



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Automatinės vaizdo atpažinimo sistemos, naudojamos detalių
kokybei nustatyti, tyrimas**
Baigiamasis magistro studijų projektas

Vaidas Gasiūnas
Projekto autorius

Lekt. dr. Evaldas Sapeliauskas
Vadovas

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Automatinės vaizdo atpažinimo sistemos, naudojamos detalių
kokybei nustatyti, tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas
Valdymo technologijos (6211EX014)

Vaidas Gasiūnas
Projekto autorius

Lekt. dr. Evaldas Sapeliauskas
Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Vaidas Gasiūnas

Automatinės vaizdo atpažinimo sistemos, naudojamos detalių kokybei nustatyti, tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. 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;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Vaidas Gasiūnas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Vaidui Gasiūnui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba) Automatinės vaizdo atpažinimo sistemos, naudojamos detalių kokybei nustatyti, tyrimas

Baigiamojo projekto tema (anglų kalba) Research of the Automatic Image Recognition System Used to Determine Parts Quality

Patvirtinta 2022 m. balandžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-10

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2022 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui:

Penkių detalių imtis, vaizdo kamera, filtrai

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Išanalizuoti mokslinę ir techninę literatūrą susijusias su vaizdo atpažinimu ir metodais.
2. Atlikti pramonėje taikomų vaizdo atpažinimo sprendimų bei kamerų kalibravimo metodų analizę.
3. Aprašyti skirtingo spektro šviesos įtaką vaizdo atpažinimui.
4. Pateikti sriegio defekto detalėje aptikimo, naudojant vaizdo kamerą, metodiką.
5. Aprašyti tyrimo rezultatus.

Vadovas lektorius dr. Evaldas Sapeliauskas

(vadovo pareigės, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau Vaidas Gasiūnas

(studento vardas, pavardė, parašas)

2022 m. balandžio 19 d.

Gasiūnas, Vaidas. Automatinės vaizdo atpažinimo sistemos, naudojamos detalių kokybei nustatyti, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Evaldas Sapeliauskas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos ir elektros inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vaizdo atpažinimas, defektų aptikimas, sriegis.

Panevėžys, 2022. 89 p.

Santrauka

Baigiamajame darbe tiriamos standartinės pramoninės kameros, turinčios vaizdo atpažinimo programinę įrangą, galimybės sriegio defekto aptikimo klausimu. Tyrimų objektas – automatinė vaizdo atpažinimo sistema, naudojama detalių kokybei nustatyti. Projekto tikslas – ištirti automatinę vaizdo atpažinimo sistemą, naudojamą detalių kokybei nustatyti. Projekto uždaviniai: išanalizuoti mokslinę ir techninę literatūrą, susijusią su vaizdo atpažinimu ir metodais, atlikti pramonėje taikomų vaizdo atpažinimo sprendimų bei kamerų kalibravimo metodų analizę, aprašyti skirtingo spektro šviesos įtaką vaizdo atpažinimui, pateikti sriegio defekto detalėje aptikimo, naudojant vaizdo kamerą, metodiką, aprašyti tyrimo rezultatus.

Analitinėje dalyje išnagrinėtos vaizdo kamerų rūšys, apšvietimo metodai bei kamerų kalibravimo metodai.

Projektinėje dalyje pateikiama tyrimams reikalinga fizinė bei programinė įranga: kamera, filtrai, šviesos šaltiniai.

Tiriamojame dalyje aprašyti tokie tyrimai:

- tyrimas su skaidriu filtru ir vidiniu kameros apšvietimu, su apšvietimu iš šono bei apšvietimu iš visų keturių šonų, eliminavus natūralią šviesą;
- tyrimas, naudojant kupolą ir vidinį kameros apšvietimą;
- tyrimas su raudonu filtru ir vidiniu kameros apšvietimu, su apšvietimu iš šono bei apšvietimu iš visų keturių šonų, eliminavus natūralią šviesą;
- tyrimas su žaliu filtru ir vidiniu kameros apšvietimu, su apšvietimu iš šono bei apšvietimu iš visų keturių šonų, eliminavus natūralią šviesą;
- tyrimas su mėlynu filtru ir vidiniu kameros apšvietimu, su apšvietimu iš šono bei apšvietimu iš visų keturių šonų, eliminavus natūralią šviesą;
- tyrimas su ND filtru ir su apšvietimu iš šono bei apšvietimu iš visų keturių šonų, eliminavus natūralią šviesą;
- tyrimas tiriamą detalę sukant kampu.

Išvados ir tyrimų rezultatai:

1. Išanalizavus mokslinę ir techninę literatūrą, susijusią su vaizdo atpažinimu ir metodais, nustatyta, kad vaizdo atpažinimo sprendiniai yra aktualūs pramonės sistemose kaip įrankis gaminio kokybei ir gamybos efektyvinimui pasiekti.
2. Atlikus tyrimą, iš vaizdo atpažinimo kameroms dažniausiai taikomų trijų kalibravimo metodų (*Tsai, Zhang* ir tiesioginis tiesinis), pasirinktas *Zhang* metodas (PIM60 kamerai tinkamiausias kalibravimo metodas).

3. Išanalizavus mokslinę ir techninę literatūrą nustatyta, kad naudojant vaizdų atpažinimo sistemas paviršių defektams tirti, patikimiausia naudoti tamsaus lauko arba tiesioginio tiriamo objekto apšvietimą. Kadangi tirtos plieninės blizgios detalės, tai teoriškai patikimiausi apšvietimo būdai tyrimams netiko. Tyrimams naudoti supaprastinti apšvietimo būdai, naudojant LED 5500° K šviesą: detalės apšvietimas iš vieno šono, iš keturių šonų išoriniu apšvietimu bei apšvietimas iš viršaus integruotu kameros apšvietimu. Geriausiai pasiteisino apšvietimas iš vieno šono.
4. Sriegio defekto detalėje aptikimo, naudojant vaizdo kamerą, metodika yra palyginimo nustatymo įvedimas (kokybiškos detalės savybių sužymėjimas tokiomis pat sąlygomis, kokiomis bus tiriamos kitų detalių savybės). Nustatymui padaryti įvairių filtrų ir apšvietimo metodų pagalba randamos tinkamiausios, kokybiškiausios savybių aptikimo sąlygos, prie kurių tiriamas objektas sufokusuojamas geriausiai. Sudarius nustatymą ir jį patvirtinus, su juo lyginamos tiriamos detalės.
5. Atlikus tyrimus, kokybiškiausi tyrimų rezultatai gauti detalę stebint 90 – 100 mm atstumu, naudojant žalią kameros filtrą ir apšviečiant detalę iš vieno šono. Gauta, kad detalę stebint maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), galima išgauti net 100 proc. atpažinimo tikslumą (kokybiškos detalių pusės atitinka nuostatai ≥ 90 , o brokuotos atitinka nuostatai < 90).

Gasiūnas, Vaidas. Research of the Automatic Image Recognition System Used to Determine Parts Quality. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Evaldas Sapeliauskas; Panevėžys Faculty of Technology and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronic and Electric Engineering, Technology Sciences.

Keywords: image recognition, defect detection, thread.

Panevėžys, 2022. 89 pages.

Summary

The final paper examines possibilities of standard industrial camera to determine the quality of details using image recognition software. The object of research is an automatic image recognition system used to determine the quality of details. The aim of this work is to investigate the automatic image recognition system used to determine the quality of details. Tasks - to analyze scientific and technical literature related to image recognition and methods, perform analysis of industrial image recognition solutions and camera calibration methods, describe the influence of different spectral light on image recognition, present the method of thread defect detection using a camera, describe research results.

The analytical part examines the types of video cameras, lighting methods and camera calibration methods.

The project part presents the physical and software required for research: camera, filters, light sources.

The research part presents the research:

- examination with a transparent filter and internal camera illumination, with illumination from the side and illumination from all four sides after elimination of natural light;
- examination using a dome and internal camera lighting;
- examination with red filter and internal camera illumination, with side illumination and illumination from all four sides after elimination of natural light;
- examination with green filter and internal camera illumination, with side illumination and illumination from all four sides after elimination of natural light;
- examination with blue filter and internal camera illumination, with side illumination and illumination from all four sides after elimination of natural light;
- study with ND filter and with side illumination and illumination from all four sides after elimination of natural light;
- the study examines the part by turning it at an angle.

Conclusions and research results:

1. An analysis of the scientific and technical literature related to image recognition and methods has shown that image recognition solutions are relevant in industrial systems as a tool to achieve product quality and production efficiency.
2. The Zhang method (most suitable for the PIM60) was selected from three of the most commonly used calibration methods (Tsai, Zhang, and direct linear) for image recognition cameras.
3. After analyzing the scientific and technical literature, it has been established that when using image recognition systems to investigate surface defects, it is most reliable to use lighting in a dark field or bright field. Since shiny steel details were studied, the theoretically most reliable lighting methods were not suitable for the research. The study used simplified lighting methods

using LED 5500° K light: lighting of the part from one side, external lighting from four sides, and lighting from above with integrated camera lighting. Lighting from one side worked best.

4. The methodology for detecting a thread defect in a part using a video camera is, in general, the introduction of a comparison provision (marking the properties of a quality part under the same conditions as the properties of other parts will be examined). With the help of various filters and lighting methods, the most suitable, high-quality properties detection conditions are sought, under which the object under investigation is best focused. Once the setting is made, the details under investigation are compared to it.
5. After the tests, the highest quality test results were obtained by observing the part at a distance of 90–100 mm, using a green camera filter and illuminating the part from one side. It has been found that by observing the part in approximately the same position (± 5 mm and $\pm 5^\circ$), as much as 100 % details properties can be recognized (quality parts meet specifications ≥ 90 and defective parts meet specifications < 90).

Turinys

Lentelių sąrašas	11
Paveikslų sąrašas	13
Santrumpų ir terminų sąrašas	15
Įvadas.....	16
1. Vaizdo atpažinimo sistemos.....	17
1.1. Vaizdų klasifikavimo metodai.....	19
2. Apšvietimas	20
3. Vaizdo atpažinimo sistemose naudojamos kameros	24
3.1. Analoginių ir skaitmeninių vaizdo atpažinimo kamerų palyginimas.....	25
4. Pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodai.....	27
4.1. Linijinis (tiesioginis tiesinis) kalibravimo metodas	27
4.2. <i>Zhang</i> kalibravimo metodas	28
4.3. <i>Tsai</i> kalibravimo metodas.....	29
5. Dalinės analitinės dalies išvados.....	32
6. Projektinė dalis	33
6.1. Tiriamos detalės.....	33
6.2. Fizinė įranga	33
6.2.1. Kamera	33
6.2.2. Išorinis šviesos šaltinis	35
6.3. Programinė įranga	36
6.3.1. Kameros programinė įranga „SOPAS“	36
7. Pirminė eksperimentinė analizė	41
7.1.1. Bandymas su kupolu.....	46
7.1.2. Tyrimas su raudonu filtru ir vidiniu integruotu kameros apšvietimu.....	49
7.1.3. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono.....	50
7.1.4. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių	53
7.1.5. Tyrimas su žaliu filtru ir integruotu kameros apšvietimu	55
7.1.6. Tyrimas su žaliu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono	56
7.1.7. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių	60
7.1.8. Tyrimas su mėlynu filtru ir vidiniu integruotu kameros apšvietimu.....	61
7.1.9. Tyrimas su mėlynu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono.....	62
7.1.10. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių	65
7.2. Tyrimas su ND filtru (ND2-ND400) ir išoriniu apšvietimu iš šono	66
7.3. Tyrimas su ND filtru (ND2-ND256) ir išoriniu apšvietimu iš apačios	70
7.3.1. Tyrimas su ND filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių.....	71
7.3.2. Tyrimas detalę sukant kampu, apšviečiant ją iš šono.....	72
7.3.3. Tyrimas detalę sukant kampu, izoliavus tiriamą zoną nuo išorinės šviesos bei naudojant apšvietimą iš keturių šonų	73
7.3.4. Tyrimas su žaliu filtru ir integruotu kameros apšvietimu, sukant tiriamą detalę	75
7.4. Gautų rezultatų, naudojant skirtingus filtrus bei kupolą, apibendrinimas.....	76
8. Dalinės projektinės dalies išvados.....	80
9. Pritaikymas gamybai (rekomendacijos).....	81
Išvados	84
Literatūros sąrašas	85

Priedai.....	90
1 priedas. Vaizdo atpažinimo sistemos programos pavyzdys	90

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Automatinės vizualios apžiūros pritaikymo sritys [8].....	18
2 lentelė. Skirtingų šviesos šaltinių palyginimas [24].....	21
3 lentelė. „YONGNUO“ LED YN-160S išorinio šviesos šaltinio specifikacija [62].....	35
4 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	41
5 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	41
6 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	44
7 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	44
8 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	45
9 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	45
10 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	47
11 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas.....	48
12 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	49
13 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	49
14 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	52
15 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	52
16 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei	53
17 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	53
18 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	54
19 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	54
20 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	55
21 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	56
22 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	58
23 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	58
24 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei	59
25 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	59
26 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	60
27 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	60
28 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	61
29 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	62
30 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	64
31 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	64
32 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei	64
33 lentelė. Detalių brokuotos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	65
34 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas.....	66
35 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka	66
36 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%).....	67
37 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)	67
38 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su pilnai kokybiška detale (%).....	68
39 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su pilnai kokybiška detale (%).....	69
40 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%).....	70
41 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)	70
42 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas (%).....	71

43 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)	72
44 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)	73
45 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)	74
46 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)	75
47 lentelė. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas	76
48 lentelė. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas	78
49 lentelė. Detalės savybių atpažinimui rekomenduojamo įrangos išdėliojimo pavyzdžio elementai	81

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pagrindinės vaizdų atpažinimo sistemos dalys [11].....	18
2 pav. Sistemos trūkumų ir gaminamų objektų stebėjimo procesas [13].....	19
3 pav. Skirtingų apšvietimų savybės [20]	20
4 pav. Galinis apšvietimas [11, 20].....	22
5 pav. Difuzinis apšvietimas [11, 20]	22
6 pav. Ryškaus lauko apšvietimas [11, 20].....	23
7 pav. Tamsaus lauko apšvietimas [11, 20]	23
8 pav. Žemės riešutų maišelis (veidrodinis paviršius). Kairėje – esant ryškiai lauko žiedo šviesai. Dešinėje – esant tamsiam lauko žiedui [11, 20].....	23
9 pav. Skaitmeninių ir analoginių kamerų blokinė diagrama [19].....	24
10 pav. Analoginės kameros pavyzdys [19, 29]	25
11 pav. Kameros tipai: a) skaitmeninė; b) savarankiška vaizdo sistema [30–31].....	25
12 pav. Standartinė vaizdo atpažinimo sistema [36].....	27
13 pav. Bendras paveiklo ir objekto koordinacių sistemos vaizdas [58]	28
14 pav. Tsai kameros perprojekcijos modelis su perspektyvine projekcija ir radialiniu iškraipymu [57]	31
15 pav. Tiriama detalė.....	33
16 pav. „InspectorPIM60“ kamera [60].....	34
17 pav. Supaprastintas kameros prijungimo brėžinys [60].....	34
18 pav. „YONGNUO“ LED YN-160S išorinis šviesos šaltinis [62].....	35
19 pav. „Sick“ PIM60 kameros šviesos šaltiniu apšviesta tiriama detalė.....	35
20 pav. Detalė padėta ant „YONGNUO“ LED YN-160S išorinio šviesos šaltinio.....	36
21 pav. Detalė apšviesta iš šono „YONGNUO“ LED YN-160S išoriniu šviesos šaltiniu	36
22 pav. „SOPAS“ programinės įrangos naudojimo algoritmas: a) vaizdo atpažinimo algoritmas; b) programos įrankių naudojimo iliustracija [61]	38
23 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas	38
24 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas jį pajudinus iš pradinės pozicijos	38
25 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas jį pajudinus iš pradinės pozicijos toliau nuo šviesos šaltinio arba pakeitus objekto savybes	39
26 pav. Bendras sistemos valdymo algoritmas	40
27 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	41
28 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	42
29 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	42
30 pav. Detalė padėta 90 mm po kamera ir apšviesta iš šono.....	43
31 pav. Pajudinama detalė padėta 90 mm po kamera ir apšviesta iš šono.....	43
32 pav. Detalės pusė be defekto	43
33 pav. Pajudinama detalė be defekto	43
34 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	44
35 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	45
36 pav. Kameros papildoma fizinė įranga [63].....	46
37 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros kupolą	47
38 pav. Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant vidinį apšvietimą su kupolu (fonas geltonas)	48
39 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	48
40 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą	49

41 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	50
42 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną lęšį.....	51
43 pav.	Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant raudoną filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas juodas)	51
44 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	52
45 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	53
46 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	54
47 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą	55
48 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	56
49 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros žalią lęšį.....	57
50 pav.	Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant žalią filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas geltonas)	57
51 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	58
52 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	59
53 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	60
54 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros mėlyną filtrą	61
55 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	62
56 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros mėlyną filtrą	63
57 pav.	Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant mėlyną filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas žalias)	63
58 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	64
59 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas.....	65
60 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	66
61 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros ND2-ND400 filtrą	67
62 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, a) kokybiškos pusės atpažinimas, atitikimo riba ≥ 90 , b) brokuotos pusės atpažinimas, atitikimo riba < 90	68
63 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, a) kokybiškos pusės atpažinimas, atitikimo riba ≥ 90 , b) brokuotos pusės atpažinimas, atitikimo riba < 90	69
64 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros ND2-ND400 filtrą	70
65 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	71
66 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	72
67 pav.	Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema	74
68 pav.	a) aptiktos detalės savybės; b) pamestos detalės savybės	74
69 pav.	Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą	75
70 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, naudojant integruotą kameros apšvietimą.....	77
71 pav.	Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, naudojant išorinį apšvietimą	77
72 pav.	Detalių kokybiškos ir nekokybiškos pusių aptikimo skirtumas nuo nuostato 90 proc.	79
73 pav.	Detalės savybių atpažinimui rekomenduojamo įrangos išdėliojimo pavyzdys.....	81
74 pav.	Valdiklis „Siemens“ S7-1200 CPU 1214C [64]	82
75 pav.	Dažnio keitiklis „Danfoss“ FC51 [65]	82
76 pav.	Konvejerio programos blokinė schema.....	83

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

PCB – montavimo plokštė (angl. *printed circuit board*);

TTS – *Tsai* dviejų žingsnių kalibravimo metodas (angl. *Tsai two-step method*);

DLT – linijinis (tiesioginis tiesinis) kalibravimo metodas (angl. *direct linear transformation*).

Įvadas

Pastaruoju metu pramonės srityje automatinės vaizdo atpažinimo sistemos taikomos vis dažniau, kadangi jų kaina per paskutinius 20 metų sumažėjo net tris kartus, o panaudojimo galimybės ir kokybė išaugo [1–2]. Vaizdo atpažinimo technologijos gali padėti išspręsti informacijos realiu laiku apie tiriamą objektą gavimo problemą. Tai gali būti panaudota pramonėje gaminiamis realiu laiku stebėti, gamybos defektams aptikti bei gamyboje naudojamoms medžiagoms kontroliuoti (pvz., esant tam tikriems pradinės medžiagos išmatavimo reikalavimams, jei yra tam tikri sanitariniai medžiagų kokybės apribojimai, galima naudoti purvui, graužikams ar kitiems nepageidaujamiems objektams aptikti ir t. t.) [3].

Temos aktualumas. Vis daugiau gamyklų stengiasi pakeisti savo personalą automatiniais įrenginiais (iki 2030 m. manipulatoriais planuojama pakeisti iki 20 milijonų darbuotojų), nes jie dirba greičiau, tiksliau ir pigiau [4]. Darbuotojų pakeitimas automatinėmis sistemomis ypač aktualus produkcijos defektų aptikimo sektoriuje. Gamyboje nepastebėti defektai gali lemti tuo metu gaminamo produkto atšaukimu, o galiausiai baigtis ir ieškiniais, jei dėl šio broko(-ų) buvo kaip nors pakenkta vartotojo sveikatai ar tolimesnės produkcijos kokybei.

Tyrimų objektas – automatinė vaizdo atpažinimo sistema, naudojama detalių kokybei nustatyti.

Projekto tikslas – ištirti automatinę vaizdo atpažinimo sistemą, naudojamą detalių kokybei nustatyti.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę ir techninę literatūrą, susijusią su vaizdo atpažinimu ir metodais.
2. Atlikti pramonėje taikomų vaizdo atpažinimo sprendimų bei kamerų kalibravimo metodų analizę.
3. Aprašyti skirtingo spektro šviesos įtaką vaizdo atpažinimui.
4. Pateikti sriegio defekto detalėje aptikimo, naudojant vaizdo kamerą, metodiką.
5. Aprašyti tyrimo rezultatus.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, modeliavimas, eksperimentai.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

Gasiūnas, Vaidas; Sapeliauskas, Evaldas. Vaizdo atpažinimo sistemos panaudojimas metalinės detalės skylių matmenims identifikuoti // Technologijų ir verslo aktualijos – 2022: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2022 m. lapkričio 25 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 2538-8045. 2022.

1. Vaizdo atpažinimo sistemos

Vaizdo atpažinimo įrenginiai – tai sistemos, skirtos užfiksuoti ir pranešti apie gautos informacijos sutapimus ar nesutapimus su turimais duomenimis arba, atsižvelgiant į parašytą programą, elementų pozicijoms bei matmenims surasti. Pvz., jei sistema skirta veido atpažinimo funkcijai išmaniajame telefone atlikti, tai ji turi atrakinti telefoną tik esant tam tikram iš anksto išmaniajame įrenginyje nustatytam savininko veido duomenų sutapimui su tuo metu telefono kameros fiksuoto veido informacija. Tačiau ši sistema gali būti naudojama ir atvirkščiai. Sakykime, pramonėje pagaminus produktą, jo kokybė gali būti patikrinta taikant vaizdo atpažinimo technologiją. Šiuo atveju sistema negaiš laiko ieškodama sutapimų, o susitelks į nesutapimus, jų kiekį ir įtaką produkto kokybei. Jei nesutapimai tokie dideli, kad pagamintas objektas neatitinka gamybos standarto, formos, dydžio, skylių skersmens (pvz., pagamintas sriegis, kurio skersmuo neatitinka gaminamų varžtų standartų) ar iš anksto nustatyto estetinio vaizdo, sistema užfiksuoja defektą ir šis produktas (objektas) atskiriamas nuo kitų produktų gamybos ar eksploataavimo procesų.

Šiuos defektus fiksuojančių sistemų veikimas, pagrįstas žmogaus regos funkcija, kuri turi pranašumą didelio tikslumo bekontaktėje automatinėje gamybos stebėjimų srityje [5].

Norint apibūdinti vaizdo atpažinimo sistemos panaudojimą pramonėje, reikia prieš tai įvardinti jos pagrindinius aspektus (kategorijas ar funkcijas): vizuali apžiūra, proceso valdymas, detalių identifikavimas, automatizuotas valdymas bei valdymo mechanizmai. Pagrindinis iš jų yra automatinė vizuali apžiūra, kadangi svarbiausia užduotis stebint automatinį vaizdą yra sekamo produkto (dalių ar medžiagos) matmenų palyginimas su specifikacija. Vizuali apžiūra yra svarbi automatizavimo procese, bet neturi didelės įtakos gamybos lankstumui [6–8].

Automatinė vizuali apžiūros sistema gali būti taikoma matavimams (objektų matmenų, mažų tarpų), vientisumui tikrinti bei plyšių susidarymo analizei vykdyti. Tokias sistemas ypač patogu naudoti medicinos pramonėje, kadangi sumažina riziką sudaryti per didelę ar per mažą vaisto koncentraciją bei, jei dirbama su pavojingomis cheminėmis medžiagomis, suteikia galimybę stebėti sistemą iš atskiros patalpos, taip išvengiant papildomo pavojaus sveikatai. Naudojant tokį apžiūros metodą produkcijos gamybos linijoje, pastebimas efektyvumo pakilimas (dažniausiai tris ir daugiau kartų), lyginant su standartine apžiūra [8]. Pvz., šiuo metu apie 70 proc. komponentų į PCB įdėjimo darbo atlieka žmogus, kuris gali padaryti klaidų (per klaidą neteisingai įterpia PCB komponentą(-us) ir t. t.), dėl kurių sumažėja efektyvumas, padidėja išlaidos ir išauga gaminių su trūkumais arba rimtais defektais skaičius. Vaizdų atpažinimo technologija leidžia automatinėms sistemoms užfiksuoti ruošinį (jo koordinates, poziciją ir t. t.) gamybos linijoje ir nukreipti manipulatoriaus veiksmus. Tyrimai, atlikti su vaizdo atpažinimo sistemomis [8–9], parodė, kad naudojant mašininį matymą, sistemos darbo efektyvumas yra tris kartus didesnis nei tuos pačius darbus atliekant rankiniu būdu. Automatinės vizualios apžiūros pritaikymo sritys pateiktos 1 lentelėje.

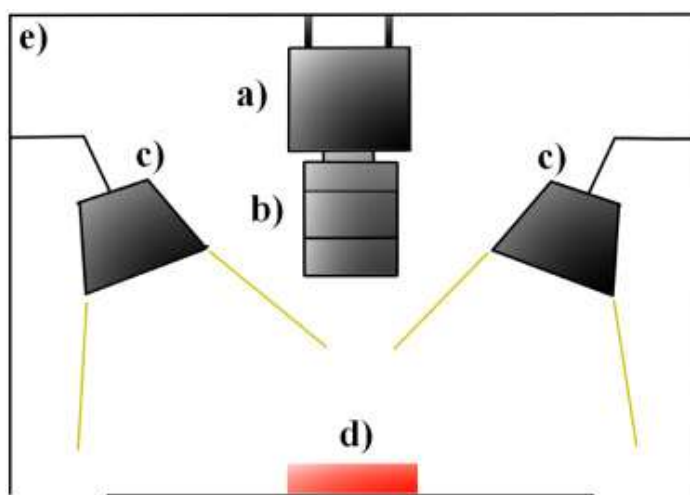
Vaizdo atpažinimo technologijos susideda iš kelių pagrindinių dalių (žr. 1 pav.). 1 paveiksle pavaizduota [5, 10, 11]:

- a. skeneris / vaizdo kamera (nuo jo / jos priklauso sistemos tipas: spalvotas / nespalvotas, analoginis / skaitmeninis, terminis, skeneris, 1D, 2D, 3D ir t. t.);
- b. kameros lęšis, skirtas padidinti / pamažinti fiksuojamą vaizdą;
- c. apšvietimas, skirtas apšviesti stebimą procesą, jo dalį, naudojamų medžiagų ar gaminamos produkcijos kokybę;

- d. tiriamas objektas;
- e. pastoliai, manipulatoriai ar kiti panašūs vaizdo atpažinimo sistemą prilaikantys / nukreipiantys objektai.

1 lentelė. Automatinės vizualios apžiūros pritaikymo sritys [8]

Matavimai	Vientisumo tikrinimas ir kokybės kontrolė
Tarpas tarp žvakių	Automobilių gamyklos (pagerina automobilių dalių tikrinimą, stabdžių mazgų, vožtuvų spyruoklių, stūmoklių žiedų ir strypų saugos patikrinimą, patvirtina jungiklio vientisumą, patikrina automatinių ašių sąrankas, įvertina alyvos sandarinimo paviršius, patikrina sunkvežimio lovas, patikrina lazerines suvirinimo siūles, aptinka variklio degalų nuotėkį).
Įrankių nusidėvėjimas	Patikrinama ar klijuojamos teisingos, standartus atitinkančios etiketės.
Konvejerio diržo plotis	Maisto pramonė (vaisių / daržovių klasifikacija bei klasės priskyrimas (a, b ir t. t.)).
Kalibravimas bei patikrinamas automatizavimui	Elektronikos bei elektro-optikos pramonė (spausdintinių plokščių, mikroschemų, šviesolaidžių jungčių tikrinimas, puslaidininkių tikrinimas, paviršiaus defektų pašalinimas fotojuostų tinkluose).
Manipulioriaus ir vizualizacijos sistema surenka diagnostikos prietaisus, tikrina ir rūšiuoja grubias medines lentas	Medicinos ir farmacijos įmonės (patvirtina medicininius indus, patikrina mėgintuvėlius, ar jie tinkamai užpildyti ir užplombuoti, užtikrina medicininių tablečių kokybę, užtikrina produktų ir pakuočių kokybę).
Komponento lygiavimas ir poslinkis	Nudažymo kokybės įvertinimas.
Plyšių susidarymo ir plitimo analizė	Gamybos linijos (apdorotų paviršių, šurkštumo, plokščių kraštų pažeidimų ir įbrėžimų tikrinimas, akrilo lakštų defektų tikrinimas, indeksuojamų įdėklų, pjovimo įrankių tikrinimas, realaus laiko tinklo patikros sistema nustato plieno defektus, nukreipia pakuotės tikrinimą, automatizuoja stiklo stakles – įrankio tikrinimas, tinklo kameros tikrina komponentus).



1 pav. Pagrindinės vaizdų atpažinimo sistemos dalys [11]

Kitos 1 paveiksle neįvardytos vaizdo atpažinimo sistemos dalys:

- valdiklis / kompiuteris su tam tikra vaizdo atpažinimo sistema, valdančia programinę įrangą;

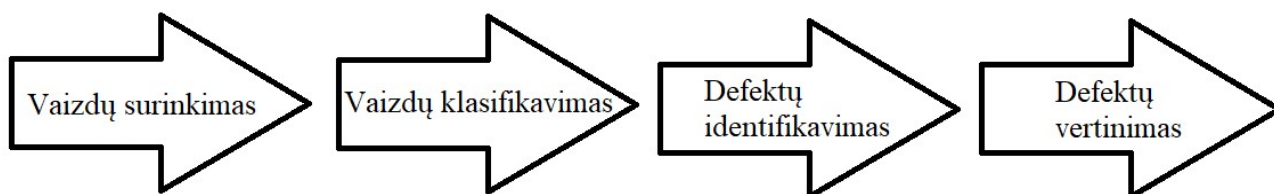
- sistemą valdanti programa, skirta sutapimams / nesutapimams (klaidoms ar defektams) surasti;
- jutikliai, skirti aptikti kameros ir produkto koordinates ir poziciją.

1.1. Vaizdų klasifikavimo metodai

Vaizdų klasifikavimas leidžia suskirstyti vaizdus į kategorijas pagal turimus pavyzdinius duomenis. Bendras požiūris į vaizdo klasifikavimo užduotį apima tris klausimus [12]:

- funkcijos (savybės) ištraukimas;
- vaizdo duomenų mokymo procedūra (neuroninio tinklo apmokymas ir pan.);
- klasifikatoriaus pasirinkimas vaizdams klasifikuoti.

Atsižvelgus į šiuos tris punktus, industrinėje gamyboje sudaroma defektų aptikimo ir įvertinimo veiksmų seka (žr. 2 pav.).



2 pav. Sistemos trūkumų ir gaminamų objektų stebėjimo procesas [13]

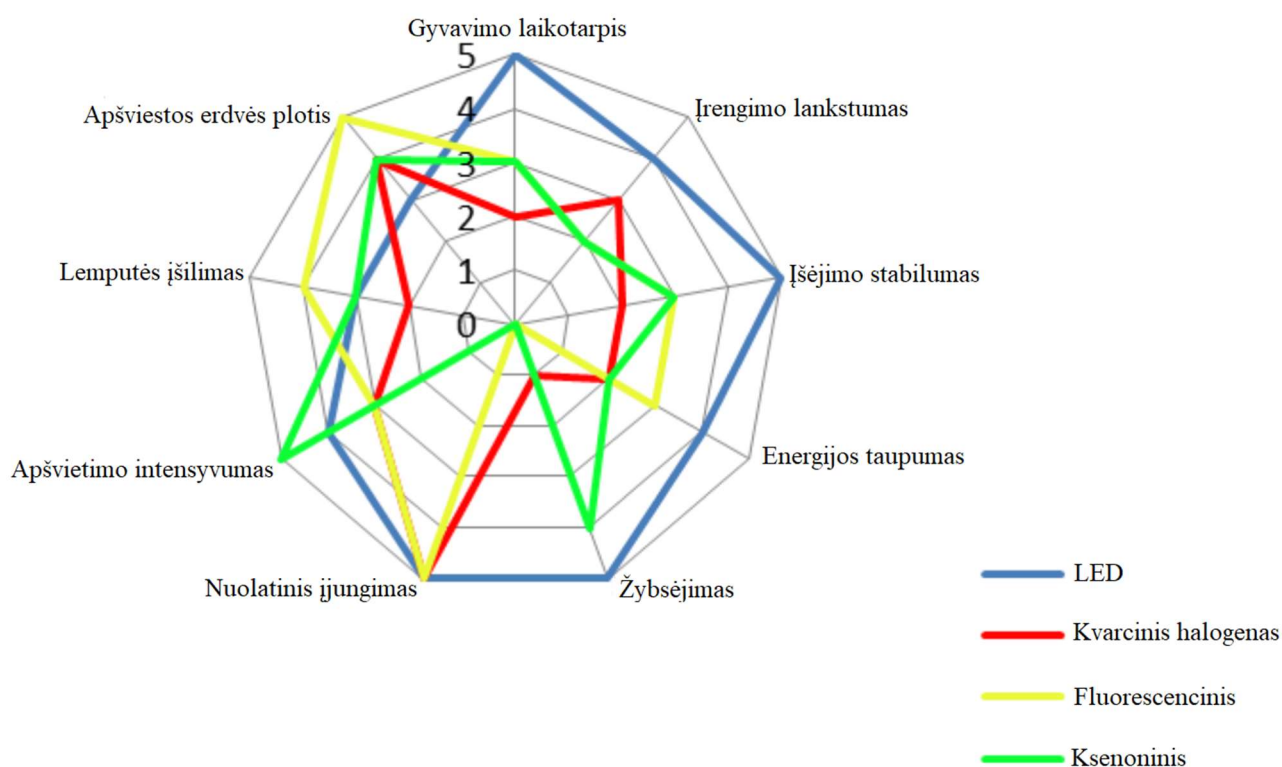
Tradiciniai vaizdų klasifikavimo algoritmai yra sukurti pasinaudojant funkcija, kuri yra sudaroma rankiniu būdu. Tai vadinama funkcijos išskyrimu konkrečiai užduočiai [14, 18]. Jos išskyrimas yra ilgalaikis procesas, kuris turi būti atliktas atskirai kiekvieną kartą prireikus klasifikuoti gautus vaizdus [14–18]. Tiek programinė, tiek atvirojo kodo programinė įrangos vaizdo atpažinimo sistemos yra sudarytos naudojant skirtingus vaizdo apdorojimo būdus, tokius kaip [19]:

- pikselių skaičiavimas (šviesių ir tamsių pikselių skaičiavimas);
- binarizavimas (spalvų konvertavimas iš pilkų atspalvių dviem spalvomis: balta ir juoda);
- segmentavimas (naudojamas objektams surasti ir (arba) skaičiuoti);
- „sunku“ atpažinti vaizdą (rasti objektą, kurį galima pasukti, iš dalies paslėpti arba pakeisti jo dydį);
- brūkšninių kodų nuskaitymas (brūkšninių kodų dekodavimas, nuskaitytas ar nuskaitytas mašinomis), teksto atpažinimas (automatinis teksto – raidžių ir skaičių nuskaitymas, pvz., kaip serijos numeriai);
- matavimas (objekto dydžio matavimas);
- krašto aptikimas (krašto aptikimo objektas);
- šablonų derinimas (konkrečių šablonų suradimas, derinimas ir (arba) skaičiavimas);
- kiti.

Daugeliu atvejų, norint atlikti išsamų patikrinimą, vaizdo atpažinimo sistemoje naudojami šių apdorojimo būdų deriniai. Pvz., brūkšninius kodus nuskaityti sistema taip pat gali patikrinti objekto paviršių, kad aptiktų įbrėžimus ar kitus pažeidimus ir pamatuotų pagaminto komponento ilgį bei plotį [19].

2. Apšvietimas

Užfiksuojamų nuotraukų vaizdo atpažinimo įrangos stebimoje zonoje kokybei įtakos turi parinktas apšvietimas. Ryškesnius vaizdus galima gauti parinkus tinkamą apšvietimą, atsižvelgiant į aplinką, stebimą objektą (ar atspindi / sugeria šviesą), naudojamus kameros filtrus bei parinktus sistemos jutiklius. Dažniausiai parenkami apšvietimai: kvarcinis halogenas, LED, metalo halogenidas (gyvsidabris), ksenonas, aukšto slėgio natrius. Sistemai parinkti įtakos turi ne tik apšvietimo kokybė, bet ir gyvavimo laikotarpis, kainos ir kokybės santykis, išilimas, stabilumas, įdiegimo paprastumas bei intensyvumas [5, 10]. Tai galima pamatyti 3 paveiksle.



3 pav. Skirtingų apšvietimų savybės [20]

Dažniausiai naudojami fluorescenciniai ir kvarciniai-halogeniniai apšvietimo šaltiniai. Tačiau pastaraisiais metais LED apšvietimas tapo standartu, nes jis yra vienas geriausių variantų kainos ir kokybės atžvilgiu. Apšvietimo šaltinių palyginimas pateiktas 3 paveiksle [5, 10, 21–22]. LED apšvietimas naudojamas, kai reikalingas taikymo lankstumas, išvesties stabilumas, energijos taupumas (išsaugoma 50 proc. ir daugiau elektros energijos) bei ilgaamžiškumas [20, 23]. Priklausomai nuo apšvietimo reikalavimų, dažnai tam tikrai apšvietimo sistemai gali būti naudojamas daugiau nei vienas šaltinio tipas, ir dauguma ekspertų sutinka, kad vienas šaltinio tipas negali adekvačiai išspręsti visų apšvietimo klausimų [20]. Tikslesnė informacija apie apšvietimo šaltinius pateikta 2 lentelėje.

Apšvietimo sistemų pagrindas – jų išplanavimas stebimoje teritorijoje (3D erdvėje tarp objekto, šviesos bei kameros) [5, 10]. Kameros ir apšvietimo šaltinių parinkimas bei išdėstymas yra vienas pagrindinių žingsnių sėkmingos vaizdo atpažinimo sistemos sukūrimo, nes aukštos kokybės vaizdų gavimas gali supaprastinti vaizdo atpažinimo algoritmą bei pakelti sistemos kokybę [8–9]. Žemo lygio vaizdo apdorojimo užduotys, tokios kaip segmentavimas, yra neatsiejamos vaizdo atpažinimo technologijos panaudojime.

2 lentelė. Skirtingų šviesos šaltinių palyginimas [24]

Šviesos šaltinis	Darbinė įtampa	Gyvavimo laikotarpis	Spalvos temperatūra, K	Senėjimo poveikis
LED	Žema įtampa (12 V)	20000–100000 valandų	2700–8000	Pakeičia spalvų koordinates
Halogeninis	Veikia su maža įtampa (pradedant 1,5 V)	300–2000 valandų	3000–3400	Laikui bėgant ryškumo kritimas (dreifas)
Fluorescencinis	Aukšta įtampa ≤ 250 V	5000–12000 valandų	3000–6000	Po 1200 val. 50 procentų ryškumo kritimas
Ksenoninis	Veikia su aukšta įtampa (250 V)	1000000 tūkstančių blyksnių	5500–12000	50 procentų ryškumo kritimas po kelių milijonų blyksnių

Su apšvietimo sąlygų pasikeitimu, naudojant žemo lygio vaizdo atpažinimo sistemą (n spalvotą, naudojamą, kai svarbi elementų forma / išmatavimai, o ne jų spalva), susitvarkoma dviem būdais [21]:

- sistemai parašoma programa, kuri pagal apšvietos jutiklių parodymus išskaičiuoja kokius ir kada sistemos parametrus (kamerės jautrumą, poziciją ir t. t.) reikia automatiškai pakeisti; tokia sistema negali dirbti tamsoje. Ji veiks esant saulės apšvietimui arba lempų apšviestoje patalpoje (cecho apšvietime). Taip pat gali veikti, jei pati kamera turi naktinio matymo funkciją;
- sudaromos kontroliuojamos apšvietimo sąlygos į sistemą įdedant išorinį apšvietimo šaltinį.

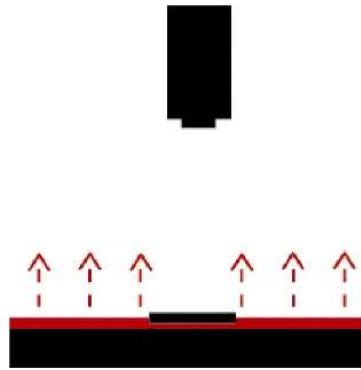
Taikant realaus laiko vaizdo atpažinimo programas, geriausia pasirinkti išorinį šviesos šaltinį scenai apšviesti. Vaizdo atpažinimo sistemos tiriamas objektas bus tinkamai apšviestas, jei apšvietimo algoritmas bus suformuotas, atsižvelgiant į aplinkos apšvietos pokyčius erdvėje (sakykim, detalei judant konvejeriu, jos apšvietimas turi išlikti pastovus) ir laike (jei yra gaunamas papildomas apšvietimas iš saulės, į tai atsižvelgiant lempų ryškumas turi padidėti ar sumažėti, kad tiriamas objektas būtų apšviestas pastoviu intensyvumu). Taigi, išorinis apšvietimas yra svarbus vaizdo atpažinimo sistemų naudojime [21].

Galimi apšvietimo tipai [11, 20]:

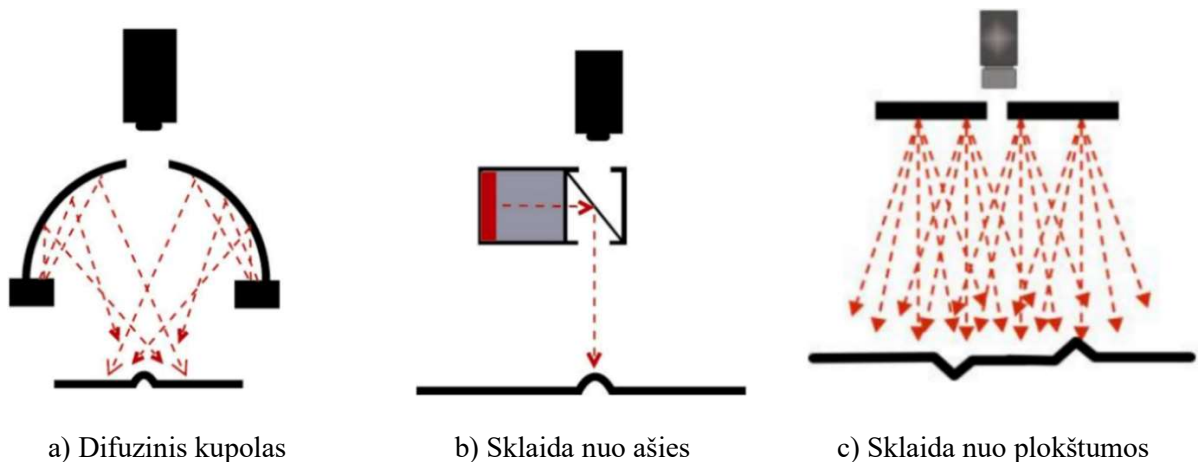
- galinis apšvietimas;
- difuzinis (pilno lauko) apšvietimas;
- ryškaus lauko apšvietimas;
- tamsaus lauko apšvietimas.

Galinis apšvietimas – tai toks apšvietimas, kai objektas (produktas) yra uždedamas ant šviesos šaltinio. Toks apšvietimas naudingas norint aptikti broką, objekte atsiradusias skylės ir tarpus, kurių pagal specializaciją neturėtų būti. Naudojant šį būdą, defektai yra akivaizdūs, kadangi šviesa sklinda per tiriamo objekto įtrūkimus / skylės [11, 20] (žr. 4 pav.).

Difuzinis apšvietimas – tai toks apšvietimas, kai difuzinis šviesos šaltinis yra pastatomas už tiriamo objekto ir apšviečiamas ne pats objektas, o tik jo kontūras. Yra trys pagrindiniai metodai difuziniam apšvietimui gauti: a) naudojant difuzinį kupolą; b) naudojant šviesos sklaidą nuo ašies; c) naudojant šviesos sklaidą nuo nelygios plokštumos [11, 20] (žr. 5 pav.).



4 pav. Galinis apšvietimas [11, 20]



5 pav. Difuzinis apšvietimas [11, 20]

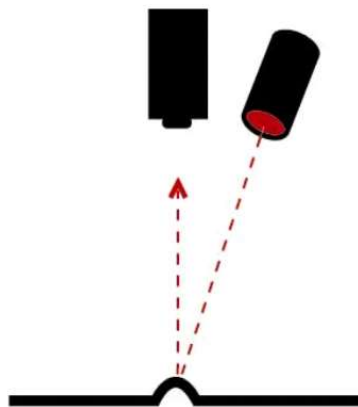
Difuziniai kupolo žibintai efektyviai apšviečia kreivus, veidrodinius paviršius, pvz., automobilių pramonėje naudojami keliui ir priešais važiuojantiems automobiliams apšviesti [11, 20].

Ryškus lauko apšvietimas (įskaitant ir saulės spindulius) yra dažniausiai naudojamas apšvietimo tipas, kuris nuo viso šviesaus lauko apšvietimo skiriasi tuo, kad yra kryptingai nukreiptas iš taškinio šaltinio. Šis apšvietimo tipas tinka kontrastui sukurti ir topografinę detalei gerinti [11, 20] (žr. 6 pav.).

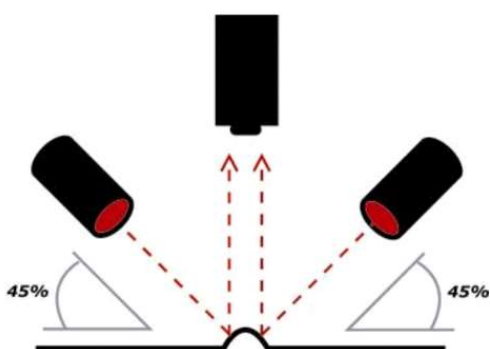
Tamsi lauko apšvietimo technika apšviečia tiriamą objektą 45 laipsnių kampu. Bet kokie paviršiaus netolygumai – įbrėžimai, briaunos, įspaudai, įpjovos – atspindi šviesą į kamerą, todėl šie paviršiaus ypatumai atrodo ryškiau nei likusi tamsi dalis. Šią techniką galima sukurti naudojant bet kokį kryptinio apšvietimo variantą (juostą, žiedą, tašką), leidžiantį šviesą nukreipti į tiriamo objekto paviršių (žr. 7 pav.) [25].

8 paveiksle matyti, kad esant tamsaus lauko apšvietimui, objekto veidrodinio paviršiaus trūkumai yra aiškiai matomi [11, 20].

Dažniausiai taikomi apšvietimo metodai: tamsaus lauko ir tiesioginis tiriamo objekto apšvietimai. Naudojant tamsaus lauko apšvietimą (TLA), gerai matomas tiriamo objekto kontūras, taip pat mažėja nepageidaujami atspindžiai. Taikant TLA, gali būti nustatyta medžiagos (detalės) paviršiaus struktūra / tekstūra, nes apšviečiami visi objekto iškilimai. Trūkumas – gali susidaryti šešėliai ant apšviečiamo paviršiaus.

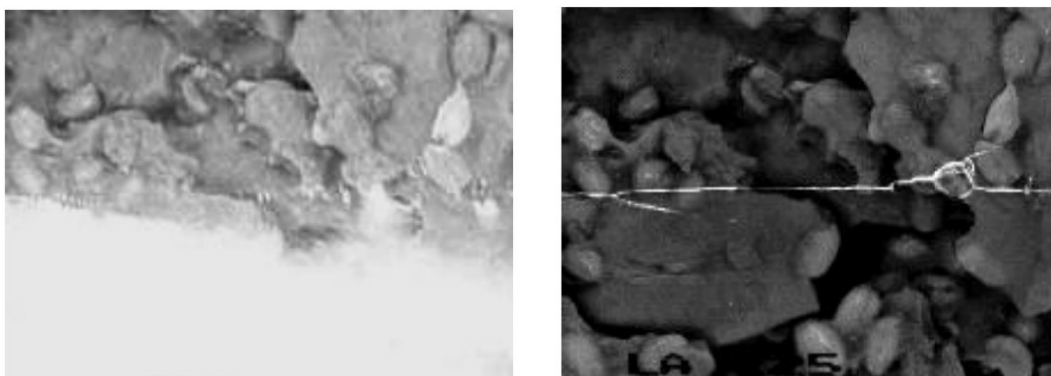


6 pav. Ryškaus lauko apšvietimas [11, 20]



7 pav. Tamsaus lauko apšvietimas [11, 20]

Ši technika taikoma veidrodinių paviršių trūkumams nustatyti [11, 20].

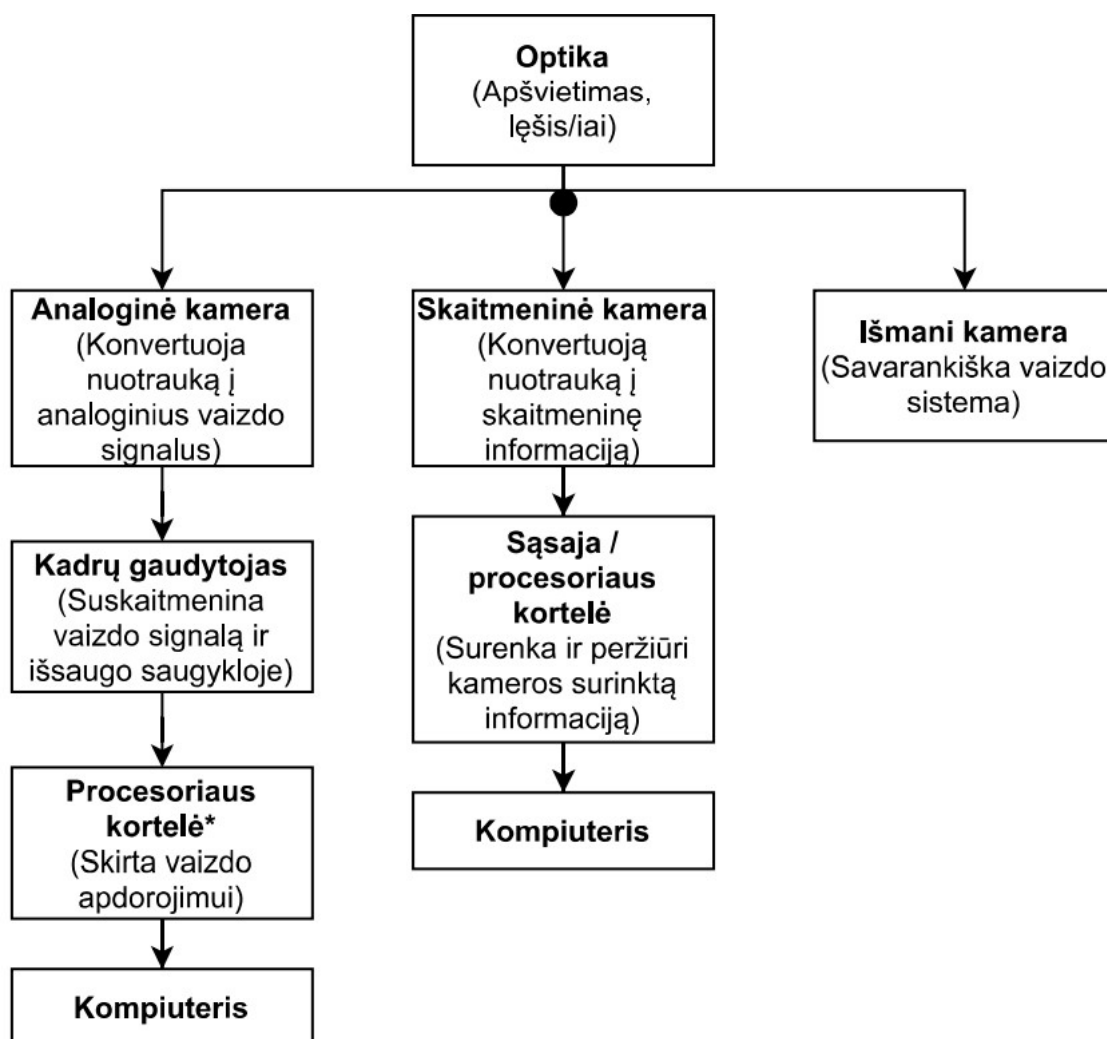


8 pav. Žemės riešutų maišelis (veidrodinis paviršius). Kairėje – esant ryškiai lauko žiedo šviesai. Dešinėje – esant tamsiam lauko žiedui [11, 20]

Pagrindiniai tiesioginio objekto apšvietimo trūkumai: apšvietimas gali būti per ryškus, esant blizgiam paviršiui, šviesos šaltinio kontūrai atsispindi į kameros objektyvą [11–20].

3. Vaizdo atpažinimo sistemose naudojamos kameros

Parenkant kamerą vaizdo atpažinimo sistemai, būtina įvertinti sekančius parametrus: skiriamąją gebą, kiek kadrų per sekundę reikia įrašyti ir ar reikia pilkų / spalvotų vaizdų. Taip pat kamera turi turėti objektyvą su vaizdo padidinimo funkcija. Šviesos šaltiniai turėtų būti įrengti taip, kad gaminamas ar apdorojamas objektas būtų apšviestas vienodu šviesos intensyvumu [11–12, 26]. Kamera ir jos objektyvas nustato vaizdo matymo lauką, skiriamąją gebą ir kitas vaizdo savybes [19]. Pagrindiniai vaizdo atpažinimo programoje naudojami kamerų tipai pateikti 9 paveiksle.



9 pav. Skaitmeninių ir analoginių kamerų blokinė diagrama [19]

Kuriant vaizdo atpažinimo sistemą, reikia apsvarstyti esminius sistemos komponentų parinkimo klausimus. Fotoaparatas ir objektyvas turi būti parenkami atsižvelgiant į vaizdo atpažinimo sistemos paskirtį [11, 27]. Skirtingi kamerų modeliai gali sąlygoti skirtingų objektų dydžio matavimą, paviršiaus defektų tikrinimą ar mėginio spalvos įvertinimą. Dvi vienodos kameros neegzistuoja [11, 28].

Daugumoje vaizdo atpažinimo kamerų yra naudojami krūvio sąsajos įtaisai (angl. *charge-coupled device*, CCD). Įkrova iš kiekvienos pikselių linijos perkeliama žemyn pikselis po pikselio ir eilutė po eilutės į stiprintuvą, kuriame formuojamas vaizdo signalas [19].

Naudojamos dviejų tipų fotoaparatus sąsajos: analoginės ir skaitmeninės. Analoginėje kameroje (žr. 10 pav.) jutiklio signalas paverčiamas analogine įtampa ir siunčiamas kadru gaudytojui stebėjimo sistemos kompiuteryje [19].



10 pav. Analoginės kameros pavyzdys [19, 29]

Daugelyje naujų vaizdo atpažinimo sistemų naudojama skaitmeninė sąsaja (žr. 11 pav.).



11 pav. Kamerų tipai: a) skaitmeninė; b) savarankiška vaizdo sistema [30–31]

Kiekvieno pikselio signalą kamera skaitmenina, o duomenys skaitmenine forma siunčiami tiesiai į kompiuterį. Skaitmeninis signalas nėra veikiamas triukšmo, todėl pasižymi geru atitikimu tarp kiekvieno jutiklio fiksuojamų pikselių ir matomo vaizdo. Kadangi signalas jau suskaitmenintas, kadru gaudytoją pakeičia paprasta sąsajos plokštė [7].

3.1. Analoginių ir skaitmeninių vaizdo atpažinimo kamerų palyginimas

Analoginiai signalai gali susilpnėti dėl elektromagnetinių trukdžių, sukeltų kitos gamyklinės įrangos, pvz., elektros variklių ar aukštos įtampos kabelių. Didėjant triukšmo lygiui, mažėja dinaminis diapazonas – pradinis signalas, padalytas iš analoginių kamerų triukšmo. Dinaminis diapazonas nustato, kiek informacijos galima perduoti iš kameros į kompiuterį [32].

Skaitmeniniai signalai yra apsaugoti nuo elektrinio triukšmo, todėl skaitmeniniai fotoaparatai turi didesnę dinaminę diapazoną ir perduoda tikslesnį signalą į kompiuterį. Tipinis skaitmeninių fotoaparatus dinaminis diapazonas yra nuo 55 iki 60 dB, o analoginių – apie 45–50 dB [32].

Vienas iš pagrindinių parametru, apibūdinančių kamerą, yra skiriamoji geba, kurią sudaro du komponentai [32]:

- masyvo jutimo elemento arba pikselių skaičius;
- kiekvieno jutimo elemento dydis.

Analoginės kameros paprastai naudoja analoginę (angl. *video graphics array*, VGA) vaizdo formatą, kuris skiria maždaug 640×480 taškų skiriamąją gebą. Kita vertus, skaitmeniniai fotoaparatai gali turėti 80 megapikselių ar didesnę skiriamąją gebą. Analoginių ir skaitmeninių fotoaparatus elemento dydis paprastai yra nuo 3 iki 20 mikronų [32].

Antras pagrindinis parametras – kadru dažnis arba greitis, kuriuo kamera gali pateikti nuoseklius vaizdus. Kuo didesnis kadru nuskaitymo dažnis, tuo daugiau patikrinimų, matavimų ar identifikacijų galima atlikti per tam tikrą laiką. Pikselių skaičius ir kadru dažnis yra susiję, todėl kuo daugiau taškų turi kamera, tuo lėtesnis kadru nuskaitymo dažnis. Tačiau tai nėra griežta taisyklė, nes smulkesnės geometrijos puslaidininkiai paprastai užtikrina didesnę poslinkio greitį, todėl dviejų to paties pikselių skaičiaus kamerų kadru dažnis gali būti skirtingas [32].

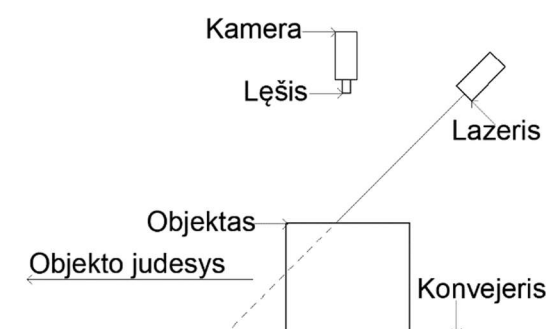
Tipiškas 640×480 taškų analoginių fotoaparatus dažnis siekia 30 kadru per sekundę. Skaitmeniniai fotoaparatai gali užtikrinti tą patį kadru dažnį, turėdami dviejų megapikselių (1600×1200 pikselių) skiriamąją gebą. Skaitmeniniai 16 megapikselių fotoaparatai užtikrina trijų kadru per sekundę greitį [32].

Analoginės vaizdo atpažinimo kameros paprastai yra pigesnės už skaitmenines. Jos kainuoja apie 165 EUR (200 dolerių). Analoginių kamerų kadru griebtuvai taip pat kainuoja apie 165 EUR. Skaitmeninių vaizdo atpažinimo kamerų kainos svyruoja nuo 825 iki 16 485 EUR. Skaitmeninio fotoaparato rėmelis gali kainuoti nuo 825 iki 1 650 EUR. Tačiau skaitmeninės kameros ir rėmelių griebtuvai tampa vis plačiau prieinami, o jų kainos krenta [32].

Pasirenkant kamerą mašininio matymo sistemai, reikia atsižvelgti į fotoaparato našumą ir jo kainą. Nors analoginės kameros yra pigesnės (mažiausiai keturis kartus), jų skiriamoji geba ir vaizdo kokybė yra mažesnė (dažniausiai daugiau nei tris kartus), todėl jos gali apsiriboti mažiau reikalaujančiomis programomis. Skaitmeniniai fotoaparatai yra brangesni (net keturis kartus), tačiau pasižymi didesniu greičiu ir tikslumu (net tris kartus) [32].

4. Pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodai

Kameros kalibravimas yra vidinių kameros geometrinių, optinių charakteristikų, kameros rėmelio 3D padėties ir orientacijos nustatymas (išoriniai parametrai) pasaulio koordinatės sistemos atžvilgiu [33–34]. Kalibravimas yra būtinas, norint gauti erdvinę informaciją iš dvimačio vaizdo [35]. Standartinė vaizdo atpažinimo sistema pateikta 12 paveiksle.



12 pav. Standartinė vaizdo atpažinimo sistema [36]

12 paveikslo schemeje padaryta prielaida, kad fotoaparatas sumontuotas vertikaliai, o kamera fiksuoja pilną objekto vaizdą iš viršaus. Taip pat yra priimta, kad po fotoaparatu įdėtas gerai apšviestas kalibravimo lapas, dengiantis visą regėjimo lauką ar dominantį regioną. Tipiškoje 3D objektų matavimo sistemoje gali būti naudojamas konvejeris (žr. 12 pav.). Be to, galima nuskaityti lazerio liniją, naudojant besisukantį veidrodį [36]. Labiausiai paplitusios vaizdo kamerų kalibravimo sistemos: *Tsai, Zhang* ir tiesioginis tiesinis kalibravimas [37].

4.1. Linijinis (tiesioginis tiesinis) kalibravimo metodas

Linijinis kalibravimo metodas – tai skaičiavimo sistema, kurioje naudojamas mažiausių kvadratų metodas transformacijos matricai, kuri sieja 3D taškus su jų 2D projekcijomis gauti. Taikant šį metodą, neatsižvelgiama į nelinejinių iškraipymų problemas kameros darbo metu. Siekiant padidinti tikslumą, tiesioginės tiesinės transformacijos metodą galima išplėsti įtraukiant nelinejinius veiksnius ir panaudojant nelinejines priemones jiems išspręsti [38–41]. Sistemos trūkumas tas, kad tiesinis modelis yra nenaudingas objektyvo iškraipymui modeliuoti ir reikalauja apytikslio sistemos tikslumo. Be to, kartais sunku išgauti parametru matricą dėl naudojamo numanomo kalibravimo [42].

Šį kalibravimo metodą sudaro du etapai. Pirmajame etape, naudojant linijinę transformaciją, objekto koordinatės (X_j, Y_j, Z_j) keičiamos į vaizdo koordinatės (u_{ij}, v_{ij}) . Gaunama matrica P_i (3×4) i -ajai projekcijai ir N atskaitos taškams. Tiesioginės tiesinės matricos parametrai $p_i = p_{11} \dots p_{34}$ pasitelkus vienalytės matricos formulę [43] apskaičiuojami:

$$Lp_i = 0; \quad (1)$$

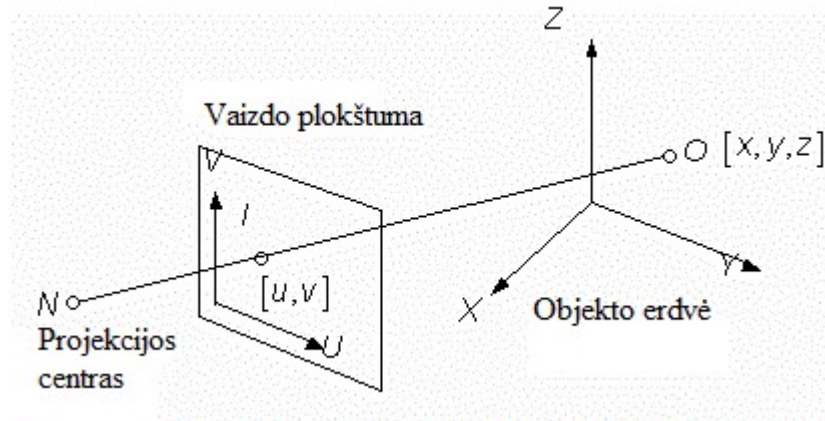
čia $L - N \times 12$ matrica [42–45], kurią sudaro atitinkamos pasaulio ir vaizdo kameros koordinatės.

Matematinio DLT modelio koordinatės taške (x, y) randamos [58]:

$$x = \frac{L_1X + L_2X + L_3X + L_4}{L_9X + L_{10}X + L_{11}X + 1}, \quad (2)$$

$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (3)$$

11 transformacijos parametrų (L_1, L_2, \dots, L_{11}), naudojamų lygtyse (2) ir (3), galima apskaičiuoti naudojant šešis taškus, kurių koordinatės žinomos abiejose sistemose (paveikslas koordinatinių sistemose ir objekto koordinatinių sistemoje) (žr. 13 pav.) [58].



13 pav. Bendras paveikslas ir objekto koordinatinių sistemos vaizdas [58]

13 paveiksle parodyta, kaip kameros optinė sistema žemėlapių tašką O objekto erdvėje atvaizduoja I vaizdo plokštumoje. $[x, y, z]$ yra taško O objekto ir erdvės koordinatės, o $[u, v]$ – vaizdo taško I vaizdo ir plokštumos koordinatės. Taigi, I, N ir O taškai yra kolinearūs. Tai vadinamoji kolinearumo sąlyga – DLT metodo pagrindas.

4.2. Zhang kalibravimo metodas

1990 m. Zhang'as pristatė naują kalibravimo metodą [34, 46]. Jis remiasi tuo, kad naudojant plokščią lentą su šachmatų piešiniu (juodų ir baltų kvadratų išdėliojimas lentoje), galima įvertinti kameros vidinius ir išorinius parametrus. Šis būdas pagrįstas Tsai dviejų pakopų kalibravimo metodu [46–47], kai pirmiausia išspendžiamos lygtys (4–7) ir tik tuomet gaunami kameros parametrai ($[h_1 \ h_2 \ h_3], (r_1 \text{ ir } r_2)$). Kitame žinginyje, atsižvelgiant į objektyvo iškraipymą, parametrai optimizuojami netiesiniu optimizavimo algoritmu. Šio metodo matematinis kalibravimo modelis išreiškiamas taip: taškai trimatėje erdvėje žymimi $M = (X_w, Y_w, Z_w)^T$, o plokštumoje $m = (u, v)^T$. Vienalytė koordinatė trimatėje erdvėje – $\tilde{M} = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$, jos koordinatės plokštumoje yra $\tilde{m} = (u, v, 1)^T$. Priklausomai nuo kameros modelio, koordinatinių trimatėje erdvėje ir vienalyčių koordinatinių trimatėje erdvėje santykis [34, 48]:

$$\lambda \tilde{m} = A [R \ t] \tilde{M}; \quad (4)$$

čia λ – proporcingumo koeficientas; $[R \ t]$ – išorinių parametrų matrica; A – kameros vidinių parametrų matrica. Tarkime, kad plokštumos Z vertė yra lygi nuliui, formulė (4) gali būti konvertuojama į žemiau pateiktą formatą [34]:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A [r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Iš formulės (5) $\lambda \cdot \tilde{m} = H \cdot \tilde{M}$. H yra 3×3 vienalytė matrica, kuri apibrėžiama taip [34]:

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] = sA[r_1 \quad r_2 \quad t]; \quad (6)$$

čia s yra proporcinis koeficientas. Pateikus plokštuminį lentos vaizdą, gaunama vienalytė matrica H [34, 49]. Remiantis sukimosi matricos R savybėmis, apskaičiuojami vienetiniai stačiakampiai vektoriai (r_1 ir r_2) [34]:

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (7)$$

Formulė (7) – pagrindinis kameros vidinių parametrų apribojimas. Kai surandamas vektorius $A^{-T} A^{-1}$, pagal vienalytę matricą H (homografijos matricą) ir kameros vidinius parametrus, išorinius fotoaparato parametrus galima gauti, pasinaudojant formule (6) [34].

Sprendžiant kameros kalibravimo uždavinį, pradedama nuo analitinio sprendimo. Po to įvykdomas netiesinis optimizavimas, pagrįstas maksimalios tikimybės kriterijumi. Toliau įvertinamas lęšio iškraipymas. Taip gaunami abu – analitinis ir netiesinis sprendiniai.

4.3. Tsai kalibravimo metodas

Tsai kalibravimo metodas – tai dviejų žingsnių metodas, kuriame konvergencija garantuota dėl duomenų, gautų pirmame žingsnyje [42].

Taikant TTS metodą kamerei kalibruoti naudojamas atitinkamas vaizdo savybių taškų ir žinomų stebimo objekto koordinatė santykis [50–52]. Kalibruojant kamerą, plokštumos kalibravimo blokai fotografuojami iš skirtingų kampų, kad objektų taškai nebūtų toje pačioje plokštumoje. Tada, naudojant transformacijos santykį tarp keturių koordinatė sistemų, gaunami vidiniai ir išoriniai kameros parametrai, o radialinis iškraipymas koreguojamas taip, kad būtų pasiektas kameros kalibravimo tikslas [50, 53–55].

Pirmajame etape naudojamas mažiausių kvadratų metodas, kad būtų išspręsta didelio nustatymo lygtis (angl. *overdetermination equation*) ir surasti kameros išoriniai parametrai. Skaičiavimams atlikti naudojami: sukimosi (angl. *rotation*) matrica $R = [r_{11}r_{12}r_{13}; r_{21}r_{22}r_{23}; r_{31}r_{32}r_{33}]$, translacijos vektorius $T = [t_x t_y t_z]^T$, atvaizdo koordinatė sistemos koordinatės (x, y) , pasaulio koordinatė sistemos koordinatės (X_w, Y_w, Z_w) . Įvertinus koordinatė sistemos santykį, nustatomas transformacijos santykis tarp pasaulio ir vaizdo koordinatė sistemų [50]:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Remiantis apskaičiuotu santykiu tarp pasaulio ir vaizdo koordinatė sistemų, parodytu (8) formulėje, matrica išplečiama. Gaunama dviejų koordinatė transformacijos formulė [50]:

$$\frac{x}{y} = \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_x}{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}. \quad (9)$$

Formulėje (9) yra aštuoni nežinomieji, todėl jai išspręsti būtina žinoti bent aštuonis pasaulio taškus ir atitinkamas vaizdo koordinates. Turint ištrauktų funkcijų taškus, išsprendžiama lygčių sistema ir gaunamos reikšmės $r_{11}r_{12}r_{13}; r_{21}r_{22}r_{23}; r_{31}r_{32}r_{33}$ bei $t_x t_y$ [50].

Antrame etape apskaičiuojamas efektyvusis židinio nuotolis f , radialinio iškraipymo koeficientas k ir translacijos vektoriaus T parametras t_z . Žinant R , t_x , t_y , pasaulio koordinatinių sistemų perskaičiavimo santykį ir keičiant požymio taško koordinates, gaunamas parametras t_z bei visas translacijos vektorius T . Transformacijos formulė tarp kameros ir pasaulio koordinatinių [50]:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Kameros koordinatinių sistemoje esančių taškų koordinatės apskaičiuojamos pagal (10). Kameros koordinatinių sistemos transformacijos ryšys su vaizdo koordinatinių sistema pavaizduojamas taip [50]:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Kaip parodyta (11), perskaičiavus kameros ir vaizdo koordinatinių sistemas, nustatomas faktinis židinio nuotolis [50].

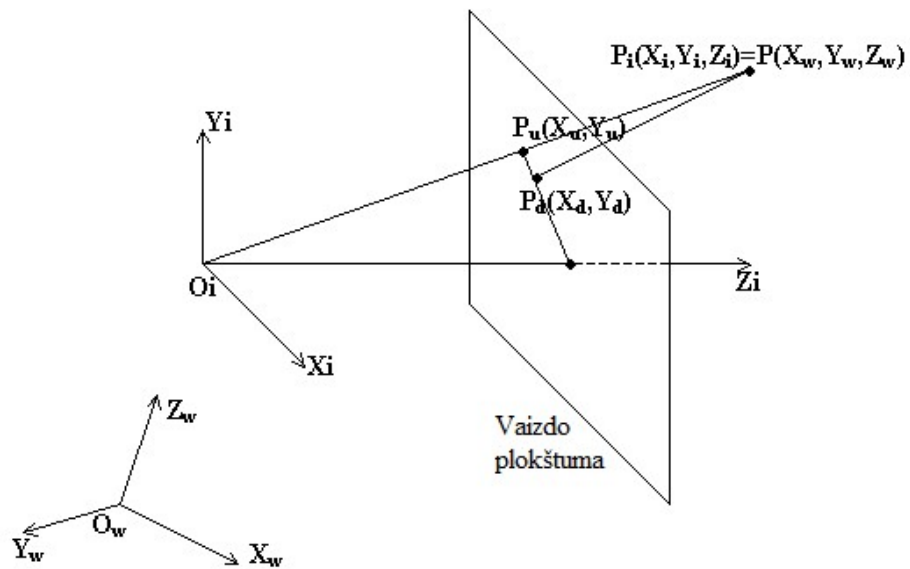
Dėl kameros objektyvo veidrodžio kreivumo keičiasi vaizdo taškų nuokrypis radialine kryptimi [50, 56]. Radialinio iškraipymo korekcijos formulėje $r^2 = x^2 + y^2$ yra ideali koordinatė vaizdo koordinatinių sistemoje [50]:

$$\begin{cases} x_{dr} = x(1 + kr^2) \\ y_{dr} = y(1 + kr^2) \end{cases}. \quad (12)$$

Iš iškraipymo korekcijos (12) galima gauti iškraipymo koeficientą k ir apskaičiuoti visus vidinius bei išorinius kameros parametrus [50]. Taikant *Tsai* kalibravimo metodą, būtina įvertinti vienuolika parametrų [57]:

- T_x, T_y, T_z – translacijos komponentai transformacijai tarp realiųjų (pasaulio) ir kameros koordinatinių;
- f – kameros objektyvo židinio nuotolis;
- S_x – perskaičiavimo faktorius, kuris įvertina nepastovumus dėl įrenginių skaičiavimo trūkumų, skenuojant ir verčiant vaizdą į skaitmeninius duomenis;
- k – lęšio radialinių iškraipymų koeficientas;
- R_x, R_y, R_z – posūkio kampai transformacijai tarp realiųjų (pasaulio) ir kameros koordinatinių;
- C_x, C_y – lęšio radialinių iškraipymų centro koordinatės.

Tsai kameros perprojekcijos modelis pateiktas 14 paveiksle.



14 pav. *Tsai* kameros perprojekcijos modelis su perspektyvine projekcija ir radialiniu iškraipymu [57]

Vienas pagrindinių *Tsai* metodo pranašumų, palyginti su *Zhang* metodu – gali rasti modelio parametrų sprendimą ir neplaniniams kalibravimo objektams (pvz., „V“ formos kalibravimo įrenginiai) [59].

5. Dalinės analitinės dalies išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę nustatyta, kad automatinė vizuali apžiūra yra pagrindinis pramoninės vaizdo atpažinimo sistemos aspektas, kadangi svarbiausia užduotis automatiniame vaizdo stebėjime yra stebimo objekto (dalių / medžiagos) matmenų palyginimas su specifikacija.
2. Nustatyta, kad naudojant vaizdų atpažinimo sistemas paviršių defektams tirti, patikimiausia naudoti tamsaus lauko arba tiesioginio tiriamo objekto apšvietimą. Naudojant tamsaus lauko apšvietimą, gerai matomas detalės kontūras bei mažėja nenumatytų atspindžių tikimybė. Tokiu būdu apšviečiant, tiksliai nustatoma medžiagos (detalės) paviršiaus struktūra, nes apšviečiami visi iškilimai, nesusidaro atspindžiai į kamerą. Deja, galimi šešėliai ant apšviečiamo objekto. Antra vertus, naudojant tiesioginį objekto apšvietimą, dažnai objektas apšviečiamas per ryškiai. Jei tiriamas objektas turi blizgų paviršių, jis atspindi šviesos šaltinio kontūrus į kameros objektyvą.
3. Mokslinių šaltinių analizė parodė, kad pramonėje naudojamos ne tik analoginės ir skaitmeninės kameros vaizdams atpažinti, bet ir išmaniosios. Nustatyta, kad analoginės kameros nuo 3 iki 100 kartų pigesnės, jų skiriamoji geba ir vaizdo kokybė yra mažesnė (640×480 taškų, o skaitmeninių minimaliai $1\,600 \times 1\,200$ pikselių), todėl gali apsiriboti mažiau reikalaujančiomis programomis. Skaitmeniniai fotoaparatai yra brangesni, tačiau pasižymi greitaveika ir tikslumu (dažniausiai analogines kameras lenkia bent 3 kartus).
4. Išsiaiškinta, kad vaizdo atpažinimo kameroms dažniausiai taikomi trys kalibravimo metodai: *Tsai*, *Zhang* ir tiesioginis tiesinis kalibravimas. Iš jų dažniausiai naudojimas *Zhang* metodas, kuris yra įdiegtas tokiose programose: *MATLAB* kameros kalibravimo įrankių dėžutė ir *MATLAB* kompiuterio vizijos įrankių dėžutė. *Tsai* kalibravimo metodas naudojamas užduotims, kurios yra neįmanomos *Zhang* metodui (pvz. modelio parametrų sprendimo radimas neplaniniams kalibravimo objektams) atlikti.

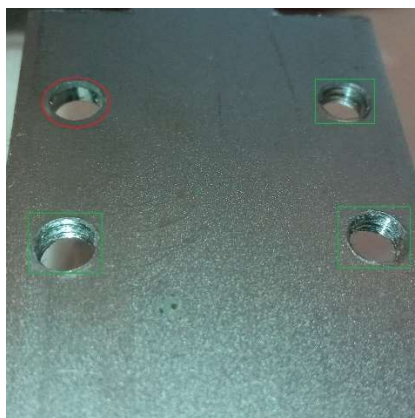
6. Projektinė dalis

Šio skyriaus pagrindinis tikslas – vaizdo kamera užfiksuoti ar visos detalėje esančios skylės prasriegtos bei nustatyti, kokią įtaką skylės skersmuo turi atpažinimo kokybei. Tyrimų objektas – plieninės detalės.

6.1. Tiriamos detalės

Tiriamos sertifikuotos detalės, pagamintos iš plieno. Baigiamajame projekte bus pateiktos tik atskirų jų dalių (sriegių / skylių) nuotraukos ir brėžiniai.

Tiriama detalė, kurios išmatavimai 59 mm × 38 mm × 43 mm, pagaminta iš plieno. Detalėje turi būti pragręžtos keturios skylės 5 mm skersmens (ant abiejų sienų) (žr. 15 pav.).



15 pav. Tiriama detalė

15 paveiksle pateikta pirmos tiriamos detalės probleminė vieta. Defektas (neprasriegta skylė) pažymėtas raudonu apskritimu, o prasriegtos skylės pažymėtos žaliais stačiakampiais.

6.2. Fizinė įranga

Sistemos fizinę įrangą sudaro:

- „InspectorPIM60“ kamera;
- išoriniai apšvietimo šaltiniai;
- bet koks kompiuteris, turintis LAN jungtį ir kuriame įdiegta „SOPAS“ programinė įranga;
- tiriamos detalės;

6.2.1. Kamera

„Sick“ įmonės pagamintos kameros „InspectorPIM60“ (žr. 16 pav.) supaprastintas prijungimo būdas pateiktas 17 paveiksle.

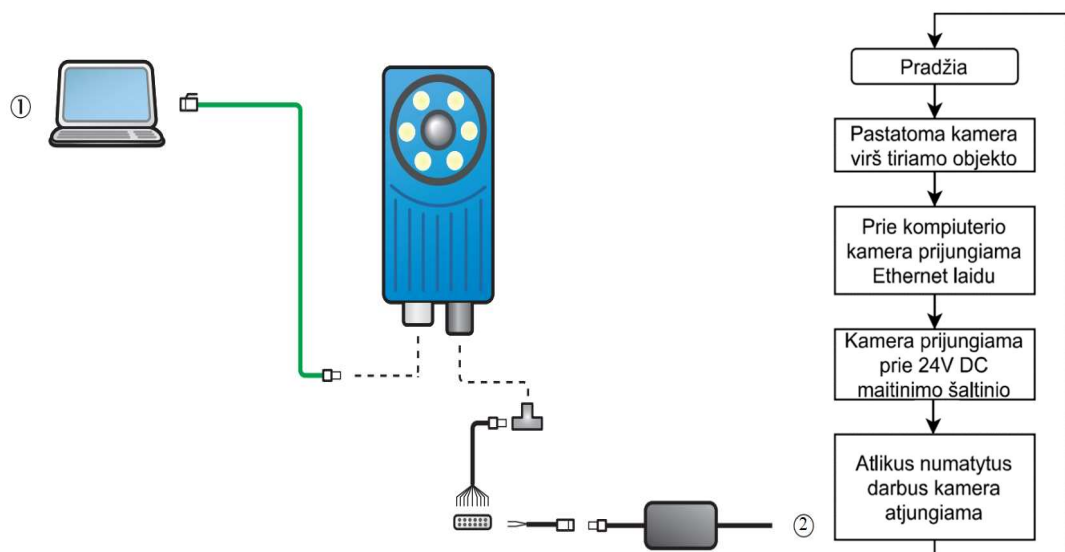
„Sick“ kameros „InspectorPIM60“ ypatybės [60–61]:

- greitas patikrinimas, padėties nustatymas ir matavimas;
- įrankių rinkinys, skirtas modeliams, kraštams, apskritimams, kraštų skaičiavimui ir pikselių skaičiavimui patikrinti;

- įrankių rinkinys, skirtas pamokytiems, laisvos formos ir modelio formos objektams pozicionuoti;
- įrankių dėžė skersmenims, kampams ir atstumams matuoti;
- konfigūracijų importavimas / eksportavimas;
- vaizdo ir rezultatų kalibravimas bei padėties derinimas;
- *Ethernet* ryšys per *EtherNet/IP* ir *Ethernet Raw*;
- HMI integracija per žiniatinklio API, įskaitant tinkintų tinklalapių importavimą;
- prieiga prie interneto naudojant HTTP;
- keičiamas objektyvas;
- išvestys loginėmis išraiškomis;
- skaitmeniniai įvesties ir išvesties plėtiniai per išorinę įvesties / išvesties dėžutę (priedas);
- patikrintus vaizdus saugokite nuotoliniame FTP serveryje;
- jutiklio raiška: 640 px × 480 px;
- veikimo atstumas $\geq 50\text{mm}$;
- integruoto apšvietimo veikimo zona: 50–200 mm nuo kameros lęšio.



16 pav. „InspectorPIM60“ kamera [60]



17 pav. Supaprastintas kameros prijungimo brėžinys [60]

17 paveiksle pateiktas kameros maitinimo ir prijungimo prie kompiuterio brėžinys, kuriame 1 numeriu pažymėtas kompiuteris, o 2 numeriu – maitinimo šaltinis.

6.2.2. Išorinis šviesos šaltinis

„Sick“ kameros turi iš anksto jose integruotą šviesos šaltinį, bet jei jo nepakanka ar yra reikalingas apšvietimas ne iš viršaus, o iš pvz., detalės šono, naudojamas išorinis šviesos šaltinis (žr. 18 pav.).

Šiuo atveju, kadangi nuo tiriamų detalių atsispindi kameros šviesos šaltinio šviesa (žr. 19 pav.), reikalingas išorinis šviesos šaltinis (žr. 3 lentelę).

Kadangi tiriamos blizgios plieninės detalės, tai tyrimui naudoti vien tik integruotą kameros apšvietimą yra nenaudinga. Šviesa iš detalės viršaus pasiskirsto nevienodai, todėl kameros programinei įrangai „SOPAS“ yra sunkiau išgauti tiriamos detalės savybes bei sulygtinti jas su iš anksto paimtu detalės pavyzdžiu. Šią problemą išspręsti yra keli galimi būdai:

- patalpinti detalę ant šviesos šaltinio;
- detalę apšviesti iš šono ar šonų.



18 pav. „YONGNUO“ LED YN-160S išorinis šviesos šaltinis [62]

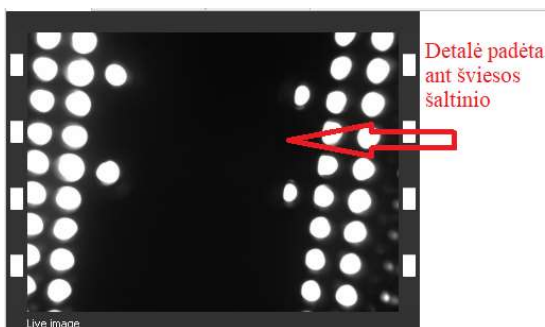


19 pav. „Sick“ PIM60 kameros šviesos šaltiniu apšviesta tiriamą detalę

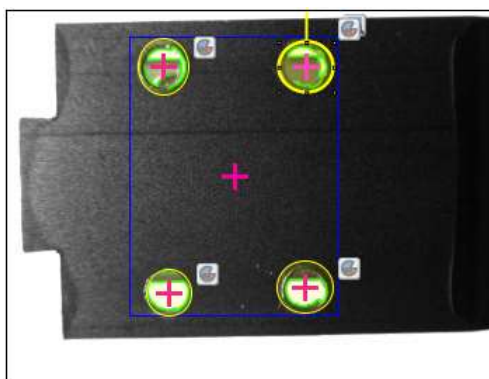
3 lentelė. „YONGNUO“ LED YN-160S išorinio šviesos šaltinio specifikacija [62]

Matmenys	Masė	Galios sunaudojimas	Šviesos temperatūra	Diodų kiekis	Maitinimas
160 × 160 × 60 mm	0,34 kg	3–9 W	5500 °K	160 vnt.	DC 6–9 V

Kadangi iš apačios apšvietus detalę nematomi jos sriegiai (tyrimui svarbiausios dalys) (žr. 20 pav.), priimta, kad geriausias detalės apšvietimo variantas yra iš šono (žr. 21 pav.).



20 pav. Detalė padėta ant „YONGNUO“ LED YN-160S išorinio šviesos šaltinio



21 pav. Detalė apšviesta iš šono „YONGNUO“ LED YN-160S išoriniu šviesos šaltiniu

Palyginus 19–21 paveikslus, aiškiai matomas skirtumas – apšvietus detalę iš šono, detalės paviršius apšviečiamas tolygiau nei iš viršaus, o detalės savybės aiškiau matomos nei apšvietus iš viršaus ar apačios.

6.3. Programinė įranga

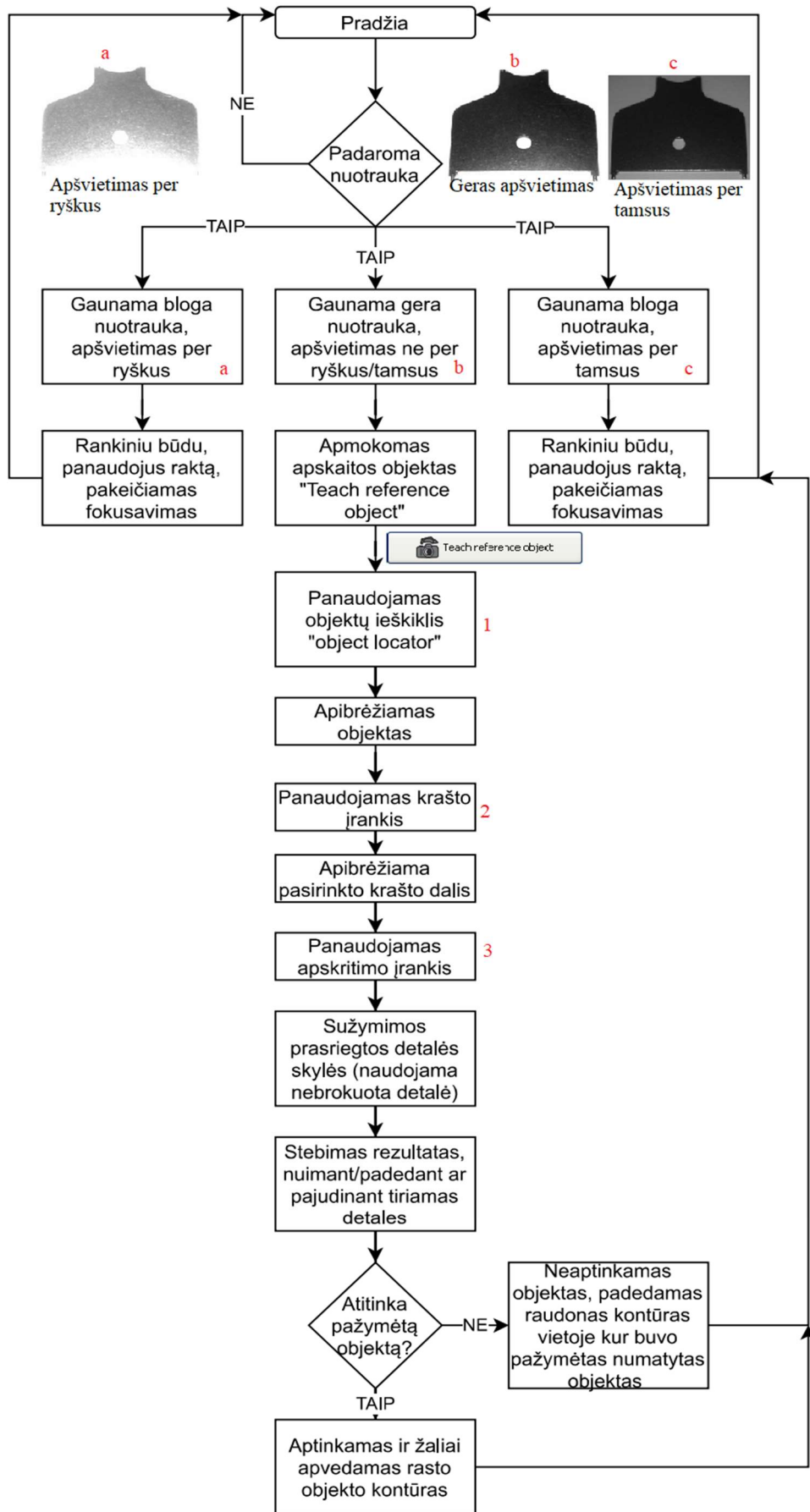
Sistemos programinė įranga – kamerą valdanti programinė įranga „SOPAS“.

6.3.1. Kameros programinė įranga „SOPAS“

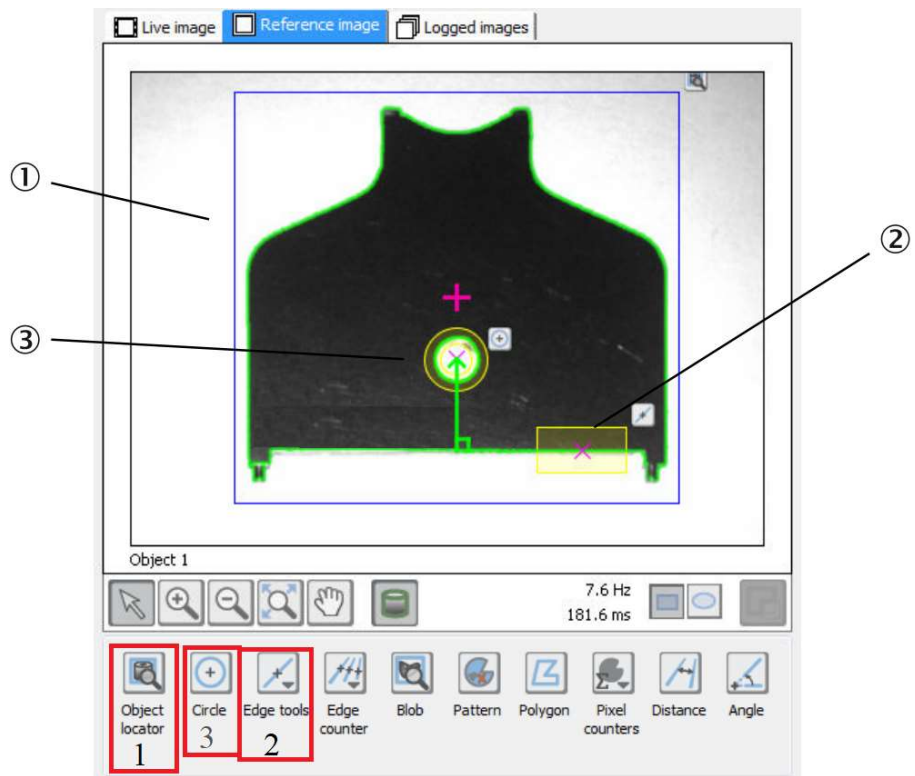
„Sick“ kameros programinės įrangos „SOPAS“ naudojimo supaprastintas algoritmas pateiktas 23 paveiksle.

Kamera „InspectorPIM60“ yra valdoma nemokama „SOPAS“ programine įranga, leidžiančia aptikti objektą pagal jo formą ir identifikacinę žymę (užrašą, įbrėžimą, lipduką, piešinį ir t. t.). Tai galima pamatyti objekto indentifikavimo pavyzdyje (žr. 23–25 pav.).

23 paveiksle pateiktas objektas, kuris bus lyginamas su tiriamu objektu (šiuo atveju tai pirma tiriama štampuota detalė). Nuotraukoje parodytas „Object finder“ funkcija identifikuotas objektas (pirma tiriama detalė). 24 paveiksle matyti, kad objekto aptikimas galimas net judinant objektą

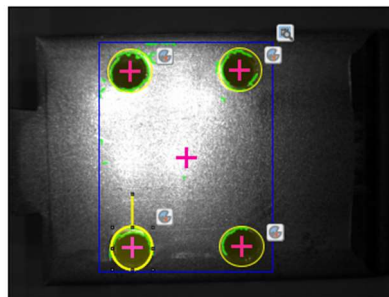


a)

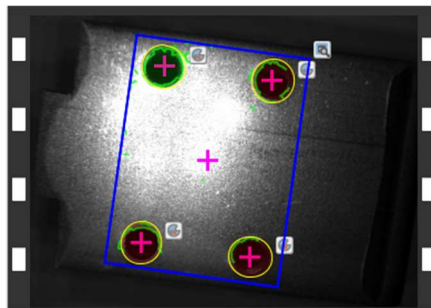


b)

22 pav. „SOPAS“ programinės įrangos naudojimo algoritmas: a) vaizdo atpažinimo algoritmas; b) programos įrankių naudojimo iliustracija [61]

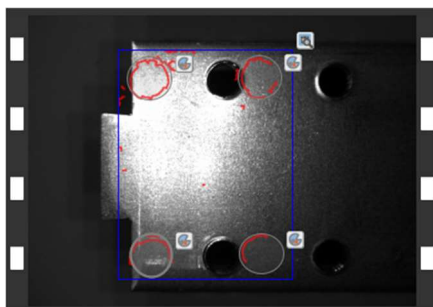


23 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas



24 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas jį pajudinus iš pradinės pozicijos

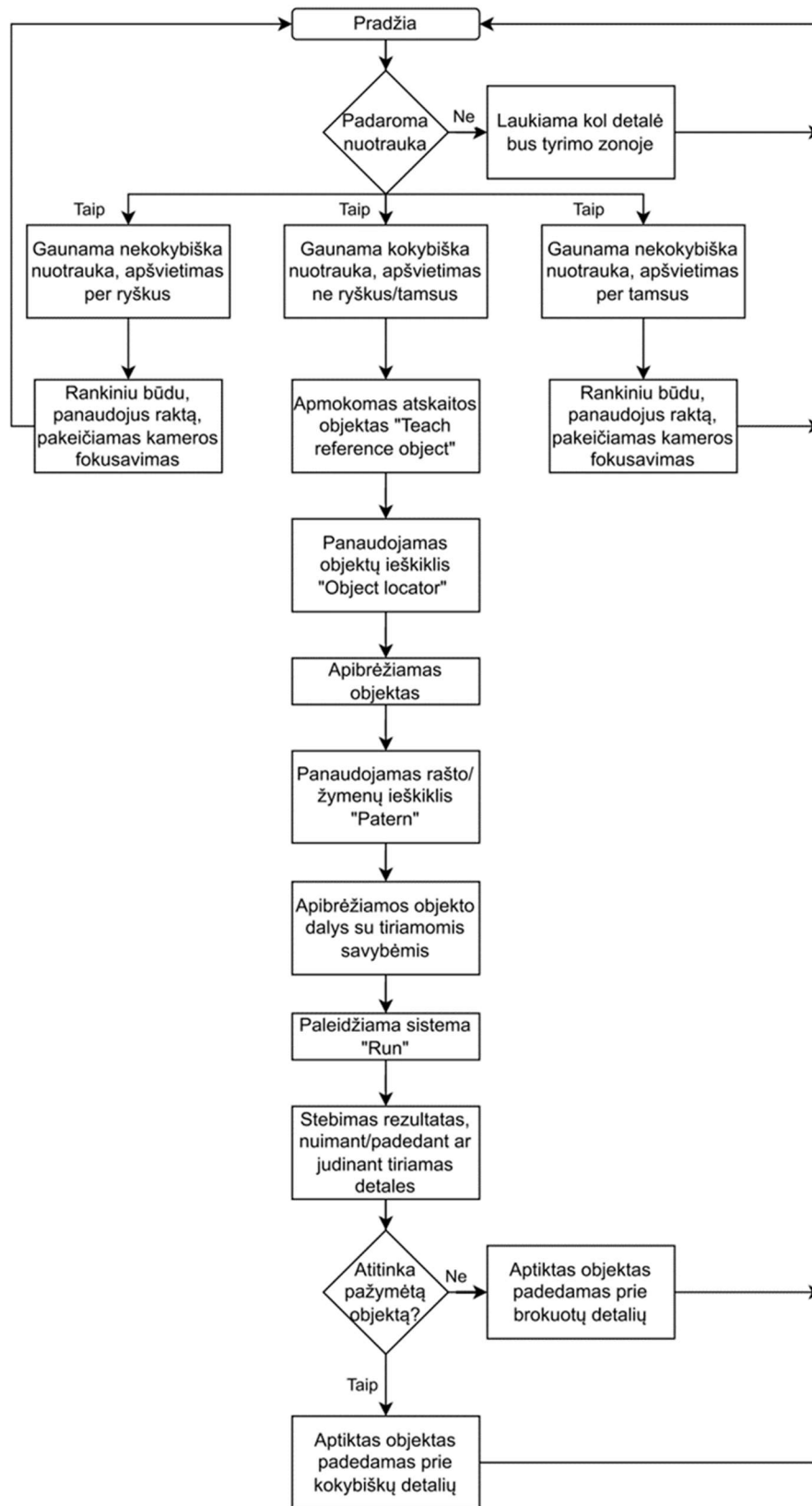
25 paveiksle matyti, kad objekto tiriamosioms dalims (skylėms) nutolus nuo kameroje integruoto šviesos šaltinio (kai nenaudojamas išorinis šviesos šaltinis), objektas ir pažymėtos jo savybės nebeaptinkamos.



25 pav. Kameros fiksuojamo objekto aptikimas jį pajudinus iš pradinės pozicijos toliau nuo šviesos šaltinio arba pakeitus objekto savybes

Norint objektą ir jo savybes užfiksuoti net ir objektui nutolus nuo kameros šviesos šaltinio, reikalingas išorinis šviesos šaltinis. Jei yra poreikis aptikti laike formą pakeičiantį objektą, sakykime, jei yra prietaisas, kuris nustatytas iš tiesios padėties po tam tikro laiko susilenkti tam tikru kampu ar pan. (ar yra žmogaus įtakojamas, pvz., uždara dėžutė yra atidaroma), reikia įvesti daugiau jo savybių: pažymėti visas jo savybes, tokias kaip paviršiaus užrašus, įbrėžimus ir t. t.

Šiam darbui reikalingas supaprastintas algoritmas pateiktas 26 paveiksle.

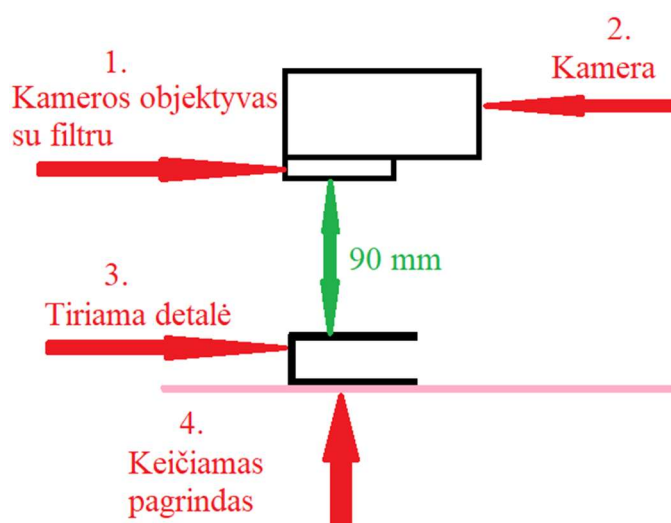


26 pav. Bendras sistemos valdymo algoritmas

26 paveiksle matyti, kad planuojama, aptikus brokuotą detalę, ją nustumti ant kito konvejerio, kur jos kokybė būtų patikrinama rankiniu būdu, o kokybiškos detalės toliau judėtų pradinio konvejeriu į iš anksto nustatytą kokybiškų detalių padėjimo vietą.

7. Pirminė eksperimentinė analizė

Tyrimas pradedamas nuo patikrinimo, kokių tikslumu kamera fiksuoja detalių defektus, esant pradiniam naudojamos įrangos išdėstymui, t. y., naudojant kamerą su skaidriu filtru ir integruotu apšvietimu be išorinio apšvietimo (žr. 27–28 pav.).



27 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

Toliau atliekamas tyrimas su penkiomis detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje, sužymėtos detalės savybėms, pateiktas 4–5 lentelėse.

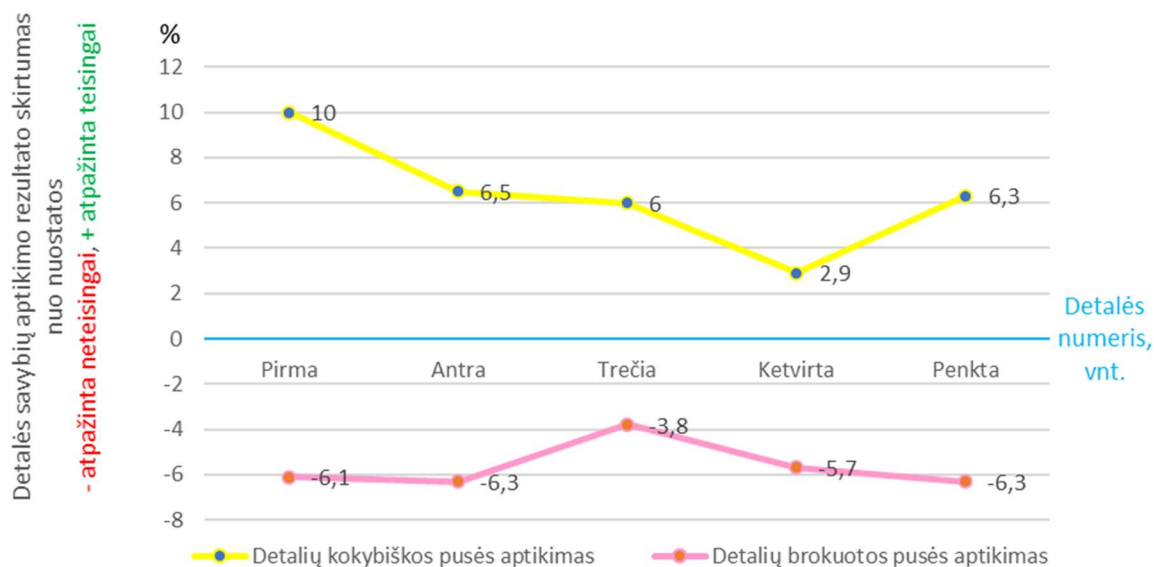
4 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	100	≥90	10	1
2	Integruotas (vidinis)	96,5	≥90	6,5	1
3	Integruotas (vidinis)	96	≥90	6	1
4	Integruotas (vidinis)	92,9	≥90	2,9	1
5	Integruotas (vidinis)	96,3	≥90	6,3	1

5 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	96,1	<90	-6,1	0
2	Integruotas (vidinis)	96,3	<90	-6,3	0
3	Integruotas (vidinis)	93,8	<90	-3,8	0
4	Integruotas (vidinis)	95,7	<90	-5,7	0
5	Integruotas (vidinis)	96,3	<90	-6,3	0

4–5 lentelėse esančių duomenų palyginimas pateiktas 28 paveiksle.

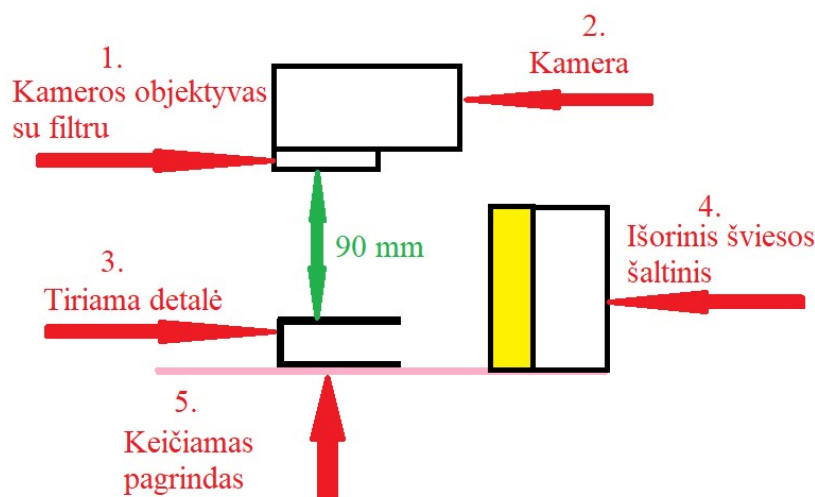


28 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant tik vidinį integruotą kameros apšvietimą ir skaidrų filtrą, sistema defektų aptikimui yra netinkama (defektai neaptikti, iš penkių brokuotų detalių neatpažinta nei viena, atpažinimo tikslumas 0 proc.).

Iki šiol rasta, kad tiriamos detalės aiškiausiai matomos 90–100 mm atstumu nuo kameros, apšvietus detalę iš šono. Tyrimui naudotos įrangos išdėstymas (žr. 29 pav.).

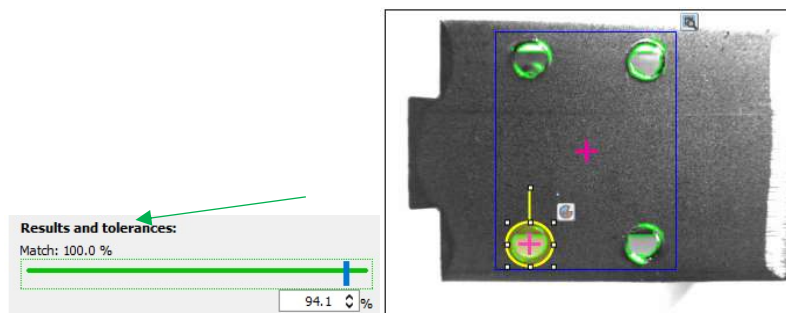


29 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

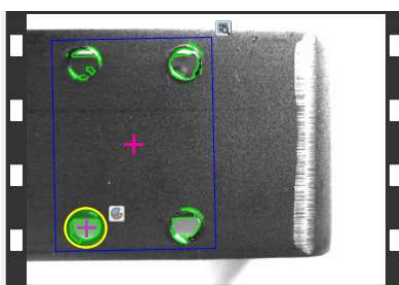
Numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas skaidrus filtras (kameros lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriamą detalę; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas kameros apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, mėlynas, žalias ir t. t.).

30 paveiksle, naudojant „Object locator“, pažymima detalės sritis, kurioje yra tiriamos skylės. Detalės defektas (nepragręžta skylė) apvedama, panaudojant „Pattern“ funkciją, ir nustatomas norimas atitikimas procentais. Sužymėjus norimas detalės savybes, paleidžiama programa, paspaudus „Run“

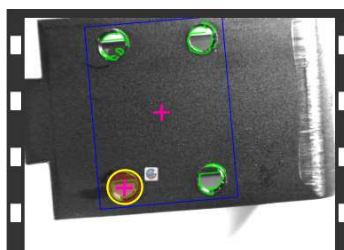
mygtuką (žr. 31 pav.). 31 paveiksle matyti, kad pajudinus detalę, sistema vis vien aptinka pažymėtas detalės skylės. Tačiau, apvertus detalės kitą pusę, kurioje nėra defekto (visos skylės prasriegtos), matoma, kad „Pattern“ funkcija pažymėta skylės vieta neatitinka neprasriegtos skylės, pvz., tai yra matoma, kad toje vietoje defekto nėra (žr. 32–33 pav.).



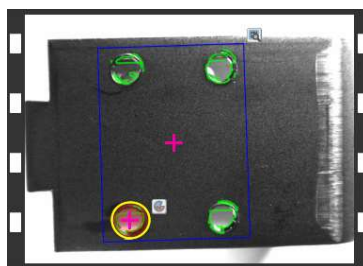
30 pav. Detalė padėta 90 mm po kamera ir apšviesta iš šono



31 pav. Pajudinama detalė padėta 90 mm po kamera ir apšviesta iš šono



32 pav. Detalės pusė be defekto



33 pav. Pajudinama detalė be defekto

Iš 32 ir 33 paveikslų matyti, kad net pajudinus detalę, negaunamas klaidingas parodymas, kad defektas yra.

Toliau atliekamas tyrimas su penkiomis detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 6–7 lentelėse.

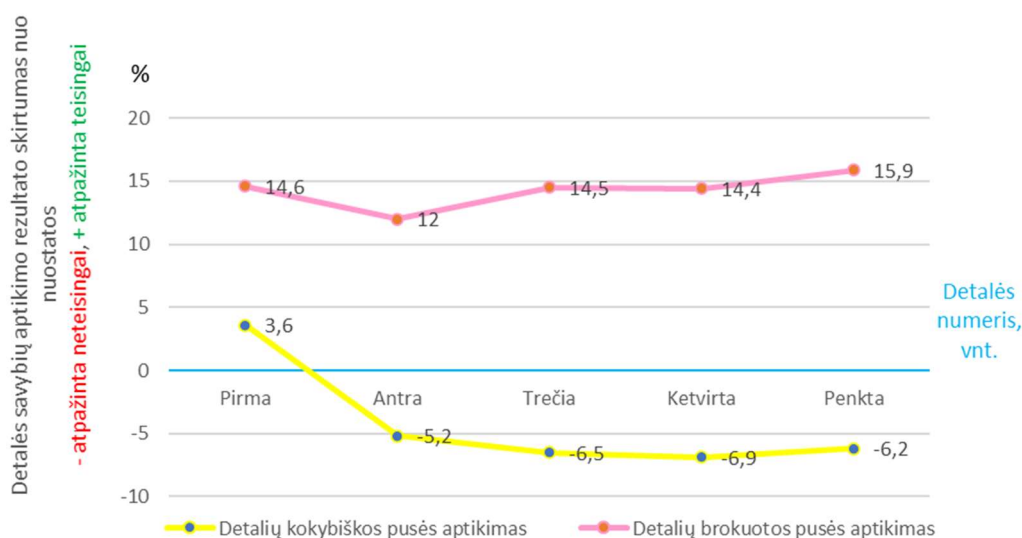
6 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	93,6	≥ 90	3,6	1
2	Išorinis	84,8	≥ 90	-5,2	0
3	Išorinis	83,5	≥ 90	-6,5	0
4	Išorinis	83,1	≥ 90	-6,9	0
5	Išorinis	83,8	≥ 90	-6,2	0

7 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	75,4	< 90	14,6	1
2	Išorinis	78	< 90	12	1
3	Išorinis	75,5	< 90	14,5	1
4	Išorinis	75,6	< 90	14,4	1
5	Išorinis	74,1	< 90	15,9	1

6–7 lentelėse esančių duomenų palyginimas pateiktas 34 paveiksle.

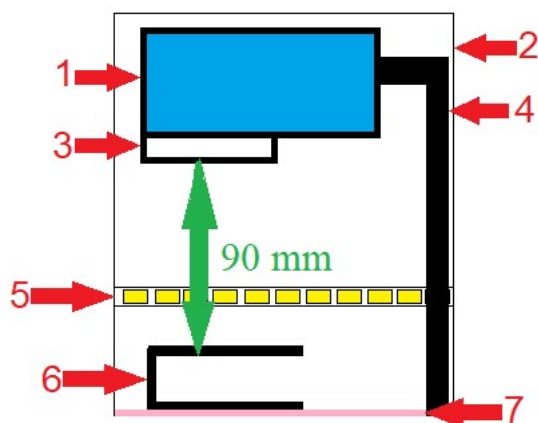


34 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad brokuotos detalių pusės buvo užfiksuotos kaip brokuotos teisingai, tačiau kaip brokas buvo užskaitytos ir kokybiškos detalės pusės keturis kartus iš penkių bandymų. Vadinas, kad kokybiškos detalės pusės aptikimas yra lygus tik 20 proc. Taigi galima daryti išvadą, kad detalės kokybei nustatyti skaidrus filtras su apšvietimu iš šono nėra tinkama kombinacija.

Toliau tyrimas pratęsimas eliminavus natūralią šviesą, apdengiant tiriamąją zoną dėže ir detalę apšviečiant tolygiai iš visų pusių LED juosta, priklijuota prie dėžės sienų (žr. 35 pav.)



35 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriama zona nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtras (kamos lęšis); 4 – kamara laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriama detalė; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su penkiomis detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 8–9 lentelėse.

8 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Kokybiška	85,4	≥90	-4,6	neteisingai
2	Kokybiška	87,6	≥90	-2,4	neteisingai
3	Kokybiška	90,1	≥90	0,1	teisingai
4	Kokybiška	87,1	≥90	-2,9	neteisingai
5	Kokybiška	87,3	≥90	-2,7	neteisingai
6	Kokybiška	83,3	≥90	-6,7	neteisingai
7	Kokybiška	79,3	≥90	-10,7	neteisingai
8	Kokybiška	81,4	≥90	-8,6	neteisingai
9	Kokybiška	82,5	≥90	-7,5	neteisingai
10	Kokybiška	59,3	≥90	-30,7	neteisingai

9 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Brokuota	65	<90	25	teisingai
2	Brokuota	66,4	<90	23,6	teisingai
3	Brokuota	70	<90	20	teisingai
4	Brokuota	69,1	<90	20,9	teisingai
5	Brokuota	64,7	<90	25,3	teisingai
6	Kokybiška	62,4	≥90	-27,6	neteisingai
7	Kokybiška	55,6	≥90	-34,4	neteisingai
8	Kokybiška	63	≥90	-27	neteisingai
9	Kokybiška	63,2	≥90	-26,8	neteisingai
10	Kokybiška	57,7	≥90	-32,3	neteisingai

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę iš keturių šonų bei naudojant skaidrų kameros filtrą detalės stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalės savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta ~6,67 proc. tikslumu, t. y., ji buvo atpažinta kokybiška tik vieną kartą iš penkiolikos bandymų). Daroma išvada, kad naudojant skaidrų filtrą, apšvietimas iš

tiriamos detalės keturių šonų, stebint detalę (nepasukta kampu) yra netinkamas, norint detalių savybėms užfiksuoti.

Toliau tyrime naudojama papildoma fizinė įranga (žr. 36 pav.):

- kameros kupolas;
- žalias, raudonas, ND2-400 bei mėlynas kameros filtrai.



36 pav. Kameros papildoma fizinė įranga [63]

36 paveiksle pateikta: 1 – skaidrus filtras, kuris naudojamas nuo šio darbo „6. Projektinės dalies“ pradžios iki „6.4. Tyrimas“; 2 – raudonas filtras, kuris kol kas išbandytas tik prie juodo fono; 3 – kupolas, kuris, pagal žinyne pateiktą informaciją, turėtų tolygiai paskirstyti šviesą, pašalinti nepageidaujamą blizgios arba atspindinčios medžiagos akinimą [63]; 4 – žalias kameros filtras; 5 – mėlynas kameros filtras.

7.1.1. Bandymas su kupolu

Tyrimui su kupolu detalė nuo kupolo nutolusi 90–100 mm ir nenaudojamas išorinis apšvietimas, tik vidinis kameroje integruotas apšvietimas, kadangi tyrimo tikslas patikrinti, ar tikrai kupolas, kaip žinyne aprašyta, leidžia tolygiai apšviesti blizgius tiriamus objektus ir kokios tai įtakos turi atpažįstant tiriamos detalės savybes. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas ir rezultatai pateikti 37 paveiksle.

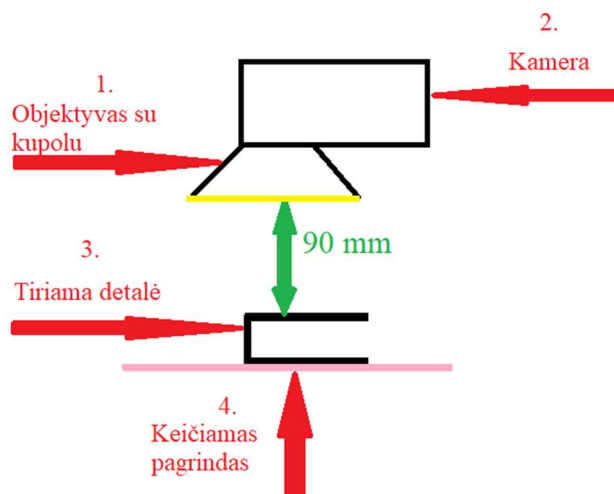
Numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas kupolas, 2 – naudojama kamera, 3 – tiriama detalė, 4 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, mėlynas, žalias ir t. t.).

38 paveiksle pateiktos „PIM60“ fiksuojamos nuotraukos, kai naudojamas vidinis apšvietimas, kupolas bei geltonas fonas.

a) tiriamoji detalė, nepajudinta iš pradinės jos pozicijos nuo jos savybių sužymėjimo (detalė be broko), b) detalė pajudinama iš pradinės pozicijos (detalė be broko), c) detalė su broku padedama vietoje kokybiškos detalės, d) brokuota detalė pastumiama arčiau kameros matymo zonos centro, e) brokuota detalė pastumiama dar arčiau kameros matymo zonos centro, f) detalė su broku padedama maždaug į pradinę poziciją, kurioje pažymėtos kokybiškos detalės savybės.

Iš užfiksuotų nuotraukų matyti, kad kameros vidinis apšvietimas su kupolu nėra toks naudingas tolygiam atspindžių detalių apšvietimui, kaip nurodyta žinyne. Atspindžiai vis vien susidaro, nors ir ne tokie ryškūs. Tačiau šio ryškumo užtenka trikdyti objekto savybių aptikimui ir palyginimui. Iš a nuotraukos matyti, kad jei detalė nejudinama iš pradinės pozicijos, jos savybės gana tiksliai

aptinkamos, tačiau, jei detalė pastumiama toliau nuo apšvietimo centro (žr. 38 pav., b), jos savybės nebeaptinkamos (dėl netolygaus apšvietimo).

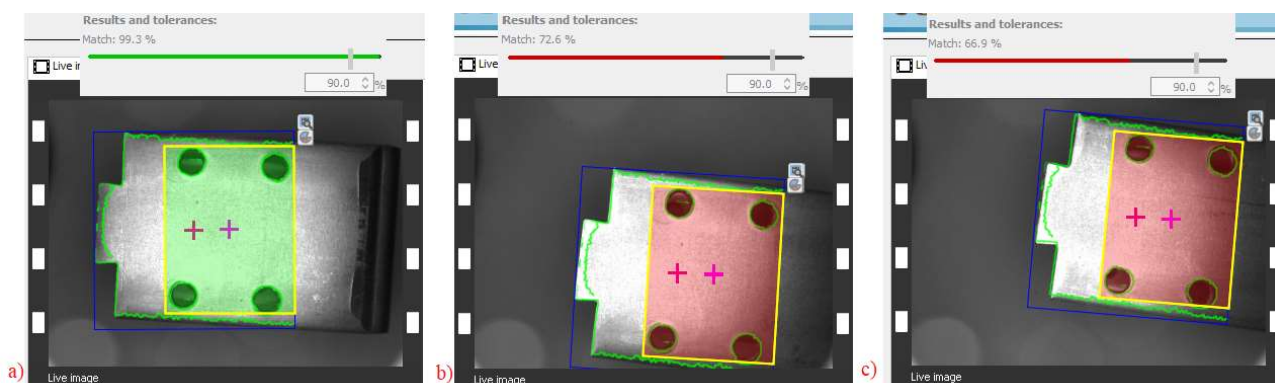


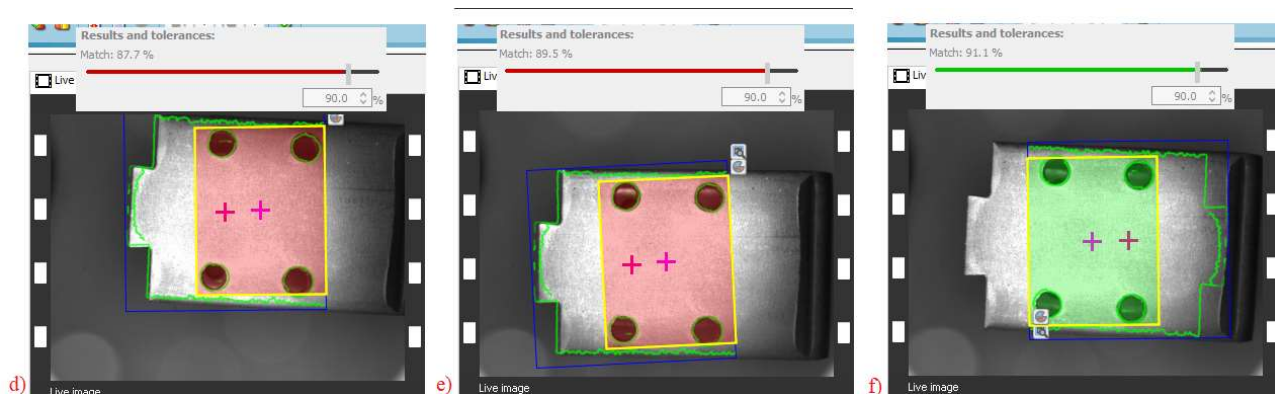
37 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros kupolą

Nuotraukose c–f (žr. 38 pav.) išvelgiama ir kita tendencija. Pastebima, kad padedant brokuotą detalę kuo arčiau apšvietimo centro, vis auga tikimybė, kad brokas bus identifikuotas kaip kokybiška detalė. Toliau atliekamas tyrimas su penkiomis detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 10–11 lentelėse.

10 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	100	≥ 90	10	1
2	Integruotas (vidinis)	98,4	≥ 90	8,4	1
3	Integruotas (vidinis)	97,8	≥ 90	7,8	1
4	Integruotas (vidinis)	97,4	≥ 90	7,4	1
5	Integruotas (vidinis)	97,8	≥ 90	7,8	1



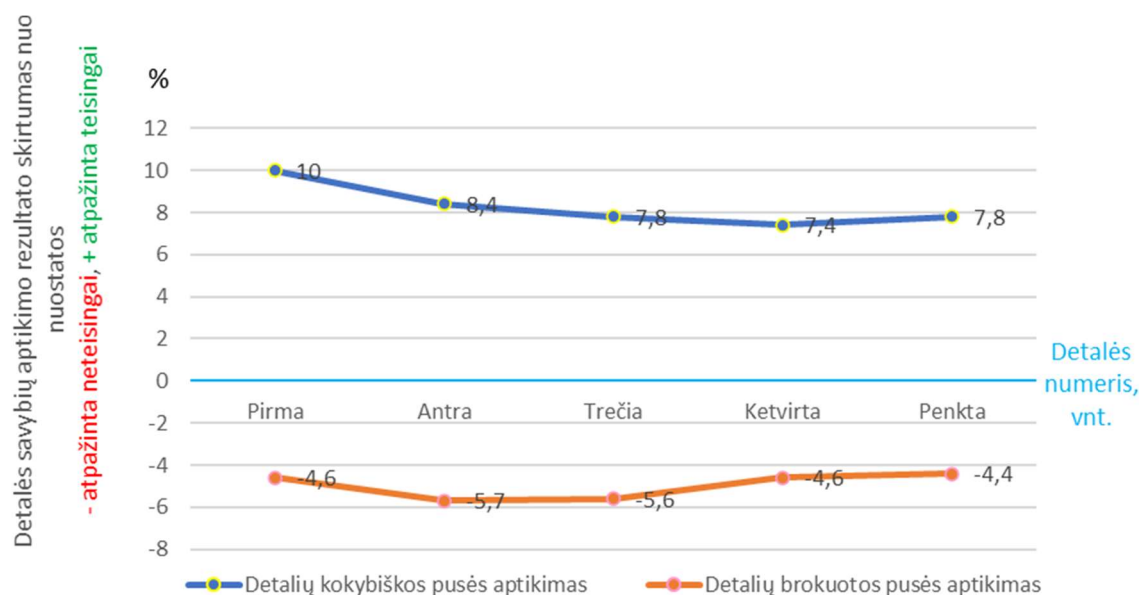


38 pav. Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant vidinį apšvietimą su kupolu (fonas geltonas)

11 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	94,6	<90	-4,6	0
2	Integruotas (vidinis)	95,7	<90	-5,7	0
3	Integruotas (vidinis)	95,6	<90	-5,6	0
4	Integruotas (vidinis)	94,6	<90	-4,6	0
5	Integruotas (vidinis)	94,4	<90	-4,4	0

10–11 lentelių palyginimas pateiktas 39 paveiksle.



39 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

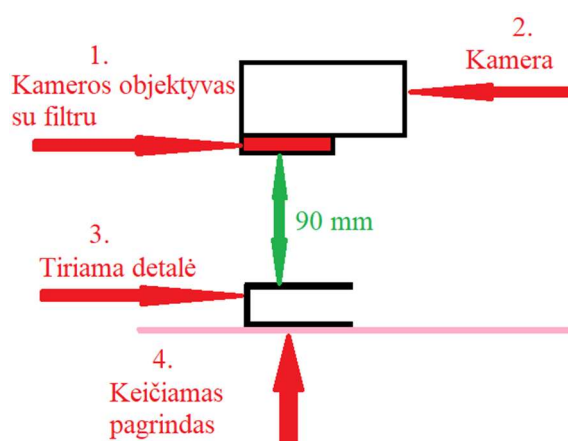
Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant tik vidinį integruotą kameros apšvietimą ir kupolą, sistema defektų aptikimui yra netinkama (defektų atpažinimo tikslumas 0 proc.).

7.1.2. Tyrimas su raudonu filtru ir vidiniu integruotu kameros apšvietimu

Tyrimui su raudonu filtru detalė nuo kameros nutolusi 90–100 mm ir nenaudojamas išorinis apšvietimas. Naudojamas tik vidinis, kameroje integruotas apšvietimas. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas ir rezultatai pateikti 40 paveiksle.

Numeriu 1 pažymėti kamera ir naudojamas raudonas filtras, 2 – naudojama kamera, 3 – tiriama detalė, 4 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, mėlynas, žalias ir t. t.).

Kadangi stebimą detalę pajudinus iš pradinės zonos, kurioje buvo sužymėtos palyginamosios detalės savybės, dėl netolygiai pasiskirsčiusio apšvietimo detalės savybės neatitinka palyginamojoje nuotraukoje esančios detalės savybėms, toliau atliekamas tyrimas su penkiomis detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 12–13 lentelėse.



40 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą

12 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

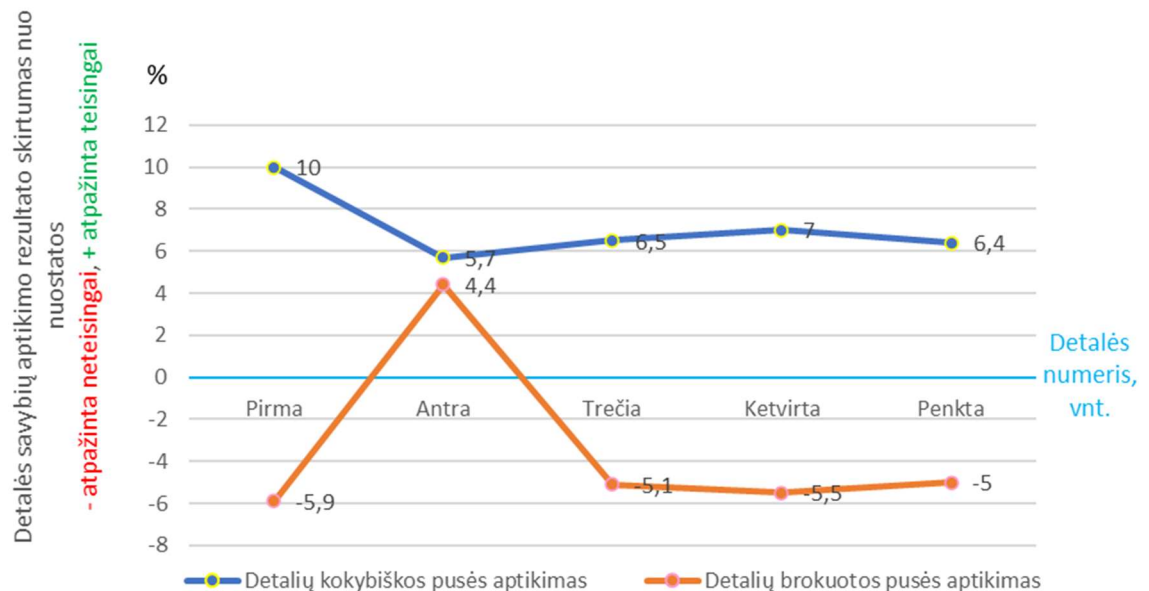
Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	100	≥90	10	1
2	Integruotas (vidinis)	95,7	≥90	5,7	1
3	Integruotas (vidinis)	96,5	≥90	6,5	1
4	Integruotas (vidinis)	97	≥90	7	1
5	Integruotas (vidinis)	96,4	≥90	6,4	1

13 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	95,9	<90	-5,9	0
2	Integruotas (vidinis)	94,4	≥90 (detalė be defektui iš abiejų pusių)	4,4	1
3	Integruotas (vidinis)	95,1	<90	-5,1	0

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
4	Integruotas (vidinis)	95,5	<90	-5,5	0
5	Integruotas (vidinis)	95	<90	-5	0

12–13 lentelėse esančių duomenų palyginimas pateiktas 41 paveiksle.



41 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant tik vidinį integruotą kameros apšvietimą ir raudoną filtrą, sistema defektų aptikimui yra netinkama (brokas aptiktas tik 20 proc. tikslumu).

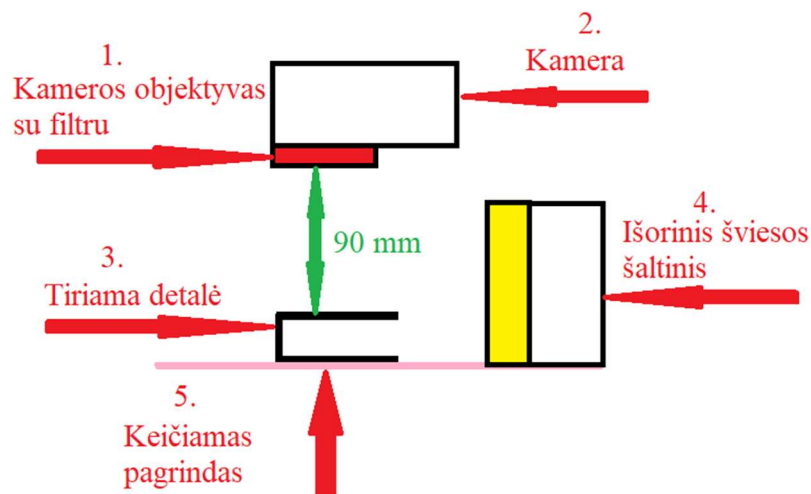
7.1.3. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono

Tyrimui su raudonu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm ir naudojamas išorinis apšvietimas iš šono. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 42 paveiksle ir rezultatai 43–44 paveiksluose.

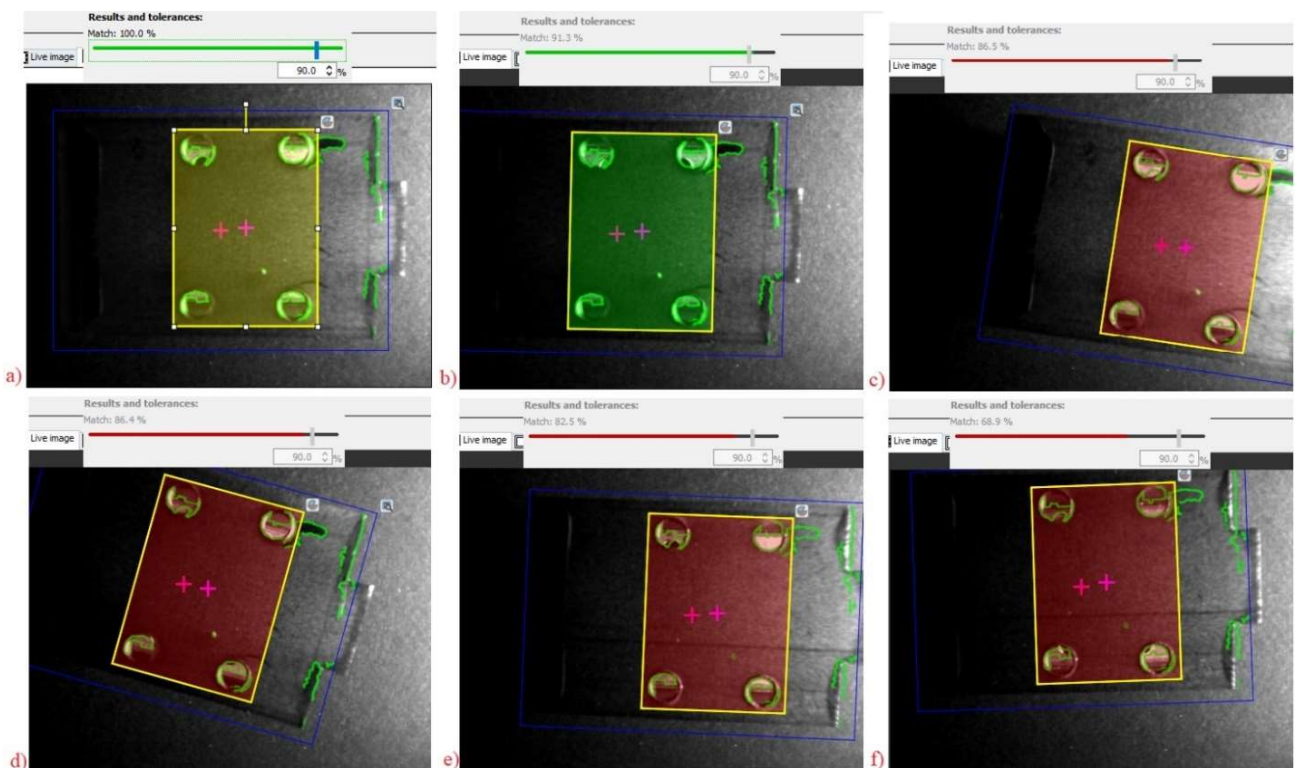
42 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas raudonas filtras (kamos lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriamą detalę; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas).

43 paveiksle pateiktos „PIM60“ fiksuojamos nuotraukos, kai naudojamas išorinis apšvietimas, raudonas filtras bei juodas fonas.

a) detalės palyginamasis vaizdas su sužymėtomis savybėmis (detalė be broko), b) paleidžiamas detalių stebėjimas, detalė palikta pradinėje pozicijoje (detalė be broko), c) detalė pajudinama iš pradinės pozicijos (detalė be broko), d) detalė dar pajudinama (detalė be broko), e) detalė su broku padedama vietoje kokybiškos detalės, f) brokuota detalė pastumiamą toliau nuo kameros matymo zonos centro.



42 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną lęšį



43 pav. Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant raudoną filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas juodas)

Iš užfiksuotų nuotraukų matyti, kad naudojant raudoną kameros filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas juodas), detalė apšviečiama tolygiai, bet ji nėra taip gerai sufokusuojama kaip naudojant skaidrų filtrą su išoriniu apšvietimu. Iš nuotraukų a–d matyti, kad dėl sufokusavimo stokos, pajudinus tiriamą detalę, jos savybių atitikimas nepasiekia 90 proc. sutapimo su lyginamosios nuotraukos sužymėtomis savybėmis. Fiksuojant brokuotą detalę pastebėta, kad jos sutapimas su lyginamosios nuotraukos sužymėtomis savybėmis viršija net 80 proc. Vadinasi, šiuo atveju, įmanoma brokuotą detalę padėti taip, kad ji būtų atpažįstama kaip kokybiška, skirtingai nei naudojant žalią filtrą. Tačiau su raudonu filtru tyrimas nebaigtas. Situacija gali kisti, naudojant kitus fonus. Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 14–15 lentelėse.

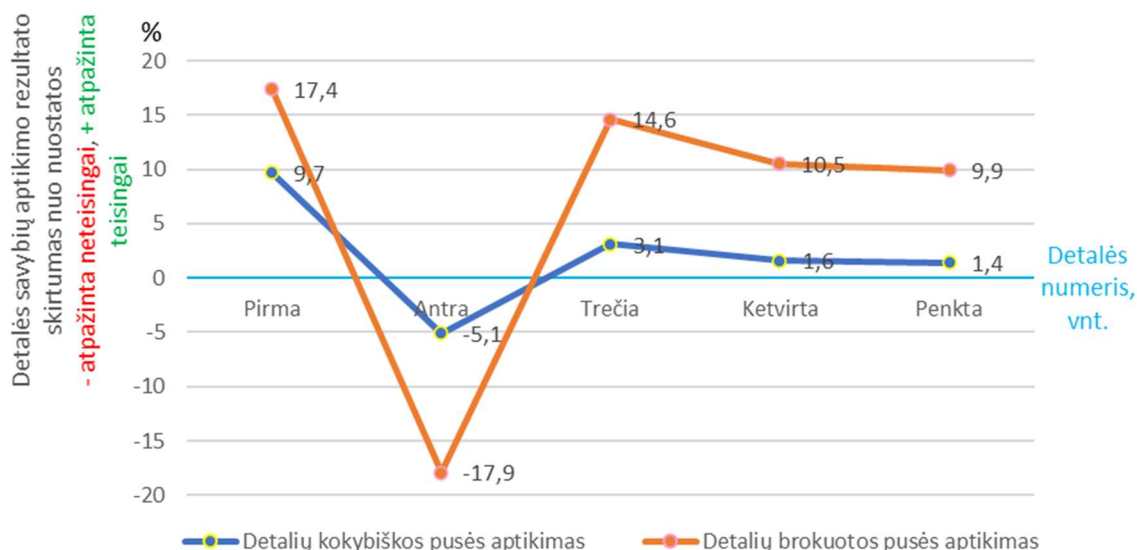
14 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	99,7	≥90	9,7	1
2	Išorinis	84,9	≥90	-5,1	0
3	Išorinis	93,1	≥90	3,1	1
4	Išorinis	91,6	≥90	1,6	1
5	Išorinis	91,4	≥90	1,4	1

15 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	72,6	<90	17,4	1
2	Išorinis	72,1	≥90 (detalė be defektui iš abiejų pusių)	-17,9	0
3	Išorinis	75,4	<90	14,6	1
4	Išorinis	79,5	<90	10,5	1
5	Išorinis	80,1	<90	9,9	1

14–15 lentelių palyginimas pateiktas 44 paveiksle.



44 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą ir raudoną filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), defektai yra atpažįstami 80 proc. tikslumu. Tačiau, dėl susidariusių atspindžių, tarp sriegių pilnai kokybiška detalė (iš abiejų pusių) neatitinka pavyzdžio nuotraukai, kurioje sužymėtos vienos detalės kokybiška pusė, tačiau kita pusė turi defektą. Taigi, daroma išvada, kad tolimesniame tyrime kokybei užtikrinti, jei tiriama pilnos detalės kokybė, ji turi būti lyginama su kokybiška detale iš abiejų pusių, o ne tik su detale, turinčia reikiamą kokybišką pusę. Kadangi turime tik 1 kokybišką detalę ir 5 nekokybiškas, visų pirma, bus tiriama, kaip su esama įranga tarpusavyje atpažįstamos detalių savybės, kurios turi tokį patį defektą (neprasriegtą skylę). Atlikus šį tyrimą, penkios tiriamos detalės palyginamos su pilnai kokybiška detale (žr. 45 pav.).

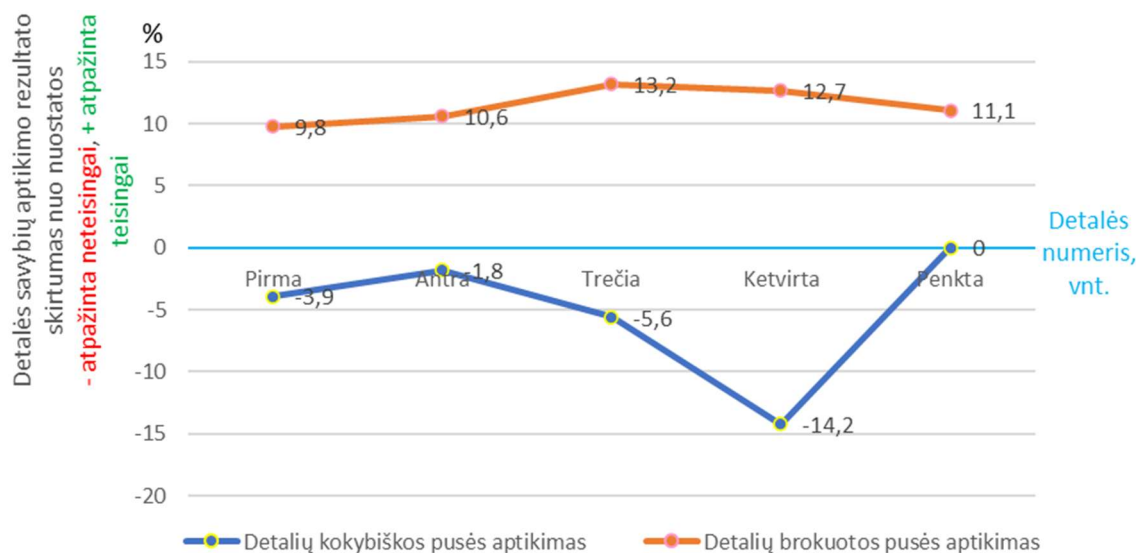
16 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	86,1	≥90	-3,9	0
2	Išorinis	88,2	≥90	-1,8	0
3	Išorinis	84,4	≥90	-5,6	0
4	Išorinis	85	≥90	-14,2	0
5	Išorinis	90	≥90	0	1

17 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	80,2	<90	9,8	1
2	Išorinis	79,4	<90	10,6	1
3	Išorinis	76,8	<90	13,2	1
4	Išorinis	77,3	<90	12,7	1
5	Išorinis	78,9	<90	11,1	1

16–17 lentelių palyginimas pateiktas 45 paveiksle.



45 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

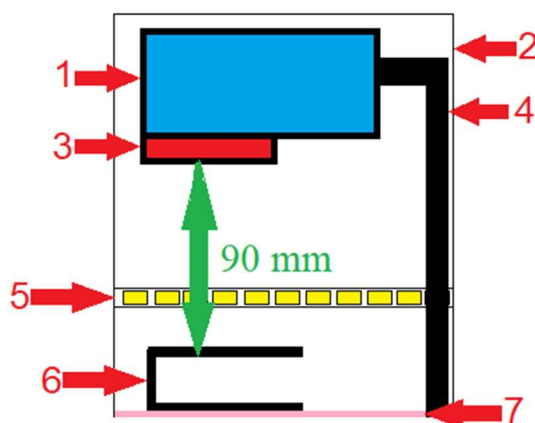
Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Dėl susidariusių atspindžių tarp sriegių pilnai kokybiška detalė (iš abiejų pusių) neatitinka pavyzdžio nuotraukai, kurioje sužymėtos vienos detalės kokybiška pusė, tačiau kita pusė turi defektą. Detalių brokai aptinkami, bet ir kokybiškos detalės pusės užskaitomos keturis kartus iš penkių. Kokybiškos detalės pusės atpažinimo tikslumas yra tik 20 proc. Taigi, galima daryti išvadą, kad raudono filtro ir tiriamos detalės apšvietimo iš šono kombinacija nėra tinkamas sprendimas detalių kokybės atpažinimui.

7.1.4. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių

Tyrimui su raudonu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm. Eliminuojama aplinkos šviesą uždengiant tiriamąją zoną dėže ir detalę apšviečiant tolygiai iš visų pusių LED juosta,

prikljuota prie dėžės sienų (žr. 46 pav.). Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas (žr. 46 pav.).



46 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriamąją zoną nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtras (kamosos lęšis); 4 – kamerą laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriamą detalė; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 10 detalių. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 18–19 lentelėse.

18 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Kokybiška	88,2	≥90	-1,8	neteisingai
2	Kokybiška	87,5	≥90	-2,5	neteisingai
3	Kokybiška	87,2	≥90	-2,8	neteisingai
4	Kokybiška	91,1	≥90	1,1	teisingai
5	Kokybiška	91,8	≥90	1,8	teisingai
6	Kokybiška	58,8	≥90	-31,2	neteisingai
7	Kokybiška	80,4	≥90	-9,6	neteisingai
8	Kokybiška	72,3	≥90	-17,7	neteisingai
9	Kokybiška	51	≥90	-39	neteisingai
10	Kokybiška	79,4	≥90	-10,6	neteisingai

19 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

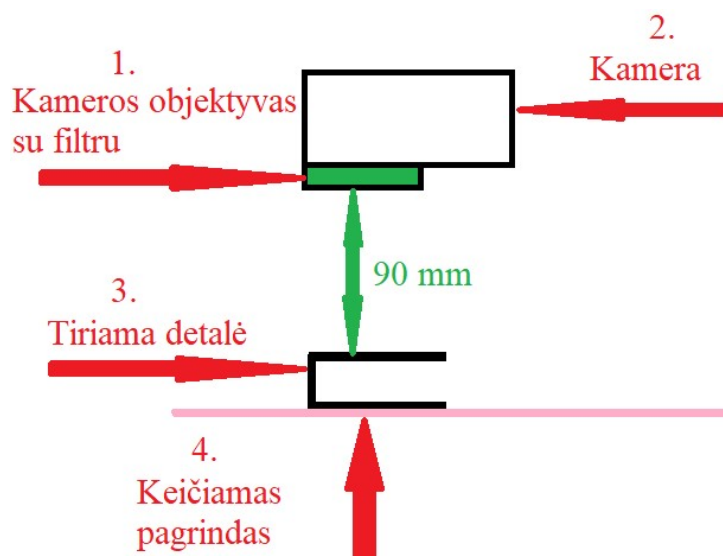
Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Brokuota	61,1	<90	28,9	teisingai
2	Brokuota	62,8	<90	27,2	teisingai
3	Brokuota	56,5	<90	33,5	teisingai
4	Brokuota	64,3	<90	25,7	teisingai
5	Brokuota	64,1	<90	25,9	teisingai
6	Kokybiška	48,6	≥90	-41,4	neteisingai
7	Kokybiška	61,2	≥90	-28,8	neteisingai
8	Kokybiška	61,4	≥90	-28,6	neteisingai
9	Kokybiška	62,7	≥90	-27,3	neteisingai
10	Kokybiška	59,2	≥90	-30,8	neteisingai

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę iš keturių šonų bei naudojant raudoną kameros filtrą detalės stebėjimui

maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta 13,33 proc. tikslumu, t. y., ji buvo atpažinta kokybiška tik du kartus iš penkiolikos bandymų). Daroma išvada, kad naudojant raudoną filtrą, apšvietimas iš tiriamos detalės keturių šonų stebint detalę (nepasukta kampu) yra netinkamas, norint užfiksuoti detalių savybes.

7.1.5. Tyrimas su žaliu filtru ir integruotu kameros apšvietimu

Tyrimui su žaliu filtru detalė nuo kameros nutolusi 90–100 mm ir nenaudojamas išorinis apšvietimas. Naudojamas tik vidinis, kameroje integruotas apšvietimas. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 56 paveiksle ir rezultatai 47 paveiksle.



47 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą

Numeriu 1 pažymėta kamera ir naudojamas žalias filtras, 2 – naudojama kamera, 3 – tiriamą detalę, 4 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, mėlynas, žalias ir t. t.).

Kadangi stebimą detalę pajudinus iš pradinės zonos, kurioje buvo sužymėtos palyginamosios detalės savybės, dėl netolygiai pasiskirsčiusio apšvietimo detalės savybės neatitinka palyginamojoje nuotraukoje esančios detalės savybėms, toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 20–21 lentelėse.

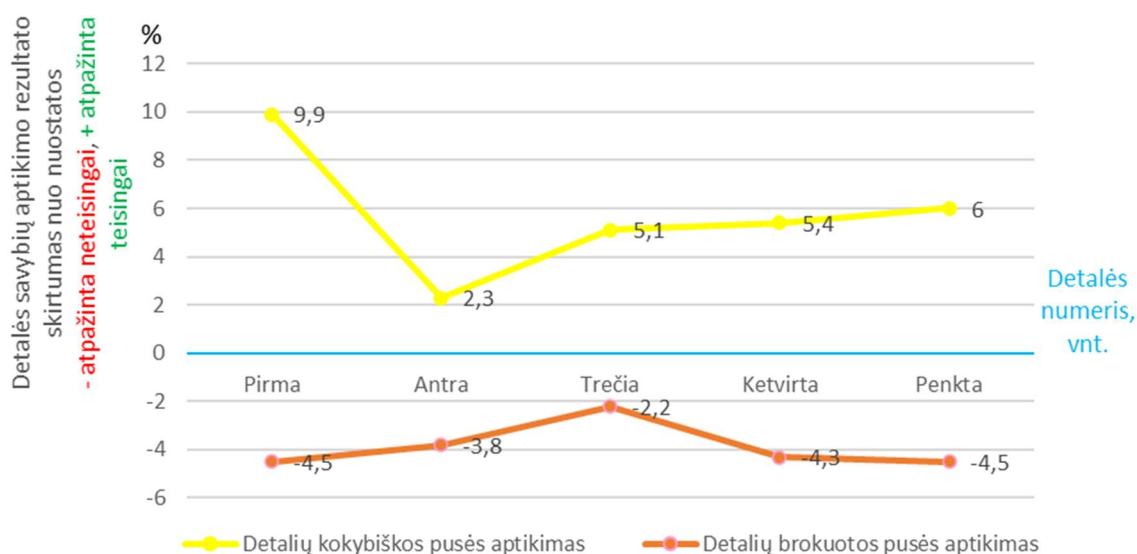
20 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	99,9	≥ 90	9,9	1
2	Integruotas (vidinis)	92,3	≥ 90	2,3	1
3	Integruotas (vidinis)	95,1	≥ 90	5,1	1
4	Integruotas (vidinis)	95,4	≥ 90	5,4	1
5	Integruotas (vidinis)	96	≥ 90	6	1

21 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	94,5	<90	-4,5	0
2	Integruotas (vidinis)	93,8	<90	-3,8	0
3	Integruotas (vidinis)	92,2	<90	-2,2	0
4	Integruotas (vidinis)	94,3	<90	-4,3	0
5	Integruotas (vidinis)	94,5	<90	-4,5	0

18–19 lentelėse esančių duomenų palyginimas pateiktas 48 paveiksle.



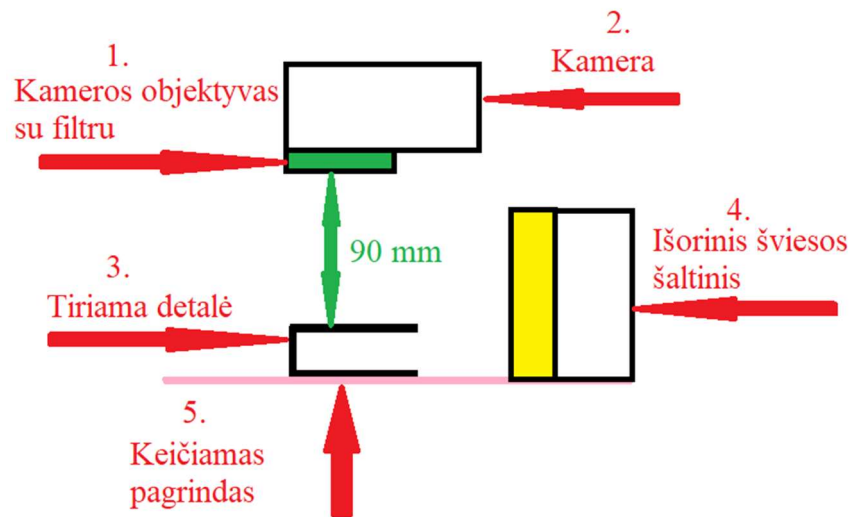
48 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant tik vidinį integruotą kameros apšvietimą ir žalią filtrą, sistema defektų aptikimui yra netinkama.

7.1.6. Tyrimas su žaliu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono

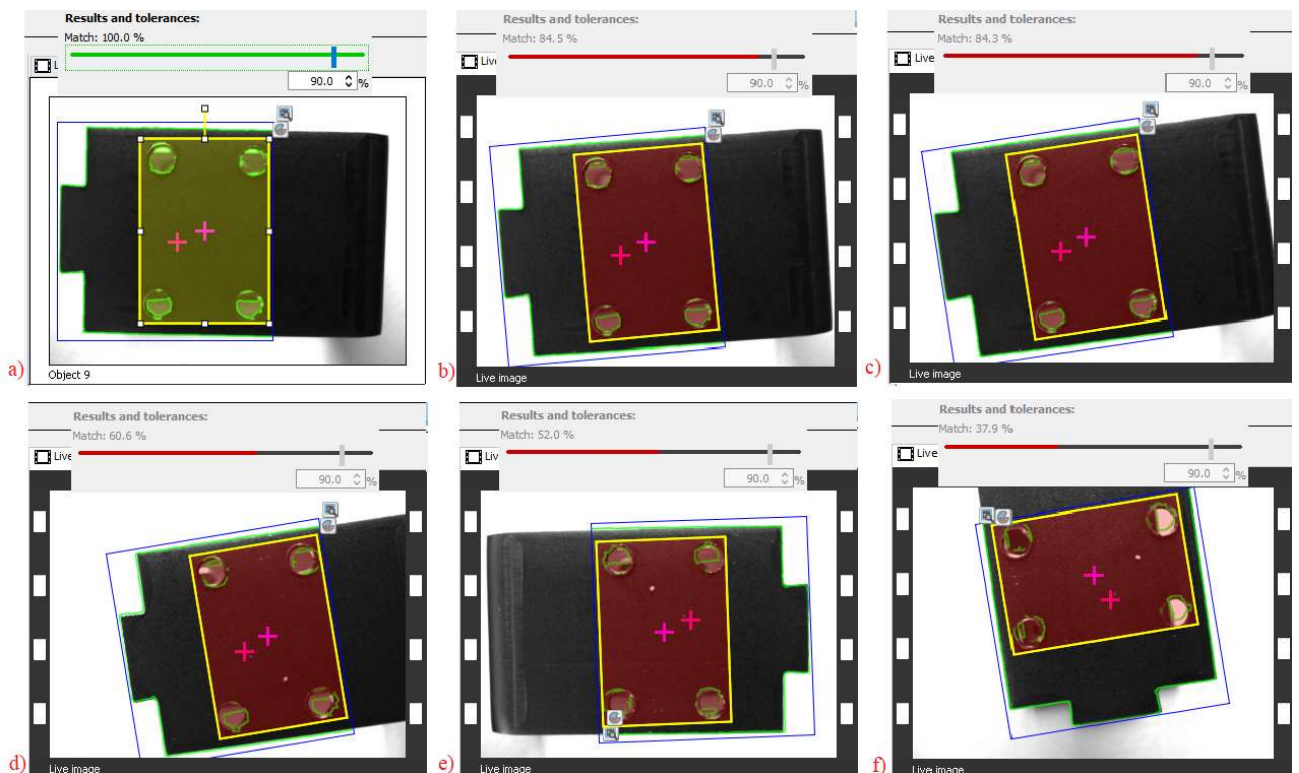
Tyrimui su žaliu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm ir naudojamas išorinis apšvietimas iš šono. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 49 paveiksle ir rezultatai 50–51 paveiksluose.



49 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros žalią lęšį

49 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas žalias filtras (kamos lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriama detalė; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, rudas, žalias ir t. t.).

50 paveiksle pateiktos „PIM60“ fiksuojamos nuotraukos, kai naudojamas išorinis apšvietimas, žalias filtras bei geltonas fonas.



50 pav. Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant žalią filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas geltonas)

a) detalės palyginamasis vaizdas su sužymėtomis savybėmis (detalė be broko), b) detalė pajudinama iš pradinės pozicijos (detalė be broko), c) detalė dar pajudinama (detalė be broko), d) detalė su broku padedama vietoje kokybiškos detalės, e) brokuota detalė pastumiama arčiau kameros matymo zonos centro, f) detalė su broku dar pajudinama.

Iš užfiksuotų nuotraukų matyti, kad naudojant žalią kameros filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas geltonas), detalė apšviečiama tolygiai, bet detalė nėra taip gerai sufokusuojama, kaip naudojant skaidrų filtrą su išoriniu apšvietimu. Iš nuotraukų a–c matyti, kad dėl sufokusavimo stokos, pajudinus tiriamą detalę, jos savybių atitikimas nepasiekia 90 proc. sutapimo su lyginamosios nuotraukos sužymėtomis savybėmis. Fiksuojant brokuotą detalę pastebėta, kad jos sutapimas su lyginamosios nuotraukos sužymėtomis savybėmis nepasiekia net 70 proc. Šiuo atveju, kad ir kaip judinama brokuota detalė, ji neatpažįstama kaip kokybiška, skirtingai nei naudojant vidinį apšvietimą su kupolu.

Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 22–23 lentelėse.

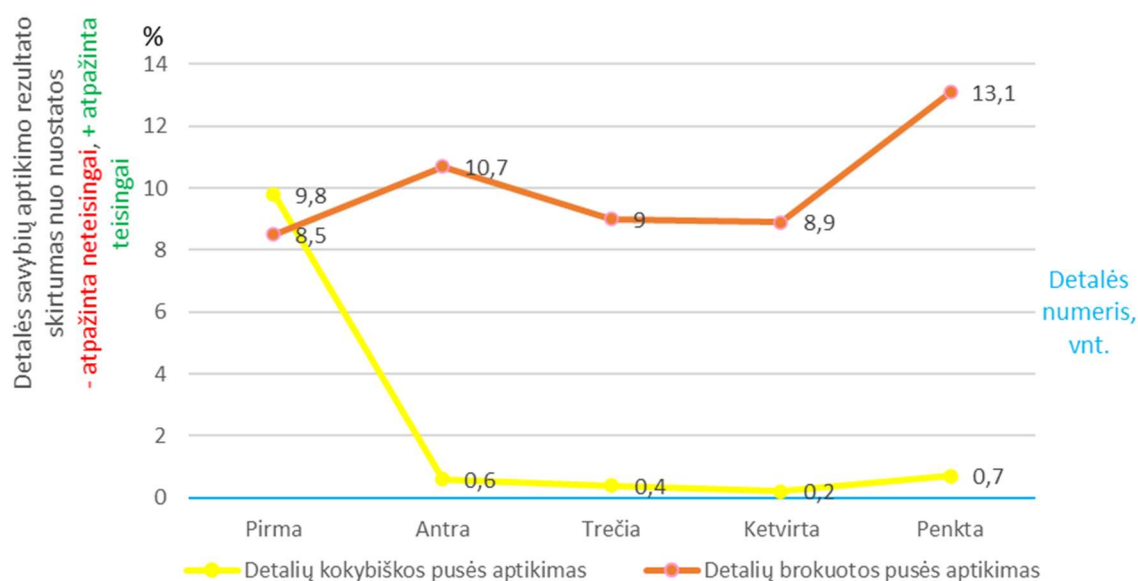
22 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	99,8	≥90	9,8	1
2	Išorinis	90,6	≥90	0,6	1
3	Išorinis	90,4	≥90	0,4	1
4	Išorinis	90,2	≥90	0,2	1
5	Išorinis	90,7	≥90	0,7	1

23 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	81,5	<90	8,5	1
2	Išorinis	79,3	<90	10,7	1
3	Išorinis	81	<90	9	1
4	Išorinis	81,1	<90	8,9	1
5	Išorinis	76,9	<90	13,1	1

22–23 lentelėse esančių duomenų palyginimas pateiktas 51 paveiksle.



51 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą ir žalią filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), defektai yra atpažįstami (brokuota detalė visus kartus atskirta nuo kokybiškos, atpažinimo tikslumas 100 proc. iš 10 bandymų, visi 10 atpažinti teisingai). Atlikus šį tyrimą, 5 tiriamos detalės palyginamos su pilnai kokybiška detale (žr. 24–25 lenteles ir 52 pav.).

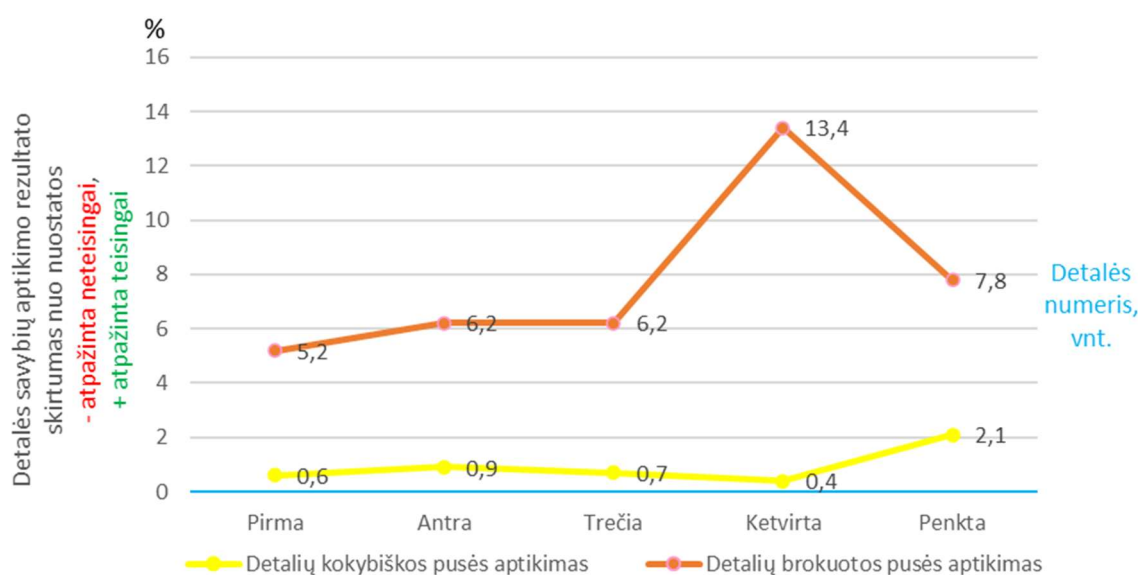
24 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	90,6	≥ 90	0,6	1
2	Išorinis	90,9	≥ 90	0,9	1
3	Išorinis	90,7	≥ 90	0,7	1
4	Išorinis	90,4	≥ 90	0,4	1
5	Išorinis	92,1	≥ 90	2,1	1

25 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	84,8	< 90	5,2	1
2	Išorinis	83,8	< 90	6,2	1
3	Išorinis	83,8	< 90	6,2	1
4	Išorinis	76,6	< 90	13,4	1
5	Išorinis	82,2	< 90	7,8	1

24–25 lentelių palyginimas pateiktas 52 paveiksle.

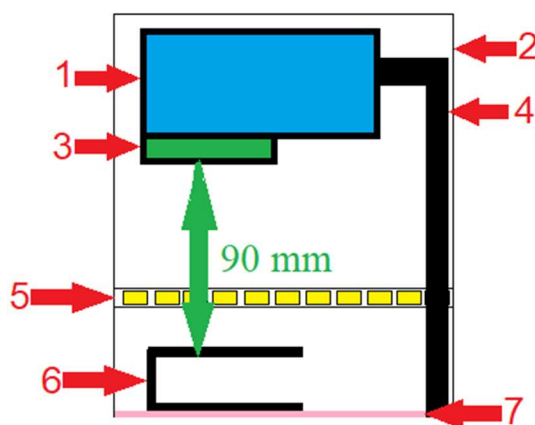


52 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą ir žalią filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), defektai yra atpažįstami (brokuota detalė visus kartus atskirta nuo kokybiškos, atpažinimo tikslumas 100 proc., iš 10 bandymų, visi 10 atpažinti teisingai), detalę lyginant su pilnai kokybiška detale iš abiejų pusių.

7.1.7. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių

Tyrimui su žaliu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm. Eliminuojuama aplinkos šviesa, uždengiant tiriamąją zoną dėže ir detalę apšviečiant tolygiai iš visų pusių LED juosta, priklijuota prie dėžės sienų. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 53 paveiksle ir rezultatai 26–27 lentelėse.



53 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriamąją zoną nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtras (kameros lęšis); 4 – kamerą laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriamą detalę; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 10 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 26–27 lentelėse.

26 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Kokybiška	83,4	≥90	-6,6	neteisingai
2	Kokybiška	89,9	≥90	-0,1	neteisingai
3	Kokybiška	91	≥90	1	teisingai
4	Kokybiška	90,5	≥90	0,5	teisingai
5	Kokybiška	80,8	≥90	-9,2	neteisingai
6	Kokybiška	83,6	≥90	-6,4	neteisingai
7	Kokybiška	76	≥90	-14	neteisingai
8	Kokybiška	84,5	≥90	-5,5	neteisingai
9	Kokybiška	84	≥90	-6	neteisingai
10	Kokybiška	66,1	≥90	-33,9	neteisingai

27 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Brokuota	66,6	<90	23,4	teisingai
2	Brokuota	67,2	<90	22,8	teisingai
3	Brokuota	69,2	<90	20,8	teisingai
4	Brokuota	68,6	<90	21,4	teisingai
5	Brokuota	66,8	<90	23,2	teisingai
6	Kokybiška	61,6	≥90	-28,4	neteisingai
7	Kokybiška	56,4	≥90	-33,6	neteisingai
8	Kokybiška	65,4	≥90	-24,6	neteisingai

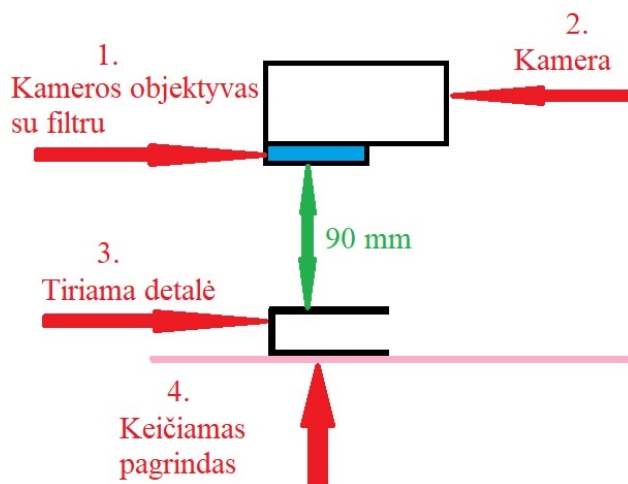
Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
9	Kokybiška	65,5	≥90	-24,5	neteisingai
10	Kokybiška	56,6	≥90	-32,4	neteisingai

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę iš keturių šonų bei naudojant žalią kameros filtrą detalės stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta 0 proc. tikslumu, t. y. ji nebuvo atpažinta kaip kokybiška nei karto). Daroma išvada, kad naudojant žalią filtrą, apšvietimas, stebint tiriamą detalę iš keturių šonų (nepasukta kampu), yra netinkamas, norint detalių savybes užfiksuoti.

7.1.8. Tyrimas su mėlynu filtru ir vidiniu integruotu kameros apšvietimu

Tyrimui su mėlynu filtru detalė nuo kameros nutolusi 90–100 mm ir nenaudojamas išorinis apšvietimas, naudojamas tik vidinis kameroje integruotas apšvietimas. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 54 paveiksle ir rezultatai 55 paveiksle.

Kadangi stebimą detalę pajudinus iš pradinės zonos, kurioje buvo sužymėtos palyginamosios detalės savybės, dėl netolygiai pasiskirsčiusio apšvietimo detalės savybės neatitinka palyginamojoje nuotraukoje esančios detalės savybės, todėl toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 28–29 lentelėse.



54 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros mėlyną filtrą

Numeriu 1 pažymėti kamera ir naudojamas mėlynas filtras, 2 – naudojama kamera, 3 – tiriamą detalę, 4 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, mėlynas, žalias ir t. t.).

28 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

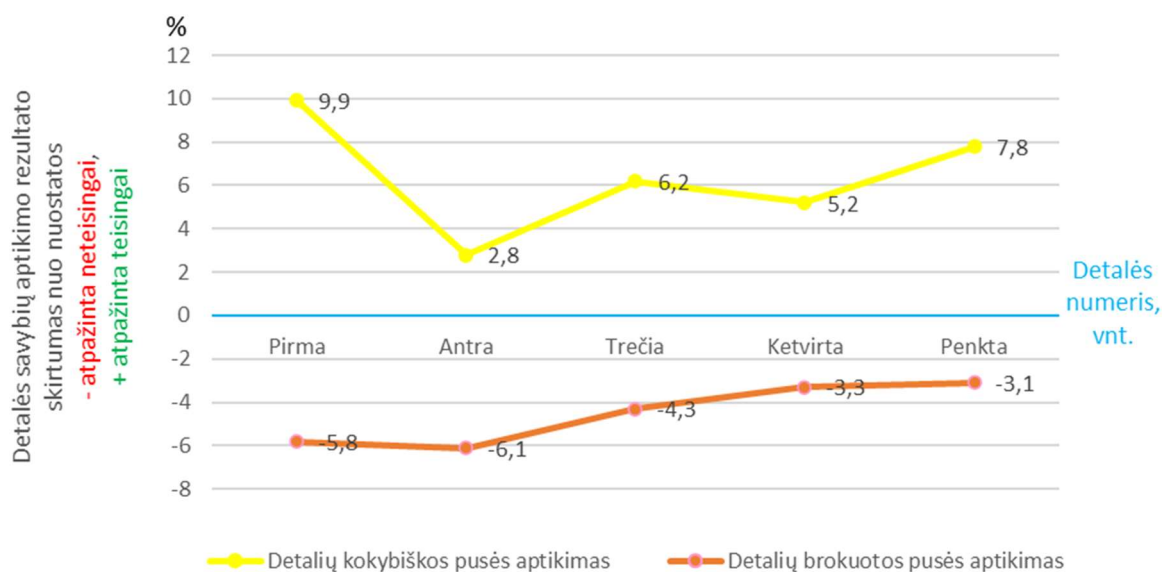
Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	99,9	≥90	9,9	1
2	Integruotas (vidinis)	92,8	≥90	2,8	1
3	Integruotas (vidinis)	96,2	≥90	6,2	1

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
4	Integruotas (vidinis)	95,2	≥90	5,2	1
5	Integruotas (vidinis)	97,8	≥90	7,8	1

29 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Integruotas (vidinis)	95,8	<90	-5,8	0
2	Integruotas (vidinis)	96,1	<90	-6,1	0
3	Integruotas (vidinis)	94,3	<90	-4,3	0
4	Integruotas (vidinis)	93,3	<90	-3,3	0
5	Integruotas (vidinis)	93,1	<90	-3,1	0

28–29 lentelių palyginimas pateiktas 55 paveiksle.



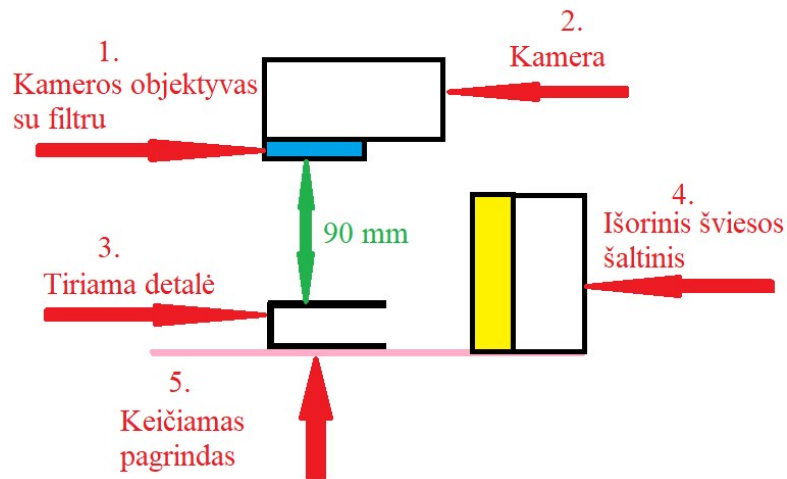
55 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant tik vidinį integruotą kameros apšvietimą ir mėlyną filtrą, sistema defektų aptikimui yra netinkama.

7.1.9. Tyrimas su mėlynu filtru ir išoriniu apšvietimu iš šono

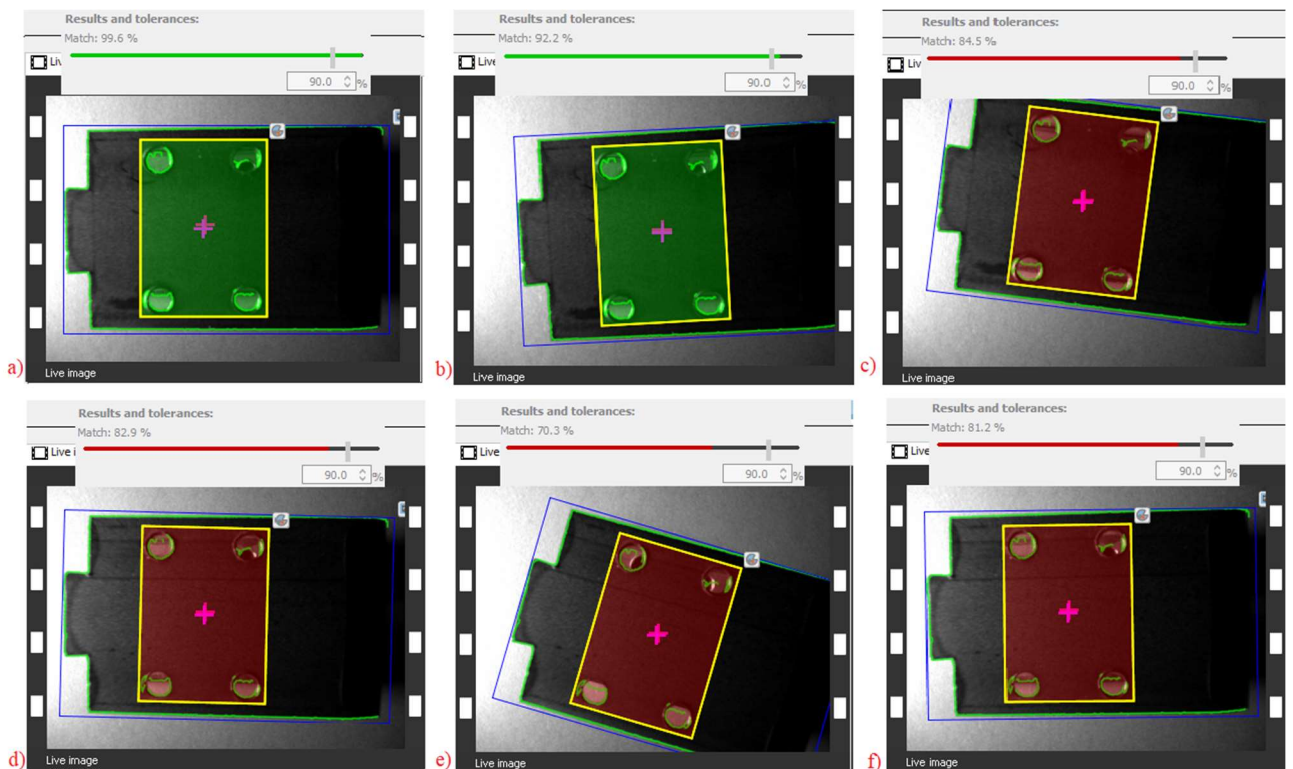
Tyrimui su mėlynu kameros filtru, detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm ir naudojamas išorinis apšvietimas iš šono. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 56 paveiksle ir rezultatai 57–58 paveiksluose.



56 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros mėlyną filtrą

56 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas mėlynas filtras; 2 – naudojama kamera; 3 – tiriama detalė; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, rudas, žalias ir t. t.).

57 paveiksle pateiktos „PIM60“ fiksuojamos nuotraukos, kai naudojamas išorinis apšvietimas, mėlynas filtras bei geltonas fonas.



57 pav. Kameros fiksuojami vaizdai, naudojant mėlyną filtrą bei išorinį apšvietimą (fonas žalias)

a) detalės palyginamasis vaizdas su sužymėtomis savybėmis (detalė be broko), b) detalė pajudinama iš pradinės pozicijos (detalė be broko), c) detalė dar pajudinama (detalė be broko), d) detalė su broku padedama vietoje kokybiškos detalės, e) brokuota detalė pakreipiama, f) detalė su broku dar pajudinama. Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 30–31 lentelėse.

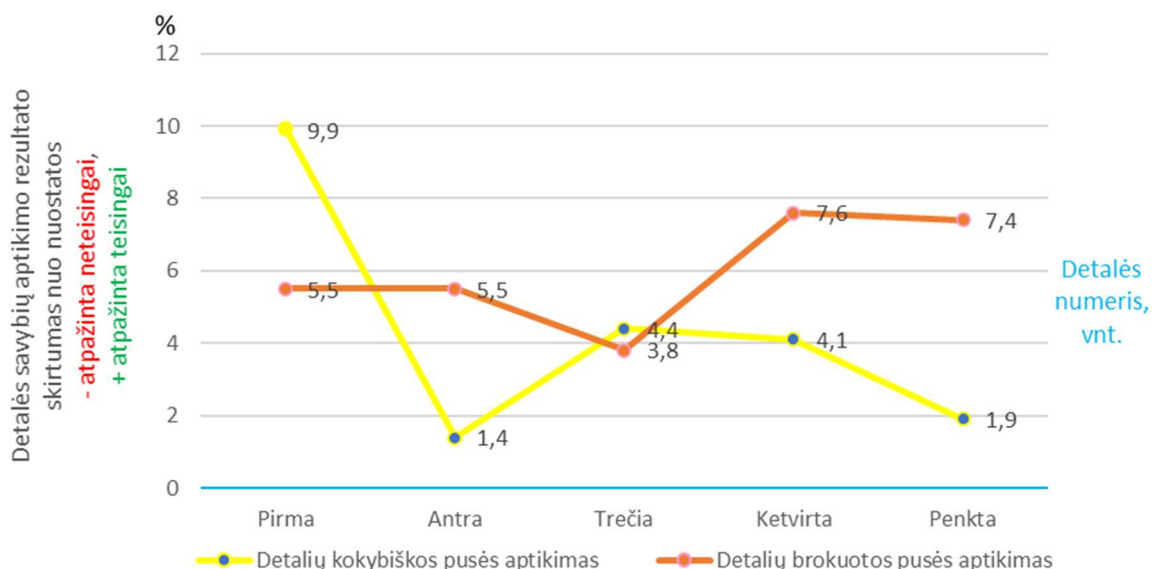
30 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	99,9	≥90	9,9	1
2	Išorinis	91,4	≥90	1,4	1
3	Išorinis	94,4	≥90	4,4	1
4	Išorinis	94,1	≥90	4,1	1
5	Išorinis	91,9	≥90	1,9	1

31 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	85,5	<90	5,5	1
2	Išorinis	85,5	<90	5,5	1
3	Išorinis	83,8	<90	3,8	1
4	Išorinis	87,6	<90	7,6	1
5	Išorinis	87,4	<90	7,4	1

30–31 lentelių palyginimas pateiktas 58 paveiksle.



58 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą ir mėlyną filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), defektai yra atpažįstami. Atlikus šį tyrimą, 5 tiriamos detalės palyginamos su pilnai kokybiška detale (žr. 32–33 lenteles).

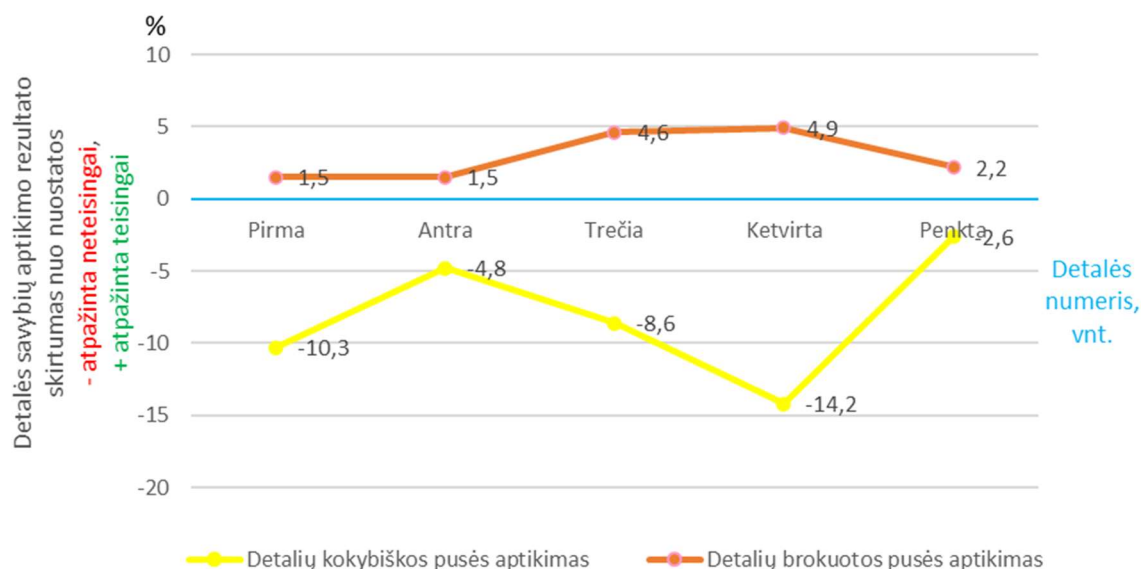
32 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas kokybiškai detalei

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	79,7	≥90	-10,3	0
2	Išorinis	85,2	≥90	-4,8	0
3	Išorinis	81,4	≥90	-8,6	0
4	Išorinis	75,8	≥90	-14,2	0
5	Išorinis	87,4	≥90	-2,6	0

33 lentelė. Detalių brokuotos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

Detalės Nr.	Apšvietimas	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai (1/0)
1	Išorinis	88,5	<90	1,5	1
2	Išorinis	88,5	<90	1,5	1
3	Išorinis	85,4	<90	4,6	1
4	Išorinis	85,1	<90	4,9	1
5	Išorinis	87,8	<90	2,2	1

32–33 lentelių palyginimas pateiktas 59 paveiksle.



59 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Jei ≥ 0 – atpažinta teisingai, < 0 – atpažinta neteisingai.

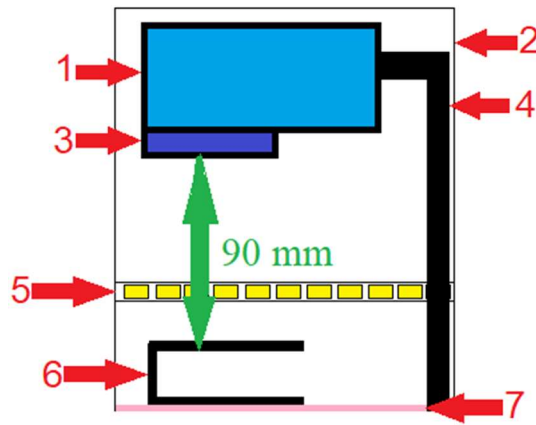
Iš pateiktų duomenų 30–33 lentelėse matyti, kad naudojant mėlyną filtrą bei apšvietimą iš tiriamos detalės šono, detalės savybės yra pilnai atpažįstamos (100 proc. tikslumu) tik detales lyginant su brokuotos detalės kokybiška puse, bet kokybiškos detalių pusės yra neatpažįstamos, kai yra lyginama su iš abiejų pusių kokybišką detales (kokybiška detalės pusė užskaitoma kaip brokas, kokybiška pusė atpažįstama 0 proc. tikslumu).

7.1.10. Tyrimas su raudonu filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių

Tyrimui su mėlynu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm. Eliminuojuama aplinkos šviesa, uždengiant tiriamąją zoną dėže ir detalę apšviečiant tolygiai iš visų pusių LED juosta, priklijuota prie dėžės sienų. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 60 paveiksle ir rezultatai 34–35 lentelėse.

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriamąją zoną nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtrs (kameros lęšis); 4 – kamerą laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriamą detalę; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 34–35 lentelėse:



60 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

34 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas

Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Kokybiška	55,9	≥90	-34,1	neteisingai
2	Kokybiška	45,1	≥90	-44,9	neteisingai
3	Kokybiška	58,7	≥90	-31,3	neteisingai
4	Kokybiška	53,9	≥90	-26,1	neteisingai
5	Kokybiška	56,1	≥90	-33,9	teisingai
6	Kokybiška	99,8	≥90	9,8	teisingai
7	Kokybiška	59,1	≥90	-30,9	neteisingai
8	Kokybiška	58,8	≥90	-31,2	neteisingai
9	Kokybiška	51,8	≥90	-38,2	neteisingai
10	Kokybiška	57,9	≥90	-32,1	neteisingai

35 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka

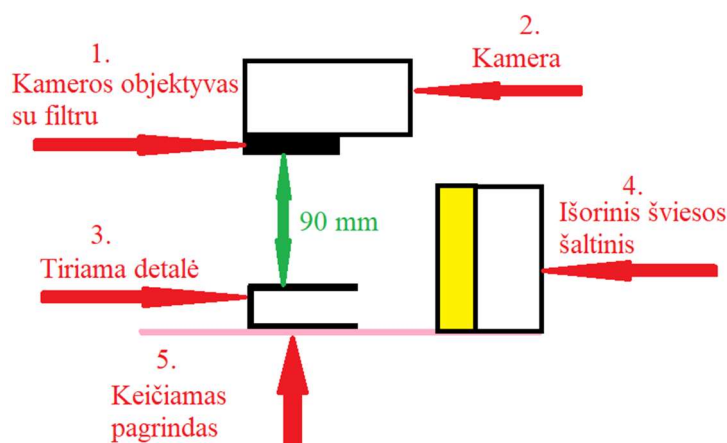
Detalės Nr.	Būsena	Atitikimas pavyzdinei nuotraukai, %	Atitikimo riba, %	Skirtumas, %	Atpažinta teisingai / neteisingai
1	Brokuota	51,8	<90	38,2	teisingai
2	Brokuota	52,1	<90	37,9	teisingai
3	Brokuota	45	<90	45	teisingai
4	Brokuota	58,7	<90	31,3	teisingai
5	Brokuota	47,4	<90	42,6	teisingai
6	Kokybiška	44,8	≥90	-45,2	neteisingai
7	Kokybiška	61,8	≥90	-28,2	neteisingai
8	Kokybiška	57,5	≥90	-32,5	neteisingai
9	Kokybiška	45,8	≥90	-44,2	neteisingai
10	Kokybiška	59,9	≥90	-30,1	neteisingai

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę iš šonų bei naudojant mėlyną kameros filtrą detalės stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta 0 proc. tikslumu, t. y. , ji nebuvo atpažinta kaip kokybiška nei karto). Daroma išvada, kad naudojant mėlyną filtrą apšvietimas iš tiriamos detalės keturių šonų stebint detalę (nepasukta kampu) yra netinkamas, norint detalių savybėms užfiksuoti. Dėl šios priežasties šis būdas nebus naudojamas tolimesniame tyrime.

7.2. Tyrimas su ND filtru (ND2-ND400) ir išoriniu apšvietimu iš šono

Tyrimui su ND kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm ir naudojamas išorinis apšvietimas iš šono. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių

atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 61 paveiksle ir rezultatai 62–63 paveiksluose.



61 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros ND2-ND400 filtrą

61 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas ND filtras (kamos lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriamą detalę; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas (įvairių spalvų kartonas: geltonas, rudas, žalias ir t. t.).

Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 36–37 lentelėse.

36 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)

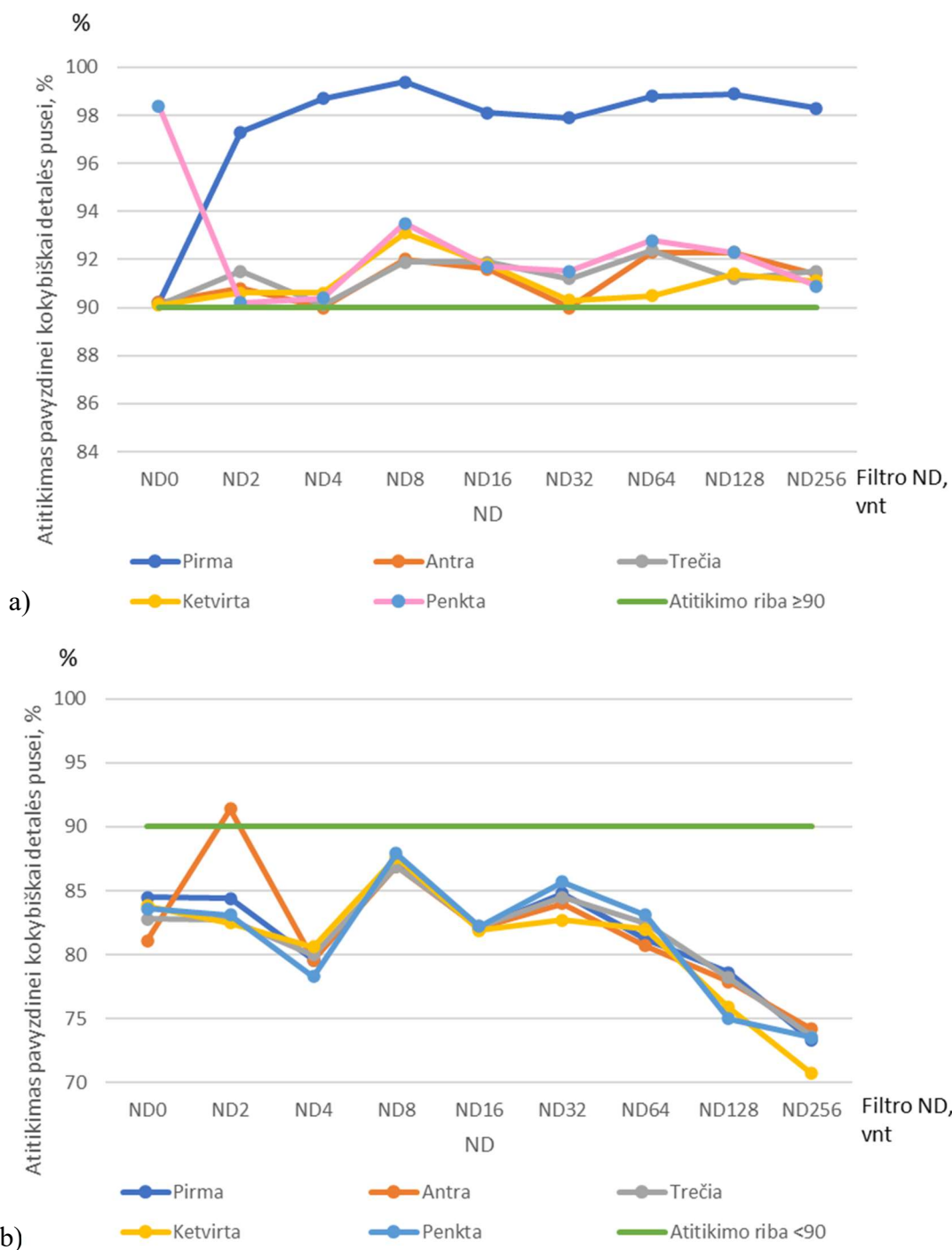
Filtro ND	0	2	4	8	16	32	64	128	256
1	90,2	97,3	98,7	99,4	98,1	97,9	98,8	98,9	98,3
2	90,2	90,8	90	92	91,6	90	92,3	92,3	91,4
3	90,1	91,5	90,1	91,9	91,9	91,2	92,4	91,2	91,5
4	90,1	90,6	90,6	93,1	91,8	90,3	90,5	91,4	91,1
5	98,4	90,2	90,4	93,5	91,7	91,5	92,8	92,3	90,9

37 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)

Filtro ND	0	2	4	8	16	32	64	128	256
1	84,5	84,4	79,6	87	82,1	84,8	81,2	78,6	73,3
2	81,1	91,4	79,6	86,9	82,1	84	80,7	77,9	74,2
3	82,8	82,7	80	86,9	82,2	84,5	82,5	78,2	73,6
4	83,8	82,5	80,6	87,6	81,9	82,7	82	75,9	70,7
5	83,6	83,1	78,3	87,9	82,2	85,7	83,1	75	73,5

36–37 lentelių palyginimas pateiktas 62 paveiksle.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą ir ND filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), defektai yra atpažįstami. Atlikus šį tyrimą, 5 tiriamos detalės palyginamos su pilnai kokybiška detale (žr. 63 pav.). Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 38–39 lentelėse.



62 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, a) kokybiškos pusės atpažinimas, atitikimo riba ≥ 90 , b) brokuotos pusės atpažinimas, atitikimo riba < 90

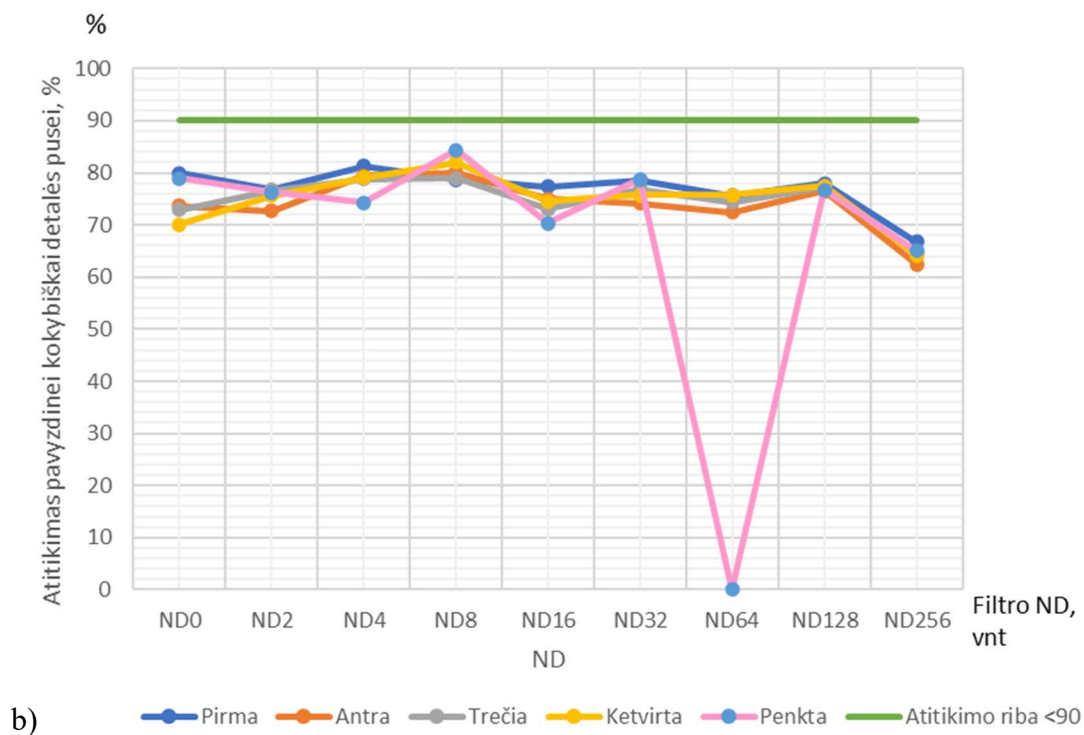
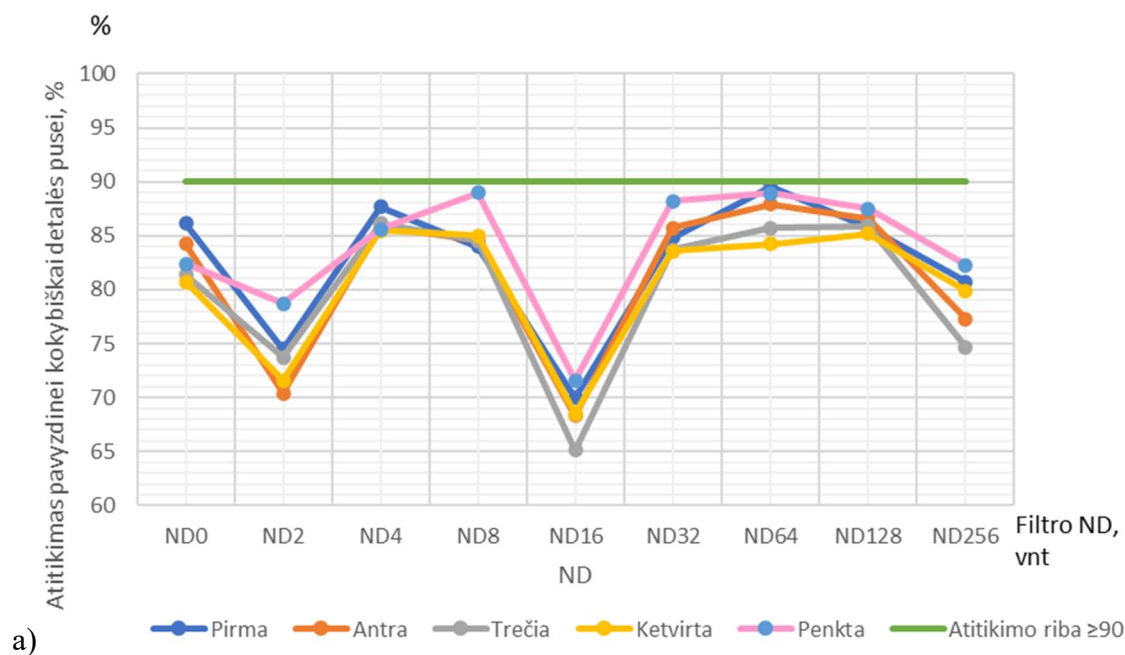
38 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su pilnai kokybiška detale (%)

Filtro ND	0	2	4	8	16	32	64	128	256
Detalės Nr.									
1	86,1	74,5	87,7	84	70	84,8	89,5	85,8	80,7
2	84,2	70,4	85,9	84,5	68,3	85,7	87,9	86,6	77,3
3	81,4	73,7	86,1	84,5	65,1	83,7	85,7	85,9	74,7
4	80,7	71,6	85,5	85	68,5	83,6	84,2	85,2	79,9
5	82,4	78,7	85,6	89	71,6	88,2	88,9	87,5	82,3

39 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su pilnai kokybiška detale (%)

Filtro ND	0	2	4	8	16	32	64	128	256
1	79,9	76,7	81,3	78,7	77,3	78,6	75,6	78	66,8
2	73,7	72,7	79,4	80,1	75	74,2	72,4	76,5	62,5
3	72,9	76,6	78,8	78,9	73	76,9	74,4	77,3	64,5
4	70,1	75,6	79,1	82	74,5	75,8	75,7	77,5	64,2
5	79	76,2	74,3	84,4	70,4	78,7	0	76,7	65

38–39 lentelių palyginimas pateiktas 63 paveiksle.

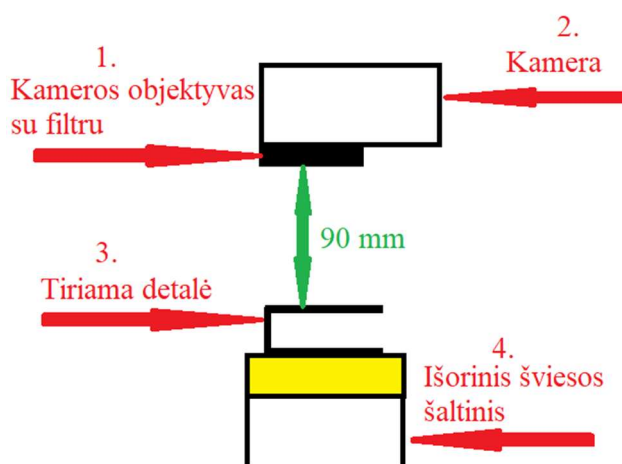


63 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, a) kokybiškos pusės atpažinimas, atitikimo riba ≥ 90 , b) brokuotos pusės atpažinimas, atitikimo riba < 90

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant ND filtrą ir išorinį apšvietimą, detalės savybės nėra teisingai identifikuojamos, kai yra lyginama kokybiška detalės pusė su pilnai kokybiška detale.

7.3. Tyrimas su ND filtru (ND2-ND256) ir išoriniu apšvietimu iš apačios

Tyrimui su ND kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm ir naudojamas išorinis apšvietimas iš apačios. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 64 paveiksle ir rezultatai 40–41 lentelėse.



64 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros ND2-ND400 filtrą

64 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas ND filtras (kameros lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriamą detalę; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš apačios; 5 – keičiamas pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 40–41 lentelėse.

40 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)

Filtro ND	2	4	8	16	32	64	128	256
1	59,9	60	53,4	84	81,2	81,7	67,1	-
2	70,8	59,6	58	69,6	81,1	70,3	68,2	-
3	60,6	61,8	78,1	64,8	65,6	72	64,4	-
4	58,6	70,7	85,3	70,5	86,2	76,7	75,2	-
5	31,4	46,5	67,8	73	67,7	59,1	54,2	-

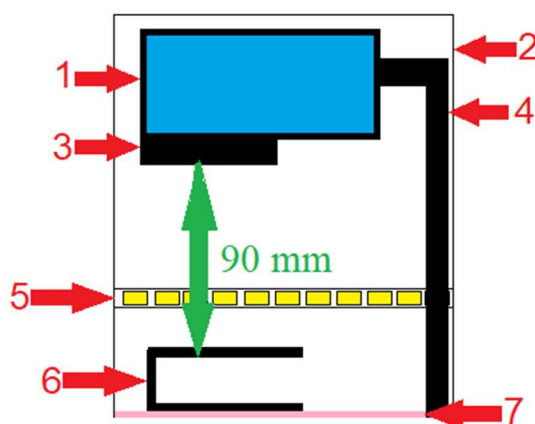
41 lentelė. Detalių brokuotos pusės aptikimas, lyginant su kokybiška detalės puse (%)

Filtro ND	2	4	8	16	32	64	128	256
1	82,7	81,7	46,2	70,6	70,4	60,3	60,3	-
2	85,4	65,7	47,9	71,6	72,8	71,7	65	-
3	87,2	59,6	68,2	56,7	61,2	66,4	63,2	-
4	73,5	72,4	41,4	71,6	74,1	62,1	62	-
5	75	76	68,6	70,1	71,9	70,1	65	-

Iš pateiktų duomenų matyti, kad naudojant išorinį apšvietimą iš apačios ir ND filtrą bei stebint detalę maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė visais bandymais buvo atpažinta kaip brokuota). Daroma išvada, kad apšvietimas iš tiriamos detalės apačios yra netinkamas, norint detalių savybėms užfiksuoti net ir sumažinus atspindžius ND filtru. Dėl šios priežasties šis būdas nebus naudojamas tolimesniame tyrime.

7.3.1. Tyrimas su ND filtru ir išoriniu apšvietimu iš keturių pusių

Tyrimui su ND kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm. Eliminuojama aplinkos šviesą uždengiant tiriamąją zoną dėže ir detalę apšviečiant tolygiai iš visų pusių LED juosta, priklijuota prie dėžės sienų. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 65 paveiksle ir rezultatai 42–43 lentelėse.



65 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriamąją zoną nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtras (kameros lęšis); 4 – kamerą laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriamą detalę; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 10 detalių. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 42–43 lentelėse.

42 lentelė. Detalių kokybiškos pusės aptikimas (%)

Filtro ND	2	4	8	16	32	64
Detalės Nr.						
1	90,2	90	87,9	83,9	79	64,3
2	87,6	86,9	83,5	80,3	74,4	60
3	87,2	86,8	84,1	80,5	74,2	-
4	90,2	88,7	87,1	81,6	72,6	-
5	90,2	91,1	88,8	84	76,5	-
6	63,2	62,5	57,1	56,2	53	38,4
7	81,6	80,5	78,7	74,9	70,2	63
8	80	78,2	76,6	77,8	66,6	-
9	79,1	74,9	75,2	70,3	67,5	62,6
10	83,9	83,4	82	76,7	70,6	63

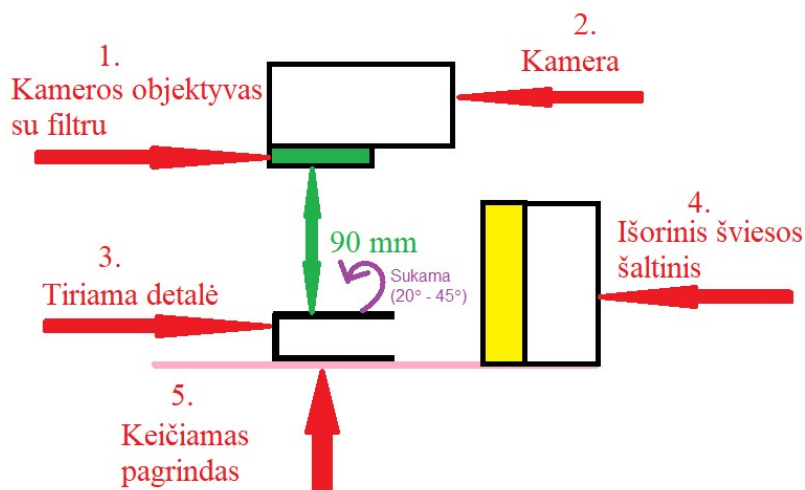
43 lentelė. Detalių kitos pusės palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)

Filtro ND	2	4	8	16	32	64
Detalės Nr.						
1	73	72,7	70,3	66,9	61,3	-
2	58,6	59	55,7	52,4	52	-
3	69,8	68,8	66,7	61,8	56,7	56,3
4	71,3	72,6	71	66,3	63,2	57,7
5	69,9	69,4	66,7	61,3	60,9	59
6	60,7	62,1	52,5	55,6	52,1	37,4
7	64,3	63,5	62	60,9	57,8	23,1
8	65,7	65,4	64,1	61,1	59,2	35,6
9	25,9	25,5	23,2	21,1	21,1	14,3
10	67,9	66,5	65,2	60,7	57,9	-

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę iš keturių šonų bei naudojant ND filtrą detalės stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta tik $\sim 8,33$ proc. tikslumu, penkis kartus iš šešiasdešimties bandymų). Daroma išvada, kad apšvietimas iš tiriamos detalės keturių šonų stebint detalę (nepasukta kampu) yra netinkamas, norint detalių savybėms užfiksuoti net ir sumažinus atspindžius ND filtru. Dėl šios priežasties šis būdas nebus naudojamas tolimesniame tyrime.

7.3.2. Tyrimas detalę sukant kampu, apšviečiant ją iš šono

Iš duomenų pateiktų 4–43 lentelėse matyti, kad detalių savybės iki šiol buvo atpažįstamos geriausiai naudojant žalią filtrą, todėl tolimesniame tyrime naudojamas tik jis. Tyrimui su žaliu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–100 mm. Tiriamas detalės savybių atpažinimas, ją sukant kampu (20 – 45°), kai ji apšviečiama iš šono. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 66 paveiksle ir rezultatai 44 lentelėje.



66 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

68 paveiksle matyti, kad numeriu 1 pažymėtas tyrimui naudojamas ND filtru (kameros lęšis); 2 – naudojama kamera; 3 – tiriamą detalę; 4 – naudojamas išorinis apšvietimas detalės apšvietimui iš šono; 5 – keičiamas pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 10 detalių. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 44 lentelėje.

44 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)

Atitikimo riba, kai detalė brokuota <90				
Atitikimo riba, kai detalė kokybiška ≥90				
Pasukimo kampas °		20	30	45
Detalės Nr.	Kokybė			
1	brokuota	67	62,6	59,3
	kokybiška	58	81,8	83,6
2	brokuota	65	69,4	64,8
	kokybiška	39,4	71,8	84,8
3	brokuota	63,6	62,8	68,8
	kokybiška	60,1	34,6	81,3
4	brokuota	68,4	66,6	63,6
	kokybiška	56	82,1	74,8
5	brokuota	55,9	68,5	64,4
	kokybiška	41,9	50,1	84,5
6	kokybiška	32,5	76,2	65,8
	kokybiška	38,1	74,9	67,8
7	kokybiška	68,6	70,1	65,6
	kokybiška	63,8	75,9	75,2
8	kokybiška	49,1	77,5	73,8
	kokybiška	20	71,7	62,9
9	kokybiška	33,6	78,4	66,8
	kokybiška	43,1	72,9	65,7
10	kokybiška	68,5	73,2	75,7
	kokybiška	53,9	60,6	74,6

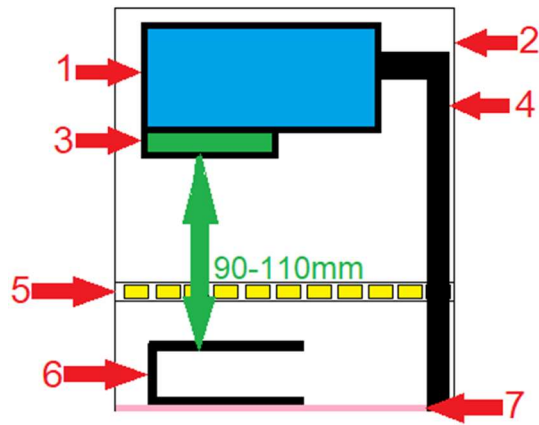
Iš pateiktų duomenų matyti, kad apšviečiant detalę iš šono bei naudojant žalią filtrą detalės stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo neatpažinta, t. y. kokybiška detalės pusė fiksuojama kaip brokuota), atpažinimo tikslumas 0 proc. Daroma išvada, kad apšvietimas iš tiriamos detalės šono, sukant ją kampu, yra netinkamas, norint užfiksuoti detalių savybes.

7.3.3. Tyrimas detalę sukant kampu, izoliavus tiriamą zoną nuo išorinės šviesos bei naudojant apšvietimą iš keturių šonų

Tyrimui su žaliu kameros filtru detalė nuo kameros lęšio nutolusi 90–110 mm. Eliminuojuama aplinkos šviesa, uždengiant tiriamąją zoną dėže ir tiriamą detalę sukant kampu tolygiai bei ją apšviečiant iš visų pusių LED juosta, priklijuota prie dėžės sienų. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 67 paveiksle ir rezultatai 45 lentelėje.

Numeriu 1 pažymėta naudojama kamera; 2 – tiriamąją zoną nuo išorinės šviesos izoliuojanti dėžė; 3 – tyrimui naudojamas skaidrus filtras; 4 – kamerą laikantis stovas; 5 – ant visų keturių aplink detalę esančių sienų ištiesta LED juosta; 6 – tiriamą detalę; 7 – detalės pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 5 detalėmis. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 45 lentelėje.

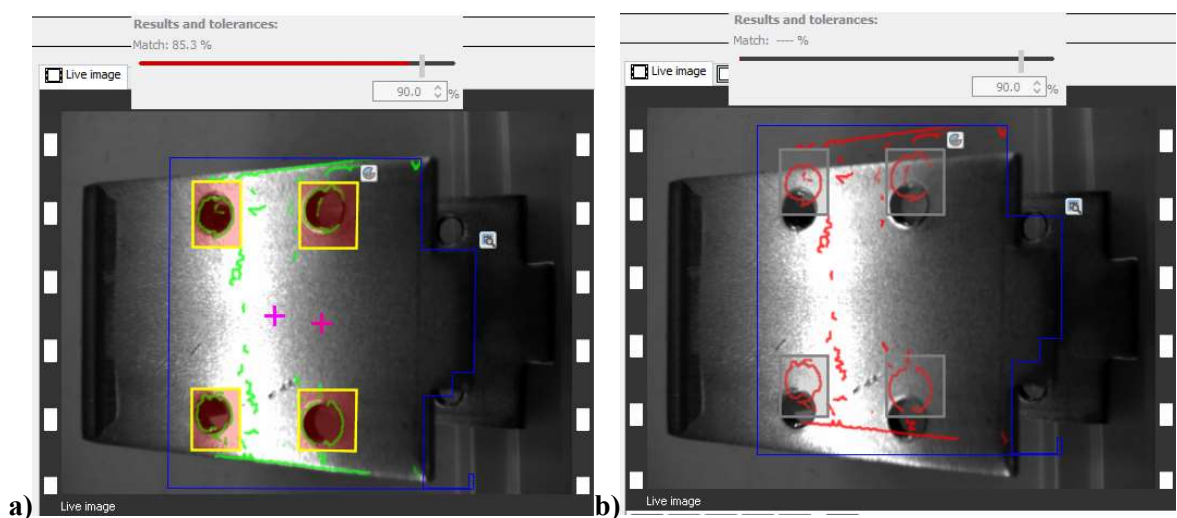


67 pav. Tyrimo metu naudojamos fizinės įrangos išdėstymo schema

45 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)

Pasukimo kampas °		Kokybė	45
Detalės Nr.			
1	brokuota	61,5	
	kokybiška	93,6	
2	brokuota	86,7	
	kokybiška	96,7	
3	brokuota	0	
	kokybiška	0	
4	brokuota	85,7	
	kokybiška	97	
5	brokuota	76,5	
	kokybiška	93,3	

Tyrimas kampu, apšvietus detalę iš visų keturių šonų, buvo nutrauktas pastebėjus, kad dėl apšvietimo susidarė atspindžiai, dėl kurių detalės atpažinimas nėra stabilus, t. y., aptikta detalės pozicija yra pametama, atrandama ir vėl pametama. Pavyzdys pateiktas 68 paveiksle.



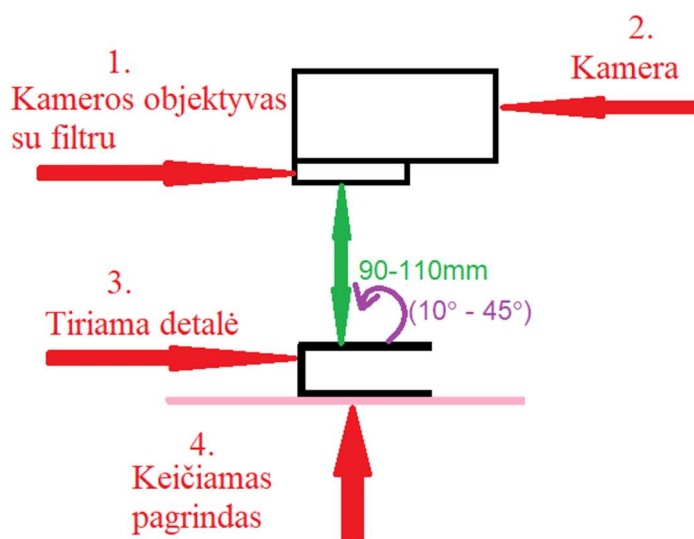
68 pav. a) aptiktos detalės savybės; b) pamestos detalės savybės

Iš pateiktų duomenų matyti, kad apdengus tyrimo zoną dėže (pašalinant išorinį apšvietimą) ir apšviečiant LED juosta detalę (sukama 45° kampu) iš keturių šonų bei naudojant žalią filtrą detalės

stebėjimui maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (detalės pozicija ir jos atitikimas nuostatui pametamas). Daroma išvada, kad apšvietimas iš tiriamos detalės keturių šonų, stebint detalę pasuktą kampu, yra netinkamas, norint užfiksuoti detalių savybes .

7.3.4. Tyrimas su žaliu filtru ir integruotu kameros apšvietimu, sukant tiriamą detalę

Tyrimui su žaliu filtru detalė nuo kameros nutolusi 90–110 mm ir nenaudojamas išorinis apšvietimas. Naudojamas tik vidinis kameroje integruotas apšvietimas. Eliminuojuama aplinkos šviesa, uždengiant tiriamąją zoną dėže ir tiriamą detalę sukama kampu, tolygiai ją apšviečiant integruotu kameros apšvietimu. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kokios tai įtakos turi tiriamos detalės savybių atpažinimui. Tyrime naudojamos įrangos išdėstymas pateiktas 69 paveiksle ir rezultatai 46 lentelėje.



69 pav. Fizinės įrangos išdėliojimas, naudojant kameros raudoną filtrą

Numeriu 1 pažymėti kamera ir naudojamas žalias filtras, 2 – naudojama kamera, 3 – tiriamą detalę, 4 – keičiamas pagrindas.

Toliau atliekamas tyrimas su 10 detalių. Tiriamų detalių atitikimas palyginamojoje nuotraukoje sužymėtos detalės savybėms pateiktas 46 lentelėje.

46 lentelė. Detalių palyginimas su pavyzdinės kokybiškos detalės pusės nuotrauka (%)

Atitikimo riba, kai detalė brokuota <90						
Atitikimo riba, kai detalė kokybiška ≥90						
Pasukimo kampas °		10	20	30	40	45
Detalės Nr.	Kokybė					
1	brokuota	81,9	76	73,9	76	74,4
	kokybiška	92	90,2	90,7	92	90,9
2	brokuota	76,2	74,6	73,7	70	68,7
	kokybiška	94,7	90,7	92,3	95,3	91,4
3	brokuota	73,1	72,6	68,8	73,7	76,4
	kokybiška	93,5	90,7	91,8	91,5	91,7
4	brokuota	78,3	77,3	71,5	71,3	74,9
	kokybiška	91,4	91,6	91	91,6	94,6
5	brokuota	77,1	76,6	71,5	71,6	74,9
	kokybiška	92,9	91,4	90,4	91,5	98,9

Atitikimo riba, kai detalė brokuota <90						
Atitikimo riba, kai detalė kokybiška ≥90						
Pasukimo kampas °		10	20	30	40	45
Detalės Nr.	Kokybė					
6	kokybiška	92,8	69,7	90,5	84,6	90,3
	kokybiška	65,5	84	82,6	75	75,5
7	kokybiška	92	65,6	90,1	93,8	90,8
	kokybiška	78,2	73,9	83,1	78,9	83,3
8	kokybiška	81,6	67,4	80,7	94,6	82,2
	kokybiška	91,5	84,7	81,6	86,3	80,2
9	kokybiška	77,7	69	91,6	84,4	69,1
	kokybiška	77,5	81	82,9	90,3	91,8
10	kokybiška	91,5	69,6	89,1	86	90,1
	kokybiška	79	84,4	82,7	93,3	76,6

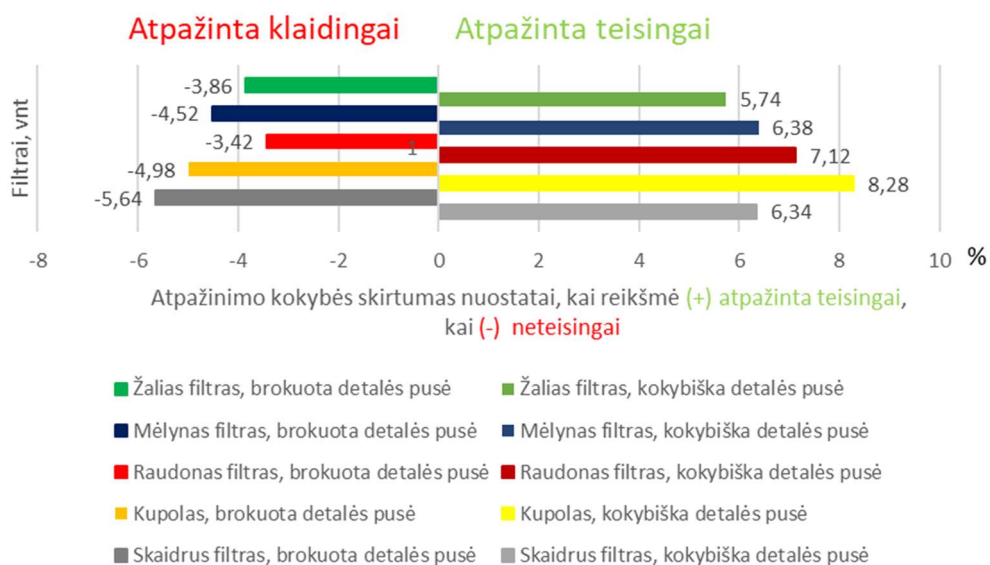
Iš pateiktų duomenų matyti, kad detalės stebėjimui toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), detalių savybių atpažinimas yra nekokybiškas (kokybiška detalės pusė buvo atpažinta: kai 10° , tai atpažinta 60 proc. tikslumu, kai 20° atpažinta ~33,33 proc. tikslumu, kai 30° atpažinta ~53,33 proc. tikslumu, kai 40° atpažinta ~53,33 proc. tikslumu, o kai 45° atpažinta ~60 proc. tikslumu).

7.4. Gautų rezultatų, naudojant skirtingus filtrus bei kupolą, apibendrinimas

Atlikus tyrimą su įvairiais kamerai pritaikytais filtrais bei kupolu, gauti rezultatai buvo apibendrinti 47 lentelėje bei 70–71 paveiksluose.

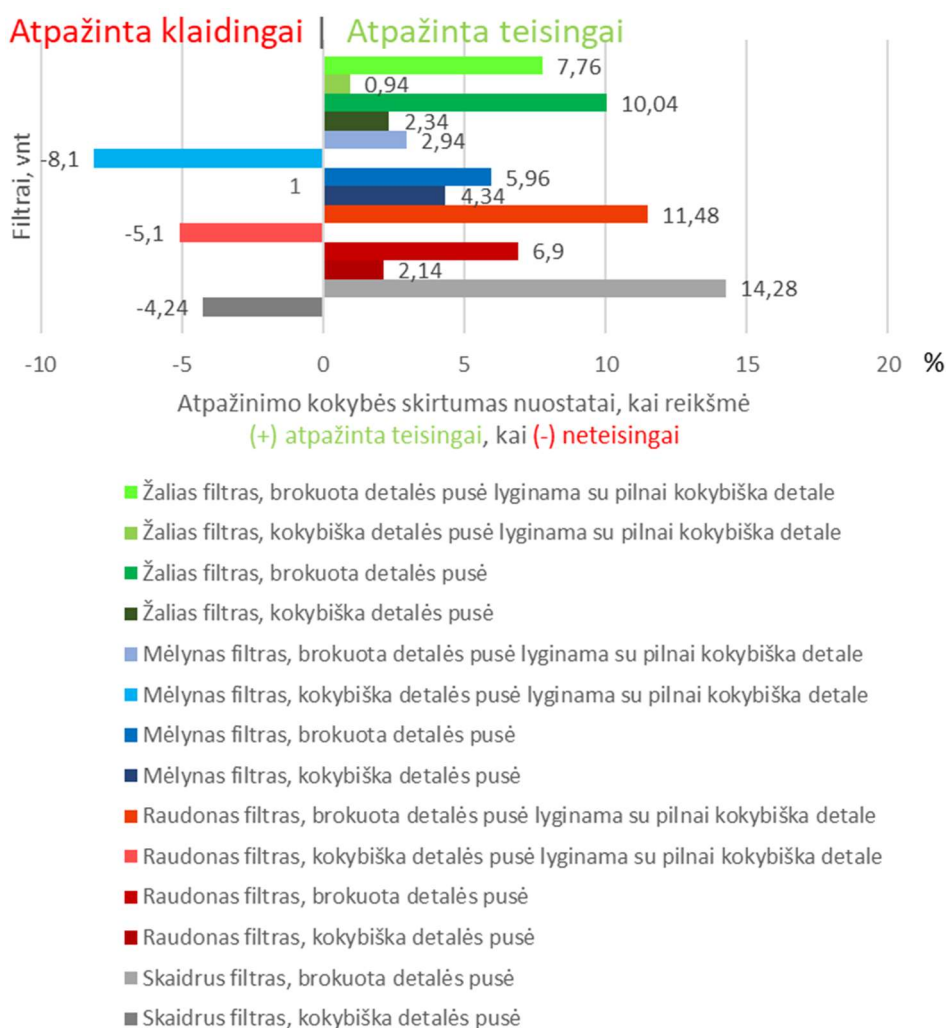
47 lentelė. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Tyrimas	Apšvietimas	Vidutinis skirtumas su atitikimo riba (kokybiškos detalės pusės atitikimo skirtumas turi būti ≥ 0 %), %	Vidutinis skirtumas su atitikimo riba (brokuotos detalės pusės atitikimo skirtumas turi būti ≥ 0 %), %
Skaidrus filtras	Vidinis	6,34	-5,64
	Išorinis	-4,24	14,28
Kupolas	Vidinis	8,28	-4,98
Raudonas filtras	Vidinis	7,12	-3,42
	Išorinis	2,14	6,9
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
	Išorinis	-5,1	11,48
Mėlynas filtras	Vidinis	6,38	-4,52
	Išorinis	4,34	5,96
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
	Išorinis	-8,1	2,94
Žalias filtras	Vidinis	5,74	-3,86
	Išorinis	2,34	10,04
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
	Išorinis	0,94	7,76



70 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, naudojant integruotą kameros apšvietimą

Iš gautų duomenų matyti, kad nesvarbu koks iš turimų filtrų (skaidrus, mėlynas, žalias, raudonas bei kupolas) naudojamas, kamera nėra tinkama blizgios plieninės detalės defektų atpažinimui, kai naudojamas tik vidinis (integruotas) kameros šviesos šaltinis. Rezultatų apibendrinimas, naudojant išorinį šviesos šaltinį, pateiktas 71 paveiksle.



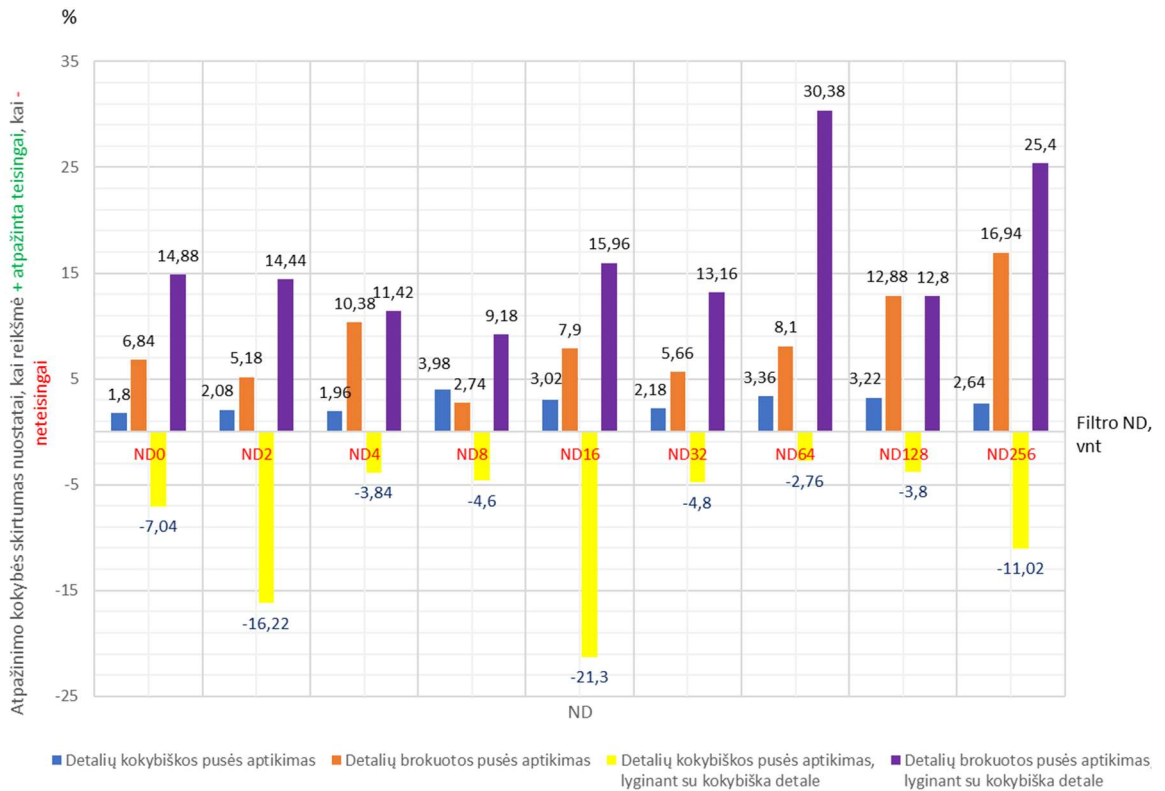
71 pav. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas, naudojant išorinį apšvietimą

Atlikus tyrimus su kameros komplektacijoje esančiais filtrais rasta, kad geriausiai atpažinti detalių savybes, kai naudojama išorinio apšvietimo bei žalio filtro kombinacija. Šis sistemos derinys atpažino detalės savybes, lygiavertes užsibrėžtai nuostatai bei savybes (brokas), neatitinkančias nuostatos.

Toliau apibendrinami tyrimo su ND filtru rezultatai. Jie pateikti 48 lentelėje ir grafiškai pavaizduoti 72 paveiksle.

48 lentelė. Abiejų detalės pusių atpažinimo kokybės palyginimas

Tyrimas	Apšvietimas	Vidutinis skirtumas su atitikimo riba (kokybiškos detalės pusės atitikimo skirtumas turi būti ≥ 0 %), %	Vidutinis skirtumas su atitikimo riba (brokuotos detalės pusės atitikimo skirtumas turi būti ≥ 0 %), %
ND0	Išorinis	1,8	6,84
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND2	Išorinis	-7,04	14,88
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND4	Išorinis	2,08	5,18
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND8	Išorinis	-16,22	14,44
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND16	Išorinis	1,96	10,38
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND32	Išorinis	-3,84	11,42
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND64	Išorinis	3,98	2,74
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND128	Išorinis	-4,6	9,18
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND256	Išorinis	3,02	7,9
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND32	Išorinis	-21,3	15,96
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND64	Išorinis	2,18	5,66
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND128	Išorinis	-4,8	13,16
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND256	Išorinis	3,36	8,1
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND32	Išorinis	-2,76	30,38
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND64	Išorinis	3,22	12,88
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND128	Išorinis	-3,8	12,8
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND256	Išorinis	2,64	16,94
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		
ND256	Išorinis	-11,02	25,4
	Lyginant su kokybiška detale iš abiejų pusių		



72 pav. Detalių kokybiškos ir nekokybiškos pusių aptikimo skirtumas nuo nuostato 90 proc.

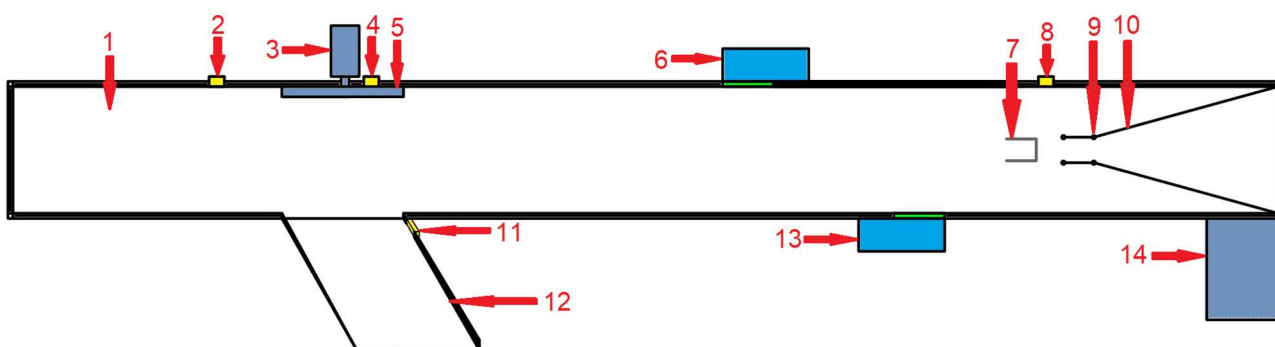
Iš tyrime gautų duomenų matyti, kad kelių pozicijų ND filtras nesuteikia didesnio detalių savybių atpažinimo tikslumo nei filtrai, kurie yra sukomplektuoti prie PIM60 „Sick“ firmos kameros.

8. Dalinės projektinės dalies išvados

1. Pasirinkti tiriamų detalių defektų stebėjimo įrangos komponentai: „InspectorPIM60“ kamera su spalvotais filtrais (skaidrus, raudonas, mėlynas, žalias, ND2-ND128 bei skaidrus su kupolu) naudojami tiriamų objektų stebėjimui ir defektų identifikavimui; Išorinis šviesos šaltinis „YONGNUO“ LED YN-160S,, skirtas tiriamų detalių kokybiškam apšvietimui bei LED juosta kartu su tyrimo zona apdengiančia dėže (aplinkos šviesos įtakos tyrimui pašalinimui) kokybiškam detalės apšvietimui iš visų šonų.
2. Atlikus tarpinį kameros atpažinimo kokybės tyrimą pastebėta, kad šio tyrimo metu geriausi rezultatai buvo gauti, panaudojus išorinį apšvietimą (nenaudojant kameroje įmontuoto šviesos šaltinio) bei žalią kameros filtrą, kamerei esant virš objekto 90–100 mm atstumu. Atliekant tyrimą su penkiomis vienodo tipo detalėmis, naudojant prieš tai paminėtą įrangą, kameros programinė įranga aptiko detalę abiem atvejais: ir atsukus kokybišką detalės pusę ir brokuotą. Visa tai kameros programinė įranga atliko pagal nuostatą. Kokybiška detalės pusė sutapo su pavyzdine ≥ 90 procentų, o brokuota < 90 procentų.
3. Atlikus tarpinį kameros atpažinimo kokybės tyrimą su filtrais pastebėta, kad šio tyrimo metu geriausi rezultatai buvo gauti panaudojus išorinį apšvietimą (nenaudojant kameroje įmontuoto šviesos šaltinio). Naudojamas vienas šviesos šaltinis – detalę apšviesti iš šono. Nors šis apšvietimo būdas kokybiškesnis už vidinį (integruotą) kameros apšvietimą (vietomis pakelia kameros sistemos detalės broko atradimo galimybes nuo 0 iki 100 procentų), tačiau nėra tobulas. Detalė vis vien nėra tolygiai apšviesta. Darytina išvada, kad tolesniame tyrime gali prireikti daugiau šviesos šaltinių, kad detalė būtų vienodai apšviesta iš visų pusių.
4. Atlikus kameros atpažinimo kokybės tyrimus su filtrais ir detalės sukimu kampu (10° – 45°) pastebėta, kad šio tyrimo metu geriausi rezultatai buvo gauti panaudojus išorinį apšvietimą (nenaudojant kameroje įmontuoto šviesos šaltinio). Naudojamas vienas šviesos šaltinis – detalę apšviesti iš šono. Nors šis apšvietimo būdas kokybiškesnis už vidinį (integruotą) kameros apšvietimą (vietomis pakelia kameros sistemos detalės broko atradimo galimybes nuo 0 procentų iki 100 procentų), tačiau nėra tobulas. Detalė vis vien nėra tolygiai apšviesta. Darytina išvada, kad tolesniame tyrime gali prireikti daugiau šviesos šaltinių, kad detalė būtų vienodai apšviesta iš visų pusių.

9. Pritaikymas gamybai (rekomendacijos)

Tyrimuose buvo nustatyta, kad kokybiškiausiai skirtumas tarp kokybiškos detalės pusės ir brokuotos randamas naudojant žalią kameros filtrą ir stebint detalę 90–100 mm atstumu (detalei esant maždaug toje pačioje pozicijoje ± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), apšvietus detalę iš šono. Šis atpažinimo metodas labiausiai rekomenduojamas. Kadangi tyrimuose buvo nustatyta, kad tos pačios detalės ir kokybiškos detalės pusės tarpusavyje skiriasi viena nuo kitos (akimi nematoma, bet sutapimas su nuostata skiriasi), tai rekomenduojama defektų aptikimui naudoti dvi kameras, stebinčias skirtingas detalės sienas pagal tai, kuri siena į kurią kamerą bus nukreipta po detalės pagaminimo ir padėjimo ant konvejerio. Kameroms sudaryti nuostatai pagal tai, kokia kokybiška detalės pusė prieš tą kamerą technologiškai turi būti. Sistemos įrangos išdėliojimo pavyzdys, darant prielaidą, kad apšvietimas yra iš viršaus (detalės šono), pateiktas 73 paveiksle.



73 pav. Detalės savybių atpažinimui rekomenduojamo įrangos išdėliojimo pavyzdys

Iš 73 paveikslo ir 49 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad tokiai sistemai reikalinga įranga:

- 2 kameros;
- 3–4 optiniai jutikliai;
- stūmoklis su pradinės ir galinės padėties jutikliais;
- konvejeris;
- konvejerio judėjimui reikalingos pavaros;
- dažnio keitiklis pavarai valdyti;
- valdiklis visai sistemai valdyti.

49 lentelė. Detalės savybių atpažinimui rekomenduojamo įrangos išdėliojimo pavyzdžio elementai

Numeris	Aprašymas
1	Konvejeris, 250 cm ilgio ir 24 cm pločio
2	Tiriamos detalės pozicijos jutiklis, J3
3	Brokuotas detales nustumiantis stūmoklis
4	Tiriamos detalės pozicijos jutiklis, J2
5	Brokuotas detales nustumiančio stūmoklio stumiamą plotą padidinanti plokštelė
6	Vaizdo atpažinimo kamera su žaliu filtru, Kj2
7	Tiriama detalė
8	Tiriamos detalės pozicijos jutiklis, J1
9	Detalės nukreipėjo trintį su tiriamomis detalėmis mažinantys guoliai
10	Detalės pozicionuotojas
11	Tiriamos detalės pozicijos jutiklis, J4
12	Brokuotų detalių nuožulna
13	Vaizdo atpažinimo kamera su žaliu filtru, Kj1
14	Pavara

Sistemos valdymo elementai. Kadangi šiai preliminariai sistemai reikia tik 7–8 skaitmeninių įėjimų ir 3 išėjimų, tai jai tinka daugelis valdiklių. Sakykim, „Siemens“ S7-1200 yra pilnai tinkantis valdiklis šiai užduočiai, kadangi turi 14 skaitmeninių įėjimų, 10 skaitmeninių išėjimų ir 2 analoginius įėjimus [64]. Dažnio keitiklio pavyzdys galėtų būti 1,5 kW „Danfoss“ FC51 [65]. Šį valdiklį ir dažnio keitiklį galima pamatyti 74–75 paveiksluose.



74 pav. Valdiklis „Siemens“ S7-1200 CPU 1214C [64]



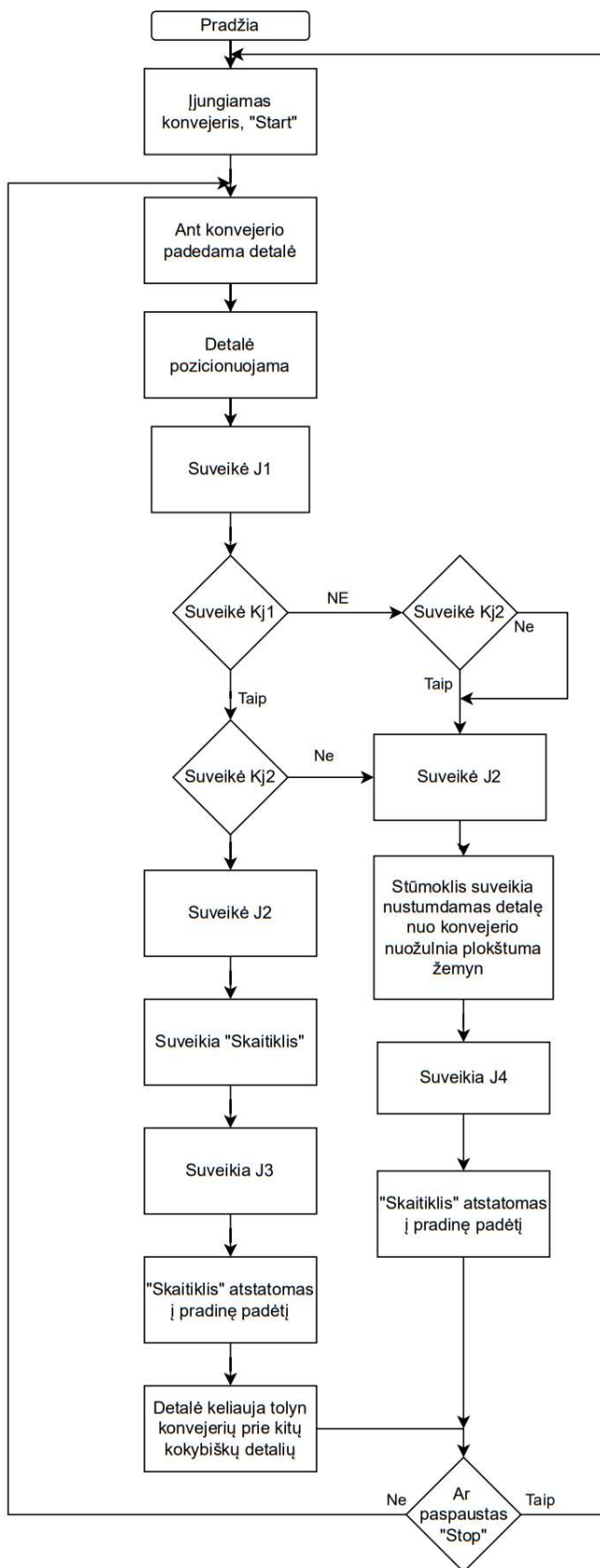
75 pav. Dažnio keitiklis „Danfoss“ FC51 [65]

Šiems valdymo elementams (žr. 74–75 pav.) naudojantis „TIA portal“ programine įranga, parašyta pavyzdinė valdymo programa pateikta 1 priede. Programos supaprastintas aprašas: Paspaudus „Start“ mygtuką, paleidžiamas konvejeris. Atkeliavus detalei ant konvejerio, ji nukreipėju yra pozicionuojama. Supozicionuotos detalės pozicija J1 jutiklio užfiksuojama. Detalė keliauja toliau. Detalė pasiekia pirmos kameros (Kj1) matymo lauką ir užfiksuojama, ar viena iš tiriamos detalės pusių yra kokybiška. Toliau detalė pasiekia antrosios kameros (Kj2) matymo lauką ir užfiksuojama, ar kita detalės pusė yra kokybiška. Patikrinus detalės kokybę abejomis kameromis (Kj1, Kj2), ji toliau keliauja prie detalės pozicijos jutiklio J2. Jeigu pasiekus J2 jutiklį detalė:

- nėra prieš tai užfiksuota kaip kokybiška, nors vienos kameros (Kj1, Kj2) išsistumia stūmoklis, nustumdamas detalę ant konvejerio atšakos (nuožulnos žemyn), kuria detalė nuslysta į brokuotų detalių dėžę. Suveikia nustumiamas brokuotas detales fiksuojantis jutiklis J4;
- yra užfiksuojama kaip kokybiška detalė abiejų kamerų (Kj1, Kj2), detalė važiuoja toliau konvejeriu prie kokybiškų detalių. Pakeliui ją užfiksuoja kokybiškų detalių jutiklis J3.

Paspaudus „Stop“ mygtuką, pavara sustabdoma.

Supaprastinta programos blokinė schema pateikta 76 paveiksle.



76 pav. Konvejerio programos blokinė schema

Daugiau informacijos apie programą pateikta 1 priede. Vaizdo atpažinimo sistemos programos pavyzdys.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinę ir techninę literatūrą, susijusią su vaizdo atpažinimu ir metodais, nustatyta, kad vaizdo atpažinimo sprendiniai yra aktualūs pramonės sistemose kaip įrankis gaminio kokybei ir gamybos efektyviniui pasiekti.
2. Atlikus tyrimą, iš vaizdo atpažinimo kameroms dažniausiai taikomų trijų kalibravimo metodų (*Tsai, Zhang* ir tiesioginis tiesinis), pasirinktas *Zhang* metodas (PIM60 kamerai tinkamiausias kalibravimo metodas).
3. Išanalizavus mokslinę ir techninę literatūrą nustatyta, kad naudojant vaizdų atpažinimo sistemas paviršių defektams tirti, patikimiausia naudoti tamsaus lauko arba tiesioginio tiriamo objekto apšvietimą. Kadangi tirtos plieninės blizgios detalės, tai teoriškai patikimiausi apšvietimo būdai tyrimams netiko. Tyrimams naudoti supaprastinti apšvietimo būdai, naudojant LED 5500° K šviesą: detalės apšvietimas iš vieno šono, iš keturių šonų išoriniu apšvietimu bei apšvietimas iš viršaus integruotu kameros apšvietimu. Geriausiai pasiteisino apšvietimas iš vieno šono.
4. Sriegio defekto detalėje aptikimo, naudojant vaizdo kamerą, metodika yra palyginimo nustatymo įvedimas (kokybiškos detalės savybių sužymėjimas tokiomis pat sąlygomis, kokiomis bus tiriamos kitų detalių savybės). Nustatymui padaryti įvairių filtrų ir apšvietimo metodų pagalba randamos tinkamiausios, kokybiškiausios savybių aptikimo sąlygos, prie kurių tiriamas objektas sufokusuojamas geriausiai. Sudarius nustatymą ir jį patvirtinus, su juo lyginamos tiriamos detalės.
5. Atlikus tyrimus, kokybiškiausi tyrimų rezultatai gauti detalę stebint 90 – 100 mm atstumu, naudojant žalią kameros filtrą ir apšviečiant detalę iš vieno šono. Gauta, kad detalę stebint maždaug toje pačioje pozicijoje (± 5 mm ir $\pm 5^\circ$), galima išgauti net 100 proc. atpažinimo tikslumą (kokybiškos detalių pusės atitinka nuostatai ≥ 90 , o brokuotos atitinka nuostatai < 90).

Literatūros sąrašas

1. ZANCUL, E., MARTINS, H. O., LOPES, F. P., SILVA, F. Machine vision applications in a learning factory. *Procedia Manufacturing* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-03-10]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920311112>.
2. WEDEL, A., CREMERS, D. *Machine Vision Systems* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2021-03-18]. Prieiga per: <https://www.qualitydigest.com/oct97/html/machvis.html>.
3. KUMAR, R., PATIL, O., NATH, S. K., SANGWAN, K. S. A machine vision-based cyber-physical production system for energy efficiency and enhanced teaching-learning using a learning factory. *Procedia* [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-03-15]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712100158X>.
4. JONES, R. C. *Robots' to Replace up to 20 Million Factory Jobs' by 2030* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: <https://www.bbc.com/news/business-48760799>.
5. XIAO, G., LI, Y., XIA, Q., CHENG, X., CHEN, W. Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology. *Measurement. Journal of the International Measurement Confederation* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2021-03-16]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119307389>.
6. EDWARDS, J. Machine vision and its integration with CIM systems in the electronic manufacturing industry. *Computer Aided Engineering Journal*. 1990, 12–18.
7. CROMWELL, R. L. Sensor and processor enable robot to see and understand. *Laser Focus World*. 1993, 67–78.
8. GOLNABI, H., ASADPOUR, A. Design and application of industrial machine vision systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [interaktyvus]. 2007 [žiūrėta 2021-03-18]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584507000233#bib6>.
9. BIN, UE, SUNCHANG, HUIHUI, CHU, QINGSEN, MENG, SHUANBEN, JIAO. Method of electronic component location, grasping and inserting based on machine vision. *International Wireless Communications and Mobile Computing* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9148099>.
10. PRASAD, PB. Machine vision systems and image processing with applications. *Journal of Innovation in Computer Science and Engineering*. 2013.
11. BOTTERILL, T. Optimising light source positions to minimise illumination variation for 3D vision. 2012 *Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission*, IEEE. 2012.
12. SATHYANATH, S., SAHIN, F. An AIS approach to a color image classification problem in a real time industrial application. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace* [interaktyvus]. 2001 [žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/972897>.
13. OKOULALI, RIM, ZAIDANI, HAJAR, ZAIM, MARYEME. Image classification approach using machine learning and an industrial hadoop based data pipeline. *Big Data Research* [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.bdr.2021.100184.
14. PERNKOPF, F., O'LEARY, P. Visual inspection of machined metallic high-precision surfaces. *Journal on Advances in Signal Processing. EURASIP*. 2002.

15. TIMM, F., BARTH, E. Non-parametric texture defect detection using Weibull features. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*. 2011.
16. KIM, S., KIM, W., NOH, Y. K., PARK, F. C. Transfer learning for automated optical inspection. *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. 2017, pp. 2517-2524.
17. O'MAHONYN, A., CAMPLELL, S., CARVALHO G. V., HARAPANAHALLI, L., HERNANDEZ, KRPALKOVA, D., RIORDAN, W. J. Deep learning vs. traditional computer vision. *Proceedings of the Science and Information Conference*. 2019, 128–144.
18. WÜRSCHINGER, H., MÜHLBAUER, M., WINTER, M., ENGELBRECHT, M., HANENKAMP, N. Implementation and potentials of a machine vision system in a series production using deep learning and low-cost hardware]. *Procedia* [interaktyvus]. 2020 [žiūrēta 2021-03-18]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120302985#bib0011>.
19. LABUDZKI, R., LEGUTKO, S., RAOS, P. The essence and applications of machine vision. [interaktyvus]. 2014 [žiūrēta 2021-03-17]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/286283684_The_essence_and_applications_of_machine_vision.
20. MARTIN, D. Practical guide to machine vision lighting. *Advanced Illumination* [interaktyvus]. 2012 [žiūrēta 2021-03-19]. Prieiga per: <https://www.advancedillumination.com/wp-content/uploads/2018/10/A-Practical-Guide-to-Machine-Vision-Lighting-v.-4-Generic.pdf>.
21. KOPPARAPU, SK. Lighting design for machine vision application. *Image and Vision Computing* [interaktyvus]. 2006 [žiūrēta 2021-03-17]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885606000278>.
22. COWAN, C., K., MODAYUR, B., DECURTINS, J. L. Automatic light-source placement for detecting object features. *Proceedings of SPIE*. 1992, 1826, 397–408.
23. RYCKAERT, W. R., SMET, K. A. G., ROELANDTS, I. A. A., GILS, M., VAN, HANSELAER, P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps. *An evaluation. Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2012 [žiūrēta 2021-03-17]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.enbuild.2012.02.042.
24. CHAKI, A., PRASHANT, M., SEN, P. A comprehensive market analysis on camera and illumination sensors for image processing and machine vision applications [interaktyvus]. *2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, Bhopal, India*. 2010 [žiūrēta 2021-04-11]. Prieiga per: DOI: 10.1109/CICN.2010.79.
25. COGNEX. *MACHINE VISION LIGHTING* [interaktyvus]. 2021 [žiūrēta 2021-04-10]. Prieiga per: <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components/lighting>.
26. GALATA, DORIÁN, LÁSZLÓ, MÉSZÁROS, LILLA, ALEXANDRA, KÁLLAI-SZABÓ, NIKOLETT, SZABÓ, EDINA, PATAKI, HAJNALKA, MAROSI, GYÖRGY, NAGY, ZSOMBOR, KRISTÓF. Applications of machine vision in pharmaceutical technology. A review. *European Journal of Pharmaceutical Sciences* [interaktyvus]. 2021 [žiūrēta 2021-04-05]. Prieiga per: DOI 10.1016/j.ejps.2021.105717.
27. GOLNABI, H., ASADPOUR, A. Design and application of industrial machine vision systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [interaktyvus]. 2007 [žiūrēta 2021-04-05]. Prieiga per: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0736584507000233?token=7E7B2E5E00BB6C71380>

D1E113B970F24C592F4613E3FDC3F26DC04DAFDD69D1AF3E8F0656CBD9A82171831B3B1EAB6F0&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210406211910.

28. OTTAVIAN, M., BAROLO, M., GARCÍA-MUÑOZ, S. *Maintenance of Machine Vision Systems for Product Quality Assessment. Part II. Addressing Camera Replacement*. 2014, 1529–1536.
29. VISION A. GUPPY. PRO Technical Manual [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per: https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/avt/65/65129-Allied_Vision_Guppy_PRO_Technical_Manual.pdf.
30. Vision System [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per: https://support.cognex.com/docs/is_590/ISE/EN/Manuals/is8000inst.pdf.
31. TAISSY, L. *User's Guide* [interaktyvus]. 1985 [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per: <https://www.hvssystem.com/documentations/Cognex/Checker/3g-users-guide.pdf>.
32. DINEV PETKO. *Digital or Analog?* [interaktyvus]. 2008 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: <https://www.qualitymag.com/articles/89454-digital-or-analog>.
33. LEE, H., W., WANG, C., LU, B., Y. Study on the computer vision of the biped robot for stable walking on the stairs. *International Conference on Consumer Electronics – Taiwan* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2021-03-19]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8991808>
34. YU, W., XIE, J., WU, X., LIU, K. Research of improved Zhang's calibration method. *Proceedings – Chinese Automation Congress* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2021-03-20]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8242990/citations#citations>.
35. LU, G., SHAO, Y., DENG, L., FEI, M. An improved algorithm for camera calibration technology research. *Communications in Computer and Information Science* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2021-03-19]. Prieiga per: https://page-one.springer.com/pdf/preview/10.1007/978-3-662-45261-5_26.
36. SMITH, L., N., SMITH, M., L. Automatic machine vision calibration using statistical and neural network methods. *Image and Vision Computing* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2021-03-19]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885605000740>.
37. TISCAREÑO, J., ALBAJEZ, J., A., SANTOLARIA, J. Analysis of different camera calibration methods on a camera projector measuring system. *Procedia Manufacturing* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2021-03-20] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311308>.
38. WEN-QI, WU, ZENG-Q, SUN. Overview of camera calibration methods for machine vision. *Application Research of Computers*, 2004.
39. PENG LI, WANG JUN-NING. Overview of camera calibration methods. *Shanxi Electronic Technology*. 2007, 4, 77–79.
40. DA-ZHI, JIANG, QIAN, YU, BING-YANG, WANG. Overview of camera calibration and 3D reconstruction for computer vision. *Computer Engineering and Applications*, 2001, 13, 53–55.
41. QI, WANG, LI, FU, ZHENZHONG, LIU. Review on camera calibration. *Chinese Control and Decision Conference* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2021-04-05]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5498574>.
42. SALVI, J., ARMANGUÉ, X., BATLLE, J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition* [interaktyvus]. 2002 [žiūrėta 2021-03-20]. Prieiga per: <http://eia.udg.es/~qsalvi/papers/2002-PR.pdf>.

43. OLLNER, H., SABLATNIG, R. Comparison of methods for geometric camera calibration using planar calibration targets. H. Zollner and R. Sablatnig Pattern and Image Processing Group (PRIP), Vienna University of Technology. *Image Processing* [interaktyvus]. 2004 [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: <https://cvi.tuwien.ac.at/wp-content/uploads/2014/12/oagm04b.pdf>.
44. HEIKKILA, J., SILVEN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)*, San Juan, Puerto Rico, 1997.
45. MELEN, T. Geometrical modelling and calibration of video cameras for underwater navigation. *PhD Thesi*. Institutt for Teknisk Kybernetikk, Norges Tekniske Hogskole, 1994.
46. ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000, 22(11), 1330–1334.
47. TSAI, R., Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal on robotics & Automation*. 1987, 3(4), 323–344.
48. ABDEL-AZIZ, Y., I., KARARA, H., M., HAUCK, M. Direct liner transformation form comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2015, 81(2), 103–107.
49. YANG, H., DENG, K., ZHANG, S., GUO, G., ZHOU, M. Non-metric CCD camera calibration algorithm in a digital photogrammetry system. *Journal of China University of mining & Technology*. 2017, 16(2), 119–122.
50. TANG, S., DONG, Z., FENG, W., LI, Q., NIE, L. Fast and accuracy camera calibration based on Tsai two-step method. *7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Budapest, Hungary [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9384826>.
51. XIPING, MA, DI, LI, XIA-NAN, YAO, YUANJIN, MA. Camera calibration method of Visual dispensing System based on Tsai's two-step method. *Automation & Instrumentation*. 2016, 33, 5, 1–4.
52. TSAI, ROGER, Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1987, 3(4), 323–343.
53. PENG, LI, JUNNING, WANG. Brief description of camera calibration method. *Sensor World*. 2007, 3, 21–24.
54. ZHANG, ZHENGYOU. A flexible new technology suitable for camera calibration. *IEEE Transactionson Mode Analysis and Machine Intelligence*. 2000, 22(11), 1330–1334.
55. LIU, H., SUN, Q., WANG, W. A camera calibration method based on real-time video. *Advances in 3D Image and Graphics Representation Analysis Computing and Information Technology. Smart Innovation Systems and Technologies* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-03-06] Prieiga per: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3867-4_49.
56. SIYONG, FU, LUSHEN, WU, HUAWEI, CHEN, YUN, HU. Integrated camera calibration with Multiple distortion factors. *Journal of Instrumentation*. 2012, 39(02), 248–256.
57. TSAI, R. Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. *Proceeding, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach* [interaktyvus]. 1986 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/DIAS1/.

58. AYHAN, GOKTEPE, ENGIN, KOCAMAN. Analysis of camera calibrations using direct linear transformation and bundle adjustment methods. *Scientific Research and Essays* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/267835009_Analysis_of_camera_calibrations_using_direct_linear_transformation_and_bundle_adjustment_methods.
59. JAJOB, W. *Camera Calibration Explained* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: <https://calib.io/blogs/knowledge-base/camera-calibration>.
60. SICK, 2018. *Inspector PIM60 ver 2.0 – Vision Sensor* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2021-10-07]. Prieiga per: https://cdn.sick.com/media/docs/6/36/836/operating_instructions_inspector_pim60_ver_2.0_en_im0048836.pdf.
61. SICK. *Inspector PIM60 ver 2.0 Vision Sensor* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2021-10-20]. Prieiga per: <https://cdn.kempstoncontrols.com/files/5e51b6933c4baae1611646ce4f1c4f66/VSPM-6F2113.pdf>.
62. YONGNUO LED YN-160S [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-11-20]. Prieiga per: https://www.yongnuo.eu/catalog.html?page=shop.product_details&product_id=74&flypage=flypage.tpl&pop=0.
63. *Inspector Vision Sensors The Intelligent Vision Solution in an Easy-to-Use Sensor Package* [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2021-12-15]. Prieiga per: https://cdn.sick.com/media/docs/6/06/206/product_information_inspector_vision_sensors_en_im0026206.pdf.
64. SIEMENS. *SIMATIC S7-1200 Datasheet. Plc* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2022-05-10]. Prieiga per: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/simatic.html>.
65. MODERN, *Making and POSSIBLE, Living. Design Guide VLT ® Micro Drive FC 51* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2022-05-10]. Prieiga per: <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG02K402.pdf>.

Priedai

1 priedas. Vaizdo atpažinimo sistemos programos pavyzdys

Name	Data type	Address	Retain	Accessible from HMI/O PC UA/W eb API	Writable from HMI/O PC UA/W eb API	Visible in HMI engineering	Supervision	Comment
System_Byte	Byte	%MB1	False	True	True	True		
FirstScan	Bool	%M1.0	False	True	True	True		
DiagStatusUpdate	Bool	%M1.1	False	True	True	True		
AlwaysTRUE	Bool	%M1.2	False	True	True	True		
AlwaysFALSE	Bool	%M1.3	False	True	True	True		
Valdymo_žodis	Word	%MW20	False	True	True	True		
Greičio_nuostata	Word	%MW22	False	True	True	True		
Būsena	Word	%MW24	False	True	True	True		
J1	Bool	%I0.0	False	True	True	True		Detalės poziciją fiksuojantis jutiklis
J3	Bool	%I0.1	False	True	True	True		Detalės poziciją fiksuojantis jutiklis
Kj1	Bool	%I0.2	False	True	True	True		Pirma kamera, naudojama kaip jutiklis
Kj2	Bool	%I0.3	False	True	True	True		Antra kamera, naudojama kaip jutiklis
Spj	Bool	%I0.4	False	True	True	True		Stūmoklio pradinės pozicijos jutiklis
Sgj	Bool	%I0.5	False	True	True	True		Stūmoklio galinės pozicijos jutiklis
Skaitiklis	Bool	%Q0.0	False	True	True	True		Skaitiklis
J2	Bool	%I0.6	False	True	True	True		Detalės poziciją fiksuojantis jutiklis
Stūmoklis_išsistumia	Bool	%Q0.1	False	True	True	True		Stūmoklis išsistumia
Stūmoklis_susistumia	Bool	%Q0.2	False	True	True	True		Stūmoklis susistumia
J4	Bool	%I1.1	False	True	True	True		Detalės poziciją fiksuojantis jutiklis

Konvejeris_Vaidas_Gasiūnas / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

Duomenys [DB3]

Duomenys Properties					
General					
Name	Duomenys	Number	3	Type	DB
Language	DB	Numbering	Automatic		
Information					
Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Duomenys									
Name	Data type	Start value	Retain	Accessible from HMI/OPC UA/Web API	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Visible in HMI engineering	Set-point	Supervision	Comment
▼ Static									
Skaičiuoti	Int	0	False	True	True	True	False		
Start	Bool	false	False	True	True	True	False		
Stop	Bool	false	False	True	True	True	False		
Reversas	Bool	false	False	True	True	True	False		
Greičio_nuostata	Int	0	False	True	True	True	False		
Greitis_normx	Real	0.0	False	True	True	True	False		

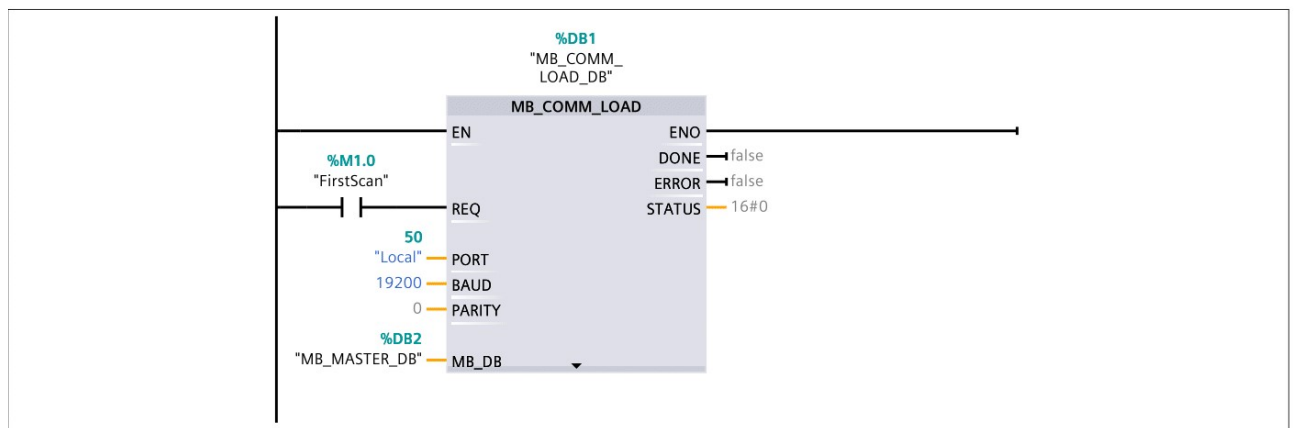
Konvejeris_Vaidas_Gasiūnas / PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

Main [OB1]

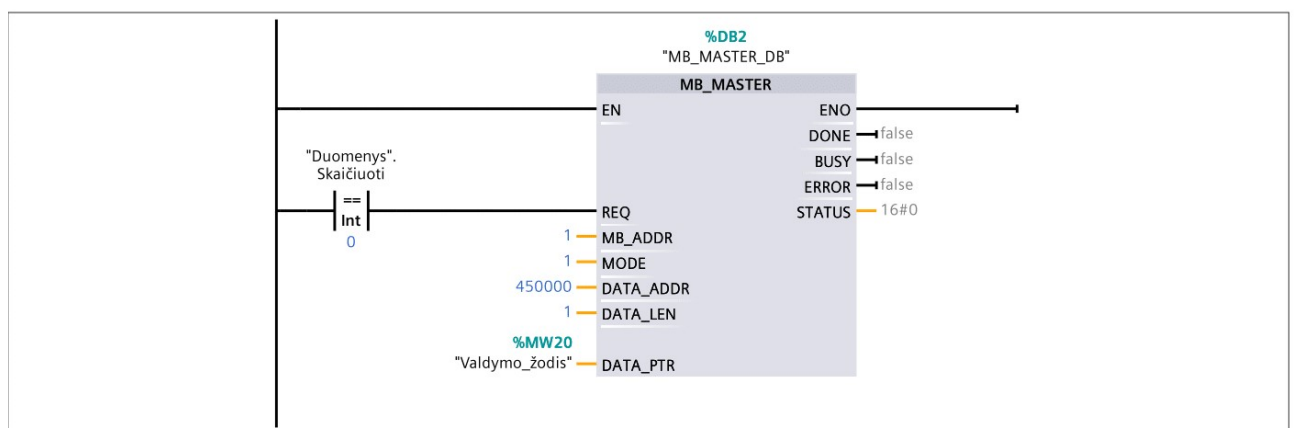
Main Properties					
General					
Name	Main	Number	1	Type	OB
Language	LAD	Numbering	Automatic		
Information					
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Main			
Name	Data type	Default value	Comment
Temp			
Constant			

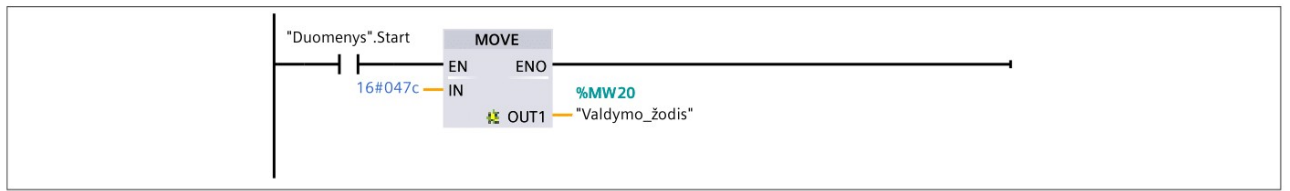
Network 1: Pradinių duomenų suvedimas



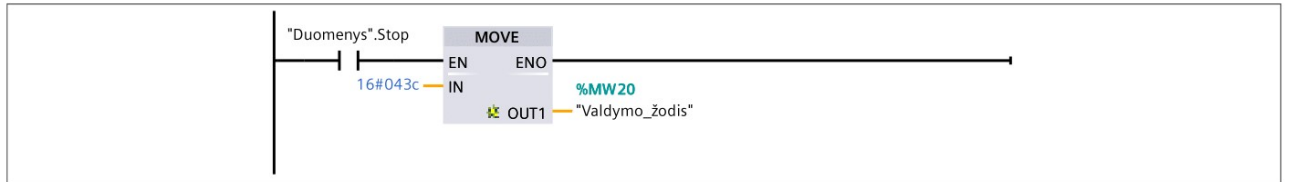
Network 2:



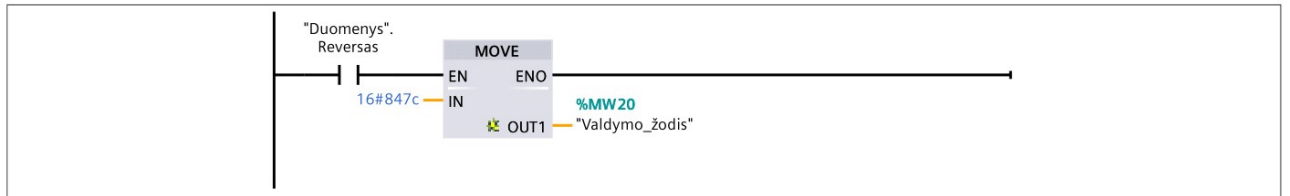
Network 3: Konvejerio paleidimo išraiška



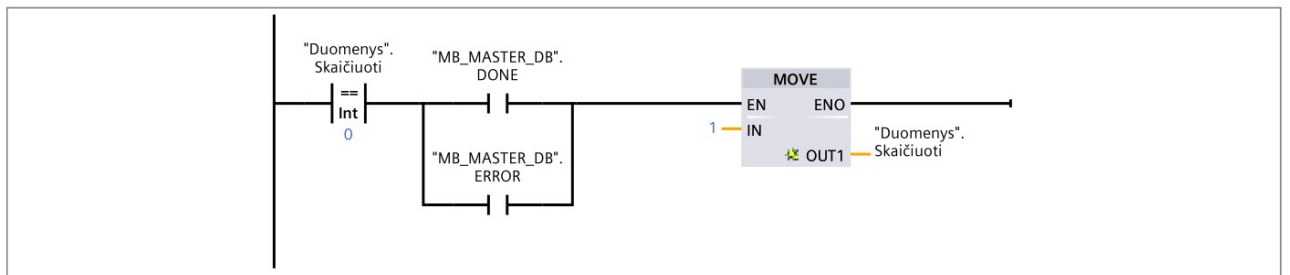
Network 4: Konvejerio sustabdymo išraiška



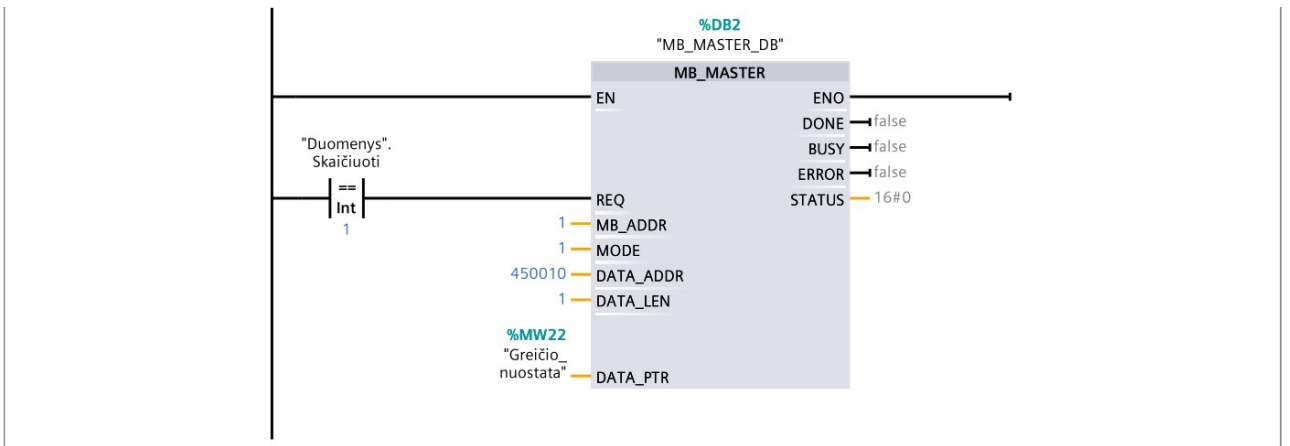
Network 5: Konvejerio paleidimo kita kryptimi išraiška



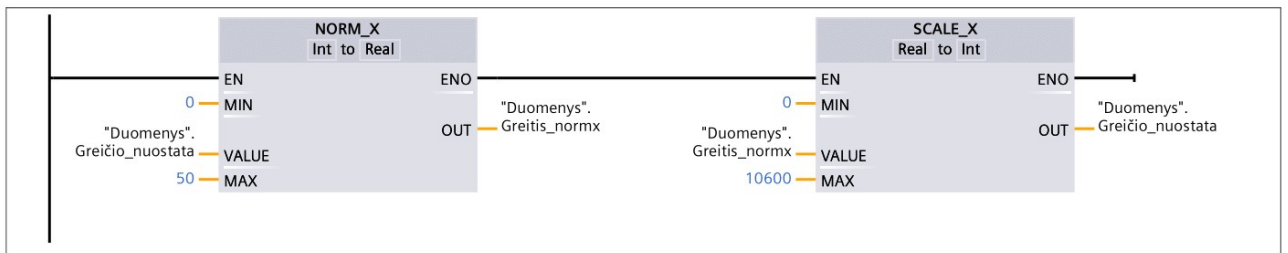
Network 6:



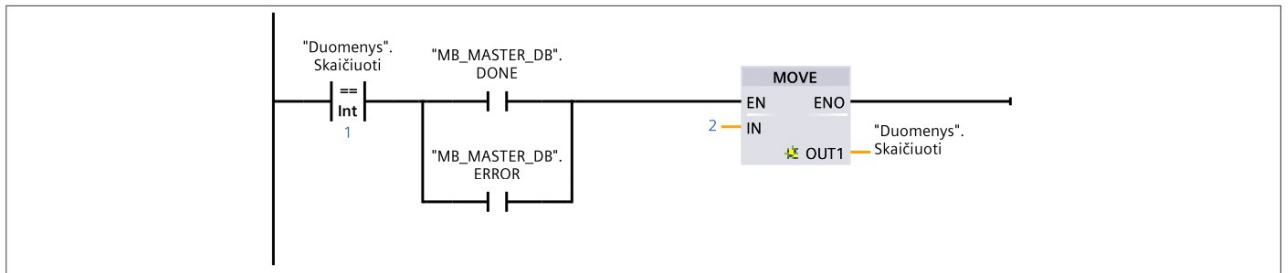
Network 7:



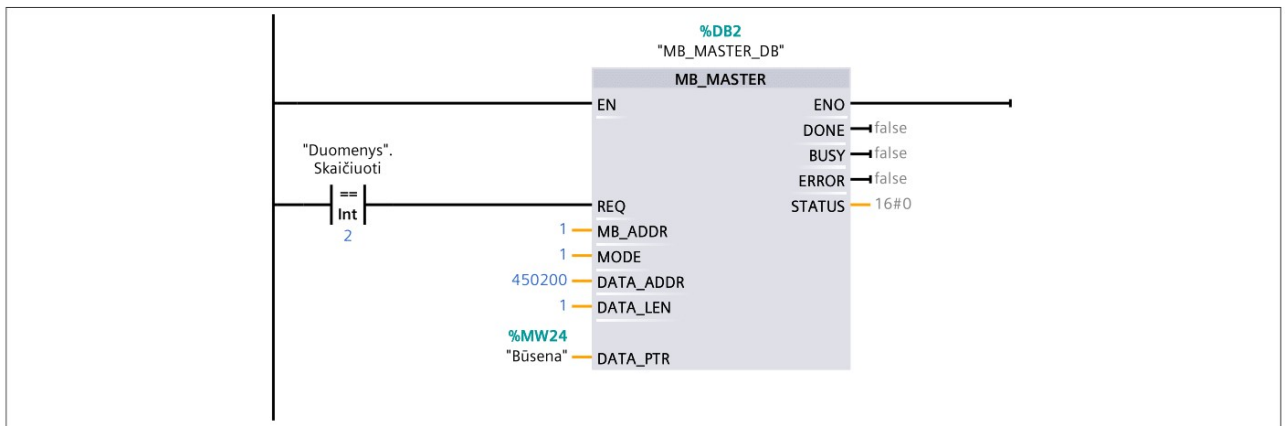
Network 8: Greičio valdymas



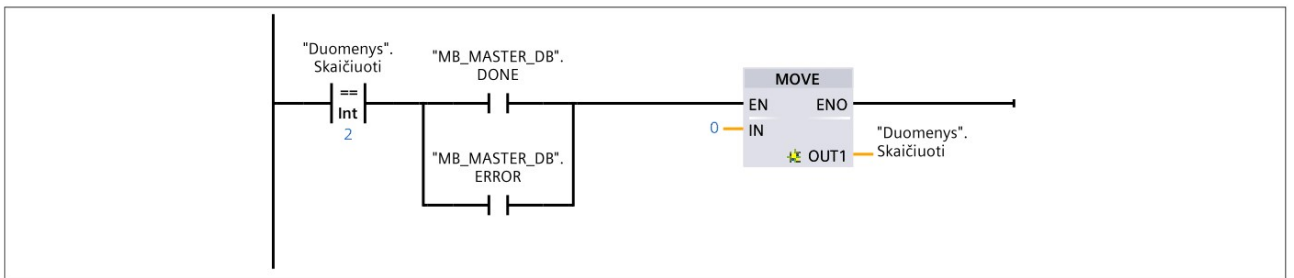
Network 9:



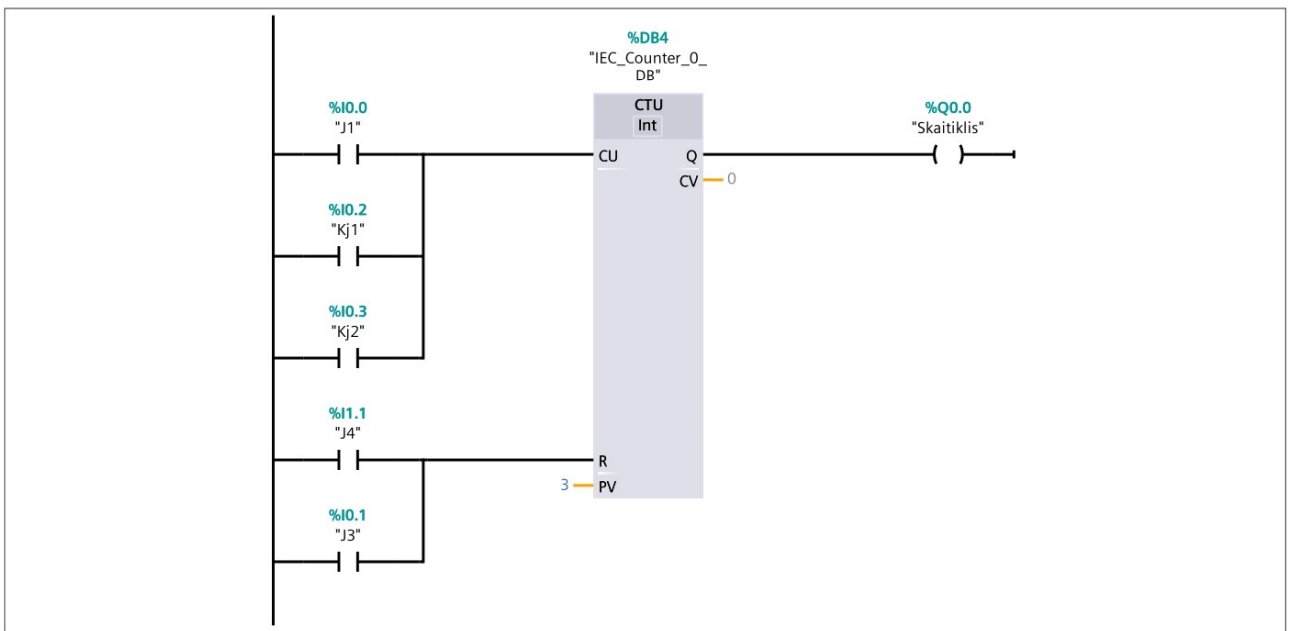
Network 10:



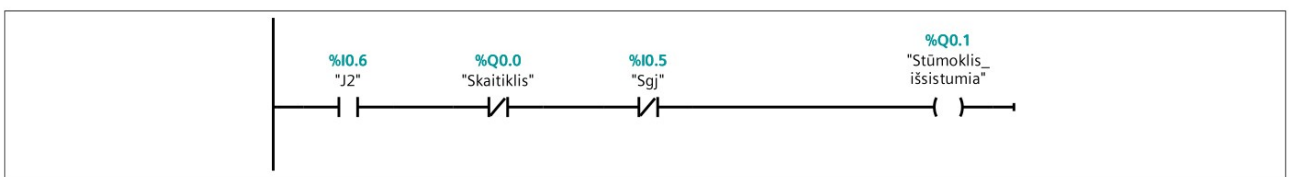
Network 11:



Network 12: Skaitiklis



Network 13: Stūmoklis išsistumia



Network 14: Stūmoklis susistumia

