

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Adomas Varkalys

Kliūčių roboto kelyje analizė Kinect jutikliu

Magistro darbas

Vadovas

prof. dr. G. Daunys

ŠIAULIAI, 2015

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas
lekt. dr. D. Balbonas

2015 06 12

Kliūčių roboto kelyje analizė Kinect jutikliu

Signalų technologijos magistro darbas

Vadovas

2015 06 12

prof. dr. G. Daunys

Recenzentas

2015 06 12

doc. dr. N. Ramanauskas

Atliko

2015 06 12

RM-13 gr. stud.
A. Varkalys

ŠIAULIAI, 2015

Varkalys A. Analysis of Obstacles on Robot Path by Kinect Sensor: Master thesis in signal processing / research advisor professor G. Daunys; Šiauliai University, Technological and Natural Sciences Faculty, Electronics and Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2015. – 73 p.

SUMMARY

In recent years 3D mapping of environments has received more and more attention in robotic community for autonomous robot navigation. Potential applications require the modeling system to be mounted on a mobile robot and construct objects or scenes autonomously. One of the solutions is to use a single Kinect sensor.

The aim of the thesis is to evaluate Kinect sensor's potentiality to use this sensor for different height robots. It was to choose five robots heights: 100 mm, 300 mm, 600 mm, 1000 mm and 1500 mm. For each height determined tilting angle of Kinect sensor and minimum distance to the obstacle is detected. Obstacle pulled from the sensor by 100 mm step. Begin to pull from determined minimum distance to 3700 mm. Also developed methodology, which evaluates filling of depth image. In depth image are calculated the values of zero.

The results of research show that average of filling of depth image is 96 % when robots heights are higher then 300 mm. When robots heights are 100 mm average of filling of depth image is only 54 %. The dimensions of the obstacle are 130x130 mm. The distance to the obstacle is between 600 mm and 4200 mm The maximum value of obstacle height measurement uncertainty is 6,3 mm. Maximum value of obstacle width measurement uncertainty is 5,9 mm. Maximum value of distance to the obstacle measurement uncertainty is 150 mm. Humanoid robots have lower standard deviation of obstacle height measurement uncertainty (~2 mm) than lower robots (2-3 mm). Standard deviation of obstacle width measurement uncertainty is ~2 mm. Standard deviation of distance to the obstacle measurement uncertainty increases when increasing the height of the robot, except where the height of robot is 1000 mm. Standard deviation of distance to the obstacle measurement uncertainty is between 19 mm and 53 mm.

TURINYS

TURINYS.....	4
PRIEDAI	6
LENTELĖS	7
PAVEIKSLAI.....	8
1. Kinect jutiklis: veikimo principai ir panaudojamumas robotikoje	12
1.1. Kinect jutiklis.....	12
1.2. Optiniai matavimo metodai	14
1.2.1. Pasyvusis optinis atstumo matavimo metodas	14
1.2.2. Aktyvusis optinis atstumo matavimo metodas	16
1.3. Gylio vaizdo fiksavimas Kinect jutikliu	17
1.4. Kinect jutiklio išvestys.....	19
1.4.1. Gylio skiriamoji geba	20
1.4.2. Poslinkis tarp infraraudonųjų spindulių vaizdo ir gylio vaizdo.....	21
1.4.3. „Skylės“ gylio vaizduose.....	22
1.5. Kinect geometrinis modelis	22
1.6. Kinect jutiklio kalibracija	24
1.7. Robotai ir kompiuterinė rega	29
2. TYRIMO METODIKA	33
2.1. Programinė įranga.....	33
2.1.1. Programinės įrangos pasirinkimas.....	33
2.1.2. Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankis	34
2.2. Tyrimo koncepcija.....	37
2.2.1. Tyrimo rezultatų registravimas.....	37
2.2.2. Robotų aukščio ir minimalaus kampo parinkimas	39
2.2.3. Gylio vaizdo užpildymo matavimas	42
2.2.4. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimas	43
2.2.5. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo algoritmas	45
3. TYRIMO REZULTATAI	47
3.1. Gylio vaizdo užpildymo matavimo rezultatai	47
3.1.1. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=100 mm	47
3.1.2. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=300 mm	49
3.1.3. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=600 mm	50
3.1.4. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=1000 mm	52
3.1.5. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=1500 mm	53

3.1.7. Gylio vaizdo užpildymo palyginimas skirtingo aukščio robotams	54
3.2. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis	55
3.2.1. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=100$ mm.....	57
3.2.2. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=300$ mm.....	58
3.2.3. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=600$ mm.....	60
3.2.4. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=1000$ mm.....	61
3.2.5. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=1500$ mm.....	62
3.3. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžties dispersinė analizė.....	64
3.3.1. Aukščio h_k matavimo neapibrėžties dispersinė analizė	64
3.3.2. Pločio w matavimo neapibrėžties dispersinė analizė	65
3.3.3. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžties dispersinė analizė	66
3.4. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis....	67
IŠVADOS.....	69
LITERATŪRA	70

PRIEDAI

1 priedas. Minimalaus atstumo d ir gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α ir aukščio H lentelės.....	74
--	----

LENTELĖS

1.1. IR vaizdo pikselių pozicijų postūmis [34].....	21
1.2. Vidiniai RGB kameros parametrai [34].....	26
1.3. Vidiniai IR kameros parametrai [34].....	26
2.1. X matrica.....	38
2.2. Y matrica.....	38
2.3. Minimalus atstumo lentelė, kai aukštis $H=100$ mm.....	40
2.4. Minimalaus kampo parinkimas.....	42
3.1. Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=100$ mm.....	57
3.2. Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=300$ mm.....	58
3.3. Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=600$ mm.....	60
3.4. Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=1000$ mm.....	61
3.5. Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=1500$ mm.....	63

PAVEIKSLAI

1.1 pav. Kinect jutiklis [46].....	12
1.2 pav. Kinect jutiklio sudedamosios dalys: IR siųstuvas, RGB kamera, IR gylio jutiklis [7].....	13
1.3 pav. Nekontaktinių atstumo matavimo metodų skirstymas [10].....	14
1.4 pav. Pasyviosios trianguliacijos sistema [10].....	15
1.5 pav. Aktyviosios trianguliacijos sistema [10].....	17
1.6 pav. PS1080 SoC veikimo principai [43].....	18
1.7 pav. Kinect IR kamera fiksuojami IR projektoriaus projektuojami rašto taškai [6].....	19
1.8 pav. Kinect įrenginio invertuoto gylio priklausomybė nuo matuojamo atstumo [34, 38].....	20
1.9 pav. Kinect jutiklio gylio skiriamosios gebos žingsnis. Dešinėje 0-5 metrų atstumas. Kairėje 0-15 metrų atstumas [34, 38].....	20
1.10 pav. IR (juodas) ir gylio (baltos kraštinės) vaizdų poslinkis (kairėje). IR ir gylio vaizdų pozicija po išlyginimo (dešinėje) [34].....	21
1.11 pav. Kinect jutikliu gautas gylio vaizdas. Šviesesnės sritys yra toliau, o tamsesnės arčiau [41].....	22
1.12 pav. Kinect jutiklio geometrinis modelis [34].....	23
1.13 pav. Kinect jutiklio RGB kameros radialiniai iškreipymai [34].....	25
1.14 pav. Kinect jutiklio RGB kameros tangentiniai iškreipymai [34].....	25
1.15 pav. Kinect jutiklio IR kameros radialiniai iškreipymai [34].....	25
1.16 pav. Kinect jutiklio IR kameros tangentiniai iškreipymai [34].....	26
1.17 pav. Kinect jutiklio, sudaryto iš RGB ir IR kamerų, užfiksuotos kalibravimo objekto (šachmatų lentos) pozicijos [34].....	27
1.18 pav. Kairėje pateiktas IR kameros fiksuojamas vaizdas, kada šachmatų lenta yra apšviečiama IR spinduliais. Dešinėje pateiktas IR kameros fiksuojamas vaizdas, kada šachmatų lenta apšviečiama halogenine šviesa [34].....	28
1.19 pav. Kinect matavimo neapibrėžtumas priklausomai nuo matuojamo gylio [11].....	29
2.1 pav. Programos langas. Programa teikia gylio vaizdą ir gali keisti Kinect jutiklio korpuso kampinę padėtį pagrindo atžvilgiu programos veikimo metu. Programa parašyta Microsoft Visual Studio 2012.....	32
2.2 pav. Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankio blokai.....	34
2.3 pav. Projekcinių koordinačių sistema [33].....	35
2.4 pav. Realių koordinačių sistema [33].....	36

2.5 pav. Tyrimo rezultatų registravimo schema.....	37
2.6 pav. Kinect jutiklio apžvalgos zona.....	40
2.7 pav. Kliūties matavimo schema.....	44
2.8 pav. Kliūties matuojamieji taškai.....	44
2.9 pav. Matavimo taškų žymėjimas gylio vaizde.....	45
2.10 pav. Atstumo iki kliūties įvertinimo schema [3].....	45
2.11 pav. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo algoritmas.....	46
3.1 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=100$ mm.....	48
3.2 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=100$ mm, o $\alpha=-27^\circ$	48
3.3 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=100$ mm, o $\alpha=0^\circ$	49
3.4 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=300$ mm.....	50
3.5 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=300$ mm, o $\alpha=-20^\circ$	50
3.6 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=600$ mm.....	51
3.7 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=600$ mm, o $\alpha=-27^\circ$	51
3.8 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=1000$ mm.....	52
3.9 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=1000$ mm, o $\alpha=-27^\circ$	52
3.10 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=1500$ mm.....	53
3.11 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=1500$ mm, o $\alpha=-27^\circ$	53
3.12 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α	54
3.13 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α (be aukščio $H=100$ mm).....	55
3.14 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=100$ mm.....	57
3.15 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=100$ mm.....	58
3.16 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=300$ mm.....	59
3.17 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=300$ mm.....	59
3.18 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=600$ mm.....	60
3.19 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=600$ mm.....	61

3.20 pav. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1000$ mm.....	62
3.21 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1000$ mm.....	62
3.22 pav. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1500$ mm.....	63
3.23 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtis, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1500$ mm.....	64
3.24 pav. Aukščio h_k matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį.....	65
3.25 pav. Pločio w matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį.....	65
3.26 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį.....	67
3.27 pav. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai.....	68
3.28 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai.....	68

IŽANGA

Šių dienų robotai tampa vis sudėtingesni ir labiau palaikantys ryšį su aplinka. Pastarajam ryšiui palaikyti naudojami įvairūs jutikliai, kurie perduoda informaciją roboto apdorojimo sistemai apie atstumus iki statinių ir dinaminių kliūčių, nusako roboto padėtį ir vietą. Tam naudojami įvairūs metodai: infraraudonieji spinduliai, ultragarsas, lazeriai bei kompiuterinė rega. Paskutinis metodas dabar labiausiai plėtojamas ir naudojamas robotikoje, kadangi gaunami paprastesni ir efektyvesni įeinančios informacijos apdorojimo algoritmai. Vienas iš būdų pritaikyti kompiuterinę regą robotui yra pasinaudoti jau sukurtais produktais - Microsoft Kinect jutikliu. Šis prietaisas tinkamas daugeliui užduočių, susijusių su vaizdų apdorojimu, kompiuterine rega, įgyvendinti. Kinect jutiklis išsiskiria ne tik paprastu informacijos apie supančią aplinką perdavimu į valdymo sistemą, bet ir pigia kaina. Žinoma, tikslumu šis prietaisas neprilygsta laiko skydžio kameroms, tačiau yra atlikta įvairiausių tyrimų, kurie teigia, kad Kinect jutiklio metrologinės savybės gana geros. Šio tyrimo tikslas įvertinti Kinect jutiklio tinkamumą kliūčių aptikimui įvairaus tipo robotams, kurie skiriasi aukščiu. Vieni robotai turi būti kuo žemesni, kiti, pavyzdžiui humanoidai, - žmogaus ūgio. Keičiantis aukščiu, keičiasi ir Kinect jutiklio apžvalgos zona. Nuo to priklauso, kaip tiksliai jutiklis įvertina kliūtį. Šiam tikslui įgyvendinti iškeliami uždaviniai:

- Apžvelgti literatūrą, kuri analizuoja gylio vaizdo technologijas, Kinect veikimo principus ir jo panaudojamumą robotikoje.
- Sukurti eksperimento metodiką, kuri įvertintų Kinect jutiklio teikiamo gylio vaizdo tinkamumą kliūčių aptikimui.
- Nustatyti kliūties aukščio, pločio ir atstumo iki jos matavimo neapibrėžtis, matavimo neapibrėžties standartinius nuokrypius.

Šio tyrimo rezultatai gali būti panaudoti renkantis roboto regos sistemą.

1. Kinect jutiklis: veikimo principai ir panaudojamumas robotikoje

1.1. Kinect jutiklis

Microsoft kompanija 2010 m. lapkričio 4 dieną Šiaurės Amerikoje pristatė Kinect jutiklį. Po savaitės įrenginys pristatytas Europoje, o vėliau ir visame pasaulyje. Iš pradžių šis jutiklis buvo pardavinėjamas kaip XBOX 360 konsolių įvesties periferija žaidėjų judesiams aptikti. Tačiau šis jutiklis domino ne tik žaidimų mėgėjus, bet ir įvairios srities specialistus, kurie pastebėjo ganėtinai pigaus įrenginio (maždaug 150 eurų vertės) galimybes pritaikant jį įvairiausioms užduotims vykdyti. Microsoft kompanija 2012 m. vasario 1 d. pristatė Kinect jutiklio versiją asmeniniams kompiuteriams. Kinect jutiklis pasižymėjo kaip vienas labiausiai perkamų produktų istorijoje, kadangi per pirmuosius du metus nupirkta 24 milijonai įrenginių. Kinect jutiklio programinės įrangos technologija plėtojama Rare, o jutiklio technologiškai pagrindą sudaro gylio kameros technologija, kuri yra plėtojama PrimeSense - Izraelio kompanija (Microsoft iš esmės nupirko šią technologiją). Nors pastaroji technologija nėra atvira, tačiau jos veikimo principai nustatyti atgalinės inžinerijos metodais. PrimeSense technologija remiasi struktūrizuotos šviesos principais [6, 7, 15, 46].



1.1 pav. Kinect jutiklis [46]

Kinect jutiklį sudaro pailgas stačiakampio formos korpusas, kuris yra pritvirtintas prie stabilaus pagrindo 1.1 pav.

Kinect jutiklio vaizdas be korpuso pateiktas 1.2 pav. Kinect jutiklio pagrindinės dalys yra RGB kamera, kuri yra MT9M112 arba MT9v112, IR (gylio) kamera - MT9M001. Kinect taip pat turi akselerometrą KXSD9, USB audio sąsają TAS1020B ir USB HUB uPD720114 [7].

Kaip IR (infraraudonųjų spindulių) projektorius naudojamas 830 nm lazerinis diodas. Apšvietimo galia siekia 60 mW, o išėjimas yra pastovus – moduliacija nenaudojama [7].

IR (gylio) kamerą sudaro monochromatinis vaizdo jutiklis, kurio skiriamoji geba siekia 640x480 pikselių, kuomet kadrų dažnis yra 30 Hz. Gylgio kamera turi IR spindulių filtrą, o ji yra valdoma per I2C sąsają [7].

Kinect jutiklis taip pat turi mikrofonų masyvą, kuris ne tik priima garsą, tačiau ir nustato garso šaltinio vietą. Pavyzdžiui, jei vienas iš kelių žaidėjų pateikia jutikliui komandą balsu, tai jutiklis nustato, kuris žaidėjas jas pateikė [6].

Kinect jutiklis gali keisti savo korpuso kampinę poziciją pagrindo, ant kurio jis pastatytas, atžvilgiu, kadangi jame yra įdiegtas variklis su pavara. Kinect jutiklis gali keisti savo poziciją laipsnio tikslumu iki 27° tiek aukštyn, tiek žemyn. Microsoft įdiegė šį variklį, kad jutiklis galėtų tiksliai ir sklandžiai veikti įvairiose patalpose nepriklausomai nuo jų dydžio, jose esančių baldų bei nuo įvairių žaidėjų pozicijų.

Tačiau šis privalumas turi ir trūkumų. Pirmiausiai dėl to padidėja jutiklio svoris ir matmenys, o variklio valdymui reikalingi papildomi galios laidai [7, 46].

Kinect jutiklio gylio kamerą ir IR projektorių valdo PS1080 SoC (system on chip, liet. sistema luste), kuris ir sudaro Kinect jutiklio technologinį pagrindą [5, 7, 43].

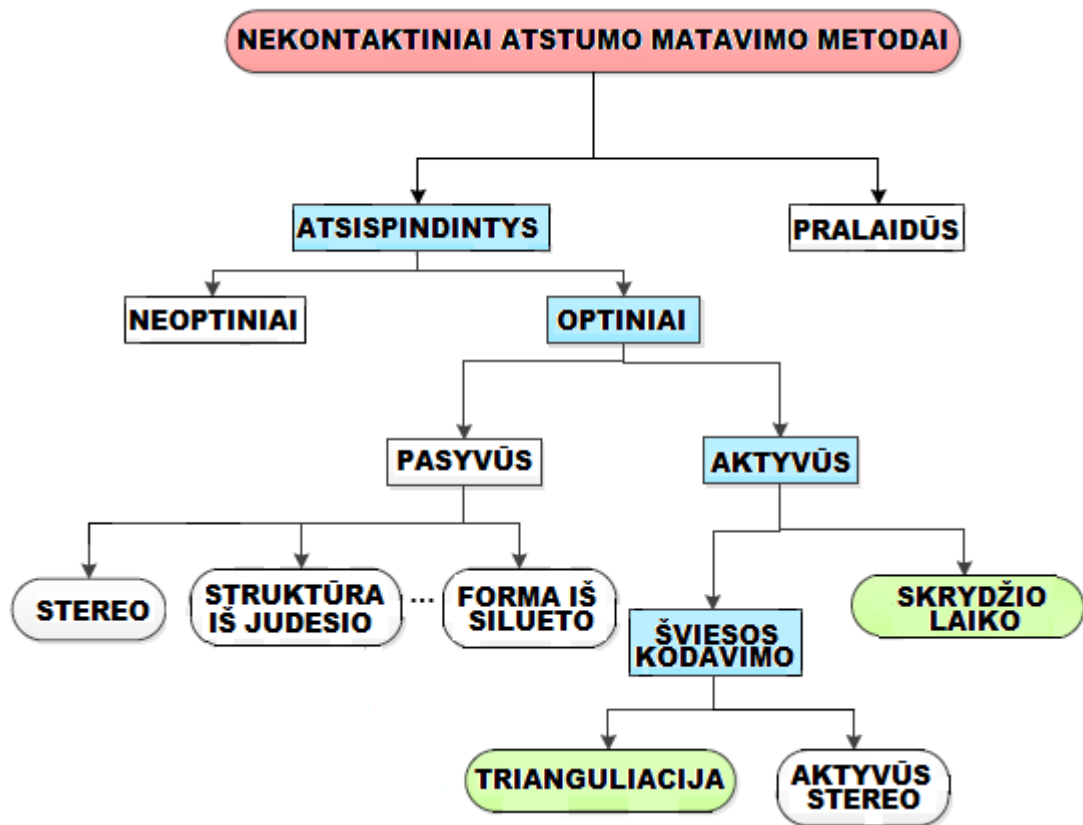


1.2 pav. Kinect jutiklio sudedamosios dalys: IR siūstuvus, RGB kamera, IR gylio jutiklis [7]

RGB vaizdo srautas naudoja 8 bitų VGA rezoliucija su „Bayer“ spalvų filtru. Gylio vaizdo srautas taip pat yra VGA rezoliucijos su 11 bitų gyliu, kuris leidžia perduoti 2048 jautrio lygius. Kinect jutiklis vienu metu yra pajėgus sekti iki šešių žmonių, esančių 6 m^2 plote [38]. Kinect jutiklis pritaikytas veikti tik patalpose, tačiau jų apšvietimas gali kisti nuo visiškai tamsos iki ryškaus apšvietimo [40].

Pagrindiniai Kinect jutiklio konkurentai yra The PrimeSensor Reference Design ir Asus Xtion jutikliai. Šių jutiklių technologinį pagrindą sudaro tas pats PS1080 SoC iš PrimeSense. Iš šių trijų jutiklių populiariausias yra Kinect, todėl jis pasižymi geresnėmis tvarkyklėmis, didesniu pritaikomumu. Asus Xtion jutiklis nėra toks populiarus, tačiau jis pasižymi ne ką prastesnėmis metrologinėmis savybėmis [15] ir gali būti taikomas toms pačioms užduotims spręsti.

Kinect jutiklis priklauso nekontaktinių atstumo matavimo metodų grupei. Nekontaktinių atstumo matavimo metodų skirstymas pateiktas 1.3 pav. Remiantis šiuo skirstymu nekontaktiniai matavimo metodai skirstomi į atspindinčius ir pralaidžius. Atspindintys metodai skirstomi į optinius ir neoptinius. Optiniai metodai skirstomi į pasyvius, kurio geriausias pavyzdys yra stereoregos sistemos, ir aktyvius, kurie skirstomi į šviesos kodavimo ir skrydžio laiko (angl. Time-of-flight). Kinect jutiklio veikimo principas remiasi aktyviaisiais optiniais metodais. Geresniam Kinect jutiklio veikimo principo supratimui, reikia suprasti pasyvių ir aktyvių metodų skirtumus [10].



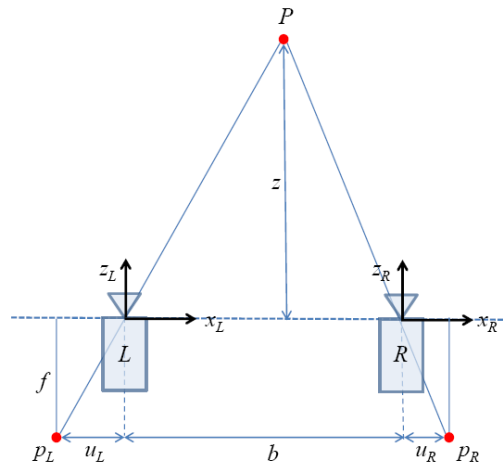
1.3 pav. Nekontaktinių atstumo matavimo metodų skirstymas [10]

1.2. Optiniai matavimo metodai

1.2.1. Pasyvusis optinis atstumo matavimo metodas

Tipiškiausias pasyvaus optinio atstumo matavimo metodo pavyzdys yra stereorega. Šiam matavimo būdai įgyvendinti naudojamos stereoregos sistemos. Stereoregos sistemą, kuri pateikta 1.4 pav., sudaro dvi fotokameros – kairioji L ir dešinioji D, kurios tuo pačiu laiko momentu fiksuoja tą

patį vaizdą [17]. Dažniausiai naudojamos identiškos kameros, kadangi jos turi tokius pačius šviesai jautrius elementus (angl. imaging sensors). Kameros, kurių židinio nuotolis f , išdėstytos vienoje optinėje ašyje, o tarp jų koordinatinių sistemų pradžios taškų yra atstumas b . Erdvės taškas P , kurio koordinatės yra $P=[x,y,z]^T$, stereoregos sistemos yra atitinkamai projektuojamas į L ir R kamerų pikselius p_L ir p_R . Pikselis p_L turi dvimates koordinatas $[u_L, v_L]^T$, o pikselis p_R – $[u_R, v_R]^T$. Erdvės taškas P bei pikseliai p_L ir p_R sudaro trikampį, kurio viršūnės yra P , p_L ir p_R . Viršūnių taškai p_L ir p_R turi tas pačias vertikalias koordinatas, o skirtumas tarp jų horizontalių koordinatinių $d=u_L-u_R$, vadinamas disparitiškumu (angl. disparity). Remiantis trianguliacijos sąryšiais [18, 36] minėtam trikampiui pagal (1.1) formulę gaunama, kad disparitiškumas d yra atvirkščiai proporcingas erdvės taško P gyliui z .



1.4 pav. Pasyviosios trianguliacijos sistema [10]

$$z = \frac{b|f|}{d} \quad (1.1)$$

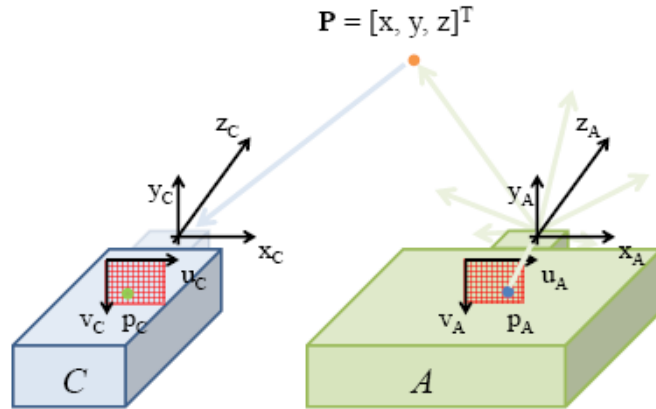
Pikseliai p_L ir p_R yra vadinami sujungtiniais (angl. conjugate). Turint dvimates pikselio p_L ir gylio z , gauto iš (1.1) formules, atitinkamos erdvės taško P koordinatės apskaičiuojamos pagal (1.2) formulę, kur K_L^{-1} yra kameros L atvirkštinė ištaisyta vidinių parametrų matrica. Norint surasti erdvės taško P koordinatės $[x,y,z]^T$, remiantis (1.1) ir (1.2) formulėmis, reikia turėti abiejų stereo vaizdų vieną porą sujungtinių pikselių p_L ir p_R . Toks koordinatinių radimas vadinamas trianguliacija (angl. triangulation).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = K_L^{-1} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} z \quad (1.2)$$

Dėl okliuzijos sujungtinių pikselių pora gali apskritai neegzistuoti. Tačiau net ir egzistuojančių porų tarp dviejų stereovaizdų radimas yra sudėtingas procesas, kuris įvardinamas kaip atitikimo uždavinys (angl. coorespondence problem). Šis uždavinys sukelia daug sunkumų stereoregos algoritmuose, todėl jam spręsti yra kuriami įvairūs metodai [17]. Pastarieji yra skirstomi į vietinius ir globalius. Vienas iš žinomesnių vietinių metodų yra „Viskas pagal nugalėtoją“ (angl. Winner Takes All). Naudojant šį metodą, pasirenkami tie sujungtiniai taškai, kuriuos supančios sritys bei jie patys yra labiausiai panašūs. Globalūs metodai, priešingai nei vietiniai metodai, įvertina visas disparitiškumo vertes iškart, o ne atsižvelgia į kiekvieną porą atskirai. Dažniausiai šie metodai remiasi Bajeso formuluotėmis.

1.2.2. Aktyvusis optinis atstumo matavimo metodas

Specifiniai stereoregos algoritmai palengvina atitikimo uždavinio sprendimą, tačiau atkūrimo kokybė priklauso nuo vaizdo charakteristikų. Jeigu vaizdas bus vienspalvis, tai tokiu atveju neišeitų apskaičiuoti gylio, kadangi nebūtų įmanoma surasti tinkamų porų sujungtinių pikselių [40]. Tokiu atveju naudojama aktyvioji trianguliacija. Tai vienas iš būdų rasti gylį vienspalviame vaizde. Aktyviosios trianguliacijos sistemoje viena iš kamerų yra pakeičiama projektoriumi. Tokia sistema pateikta 1.5 pav. Šią sistemą sudaro fotokamera C, kuri turi trimatę koordinačių sistemą $[x_C, y_C, z_C]$ bei dvimatę $[u_C, v_C]$ ir projektorius A, kuris atitinkamai turi trimatę koordinačių sistemą $[x_A, y_A, z_A]$ bei dvimatę $[u_A, v_A]$. Šiuo atveju dvimatės pikselio p_A koordinatės $[u_A, v_A]$, pasinaudojant šviesos raštu, projektuojamos į erdvės tašką P, kurio koordinatės $[x, y, z]^T$. Jei taškas P neabsorbuoja visos šviesos rašto formuojamos energijos bei tarp minėto erdvės taško ir projektoriaus nėra kliūtis, tuomet nuo taško P atspindėtas šviesos spindulys patenka į fotokameros C pikselį p_C . Tokiu būdu sudaromas trikampis, kurio viršūnės koordinatės p_A , P ir p_C yra žinomos. Todėl aktyviosios trianguliacijos metu supaprastėja gylio z skaičiavimas, kadangi nereikia ieškoti sujungtinių pikselių poros. Jeigu aktyvioji trianguliacijos sistema yra tinkamai sukalibruota, tai pikselis p_C turi koordinates $p_C=[u_C=u_A+d, v_C=v_A]$ [10, 15].



1.5 pav. Aktyviosios trianguliacijos sistema [10]

Priešingai nei stereoregos atveju, naudojant aktyviają trianguliaciją surandami sujungtiniai pikseliai vienspalviame vaizde. Aktyviosios trianguliacijos metu projektoriaus P pikselis p_A pažymi savo švytėjimo galia erdvės tašką P, nuo kurio atspindėjęs spindulys patenka į kameros C pikselį p_C . Tokiu būdu pikselis p_C išsiskiria iš jį supančios srities ir tampa lengvai atpažįstamu, todėl vienspalviame vaizde yra išskiriama sujungtinių pikselių pora ir vėliau apskaičiuojamas vaizdo gylis. Taigi, naudojant aktyviosios trianguliacijos sistemas, galima apskaičiuoti gylį vaizduose, kurie neturi geometrijos ar spalvos požymių [17].

Aktyvūs optiniai atstumo matavimo metodai yra lėtesni bei daug brangesni nei pasyvieji matavimo metodai, tačiau aktyvūs metodai yra daug tikslesni, patikimesni ir paprastesni [44].

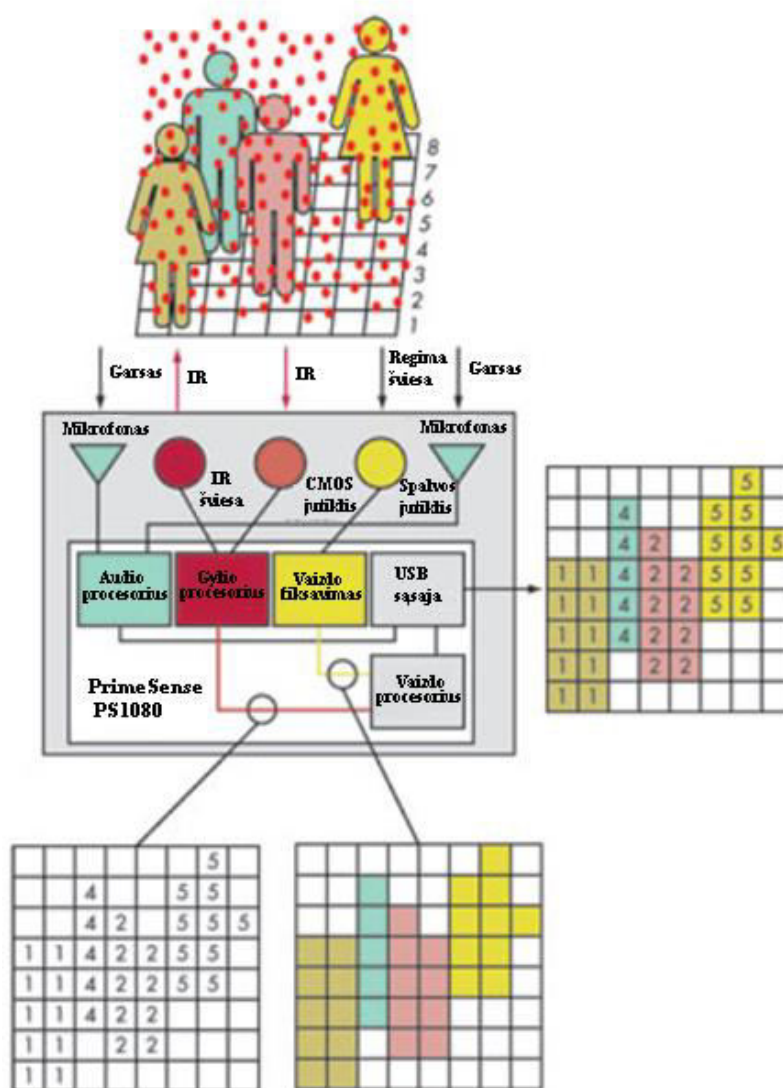
[23] šaltinyje pateikiama aktyvios trianguliacijos, kuri gali būti panaudojama robotų navigacijai ar erdviniam vaizdų atstatymui, optimalios konfigūracijos apskaičiavimo metodika. Pasinaudojant tyrime pateikta metodika, galima gauti daug tikslesnius erdvinių objektų paviršių atstatymo rezultatus.

1.3. Gylio vaizdo fiksavimas Kinect jutikliu

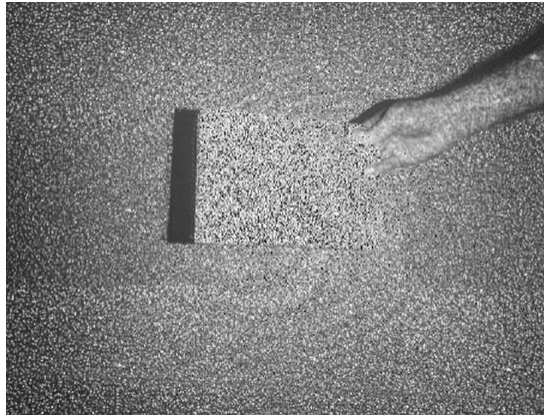
IR spindulių projektorius, valdomas gylio procesoriaus, projektuoja raštą, sudarytą iš taškų, ant objektų, esančių priešais jį. Kadangi priešais jutiklį yra keli objektai (4 žmonės) 1.6 pav., šis raštas yra iškraipomas, kadangi dalis šviesos atsispindi nuo jų. Taškai pakeičia savo dydį bei poziciją priklausomai nuo kiek toli objektai yra nuo jutiklio. Iškraipytas raštas aptinkamas įprastiniu CMOS vaizdo jutikliu su IR spindulių filtru. Atsispindėjusi IR šviesa patenka į gylio procesorių, iš kurio gylio vaizdas patenka į vaizdo procesorių. PS1080 SoC priima informaciją iš minėtojo vaizdo jutiklio ir sudaro gylio žemėlapi, kurio skiriamoji geba yra 640x480. Į vaizdo procesorių iš spalvotojo vaizdo jutiklio (RGB kameros) tiekiami spalvotojo vaizdo duomenys. Vaizdo procesorius sulygiuoja gautus

vaizdus, t. y. kad kiekvienas spalvotojo vaizdo pikselis turėtų jį atitinkančią gylio vaizdo vertę. Gylio informacija leidžia suprasti, koku atstumu nuo jutiklio yra objektas, jį identifikuoja, o spalvotoji informacija detalizuoja objektą, lengvina objektų atpažinimą [5, 19, 43].

Kinect jutiklio projektoriaus projektuojami IR spindulių rašto taškai pateikti 1.7 pav. Šis vaizdas gautas Kinect jutiklio IR kamera. Šie taškai ties nešiojamuoju kompiuteriu, kuris yra arčiau jutiklio nei siena, yra pastumiami į priekį bei nukreipiami į šoną. Bet koks objektas, kuris yra arčiau nei Kinect jutiklio kalibracijos nustatytas atstumas, stums minėtus taškus iš jų pradinių pozicijų į kitas kryptis. Kinect jutiklis saugo atmintyje šių taškų pradines sklidimo kryptis, o priimdamas išsklaidytas kryptis, jis apskaičiuoja, koks yra atstumas tarp jo ir objektų [6].



1.6 pav. PS1080 SoC veikimo principai [43]

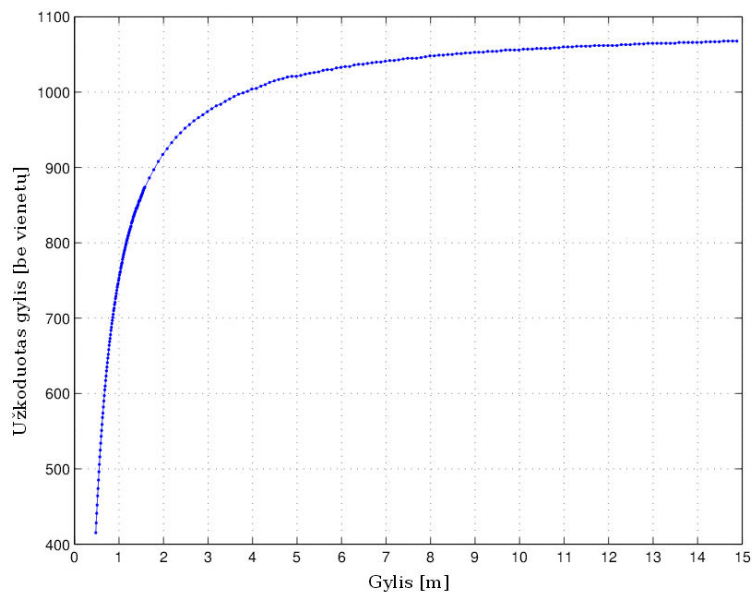


1.7 pav. Kinect IR kamera fiksuojami IR projektoriaus projektuojami rašto taškai [6]

1.4. Kinect jutiklio išvestys

Kinect įrenginys fiksuoja vaizdą RGB ir gylio kameromis. Pastaroji susideda iš infraraudonųjų spindulių rašto projektoriaus ir juos priimančios infraraudonųjų spindulių kameros. Minėti komponentai naudojami erdvės taškų trianguliacijai atlikti. RGB kamera panaudojama vaizdo turiniui atpažinti bei struktūrizuoja trimačius taškus. Kinect įrenginys pateikia trijų rūšių vaizdus: infraraudonųjų spindulių vaizdą, RGB vaizdą, gylio vaizdą.

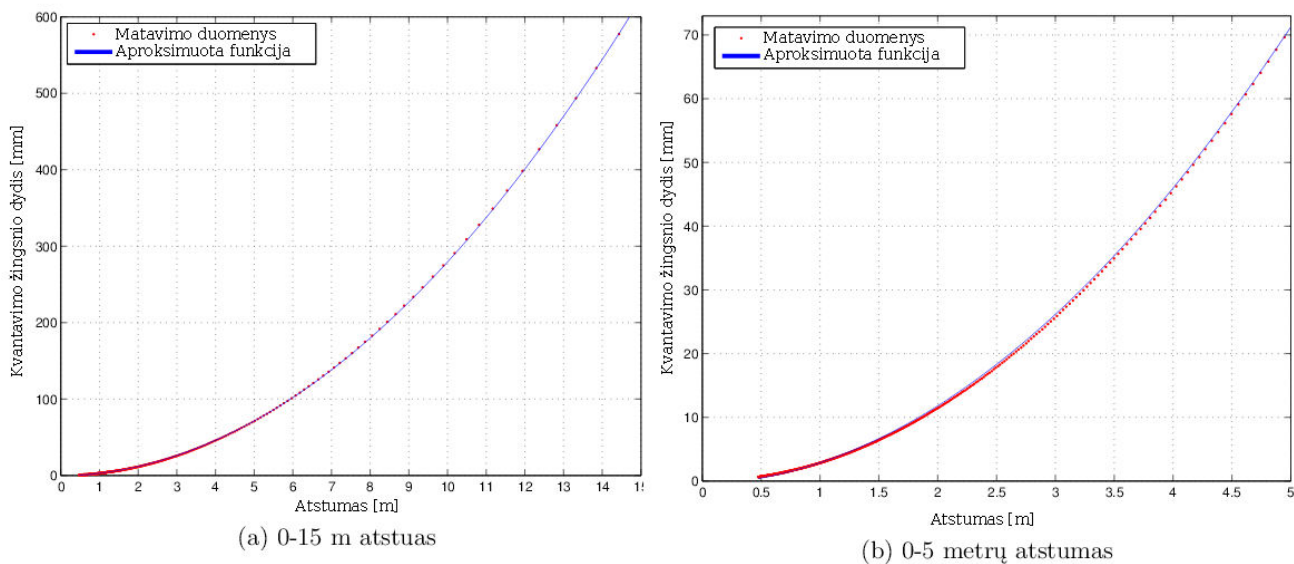
- **Infraraudonųjų spindulių vaizdas.** Infraraudonųjų spindulių (640x480 pikselių 57x45 apžvalgos laipsnių, 6,1 mm židinio nuotolis, 5,2 μm pikselio dydis) kamera naudojama infraraudonųjų spindulių rašto gavimui ir dekodavimui 3D scenos trianguliacijos metu. Esant uždengtam IR projektoriui, ją galima sukalibruoti naudojant šachmatų tikrinamąją lentelę ir įprastą RGB kameros kalibravimo procedūrą.
- **RGB vaizdas.** RGB kamera (640x480 pikselių, 63x50 apžvalgos laipsnių, 2,9 mm židinio nuotolis, 2,8 μm pikselio dydis) teikia vidutinės kokybės spalvotą vaizdą. Ją galima sukalibruoti naudojant šachmatų tikrinamąją lentelę ir įprastą RGB kameros kalibravimo procedūrą [38].
- **Gylio vaizdas.** Pagrindiniai, svarbiausi žemo lygio Kinect išvesties duomenys yra vaizdas, atitinkantis scenos gylį. Kinect grąžinamas gylio vaizdas yra susietas su tikroju gyliu atvirkštine priklausomybe 1.8 pav.



1.8 pav. Kinect įrenginio invertuoto gylio priklausomybė nuo matuojamo atstumo [34, 38]

1.4.1. Gylio skiriamoji geba

1.9 pav. pateikta gylio skiriamosios gebos priklausomybė nuo atstumo. Ši priklausomybė gauta eksperimentiniu būdu - keičiant atstumą (0,5 m-15 m) tarp Kinect įrenginio ir sienos. Eksperimento metu buvo fiksuojamos visos grąžinamos vertės apytiksliai 5 laipsnių vaizdo lauku aplink vaizdo centrą.



1.9 pav. Kinect jutiklio gylio skiriamosios gebos žingsnis. Dešinėje 0-5 metrų atstumas. Kairėje 0-15 metrų atstumas [34, 38]

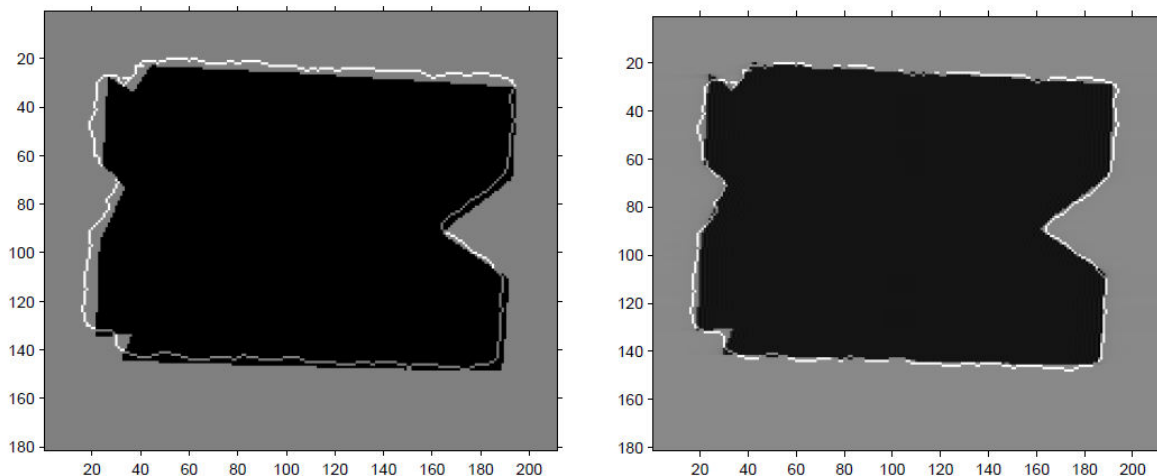
Kvantavimo žingsnis q (matuojamas milimetrais), kuris išreiškia atstumą tarp dviejų nuoseklių verčių, apskaičiuojamas pagal (1.3) formulę, kur z - gylis, matuojamas metrais

$$q(z) = 2,73z^2 + 0,74z - 0,58 \quad (1.3)$$

1.4.2. Poslinkis tarp infraraudonųjų spindulių vaizdo ir gylio vaizdo

Eksperimentų metu [34] nustatyta, kad IR vaizdas ir gylio vaizdas yra paslinkti vienas kito atžvilgiu. Norint apskaičiuoti poslinkį $[u_0, v_0]^T$, reikia užfiksuoti kelis skirtingus taikinius infraraudonųjų spindulių ir gylio vaizduose. 1.10 pav. pateiktas tamsesnis taikinyš buvo padalintas į dalis ir paslinktas į geriausias apskaičiuotas pozicijas, kad būtų gautas geriausias išlyginimas.

Kelių eksperimentų rezultatai su skirtingų formų taikiniaus pateikti 1.1 lentelėje. Poslinkis įvertinamas kaip vidurkio vertė visų darytų eksperimentų. Gylio apskaičiavimo procese geriausiai naudoti yra 7x7 pikselio dydžio koreliacijos langą [34].



1.10 pav. IR (juodas) ir gylio (baltos kraštinės) vaizdų poslinkis (kairėje). IR ir gylio vaizdų pozicija po išlyginimo (dešinėje) [34]

1.1 lentelė

IR vaizdo pikselių pozicijų postūmis [34]

Vaizdas	1	2	3	4	Vidurkis
u_0	2,8	2,9	3,0	3,4	3,0
v_0	3,0	2,7	2,8	3,1	2,9

1.4.3. „Skylės“ gylio vaizduose

Kitas artefaktas pasireiškiantis gylio vaizduose yra „skylės“. Tai didelės juodos sritys gylio vaizde 1.11 pav. Šios sritys rodo, kad toje zonoje vaizdo gylis nėra nustatomas ir pažymimos kaip nulinės vertės (nulinio gylio). „Skylės“ atsiranda dėl to, kad:

- objektai yra per toli arba per arti jutiklio;
- dėl objekto formos;
- dėl objekto struktūros.

Dėl šių sričių gylio vaizduose pasireiškia fiksuojamų objektų kraštų nelygumas. Šiuos artefaktus pasiūlyta taisyti [41]. Jame naudojama multirezoliucinė anizotropinė difuzija (angl. multi-resolution anisotropic diffusion) paremti algoritmai, kurie skirti gylio vaizdo kokybei gerinti.



1.11 pav. Kinect jutikliu gautas gylio vaizdas. Šviesesnės sritys yra toliau, o tamsesnės arčiau [41]

1.5. Kinect geometrinis modelis

Kinect jutiklis yra kelių vaizdų sistema, susidedanti iš RGB, IR ir gylio kamerų. Geometrinis RGB ir IR kamerų modelis pateiktas 1.12 pav., kuris projektuoja erdvės tašką X į vaizdo tašką $[u,v]^T$ pagal (1.4) formulę, kur K - kameros kalibravimo matrica. (1.4) formulė yra išreikšta per (1.5), (1.6) ir (1.7) formules, kuriuose k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 yra iškreipimų koeficientai, C – kameros centras. Pirmasis dėmuo (1.5) formulėje išreiškia radialinius iškreipimus, o antrasis – tangentinus iškreipimus.

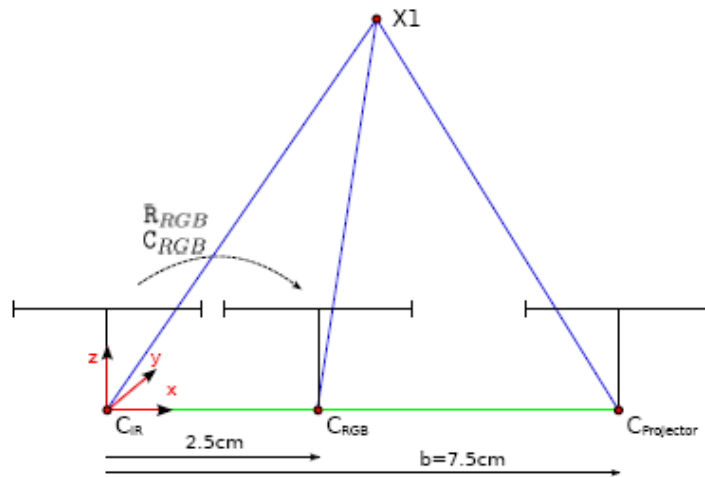
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} s \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$\begin{bmatrix} s \\ t \\ 1 \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) \begin{bmatrix} p \\ q \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_3 pq + k_4(r^2 + 2p^2) \\ 2k_4 pq + k_3(r^2 + 2q^2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$r^2 = p^2 + q^2 \quad (1.6)$$

$$\begin{bmatrix} p_z \\ q_z \\ z \end{bmatrix} = R(X - C) \quad (1.7)$$

Kinect jutiklio gylio kamera yra susieta su IR kameros geometriniais parametrais ir grąžina kiekvieno IR kameros ašies taško $[u, v]^T$ gylį d pagal (1.8) formulę, kurioje u ir v yra iš (1.4) formules, gylis iš (1.7) formules, u_0, v_0, c_0, c_1 yra modelio parametrai.



1.12 pav. Kinect jutiklio geometrinis modelis [34]

Kadangi koordinatų sistema prasideda IR kameroje, $R_{IR}=I$, o $C_{IR}=0$. Taigi erdvės taškas X_{IR} gali būti atkurtas iš gylio vaizdo duomenų x, y ir d . Taško X_{IR} projekcija į RGB vaizdą perdaroma pagal (1.10) formulę, kurioje f_{dis} yra iškreipų funkcija, pateikta (1.5) formulėje, k_{IR} ir k_{RGB} yra IR ir RGB kamerų iškreipų koeficientai, K_{IR} – IR kameros kalibravimo matrica, o $K_{RGB}, R_{RGB}, C_{RGB}$ – RGB kameros kalibravimo, posūkio ir centro matricos.

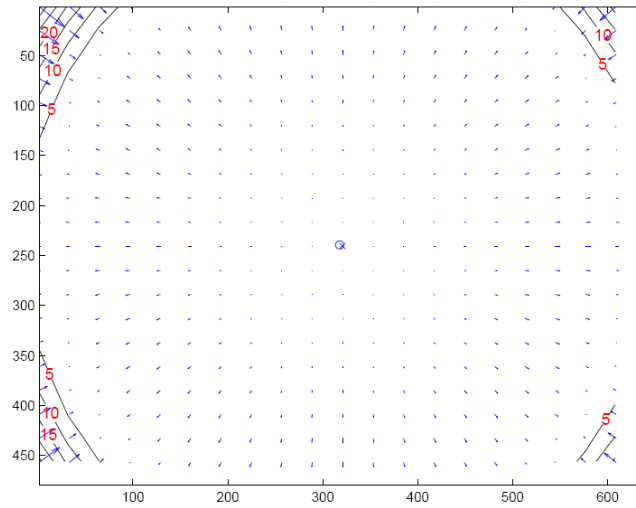
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ \frac{1}{c_1} \frac{1}{z} - \frac{c_0}{c_1} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$X_{IR} = \frac{1}{c_1 d + c_0} \text{dis}^{-1} \left(K_{IR}^{-1} \begin{bmatrix} x + u_0 \\ y + v_0 \\ 1 \end{bmatrix}, k_{IR} \right) \quad (1.9)$$

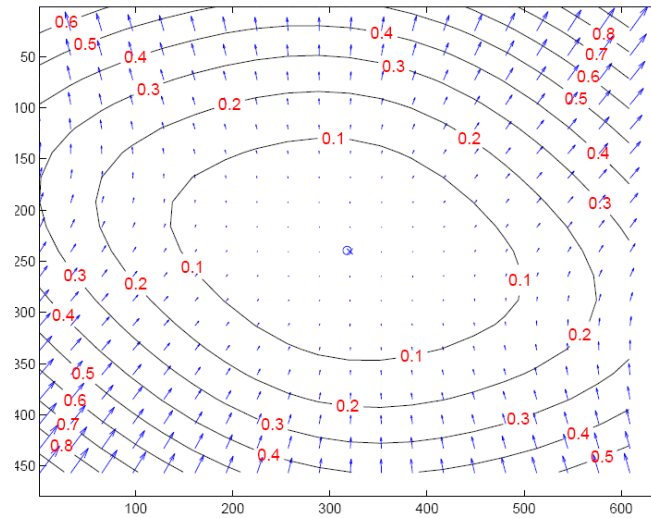
$$u_{RGB} = K_{RGB} \text{dis}(R_{RGB}(X_{IR} - C_{RGB}), k_{RGB}) \quad (1.10)$$

1.6. Kinect jutiklio kalibracija

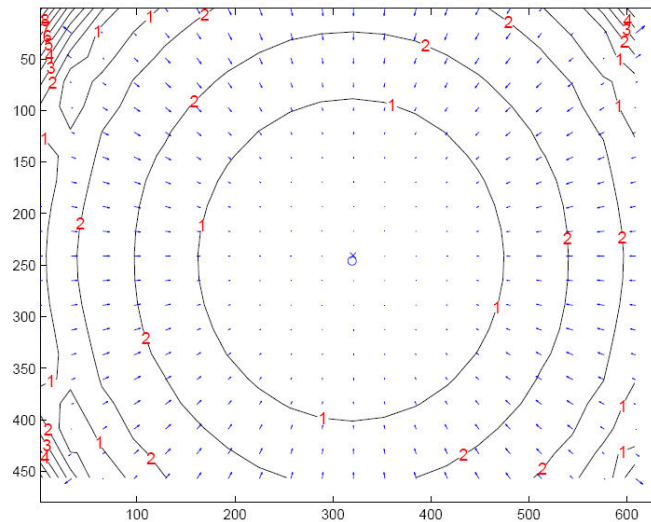
Kinect jutiklis susideda iš RGB ir IR kamerų, kurios turi radialinių ir tangentių iškraipymų. Radialinius iškraipymus sukelia kameros objektyvo lęšio formos ypatumai, o tangentių iškraipymus kameros konstrukciniai netobulumai. Kinect jutiklio RGB kameros radialiniai iškraipymai, kurie pateikti 1.13 pav., yra vaizdo kraštuose. RGB kameros tangentiniai iškraipymai pateikti 1.14 pav. Nors pastarieji yra visame vaizde, tačiau pikseliai perstumiami iki 10 kartų mažesniu atstumu. Kinect jutiklio IR kameros radialiniai iškraipymai, kurie pateikti 1.15 pav., yra arčiau vaizdo centro, tačiau vaizdo šonuose pikseliai yra perstumiami mažesniu atstumu lyginant su RGB kamera. 1.16 pav. pateikti IR kameros tangentiniai iškraipymai. Šiuo atveju pikseliai perstumiami didesniais atstumais nei RGB kameros vaizde. Vaizdų centrų pozicija nesutampa su RGB ir IR kamerų pagrindinio taško (angl. principal point) pozicija. RGB kameros pagrindinis taškas yra pasislinkęs į kairę nuo vaizdo centro (1.13 ir 1.14 pav.), o IR kameros pagrindinis taškas yra pasislinkęs į apačią nuo vaizdo centro (1.15 ir 1.16 pav.). RGB ir IR kamerų tangentiniai iškraipymai yra daug mažesni (pikseliai perstumiami nuo 5 iki 20 kartų mažiau) nei radialiniai iškraipymai.



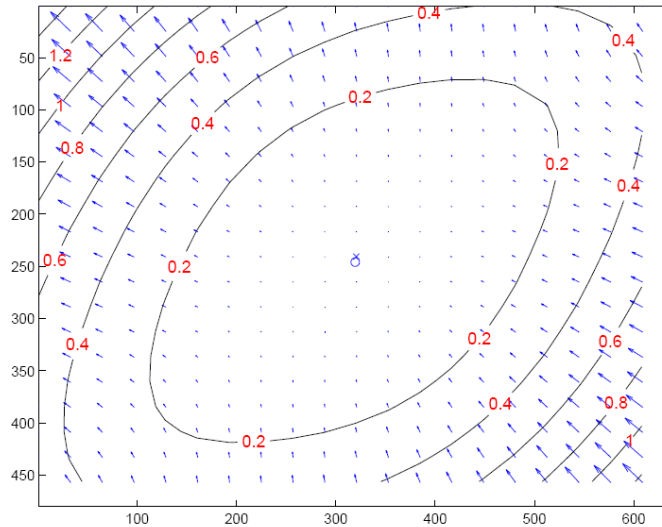
1.13 pav. Kinect jutiklio RGB kameros radialiniai iškraipymai [34]



1.14 pav. Kinect jutiklio RGB kameros tangentiniai iškraipymai [34]



1.15 pav. Kinect jutiklio IR kameros radialiniai iškraipymai [34]



1.16 pav. Kinect jutiklio IR kameros tangentiniai iškraipymai [34]

1.2 lentelėje pateikti RGB kameros vidiniai parametrai – židinio nuotolio ir pagrindinio taško pozicijos bei iškraipymų koeficientai. 1.3 lentelėje pateikti IR kameros atitinkami parametrai. Kameros vidiniai parametrai skiriasi. RGB kameros židinio nuotolis yra mažesnis nei IR kameros. Pagrindinio taško x_0 koordinatės beveik sutampa, o y_0 koordinatės skiriasi 9,1 px. RGB kameros pagrindinis taškas yra žemiau nei IR kameros.

1.2 lentelė

Vidiniai RGB kameros parametrai [34]

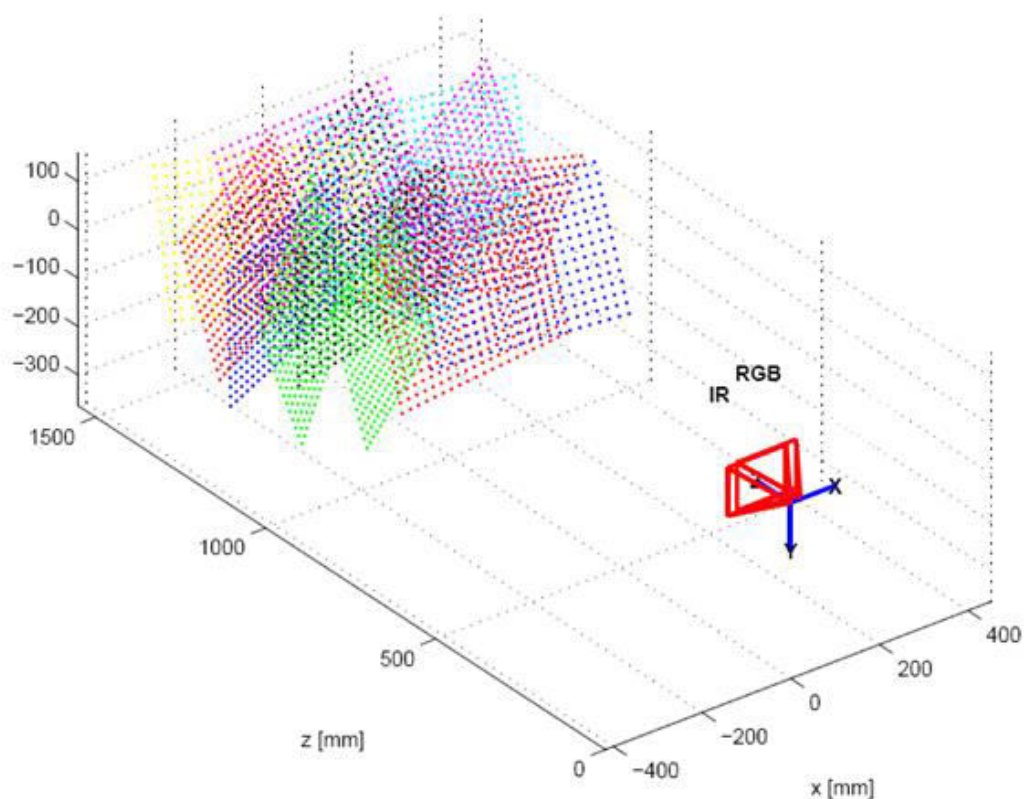
Židinio nuotolis		Pagrindinis taškas	
f	f	x_0	y_0
524 px	2,9 mm	316,7 px	238,5 px
Iškraipymų koeficientai			
k_1	k_2	k_3	k_4
0,2402	-0,6861	-0,0015	0,0003

1.3 lentelė

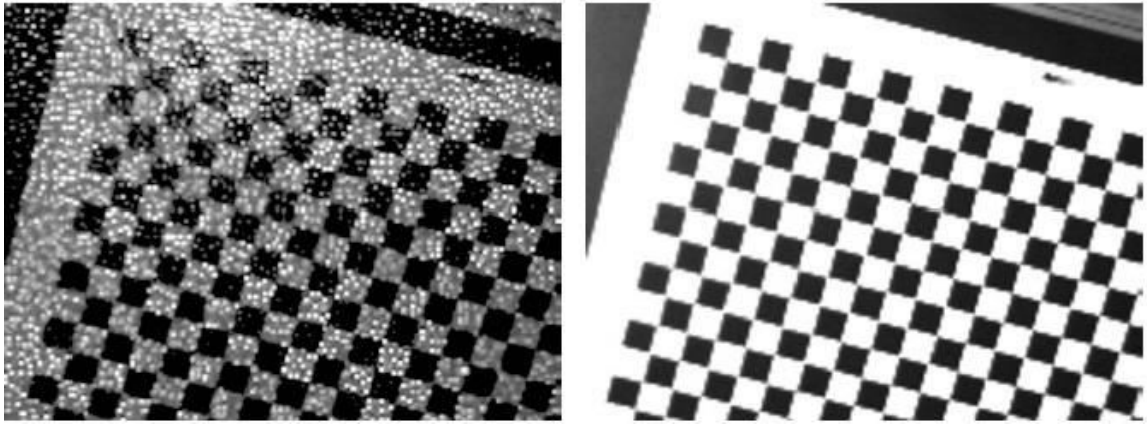
Vidiniai IR kameros parametrai [34]

Židinio nuotolis		Pagrindinis taškas	
f	f	x_0	y_0
585,6 px	6,1mm	316 px	247,6 px
Iškraipymų koeficientai			
k_1	k_2	k_3	k_4
-0,1296	0,45	-0,0005	-0,0002

Radialinių ir tangentinių iškreipimai, kurie pateikti 1.13-1.16 pav., nustatomi [34] šaltinyje atliekamos kalibracijos metu. Jos metu RGB ir IR kameros yra kalibruojamos kartu. Kalibracija atliekama fiksuojant tą patį kalibravimo objektą įvairiomis pozicijomis. Vaizdas fiksuojamas iš karto abejomis kameromis tuo pačiu laiko momentu. Kalibravimo objektas – šachmatų lenta. Šios lentos pozicijos prieš Kinect jutiklį pateiktos 1.17 pav. IR kameros koordinatių sistema laikoma globaliąja Kinect jutiklio koordinatių sistema. Taip pat šios kalibracijos metu uždengiamas IR projektorius, o šachmatų lenta apšviečiama halogenine šviesa. 1.18 pav. pateikti šachmatų lentos vaizdai, kai ji apšviečiama IR spinduliais, o kada halogenine šviesa. Apšviečiant šachmatų lentą halogenine šviesa gaunamas geresnis kalibravimo objekto apšviestumas, o tai pagerina kalibracijos rezultatus.



1.17 pav. Kinect jutiklio, sudaryto iš RGB ir IR kamerų, užfiksuotos kalibravimo objekto (šachmatų lentos) pozicijos [34]

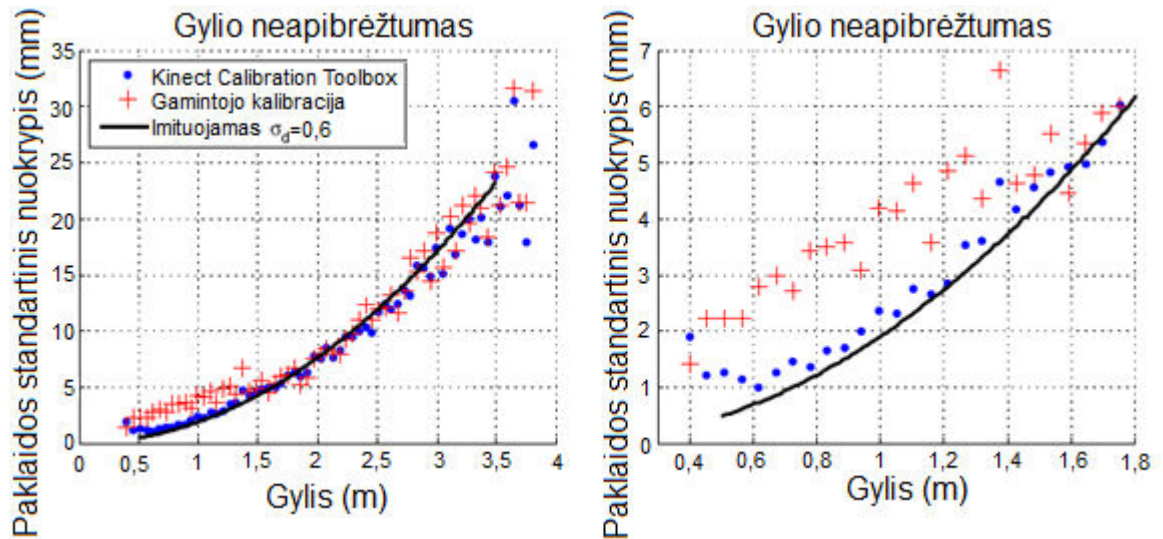


1.18 pav. Kairėje pateiktas IR kameros fiksuojamas vaizdas, kada šachmatų lenta yra apšviečiama IR spinduliais. Dešinėje pateiktas IR kameros fiksuojamas vaizdas, kada šachmatų lenta apšviečiama halogenine šviesa [34]

Tiksliam vaizdo atstatymui iš kamerų poros, vaizdo fiksavimo sistema privalo būti tinkamai sukalibruota. Kinect jutiklyje yra integruoti gamintojo kalibracijos procedūrų algoritmai. Tačiau šios kalibracijos kodai nėra atviri, todėl nėra laisvai prieinami šio jutiklio tyrėjams. Dar viena iš priežasčių skatinanti tobulinti Kinect jutiklio kalibracijos procedūras – nepakankamas gamintojo kalibracijos tikslumas. Kokybiška Kinect jutiklio kalibracija leidžia įrenginiui konkuruoti su profesionaliomis vaizdo gylio fiksavimo sistemomis. Remiantis [34] šaltinio duomenimis, Kinect įrenginys ne daug atsilieka savo tikslumu nuo SLR Stereo trianguliacijos metodo ir turi žymiai geresnį tikslumą nei SwissRanger SR-4000 3D-TOF kamera.

Yra pasiūlyta įvairių vaizdo gylių fiksuojančių kamerų kalibracijos metodų. Vienas iš standartinių kalibracijos metodų pirmiausiai kalibruoja kameras atskirai, o tik vėliau atsižvelgia į jų tarpusavio išsidėstymą. Tokie pavyzdžiai pateikiami [30, 39, 45] šaltiniuose. Tačiau tokia kalibracija nėra optimali, kadangi vienos iš kamerų kalibracija gali pagerinti kitos, sistemoje esančios kameros, kalibracijos parametrus, o gylio kameros kalibracijai reikia itin tikslaus erdvinio kalibracijos objekto. Tai galima išvengti atliekant kalibraciją abiem kameroms iš karto. Kitas autorius [14] siūlo naudoti kalibraciją pasitelkiant roboto manipuliatorių, kad būtų užtikrinamas tikslus pozicionavimas. Tačiau šiame skrydžio-laiko kamerų kalibravimo metode naudojamas itin didelis skaičius parametrų. Kitas kalibracijos metodas, pasiūlytas [11], sukurtas atsižvelgiant į RGB ir gylio kameros sujungtinį kalibravimą bei jų tarpusavio padėtį. Šis kalibracijos metodas teikia geresnius rezultatus nei Kinect jutiklio gamintojo kalibracija 1.19 pav. Tai ypač pastebima, kada matavimo atstumas yra mažas (0,5 – 1,8 m). Gamintojo kalibracijos metu standartinis nuokrypis vidutiniškai siekia 2 mm, o [11] šaltinyje aprašomos kalibracijos metu – mažiau nei 0,3 mm. Norint atlikti kalibraciją, reikia užfiksuoti

šachmatų lentą įvairiose pozicijose. Mažiausiai reikia maždaug 30 porų RGB ir IR kameromis užfiksuotų vaizdų. Vaizdai tarpusavyje turi skirtis posūkiiais apie horizontalią ašį, posūkiiais apie vertikalią ašį, atstumu nuo šachmatų lentos ir jutiklio.



1.19 pav. Kinect matavimo neapibrėžtumas priklausomai nuo matuojamo gylio [11]

Šis kalibravimo metodas naudoja (1.11) formulėje pateiktą kalibravimo modelį, kur d_k – vaizdo gylis po korekcijos, d yra vaizdo gylis išmatuotas jutiklio, u ir v – pikselio koordinatės, o α_0 ir α_1 kalibracijos koeficientai [11].

$$d_k = d + D_\delta(u, v)e^{\alpha_0 - \alpha_1 d} \quad (1.11)$$

Minėtas kalibravimo metodas gali būti pritaikytas ne tik Kinect jutikliui, o ir kitokioms gylio fiksavimo sistemoms. Todėl šis kalibravimo metodas turi didelį pritaikomumą, kurį taip pat palengvina ne tik paprastas kalibracijos procesas (tereikia užfiksuoti šachmatų lentą įvairiomis pozicijomis), bet ir tam specialiai sukurtas Matlab programinės įrangos įrankis Kinect Calibration Toolbox. Užfiksavus šachmatų lentą įvairiomis pozicijomis RGB ir IR kameromis, nurodomi šachmatų lentos langelių skaičius ir jų dydis – įrankis automatiškai sužymi visų langelių kampus. Po to rankiniu būdu nurodomi gylio vaizduose užfiksuoti šachmatų lentos plotai. Šių duomenų pakanka, kad įrankis pateiktų reikalingus kalibravimo rezultatus.

1.7. Robotai ir kompiuterinė rega

Žodis robotas kilęs iš čekiško žodžio „robota“, kuris reiškia „priverstinis darbas“. 1940 m. Izakas Asimovas (Isaac Asimov) pateikė straipsnį „Runaround“, kuriame suformuluotos trys

pagrindinės taisyklės keliamos robotams: robotai negali kelti grėsmės žmonėms, robotai privalo paklusti žmonėms ir robotai privalo saugoti savo egzistavimą [26].

1978 m. „General motors“ kompanijos organizuoto simpoziumo tema buvo „Kompiuterinė rega ir jutikliais valdomi robotai“. Jau tuo laikotarpiu kompanija teikė didelį dėmesį šiai sričiai, kadangi tai buvo augančios pramonės pagrindas. Žmogaus darbo jėga buvo keičiama robotų darbo jėga, kurie gali monotonišką darbą dirbti ilgiau ir tiksliau [35].

[16] straipsnyje pateikiami apklausos, kurioje klausiama kokiose srityse robotai turėtų būti panaudojami, o kokiose jų panaudojamumo reiktų vengti, rezultatai. Kosmoso tyrinėjimo, gamybos, kariuomenės ir saugumo srityse, pasak apklaustųjų, robotai turi daugiausiai pakeisti žmonių darbą. Tai suprantama, kadangi šios sritys yra ne tik monotoniškos, bet ir pavojingos. Tokiose aplinkose reikia gerai orientuotis, todėl robotui reikalingos „akys“, kuriomis jis suvokia ir supranta aplinką kaip žmogus.

Robotai informaciją apie juos supančią aplinką gali gauti kontaktiniais ir nekontaktiniais būdais. Tačiau kontaktiniai būdai, tokie kaip koordinačių matavimo mašinos, yra sparčiai keičiami nekontaktiniais. Nekontaktiniai matavimo būdai yra greitesni ir tikslesni. Erdvinio vaizdo atstatymui naudojami skrydžio laiko, stereoregos, lazerinio skenavimo juostele (angl. laser stripe scanning) ir struktūrizuotos šviesos nekontaktiniai būdai. Iš šių minėtų būdų struktūrizuota šviesa yra dažniausiai naudojama, nes vienu matavimu nuskenuoja visą objektą bei gali teikti momentinius ir tikslus matavimo duomenis [23]. Tačiau struktūrizuota šviesa retai taikoma lauke naudojamoms sistemoms, kadangi sunku pasiekti didelį kontrastą esant itin ryškiam apšvietimui [31].

Pasak [1], robotų valdymas gali būti skirstomas į du tipus: kuomet valdymas susijęs su veiksmo vieta ir kuomet valdymas susijęs su objektu. Pirmuoju atveju vaizdą fiksuojanti kamera montuojama ant mobilaus roboto. Jo pagrindinė paskirtis tinkamai naviguoti aplinkoje, vengti ir aptikti kliūtis. [9] pateiktame tyrime naudojamas mobilus robotas, kuris navigavimui aplinkoje naudoja struktūrizuotą šviesą.

Kuomet valdymas susijęs su objektu, vaizdą fiksuojanti kamera montuojama ant roboto manipulatoriaus. Šiuo atveju svarbu objektų aptikimas, jų padėties nustatymas, taip pat ir manipulatoriaus padėties nustatymas. [2] pateikiama skrydžio laiko ir gylio kamerų panaudojimas ir palyginimas robotų manipulatoriuose. [12] pateiktame tyrime pristatomas tikslus manipulatoriaus valdymas ranka, kuomet rankos judesiai yra fiksuojami Kinect jutikliu.

Kinect jutiklio pritaikymas robotikoje aprašomas [37] straipsnyje, kur pateikiami šeši panaudojimo būdai (duomenų apjungimui, kliūčių aptikimui ir vengimui, objektų atpažinimui,

valdymui gestais, padėties nustatymui ir navigavimui, erdviniui modeliavimui). [6] aprašomas praktinis Kinect jutiklio panaudojimas Arduino robotuose. Pateikiami programinio kodo pavyzdžiai, skirti valdyti manipuliatorių rankų judesiais.

[15] tyrime, kuriame atliktas metrologinis Kinect ir Asus Xtion jutiklių įvertinimas, išvadose pateikiama, kad šie jutikliai tinkami naudoti robotų navigacijai patalpose. Tačiau [27] šaltinyje Kinect jutiklis panaudojamas lauko aplinkoje. Šiuo atveju jis montuojamas ant dviračio aplinkos erdvinio vaizdo sudarymui, kuris naudojamas saugiam dviračio tako žemėlapiui sudaryti. [19] šaltinyje pateikiamas segmentacijos algoritmas, naudojantis Kinect jutiklio gylio vaizdus robotų navigacijai. Eksperimentų rezultatai parodė, kad jų algoritmas efektyviai aptinka objektus ir gali būti panaudotas robotų navigacijai.

Objektų atpažinimui naudojami 3D formos deskriptoriai (angl. 3D shape descriptor). Vienas iš tokių deskriptorių pasiūlytas [4]. Kitoks objektų atpažinimo pavyzdys pateikiamas [32]. Jame pateikiama idėja, kad robotų navigacijai reikia gerai atpažinti ne bet kokius objektus, o tuos, kurie dažniausiai yra sutinkami – kėdės, stalai, lova, durys ir pan. Jų pasiūlytas metodas segmentuoja taškų debesis, taip sudarydamas klasterius, atitinkančius objekto atskiras dalis, ir vėliau ieškoma atitikimo tarp minėtų dalių ir objektų modelių, esančių duomenų bazėje. Rezultatai parodė, kad jų naudotas metodas teisingai atpažino objektus. Žinoma vieno objekto atpažinimas vyko sklandžiau nei kelių tos pačios klasės objektų atpažinimas (vieną kėdę atpažino lengviau, nei daug kėdžių). Taip pat išvadose pateikiama, kad rezultatai priklauso ir nuo Kinect jutiklio kampinės padėties priešais objektus.

[13] ir [25] pateikiamas Kinect jutiklio panaudojimas regėjimo negalią turinčių žmonių orientavimuisi aplinkoje. Nustatomos keturios būsenos: kliūtis nėra, kliūtis arba siena yra, laiptai žemyn, laiptai aukštyn. Šiam tikslui gylio vaizde matuojamos tam tikros taškų grupės ir tikrinama, ar spalva kinta tolygiai. Jei spalva kinta tolygiai – kliūtis nėra. Kliūčių atpažinimui naudojami dirbtinių neuronų tinklai. Pastarieji tiksliai suklasifikavo 99 % duotų pavyzdžių ir 100 % tikslumu [13].

[25] mano, kad tolimesnius savo tyrimus reiktų sieti su detalesniu objektų atpažinimu, tačiau [2] tyrime, kur lyginama gylio kamerų ir skrydžio laiko kamerų veikimas robotų suvokime ir valdyme, teigiama, kad įprastos gylio kameros negali taip detalai atpažinti objekto detalių kaip skrydžio laiko kameros. Pavyzdžiui gylio kameros gali identifikuoti, kad prieš jutiklį yra augalas, tačiau negali identifikuoti jo šakelių, lapų ir kitų detalių. Tačiau robotų navigacijai toks detalumas nėra reikalingas, svarbiausia – išvengti kliūčių, atpažinti objektą, o ne analizuoti jo sudedamąsias dalis.

[8] Kinect jutiklis naudojamas robotų navigacijai patalpose. Tyrime naudotas Pioneer P3-AT robotas. Roboto valdymo sistema sudaryta iš dviejų dalių. Pirmoji dalis skirta kliūčių išvengimui. Joje

panaudotos OpenCV bibliotekos. Jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas dalinamas į penkias dalis. Jeigu vienoje iš jų aptinkamas objektas artimesniu nei 60 cm atstumu, tai reiškia, kad toje vietoje yra kliūtis. Šią informaciją apdoroja antroji dalis – dirbtinių neuronų tinklas, kuris nustato, kokia kryptimi robotui reikia judėti toliau. Šį neuronų tinklą sudarė 632 įėjimai, 316 neuronų paslėptame sluoksnyje ir 8 neuronai išėjime. Eksperimento rezultatai parodė, kad sistema teisingai identifiko kliūtis 92 % tikslumu.

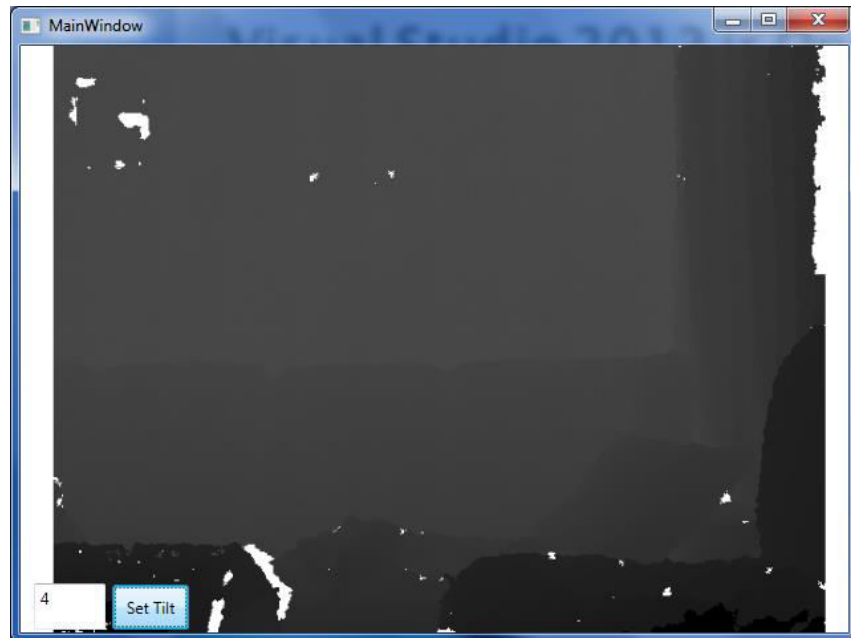
Panašus eksperimentas atliktas ir [24]. Programinis kodas rašytas C++ kalba, pasinaudojant Eclipse CDT aplinka. Kompiuterinei regai taip pat naudotos OpenCV bibliotekos. Visa tai įgyvendinta Linux Ubuntu 2.3.1 operacinėje sistemoje. Tako planavimas padalinamas į du etapus: globalus ir lokalus. globaliai roboto vietos nustatymui naudojamas ZigBee tinklas. Lokaliu atveju sistema turi nustatyti, ar prieš ją nėra kliūtis. Kliūtis nebuvimo atveju, toliau naudojamas globalusis tako planavimas, kuris remiasi Bajeso formuluotėmis. Jei kliūtis yra, tai pirmiausiai reikia jos išvengti, o vėliau vėl pereinama į globalaus tako planavimo etapą. Eksperimento rezultatai parodė, kad labai svarbu kokioje pozicijoje ir koku kampu yra pasuktas jutiklis. Šiuo atveju jo pozicija nustatyta eksperimentiniu būdu. Kita nustatyta savybė ta, kad Kinect jutiklis neidentifikuoja šviesai skaidrių objektų, todėl išvengti tokių kliūčių yra neįmanoma. Taip pat eksperimento metu nustatyta, kad, esant mažiems atstumams tarp kliūčių, robotas sustoja, kadangi nebeapskaičiuoja, kaip išvengti kliūčių.

2. TYRIMO METODIKA

2.1. Programinė įranga

2.1.1. Programinės įrangos pasirinkimas

Norint kompiuteriu registruoti Kinect jutiklio siunčiamų duomenų srautą, pastarajame reikia įdiegti programinę įrangą, kuri tuos duomenis apdorotų, saugotų ir pan. Yra įvairios programinės įrangos, kurios tai leidžia padaryti. Buvo išbandytos Processing (naudoja OpenCV bibliotekas), Microsoft Visual Studio 2012 (Kinect Application, C# kalba), įvairūs Matlab įrankiai (Image Acquisition Toolbox ir Simulink for Natural Interaction Device). Su Microsoft Visual Studio 2012 parašyta programa, kuri teikia gylio vaizdą ir tuo pačiu laiko momentu galima keisti kampą 2.1 pav.



2.1 pav. Programos langas. Programa teikia gylio vaizdą ir gali keisti Kinect jutiklio korpuso kampinę padėtį pagrindo atžvilgiu programos veikimo metu. Programa parašyta Microsoft Visual Studio 2012

Matlab R2013a versija turi gana ribotą kompiuterinės regos įrankio (angl. Computer Vision Toolbox) funkcijų skaičių. Matlab įrankis „Image Acquisition“ taip pat turėjo mažai funkcijų. Jis teturėjo vieną bloką Matlab Simulink aplinkoje – „From Video Device“, kuris teikdavo iš Kinect jutiklio gaunamą duomenų srautą. Svarbiausias keliamas tikslas programinei įrangai yra kuo aiškesnis ir paprastesnis duomenų pateikimas bei kuo didesnis funkcionalumas. Tai labiausiai būdinga Matlab Simulink for Natural Interaction Device. Šis Matlab Simulink įrankis pasirodė tinkamiausias, kadangi aiškiai atskiromis matricomis pateikdavo supančios aplinkos taškų X, Y, Z koordinatas, leisdavo greitai

ir veikiant simuliacijai pakeisti jutiklio kampa, turėjo įvairios paskirties bloką (šeši tipai). Didžiausias šio įrankio trūkumas – problemos dirbant realiu laiku su dideliu duomenų srautu.

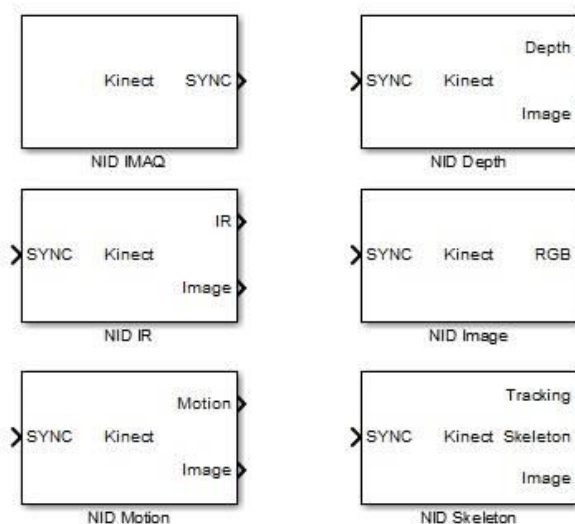
2.1.2. Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankis

Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankis, sukurtas japono Takashi Chikamasa [33], palaiko sąsają tarp kompiuterio ir natūralios sąveikos prietaisų. Norint naudoti šią sąsają Kinect jutiklio generuojamam srautui gauti, reikia, kad kompiuteryje būtų įdiegta:

- Ne senesnė nei Matlab R2010b 32/64 bitų versija su Simulink aplinka;
- Operacinė sistema Microsoft Windows7 32/64 bitų;
- C MEX kompiliatorius (Microsoft Visual Studio 2010 Express Edition);
- Microsoft Windows SDK 7.1;
- Microsoft Kinect SDK for Windows arba OpenNI;

Nors atrodo reikia pakankamai daug papildomų komponentų sėkmingam įrankio veikimui, tačiau diegimo procesas yra paprastas ir aiškiai aprašytas instrukcijoje, kuri atsisiunčiama nemokamai kartu su pačiu įrankiu. Taip pat su įrankiu pateikiami įvairūs pavyzdžiai – nuo paprasčiausio gylio gavimo iki žmogaus skeleto galūnių padėties koordinatų pateikimo realiu laiku.

Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankis turi šešis blokus: NID IMAQ, NID Depth, NID IR, NID Image, ND Motion, NID Skeleton 2.2 pav.

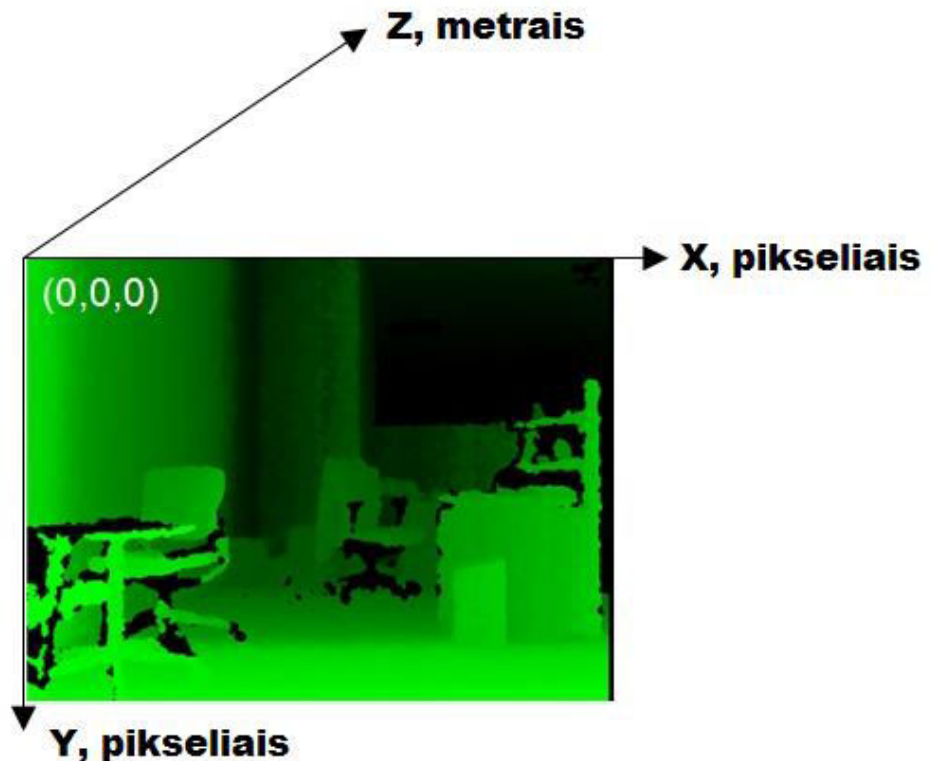


2.2 pav. Matlab Simulink for Natural Interaction Device įrankio blokai

NID IMAQ blokas pateikia duomenų srautą, gaunamą iš Kinect jutiklio. NID IMAQ bloke galima nustatyti įvesties signalą „Angle“ – nurodyti koks kampas tarp jutiklio korpuso ir pagrindo. Kampas gali kisti nuo -27° iki 27° laipsnio tikslumu. Bloko išvesties signalas „SYNC“ jungiamas tik tiesiogiai su kitais šio įrankio blokais. Šį bloką privaloma naudoti bet kurioje simuliacijoje, susijusioje su Kinect jutiklio gaunamais duomenimis.

NID Depth vienas iš funkcionaliausių blokų. Jis grąžina visus duomenis, susijusius su gyliu. Įvesties signalas „SYNC“ turi būti tiekiamas iš NID IMAQ bloko. Išvesties signalai gali būti kelių tipų:

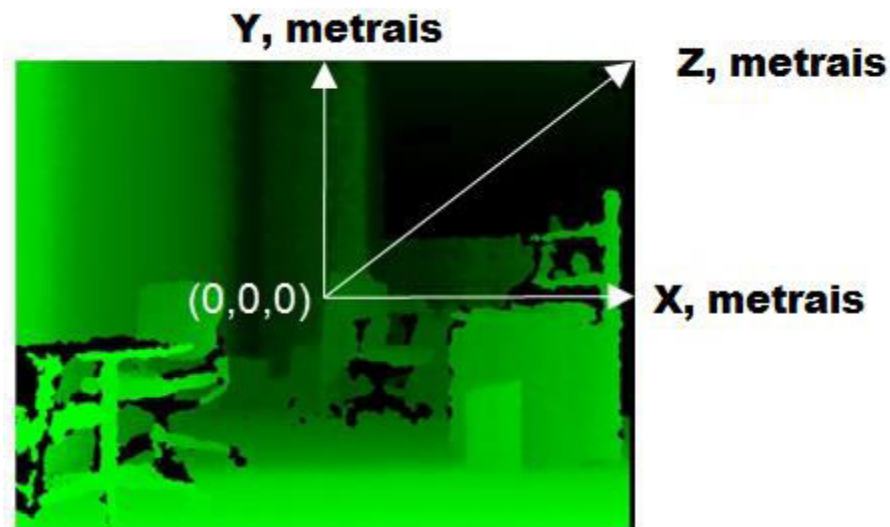
- Depth – grąžina gylį metrais. Gylis – atstumas tarp kiekvieno fiksuojamo aplinkos taško ir jutiklio;
- XYZ – grąžina XYZ koordinates. Gali būti dviejų – projekcinės ir realios;
- X/Y/Z – grąžina X, Y, Z koordinates atskirai. Taip pat gali būtų dviejų tipų;
- Vaizdą – RGB24 gylio vaizdą. Šviesesnės zonos reiškia, kad taškai yra arčiau jutiklio, o juodos, kad duomenys - prarasti;



2.3 pav. Projekcinių koordinačių sistema [33]

Projekcinės koordinatės pateiktos 2.3 pav. Jų koordinačių sistemos pradžios taškas yra kairiajame viršutiniame vaizdo taške. X ir Y koordinatės matuojamos pikseliais, o Z metrais.

Realios koordinatas pateiktos 2.4 pav. Jų koordinatinių sistemos pradžios taškas yra vaizdo viduryje, o visos trys koordinatos grąžinamos metrais.



2.4 pav. Realių koordinatinių sistema [33]

NID IR blokas grąžina infraraudonųjų spindulių duomenis iš Kinect jutiklio. IR blokas gali egzistuoti tik su NID IMAQ ir NID Depth blokais. Taip pat turi jėjimo signalą „SYNC“, ir du išėjimo signalus: „IR“ – infraraudonųjų spindulių duomenys kiekvienam pikseliui ir taip pat gali grąžinti RGB24 (nespalvotą) infraraudonųjų spindulių vaizdą.

NID Image blokui reikalingas įvesties signalas „SYNC“, o išvesties signalas yra RGB24 vaizdas, kurį fiksuoja jutiklio RGB kamera.

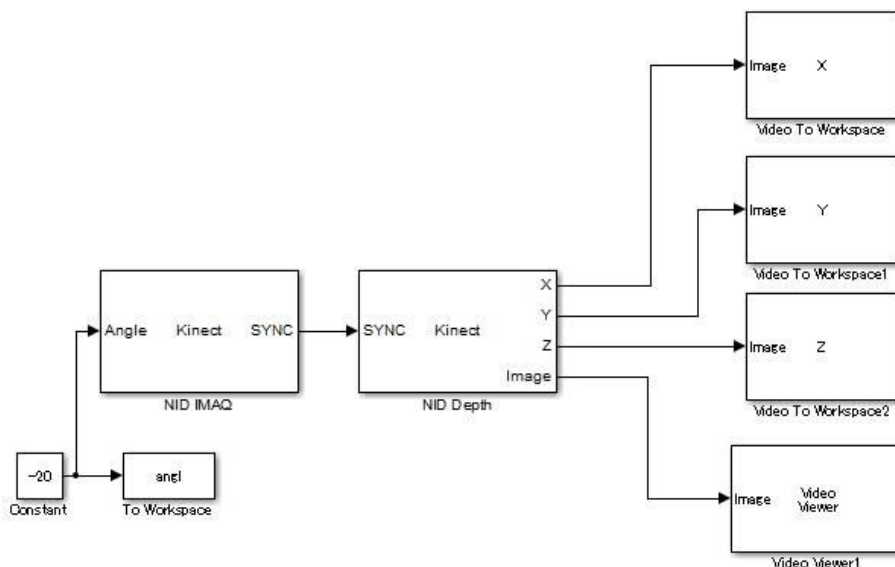
NID Motion blokas aptinka judančius objektus. Įvesties signalas taip pat „SYNC“, o išvesties – „Motion“ – grąžina judančių objektų ID (nuo 0 iki 15, kur 0 reiškia, kad objektas nejudą). Taip pat grąžina judančių objektų vaizdą, kur skirtinga spalva reprezentuoja skirtingą ID.

NID Skeleton grąžina žmogaus skeleto sąnarių informaciją. Įvesties signalas – „SYNC“, o išvesties signalai yra dviejų tipų: „Tracking“, kuris parodo skaičių žmonių, kurių skeletai yra sekami ir „Skeleton“, kuris pateikia skeleto sąnarių XYZ koordinatas, kurios gali būti pateiktos tiek projekcinėmis, tiek realiomis.

2.2. Tyrimo koncepcija

2.2.1. Tyrimo rezultatų registravimas

Tyrimo matavimams naudojama 2.5 pav. pateikta registravimo schema. NID IMAQ blokas reikalingas, kad būtų gaunami duomenys iš Kinect jutiklio. Tyrimo atliekamų matavimų duomenims gauti užtenka panaudoti tik NID Depth bloką, kuriame nurodoma, kad išėjimo signalas yra realios X, Y, Z koordinatės. Šios koordinatės perduodamos į Matlab darbo zoną (angl. workspace). Į NID IMAQ kaip įėjimo signalas perduodama pastovi kampinės padėties reikšmė, kuri taip pat perduodama ir į darbo zoną. X, Y, Z koordinatės atitinkamai naudojamos kliūtis aukščiui, pločiui ir atstumui iki jos apskaičiuoti. Taip pat iš NID Depth bloko išvedamas „Image“ signalas, kuris perduoda gylio vaizdo kompiuterinės regos įrankio blokui „Video Viewer“, kuris rodo fiksuojamą vaizdą.



2.5 pav. Tyrimo rezultatų registravimo schema

Po simuliacijos, kuri trukdavo pastovų laiko tarpą – 0,5 s, darbo zonoje atsirasdavo keturi kintamieji X, Y, Z ir posvyrio kampas angl. Kintamieji X, Y, Z yra [x y K] dydžio, kur x – eilučių skaičius (480), y – stulpelių skaičius (640), K - darbo zonoje išsaugotų kadru skaičius (dėl atminties trūkumo apribota iki 10 paskutinių kadru).

X matricoje gąžinami duomenys apie kiekvieno taško nuotolį nuo ordinačių ašies 2.4 pav. 2.1 lentelėje pateikiama X matrica. Kadangi ordinačių ašį atitinka 321 stulpelis, tai visų taškų, esančių šiame stulpelyje, X koordinatė bus lygi 0. Jeigu matricos elemento stulpelio indeksas mažesnis už 321, tai X koordinatė yra neigiama. Kuo mažesnis stulpelio indeksas, tuo mažesnė reikšmė (neigiama) yra

gaunama. Jeigu matricos elemento stulpelio indeksas didesnis už 321, tai X koordinatė yra teigiama. Kuo didesnis stulpelio indeksas, tuo didesnė reikšmė (teigiama) yra gaunama. Taigi, pločio apskaičiavimui reikia iš X matricos elemento su didesniu stulpelio indeksu atimti X matricos elementą su mažesniu stulpelio indeksu.

2.1 lentelė

X matrica						
0	1	2	...	321	...	640
1	$n_{1,1}$	$n_{1,2}$...	0	...	$n_{1,640}$
2	$n_{2,1}$	$n_{2,2}$...	0	...	$n_{2,640}$
...	0
241	$n_{241,1}$	$n_{241,2}$...	0	...	$n_{241,640}$
...	0
480	$n_{480,1}$	$n_{480,2}$...	$n_{480,321}$...	$n_{480,640}$

Y matricoje grąžinami duomenys apie kiekvieno taško nuotolį nuo abscisių ašies 2.4 pav. 2.2 lentelėje pateikiama Y matrica. Kadangi abscisių ašį atitinka 241 eilutė, tai visų taškų, esančių šioje eilutėje, Y koordinatė lygi 0. Kuo Y matricos elemento eilutės indeksas mažesnis už 241, tuo didesnes skaitines reikšmes įgauna Y koordinatė. Jeigu matricos elemento eilutės indeksas didesnis už 241, tai jo koordinatė Y įgija neigiamas reikšmes. Kuo matricos elemento eilutės indeksas didesnis už 241, tuo mažesnė skaitinė reikšmė (neigama) gaunama. Taigi, aukščio apskaičiavimui reikia iš Y matricos elemento su mažesniu eilutės indeksu atimti Y matricos elementą su didesniu eilutės indeksu.

2.2 lentelė

Y matrica						
0	1	2	...	321	...	640
1	$n_{1,1}$	$n_{1,2}$...	$n_{1,321}$...	$n_{1,640}$
2	$n_{2,1}$	$n_{2,2}$...	$n_{2,321}$...	$n_{2,640}$
...
241	0	0	0	0	0	0
...
480	$n_{480,1}$	$n_{480,2}$...	$n_{480,321}$...	$n_{480,640}$

Z matricoje nulinių stulpelių ar eilučių nėra. Z matricos elementų reikšmės įgija vertes nuo 0,4 iki 3,8 dešimt tūkstantosios metro dalies tikslumu.

2.2.2. Robotų aukščio ir minimalaus kampo parinkimas

Robotai yra įvairių tipų – vieni skirti grindims valyti, kiti specialioms užduotims vykdyti, dar kiti yra humanoido tipo. Visi šie robotai yra skirtingo aukščio, kuris gali svyruoti nuo dešimties centimetrų iki vidutinio žmogaus ūgio. [29] pateikiama 10 geriausių robotų siurblių ir jų charakteristikos - viena iš jų - roboto aukštis, kuris svyruodavo nuo 79 iki 130 mm. Todėl pirmasis tiriamasis aukštis pasirenkamas 100 mm. Kitas aukštis pasirinktas pagal [42] šaltinyje minimą robotą Pioneer 3-AT. Remiantis minėtuoju šaltiniu pasirinktas 300 mm aukštis. Humanoido tipo robotas pasirinktas Honda gamintojo [20], kurio aukštis 1500 mm. Kadangi tarp 300 mm ir 1500 mm yra didelis skirtumas, tai pasirinkti dar du tarpiniai aukščiai – 600 ir 1000 mm. Taigi iš viso naudojami penki skirtingi aukščiai: 100, 300, 600, 1000, 1500 mm.

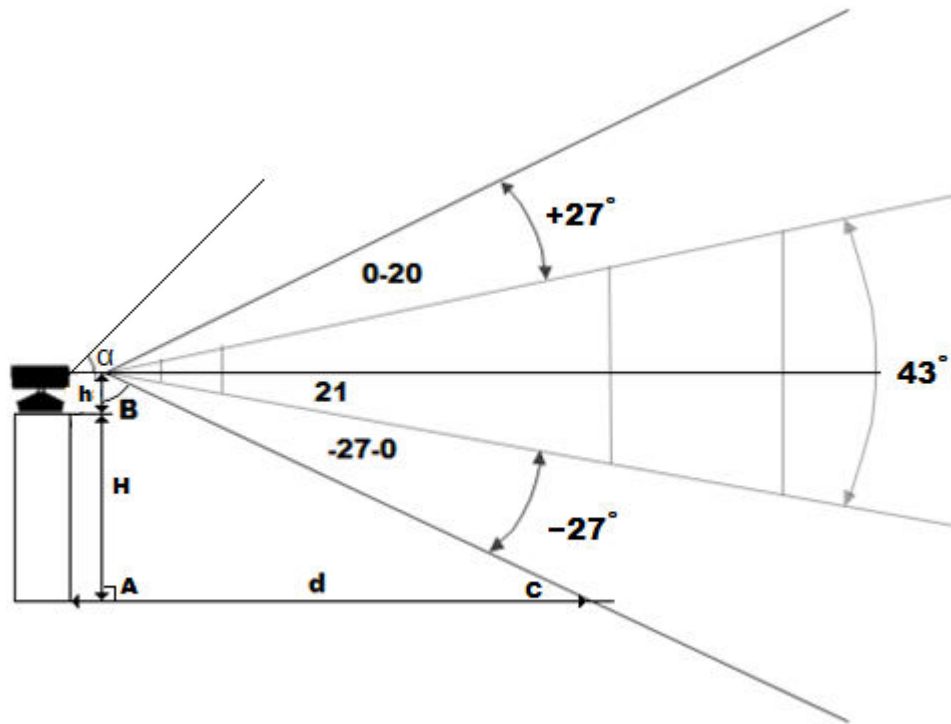
Atlikti matavimus su skirtingais aukščiais H reikia todėl, kad keičiant aukštį H , keičiasi Kinect jutiklio apžvalgos zona ir minimalus matuojamas atstumas d 2.6 pav. Minimalus matuojamas atstumas d yra atstumas tarp roboto ir mažiausiu kampu B sklindančio spindulio. Kinect jutiklio vertikalus apžvalgos kampas siekia 43 laipsnius. Taip pat jutiklis gali keisti savo korpuso padėtį pagrindo atžvilgiu kampu α nuo -27° iki 27° . Tokiu būdu yra keičiamas kampas B . Esant mažiausiai Kinect jutiklio korpuso kampinei padėčiai α (-27°), kampas $B=48^\circ$. Esant didžiausiai Kinect jutiklio kampinei padėčiai α (27°), kampas $B=96^\circ$. Esant tokiam kampui B , nebesusidarys statusis trikampis ABC, todėl kampas α didesnis nei 20° nebuvo naudojamas. Kai Kinect jutiklio korpuso kampinė padėtis $\alpha=20^\circ$, tai kampas $B=89^\circ$. Tai yra didžiausia reikšmė, kada dar susidaro statusis trikampis ABC. Taigi minimalus atstumas d bus tada, kai Kinect jutiklio kampinė padėtis α bus mažiausia (-27°). Tačiau Kinect jutiklio matavimo diapazonas yra nuo 400 mm iki maždaug 3800 mm, todėl fiksuoti taškus, kurie arčiau nei 400 mm nėra prasmės, kadangi jie grąžinami kaip nulinės vertės („skylės“). Todėl reikia parinkti tokį kampą B , kad minimalus atstumas d būtų didesnis nei 400 mm. Didėjant aukščiui H , minimalus atstumas d taip pat didėja ir gali įgyti vertes kelis kartus didesnes nei 400 mm. Tokiu atveju apžvalgos zona nebeapreps sričių, esančių prieš pat jutiklį, o tai blogintų kliūčių pastebėjimą priešais robotą.

Minimalus atstumas d apskaičiuojamas pagal (2.1) formulę.

$$d = \tan B \cdot (H + h) \quad (2.1)$$

Dydis h yra Kinect jutiklio aukštis nuo jo apatinės dalies iki kameros centro. Kadangi šis atstumas lygus 60 mm, tai (2.1) formulę galima perrašyti taip:

$$d = \tan B \cdot (H + 60) \quad (2.2)$$



2.6 pav. Kinect jutiklio apžvalgos zona

2.3 lentelė

Minimalus atstumo lentelė, kai aukštis H=100 mm

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm
-27	42	144
-26	43	149
-25	44	155
-24	45	160
-23	46	166
-22	47	172
-21	48	178
-20	49	184
-19	50	191
-18	51	198
-17	52	205
-16	53	212
-15	54	220
-14	55	229

2.3 lentelės tęsinys

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm
-15	54	220
-14	55	229
-13	56	237
-12	57	246
-11	58	256
-10	59	266
-9	60	277
-8	61	289
-7	62	301
-6	63	314
-5	64	328
-4	65	343
-3	66	359
-2	67	377
-1	68	396
0	69	417
1	70	440
2	71	465
3	72	492
4	73	523
5	74	558
6	75	597
7	76	642
8	77	693
9	78	753
10	79	823
11	80	907
12	81	1010
13	82	1138
14	83	1303
15	84	1522
16	85	1829
17	86	2288
18	87	3053
19	88	4582
20	89	9166

2.3 lentelėje pateikta minimalaus atstumo d priklausomybė nuo Kinect jutiklio padėties kampo α . Kai kampas α yra minimalus, tai minimalus matuojamas atstumas siekia 144 mm. Tačiau, kaip jau

minėta, šis atstumas turėtų būti ne mažesnis nei 400 mm. Šiuo atveju pirmoji d reikšmė viršijanti šią ribą yra tada, kai $\alpha=0^\circ$. Tuomet minimalus matuojamas atstumas siekia 417 mm, t. y. 17 mm viršija 400 mm ribą. Kitų aukščių minimalių atstumų d lentelės pateiktos 1 priede.

Maksimalus Kinect jutiklio matuojamas atstumas svyruoja apie 3800 mm. Kai $\alpha=19^\circ$, Kinect jutiklis galėtų matuoti nuo 4581 mm. Jei Kinect jutiklis būtų kambaryje, kurio matmenys neribotų šio atstumo ir aplink nebūtų pašalintų daiktų, tai būtų gražinamas tik „skylėtas“ vaizdas (nulinės vertės).

2.4 lentelėje pateikta, kokie yra minimalūs matuojami atstumai d prie skirtingų robotų aukščių H. Kai H=300 mm, tai minimalus matuojamas atstumas lieka panašus kaip ir H=100 mm atveju, t. y. arti minimalios matuojamos ribos. Kai H=600 mm, minimalus matuojamas atstumas d 194 mm viršija minimalią matuojamą ribą. Kuo H didėja, tuo šis atstumas darosi didesnis, kol ties aukščiausiu aukščiu H=1500 mm, pasiekia 1405 mm. Toks didelis minimalus atstumas d, jau gali daryti pakankamai didelę įtaką kliūčių pastebimumui priešais robotą. Kuo aukštesnis robotas, tuo jis turėtų iš anksčiau atpažinti kliūtį. Priartėjus prie kliūtis arčiau nei minimalus matuojamas atstumas d, robotas nebegalėtų remtis duomenimis gaunamais iš Kinect jutiklio.

2.4 lentelė

Minimalaus kampo parinkimas

Aukštis H, mm	Minimalus kampas α , °	Minimalus matuojamas atstumas d, mm
100	0	417
300	-20	414
600	-27	594
1000	-27	954
1500	-27	1405

2.2.3. Gylio vaizdo užpildymo matavimas

„Skylės“ (nulinės vertės) apibūdina gaunamo gylio vaizdo užpildymą. Kuo vaizde yra mažiau nulinių verčių, tuo daugiau yra taškų, kurių trimatės koordinatės yra žinomos. Todėl labai svarbu yra mažinti nulinių verčių skaičių. Kad tinkamai įvertinti kiekvienos kampinės padėties α teikiamą vaizdo užpildymą, reikia atlikti eksperimentus su kiekviena kampine padėtimi, esant skirtingiems aukščiams H. Šiuo atveju yra įvertinama ne tik priešais jutiklį esanti zona, kurioje yra ieškoma kliūtis, tačiau ir visas vaizdas. Vaizdo užpildymas įvertinamas pagal (2.3) formulę, kur q - užpildymas, procentais, N - nulinių verčių skaičius, V – visų verčių skaičius.

$$q = \frac{V-N}{V} \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

Iš viso atliekami trys matavimai q ir vedamas užpildymo vidurkis Q pagal (2.4) formulę. Kiekvieno matavimo duomenys susidaro iš 10 kadru. Kadangi yra žinomas Kinect jutiklio vaizdo geba (480x640) ir kadru skaičius, tai dydį V galima apskaičiuoti pagal (2.5) formulę, kurioje $x=640$, $y=480$ ir kadru skaičius $K=10$. Tokiu atveju gaunama, kad $V=3072000$. Šis dydis yra pastovus kiekvienam matavimui. Todėl vietoj (2.3) formules galima naudoti (2.6) formulę. Iš (2.6) formulės pastebima, kad užpildymas q priklauso tik nuo nulinių verčių skaičiaus N . Kuo N didesnis, tuo prastesnis užpildymas, nes q artėja link 0 %, kas reikštų, kad vaizde nėra nei vienos gylio vertės. Tai galima gauti keliais atvejais. Kai aplink jutiklį supantys objektai ir patalpos sienų plokštumos yra toliau nei maksimalus matuojamas atstumas. Kitu atveju, kai aplink jutiklį supantys objektai yra per arti nei minimalus matuojamas atstumas, pavyzdžiui jutiklis patalpintas dežėje. Dar vienas atvejis, kai gaunama vien nulinės vertės, yra per mažas kampas B ir aukštis H . Kuomet šie dydžiai yra maži, jutiklis fiksuoja vien grindų plokštumą, tarp kurios ir jo susidaro per mažas atstumas. Į pastarąjį atvejį reikia labiausiai atkreipti dėmesį, kuomet jutiklio pagrindinis tikslas yra kliūčių aptikimas priešais jį.

$$Q = \frac{\sum_1^3 q_i}{3} \quad (2.4)$$

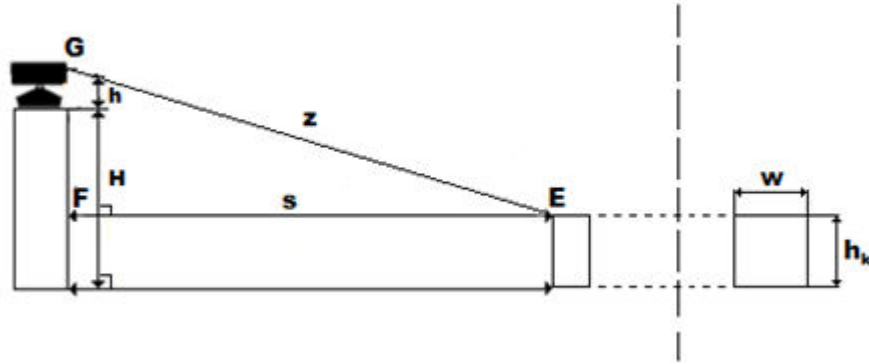
$$V = xyK \quad (2.5)$$

$$q = \frac{3072000 - N}{30720} \quad (2.6)$$

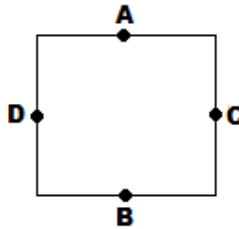
2.2.4. Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimas

Suradus minimaliausią kampą α , įvertinus užpildymą Q , prie kiekvieno skirtingo aukščio H galima įvertinti, kaip tiksliai Kinect jutiklis nustato kliūtis dydį ir atstumą iki jos. Kliūtis dydis nusakomas kliūtis aukščiu h_k ir pločiu w , o atstumas iki kliūtis viršutinės kraštinės z 2.7 pav. Atstumas s , esantis tarp taškų F ir E , nuosekliai didinamas 100 mm žingsniu nuo minimalaus atstumo d iki 3700 mm. Kiekvienam žingsnyje fiksuojami trys parametrai: aukštis h_k , plotis w ir gylis z . Aukštis h_k apskaičiuojamas iš X matricos, plotis w iš Y matricos, o gylis z iš Z matricos. Pirmiausiai pažymimas viršutinės kraštinės taškas A 2.8 pav., kurio gylio koordinatė z_A priskiriama atstumui iki kliūtis z . Turint dydį z , galima apskaičiuoti atstumą s . Tačiau matavimo metu atstumas s kaip tik tiksliai išmatuojamas rulete, kaip ir aukštis H , o atstumas z apskaičiuojamas remiantis Pitagoro teorema stačiajam trikampiui pagal (2.7) formulę. Vėliau šis teoriškai apskaičiuotas atstumas lyginamas su Kinect jutiklio gaunama z reikšme. Vėliau pažymimas apatinis kliūtis taškas B 2.8 pav. Šį tašką

išskirti iš fono yra sunkiausia, kadangi apatinė kliūties kraštinė dažnai susilieja su grindų taškais. Kliūties aukštis h_k apskaičiuojamas iš x_A ir x_B koordinačių pagal (2.8) formulę. Kliūties pločiui w apskaičiuoti pirmiausiai pažymimas taškas C, po to taškas D. Remiantis gautais dydžiais y_C ir y_D , apskaičiuojamas plotis w pagal (2.9) formulę.



2.7 pav. Kliūties matavimo schema



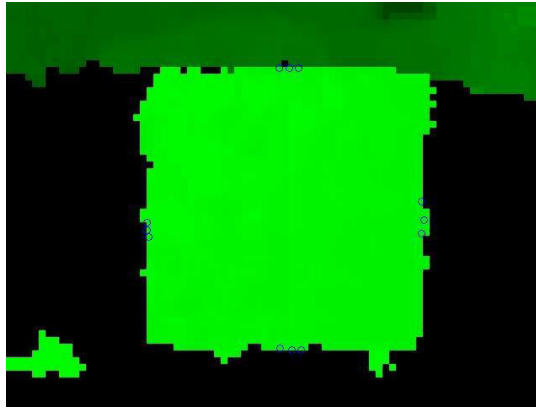
2.8 pav. Kliūties matuojamieji taškai

$$z = s^2 + (H + h)^2 \quad (2.7)$$

$$h_k = x_A - x_B \quad (2.8)$$

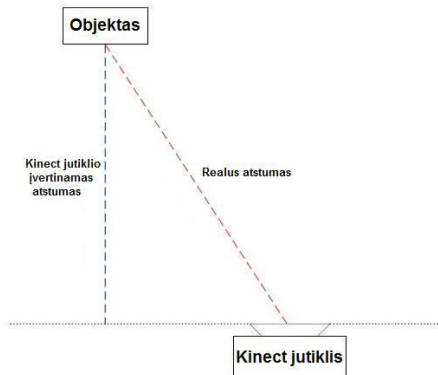
$$w = y_C - y_D \quad (2.9)$$

Taškai A, B, C ir D žymimi po kelis kartus, o į rezultatus įrašoma tiksliausia vertė. 2.9 pav. pateikiamas tokio žymėjimo gylio vaizde pavyzdys. Šiuo atveju atlikti trys matavimai, kadangi vaizde yra pažymėta 12 taškų. Trys poros kliūties aukščio h_k matavimui ir trys poros kliūties pločio w matavimui.



2.9 pav. Matavimo taškų žymėjimas gylio vaizde

Atstumas iki kliūtis z nustatomas pagal tašką A . Todėl atrodytų, kad atstumas iki kliūtis z priklausytų nuo taško A pažymėjimo vietos. Tačiau Kinect jutiklis fiksuoja atstumą ne iki kameros centro, o iki plokštumos, kurioje jis yra 2.10 pav. Todėl taškas A nebūtinai turi būti žymimas ties kraštinės viduriu, kadangi atstumai tarp kliūtis viršutinių kraštinės taškų ir Kinect jutiklio plokštumos yra lygūs [3].

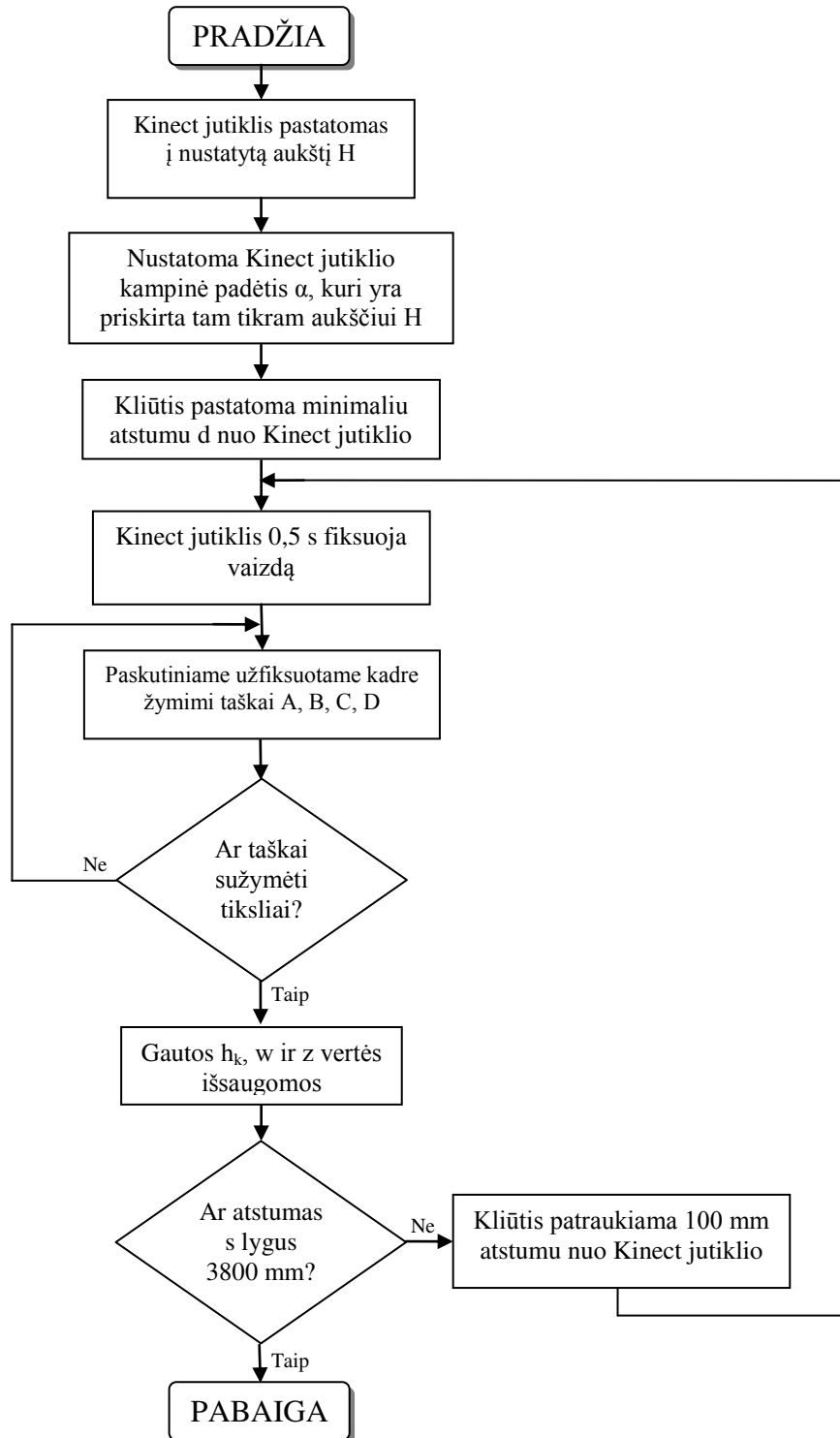


2.10 pav. Atstumo iki kliūtis įvertinimo schema [3]

2.2.5. Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimo algoritmas

Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimo algoritmas pateiktas 2.11 pav. Pirmiausiai Kinect jutiklis pastatomas į tam tikrą aukštį H . Kadangi pasirinkti penki skirtingi aukščiai H , tai algoritmą reikia pakartoti penkis kartus. Pastaciūs Kinect jutiklį į tinkamą aukštį H , pagal 2.4 lentelę nustatoma kampinė Kinect jutiklio padėtis α jo pagrindo, o tuo pačiu ir grindų, atžvilgiu. Po to, priešais Kinect jutiklį minimaliu atstumu d , kuris taip pat pateiktas 2.4 lentelėje, pastatoma 130x130 mm dydžio kliūtis lygiagrečiai Kinect jutiklio plokštumai. Tuomet paleidžiamas Matlab/Simulink modelis, pateiktas 2.5 pav., matavimo rezultatams registruoti. Šis modelis fiksuoja vaizdą 0,5 s. Paskutinis kadras iš VideoViewer bloko paverčiamas į paveikslėlį (angl. image), kuriame sužymimi keturi taškai pagal 2.8 pav. Matlab darbo zonoje peržiūrėti gauti rezultatai. Taškų žymėjimas

kartojamas, kol gaunami tiksliausi rezultatai. Po to jie įrašomi į *.xlsx tipo failą. Eksperimentai kartojami patraukiant kliūtį 100 mm žingsniu, kol pasiekiami maksimali matuojama riba – 3800 mm. Pasiekus šią ribą, eksperimentai su nustatytu aukščiu H yra baigiami.



2.11 pav. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo algoritmas

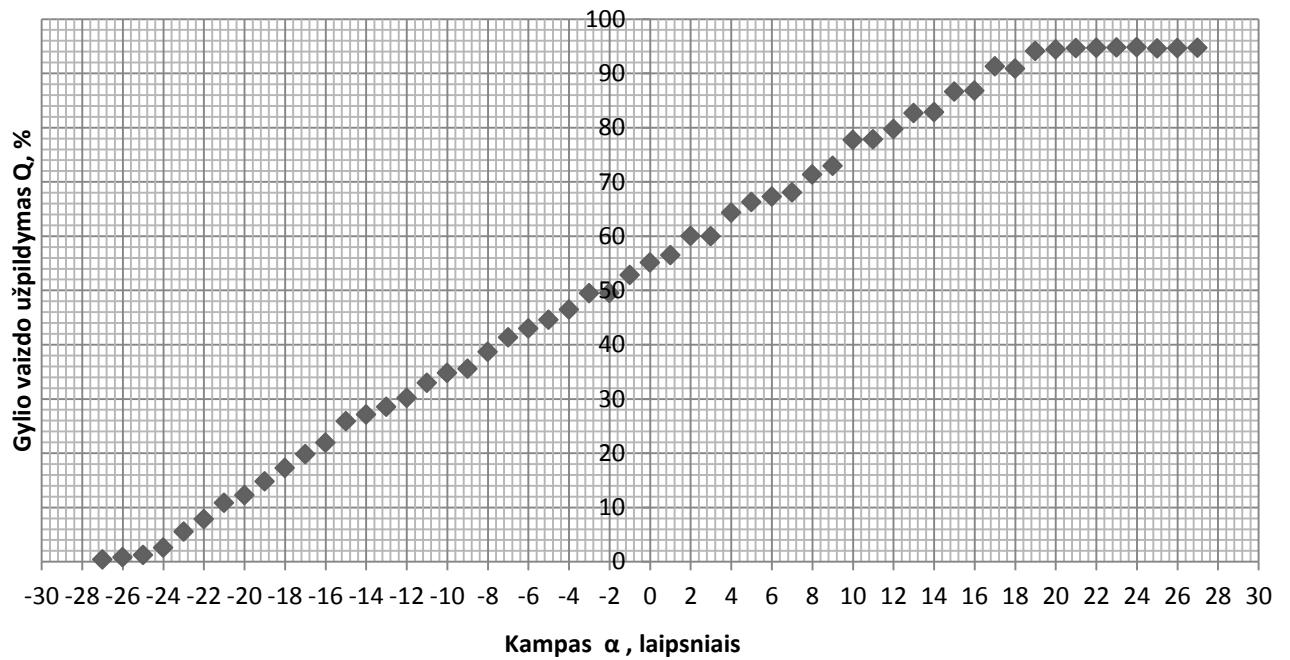
3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Gylio vaizdo užpildymo matavimo rezultatai

Prie kiekvieno skirtingo kampo α ir skirtingo aukščio H atliekami trys matavimai. Kadangi iš viso pasirinkti 5 skirtingi aukščiai H , o iš viso yra 55 (nuo -27° iki 27°) galimos kampo α padėties, tai iš viso atliekami 825 matavimai. Po 165 matavimus kiekvienam aukščiui.

3.1.1. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis $H=100$ mm

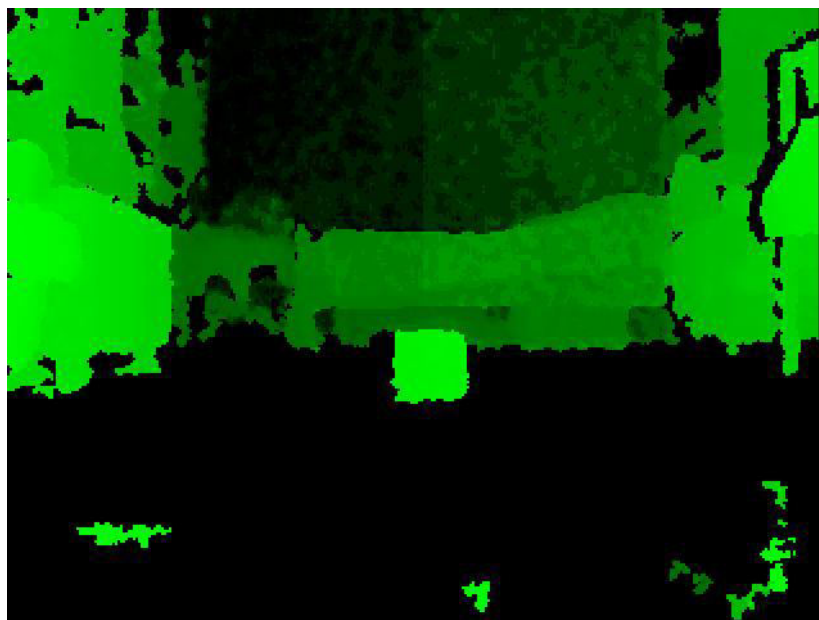
Matavimo rezultatai, kai aukštis $H=100$ mm, pateikiami 3.1 pav. Kiekvienas taškas atitinka trijų q matavimų prie to pačio kampo α ir aukščio H gylio vaizdo užpildymo vidurkį Q . Gylio vaizdo užpildymo Q vidurkis (165 matavimų prie aukščio $H=100$ mm) yra 53,55 %. Gylio vaizdo užpildymas Q ties mažiausiu kampu (-27°) yra vos virš 0 %. Tai reiškia, kad vaizdas neperteikia duomenų apie fiksuojamų taškų koordinatės. Fiksuojamas gylio vaizdas pateikiamas 3.2 pav. Taip yra todėl, kad tarp Kinect jutiklio ir fiksuojamų taškų (kurių dauguma priklauso grindų plokštumai) susidaro atstumas mažesnis nei 400 mm. Norint gerinti vaizdo užpildymą, reikia didinti kampą α , kad susidarytų didesni atstumai tarp fiksuojamų taškų ir jutiklio. Kai $\alpha=-15$, tai $Q=25$ %, t. y. taškų koordinatės fiksuojamos ketvirtidalyje gylio vaizdo. Daugiausiai taškų yra viršutinėje vaizdo dalyje, kadangi tarp ten esančių taškų ir jutiklio susidaro pakankamas atstumas. Kai $\alpha=0$, tai $Q=50$ %, t. y. pusę fiksuojamų taškų koordinatės yra žinomos. Didėjant kampui α , didėja ir minimalus atstumas d . Būtent ties $\alpha=0$, šis atstumas $d=417$ mm (žr. 2.4 lentelę), t. y. tampa didesnis nei 400 mm. Tai reikštų, kad teoriškai gylio vaizdo užpildymo vidurkis Q turėtų siekti 100 %, kadangi tarp minimalaus matuojamo atstumo d ir toliau esančių taškų susidaro didesnis nei 400 mm atstumas, bet apatinėje vaizdo dalyje esančių taškų koordinatės vis dar nėra fiksuojamos. Daugiausia šių taškų priklauso grindų plokštumai. Jeigu priešais jutiklį yra kliūtis, tai jai priklausančios taškai yra fiksuojami 3.3 pav. Jutiklis tinkamai išskiria kliūtį, kai kampas $\alpha=0^\circ$, nepaisant to, kad vaizde yra pakankamai daug (50 %) nulinių verčių. Kai $0^\circ < \alpha \leq 18^\circ$, vaizdo užpildymo vidurkis Q vis didėja, bet kartu didėja ir minimalus matuojamas atstumas d (žr. 1 priede). Kai $\alpha \geq 19^\circ$, Q vertė įsisotina ir toliau nebedidėja (svyruoja apie 94 %). Tačiau Kinect jutiklis nebefiksuoja vaizdo, esančio priešais jį. Taigi eksperimentų metu nustatyta, kad prie minimalaus matuojamo atstumo $d=417$ mm, kai $\alpha=0^\circ$, $Q=50$ %, Kinect jutiklis identifikuoja 130x130 mm kliūtį.



3.1 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=100$ mm



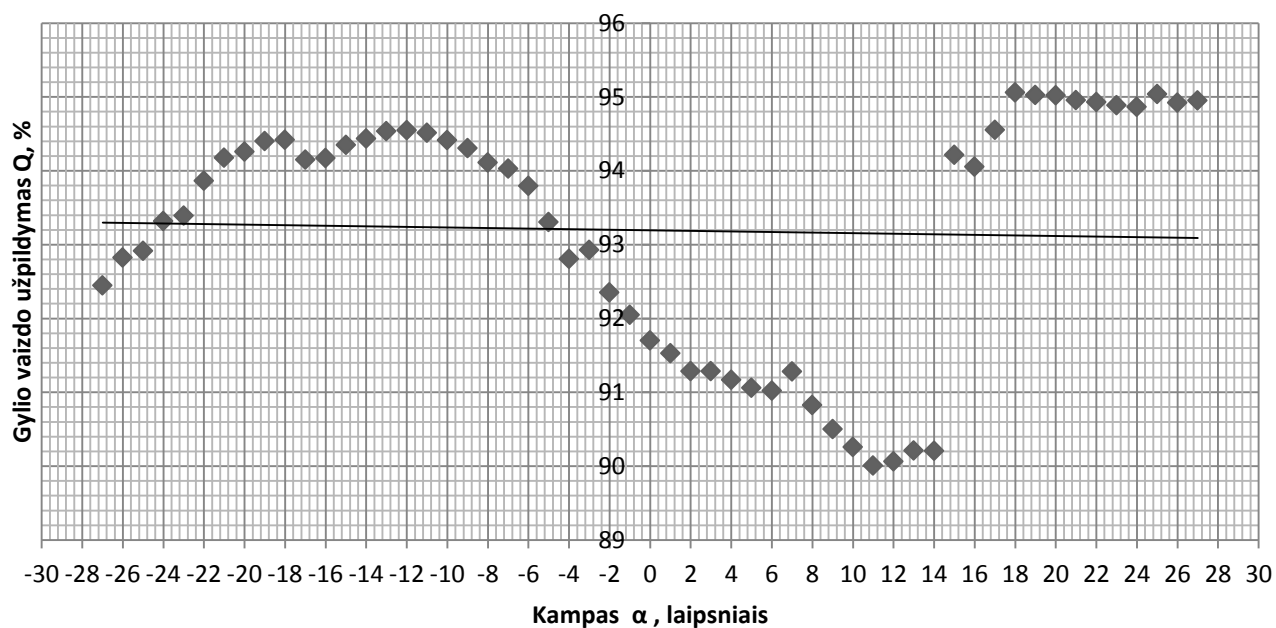
3.2 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=100$ mm, o $\alpha=-27^\circ$



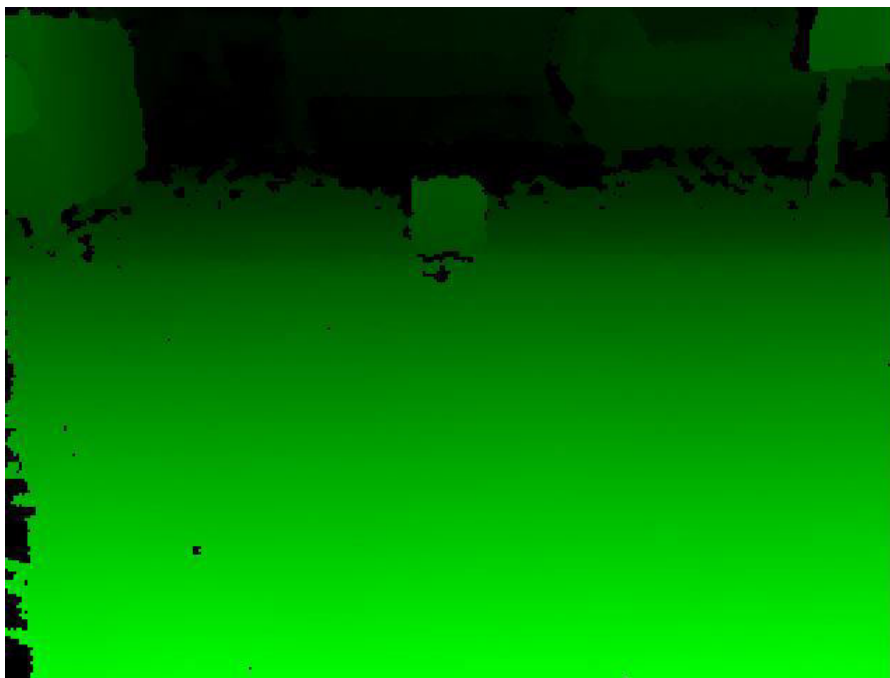
3.3 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=100$ mm, o $\alpha=0^\circ$

3.1.2. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis $H=300$ mm

Kai aukštis H padidėja 200 mm, tai gylio vaizdo užpildymas Q žymiai pagerėja 3.4 pav. Jei prie aukščio $H=100$ mm gylio vaizdo užpildymo Q visų matavimų vidurkis yra 53,55 %, tai, esant aukščiui $H=300$ mm, Q užpildymas yra 93,19 %. Didelis Q pokytis įvyksta ties $\alpha=15^\circ$. Tuomet α pasikeitus vienu laipsniu Q pasikeičia nuo 90 % iki 95 %. Kadangi užpildymas Q yra tenkinantis visame matavimų intervale, tai kampas α parenkamas pagal teoriškai apskaičiuotą minimalų atstumą d , kuris šiuo atveju $d=414$ mm, ties $\alpha=-20^\circ$. 3.5 pav. pateikiamas Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=300$ mm, o $\alpha=-20^\circ$.



3.4 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=300$ mm

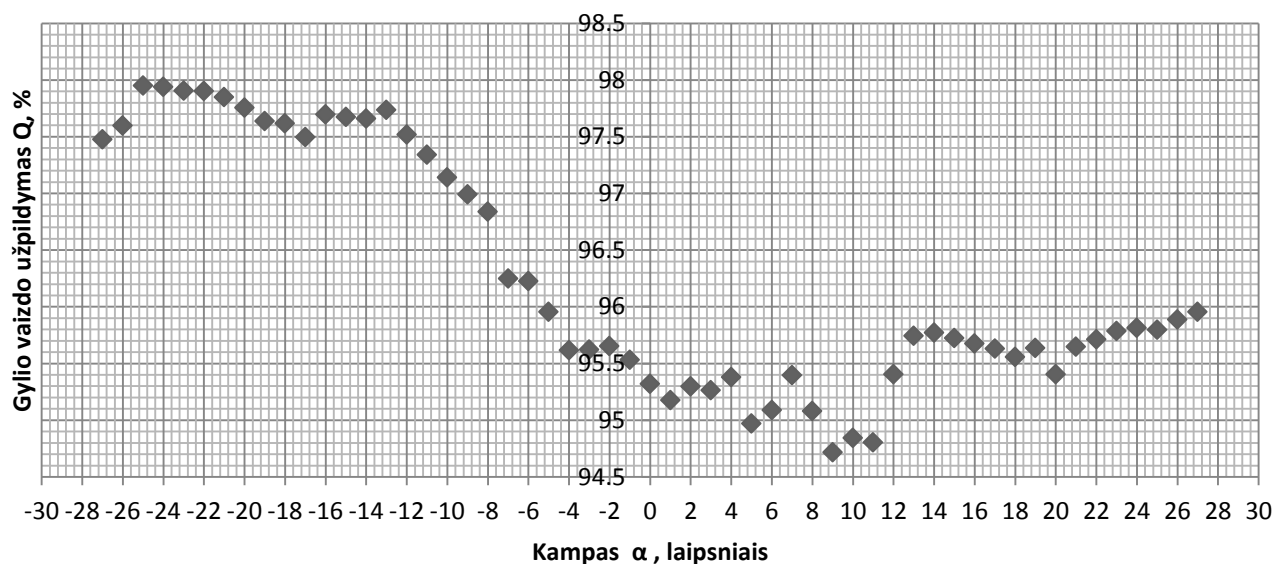


3.5 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=300$ mm, o $\alpha=-20^\circ$

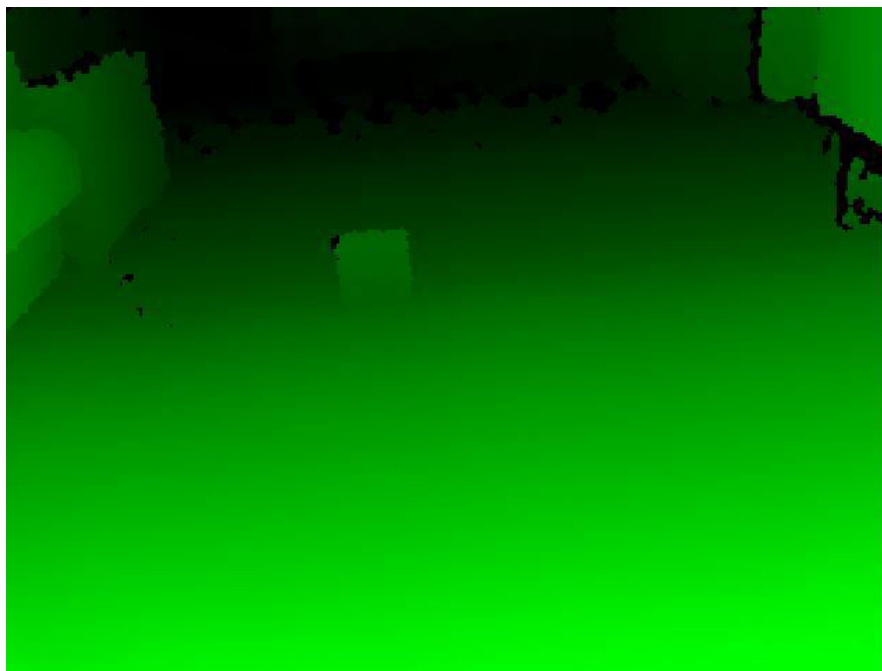
3.1.3. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis $H=600$ mm

Visų matavimų gylio vaizdo užpildymo Q, ties aukščiu $H=600$ mm, vidurkis yra 96,27 %, o tai 3,08 % geriau nei prie aukščio $H=300$ mm. Aukščiui H didėjant nuo 100 iki 600 mm, gylio vaizdo užpildymo Q vidurkis didėja. 3.6 pav. pateikiama gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo

α . Kadangi užpildymas Q yra tenkinantis visame matavimų intervale, tai kampas α parenkamas pagal teoriškai apskaičiuotą minimalų atstumą d , kuris šiuo atveju $d=594$ mm, ties $\alpha=-27^\circ$. 3.7 pav. pateikiamas Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=600$ mm, o $\alpha=-27^\circ$. Šiuo atveju minimalus matuojamas atstumas d yra 194 mm didesnis nei minimalus Kinect jutiklio fiksuojamas atstumas. Tai reiškia, kad kliūtis, esanti nuo roboto 400 mm iki 594 mm atstumu, nebus užfiksuota dėl didesnio jutiklio padėties aukščio H .



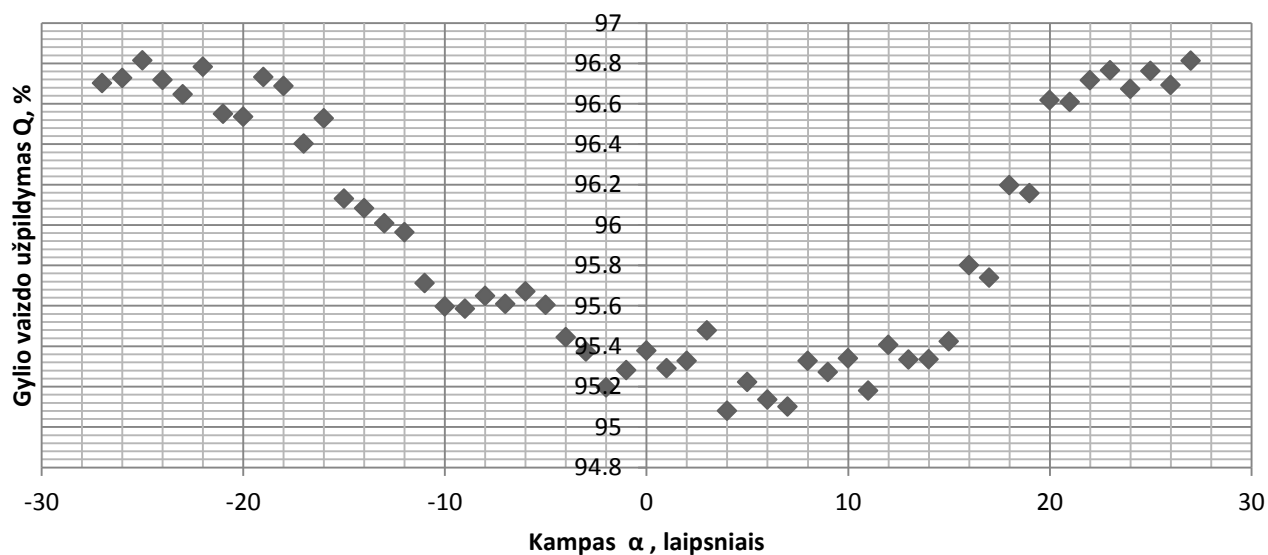
3.6 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai $H=600$ mm



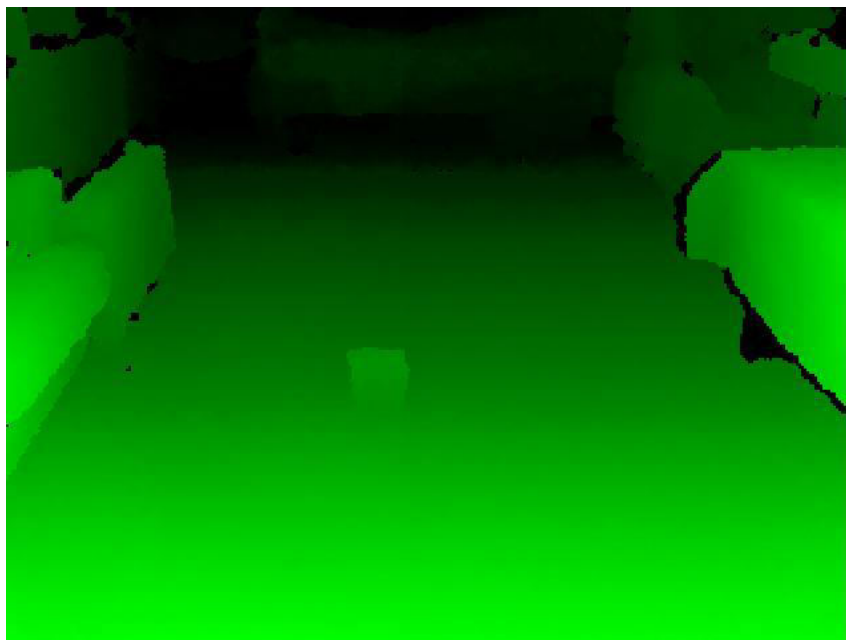
3.7 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet $H=600$ mm, o $\alpha=-27^\circ$

3.1.4. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=1000 mm

Visų matavimų gylio vaizdo užpildymo Q, ties aukščiu H=1000 mm, vidurkis yra 95,94 %. 3.8 pav. pateikiama gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α . Kadangi užpildymas Q yra tenkinantis visame matavimų intervale, tai kampas α parenkamas pagal teoriškai apskaičiuotą minimalų atstumą d, kuris šiuo atveju d=954 mm, ties $\alpha=-27^\circ$. 3.9 pav. pateikiamas Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet H=1000 mm, o $\alpha=-27^\circ$. Šiuo atveju minimalus matuojamas atstumas d yra 554 mm didesnis nei minimalus galimas. Tai reiškia, kad kliūtis, esanti nuo roboto 400 mm iki 954 mm atstumu, nebus užfiksuota dėl didesnio jutiklio padėties aukščio H.



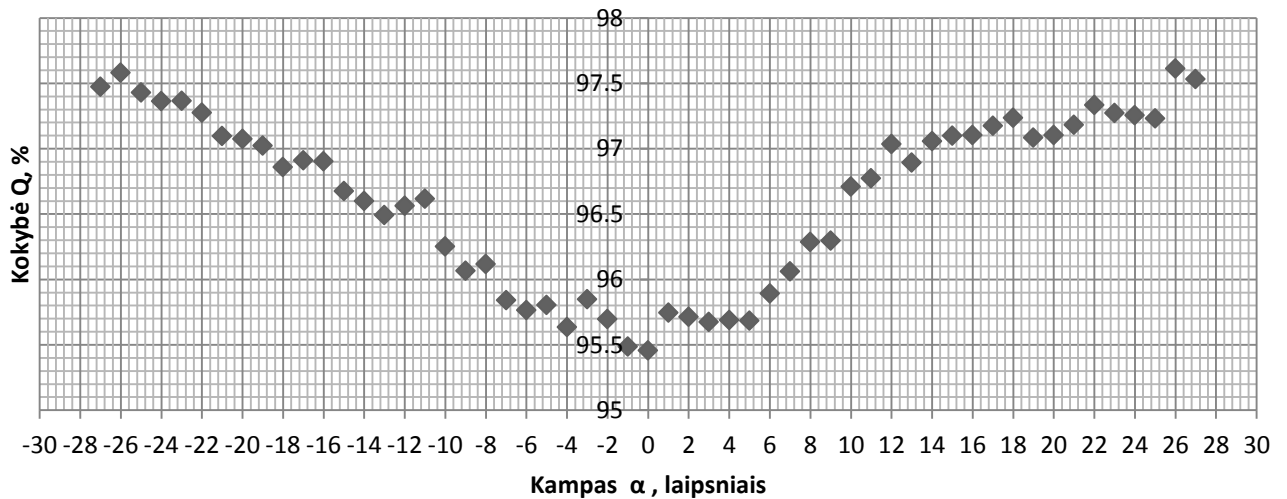
3.8 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai H=1000 mm



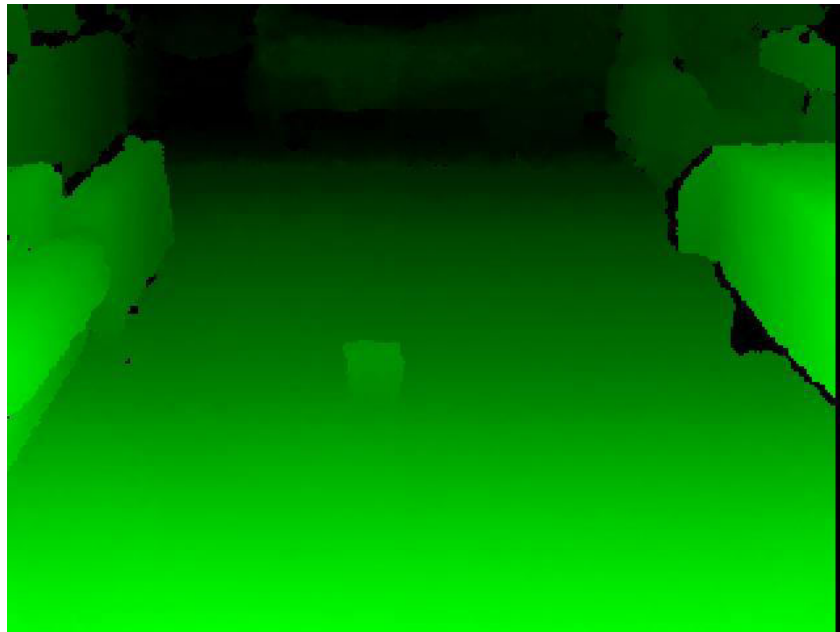
3.9 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet H=1000 mm, o $\alpha=-27^\circ$

3.1.5. Gylio vaizdo užpildymo Q rezultatai, kai matavimo aukštis H=1500 mm

Visų matavimų gylio vaizdo užpildymo Q, ties aukščiu H=1500 mm, vidurkis yra 96,64 %. 3.10 pav. pateikiama gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α . Kadangi užpildymas Q yra tenkinantis visame matavimų intervale, tai kampas α parenkamas pagal teoriškai apskaičiuotą minimalų atstumą d, kuris šiuo atveju d=1405 mm, ties $\alpha=-27^\circ$. 3.11 pav. pateikiamas Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet H=1500 mm, o $\alpha=-27^\circ$. Šiuo atveju minimalus matuojamas atstumas d net 1005 mm didesnis nei minimalus fiksuojamas atstumas. Tai reiškia, kad kliūtis, esanti nuo roboto 400 mm iki 1405 mm, nebus užfiksuota jutiklio dėl didesnio jutiklio padėties aukščio H.



3.10 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybė nuo kampo α , kai H=1500 mm

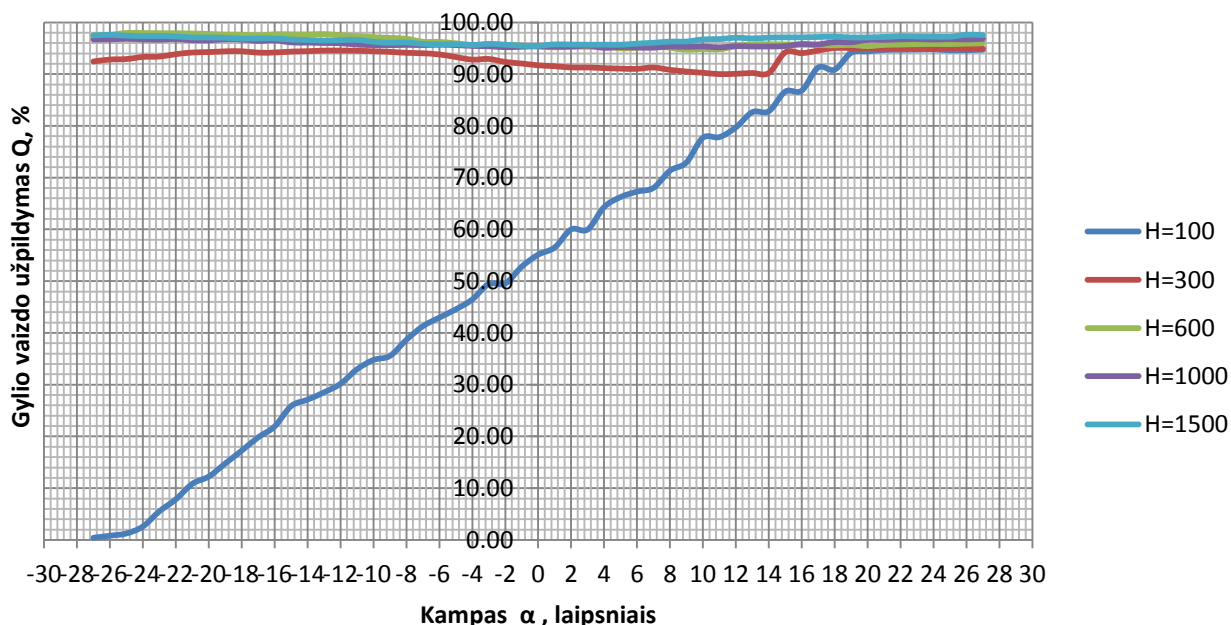


3.11 pav. Kinect jutiklio fiksuojamas gylio vaizdas, kuomet H=1500 mm, o $\alpha=-27^\circ$

3.1.7. Gylio vaizdo užpildymo palyginimas skirtingo aukščio robotams

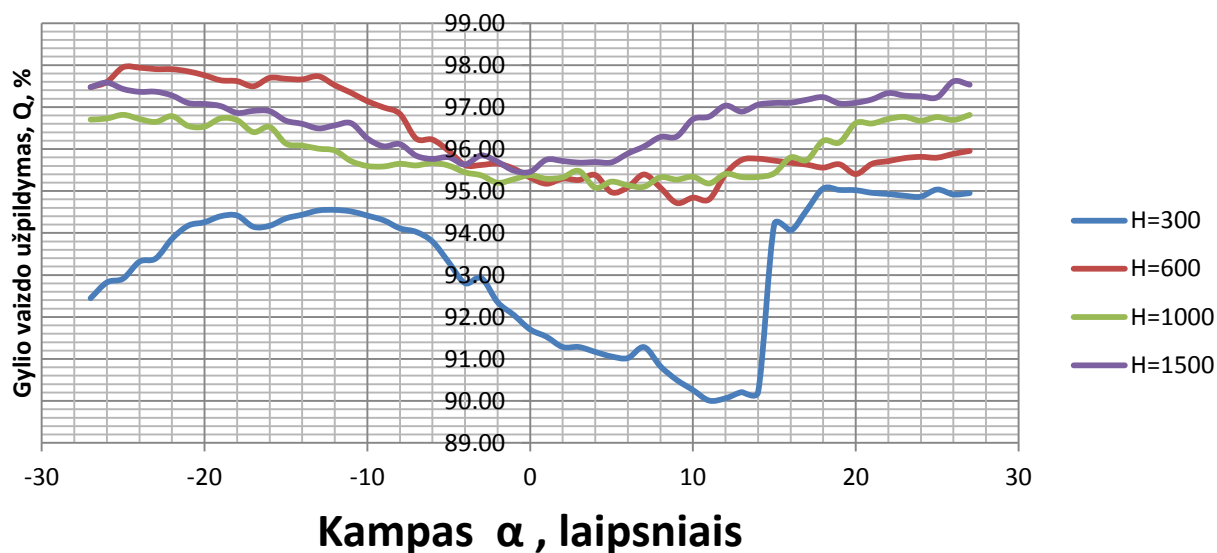
Kaip jau minėta, gylio vaizdo užpildymas Q priklauso nuo aukščio H ir kampo α . 3.12 pav. pateiktos visų penkių aukščių H gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α . Labiausiai išsiskiria aukštis $H=100$, nes šiuo atveju, didėjant kampui α , gylio vaizdo užpildymo vidurkis Q kinta nuo 0 % iki 95 %. Kiti aukščiai H taip neišsiskiria.

Kai kuriais atvejais didesnis nulinių verčių skaičius yra privalumas. Pavyzdžiui 3.3 pav. pateiktame paveiksle, kuomet $H=100$ mm, priešais jutiklį esanti dėžutė matosi ryškiai ir turi didelį kontrastą. Naudojant automatinį objektų atpažinimą vaizde, tokia fone esantį objektą būtų daug lengviau išskirti nei 3.7 pav. pateiktame vaizde. Kuo aukštis H didesnis, tuo mažesnis skirtumas tarp grindų ir kliūties. Todėl automatinis objektų atpažinimas tokį objektą sunkiai išskirtų.



3.12 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α

3.13 pav. labiausiai išsiskiria $H=300$ matavimų rezultatai, kadangi jie įgija didesnes Q vertes bei kinta kitaip nei kiti aukščiai H . Kiti aukščiai nuo $\alpha=-27^\circ$ mažėja iki maždaug $\alpha\approx 5^\circ$. Kai $H=300$, nuo $\alpha=-27^\circ$ Q didėja, nuo $\alpha=-12^\circ$ mažėja, kol nuo $\alpha=15^\circ$ staigiai padidėja, o nuo $\alpha=18^\circ$ nekinta.



3.13 pav. Gylio vaizdo užpildymo Q priklausomybės nuo kampo α (be aukščio $H=100$ mm)

Jei reiktų atrinkti, kokiems robotams naudoti Kinect jutiklį vien remiantis gylio vaizdo užpildymu Q , tai robotų aukštis turėtų būti ne žemesnis nei 300 mm. Grindų robotams, kurių aukštis svyruoja apie 100 mm, Kinect jutiklis nesuteiks pakankamai duomenų apie grindų plokštumą, todėl robotas negalės tinkamai orientuotis. Aukštesniems nei 1000 mm robotams vien Kinect jutiklio pasvyrimo kampo neužtenka, jei reikia, kad būtų fiksuojamos zonos, esančios priešais robotą mažesniu nei 954 mm atstumu. Tokie robotai turėtų papildomai mažinti Kinect jutiklio pasvyrimo kampą.

3.2. Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis

Matavimai atliekami nuo minimalus atstumo d (žr. 2.4 lentelę) iki 3700 mm. Prie aukščių $H=100$ mm ir $H=600$ mm atliekama po 32 matavimus (nuo 600 mm iki 3700 mm), prie aukščio $H=300$ mm po 33 (nuo 500 mm iki 3700 mm), $H=1000$ mm – 28 (nuo 1000 mm iki 3700 mm), $H=1500$ mm – 23 matavimus (nuo 1500 mm iki 3700 mm). Iš viso atliekami 148 matavimai. Matavimo metu gaunami trys matuojamieji dydžiai: aukštis h_k , plotis w ir gylis z . Matavimai prie visų aukščių H ir kiekvienos kampinės padėties α atliekami po du kartus. Todėl iš viso atlikti 296 matavimai, o rezultatuose pateikiamos tiksliausios matavimų imtys.

Kinect jutiklis aukščio h_k ir pločio w vertes grąžina 0,1 mm tikslumu, o gylio z reikšmę 1 mm tikslumu. Kliūtis matmenys išmatuoti slankmačiu, kurio tikslumas 0,1 mm, o gylio z reikšmė apskaičiuota teoriškai, o skaičiavimams reikalingi atstumai išmatuoti matavimo rulete, kurios tikslumas 1 mm.

Norint nustatyti matavimų patikimumą, reikia mokėti įvertinti galimą netikslumų įtaką matavimo rezultatams. **Matavimo neapibrėžtis** ir yra galimo netikslumo įvertis, pateiktas drauge su matavimo rezultatu. Neapibrėžties sąvoka matavimuose pradėta naudoti palyginti neseniai. Formaliai ji apibrėžiama taip: matavimo neapibrėžtis yra su matavimo rezultatu susijęs parametras, apibūdinantis matuojamąjį dydį nusakančių verčių sritį [22].

Matavimo netikslumai gali atsirasti dėl:

- aukščio H . aukštis H , kuriame yra Kinect jutiklis, keičiamas keičiant stovo, ant kurio jis pastatytas, aukštį. Nors stovas reguliuojamas kuo tiksliau, tačiau gali atsirasti milimetrų eilės paklaidos.
- atstumo s . Netikslumai gali atsirasti dviejose vietose. Pirmoji – tai Kinect jutiklio ir ruletės pradžios taško nesutapimas. Antroji - tam tikros ruletės vertės ir kliūties paviršiaus nesutapimas.
- dėl gaunamo gylio vaizdo karpytumo. Esant dideliame kliūties kraštinių karpytumui, sunku tiksliai pažymėti tikrąsias kliūties kraštines.

Kliūties aukščio h_k matavimo neapibrėžtis apskaičiuojama pagal (3.1) formulę, kur h_k Kinect jutikliu išmatuotas kliūties aukštis milimetrais. Jei pagal (3.1) skaičiuojamas skirtumas yra neigiamas, tai išmatuotas kliūties aukščio rezultatas yra mažesnis nei realus kliūties aukštis, o jei teigiamas, tai išmatuotas kliūties aukščio rezultatas yra didesnis.

$$130 - h_k \quad (3.1)$$

Kliūties pločio w matavimo neapibrėžtis apskaičiuojama pagal (3.2) formulę, kur w Kinect jutikliu išmatuotas kliūties plotis milimetrais. Jei pagal (3.2) formulę skaičiuojamas skirtumas yra neigiamas, tai išmatuotas kliūties pločio rezultatas yra mažesnis nei realus kliūties aukštis, o jei teigiamas, tai išmatuotas kliūties pločio rezultatas yra didesnis.

$$130 - w \quad (3.2)$$

Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtis apskaičiuojama pagal (3.3) formulę, kur z Kinect jutikliu išmatuotas kliūties plotis milimetrais, o z_T - teoriškai apskaičiuotas atstumas. Jei pagal (3.3) formulę skaičiuojamas skirtumas yra neigiamas, tai jutiklis įvertina, kad kliūtis yra arčiau negu yra iš tiesų, o jei minimas skirtumas teigiamas, tai jutiklis įvertina, kad kliūtis yra toliau negu tikrasis atstumas.

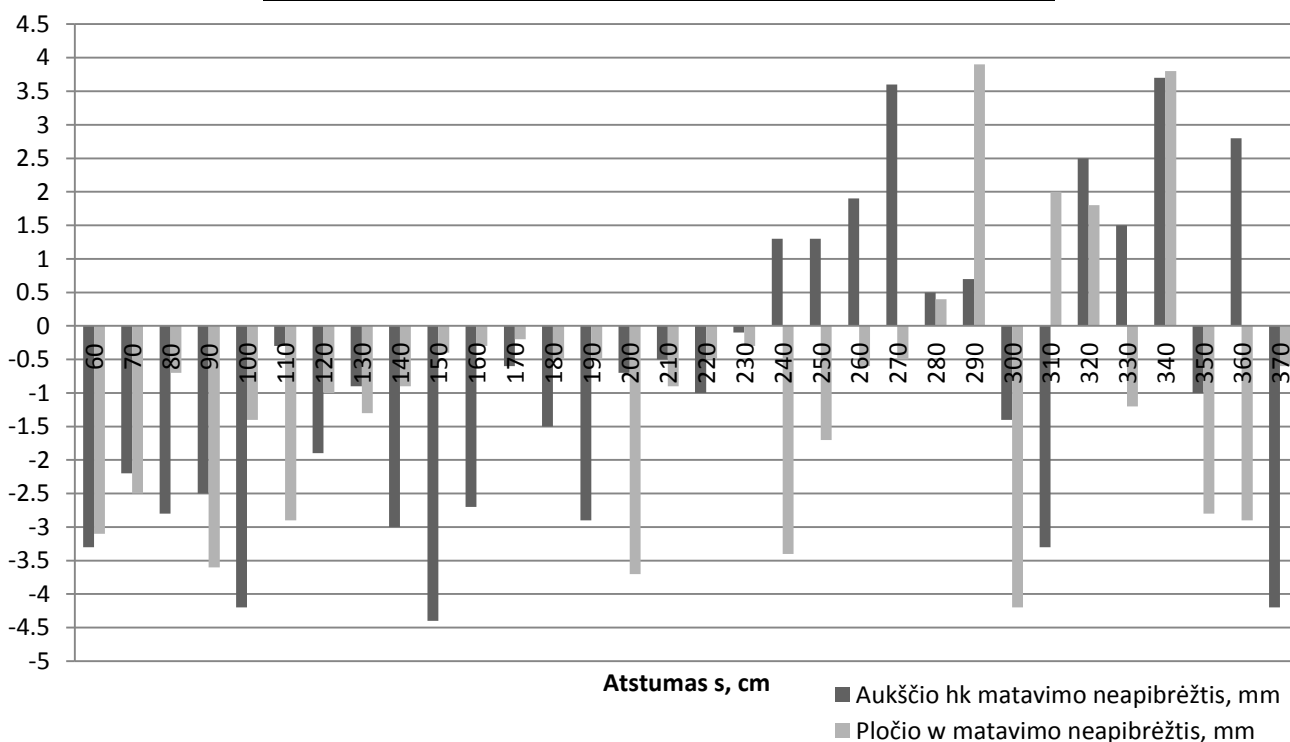
$$z_T - z \quad (3.3)$$

3.2.1. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=100$ mm

Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys pateiktos 3.14 pav. Tiek aukščio h_k , tiek pločio w matavimo neapibrėžtys neviršija 4,4 mm. Kai atstumas $s \leq 230$ mm, išmatuoti kliūties matmenys yra mažesni nei realūs. Kai atstumas $s > 230$ mm, išmatuoti kliūties matmenys yra tiek mažesni, tiek didesni nei realūs. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

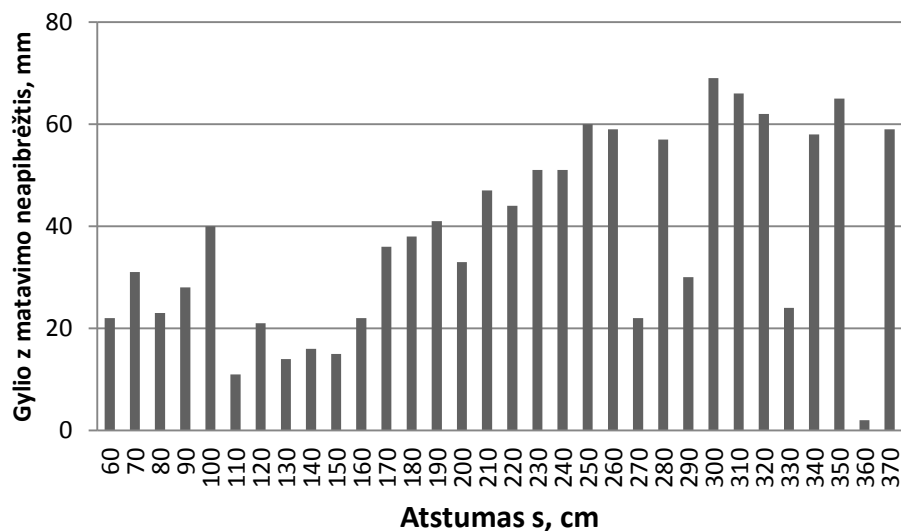
3.1 lentelė
Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=100$ mm

	h_k	w	z
Matavimo neapibrėžties vidurkis, mm	-0,67	-0,80	38,03
Matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis, mm	2,29	2,04	18,82
Matavimo neapibrėžties minimali reikšmė, mm	-4,40	-4,20	2,00
Matavimo neapibrėžties maksimali reikšmė, mm	3,70	3,90	69,00



3.14 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=100$ mm

Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s , pateiktos 3.15 pav. Matavimo rezultatai visuose matavimo taškuose yra didesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Mažiausia neapibrėžtis yra, kai $110 \text{ mm} \leq s \leq 160 \text{ mm}$. Kai $s \geq 230 \text{ mm}$, gylis z matavimo neapibrėžties vidutiniškai siekia 50-60 mm. Gylis z matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.1 lentelėje.



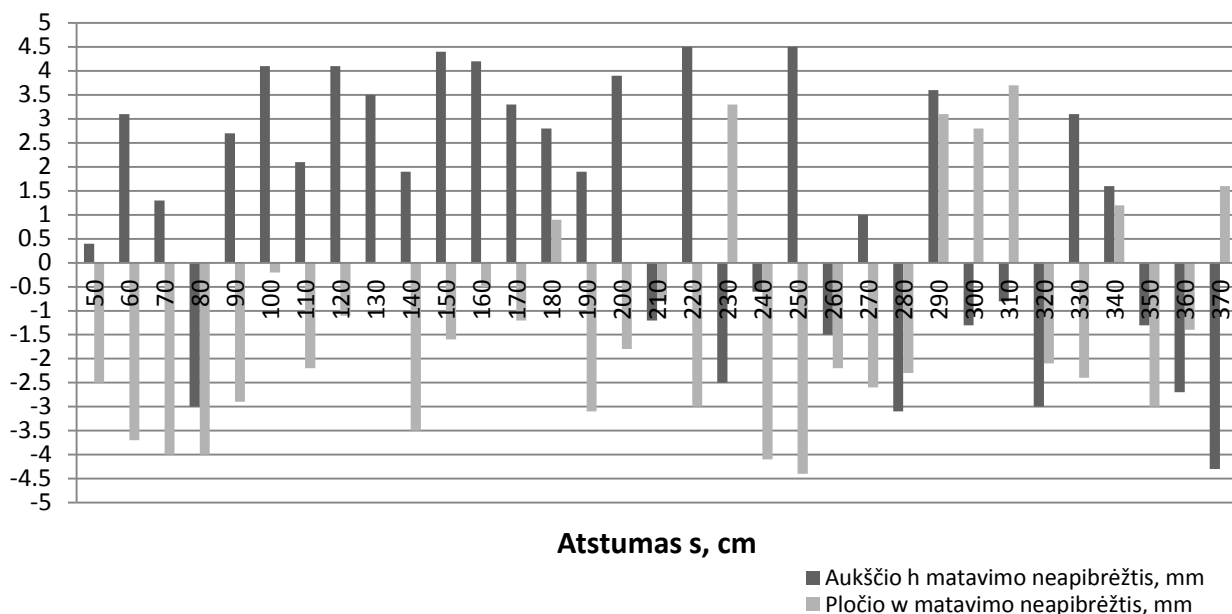
3.15 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=100 \text{ mm}$

3.2.2. Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=300 \text{ mm}$

Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, kai aukštis $H=300 \text{ mm}$, pateiktos 3.16 pav. Tiek aukščio h_k , tiek pločio w matavimo neapibrėžtys neviršija 4,5 mm. Kai atstumas $s < 230 \text{ mm}$, tai plotis w yra mažesnis nei realus kliūtis plotis, o aukščio h_k vertės yra didesnės nei realus kliūtis aukštis. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.2 lentelėje.

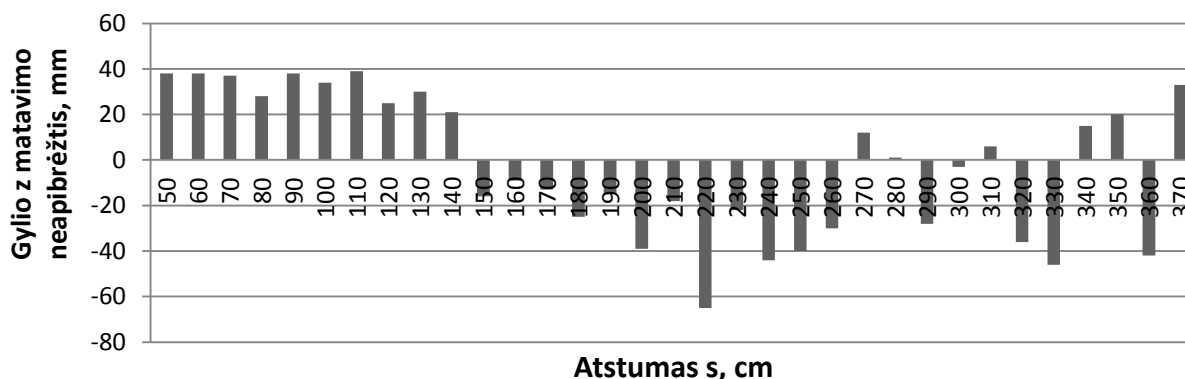
3.2 lentelė
Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=300 \text{ mm}$

	h_k	w	z
Matavimo neapibrėžties vidurkis, mm	1,11	-1,33	-2,30
Matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis, mm	2,74	2,29	31,21
Matavimo neapibrėžties minimali reikšmė, mm	-4,30	-4,40	-65,00
Matavimo neapibrėžties maksimali reikšmė, mm	4,50	3,70	39,00



3.16 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=300$ mm

Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s , pateiktos 3.17 pav. Matavimo rezultatai, kai $s < 150$ mm, yra didesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Kai $150 \text{ mm} \leq s \leq 260$ mm, matavimo rezultatai yra mažesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Kai $s > 260$ mm, matavimo rezultatai yra tiek didesni, tiek mažesni. Gylio z matavimo neapibrėžtis neviršija 65 mm ribos. Gylio z matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.2 lentelėje.



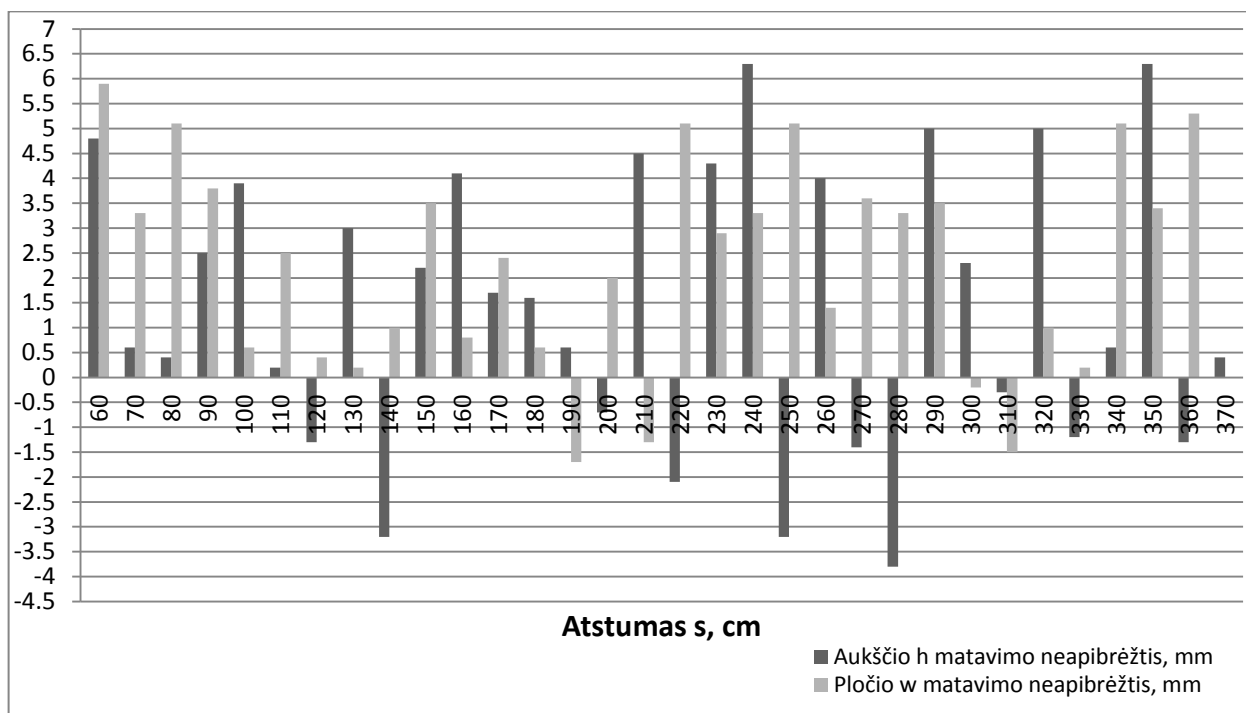
3.17 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=300$ mm

3.2.3. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=600$ mm

Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, kai aukštis $H=600$ mm, pateiktos 3.18 pav. Šiuo atveju matavimo neapibrėžtis yra didesnė nei prie aukščių $H=100$ mm ir $H=300$ mm ir siekia iki 6,3 mm. Išmatuotas aukštis h_k ir plotis w beveik visais atvejais yra didesni nei realūs matmenys. Atvejai, kuomet matavimo rezultatai yra mažesni nei realūs matmenys, dažniausiai yra tarp aukščio h_k matavimo rezultatų, kurių matavimo neapibrėžtis siekdavo iki 4 mm. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.3 lentelėje.

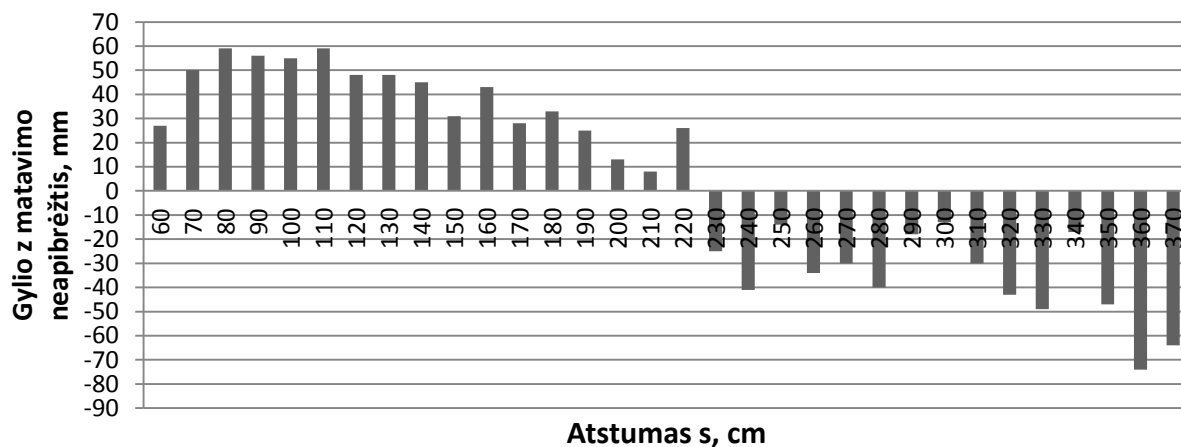
3.3 lentelė
Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=600$ mm

	h_k	w	z
Matavimo neapibrėžties vidurkis, mm	1,43	2,21	5,12
Matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis, mm	2,85	2,16	41,11
Matavimo neapibrėžties minimali reikšmė, mm	-3,80	-1,70	-74,00
Matavimo neapibrėžties maksimali reikšmė, mm	6,30	5,90	59,00



3.18 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=600$ mm

Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s , pateiktos 3.19 pav. Matavimo rezultatai, kai $s < 230$ mm, yra didesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Kai $s \geq 230$ mm, matavimo rezultatai yra mažesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Gylio z matavimo neapibrėžtis šiuo atveju yra didesnė. Ji neviršija 75 mm ribos. Gylio z matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.3 lentelėje.



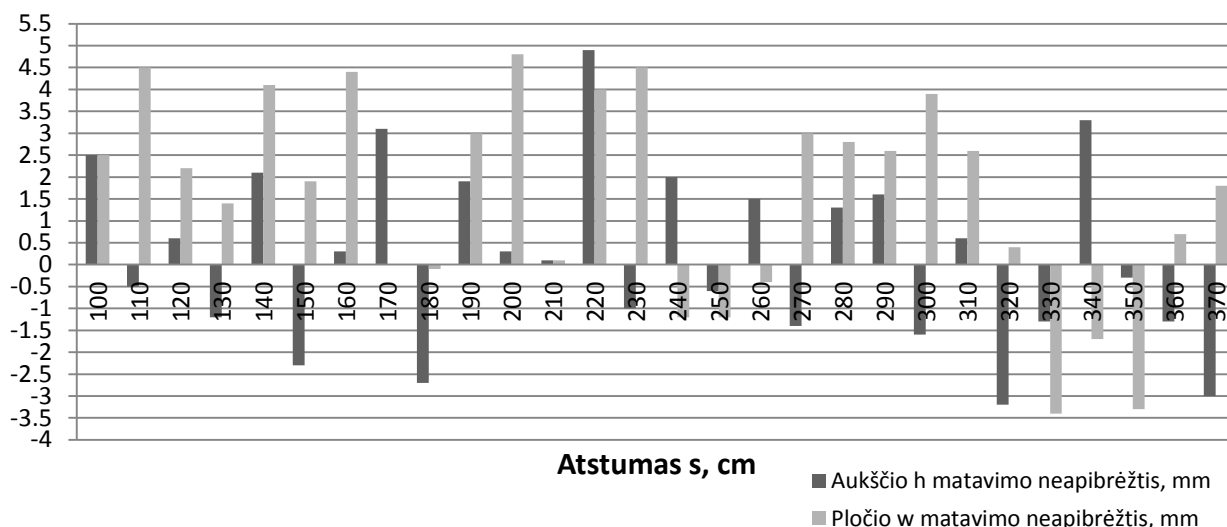
3.19 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=600$ mm

3.2.4. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=1000$ mm

Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, kai aukštis $H=1000$ mm, pateiktos 3.20 pav. Šiuo atveju matavimo neapibrėžtys siekia iki 4,9 mm. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.4 lentelėje.

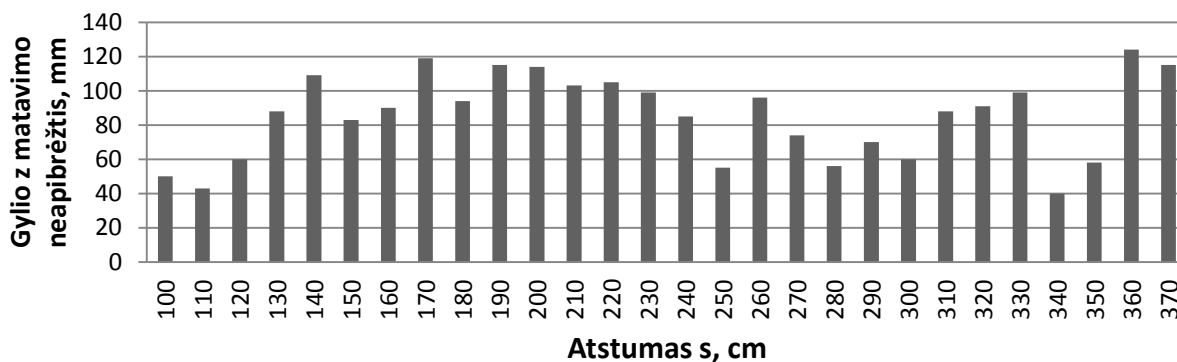
3.4 lentelė
Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=1000$ mm

	h_k	W	z
Matavimo neapibrėžties vidurkis, mm	0,20	1,57	85,11
Matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis, mm	2,04	2,36	24,63
Matavimo neapibrėžties minimali reikšmė, mm	-3,20	-3,40	40,00
Matavimo neapibrėžties maksimali reikšmė, mm	4,90	4,80	124,00



3.20 pav. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1000$ mm

Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s , pateiktos 3.21 pav. Matavimo rezultatai visuose matavimo taškuose yra didesni nei turėtų būtų lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Matavimo neapibrėžtis siekia iki 124 mm. Gylio z matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.1 lentelėje.



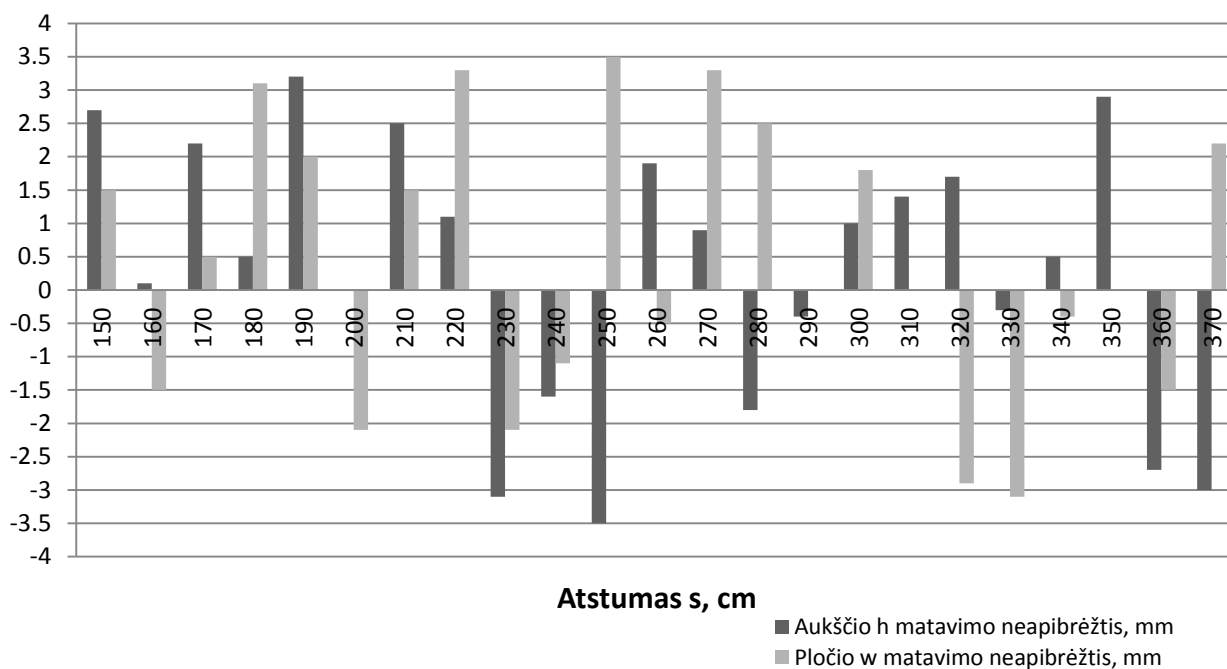
3.21 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1000$ mm

3.2.5. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžtis, kai $H=1500$ mm

Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, kai aukštis $H=1500$ mm, pateiktos 3.22 pav. Šiuo atveju matavimo neapibrėžtis yra viena mažiausių ir siekia iki 3,5 mm. Kliūties aukščio h_k ir pločio w matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.5 lentelėje.

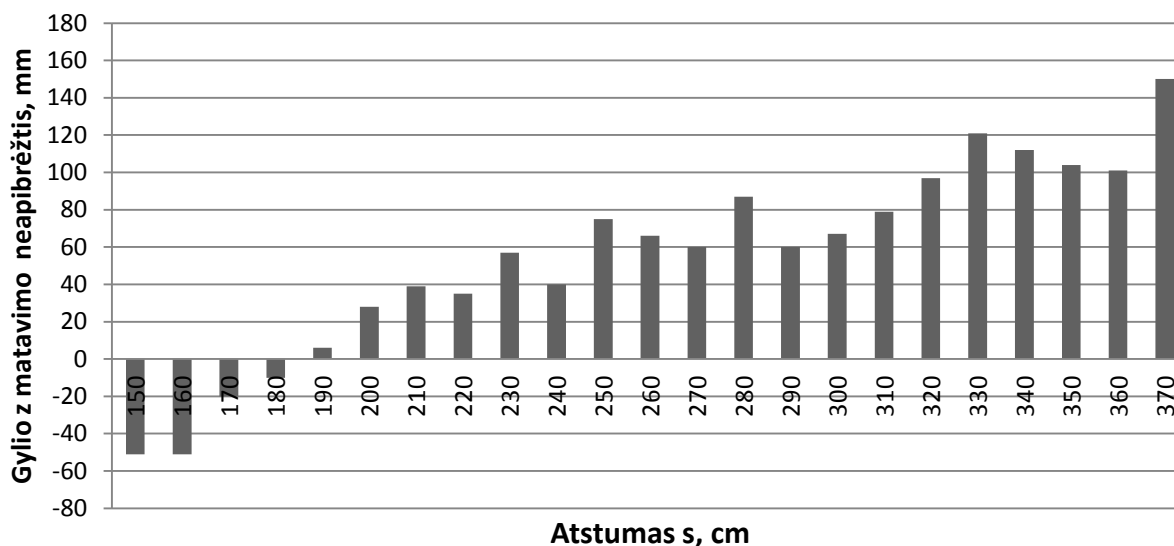
3.5 lentelė
Matavimo neapibrėžties statistiniai duomenys, kai $H=1500$ mm

	h_k	w	z
Matavimo neapibrėžties vidurkis, mm	0,27	0,43	54,43
Matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis, mm	2,04	2,08	52,90
Matavimo neapibrėžties minimali reikšmė, mm	-3,50	-3,10	-51,00
Matavimo neapibrėžties maksimali reikšmė, mm	3,20	3,50	150,00



3.22 pav. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1500$ mm

Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtys, esant skirtingiems atstumams s, pateiktos 3.23 pav. Matavimo rezultatai, kai $s < 190$, yra mažesni nei turėtų būti lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Kai $s \geq 190$, matavimo rezultatai yra didesni nei turėtų būti lyginant su teoriškai apskaičiuotu atstumu. Gylio z matavimo neapibrėžtis šiuo atveju yra didžiausia ir siekia iki 150 mm. Gylio z matavimų neapibrėžties statistiniai duomenys pateikti 3.5 lentelėje.

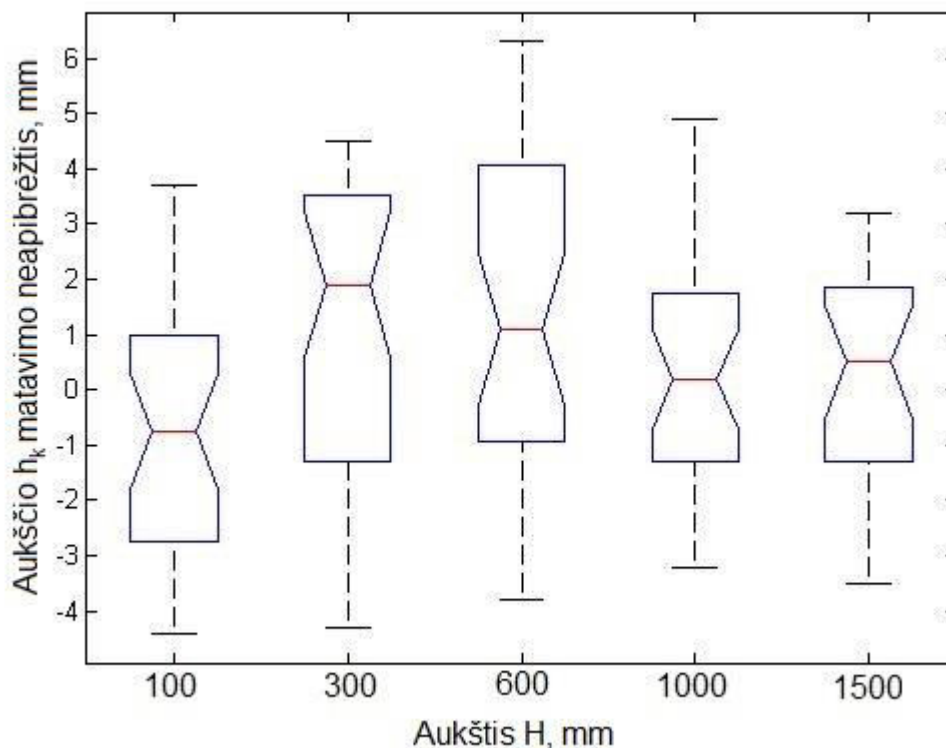


3.23 pav. Atstumo iki kliūties z matavimo neapibrėžtis, esant skirtingiems atstumams s prie aukščio $H=1500$ mm

3.3. Atstumo iki kliūties bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžties dispersinė analizė

3.3.1. Aukščio h_k matavimo neapibrėžties dispersinė analizė

Atliekama vieno faktoriaus dispersinė analizė su aukščio h_k matavimų neapibrėžties duomenimis. Pasirenkamas reikšmingumo lygmuo 0,05. 3.24 pav. pateiktos minimalios ir maksimalios užfiksuotos reikšmės (juodos linijos), viršutiniai ir apatiniai kvartilai (mėlynos linijos) ir vidurkiai (raudona linija). Aukščio h_k matavimo neapibrėžtis svyruoja nuo -4,4 mm, kai aukštis $H=100$ mm, iki 6,3 mm, kai aukštis $H=600$ mm. Mažiausia matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį yra ties aukščiais $H=1000$ mm ir $H=1500$ mm, o didžiausia ties aukščiais $H=300$ mm ir $H=600$ mm. Kai $H=100$ mm, aukščio h_k matavimo neapibrėžties vidurkis yra neigiamas. Tai reiškia, kad ties šiuo aukščiu išmatuoti kliūties aukščiai h_k dažniau yra mažesni nei realus kliūties aukštis. Prie visų kitų aukščių vidurkiai yra teigiami. Kliūties aukščio h_k matavimo rezultatų vidurkis 129,26 mm.

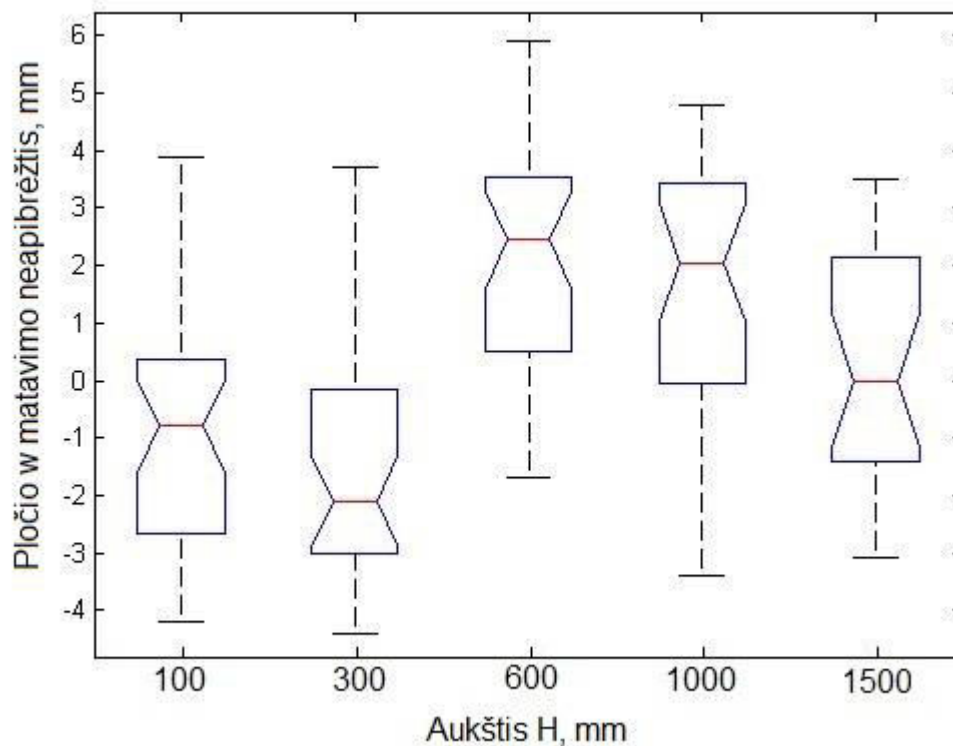


3.24 pav. Aukščio h_k matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį

Dispersinės analizės metu nustatyta tikimybė, kad visi vidurkiai lygūs, yra 0,0074. Tai yra mažiau nei pasirinktas reikšmingumo lygmuo 0,05. Tai, kad vidurkiai nėra lygūs, puikiai atsispindi ir 3.24 pav. Kliūtis aukščio h_k matavimo neapibrėžties imtys prie skirtingų aukščių H yra skirtingos.

3.3.2. Pločio w matavimo neapibrėžties dispersinė analizė

Atliekama vieno faktoriaus dispersinė analizė su pločio w matavimo neapibrėžties duomenimis. Pasirenkamas reikšmingumo lygmuo 0,05. 3.25 pav. pateiktos minimalios ir maksimalios užfiksuotos reikšmės (juodos linijos), viršutiniai ir apatiniai kvartiliai (mėlynos linijos) ir vidurkiai (raudona linija). Pločio w matavimo neapibrėžtis svyruoja nuo -4,4 mm, kai aukštis $H=300$ mm, iki 5,9 mm, kai aukštis $H=600$ mm. Ties aukščiais, mažesniais nei 600 mm, vidurkiai yra neigiami, o ties lygiais ir didesniais nei 600 mm – teigiami. Pločio w matavimo rezultatų vidurkis 128,7 mm.

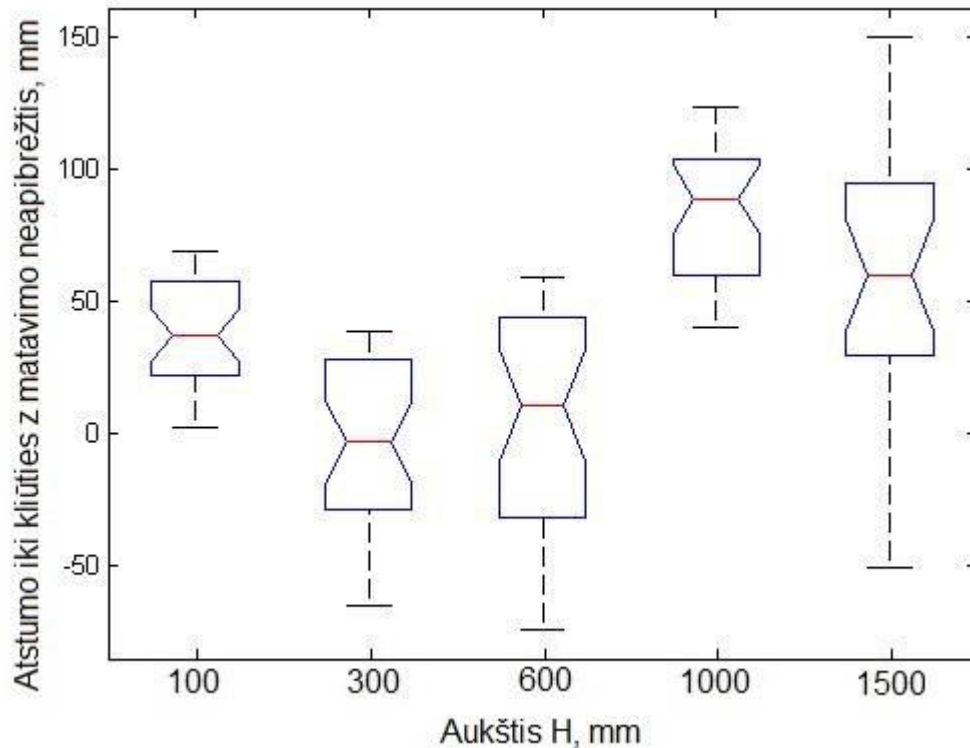


3.25 pav. Pločio w matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį

Dispersinės analizės metu nustatyta tikimybė, kad visi vidurkiai lygūs, yra $2,94 \cdot 10^{-10}$. Tai yra daug mažiau nei pasirinktas reikšmingumo lygmuo 0,05. Taip pat tai yra daug mažiau nei aukščio h_k matavimo neapibrėžties dispersinės analizės metu nustatyta tikimybė. Todėl pločio w matavimo neapibrėžties imtys yra reikšmingai skirtingos. Prie kiekvieno skirtingo aukščio H, pločio w matavimo neapibrėžtį reikia įvertinti atskirai.

3.3.3. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties dispersinė analizė

Atliekama vieno faktoriaus dispersinė analizė su atstumo iki kliūtis z neapibrėžties duomenimis. Pasirenkamas reikšmingumo lygmuo 0,05. 3.26 pav. pateiktos minimalios ir maksimalios užfiksuotos reikšmės (juodos linijos), viršutiniai ir apatiniai kvartilai (mėlynos linijos) ir vidurkiai (raudona linija). Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtis svyruoja nuo -74 mm, kai aukštis H=600 mm iki 150 mm, kai aukštis H=1500 mm. Taip pat prie minėtų aukščių yra ir didžiausia atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį. Mažiausia sklaida yra ties aukščiais H=100 mm ir H=1000 mm. Ties visais aukščiais, išskyrus aukštį H=300 mm, vidurkiai yra teigiami. Tai reiškia, kad dažniausiai įvertinamas atstumas iki kliūtis z yra didesnis nei realus atstumas. Atstumas iki kliūtis z svyravo nuo 600 mm iki 4200 mm, priklausomai nuo aukščio H ir atstumo s.

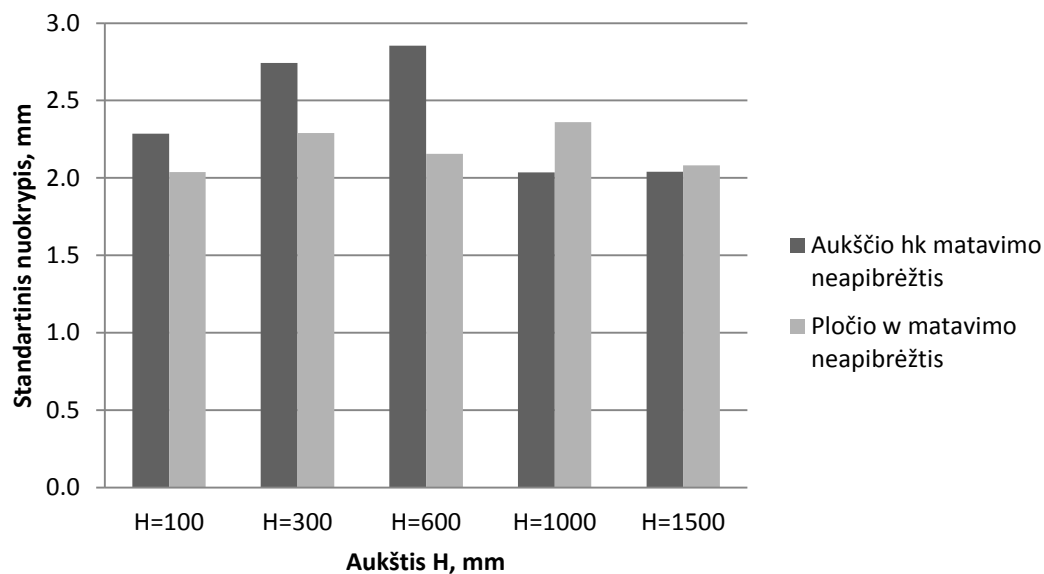


3.26 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties sklaida apie vidurkį

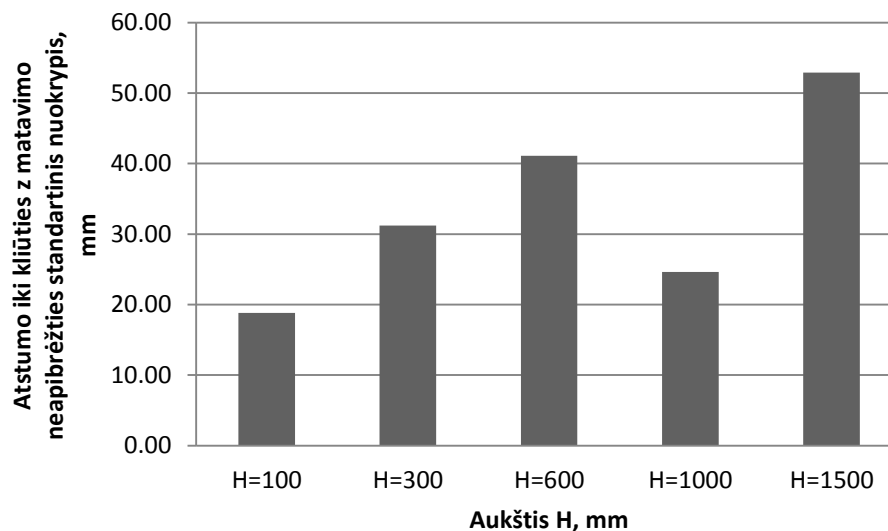
Dispersinės analizės metu nustatyta, kad tikimybė, jog visi vidurkiai lygūs yra $3,49 \cdot 10^{-19}$. Tai yra daug mažiau nei pasirinktas reikšmingumo lygmuo 0,05. Taip pat, tai yra daug mažiau nei aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžties dispersinės analizės metu nustatyta tikimybė. Atstumo iki kliūtis z vidurkiai yra itin skirtingi. Todėl prie kiekvieno aukščio H atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtis turi būti įvertinama atskirai.

3.4. Atstumo iki kliūtis bei jos aukščio ir pločio matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis

Kliūtis aukščio h_k ir pločio w standartiniai nuokrypiai prie visų penkių aukščių H svyruoja nuo 2 iki 3 mm 3.27 pav. Didžiausi kliūtis aukščio h_k matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai yra ties aukščiais $H=300$ mm ir $H=600$ mm ir viršija 2,5 mm ribą. 3.28 pav. Pateikti atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai. Standartinis nuokrypis, didėjant aukščiui, didėja, tačiau ties aukščiu $H=1000$ mm jis staiga sumažėja beveik 20 mm lyginant su prieš tai matuotu aukščiu $H=600$ mm. Kai aukštis $H=1500$ mm, atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžtis staiga vėl padidėja iki 53 mm. Tai reikštų, kad ties aukščiu $H=1000$ mm, gaunami patikimiausi atstumo iki kliūtis z matavimo rezultatai, o ties aukščiu $H=1500$ mm nepatikimiausi.



3.27 pav. Kliūtis aukščio h_k ir pločio w matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai



3.28 pav. Atstumo iki kliūtis z matavimo neapibrėžties standartiniai nuokrypiai

Remiantis Pitagoro teorema (2.7 formule), jei vienas iš trikampio statinių (aukštis H pasikeičia nuo 100 mm iki 1500 mm) padidėja 15 kartų, o kitas statinis išlieka pastovaus dydžio (atstumas s, tarkime $s=1500$ mm, t. y. minimalus matuojamas atstumas d prie aukščio $H=1500$ mm), tai trikampio įžambinė padidėja tik 1,4 karto. Didėjant atstumui s, minėtas santykis mažėja. Todėl didelis aukščio H padidimas, neturi didelės įtakos atstumo iki kliūtis z pasikeitimui.

IŠVADOS

- Nustatyti minimalūs matuojami atstumai ir Kinect jutiklio pasvyrimo kampai kiekvienai tirtai jutiklio vertikaliai padėčiai. Humanoido tipo robotuose, jeigu jutiklis yra aukščiau negu 1000 mm nuo grindų, vien Kinect jutiklio pasvyrimo kampo keitimo neužtenka, kad būtų fiksuojamos kliūtys, esančios prieš jutiklį mažesniu nei 954 mm atstumu. Tokie robotai turėtų papildomai pakreipti Kinect jutiklį žemyn. Kuo aukščiau nuo grindų pakeltas jutiklis, tuo sunkiau išskirti apatinę kliūties kraštinę iš grindų fono.
- Geriausi ($Q \approx 96\%$) gylio vaizdo užpildymo rezultatai gaunami, kai jutiklio atstumas nuo grindų yra didesnis nei 300 mm. Kai jutiklio atstumas nuo grindų yra 100 mm, gylio vaizdo užpildymas $Q \approx 54\%$. Todėl remiantis gylio vaizdo užpildymo tyrimo rezultatais, robotams, kurie skirti grindims valyti (kurių aukštis svyruoja apie 100 mm), Kinect jutiklis nesuteiks pakankamai duomenų apie grindų plokštumą.
- Kliūties aukščio ir pločio matavimo rezultatų vidurkis yra 129 mm, o atstumas iki kliūties kito nuo 600 mm iki 4200 mm. Kliūties aukščio maksimali matavimo neapibrėžtis 6,3 mm, o pločio – 5,9 mm. Atstumo iki kliūties maksimali matavimo neapibrėžtis yra 150 mm. Kliūties aukščio, pločio ir atstumo iki jos matavimo neapibrėžtys nepriklauso nuo atstumo tarp roboto ir kliūties. Matavimo neapibrėžtys yra atsitiktinės.
- Humanoido tipo robotuose, kai jutiklis gali būti pakeltas aukščiau, kliūties aukščio matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis (~ 2 mm) yra mažesnis nei žemesniuose robotuose (2-3 mm). Kliūties pločio matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis prie visų aukščių svyruoja apie 2 mm. Atstumo iki kliūties matavimo neapibrėžties standartinis nuokrypis yra nuo 19 mm iki 53 mm. Didėjant jutiklio pakėlimo aukščiui atstumo iki kliūties matavimo neapibrėžtis didėja, kol aukštis mažesnis nei 1000 mm.

LITERATŪRA

1. Alenya G. ToF cameras for active vision in robotics/ G. Alenya, S. Foix, C. Torras//Sensors and Actuators. ISSN: 0924-4247. 2014, nr. 218, p.10-22.
2. Alenya G. Using ToF and RGBD cameras for 3D robot perception and manipulation in human environments/ G. Alenya, S. Fois, C. Torras//Intel Serv Robotics. ISSN 1861-2776. 2014, nr. 7, p.211-220.
3. Andersen M. R. Kinect Depth Sensor Evaluation for Computer Vision Applications/ M. R. Andersen, T. Jensen, P. Lisouski, A. K. Mortensen, M. K. Hansen, T. Gregersen, P. Ahrendt//Technical report ECE-TR-6. ISSN 2246-2087. 2012.
4. As'ari M. A. 3D shape descriptor for object recognition based on Kinect-like depth image/ M. A. As'ari, U. U. Sheikh, E. Supriyanto//Image and Vision Computing. ISSN: 0262-8856. 2014, nr. 32, p.260-269.
5. Boehm J. Binney Daniel. Performance Evaluation of the PrimeSense IR Projected Pattern Depth Sensor. [žiūrėta 2015-01-06]. Prieiga per internetą < http://www-research.cege.ucl.ac.uk/Posters/2011PosterFair/88_Binney_Daniel.pdf>.
6. Borenstein G. Making Things See. Beijing, 2012. 440p. ISBN 978-1-449-30707-3.
7. Castaldo F. Microsoft Kinect: features and implementation. 2013.[žiūrėta 2015-01-06]. Prieiga per internetą: <<http://www.francescocastaldo.org/tutorials/kinect.pdf>>.
8. Correa, D. S. O. Mobile Robots Navigation in Indoor Environments Using Kinect Sensor//Critical Embedded Systems (CBSEC), 2012 Second Brazilian Conference on [Campinas, 2012 m. gegužės 20-25 d.]. Campinas, 2012. p. 36-41.
9. Csaba G. Mobile robot navigation in unknown environment using structured light/ G. Csaba, L. Somlyai, Z. Vamossy// Logistics and Industrial Informatics (LINDI), 2011 3rd IEEE International Symposium on [Budapeštas, 2011 m. rugpjūčio 25-27 d.]. ISBN 978-1-4577-1842-7, p. 249-254.
10. Dal Mutto C. Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect™/C. Dal Mutto, P. Zanuttigh, G. Cortelazzo. 2013. 116p. ISBN 978-1-4614-3807-6.
11. Daniel Herrera C. Joint depth and color camera calibration with distortion correction/ C. Daniel Herrera, J. Kannala, J. Heikkila//Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. ISSN 0162-8828. 2012, nr. 34 (10), p.2058-2064.
12. Du G. Markerless human–robot interface for dual robot manipulators using Kinect sensor/G. Du, P. Zhang// Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, nr.30 (2), p.150-159.

13. Filipe V. Blind navigation support system based on Microsoft Kinect/ V. Filipe, F. Fernandes, H. Fernandes, A. Sousa, H. Paredes, J. Barroso//Procedia Computer Science. ISSN: 1877-0509. 2012, nr. 14, p.94-101.
14. Fuchs S.. Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras/S. Fuchs, Hirzinger G.// Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on [Anchorage, 2008 m. birželio 23-28 d.]. p. 1 – 6.
15. Gonzalez-Jorge H. Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors/ H. Gonzalez-Jorge, B. Riveiro, E. Vazquez-Fernandez, J. Martinez-Sanchez, P. Arias//Measurement. ISSN: 0263-2241. 2013, nr. 46, p.1800-1806.
16. Grogan A. You‘ re not my type// Engineering & Technology.ISSN :1750-9637. 2013, nr. 8 (8), p. 60-63.
17. Guehring J. Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components// Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement 220 [San Jose, 2000 m. gruodžio 22 d.].
18. Hartley R. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition/ R. Harley, A. Zisserman. Cambridge, 2003. 673 p. ISBN 978-0-511-18618-9.
19. Hernandez-Lopez J. J. Detecting objects using color and depth segmentation with Kinect sensor/J. J. Hernandez-Lopez, A. L. Quintanilla-Olvera, J. L. Lopez-Ramirez, F. J. Rangel-Butanda, M. A. Ibarra-Manzano, D. L. Almanza-Ojeda//Procedia Technology. ISSN: 2212-0173. 2012, nr. 3, p.196-204.
20. Hirose M., Ogawa K. Honda humanoid robots development. [žiūrėta 2015-04-21]. Prieiga per internetą: < <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1850/11>>.
21. Yue H. Fast 3D modeling in complex environments using a single Kinect sensor/ H. Yue, W. Chen, X. Wu, J. Liu//Optics and Lasers in Engineering. ISSN: 0143-8166. 2014, nr. 53, p.104-111.
22. Lauruška V. Fizikos laboratorinių darbų nurodymai, I dalis / V. Lauruška, J. Ščiukaitė. Vilnius, 2004. 111 p. ISBN 9986-38-478-8.
23. Marin E. V. Generic design methodology for the development of three-dimensional structured-light sensory systems for measuring complex objects/ E. V. Marin, W. H. Wayne Chang, G. Nejat//Optical Engineering. ISSN 1560-2303. 2014, nr. 53 (11).
24. McGinn, K. Kelly, A. Sena, O. Brogan//Signals and Systems Conference (ISSC 2012), IET Irish [Maynooth, 2012 birželio 28-29]. E-ISBN 978-1-84919-613-0. Maynooth, 2012. p.1-6.

25. Radzevičius V. Gylio kameros panaudojimas regėjimo negalią turinčių žmonių orientavimuisi aplinkoje/ V. Radzevičius, G. Gričius//Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje : [konferencijos medžiaga]. ISSN 1822-4652, 2014, p.147-150.
26. Richardson K. Rebranding the robot//Engineering & Technology. ISSN 1750-9637. 2009, nr. 4 (6), p. 42-44.
27. Robledo A, Cossell S; Guivant J, 2011, Outdoor ride: Data fusion of a 3D Kinect camera installed in a bicycle//Proceedings of the 2011 Australasian Conference on Robotics and Automation. Melbourne, 2011.
28. Robledo A. Outdoor Ride: Data Fusion of a 3D Kinect Camera installed in a Bicycle/ A. Robledo, S. Cossell, J. Guivant//Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation [Melburnas, 2011 m. gruodžio 7-9 d.].
29. Robotika.lt. 10 geriausių robotų-siurblių. [žiūrėta 2015-04-21]. Prieiga per internetą: <<http://robotika.lt/10-geriausiu-robotu-siurbliu/>>.
30. Scaramuzza, D. Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes/D. Scaramuzza, Harati A., Siegwart R.//Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. 2007 [San Diego, 2007 m. spalio 29 d. – lapkričio 2 d.]. p. 4164 – 4169.
31. Schaffer M. Outdoor three-dimensional shape measurements using laser-based structured illumination/ M. Schaffer, M. Grosse, B. Harendt; R. Kowarschik//Optical Engineering. ISSN 1560-2303. 2012, nr. 9.
32. Sgorbissa A. Structure-based object representation and classification in mobile robotics through a Microsoft Kinect/ A.Sgorbissa, D. Verda//Robotics and Autonomous Systems. ISSN: 0921-8890. 2013, nr. 61, p.1665-1679.
33. Simulink Support for Kinect. [žiūrėta 2015-05-06]. Prieiga per internetą: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32318-simulink-support-for-kinect>>.
34. Smisek Jam. 3D with Kinect//Computer Vision Workshop (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on [Barselona, 2011 m. lapkričio 6-13 d.]. Barselona, 2011. p. 1154-1160.
35. Stout K. J. Computer vision and robots//The Production Engineer. ISSN :0032-9851. 1980, nr. 59 (4), p. 9.
36. Szeliski R. Computer Vision. Algorithms and Applications [interaktyvus]. Springer, 2010 [žiūrėta 2015-04-18]. Prieiga per internetą: <http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf>.

37. Tolgyessy Michal, Hubinsky Peter. The Kinect Sensor in Robotics Education [žiūrėta 2015-03-21]. Prieiga per internetą: < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.2920&rep=rep1&type=pdf>>.
38. Udovenko N. 3D geometrijos atstatymas panaudojant Kinect jutiklį. 61 p.
39. Unnikrishnan R., Hebert M. Fast Extrinsic Calibration of a Laser Rangefinder to a Camera [interaktyvus]. Pittsburg, 2005 [žiūrėta 2015-04-18]. Prieiga per internetą: < https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/unnikrishnan_ranjith_2005_3/unnikrishnan_ranjith_2005_3.pdf>.
40. Viejo D. Combining visual features and Growing Neural Gas networks for robotic 3D SLAM/ D. Viejo, J. Garcia-Rodriguez, M. Cazorla//Information Sciences. 2014, nr.276 (20), p.174-185.
41. Vijayanagar K. R. Real-Time Refinement of Kinect Depth Maps using Multi-Resolution Anisotropic Diffusion/ K. R. Vijayanagar, M. Loghman, J. Kim//Mobile Netw Appl. ISSN 1383-469X. 2014, nr. 19, p.414-425.
42. Webots User Guide. [žiūrėta 2015-04-21]. Prieiga per internetą: <http://www.cyberbotics.com/dvd/common/doc/webots/guide/section8.3.html>.
43. Wong.W. How Microsoft's PrimeSense-based Kinect Really Works. 2011 [žiūrėta 2015-01-06]. Prieiga per internetą: < <http://electronicdesign.com/embedded/how-microsoft-s-primesense-based-kinect-really-works>>.
44. Zhang S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement/ S. Zhang, S. T. Yau//Optical Engineering. ISSN 1560-2303. 2006, nr. 45 (12).
45. Zhang, Q. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)/Q. Zhang, Pless, R.//Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. 2004, nr. 3, p. 2301 – 2306.
46. Zhengyou Z. Microsoft Kinect Sensor and Its Effect// MultiMedia, IEEE. ISSN 1070-986X. 201, nr 19, p.4-10.

PRIEDAI

1 PRIEDAS

MINIMALAUS MATUOJAMO ATSTUMO d IR GYLIO VAIZDO UŽPILDYMO Q
PRIKLAUSOMYBĖS NUO KAMPO α IR AUKŠČIO H LENTELEŠ

H=100 mm

1 LENTELEŠ

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B , laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d , mm	Q , %
-27	42	144	99,58
-26	43	149	99,19
-25	44	155	98,75
-24	45	160	97,40
-23	46	166	94,47
-22	47	172	92,15
-21	48	178	89,16
-20	49	184	87,75
-19	50	191	85,23
-18	51	198	82,74
-17	52	205	80,17
-16	53	212	78,07
-15	54	220	74,14
-14	55	229	72,89
-13	56	237	71,48
-12	57	246	69,82
-11	58	256	67,02
-10	59	266	65,22
-9	60	277	64,45
-8	61	289	61,33
-7	62	301	58,70
-6	63	314	57,04
-5	64	328	55,44
-4	65	343	53,54
-3	66	359	50,53
-2	67	377	50,47
-1	68	396	47,20
0	69	417	44,88
1	70	440	43,50
2	71	465	40,00
3	72	492	40,03
4	73	523	35,69

1 LENTELEŠ TĖSINYS

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
5	74	558	33,76
6	75	597	32,70
7	76	642	31,98
8	77	693	28,67
9	78	753	27,06
10	79	823	22,30
11	80	907	22,17
12	81	1010	20,30
13	82	1138	17,34
14	83	1303	17,18
15	84	1522	13,37
16	85	1829	13,19
17	86	2288	8,72
18	87	3053	9,14
19	88	4582	5,89
20	89	9166	5,61

H=300 mm

2 LENTELE

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-27	42	324	7,55
-26	43	336	7,18
-25	44	348	7,09
-24	45	360	6,68
-23	46	373	6,61
-22	47	386	6,14
-21	48	400	5,82
-20	49	414	5,74
-19	50	429	5,60
-18	51	445	5,58
-17	52	461	5,85
-16	53	478	5,83
-15	54	495	5,65
-14	55	514	5,56
-13	56	534	5,46
-12	57	554	5,45
-11	58	576	5,49
-10	59	599	5,59
-9	60	624	5,70
-8	61	649	5,89

2 LENTELEŠ TĖŠINYS

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-7	62	677	5,97
-6	63	707	6,20
-5	64	738	6,70
-4	65	772	7,20
-3	66	809	7,07
-2	67	848	7,65
-1	68	891	7,95
0	69	938	8,30
1	70	989	8,47
2	71	1046	8,72
3	72	1108	8,72
4	73	1178	8,83
5	74	1255	8,94
6	75	1344	8,98
7	76	1444	8,72
8	77	1559	9,17
9	78	1694	9,50
10	79	1852	9,74
11	80	2042	9,99
12	81	2273	9,94
13	82	2562	9,79
14	83	2932	9,79
15	84	3425	5,79
16	85	4115	5,95
17	86	5148	5,45
18	87	6869	4,94
19	88	10309	4,97
20	89	20624	4,98

H=600 mm

3 LENTELEŠ

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-27	42	594	2,53
-26	43	615	2,40
-25	44	637	2,05
-24	45	660	2,06
-23	46	683	2,10
-22	47	708	2,10
-21	48	733	2,15
-20	49	759	2,24

3 LENTELĖS TĘSINYS

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-19	50	787	2,36
-18	51	815	2,38
-17	52	845	2,50
-16	53	876	2,30
-15	54	908	2,33
-14	55	943	2,34
-13	56	978	2,27
-12	57	1016	2,48
-11	58	1056	2,66
-10	59	1098	2,86
-9	60	1143	3,01
-8	61	1191	3,16
-7	62	1241	3,75
-6	63	1295	3,78
-5	64	1353	4,04
-4	65	1415	4,38
-3	66	1482	4,38
-2	67	1555	4,35
-1	68	1634	4,47
0	69	1719	4,68
1	70	1813	4,83
2	71	1917	4,70
3	72	2031	4,74
4	73	2159	4,62
5	74	2302	5,03
6	75	2463	4,91
7	76	2647	4,61
8	77	2859	4,92
9	78	3105	5,28
10	79	3395	5,16
11	80	3743	5,20
12	81	4167	4,60
13	82	4696	4,26
14	83	5375	4,23
15	84	6279	4,28
16	85	7544	4,33
17	86	9438	4,37
18	87	12594	4,44
19	88	18900	4,36
20	89	37811	4,60

H=1000 mm

4 LENTELE

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-27	42	954	3,30
-26	43	988	3,27
-25	44	1024	3,18
-24	45	1060	3,28
-23	46	1098	3,35
-22	47	1137	3,22
-21	48	1177	3,45
-20	49	1219	3,46
-19	50	1263	3,27
-18	51	1309	3,31
-17	52	1357	3,60
-16	53	1407	3,47
-15	54	1459	3,87
-14	55	1514	3,92
-13	56	1572	3,99
-12	57	1632	4,04
-11	58	1696	4,29
-10	59	1764	4,40
-9	60	1836	4,41
-8	61	1912	4,35
-7	62	1994	4,39
-6	63	2080	4,33
-5	64	2173	4,40
-4	65	2273	4,56
-3	66	2381	4,63
-2	67	2497	4,80
-1	68	2624	4,72
0	69	2761	4,62
1	70	2912	4,71
2	71	3078	4,67
3	72	3262	4,52
4	73	3467	4,92
5	74	3697	4,78
6	75	3956	4,86
7	76	4251	4,90
8	77	4591	4,67
9	78	4987	4,73
10	79	5453	4,66
11	80	6012	4,82
12	81	6693	4,59

4 LENTELEŠ TĖSINYS

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
13	82	7542	4,67
14	83	8633	4,66
15	84	10085	4,58
16	85	12116	4,20
17	86	15159	4,26
18	87	20226	3,80
19	88	30354	3,84
20	89	60727	3,38

H=1500 mm

5 LENTELEŠ

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
-27	42	1405	2,53
-26	43	1455	2,42
-25	44	1506	2,57
-24	45	1560	2,64
-23	46	1615	2,63
-22	47	1673	2,72
-21	48	1733	2,90
-20	49	1795	2,93
-19	50	1859	2,98
-18	51	1926	3,14
-17	52	1997	3,09
-16	53	2070	3,10
-15	54	2147	3,32
-14	55	2228	3,40
-13	56	2313	3,51
-12	57	2402	3,44
-11	58	2497	3,38
-10	59	2596	3,75
-9	60	2702	3,93
-8	61	2814	3,88
-7	62	2934	4,16
-6	63	3062	4,24
-5	64	3198	4,19
-4	65	3345	4,37
-3	66	3504	4,15
-2	67	3675	4,30
-1	68	3861	4,51
0	69	4064	4,54
1	70	4286	4,25

5 LENTELEŠ TĖSINYS

Kinect jutiklio padėties kampas α , laipsniais	Kampas B, laipsniais	Minimalus matuojamas atstumas d, mm	Q, %
2	71	4531	4,28
3	72	4801	4,32
4	73	5103	4,31
5	74	5440	4,32
6	75	5822	4,11
7	76	6257	3,94
8	77	6757	3,71
9	78	7339	3,70
10	79	8026	3,29
11	80	8847	3,23
12	81	9849	2,97
13	82	11100	3,11
14	83	12705	2,94
15	84	14842	2,90
16	85	17831	2,90
17	86	22309	2,83
18	87	29767	2,76
19	88	44673	2,91