



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Požeminių vamzdžių taršos vizualizacijos, naudojant ToF jutiklį, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Aurimas Petrutis

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

Darbo vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Požeminių vamzdžių taršos vizualizacijos, naudojant ToF jutiklį, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Aurimas Petrutis

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

Darbo vadovas

Prof. Žilvinas Nakutis

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Aurimas Petrutis

Požeminių vamzdžių taršos vizualizacijos, naudojant ToF jutiklį, tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Aurimas Petrutis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Petrutis Aurimas. Požeminių vamzdžių taršos vizualizacijos, naudojant ToF jutiklį, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Linas Svilainis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: ToF jutiklis, požeminiai vamzdžiai, taršos vizualizacija.

Kaunas, 2024. 63 p.

Santrauka

Šiame darbe apžvelgiami įvairūs metodai, skirti požeminių vamzdžių defektų ir taršos vizualizacijai. Apžvalgoje aptariamos CCTV kameros, konvoliuciniai neuroniniai tinklai, stereo matymas, akustinių atspindžių ir ultragarsinės vizualizacijos analizės. Aprašomi metodai, pagrįsti atstumo matavimu pagal lazerio atspindžio kampą, impulsinį ToF bei nuolatinės bangos amplitudės moduluotą (AMCW) ToF. Tyrimo metu naudojamas mažų matmenų ToF jutiklis, leidžiantis atlikti požeminių vamzdžių taršos vizualizacijas su dirbtinai suformuotomis taršos imitacijomis.

Darbe aprašomi tyrimai, kuriuose buvo tiriamos keturių tipų užterštumų imitacijos: purvo sankaupos, apnašos aplink vamzdžio perimetrą, medžių šakos ir riebalų sankaupos. Tirtos ToF jutiklio galimybės atvaizduoti užsikimšimus požeminiuose vamzdžiuose įvairiais metodais: keičiant atstumą tarp imituojamos taršos ir jutiklio, keičiant jutiklio zonų aštrumo parametras, atliktas užterštumo atvaizdavimo optimizavimo tyrimas. Taip pat buvo atliktas ToF jutikliu gautų vaizdų įvertinimas 8x8 ir 16x16 raiškose, kai vaizdai yra gaunami suliejant keturis 8x8 raiškos vaizdus.

Analizuojant gautus imitacijų vaizdus paaiškėjo, kad jutiklis sėkmingai atvaizduoja taršos imitacijas, esančias iki 30 cm atstumu nuo jutiklio. Įrodyta, kad zonų aštrumas yra svarbus parametras siekiant kuo tikslesnio vaizdavimo. Be to, vaizdavimo kokybės tyrimo rezultatai parodė, kad 8x8 raiškos vaizdų vidutinė atvaizdavimo paklaida yra 6,27%, o 16x16 raiškos vaizdų – 2,29%.

Petrutis Aurimas. Research of Underground Pipe Blockage Imaging Using ToF Sensor. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Linas Svilainis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: ToF sensor, underground pipes, blockage imaging.

Kaunas, 2024. 63 p.

Summary

This work reviews various methods for visualizing underground pipe defects and contamination. The review encompasses techniques such as CCTV cameras, convolutional neural networks, stereo vision, acoustic reflection, and ultrasonic visualization analyses. The described methods are based on distance measurement using laser reflection angle, pulsed ToF, and continuous wave amplitude modulated (AMCW) ToF. A small-sized ToF sensor is used in the study, allowing for visualizations of underground pipe contamination with artificially created contamination simulations.

The paper describes studies examining four types of contamination simulations: mud deposits, deposits around the pipe perimeter, tree roots, and fat deposits. The capabilities of the ToF sensor to visualize blockages in underground pipes were tested by varying the distance between the simulated contamination and the sensor, and by changing the sensor's zone sharpness parameter. An optimization study for contamination visualization was conducted. Additionally, the evaluation of images obtained with the ToF sensor in 8x8 and 16x16 resolutions was performed by merging four 8x8 resolution images.

Analysis of the obtained simulation images revealed that the sensor successfully visualizes contamination simulations up to 30 cm away from the sensor. It was proven that zone sharpness is an important parameter for achieving the most accurate visualization. Furthermore, the visualization quality study results showed that the average visualization error for 8x8 resolution images is 6.27%, while for 16x16 resolution images it is 2.29%.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. CCTV analizė	13
1.2. Konvoliucinių neuroninių tinklų analizė	15
1.3. Stereo matymo analizė	17
1.4. Akustinio atspindžio analizė.....	20
1.5. Ultragarsine vizualizacija grįsta analizė	24
2. Tyrimo metodika	30
2.1. Atstumo matavimas naudojant optines matavimo technikas.....	30
2.1.1. Atstumo matavimas pagal lazerio spindulio atsilenkimą	30
2.1.2. Impulsinis ToF metodas	32
2.1.3. Nuolatinės bangos amplitudės moduluotas (AMCW) ToF metodas.....	34
2.2. Imitacijų parengimas	35
2.3. Vizualizacijos metodika	37
2.4. Vizualizacijos raiškos padidinimas naudojant poslinkį.....	41
3. Tiriamoji dalis	42
3.1. Vizualizacijos kokybės tyrimas keičiant matavimo zonų aštrumą.....	42
3.2. Vizualizacijos kokybės tyrimas keičiant atstumą.....	44
3.3. Atstumo ir aštrumo vertės optimizavimas	46
3.3.1. Purvo sankaupų, U tipo taršos vizualizacija.....	46
3.3.2. Apnašų palink vamzdžio perimetrą, O tipo taršos vizualizacija	48
3.3.3. Medžio šakų nuolaužų, I tipo taršos vizualizacija.....	50
3.3.4. Riebalų sankaupų, T tipo taršos vizualizacija	51
3.4. Imitacijų 8x8 raiškos atvaizdavimo įvertinimas.....	53
3.5. Imitacijų 16x16 raiškos atvaizdavimo įvertinimas.....	57
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61
Priedai	64
1 priedas. MATLAB programinės įrangos kodas.....	64
2 priedas. Vizualizacijos kokybės tyrimo keičiant matavimo zonų aštruma imitacijų vaizdai ...	66
3 priedas. Vizualizacijos kokybės tyrimo keičiant atstumą imitacijų vaizdai.....	68
4 priedas. Atstumo ir aštrumo vertės optimizavimo tyrimo imitacijų vaizdai	76

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Defektų modeliavimo imitacijų santrauka [14]	18
2 lentelė. Ultragarso signalo greitis purvo ir vandens mišinyje, išmatuotas aštuoniuose keitikliuose [22]	25
3 lentelė. Ultragarso signalo greitis aliuminio, purvo ir oro mišinyje, išmatuotas aštuoniuose keitikliuose [22].....	25
4 lentelė. Tyrime naudotų taršos imitacijų aprašas.....	36
5 lentelė. Tyrime naudotų taršos imitacijų trumpiniai.....	37

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Kanalizacijos vamzdynų defektų klasifikacijos [1]	13
1.2 pav. CCTV kameros apžiūros proceso vaizdas betoniniame vamzdyje [3]	14
1.3 pav. Tipiški nespaltoti vaizdo stebėjimo kameros vaizdai, rodantys kanalizacijos defektus, kur: a) daugybiniai įskilimai, b) įlūžimai, c) skylė, d) ištrupėjimai, e) griūtis, f) atsivėręs susijungimas, g) sulūžimai ir h) deformuota kanalizacija [5].....	14
1.4 pav. Keturių kategorijų kanalizacijos vamzdžių defektų vaizdų pavyzdžiai [6].....	15
1.5 pav. Nustatymo vaizdai su keliais to paties arba skirtingais defektų tipais [6].....	16
1.6 pav. Neteisingai nustatytų defektų pavyzdžiai [6]	16
1.7 pav. Standartinės stereo matymo sistemos principas [13].....	17
1.8 pav. Siauro (2 mm) įtrūkimo detektavimo rezultatas, kur: a) vaizdas iš kairės kameros, b) išlygintas kontūrinis žemėlapis [14].....	18
1.9 pav. Plataus (8 mm) įtrūkimo detektavimo rezultatas [14]	18
1.10 pav. Riebalų sancaupų detektavimo rezultatas [14].....	19
1.11 pav. Skylės detektavimo rezultatas [14].....	19
1.12 pav. Medžio šaknų detektavimo rezultatas [14].....	19
1.13 pav. Kliūtis detektavimo rezultatas [14].....	19
1.14 pav. Tyrimo metu gauti sujungti 3D vaizdai, kuriuose imituojami vamzdžių defektai: a) medžių šaknys, b) skylė ir riebalų sancaupų nusėdimai [15].....	20
1.15 pav. Apdoroto akustinis signalo grafikai [20]	22
1.16 pav. Akustinio atspindžio metodo taikymo vaizdas, kuriame: a) garsiakalbis, b) devynių mikrofonų išdėstymas, c) tyrime naudojamo vamzdžio vaizdas [22]	23
1.17 pav. Akustinės bangos impulso atsakas sklindantis per vamzdį kuriame yra užsikūšimas ir alkūnė [22].....	23
1.18 pav. Ultragarso keitiklių išdėstymas skerspjūvio vaizde [23].....	24
1.19 pav. Tyrimo blokinė diagrama [23].....	24
1.20 pav. Ultragarso bangos sklidimo greitis kiekvienai keitiklių pozicijai tiriant vandens ir purvo mišinį [23]	25
1.21 pav. Ultragarso bangų greičio atvaizdavimas tiriant vandens ir purvo mišinį [23].....	26
1.22 pav. Ultragarso bangos sklidimo greitis kiekvienai keitiklių pozicijai tiriant aliuminio purvo ir oro mišinį [23]	26
1.23 pav. Ultragarso bangų greičio atvaizdavimas tiriant aliuminio purvo ir oro mišinį [23].....	27
1.24 pav. Tyrimo metu naudota 40 kHz 100 ultragarso keitiklių matrica [22].....	27
1.25 pav. Atkurtas trimatis užsikūšimo vaizdas [22]	28
1.26 pav. 6 cm molio kūgio atvaizdavimas esant: a) 100, b) 50, c) 25, d) 12, ultragarsinių keitiklių [22]	28
2.1 pav. Optinio jutimo metodų galimi parametru matavimai [25].....	30
2.2 pav. Lazerio trianguliacijos nustatymas [28].....	30
2.3 pav. Lazerio šviesos nustatymas esant skirtingam atsispindėjimo aukščiui [28].....	31
2.4 pav. Trianguliacijos matavimo geometrinis aprašymas [31].....	32
2.5 pav. Impulsinio TOF matavimo principo schema [36]	33
2.6 pav. Impulsinio ToF metodo matavimas, kuris rodo gautus tris skirtingus signalus, kai sklidimo laikas: a) trumpas, b) ilgesnis ir c) ilgas [25]	33
2.7 pav. AMCW ToF metodo fazės poslinkio pavaizdavimas [25]	34

2.8 pav. AMCW metodo fazės matavimo principas [36].....	35
2.9 pav. Tyrimo metu naudojamos sistemos vaizdas	36
2.10 pav. Imituojamų purvo sancaupų taršų vaizdai, kur imituojamas: a) aklinau užterštus vamzdis, 100 % tarša b) 75 % užterštus vamzdis, c) 50 % užterštus vamzdis, d) 25 % užterštus vamzdis.....	36
2.11 pav. Imituojamų apnašų aplink vamzdžio perimetrą vaizdai, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo, c) 25 % esančio užterštumo.....	36
2.12 pav. Imituojamų medžių šakų taršos vaizdai, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo, c) 25 % esančio užterštumo.....	37
2.13 pav. Imituojamos riebalų sancaupos, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo	37
2.14 pav. ToF jutiklio zonų atvaizdavimas, kur a) gaunamas vaizdas, b) jutiklio vaizdas [42].....	38
2.15 pav. STM STSW-IMG024 programine įranga gaunami vaizdai.....	38
2.16 pav. ToF duomenys, gauti ToF jutikliu: a) prieš, b) po interpoliacijos.....	39
2.17 pav. ToF duomenys po slenksčio pritaikymo yra žymimi taip: užteršta – 0, laisva – 1.....	39
2.18 pav. Purvo sancaupų imitacijos „U-50“ nuotrauka: a) prieš, b) po apdorojimo.	40
2.19 pav. Riebalų sancaupų imitacijos „T-75“ nuotrauka: a) prieš, b) po apdorojimo.	40
2.20 pav. 16x16 atvaizdavimo jutiklių išsidėstymo vaizdas	41
2.21 pav. „U-50“ užterštumo atvaizdo 3D grafikas su a) 8x8 raiška, b) 16x16 raiška	41
3.1 pav. Atvaizdavimo pavyzdžiai naudojant skirtingus aštrumus [43].....	42
3.2 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijai „U-100“: a) 20%, b) 30%, c) 40%, d) 50%, e) 60%, f) 70%, g) 80%, h) 90% matavimo zonų aštrumui.....	43
3.3 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio	44
3.4 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms, kur: I) „O-75“, II) „O-50“ III) „O-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio.	44
3.5 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijoms, kur: I) „I-75“, II) „I-50“ III) „I-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio.....	45
3.6 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sancaupų imitacijoms, kur: I) „T-75“, II) „T-50“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio.....	45
3.7 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijai „U-100“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	46
3.8 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijai „U-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	47
3.9 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijai „U-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	47
3.10 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sancaupų imitacijai „U-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	48
3.11 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio.....	48
3.12 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio.....	49
3.13 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio.....	49

3.14 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio ...	50
3.15 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio ...	50
3.16 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio ...	51
3.17 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sancaupų imitacijai „T-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	51
3.18 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sancaupų imitacijai „T-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio	52
3.19 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant purvo sancaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo.....	53
3.20 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo.....	54
3.21 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant medžio šakų nuolaužų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo.....	54
3.22 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos riebalų sancaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo.....	55
3.23 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant purvo sancaupų imitacijoms	55
3.24 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms	55
3.25 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant medžių šakų nuolaužų imitacijoms	56
3.26 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant riebalų sancaupų imitacijoms.....	56
3.27 pav. Užteršto ploto imitacijų atvaizdavimo paklaidos rezultatas	56
3.28 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant purvo sancaupų imitacijoms	57
3.29 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms	58
3.30 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant medžių šakų nuolaužų imitacijoms	58
3.31 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant riebalų sancaupų imitacijoms.....	58
3.32 pav. Užteršto ploto imitacijų atvaizdavimo paklaidos rezultatas	59

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CCD – krūvio sąsajos įtaisas (angl. *Charged Couple Device*);

CCTV – uždara stebėjimo sistema (angl. *Closed-Circuit Television*);

CMOS – komplementarios struktūros metalo oksido puslaidininkis (angl. *Complementary Metal – Oxide – Semiconductor*);

CSV – kableliais atskirtos reikšmės (angl. *Comma-separated Values*);

FoV – matymo laukas (angl. *Field of View*);

FPS – kadrai per sekundę (angl. *Frames Per Second*);

GPU – vaizdo apdorojimo procesorius (angl. *Graphics Processing Unit*);

HD – aukšta raiška (angl. *High Definition*);

IR – infraraudonieji spinduliai (angl. *Infrared*);

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;

mAP – vidutinių tikslumų vidurkis (angl. *Mean Average Precision*);

PVC – polivinilchloridas;

SAD – absoliutaus skirtumo suma (angl. *Sum of Absolute Difference*);

SNR – signalas – triukšmas santykis (angl. *Signal-to-Noise Ratio*);

SPAD – vienfotonis griūtinis diodas (angl. *Single Photon Avalanche Diode*);

TFM – erdvėje paskirstyto nuoseklaus fokusavimo metodas (angl. *Total Focusing Method*);

ToF – atstumo matavimo metodas veikiantis sklidimo laiko matavimo principu (angl. *Time of Flight*);

2D – dvimatė erdvė (angl. *Two-dimensional*);

3D – trimatė erdvė (angl. *Three-dimensional*);

Terminai:

Dviprasmiškumo atstumas (angl. *Ambiguity range*) – šis atstumas nusako maksimalų atstumą, kurį galima patikimai išmatuoti be klaidų, susijusių su signalo periodiškumu optinėje ir radijo bangų technologijoje;

PColor – MATLAB programinės įrangos funkcija kuri sukuria pseudospalvų grafiką;

Signalų gaubiamoji (angl. *Envelope detection*) – yra duotojo signalo, gaubiamoji kreivė kuri padengia duotąjį signalą;

Ivadas

Nuotekų tinklai yra vienas iš didžiausių infrastruktūros tinklų šiuolaikinėje visuomenėje. Šie tinklai yra atsakingi už nuotekų ir lietaus vandens nukreipimą į valymo įrenginius, siekiant užtikrinti miesto bendruomenės higieną ir riboti ligų plitimą. Įmonės, atsakingos už nuotekų išteklių valdymą, privalo atlikti periodinį vamzdynų tikrinimą ir priežiūrą, kad būtų išvengta netikėtų nutekėjimų į aplinką, kurie vėliau gali patekti į geriamojo vandens kanalus.

Daugelis problemų su nuotekų tinklais kyla dėl jų amžiaus, kadangi didelė dalis nuotekų sistemų yra gerokai senesnės nei numatytos projektavimo metu. Dažnu atveju vamzdynų struktūrinis vientisumas yra pažeidžiamas aplinkos įvykių, pavyzdžiui, statybos darbų ar žemės drebėjimų, kurie gali atverti skylės, tarpus ar sukelti įtrūkimus, taip pat yra galimas ekologinis įsiskverbimas, pavyzdžiui, medžių šaknų. Šie pažeidimai dažnai sukelia užsikimšimus dėl į vamzdžius patekusių skirtingų medžiagų, tokių kaip dirvožemis, akmenys, lapai, taip pat dėl žmonių į kanalizaciją išpiltų riebalų nuosėdų ar kitų šiukšlių. Todėl yra reikalingos sistemos, leidžiančios efektyviai ir su minimaliomis sąnaudomis nustatyti užsikimšimus ir defektus požeminiuose vamzdžiuose.

Mokslinėje literatūroje tyrinėti įvairūs metodai, skirti atkurti ar nustatyti taršą ir defektus požeminių vamzdžių sistemose. Tai apima nuo defektų aptikimo naudojant vaizdo kameras iki ultragarsinių keitiklių vizualizacijos, tačiau kiekviena sistema turi savo privalumų ir trūkumų. Metodas, kurio trūksta mokslinėje literatūroje, yra optiniais metodais pagrįstos taršos vizualizacijos tyrimai. Todėl yra motyvacija tirti šiuo metu populiarėjančias optinio matavimo technikas. Viena iš jų yra nuolatinės bangos moduluoto (AMCW) ToF metodo naudojimas. Taigi šio tyrimo tikslas yra ištirti AMCW metodu veikiančio ToF jutiklio galimybes atvaizduoti požeminių vamzdžių taršą.

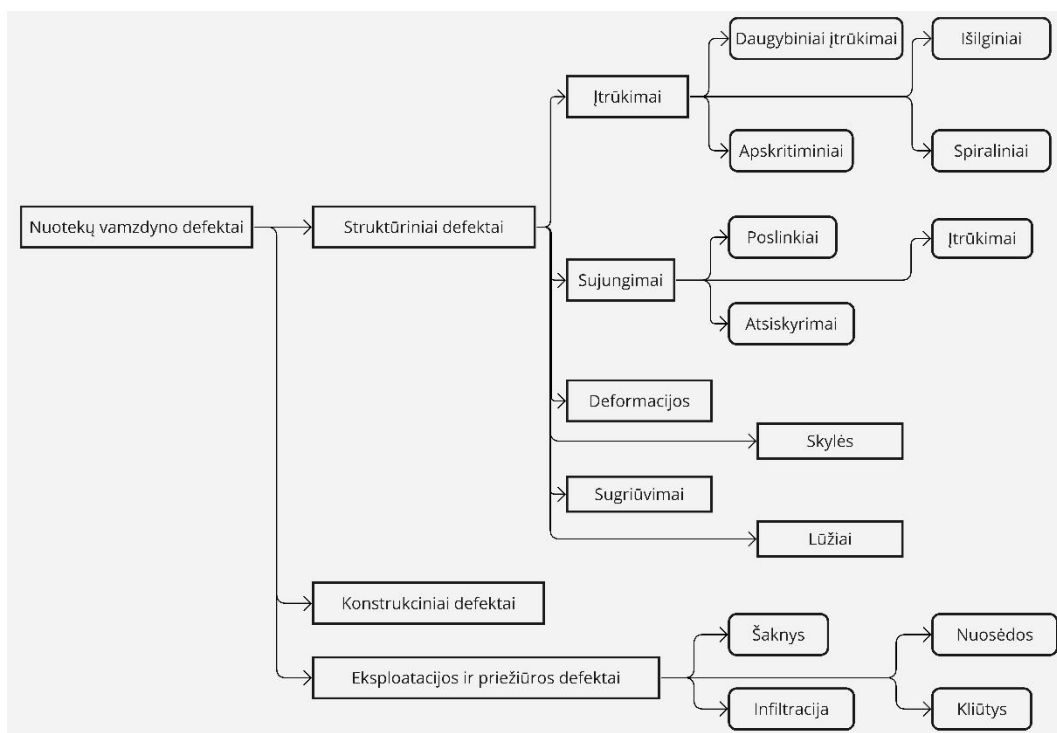
Darbo tikslas – atlikti IR ToF jutiklio požeminių vamzdžių taršos vizualizacijos tyrimą.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti požeminių vamzdžių užsikimšimų ir defektų atpažinimo metodikas mokslinėje ir techninėje literatūroje;
2. sukurti sancaupų vizualizacijos sistemą naudojant IR ToF jutiklį;
3. atlikti eksperimentinį sukurto sistemos tyrimą;
4. apibendrinti gautus tyrimo rezultatus ir parengti baigiamąjį darbą.

1. Literatūros apžvalga

Požeminės infrastruktūros yra sunkiai tikrinamos, kadangi jos yra po žeme. Dėl šios priežasties, jų taisymo ir pakeitimo kaštai yra dideli. Tiesioginis žmogaus tikrinimas, priešingai nei kitų infrastruktūrų, tokių kaip kelio dangos ar tuneliai, yra nepraktiškas požeminėms infrastruktūroms, dėl didelio po žeme esančių vamzdynų tinklų kiekio, nesaugių ir žalą sveikatai galinčių sukelti nuotekų, su kartu prisidedančiu prastu matomumu ir mažu vamzdžio diametru. Nuotekų sistemoms būdingas platus defektų spektras, o visų jų tikrinimas naudojant reguliarius metodus gali būti praktiškai neįmanomas. Nuotekų vamzdynų defektai gali būti klasifikuojami į struktūrinius, konstrukcinius bei eksploatacinius ir priežiūros defektus kaip pavaizduota 1.1 paveiksle [1].



1.1 pav. Kanalizacijos vamzdynų defektų klasifikacijos [1]

Aukščiau pavaizduoti defektai skatina sudėtingesnių metodų ir įrenginių, nuotekų vamzdynų įvertinimui, kūrimą. Tuo tarpu jutiklių technologijų vystymasis palengvino ir paskatino naujų aptikimo technikų įdiegimą bei tobulinimą. Taigi šioje dalyje apžvelgiama literatūra ir analizuojami metodai, kurie taikomi požeminių vamzdžių užsikišimams ar defektams nustatyti. Taip pat apžvelgiami metodų privalumai bei trūkumai.

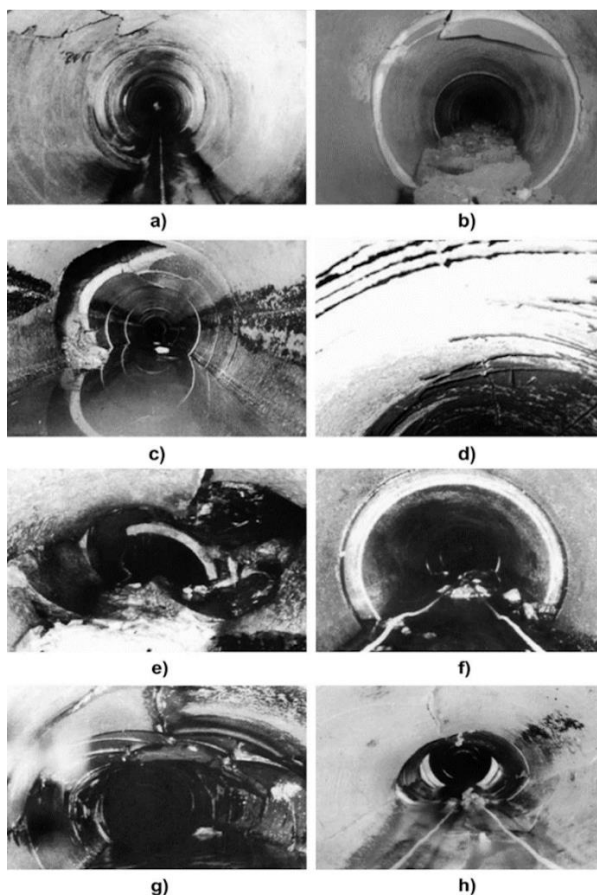
1.1. CCTV analizė

Vienas iš paprasčiausių metodų, grįstų vaizdo analize, yra naudojant CCTV sistemas. CCTV vamzdynų tikrinimo sistemos – tai paprastas ir plačiai naudojamas metodas, kuris susideda iš nuotoliniu būdu valdomo roboto su kamera [2]. Tipinis požeminių vamzdžių vaizdo stebėjimo procesas naudojant CCTV parodytas 1.2 paveiksle.



1.2 pav. CCTV kameros apžiūros proceso vaizdas betoniniame vamzdyje [3]

Naudojant CCTV metodą, įprastai operatoriaus valdymo pultas yra sujungtas su vamzdyje esančiu įrenginiu per daugiagyslius kabelius, kurie tiekia energiją ir perduoda duomenis. CCTV kamera fiksuoja nuotekų vamzdynų vidinio paviršiaus vaizdus. Juos galima matyti 1.3 paveiksle. Toliau šie duomenys yra stebimi operatorių. Be to, duomenys dažnai yra saugomi vėlesniam apdorojimui arba, jei reikia, kad operatorius su roboto sistema vėl grįžtu į tam tikrą nuotekų vamzdynų dalį, kad būtų galima stebėti būklės pasikeitimus per laiką [4].



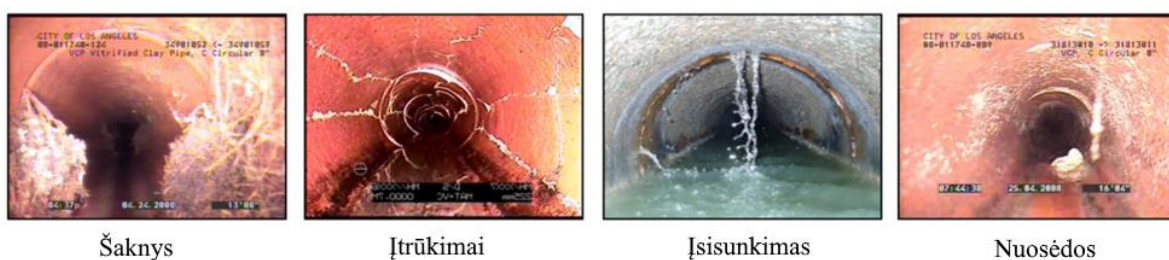
1.3 pav. Tipiški nespaltoti vaizdo stebėjimo kameros vaizdai, rodantys kanalizacijos defektus, kur: a) daugybiniai įskilimai, b) įlūžimai, c) skylė, d) ištrupėjimai, e) griūtis, f) atsivėręs susijungimas, g) sulūžimai ir h) deformuota kanalizacija [5]

CCTV metodo, naudojamo vamzdynų tikrinimui, reikšmingi trūkumai susiję su mechaniniu operatoriaus defektų ar užsikišimų nustatymu, kuris reikalauja kruopštaus kiekvieno nuotekų segmento peržiūros. Kitas svarbus veiksnys, lemiantis defektų ar užsikišimų nustatymo tikslumą naudojant CCTV sistemas, yra operatoriaus patirties lygis ir gautų vaizdų kokybė. Be to, šviesos sąlygos ir esamos kliūtys vamzdynuose labai skiriasi, todėl mažiau pastebimi defektai, pavyzdžiui, įtrūkimai, gali būti praleisti dėl žemos kokybės vaizdų, gautų triukšmingoje aplinkoje [4]. Kadangi CCTV metodas suteikia tik vamzdynų vaizdinius ir nesuteikia matuojamos informacijos apie defektus, pvz., atstumą, todėl yra reikalingi kiti metodai, kurie galėtų pateikti išsamesnę informaciją apie defektus tyrimo metu.

1.2. Konvoliucinių neuroninių tinklų analizė

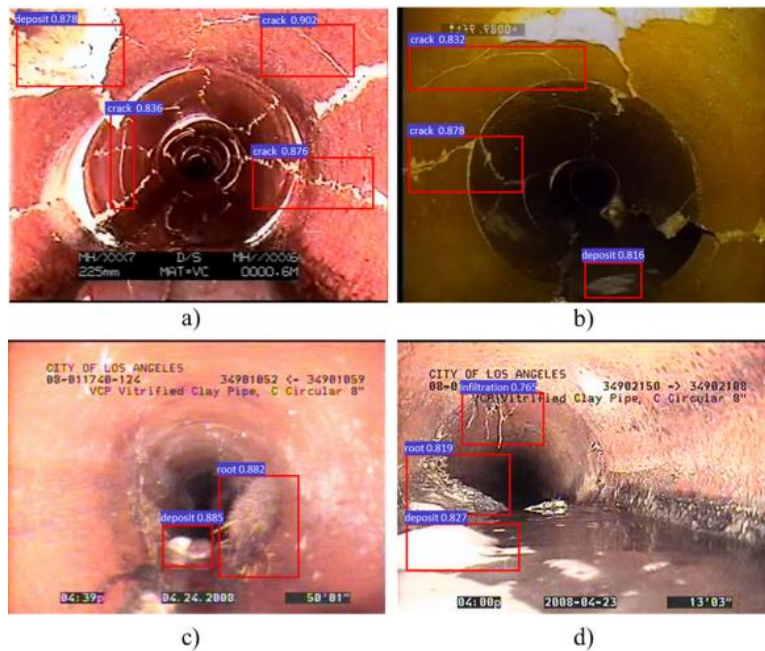
Norint palengvinti operatoriaus darbą naudojant CCTV sistemas ir tuo pačiu efektyvinti šią sistemą, siūlomi įvairūs metodai. Vienas iš tirtų metodų yra kompiuterinės regos gilusis mokymasis. Siūlomas automatizuotas defektų nustatymo metodas naudoja „Faster R-CNN“ konvoliucinį neuroninį tinklą. „Faster R-CNN“ – tai gilusis konvoliucinis neuroninis tinklas, skirtas objektų aptikimui, defektų nustatymui ir lokalizavimui iš CCTV vaizdų [6]. Pasirinktas „Faster R-CNN“, kadangi lyginant su kitais pažangiausiais objektų nustatymo metodais, „Faster R-CNN“ pasižymi aukštu tikslumo ir atpažinimo vertės lygiu ir pasiekė aukščiausią vidutinę tikslumo reikšmę VOC 2012 duomenų rinkinyje [7], tai yra svarbu tiksliai nustatant defektus iš CCTV vaizdų. Nors „Faster R-CNN“ realaus aptikimo laikas nėra labai didelis – 5 FPS, naudojant GPU [8], tyrimo metu tai buvo pakankamas greitis praktiniam nuotekų vamzdynų tikrinimui.

Tyrimo metu iš JAV Džordžijos valstijos CCTV nuotekų tikrinimo vaizdo įrašų buvo surinkta 1260 vaizdų. Vaizdai buvo užfiksuoti naudojant autonomiņį CCTV narą „RedZone® Solo“ su 1440×720 pikselių rezoliucija. Surinktuose vaizduose yra keturios defektų kategorijos, įskaitant medžių šaknų įsiskverbimus, įtrūkimus, infiltracijas ir nuosėdas, kaip parodyta 1.4 paveiksle [6].



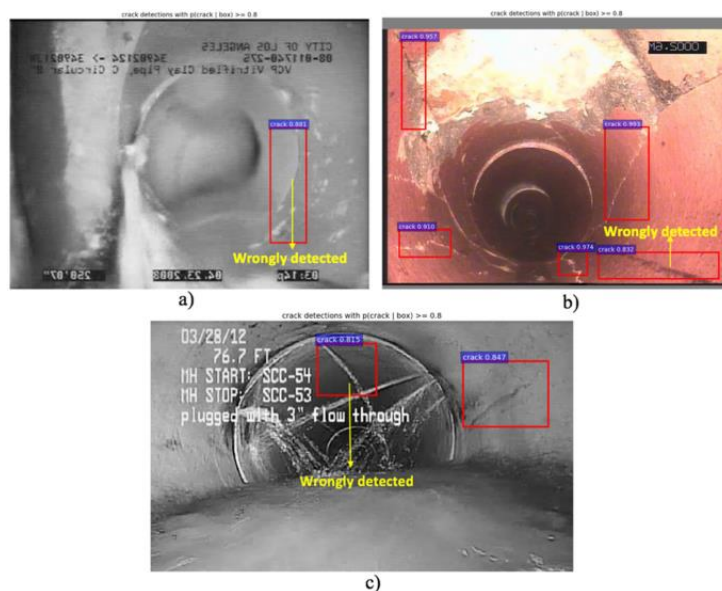
1.4 pav. Keturių kategorijų kanalizacijos vamzdžių defektų vaizdų pavyzdžiai [6]

Tyrimo metu 75% duomenų rinkinio buvo naudojama mokymui, 10% validavimui ir 15% testavimui. Geriausia gauta mAP vertė yra 83%. Kaip parodė eksperimento rezultatai 1.5 paveiksle: a) vaizde buvo nustatyti ir lokalizuoti tiek išilginiai, tiek vertikalūs įtrūkimai, o tame pačiame vaizde taip pat buvo nustatytos prilipusios nuosėdos; b) vaizde įtrūkimai ir nusėdusios nuosėdos buvo teisingai nustatytos, išskyrus vieną nedidelę prilipusią nuosėdą, kuri buvo praleista; c) vaizde, kuriame yra šaknys ir nusėdusios nuosėdos abu defektai buvo tiksliai nustatyti ir lokalizuoti; d) vaizde nedidelė šaknis buvo nustatyta kaip infiltracija, greičiausiai dėl to, kad šaknis yra išsibarsčiusi ir turi gana mažą tankį, tačiau nedidelės šaknies lokalizacija buvo tiksli, o kiti defektai buvo teisingai nustatyti [6].



1.5 pav. Nustatymo vaizdai su keliais to paties arba skirtingais defektų tipais [6]

Aukščiau išvardinti pavyzdžiai parodė, kad siūlomas metodas gali nepriklausomai identifikuoti kelis vienodo tipo ar skirtingų tipų defektus ir kiekvienam defektui sukurti atskirą ribinę dėžę. Nors bendras modelio veikimas buvo įrodytas, testavimo metu vis dar pasitaikė kai kurių klaidingų nustatymų. Kaip parodyta 1.6 a) ir c) paveikslo vaizduose, vamzdyno susijungimų kraštai neteisingai klasifikuojami kaip vamzdyno įtrūkimai, o plona vandens infiltracija per sujungimą taip pat klaidingai klasifikuojama kaip įtrūkimas. Be to, 1.6 paveikslo b) vaizde ilga ir tamsi nuosėda ant vamzdyno vidaus sienos neteisingai aptinkama kaip įtrūkimas [6].



1.6 pav. Neteisingai nustatytų defektų pavyzdžiai [6]

Nors „Faster R-CNN“ gilusis konvoliucinis neuroninis tinklas yra perspektyvus defektų nustatymo metodas, pasižymintis gana aukštu nustatymo tikslumu, jo pritaikymas realiose aplinkose reikalauja

didesnio tikslumo. Dėl šios priežasties kai kurie defektai gali būti nenustatyti ar klaidingai identifikuoti, o tai verčia operatorius atlikti galutinę defektų analizę. Be to, nors 5 FPS greitis tyrimo metu buvo pakankamas, šis kadrų skaičius gali būti nepakankamas atliekant tyrimus realiose greitai kintančiose sąlygose.

1.3. Stereo matymo analizė

Metodas, naudojantis mašininę regą, yra stereo matymas. Skirtingai nuo „Faster R-CNN“, kuri orientuota į greitą ir tikslų defektų identifikavimą 2D vaizduose, stereo matymo metodai leidžia gauti 3D vaizdų duomenis, kurie yra būtini suprantant objektų erdvinės charakteristikas ir jų tikslų išsidėstymą. Stereo matymas – tai 3D duomenų gavimo procesas, naudojant kelis 2D vaizdus [9]. Tai yra, stereo matymas pasiekiamas suderinus taškus, kuriuos mato mažiausiai du vaizdo jutikliai, fiksuojantys vaizdą iš skirtingų perspektyvų [10]. Stereo matymo principas yra pavaizduotas 1.7 paveiksle. Žinant atitinkamų taškų skirtumus ir kamerų geometrinį išdėstymą, galima apskaičiuoti atstumą tarp kamerų ir taškų. Išraiškos 1.1, 1.2 ir 1.3 gali būti naudojamos apskaičiuojant bet kurio taško, kuris atsispindi nuo paviršiaus kliūties, x, y, z koordinatas, kaip parodyta 1.7 paveiksle [11].

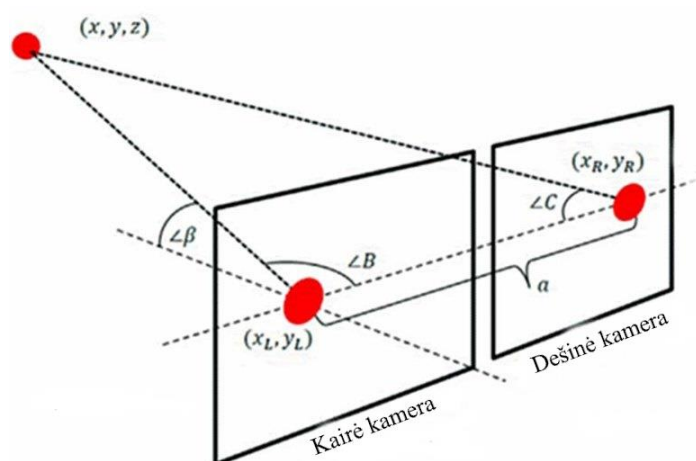
$$x = \alpha \frac{\sin c * B}{\sin(B+C)}, \quad (1.1)$$

$$y = \alpha \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin C * \cos B}{\sin(B+C)} \right), \quad (1.2)$$

$$z = \alpha \left(\frac{\sin C * \sin B * \sin \beta}{\sin(B+C)} \right), \quad (1.3)$$

čia B, C ir β yra fiksuoti kampai, kaip pavaizduota 1.7 paveiksle, o išraiškos 1.1, 1.2 ir 1.3 turi tenkinti fiksuoto atstumo tarp kamerų sąlygą.

Stereo matymas remiasi principu, panašiu į tą, kuri naudoja žmonės ir gyvūnai suvokdami gylį regos pagalba [12]. Šis metodas, kaip ir CCTV metodas, yra grindžiamas optiniu užfiksavimu. Tačiau, stereo matymas sumažina operatorių darbo krūvį, naudojant įvairius skaičiavimo algoritmus 3D objektų atpažinimui.



1.7 pav. Standartinės stereo matymo sistemos principas [13]

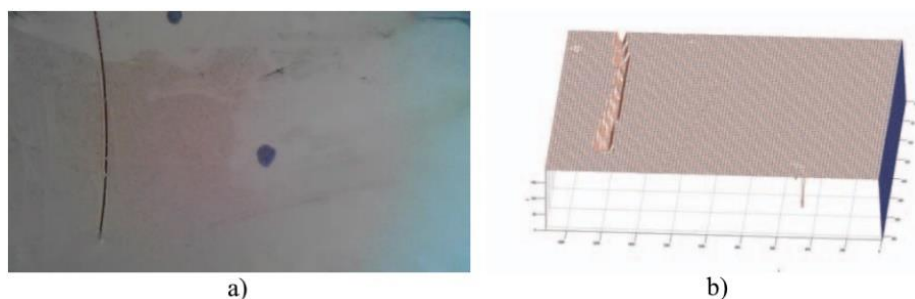
Eksperimento metu stereo matymas buvo įgyvendintas naudojant dvi komercines internetines HD kameras, kurios buvo sumontuotos taip, kad jų vaizdo plokštumos būtų kuo arčiau viena kitos.

Dviejų kamerų bazinė linija α , matoma 1.7 paveiksle, siekia 4 cm. Šis atstumas buvo parinktas siekiant, kad sistema galėtų tilpti į siaurus vamzdžius ir užfiksuotų arti esančius defektus, ypač kai numatoma, kad nuo kamerų iki defektų bus mažesnis nei 50 cm atstumas. Stereo matymo sistema buvo aprūpinta dirbtinio apšvietimo šaltiniu su automatinio stiprinimo kontrole, o dirbtinio šaltinio šviesa sklaidoma prizminiu filtru, siekiant užtikrinti vienodą apšvietimą visame vamzdžio paviršiuje. Eksperimento metu stereo matymo kameros buvo įdėtos į PVC bandymų vamzdį, kurio skersmuo siekė 250 mm, o sienelės storis – 8 mm. Vamzdžio siena buvo modifikuota, kad joje būtų įvairūs defektai, tokie kaip siauri ar platūs įtrūkimai, skylės, medžių šaknys ar riebalų sankaupos. 1 lentelė aprašo skirtingų simuliuotų defektų konstrukciją. Atitikties algoritmas naudojo absoliutaus skirtumo suma (SAD), kuri buvo įdiegta Linux platformoje naudojant C++ programavimo kalbą [14].

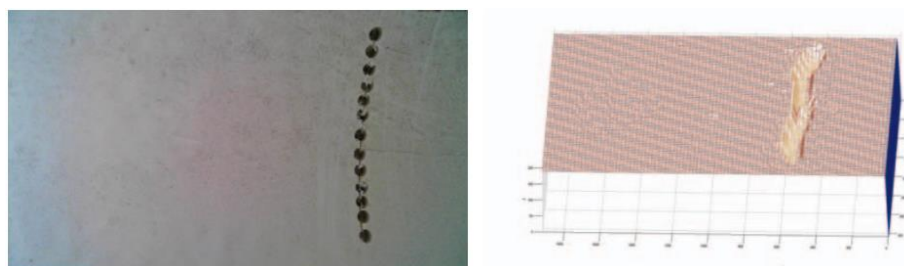
1 lentelė. Defektų modeliavimo imitacijų santrauka [14]

Defektas	Eksperimento
Vamzdžio įtrūkimai	Siauri vamzdžio įtrūkimai daromi pjaunant per patį PVC bandymo vamzdį. Mažų įtrūkimų plotis siekia 2 mm, o plačių įtrūkimų plotis – 8 mm.
Riebalų sankaupos	Sumodeliuota naudojant lipnų, daugkartinį modeliną, iš kuriuo suformuotos įvairios formos.
Skylės	Sukurta išgręžiant įvairias 10 mm skylės eksperimento vamzdyje.
Kliūtys	Eksperimento metu į vamzdžio vidų įdedama vielos ritė, kaip kliūtis.
Medžių šaknys	Naudojamas susmulkintas popierius, surištas viename gale, ir įdedamas į eksperimento vamzdį.

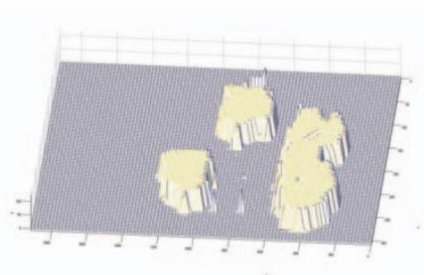
Kiekvieno defekto tipo nustatymo rezultatai matomi 1.8 – 1.13 paveiksluose. Norint parodyti defektų atpažinimą, pateikiami defektų vaizdai iš kairės kameros, taip pat išgautas 3D vaizdas, užfiksuotas abejomis kameromis.



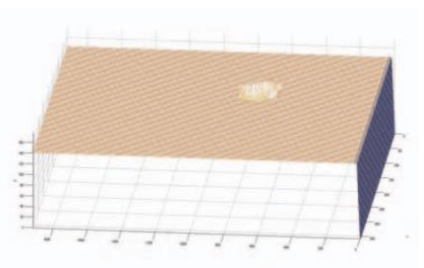
1.8 pav. Siauro (2 mm) įtrūkimo detektavimo rezultatas, kur: a) vaizdas iš kairės kameros, b) išlygintas kontūrinis žemėlapis [14]



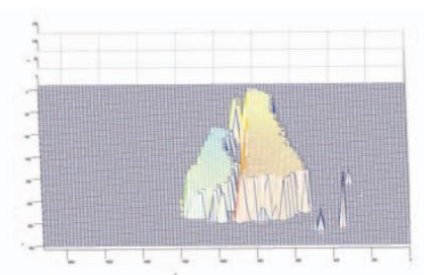
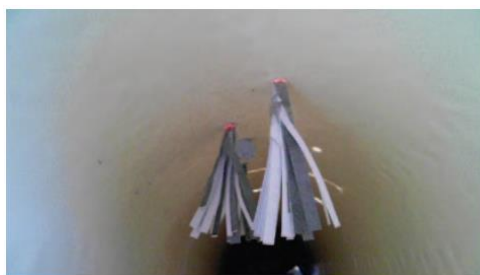
1.9 pav. Plataus (8 mm) įtrūkimo detektavimo rezultatas [14]



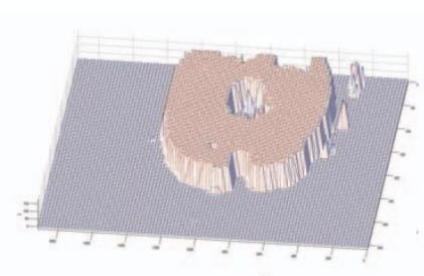
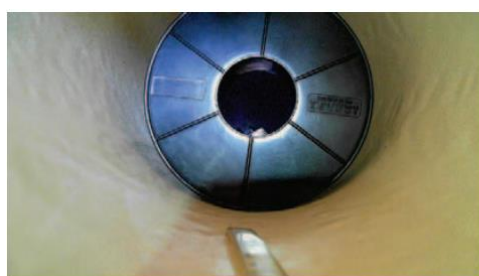
1.10 pav. Riebalų sankeupų detektavimo rezultatas [14]



1.11 pav. Skylės detektavimo rezultatas [14]



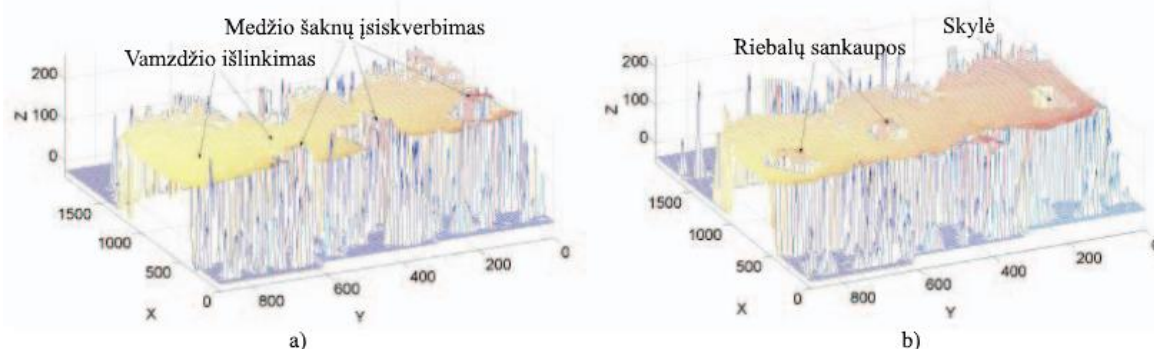
1.12 pav. Medžio šaknų detektavimo rezultatas [14]



1.13 pav. Kliūtis detektavimo rezultatas [14]

Taip pat buvo atliktas panašus tyrimas, kuriame buvo naudotas stereo matymas. Siūlomos sistemos komponentai buvo gana panašūs į aukščiau aptartą sistemą. Ją sudarė dvi komercinės HD kameros, esančios 4 cm atstumu viena nuo kitos. Dirbtinis šviesos šaltinis su automatinio stiprinimo kontrole buvo išskaidytas prizminiu filtru. Kameros pora buvo sumontuota ant mobiliojo roboto, turinčio besisukančią vyrio ašį nuo 0° iki 90° . Bandymų vamzdžiai siekė 400 mm skersmenį ir 8 mm storį. Tyrimo metu vamzdžio sienelė buvo modifikuota, kad būtų su įvairiais defektais [15].

3D defektų atkūrimai buvo sujungti į vieną kontūrų vaizdą, kaip parodyta 1.14 paveiksle, taip palengvinant vizualinę patikrą. Gautas gylis iš skirtumų žemėlapių vėliau gali būti naudojamas defektų klasifikavimo algoritmuose, siekiant pasiūlyti automatinę patikrą.



1.14 pav. Tyrimo metu gauti sujungti 3D vaizdai, kuriuose imituojami vamzdžių defektai: a) medžių šaknys, b) skylė ir riebalų sankaupų nusėdimai [15]

Iš analizuotų tyrimų paaiškėjo, kad stereo matymas turi potencialą defektų nustatymui požeminiuose vamzdžiuose. Taip pat išsiaiškinta, kad praktikoje stereo kamerų pora privalo skenuoti aukštyn ir žemyn, siekiant pasiekti optimalius kampus konkrečių tipų defektams nustatyti (eksperimentuose naudotos tyrimo kameros galėjo pasvirti nuo 0 iki 90 laipsnių) [14]. Tačiau eksperimentų metu atitikmenų suderinimas (angl. *correspondence matching*) [16] susidūrė su iššūkiais, susijusiais su tekstūros neturinčių paviršių problemomis ir galimais pašalinių objektų, esančių vamzdyje, kamerų uždengimais. Kadangi praktikoje reikalingas lankstus kamerų pozicionavimas siekiant pasiekti optimalius kampus įvairių defektų nustatymui, tai sukuria papildomus sistemos kompleksiskumus ir reguliavimo iššūkius. Šie iššūkiai rodo, kad nors stereo matymas geba nustatyti įvairius defektus, tačiau yra būtinas tolimesnis sistemos tobulinimas ir pritaikymas požeminių vamzdžių inspekcijai.

1.4. Akustinio atspindžio analizė

Akustinio atspindžio metodas remiasi garso bangomis, kurių dažnis siekia mažiau nei 20 kHz, t. y. bangomis, generuojamomis girdimojo dažnio diapazone [17]. Kaip ir vaizdo analizės grįsti metodai, akustinio atspindžio metodas yra neinvazinis ir leidžia tirti neprieinamas vamzdynų dalis su minimaliu trikdžiu. Skirtingai nuo vaizdo analizės grįstų metodų, akustinio atspindžio metodas suteikia galimybę gauti informaciją apie vamzdyno būklę nepriklausomai nuo optinės prieigos ar apšvietimo kokybės, kas yra ypač svarbu tamsiuose ar sunkiai pasiekiamuose vamzdynuose. Norint įgyvendinti šį metodą, reikia garso šaltinio ir imtuvo, kuriuo matuojamas vamzdyno akustinis atsakas. Šio tipo metodu analizuojamos atspindėtos bangos, iš kurių yra gaunama informacija apie vamzdyno defektus, pavyzdžiui, užsikimšimus [18].

Kai garsiakalbis skleidžia akustinį signalą, gaunamas signalas yra modeliuojamas diskrečiuoju laiku [19] kaip nurodyta 1.4 išraiškoje:

$$r(t) = s(t) * h(t) = \sum_{z=0}^t s(z)h(t-z), \quad (1.4)$$

čia r – gautas signalas tam tikru laiko indeksu t apibrėžiamas kaip perduoto signalo s ir vamzdyno perdavimo funkcijos h konvoliucija tarp garsiakalbio ir mikrofono [20].

Naudojant mažą garsiakalbį yra sudėtinga sukurti impulsus, turinčius pakankamai energijos. Todėl impulso atsakas nėra nustatomas tiesiogiai, o yra randamas taikant dekonvoliuciją, t. y. atsakas yra lygus perdavimo funkcijai, apibrėžtai 1.5 išraiškoje:

$$H(\omega) = \frac{R(\omega)}{S(\omega)}. \quad (1.5)$$

Čia kiekvienas narys atitinka 1.4 išraiškos nario Furjė transformaciją. Tai leidžia naudoti tiesiškai kintančio dažnio moduliuotą „chirp“ signalą, kurio energija yra pasklidusi per visą dažnių spektro juostą [20].

Remiantis prielaida, kad impulsinis atsakas yra impulsų serija atitinkanti kiekvieną akustinės bangos kelią nuo šaltinio iki imtuvo, naudojama 1.6 išraiška [21]:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N g_n \delta(t - \tau_n), \quad (1.6)$$

čia δ – Dirako delta funkcija, N – Dirako delta impulsu komponentai, ir kiekvienas n -tasis komponentas turi g_n amplitudinę vertę ir τ_n vėlinimą [20].

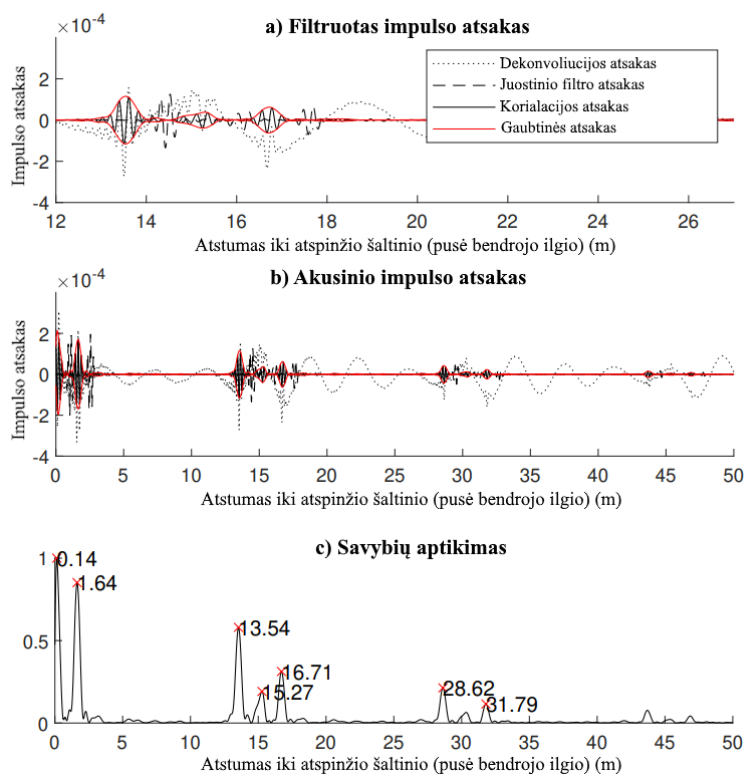
Siekiant nustatyti kiekvieną impulso komponentą, naudojamas juostinis filtras $r(t)$ ir $s(t)$ komponentams, kuris pašalina iš gauto impulso atsako aukšto dažnio dispersines bangas ir žemo dažnio osciliacijas. Filtravimo procese atsirandantis vėlinimas yra pašalinamas naudojant kryžminę koreliaciją tarp filtruoto vamzdyno impulsinio atsako ir paties filtro impulsinio atsako. Be to, naudojant signalo gaubiamąją, yra pašalinama osciliacija [20].

Signalų apdorojimas pavaizduotas 1.15 paveikslo a) dalyje, kur laiko vėlinimas τ_n paverčiamas atstumu iki atspindžio šaltinio ξ_n pagal 1.7 išraišką:

$$\xi_n = \frac{1}{2} c \tau_n, \quad (1.7)$$

čia c – yra bangos greitis. Taip pat svarbu pažymėti, kad žinomas bangos greitis reikalauja kalibravimo, atliekant tyrimus kintančio drėgnumo ir temperatūros aplinkoje [20].

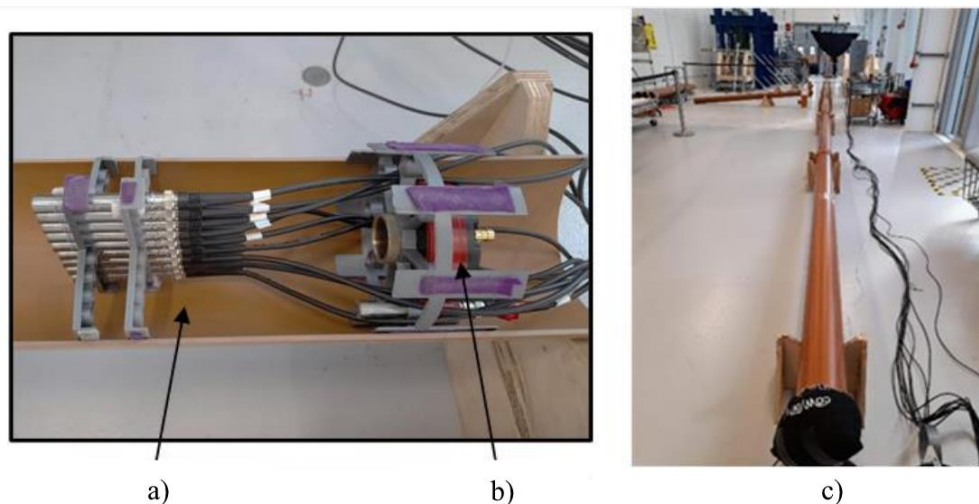
Atliktų eksperimentinių akustinių matavimų gauti rezultatai matomi 1.15 paveikslo b) dalyje, kurioje pateikiamas gautas atsakas iš matavimų, atliktų 15 m ilgio vamzdyje, esant matavimo įrenginiui 1,5 m atstumu nuo vamzdžio galo. 1.15 paveikslo c) dalyje pateikiamas numatytas impulsinis atsakas, pagal 1.6 išraišką, iš kurios galima atlikti ξ_n matavimus. Pirmasis impulsas atitinka tiesioginį kelią tarp šaltinio ir imtuvo, ir tolesniuose metoduose į jį neatsižvelgiama. Antrasis ir trečiasis impulsai atitinka atspindžius nuo vamzdyno galų. Ketvirtasis impulsas, matomas gautame atsake, atitinka dvigubai ilgesnį kelią, nei vamzdžio ilgis, suteikdamas atstumą atspindžiui, kuris yra lygus vamzdžio ilgiui – 15 m [20].



1.15 pav. Apdoroto akustinis signalo grafikai [20]

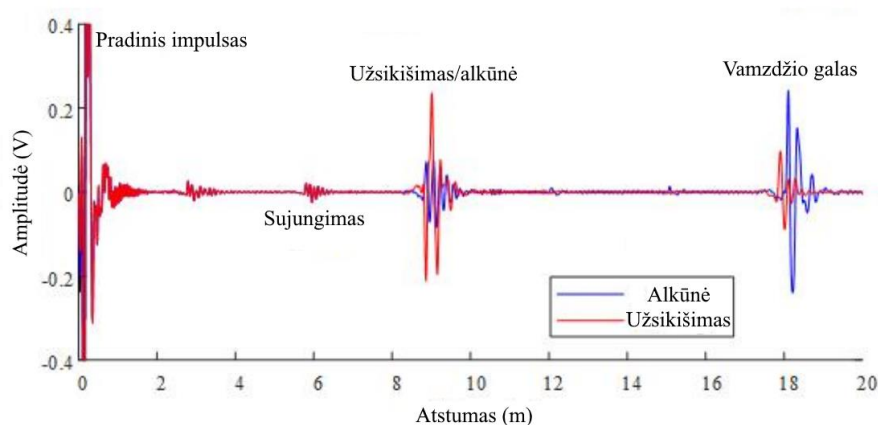
Jei naudojamas tyrimo įrenginys yra pakankamai didelis lyginant su tiriamu vamzdynu, svarbu atsižvelgti į galimybę, kad gali kilti reikšmingas akustinis atspindys nuo pačio tyrimui naudojamą įrenginio. Dėl kurio gali atsirasti klaidingi signalai, atrodantys lyg akustinė banga būtų keliavusi dvigubai ilgesnį atstumą. Ši aplinkybė ypač svarbi atliekant akustinio metodo matavimus sudėtingose aplinkose, kur atspindžiai gali sukelti papildomą triukšmą ir taip iškreipti gaunamus duomenis [20].

Kitame tyrime, kuriame buvo taikytas akustinis metodas, naudotas 18 m ilgio vamzdis, kuris matomas 1.16 c) paveiksle, skirtas užsikišimų ir vamzdžio alkūnių, esančių daugiau nei 2 m nuo daviklių, nustatymui. Tyrimo įrengimo vaizdas pateikiamas 1.16 a) ir b) paveiksle. Garsiakalbis, pasirinktas kaip akustinių bangų sužadavimo šaltinis, buvo sumontuotas vamzdžio skersinio pjūvio centre [22]. Impulsų atsako matavimui naudotas „chirp“ signalas, kurio dažnių diapazonas siekė nuo 100 iki 6000 Hz [17]. Be to, garso bangų matavimui vamzdžio skersmenyje buvo įrengti devyni mikrofonai.



1.16 pav. Akustinio atspindžio metodo taikymo vaizdas, kuriame: a) garsiakalbis, b) devynių mikrofonų išdėstymas, c) tyrime naudojamo vamzdžio vaizdas [22]

Šio tyrimo rezultatas matomas 1.17 paveiksle, kuris parodo akustinės bangos impulsų atsaką su užsikimšimu ir be užsikimšimo. Garso vėlavimo laikas nurodo užsikimšimo arba alkūnių vietą su mažesne nei 0,14 m paklaida. Tai parodė, kad garso atspindžio pikas gali gana tiksliai nurodyti užsikimšimo ar vamzdžio alkūnės vietą [22].



1.17 pav. Akustinės bangos impulso atsakas sklindantis per vamzdį kuriame yra užsikimšimas ir alkūnė [22]

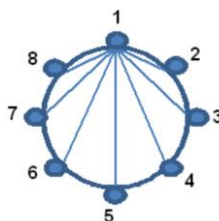
Be to, tyrimo metu išsiaiškinta, kad pusės dydžio blokada sukėlė didesnę atspindėtą garso slėgį palyginti su alkūnės vamzdelio atspindžiu, matuojant per dažnių diapazoną nuo 300 iki 2000 Hz [22]. Tai rodo, kad akustinės charakteristikos gali būti naudojamos įvairių tipų užsikimšimams atpažinti.

Šių eksperimentų rezultatai rodo, kad akustinio atspindžio analizės metodas suteikia reikšmingos informacijos tiriant požeminius vamzdžius ir nustatant vamzdžių užsikimšimus ar esamas alkūnes. Tačiau šis metodas nesuteikia aiškaus defektų vaizdo, dėl ko gali kilti sunkumų defektams nustatyti ir atpažinti, ypač žmonėms, neturintiems patirties signalų analizėje.

1.5. Ultragaršine vizualizacija grįšta analizė

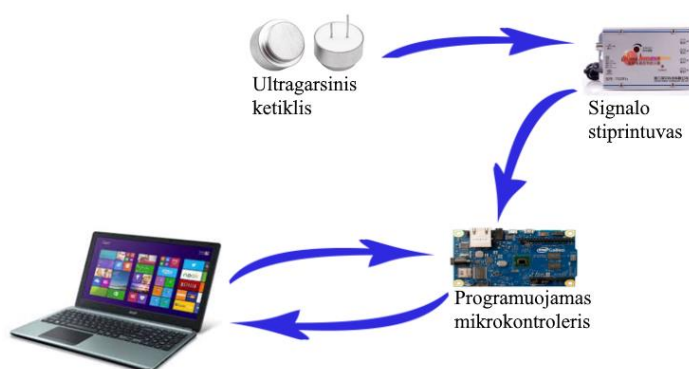
Ultragarso metodu pagrįstas požeminių vamzdžių būklės tikrinimas naudoja aukšto dažnio garso bangas, kurios skirtingai nuo žemo dažnio akustinio atspindžio bangų, gali pateikti tikslesnį vaizdą apie požeminius vamzdžius, siekiant nustatyti keletą skirtingų medžiagų savybių, tokių kaip medžiagos storis, forma, esami defektai, taip pat defektų dydį ar vietą kur yra defektas. Impulsinės ultragaršinės bangos yra generuojamos naudojant ultragarso keitiklius. Bet kokia į keitiklį grįžusi banga yra užfiksuojama, ir ji suteikia informacija apie sugrįžusio signalo amplitudę bei laiką praėjusį nuo išsiuntimo iki keitiklio priėmimo [21, 22]. Kadangi garso greitis yra žinomas, galima apskaičiuoti bangos sklidimo atstumą išmatavus jos kelionės laiką.

Gaunamo ultragarso vaizdo atkūrimo raiška priklauso nuo naudojamų keitiklių skaičius, kuo keitiklių skaičius santykinai didesnis, tuo didesnė vizualizacijos raiška yra išgaunama. Analizuotame tyrime buvo naudojamas nedidelis keitiklių skaičius, dėl ko buvo gautas mažesnės raiškos vaizdas. Iš viso tyrime naudojami aštuoni aktyvūs ultragarso keitikliai, kurie pakaitomis naudojami kaip siųstuvai, o likę kiti septyni – kaip imtuvai [23]. Ultragaršinių keitiklių išdėstymas matomas 1.18 paveiksle.



1.18 pav. Ultragarso keitiklių išdėstymas skerspjūvio vaizde [23]

Tyrimo metu kaip tiriamieji objektai buvo naudojami oras, vanduo, dirvožemis, purvas, aliuminis ir šių medžiagų kombinacijos. Be to, tyrimo metu buvo naudojamas vandeniui atsparus ultragaršinis jutiklis [23]. Ultragarso tyrimo vizualizacijos blokinė schema pavaizduota 1.19 paveiksle.



1.19 pav. Tyrimo blokinė diagrama [23]

Darbo metu bangos sklidimo ilgiai buvo išmatuoti rankiniu būdu, naudojant 8 ultragaršinius keitiklius. Pirmasis keitiklis naudojamas kaip siųstuvai, o likusieji keitikliai – nuo antrojo iki aštuntojo – kaip imtuvai. Po to antrasis keitiklis nustatomas kaip siųstuvai, o visi kiti – nuo trečiojo iki aštuntojo, įskaitant ir pirmąjį keitiklį, nustatomi kaip imtuvai. Šis žingsnis kartojamas iki tol, kol aštuntasis ultragarso keitiklis naudojamas kaip siųstuvai [23].

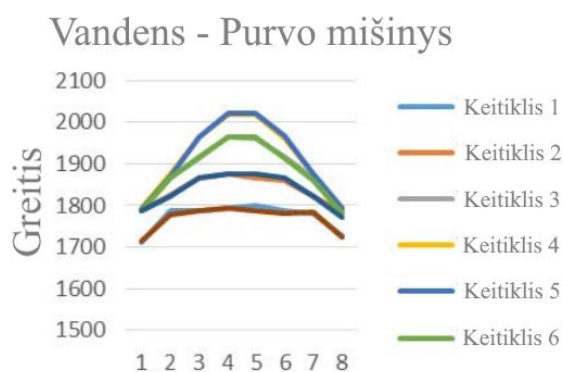
2 lentelė. Ultragarso signalo greitis purvo ir vandens mišinyje, išmatuotas aštuoniuose keitikliuose [23]

Keitiklis	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
1	1712,4	1786,4	1787,1	1793,8	1789,4	1786,8	1788,6	1714,2
2	1788,4	1825,8	1865,1	1876,5	1870,5	1866,4	1822,4	1776,4
3	1785,8	1866,4	1912,4	1963,7	1963,7	1916,5	1866,4	1785,8
4	1793,7	1876,5	1963,5	2017,1	2020,5	1963,7	1876,5	1793,2
5	1799,6	1866,5	1962,3	2018,5	2021,8	1966,1	1874,5	1786,2
6	1786,9	1860,4	1918,6	1961,3	1966,9	1913,7	1865,1	1781,3
7	1780,8	1822,9	1865,1	1876,5	1876,5	1860,4	1820,8	1784,5
8	1725,6	1784,6	1789,8	1793,2	1794,6	1780,1	1772,9	1723,8

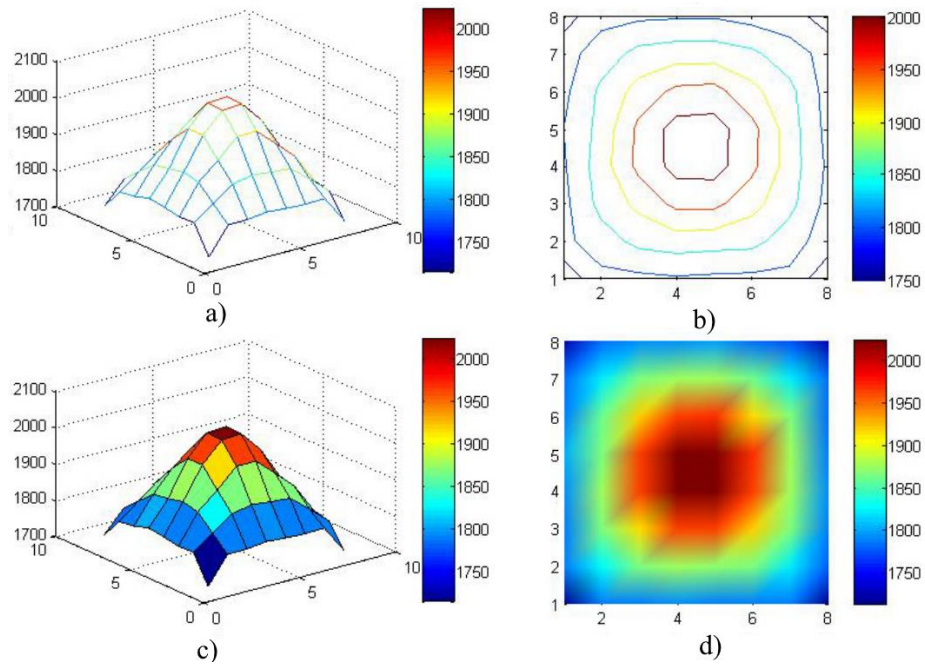
3 lentelė. Ultragarso signalo greitis aliuminio, purvo ir oro mišinyje, išmatuotas aštuoniuose keitikliuose [23]

Keitiklis	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
1	2412,4	2476,4	2527,1	2543,8	2559,4	2506,8	2498,6	2414,2
2	2508,4	2595,8	2685,1	2696,5	2710,5	2666,4	2612,4	2466,4
3	2505,8	2686,4	2772,4	2883,7	2863,7	2796,5	2666,4	2525,8
4	2563,7	2706,5	2883,5	2952,1	2970,5	2863,7	2716,5	2543,2
5	2549,6	2716,5	2862,3	2973,5	2961,8	2886,1	1694,5	2556,2
6	2526,9	2650,4	2798,6	2861,3	2886,9	2773,7	2685,1	2501,3
7	2480,8	2612,9	2655,1	2726,5	2706,5	2670,4	2590,8	2494,5
8	2415,6	2494,6	2519,8	2563,2	2544,6	2520,1	2482,9	2423,8

Ultragarso bangų greičio tyrimo rezultatai, kuriuose buvo tirti vandens ir purvo bei aliuminio, purvo ir oro objektai, pateikti 2 – 3 lentelėje (greitis matuojamas m/s). Iš 2 lentelės ir 1.20 paveikslo matyti, kad ultragarso bangų greičio diapazonas siekia nuo 1700 iki 2020 m/s. Gauti rezultatai nedaug skiriasi nuo garso sklidimo vandenyje – 1490 m/s ir purve 2000 m/s [23]. Vaizdo atkūrimo rezultatai, tiriant purvo ir vandens mišinį, pavaizduoti 1.21 paveiksle: a) tinklelio formos, b) kontūrų formos, c) „PColor“ formos, d) paviršiaus formos.

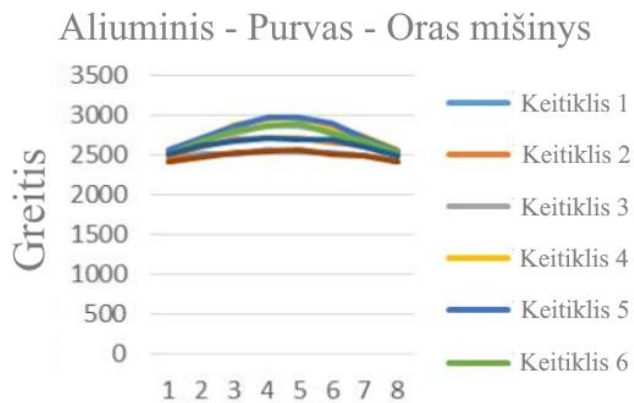


1.20 pav. Ultragarso bangos sklidimo greitis kiekvienai keitiklių pozicijai tiriant vandens ir purvo mišinį [23]

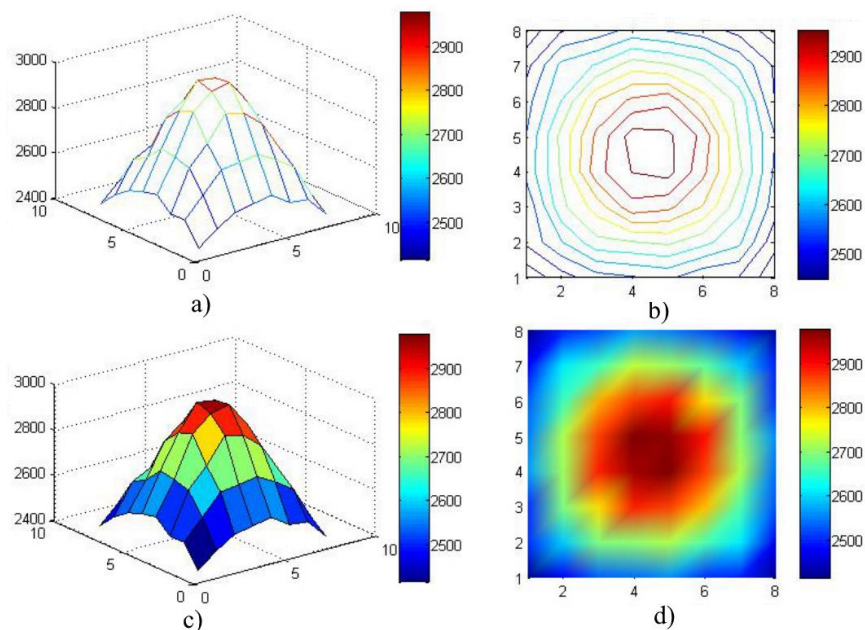


1.21 pav. Ultragarso bangų greičio atvaizdavimas tiriant vandens ir purvo mišinį [23]

Tiriant aliuminio, purvo ir oro medžiagų kombinaciją, duomenis pateikti 3 lentelėje ir 1.22 paveiksle. Ultragarso bangų greitis aliuminio, purvo ir oro medžiagose svyruoja nuo 2400 iki 2900 m/s [23]. Vaizdo atkūrimo rezultatai, tiriant aliuminio, purvo ir oro mišinį, pavaizduoti 1.23 paveiksle: a) tinklelio formos, b) kontūrų formos, c) „PColor“ formos, d) paviršiaus formos.



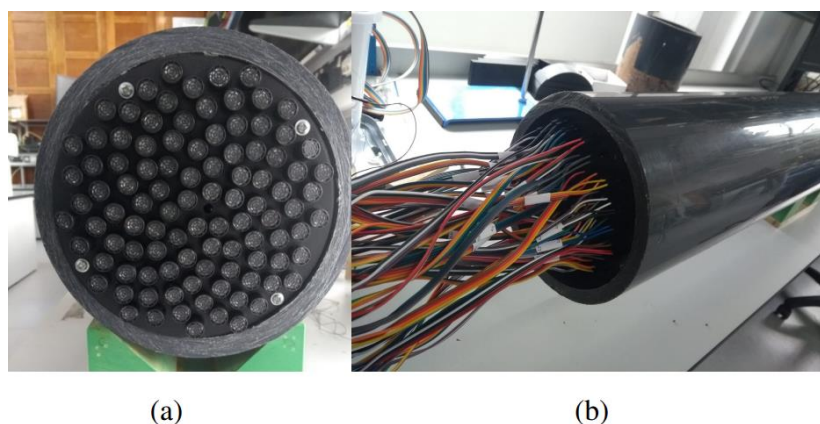
1.22 pav. Ultragarso bangos sklidimo greitis kiekvienai keitiklių pozicijai tiriant aliuminio purvo ir oro mišinį [23]



1.23 pav. Ultragarso bangų greičio atvaizdavimas tiriant aliuminio purvo ir oro mišinį [23]

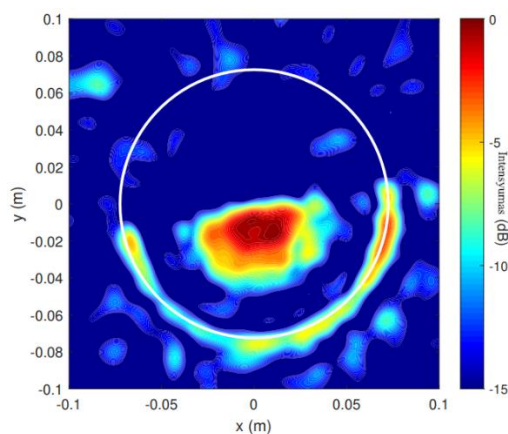
Gauti rezultatai parodo, kad ultragarso metodu galima analizuoti medžiagų savybes. Vaizdai buvo gauti, apskaičiuojant kiekvieno bandinio kelio ilgį ir vidutinį bangos sklidimo greitį. Matomi bangos greičio skirtumai tiriamuose mišiniuose parodo galimybę nustatyti įvairių tipų medžiagas.

Kitame užsikimšimo ir defektų atpažinimo požeminiuose vamzdžiuose ultragarsu tyrime buvo naudota 40 kHz ultragarso keitiklių matrica, kuri sugebėjo atkurti gana detalų užsikimšimų vaizdą nuo 20 iki 50 cm atstumuose. Siekiant išgauti aukščiausią įmanomą vamzdžio atvaizdavimo kokybę, buvo sukurta didelė matrica, sudaryta iš 100 ultragarso keitiklių. 1.24 paveiksle matoma, kad tyrimo metu naudota 100 ultragarso keitiklių matrica, kurios diametras siekia 145 mm [22]. Ši matrica buvo naudojama laiko srities (angl. *time-domain*) signalų išgavimui iš visų siųstuvo–imtuvo porų, t. y. visos matricos užfiksavimui (angl. *full matrix capture*), o vėliau gauti duomenys buvo apdorojami naudojant TFM technologiją, siekiant atkurti trimatį vaizdą [24]. Taip pat tyrėjai padarė galimybę pašalinti bet kurio iš 100 keitiklių matricos gautas reikšmes, leidžiant nustatyti gaunamo vaizdo kokybės priklausomybę nuo naudojamų keitiklių skaičiaus [22].



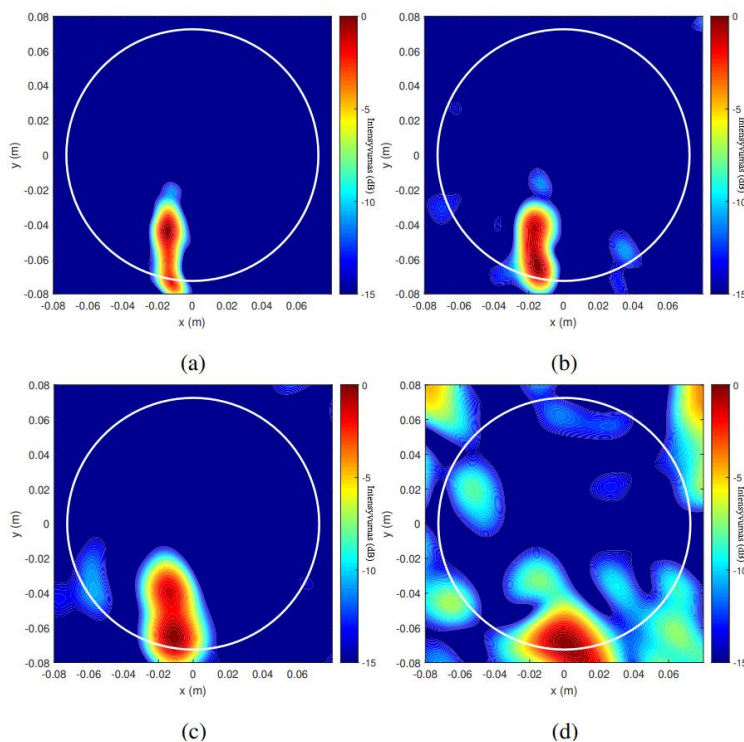
1.24 pav. Tyrimo metu naudota 40 kHz 100 ultragarso keitiklių matrica [22]

Tyrimo metu gautas trimatis atvaizdavimas pateiktas 1.25 paveiksle. Atvaizde matomas vamzdžio užsikišimas, esantis vamzdžio apačioje, 20 cm atstumu nuo ultragarso keitiklių matricos. Didelės amplitudės sritis vamzdžio centre ir prie sienos atitinka užsikišimo formą. Tarp didelio intensyvumo sričių yra matoma skirianti mažos amplitudės sritis – tai yra dėl bangų interferencijos efekto, kuris susidaro iš trukdžių tarp tiesioginių atspindžių ir atspindžių, kurie grįžta atsispindėję nuo vamzdžio sienelių. Šis efektas priklauso nuo atvaizdavimo diapazono [22].



1.25 pav. Atkurtas trimatis užsikišimo vaizdas [22]

Toliau buvo tirtas vaizdo kokybės kitimas, mažinant ultragarso keitiklių skaičių. Tiriamas objektas yra 6 cm aukščio modelinio molio kūgis, esantis 20 cm atstumu nuo keitiklių, naudojant atitinkamai 100, 50, 25 ir 12 elementus, kurie atitinkamai pavaizduoti 1.26 paveikslo a) – d) dalyse. Kiekvienam vaizdui atkurti naudojami keitikliai buvo atsitiktinai parinkti iš nustatyto spindulio, siekiant išlaikyti tolygų keitiklių pasiskirstymą [22].



1.26 pav. 6 cm molio kūgio atvaizdavimas esant: a) 100, b) 50, c) 25, d) 12, ultragarsinių keitiklių [22]

Iš gautų vaizdų matyti, kad objektas yra aiškiau išskirtas, naudojant didesnę kiekį ultragarsinių keitiklių. Tačiau objektą galima atpažinti ir naudojant 50 ir 25 ultragarsinius keitiklius, o naudojant 12 ultragarsinių keitiklių pastebimas reikšmingas raiškos praradimas, dėl kurio tiriamo objekto kontūras nėra aiškus.

Ultragarso metodu pagrįstas tyrimas parodė galimybę įvertinti požeminių vamzdžių užsikimšimus, naudojant ultragarso bangas. Tyrimo metu buvo nustatyti vamzdyje esantys defektai, jų forma, dydis ir vieta. Taip pat tyrimas atskleidė ultragarso vizualizacijos raiškos priklausomybę nuo naudojamų keitiklių skaičiaus – didesnis keitiklių skaičius leidžia pasiekti aukštesnės raiškos atvaizdus. Tačiau šio metodo taikymas realiose sąlygose būtų gana nepraktiškas, kadangi yra reikalingas gana didelis keitiklių skaičius, t. y. daugiau nei 12. Tai užimtu didelį tiriamojo vamzdžio skerspjūvio plotą. Šis faktorius gali būti kliūtis, jeigu požeminis vamzdis yra siauras arba jei vamzdžio sienelės jau yra pasidengusios nuosėdomis dėl kurių fiziškai nebūtų galima įtalpinti įrenginio su tokiu kiekiu keitiklių.

Nepaisant aptartų įvairių metodų privalumų požeminių vamzdžių defektų ir užsikimšimų nustatymo srityje, kiekvienas jų turi savų trūkumų. CCTV sistemos, nors ir plačiai paplitusios dėl savo paprastumo, reikalauja žmogiškojo faktoriaus įsikišimo ir papildomo šviesos šaltinio. Konvoliuciniai neuroniniai tinklai, nors ir efektyvūs atpažįstant ir klasifikuojant defektus, susiduria su aukšto tikslumo reikalavimais realiose sąlygose. Akustinio atspindžio analizė nesuteikia daug informacijos apie vamzdžiuose esančius defektus. Ultragarsinė vizualizacija, nors ir suteikia detalesnę informaciją apie užsikimšimus, susiduria su ribojimu dėl didelio naudojamų keitiklių skaičiaus, kuris gali būti kliūtis siauresniuose požeminiuose vamzdžiuose.

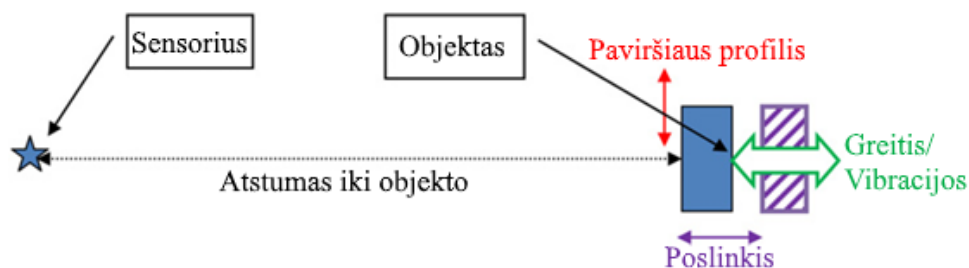
Šie iššūkiai skatina ieškoti alternatyvių sprendimų. Todėl, siekiant spręsti minėtas problemas užsikimšimų nustatymo srityje, šiame darbe bus orientuojamasi į optines matavimo technikas. Šios technikos nepriklauso nuo papildomo šviesos šaltinio, gali būti itin mažų matmenų ir integruotos į mobilius robotus požeminių vamzdžių tikrinimui. Be to, mokslinėje literatūroje trūksta tyrimų, kuriuose būtų naudojamos optinės matavimo technikos požeminių vamzdžių kontekste.

2. Tyrimo metodika

Šiame skyriuje bus aptariamasi įvairios optinės matavimo technikos, skirtos nekontaktiniams atstumų matavimams. Pradžioje bus pateikta bendra optinių matavimų metodų apžvalga, apibrėžiant jų pagrindinius fizikinius principus ir panaudojimo galimybes. Skyriuje taip pat bus aprašytas pasirengimas tyrimui ir tyrimo metu naudojami sprendimai.

2.1. Atstumo matavimas naudojant optines matavimo technikas

Optika pagrįsta matavimo technika gali būti naudojama greitam arba automatiniam matavimui atlikti, kai yra reikalingas bekontaktis metodas [25].

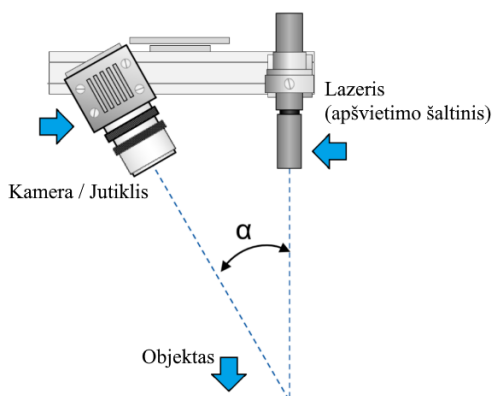


2.1 pav. Optinio jutimo metodų galimi parametrai matavimams [25]

Šiame skyriuje bus aptariamasi įvairūs nekontaktiniai optinio jutimo metodai, kurie gali būti naudojami matuoti atstumus iki objektų ar su jais susijusius parametrus, tokius kaip poslinkiai, paviršiaus profiliai, greičiai ir vibracijos, kaip pavaizduota 2.1 paveiksle. Bus aprašyti šių metodų fizikiniai pagrindai, leidžiantys suprasti jų stipriąsias ir juos ribojančias puses, tikslumą ir darbo diapazoną.

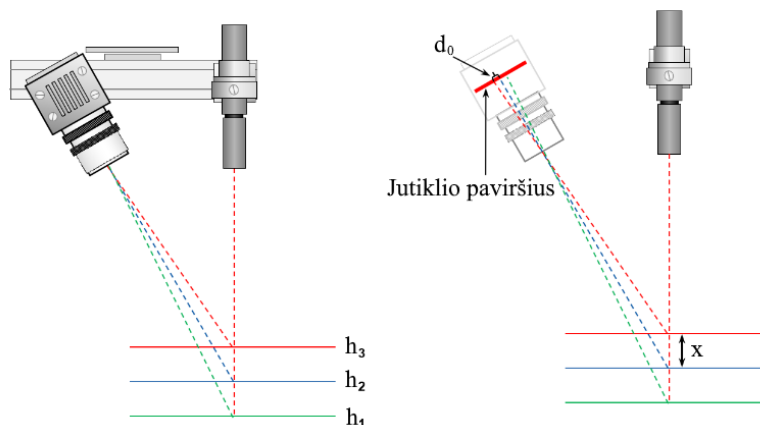
2.1.1. Atstumo matavimas pagal lazerio spindulio atsilenkimą

Trianguliacijos matavimas – tai atstumo matavimas pagal lazerio spindulio atsilenkimą. Tai yra matavimo technika, naudojama trimačių matavimų fiksavimui, derinant lazerio šviesos šaltinį su CCD arba CMOS kamera su atitinkamai parinktu objektyvu [25, 26]. Lazerio spindulys ir kamera yra nukreipti į tiriamą objektą, kaip parodyta 2.2 paveiksle. Priiman žinomą kampinį poslinkį α tarp lazerio šaltinio ir kameros jutiklio, galima išmatuoti gylį skirtingose taškuose naudojant trigonometriją.



2.2 pav. Lazerio trianguliacijos nustatymas [28]

Raudonos, mėlynos ir žalios taškuotos linijos 2.3 paveiksle iliustruoja, kaip atsispindinti lazerio šviesa pataikys į skirtingas jautraus jutiklio vietas, priklausomai nuo atstumo tarp lazerio šaltinio ir tiriamojo objekto. Pozicija, kurioje atsispindinti lazerio šviesa pataikys į jutiklio paviršių, priklauso nuo vertikaliojo objekto poslinkio ir nuo lazerio / kameros išdėstymo [28, 29]. Kitaip tariant, kai keičiasi atstumas tarp lazerio šviesos šaltinio ir tikrinimo taško, keičiasi ir vieta jutiklyje, kur aptinkama šviesa. Pokytis nuo nominalaus vertikaliojo atstumo žymimas kaip atstumu x nuo linijos h_2 , sukeliantis proporcingus padėties pokyčius d_0 jautriame jutiklyje. Didėjant vertikaliam atstumui, bus didesnis padėties poslinkis jutiklyje [28].



2.3 pav. Lazerio šviesos nustatymas esant skirtingam atsispindėjimo aukščiui [28]

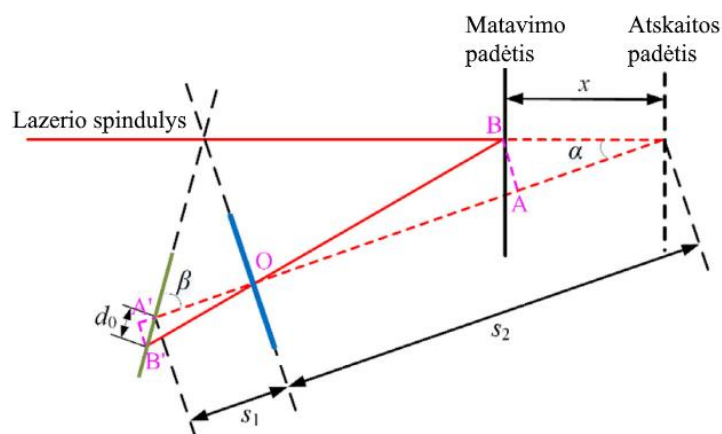
2.4 paveiksle pateikti ΔOAB ir $\Delta OA'B'$ trikampiai atitinka $\angle AOB = \angle A'OB'$, $\angle OAB = \angle OA'B' = 90^\circ$. Iš trikampių panašumo išvedama 2.1 išraiška:

$$\frac{x \sin(\alpha)}{d_0 \sin(\beta)} = \frac{s_2 - x \cos(\alpha)}{s_1 + d_0 \cos(\beta)} \quad (2.1)$$

Toliau išmatuoto objekto poslinkis gali būti demoduliuojamas nuo atspindėtos šviesos taško padėties pokyčių pagal 2.2 išraišką:

$$x = f(d_0) = \frac{s_2 d_0 \sin(\beta)}{s_1 \sin(\alpha) + d_0 \sin(\alpha + \beta)} \quad (2.2)$$

čia 2.1 ir 2.2 išraiškų simboliai, kurie taip pat matomi 2.4 paveiksle yra: x – poslinkis, d_0 – atitinkamai atsispindėjusios šviesos taške pokytis jautraus jutiklio paviršiuje, s_1 – yra atstumas tarp lęšio ir jautraus jutiklio paviršiaus, s_2 – yra atstumas tarp išmatuoto objekto ir lęšio [31].



2.4 pav. Trianguliacijos matavimo geometrinis aprašymas [31]

Trianguliacijos jutiklio atstumo skiriamoji geba priklauso tiek nuo lazerio spindulio dydžio, tiek nuo detekcijos pikselio dydžio [32]. Suprojektuotame darbiniam diapazone skiriamoji geba taip pat kinta priklausomai nuo atstumo – aukščiausia skiriamoji geba (gali būti keli mikrometrai) bus arti minimalaus jutimo atstumo. Kai atstumas didėja link maksimalaus jutimo atstumo, skiriamoji geba palaipsniui mažėja. Tai galima suprasti iš 2.3 paveikslo dešinėje pusėje storai pažymėtos raudonos linijos detektoriuje – atsižvelgiant į tai, kiek objektas turi pasislinkti, kad jo vaizdas detektoriuje pasislinktų vienu pikseliu [25].

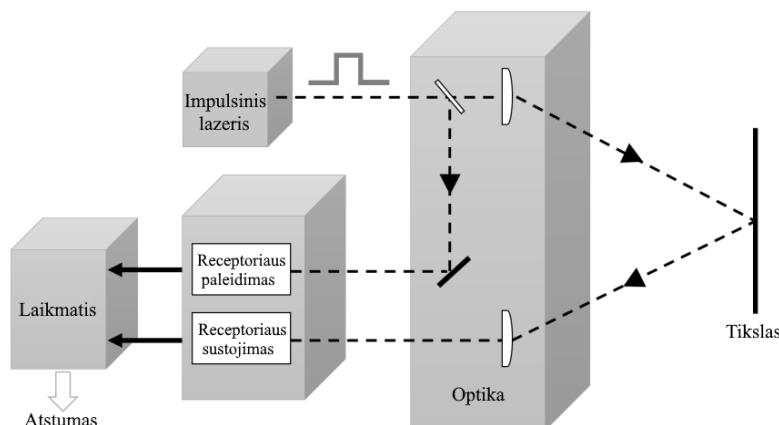
Trianguliacijos jutikliai siūlo mažos kainos ir greito matavimo privalumus (galimi nuo dešimčių iki šimtų kHz). Be to, pridėdant galimybę nuskaityti trianguliacijos lazerio taško padėtį objekto plokštumoje, atsiranda galimybė nustatyti objekto formą. Tačiau, be atstumo ir tikslumo apribojimų, trianguliacijos jutikliai turi gana didelį trūkumą. Kadangi šis metodas yra paremtas atstumo matavimu pagal lazerio atsilenkimo kampą, jutiklis turi būti bent minimaliai platus, kad būtų užtikrintas atstumas tarp siūstuvo ir detektoriaus. Tai panaikina galimybę nustatyti siaurose angose (požeminiuose vamzdžiuose) esančius objektus. Be to, norint padidinti darbinį atstumą, jutiklio plotis turi būti didinamas, todėl metro ar kelių metrų atstumo jutikliai gali tapti nepatogiai dideli [25].

2.1.2. Impulsinis ToF metodas

Impulsinis ToF (laiko sklidimo) metodas yra pagrįstas paprasčiausiu šviesos moduliacijos principu – atstumas nustatomas padauginant šviesos greitį terpėje iš laiko, per kurį šviesos impulsas nukeliauja iki tiriamo objekto [10]. ToF metode naudojamos IR šviesos atspindėtos bangos [33]. Kadangi šviesos greitis yra duota konstanta, kol išliekame toje pačioje optinėje terpėje, atstumas iki objekto yra tiesiogiai proporcingas kelionei užtruksiam laikui. O išmatuotas laikas atspindi dvigubą atstumą iki objekto, nes šviesa keliauja iki tikslo ir atgal, todėl privalo būti perpus sumažintas, kad būtų nustatyta tikroji atstumo vertė iki tiriamo objekto [33, 34]. Išmatavus šviesos sklidimo laiką, atstumas apskaičiuojamas pagal 2.3 išraišką:

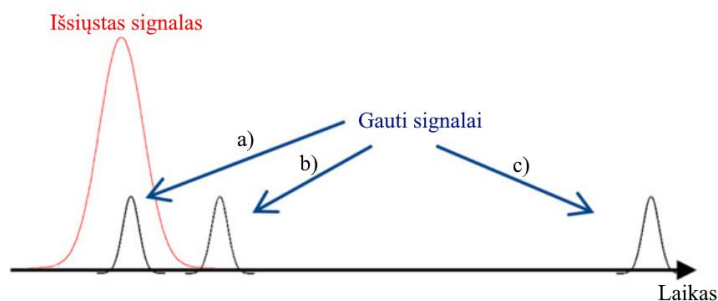
$$R = \frac{c}{2} t_{oF}, \quad (2.3)$$

čia R – atstumas iki tikslo, c – šviesos greitis laisvoje erdvėje, o t_{oF} – laikas per kurį energijos impulsas nukeliauja nuo siųstuvo iki stebimo objekto ir atgal iki imtuvo [36]. 2.5 paveiksle matoma supaprastinta tipinė tokio metodo įgyvendinimo schema.



2.5 pav. Impulsinio TOF matavimo principo schema [36]

Impulsinis TOF metodas tiesiogiai matuoja šviesos impulso kelionės pirmyn ir atgal laiką nuo šviesos impulso emisijos iki impulso sugrįžimo, atsirandančio dėl atspindžio nuo tiriamo objekto. Tai galima matyti 2.6 paveiksle, kur pateikiami trys skirtingu laiku gauti signalai, kurie parodo laiką trukusį nukeliauti iki objekto ir atsimušus grįžti atgal į detektorius (ilgesnis kelionės laiko atstumas nurodo didesnę atstumą iki objekto). Taigi, impulsai turi būti kuo trumpesni, dažnai siekia kelias nanosekundes su greitu kilimo ir kritimo laiku, bei didele optine galia. Kadangi impulsinė apšvietos galia yra daug didesnė už fono apšvietos galią, šis metodas gerai veikia lauke esant nepalankioms aplinkos sąlygoms. Jis taip pat tinka naudoti erdvėse, kur saulės fono nebuvimas papildomai sumažina sklaidžiamos galios reikalavimus, tuo atveju gali veikti dideliais atstumais - nuo kelių iki kelių šimtų metrų. Tačiau, kai lazeris išspinduliuoja šviesos impulsą ir atsispindi objekte, tik dalis optinės energijos grįžta atgal į detektorius. Darant prielaidą, kad taikiny yra optinis difuzorius, ši energija toliau padalijama į kelias sklaidos kryptis. Taigi impulsiniams metodams reikia labai jautrių detektorių, veikiančių aukštu dažniu, tam kad būtų galima nustatyti silpnus grįžtančius impulsus [36, 37].



2.6 pav. Impulsinio ToF metodo matavimas, kuris rodo gautus tris skirtingus signalus, kai sklaidimo laikas: a) trumpas, b) ilgesnis ir c) ilgas [25]

Pasiekiamas atstumo skiriamoji geba diapazone ΔR_{min} yra tiesiogiai proporcinga laiko skiriamajai gebai Δt_{min} . Dėl to, atstumo matavimo skiriamoji geba priklauso nuo laiko skaičiavimo

elektronikos skiriamosios gebos. Galima daryti prielaidą, kad jei laiko intervalo matavimo skiriamosios gebos vertė yra 0.1 ns diapazone, skiriamoji geba yra 1.5 cm gylio. Tokios vertės gali būti laikomos atskaitos taškais, ribojamais dėl skaičiavimo elektronikos triukšmo ir dreifo. Naudojant statistiką galima pasiekti reikšmingų skiriamosios gebos patobulinimų, tačiau tam reikia kelių impulsų vienam duomenų taškui, dėl ko blogėja svarbūs jutiklio aspektai, tokie kaip kadro dažnis ar erdvinė raiška [36].

Teoriškai, maksimali skiriamoji geba ΔR_{max} riboja didžiausias intervalo laikas Δt_{max} , kuri galima išmatuoti skaitikliu. Taigi toks laiko intervalas gali būti pakankamai didelis, todėl maksimalų diapazoną riboja kiti veiksniai. Tiksliau, vienas iš faktorių – lazerinio šviesos impulso energijos nuostoliai, kurie atsiranda sklidimo metu, ypač atsispindint nuo difuzinių paviršių. Silpnam impulsui nustatyti reikalingas jautrus imtuvas, kuris sugebėtų nustatyti silpnus šviesos impulsus. Imtuvas turi pasižymėti dideliu SNR, kad būtų įmanoma išskirti norimą impulsą iš foninio triukšmo [37, 38]. Tai tampa pagrindiniu faktoriumi, ribojančiu impulsinio matuoklio maksimalų atstumą.

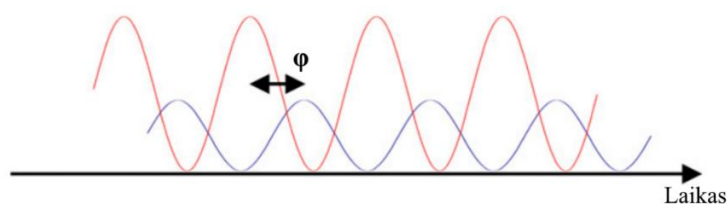
Impulsinio ToF metodo privalumai apima paprastą matavimo principą, grindžiamą tiesioginiu skrydžio trukmės matavimu ir mažą fono apšvietimo įtaką dėl didelės energijos lazerio impulsų naudojimo. Tačiau kur reikia intensyvių šviesos impulsų jį riboja matavimo SNR, tuo tarpu turi būti laikomasi akių saugumo ribų, todėl reikia naudoti labai jautrius detektorius, kurie priklausomai nuo aptikimo diapazono gali būti brangūs. Dideli aptikimui naudojami stiprinimo koeficientai kartu su naudojamu aukštu dažniu gali gerokai apsunkinti elektronikos dalį.

2.1.3. Nuolatinės bangos amplitudės moduluotas (AMCW) ToF metodas

Šis metodas nėra taip dažnai naudojamas kaip impulsinis ToF metodas [10]. AMCW ToF metodas remiasi ne lazerio impulsų, bet nuolatinės šviesos bangos intensyvumo moduliavimu. Metode naudojamas moduluoto periodinio signalo kelionės išsiuntimo ir grįžimo metu sukeltas fazės poslinkis matomas 2.7 paveiksle, siekiant nustatyti atstumą iki objekto. Optinė galia moduluojama pastoviu f_M dažniu, dažniausiai kelių dešimčių MHz diapazone, sukuriant f_M dažnio sinusinę ar stačiakampę bangą. Atsispindėjęs nuo taikinio signalas yra surenkamas detektoriaus. Atstumas R nustatomas iš fazės poslinkio $\Delta\varphi$, kuris atsiranda tarp išsiųsto ir atspindėto signalo [34, 39]. Žinant moduliacijos dažnį ir apskaičiavus fazės poslinkį $\Delta\varphi$, atstumą galima apskaičiuoti pagal 2.4 išraišką:

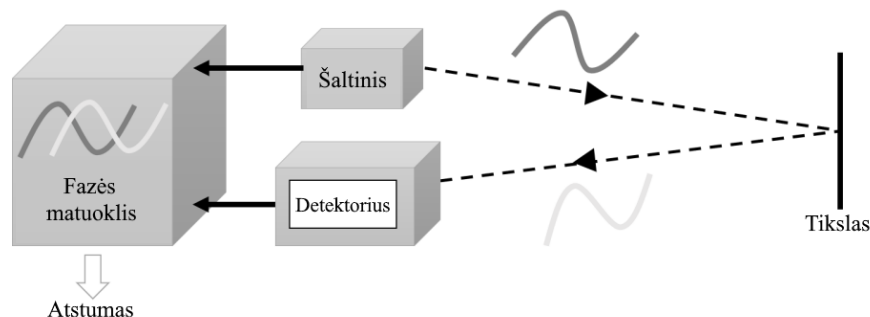
$$\Delta\varphi = k_M d = \frac{2\pi f_M}{c} 2R \Rightarrow R = \frac{c}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_M}, \quad (2.4)$$

čia R – atstumas iki tiriamo objekto, c – šviesos greitis laisvojoje erdvėje, k_M – bangos skaičius kuris yra susietas su moduliavimo dažniu, d – bendras nukeliautas bangos atstumas, o f_M – signalo amplitudės moduliacijos dažnis [36].



2.7 pav. AMCW ToF metodo fazės poslinkio pavaizdavimas [25]

2.8 paveiksle parodyta principinė AMCW jutiklio schema. Naudojant AMCW metodą, skiriamoji geba nustatoma remiantis faktiniu nuotolio signalo dažniu f_M (kurį galima reguliuoti) ir fazės matuoklio skiriamąja geba. Didesnis f_M dažnis leidžia padidinti skiriamąją gebą, jei fazės matuoklio skiriamoji geba nekinta. Vis dėlto, didesni f_M dažniai sukuria trumpesnius nedviprasmiškus atstumo matavimus kurie nusako, kad grįžtamojo signalo fazės vertės skirtingose atstumo reikšmėse pradeda kartotis kas 2π fazės poslinkį [38]. Dėl to kyla svarbus kompromisas tarp maksimalaus nedviprasmiško atstumo ir matavimo skiriamosios gebos. Įprasti moduliavimo dažniai dažniausiai yra kelių dešimčių MHz diapazone. Siekiant padidinti dviprasmiškumo atstumą nesumažinant moduliavimo dažnio, buvo pasiūlyti pažangūs moduluoto intensyvumo sistemos metodai, naudojantys kelių dažnių metodus [36].



2.8 pav. AMCW metodo fazės matavimo principas [36]

Be to, nors fazių matavimas kai kuriose srityse gali būti nuoseklus, technikos jautrumas išlieka ribotas dėl sumažėjusio tiesioginio aptikimo jautrumo optinėje srityje. Kalbant apie SNR, kuris taip pat yra susijęs su gylio tikslumu, norint gauti priimtina signalo greitį, reikia ilgo integravimo laiko per kelis laikotarpius. Savo ruožtu tai sukelia judesio susiliejimą esant judantiems objektams. Dėl šių ilgų integravimo laikotarpių sunku pasiekti aukštą užrakto greitį ar kadrų dažnį [39, 40]. Taip pat AMCW moduliacija dažniausiai įgyvendinama naudojant šviesos diodus, o ne lazerius. Todėl tai dar labiau riboja turimą galią, signalo SNR bei pasiekiamą diapazoną, kuri riboja dviprasmiškumo atstumas. Be to, signalo amplitudė patikimai matuojama jo atvykimo metu ir skaitmenizuojama esant pagrįstam intensyvumo lygių skaičiui. Todėl TOF kameros yra mažai naudojamos lauke, kur puikiai veikia patalpose [41].

Taigi, šis metodas yra tinkamas požeminių vamzdžių tyrimui dėl kelių priežasčių. Pirmiausia, minimalus aplinkos apšvietimas sumažina šviesos triukšmo įtaką, kuri yra dažna problema lauko sąlygose, todėl AMCW metodas požeminiuose vamzdžiuose užtikrina stabilų ir tikslų signalo priėmimą. Be to, AMCW jutikliai, veikdami su šviesos diodais, sunaudoja mažiau energijos, o tai yra svarbu autonominėms aplikacijoms, kuriose prieinamumas ir patikimumas yra kritiškai svarbūs. Taip pat AMCW metodas leidžia gauti tikslius atstumų matavimus esant ribotam signalo diapazonui, kuris yra pakankamas vamzdynų infrastruktūrai, kuriose rečiau pasitaiko ilgi tiesūs atstumai.

2.2. Imitacijų parengimas

Tyrimui naudotas 1,5 m PVC kanalizacijos vamzdis, kurio vidinis diametras yra 100 mm (2.9 paveiksle). Vamzdis paženklintas kas 10 cm su viršuje išgręžtomis skylutėmis, kurios leidžia

tiksliai pozicionuoti taršos imitacijos. ToF jutiklis buvo pritvirtintas prie vieno vamzdžio galo ir jo pozicija nekeičiama per visą tyrimo laikotarpį.



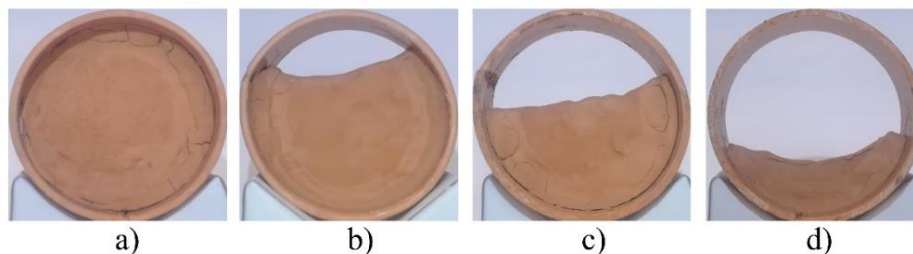
2.9 pav. Tyrimo metu naudojamos sistemos vaizdas

Tyrimo metu taršai imituoti buvo suformuotos keturių tipų užterštumo imitacijos. Imituojamų užterštumų aprašas pateiktas 4 lentelėje.

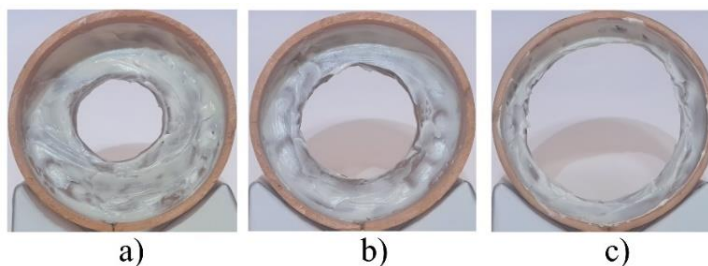
4 lentelė. Tyrime naudotų taršos imitacijų aprašas

Užterštumas	Imitacijoms naudotos medžiagos
Purvo sankaupos	Modelinas
Apnašos aplink vamzdžio perimetrą	Modelinas padengtas statybiniais klijais
Medžių šakų nuolaužos	Medžių šakos
Riebalų sankaupos	Popierius atsitiktinai apklijuotas karštais klijais

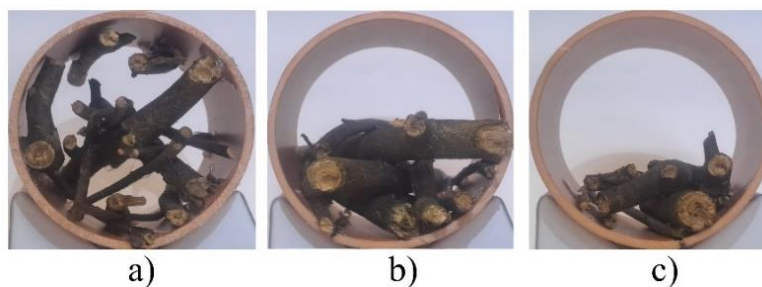
2.10 – 2.13 paveiksluose matomas realus tyrime naudotų imitacijų vaizdas. Imitacijų nuotraukos – 3200x3200 pikselių raiškos.



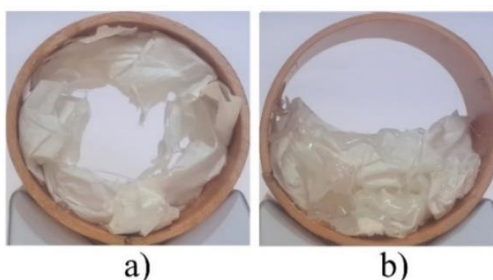
2.10 pav. Imituojamų purvo sankaupų taršų vaizdai, kur imituojamas: a) aklinau užterštas vamzdis, 100 % tarša b) 75 % užterštas vamzdis, c) 50 % užterštas vamzdis, d) 25 % užterštas vamzdis.



2.11 pav. Imituojamų apnašų aplink vamzdžio perimetrą vaizdai, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo, c) 25 % esančio užterštumo



2.12 pav. Imituojamų medžių šakų taršos vaizdai, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo, c) 25 % esančio užterštumo



2.13 pav. Imituojamos riebalų sankaupos, kur imituojama: a) 75 % esančio užterštumo, b) 50 % esančio užterštumo

Siekiant paprastumo 5 lentelėje yra pateikti taršos imitacijų trumpiniai.

5 lentelė. Tyrime naudotų taršos imitacijų trumpiniai

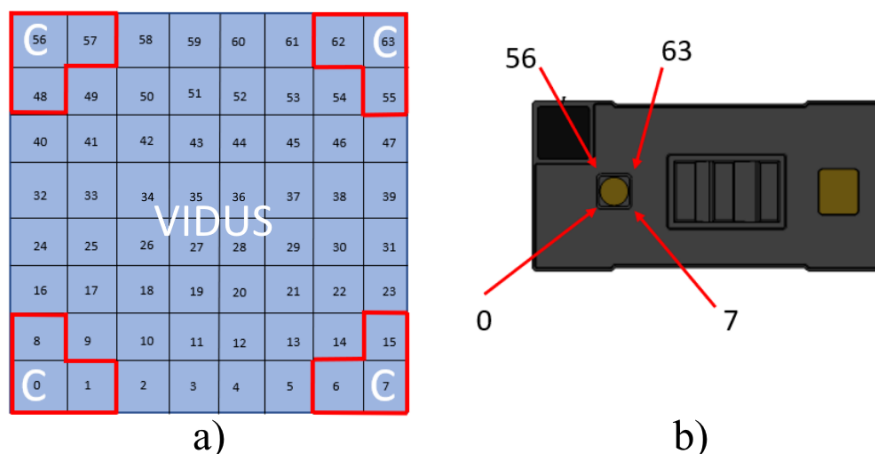
Taršos mastas Užterštumas	100%	75%	50%	25%
Purvo sankaupos	U-100	U-75	U-50	U-25
Apašos aplink vamzdžio perimetrą	X	O-75	O-50	O-25
Medžių šakų nuolaužos	X	I-75	I-50	I-25
Riebalų sankaupos	X	T-75	T-50	X

Indeksas U naudotas žymėti „U“ formos taršai; O indeksas žymi į „O“ raidę panašią taršą, kuomet užterštas visas vamzdžio perimetras; medžio šakų tarša pažymėta I indeksu, o riebalų sankaupos: T.

2.3. Vizualizacijos metodika

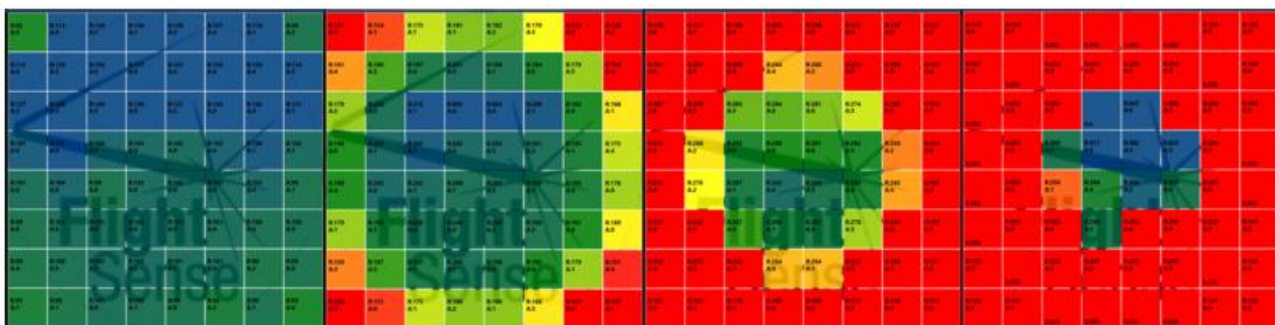
Vizualizacijai pasirinktas STM įmonės siūlomas IR ToF jutiklis VL53L5CX. Gamintojas siūlo tris IR ToF jutiklius su daugiazoniu matavimu: VL53L5CX, VL53L7CX ir VL53L8CX. Numatomam tyrimui svarbu, kad matymo kampas būtų kuo mažesnis, kadangi jutiklis bus naudojamas siaurose aplinkose, o mažesnis FoV kampas užtikrina mažesnes matavimo zonas. Todėl pasirinktas VL53L5CX, kuris turi mažiausią FoV – 65° ir yra pigiausias.

ToF jutiklis matuoja 64 zonas, formuodamas 8x8 masyvo atstumo atvaizdą (kaip matoma 2.14 paveiksle). Zonos numeruojamos išilgai eilutės nuo apačios į viršų. Vietos, apibrauktos raudonai ir pažymėtos „C“ raide, yra kameros kraštuose – čia matavimo tikslumas prastesnis. Numatomam tyrimo vamzdis yra apvalus, todėl šios zonos nebus naudojamos.



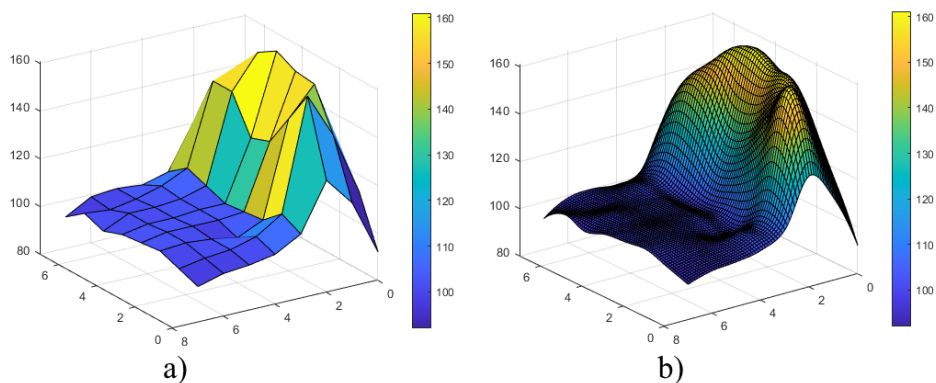
2.14 pav. ToF jutiklio zonų atvaizdavimas, kur a) gaunamas vaizdas, b) jutiklio vaizdas [42]

ToF laiko nustatymas grindžiamas anksčiau aptartu AMCW metodu. Duomenys surenkami, jutiklį prijungus prie STM32 NUCLEO-F401RE mikrovaldiklio per I²C sąsają. Jutiklis aptarnaujamas STM STSW-IMG024 programine įranga. Tačiau ant ekrano gaunami vaizdai matomi 2.15 paveiksle nėra informatyvūs ir nėra tinkami apdoroti MATLAB programine įranga.



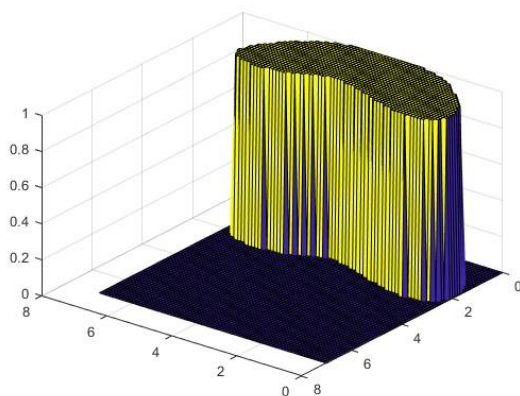
2.15 pav. STM STSW-IMG024 programine įranga gaunami vaizdai

Tačiau yra galimybė eksportuoti video serijas CSV formatu. Šiame faile pateikiamas atspindėjimo procentas, medianos atstumo vertė, aukščiausiai užfiksuotas signalo dažnis per vieną SPAD, ir aplinkos šviesos ryškumas. Buvo pasirinkta eksportuoti tik medianinę ToF vertę (2.16 paveikslas). Todėl tyrimo rezultatuose pateikti vaizdai šia programa yra naudojami kaip vaizdinė priemonė, toliau šie duomenys yra apdorojami MATLAB programine įranga. Reikėtų pažymėti, kad ToF atvaizdai turi 8x8 pikselių raišką. Todėl ToF duomenys interpoliuojami iki 256x256 pikselių raiškos, o šis procesas yra aprašytas programos tekste (žr. 1 priedą). Kaip pavyzdys 2.16 paveiksle pateikiami ToF duomenys prieš ir po interpoliacijos kaip 3D paviršius.



2.16 pav. ToF duomenys, gauti ToF jutikliu: a) prieš, b) po interpoliacijos

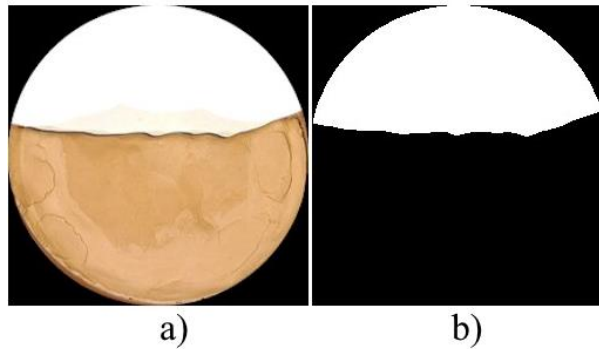
Siekiant nustatyti neužteršto spindžio plotą, naudojamas 150 mm slenkstis: visi vaizdo pikseliai, atvaizduojantys didesnę nei 150mm, priskiriami vertei 1, mažesni nei 150 mm – vertei 0. Duomenys, gauti taikant šį slenkstį 2.16 paveiksle pavaizduotiems duomenims, pateikiami 2.17 paveiksle kaip 3D paviršius.



2.17 pav. ToF duomenys po slenkščio pritaikymo yra žymimi taip: užteršta – 0, laisva – 1

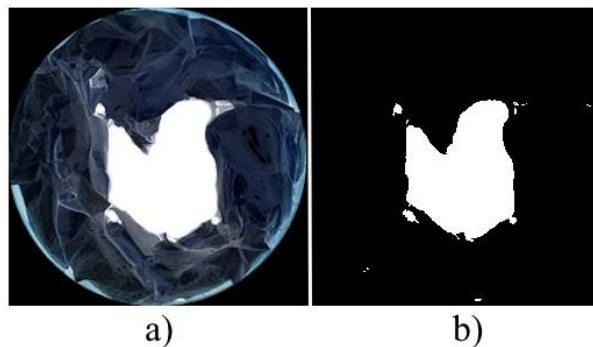
Suskaičiavus pikselius, kurių vertė yra 1, jie normuojami atsižvelgiant į pikselių skaičių, kuris telpa į vamzdžio diametrą, ir rezultatas dauginamas iš 100%. Gauta vertė atimama iš 100%, taip nustatant taršos lygį procentais.

Norint gauti spindžio dalį iš imitacijų nuotraukų, jos konvertuojamos į dvejetainį vaizdą. Šiame vaizde balta zona priskiriama reikšmei 1 (laisvai spindžio daliai), o juoda – 0 (užterštai spindžio daliai). Gautas vaizdas pateikiamas 2.18 paveiksle.



2.18 pav. Purvo sankaupų imitacijos „U-50“ nuotrauka: a) prieš, b) po apdorojimo.

Riebalų taršos imitacijoms „T-50“ ir „T-75“, kurių užterštumas pasižymi šviesiomis spalvomis, prieš pavertimą į dvejetainį vaizdą spalvos yra invertuojamos, siekiant supaprastinti tyrimo eigą. Gautas vaizdas matomas 2.19 paveiksle.



2.19 pav. Riebalų sankaupų imitacijos „T-75“ nuotrauka: a) prieš, b) po apdorojimo.

Apskaičiavus pikselius su reikšme 1, jie normuojami atsižvelgiant į pikselių skaičių, kuris telpa į vamzdžio diametrą, ir rezultatas dauginamas iš 100%. Atėmus gautą procentą iš 100%, nustatomas taršos lygis procentais. Vamzdžio taršos imitacijos dydis maketuose buvo apytikslis. Tikslus taršos kiekio įvertinimas pateikiamas 6 lentelėje.

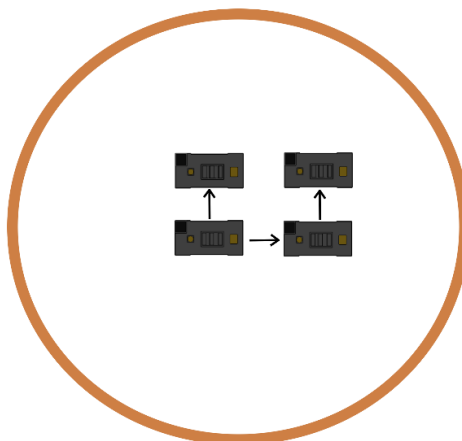
6 lentelė. Tikrasis tyrime naudotų taršos imitacijų lygis, nustatytas iš nuotraukos

Iš nuotraukos nustatytas tikrasis taršos lygis	Projektuotas užterštumas			
	100%	75%	50%	25%
Purvo sankaupos	100%	79,99%	60,90%	28,76%
Apnašos aplink vamzdžio perimetrą	100%	89,28%	70,3%	41,19%
Medžių šakų nuolaužos	100%	64,18%	50,5%	35,55%
Riebalų sankaupos	100%	86,63%	58,18%	28,76%

Norint įvertinti gauto atvaizdavimo tikslumą lyginamos gautos užterštumo procentinės išraiškos iš tyrimo metu naudotų imitacijų nuotraukų su ToF jutiklio gautais atvaizdais.

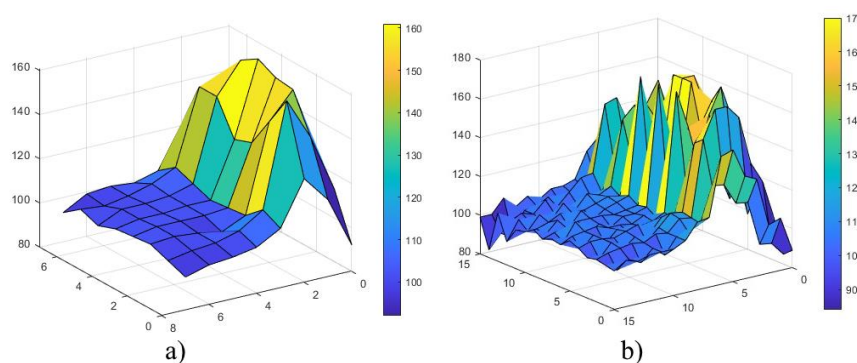
2.4. Vizualizacijos raiškos padidinimas naudojant poslinkį

ToF jutiklis formuoja tik 8x8 masyvo atstumo atvaizdus, o rinkoje tokių matmenų ir kainos ToF jutiklių su didesne atvaizdavimo raiška nėra. Siekiant padidinti raišką, pasiūlyta naudoti poslinkį. Registruojami keturi 8x8 vaizdai, jutiklį pastumiant per pusę pikselio žingsnio. Pavyzdžiui, matuojant 10 cm atstumu, pikselio žingsnis yra 14 mm. Tuomet jutiklis išdėstomas koordinatėse $x=0$ mm, $y=0$ mm (centre), $x=7$ mm, $y=0$ mm (pastumiant į kairę), $x=7$ mm, $y=7$ mm (pastumiant į kairę ir į viršų) bei $x=0$ mm, $y=7$ mm (centre esantis jutiklis stumiamas į viršų), kaip pavaizduota 2.20 paveiksle. Taip pat galima naudoti keturis jutiklius – tuomet mechaninio skenavimo poreikis išnyksta.



2.20 pav. 16x16 atvaizdavimo jutiklių išsidėstymo vaizdas

Su šiuo jutiklių išsidėstymu, sujungus gautus atstumų masyvus, bus pasiekta 16x16 atvaizdavimo raiška. 8x8 ir 16x16 raiškos atvaizdų palyginimas pateiktas 2.21 paveiksle.



2.21 pav. „U-50“ užterštumo atvaizdo 3D grafikas su a) 8x8 raiška, b) 16x16 raiška

Toliau bus vertinamas gautas atvaizdavimo tikslumas kaip ir ankščiau aprašytame 8x8 raiškos atvaizdų tikslumo įvertinime, kuriame bus lyginamos gautos užterštumo procentinės išraiškos iš tyrimo metu naudotų imitacijų nuotraukų su ToF jutiklio gautais atvaizdais.

3. Tiriemoji dalis

Tyrimo tikslas – ištirti IR ToF jutiklio panaudojimo galimybes nustatant požeminių vamzdžių užterštumą. Siekiant šio tikslo, atvaizduojamos imitacijos, esančios įvairiuose atstumuose nuo ToF jutiklio požeminiame kanalizacijos vamzdyje, taip pat keičiami pačio jutiklio zonų aštrumo parametrai, įvertinamas gautų atvaizdų tikslumas bei sujungus keturis gautus 8x8 atstumo masyvo vaizdus gaunama 16x16 atvaizdavimo raiška ir įvertinamas gautų atvaizdų tikslumas.

3.1. Vizualizacijos kokybės tyrimas keičiant matavimo zonų aštrumą

Nuo objekto atspindėto signalo šlaitai nėra statūs, todėl esant didelės amplitudės impulsui, atstumo matavimas gretimose zonose gali būti apsunkintas. Tam tikslui jutiklyje numatytas kraštų aštrinimas. Aštrinimo įtaka į gaunamą ToF vaizdą matoma 3.2 paveiksle. Čia vizualizuojami du objektai: artimas objektas, esantis 100 mm atstumu FoV centre, ir už jo tolimas objektas, esantis 500 mm atstumu (viršutinis paveikslėlis centre). Priklausomai nuo pasirinktos aštrinimo vertės (galimos vertės nuo 0 % iki 99 %) artimesnis objektas gali apimti daugiau zonų, nei iš tiesų (kairysis, apatinis paveikslėlis, 0 % aštrinimas). Parinkus pernelyg didelę aštrinimo vertę antrasis objektas nebeaptinkamas (du dešinieji paveikslėliai apačioje).

Realus vaizdas:

500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500

0% Aštrumas:

100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100

20% Aštrumas:

500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500

40% Aštrumas:

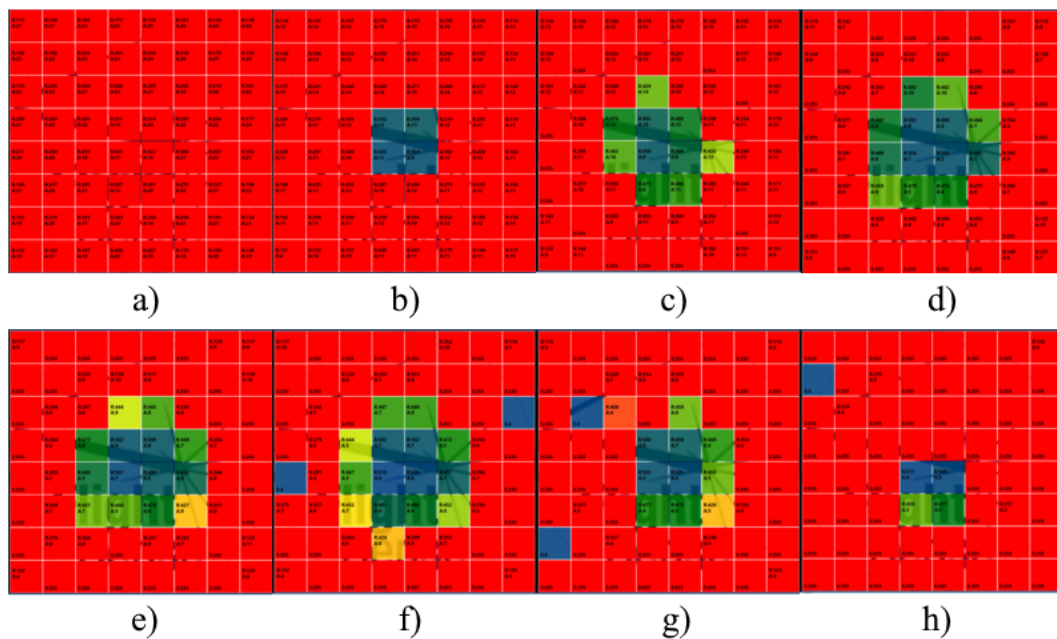
	500	500	500	500	500	500	
	500	100	100	100	100	500	
	500	100	100	100	100	500	
	500	100	100	100	100	500	
	500	500	500	500	500	500	
	500	500	500	500	500	500	

99% Aštrumas:

		100	100	100	100		
		100	100	100	100		
		100	100	100	100		

3.1 pav. Atvaizdavimo pavyzdžiai naudojant skirtingus aštrumus [43]

Todėl buvo atliktas eksperimentas, kuriame tirta, kaip užterštumo vaizdas priklauso nuo aštrumo vertės. Eksperimentui buvo naudota imitacija su pilnai užterštu spindžiu (purvo sankaupos, „U-100“). Tyrimo rezultatai pateikiami 3.2 pav. Dėl atspindžių vamzdžio sienelių, netinkamai parinkus aštrumo vertę, atstumas iki vamzdžio užterštumo nenustatomas (žr. 3.2 a) paveikslą). Tyrimas atliktas 50 cm atstumu tarp jutiklio ir užterštumo, siekiant sustiprinti nepageidaujama efektą. Aštrumo vertė buvo keičiama nuo 20% iki 90% kas 10%. Taip pat paveiksle matomas gauto geriausio atvaizdo 3D grafikas. Didesnės raiškos tyrimo vaizdus žiūrėti 2 priede.

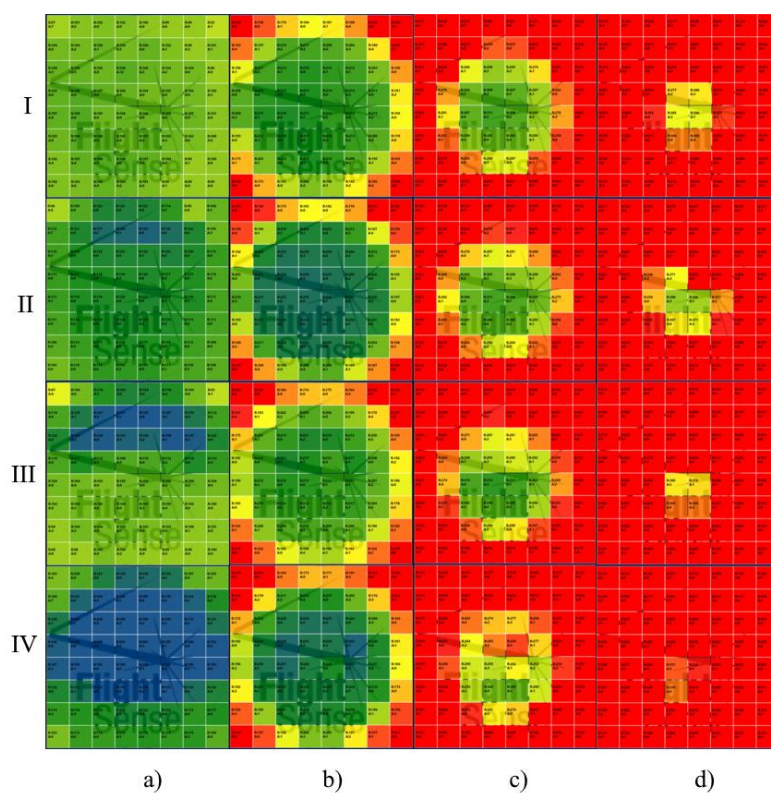


3.2 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sankauptų imitacijai „U-100“: a) 20%, b) 30%, c) 40%, d) 50%, e) 60%, f) 70%, g) 80%, h) 90% matavimo zonų aštrumui

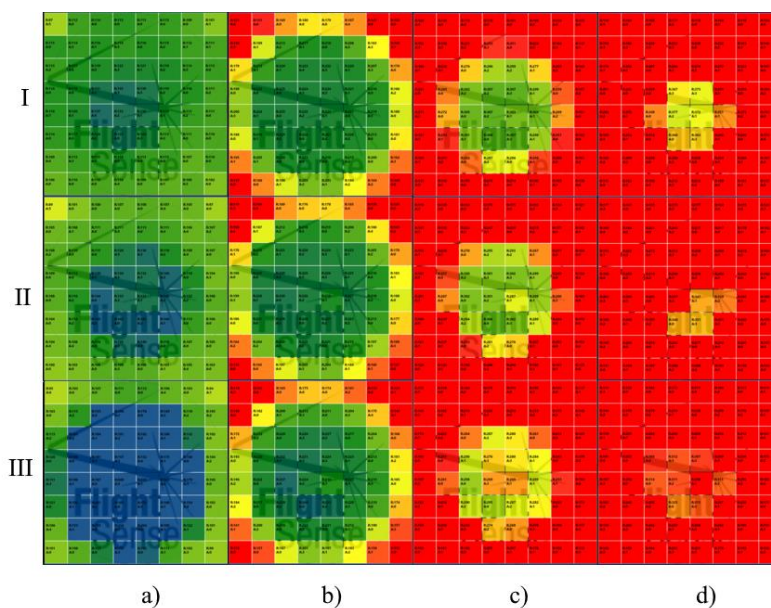
Gauti rezultatai atskleidė, kad kai purvo sankauptų imitacija „U-100“ yra 50 cm atstumu nuo jutiklio ir zonų aštrumas yra 20%, jutiklis užterštumo neaptinka, o maksimalus atvaizduojamas atstumas siekia 34 cm. Esant 30% aštrumui, viduriniuose keturiuose langeliuose jutiklis nustatė atstumą iki imitacijos, tuo tarpu aplinkiniuose langeliuose matuojamas atstumas yra iki vamzdžio sienelių ir siekia apie 30 cm. Aštrumui padidėjus iki 40%, imitacijos vaizdas tampa aiškesnis, tačiau langeliai aplink keturis centrinius langelius rodo apie 3 cm matavimo paklaidą dėl ankščiau minėto kraštų nuolydžio tarp zonų. Kai aštrumas yra 50% ir 60%, atvaizdavimas kai kuriomis zonomis tampa aiškesnis, nors paklaida išlieka nepakitusi. Esant 70% ir didesniai aštrumui, atvaizdavimas pradeda blogėti dėl atsirandančių atvaizdavimo triukšmo artefaktų. Trumpai tariant, galima teigti, kad aštrumo laipsnis yra svarbus ir priklauso nuo užterštumų atstumo iki jutiklio, o tai yra reikšmingas parametras siekiant tikslesnio ir aiškesnio užterštumo atvaizdavimo.

3.2. Vizualizacijos kokybės tyrimas keičiant atstumą

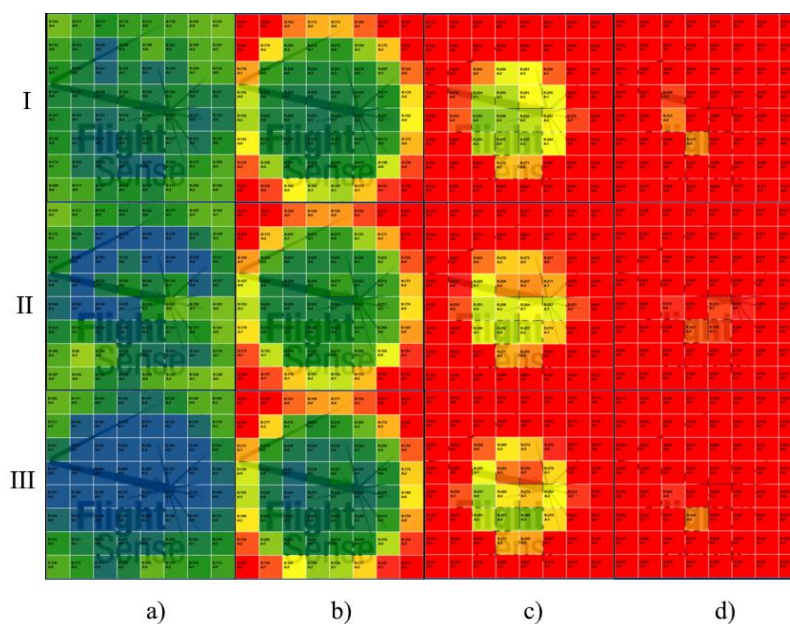
Vizualizacijos kokybės tyrime keičiat atstumą atliktas eksperimentas, kuriame atvaizduotos visos užterštumo imitacijos, keičiant atstumą nuo 10 cm iki 50 cm. Naudojamas 5% aštrumas. Gauti atvaizdavimai pavaizduoti 3.3 – 3.6 paveiksluose.



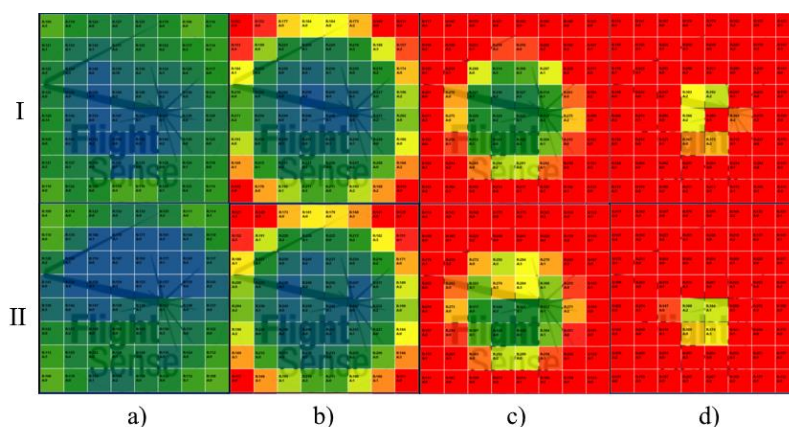
3.3 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sankaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“, III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio



3.4 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms, kur: I) „O-75“, II) „O-50“, III) „O-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio



3.5 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijoms, kur: I) „I-75“, II) „I-50“ III) „I-25“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio



3.6 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sankaupų imitacijoms, kur: I) „T-75“, II) „T-50“, kai: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm atstumu nuo jutiklio

Gauti rezultatai parodė tikslių imitacijų atstumų matavimą, gauta paklaida <1 cm. Užterštumo imitacijoms esant 10 cm nuo ToF jutiklio, atvaizdavimai yra aiškūs, suprantami ir tiksliai išmatuoti (paklaida ~ 1 cm). Užterštumo imitacijoms „I-50“, „O-75“, „U-50“ esant 20 cm nuo jutiklio atvaizdavimas tapo gana panašus į purvo sankaupų imitaciją „U-100“, tačiau matmenų skirtumai esantys matavimo zonose padeda atskirti užterštumo tipą. Imitacijos „I-100“ ir „O-75“ esančios 30 cm nuo jutiklio, taip pat priminė „U-100“ imitaciją, tačiau jos buvo atpažįstamos pagal nedidelius matmenų skirtumus skirtingose imitacijų zonose. Užterštumo imitacijoms esančioms toliau nei 30 cm, atvaizdavimas tapo neaiškus. Didesnės raiškos tyrimo vaizdus žiūrėti 3 priede. Apibendrinant, nors atvaizdavimas pateikia tirtų imitacijų siluetus, tačiau realiosios laisvos spindžio vietos vertės zonose nėra tiksliai užfiksuotos, o yra mažesnės nei realios. Pavyzdžiui purvo sankaupų imitacijoje „U-50“, kai užterštumas buvo matuojamas esant 10 cm tarp jutiklio ir užterštumo imitacijos, zonose, kuriose turėjo būti išmatuotas 1 m atstumas, buvo išmatuota apie 15 cm, o imitacijoje apnašų aplink vamzdžio perimetrą „O-20“, kai užterštumas matuotas esant

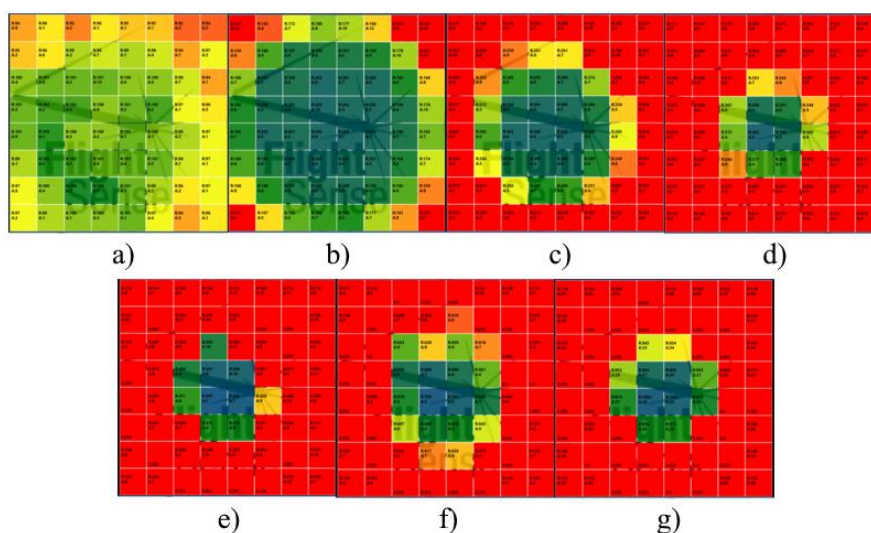
20 cm tarp jutiklio ir užterštumo imitacijos, išmatuotas atstumas siekė apie 22 cm. Šis nepageidaujamas efektas kyla dėl naudoto 5% aštrumo tarp sensoriaus matavimo zonų, dėl kurio zonų atstumai susilieja.

3.3. Atstumo ir aštrumo vertės optimizavimas

Sekančiame tyrime buvo siekiama išgauti kiekvienos užterštumo imitacijos optimalų atvaizdavimą, individualiai keičiant atvaizdavimo aštrumą kiekviename tirtame atstume nuo jutiklio iki tiriamos užterštumo imitacijos. Tyrimo metu užterštumo imitacijos buvo atvaizduojamos nuo 10 cm iki 50 cm ir 70 cm, bei 100 cm atstumuose. Gauti užterštumo imitacijų atvaizdavimai matomi 3.8 – 3.18 paveiksluose. Didesnės raiškos tyrimo vaizdus žiūrėti 4 priede.

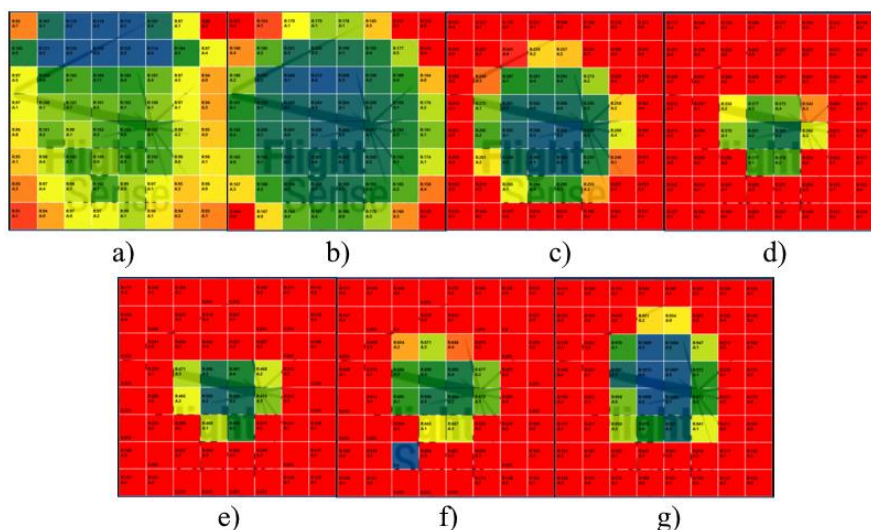
3.3.1. Purvo sankaupų, U tipo taršos vizualizacija

Žemiau esančiuose 3.8 – 3.11 paveiksluose pateikiami purvo sankaupų „U-100“, „U-75“, „U-50“, „U-25“ užterštumo imitacijų vaizdai.



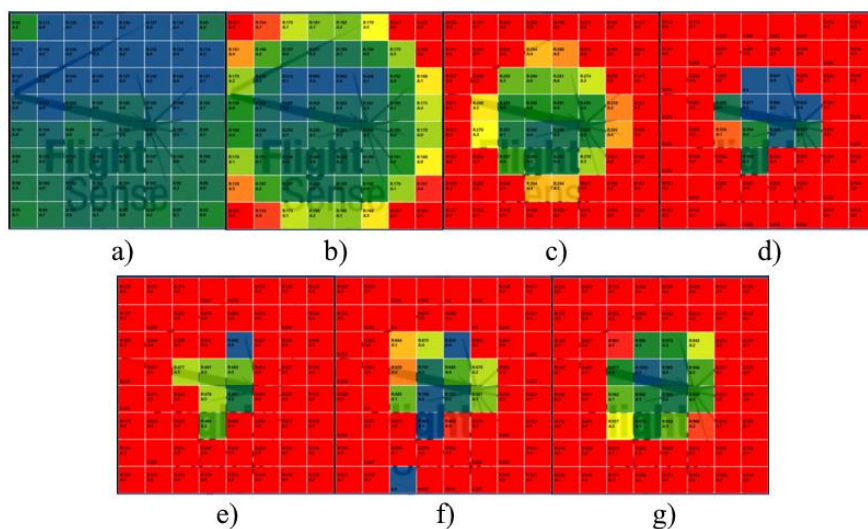
3.7 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sankaupų imitacijai „U-100“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti purvo sankaupų užterštumo imitacijos „U-100“ vaizdai yra gana tikslūs, su maža paklaida <1 cm. Tačiau, kai atstumas viršija 30 cm, aplink imitaciją susidaro zonos su apytiksliai 1 – 3 cm paklaidomis.



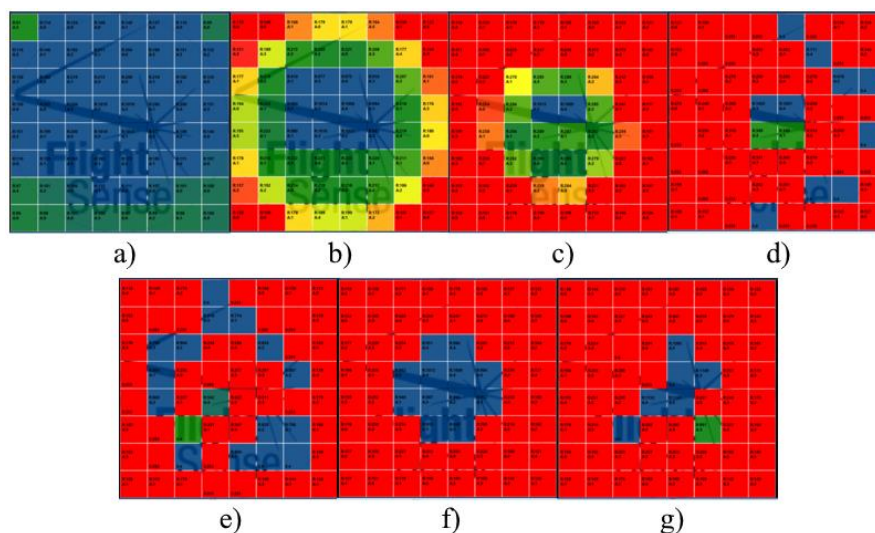
3.8 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sankauptų imitacijai „U-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti purvo sankauptų užterštumo imitacijos „U-75“ vaizdai yra gana aiškus iki 30 cm atstumo, tačiau bandant atvaizduoti didesniuose atstumuose, laisvos vietos spindyje vaizdas išnyksta. Be to, išlieka iš pirmo tyrimo gauta problema, kad spindyje realusis atstumas nėra tiksliai atvaizduojamas.



3.9 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo sankauptų imitacijai „U-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti purvo sankauptų užterštumo imitacijos „U-50“ vaizdai buvo aiškūs ir suprantami iki 40 cm atstumo, o spindžio vaizdas taip pat buvo matomas iki šio atstumo.

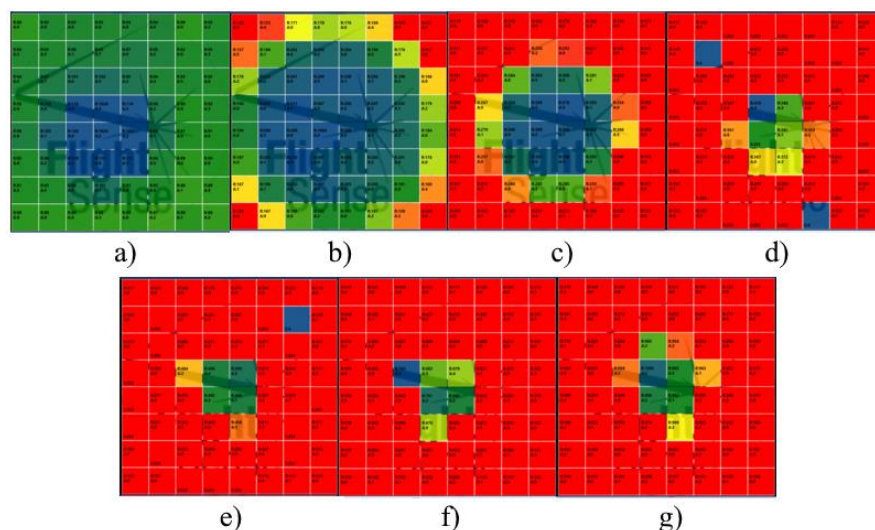


3.10 pav. „Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant purvo san kaupų imitacijai „U-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gautuose purvo san kaupų užterštumo imitacijos „U-25“ vaizduose iki 30 cm atstumo buvo gaunamas gana aiškus atvaizdas, kuriame taip pat matoma laisva vieta spindyje. Tačiau, kai užterštumo imitacijos atstumas viršijo 30 cm nuo jutiklio atstumą, atvaizdavimas tapo neaiškus, o daugelyje zonų pasirodė triukšmo atributai.

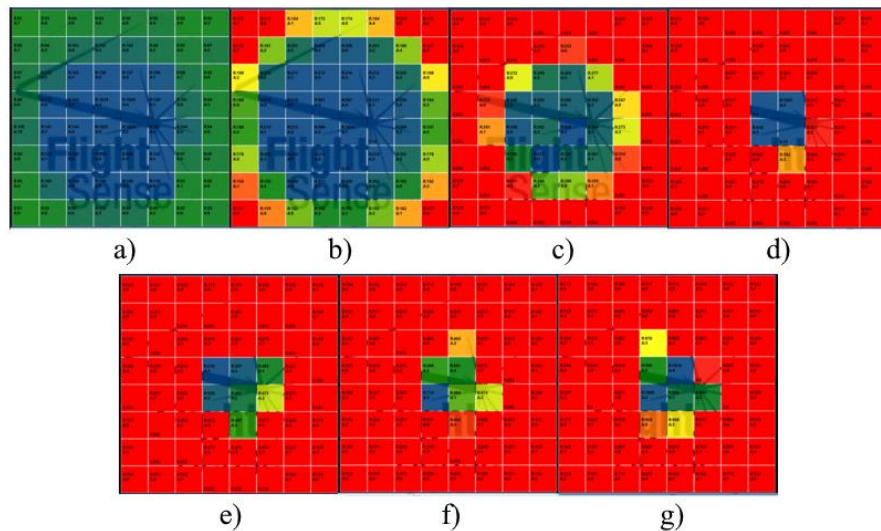
3.3.2. Apnašų palink vamzdžio perimetrą, O tipo taršos vizualizacija

Žemiau esančiuose 3.12 – 3.14 paveiksluose pateikiami apnašų aplink vamzdžio perimetrą „O-75“, „O-50“, „O-25“ užterštumo imitacijų vaizdai.



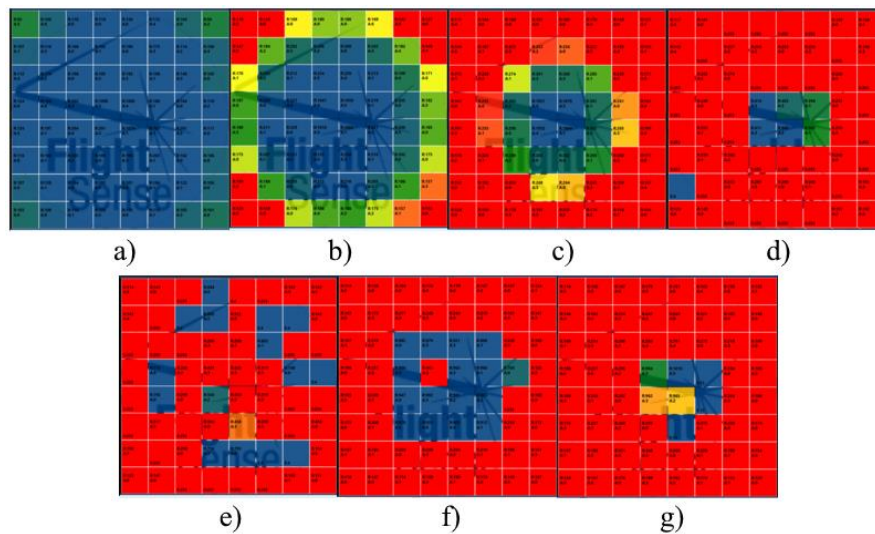
3.11 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Vaizdai iki 30 cm atstumo aiškiai perteikia apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijos „O-75“ vaizdą, leidžiant atpažinti objektą. Tačiau, kai atstumas didėja, vaizdai tampa netinkami imitacijos atpažinimui ir ima ryškėti triukšmas.



3.12 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gautuose apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijos „O-50“ vaizduose užterštumo atvaizdavimas yra aiškus iki 30 cm atstumo. 40 cm atstumu pastebimi užterštumo artefaktai t. y. atstumas iki imitacijos ir zona, kuri rodo, kad imitacijoje yra laisva vieta spindyje. Vaizduose, esančiuose už 40 cm ribos, matomas tik atstumas iki objekto su maždaug 1 cm paklaida.

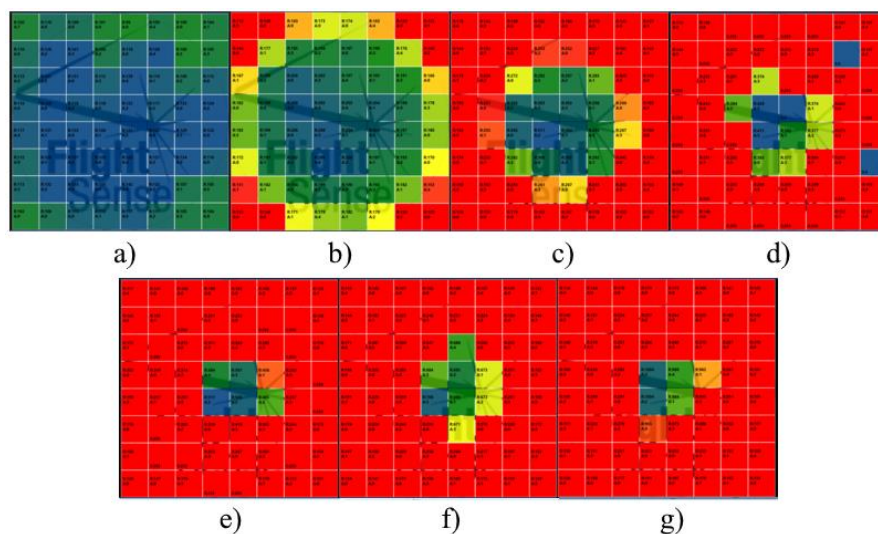


3.13 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijai „O-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijos „O-25“ užterštumo vaizdai iki 30 cm atstumo parodė panašius rezultatus kaip ir ankstesnės „O-50“ imitacijos vaizdas. Skirtumas matomas 40 cm atstumo vaizduose, kuriuose užfiksuotas didesnis imitacijos atvaizdavimo zonų kiekis. Atstumuose didesniuose nei 40 cm, atvaizdavimas tampa neaiškus. 70 cm atstumo vaizdas labai skiriasi nuo kitų užterštumo imitacijų, nes šiame atvaizde fiksuojama didelė neužteršto ploto dalis – 4x4 masyvas, kur viena iš zonų nustatė užterštumo atstumą – 70 cm.

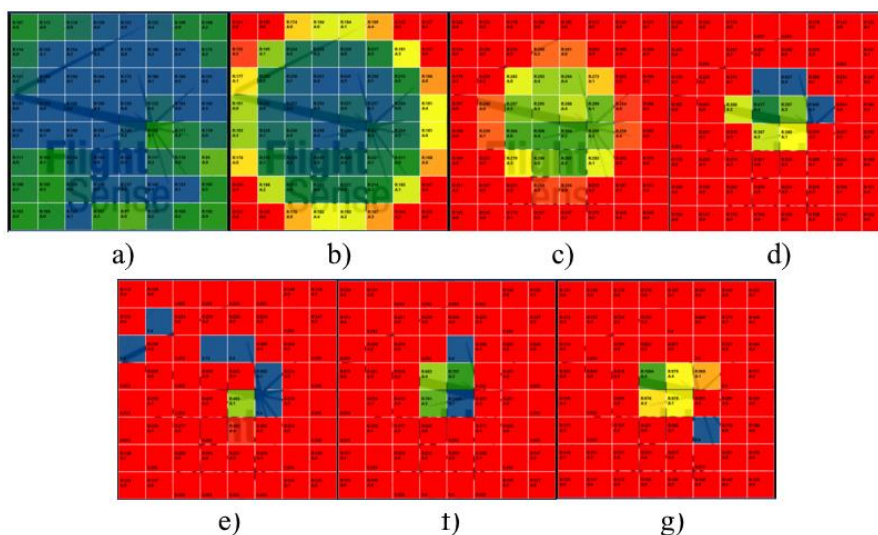
3.3.3. Medžio šakų nuolaužų, I tipo taršos vizualizacija

Žemiau esančiuose 3.15 – 3.17 paveiksluose pateikiami medžio šakų nuolaužų „I-75“, „I-50“, „I-25“ užterštumo imitacijų vaizdai.



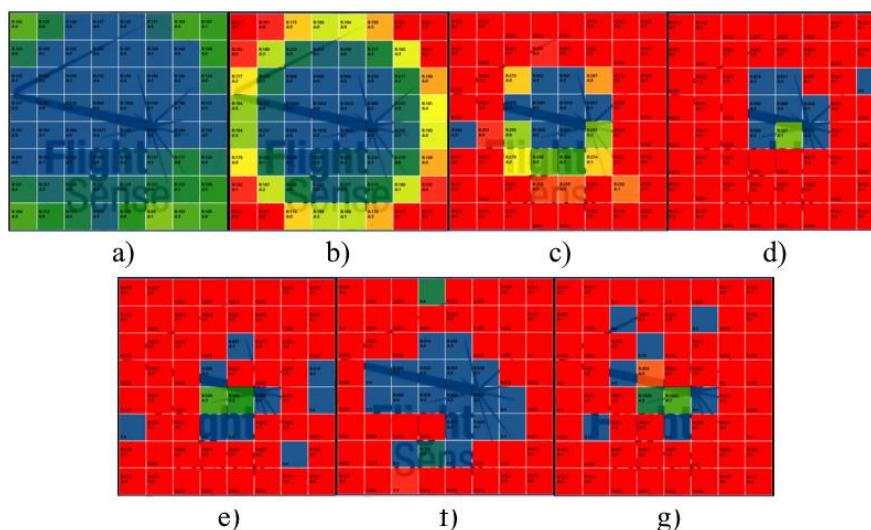
3.14 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gautuose medžio šakų nuolaužų imitacijos „I-75“ vaizduose iki 30 cm atstumo matomas netolygumas zonų atstumuose per visą imitacijos siluetą, kas yra būdinga šiai imitacijai dėl netolygaus šakų išsidėstymo, tačiau netolygumas yra paplitęs visame vamzdžio skersmenyje. Vaizdai, fiksuoti didesniuose atstumuose, neatskleidžia tikslesnių šios imitacijos savybių.



3.15 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti medžio šakų nuolaužų imitacijos „I-50“ vaizdai iki 30 cm atstumo tiksliai atspindi šios imitacijos savybes, tačiau didesniuose atstumuose vaizdai tampa triukšmingi ir neaiškūs. Be to, vaizdai, fiksuoti iki 30 cm atstumo, susidūrė su problemomis atvaizduojant laisvą dalį spindyje.

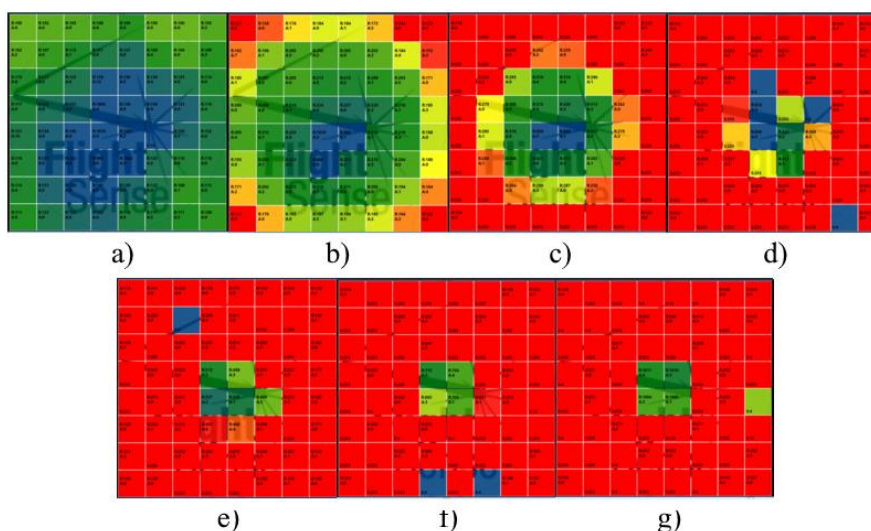


3.16 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant medžio šakų nuolaužų imitacijai „I-25“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gautuose medžio šakų nuolaužų imitacijos „I-25“ vaizduose imitacijų bruožai matomi iki 40 cm atstumo, bet vaizdai nuo 40 cm yra pilni triukšmo artefaktų. Be to, vaizdai atlikti esant 10 cm atstumu, susidūrė su spindžio atvaizdavimo problema.

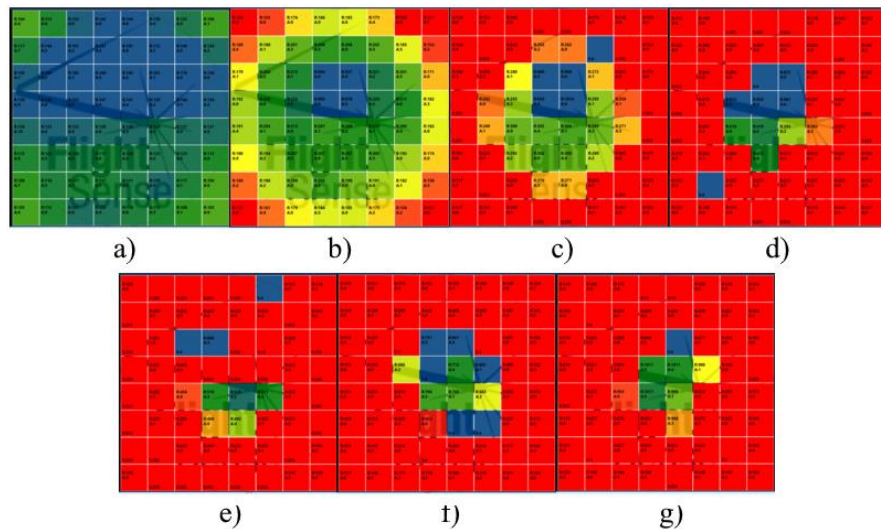
3.3.4. Riebalų sancaupų, T tipo taršos vizualizacija

Žemiau esančiuose 3.18 – 3.19 paveiksluose pateikiami riebalų sancaupų „T-75“, „I-50“ užterštumo imitacijų vaizdai.



3.17 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sancaupų imitacijai „T-75“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

Gauti riebalų sancaupų imitacijos „T-75“ vaizdai iki 30 cm atstumo parodė gerą šiai imitacijai būdingų bruožų atvaizdavimą, t. y., nustatytas netolygus atstumas aplink esantį laisvą dalį spindyje, lyginant su panašia „O-75“ užterštumo imitacija. Taip pat „T-75“ vaizdai išsiskyrė aiškiai išreikštu laisvos dalies spindyje iki 30 cm atstumo. Vaizdai, užfiksuoti didesniame atstume, neperteikė imitacijos bruožų, kurie leistų aiškiai nustatyti užterštumo tipą.



3.18 pav. Vamzdžio skerspjūvio vaizdai esant riebalų sancaupų imitacijai „T-50“, kai imitacija yra: a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm, d) 40 cm, e) 50 cm, f) 70cm, g) 100 cm nutolusi nuo jutiklio

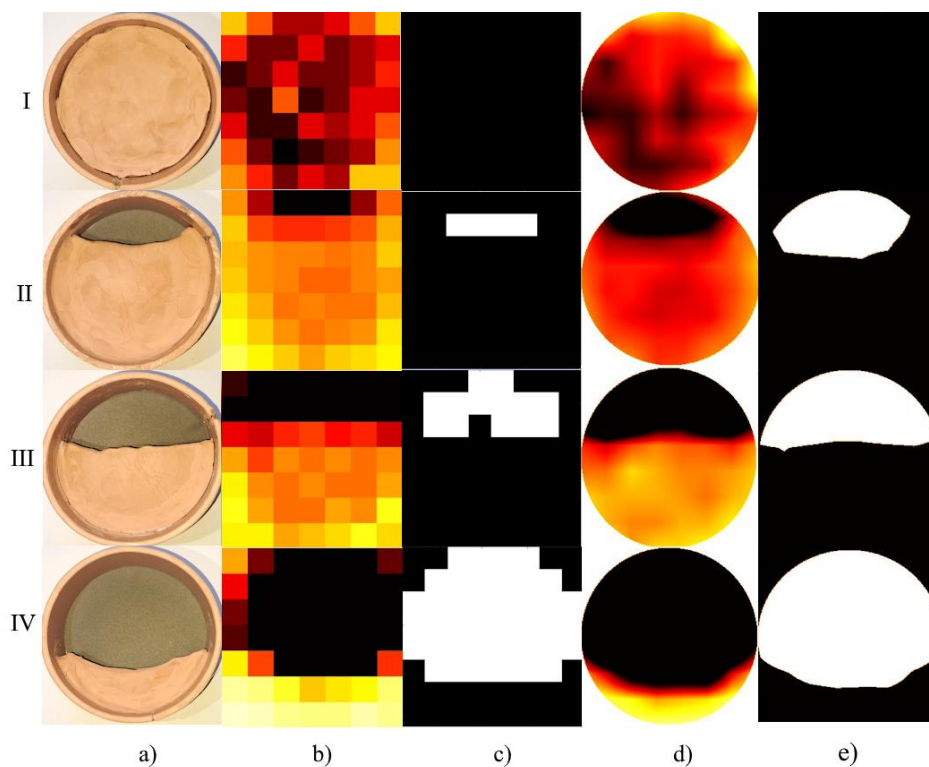
Gautuose riebalų sancaupų imitacijos „T-50“ vaizduose užterštumo imitaciją galima atskirti iki 40 cm atstumo, tačiau didesniame atstume atvaizdo zonos nebeatkuria šiai imitacijai būdingu bruožu ir yra matomi triukšmo artefaktai. Be to, 10 cm atstumo vaizde susiduriama su spindžio neatvaizdavimo problema.

Šiame eksperimente vidutinis naudojamas užterštumų atvaizdavimo aštrumas imitacijoms, esančioms 10 cm nuo jutiklio yra 6%, 20 cm – 14%, 30 cm – 30%, 40 cm – 41%, 50 cm – 46%, 70 cm – 36%, 100 cm – 30%.

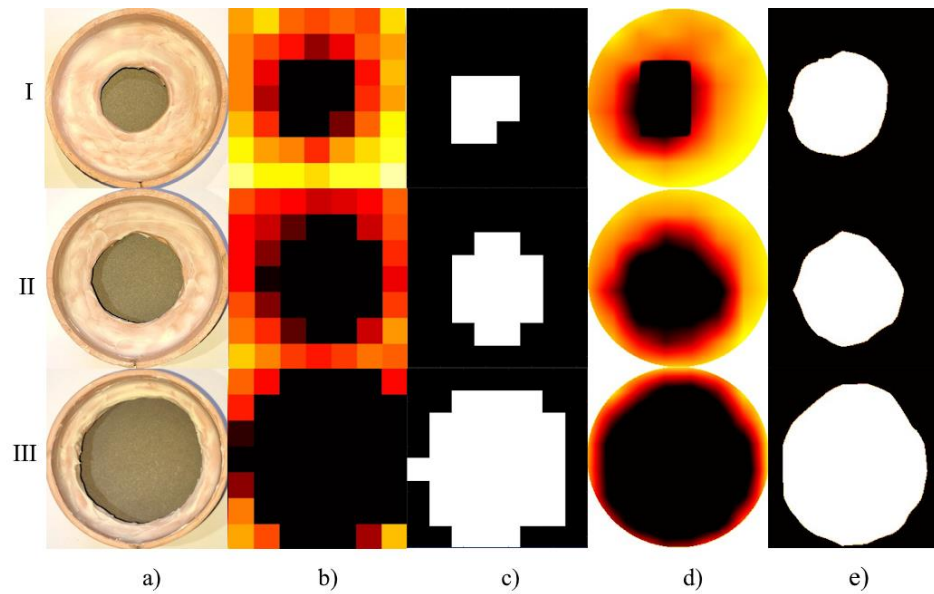
Apibendrinant galima teigti, kad tirtas ToF jutiklis, turintis 8x8 masyvo atstumo atvaizdavimo galimybę, yra pakankamai efektyvus atvaizduojant užterštumo imitacijas iki 30 cm su apytiksliai 1 cm paklaida. Užterštumo imitacijos esančios toliau nei 30 cm, susiduria su raiškos trūkumais ir triukšmais atvaizdavime. Aštrumo parametras nekinta tiesiškai, t. y. iki 50 cm atstumo, didėjant atstumui, reikia didinti aštrumą, norint aiškiau atvaizduoti užterštumus, o esant užterštumo imitacijoms nutolusioms daugiau nei 50 cm atstumu nuo jutiklio, aštrumas pradeda mažėti siekiant aiškesnio atvaizdavimo. Taip pat ToF jutiklis susidūrė su laisvos dalies spindyje atvaizdavimo problema esant 10 cm atstumui nuo jutiklio iki tiriamų užterštumo imitacijų. Geriausiai atvaizduojamos imitacijos yra esančios 10 cm atstumu nuo jutiklio. Tokie jutikliai praktiškai galėtų būti naudojami kartu su vamzdyje judančiu robotu, kuris galėtų priartėti prie užterštumų ir taip juos būtų galima tiksliau atvaizduoti.

3.4. Imitacijų 8x8 raiškos atvaizdavimo įvertinimas

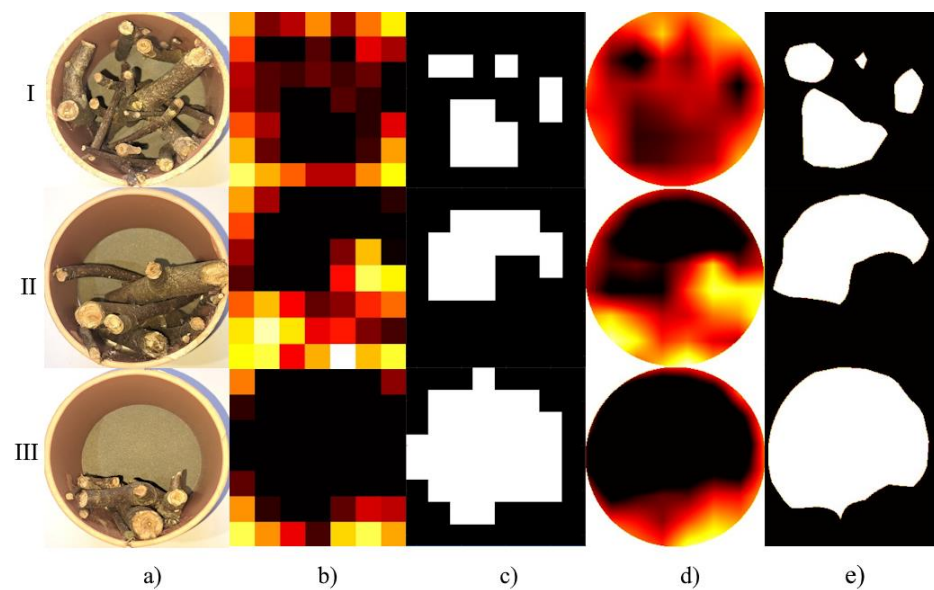
Tikslumo vertinimui naudojami atstumo ir aštrumo optimizavimo eksperimento metu gauti užterštumo imitacijų vaizdai, esantys 10 cm atstumu nuo ToF jutiklio. Buvo pasirinkta naudoti šiuos vaizdus, kadangi juose užterštumo imitacijos perteikiamos pilnu vaizdu, t. y., imitacijų kraštai sutampa su atvaizdo kraštais. Gavus tiek ToF atvaizdų, tiek imitacijų nuotraukų 256x256 dvejetainius masyvus, buvo lyginamos gautos užterštumo procentinės išraiškos, kaip aptarta 2.3 skyriuje. Apibendrinti vizualizacijos rezultatai pateikiami 3.19 – 3.22 paveiksluose.



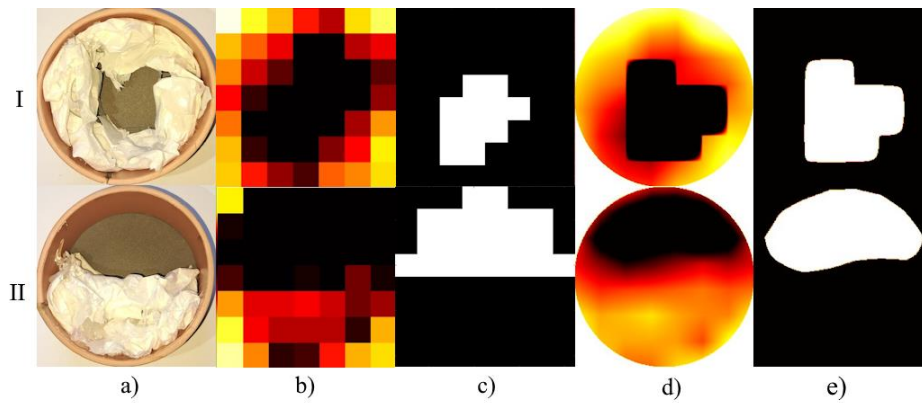
3.19 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant purvo sankaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“, III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo



3.20 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo

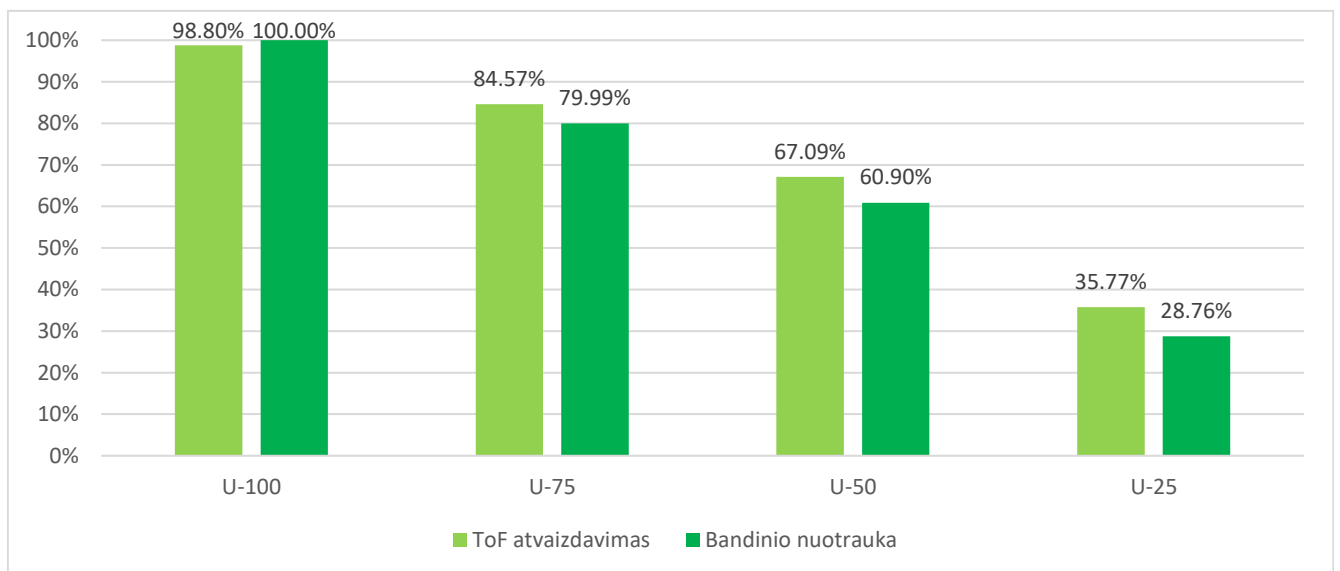


3.21 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos esant medžio šakų nuolaužų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo

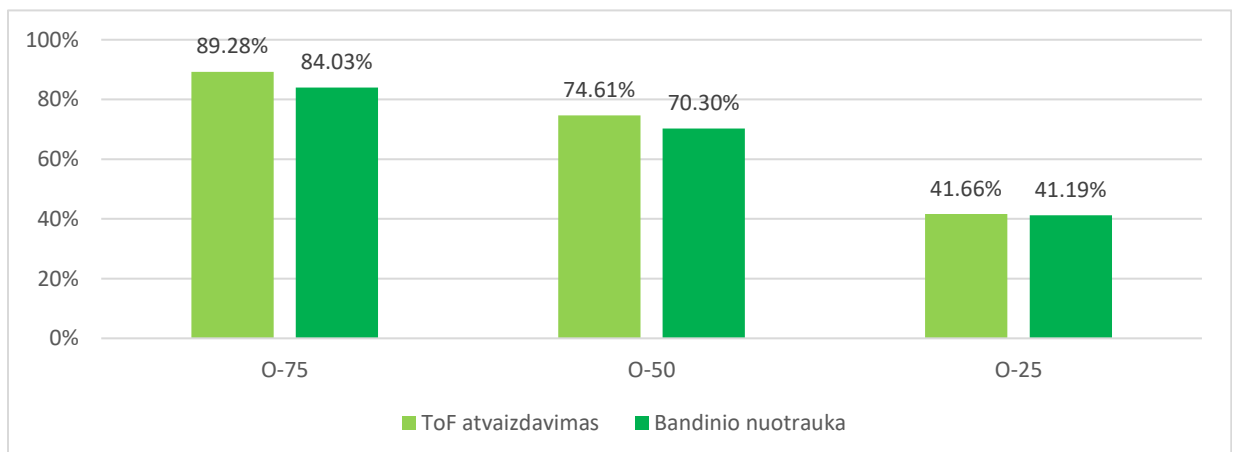


3.22 pav. Vamzdžio skerspjūvio vizualizacijos riebalų sankaupų imitacijoms, kur: I) „U-100“, II) „U-75“ III) „U-50“, IV) „U-25“, kai: a) reali nuotrauka, b) 8x8 vaizdas, c) 8x8 vaizdas po slenksčio pritaikymo, d) 256x256 vaizdas, e) 256x256 vaizdas po slenksčio pritaikymo

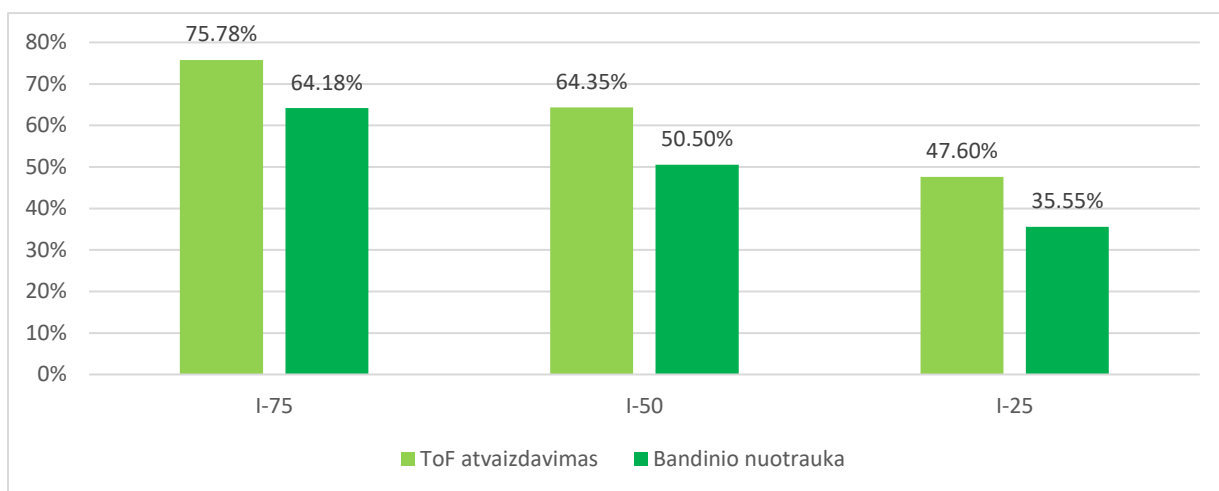
3.23 – 3.26 paveiksluose pateikti užteršto ploto įvertinimo rezultatai.



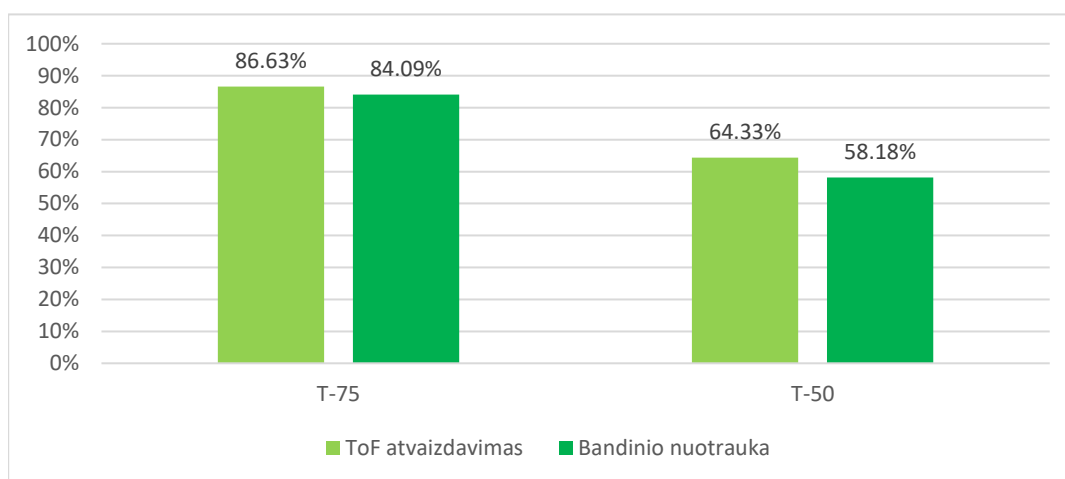
3.23 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant purvo sankaupų imitacijoms



3.24 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms

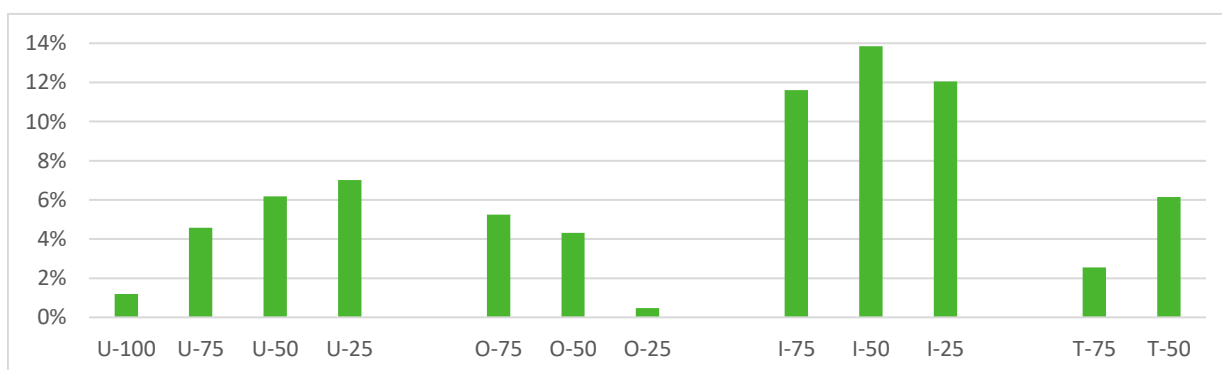


3.25 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant medžių šakų nuolaužų imitacijoms



3.26 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant riebalų sancaupų imitacijoms

Gauti rezultatai rodo, kad visų užterštumo imitacijų atvaizdavime naudojant ToF jutiklį buvo gauta didesnė užterštumo dalis lyginant su imitacijų nuotraukomis, tai atskleidžia ToF jutiklio ribotą gebėjimą aptikti smulkių elementų gausą, kuri matoma užterštumo imitacijų nuotraukose. Taip pat rezultatams turi įtakos ToF jutiklio atvaizduose zonų nuolydžio faktorius. 3.27 paveiksle pateikta visų užterštumo imitacijų atvaizdavimo paklaida.



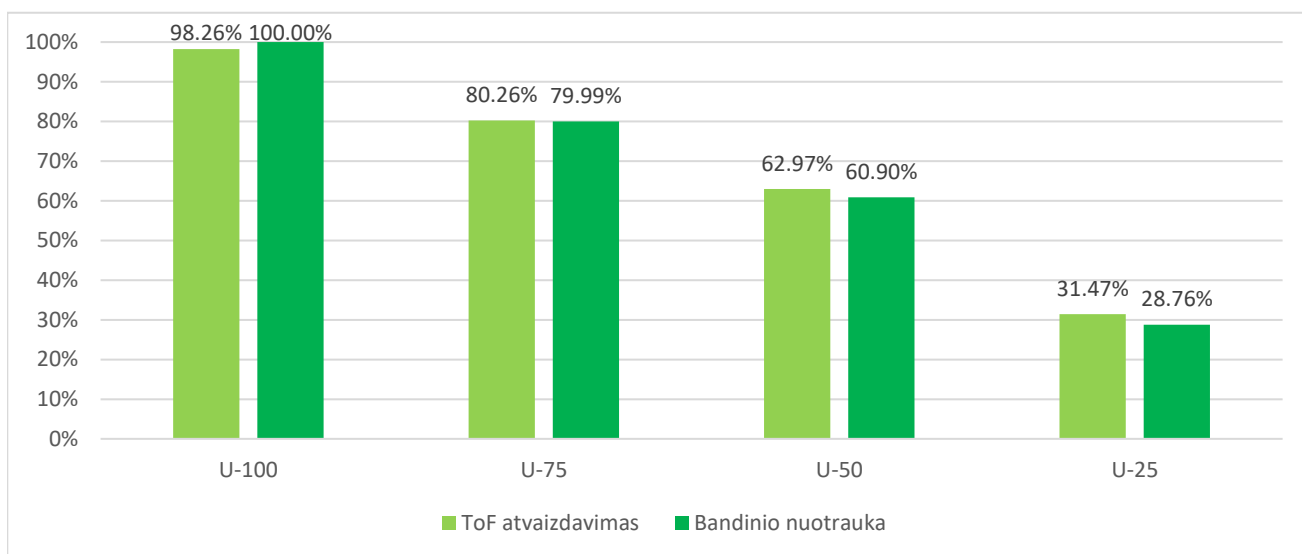
3.27 pav. Užteršto ploto imitacijų atvaizdavimo paklaidos rezultatas

Gauti rezultatai parodė, kad užterštumo aptikimas ir perteikimas naudojant ToF jutiklį skiriasi priklausomai nuo imitacijų tipo. Pavyzdžiui, geriausias rezultatas gautas apnašų, esančių aplink vamzdžio perimetrą, imitacijoms „O-75“ – 5,25%, „O-50“ – 4,31%, „O-25“ – 0,47%. Tuo tarpu prasčiausiai atvaizduojamos yra medžių šakų nuolaužų imitacijos, turinčios didžiausią atvaizdavimo paklaidą „I-75“ – 11,61%, „I-50“ – 13,85%, „I-25“ – 12,05%. Tai susiję su tuo, kad šiose imitacijose užterštumas yra išsidėstęs netolygiai, todėl jutikliui yra gerokai sunkiau aptikti tokio pobūdžio užterštumą, žinant, kad jutiklio matavimo zonų raiška yra tik 8x8. Taip pat riebalų sankauptų imitacijų atvaizdavimo paklaida turi didelį skirtumą tarp „T-75“ ir „T-50“ tokio pat tipo imitacijų, lyginant su kitų tipų užterštumo imitacijomis.

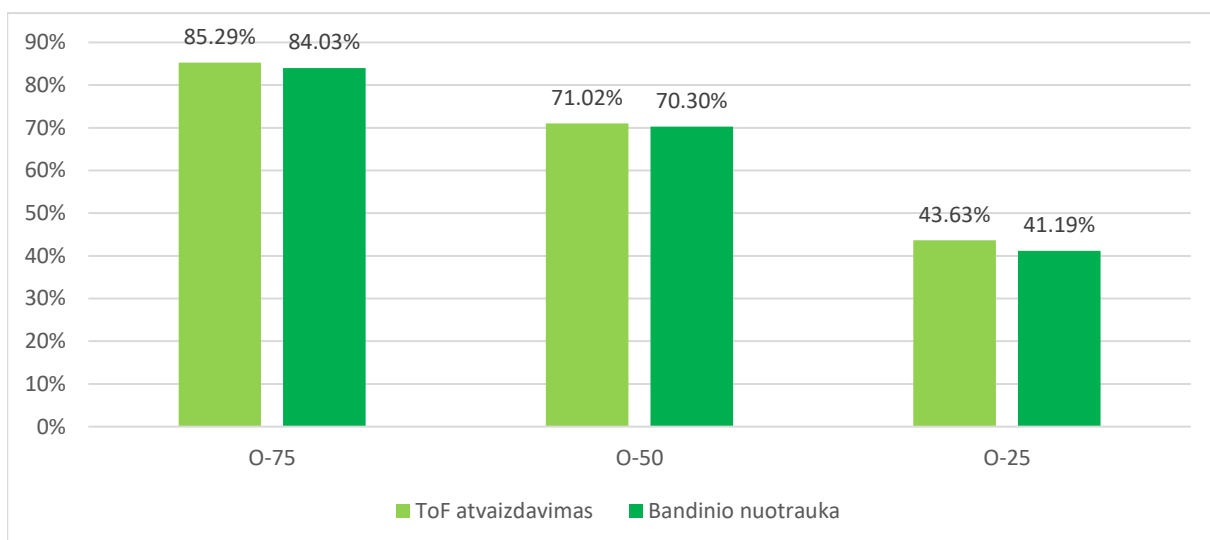
Apibendrinant, galima teigti, kad imitacijų tipai U, O, I, ir T atrodo, kad yra tarpusavyje susiję, tačiau jie demonstruoja skirtingą elgesį. Skirtingi maksimalūs ir minimalūs lygiai rodo, kad kiekvieno tipo imitacijos turi savo imitacijų tipui būdingus, faktorius.

3.5. Imitacijų 16x16 raiškos atvaizdavimo įvertinimas

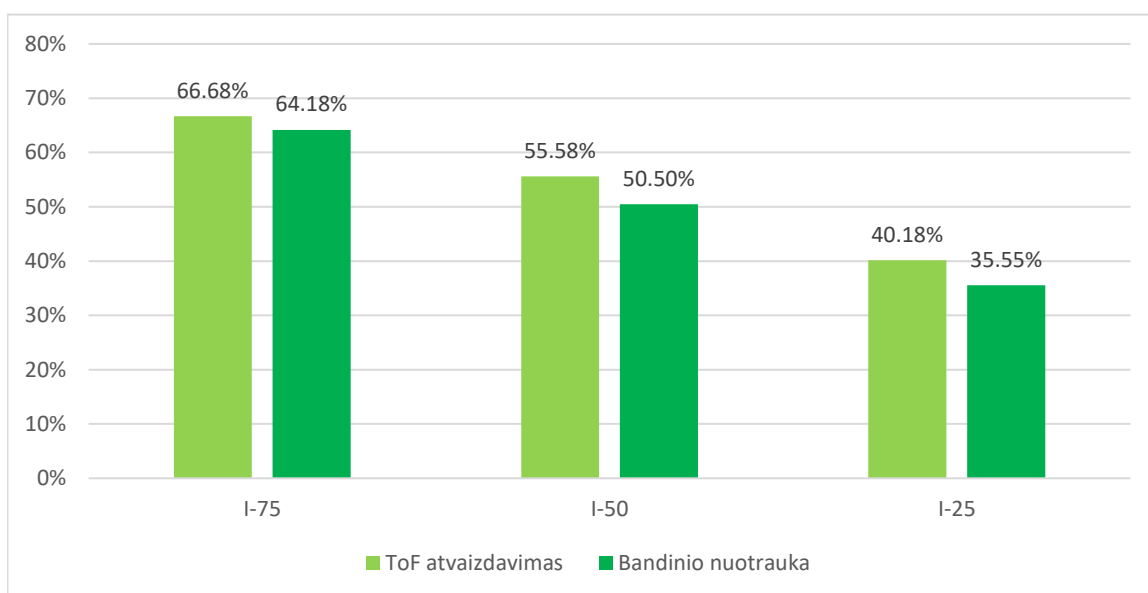
Tikslumo vertinimui naudojami 16x16 raiškos imitacijų atvaizdai esantys 10 cm atstumu nuo ToF jutiklio, kurie buvo sujungti iš gautų keturių ToF jutiklio atstumo masyvų, kurių kiekvienas yra 7 mm atstumu vienos nuo kito, kaip aptarta 2.4 skyriuje. Interpoliuojant gavus 256x256 dvejetainius masyvus, jie buvo lyginami kaip aukščiau aprašytame raiškos atvaizdavimo įvertinimo eksperimente – lyginamos gautos užteršto ploto procentinės išraiškos. Tai galima matyti 3.28 – 3.32 paveikslėliuose.



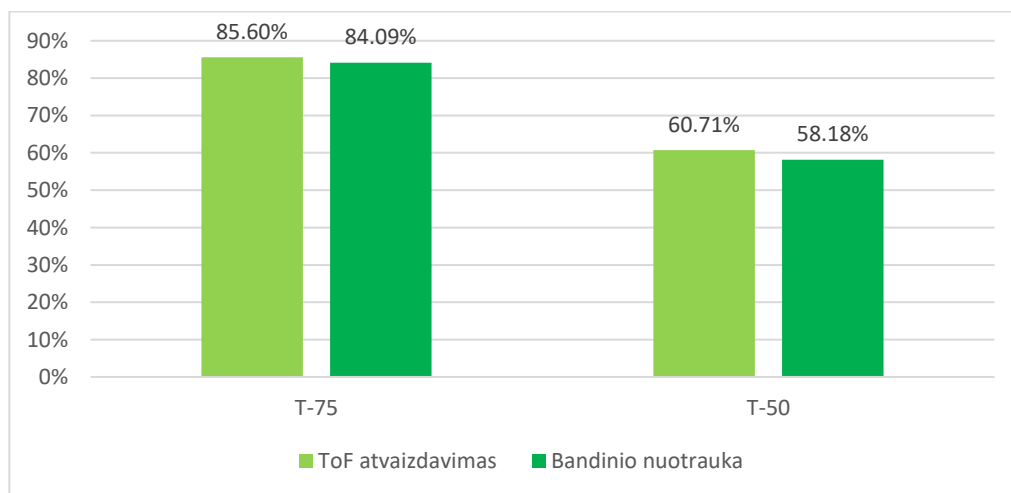
3.28 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant purvo sankauptų imitacijoms



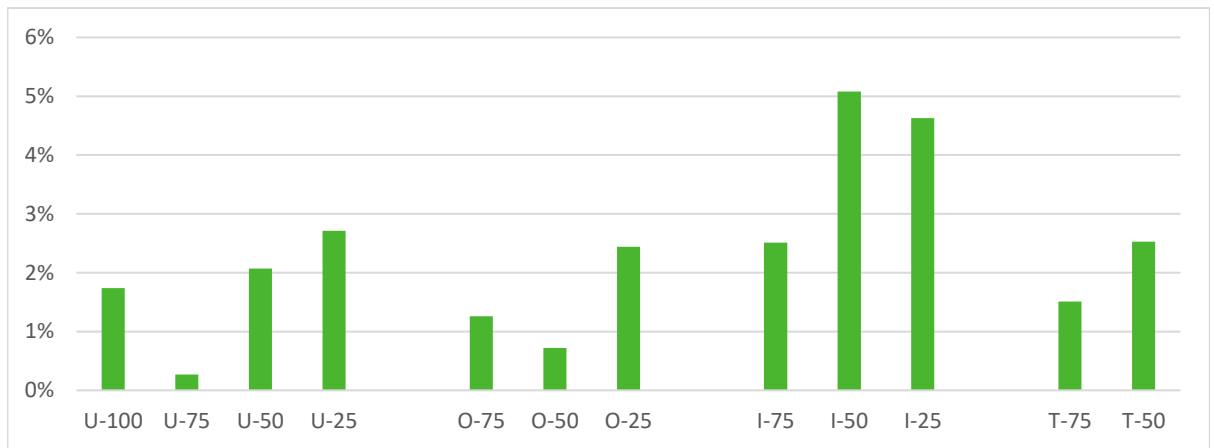
3.29 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant apnašų aplink vamzdžio perimetrą imitacijoms



3.30 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant medžių šakų nuolaužų imitacijoms



3.31 pav. Užteršto ploto įvertinimo rezultatai esant riebalų sancaupų imitacijoms



3.32 pav. Užteršto ploto imitacijų atvaizdavimo paklaidos rezultatas

Gautuose rezultatuose matoma, kad kaip ir 8x8, taip ir 16x16 raiškos atvaizdavime ToF jutikliu gautuose vaizduose gauta užterštumo dalis yra didesnė lyginant su imitacijų nuotraukomis. Tačiau kaip matoma iš 3.29 paveikslo imitacijų vaizdų paklaidų, dauguma imitacijų vaizdų gautos turinčios mažesnę paklaidą. Tai įrodo, kad raiška yra svarbus faktorius siekiant tikslaus užterštumo atvaizdavimo. Tačiau rezultatai parodė, kad medžių šakų nuolaužų imitacijos yra didžiausia atvaizdavimo paklaidą turintis užterštumo tipas, dėl savito netolygaus užterštumo paplitimo. Tai įrodo, kad ToF jutiklio galimybės yra ribotos aptikti smulkių elementų gausą.

Apibendrinant, galima teigti, kad didesnė raiška ir artimesnis atstumas gerina ToF jutiklių tikslumą vaizduojant įvairių tipų užterštumus. Tačiau jutiklio gebėjimas tiksliai atvaizduoti smulkesnius ir netolygiai paskirstytus elementus, pavyzdžiui, medžių šakas, tebėra iššūkis. Skirtingi maksimalūs ir minimalūs lygiai rodo, kad kiekvienos grupės imitacijos turi savo imitacijų tipui būdingus, faktorius. Šie rezultatai suteikia pagrindą tolimesniems tyrimams, kurie galėtų būti orientuoti į ateityje pasirodančius STM ar panašaus gamintojo mažų matmenų ir mažos kainos ToF jutiklius, turinčius didesnę nei 8x8 pikselių raišką, ar mažesnę FoV kampą. Taip pat, norint pasiekti geresnių atvaizdavimo rezultatų su šiame darbe naudojamu jutikliu, reikėtų pritaikyti zonų aštrumą atskiroms atstumo matavimo zonoms. Kita galimybė yra apsiriboti rinkoje esančiais didesnių matmenų jutikliais, tokiais kaip „Kinect 2“ kurie gali pateikti aukštos raiškos vaizdus, tačiau jų galimas panaudojimas tik didelių matmenų vamzdžiuose.

Išvados

1. Aptarti ir išanalizuoti skirtingi požeminių vamzdžių taršos atvaizdavimo ir defektų atpažinimo metodai: konvoliucinių neuroninių tinklų, stereo matymo, akustinio atspindžio, ultragarsinės vizualizacijos analizės.
2. Naudojant STM gamintojo VL53L5CX jutiklį, kuris buvo pasirinktas dėl mažo FoV kampo ir kainos rinkoje, buvo gauti gana aiškūs vaizdai, tačiau eksperimentai parodė ir jutiklio ribotumo aspektus. Pavyzdžiui, artimiausiuose atstumuose (iki 10 cm) gauti vaizdai buvo tikslūs ir aiškūs, tačiau didesniuose atstumuose tikslumas sumažėjo, ypač kai objektai buvo toliau nei 30 cm, ir atvaizdai tapo neaiškūs.
3. Tyrimo metu eksperimentas su purvo sankaupų imitacija „U-100“ 50 cm atstumu nuo jutiklio parodė, kad zonų aštrumas yra svarbus parametras siekiant tikslaus atvaizdo. Eksperimento metu įvairūs aštrumo lygiai veikė matavimų tikslumą: 20% aštrumas buvo nepakankamas, o aukštesni aštrumo lygiai (70% ir daugiau) sukėlė triukšmą atvaizduose.
4. Užterštumo optimalaus atvaizdavimo eksperimentas atskleidė, kad priklausomai nuo užterštumo tipo ir jo išsidėstymo, aštrumo parametras reikėtų automatizuoti, siekiant pasiekti geriausią vizualizacijos tikslumą. Tirtas ToF jutiklis yra pakankamai efektyvus atvaizduojant objektų bruožus iki 30 cm atstumu. Objektai, esantys toliau nei 30 cm, susiduria su raiškos trūkumais atvaizduose. Geriausiai atvaizduojamos imitacijos yra esančios 10 cm atstumu nuo jutiklio.
5. Tyrimo metu buvo ištirtas IR ToF jutiklio panaudojimas požeminių vamzdžių užterštumo atvaizdavime, keičiant matavimo zonų aštrumą ir imitacijų atstumą nuo jutiklio. Eksperimentai parodė, kad atstumas turi įtaką atvaizdavimo skyrai: priklausomai nuo atstumo, ji kinta nuo 14 mm per zoną (esant 100 mm atstumu nuo jutiklio) iki 50 mm per zoną (esant 500 mm atstumu nuo jutiklio). Todėl atvaizdavimo vertinimui buvo pasirinkta naudoti imitacijas, esančias 100 mm nuo jutiklio.
6. Imitacijų atvaizdavimo įvertinimas parodė, kad užterštumo aptikimas ir perteikimas naudojant ToF jutiklį skiriasi priklausomai nuo imitacijų tipo. Tai lėmė ToF jutiklio 8x8 raiška, dėl kurios jutikliui yra sudėtinga aptikti įvairių formų užterštumus.
7. Naudojant kelių ToF jutiklių kombinaciją, gauti taršos vizualizacijos vaizdai parodė mažesnę paklaidą, patvirtinant, kad vieno jutiklio atvaizdavimo paklaidos susijusios su esama maža 8x8 atvaizdavimo raiška. Be to, šis eksperimentas atskleidė, kad naudojant didesnę raišką jutiklis susiduria su smulkių elementų gausos atvaizdavimo problema.
8. Gauti rezultatai suteikia pagrindą tolimesniems tyrimams, kurie galėtų būti orientuoti į taršos vizualizacijas, naudojant kelių ToF jutiklių kombinaciją, arba į ateityje galimai pasirodysiančius STM ar panašaus gamintojo mažų matmenų ir mažos kainos ToF jutiklius, turinčius didesnę nei 8x8 pikselių raišką arba mažesnę FoV kampą.

Literatūros sąrašas

- [1] S. Moradi, T. Zayed, and F. Golkhoo, "Review on computer aided sewer pipeline defect detection and condition assessment," *Infrastructures*, Vol. 4, no. 1., 2019. doi: 10.3390/infrastructures4010010.
- [2] H. R. Choi and S. M. Ryew, "Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines.," *Mechatronics* Vol.12, No. 5, June 2002, pp. 713-736.
- [3] S. K. Sinha, P. W. Fieguth, and M. A. Polak, "Computer Vision Techniques for Automatic Structural Assessment of Underground Pipes.," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* Vol.18, 2003, pp. 95-112.
- [4] P. Huynh, R. Ross, A. Martchenko, and J. Devlin, "Anomaly inspection in sewer pipes using stereo vision," in *IEEE 2015 International Conference on Signal and Image Processing Applications, ICSIPA*, Feb. 2016, pp. 60–64. doi: 10.1109/ICSIPA.2015.7412164.
- [5] T. C. Su, M. Der Yang, T. C. Wu, and J. Y. Lin, "Morphological segmentation based on edge detection for sewer pipe defects on CCTV images," *Expert Syst Appl*, Vol. 38, no. 10, Sep. 2011, pp. 13094–13114, doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.116.
- [6] J. C. P. Cheng and M. Wang, "Automated detection of sewer pipe defects in closed-circuit television images using deep learning techniques," *Autom Constr*, Vol. 95, Nov. 2018, pp. 155–171, doi: 10.1016/j.autcon.2018.08.006.
- [7] "PASCAL VOC Challenge performance evaluation server." Accessed: Mar. 05, 2024. [Prieiga per internetą] [žiūrėta 2024 m. kovo 5 d.]. Available: <http://host.robots.ox.ac.uk:8080/leaderboard/displaylb.php?cls=mean&challengeid=11&compid=4&submid=9222>
- [8] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, Vol. 39, no. 6, Jun. 2017, pp. 1137–1149, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [9] G. Saygili, L. Van Der Maaten, and E. A. Hendriks, "Adaptive stereo similarity fusion using confidence measures," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 135, Jun. 2015, pp. 95–108, doi: 10.1016/j.cviu.2015.02.005.
- [10] P. Zanuttigh, G. Marin, C. Dal Mutto, F. Dominio, "Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras Technology and Applications", Switzerland, Springer International Publishing, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-30973-6.
- [11] L. C. Básaca-Preciado *et al.*, "Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot," *Opt. Lasers Eng*, Vol. 54, Mar. 2014, pp. 159–169, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.005.
- [12] Keisoku Jidō Seigyo Gakkai (Japan). "Vision System for Mobile Robots for Tracking Moving Targets, Based on Robot Motion and Stereo Vision Information", *SI International*, Dec. 2011, pp. 634-639.
- [13] E. Dandil and K. K. Cevik, "Computer Vision Based Distance Measurement System using Stereo Camera View," in *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings*, Oct. 2019. doi: 10.1109/ISMSIT.2019.8932817.
- [14] P. Huynh, R. Ross, A. Martchenko, J. Devlin, "Anomaly Inspection in Sewer Pipes Using Stereo Vision", *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, 2015, pp. 60-64.

- [15] R. Diamant, "Closed Form Analysis of the Normalized Matched Filter with a Test Case for Detection of Underwater Acoustic Signals", Dec. 2016, pp. 8225-8235.
- [16] C. Chang and S. Chatterjee, "On an Analysis of Static Occlusion in Stereo Vision", 1991, pp. 722-723.
- [17] R. Worley, Y. Yu, and S. Anderson, "Acoustic Echo-Localization for Pipe Inspection Robots," in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Sep. 2020, pp. 160–165. doi: 10.1109/MFI49285.2020.9235225.
- [18] W. Duan, R. Kirby, J. Prisutova, and K. V. Horoshenkov, "On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe," *Applied Acoustics*, Vol. 87, 2015, pp. 190–197, doi: 10.1016/j.apacoust.2014.07.002.
- [19] J. Mourjopoulos, "On the Variation and Invertability of Room Impulse Response Functions", *Journal of Sound and Vibration*, 1985, pp. 217-228.
- [20] R. Worley, Y. Yu, and S. Anderson, "Acoustic Echo-Localization for Pipe Inspection Robots," in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Sep. 2020, pp. 160–165. doi: 10.1109/MFI49285.2020.9235225.
- [21] R. Diamant, "Closed form analysis of the normalized matched filter with a test case for detection of underwater acoustic signals," *IEEE Access*, vol. 4, 2016, pp. 8225–8235, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2630498.
- [22] A. Towlson, Y. Yu, G. Sailor, K. Horoshenkov, A. Croxford, and B. Drinkwater, "Acoustic and Ultrasonic Characterisation of Blockages and Defects in Underground Pipes," in *Proceedings of IEEE Sensors*, 2021. doi: 10.1109/SENSORS47087.2021.9639823.
- [23] R. Rokhana, S. Anggraini, "Using of Array Of 8 Ultrasonic Transducers On Accoustic Tomography for Image Reconstruction", *2015 International Electronics Symposium (IES)*, 2015, pp. 20-25.
- [24] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," *NDT and E International*, Vol. 38, no. 8, Dec. 2005, pp. 701–711, doi: 10.1016/j.ndteint.2005.04.002.
- [25] G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements," *Adv Opt Photonics*, Vol. 4, no. 4, Dec. 2012, p. 441, doi: 10.1364/aop.4.000441.
- [26] "Laser Triangulation Sensor Principles - Vitrek." Accessed: Mar. 07, 2024. [Prieiga per internetą] [Žiūrėta 2024 m. kovo 7 d.]. Available: <https://vitrek.com/mti-instruments/technology-principles/laser-triangulation-sensors/>
- [27] P. Siekański *et al.*, "On-line laser triangulation scanner for wood logs surface geometry measurement", Vol. 19, no. 5, Mar. 2019, doi: 10.3390/s19051074.
- [28] "What is Laser Triangulation? - Movimed." Accessed: Mar. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.movimed.com/knowledgebase/what-is-laser-triangulation/>
- [29] P. Suliga, "A feature analysis of a laser triangulation stand used to acquire a 3D screw thread image", 2016, pp. 702-705.
- [30] J. Schlarp, E. Csencsics, and G. Schitter, "Optical Scanning of a Laser Triangulation Sensor for 3-D Imaging," *IEEE Trans Instrum Meas*, Vol. 69, no. 6, Jun. 2020, pp. 3606–3613, doi: 10.1109/TIM.2019.2933343.
- [31] G. Ye *et al.*, "Improving measurement accuracy of laser triangulation sensor via integrating a diffraction grating," *Opt. Lasers Eng*, Vol. 143, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106631.
- [32] R. G. Dorsch, G. Hausler, and J. M. Herrmann, "Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement", *Applied optics*, vol. 33, no. 7, Mar. 1994, pp. 1306-1314.

- [33] J. Park, H. Kim, Y.-W. Tai, M. S. Brown, and I. Kweon, “High Quality Depth Map Upsampling for 3D-TOF Cameras”, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011, pp. 1623-1630.
- [34] A. Kolb, E. Barth, R. Koch, and R. Larsen, “Time-of-flight cameras in computer graphics,” *Computer Graphics Forum*, vol. 29, no. 1, 2010, pp. 141–159, doi: 10.1111/j.1467-8659.2009.01583.x.
- [35] J. Illade-Quinteiro, V. M. Brea, P. López, D. Cabello, and G. Doménech-Asensi, “Distance measurement error in time-of-flight sensors due to shot noise”, vol. 15, no. 3, Feb. 2015, pp. 4624–4642, doi: 10.3390/s150304624.
- [36] S. Royo and M. Ballesta-Garcia, “An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/app9194093.
- [37] U. Wandinger, “Introduction to Lidar”, Leipzig, Germany, Springer Series in Optic Sciences, 2005
- [38] A. Wehr and U. Lohr, “Airborne laser scanning-an introduction and overview”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 1999, pp. 68-82.
- [39] D. J. Svetkoff, “Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision”, SPIE Digital Library., SPIE, 1992.
- [40] Miles. Hansard, “Time-of-flight cameras: principles, methods and applications”, Springer, 2013, p. 103.
- [41] R. Horaud, M. Hansard, G. Evangelidis, and C. Ménier, “An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies,” *Mach Vis Appl*, vol. 27, no. 7, Oct. 2016, pp. 1005–1020, doi: 10.1007/s00138-016-0784-4.
- [42] “Time-of-Flight 8x8 multizone ranging sensor with wide field of view VL53L5CX Datasheet.” [Prieiga per internetą]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-53l5a1.html>
- [43] “Introduction A guide to using the VL53L5CX multizone Time-of-Flight ranging sensor with a wide field of view ultra lite driver (ULD) UM2884 User manual,” 2024. [Prieiga per internetą]. Available: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l5cx.html>

Priedai

1 priedas. MATLAB programinės įrangos kodas

```
clear all
close all

% Duomenų nustatymas
MyFontSize=15;
MainPath='C:\Users\urims\Desktop\Duomenys\Tofdata\U\';
DatFile='10cm U50.csv';
% csv skaitymas
MyRez = readtable([MainPath DatFile]);
% Duomenų koregavimas į atvaizdus
NrOfImages=length(MyRez.median_range_mm)/65;
xx=MyRez.median_range_mm;
xx(1:65:end)=[ ];
ToF_mm = reshape(xx,[8,8,NrOfImages]);
% Tinklelio sudarymas
x_mm=0:100/255:100;
y_mm=x_mm;
xcentered_mm=x_mm-50;
ycentered_mm=y_mm-50;
[xo,yo]=meshgrid(0:100/7:100);
[xq,yq]=meshgrid(0:100/255:100);
% Kauke vamzdžio atvaizdui
Omask=zeros(256,256);
PipePixelsNo=0;

for xnr=1:256,
    for ynr=1:256,
        R_mm=sqrt(xcentered_mm(xnr)^2+ycentered_mm(ynr)^2);
        if R_mm<50,
            Omask(xnr,ynr)=1;
            PipePixelsNo=PipePixelsNo+1;
        end;
    end;
end;
% Interpoliacija
for nr=1:NrOfImages,
    My8x8img=ToF_mm(:, :, nr); % 8x8
    My256x256img=interp2(xo,yo,My8x8img,xq,yq); % 256 x 256
    % slenkstis
    cc=find(My256x256img>250);
    My256x256img(cc)=250;
    % Kaukes uždejimas ir pikselių skaičiavimas
    findmin=min(min(My256x256img));
    wmask=Omask;
    find0=find(wmask==0);
    wmask=My256x256img;
    wmask(find0)=findmin;
    all0=find(wmask>120);
    openPixels=length(all0);
    % ToF_mm(:, :, nr)
% vizualizacija
figure(1)
pcolor(x_mm,y_mm,rot90(wmask))
colormap hot
colormap(flipud(hot))
colorbar;shading interp
title(['Nr=' num2str(nr) ' of ' num2str(NrOfImages)])
```

```

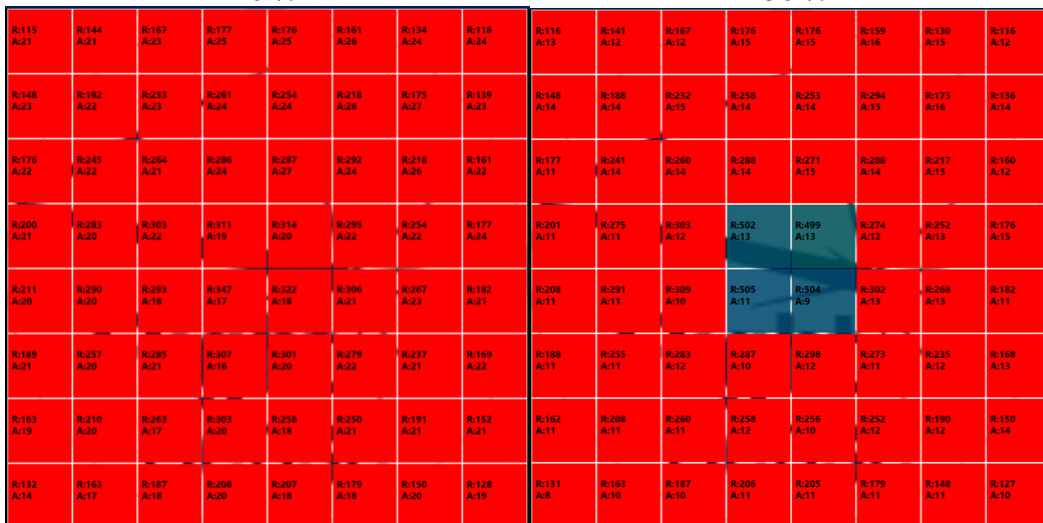
axis equal; axis tight;
xlabel('X (mm)');ylabel('Y (mm)')
if exist('MyFontSize','var'), set(gca,'FontSize',MyFontSize);end;
% shading interp
% užsikišimo apsakiciavimas ir parodymas
figure(2)
masyv=ones(256,256);
masyv(find0)=0;
pcolor(x_mm,y_mm,rot90(masyv))
colormap gray
colormap(flipud(hot))
colorbar;shading interp
title(['Blockage size=' num2str(100-openPixels/PipePixelsNo*100) ' % '])
axis equal; axis tight;
xlabel('X (mm)');ylabel('Y (mm)')
if exist('MyFontSize','var'), set(gca,'FontSize',MyFontSize);end;
pause
end;

```

2 priedas. Vizualizacijos kokybės tyrimo keičiant matavimo zonų aštrumą imitacijų vaizdai

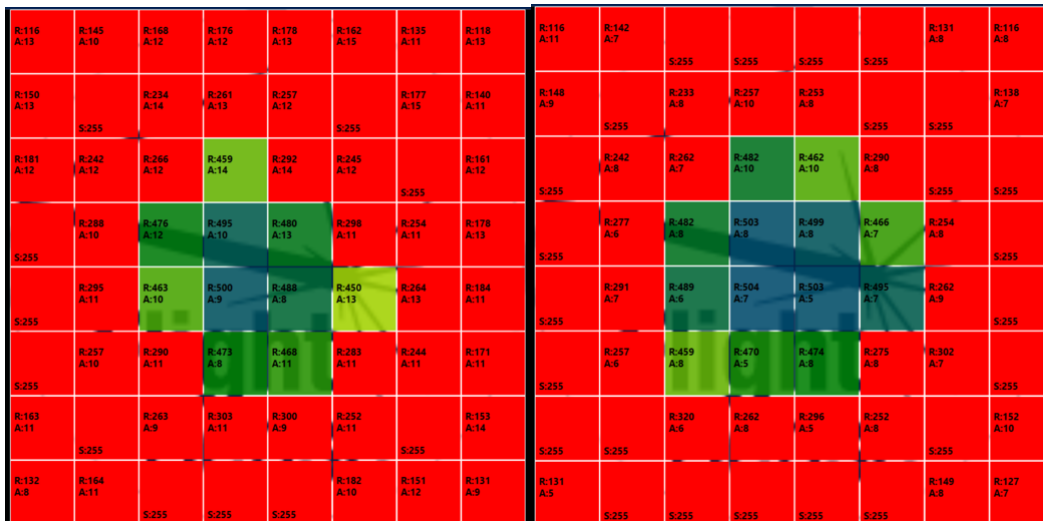
20 %

30 %



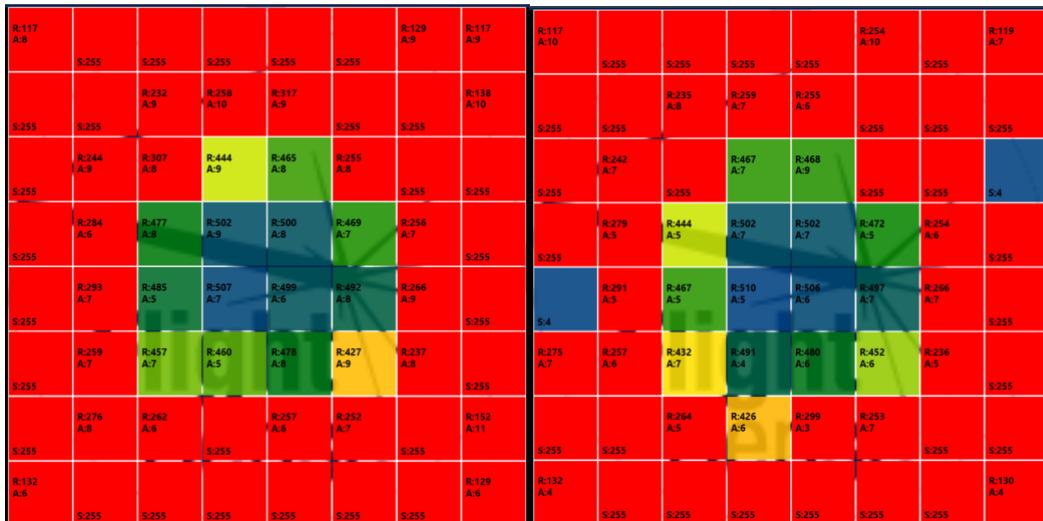
40 %

50 %



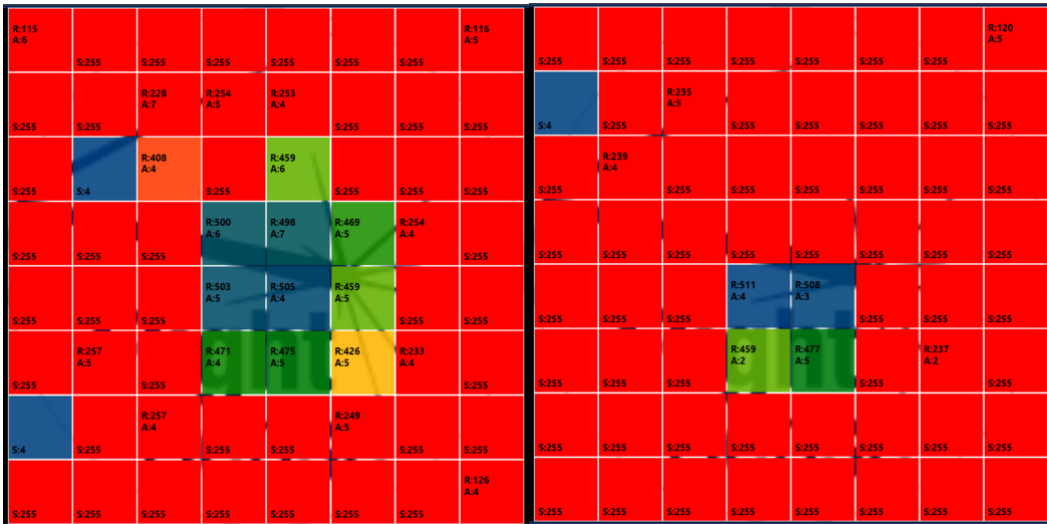
60 %

70 %



80 %

90 %



3 priedas. Vizualizacijos kokybės tyrimo keičiant atstumą imitacijų vaizdai

„U-100“

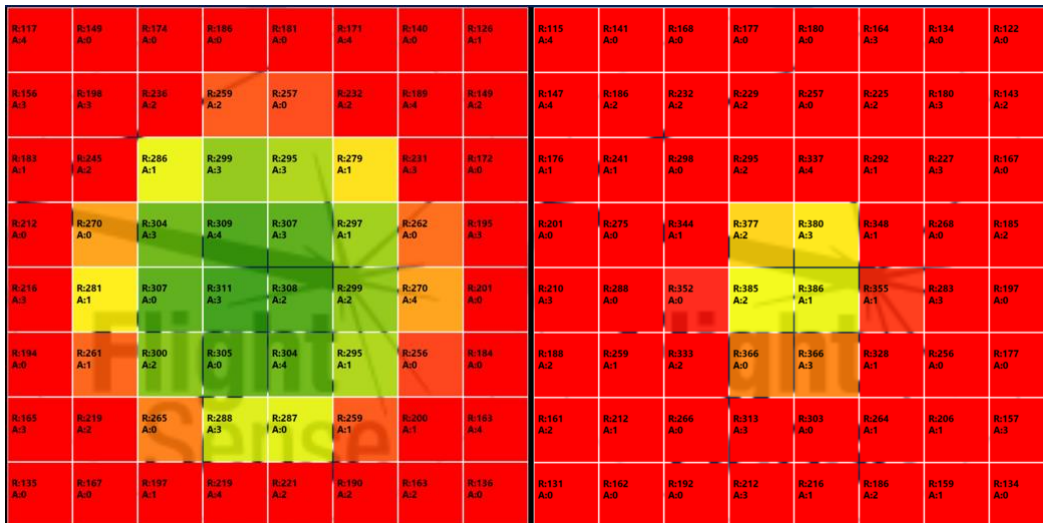
10 cm

20 cm



30 cm

40 cm



„U-75“

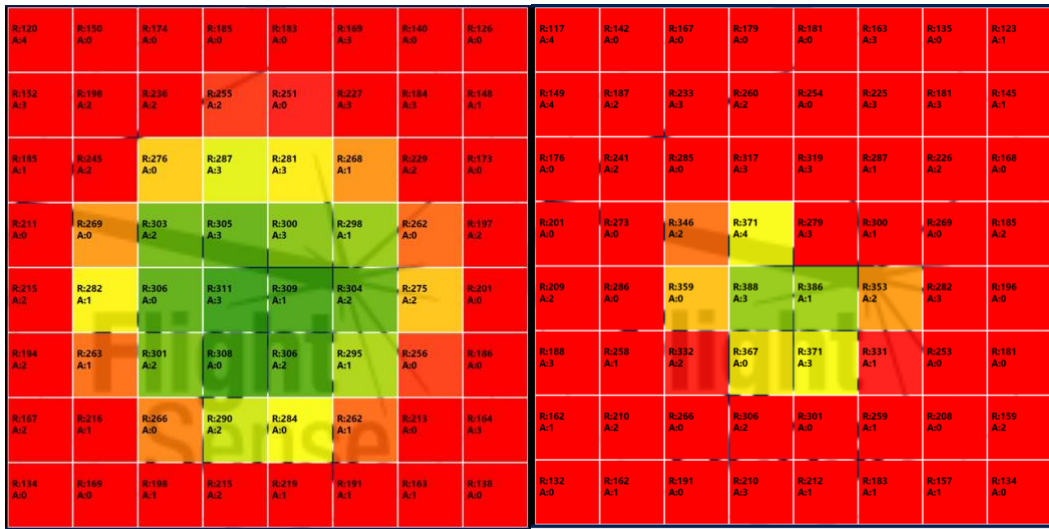
10 cm

20 cm



30 cm

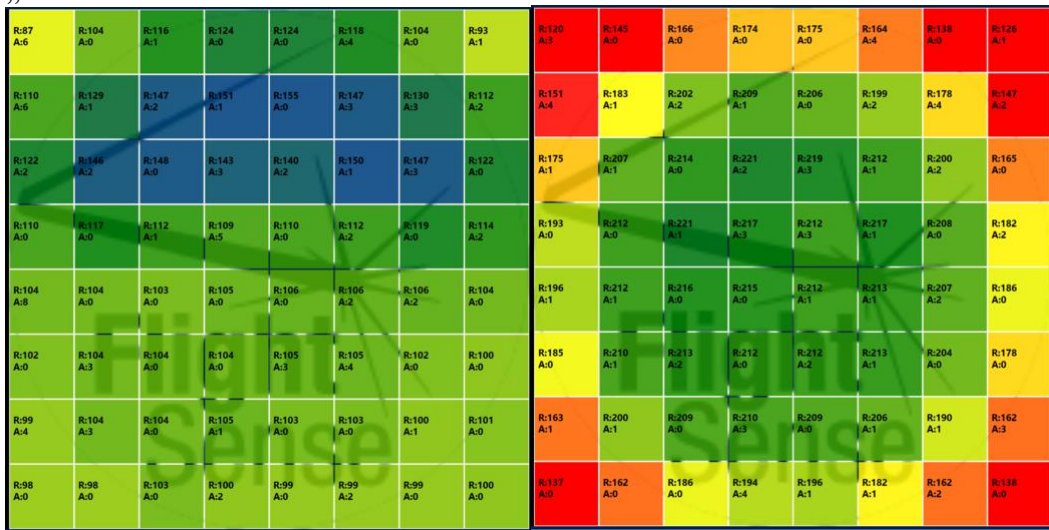
40 cm



„U-50“

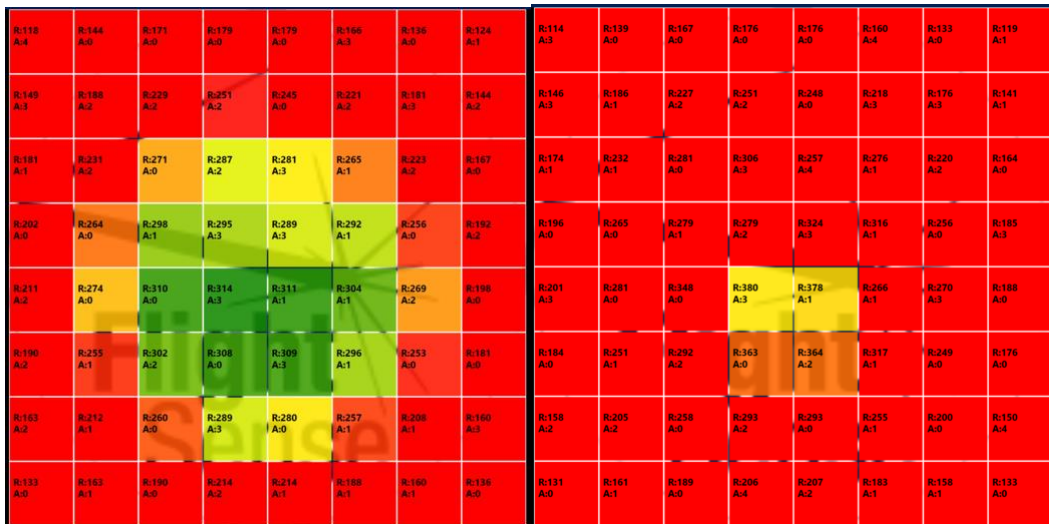
10 cm

20 cm



30 cm

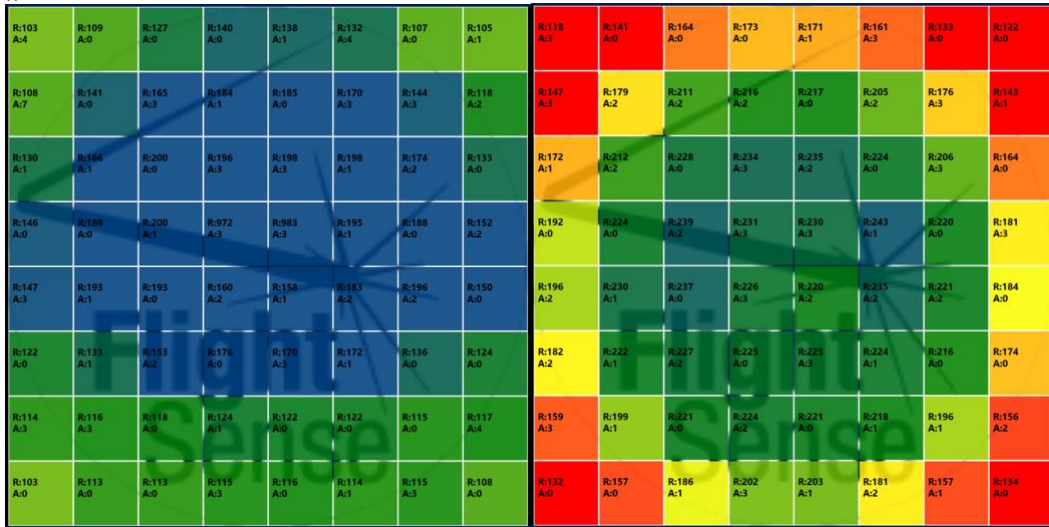
40 cm



„U-25“

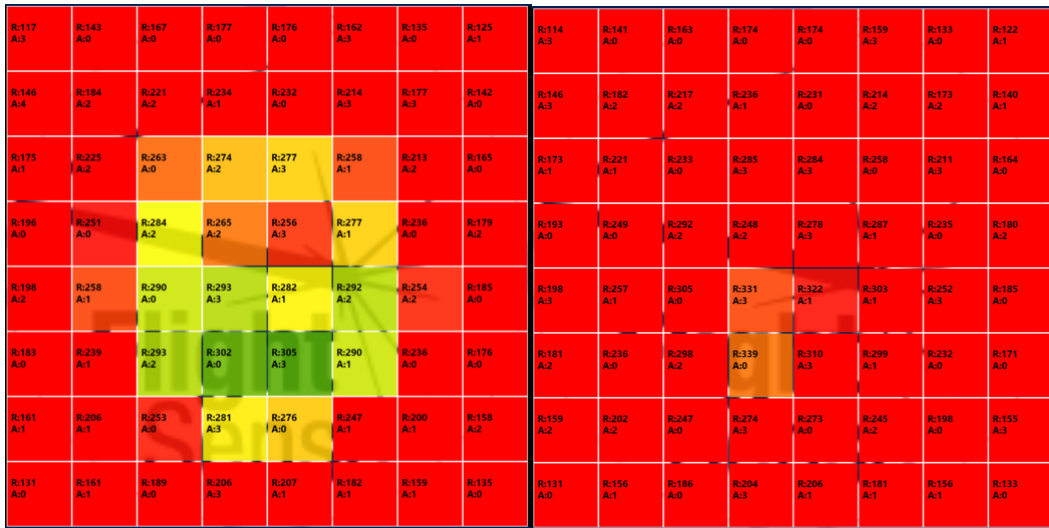
10 cm

20 cm



30 cm

40 cm



„O-75“

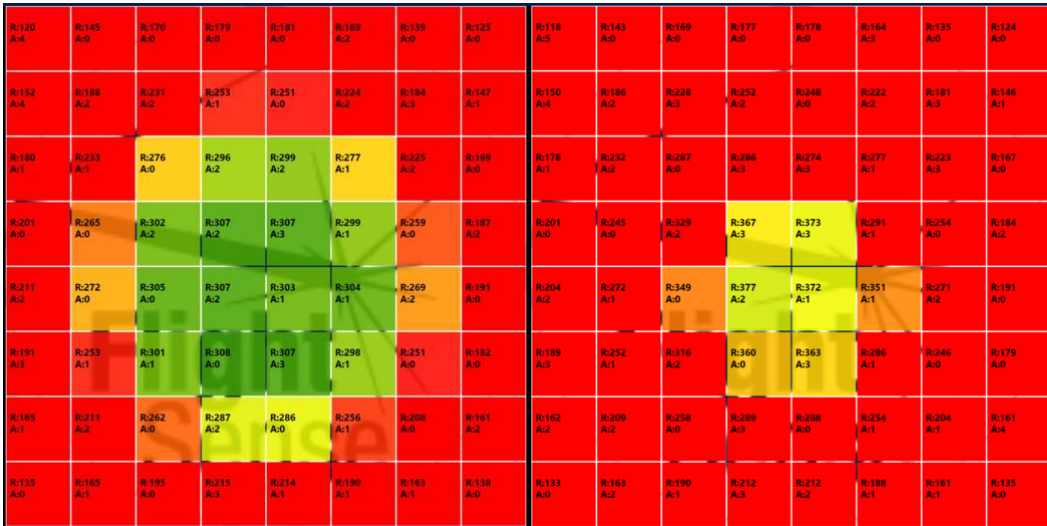
10 cm

20 cm



30 cm

40 cm



„O-50“

10 cm

20 cm



30 cm

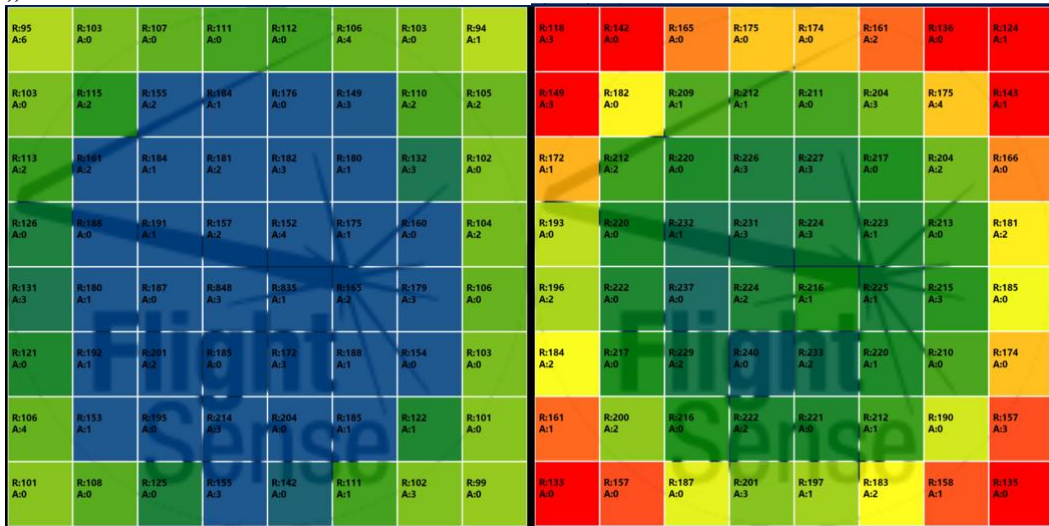
40 cm



„O-25“

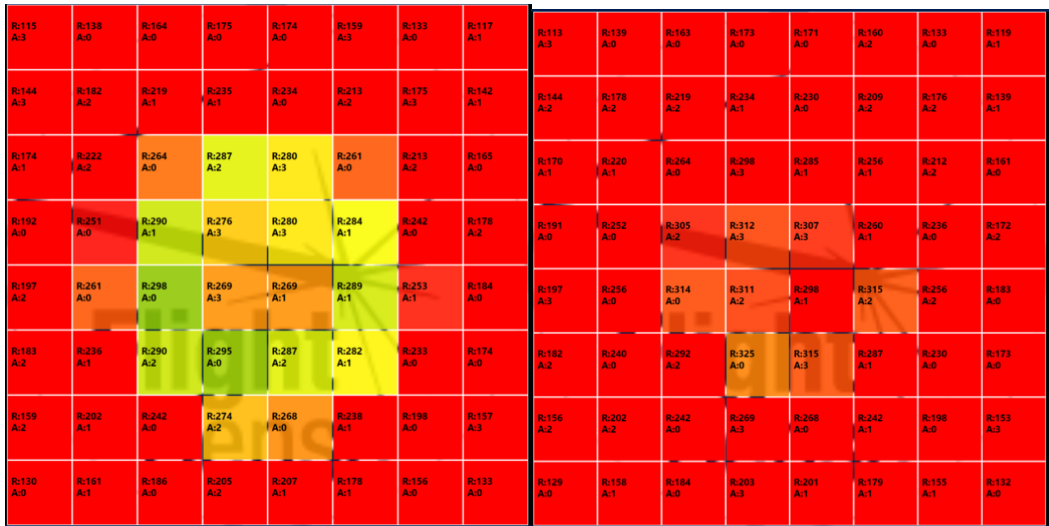
10 cm

20 cm



30 cm

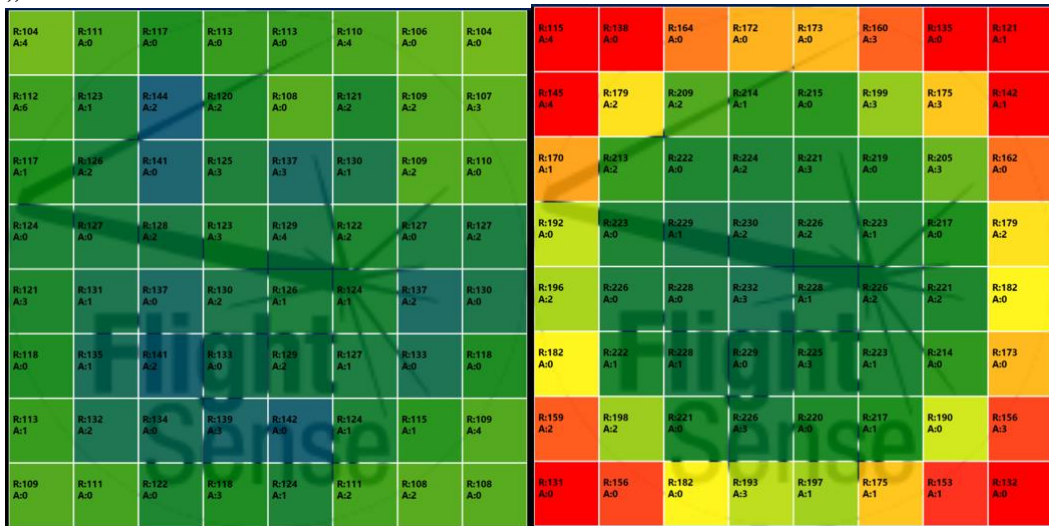
40 cm



„I-75“

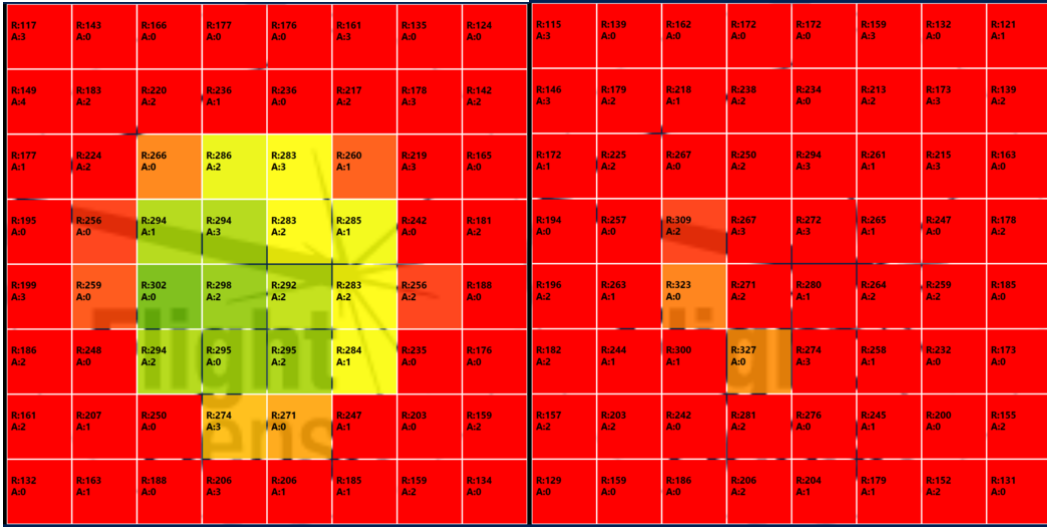
10 cm

20 cm



30 cm

40 cm



„I-50“

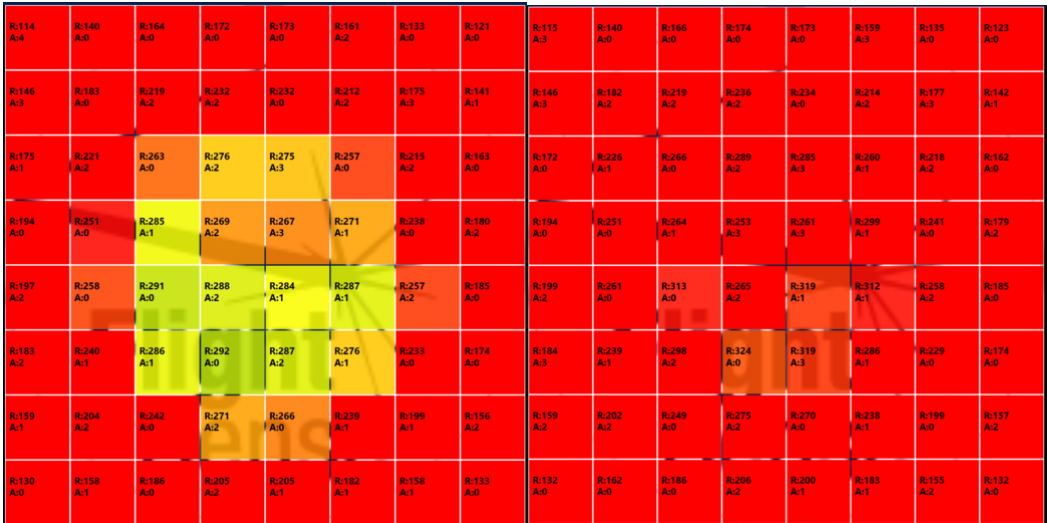
10 cm

20 cm



30 cm

40 cm



„I-25“

10 cm

R:106 A:4	R:111 A:0	R:124 A:0	R:138 A:0	R:137 A:0	R:122 A:3	R:108 A:0	R:109 A:1
R:111 A:5	R:146 A:1	R:166 A:2	R:178 A:1	R:177 A:0	R:162 A:2	R:139 A:3	R:110 A:2
R:131 A:1	R:171 A:1	R:192 A:0	R:195 A:2	R:196 A:2	R:184 A:0	R:165 A:2	R:123 A:0
R:151 A:0	R:187 A:0	R:204 A:2	R:680 A:2	R:169 A:3	R:193 A:1	R:182 A:0	R:140 A:2
R:153 A:2	R:182 A:1	R:193 A:0	R:157 A:2	R:157 A:1	R:179 A:1	R:181 A:2	R:146 A:0
R:139 A:0	R:147 A:1	R:149 A:2	R:145 A:0	R:148 A:1	R:146 A:1	R:147 A:0	R:133 A:0
R:116 A:2	R:127 A:1	R:133 A:0	R:117 A:2	R:137 A:0	R:126 A:0	R:126 A:1	R:119 A:3
R:109 A:0	R:115 A:0	R:137 A:0	R:125 A:2	R:106 A:0	R:113 A:2	R:116 A:1	R:112 A:0

20 cm

R:113 A:3	R:138 A:0	R:161 A:0	R:169 A:0	R:171 A:0	R:158 A:2	R:131 A:0	R:121 A:0
R:144 A:3	R:177 A:2	R:210 A:3	R:220 A:1	R:215 A:0	R:205 A:2	R:172 A:3	R:141 A:1
R:171 A:1	R:214 A:1	R:230 A:0	R:234 A:2	R:232 A:2	R:224 A:1	R:206 A:2	R:159 A:0
R:190 A:0	R:228 A:0	R:241 A:1	R:230 A:3	R:221 A:3	R:234 A:1	R:220 A:0	R:176 A:2
R:193 A:3	R:230 A:0	R:242 A:0	R:233 A:2	R:229 A:1	R:234 A:1	R:225 A:3	R:180 A:0
R:180 A:2	R:223 A:1	R:232 A:3	R:232 A:0	R:227 A:2	R:228 A:1	R:214 A:0	R:170 A:0
R:158 A:2	R:200 A:1	R:222 A:0	R:227 A:2	R:219 A:0	R:218 A:1	R:194 A:0	R:154 A:3
R:130 A:0	R:158 A:1	R:183 A:0	R:199 A:2	R:196 A:1	R:177 A:2	R:152 A:1	R:131 A:0

30 cm

R:117 A:3	R:139 A:0	R:164 A:0	R:174 A:0	R:173 A:0	R:161 A:2	R:133 A:0	R:123 A:0
R:147 A:2	R:180 A:2	R:217 A:2	R:232 A:2	R:228 A:0	R:212 A:2	R:173 A:4	R:142 A:1
R:172 A:1	R:219 A:2	R:260 A:0	R:280 A:2	R:274 A:4	R:252 A:0	R:213 A:3	R:164 A:0
R:194 A:0	R:247 A:0	R:285 A:1	R:264 A:3	R:258 A:3	R:278 A:0	R:237 A:0	R:179 A:2
R:199 A:2	R:258 A:1	R:297 A:0	R:280 A:2	R:274 A:1	R:283 A:2	R:254 A:2	R:185 A:0
R:183 A:3	R:237 A:1	R:291 A:2	R:297 A:0	R:300 A:3	R:278 A:1	R:233 A:0	R:171 A:0
R:159 A:2	R:200 A:1	R:244 A:0	R:272 A:2	R:269 A:0	R:244 A:1	R:197 A:1	R:155 A:4
R:131 A:0	R:156 A:1	R:185 A:1	R:204 A:3	R:207 A:1	R:179 A:1	R:154 A:1	R:132 A:0

40 cm

R:115 A:3	R:138 A:0	R:162 A:0	R:171 A:0	R:169 A:0	R:159 A:2	R:133 A:0	R:120 A:1
R:145 A:4	R:180 A:2	R:210 A:2	R:232 A:2	R:231 A:0	R:212 A:2	R:174 A:3	R:140 A:1
R:169 A:1	R:219 A:1	R:257 A:0	R:283 A:3	R:280 A:3	R:255 A:1	R:213 A:2	R:162 A:0
R:192 A:0	R:250 A:0	R:291 A:1	R:270 A:3	R:277 A:3	R:287 A:1	R:236 A:0	R:178 A:3
R:196 A:2	R:255 A:0	R:304 A:0	R:254 A:2	R:258 A:1	R:252 A:1	R:253 A:2	R:182 A:0
R:180 A:2	R:233 A:1	R:293 A:1	R:324 A:0	R:274 A:3	R:287 A:1	R:230 A:0	R:170 A:0
R:159 A:1	R:202 A:1	R:242 A:0	R:273 A:2	R:268 A:0	R:239 A:1	R:194 A:1	R:156 A:3
R:128 A:0	R:156 A:0	R:184 A:1	R:201 A:3	R:199 A:1	R:180 A:1	R:152 A:3	R:130 A:0

„T-75“

10 cm

R:109 A:5	R:119 A:0	R:124 A:0	R:127 A:0	R:125 A:0	R:119 A:0	R:108 A:0	R:116 A:1
R:121 A:1	R:133 A:1	R:136 A:1	R:151 A:6	R:125 A:0	R:122 A:2	R:117 A:3	R:114 A:2
R:125 A:5	R:139 A:3	R:148 A:0	R:139 A:10	R:136 A:2	R:134 A:3	R:128 A:4	R:117 A:0
R:125 A:0	R:143 A:0	R:150 A:1	R:144 A:3	R:140 A:0	R:143 A:2	R:138 A:0	R:124 A:2
R:120 A:14	R:142 A:0	R:154 A:0	R:147 A:2	R:147 A:1	R:145 A:1	R:138 A:0	R:129 A:0
R:120 A:0	R:143 A:2	R:152 A:2	R:150 A:0	R:150 A:2	R:144 A:2	R:130 A:0	R:125 A:0
R:121 A:3	R:127 A:3	R:130 A:0	R:145 A:1	R:135 A:0	R:128 A:0	R:124 A:1	R:119 A:0
R:110 A:0	R:122 A:0	R:120 A:0	R:110 A:4	R:110 A:0	R:124 A:1	R:123 A:4	R:114 A:0

20 cm

R:122 A:3	R:152 A:0	R:177 A:0	R:184 A:0	R:184 A:0	R:173 A:2	R:149 A:0	R:131 A:0
R:153 A:4	R:199 A:0	R:223 A:2	R:229 A:1	R:229 A:0	R:218 A:3	R:188 A:3	R:157 A:2
R:184 A:1	R:226 A:2	R:238 A:0	R:242 A:4	R:236 A:1	R:230 A:0	R:218 A:2	R:174 A:0
R:210 A:0	R:234 A:0	R:244 A:0	R:250 A:3	R:245 A:4	R:242 A:2	R:227 A:0	R:196 A:2
R:211 A:2	R:234 A:1	R:244 A:0	R:246 A:3	R:248 A:1	R:245 A:0	R:231 A:2	R:202 A:0
R:193 A:0	R:230 A:0	R:239 A:3	R:237 A:0	R:237 A:3	R:236 A:1	R:226 A:0	R:186 A:0
R:169 A:1	R:215 A:1	R:231 A:0	R:227 A:3	R:226 A:0	R:227 A:2	R:208 A:0	R:166 A:2
R:139 A:0	R:170 A:0	R:196 A:1	R:211 A:3	R:211 A:0	R:193 A:2	R:168 A:2	R:143 A:0

30 cm

40 cm

R:117 A:3	R:146 A:0	R:170 A:0	R:181 A:0	R:182 A:0	R:166 A:3	R:140 A:0	R:125 A:0	R:116 A:3	R:141 A:0	R:167 A:0	R:176 A:0	R:176 A:0	R:162 A:2	R:135 A:0	R:123 A:1
R:149 A:2	R:188 A:2	R:231 A:1	R:256 A:2	R:256 A:0	R:228 A:2	R:182 A:2	R:147 A:1	R:145 A:2	R:185 A:1	R:226 A:1	R:250 A:1	R:249 A:0	R:220 A:2	R:179 A:3	R:143 A:1
R:180 A:1	R:239 A:1	R:288 A:0	R:314 A:3	R:309 A:3	R:287 A:1	R:229 A:2	R:171 A:0	R:176 A:1	R:229 A:1	R:285 A:0	R:280 A:3	R:337 A:2	R:286 A:0	R:220 A:2	R:165 A:0
R:201 A:0	R:270 A:0	R:321 A:1	R:330 A:3	R:327 A:3	R:314 A:1	R:261 A:0	R:194 A:2	R:198 A:0	R:232 A:0	R:337 A:2	R:383 A:2	R:392 A:2	R:287 A:1	R:226 A:0	R:178 A:2
R:211 A:3	R:275 A:0	R:320 A:0	R:324 A:2	R:325 A:1	R:310 A:2	R:275 A:2	R:198 A:0	R:202 A:2	R:274 A:1	R:286 A:0	R:386 A:2	R:290 A:1	R:364 A:2	R:270 A:2	R:189 A:0
R:192 A:0	R:256 A:1	R:312 A:1	R:321 A:0	R:320 A:2	R:304 A:1	R:255 A:0	R:181 A:0	R:186 A:0	R:254 A:0	R:321 A:1	R:367 A:0	R:373 A:2	R:318 A:1	R:247 A:0	R:178 A:0
R:165 A:1	R:214 A:2	R:265 A:0	R:294 A:2	R:291 A:0	R:262 A:1	R:210 A:0	R:161 A:2	R:162 A:1	R:209 A:1	R:262 A:0	R:297 A:2	R:294 A:0	R:254 A:1	R:204 A:0	R:157 A:3
R:135 A:0	R:166 A:1	R:193 A:0	R:216 A:4	R:217 A:1	R:189 A:1	R:162 A:1	R:135 A:0	R:131 A:0	R:159 A:0	R:189 A:0	R:211 A:3	R:213 A:1	R:175 A:1	R:160 A:1	R:135 A:0

„T-50“

10 cm

20 cm

R:109 A:4	R:114 A:0	R:123 A:0	R:132 A:0	R:133 A:0	R:125 A:3	R:111 A:0	R:114 A:1	R:121 A:3	R:149 A:0	R:173 A:0	R:181 A:0	R:179 A:0	R:168 A:3	R:141 A:0	R:129 A:1
R:110 A:6	R:135 A:1	R:160 A:0	R:170 A:1	R:171 A:0	R:161 A:3	R:144 A:3	R:118 A:2	R:152 A:3	R:191 A:1	R:220 A:2	R:226 A:1	R:225 A:0	R:215 A:2	R:182 A:3	R:151 A:1
R:128 A:2	R:165 A:1	R:174 A:0	R:167 A:2	R:163 A:3	R:177 A:1	R:165 A:2	R:137 A:0	R:180 A:1	R:201 A:1	R:239 A:0	R:245 A:2	R:237 A:2	R:234 A:0	R:216 A:2	R:171 A:0
R:143 A:0	R:156 A:0	R:158 A:1	R:154 A:2	R:153 A:3	R:157 A:1	R:155 A:0	R:143 A:2	R:200 A:0	R:233 A:0	R:248 A:1	R:240 A:2	R:236 A:3	R:247 A:0	R:231 A:0	R:189 A:2
R:138 A:5	R:142 A:0	R:147 A:0	R:139 A:0	R:139 A:1	R:132 A:1	R:140 A:4	R:137 A:0	R:204 A:2	R:236 A:1	R:243 A:0	R:239 A:2	R:242 A:1	R:242 A:0	R:232 A:2	R:199 A:0
R:122 A:0	R:127 A:2	R:129 A:0	R:125 A:0	R:129 A:3	R:130 A:3	R:131 A:0	R:122 A:0	R:190 A:2	R:228 A:0	R:240 A:2	R:240 A:0	R:241 A:2	R:235 A:1	R:221 A:0	R:184 A:0
R:113 A:5	R:125 A:4	R:122 A:0	R:126 A:1	R:128 A:0	R:135 A:0	R:124 A:0	R:112 A:0	R:169 A:1	R:212 A:0	R:231 A:0	R:238 A:3	R:233 A:0	R:225 A:0	R:206 A:0	R:166 A:3
R:108 A:0	R:119 A:0	R:134 A:1	R:134 A:2	R:126 A:0	R:122 A:0	R:112 A:1	R:108 A:0	R:137 A:0	R:168 A:1	R:195 A:1	R:210 A:3	R:211 A:0	R:190 A:1	R:166 A:1	R:141 A:0

30 cm

40 cm

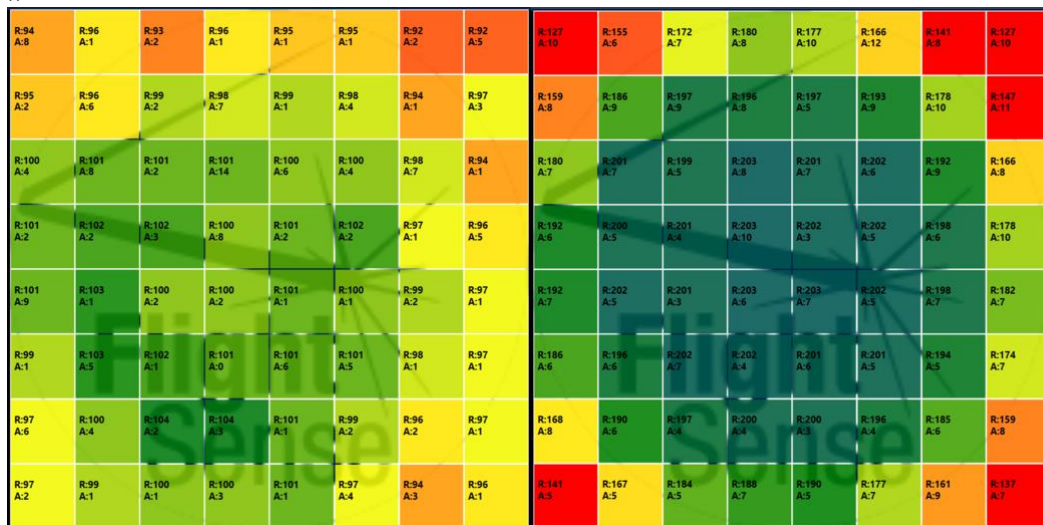
R:116 A:2	R:143 A:0	R:168 A:0	R:179 A:0	R:179 A:0	R:165 A:3	R:138 A:0	R:122 A:1	R:117 A:3	R:142 A:0	R:167 A:0	R:178 A:0	R:176 A:0	R:164 A:2	R:132 A:0	R:123 A:1
R:150 A:3	R:189 A:1	R:225 A:2	R:248 A:1	R:241 A:0	R:220 A:2	R:179 A:2	R:145 A:1	R:147 A:4	R:186 A:2	R:227 A:2	R:251 A:1	R:240 A:0	R:218 A:2	R:177 A:3	R:143 A:1
R:176 A:1	R:230 A:2	R:272 A:0	R:292 A:3	R:284 A:3	R:270 A:1	R:220 A:2	R:167 A:0	R:176 A:1	R:233 A:2	R:244 A:0	R:302 A:3	R:306 A:3	R:269 A:1	R:220 A:2	R:157 A:0
R:202 A:0	R:262 A:0	R:303 A:1	R:276 A:3	R:284 A:3	R:300 A:1	R:255 A:0	R:185 A:1	R:199 A:0	R:263 A:0	R:319 A:1	R:313 A:3	R:267 A:3	R:322 A:1	R:255 A:0	R:184 A:2
R:210 A:2	R:273 A:0	R:317 A:0	R:326 A:3	R:321 A:1	R:312 A:1	R:271 A:2	R:195 A:0	R:202 A:3	R:274 A:1	R:347 A:0	R:388 A:2	R:384 A:1	R:308 A:2	R:272 A:3	R:188 A:0
R:187 A:2	R:254 A:0	R:307 A:1	R:320 A:0	R:320 A:3	R:304 A:1	R:251 A:0	R:181 A:0	R:185 A:3	R:249 A:0	R:319 A:1	R:369 A:0	R:374 A:3	R:321 A:1	R:246 A:0	R:175 A:0
R:159 A:1	R:209 A:1	R:263 A:0	R:292 A:2	R:289 A:0	R:258 A:1	R:208 A:1	R:158 A:3	R:159 A:2	R:206 A:1	R:254 A:0	R:291 A:3	R:294 A:0	R:252 A:1	R:201 A:1	R:157 A:3
R:131 A:0	R:183 A:0	R:189 A:0	R:210 A:2	R:213 A:1	R:186 A:1	R:159 A:1	R:133 A:0	R:131 A:0	R:159 A:1	R:167 A:0	R:207 A:3	R:207 A:2	R:183 A:2	R:157 A:1	R:132 A:0

4 priedas. Atstumo ir aštrumo vertės optimizavimo tyrimo imitacijų vaizdai

„U-100“

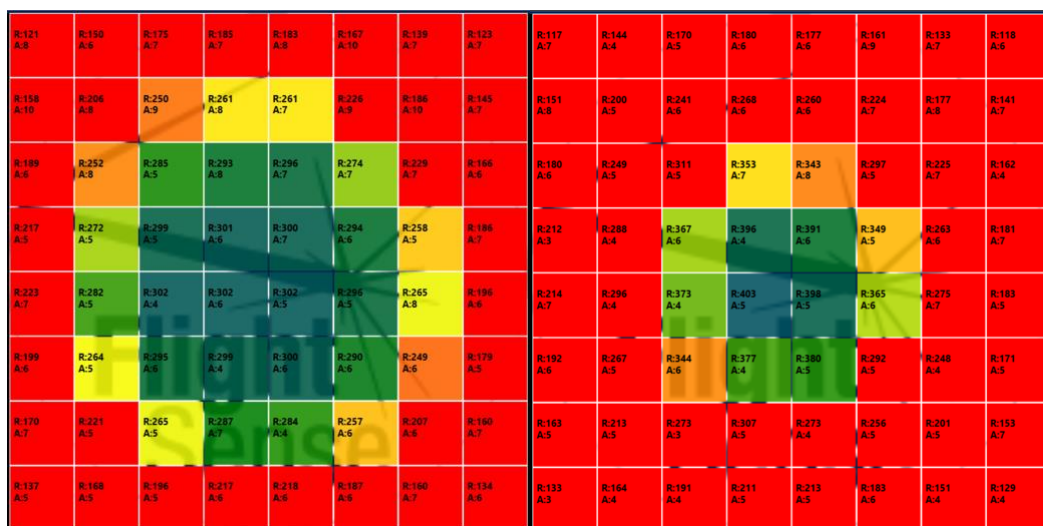
10 cm

20 cm

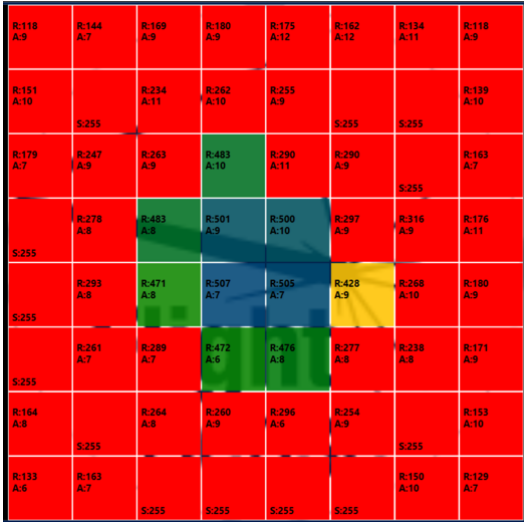


30 cm

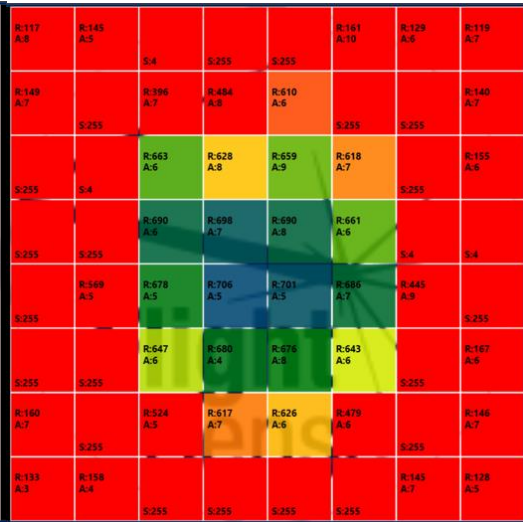
40 cm



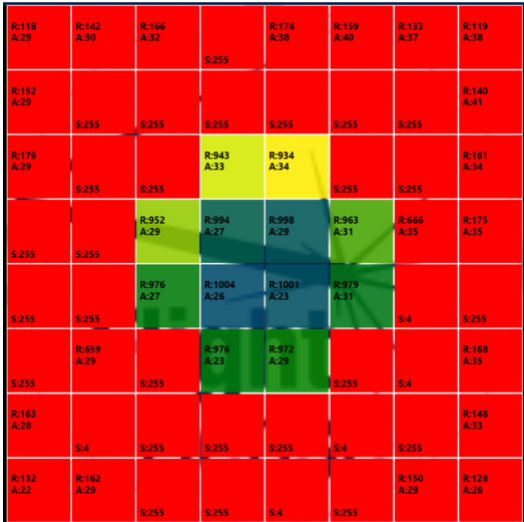
50 cm



70 cm

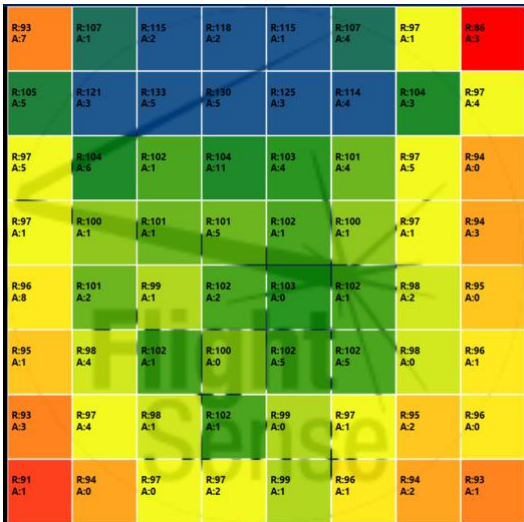


100 cm

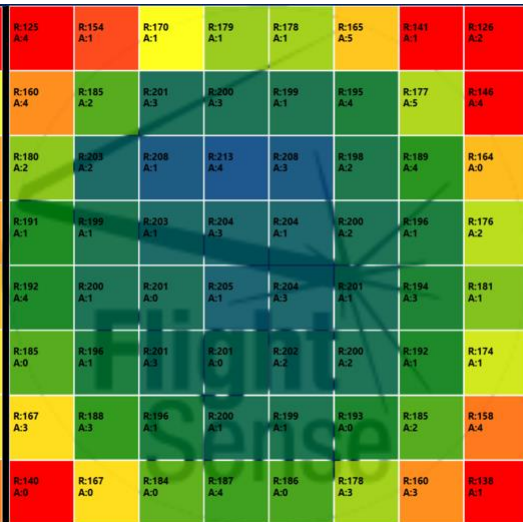


„U-75“

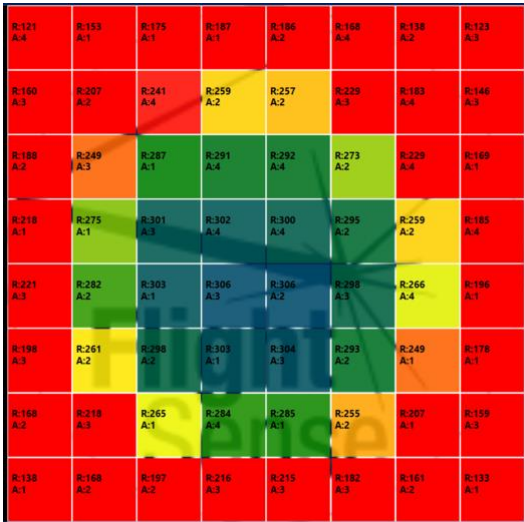
10 cm



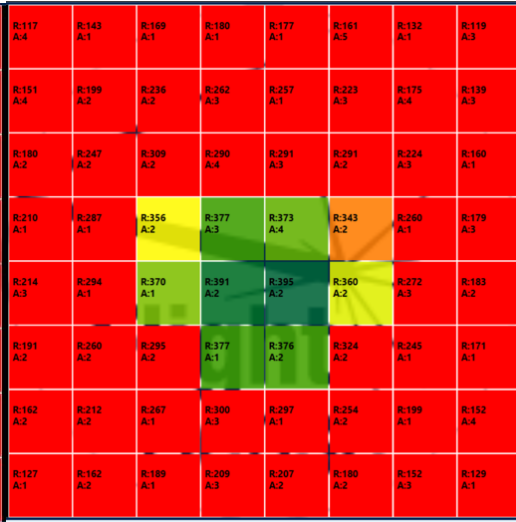
20 cm



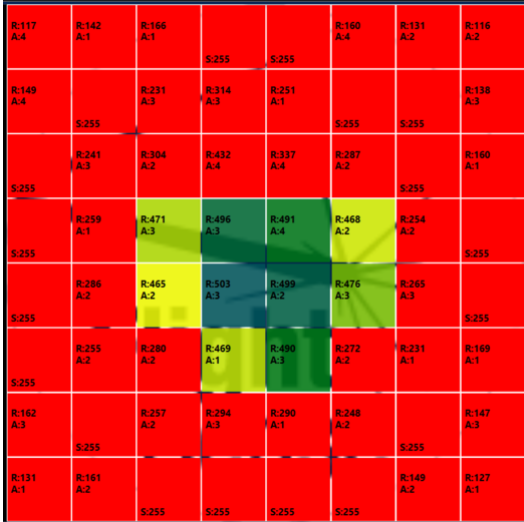
30 cm



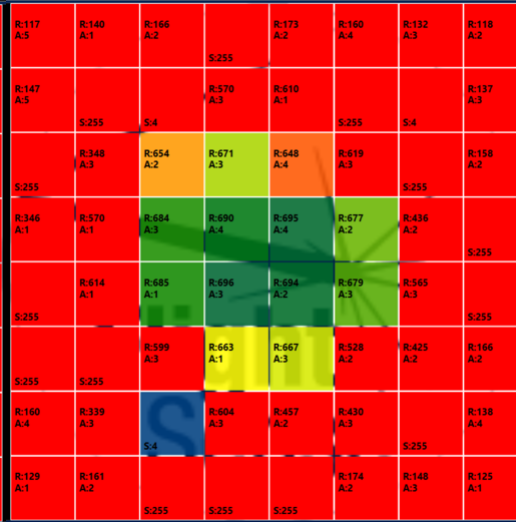
40 cm



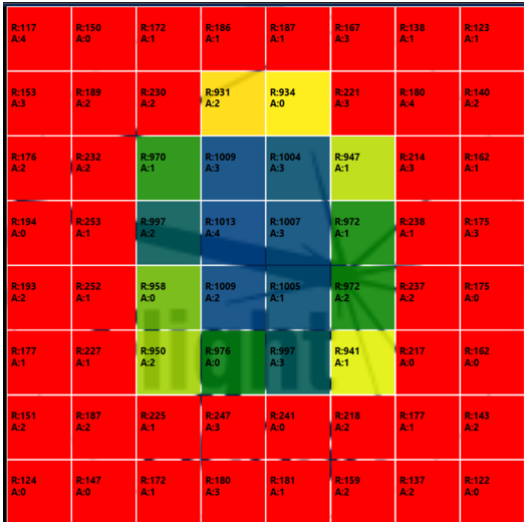
50 cm



70 cm



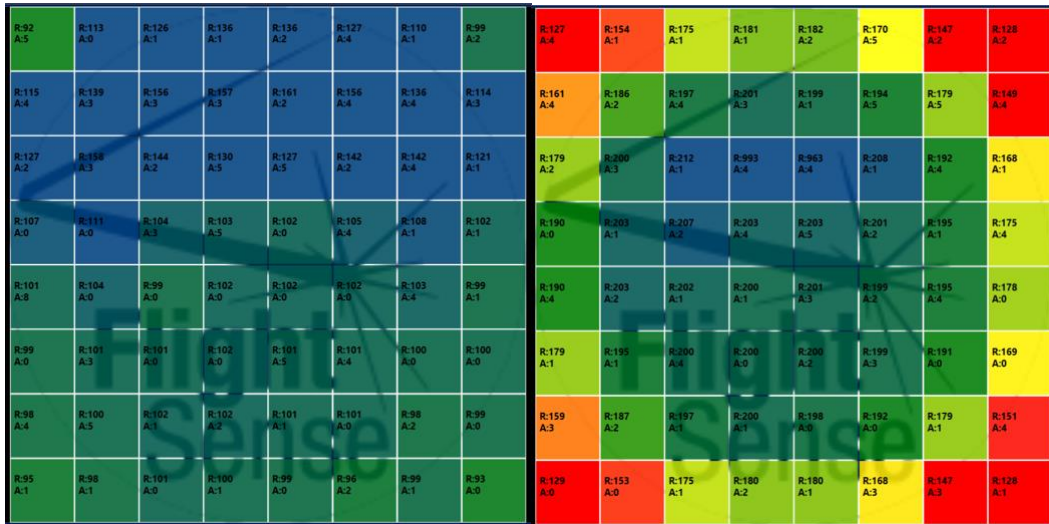
100 cm



„U-50“

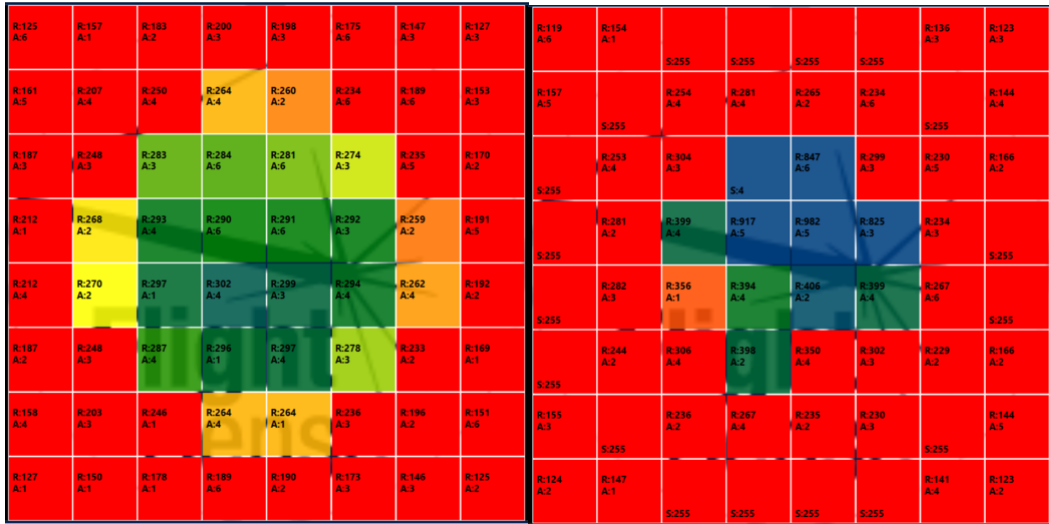
10 cm

20 cm



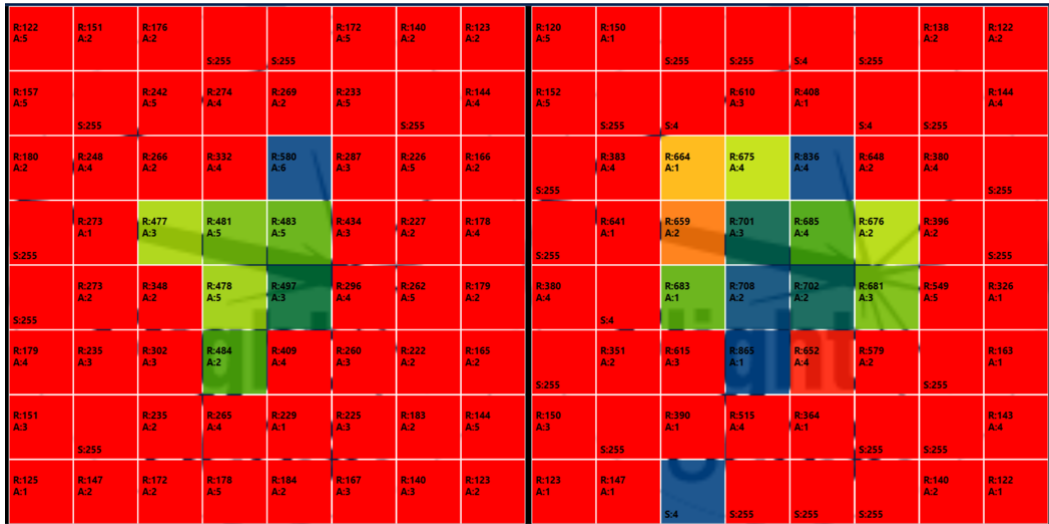
30 cm

40 cm



50 cm

70 cm



100 cm

R:121 A:3	R:152 A:1	R:172 A:1	R:188 A:1	R:183 A:2	R:168 A:4	R:137 A:1	R:122 A:2
R:153 A:3	R:190 A:3	R:228 A:2	R:896 A:3	R:246 A:1	R:218 A:2	R:177 A:4	R:141 A:1
R:169 A:2	R:227 A:2	R:901 A:1	R:980 A:3	R:976 A:3	R:943 A:2	R:214 A:3	R:159 A:1
R:193 A:1	R:256 A:1	R:977 A:2	R:1005 A:3	R:995 A:4	R:966 A:2	R:237 A:1	R:172 A:3
R:196 A:3	R:251 A:1	R:962 A:1	R:982 A:3	R:988 A:2	R:969 A:3	R:237 A:3	R:175 A:0
R:175 A:3	R:225 A:1	R:937 A:2	R:978 A:1	R:960 A:3	R:906 A:2	R:210 A:1	R:159 A:1
R:148 A:3	R:188 A:2	R:223 A:1	R:248 A:2	R:240 A:0	R:217 A:2	R:175 A:2	R:144 A:4
R:123 A:1	R:145 A:1	R:171 A:1	R:182 A:3	R:179 A:1	R:158 A:2	R:138 A:2	R:116 A:0

„U-25“

10 cm

R:91 A:5	R:114 A:0	R:134 A:0	R:148 A:0	R:149 A:1	R:137 A:4	R:116 A:0	R:99 A:0
R:116 A:3	R:146 A:1	R:192 A:2	R:911 A:1	R:204 A:0	R:189 A:3	R:151 A:3	R:122 A:2
R:136 A:1	R:189 A:2	R:219 A:1	R:215 A:3	R:208 A:3	R:218 A:1	R:182 A:3	R:135 A:0
R:150 A:0	R:203 A:0	R:204 A:2	R:1019 A:3	R:1019 A:3	R:286 A:1	R:200 A:0	R:151 A:3
R:151 A:3	R:199 A:1	R:200 A:0	R:1018 A:3	R:1013 A:1	R:177 A:2	R:198 A:2	R:144 A:0
R:110 A:0	R:130 A:1	R:163 A:3	R:185 A:1	R:172 A:3	R:185 A:1	R:131 A:0	R:107 A:0
R:97 A:4	R:101 A:3	R:106 A:0	R:115 A:1	R:111 A:0	R:107 A:0	R:101 A:0	R:100 A:0
R:96 A:0	R:98 A:0	R:101 A:0	R:100 A:3	R:99 A:0	R:99 A:2	R:98 A:1	R:100 A:0

20 cm

R:119 A:4	R:149 A:0	R:166 A:1	R:179 A:0	R:179 A:1	R:164 A:5	R:138 A:1	R:122 A:2
R:151 A:3	R:189 A:3	R:215 A:3	R:220 A:2	R:221 A:0	R:208 A:3	R:177 A:4	R:144 A:3
R:177 A:1	R:219 A:2	R:910 A:1	R:977 A:3	R:975 A:4	R:910 A:1	R:207 A:3	R:161 A:1
R:194 A:0	R:225 A:1	R:984 A:2	R:1014 A:3	R:1008 A:4	R:994 A:1	R:218 A:1	R:176 A:3
R:195 A:3	R:225 A:1	R:980 A:1	R:1016 A:3	R:1013 A:2	R:982 A:2	R:219 A:4	R:180 A:0
R:178 A:1	R:216 A:1	R:222 A:3	R:221 A:0	R:223 A:3	R:220 A:1	R:211 A:1	R:166 A:0
R:157 A:3	R:192 A:2	R:214 A:0	R:219 A:2	R:218 A:0	R:212 A:2	R:186 A:2	R:146 A:3
R:128 A:0	R:150 A:0	R:178 A:1	R:189 A:4	R:190 A:1	R:172 A:2	R:145 A:1	R:127 A:0

30 cm

R:118 A:3	R:150 A:1	R:170 A:1	R:179 A:1	R:183 A:1	R:166 A:3	R:133 A:1	R:121 A:2
R:151 A:4	R:198 A:1	R:226 A:2	R:247 A:2	R:246 A:0	R:215 A:2	R:179 A:4	R:142 A:2
R:178 A:2	R:227 A:2	R:270 A:1	R:285 A:3	R:288 A:3	R:264 A:2	R:212 A:3	R:158 A:1
R:195 A:0	R:254 A:0	R:284 A:2	R:1015 A:3	R:1009 A:4	R:285 A:1	R:241 A:1	R:177 A:3
R:199 A:3	R:258 A:1	R:294 A:1	R:289 A:2	R:287 A:1	R:292 A:3	R:256 A:3	R:181 A:1
R:180 A:3	R:230 A:1	R:282 A:3	R:295 A:0	R:295 A:3	R:279 A:2	R:227 A:0	R:165 A:1
R:155 A:2	R:192 A:2	R:238 A:1	R:259 A:2	R:264 A:0	R:231 A:2	R:185 A:2	R:147 A:3
R:126 A:0	R:151 A:0	R:178 A:1	R:190 A:3	R:190 A:1	R:172 A:1	R:146 A:2	R:126 A:0

40 cm

R:121 A:4	R:150 A:1	S:255	S:255	S:4	S:255	R:136 A:1	R:124 A:2
R:192 A:3		S:255	S:255	R:252 A:3	R:252 A:1	R:711 A:4	R:144 A:2
	S:255	S:255	R:278 A:2	R:299 A:3	R:299 A:4	R:270 A:2	R:670 A:3
S:255	S:255		R:278 A:0	R:249 A:1	R:308 A:2	R:1003 A:3	R:1001 A:4
	R:256 A:2	R:318 A:1	R:309 A:3	R:309 A:1	R:316 A:2	R:250 A:3	S:4
S:255	S:255	R:290 A:3	R:337 A:1	R:340 A:4	R:278 A:2	S:255	S:255
R:159 A:1	S:255	S:255	R:262 A:3	R:261 A:1	S:4	S:4	R:149 A:4
R:129 A:1	R:152 A:1	S:255	S:4	S:255	S:255	R:145 A:3	R:127 A:0

50 cm

70 cm

R:118 A:4	R:149 A:1	R:170 A:2	S:4	S:255	R:164 A:5	R:138 A:1	R:121 A:2	R:119 A:5	R:150 A:1	R:171 A:2	R:180 A:1	R:178 A:2	R:166 A:5	R:137 A:1	R:123 A:3
R:152 A:5	S:255	S:255	R:916 A:3	R:774 A:1	S:255	S:255	R:139 A:3	R:152 A:5	R:190 A:3	R:226 A:4	R:254 A:3	R:247 A:1	R:215 A:4	R:180 A:4	R:140 A:2
R:178 A:3	R:769 A:3	R:904 A:2	R:294 A:4	R:298 A:4	R:836 A:2	S:255	R:163 A:1	R:177 A:2	R:229 A:3	R:274 A:2	R:951 A:4	R:986 A:4	R:261 A:2	R:212 A:5	R:164 A:2
S:255	R:895 A:1	R:296 A:3	S:255	R:377 A:5	R:297 A:3	R:907 A:2	R:178 A:4	R:196 A:1	R:254 A:1	R:962 A:3	R:1012 A:4	R:1008 A:4	R:984 A:3	R:236 A:2	R:177 A:4
S:255	R:863 A:2	R:307 A:1	R:502 A:4	R:422 A:2	R:311 A:3	S:255	R:179 A:2	R:198 A:3	R:252 A:2	R:949 A:1	R:987 A:3	R:894 A:2	R:952 A:3	R:238 A:4	R:180 A:2
R:182 A:3	S:255	S:4	R:321 A:1	R:347 A:4	R:829 A:2	R:786 A:1	R:165 A:1	R:176 A:0	R:230 A:2	R:274 A:3	R:910 A:1	R:948 A:3	R:269 A:2	R:216 A:2	R:165 A:2
R:152 A:3	S:255	S:4	S:255	R:304 A:1	S:4	S:4	R:148 A:5	R:157 A:2	R:198 A:3	R:227 A:1	R:235 A:4	R:255 A:0	R:224 A:3	R:180 A:2	R:151 A:4
R:126 A:1	R:150 A:1	R:178 A:1	S:255	S:255	R:169 A:3	R:144 A:3	R:124 A:1	R:127 A:1	R:151 A:0	R:179 A:1	R:190 A:5	R:180 A:2	R:168 A:3	R:142 A:3	R:126 A:1

100 cm

R:120 A:5	R:146 A:1	R:170 A:2	R:181 A:2	R:181 A:3	R:165 A:5	R:136 A:2	R:122 A:3
R:149 A:5	R:183 A:4	R:227 A:4	R:243 A:3	R:243 A:2	R:218 A:5	R:179 A:5	R:142 A:5
R:176 A:2	R:224 A:4	S:4	R:291 A:6	R:1085 A:5	R:915 A:4	R:216 A:5	R:161 A:2
R:194 A:1	R:256 A:2	R:289 A:3	S:255	S:4	R:1109 A:3	R:237 A:3	R:174 A:5
R:195 A:4	R:251 A:2	R:299 A:2	R:1152 A:4	R:1147 A:3	R:291 A:5	R:246 A:5	R:179 A:2
R:179 A:1	R:216 A:3	S:4	R:292 A:2	R:293 A:5	R:991 A:3	R:221 A:2	R:160 A:2
R:156 A:3	R:192 A:3	R:233 A:2	R:257 A:3	R:252 A:2	R:226 A:3	R:182 A:2	R:145 A:5
R:125 A:1	R:149 A:1	R:176 A:2	R:189 A:4	R:189 A:3	R:169 A:3	R:142 A:3	R:126 A:2

„O-75“

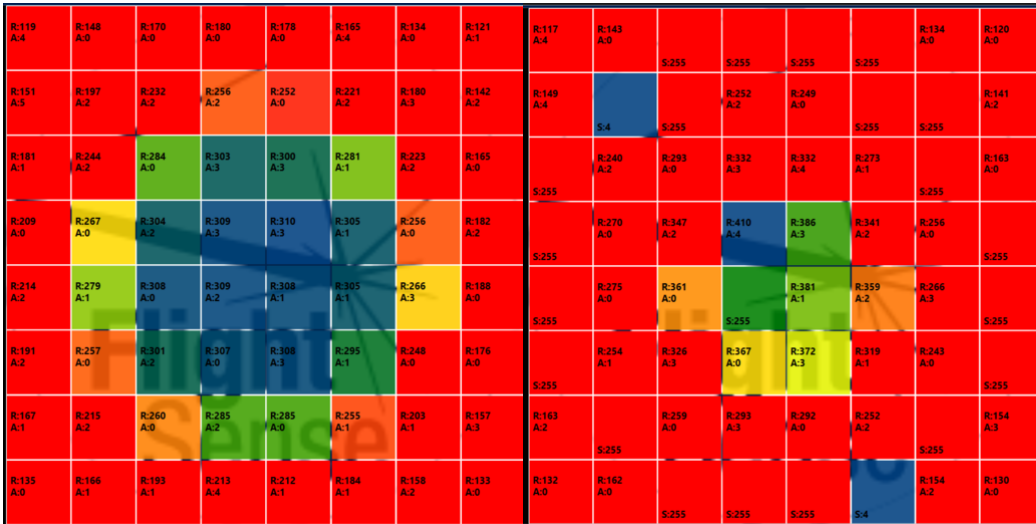
10 cm

20 cm

R:89 A:9	R:93 A:0	R:93 A:0	R:93 A:0	R:94 A:0	R:94 A:0	R:89 A:0	R:92 A:2	R:123 A:4	R:153 A:0	R:171 A:0	R:178 A:0	R:176 A:0	R:166 A:4	R:139 A:0	R:127 A:1
R:93 A:2	R:93 A:3	R:96 A:1	R:95 A:7	R:97 A:0	R:95 A:2	R:92 A:0	R:93 A:3	R:157 A:5	R:186 A:1	R:202 A:4	R:204 A:2	R:204 A:2	R:196 A:2	R:176 A:5	R:147 A:2
R:94 A:5	R:97 A:7	R:101 A:0	R:102 A:5	R:99 A:2	R:94 A:4	R:93 A:5	R:92 A:0	R:179 A:2	R:205 A:2	R:207 A:0	R:209 A:5	R:208 A:1	R:206 A:1	R:199 A:3	R:166 A:0
R:93 A:0	R:100 A:0	R:118 A:2	R:1028 A:3	R:114 A:3	R:98 A:0	R:90 A:0	R:92 A:3	R:194 A:0	R:208 A:0	R:211 A:1	R:207 A:3	R:208 A:2	R:207 A:2	R:202 A:1	R:179 A:2
R:96 A:8	R:105 A:1	R:120 A:0	R:1026 A:2	R:1031 A:2	R:99 A:1	R:91 A:0	R:91 A:0	R:194 A:4	R:209 A:1	R:209 A:0	R:1004 A:3	R:208 A:2	R:205 A:1	R:202 A:3	R:184 A:0
R:92 A:0	R:98 A:2	R:119 A:1	R:115 A:0	R:111 A:1	R:94 A:3	R:89 A:0	R:90 A:0	R:187 A:1	R:203 A:1	R:210 A:3	R:207 A:0	R:204 A:2	R:204 A:2	R:201 A:0	R:176 A:0
R:91 A:5	R:92 A:5	R:99 A:0	R:101 A:1	R:93 A:3	R:92 A:0	R:88 A:1	R:89 A:0	R:167 A:1	R:196 A:1	R:203 A:0	R:207 A:1	R:203 A:0	R:200 A:0	R:191 A:0	R:160 A:4
R:89 A:0	R:89 A:0	R:89 A:0	R:88 A:3	R:89 A:0	R:87 A:2	R:89 A:1	R:88 A:0	R:139 A:0	R:167 A:0	R:186 A:0	R:192 A:2	R:191 A:0	R:181 A:2	R:158 A:2	R:138 A:0

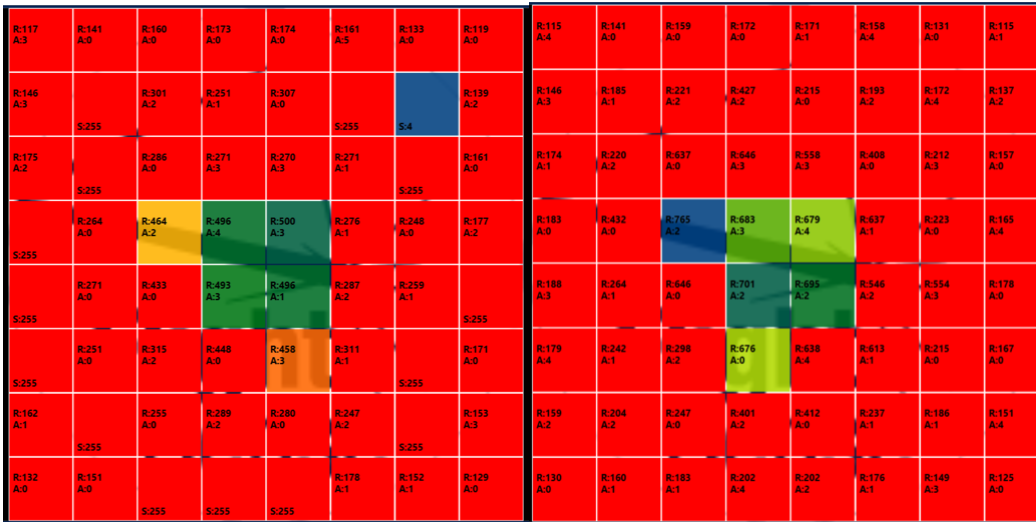
30 cm

40 cm

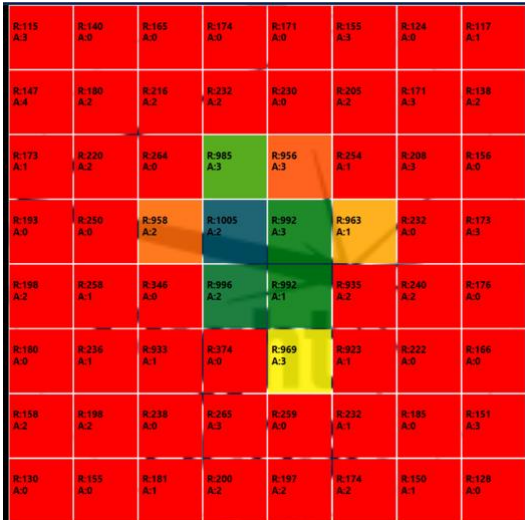


50 cm

70 cm



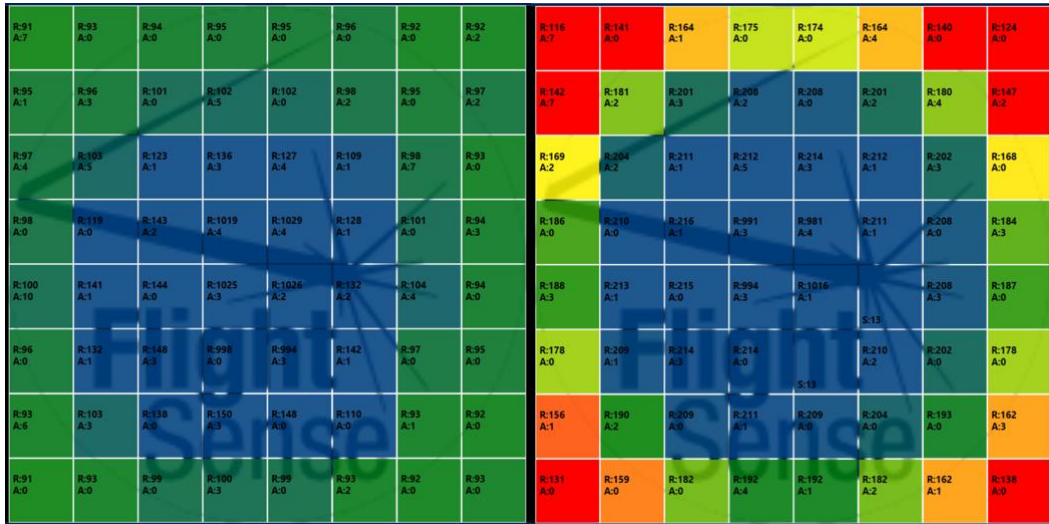
100 cm



„O-50“

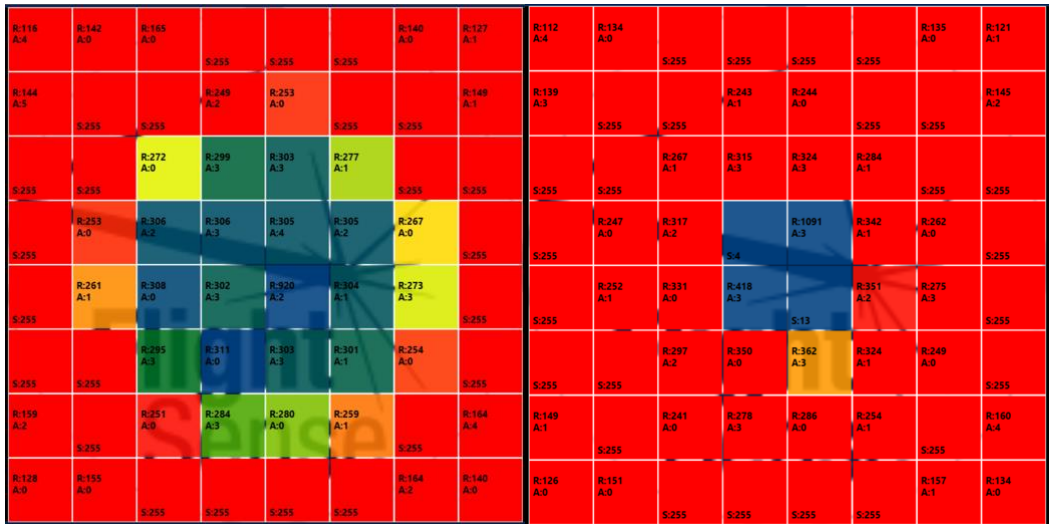
10 cm

20 cm



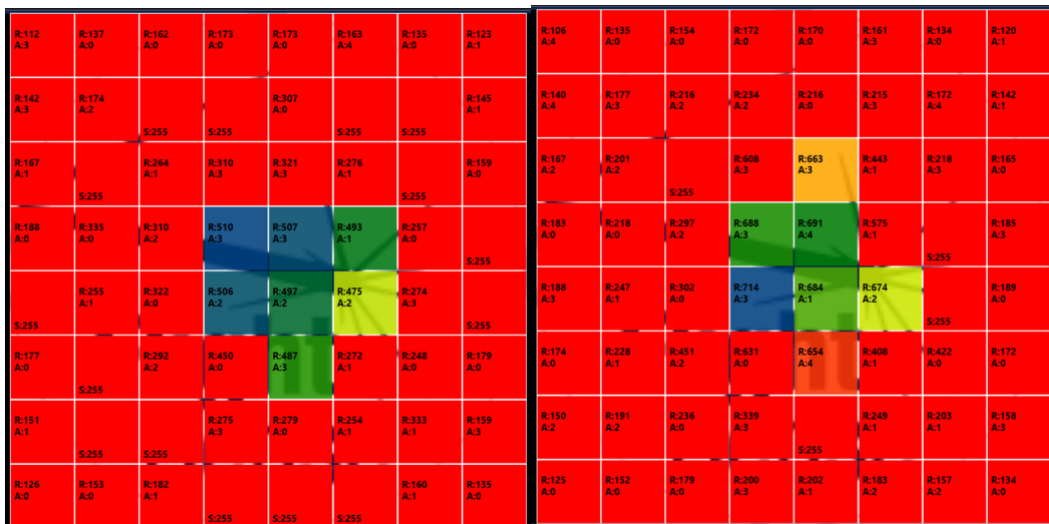
30 cm

40 cm

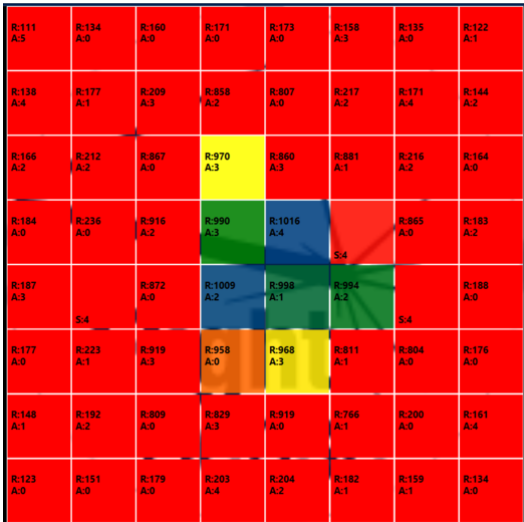


50 cm

70 cm

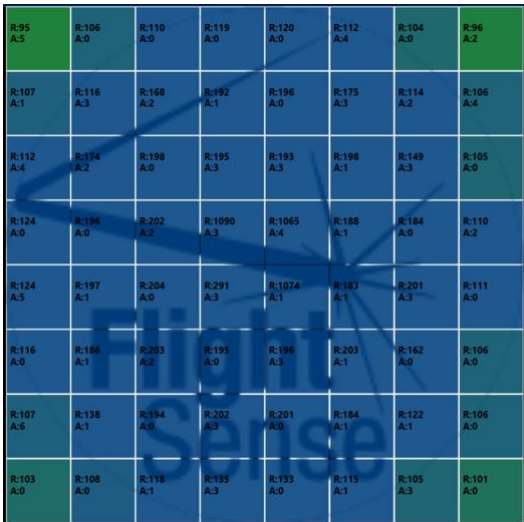


100 cm



„O-25“

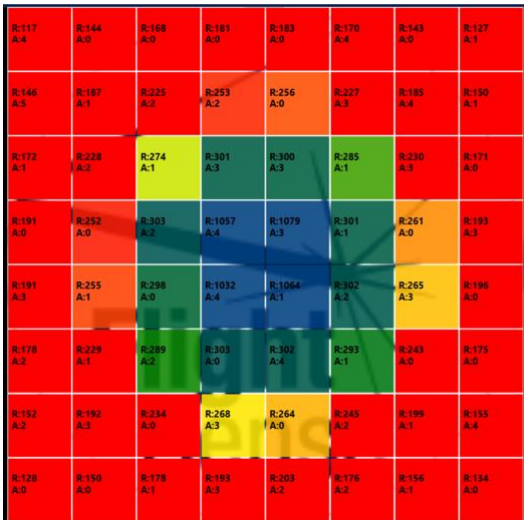
10 cm



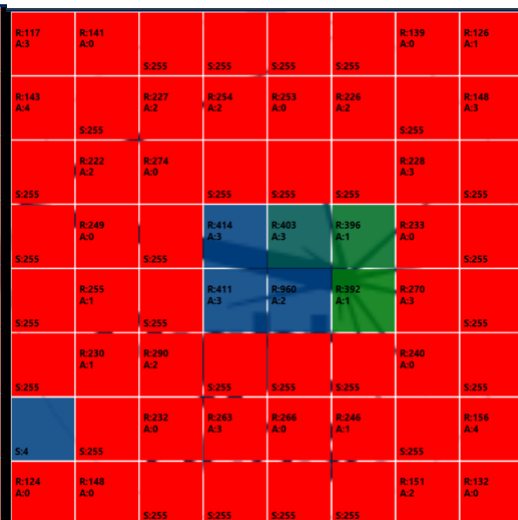
20 cm



30 cm



40 cm



50 cm

R:114 A:3	R:141 A:0	S:255	R:684 A:0	S:4	S:255	R:139 A:0	R:125 A:1
R:143 A:4	S:255	S:4	R:805 A:2	R:333 A:0	S:4	S:4	R:145 A:2
S:255	S:255	S:255	R:296 A:3	R:298 A:3	R:805 A:1	S:255	S:255
S:255	R:715 A:0	R:288 A:2	R:425 A:3	R:438 A:3	R:313 A:1	R:748 A:0	S:4
S:255	R:792 A:0	R:299 A:0	R:504 A:2	R:434 A:2	R:319 A:2	S:255	S:255
S:255	R:317 A:1	S:255	R:304 A:0	R:458 A:3	R:290 A:1	S:255	R:434 A:0
R:150 A:1	S:255	R:298 A:0	R:754 A:3	R:793 A:0	S:4	S:4	R:154 A:3
R:123 A:0	R:147 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:150 A:1	R:131 A:0

70 cm

R:114 A:5	R:139 A:0	R:164 A:0	R:176 A:0	R:179 A:0	R:167 A:3	R:137 A:0	R:124 A:1
R:143 A:5	R:179 A:3	R:217 A:3	R:248 A:2	R:244 A:0	R:219 A:2	R:181 A:3	R:141 A:2
R:167 A:1	R:215 A:2	R:992 A:0	R:879 A:3	R:921 A:3	R:869 A:1	R:220 A:3	R:168 A:0
R:186 A:0	R:237 A:0	R:966 A:2	R:441 A:3	R:963 A:3	R:966 A:1	R:704 A:0	R:186 A:2
R:185 A:2	R:249 A:1	R:947 A:0	R:992 A:3	R:981 A:2	R:985 A:2	S:255	R:188 A:0
R:175 A:0	R:208 A:1	R:879 A:2	R:933 A:0	R:903 A:4	R:912 A:1	R:233 A:0	R:173 A:0
R:147 A:1	R:183 A:1	R:229 A:0	R:260 A:3	R:256 A:0	R:219 A:1	R:188 A:1	R:151 A:3
R:118 A:0	R:147 A:0	R:174 A:1	R:188 A:3	R:190 A:1	R:174 A:2	R:148 A:3	R:127 A:0

100 cm

R:114 A:5	R:140 A:0	R:167 A:0	R:179 A:0	R:181 A:0	R:165 A:4	R:138 A:0	R:125 A:1
R:144 A:4	R:183 A:1	R:214 A:2	R:247 A:2	R:246 A:0	R:221 A:2	R:182 A:3	R:148 A:3
R:166 A:1	R:214 A:3	R:200 A:1	R:282 A:4	R:751 A:4	R:272 A:0	R:218 A:3	R:169 A:0
R:186 A:0	R:227 A:0	R:296 A:2	R:994 A:3	R:1010 A:3	S:13	R:234 A:0	R:186 A:3
R:188 A:3	R:249 A:1	R:282 A:0	R:962 A:3	R:965 A:2	S:13	R:254 A:2	R:186 A:0
R:175 A:2	R:227 A:1	R:260 A:2	R:282 A:0	S:13	R:275 A:1	R:230 A:0	R:174 A:0
R:147 A:1	R:186 A:2	R:231 A:0	R:248 A:3	R:260 A:0	R:228 A:1	R:190 A:1	R:154 A:4
R:124 A:0	R:147 A:0	R:176 A:0	R:189 A:3	R:192 A:2	R:174 A:1	R:152 A:1	R:129 A:0

„I-75“

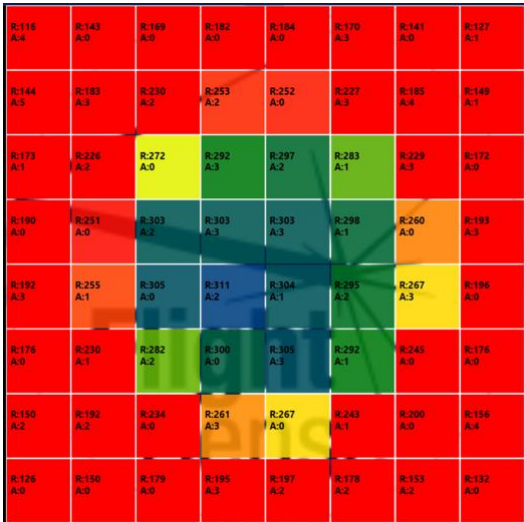
10 cm

R:102 A:7	R:110 A:0	R:109 A:0	R:101 A:0	R:99 A:0	R:105 A:4	R:100 A:0	R:104 A:1
R:110 A:6	R:126 A:2	R:141 A:3	R:106 A:2	R:116 A:0	R:120 A:4	R:100 A:3	R:103 A:3
R:113 A:2	R:131 A:3	R:131 A:0	R:115 A:3	R:129 A:4	R:116 A:1	R:109 A:2	R:115 A:0
R:116 A:0	R:128 A:0	R:118 A:3	R:118 A:3	R:122 A:2	R:117 A:2	R:135 A:0	R:124 A:2
R:117 A:4	R:127 A:1	R:133 A:0	R:126 A:1	R:121 A:2	R:122 A:0	R:129 A:3	R:122 A:0
R:112 A:0	R:129 A:1	R:137 A:3	R:126 A:0	R:125 A:4	R:121 A:2	R:124 A:0	R:116 A:0
R:113 A:3	R:132 A:2	R:133 A:0	R:135 A:3	R:142 A:0	R:123 A:2	R:107 A:1	R:105 A:3
R:102 A:0	R:108 A:0	R:115 A:0	R:115 A:1	R:117 A:0	R:111 A:2	R:105 A:3	R:104 A:0

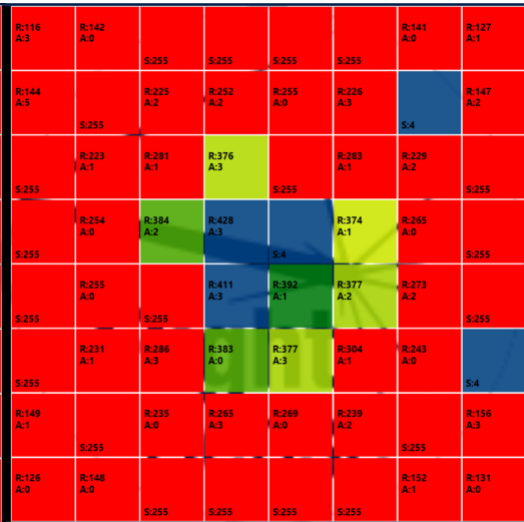
20 cm

R:116 A:5	R:140 A:0	R:163 A:0	R:173 A:0	R:174 A:0	R:163 A:4	R:138 A:0	R:125 A:1
R:144 A:6	R:177 A:1	R:195 A:3	R:184 A:2	R:197 A:0	R:190 A:3	R:176 A:4	R:148 A:2
R:167 A:1	R:199 A:2	R:206 A:0	R:202 A:3	R:197 A:4	R:195 A:1	R:191 A:3	R:166 A:0
R:182 A:0	R:199 A:0	R:208 A:2	R:205 A:4	R:203 A:4	R:204 A:1	R:198 A:0	R:178 A:3
R:183 A:3	R:199 A:1	R:206 A:0	R:208 A:3	R:204 A:1	R:204 A:2	R:197 A:3	R:180 A:0
R:172 A:0	R:197 A:1	R:202 A:3	R:209 A:0	R:206 A:3	R:197 A:1	R:193 A:0	R:170 A:0
R:151 A:1	R:182 A:1	R:194 A:0	R:199 A:2	R:196 A:0	R:192 A:2	R:182 A:1	R:153 A:4
R:125 A:0	R:148 A:0	R:171 A:1	R:179 A:4	R:182 A:1	R:170 A:2	R:150 A:2	R:129 A:0

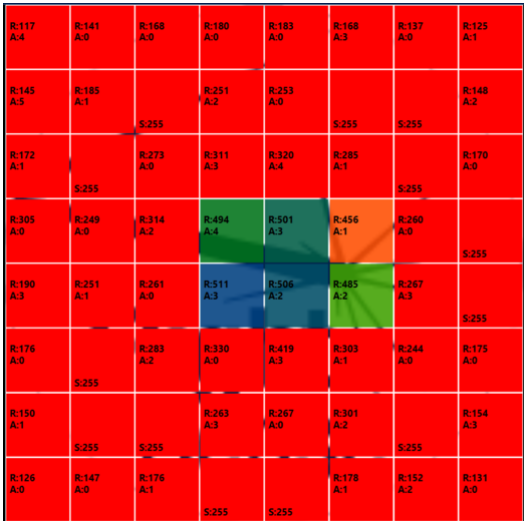
30 cm



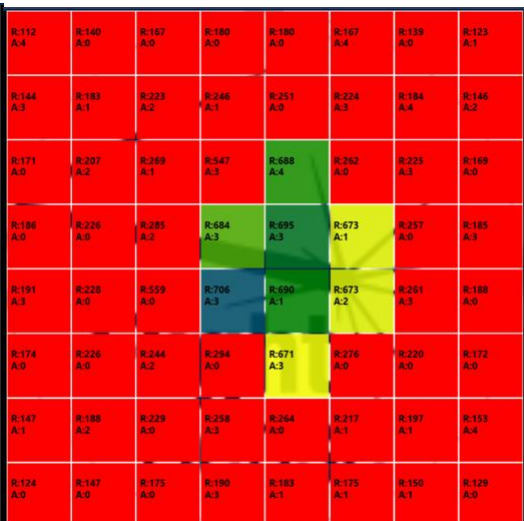
40 cm



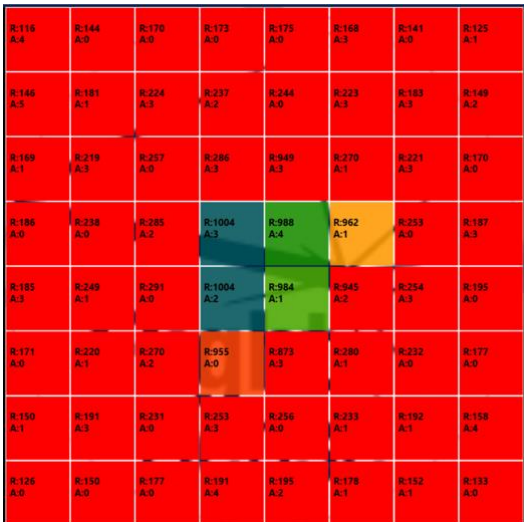
50 cm



70 cm



100 cm



„I-50“

10 cm

20 cm

R:107 A:6	R:112 A:0	R:118 A:0	R:128 A:0	R:132 A:0	R:125 A:4	R:109 A:0	R:108 A:2
R:114 A:9	R:129 A:1	R:154 A:3	R:169 A:2	R:170 A:0	R:160 A:3	R:142 A:4	R:113 A:2
R:121 A:2	R:150 A:2	R:150 A:1	R:164 A:4	R:175 A:3	R:180 A:1	R:164 A:3	R:131 A:0
R:131 A:0	R:155 A:0	R:143 A:2	R:150 A:4	R:150 A:4	R:122 A:2	R:163 A:0	R:142 A:3
R:135 A:3	R:149 A:1	R:160 A:0	R:153 A:3	R:126 A:2	R:102 A:1	R:111 A:4	R:118 A:0
R:111 A:0	R:104 A:1	R:124 A:2	R:134 A:0	R:132 A:3	R:117 A:2	R:110 A:0	R:95 A:0
R:108 A:3	R:103 A:3	R:120 A:0	R:128 A:3	R:127 A:0	R:142 A:1	R:133 A:1	R:105 A:3
R:103 A:0	R:106 A:0	R:129 A:1	R:101 A:3	R:97 A:0	R:120 A:2	R:104 A:2	R:102 A:0

R:121 A:5	R:158 A:0	R:174 A:0	R:184 A:0	R:184 A:1	R:169 A:4	R:142 A:0	R:127 A:1
R:155 A:5	R:195 A:1	R:224 A:3	R:228 A:2	R:229 A:0	R:217 A:3	R:181 A:3	R:147 A:2
R:177 A:1	R:220 A:3	R:236 A:1	R:241 A:4	R:241 A:3	R:236 A:1	R:215 A:3	R:166 A:0
R:191 A:0	R:232 A:0	R:237 A:2	R:235 A:3	R:231 A:4	R:237 A:1	R:226 A:0	R:181 A:4
R:193 A:3	R:228 A:1	R:226 A:0	R:238 A:4	R:234 A:2	R:227 A:2	R:224 A:3	R:181 A:0
R:176 A:0	R:218 A:1	R:229 A:2	R:228 A:0	R:228 A:4	R:221 A:1	R:211 A:0	R:168 A:0
R:150 A:1	R:188 A:2	R:217 A:0	R:222 A:4	R:221 A:0	R:214 A:1	R:185 A:1	R:147 A:4
R:125 A:0	R:149 A:0	R:170 A:0	R:182 A:4	R:183 A:2	R:167 A:3	R:144 A:2	R:125 A:0

30 cm

40 cm

R:122 A:4	R:153 A:0	R:178 A:0	R:188 A:0	R:192 A:0	R:173 A:3	R:143 A:0	R:127 A:1
R:154 A:5	R:199 A:3	R:235 A:3	R:260 A:2	R:261 A:0	R:228 A:3	R:186 A:4	R:150 A:3
R:179 A:1	R:239 A:2	R:283 A:0	R:293 A:4	R:294 A:4	R:273 A:1	R:225 A:3	R:169 A:0
R:197 A:0	R:260 A:0	R:297 A:3	R:295 A:5	R:288 A:4	R:299 A:1	R:254 A:0	R:184 A:3
R:198 A:4	R:259 A:1	R:304 A:0	R:306 A:4	R:304 A:2	R:299 A:2	R:258 A:4	R:185 A:0
R:180 A:0	R:233 A:1	R:279 A:3	R:296 A:0	R:303 A:3	R:283 A:1	R:229 A:0	R:170 A:0
R:151 A:2	R:187 A:2	R:231 A:0	R:256 A:3	R:256 A:0	R:229 A:2	R:187 A:1	R:152 A:4
R:125 A:0	R:148 A:0	R:174 A:1	R:187 A:3	R:187 A:2	R:170 A:2	R:148 A:2	R:128 A:0

R:120 A:5	R:150 A:0	R:175 A:0	S:255	S:255		R:170 A:5	R:142 A:0	R:125 A:1
R:158 A:4		R:237 A:3	R:261 A:2	R:260 A:0	R:230 A:3			R:147 A:1
	S:255						S:255	
R:178 A:1	R:233 A:2	R:274 A:1		R:927 A:4	R:283 A:1	R:225 A:3	R:167 A:0	
			S:4					
R:195 A:0	R:261 A:0	R:386 A:2	R:417 A:4	R:397 A:3	R:945 A:1	R:254 A:0	R:182 A:3	
	R:261 A:1	R:319 A:0	R:387 A:3	R:380 A:1	R:310 A:2	R:257 A:3	R:183 A:0	
S:255								
R:178 A:3	R:229 A:1	R:279 A:3	R:321 A:0	R:328 A:3	R:283 A:1	R:225 A:0	R:169 A:0	
R:150 A:2	R:189 A:2	R:229 A:0	R:256 A:3	R:254 A:0	R:226 A:2	R:186 A:1	R:151 A:4	
R:124 A:0	R:147 A:0	R:172 A:0	R:184 A:4	R:186 A:2	R:168 A:2	R:143 A:3	R:126 A:0	

50 cm

70 cm

R:119 A:4	R:150 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:140 A:0	R:124 A:1
R:152 A:4		R:234 A:2	R:259 A:2	R:260 A:0	R:226 A:3		R:147 A:2
	S:4					S:255	
	R:238 A:2			R:283 A:1	R:226 A:3		
S:4		S:255	S:13	S:4		S:255	
S:255	R:259 A:0		R:428 A:3	R:435 A:4	R:902 A:1	R:254 A:0	
S:255		S:255					S:255
S:255	R:253 A:1		R:439 A:3	R:493 A:1		R:258 A:2	
		S:255		S:4			S:255
S:255	R:230 A:1	R:277 A:3		R:453 A:4	R:282 A:1	R:224 A:0	
		S:255					S:255
R:148 A:1		R:229 A:0	R:254 A:4	R:251 A:0	R:226 A:1		R:146 A:4
	S:255					S:255	
R:124 A:0	R:147 A:0					R:144 A:1	R:125 A:0
		S:255	S:255	S:255	S:255		

R:120 A:5	R:151 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:142 A:0	R:126 A:1
R:151 A:4		R:231 A:2	R:230 A:2	R:256 A:0	R:225 A:3		R:147 A:2
	S:255					S:255	
	R:230 A:2	R:270 A:0			R:268 A:1	R:223 A:3	R:249 A:0
S:255			S:255	S:4			
R:275 A:0	R:231 A:0	R:518 A:2	R:693 A:4	R:707 A:3		R:251 A:0	
					S:255		S:255
S:255	R:234 A:1	R:478 A:0	R:701 A:3	R:1226 A:1	R:633 A:2	R:251 A:3	
							S:255
S:255	R:228 A:1	R:277 A:2	R:500 A:0		R:271 A:1	R:228 A:0	
			S:255				S:255
R:151 A:1		R:228 A:0	R:252 A:3	R:253 A:0	R:226 A:1		R:147 A:3
	S:255					S:255	
R:125 A:0	R:148 A:0					R:145 A:2	R:127 A:0
		S:255	S:4	S:4	S:255		

100 cm

R:121 A:4	R:150 A:0	R:173 A:0	R:178 A:0	R:187 A:1	R:167 A:4	R:142 A:0	R:125 A:1
R:153 A:5	R:195 A:3	R:723 A:2	R:729 A:2	S:4	R:669 A:3	R:179 A:3	R:146 A:2
R:173 A:1	S:255	R:797 A:0	R:852 A:3	R:877 A:3	S:4	R:721 A:3	R:166 A:0
R:192 A:0	R:858 A:0	R:910 A:2	R:1004 A:4	R:979 A:4	R:969 A:1	S:4	R:172 A:3
R:196 A:3	S:255	R:936 A:0	R:976 A:3	R:979 A:1	R:903 A:2	R:685 A:3	R:180 A:0
R:177 A:3	S:255	R:787 A:2	R:431 A:0	R:866 A:3	S:4	R:743 A:0	R:160 A:0
R:148 A:1	R:191 A:2	R:731 A:0	R:729 A:4	R:873 A:0	S:255	R:181 A:0	R:150 A:5
R:125 A:0	R:147 A:0	R:172 A:0	R:185 A:3	R:186 A:2	R:168 A:2	R:142 A:3	R:124 A:0

„I-25“

10 cm

R:102 A:6	R:120 A:0	R:140 A:0	R:147 A:0	R:145 A:0	R:131 A:5	R:105 A:0	R:107 A:1
R:123 A:6	R:156 A:1	R:182 A:3	R:190 A:2	R:187 A:0	R:168 A:3	R:140 A:4	R:108 A:2
R:145 A:1	R:182 A:2	R:209 A:1	R:210 A:4	R:196 A:4	R:194 A:1	R:166 A:3	R:124 A:0
R:157 A:0	R:192 A:0	R:210 A:2	R:996 A:3	R:1006 A:4	R:194 A:1	R:180 A:1	R:137 A:3
R:157 A:3	R:192 A:1	R:204 A:0	R:1017 A:4	R:160 A:1	R:151 A:2	R:146 A:3	R:138 A:0
R:143 A:0	R:156 A:1	R:152 A:2	R:139 A:0	R:136 A:4	R:131 A:2	R:117 A:0	R:125 A:0
R:121 A:2	R:131 A:2	R:126 A:0	R:131 A:5	R:128 A:0	R:121 A:0	R:115 A:1	R:109 A:5
R:104 A:0	R:112 A:0	R:119 A:0	R:134 A:3	R:109 A:0	R:96 A:1	R:103 A:3	R:105 A:0

20 cm

R:123 A:4	R:151 A:0	R:173 A:0	R:186 A:0	R:184 A:0	R:169 A:3	R:141 A:0	R:126 A:1
R:152 A:5	R:189 A:3	R:223 A:3	R:233 A:1	R:230 A:0	R:217 A:3	R:183 A:3	R:147 A:2
R:177 A:2	R:223 A:1	R:888 A:0	R:990 A:4	R:966 A:3	R:238 A:0	R:217 A:3	R:168 A:0
R:194 A:0	R:234 A:0	R:1006 A:2	R:1034 A:4	R:1023 A:4	R:985 A:2	R:225 A:0	R:181 A:4
R:194 A:3	R:237 A:1	R:954 A:0	R:1018 A:3	R:1028 A:1	R:955 A:2	R:232 A:3	R:183 A:0
R:178 A:0	R:223 A:1	R:940 A:2	R:236 A:0	R:233 A:3	R:234 A:1	R:219 A:0	R:169 A:0
R:152 A:1	R:187 A:2	R:220 A:0	R:234 A:2	R:227 A:0	R:219 A:1	R:186 A:1	R:152 A:4
R:127 A:0	R:130 A:0	R:174 A:0	R:188 A:3	R:188 A:1	R:170 A:3	R:145 A:2	R:129 A:0

30 cm

R:119 A:4	R:145 A:0	S:255	S:255	S:255	R:170 A:4	R:140 A:0	R:124 A:3
R:151 A:3	S:255	R:228 A:2	R:251 A:2	R:250 A:0	R:222 A:2	S:255	R:147 A:3
S:255	R:224 A:2	R:273 A:0	R:922 A:3	R:961 A:2	R:267 A:0	R:220 A:2	R:166 A:0
S:255	R:230 A:0	R:976 A:2	R:1001 A:3	R:1014 A:4	R:967 A:1	R:239 A:0	S:255
R:662 A:3	R:233 A:0	R:293 A:0	R:1002 A:2	R:961 A:1	R:295 A:2	R:249 A:2	S:255
R:177 A:0	R:229 A:1	R:279 A:2	R:298 A:0	R:304 A:3	R:274 A:1	R:221 A:0	R:168 A:0
R:151 A:2	S:255	R:231 A:0	R:256 A:3	R:259 A:0	R:229 A:1	R:262 A:1	R:150 A:3
R:124 A:0	R:148 A:0	R:174 A:1	S:255	S:255	R:168 A:2	R:144 A:1	R:126 A:0

40 cm

R:119 A:5	R:149 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:141 A:0	R:126 A:1
R:152 A:5	S:255	R:226 A:3	R:256 A:2	R:253 A:0	R:226 A:3	S:255	R:146 A:2
S:255	R:230 A:2	R:279 A:0	R:876 A:3	R:837 A:4	R:256 A:1	R:223 A:2	S:4
S:255	R:234 A:0	S:255	R:905 A:3	R:860 A:4	R:826 A:1	R:245 A:0	S:255
S:255	R:248 A:0	S:255	R:926 A:3	R:397 A:1	R:773 A:2	R:254 A:3	S:255
S:255	R:227 A:1	R:279 A:2	S:255	S:255	R:275 A:1	R:224 A:0	S:255
R:151 A:2	S:255	R:229 A:0	R:254 A:2	R:255 A:0	R:226 A:1	S:255	R:150 A:4
R:125 A:0	R:147 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:144 A:1	R:126 A:0

50 cm

R:120 A:4	R:149 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:140 A:0	R:125 A:1
R:150 A:3	S:255	R:233 A:3	R:249 A:1	R:253 A:0	R:222 A:3	S:255	R:145 A:2
S:255	R:228 A:2	R:272 A:0	S:255	R:897 A:3	R:271 A:1	R:222 A:2	S:255
S:255	R:229 A:0	S:255	R:995 A:3	R:383 A:4	S:255	R:250 A:0	R:810 A:2
S:255	R:249 A:0	S:255	R:504 A:3	R:509 A:2	R:889 A:2	R:247 A:2	S:4
S:4	R:224 A:1	R:272 A:2	S:4	S:4	R:266 A:1	R:224 A:0	S:255
R:149 A:1	S:255	R:228 A:0	R:255 A:3	R:250 A:0	R:292 A:2	S:4	R:146 A:4
R:123 A:0	R:146 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:143 A:2	R:127 A:0

70 cm

R:119 A:5	S:255	S:255	S:4	S:255	S:255	R:140 A:0	R:125 A:1
S:4	S:255	S:255	S:255	S:255	R:336 A:0	S:255	R:147 A:2
S:255	R:345 A:2	S:255	R:914 A:3	R:929 A:4	S:255	S:255	S:4
S:255	S:4	R:842 A:2	R:993 A:3	R:993 A:5	R:939 A:1	S:255	S:255
S:255	S:4	R:848 A:0	R:939 A:3	R:986 A:2	R:929 A:2	S:4	S:255
S:255	S:255	S:255	S:255	R:878 A:4	R:826 A:1	S:4	S:255
S:255	S:255	S:4	R:729 A:3	S:4	S:255	S:13	R:145 A:3
R:123 A:0	S:255	S:4	S:255	S:255	S:255	R:145 A:2	R:125 A:0

100 cm

R:119 A:3	R:151 A:0	S:4	S:4	S:4	S:255	R:141 A:0	R:124 A:1
R:152 A:4	S:255	S:4	R:238 A:1	R:252 A:0	S:4	S:255	R:146 A:2
S:255	S:255	R:278 A:0	S:13	S:255	R:272 A:1	S:255	S:255
S:4	R:253 A:0	S:4	R:959 A:3	R:940 A:4	R:435 A:1	S:4	S:255
S:4	R:256 A:1	R:641 A:0	R:1020 A:3	R:1003 A:1	R:255 A:2	S:255	S:255
S:255	S:13	R:277 A:2	R:300 A:0	S:4	R:268 A:1	R:413 A:0	S:4
R:150 A:1	S:255	R:297 A:0	R:253 A:3	R:252 A:0	S:4	R:262 A:1	R:150 A:4
R:125 A:0	R:148 A:0	S:255	S:255	S:255	S:255	R:145 A:2	R:127 A:0

„T-75“

10 cm

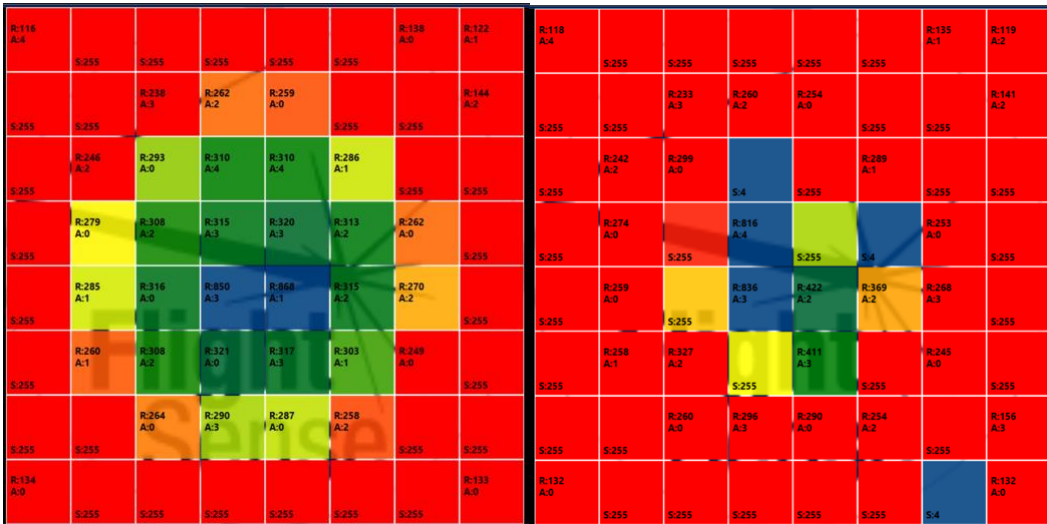
R:100 A:6	R:102 A:0	R:103 A:0	R:106 A:0	R:109 A:0	R:100 A:0	R:100 A:0	R:103 A:3
R:102 A:2	R:107 A:0	R:113 A:1	R:121 A:3	R:127 A:0	R:109 A:4	R:104 A:0	R:109 A:3
R:113 A:8	R:117 A:2	R:123 A:0	R:138 A:12	R:139 A:3	R:130 A:4	R:123 A:3	R:114 A:0
R:117 A:0	R:126 A:0	R:131 A:2	R:1004 A:4	R:138 A:0	R:138 A:0	R:133 A:0	R:118 A:4
R:121 A:16	R:134 A:0	R:145 A:0	R:1010 A:3	R:1001 A:2	S:13	R:130 A:3	R:122 A:0
R:116 A:0	R:137 A:2	R:152 A:3	R:995 A:0	R:1002 A:3	R:125 A:4	R:116 A:0	R:116 A:0
R:114 A:4	R:131 A:5	R:939 A:0	R:145 A:2	R:130 A:0	R:122 A:0	R:108 A:1	R:113 A:0
R:111 A:0	R:122 A:0	R:129 A:0	R:132 A:4	R:118 A:0	R:117 A:3	R:111 A:2	R:108 A:0

20 cm

R:127 A:3	R:158 A:0	R:176 A:1	R:184 A:0	R:184 A:1	R:172 A:5	R:144 A:0	R:128 A:1
R:162 A:7	R:196 A:1	R:205 A:3	R:205 A:2	R:205 A:0	R:202 A:2	R:184 A:6	R:153 A:3
R:185 A:1	R:207 A:2	R:205 A:0	R:213 A:5	R:215 A:2	R:209 A:1	R:203 A:3	R:171 A:0
R:200 A:0	R:208 A:0	R:214 A:1	R:224 A:4	R:227 A:0	R:220 A:2	R:210 A:1	R:185 A:3
R:205 A:4	R:212 A:1	R:223 A:3	R:1010 A:3	R:982 A:1	R:216 A:1	R:210 A:4	R:188 A:0
R:193 A:0	R:209 A:1	R:223 A:3	R:844 A:0	R:223 A:2	R:215 A:3	R:204 A:0	R:180 A:0
R:171 A:2	R:202 A:2	R:212 A:0	R:216 A:1	R:211 A:0	R:205 A:0	R:194 A:1	R:164 A:4
R:141 A:0	R:170 A:0	R:193 A:0	R:197 A:5	R:194 A:1	R:185 A:2	R:164 A:2	R:142 A:0

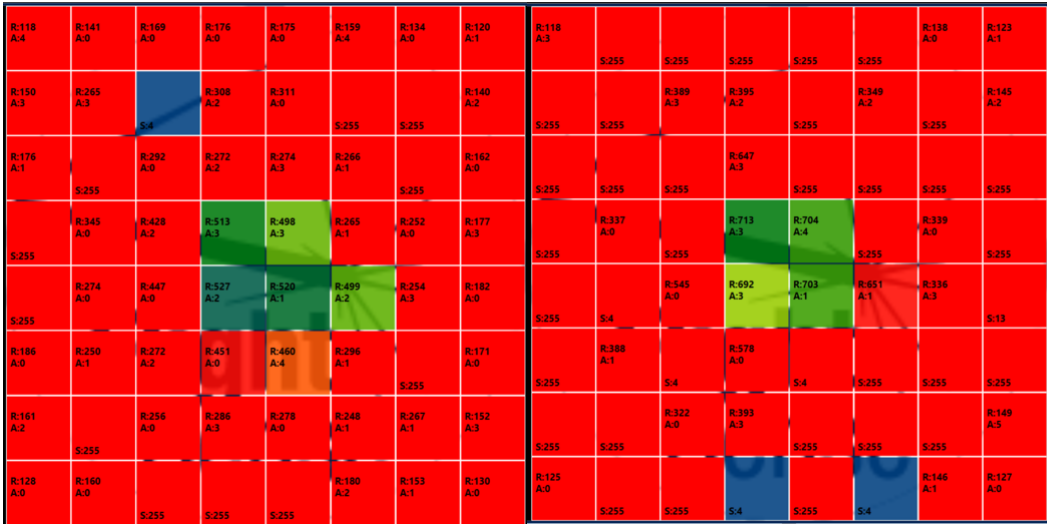
30 cm

40 cm

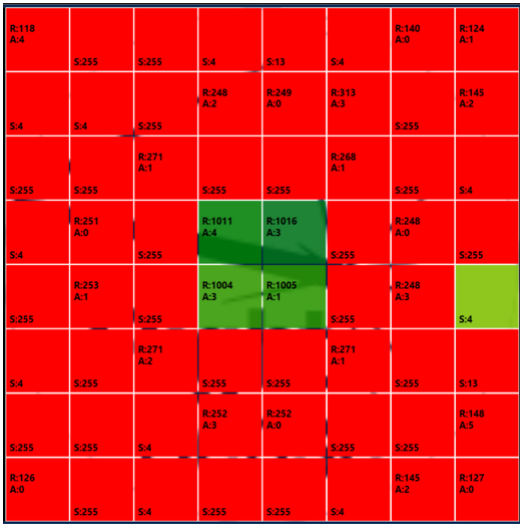


50 cm

70 cm



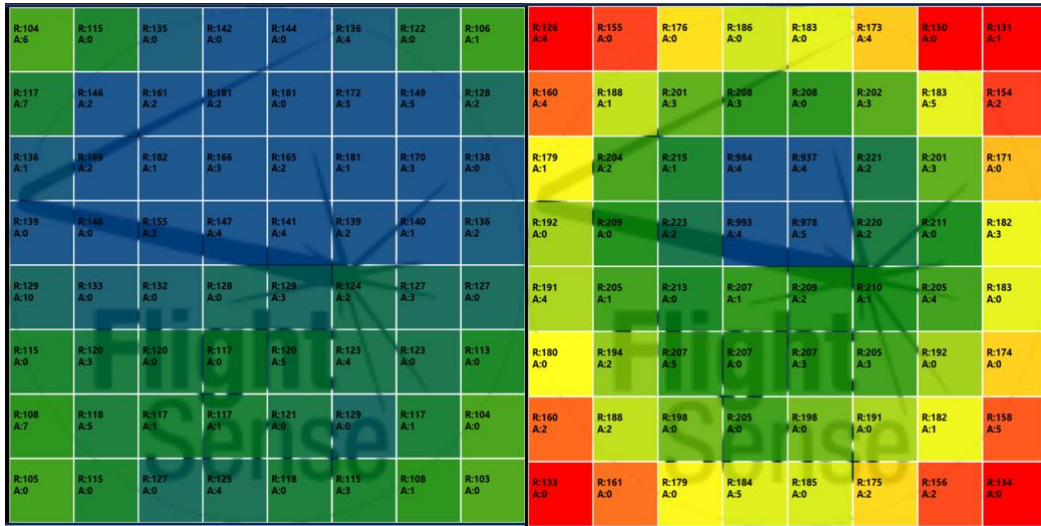
100 cm



„T-50“

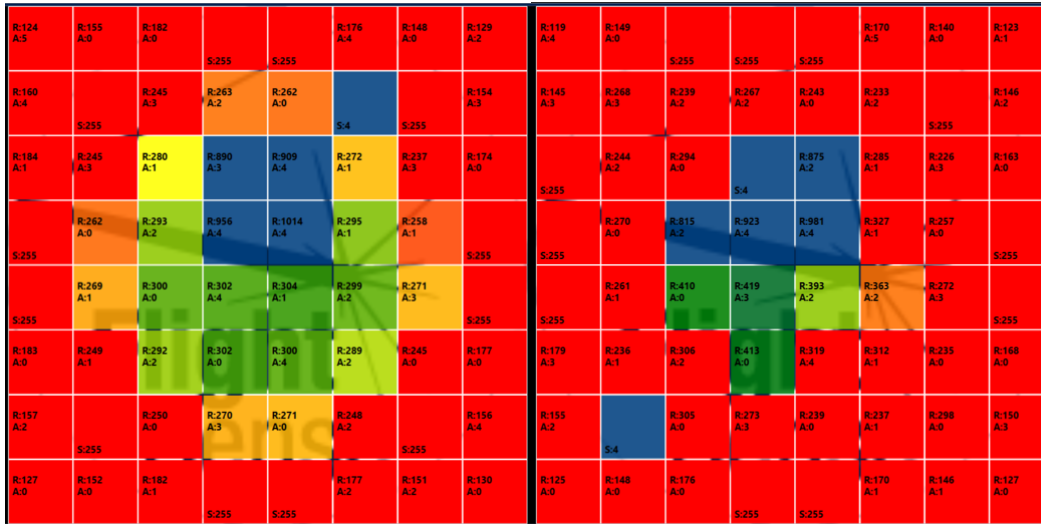
10 cm

20 cm



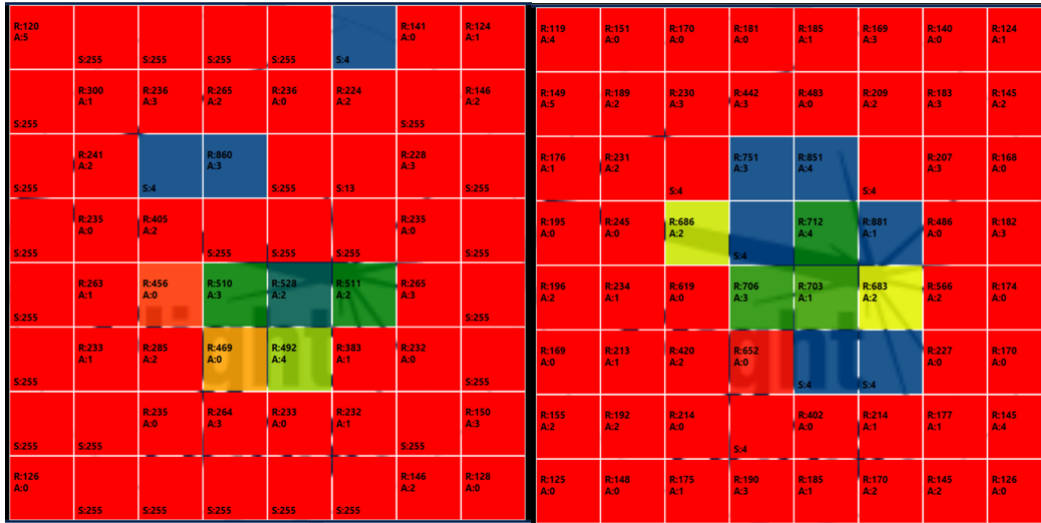
30 cm

40 cm



50 cm

70 cm



100 cm

R:119 A:4	R:145 A:0	R:173 A:0	S:13	S:13	R:169 A:3	R:138 A:0	R:124 A:1
R:150 A:4	S:4	R:224 A:2	R:248 A:2	R:250 A:0	R:220 A:2	R:652 A:3	R:145 A:1
R:175 A:1	R:225 A:3	R:269 A:0	R:949 A:2	S:4	R:271 A:1	R:218 A:3	R:165 A:0
R:274 A:0	R:251 A:0	R:933 A:2	R:1011 A:3	R:1011 A:4	R:980 A:1	R:248 A:0	S:255
S:255	R:233 A:1	R:955 A:0	R:1017 A:3	R:999 A:1	R:932 A:2	R:250 A:2	R:179 A:0
R:176 A:0	R:227 A:0	R:276 A:2	R:294 A:0	R:968 A:3	R:272 A:1	R:223 A:0	R:166 A:0
R:151 A:2	S:4	R:227 A:0	R:250 A:3	R:251 A:0	R:225 A:1	S:4	R:150 A:4
R:125 A:0	R:148 A:0	R:169 A:1	R:189 A:3	S:255	R:166 A:1	R:145 A:2	R:126 A:0