



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Tautvydas Berteška

**BEPILOTE SKRAIDYMO PRIEMONE GAUTŲ FOTOGRAMETRINIŲ  
DUOMENŲ APDOROJIMAS IR TIKSLUMO ANALIZĖ  
PROCESSING AND ACCURACY ANALYSIS OF THE  
PHOTOGRAMMETRIC DATA COLLECTED WITH UNMANNED AERIAL  
VEHICLE**

Baigiamasis magistro darbas

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 621H14003

Geografinės informacinės sistemos specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS  
GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)  
Vladislovas Česlovas Aksamitauskas  
(Vardas, pavardė)  
\_\_\_\_\_  
(Data)

Tautvydas Berteška

**BEPILOTE SKRAIDYMO PRIEMONĖ GAUTŲ FOTOGRAMETRINIŲ  
DUOMENŲ APDOROJIMAS IR TIKSLUMO ANALIZĖ  
PROCESSING AND ACCURACY ANALYSIS OF THE  
PHOTOGRAMMETRIC DATA COLLECTED WITH UNMANNED AERIAL  
VEHICLE**

Baigiamasis magistro darbas

Geodezijos ir kartografijos studijų programa, valstybinis kodas 621H14003

Geografinės informacinės sistemos specializacija

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis

**Vadovas**

\_\_\_\_\_  
doc. dr. Birutė Ruzgienė  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Konsultantas**

\_\_\_\_\_  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Lietuvių kalbos konsultantas**

\_\_\_\_\_  
lekt. Regina Žukienė  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS  
GEODEZIJOS IR KADASTRO KATEDRA

Bendrosios inžinerijos studijų kryptis  
Geodezijos ir kartografijos studijų programa,  
valstybinis kodas 621H14003  
Geografinės informacinės sistemos specializacija

TVIRTINU  
Katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
(Parašas)  
Vladislovas Česlovas Aksamitauskas  
\_\_\_\_\_  
(Vardas, pavardė)  
\_\_\_\_\_  
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO  
UŽDUOTIS**

.....Nr. ....  
Vilnius

Studentui (ei) ..... Tautvydui Berteškai  
.....  
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

BEPILOTE SKRAIDYMO PRIEMONE GAUTŲ FOTOGRAMETRINIŲ DUOMENŲ  
APDOROJIMAS IR TIKSLUMO ANALIZĖ

patvirtinta 2014 m. lapkričio 8 d. dekanų potvarkiu Nr. 349ap.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014 m. birželio 3 d.

**BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:**

Išanalizuoti aerokartografavimo ypatybes ir fotogrametrijos metodų taikymą fotografiniams  
vaizdams apdoroti. Atlikti autonomini objekto aerofografavimą skaitmenine fotokamera  
įmontuota bepilotėje skraidymo priemonėje. Fotogrametriškai apdoroti gautus skaitmeninius  
vaizdus, sukurti 3D modelius, atlikti pradinių duomenų įtakos fotogrametrinio apdorojimo  
rezultatams analizę ir įvertinti sukurtų fotogrametrinių produktų tikslumą.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

..... lekt. Regina Žukienė  
.....  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas .....  
.....  
(Parašas)

..... doc. dr. Birutė Ruzgienė  
.....  
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....  
.....  
(Parašas)  
Tautvydas Berteška  
.....  
(Vardas, pavardė)  
.....  
(Data)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Vilniaus Gedimino technikos universitetas<br>Aplinkos inžinerijos fakultetas<br>Geodezijos ir kadastro katedra                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ISBN ..... ISSN .....<br>Egz. sk. ....<br>Data .....-.....-..... |
| Antrosios pakopos studijų <b>Geodezijos ir kartografijos</b> programos magistro baigiamasis darbas 4 (geografinės informacinės sistemos)<br>Pavadinimas <b>Bepilote skraidymo priemone gautų fotogrametrinių duomenų apdorojimas ir tikslumo analizė</b><br>Autorius <b>Tautvydas Berteška</b><br>Vadovas <b>doc. dr. Birutė Ruzgienė</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                  |
| <b>Kalba:</b> lietuvių                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                  |
| <b>Anotacija</b><br><p>Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos skaitmeninės fotogrametrijos esminės savybės ir taikymo sritys, pateikiami skaitmeninio vaizdo gavimo būdai, technologija ir aerokartografavimo darbų seka. Apžvelgiama bepiločių skraidymo aparatų (UAV) raida, klasifikacija, techninės charakteristikos bei praktinės taikymo galimybės, trumpai aprašoma užsienyje įgyta aerofotografavimo su bepiločiais orlaiviais patirtis.</p> <p>Darbe išnagrinėtos eksperimentinės vietovės aerografavimui naudotos techninės įrangos – bepiločio orlaivio, skaitmeninės fotokameros savybės. Gautieji fotografiniai vaizdai apdoroti skaitmeninėmis fotogrametrinėmis darbo stotimis LISA (Vokietija) ir Pix4D (Šveicarija). Siekiant išanalizuoti referencinių taškų kiekio svarbą aerokartografavimo procese, sukurti paviršiaus trimačiai modeliai ir atlikta palyginamoji analizė. Fotogrametrinis duomenų apdorojimas atliktas, kai referencinių taškų koordinatės nustatytos su GPS (Sokkia GSR2700) ir interaktyviuoju būdu internetinėje erdvėje bei naudojant skirtingą referencinių taškų kiekį: 14 ir 9 atraminių taškų, apdorojant LISA programine sistema, o Pix4D – tik autopilotu nustatytomis fotonuotraukų projekcijos centrų geodezinėmis koordinatėmis bei, pasirinkus du fotografinių vaizdų apdorojimo variantus – su 5 ir 10 referenciniais taškais.</p> <p>Atlikus eksperimentinius fotogrametrinius matavimus fotonuotraukose, gautose su BO ir sukūrus ortofotografinę nuotrauką bei skaitmeninius paviršiaus modelius, išanalizuota jų geometrinė kokybė ir nustatytas optimalus referencinių taškų kiekis reikalingas fotografiniams vaizdams geometriškai koreguoti.</p> <p>Remiantis atliktų bandymų rezultatais pateikiamos išvados ir pasiūlymai aerokartografavimo procesų ir rezultatų kokybei gerinti.</p> <p>Darbą sudaro: įvadas, penki skyriai, išvados, literatūros sąrašas, priedai.</p> <p>Darbo apimtis – 88 p. teksto be priedų, 52 iliustr., 16 lent., 46 literatūros šaltiniai, 6 priedai</p> |                                                                  |
| <b>Prasminiai žodžiai:</b> bepilotis orlaivis, skaitmeninė fotokamera, skaitmeninė fotogrametrija, skaitmeninis paviršiaus modelis, ortofotografinė nuotrauka, referenciniai taškai, tikslumas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                            |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Vilnius Gediminas Technical University<br>Faculty of Environmental Engineering<br>Department of Geodesy and Cadastre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ISBN ..... ISSN .....<br>Copies No. ....<br>Date .....-.....-.....                                         |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| Master Degree Studies <b>Geodesy and Cartography</b> study programme Master Graduation Thesis 4 (Geographic Information Systems)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                            |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%; border: none;">Title</td> <td style="border: none;"><b>Processing and Accuracy Analysis of the Photogrammetric Data Collected with Unmanned Aerial Vehicle</b></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">Author</td> <td style="border: none;"><b>Tautvydas Berteška</b></td> </tr> <tr> <td style="border: none;">Academic supervisor</td> <td style="border: none;"><b>Assoc Prof Dr Birutė Ruzgienė</b></td> </tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                            | Title | <b>Processing and Accuracy Analysis of the Photogrammetric Data Collected with Unmanned Aerial Vehicle</b> | Author | <b>Tautvydas Berteška</b> | Academic supervisor | <b>Assoc Prof Dr Birutė Ruzgienė</b> |
| Title                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Processing and Accuracy Analysis of the Photogrammetric Data Collected with Unmanned Aerial Vehicle</b> |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| Author                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Tautvydas Berteška</b>                                                                                  |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| Academic supervisor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Assoc Prof Dr Birutė Ruzgienė</b>                                                                       |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| <b>Thesis language:</b><br>Lithuanian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                            |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| <b>Annotation</b><br><p>This master thesis analyze essential features of digital photogrammetry and application areas, provides digital imaging techniques, technology and aerial mapping workflow. An overview of unmanned aerial vehicle (UAV) evolution, classification, technical characteristics and practical applicability is presented. There is briefly described the experience gained overseas, taking aerial photography by unmanned aerial vehicle.</p> <p>The thesis analyzed the characteristics of technical means –unmanned aerial vehicle and digital camera, used at experimental area taking aerial photography. The gained photographic images are processed by digital photogrammetry workstations LISA (Germany) and Pix4D (Switzerland). In order to analyze the importance of reference points number in aerial cartography process, three-dimensional surface models are create and a comparative analysis is performed. Photogrammetric data processing is carried out with the use of reference points coordinates determined by GPS (Sokkia GSR2700), by interactive way at the Internet environment; as well as using different number of reference points: 14 and 9 reference points were used when image processing was done by LISA software; while using Pix4D – included only geodetic coordinates of photographs projection centers, defined by autopilot, as well have been selected two variants – involving 5 and 10 reference points.</p> <p>After accomplishing the photogrammetric measurements in images, obtained with the UAV, generating orthophotos and digital surface models, the analysis of their geometrical quality have been done and optimal number of reference points, required for images geometrically transformation.</p> <p>The conclusions and recommendations on improvement of the aerial cartographic procedures and quality results is outlined and based on performed experimental investigations.</p> <p>Structure of theses: introduction, five chapters, conclusions, list of references, appendixes.</p> <p>Thesis consists of 88 p. texts without appendixes, 52 pictures, 16 tables, 46 references, 6 appendixes.</p> |                                                                                                            |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |
| <b>Keywords:</b> unmanned aerial vehicle, digital camera, digital photogrammetry, digital surface model, ortho-photo, ground control points, accuracy.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                            |       |                                                                                                            |        |                           |                     |                                      |

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų,  
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo  
organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.  
1 priedas

**(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)**

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

Tautvydas Berteška, 20085317

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Geodezija ir kartografija, GISmf-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)  
SĄŽINGUMO DEKLARACIJA**

2014 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Bepilote skraidymo priemone gautų fotogrametrinių duomenų apdorojimas ir tikslumo analizė“ patvirtintas 2012 m. lapkričio 8 d. dekanų potvarkiu Nr. 349ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parinkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė. Mano darbo vadovas doc. dr. Birutė Ruzgienė.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesus mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Tautvydas Berteška

(Vardas ir pavardė)

**(the document of Declaration of Authorship in the Final Degree Paper)**

**VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY**

Tautvydas Berteška, 20085317

(Student's given name, family name, certificate number)

Faculty of Environmental Engineering

(Faculty)

Geodesy and Cartography, GISmf-12

(Study programme, academic group no.)

**DECLARATION OF AUTHORSHIP  
IN THE FINAL DEGREE PAPER**

May 20, 2014

I declare that my Final Degree Paper entitled „Processing and Accuracy Analysis of the Photogrammetric Data Collected with Unmanned Aerial Vehicle” is entirely my own work. The title was confirmed on November 8, 2012 by Faculty Dean's order No. 349ap. I have clearly signalled the presence of quoted or paraphrased material and referenced all sources.

I have acknowledged appropriately any assistance I have received by the following professionals/advisers: Regina Žukienė.

The academic supervisor of my Final Degree Paper is Assoc Prof Dr Birutė Ruzgienė.

No contribution of any other person was obtained, nor did I buy my Final Degree Paper.



(Signature)

Tautvydas Berteška

(Given name, family name)

## TURINYS

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Įvadas.....                                                                                                                                     | 14  |
| 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA.....                                                                                                           | 17  |
| 2. FOTOGRAFINIŲ VAIZDŲ GAVIMAS, SAVYBĖS IR GEOMETRINIAI PRINCIPAI.....                                                                          | 22  |
| 2.1. Fotografavimo priemonių apžvalga ir jų kalibravimo esmė .....                                                                              | 22  |
| 2.2. Skaitmeninių vaizdų savybės .....                                                                                                          | 29  |
| 2.3. Fotografinio vaizdo geometrija ir orientavimas.....                                                                                        | 31  |
| 3. BEPILOČIŲ ORLAIVIŲ SISTEMOS IR JŲ TAIKYMAS .....                                                                                             | 36  |
| 3.1. Bepiločių orlaivių tipai .....                                                                                                             | 36  |
| 3.2. Mažųjų bepiločių skraidymo priemonių sistemų galimybės ir taikymas.....                                                                    | 38  |
| 3.3. Aerokartografavimas – praktinė patirtis .....                                                                                              | 41  |
| 4. EKSPERIMENTINIO OBJEKTO FOTOGRAFAVIMAS IR FOTOGRAFINĖS<br>MEDŽIAGOS APDOROJIMAS .....                                                        | 44  |
| 4.1. Lėktuvo modelio sistemos ir skrydžio techninės charakteristikos.....                                                                       | 44  |
| 4.2. Aerofotonuotraukų koordinavimas .....                                                                                                      | 48  |
| 4.3. Fotogrametrinių duomenų apdorojimas fotogrametrine sistema <i>LISA</i> .....                                                               | 53  |
| 4.4. Aerofotografinių vaizdų apdorojimas fotogrametrine programa <i>Pix4D</i> .....                                                             | 65  |
| 5. SKAITMENINIŲ PAVIRŠIŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ .....                                                                                             | 74  |
| 5.1. <i>LISA</i> programine sistema fotogrametrinių matavimų ortofotografinėje medžiagoje<br>rezultatai ir jų analizė .....                     | 74  |
| 5.2. <i>Pix4D</i> programine sistema fotogrametrinių matavimų ortofotografinėje medžiagoje<br>rezultatai ir jų analizė .....                    | 77  |
| 5.3. Rezultatų suvestinė .....                                                                                                                  | 80  |
| IŠVADOS IR PASIŪLYMAI .....                                                                                                                     | 81  |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS.....                                                                                                                        | 85  |
| PRIEDAI .....                                                                                                                                   | 89  |
| A Priedas. Straipsnis publikuotas moksliniame žurnale “ <i>Geodesy and Cartography</i> “ .....                                                  | 90  |
| B Priedas. Pranešimas tarptautinėje konferencijoje „ <i>Nuo kartografijos iki geografinės<br/>informacijos mokslo</i> “ .....                   | 91  |
| C Priedas. Pranešimas tarptautinėje konferencijoje “ <i>Environmental Engineering</i> “ .....                                                   | 92  |
| D Priedas. Pranešimas respublikinėje konferencijoje „ <i>Mokslas – Lietuvos ateitis</i> “ „ <i>Civilinė<br/>inžinerija ir geodezija</i> “ ..... | 101 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| E Priedas. Aukščių profiliai sudaryti naudojant autopilotu registruotus duomenis .....                                           | 103 |
| F Priedas. Atramos taškų parinktų interaktyviu būdu ortofotografiniame žemėlapyje<br>išsidėstymo aerofotonuotrukose schemas..... | 104 |

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

- 2.1 lentelė. Fotoaparatus savybių detalus palyginimas (Skaitmeninių fotoaparatus palyginimas 2014)
- 4.1 lentelė. Aerofotografavimui naudotos įrangos techninės savybės
- 4.2 lentelė. Atramos taškų koordinatės nustatytos internetinėje aplinkoje
- 4.3 lentelė. Atramos taškų koordinatės nustatytos su *GPS*
- 4.4 lentelė. Pagrindiniai programos įrankiai
- 4.5 lentelė. Atraminių taškų indentifikavimo aerofotonuotraukose rezultatai, kai panaudoti 5 geodezinio atramos pagrindo taškai
- 4.6 lentelė. Atraminių taškų indentifikavimo aerofotonuotraukose rezultatai, kai panaudota 10 referencinių taškų
- 5.1 lentelė. Fotogrametrinių matavimų rezultatai ortofografinėse nuotraukose
- 5.2 lentelė. *GPS* metodu išmatuotų taškų erdvinės koordinatės (kontroliniai matavimai)
- 5.3 lentelė. Išmatuotų taškų koordinatų nuokrypiai
- 5.4 lentelė. Taškų koordinatų ir altitudžių tikslumo analizės rezultatai
- 5.5 lentelė. Taškų koordinatės išmatuotos geodeziniu prietaisu vietovėje
- 5.6 lentelė. Ortofografinėse nuotraukose išmatuotų taškų erdvinės koordinatės, kai orientavimas atliktas trimis atvejais
- 5.7 lentelė. Koordinatų nuokrypiai tiriamaisiais atvejais
- 5.8 lentelė. Taškų koordinatų vidutinės kvadratinės paklaidos
- 5.9 lentelė. Išmatuotų taškų erdvinų koordinatų tikslumo tyrimo rezultatai (m)

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 2.1 pav. Aerofotokameros: a) skaitmeninė *Z/I DMC IIe 230* (Z/I Imaging 2012); b) filmo *Leica RC30* (Blue Skies Consulting 2014)
- 2.2 pav. *CCD* jutiklis kairėje ir *CMOS* dešinėje (OneSlidePhotography 2011)
- 2.3 pav. Kalibravimo stendas (kairėje) ir kameros parametrų automatinis nustatymas pagal gautus fotografinius vaizdus *TopCon Calibration Software* paketu (dešinėje)
- 2.4 pav. Gardelės padėtis skaitmeninio vaizdo koordinatinių sistemoje
- 2.5 pav. Spalvų sintezė: a) pilkosios spalvos intensyvumas (Shiffman, Kaufmann 2008); atspalvių intensyvumo priklausomybė nuo juodos/baltos spalvos kiekio (Vallentino 2010)
- 2.6 pav. *RGB* ir *CMY* spalvų modelis
- 2.7 pav. Pasvirošios aerofotonuotraukos pagrindiniai elementai (Ruzgienė 2008): O – projekcijos centras; O' – pagrindinis taškas; N – nadyro taškas objekto plokštumoje; N' – nadyro taškas projektuojamoje plokštumoje; v – projektuojamosios plokštumos posvyrio kampas; I – izocentras; h – horizonto linija; N'O' – pagrindinė linija
- 2.8 pav. Aerofotonuotraukos orientavimo elementai ir koordinatinių sąsaja su vietovės koordinatinių sistema (Schenek 1999)
- 2.9 pav. Absoliučiojo orientavimo principinė schema (Schenek 1999)
- 3.1 pav. Bepiločių orlaivių pavyzdžiai
- 3.2 pav. Bepiločių orlaivių klasifikacijos modelis (Watts *et al.* 2012)
- 3.3 pav. Gamyklinė bepilotė skraidymo sistema *SwingletCAM* (Jefferies 2012)
- 3.4 pav. Vartotojo-mėgėjo sukomplektuotas aeromodelis (Rudinskas 2011)
- 3.5 pav. Vietovės fotografavimui naudoti bepiločiai orlaiviai: a) vertikalaus kilimo ir leidimosi (VTOL) klasės *Octocopter 'is*; b) mažųjų orlaivių (MAV) klasei priskiriamas *SwingletCam* modelis
- 3.6 pav. Aerofotografavimo maršrutai: a) *Octocopter*; b) *SwingletCam*
- 3.7 pav. Ortografinė nuotrauka sudaryta pagal *Octocopter* gautus fotografinius vaizdus su *ImageMaster* kompiuterine sistema
- 3.8 pav. Skaitmeninis paviršiaus modelis sukurtas pagal *SwingletCam* aerokartografavimo duomenis *PhotoScan* programiniu paketu
- 4.1 pav. Aerofotografavimo teritorija – Naujasodžio gatvė, Vilnius
- 4.2 pav. Skrydžio valdymo ir navigacijos komponentai: a) *Xbee* tiesioginis duomenų perdavimo modulis; b) sistemos instaliacija orlaivyje; c) autopilotas *ArduPilotMega* su *GPS* imtuvu
- 4.3 pav. Aerofotografavimui naudota skraidymo priemonė su skaitmeniniu imtuvu
- 4.4 pav. Fotokamera *Canon S100* su integruota *GPS* funkcija
- 4.5 pav. Skrydžio charakteristikos: a) viso skrydžio; b) intereso atkarpos

- 4.6 pav. Atraminių taškų rinkimas [www.maps.lt/](http://www.maps.lt/) aplinkoje
- 4.7 pav. Atramos taškų  išsidėstymo ortofotografiniame žemėlapyje schema
- 4.8 pav. Taškų koordinavimui naudotas *GPS* imtuvas
- 4.9 pav. Atramos taškų išdėstymo vietovėje fragmentas (koordinuota su *GPS*)
- 4.10 pav. Kairioji aerofotonuotrauka
- 4.11 pav. Dešinioji aerofotonuotrauka
- 4.12 pav. Projekto savybių nustatymo langas
- 4.13 pav. Vidinio orientavimo parametrų įvedimo langas
- 4.14 pav. Fotokameros *Canon S100* parametrai
- 4.15 pav. Atramos koordinačių katalogo pildymo langas
- 4.16 pav. Kairiosios ir dešinėsios aerofotonuotraukų išorinio orientavimo parametrai, kai panaudotas 21 referencinis taškas (vietovėje koordinuoti *GPS* prietaisu)
- 4.17 pav. Kairiosios ir dešinėsios fotonuotraukos absoliučiojo orientavimo parametrai, gauti panaudojus 5 atramos taškus (vietovėje koordinuoti *GPS* prietaisu)
- 4.18 pav. Kairiosios ir dešinėsios aerofotonuotraukų išorinio orientavimo parametrai, kai atramos taškų erdvinė padėtis nustatyta iš ortofotografinio žemėlapyje
- 4.19 pav. Kairiosios fotonuotraukos išorinio orientavimo rezultatai *LISA FOTO* aplinkoje: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje
- 4.20 pav. Dešinėsios fotonuotraukos išorinio orientavimo rezultatai *LISA FOTO* aplinkoje: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje
- 4.21 pav. Kairiosios fotonuotraukos orientavimo rezultatai, kai išmatuotas (109) taškas (a) ir taškas eliminuotas (b)
- 4.22 pav. Modelio sukūrimo parametrai
- 4.23 pav. Modelių geometrinės savybės tiriamaisiais atvejais
- 4.24 pav. Vaizdų koreliacijos parametrų nustatymo langas
- 4.25 pav. Ortofotografinės nuotraukos: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje
- 4.26 pav. Apdorojimui *Pix4D* sistema atrinkti aerofografavimo metu gauti vaizdai
- 4.27 pav. Pagrindinis skaitmeninių vaizdų parametrų nustatymo langas (kairėje) ir fotonuotraukos informacija (dešinėje)
- 4.28 pav. Fotokameros parametrų nustatymo langas (pateikti programos)
- 4.29 pav. Kontūrženklių indentifikavimo langas
- 4.30 pav. Referencinių taškų suvestinė
- 4.31 pav. Programos langas su žemėlapyje užkeltais pradiniais duomenų simboliais

4.32 pav. Fotografinių vaizdų informaciniai duomenys (kairėje) ir ortofografinė nuotrauka (dešinėje)

4.33 pav. Aerofotografavimo metu gautų skaitmeninių vaizdų persidengimo zonos: raudonai – viengubas dengimas, geltonai – trigubas ir t.t.

4.34 pav. Atramos taško indentifikavimas septyniose aerofotonuotaukose. Mėlynas apskritimas žymi matavimo plotą, žalias –  $3D$  taško projekciją į vaizdus. Matavimai atlikti leistinos paklaidos ribose, kai žalias apskritimas yra mėlynojo viduje

5.1 pav. Išmatuotų taškų tikslumo tyrimo rezultatų palyginamasis grafikas

## IVADAS

Mokslas bei matavimų technologija, kai objektų ar įvairių reiškinių padėtis nustatoma neprisiliečiant prie jų t.y. fotografiniuose vaizduose, gautuose fotografuojant nuo žemės paviršiaus, iš lėktuvo ar kosminių palydovų sistemų vadinamas fotogrametrija. Fotogrametriniais metodais, pasitelkiant ne mažiau kaip du fotografinius vaizdus, galima nustatyti realaus pasaulio objektų kokybinius ir kiekybinius parametrus: plotį, ilgį, spalvą, tekstūrą ir pan.

Dar prieš du dešimtmečius analitinę fotogrametriją pakeitė skaitmeninė. Tai mokslo šaka, tirianti skaitmeninių vaizdų gavybos, apdorojimo ir analizavimo procesus. Fotografiniai vaizdai, simboliai, užrašai ir kt. duomenys pateikiami naudojant kompiuterines sistemas, todėl atsiranda poreikis skaitmenizuoti senas analogines ar filmo fotonuotraukos skaitmeniniams duomenis gauti, o šiuolaikinėse technologijose vietovė fotografuojama skaitmeninėmis fotokameromis.

Technikos progresas išplėtė fotogrametrijos taikymo galimybes ir sričių įvairovę. Kasmet didėja ir besidominančių skaičius, norinčių fotogrametriškai apdorotus duomenis pritaikyti savo darbo ar mokslo srityse. Tokie duomenys taikomi architektūroje, kartografijoje, aplinkosaugoje, archeologijoje ir ten kur svarbi tiriamojo objekto padėtis erdvėje. Geros kokybės fotogrametriniai duomenys labai informatyvūs, tačiau reikia tinkamai apdoroti ir pateikti. Generuojant ortofotografinius žemėlapius aerofotonuotraukos orientuojamos, pašalinami geometriniai iškraipymai atsiradę dėl fotokameros posvyrio, centrinės projekcijos ar reljefo poveikio ir formuojamas skaitmeninis reljefo modelis (*DTM*). Modeliai turi būti tokio tikslumo, kad užtikrintų gerą geometrinę skaitmeninių vaizdų kokybę. Fotogrametrinio apdorojimo rezultatai yra saugomi duomenų bazėje kaip erdvinių duomenų rinkiniai, kurios galima eksportuoti į *GIS* arba *CAD* sistemas ir testuoti duomenų tvarkymą jau ne fotogrametriniais, o grafjiniais metodais.

Viena iš plačiausiai taikomų fotogrametrijos mokslo šakų – artimų nuotolių fotogrametrija, kai objektai fotografuojami nuo 1 iki 100 m atstumu. Vietovės aerofotografavimas iš bepiločio skraidymo aparato – lengvojo bepiločio orlaivio (*Unmanned Aerial Vehicle – UAV*) gali būti priskiriamas artimų nuotolių fotogrametrijai arba aerofotogrametrijai, kai fotografuojama iš didesnio aukščio. Fotogrametrijoje UAV apibūdinama kaip matavimo platforma, kuri veikia valdoma autonominiu, pusiau–autonominiu arba nuotoliniu būdu.

Bepiločiai orlaiviai (*BO*) gaminami įvairiausių tipų, formų dydžių – nuo mažiausio, sveriančio vos kelis šimtus gramų iki milžiniškos mašinos, galinčios skristi tūkstančius kilometrų. *BO* atveria dideles fotogrametrinių duomenų kaupimo galimybes. Priklausomai nuo užduoties tipo pasirenkama ir reikalinga bepilotė skraidymo priemonė. Ši technologija dažnai naudojama moksliniams tyrimams atlikti. *BO* su jame įmontuota fotokamera yra naujas fotogrametrinių matavimų įrankis, kuriuo galima atlikti uždary, mišrių teritorijų ir žemės paviršiaus fotografavimą,

žymiai efektyviau nei naudojant tradicinius fotogrametrinius metodus. Dėl nedidelės įrangos kainos bepiločiai orlaiviai tampa vis populiarešni, žvalgant dideles teritorijas. Jie pasitelkiami siekiant įvertinti įvairius reiškinius: gyvūnų migraciją, gaisrų plitimą, vamzdynų, namų, kelių būsenas.

**Darbo aktualumas ir mokslinis naujumas.** Aerokartografavimas yra viena pažangiausių informacijos gavimo apie Žemės paviršiuje esančius objektus, jų padėtį ir paskirtį naudojant fotografinius vaizdus, priemonių sistema. Aerokartografavimo produktai *GIS* sistemomis pateikiami eiliniams vartotojams interaktyvių žemėlapių (pažintiniai, kultūriniai, navigaciniai ir kt.) forma ar skaitmeniniais vietovės modeliais.

Vienas iš pagrindinių uždavinių, sprendžiamų fotogrametriniais metodais, yra nustatyti įvairių Žemės paviršiaus objektų padėtį bei paskirtį fotografiniuose vaizduose. Fotografinių duomenų gavimas iš bepiločių skraidymo aparatų – tai pažangi ir efektyvi aerokartografavimo metodų sistema. Kasmet krintanti sistemos kaina ir gerėjanti skaitmeninių vaizdų kokybė bei automatizuotas duomenų apdorojimo procesas priverčia atsigręžti net ir klasikinių matavimo metodų šalininkus.

Mažai ištirta fotografinių vaizdų apdorojimo technologija, kai aerofotografavimo maršrutai yra ne tradiciniai, t.y. skrydžio maršrutai formuojami įvairaus dydžio poligonais ir nėra lygiagretūs.

**Tyrimo objektas.** Aerokartografavimo produktai: skaitmeninis paviršiaus modelis ir ortofotografinis žemėlapis.

**Darbo tikslas** – atlikus eksperimentinės vietovės fotografavimą netradiciniais aerokartografavimo maršrutais, sukurti aerokartografavimo produktus bei įvertinti jų tikslumą.

**Darbo uždaviniai:**

- išnagrinėti aerokartografavimo darbų technologiją ir fotografinių vaizdų apdorojimo metodus;
- aerokartografuoti vietovę skaitmenine fotokamera įmontuota bepilotėje skraidymo priemonėje;
- atlikti fotografinės medžiagos apdorojimą fotogrametrinėmis sistemomis;
- sudaryti žemės paviršiaus skaitmeninius modelius ir ortofotografinius žemėlapius;
- nustatyti pradinių duomenų įtaką fotogrametrinių produktų kokybei;
- įvertinti žemės paviršiaus modelių tikslumą ir atlikti rezultatų analizę.

**Tyrimo metodika.** Vietovei aerofotografuoti taikytas netradicinis skrydžio maršrutų planavimo metodas. Skaitmeniniai paviršiaus modeliai sukurti fotogrametriniais metodais specializuotomis skirtingomis fotogrametrinėmis sistemomis *LISA* ir *Pix4D*. Paviršiaus trimačių modelių kokybės analizei atlikti taikytas skirtingo tikslumo geodezinis pagrindas.

**Darbo rezultatų aprobavimas.** Baigiamojo magistro darbo tema yra atspausdintas vienas mokslinis straipsnis, o atliktų tyrimų rezultatai aprobuoti trijose mokslinėse konferencijose:

- Berteška T.; Ruzgienė, B. 2013. Photogrammetric mapping based on UAV imagery *Geodesy and Cartography*, 39(4): 158–163. ISSN 2029-6991 print / ISSN 2029-7009 online (A priedas);
- Berteška T.; Ruzgienė, B. 2013. Cartographic data collection based on UAV and photogrammetric mapping *tarptautinė konferencija „Nuo kartografijos iki geografinės informacijos mokslo“*. Vilniaus universitetas, Lietuva (B priedas);
- Ruzginė B.; Berteška, T.; Gečytė, S.; Jakubauskienė, E.; Aksamitauskas, V. Č. 2014. Photogrammetric Processing of UAV Imagery: Checking DTM, in *the 9<sup>th</sup> International Conference “Environmental Engineering”*. Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania (C priedas);
- Berteška, T. 2013. Bepiločių orlaivių sistemomis gautų fotogrametrinių duomenų apdorojimas, 16-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ „Civilinė inžinerija ir geodezija“, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lietuva (D priedas).

**Darbo struktūra.** Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, penki skyriai, išvados, literatūros šaltinių sąrašas ir priedai. Bendra darbo apimtis – 88 puslapiai be priedų, 52 iliustracijos, 16 lentelių, 46 literatūros šaltiniai, 6 priedai.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros šaltinių apžvalga.

Antrajame skyriuje išnagrinėti skaitmeninės fotogrametrijos metodai, fotokamerų tipai ir jų kalibravimo metodika, aprašytos skaitmeninio vaizdo savybės ir jo geometrijos savybės.

Trečiajame skyriuje pateikta bepilotės skraidymo įrangos (orlaivio) apibrėžimas, istorinė raida, tipai ir klasifikacija, panaudojimo galimybės ir taikymo sritys. Aprašyta užsienyje įgyta patirtis, atliekant aerokartografavimo darbus su bepiločių orlaivių sistemomis.

Ketvirtajame skyriuje pateikiama eksperimentinio objekto fotografavimo bepiločiu orlaiviu *EPP-FPV* darbų eiga, fotografinių vaizdų apdorojimo fotogrametrinėmis sistemomis *LISA* ir *Pix4D* procesai. Sukurti skaitmeniniai paviršiaus modeliai ir ortofotografinės nuotraukos. Pateikti fotogrametrinių matavimų rezultatai.

Penktajame skyriuje išanalizuotas aerokartografinės produkcijos tikslumas.

## 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Atlikta literatūros šaltinių, kuriuose nagrinėjamos temos siejamos su skaitmenine fotogrametrija, trimačių modelių kūrimu, aerokartografavimu bepiločiais skraidymo aparatais, fotografinių vaizdų apdorojimu, analizė. Apžvelgti moksliniai straipsniai, vadovėliai, konferencijų medžiaga bei kita.

**Linder, W. 2006. „Digital Photogrammetry“.** Knygoje aprašomi pagrindiniai skaitmeninių vaizdų gavimo ir apdorojimo geometriniai principai, pateikiami fotogrametrinių uždavinių sprendimo pavyzdžiai su programine įranga *LISA*. Detalizuojamas kiekvienas fotonuotraukų apdorojimo etapas, pabrėžiama jo svarba. Kartografavimo efektyvumas priklauso nuo duomenų apdorojimo kokybės ir spartos. Galutinio produkto kokybę lemia ir fotokameros savybės (analoginėms – kadro formatas, skaitmeninėms – skiriamoji geba, židinio nuotolis), jos parametrų nustatymas (kalibravimo rezultatai, kurie pateikiami sertifikate). Pateikiama fotografinių vaizdų vidinio ir išorinio orientavimo esmė bei tikslumas. Fotonuotraukų apdorojimo sparta priklauso nuo fotografinių vaizdų kiekio, programinio paketo ypatybių ir funkcionalumo (kiek funkcijų yra atliekama automatiškai, pusiau–automatiniu ar rankiniu būdais), kompiuterio galingumo.

**Ruzgienė, B. 2008. „Fotogrametrija: vadovėlis“.** Fotogrametrija, plačiąja prasme, tai fizinių objektų matavimų technologija, kai erdvinė informacija surenkama tiesiogiai neprisiliečiant prie jų. Jos, kaip mokslo šakos, ištakos siekia XIX a. vidurį, kuomet buvo išrastas fotoaparatas, vienas svarbiausių fotogrametrinės technologijos informacijos surinkimo įrenginių. Fotonuotraukos skiriamos į grupes, kurios sudaromos pagal technines kamerų galimybes ir gali būti: aero, kosminės, povandeninės ir antžeminės. Topografinių žemėlapių sudarymas, geodezinio atramos tinklo sutankinimas yra pagrindinės tradicinės fotogrametrijos taikymo sritys. Atsiradus naujoms technologijoms susikūrė naujos fotogrametrijos kryptys, kurių panaudojimo galimybės gerokai lenkia pirmykštes. Šiuolaikinės fotografinių vaizdų apdorojimo ypatumus nagrinėja skaitmeninė fotogrametrija.

**Eisenbeiß, H. 2009. „UAV Photogrammetry“.** Panaudojus bepiločius orlaivius (*BO*) ir skaitmeninės fotogrametrijos ypatumus gaunamas šiuolaikinių technologijų kompleksas, *BO* fotogrametrija, kuris suprantamas, kaip nauja fotogrametrinių matavimų priemonių visuma. Bepiločiais orlaiviais, kuriuose įmontuota fotokamera, galima atlikti uždary, mišrių teritorijų ir žemės paviršiaus fotografavimą. Fotogrametriniai matavimai atliekami žymiai efektyviau, nei naudojant tradicinius fotogrametrinius metodus.

**Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F.; Trittler, M. 2011.** Panašius minėtos technologijos privalumus pristatė konferenciniame pranešime „**Performance Test on UAV-Based Photogrammetric Data Collection**“. Panašūs minėtos technologijos privalumai pristatyti

konferencijos medžiagoje (leidinyje). Didelis dėmesys skiriamas įrangai ir technologijai. Pagrindiniais privalumais laikoma maža įrangos kaina, fizinis jos dydis, nesudėtingas valdymas bei pigi eksploatacija.

**Haala, N.; Hastedt, H.; Wolf, K.; Ressler, C.; Baltrusch, S. 2010. „Digital Photogrammetric Camera Evaluation – Generation of Digital Elevation Models“.** Pakeitus analogines fotokameras į skaitmenines pagreitėjo kartografinių duomenų gavimo greitis ir kokybė. Šis technikos progresas leidžia greitai ir pigiai sukurti didelės teritorijos ortofotografinės nuotraukos ar skaitmeninius aukščių modelius, panaudojant kompiuterines sistemas, automatinio arba pusiau-automatinio būdu. Aukščių duomenys gauti apdorojant fotonuotraukos yra svarbūs sudarant pastatų ar landšafto trimačius (3D) modelius, generuojant naujus ar atnaujinant senus reljefo modelius (DTM).

**Ruzgienė, B. 2010. „Skaitmeninio reljefo modelio kūrimo metodai ir tikslumo tyrimas, taikant skaitmenines fotogrametrijos technologiją“.** Skaitmeninės fotogrametrijos metodai pasirenkami gaminant ortofotografinius žemėlapius. Generuojant DTM atliekamos aerofotografinių vaizdų geometrinis koregavimas, kuriuo pašalinamos geometrinės distorsijos atsirandančios dėl fotokameros posvyrių, centrinės projekcijos ir reljefo ypatumų.

**Nilsson, H. F.; Grundberg, D. 2009. „Plane-Based Close Range Photogrammetric Reconstruction of Building“.** Nurodomi svarbiausi fotonuotraukų apdorojimo procesai ir principai: vidinio bei išorinio orientavimo parametrai, vaizdo geometrija, klaidų eliminavimas, klaidų poveikio mažinimas ir vertinimas, paviršiaus modeliavimas.

**Daniulis, J. 1998. „Aerofotometodai. Aerofotonuotraukų dešifravimas“.** Aerofotografavimas vyksta aplinkoje, kurią vienu metu, veikia daug skirtingų gamtos reiškinių (Saulė, vėjas, debesys, rūkas ir kt.). Dažnu atveju, jie neigiamai veikia vaizdų gavimo procesą ir kokybę, todėl gauti duomenys gali nebetenkinti užsibrėžtų tikslų. Aplinkos poveikis pasireiškia dėl fotonuotraukų gavimo fizinės prigimties. Fotokameros jutiklyje arba neigiamai yra registruojama nuo realaus paviršiaus objektų atsispindėjusi energija, kurios pagrindinis šaltinis – Saulė. Elektromagnetinei spinduliuotei didžiausią poveikį turi paros metas, meteorologinės sąlygos ir aplinkos tarša. Aerofotografavimas vyksta tik šviesiu paros metu, tačiau labai svarbus Saulės pakilimo kampas virš horizonto. Kampui didėjant kartu didėja ir tiesioginės spinduliuotės poveikis bendrai paviršiaus objektų apšvietai, kampui mažėjant – didėja išskaidytos šviesos poveikis, be to ilgėja šešėliai, kurie blogina aerofotonuotraukų kokybę paslėpdami smulkius objektus ir taip apsunkindami duomenų dešifravimo procesus. Optimalus paros laikas aerofotografavimui yra vidurdienis, kai Saulė yra zenite, optimalus metų laikas yra pavasaris, kol nesuvešėjusi augmenija.

**Kraus, K. 2007. „Photogrammetry. Geometry from Image and Laser Scans“.** Knygoje autorius pateikia fotografinių vaizdų geometrines ypatybes, pagrindinius veiksnius darančius

poveikį duomenų patikimumui, analizuojama fotogrametrinių procesų reikšmė, pateikiamos matematinės formulės, brėžiniai ir schemos atspindinčios apdorojimo etapų esmę. Autorius išskiria šiuos fotogrametriniais metodais gautus produktus:

- brėžinius – žemėlapius ir planus;
- geometrinius modelius;
- skaitmenines erdvinės koordinates;
- 3D fotomodelius, vektorizuotus CAD sistemomis.

**Ruzgienė, B. 2011. „Fotogrametrija: ortofotografinė nuotrauka“.** Skaitmeninė fotogrametrija – naujausia ir perspektyviausia fotogrametrijos mokslo sritis, kurią taikant specialia kompiuterine įranga ir programinėmis sistemomis apdorojami visų rūšių skaitmeniniai fotografiniai vaizdai, gauti fotografuojant žemės paviršių iš Žemės atmosferos (aerofotogrametrija) ar iš kosmoso (nuotoliniai tyrimai), iš bet kokios fotografuoti naudojamos priemonės (orlaivių ar kosminių aparatų) ar fotografuojant objektus iš artimų nuotolių (nuo žemės ar statinių). Gauti rezultatai leidžia kurti skaitmeninius žemėlapius, sudaryti skaitmeninius aukščių (*DEM*) bei paviršių (*DTM*) modelius.

**Paršeliūnas, E. 2001. „Geoinformacinės sistemos: technologija. Mokomoji knyga“.** Autorius teigia, kad fotogrametrijos uždavinys rasti bet kurio taško, esančio fotonuotraukoje erdvinės koordinatės. Geoinformacinėse sistemose (*GIS*) erdvė suprantama kaip matematinis tikrovės modelis, kuriame egzistuoja glaudūs ryšiai tarp bet kokios kilmės aibės elementų. Autoriaus nuomone, erdvėje elementų padėtis aprašoma santykinai, t.y. kitų realaus pasaulio objektų atžvilgiu. Elementas, kurio atžvilgiu nustatomos kitų elementų padėtys įprasta vadinti atskaitos tašku. Erdvine atskaitos sistema laikomas objektas arba taškas, kurio padėtis tiksliai žinoma, o koordinačių ašys išdėstomos jo atžvilgiu.

**Küng, O.; Strecha, C.; Beyeler, A.; Zufferey, J-C.; Floreano, D.; Fua, P.; Gervais, F. 2011. „The Accuracy Of Automatic Photogrammetric Techniques On Ultra-Light UAV Imagery“.** Autorių kolektyvas pristato bepiločių orlaivių sistemų privalumus kuriant *DTM* ir aerofotonuotraukų mozaikas. Detaliai aprašoma naudota techninė ir programinė įranga, darbų eiga. Autoriai įrodinėja priklausomybę tarp skrydžio aukščio ir paviršiaus skiriamosios gebos ortofotografinėse nuotraukose. Akcentuojama kontrolinių taškų svarba fotonuotraukų koreliacijai ir tikslumui. Panaudojus atramos taškus tikslumas modelyje svyruoja tarp 0.05 m ir 0.2 m, be rankinio įsikišimo tarp 2–8 m. Vaizdų mozaikos įkėlimo į *Google* sistemą paklaida be atramos taškų ~7 m, juos įtraukiant ~1 m. Anot autorių, šiuolaikiškos programos turi atlikti duomenų apdorojimą ir pateikti galutinį produktą vieno mygtuko paspaudimu.

**Höhle, J. 2011. „DEM Generation By Means Of New Digital Aerial Cameras“.** Straipsnyje analizuojama skaitmeninio aukščių modelio tikslumą lemiantys veiksniai: profesionalių

aerofotokamerų techninės galimybės (matymo laukas, kadro dydis, gardelės dydis ant žemės paviršiaus, jutiklio dydis, skiriamoji geba), aerofotonuotaukų persidengimas, skrydžio aukštis ir greitis.

**Watts, A. C.; Ambrosia, V. G.; Hinkey E. A. 2012. „Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use“.** Bepiločius orlaivius plačiai naudoja kariuomenė, tačiau paskutiniu metu kuriama vis daugiau civilinėms ir mokslinėms reikmėms pritaikytų mašinų. Manoma, kad greitai metu sistemos naudojimas sukels revoliuciją ir taps neatsiejama mokslinių tyrimų dalimi, kaip GIS (geoinformacinės sistemos) ir GPS (globalinė padėties nustatymo sistema) sistemos tapo prieš pora dešimtmečių. Straipsnyje, mokslininkai, detalai analizuoja bepiločių orlaivių tipus, jų technines galimybes, pagal nustatytus parametrus juos klasifikuoja. Pateikiamas BO sistemų panaudojimo galimybės šiose srityse:

- miškų būklės monitoringas (duomenims kaupti naudotini elektroniniai optiniai, infraraudonųjų ir/arba daugiaspektriniai jutikliai);
- miškų inventurizacija (stebėjimai atliekami per elektroninį optinį jutiklį);
- laukinių gyvūnų monitoringas (sausumos skrydžiai atliekami su žemai skrendančiais, o virš jūrų su ilgo skrydžio orlaiviais);
- nuošliaužų monitoringas (vietovėse, kuriose egzistuoja didelis purvo nuošliaužų pavojus, gaunami reikalingi duomenys prognozėms sudaryti);
- oro kokybės monitoringas (priklausomai situacijos, galima pasiųsti orlaivius paimti oro mėginius ir juos saugiai paragabenti į laboratoriją, didesnis mėginių skaičius gali reikalaus didesnės keliamosios galios, o geografinis paplitimas ilgo skrydžių BO panaudojimą);
- vandens telkinių monitoringas (stebėjimui reikalingi dažni praskridimai, ypač pramoniniuose rajonuose, todėl geriausia naudoti vertikalaus kilimo ir leidimosi BO sistemas iš greta įrengtų stočių, ekologinių katastrofų metu, kai reikia apskristi didesnes teritorijas pranašesni ilgojo skrydžio BO);
- požeminio vandens monitoringas (tyrimai atliekami gerai žinomose teritorijose su lengvai identifikuojamais atramos taškais, naudojami regimojo arba infraraudonųjų bangų jutikliai sumontuoti žemai skrendančiuose BO);
- geologiniai tyrimai (mažiausieji BO gali skristi mažose, uždaroje patalpose, kuriose neveikia GPS, didesniuose lėktuvuose gali būti montuojamos LIDAR (*Light Detection And Ranging*) arba RADAR (*Radio Detection And Ranging*) sistemos ir gauti duomenys panaudojami atvirųjų kasyklų moksliniams tyrimams);

- tikslusis ūkininkavimas (tikslus žemės ūkio kultūrų sveikatos būsenos įvertinimas garantuoja stabilų pelną, sveikesnį maistą ir švaresnę aplinką, nuolat stebint augalų būklę parenkamas optimalus pesticidų naudojimo laikas ir kiekis).

**Pérez, M.; Agüera, F.; Carvajal, F. 2013. „Low Cost Surveying Using An Unmanned Aerial Vehicle“; Sauerbier, M.; Siegrist, E.; Eisenbeiss, H.; Demir, N. 2011. „The Practical Application Of UAV-Based Photogrammetry Under Economic Aspects“; Vallet, J.; Panissod, F.; Strecha, C.; Tracol, M. 2011. Photogrammetric Performance Of An Ultra Light Weight *Swinglet* “UAV”.** Autoriai savo straipsniuose pristato tyrimuose naudotus nedidelius *BO*, pabrėžia nedidelę įrangos kainą, greitą ir nepriklausomą fotonuotraukų gavimo metodą automatiniu būdu. Gauti duomenys apdorojami fotogrametrinėmis sistemomis, kurių rezultatas – skaitmeninis paviršiaus modelis arba ortofotografinis žemėlapis. Užsimenama apie geodezinio pagrindo ir fotokameros parametrų svarbą galutinio produkto tikslumui.

## 2. FOTOGRAFINIŲ VAIZDŲ GAVIMAS, SAVYBĖS IR GEOMETRINIAI PRINCIPAI

Aerofotonuotrukų vaizdiniai, geometriniai, ir informaciniai ypatumai priklauso nuo techninių aerofotografavimo priemonių bei gamtinių ir meteorologinių sąlygų. Vietovę aerofotografuojant, trimačiai (3D) vietovės objektai projektuojami į fotografinę plokštumą. Fotografinio vaizdo objektų erdvinei padėčiai gauti sukuriamas vietovės geometrinis modelis. Šiam tikslui turi būti žinoma fotokameros erdvinė padėtis ekspozicijos momentu, optinės sistemos ypatumai, objektyvo lęšių ir fotografinės medžiagos distorsijos, geodezinė koordinačių sistema (Ruzgienė 2011).

### 2.1. Fotografavimo priemonių apžvalga ir jų kalibravimo esmė

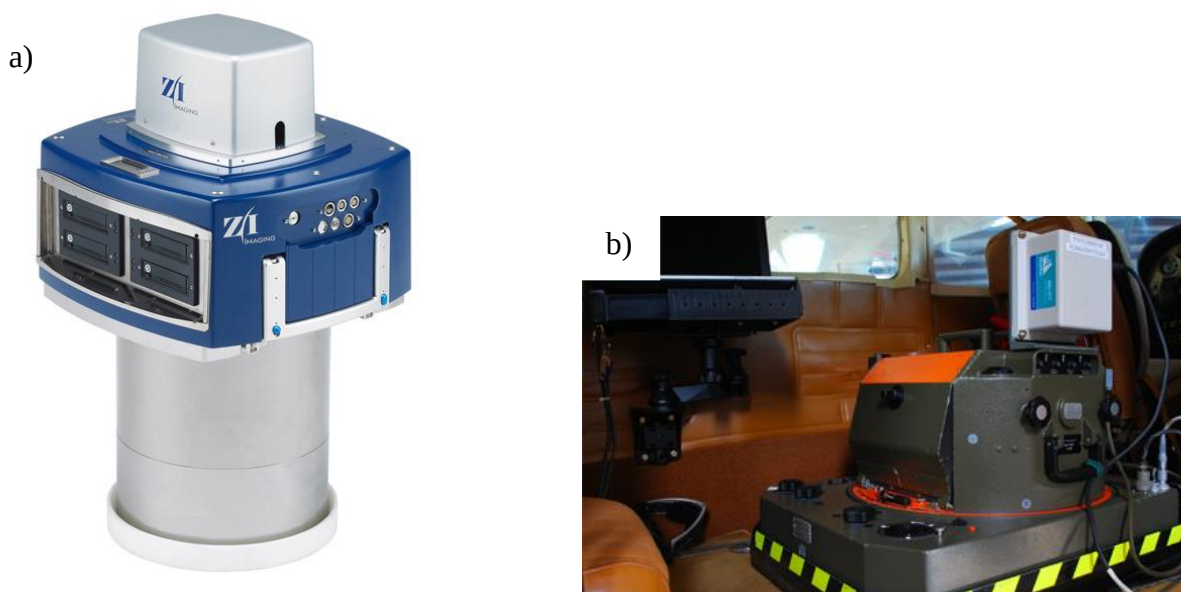
Fotokamera – optinis mechaninis arba optinis elektroninis prietaisas, skirtas objektų atvaizdams gauti, erdvinį vaizdą fiksuojantis plokštumoje, šviesai jautrioje medžiagoje arba puslaidininkių matricoje tai pagrindinis fotogrametrinių duomenų gavimo įrenginys. Aerofotografavimui naudojamos analoginės ir skaitmeninės fotokameros. Analoginės kameros buvo populiarios XX a. Jos atsirado pirmiau ir ilgą laiką buvo tobulesnės už skaitmenines, kurių prototipas sukurtas 1975 m., tačiau sparčiai tobulėjant technologijoms savo galimybėmis jos neprilygo skaitmeninėms. Pastarųjų vaizdo kokybė priklauso nuo matricą sudarančių fotoelementų skaičiaus, kuri išreiškiama milijonais taškų *Mpx*, kuo daugiau fotoelementų matricoje, tuo detalesnę nuotrauką gausime.

Pagal fotografavimo įrangos naudojimą nuotraukų tipai skiriami į:

- antžemines nuotraukas (fotografuojama nuo žemės paviršiaus);
- povandenines nuotraukas (fotografuojama iš povandeninių laivų ar spec. įrenginių);
- kosmines nuotraukas (fotografuojama iš kosmose skriejančių kosminių aparatų);
- aerofotonuotrukas (fotografuojama iš Žemės atmosferoje skriejančių skraidymo aparatų).

**Aerofotokameros.** Į lėktuvą montuojamos kartu su girokopiniu stabilizavimo įrenginiu, lėktuvo dugne įrengus specialų fotoliuką, gaunami aukštos kokybės duomenys, tačiau brangūs. Kaip ir visos kameros jos buvo gaminamos analoginės. Nepaisant kamerų gausos, visos turėjo bendrus konstrukcinius elementus: kasetę, kurioje talpinamas filmas, korpusą, kuriame talpinama lęšių sistema, elektros energijos šaltinį, stabilizavimo sistemą, valdymo prietaisus ir pagalbines – atsargines dalis. Žinomiausios šių įrenginių gamintojos buvo korporacijos *Carl Zeiss* (Vokietija/JAV), *Leica Wild* (Šveicarija), dabar tokios kameros nebegaminamos. Jas pakeitė skaitmeninės, kurios turi didelę skiriamąją gebą, siekiančią 260 mln. pikselių, patogias duomenų saugojimo galimybes, neturi koordinatinių žymių. Pastarosios gaminamos matricinės (vaizdas

gaunamas kadrais) ir linijinės (vaizdai registruojami atitinkamo pločio ruožais) (Daniulis 1998).



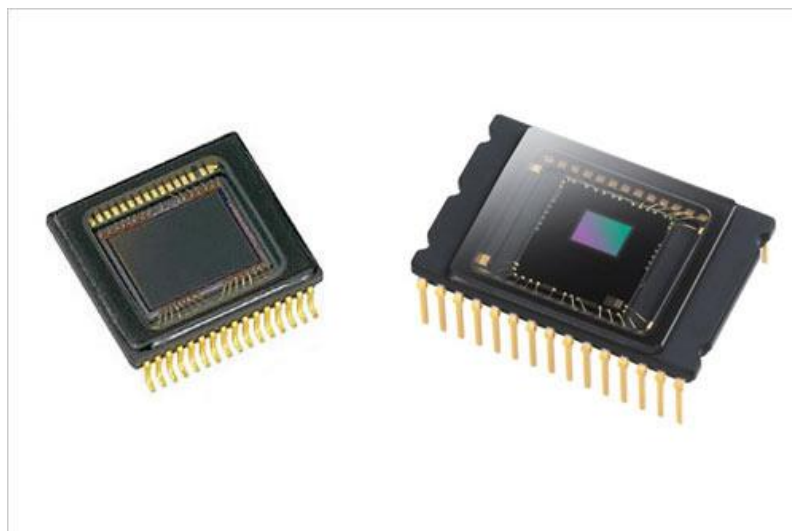
**2.1 pav.** Aerofotokameros: a) skaitmeninė Z/I DMC IIe 230 (Z/I Imaging 2012); b) filmo Leica RC30 (Blue Skies Consulting 2014)

Didelis aerofotogrametrinės produkcijos poreikis paskatino mokslininkus aktyviau dirbti šioje srityje, ieškoti būdų gauti pigiems, bet ne prastos kokybės, stambesnių mastelių fotogrametriniams duomenims. Klasikinės įrangos kaina nepaprastai aukšta, o duomenų gavimui reikia daug lėšų, todėl buvo atsiųgęta į pigias antžemines fotokameras, montuojamas nedideliuose skraidančiuose aparatuose.

**Skaitmeninės fotokameros antžeminiams objektams fotografuoti.** Šiuolaikinė fototechnika yra geros skiriamosios gebos, santykinai mažos kainos ir dydžio. Svarbus tokios fotokameros elementas yra jutiklių matrica – *CCD (Charge Couple Device)* arba *CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)*. *CCD* jutiklis gerokai mažesnis ir naudojamas kompaktiniuose fotoaparatuose, o *CMOS* yra ekonomiškė ir montuojamas veidrodiniuose fotoaparatuose. Nuo jos savybių priklauso skaitmeninio vaizdo skiriamoji geba. Visas tris spalvas (*Red Green Blue*) atpažįsta tik vertikalojo spalvų filtro konstrukcijos jutiklis ir nuo horizontaliojo spalvų filtro detektoriaus skiriasi:

- tris kartus didesniu kvantiniu našumu, kurio fotonai nepatiria sugerties nuostolių;
- visos jutiklio spalvos generuojamos visame gardelės plote, išvengiame spalvų sanklodos ir nenatūralių spalvų labai kontrastingose vaizdo vietose;
- reikia mažiau filtrų, todėl vaizdo kokybė gerėja, o įrangos kaina mažėja;
- puslaidininkiniai spalvų filtrai patvaresni, mažiau jautresni temperatūroms ar ultravioletinės šviesos poveikiui nei polimeriniai;

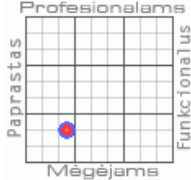
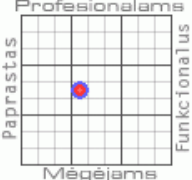
- e) visos vertikaliam filtrui naudojamos medžiagos yra suderintos su CMOS technologijomis.



**2.2 pav.** CCD jutiklis kairėje ir CMOS dešinėje (OneSlidePhotography 2011)

Fotokameras pagal konstrukcijos tipą galima skirstyti į penkias grupes: kompaktinius, sisteminius, veidrodinius, vienkartinius ir momentinius. Dauguma gamintojų gamina visų tipų aparatus, siekdami didesnės rinkos dalies. Žinomiausiais fototechnikos gamintojų prekiniais ženklais laikomi: *Canon*, *Fujifilm*, *Leica*, *Nikon*, *Olympus*, *Panasonic*, *Sony* ir *Pentax*. Skirtingų gamintojų ir tipų fotoaparatai pateikiami 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Fotoaparatus savybių detalus palyginimas (Skaitmeninių fotoaparatus palyginimas 2014)

| Fotoaparatas    | Canon PowerShot S100                                                                | Leica X Vario                                                                        | Nikon D610                                                                            |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Anonsuotas      | 2011.09.15                                                                          | 2013.06.11                                                                           | 2013.10.08                                                                            |
| Išvaizda        |  |  |  |
| Kaina nuo       | 949 Lt                                                                              | 7650 Lt                                                                              | 5698 Lt                                                                               |
| Foto dydis      | 40x30 cm                                                                            | 150x95 cm                                                                            | 210x140 cm                                                                            |
| Funkcijos/kaina | ★★★★☆ (62%)                                                                         | ★★★★☆ (60%)                                                                          | ★★★★★ (91%)                                                                           |
| Kategorija      |  |  |  |

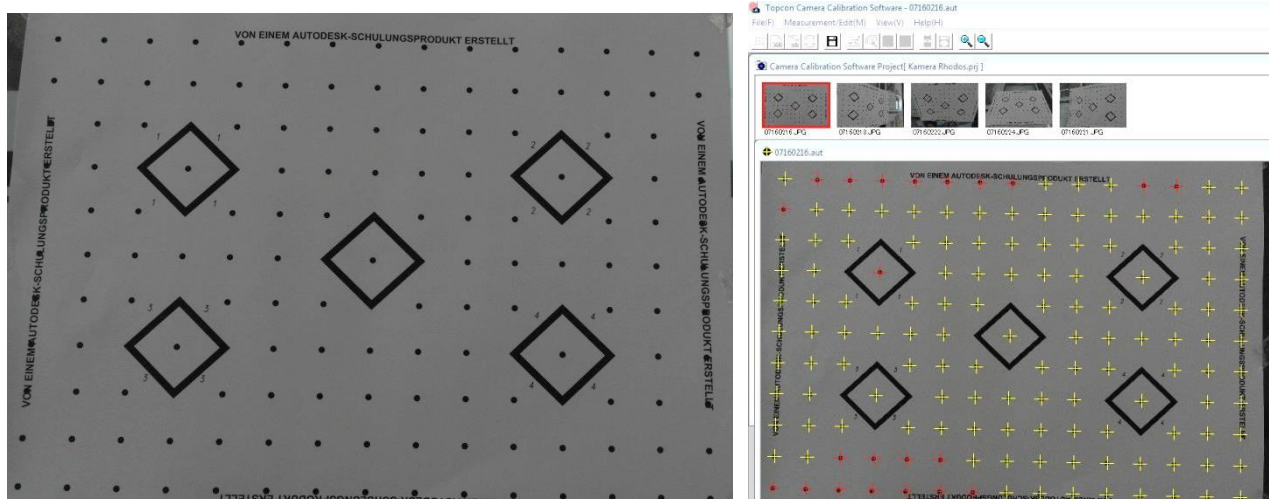
| 2.1 lentelės tęsinys |                                                                         |                                                                                             |                                                                                                                          |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parametrai           |                                                                         |                                                                                             |                                                                                                                          |
| Vaizdo taškai        | 12.1 milijono                                                           | 16 milijonų                                                                                 | 24 milijonai                                                                                                             |
| Jutiklio dydis       | 10 mm                                                                   | 28 mm                                                                                       | 43 mm                                                                                                                    |
| Vaizdo santykis      | 1:1, 4:5, 4:3, 3:2,<br>16:9                                             | 3:2                                                                                         | 3:2                                                                                                                      |
| Vaizdo dydis         | 4000x3000                                                               | 4928x3272                                                                                   | 6016x4016                                                                                                                |
| Didinimas            | 5x (+0.4x<br>skaitmeninis)                                              | 2.5x                                                                                        | -                                                                                                                        |
| Židinio nuotolis     | 24-120 mm                                                               | 28-70 mm                                                                                    | -                                                                                                                        |
| Diafragma            | f/2 - f/5.9                                                             | f/3.5 - f/6.4                                                                               | -                                                                                                                        |
| Makro                | 5 cm, supermakro:<br>3 cm                                               | 30 cm                                                                                       | -                                                                                                                        |
| Išlaikymas           | 1/2000-15 sek                                                           | 1/2000-30 sek                                                                               | 1/4000-30 sek                                                                                                            |
| Fokusavimo režimai   | Automatinis su pašvietimu, rankinis (žiedas), veido atpažinimo funkcija | Automatinis su pašvietimu, rankinis (žiedas), fokusavimo sekimas, veido atpažinimo funkcija | Automatinis su pašvietimu, rankinis (žiedas), fokusavimo sekimas, veido atpažinimo funkcija (tik fokusuojant ekranėlyje) |
| Fokusavimo taškai    | Fokusavimas visame kadre                                                | Fokusavimas visame kadre                                                                    | 39 taškai, 9 kryžminiai, greitas fazinis fokusavimas                                                                     |
| Foto serijos         | Be autofokusavimo: 9.6 k/s                                              | Fokusuojant: 3 kadrai per sek., be autofokusavimo: 5 k/s                                    | Fokusuojant: 6 kadrai per sek.                                                                                           |
| Jautrumas            | 80-6400 ISO                                                             | 100-12500 ISO                                                                               | 100-6400 (25600) ISO                                                                                                     |
| Blykstė              | Iššokanti, 7 režimai; iki 7 m                                           | Iššokanti, išorinė, GN5                                                                     | Iššokanti, išorinė, nuotolinė valdoma, x-sync: 1/200, GN 12                                                              |

| 2.1 lentelės tęsinys   |                                                                                                                                      |                                                                                                     |                                                                                                                                      |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rankiniai nustatymai   | Ekspozicijos korekcija, baltos balansas, išlaikymas, diafragma, jautrumas ISO, siužetinės programos, yra programų pasirinkimo žiedas | Ekspozicijos korekcija, baltos balansas, išlaikymas, diafragma, jautrumas ISO, siužetinės programos | Ekspozicijos korekcija, baltos balansas, išlaikymas, diafragma, jautrumas ISO, siužetinės programos, yra programų pasirinkimo žiedas |
| Skaitmeninės galimybės |                                                                                                                                      |                                                                                                     |                                                                                                                                      |
| Vaizdo formatai        | JPG, RAW                                                                                                                             | JPG, RAW                                                                                            | JPG, RAW + HDR, fotofilmo fotografavimas                                                                                             |
| Video                  | FullHD kokybe                                                                                                                        | FullHD kokybe, MPG4/H264 formatu                                                                    | FullHD kokybe, MPG4/H264 formatu                                                                                                     |
| Video formatai         | 1920x1080 (24kps), 1280x720, 640x480 (120/30kps), 320x240                                                                            | 1920x1080/30p, 1280x720/30p                                                                         | 1920x1080/30p/25p/24p, 1280x720/60p/50p/30p/25p, 640x480/30p                                                                         |
| Garsas                 | Taip                                                                                                                                 | Taip, stereo                                                                                        | Taip, galimas išorinis stereo mikrofonas                                                                                             |
| GPS imtuvas            | Taip                                                                                                                                 | Ne                                                                                                  | Ne                                                                                                                                   |
| Stabilizavimas         | Taip, optinis                                                                                                                        | Ne                                                                                                  | Ne                                                                                                                                   |
| Laikmenos              | SD, SDHC, SDXC                                                                                                                       | SD, SDHC, SDXC                                                                                      | SD, SDHC, SDXC, Du lizdai                                                                                                            |
| Jungtys                | USB2, HDMI                                                                                                                           | USB2, HDMI                                                                                          | USB2, HDMI                                                                                                                           |
| Korpusas               |                                                                                                                                      |                                                                                                     |                                                                                                                                      |
| Dydis                  | Labai mažas                                                                                                                          | Vidutinis - kompaktinis, su nekeičiamu objektyvu                                                    | Veidrodinis - didelis, su keičiamais objektyvais                                                                                     |

| 2.1 lentelės pabaiga |                                                         |                                                                       |                                                    |
|----------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Atsparus             | Ne                                                      | Ne                                                                    | Atsparus drėgmei ir dulkėms                        |
| Uždedami objektyvai  | Objektyvai nekeičiami                                   | Objektyvai nekeičiami                                                 | Nikon                                              |
| Ieškiklis            | Nėra                                                    | Nėra                                                                  | Optinis (TTL), 0.7x, 100%                          |
| LCD ekranas          | 8.1 cm, 461 tūkst. taškų                                | 8.1 cm, 920 tūkst. taškų                                              | 8.6 cm, 920 tūkst. taškų                           |
| Akumulatorius        | Ličio akumulatorius: NB-5L Li-ion, veikia 200 nuotraukų | Ličio akumulatorius: Leica BP-DC8 akumulatorius, veikia 450 nuotraukų | Ličio akumulatorius: EN-EL15, veikia 900 nuotraukų |
| Matmenys             | 99x60x27 mm                                             | 133x73x95 mm                                                          | 141x113x82 mm                                      |
| Svoris               | 198 g                                                   | 680 g                                                                 | 850 g                                              |

- priklausomai nuo objektyvo.

**Fotokamerų kalibravimas.** Fotokameros optinę sistemą sudaro lęšių rinkiniai, kurie teikia didesnes ar mažesnis paklaidas vadinamas lęšių distorsija. Aukštos kokybės fotogrametriniai produktai gaunami tik kalibruotomis fotokameromis, tiksliai žinant vidinio orientavimo parametrus (pagrindinio taško koordinatės, fotokameros židinio nuotolį, radialinę (matuojama nuo fotografinio vaizdo centro pakraščio link) bei tangentinę (nustatoma apskritimo liestinių matuojamajame taške kryptimis) distorsijas). Fotoaparatai naudojami autonominio skrydžio aparatuose, dažnu atveju kalibruojami, naudojant paruoštą stendą su pažymėtomis žinomomis taškų koordinatėmis, gautus duomenis apdorojant specializuotomis programomis (2.3 pav.). Kaip alternatyva, naudojamas kalibravimas nuotraukų apdorojimu metu, tai susiję su stereofotogrametriniais procesais, tačiau metodas reikalauja didelio kontrolinių taškų skaičiaus su žinomomis koordinatėmis. Itin tiksliais ir patikimais vidinio orientavimo elementams gauti kalibravimo darbai atliekami specialiose laboratorijose. Visais atvejais gauti fotokameros kalibravimo parametrai pateikiami sertifikatuose ir naudojami nuotraukų apdorojimo procesuose (Mikhail *et al.* 2001).



**2.3 pav.** Kalibravimo standas (kairėje) ir kameros parametrų automatinis nustatymas pagal gautus fotografinius vaizdus TopCon Calibration Software paketu (dešinėje)

Naujausios fotogrametrinių duomenų apdorojimo programos yra automatizuotos, turi automatinio kalibravimo funkciją ir nereikalauja vidinio orientavimo parametrų, nes jie įtraukti į fotografinio vaizdo išlyginimo procesą, o nežinomieji apskaičiuojami pagal koreliacines lygtis. Dažnu atveju distorsinėms klaidoms eliminuoti naudojami daugianariai (Abraham 2004; Marzan, Karara 2003; Sužiedelytė – Visockienė 2007):

$$\left. \begin{aligned} d_x &= A_1 x_0 (r^2 - r_0^2) + A_2 x_0 (r^4 - r_0^4) + A_3 x_0 (r^6 - r_0^6) \\ d_y &= A_1 y_0 (r^2 - r_0^2) + A_2 y_0 (r^4 - r_0^4) + A_3 y_0 (r^6 - r_0^6) \\ r^2 &= \left( \frac{d_x}{s_{xy}} \right)^2 + d_y^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

čia  $x_0, y_0$  – pagrindinio taško koordinatės;  $A_1, A_2, A_3$  – radialinės simetrinės distorsijos parametrai;  $s_{xy}$  – fotonuotraukos mastelio koeficientas;  $r_0$  – konstanta, apibūdinanti koreliaciją tarp distorsijos koeficientų ir fotokameros židinio nuotolio  $c$ .

$$\left. \begin{aligned} d_x &= B_1 (r^2 + 2x_0^2) + B_2 2x_0 y_0 \\ d_y &= B_2 (r^2 + 2y_0^2) + B_3 2x_0 y_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

čia  $B_1, B_2, B_3$  – radialinės nesimetrinės distorsijos parametrai.

Arba *Brauno* lygtys:

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2x^2)p_1 + 2xyp_2 \\ d_y &= x(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2y^2)p_1 + 2xyp_1 \\ r &= \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

čia  $x, y$  – skaitmeninio vaizdo koordinatės;  $k_1, k_2, k_3$  – radialinės distorsijos parametrai;  $p_1, p_2$  – tangentinės distorsijos parametrai;  $r$  – radialinis atstumas iki pagrindinio taško.

## 2.2. Skaitmeninių vaizdų savybės

Skaitmeninį vaizdą galima suvokti kaip skaitmenizuotą vietovės reginį arba programiniu būdu gautą duomenų masyvą, kuris technologiniu požiūriu gaunamas skaitmeninėmis fotokameromis arba skenuojant analogines fotonuotraukas. Skaitmeninis vaizdas susideda iš dvimatės matricos  $G$ , kurią sudaro elementai  $g_{ij}$ . Matricos  $G$  eilutės ir stulpeliai indeksuojami žingsniu nuo 1 iki  $I$  ir  $J$ . Matricos elementai vadinami ląstelėmis, gardelėmis arba pikseliais (*angl. pixel*). Ląstelėse registruojamas informacijos kiekis, kuris priklauso nuo registruojamo prietaiso savybių.

Apdorojant skaitmeninius vaizdus fotogrametriniais metodais, nustatoma ląstelės padėtis vaizdo koordinačių sistemoje  $(x, y)$ , kurios dydis vaizdo koordinačių sistemoje yra  $\Delta x \times \Delta y$ . Ląstelės padėtis  $g_{ij}$  skaitmeninio vaizdo koordinačių sistemoje randama indeksą  $i$  padauginus iš  $\Delta y$ , o  $j$  iš  $\Delta x$  (2.1 pav.). Gardelių skaičius, apibrėžia vaizdo dydį ir skaitmeninio vaizdo geometrinę skiriamąją gebą. Skiriamoji geba gaunama mažesnė, padidinus gardelės dydį skaitmeninio vaizdo ploto atžvilgiu.

Fotografinis (analoginis) vaizdas aprašomas kaip funkcija  $f(x, y)$ , kur  $x$  ir  $y$  – plokštuminės koordinatės (Gonzalez, Woods 2007; Aggarwal *et. al.* 1997). Kiekvienas vaizdo elementas turi pilkosios spalvos reikšmę, kuri išreiškiama funkcija –  $f$ . Matematinų modelių pagalba vaizdai pateikiami skaitmenine forma. Skaitmeninis vaizdas tampa tolydžia funkcija  $g(x, y)$ ,  $g$  – pilkosios spalvos intensyvumas. Pilkosios spalvos intensyvumo  $g$  vidutinė reikšmė  $g_{\text{vid}}$  nusako vaizdo ryškumą, o standartinis nuokrypis  $\sigma$  vaizdo kontrastiškumą:

$$g_{\text{vid}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N g(x, y), \quad (2.4)$$

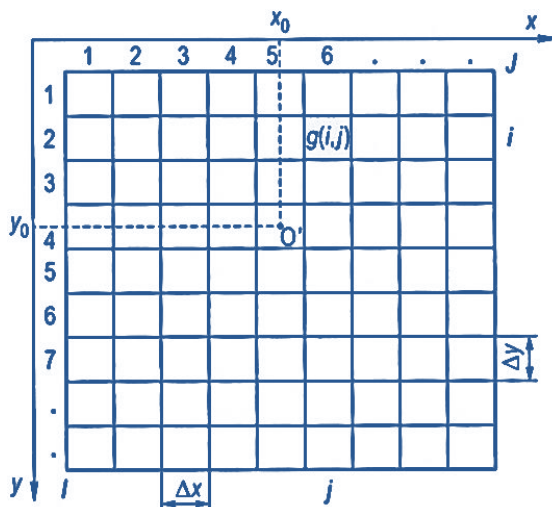
čia  $M$  – skaitmeninio vaizdo stulpelių skaičius;  $N$  – eilučių skaičius;  $x, y$  ląstelės koordinatės.

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (g(x, y) - g_{\text{vid}})^2. \quad (2.5)$$

Skaitmeninio vaizdo kontrastas  $k$  vienas svarbiausių parametru, apibūdinančių vaizdo kokybę, apskaičiuojamas:

$$k = \frac{g_{\text{max}} - g_{\text{min}}}{g_{\text{max}} + g_{\text{min}}}, \quad (2.6)$$

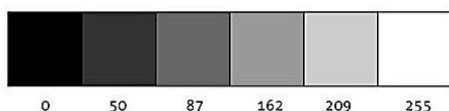
čia  $g_{max}$  – skaitmeninio vaizdo pilkumo įvairaus intensyvumo didžiausioji reikšmė;  $g_{min}$  – mažiausioji.



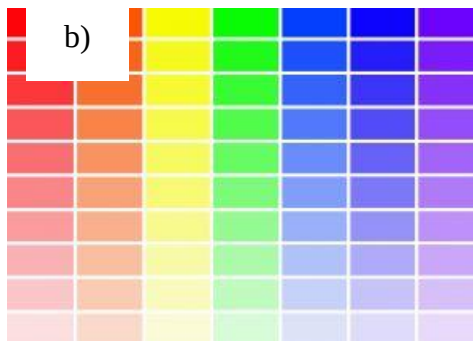
**2.4 pav.** Gardelės padėtis skaitmeninio vaizdo koordinatų sistemoje

Gardelėse saugoma 0 – 255 reikšmių diapazono informacija, kuri aprašo pilkos spalvos sodrumą (pilkėjimą nuo baltos iki juodos spalvos, 0 – visiškai juoda, 255 – visiškai balta (2.2 pav. a). Achromatinės spalvos yra abstrakčios ir vienodos, chromatinės – gyvybingos ir sudėtingos. Vaizdo suvokimas aprašomas atspalviu, sočiu ir apšviestumu. Atspalvis priklauso nuo to, kokio ilgio bangos pasiekia jutiklius, sotis – nurodo spalvos grynumą, o apšviestumas (intensyvumas) nurodo baltos ar juodos spalvos kiekį atspalvyje (2.2 pav. b). Praktikoje dažniausiai naudojamos dvi spalvinės palėtės (modeliai) *RGB* (*Red Green Blue*) ir *CMY* (*Cyan, Magenta, Yellow*). *RGB* sudaro trys pagrindinės spalvos R – raudona, G – žalia ir B – mėlyna. Ją maišant, gaunamas, bet koks kitas atspalvis. *CMY* sudaryta, kaip persidengiančių *RGB* spalvų mišinys. C – žydra, M – purpurinė, Y – geltona (2.3 pav.) (Dervinis 2012).

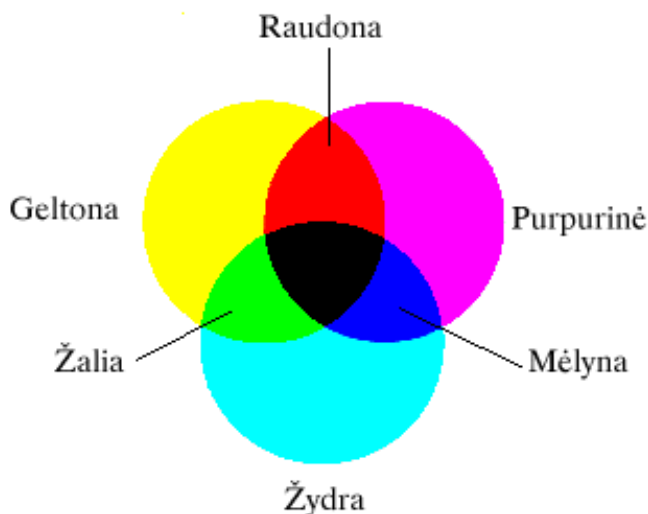
a)



b)



**2.5 pav.** Spalvų sintezė: a) pilkosios spalvos intensyvumas (Shiffman, Kaufmann 2008); atspalvių intensyvumo priklausomybė nuo juodos/baltos spalvos kiekio (Vallentino 2010)



2.6 pav. RGB ir CMY spalvų modelis

Aukščiausios kokybės skaitmeninis vaizdas gaunamas, kai pikselių pilkumo reikšmės apima visą pilkosios spalvos intensyvumo skalę ir yra tolygiai pasiskirsčiusios. Siekiant tokių rezultatų histograma (stulpelinė diagrama, grafiškai vaizduojanti empirinį (statistinį) pasiskirstymą) modifikuojama pagal išplėtimo (pilkumo reikšmės užima visą galimą reikšmių diapazoną) ir suvienodinimo (pilkumo reikšmės paskirstomos tolygiai) metodus. Histograma padeda nustatyti vaizdo kontrastingumą ir taškų intensyvumą. Diagramos  $x$  ašyje rodomas konkretaus intensyvumo taškų skaičius,  $y$  – taško intensyvumas. Viso vaizdo taškai yra sugrupuojami didėjančia tvarka ir randami jų kiekiai. Histograma vaizduojama kiekvieno taško intensyvumo stulpelis yra tokio dydžio, kiek konkretaus intensyvumo taškų yra visame paveiksle (Ruzgienė 2008).

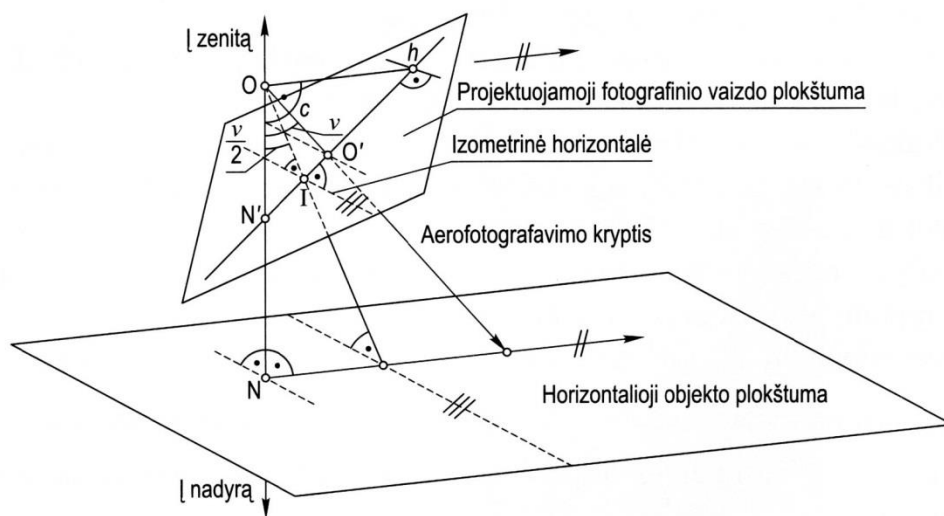
### 2.3. Fotografinio vaizdo geometrija ir orientavimas

Aerofotokamera fiksuojamas Žemės paviršius su jame esančiais objektais. Erdvinių objektų padėtis aerofotografiniuose vaizduose gaunama pagal centrinės projekcijos dėsnius (nuo objektų atspindėjusių spindulių pluoštas, sueina į vieną tašką – projekcijos centrą, kur jie projektuojami horizontalioje arba pasviroje plokštumoje).

Aerofotouotraukos dažnu atveju gaunamos pasvirošios (fotokameros optinės ašies posvyrio kampas neviršija  $3^\circ$ ), tačiau galimi ir kiti nuotraukų tipai: vertikalioji (fotokameros optinė ašis yra visiškai vertikali), gulsčioji (optinės ašies posvyrio kampas  $>3^\circ$ ) ir horizontalioji (fotografinio vaizdo plokštuma vertikali).

Pasvirošios nuotraukos, kuriose yra taškų poslinkių, gaunamos dėl skraidymo įrangos nestabilumo, fotokameros optinės ašies pasvirimo, Žemės reljefo nelygumo, atmosferos refrakcijos, Žemės kreivumo. Tokioje aerofotonuotraukoje pagrindinis taškas  $O'$  nuo projekcijos centro  $O$

atitolęs atstumu lygiu židinio nuotoliui  $c$ . Vertikalė  $NN'$  eina per projekcijos centrą bei projektuojamą ir horizontaliąją plokštumas. Posvyrio kampas  $v$  apskaičiuojamas kaip kampas tarp aerofotografavimo krypties  $OO'$  ir vertikalės  $ON$  (2.7 pav.) (Manual of Photogrammetry 2004).



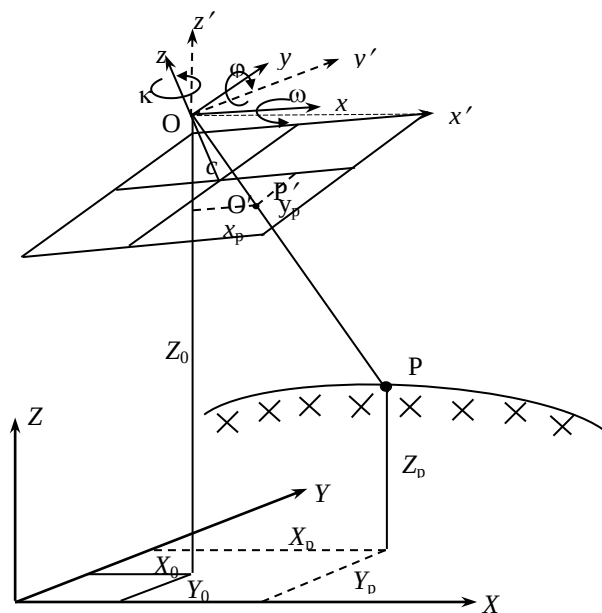
**2.7 pav.** Pasvirosios aerofotonuotraukos pagrindiniai elementai (Ruzgienė 2008): O – projekcijos centras; O' – pagrindinis taškas; N – nadyro taškas objekto plokštumoje; N' – nadyro taškas projektuojamoje plokštumoje;  $v$  – projektuojamosios plokštumos posvyrio kampas; I – izocentras; h – horizonto linija;  $NN'$  – pagrindinė linija

**Vaizdų orientavimas.** Svarbus aerofotografinių vaizdų apdorojimo etapas yra turimų vaizdų orientavimas (vidinis ir išorinis (realiatyvus bei absoliutus)) ir sąsaja tarp nuotraukos ir vietovės koordinačių sistemų. Procesas gali būti visiškai automatizuotas, pusiau automatizuotas arba rankinis priklausomai nuo turimos programinės įrangos, bet kuriuo atveju darbai atliekami pagal iš anksto nustatytus matematinius algoritmus.

**Vidinis orientavimas.** Proceso tikslas – atkurti projektuojamųjų spindulių geometriją kiekvienos ekspozicijos momentu. Tikslui pasiekti reikia žinoti vidinio orientavimo elementus: projekcijos centro koordinatės vaizdo koordinačių sistemoje, židinio nuotolį, radialinės simetrinės ir radialinės asimetrinės distorsijų reikšmes, jei kamera metrinė – koordinačių žymių reikšmes, visi parametrai nustatomi kalibravimo metu. Skaitmeninėmis fotokameromis gautiems fotografiniams vaizdams vidinis orientavimas atliekamas tiesiogiai, nes kiekviena *CCD* elemento gardelė atitinka tą patį fotografinio vaizdo elementą kiekvienos ekspozicijos momentu.

**Išorinis orientavimas.** Tikslas nustatyti fotonuotraukos ir objekto koordinačių sistemų sąsają, kai ji išreiškiama fotonuotraukos padėtimi erdvėje ir kampiniais posūkiais apie  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ašis kiekvienu ekspozicijos momentu, todėl nustatomi septyni parametrai:  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  – posūkių apie ašis kampai,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  – projekcijos taško koordinatės vietovės koordinačių sistemoje,  $\lambda$  – mastelio koeficientas (2.8 pav.). Šiems parametrams apskaičiuoti, teoriniu atveju, reikia mažiausiai dviejų atraminių taškų su

žinomomis  $X, Y$  koordinatėmis ir vieno taško su žinoma aukščio  $Z$  koordinate. Siekiant aukšto tikslumo reikia ne mažiau septynių atraminių taškų išsidėsčiusių visame fotografinio vaizdo plote.



**2.8 pav.** Aerofotonuotraukos orientavimo elementai ir koordinačių sąsaja su vietovės koordinačių sistema (Schenek 1999)

Fotografiniai vaizdai skirti fotogrametriniam apdorojimui turi persidengti. Optimalus išilginis dengimas 65 %, o skersinis 35 %, taip gaunamos 2x ar 3x net 5x dengimo vietos. Dvi persidengiančios aerofotonuotraukos vadinamos stereopora. Tokiu būdu tie patys vietovės objektai pakliūna į keleto skirtingų ekspozicijų fotografinius vaizdus. Tokiuose stereomodeliuose dėl skirtingų kameros padėčių atsiranda tų pačių taškų nesutaptis (paralaksas). Ordinačių nesutapimas duoda skersinį, o abscisių – išilginį paralaksą (Kraus 2007 ).

Reliatyvusis orientavimas. Tikslas – rasti tokią dviejų fotografinių vaizdų padėtį, kurioje kiekvienas aerofotonuotraukų perdangos taškas tenkintų sąlygą: spinduliai, einantys per kairiosios ir dešinėsios fotonuotraukų taškus ir projekcijos centrus, turi susikirsti viename taške. Sąlyga išlaikyta, kai dviejų identiškų taškų skersinis paralaksas  $p_y = 0$ . Gerai žinomi du reliatyvaus orientavimo metodai: elementų posūkių apie ašis ir homologinių taškų.

Orientavimas pagal elementų posūkius apie ašis atliekamas pagal penkis orientavimo parametrus ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$p_y = -x'_1 d\kappa_1 + x'_2 d\kappa_2 + \frac{x'_1 y'_1}{c} d\varphi_1 - \frac{x'_2 y'_2}{c} d\varphi_2 + \left( c + \frac{(y'_2)^2}{c} \right) d\omega_2, \quad (2.7)$$

čia  $x'_1, y'_1$ - taško koordinatės kairiojoje fotonuotraukoje;  $x'_2, y'_2$ - taško koordinatės dešiniojoje

fotonuotraukoje;  $c$  – židinio nuotolis;  $d\varphi_1, d\kappa_1, (d\omega_1=0)$  – posūkių dydis kairiojoje fotonuotraukoje;  $d\omega_2, d\varphi_2, d\kappa_2$  – posūkių dydis dešiniojoje fotonuotraukoje.

Homologinių taškų metodui reikia parinkti bendrus (ne mažiau penkis), gerai matomus stereoporoje vadinamuosius *Gruberio* taškus. Išmatavus koordinates, skaičiuojami priartėjimai, kol skersinio paralakso reikšmė tampa lygi arba artima nuliui. Tuomet fotonuotraukos koordinatės  $x'_1, y'_1$  ir  $x'_2, y'_2$  yra transformuotos į naujas koordinates  $x'_{n1}, y'_{n1}$  ir  $x'_{n2}, y'_{n2}$ . Jos perskaičiuojamos į modelio koordinates pagal formules:

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= -\frac{c B}{x'_{n1} - x'_{n2}}, \\ X_m &= -Z_m \frac{x'_1}{c}, \\ Y_m &= Z_m \frac{y'_{n1}}{c} = -Z_m \frac{y'_{n2}}{c}. \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

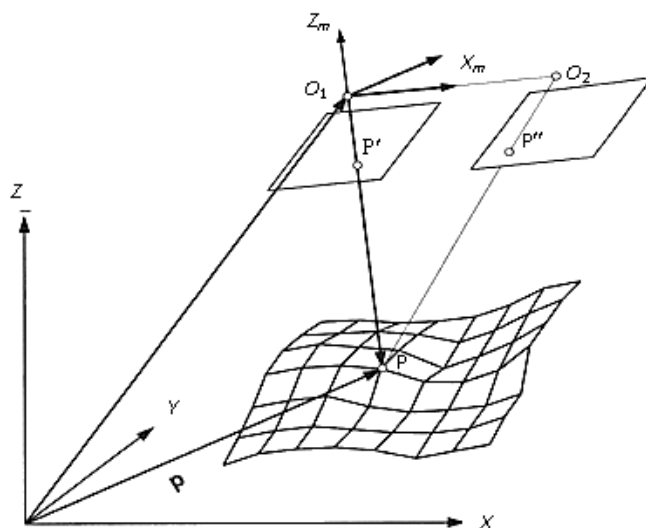
čia  $B$  – fotografavimo bazė.

Absoliutusias orientavimas. Tikslas – stereoskopinio modelio koordinates transformuoti į vietovės koordinačių sistemą. Ryšys tarp modelio koordinačių  $X_m, Y_m, Z_m$  ir atraminių taškų koordinačių  $X, Y, Z$  išreiškiamas lygtimis:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \lambda \mathbf{R} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

čia  $\lambda$  – mastelio koeficientas,  $X_0, Y_0, Z_0$  – projekcijos centro koordinatės,  $R$  – modelio koordinačių sistemos  $(XYZ)_m$  posūkio,  $XYZ$  koordinačių sistemos atžvilgiu, matrica.



**2.9 pav.** Absoliučiojo orientavimo principinė schema (Schenek 1999)

Atraminų taškų koordinatės vietovėje nustatomos klasikiniiais geodeziniais metodais, pagal kuriuos ir atliekamas koordinačių perskaičiavimas. Turint vieno atraminio taško koordinates  $X$ ,  $Y$  ir  $Z$ , galima sudaryti tris lygtis. Nežinomieji apskaičiuojami mažiausiųjų kvadratų metodu, taikant išlyginimo metodą:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X - \lambda(X \cos \kappa + Y \sin \kappa), \\ Y_0 &= Y - \lambda(X \sin \kappa + Y \cos \kappa), \\ Z_0 &= Z - \lambda Z. \end{aligned} \right\}, \quad (2.11)$$

$$\lambda = \left[ \frac{dX_m^2 + dY_m^2}{dX^2 + dY^2} \right]^{-0.5}, \quad (2.12)$$

$$\kappa = \arctg \frac{dY_m}{dX_m} - \arctg \frac{dY}{dX}. \quad (2.13)$$

Apskaičiavus absoliučiojo orientavimo parametrus, galima nustatyti bet kurio taško fotonuotraukų stereoporoje koordinatės vietovės koordinačių sistemoje. Šiam tikslui reikia išmatuoti homologinius taškus, kurių koordinatės apskaičiuojamos automatiškai.

### 3. BEPILOČIŲ ORLAIVIŲ SISTEMOS IR JŲ TAIKYMAS

„Bepilotis orlaivis – tai bet kuris orlaivis be įgulos, kurį galima valdyti nuotoliniu būdu arba kurio skrydis valdomas automatiškai“ (Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės 2013). „Orlaivis – kiekvienas aparatas (mašina), kuris atmosferoje laikosi dėl sąveikos su oru, bet ne dėl oro atoveikio nuo žemės paviršiaus“ (Lietuvos respublikos aviacijos įstatymas 2010). Orlaivis – pagal Lietuvoje galiojančius teisinius aktus – bet koks skraidymo aparatas. Daugelį metų terminas orlaivis buvo naudojamas tik lengvesniems už orą aparatams, skrendantiems dėl Archimedo jėgos veikimo, tačiau dabar naudojamas platesne prasme. Žvalgybos orlaivis – orlaivis, naudojamas stebėti žemę ir rinkti informaciją iš oro. Žvalgybos orlaiviai naudojami tiek civiliniais (kartografijos, geologinių tyrimų, mokslo, saugumo, taip pat eismo, žvejybos plotų bei pasienio stebėjimo), tiek kariniais tikslais (priešo ginkluotųjų pajėgų judėjimui sekti, objektams stebėti) (Malin, D.; Light, D. 2014).

#### 3.1. Bepiločių orlaivių tipai

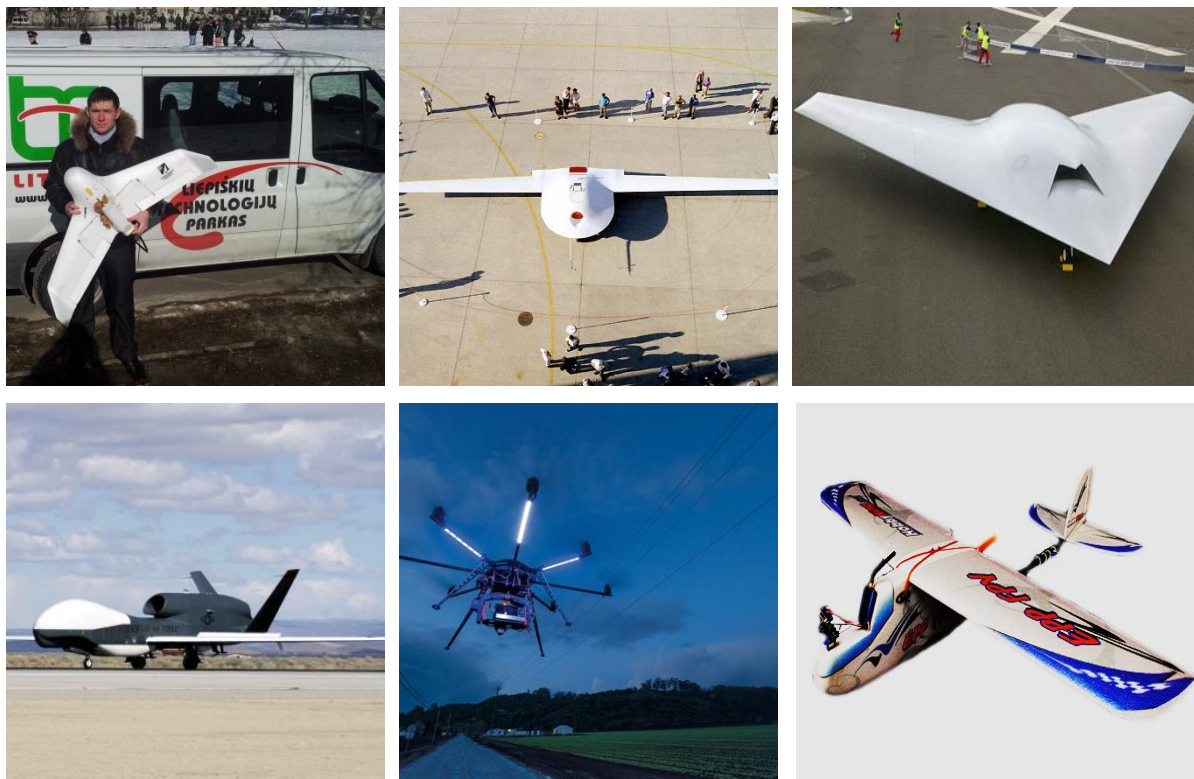
Bepiločių orlaivių sistemos (UAS – *Unmanned Aerial System*) – nuotoliniu būdu valdomos skraidančios mašinos, pirmiausia kurtos kariniams tikslams, siekiant išsaugoti žmonių gyvybes pavojingose karinėse misijose, svarbu paminėti, kad sistema yra pilnai automatizuota, veikia be žmogiškojo faktoriaus nuo misijos pradžios iki pabaigos.

Ši sritis gyvuoja jau visą amžių, orlaivių prikūrta daug ir įvairių, nuo nedidelio bandomojo modelio iki milžiniškos karo mašinos. Tai nėra tik žudymo mašinos, bepiločiai orlaiviai naudojami nukentėjusiųjų paieškai po stichinių nelaimių, jūroje ar dykumoje, daugiau dėmesio skiriama atliekant įvairius mokslinius tyrimus, ne išimtis ir nuotolinių tyrimų sritis – skaitmeninė fotogrametrija. Bepiločiuose orlaiviuose (UAVs – *Unmanned Aerial Vehicles*), kurie gali būti valdomi nuotoliniu būdu radijo bangomis (*Remote Operation Aerial Vehicles* – ROAVs), atliekami nuotoliniai tyrimai, įmontuojami elektromagnetinio spektro, gama spindulių, biologiniai ar cheminiai jutikliai. Elektromagnetinių bangų jutikliai registruoja regimosios šviesos, infraraudonųjų ir artimų jiems bangas. Gali būti naudojami mikrobangų ar ultravioletinių bangų jutikliai, tačiau jie nėra populiarūs. Biologiniais jutikliais iš oro tiriamos įvairių mikroorganizmų populiacijos, cheminiai jutikliai – tai lazeriniai spektroskopai, skirti oro dalelių koncentracijos tyrimams (Eisenbeiß 2009).

Bepiločių orlaivių eros pradžia laikoma Pirmasis Pasaulinis karas. Nikolas Tesla 1916 aprašė karui skirtus bepiločius orlaivius – RVP (*Remote Piloted Vehicle*) – nuotolinio valdymo bepiločiai orlaiviai buvo naudojami kartu su priešlėktuvine artilerija ir puolimo iš oro užduotyse.

Bepiločiai orlaiviai būna įvairių dydžių, formų, konstrukcijų ir pasižymi įvairiomis savybėmis (3.1 pav.). Anksčiau tai buvo tiesiog nuotoliniu būdu valdomi orlaiviai, bet pastaruoju metu

naudojama vis daugiau savarankiškų bepiločių orlaivių, kurie juda pagal iš anksto užprogramuotą skrydžio trajektoriją arba naudodami sudėtingesnes dinaminio automatizavimo sistemas (Dempsey 2010).



3.1 pav. Bepiločių orlaivių pavyzdžiai

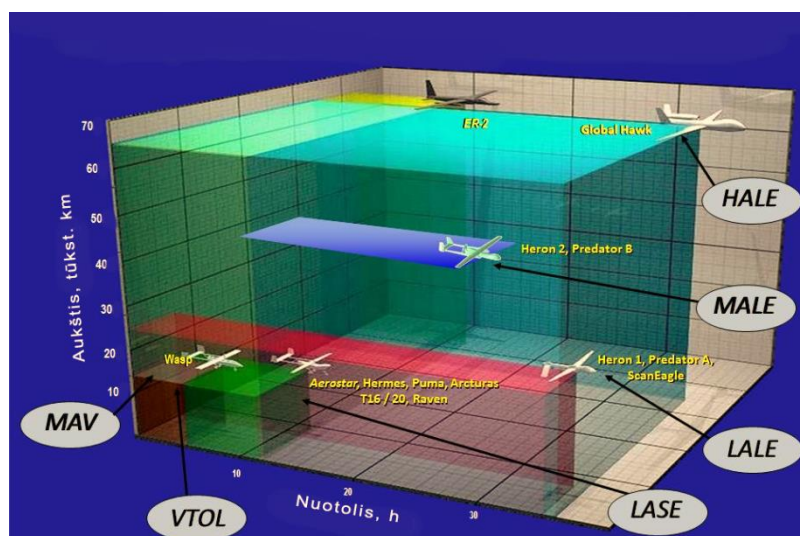
**Klasifikacija.** Pagrindiniai klasifikavimo aspektai yra masė, skrydžio trukmė, skridimo nuotolis, greitis, sparno keliamoji galia. Atsižvelgiama į kainą, ilgaamžiškumą bei maksimalų skridimo aukštį. Doktoras Maziaras Arjomandis (*Dr. Maziar Arjomandi*) pateikia orlaivių klasifikavimą pagal 5 požymius (Arjomandi 2006):

1. Masė (masių skirtumai sudaro tūkstančius kartų, nuo itin lengvų iki masyvių);
2. Skrydžio trukmė ir nuotolis (skiriama į ilgo, vidutinio bei trumpo nuotolio);
3. Didžiausias pakilimo aukštis (skrydžio aukštis apsprendžia orlaivio užduotį, žvalgybai ar kartografavimui naudotini itin didelio skrydžio aukščio modeliai, kadangi jie mažiau pastebimi, o su šiuolaikine optika gaunami aukštos skiriamosios gebos fotografiniai vaizdai);
4. Keliamoji jėga ir galia (skaičiuojama kilogramais kiekvienam sparno kvadratiniam metrui. Vyrauja nuomonė, kad maža keliamoji galia yra  $<50 \text{ kg/m}^2$ , vidutinė  $50\text{--}100 \text{ kg/m}^2$ , didelė  $>100 \text{ kg/m}^2$ );
5. Motoro tipas (dažniausiai gaminami su turboventiliatoriniais, dvitakčiais,

keturtakčiais, rotoriniais, turbosraigtiniais, elektriniais bei propeleriniais varikliais).

Klasifikavimas galimas ir kitoks (3.2 pav.). Žurnale „Remote Sensing“ bepiločius orlaivius mokslininkai (Watts *et al.* 2012) skirsto į:

1. Mažus ir labai mažus (MAV ir NAV Air Vechiles);
2. Vertikalaus kilimo ir leidimosi (VTOL – Vertical Take-Off & Landing);
3. Žemaskrydžius/trumpaskrydžius (LASE – Low Altitude, Short-Endurance);
4. Žemaskrydžius/ilgaskrydžius (LALE – Low Altitude, Long Endurance);
5. Ilgaskrydžius (MALE - Medium Altitude, Long Endurance);
6. Aukštaskrydžius/ilgaskrydžius (HALE – High Altitude, Long Endurance).



3.2 pav. Bepiločių orlaivių klasifikacijos modelis (Watts *et al.* 2012)

### 3.2. Mažųjų bepiločių skraidymo priemonių sistemų galimybės ir taikymas

Pirmosios žemės paviršiaus fotonuotaukos iš oro darytos pasitelkiant balandžius, kuriems prie kūno pritvirtindavo lengvos konstrukcijos fotoaparatus. Didesnes fotokameras montuodavo prie vėjo aitvarų, dėl nuolatinio ir netolygaus judėjimo fotografinis vaizdas būdavo susiliejęs ir netikslus.

Technikos progresas pakeitė aitvarus ir balandžius į oro balionus, o pastaruosius – į lėktuvus. 1860 m. padaryta pirmoji aerofotonuotauka iš oro baliono. 1979 m. atliktas žemės paviršiaus fotografavimas iš radijo bangomis valdomo skrendančio nedidelio lėktuvo, kuris svėrė 3 kg, skriejo 150 m aukštyje 11 m/s greičiu. Dėl santykinai didelio greičio, korpuso vibracijų ir prastai išstbulintos fototechnikos lyginant su dabartine, fotografiniai vaizdai buvo ganėtinai prastos kokybės. 1980 m. sukurtas specialiai koartografiniams darbams straigtasparnio tipo aeromodelis, turintis vibracinį kompensacinį mechanizmą nepageidaujamoms korpuso vibracijoms slopinti.

Stipriai krtitusi elektronikos kaina, išaugęs kompiuterių galingumas ir vartotojų

susidomėjimas inovacijomis paspartino bepiločių orlaivių plėtrą ir taikymą civiliniams tikslams. Kompanija *Hnit-Baltic* išskiria šias bepiločių orlaivių sistemų panaudojimo sritis:

- inžinerija ir geodezija (tikslūs ortofotografiniai žemėlapiai geodezijos darbams, projektavimui ir planavimui, *GIS* duomenų bazių sudarymui, greitai sukuriamas skaitmeninis paviršiaus modelis pakeičia standartiniais geodeziniais prietaisais atliekamą piketavimą topografiniuose matavimuose);
- civilinė inžinerija (galima generuoti aukštos raiškos ir geodezinio tikslumo ortofoto nuotraukas, sudaryti reljefo modelį, skaičiuoti žemės darbų tūrius ir jų pokyčius, dokumentuoti statybos ir remonto darbų eigą);
- miškininkystė (*RGB* ir *NIR* aerofotonuotraukos gali būti naudojamos miškų, sodinukų monitoringui, teminiam kartografavimui, derinant standartinius *RGB* vaizdus ir artimo infraraudonųjų spindulių (*NIR*) spektro vaizdus, atliekama sergančių, kenkėjų pažeistų medžių identifikacija, fiksuojama ir vertinama audrų, kritulių žala);
- kalnakasyba (karjerų ir durpynų eksploatavimo, tiksliam kasamo produkto tūrio ir jo pokyčio skaičiavimui);
- žemdirbystė (naudojant aukštos raiškos *RGB* fotokamerą sprendžiami pasėlių deklaravimo uždaviniai, galima augalų chlorofilo indikacija bei drenažo efektyvumo nustatymas, atliekant pasėlių fotografavimą artimo infraraudonųjų spindulių spektro (*NIR*) fotokamera galima išskirti pasėlių bei augalų rūšis);
- atliekų tvarkymas (tikslus kaupiamų atliekų paviršiaus modelio kūrimas naudojant aerofotografavimą, leidžia stebėti, kontroliuoti atliekų tūrio dinamiką jų kaupimo aikštelėje);
- archeologija (*RGB* ir *NIR* aerofotonuotraukos išryškina žemės paviršiaus struktūrinius pokyčius, leidžiančius efektyviau ieškoti archeologinių objektų, tikslūs ortofotografiniai *3D* žemėlapiai tarnauja objektų dokumentavimui ir kartografavimui);
- stichinių nelaimių monitoringas (operatyvus duomenų surinkimas, vizualizavimas, publikavimas internete ar mobiliuose įrenginiuose – tai priemonė stichinių nelaimių padarinių įvertinimui).

Aerofotogrametrinio fotografavimo atveju įprasta laikytis tokios darbų sekos (Eisenbeiß 2009; (UAV Systems-Unmanned 2013) :

- projekto tikslų ir parametrų apibrėžimas;
- skrydžio planavimas;
- aerofotografavimas;
- gautų duomenų kokybės patikrinimas;

- blokinės trianguliacijos sudarymas;
- skaitmeninio paviršiaus modelio kūrimas;
- ortofotonuotraukos, trimačio modelio kūrimas.

Fotografiniams vaizdams gauti naudojami skirtingo tipo, kategorijos ir klasifikacijos bepiločiai skraidantys įrenginiai, kurių sistemos kaina siekia iki 30 000 €. Svarbu paminėti, kad sistemą sudaro: orlaivis, autopilotas, kontrolinis pultas, kompiuteris su specializuota programine įranga skirta autonominio skrydžio projektavimui ir gautų duomenų apdorojimui, telemetrinio ryšio antena, fotokamera. Kompaktiškos *SwingletCAM* sistemos pavyzdys pateikiamas 3.3 pav. Tokiuose lengvos konstrukcijos lėktuvėliuose montuojamas lengos, neprofesionalios 10–20 *Mpx* skiriamosios gebos, nors ir nevisada tenkinančios vartojų lūkesčius fotokameros. Šiuose sistemose aerofotonuotraukos gali būti fiksuojamos rankiniu, pusiau automatiniu arba automatiniu būdu.



**3.3 pav.** Gamyklinė bepilotė skraidymo sistema *SwingletCAM* (Jefferies 2012)

Lietuvoje gamyklinius modelius platina ir konsultuoja gerai žinomos kompanijos, tokios kaip *InfoEra*, *Hnit-Baltic* ar *TopCon*. Prie modelio pateikiama visa reikalinga skrydžio misijos planavimo, fotografavimo ir vėlesnio fotovaizdų apdorojimo bei ortofotografinių žemėlapių ir paviršiaus modelių generavimo programine įranga. Gamyklinės yra brangesnės ir pranašesnės, dėl kartu pridamos, suderintos su sistema, programinės įrangos, už pačių vartotojų sukomplektuotas sistemas (3.4 pav.). Dauguma fotogrametrinių programų yra licenzijuojamos, t.y. komercinės, todėl sutaupius įrangai kyla problemų su duomenų apdorojimu, nes rinkoje pateikiama nemokama programinė įranga dažniausiai yra bandomojo pobūdžio su daugybės funkcijų, laiko ar kitokiais apribojimais.



**3.4 pav.** Vartotojo-mėgėjo sukomplektuotas aeromodelis (Rudinskas 2011)

Gamintojai norėdami sulaukti didesnio vartotojų dėmesio ir padidinti pardavimus piešia labai gražias vizijas ir pateikia įspūdingus galutinių produktų vaizdus (brošiūrose) apie spartų ir autonominį duomenų apdorojimo procesą, tačiau realybėje vargu ar galime tikėtis tokio aukšto skaitmeninio paviršiaus modelio tikslumo ir kokybiškos ortofografinės nuotraukos be žmogaus įsikišimo į apdorojimo procesus.

Šiuo metu rinkoje pristatomos naujos kartos ir naujų galimybių bepiločio lėktuvo profesionalaus aerokartografavimo sistemos (pvz.: *Topcon SiriusPRO RTK*). Šios sistemos paskirtis yra greitas didelės apimties teritorijų kartografavimas paviršių modelių generavimui, įvairios paskirties žemėlapių kūrimui, skaičiavimams ir analizei, nepaprastai aukštu tikslumu, be jokių kontrolinių taškų įrengimo kartografuojamoje vietovėje. Nepilotuojamame lėktuve integruota *Topcon* 226 kanalų, *L1/L2*, *GPS/Glonass*, *GPNS* plokštė atnaujinanti padėtį net 100 kartų per sekundę greičiu, užtikrina *RTK (Real Time Kinematic)* technologijos teikiamų galimybių panaudojimą precizinio aerokartografavimo procese, tuo užtikrinant ženkliai didesnę tiek lauko darbų, tiek ir žemėlapių generavimo spartą. *Topcon SiriusPRO* aprūpintas visa reikalinga skrydžio misijos planavimo, fotografavimo ir vėlesnio fotovaizdų apdorojimo bei ortofotografinių žemėlapių ar paviršiaus modelių generavimo programine įranga (Profesionali aerokartografavimo sistema *Topcon SiriusPRO RTK* 2014).

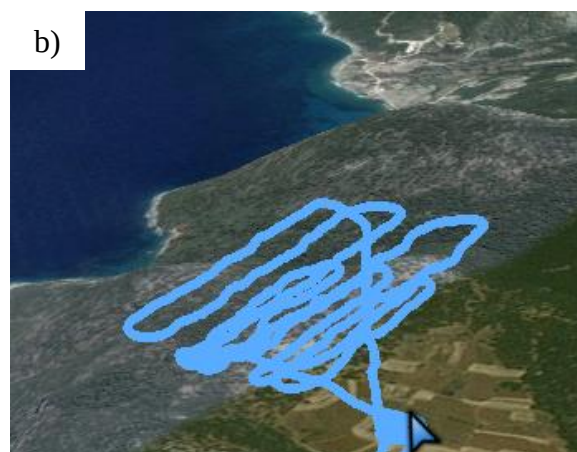
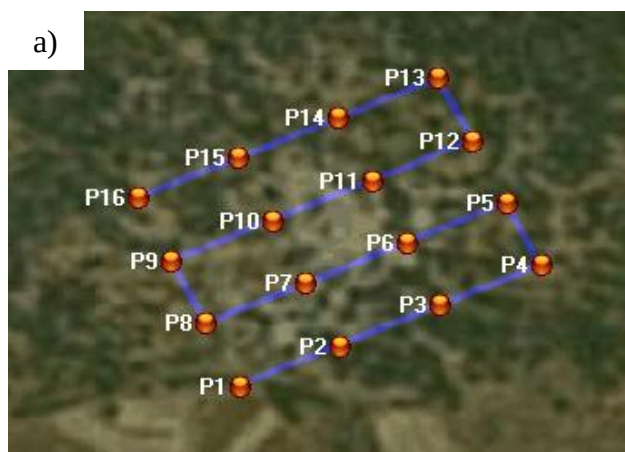
### 3.2. Aerokartografavimas – praktinė patirtis

Erasmus praktikos metu (Rodas, Graikija 2013.07.07–21), kurios tikslas – kultūrinio paveldo dokumentavimas šiuolaikinėmis priemonėmis, buvo atliktas 30 000 m<sup>2</sup> vietovės aerokartografavimas su dviejų skirtingų klasių bepiločiais orlaiviais (3.5 pav. a, b), skirtingomis fotokameromis bei gautų duomenų apdorojimo fotogrametrinėmis programomis. Vietovė pasižymi įspūdingu landšaftu: dideli aukščių skirtumai, gausu medžių, krūmų ir didelių akmenų.



**3.5 pav.** Vietovės fotografavimui naudoti bepiločiai orlaiviai: a) vertikalios kilimo ir leidimosi (VTOL) klasės Octocopter'is; b) mažųjų orlaivių (MAV) klasei priskiriamas SwingletCam modelis

Vietovė buvo aerofotografuota su kiekvienu *BO* po keletą kartų iš 60–90 m aukščio, kiekvienu praskridimu su *Octocopter* užfiksuota apie 500 fotonuotraukų, su *SwingletCam* apie 100. *Octocopter* fotografavo virš 16-os skrydžio maršrute nurodytų taškų (3.6 pav., a) tuo tarpu *SwingletCam* fotografavo viso skrydžio metu (3.6 pav., b).

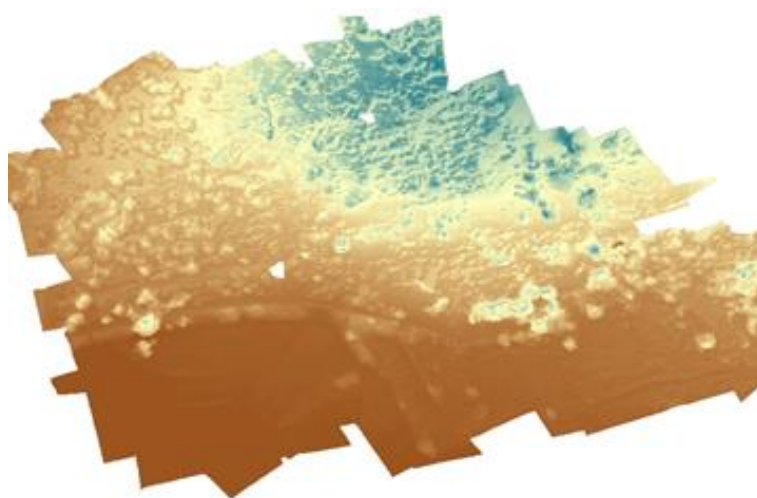


**3.6 pav.** Aerofotografavimo maršrutai: a) *Octocopter*; b) *SwingletCam*

Duomenų apdorojimas atliktas su *ImageMaster* ir *PhotoScan* kompiuterinėmis programomis. Tikslesniam aerofotonuotraukų sugretinimui atlikti buvo įtraukta virš 20-ies referencinių taškų išmatuotų geodeziniu *GPS* prietaisu *RTK* metodu. Darbo rezultatas – ortofotografinė nuotrauka (3.7 pav.) ir skaitmeninis paviršiaus modelis (3.8 pav.).



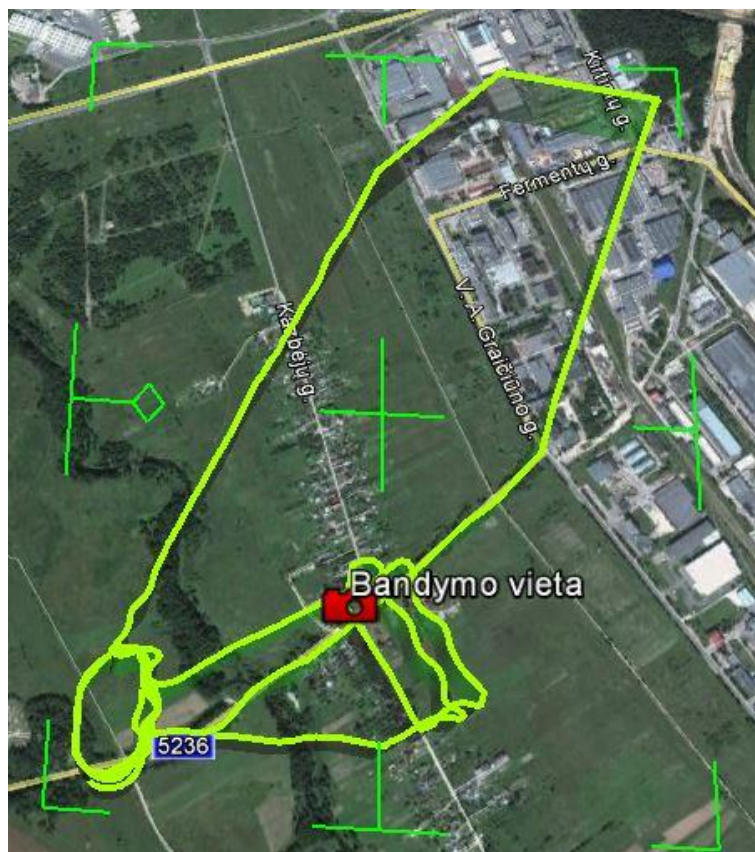
**3.7 pav.** Ortografinė nuotrauka sudaryta pagal *Octocopter* gautus fotografinius vaizdus su *ImageMaster* kompiuterine sistema



**3.8 pav.** Skaitmeninis paviršiaus modelis sukurtas pagal *SwingletCam* aerokartografavimo duomenis *PhotoScan* programiniu paketu

#### 4. EKSPERIMENTINIO OBJEKTO FOTOGRAFAVIMAS IR FOTOGRAFINĖS MEDŽIAGOS APDOROJIMAS

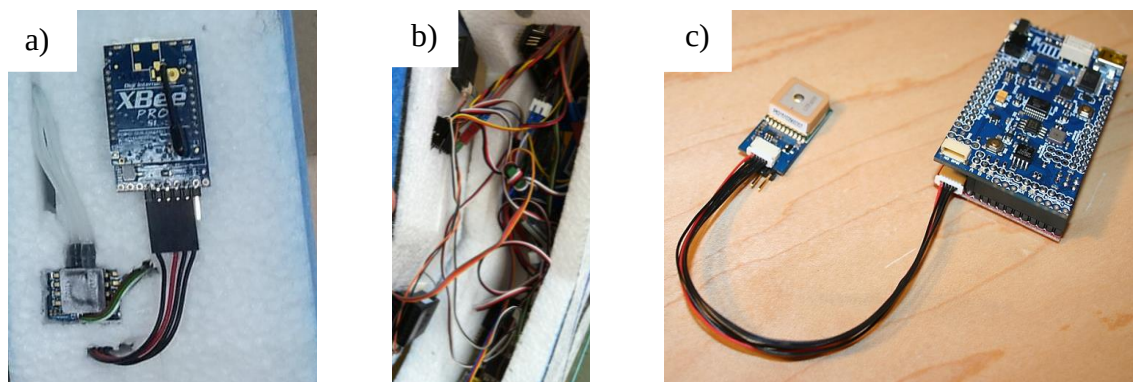
Aerofotografavimui pasirinkta teritorija – Vilniaus miesto pietvakarinėje dalyje esanti Naujakiemio gyvenvietė (4.1 pav.). Bandymo metu bepilotis orlaivis (BO) apskriejo 350 000 m<sup>2</sup> teritoriją, iš kurių 40 000 m<sup>2</sup> – intereso (eksperimento) zona. Vietovė yra dalinai užstatyta, nepasižymi kontrastingomis geomorfologinėmis ypatybėmis, reljefo aukštis virš jūros lygio intereso zonoje svyruoja ties 125 m riba.



**4.1 pav.** Aerofotografavimo teritorija – Naujasodžio gatvė, Vilnius

##### 4.1. Lėktuvo modelio sistemos ir skrydžio techninės charakteristikos

Bandymo metu naudotas visas komplektas elektronikos komponentų (4.2 pav.) sumontuotų putoplastiniame *EPP-FPV* aviamodelyje. Kiekviena sistemos detalė (autopilotas, radijo ryšio antena, traukos kontrolės sistema, *GPS* imtuvas variklis, sraigtas, ir kt.) yra svarbi ir užsakoma pagal poreikius ir galimybes.



**4.2 pav.** Skrydžio valdymo ir navigacijos komponentai: a) *Xbee* tiesioginis duomenų perdavimo modulis; b) sistemos instaliacija orlaivyje; c) autopilotas *ArduPilotMega* su *GPS* imtuvu

**4.1 lentelė.** Aerofotografavimui naudotos įrangos techninės savybės

| Parametras                  | Aprašymas                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Ilgis                       | 1.5 m                                             |
| Sparnų mojis                | 1.8 m                                             |
| Naudingasis krovinys        | $\leq 0.7$ kg                                     |
| Maksimali masė              | 4 kg                                              |
| Maksimalus greitis          | 70 km/h                                           |
| Kreiserinis greitis         | 50 km/h                                           |
| Vidutinis skrydžio nuotolis | 30 km (priklausomai nuo masės)                    |
| Skrydžio laikas             | 30–50 min. (priklausomai nuo masės)               |
| Variklio tipas              | elektrinis                                        |
| Valdymas                    | automatinis/rankinis                              |
| Pakilimas                   | išmetamas                                         |
| Nusileidimas                | ant lygaus paviršiaus                             |
| Tiesioginis 430 MHz ryšys   | ~10 km                                            |
| Valdymo įranga              | nešiojamas kompiuteris su ryšio moduliu ir antena |
| Fotokamera                  | <i>Canon S100</i>                                 |
| Skiriamoji geba             | 12.1 vaizdo elementų                              |
| Nominalus židinio nuotolis  | 5.2 mm                                            |
| Jutiklio dydis              | 7.6×5.7 mm                                        |
| Maksimalus vaizdo dydis     | 400×300 mm                                        |
| <i>GPS</i> imtuvas          | yra                                               |
| Masė                        | 198 g                                             |
| Sistemos 1 komplekto kaina  | 4700–5000 Lt                                      |

Aerofotografavimui pradedama ruoštis dar biure. Aptariamais tikslais, peržiūrima tos dienos orų prognozė, sukomplektuojama *BO* sistema (modelis, sraigtas, baterijos, fotokamera ir kt.), viskas sukraunama į automobilį ir važiuojama į objektą. Objekte atlikti šie parengiamieji darbai:

- įvertinamos landšafto ypatybės;
- įvertinamos meteorologinės sąlygos;
- surenkamas skraidymo aparatas;
- patikrinamos baterijos, sraigtas, variklis, radijo ryšio stiprumas;
- patikrinama ir įmontuojama fotokamera orlaivyje;
- nustatomas begalinis kameros fokusavimo režimas;
- fotokamera prijungiama prie *APM* plokštės;
- atsižvelgiant į numatytus tikslus sudaromas skrydžio maršrutas kompiuteryje panaudojant *Google Earth* žemėlapius;
- nustatomi maršruto parametrai (posūkio taškai, aukštis ir kt.);
- visi nustatymai keliami į autopiloto sistemą orlaivyje;
- dar kartą įsitikiname, kad viskas veikia ir paleidžiame *BO* sistemą į orą.

*BO* sistemos skrydis, pagal kontrolės tipą, gali būti rankinis, pusiau–autonominis arba pilnai autonominis. Pakilimo ir nusileidimo funkcija – autonominė arba rankinė, dažniausiai naudojama rankinė, nes realiu laiku galima įvertinti esamas aplinkybes (pvz.: vėją), reikalinga mažesnė erdvė, nebūtinai lygus paviršius (galima sugauti rankomis). Autonominio skrydžio paruošimui naudojame laisvai prieinamą (*Free Software*) programinį paketą „*Mission Planner*“, kuris nuotoliniu ryšiu, kompiuterio pagalba siunčia valdymo komandas į autopilotą *ArduPilotMega (APM)*. Visi skrydžio duomenys registruojami *APM* vidinėje atmintyje, o esant būtinybei siunčiami telemetrinio ryšio pagalba į antžeminę valdymo stotį (pvz.: nešiojamąjį kompiuterį).

Fotogrametrinio aerofotografavimo atvejui skrydžio trajektorija pasirinkta kiek neįprasta. Skraidyta 6 skirtingų formų poligonais, skirtinguose aukščiuose, todėl sunku surasti dvigubo ar trigubo dengimo zonas aerofotonuotaukose, kas problemų nekelia standartiniuose skrydžio maršrutuose.

Objekto fotografavimas atliktas pasinaudojus autonominio skrydžio funkcija su 4.3 pav. pavaizduotu lengvučiu *BO*. Maršrute, su *BO* įmontuota mėgėjiška fotokamera *Canon S100* (4.4 pav.) padaryta 184 objekto nuotraukos, kurios ekspozicijos momentai buvo valdomi *AMP* sistemos. Pikselio dydis ant žemės paviršiaus (*GSD – Ground Sample Distance*) fotografiniuose vaizduose gautuose fotokamera iš 150 m aukščio nuo žemės paviršiaus siekia apie 10 cm. Židinio nuotolis 35 mm, vaizdo elemento dydis 3 µm. *GSD* apskaičiuojamas pagal 4.1 formulę:

$$GSD = \frac{P \times H}{c}, \quad (4.1)$$

čia  $P$  – vaizdo elemento dydis;  $H$  – objektyvo aukštis virš žemės paviršiaus;  $c$  – židinio nuotolis.

Įrenginiui nusileidus iš fotokameros išimama  $SD$  kortelė dedama į kompiuterį, atidaroma ir patikrinama gautų duomenų kokybė: nuotraukų ryškumas, aiškumas. Jeigu reikia skrydis kartojamas.



**4.3 pav.** Aerofotografavimui naudota skraidymo priemonė su skaitmeniniu imtuvu

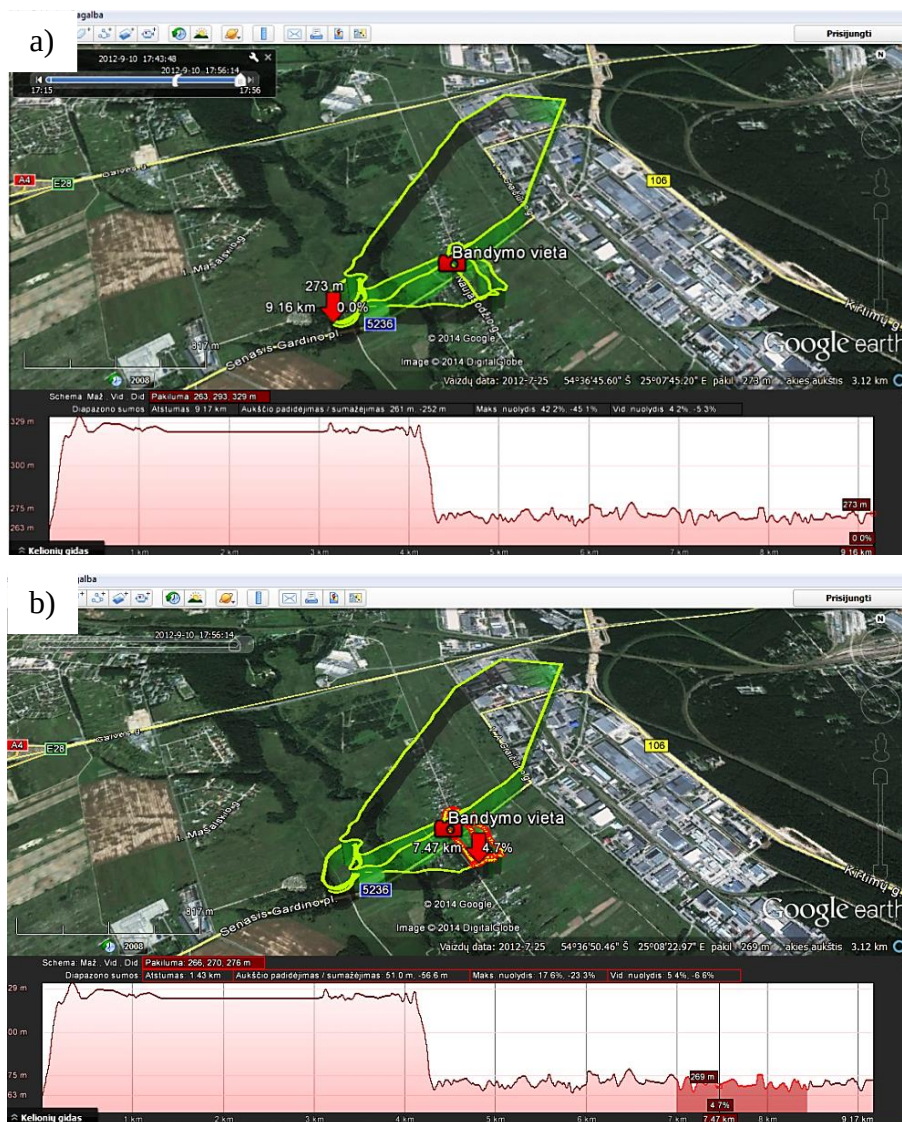


**4.4 pav.** Fotokamera Canon S100 su integruota GPS funkcija

Objektas fotografuotas 2012 liepos 25 d. Didžiausias fiksuotas pakilimo aukštis nuo jūros lygio maršrute, kurio ilgis 9.15 km – 328 m, mažiausias 263 m, vidutinis 293 m. Sistemos stabilumas skrydžio metu labai priklauso nuo esamų meteorologinių sąlygų, todėl galimi nemaži

nuokrypiai nuo užduoto kurso tiek vertikaliajoje, tiek horizontalioje padėtyje. Analizuojant aukščio profilį nustatytas vidutinis nuolydis svyruoja [4.5;-5.3 %] intervale (4.5 pav., a).

Maksimalus pakilimo aukštis, tyrimui pasirinktoje, daugiausiai persidengimų turinčioje zonoje (pažymėta raudonai) (4.5 pav., b), kur trasos ilgis siekia 1.43 km yra 276 m, mažiausias – 266 m, vidutinis – 270 m. Zonoje vertikalus nuolydis svyruoja [5.4;-6.6 %] intervale. Detalesnis aukščių profilis pateikiamas E priede.



4.5 pav. Skrydžio charakteristikos: a) viso skrydžio; b) intereso atkarpos

## 4.2. Aerofotonuotrukų koordinavimas

Aerofotonuotrukų orientavimui sudaromas geodezinis pagrindas. Apytikslis orientavimas įmanomas, pasinaudojus bepiločio orlaivio *EPP-FPV* sistemoje esančia *GPS* įranga nustatytomis kiekvieno fotografinio vaizdo projekcijos centro koordinatėmis, tačiau, siekiant sukurti aukštos

kokybės aerokartografavimo produktus reikia papildomai sukurti atraminių taškų tinklą ir nustatyti jų erdvines koordinates.

Prieš aerofotografavimą geodezinio pagrindo taškai (kontūrženkliai) nebuvo specialiai suprojektuoti ir markiruoti vietovėje. Atramos taškai parinkti interaktyviuoju būdu iš Lietuvos teritorijos ortofotografinio žemėlapio ([www.maps.lt/](http://www.maps.lt/)). Fotogrametriniai taškai parinkti taip, kad aiškiai būtų matomi fotografiniuose vaizduose ir pasiekiami vietovėje (aktualu koordinuojant geodeziniais prietaisais).

Atramos taškų erdvinės koordinatės nustatytos dviem būdais:

- iš ortofotografinio žemėlapio internetinėje aplinkoje  $\pm 1$  m tikslumu;
- globaline padėties nustatymo sistema (GPS)  $\pm 4$  cm tikslumu.

Atramos taškų parinkimas iš ortofotografinio žemėlapio (*LT 10 000*) yra spartus ir patogus. Pakanka išsirinkti gerai matomą tašką, ant jo spustelėjus kairiąją pelės klavišą atsiranda lentelė su keturiais pasirinkimais, iš kurių vienas  $\rightarrow$  *Gauti taško koordinates*. Interaktyviu būdu galima nustatyti planimetrines koordinates *LKS-94* ir *WGS-84* stačiakampių bei *WGS-84* geodezinių koordinatinių sistemose (4.6 pav.). *Google Earth* programine sistema nustatyti parinktųjų taškų aukščiai. Planimetrinės koordinatės kosminėse nuotraukose netenkina tikslumo reikalavimų.



**4.6 pav.** Atraminių taškų rinkimas [www.maps.lt/](http://www.maps.lt/) aplinkoje

Interaktyviuoju būdu koordinuoti 9 taškai: elektros stulpai, didesnių akmenų kontūrai ir kiti aiškiai matomi fotografiniuose vaizduose objektai. Kontūrženklų išdėstymo schema pateikta 4.7 pav., o nustatytų koordinatinių katalogas 4.2 lentelėje. Geodezinio pagrindo visi atramos taškai kairiojoje ir dešiniojoje aerofotonuotraukose bei jų numeracija pateikiama F priede.



**4.7 pav.** Atramos taškų  išsidėstymo ortofotografiniame žemėlapyje schema

**4.2 lentelė.** Atramos taškų koordinatės nustatytos internetinėje aplinkoje

| Taško Nr. | X, m      | Y, m     | H, m  |
|-----------|-----------|----------|-------|
| 101       | 6053876.0 | 573430.0 | 127.0 |
| 102       | 6053782.0 | 573429.0 | 123.0 |
| 103       | 6053927.0 | 573484.0 | 127.0 |
| 104       | 6053820.0 | 573399.0 | 123.0 |
| 105       | 6053840.0 | 573525.0 | 126.0 |
| 106       | 6053919.0 | 573550.0 | 127.0 |
| 107       | 6053880.0 | 573534.0 | 126.0 |
| 108       | 6053859.0 | 573614.0 | 127.0 |
| 109       | 6053937.0 | 573589.0 | 127.0 |

Tikslus geodezinis pagrindas kuriamas globalios padėties nustatymo sistema. Palydovinė radijo-navigacinė sistema matuoja taškus realiu laiku, bet kurioje, santykinai atviroje vietoje priimdama iš visų, virš horizonto esančių palydovų skleidžiamus signalus. Objekte matavimai atlikti pagal *GPS* referencinių stočių duomenis. Šios stotys telemetrinio ryšio kanalais perduoda vartotojams koordinačių, pseudoatstumų bei nešlio fazių pataisas į *GPS* imtuvus, kuriuose skaičiuojamos pataisos ir tikslinami matavimų rezultatai.

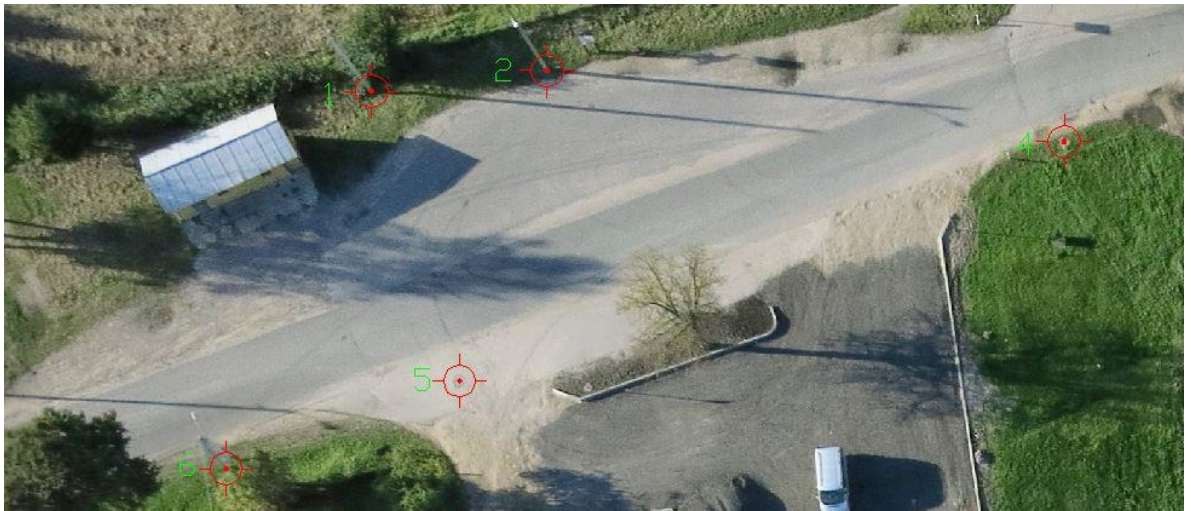
Objekte, taškų koordinatės matuotos dviadažniu *GPS* imtuvu *Sokkia GSR2700* (4.8 pav.). Matavimų metu buvo nustatyta 21 taško erdvinės koordinatės valstybinėje koordinačių sistemoje *LKS-94*. Šiuo metodu išmatuoti tik lengvai prieinami vietovėje taškai, kai interaktyviuoju būdu tokia sąlyga nebūtina. Įvertinus situaciją, išmatuoti geodezinio pagrindo taškai vietovėje – gatvių pakraščiuose esantys elektros stulpai, komunikacinio šulinio dangtis, didesni akmenys bei

neaptvortoje teritorijoje esančio nebaigto statyti pastato kertė. Matavimai prietaisu atlikti tiksliai, tačiau galimos nemažos paklaidos identifikuojant taškus aerofotonuotrukose. Kontūrženklių išsidėstymo fragmentas pateikiamas 4.9 pav.



**4.8 pav.** Taškų koordinavimui naudotas GPS imtuvas

Nustatytosios kontūrženklių koordinatės *LKS-94* koordinačių sistemoje pateikiamos 4.3 lentelėje.



**4.9 pav.** Atramos taškų išdėstymo vietovėje fragmentas (koordinuota su GPS)

**4.3 lentelė.** Atramos taškų koordinatės nustatytos su GPS

| Taško Nr. | X, m       | Y, m      | H, m   |
|-----------|------------|-----------|--------|
| 1         | 6053926.78 | 573483.81 | 128.00 |
| 2         | 6053932.35 | 573494.42 | 128.46 |
| 3         | 6053948.44 | 573511.02 | 127.99 |
| 4         | 6053940.42 | 573529.05 | 128.80 |
| 5         | 6053909.89 | 573497.75 | 128.14 |
| 6         | 6053897.22 | 573486.05 | 127.61 |
| 7         | 6053876.21 | 573463.08 | 126.83 |
| 8         | 6053851.08 | 573433.45 | 125.64 |
| 9         | 6053820.08 | 573397.93 | 124.35 |
| 10        | 6053886.19 | 573437.70 | 126.40 |
| 11        | 6053927.66 | 573390.53 | 127.44 |
| 12        | 6053893.30 | 573511.47 | 128.34 |
| 13        | 6053838.38 | 573526.16 | 128.23 |
| 14        | 6053879.40 | 573534.03 | 128.37 |
| 15        | 6053913.48 | 573549.65 | 128.76 |
| 16        | 6053843.76 | 573586.79 | 128.69 |
| 17        | 6053927.91 | 573557.97 | 128.83 |
| 18        | 6053942.57 | 573565.77 | 129.25 |
| 19        | 6053931.71 | 573584.69 | 129.84 |
| 20        | 6053809.04 | 573407.64 | 124.80 |
| 21        | 6053782.39 | 573428.94 | 125.41 |

#### 4.3. Fotogrametrinių duomenų apdorojimas fotogrametrine sistema LISA

Bepiločio orlaivio sistema gautieji fotografiniai vaizdai fotogrametriškai apdoroti skaitmenine fotogrametrine darbo stotimi „LISA“. Mokomoji programinio paketo versija pateikta kompaktiniame diske su mokomąja *Wilfried Linder* knyga „*Digital Photogrammetry. A Practical Course*“. Pirmoji versija išleista 2005 m Hanoverio mokslininkų Vokietijoje, darbe naudota 2009 m modulis. Programa skirta įvairiems fotogrametriniams uždaviniams spręsti skaitmeniniuose vaizduose, kurių poreikis kiekvienais metais auga. Didelio vartotojų susidomėjimo sulaukia ne tik aerokartografavimo sritis, bet ir archeologija, architektūra, aplinkos apsauga, hidrologija, geografija, medicina, kultūrinis paveldas, žemės ūkis ir kt.

Fotogrametriniais duomenų apdorojimo principais paremtos programinės įrangos privalumai:

- galima tirti jau nebeegzistuojančius objektus, nes pakanka turėti jų fotografinius vaizdus;
- matavimai atliekami netiesiogiai neprisiliečiant prie objekto, todėl galima ištirti sunkiai prieinamas vietas;
- sinchronizuotomis fotokameromis gautuose vaizduose galima atkurti ir prognozuoti judančius reiškinius.

Skaitmeniniams vaizdams apdoroti skirtą paketą *LISA* sudaro keturi moduliai: *BASIC* (rastrinių *GIS* duomenų modeliavimas ir apdorojimas), *FOTO* (skaitmeninių vaizdų apdorojimas), *BLUH* (blokinė aerotrianguliacija) bei *FFSAT* (palydovinių vaizdų apdorojimas). Aerofotonuotraukų apdorojimui darbe naudoti *LISA BASIC* ir *LISA FOTO* moduliai. Šios dalys tarpusavyje tarpiai siejasi. Modelio apibrėžimas, kameros parametrų nustatymas, kontrolinių taškų katalogo kūrimas, skaitmeninių vaizdų orientavimas, stereoskopinis matavimas atliktas *LISA FOTO* aplikacijoje, o paviršiaus modelio analizė, ortofotografinės medžiagos vektorizavimas atliktas *LISA BASIC* pagalba (*LISA Geo* 2013).

Mokomojoje *LISA* versijoje apribotos dalis funkcijų ir galimybių: didžiausias leistinas skaitmeninio vaizdo dydis ribojamas iki 10 Mb, įmanomas tik nespaltotų fotografijų (grey scale) koduotų 8 bitų takeliu apdorojimas, nėra geokodavimo galimybių įrankių, nuotraukos įkeliamos tik *IMA* formatu.

Fotografinių vaizdų apdorojimui iš turimų 184-ių aerofotonuotraukų gausos atrinkta kokybiškiausia ir informatyviausia aerofotonuotraukų stereopora (dvi tarpusavyje persidengiančios fotonuotraukos), kurių išilginis dengimas ~80 %. Atrinkti vaizdai paruošiami pagal programos *LISA* reikalavimus:

- keičiamas nuotraukų formatas. Skaitmenine kamera vaizdai koduoti *JPG* formatu. Vaizdų redaktoriumi atidarytos nuotraukos išsaugotos *BMP* formatu;

- mažinamas fotonuotraukų dydis (*Resize/Resample*), jei viršija 10 MB, kadangi *BMP* formatas naudoja žymiai daugiau atminties. Aerofotonuotraukų dydis sumažintas iki 9.76 Mb;
- spalvotas vaizdas transformuojamas į nespaltvotą (iš *RGB*);
- *LISA BASIC* modulyje *BMP* formato vaizdai transformuojami į *IMA* 8 bitų formatą.

Taip paruoštos aerofotonuotraukos (4.10, 4.11 pav.) apdorotos *LISA FOTO* modulių.

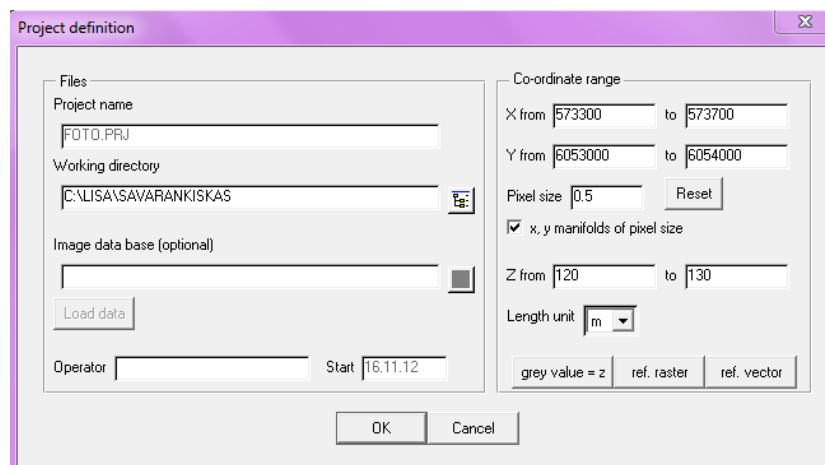


**4.10 pav.** Kairioji aerofotonuotrauka



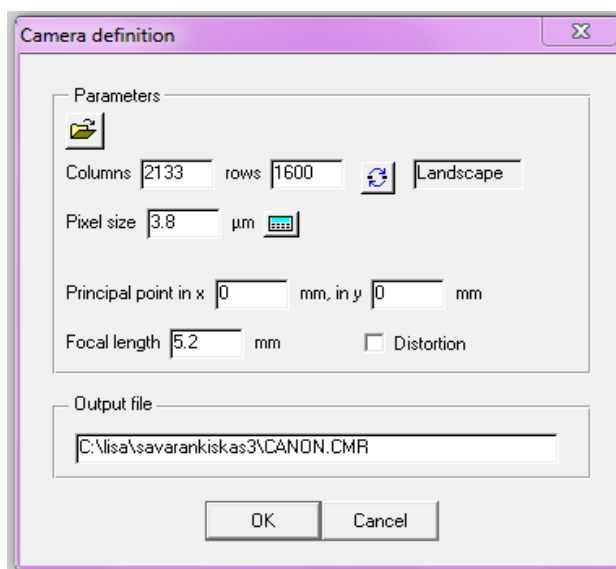
**4.11 pav.** Dešinioji aerofotonuotrauka

Programa darbas pradedamas naujo projekto apibrėžimu. *File* → *Define New Project*, atsidaro *Project Definition* langas, kuriame nurodomi pagrindiniai parametrai (projekto vardas, darbinė direktorija, stereoporos ribos, pikselio dydis ir kt.) (4.12 pav.).

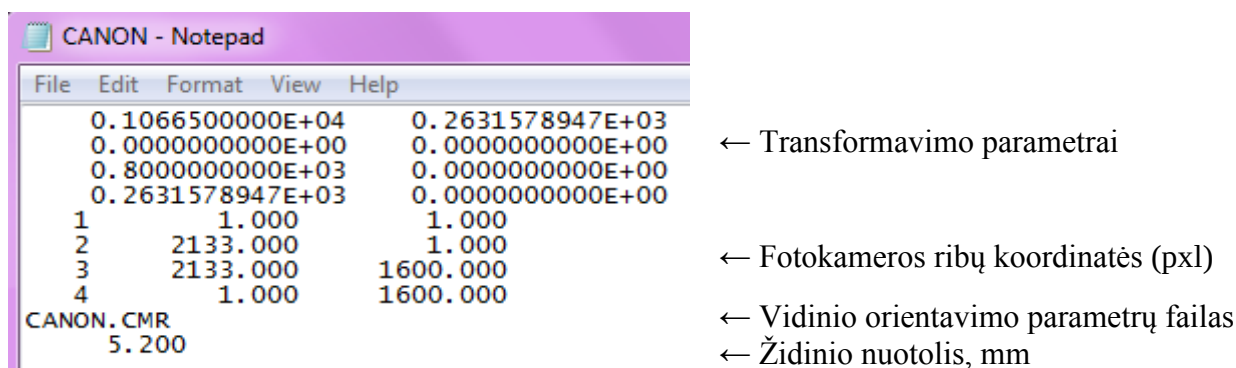


4.12 pav. Projekto savybių nustatymo langas

Svarbus etapas yra kameros kalibravimas arba kameros parametrų įvedimas (vidinis orientavimas), kurio metu atkuriami projektuojamų spindulių geometrija kiekvienos ekspozicijos momentu. Fotografavimo įrenginys *Canon S100* yra skaitmeninis, todėl neatliekame vidinio kameros orientavimo pagal kalibravimo sertifikatus, o tik suvedame apskaičiuotus parametrus: *Pre programmes* → *Camera definition* → *Digital*. Atsidaro *Camera Defination* langas, kuriame įvedame fotokameros parametrus (nuotraukos dydis, pikselio dydis, židinio nuotolis), o *Output file* nurodome dokumento pavadinimą, kuriame išsaugomi fotokameros duomenys (4.13 pav.). Gaunami du failai: fotokameros aprašymas \*.CMR su vidinio orientavimo parametrais \*.INN (4.14 pav.). Juose saugomi transformavimo parametrai, kuriais remiantis pereinama iš matricinės koordinatės sistemos (i,j) į sąlyginę koordinatės sistemą (x,y).

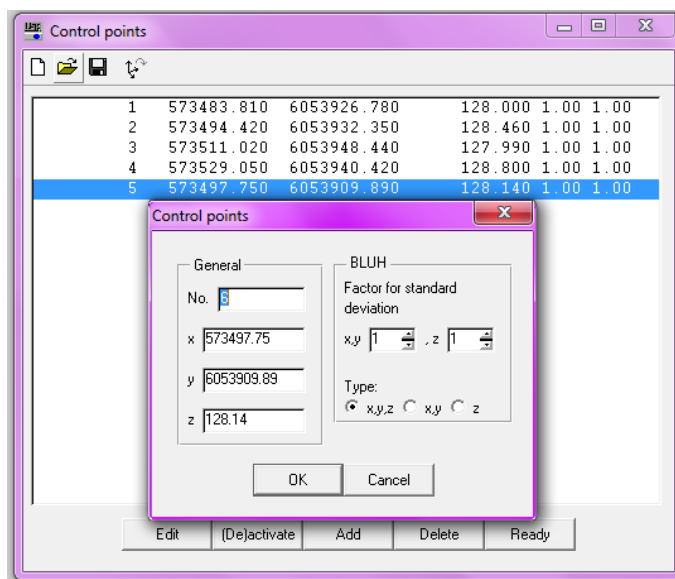


4.13 pav. Vidinio orientavimo parametrų įvedimo langas



4.14 pav. Fotokameros Canon S100 parametrai

Atramos taškų koordinatės įvedamos interaktyviu būdu ir saugojamos \*.DAT formatu darbinėje direktorijoje. *Pre programmes* → *Control Point Editor*, atsidaro *Control Points* langas, atramos tašką pridėdami mygtuku *Add*, įvedame atramos taško numerį, *X*, *Y* ir *H* koordinatas (fotogrametrinėse programose naudojama *Dekarto* koordinatės sistema, todėl svarbu sukeisti *x* ir *y* ašis vietomis) (4.15 pav.).



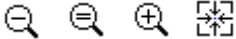
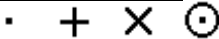
4.15 pav. Atramos koordinatės katalogo pildymo langas

Suvedus fotokameros parametrus ir geodezinio pagrindo atramos taškus, aerofotonuotraukos koordinatės sistema perskaičiuojama į vietovės geodezinę koordinatės sistemą – atliekamas absoliutusias orientavimas. Objektų fotografiniuose vaizduose erdvinei geometrijai atkurti sprendžiamos kolinearumo lygtys ir taip sukuriamas stereoskopinis modelis. Absoliučiajam orientavimui reikia turėti mažiausiai trijų atraminių taškų erdvines koordinatas bei du

persidengiančius vaizdus. Tai svarbus tyrimo etapas, kadangi nuo gautų rezultatų priklausys ortofotografinėje medžiagoje matuojamų taškų erdvinių koordinatčių tikslumas.

Programos valdikliai, kuriais atliekamas duomenų valdymas, matavimas, registravimas ir kontrolė pateikiami 4.4 lentelėje.

**4.4 lentelė.** Pagrindiniai programos įrankiai

| Simbolis                                                                            | Aprašymas                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | žymeklio slinkties greičio parinktys (labai lėtas, lėtas, vidutinis, greitas ir labai greitas)                                            |
|    | sanklodos anaglifinis vaizdas ir pateiktis (spalvų filtrai, streoporos kairysis–dešinysis vaizdas)                                        |
|    | mastelio keitimas (vaizdo mažinimas, normalus vaizdo dydis, vaizdo didinimas, vaizdo centravimas)                                         |
|    | matavimo žymės (taškas, kryžius, iksas, apskritimas su tašku viduryje)                                                                    |
|    | matavimo ir registravimo įrankiai (atstumo matavimas, kampo matavimas, spindulio matavimas, laužtės matavimas, koreliacijos koeficientas) |
|  | matavimų išsaugojimas                                                                                                                     |
|  | matavimų panaikinimas                                                                                                                     |

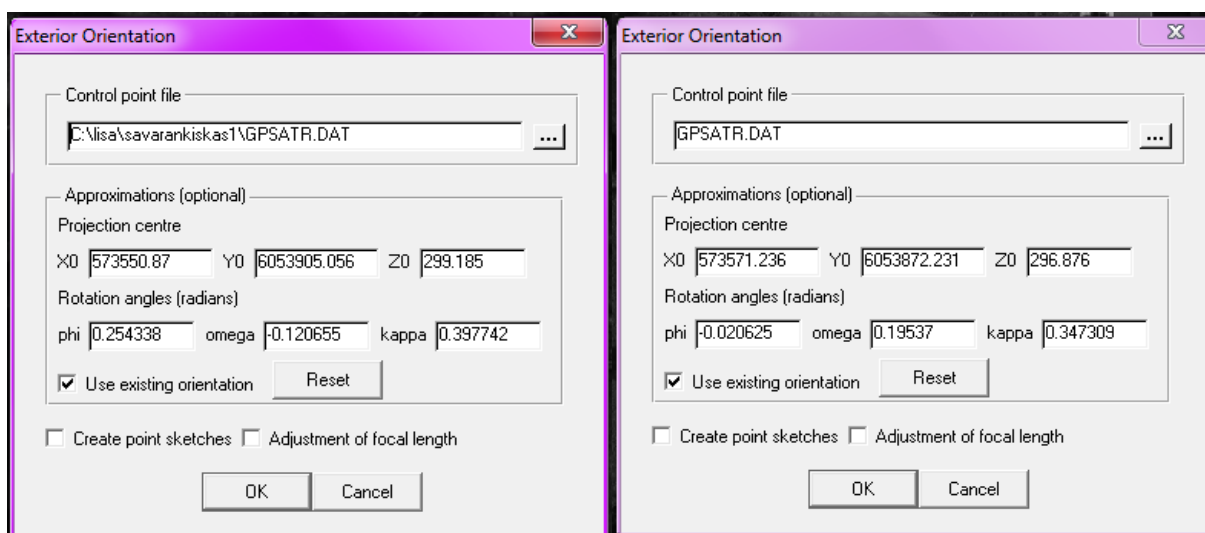
**Fotografinių vaizdų išorinio orientavimas ir rezultatų analizė.** Išorinio orientavimo ir tolimesniuose fotografinės medžiagos apdorojimo ir analizės etapuose išskirti trys atvejai:

1. absoliutus orientavimas atliktas įtraukiant visus *GPS* prietaisu pamatuotus atramos taškus (kontrolinis);
2. absoliutus orientavimas atliktas, įtraukiant minimalų reikalingų orientavimui taškų skaičių (du modelio kairėje, vienas centre ir du dešinėje), jų koordinatės gautos *GPS* prietaisu;
3. absoliutus orientavimas atliktas įtraukiant optimalų atramos taškų skaičių (8 ir/ar 9), kurių koordinatės nustatytos ortofotografiniame žemėlapyje.

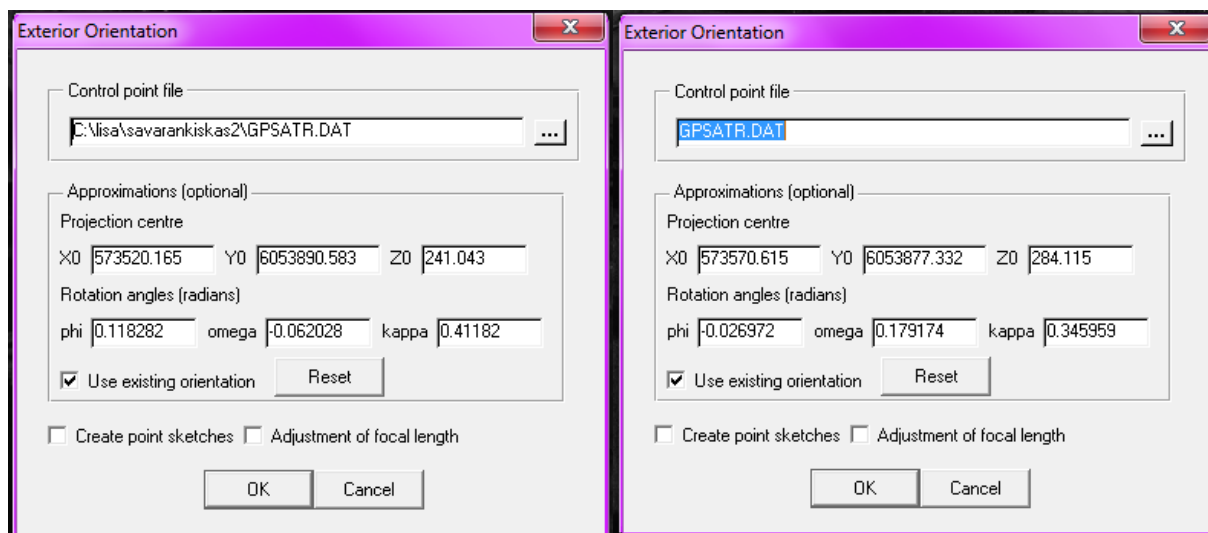
Absoliutusias orientavimas atliekamas kiekvienai aerofotonuotraiškai atskirai (kairiajai ir dešiniajai), naudojantis tuo pačiu atramos taškų katalogu. Kiekviename fotografiniame vaizde, priklausomai nuo atvejo, matuojami referenciniai (geodezinio pagrindo) taškai, pagal sudarytas schemas. Pamatavus kairiojoje fotonuotraukoje programa sukuria tikslias kontūrženklų pagal kurias galima lengviau surasti tuos pačius atramos taškus dešiniojoje fotonuotraukoje arba kartojant matavimus. Išmatavus pirmus keturis taškus programa automatiškai, pagal atramos taškų

koordinates, perkelia matavimo simbolį prie sekančio kontūrženklis, šiek tiek patikslinus atliekamas taško matavimas. Atlikus taško matavimą eilutės gale atsiranda raidė *M* arba *S*. *M* reiškia taško matavimus, jeigu matavimai atlikti netiksliai arba taško matavimai duoda dideles klaidas, tuomet jis ignoruojamas naudojant *DeActive* funkciją ir atsiranda raidė *S*. Absoliutusias orientavimas bus atliktas tiksliai, kai bendros taškų matavimo liekamosios paklaidos ir standartinio nuokrypio reikšmė yra mažesnės už pusę fotografinio vaizdo elemento dydžio.

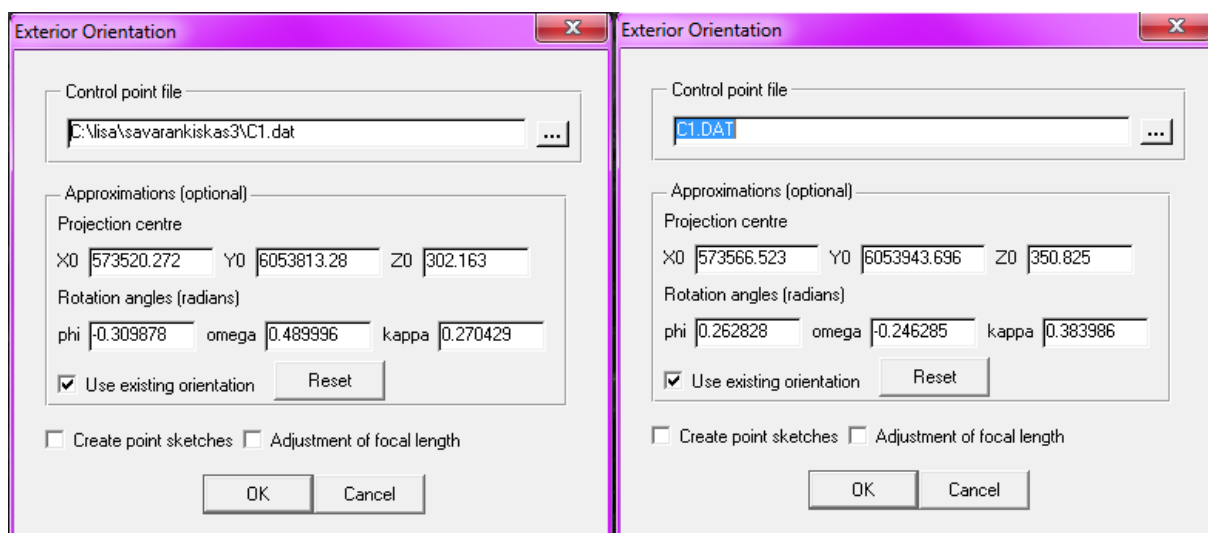
Šešių absoliučiojo orientavimo parametrų ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  – pagrindinio taško koordinatės geodezinėje koordinatinių sistemoje (m) ir  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  – posūkių apie ašis kampai (rad)) rezultatus programa išsaugo ABS formato faile. Visų trijų išorinio orientavimo atvejų parametrai pateikiami 4.16, 4.17, 4.18 pav. Kaip matyti iš pateiktų paveikslų kiekvienu atveju gaunamos skirtingos pagrindinio taško koordinatinių ir posūkių apie ašis reikšmės. Posūkio apie  $Z$  ašį reikšmės kinta mažiausiai.



**4.16 pav.** Kairiosios ir dešinėsios aerofotonuotrukų išorinio orientavimo parametrai, kai panaudotas 21 referencinis taškas (vietovėje koordinuoti GPS prietaisu)



**4.17 pav.** Kairiosios ir dešinėsios fotonuotraukos absoliučiojo orientavimo parametrai, gauti panaudojus 5 atramos taškus (vietovėje koordinuoti GPS prietaisu)

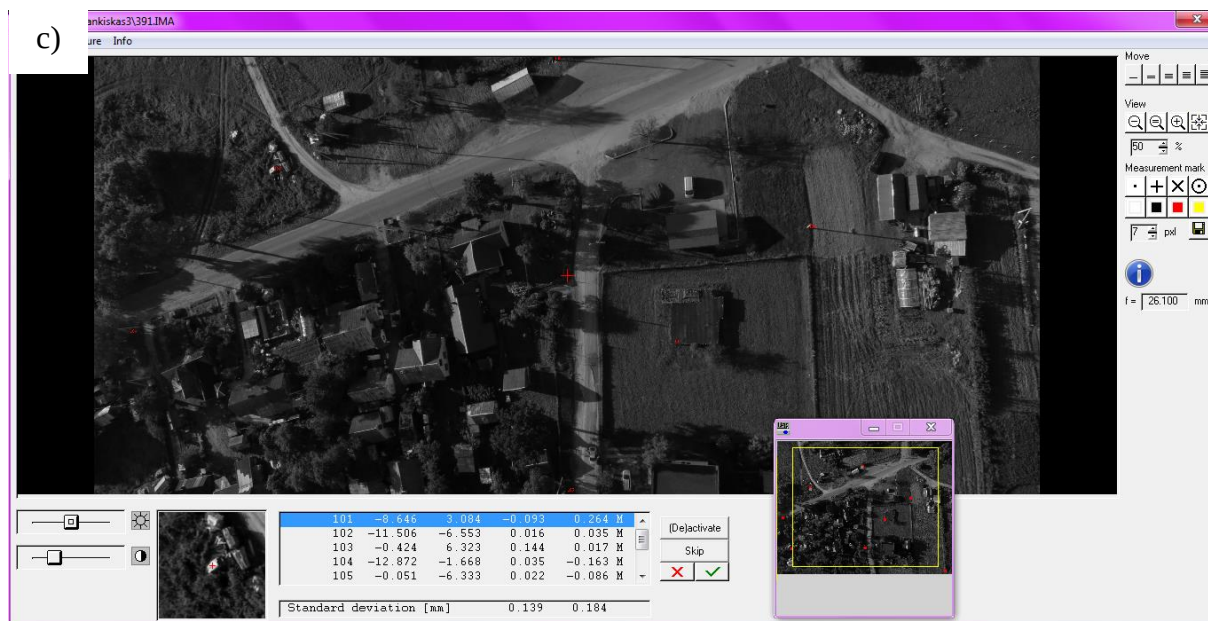


**4.18 pav.** Kairiosios ir dešinėsios aerofotonuotraukų išorinio orientavimo parametrai, kai atramos taškų erdvinė padėtis nustatyta iš ortofotografinio žemėlapis

Išorinio orientavimo metu nustatytos atramos taškų standartinio nuokrypio vidutinės kvadratinės paklaidos ( $\sigma$ ) kiekvienu tyrimo atveju. Pirmuoju atveju, kai panaudoti visi išmatuoti vietovėje referenciniai taškai geodeziniais metodais, kairiojoje aerofotonuotraukoje  $\sigma_x = 0.044$  mm,  $\sigma_y = 0.058$  mm (4.19 pav., a), o dešiniojoje  $\sigma_x = 0.024$  mm,  $\sigma_y = 0.023$  mm (4.20 pav., a). Antruoju atveju, kai registruotas minimalus atramos taškų skaičius paklaidos siekia  $\sigma_x = 0.021$  mm,  $\sigma_y = 0.026$  mm (4.19 pav., b) ir  $\sigma_x = 0.010$  mm,  $\sigma_y = 0.009$  mm (4.20 pav., b). Trečiuoju atveju, kai geodezinė atrama sudaryta pagal ortofotografinio žemėlapis duomenis  $\sigma_x = 0.136$  mm,  $\sigma_y = 0.178$  mm (4.19 pav., c), o dešiniojoje  $\sigma_x = 0.111$  mm,  $\sigma_y = 0.062$  mm (4.20 pav., c). Visi rezultatai gauti pirmu priartėjimu, be jokių korekcijų.

Trečiuoju atveju dešiniojoje fotonuotraukoje atšauktas 109 atramos taškas neįtrauktas į matavimus, dėl ženkliai iškreiptos standartinio nuokrypio vidutinės reikšmės y ašyje (4.21 pav., a, b).





4.19 pav. Kairiosios fotonuotraukos išorinio orientavimo rezultatai *LISA FOTO* aplinkoje: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje

a) tdvd - Notepad

| No. | x [mm]  | y [mm] | Res. x | Res. y   |
|-----|---------|--------|--------|----------|
| 1   | -10.398 | 6.738  | 0.013  | -0.013 M |
| 2   | -8.798  | 6.920  | -0.007 | -0.005 M |
| 3   | -5.898  | 7.974  | -0.006 | 0.028 M  |
| 4   | -4.077  | 6.257  | 0.006  | -0.016 M |
| 5   | -9.576  | 4.082  | 0.015  | -0.036 M |
| 6   | -11.786 | 3.152  | 0.022  | 0.045 M  |
| 12  | -8.821  | 1.480  | -0.065 | 0.043 M  |
| 13  | -9.956  | -6.667 | 0.038  | -0.011 M |
| 14  | -6.564  | -1.419 | -0.001 | 0.001 M  |
| 15  | -2.803  | 2.150  | 0.003  | 0.001 M  |
| 16  | -1.337  | -8.906 | 0.011  | -0.028 M |
| 17  | -1.079  | 3.499  | 0.009  | 0.002 M  |
| 18  | 0.512   | 4.876  | -0.014 | 0.006 M  |
| 19  | 2.377   | 2.748  | -0.029 | -0.015 M |

Standard deviation [mm] 0.024 0.023

b) tdvd5 - Notepad

| No. | x [mm]  | y [mm] | Res. x | Res. y   |
|-----|---------|--------|--------|----------|
| 1   | -10.406 | 6.759  | 0.000  | 0.008 M  |
| 4   | -4.075  | 6.254  | 0.007  | -0.015 M |
| 13  | -9.956  | -6.660 | 0.010  | -0.004 M |
| 14  | -6.567  | -1.417 | -0.019 | 0.004 M  |
| 19  | 2.382   | 2.773  | 0.002  | 0.007 M  |

Standard deviation [mm] 0.010 0.009

c) Notepad

| No.                     | x [mm]  | y [mm] | Res. x | Res. y   |
|-------------------------|---------|--------|--------|----------|
| 103                     | -10.431 | 6.771  | 0.148  | 0.011 M  |
| 105                     | -9.975  | -6.680 | 0.067  | -0.102 M |
| 106                     | -2.835  | 2.179  | -0.117 | 0.040 M  |
| 107                     | -6.555  | -1.398 | -0.145 | 0.081 M  |
| 108                     | 2.822   | -7.980 | 0.034  | -0.012 M |
| Standard deviation [mm] |         |        | 0.111  | 0.061    |

**4.20 pav.** Dešiniosios fotonuotraukos išorinio orientavimo rezultatai *LISA FOTO* aplinkoje: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje

| a)                      | No. | x [mm] | y [mm] | Res. x | Res. y |   |
|-------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|---|
|                         | 105 | -9.975 | -6.680 | -0.038 | -0.185 | M |
|                         | 106 | -2.835 | 2.179  | -0.197 | -0.453 | M |
|                         | 107 | -6.555 | -1.398 | 0.033  | 0.161  | M |
|                         | 108 | 2.822  | -7.980 | -0.053 | 0.113  | M |
|                         | 109 | 3.108  | 3.272  | 0.095  | 0.230  | M |
| Standard deviation [mm] |     | 0.116  |        | 0.242  |        |   |

| b)                      | No. | x [mm] | y [mm] | Res. x | Res. y |   |
|-------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|---|
|                         | 105 | -9.975 | -6.680 | 0.067  | -0.102 | M |
|                         | 106 | -2.835 | 2.179  | -0.117 | 0.040  | M |
|                         | 107 | -6.555 | -1.398 | -0.145 | 0.081  | M |
|                         | 108 | 2.822  | -7.980 | 0.034  | -0.012 | M |
|                         | 109 | 3.108  | 3.272  | 0.095  | 0.230  | S |
| Standard deviation [mm] |     | 0.111  |        | 0.061  |        |   |

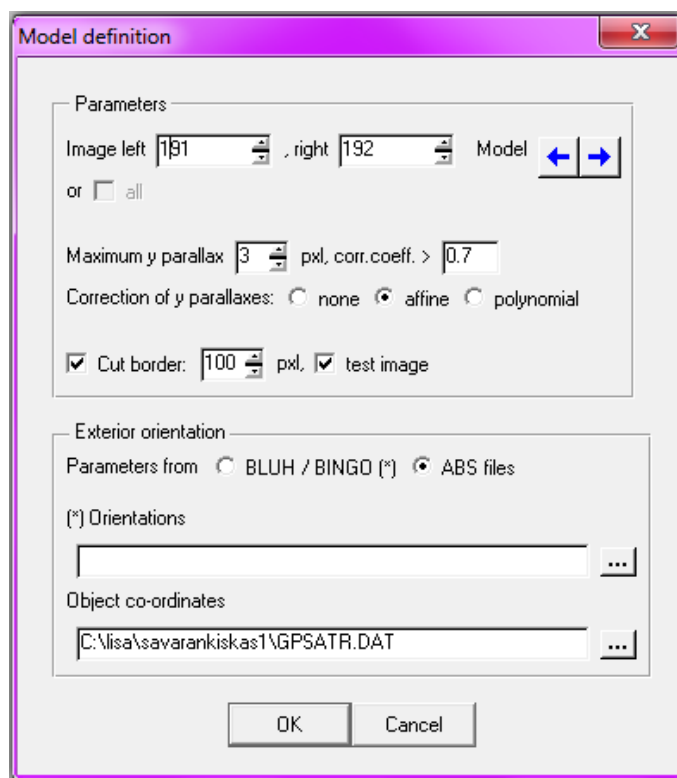
**4.21 pav.** Kairiosios fotonuotraukos orientavimo rezultatai, kai išmatuotas (109) taškas (a) ir taškas eliminuotas (b)

Po vidinio ir išorinio orientavimo etapų sukuriama trys nauji modelių aprašymai pagal kurių parametrus atliekami stereoskopiniai matavimai, vaizdų sugretinimas ir ortofotografinio žemėlapijo kūrimas.

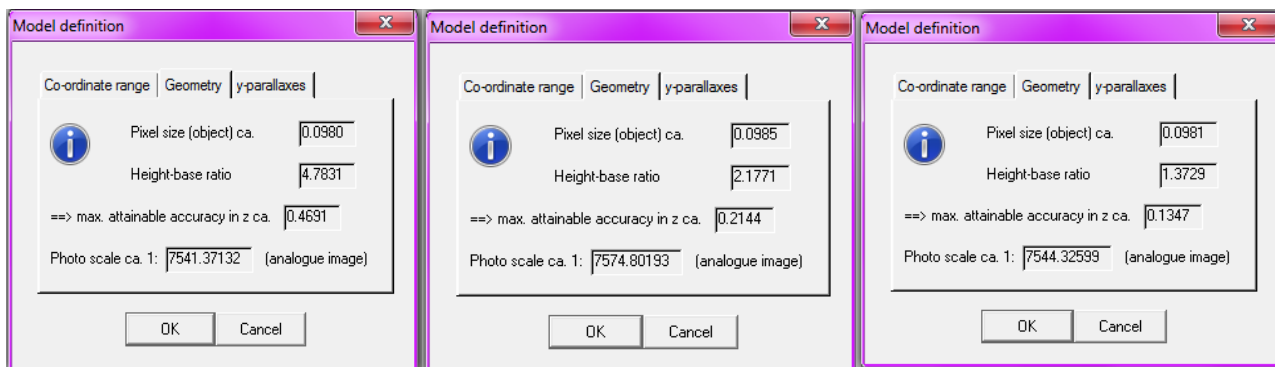
Stereoskopinio modelio kūrimo metu yra apibrėžiamos jo ribos, naikinamas skersinis paralaksas. Fotonuotraukų stereopora orientuojama – sukuriamas stereomodelis su automatiškai apibrėžiamomis modelio ribomis (persidengimo plotu). Ryšys tarp skrydžio aukščio ir fotografavimo bazės siejamas su fotonuotraukos masteliu ir koordinatinių nustatymo tikslumu, nustačius atstumus tarp taškų vietovės koordinatinių sistemoje ir skaitmeninio vaizdo sistemoje, surandamas fotonuotraukos mastelis. Galima nedidelė paralakso paklaida (iki 5 gardelių) dėl skenavimo, vaizdo geometrinės skiriamosios gebos, vidinio, išorinio orientavimo paklaidų.

Modelio parametrų aprašyme nurodomi fotografinių vaizdų numeriai (91–92 191–192 ir 291–292), skersinio paralakso didžiausia reikšmė (3 gardelės) ir jo pataisos metodas (afininis), koreliacijos koeficientas ( $>0.7$ ), išorinio orientavimo parametrų (ABS) bei referencinių taškų (GPSATR.DAT, C1.DAT) failai. Visais trimis atvejais nekintantys parametrai ir parinkty nurodyti tokie patys kaip 4.22 pav.

4.23 pav. pateikta modelio apibrėžimo trijų atvejų parametrai. Pateikiama pikselio dydžio ant žemės paviršiaus reikšmė visais atvejais vienoda – 9.8 cm, daugiausiai skiriasi skrydžio aukščio ir fotografavimo santykis (4.78; 2.18; 1.37).

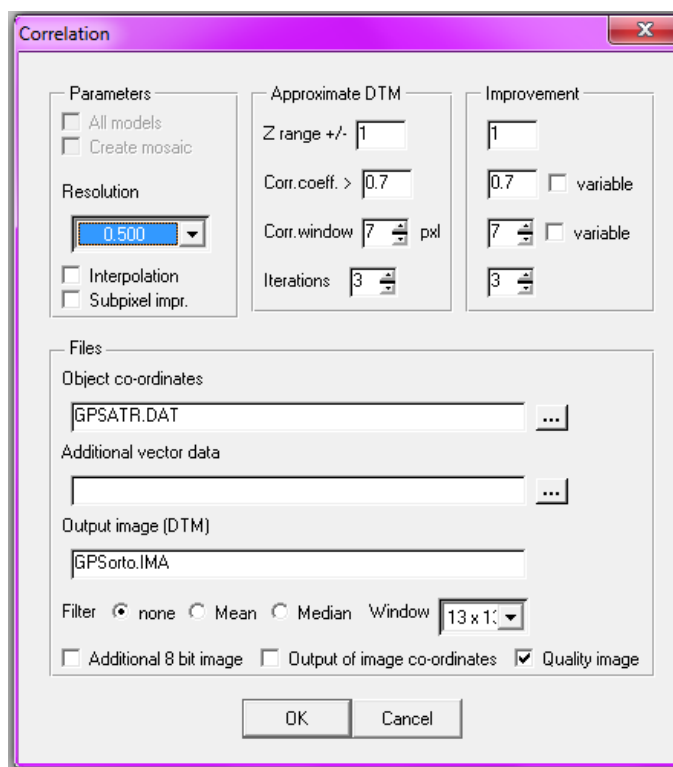


4.22 pav. Modelio sukūrimo parametrai



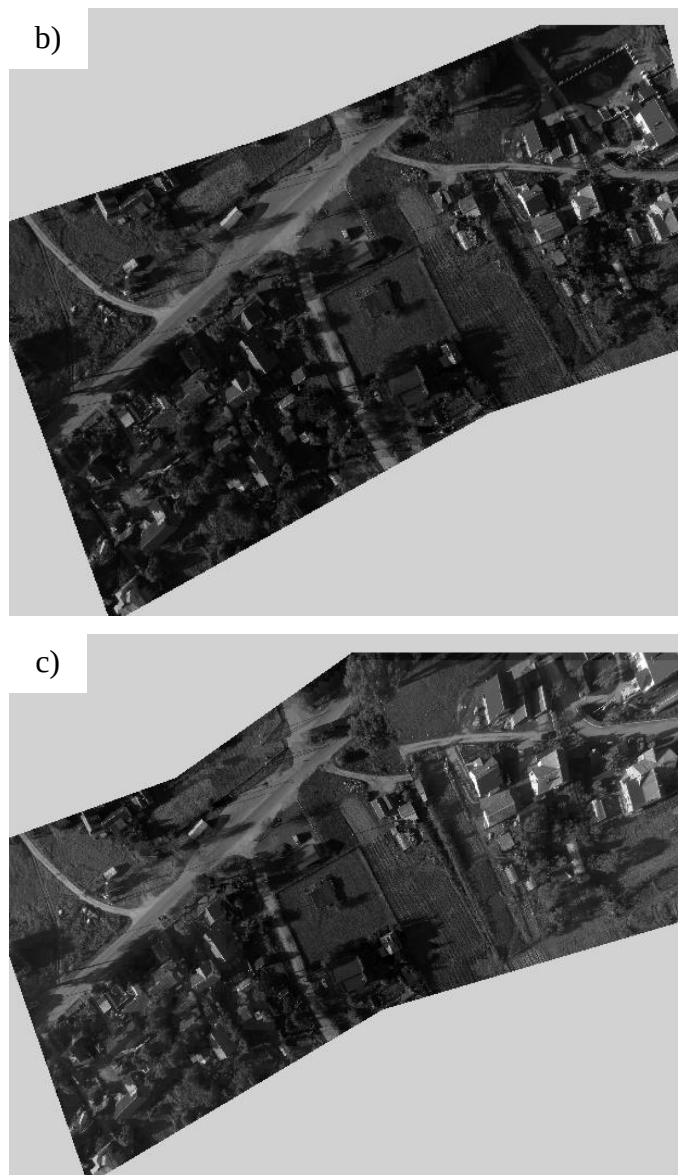
4.23 pav. Modelių geometrinės savybės tiriamaisiais atvejais

Programa automatiškai atlieka skaitmeninių vaizdų sugretinimą, randamas geriausias ieškomojo (atpažįstamojo) objekto atitikmuo dviejuose arba keliuose fotografiniuose vaizduose pagal nurodytus parametrus: aukščių reikšmių diapazonas, koreliacijos koeficientas, koreliacijos langas, iteracijų skaičius ir kt. (4.24 pav.). Galiausiai sukuriamas skaitmeninis paviršiaus modelis ir ortofotografinė nuotrauka (4.25 pav.).



4.24 pav. Vaizdų koreliacijos parametrų nustatymo langas





**4.25 pav.** Ortofotografinės nuotraukos: a) su 21 referenciniu tašku; b) su 5 taškais; c) su 8 taškais nustatytais ortofotografiniame žemėlapyje

#### 4.4. Aerofotografinių vaizdų apdorojimas fotogrametrine programa *Pix4D*



Fotografiniai vaizdai apdoroti specializuota aerokartografavimo metu gautų fotografinių duomenų apdorojimui skirta programine sistema *Pix4D*. Projektas *Pix4D* startavo 2011 m. Šveicarijoje, su valstybės ir verslo įmonių pagalba. Programinė įranga yra licencijuota, todėl teko prašyti gamintojų leidimo ir aktyvacijos kodo pilnavertiškai sistemos veiklai, šio baigiamojo darbo tikslams pasiekti. Autoriai sutiko duoti dviejų savaičių trukmės aktyvacijos raktą.

Aerofotografinių skaitmeninių vaizdų apdorojimui skirtą programą sudaro dvi dalys: *Pix4Desktop* (neribotam duomenų apdorojimui kompiuteryje, itin reikli kompiuterio resursams) ir

*Pix4Cloud* (duomenų ir projektų valdymas internete, resursų poreikis neišskirtas). Sistema gali sukurti ortofotografinius žemėlapius, skaitmeninius paviršiaus modelius, *TIN* (*Triangulated Irregular Network*) modelius, taškų debesis, turi sąsają su *Google Map*. Pagrindinės gamintojo nurodomos programinės įrangos panaudojimo sritys, apdorojant fotografinius vaizdus yra šios:

- kalnakasyba;
- topografija;
- žemdirbystė;
- gamtinių išteklių valdymas;
- statyba;
- ekstremalių situacijų valdymas.

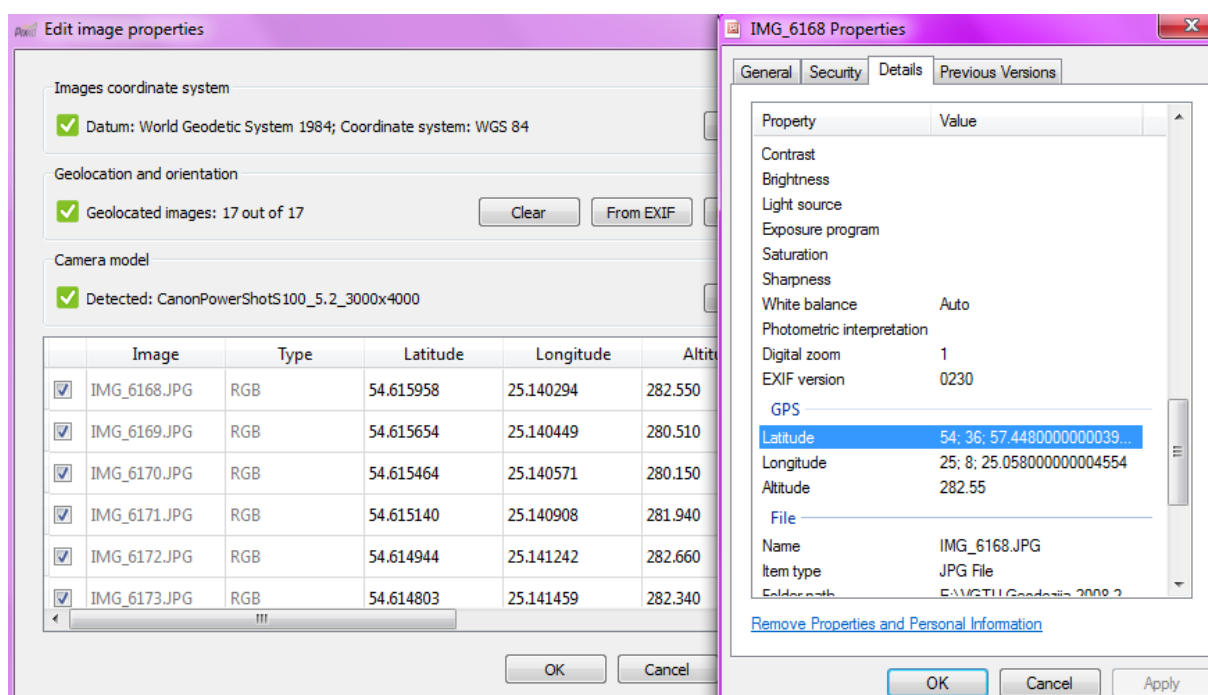
Šiuo atveju, tyrimui atlikti atrinkta 17 aerofotonuotraukų, kadangi programa funkcionuoja be jokių apribojimų galima atlikti pilnavertišką duomenų apdorojimą. Atrinktų skaitmeninių vaizdų galerija pavaizduota 4.26 pav. Gautų duomenų apdorojimas atliktas su *Pix4Desktop*. Pats procesas gana automatizuotas, tik referencinių taškų suradimas ir pažymėjimas fotonuotraukose reikalauja tyrėjo dėmesio.



**4.26 pav.** Apdorojimui *Pix4D* sistema atrinkti aerofografavimo metu gauti vaizdai

Su šia sistema buvo padaryti trys projektai su skirtingu atraminių taškų skaičiumi. Pirmuoju atveju (*0GCP*) fotografinių vaizdų apdorojimas atliktas pilnai automatizuotu būdu neįtraukiant geodezinio prietaisu išmatuotų atramos taškų. Antruoju atveju (*5GCP*) į duomenų apdorojimo procesą atraukti 5 atramos taškai, o trečiuoju atveju (*10GCP*), net 10 geodezinio pagrindo atramos taškų.

Kuriant naują projektą parenkami atraminių taškų bei fotografinių vaizdų katalogai, koordinacių sistema, galima keisti kameros parametrus. Fotonuotraukos turi būti išsaugotos *JPG* arba *TIFF* formatu. Parenkama *WGS-84* koordinacių sistema, nes fotokamera *Canon S100* turi integruotą *GPS* funkciją, todėl kiekvieno skaitmeninio fotografinio vaizdo savybių lange yra geodezinės fotonuotraukos centro koordinatės (4.27 pav.), pagal kurias programa orientuos vaizdus *Google Map* aplinkoje.



**4.27 pav.** Pagrindinis skaitmeninių vaizdų parametrų nustatymo langas (kairėje) ir fotonuotraukos informacija (dešinėje)

*Pix4Desktop* automatiškai suranda ir pateikia šiuos fotokameros parametrus (4.28 pav.): fotokameros tipą (*CanonPowerShotS100\_5.2\_3000x4000*), židinio nuotolį (5.46 mm), jutiklio plotį ir aukštį (7.44x5.58 mm), pagrindinio taško koordinatės (x, y) skaitmeninio vaizdo koordinacių sistemoje (3.75825x2.84203 mm), tangentinės (-0.001 ir -0.002) bei radialinės (-0.041, -0.004 bei 0.018) distorsijų koeficientus (-0.001; -0.002).

Detected camera model

Current EXIF: CanonPowerShotS100\_5.2\_3000x4000

Current camera model: CanonPowerShotS100\_5.2\_3000x4000 Edit New

Camera model

Reset Estimate from EXIF Save Cancel

Warning: wrong parameters can cause failure in the reconstruction. Please check the Help for more information.

Camera model name: CanonPowerShotS100\_5.2\_3000x4000

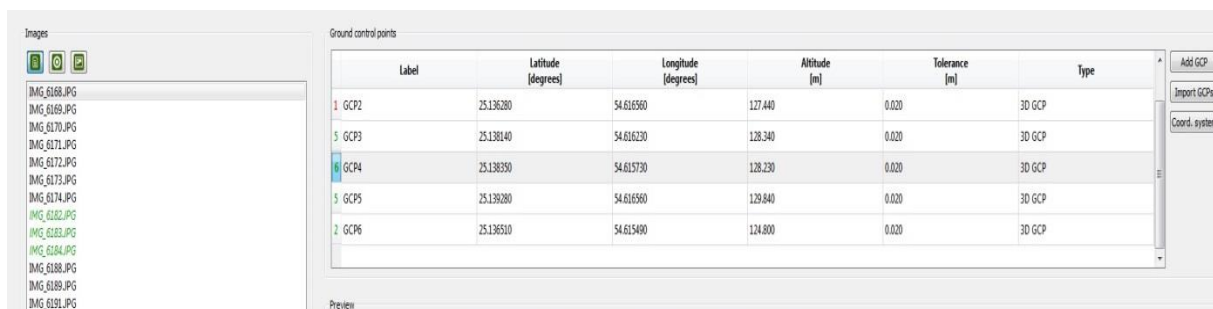
|                                                 |                                                          |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <input type="radio"/> Image width [pixel]: 4000 | <input checked="" type="radio"/> Sensor width [mm]: 7.44 |
| Image height [pixel]: 3000                      | Sensor height [mm]: 5.58                                 |
| Focal length [pixel]: 2937.94                   | Focal length [mm]: 5.46457                               |
| Principal point x [pixel]: 1979.43              | Principal point x [mm]: 3.75825                          |
| Principal point y [pixel]: 1472.03              | Principal point y [mm]: 2.84203                          |
| Radial distortion K1: -0.041                    | Tangential distortion T1: -0.001                         |
| Radial distortion K2: -0.004                    | Tangential distortion T2: -0.002                         |
| Radial distortion K3: 0.018                     |                                                          |

**4.28 pav.** Fotokameros parametrų nustatymo langas (pateikti programos)

Nustačius projekto parametrų savybes įkeliamas atramos taškų katalogas. Pasirenkama fotonuotrauka kurioje identifikuosime referencinius taškus, jie po vieną surandami ir koordinuojami (4.29 pav.). Programa pažymi kiek ir kurioje fotonuotraukoje identifikuota geodezinio pagrindo atramos taškų (4.30 pav.).

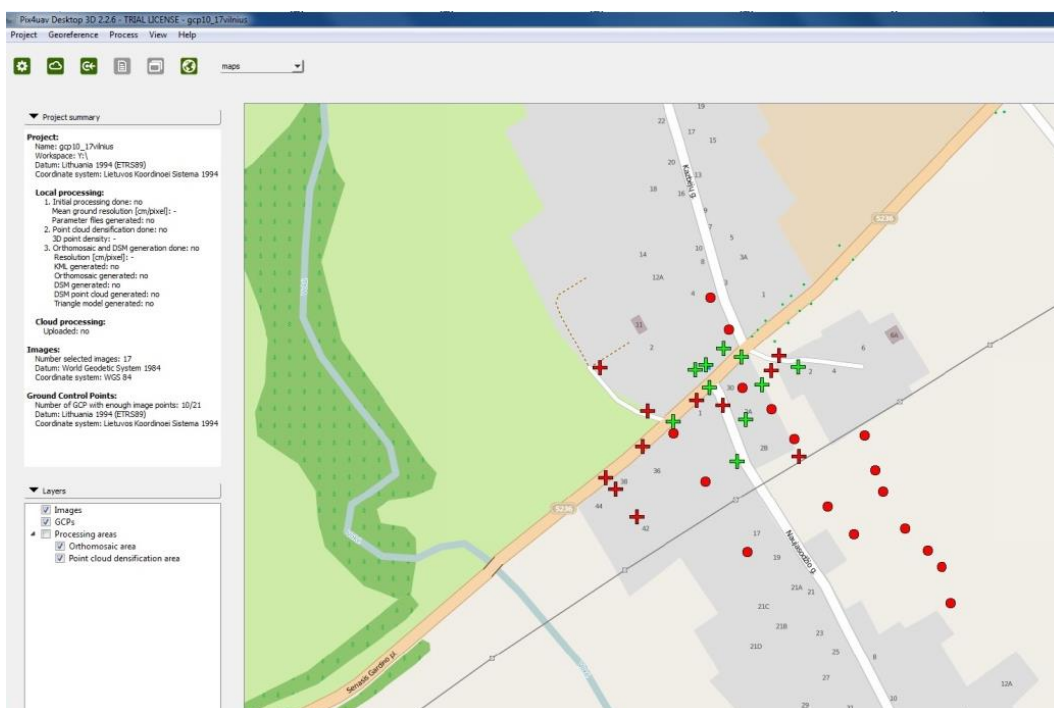


**4.29 pav.** Kontūrženklių indentifikavimo langas



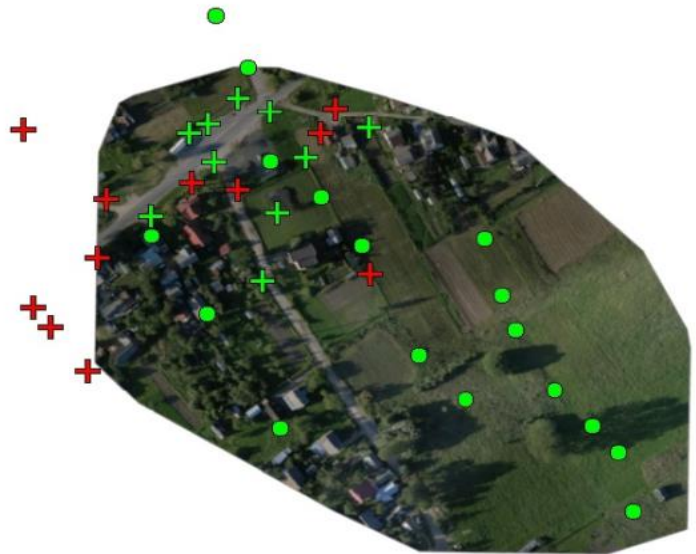
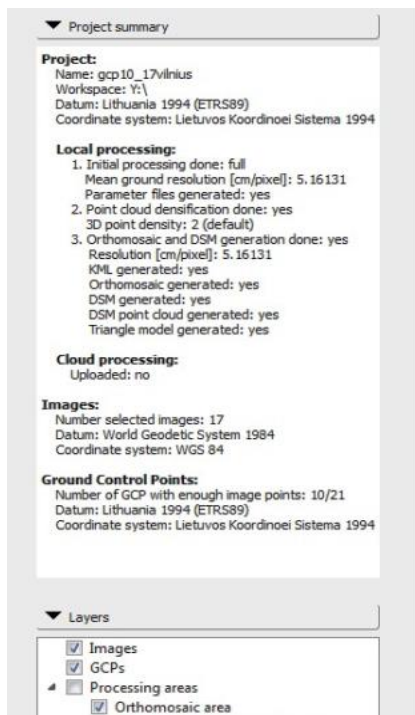
**4.30 pav.** Referencinių taškų suvestinė

*Pix4Desktop* pagal sukurtą aprašymą atlieka duomenų apdorojimą. 4.31 pav. raudoni skrituliukai – tai įkeltų aerofotonuotraukų centrai, raudono kryžiukai – nekoordinuoti fotonuotraukose referenciniai taškai, žali kryžiukai žymi koordinuotus geodezinio pagrindo atramos taškus skaitmeniniuose vaizduose.



**4.31 pav.** Programos langas su žemėlapyje užkeltais pradinių duomenų simboliais

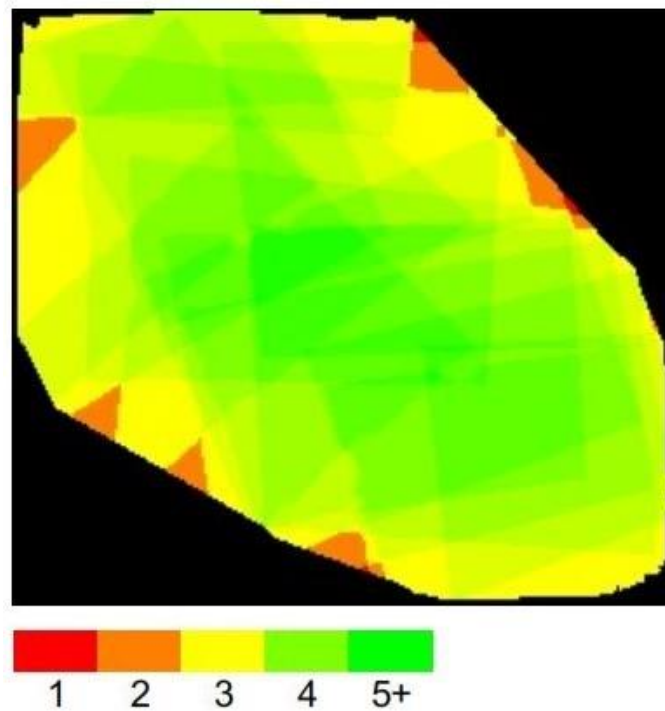
Baigus duomenų apdorojimo procesą ekrane pateikiami pagrindiniai duomenys ir ortofografinė nuotrauka. Pavyzdys pateiktas 4.32 pav.



**4.32 pav.** Fotografinių vaizdų informaciniai duomenys (kairėje) ir ortofografinė nuotrauka (dešinėje)

Darbinėje direktorijoje programa automatiškai sukuria kokybinę ataskaitą, kurioje saugo informaciją apie:

- projekto pradinius duomenis (projekto vardas, fotokameros tipas, pikselio dydis ant žemės paviršiaus, koordinacių sistema, atraminių taškų skaičius, fotonuotraukų kiekis ir kt.);
- orientavimo parametrus (kalibruotų fotonuotraukų kiekis, kameros padėties klaidos, padėties neatitikimo standartinis nuokrypis, skaitmeninių vaizdų persidengimo schema (4.33 pav.) ir kt.);
- duomenų rinkinio parametrai (fotokameros savybės, 2D ryšio taškų skaičius fotografiniuose vaizduose ir jų išsidėstymo schema, atraminių taškų nustatymo tikslumas (4.5 ir 4.6 lentelės) ir jų schemas aerofonuotrukose ir kt.)



**4.33 pav.** Aerofotografavimo metu gautų skaitmeninių vaizdų persidengimo zonos: raudonai – viengubas dengimas, geltonai – trigubas ir t.t.

**4.5 lentelė.** Atraminių taškų indentifikavimo aerofotonuotraukose rezultatai, kai panaudoti 5 geodezinio atramos pagrindo taškai

| Atramos taško ID       | Išvestinis nuokrypis, m | Paklaidos X, m | Paklaidos Y, m | Paklaidos H, m | Planinė paklaida, pxl | surasti/išmatuoti |
|------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| 3D GCP: 1              | 0.020                   | 0.148          | 0.054          | 0.156          | 0.764                 | 6 / 7             |
| 3D GCP: 13             | 0.020                   | 0.027          | 0.023          | 0.052          | 1.932                 | 5 / 8             |
| 3D GCP: 14             | 0.020                   | 0.259          | 0.217          | 1.244          | 0.724                 | 2 / 7             |
| 3D GCP: 15             | 0.020                   | 0.094          | 0.026          | 0.049          | 1.206                 | 7 / 8             |
| 3D GCP: 19             | 0.020                   | 0.129          | 0.122          | 0.236          | 2.184                 | 6 / 7             |
| Vidutinė reikšmė       |                         | 0.131          | 0.089          | 0.348          |                       |                   |
| Standartinis nuokrypis |                         | 0.076          | 0.074          | 0.454          |                       |                   |

**4.6 lentelė.** Atraminių taškų indentifikavimo aerofotonuotrukose rezultatai, kai panaudota 10 referencinių taškų

| Atramos taško ID       | Išvestinis nuokrypis, m | Paklaidos X, m | Paklaidos Y, m | Paklaidos H, m | Planinė paklaida, pxl | surasti/išmatuoti |
|------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| 3D GCP: 1              | 0.020                   | 0.015          | 0.033          | 0.075          | 1.174                 | 6 / 6             |
| 3D GCP: 2              | 0.020                   | 0.112          | 0.060          | 0.127          | 0.699                 | 5 / 7             |
| 3D GCP: 3              | 0.020                   | 0.147          | 0.195          | 0.144          | 0.964                 | 6 / 6             |
| 3D GCP: 4              | 0.020                   | 0.025          | 0.001          | 0.150          | 1.891                 | 5 / 5             |
| 3D GCP: 5              | 0.020                   | 0.081          | 0.104          | 0.012          | 0.876                 | 5 / 5             |
| 3D GCP: 7              | 0.020                   | 0.005          | 0.171          | 0.191          | 1.374                 | 2 / 3             |
| 3D GCP: 13             | 0.020                   | 0.014          | 0.085          | 0.078          | 1.974                 | 7 / 7             |
| 3D GCP: 14             | 0.020                   | 0.275          | 0.209          | 1.274          | 0.598                 | 2 / 6             |
| 3D GCP: 15             | 0.020                   | 0.156          | 0.008          | 0.151          | 1.508                 | 6 / 7             |
| 3D GCP: 19             | 0.020                   | 0.117          | 0.222          | 0.336          | 1.270                 | 5 / 5             |
| Vidutinė reikšmė       |                         | 0.095          | 0.109          | 0.254          |                       |                   |
| Standartinis nuokrypis |                         | 0.081          | 0.081          | 0.350          |                       |                   |

Iš lentelės pateiktų rezultatų matyti, kad matuojant didesnę referencinių taškų skaičių didėja planinių koordinatų standartinis nuokrypis, dėl galimų klaidų indentifikuojant taškus aerofotonuotrukose (4.34 pav.), tačiau vidutinė visų matavimų reikšmė mažėja. Aukščio paklaidos gautos mažesnės (0.454 m su 5 ir 0.350 m su 10 kontūrženkliais), kai atramos taškų skaičius panaudotas didesnis.



**4.34 pav.** Atramos taško indentifikavimas septyniose aerofotonuotrukose. Mėlynas apskritimas žymi matavimo plotą, žalias – 3D taško projekciją į vaizdus. Matavimai atlikti leistinos paklaidos ribose, kai žalias apskritimas yra mėlynojo viduje

## 5. SKAITMENINIŲ PAVIRŠIŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ

Atlikta skaitmeninių paviršių sukurtų, naudojant skirtingas fotogrametrines programas bei metodus, palyginimas ir analizė. Mėgėjiška fotokamera ir bepiločiu skraidymo aparatu gautuose skaitmeniniuose vaizduose ir sukurtuose skaitmeniniuose paviršiuose ir ortofotografinėse nuotraukose atlikti gerai matomų natūralių objektų erdviųjų koordinačių matavimai fotogrametrinėmis programomis *LISA* ir *Pix4D*. Tų pačių taškų planinė padėtis ir aukščiai nustatyti geodeziniu prietaisu *Sokkia GSR2700*. Geodeziniu prietaisu taškų koordinatės nustatytos pakankamai tiksliai ( $\pm 4$  cm), atliekant analizę šių taškų matavimo paklaidos nepriimtose dėmesin. Taškų tikslumo tyrimo duomenys apdoroti kompiuterinėmis sistemomis.

### 5.1. *LISA* programine sistema fotogrametrinių matavimų ortofotografinėje medžiagoje rezultatai ir jų analizė

Sukūrus ortofotografinę nuotrauką, atliekamas 3D koordinačių matavimas fotogrametriniais metodais. Nuspręsta tikslų stereoskopinių matavimų neatlikti dėl didelių laiko sąnaudų. Parinktųjų fotografiniuose vaizduose taškų koordinatės nustatytos atlikus objektų/taškų vektorizavimą dvejose ortofotografinėse nuotraukose, sukurtose *LISA* programa, kai fotonuotraukos orientuotos pagal 5 atramos taškus (*LISA\*\**), kurių koordinatės nustatytos vietovėje su *GPS* ir pagal kontūrženklų koordinatės nustatytas iš ortofotografinio žemėlapis *LT 10 000* (*LISA\*\*\**). Gautieji rezultatai pateikti 5.1 – 5.2 lentelėse.

**5.1 lentelė.** Fotogrametrinių matavimų rezultatai ortofotografinėse nuotraukose

| Eil.<br>Nr. | Taško<br>ID | Taškų koordinatės nustatytos <i>LISA</i> (m) |           |          |  |                                   |           |          |
|-------------|-------------|----------------------------------------------|-----------|----------|--|-----------------------------------|-----------|----------|
|             |             | orientuota pagal <i>GPS</i>                  |           |          |  | orientuota pagal <i>LT 10 000</i> |           |          |
|             |             | <i>X</i>                                     | <i>Y</i>  | <i>H</i> |  | <i>X</i>                          | <i>Y</i>  | <i>H</i> |
| 1           | 2           | 6053934.25                                   | 573493.70 | 129.50   |  | 6053933.25                        | 573493.75 | 132.50   |
| 2           | 3           | 6053951.25                                   | 573510.75 | 128.70   |  | 6053948.75                        | 573511.25 | 131.70   |
| 3           | 5           | 6053910.75                                   | 573497.20 | 124.50   |  | 6053910.75                        | 573497.70 | 127.50   |
| 4           | 6           | 6053899.70                                   | 573484.70 | 125.30   |  | 6053899.25                        | 573485.25 | 128.30   |
| 5           | 7           | 6053876.25                                   | 573459.70 | 126.10   |  | 6053876.25                        | 573462.25 | 129.10   |
| 6           | 8           | 6053853.20                                   | 573435.75 | 126.90   |  | 6053851.75                        | 573436.20 | 129.90   |
| 7           | 10          | 6053885.75                                   | 573435.70 | 127.70   |  | 6053884.25                        | 573438.70 | 130.70   |
| 8           | 11          | 6053920.70                                   | 573393.75 | 128.50   |  | 6053916.25                        | 573400.20 | 131.50   |
| 9           | 12          | 6053896.75                                   | 573509.20 | 129.30   |  | 6053895.25                        | 573509.70 | 132.30   |
| 10          | 15          | 6053914.70                                   | 573551.20 | 125.10   |  | 6053915.75                        | 573549.25 | 128.10   |

| 5.1 lentelės pabaiga |    |            |           |        |  |            |           |        |
|----------------------|----|------------|-----------|--------|--|------------|-----------|--------|
| 11                   | 16 | 6053842.25 | 573586.25 | 128.90 |  | 6053843.25 | 573585.25 | 131.90 |
| 12                   | 17 | 6053929.20 | 573559.75 | 125.90 |  | 6053930.75 | 573557.70 | 128.90 |
| 13                   | 18 | 6053943.70 | 573571.75 | 130.90 |  | 6053945.25 | 573568.70 | 133.90 |
| 14                   | 20 | 6053808.75 | 573408.75 | 120.90 |  | 6053811.75 | 573411.75 | 123.90 |

**5.2 lentelė.** GPS metodu išmatuotų taškų erdvinės koordinatės (kontroliniai matavimai)

| Eil. Nr. | Taško ID | X, m       | Y, m      | H, m   |
|----------|----------|------------|-----------|--------|
| 1        | 2        | 6053932.35 | 573494.42 | 128.46 |
| 2        | 3        | 6053948.44 | 573511.02 | 127.99 |
| 3        | 5        | 6053909.89 | 573497.75 | 128.14 |
| 4        | 6        | 6053897.22 | 573486.05 | 127.61 |
| 5        | 7        | 6053876.21 | 573463.08 | 126.83 |
| 6        | 8        | 6053851.08 | 573433.45 | 125.64 |
| 7        | 10       | 6053886.19 | 573437.70 | 126.40 |
| 8        | 11       | 6053927.66 | 573390.53 | 127.44 |
| 9        | 12       | 6053893.30 | 573511.47 | 128.34 |
| 10       | 15       | 6053913.48 | 573549.65 | 128.76 |
| 11       | 16       | 6053843.76 | 573586.79 | 128.69 |
| 12       | 17       | 6053927.91 | 573557.97 | 128.83 |
| 13       | 18       | 6053942.57 | 573565.77 | 129.25 |
| 14       | 20       | 6053809.04 | 573407.64 | 124.80 |

Matavimo tikslumui įvertinti apskaičiuojamos taškų koordinatinių vidutinės kvadratinės paklaidos pagal formules:

$$m_X = \sqrt{\frac{\sum \Delta X^2}{n-1}}, \quad m_Y = \sqrt{\frac{\sum \Delta Y^2}{n-1}}, \quad m_H = \sqrt{\frac{\sum \Delta H^2}{n-1}}, \quad (5.1)$$

čia  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta H$  – koordinatinių nuokrypiai;  $n$  – išmatuotų taškų skaičius.

Apskaičiuojama planimetrinės padėties, taškų koordinatinių absoliučioji vidutinė kvadratinė paklaida:

$$m_{X,Y} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}. \quad (5.2)$$

Išmatuotų taškų koordinatinių nuokrypiai pateikti 5.3 lentelėje.

**5.3 lentelė.** Išmatuotų taškų koordinatinių nuokrypiai

| Eil. Nr. | Taško ID | <i>LISA** – GPS</i> |                |                |  | <i>LISA*** – GPS</i> |                |                |
|----------|----------|---------------------|----------------|----------------|--|----------------------|----------------|----------------|
|          |          | $\Delta X$ , m      | $\Delta Y$ , m | $\Delta H$ , m |  | $\Delta X$ , m       | $\Delta Y$ , m | $\Delta H$ , m |
| 1        | 2        | 1.90                | -0.72          | 1.04           |  | 0.90                 | -0.67          | 4.04           |
| 2        | 3        | 2.81                | -0.27          | 0.71           |  | 0.31                 | 0.23           | 3.71           |
| 3        | 5        | 0.86                | -0.55          | -3.64          |  | 0.86                 | -0.05          | -0.64          |
| 4        | 6        | 2.48                | -1.35          | -2.31          |  | 2.03                 | -0.80          | 0.69           |
| 5        | 7        | 0.04                | -3.38          | -0.73          |  | 0.04                 | -0.83          | 2.27           |
| 6        | 8        | 2.12                | 2.30           | 1.26           |  | 0.67                 | 2.75           | 4.26           |
| 7        | 10       | -0.44               | -2.00          | 1.30           |  | -1.94                | 1.00           | 4.30           |
| 8        | 11       | -6.96               | 3.22           | 1.06           |  | -11.41               | 9.67           | 4.06           |
| 9        | 12       | 3.45                | -2.27          | 0.96           |  | 1.95                 | -1.77          | 3.96           |
| 10       | 15       | 1.22                | 1.55           | -3.66          |  | 2.27                 | -0.40          | -0.66          |
| 11       | 16       | -1.51               | -0.54          | 0.21           |  | -0.51                | -1.54          | 3.21           |
| 12       | 17       | 1.29                | 1.78           | -2.93          |  | 2.84                 | -0.27          | 0.07           |
| 13       | 18       | 1.13                | 5.98           | 1.65           |  | 2.68                 | 2.93           | 4.65           |
| 14       | 20       | -0.29               | 1.11           | -3.90          |  | 2.71                 | 4.11           | -0.90          |

5.4 lentelėje pateikiamos apskaičiuotos išmatuotų taškų padėties fotografiniuose vaizduose vidutinės kvadratinės  $m_X$ ,  $m_Y$ ,  $m_H$  bei absoliučiosios  $m_{XY}$  koordinatinių paklaidos.

**5.4 lentelė.** Taškų koordinatinių ir altitudinių tikslumo analizės rezultatai

| Atvejis        | Vidutinės kvadratinės taškų padėties paklaidos, m |       |       |          |
|----------------|---------------------------------------------------|-------|-------|----------|
|                | $m_X$                                             | $m_Y$ | $m_H$ | $m_{XY}$ |
| <i>LISA**</i>  | 2.63                                              | 2.51  | 2.25  | 3.64     |
| <i>LISA***</i> | 3.64                                              | 3.22  | 3.26  | 4.86     |

Gautų rezultatų įvertinimui skaičiuojami standartiniai vidurkio nuokrypiai  $\sigma_{\bar{X}}$ ,  $\sigma_{\bar{Y}}$ ,  $\sigma_{\bar{H}}$  pagal formules (5.9 lentelė):

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta X - \Delta \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad \sigma_{\bar{Y}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta Y - \Delta \bar{Y})^2}{n(n-1)}}, \quad \sigma_{\bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta H - \Delta \bar{H})^2}{n(n-1)}}, \quad (5.3)$$

čia:  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta H$  – koordinatinių nuokrypiai;  $\Delta \bar{X}$ ,  $\Delta \bar{Y}$ ,  $\Delta \bar{H}$  – koordinatinių nuokrypių vidutinė reikšmė;  $n$  – išmatuotų taškų skaičius.

Apskaičiuotų koordinatinių tikslumo įverčiai pateikiami 5.9 lentelėje.

## 5.2. Pix4D programine sistema fotogrametrinių matavimų ortofotografinėje medžiagoje rezultatai ir jų analizė

Atlikus *Pix4D* programa duomenų fotogrametrinį apdorojimą, nustatytos pasirinktųjų taškų koordinatės ortofotografinėje medžiagoje. Globalinės padėties nustatymo sistema vietovėje išmatuotų taškų koordinačių reikšmės pateiktos 5.5 lentelėje, o tų pačių taškų koordinatės nustatytos ortofotografinėje medžiagoje fotogrametriniais metodais pateiktos 5.6 lentelėje.

5.7 lentelėje pateikiami apskaičiuoti nuokrypiai nuo geodeziniu prietaisu išmatuotų taškų kontrolinių matavimų.

Matavimų vidutinės kvadratinės paklaidos apskaičiuotos pagal (5.1) ir (5.2) formules pateikiamos 5.8 lentelėje.

Apskaičiuotų koordinačių tikslumo įverčiai pagal (5.3) formulę pateikiami 5.9 lentelėje.

**5.5 lentelė.** Taškų koordinatės išmatuotos geodeziniu prietaisu vietovėje

| Eil. Nr. | Taško ID | X, m      | Y, m       | H, m   |
|----------|----------|-----------|------------|--------|
| 1        | 1        | 573483.81 | 6053926.78 | 128.00 |
| 2        | 2        | 573494.42 | 6053932.35 | 128.46 |
| 3        | 3        | 573511.02 | 6053948.44 | 127.99 |
| 4        | 4        | 573529.05 | 6053940.42 | 128.80 |
| 5        | 5        | 573497.75 | 6053909.89 | 128.14 |
| 6        | 7        | 573463.08 | 6053876.21 | 126.83 |
| 7        | 13       | 573526.16 | 6053838.38 | 128.23 |
| 8        | 14       | 573534.03 | 6053879.40 | 128.37 |
| 9        | 15       | 573549.65 | 6053913.48 | 128.76 |
| 10       | 19       | 573584.69 | 6053931.71 | 129.84 |

**5.6 lentelė.** Ortofotografinėse nuotraukose išmatuotų taškų ervinės koordinatės, kai orientavimas atliktas trimis atvejais

| Orientavimas be kontrolinių taškų |    |           |            |        | Orientavimas su 5 kontroliniais taškais |           |            |        | Orientavimas su 10 kontrolinių taškų |           |            |        |
|-----------------------------------|----|-----------|------------|--------|-----------------------------------------|-----------|------------|--------|--------------------------------------|-----------|------------|--------|
| Nr.                               | ID | X, m      | Y, m       | H, m   |                                         | X, m      | Y, m       | H, m   |                                      | X, m      | Y, m       | H, m   |
| 1                                 | 1  | 573485.79 | 6053924.09 | 125.37 |                                         | 573483.74 | 6053926.82 | 127.97 |                                      | 573483.79 | 6053926.71 | 128.10 |
| 2                                 | 2  | 573496.30 | 6053929.34 | 127.05 |                                         | 573494.21 | 6053932.50 | 128.21 |                                      | 573494.32 | 6053932.40 | 128.32 |
| 3                                 | 3  | 573515.00 | 6053944.81 | 129.52 |                                         | 573510.73 | 6053948.73 | 127.90 |                                      | 573510.88 | 6053948.68 | 128.05 |
| 4                                 | 4  | 573530.74 | 6053946.03 | 131.40 |                                         | 573529.19 | 6053940.44 | 128.43 |                                      | 573529.17 | 6053940.36 | 128.56 |
| 5                                 | 5  | 573499.12 | 6053908.85 | 125.71 |                                         | 573497.79 | 6053909.83 | 127.90 |                                      | 573497.88 | 6053909.70 | 127.98 |
| 6                                 | 7  | 573464.25 | 6053877.95 | 118.70 |                                         | 573462.95 | 6053876.01 | 126.79 |                                      | 573462.95 | 6053876.09 | 126.71 |
| 7                                 | 13 | 573524.26 | 6053835.54 | 125.92 |                                         | 573526.50 | 6053838.33 | 129.68 |                                      | 573526.20 | 6053838.23 | 128.75 |
| 8                                 | 14 | 573529.08 | 6053877.91 | 131.80 |                                         | 573534.61 | 6053879.61 | 128.43 |                                      | 573534.45 | 6053879.76 | 128.61 |
| 9                                 | 15 | 573550.93 | 6053912.94 | 127.98 |                                         | 573550.27 | 6053913.53 | 128.33 |                                      | 573550.22 | 6053913.56 | 128.57 |
| 10                                | 19 | 573583.69 | 6053935.35 | 137.68 |                                         | 573584.66 | 6053931.58 | 130.08 |                                      | 573584.65 | 6053931.40 | 130.12 |

**5.7 lentelė.** Koordinacijų nuokrypiai tiriamaisiais atvejais

| Orientavimas be kontrolinių taškų |    |                |                |                | Orientavimas su 5 kontroliniais taškais |                |                |                | Orientavimas su 10 kontrolinių taškų |                |                |                |
|-----------------------------------|----|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Nr.                               | ID | $\Delta X$ , m | $\Delta Y$ , m | $\Delta H$ , m |                                         | $\Delta X$ , m | $\Delta Y$ , m | $\Delta H$ , m |                                      | $\Delta X$ , m | $\Delta Y$ , m | $\Delta H$ , m |
| 1                                 | 1  | 1.98           | -2.69          | -2.63          |                                         | -0.07          | 0.04           | -0.03          |                                      | -0.02          | -0.07          | 0.10           |
| 2                                 | 2  | 1.88           | -3.01          | -1.41          |                                         | -0.21          | 0.15           | -0.25          |                                      | -0.10          | 0.05           | -0.14          |
| 3                                 | 3  | 3.98           | -3.63          | 1.53           |                                         | -0.29          | 0.29           | -0.09          |                                      | -0.14          | 0.24           | 0.06           |
| 4                                 | 4  | 1.69           | 5.61           | 2.60           |                                         | 0.14           | 0.02           | -0.37          |                                      | 0.12           | -0.06          | -0.24          |
| 5                                 | 5  | 1.37           | -1.04          | -2.43          |                                         | 0.04           | -0.06          | -0.24          |                                      | 0.13           | -0.19          | -0.16          |
| 6                                 | 7  | 1.17           | 1.74           | -8.13          |                                         | -0.13          | -0.20          | -0.04          |                                      | -0.13          | -0.12          | -0.12          |
| 7                                 | 13 | -1.90          | -2.84          | -2.31          |                                         | 0.34           | -0.05          | 1.45           |                                      | 0.04           | -0.15          | 0.52           |
| 8                                 | 14 | -4.95          | -1.49          | 3.43           |                                         | 0.58           | 0.21           | 0.06           |                                      | 0.42           | 0.36           | 0.24           |
| 9                                 | 15 | 1.28           | -0.54          | -0.78          |                                         | 0.62           | 0.05           | -0.43          |                                      | 0.57           | 0.08           | -0.19          |
| 10                                | 19 | -1.00          | 3.64           | 7.84           |                                         | -0.03          | -0.13          | 0.24           |                                      | -0.04          | -0.31          | 0.28           |

**5.8 lentelė.** Taškų koordinacių vidutinės kvadratinės paklaidos

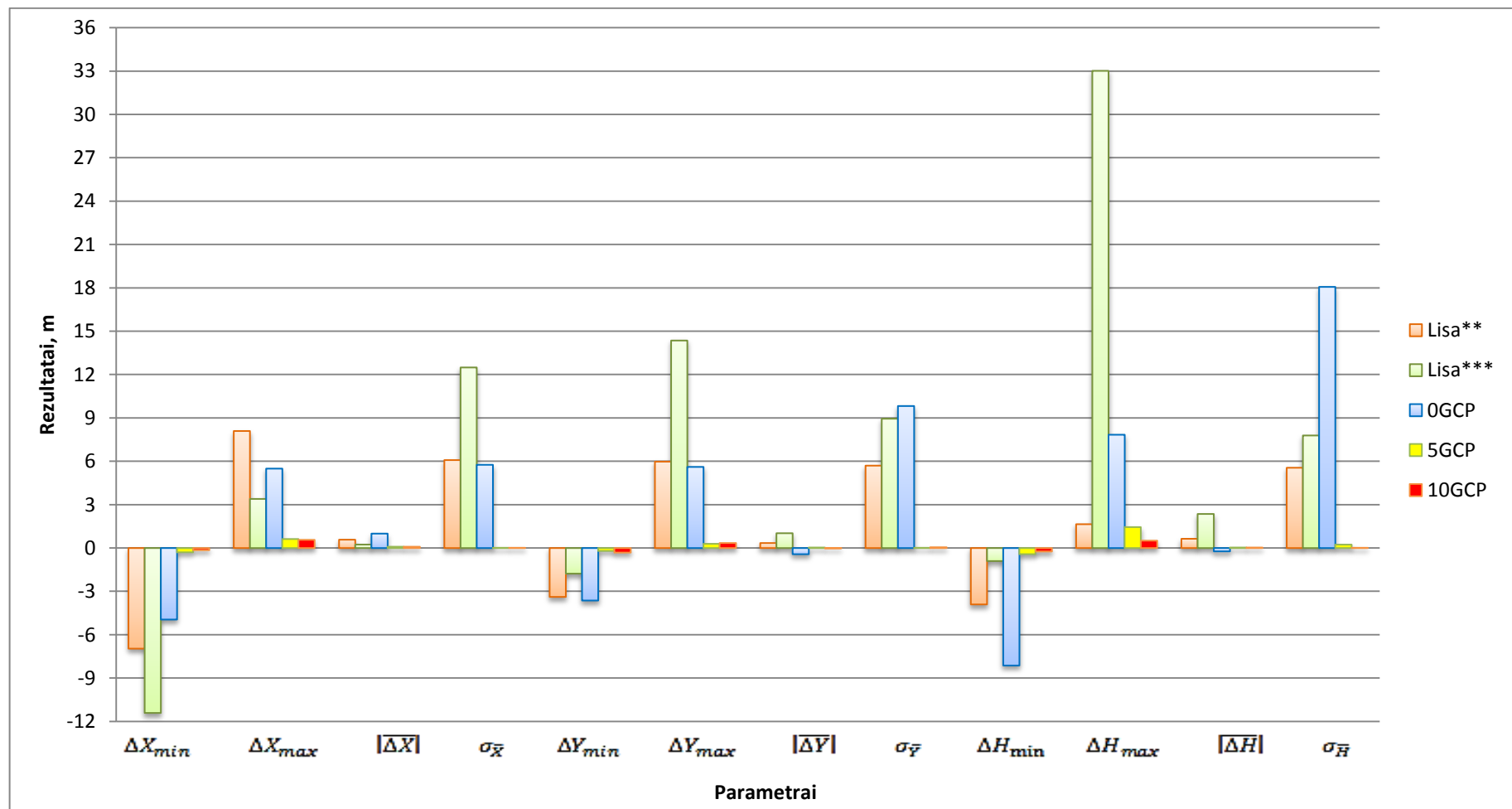
| Atvejis | Vidutinės kvadratinės kontūrų padėties paklaidos, m |       |       |          |
|---------|-----------------------------------------------------|-------|-------|----------|
|         | $m_X$                                               | $m_Y$ | $m_H$ | $m_{XY}$ |
| 0 GCP   | 2.59                                                | 3.14  | 4.34  | 4.07     |
| 5 GCP   | 0.34                                                | 0.16  | 0.54  | 0.37     |
| 10 GCP  | 0.25                                                | 0.20  | 0.25  | 0.33     |

### 5.3. Rezultatų suvestinė

5.9 lentelėje pateikiami fotogrametrinių matavimų suvestiniai duomenys: išmatuotų taškų tikslumo analizės rezultatai, nustatyti iš santykinai skirtingų pradinių duomenų, gautų skirtingomis fotogrametrinėmis darbo stotimis palyginus su gautais duomenimis geodeziniais matavimais. Gauta standartinio vidurkio nuokrypio reikšmė, kai duomenys apdoroti *LISA* sistema yra  $\sigma_{\bar{X}} = 6.09$  m,  $\sigma_{\bar{Y}} = 5.70$  m,  $\sigma_{\bar{H}} = 5.56$  m (*LISA\*\**),  $\sigma_{\bar{X}} = 12.50$  m,  $\sigma_{\bar{Y}} = 8.95$  m,  $\sigma_{\bar{H}} = 7.79$  m (*LISA\*\*\**), kai duomenys apdoroti *Pix4D* programine įranga, tuomet  $\sigma_{\bar{X}} = 6.09$  m,  $\sigma_{\bar{Y}} = 9.38$  m,  $\sigma_{\bar{H}} = 18.07$  m (*0GCP*),  $\sigma_{\bar{X}} = 0.00$  m,  $\sigma_{\bar{Y}} = 0.01$  m,  $\sigma_{\bar{H}} = 0.24$  m (*5GCP*),  $\sigma_{\bar{X}} = 0.03$  m,  $\sigma_{\bar{Y}} = 0.06$  m,  $\sigma_{\bar{H}} = 0.02$  m (*10GCP*). Rezultatai grafiškai atvaizduoti 5.1 pav.

**5.9 lentelė.** Išmatuotų taškų erdvinį koordinacių tikslumo tyrimo rezultatai (m)

|                         | <i>Lisa</i>   |                |  | <i>Pix4D</i> |             |              |
|-------------------------|---------------|----------------|--|--------------|-------------|--------------|
|                         | <i>Lisa**</i> | <i>Lisa***</i> |  | <i>0GCP</i>  | <i>5GCP</i> | <i>10GCP</i> |
| $\Delta X_{min}$        | -6.96         | -11.41         |  | -4.95        | -0.29       | -0.14        |
| $\Delta X_{max}$        | 8.1           | 3.40           |  | 5.50         | 0.62        | 0.57         |
| $ \overline{\Delta X} $ | 0.58          | 0.24           |  | 1.00         | 0.10        | 0.08         |
| $\sigma_{\bar{X}}$      | 6.09          | 12.50          |  | 5.76         | 0.00        | 0.03         |
| $\Delta Y_{min}$        | -3.38         | -1.77          |  | -3.63        | -0.20       | -0.31        |
| $\Delta Y_{max}$        | 5.98          | 14.36          |  | 5.61         | 0.29        | 0.36         |
| $ \overline{\Delta Y} $ | 0.35          | 1.03           |  | -0.43        | 0.03        | -0.02        |
| $\sigma_{\bar{Y}}$      | 5.70          | 8.95           |  | 9.83         | 0.01        | 0.06         |
| $\Delta H_{min}$        | -3.9          | -0.90          |  | -8.13        | -0.43       | -0.24        |
| $\Delta H_{max}$        | 1.65          | 33.02          |  | 7.84         | 1.45        | 0.52         |
| $ \overline{\Delta H} $ | 0.64          | 2.36           |  | -0.23        | 0.03        | 0.03         |
| $\sigma_{\bar{H}}$      | 5.56          | 7.79           |  | 18.07        | 0.24        | 0.02         |



5.1 pav. Išmatuotų taškų tikslumo tyrimo rezultatų palyginamasis grafikas

Iš 5.1 pav. matyti, kad didžiausius tirtų parametrų paklaidas, o ypač aukščių nuokrypius, turi *LISA\*\*\** atvejis, kai atramos taškų koordinatės nustatytos iš ortofotografinio žemėlapiu 1 m tikslumu. *LISA* modulių atliktų duomenų apdorojimo rezultatai, tiek vienu, tiek kitu atveju, nenusileidžia tik *Pix4D* programa apdorotų duomenų rezultatams, kai aerofotonuotraukų vidinis orientavimas atliktas be geodezinio pagrindo taškų.

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Remiantis magistriniame darbe atliktais teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais gautos šios apibendrintos išvados:

1. Skaitmeninėmis fotokameromis, įmontuotomis bepiločiuose orlaiviuose (*BO*) galima aerofotografuoti nedideles ar neprieinamas teritorijas, įranga yra palyginus nebrangi, duomenys gaunami greitai, o fotogrametriniai metodai suteikia galimybę gauti kartografinę produkciją. *BO* įrangos autopilotas garantuoja teisingą skrydžio trajektoriją ir reguliuoja fotoaparato ekspozicijos momentus. Skrydžio metu nustatomos kiekvieno fotografinio vaizdo projekcijos centro koordinatės. Skaitmeninės fotogrametrijos metodų taikymas *BO* vaizdams apdoroti sparčiai auga. Aerokartografavimas *BO* sistemomis puikiai tinka naudoti įvairiose srityse: gaisrų monitoringas, stichinių nelaimių padarytų nuostolių vertinimas, elektros tinklų būklės stebėjimas, įvairaus mastelio žemėlapių sudarymas, žemės ūkio augalų būklės stebėjimas, miškų ūkio medienos apskaitos sekimas ir kt.
2. Nustatyta, kad netradiciniais aerofotografavimo maršrutais skraidantis *BO* sukaupė pakankamą kiekį kokybiškų fotonuotraukų, tinkamų fotogrametriniam apdorojimui.
3. Išanalizavus skaitmeninių fotokamerų techninius duomenis bei jų taikymą fotogrametriniams uždaviniams spręsti, nustatyta, kad mėgėjiškomis fotokameromis, kurių skiriamoji geba 10-15 Mpx, gauti fotografiniai vaizdai iš 150 m aukštyje skriejančio bepiločio orlaivio, tenkina fotogrametrinio apdorojimo vaizdų kokybės reikalavimus.
4. Atlikus vietovės aerofotografavimą, atrinkti kokybiškiausi fotografiniai vaizdai ir jiems apdoroti naudotos dvi programinės sistemos (*LISA* ir *PIX4D*). Su fotogrametrine sistema *LISA* fotografinių vaizdų išorinio orientavimo gauti šie rezultatai: standartinio nuokrypio įverčiai (fotonuotrukose) kairiojoje aerofotonuotrukose  $\sigma_x = 0.044$  mm,  $\sigma_y = 0.058$  mm, o dešiniojoje  $\sigma_x = 0.024$  mm,  $\sigma_y = 0.023$  mm, kai išmatuoti visi (21-as) atramos taškai. Tuo atveju, kai išoriniam orientavimui naudotas minimalus atramos taškų skaičius (5-ki), paklaidos siekia  $\sigma_x = 0.021$  mm,  $\sigma_y = 0.026$  mm kairiojoje ir  $\sigma_x = 0.010$  mm,  $\sigma_y = 0.009$  mm dešiniojoje fotonuotrukose; kai geodezinė atrama sudaryta pagal ortofotografinio žemėlapiu duomenis –  $\sigma_x = 0.136$  mm,  $\sigma_y = 0.178$  mm kairiojoje, o dešiniojoje aerofotonuotrukose atitinkamai  $\sigma_x = 0.111$  mm,  $\sigma_y = 0.062$  mm. Tiksliausi išorinio orientavimo rezultatai gauti, kai geodezinio pagrindo taškai vietovėje koordinuoti su *GPS*, o jų kiekis pasirinktas minimalus, t.y. penki.
5. Nustatyta, kad naudojant profesionalų aerokartografavimui skirtą programinę paketą *Pix4D*, aerofotonuotraukų orientavimo pagal 5 referencinius taškus tenkina tikslumo reikalavimus.

6. Tiksliausiai aukščiai nustatyti modelyje, kuris orientuotas pagal 10 referencinių taškų –  $m_H = 0.25$  m.
7. Apskaičiuota, kad naudojant atramos taškų koordinačių tinklą, fotogrametriniais metodais išmatuotos taškų koordinačių absoliučiosios paklaidos  $m_{XY}$  gaunamos ženkliai mažesnės. Paklaida net 12 kartų mažesnė tuo atveju, kai panaudota 10 referencinių taškų, lyginant su atveju, kai tokie taškai apskritai nenaudoti.
8. Atlikus palyginamąją tikslumo analizę nustatyta, kad tiksliausi fotogrametrinių matavimų fotonuotraukose rezultatai gauti šiuolaikiška programine sistema *Pix4D* ir panaudojus 10 atramos taškų koordinuotų vietovėje geodeziniu prietaisu.
9. Fotogrametrinė programinė įranga *LISA* yra puiki programinė sistema, skirta skaitmeninės fotogrametrijos uždaviniams spręsti. Tačiau, kai kurie apribojimai (vaizdo dydis, apdorojami tik nespaltoti vaizdai) įtakoja fotografinių vaizdų apdorojimo rezultatus. Fotografiniai vaizdai, gautieji fotografuojant su *BO* sistema yra ženkliai pasvirę, todėl tokiems fotografiniams vaizdams apdoroti reikėtų naudoti specialią (profesionalią) programinę įrangą. Rekomenduotina *BO* fotografinius vaizdus efektyviai ir greitai apdoroti šiuolaikine specializuota programine sistema *Pix4D*.
10. Nustatyta tiesioginė priklausomybė tarp aerokartografavimo su bepiločių orlaivių sistemomis galutinių produktų tikslumo ir proceso autonomiškumo.
11. Fotogrametriškai apdorotieji fotografiniai vaizdai, gautieji iš paukščio skrydžio (150–300 m aukščio), fotografuojant eksperimentinę vietovę fotokamera *Canon S100* iš bepiločio skraidomojo aparato (*BO*) *EPP-FPV* modelio, teikia žemės paviršiaus kartografinius duomenis, kurie atitinka teritorijų erdvinių modelių bei ortofotografinės produkcijos kūrimo reikalavimus.
12. Nustatyta, kad aerokartografavimas *BO* sistemomis puikiai tinka naudoti srityse, kuriose nesiekiamas aukštas tikslumas, pvz.: gaisrų monitoringas, stichinių nelaimių padarytų nuostolių vertinimas, elektros tinklų būklės stebėjimas, smulkesnio mastelio žemėlapių sudarinėjimas, žemės ūkio augalų būklės stebėjimas, miškų ūkio medienos apskaitos sekimas ir kt.
13. Aukštos kokybės fotogrametriniams produktams gauti reikia:
  - Aerofotografuoti iš mažesnio skrydžio aukščio;
  - Parinkti mažesnę *BO* skrydžio greitį;
  - Naudoti tikslų/ moderniausią *GPS* imtuvą, integruotą *BO* sistemoje;
  - Suprojektuoti skrydžio maršrutus, taikant tradicinius planavimo metodus;
  - Naudoti didelės skiriamosios gebos fotokameras.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Abraham, S. 2004. Tcc – A software for Test field based on self-Calibration of multi-Camera-Systems. Institute für Photogrammetrie, Universität Bonn, 39 p.
2. Aerial Mapping. [cited 20 March 2014]. Available from Internet: <<http://www.blueskies.aero/mapping.html>>.
3. Aggarwal, J.K.; O.Duda, R.; Rosenfeld, A. 1977. Computer Methods in Image Analysis. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 466 p.
4. Arjomandi, M. Classification of Unmanned Aerial Vehicles [cited 20 March 2013]. Available from Internet: <http://personal.mecheng.adelaide.edu.au/maziar.arjomandi/Aeronautical%20Engineerin20Projects/2006/group9.pdf>.
5. CCD vs CMOS, fact and fiction. [cited 22 March 2014]. Available from Internet: <<http://oneslidephotography.com/ccd-vs-cmos-fact-and-fiction/ccd-vs-cmos-fact-and-fiction>>.
6. Civilinės aviacijos administracija. 2013. *Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės*. [žiūrėta 2014-02-01]. Prieiga per internetą: <[http://www.lrs.lt/pls/proj/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=175599&p\\_query=&p\\_tr2=&p\\_org=2488&p\\_fix=y](http://www.lrs.lt/pls/proj/dokpaieska.showdoc_l?p_id=175599&p_query=&p_tr2=&p_org=2488&p_fix=y)>.
7. Daniulis, J. 1998. Aerofotometodai. Aerofotonuotraukų dešifravimas. Vilnius: Enciklopedija. 247 p.
8. Dempsey, E. M. 2011. Eyes of the Army – U.S. Army Roadmap for Unmanned Aircraft Systems 2010–2035 United States Army. [cited 20 March 2013]. Available from Internet: <<http://www-rucker.army.mil/usaace/uas/US%20Army%20UAS%20RoadMap%202010%202035.pdf>>.
9. Dervinis D. 2012. Vaizdų apdorojimas. Kaunas: TEV. 106 p.
10. Eisenbeiss, H. 2009. UAV photogrammetry. Diss. ETH No.18515, *Institute of Geodesy and Photogrammetry*, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen Nr.105, 235 p.
11. Gonzalez R.; Woods R. 2007. Digital Image Processing. 3rd edition. Prentice Hall. 976 p.
12. Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F.; Trittler, M. 2011. Performance Test on UAV-Based Photogrammetric Data Collection in International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland: 7–12 p.
13. Haala, N.; Hastedt, H.; Wolf, K.; Ressler, C.; Baltrusch, S. 2010. Digital Photogrammetric Camera Evaluation – Generation of Digital Elevation Models, PFG 2/2010: 99–115 p.

14. Höhle, J. 2011. DEM Generation By Means Of New Digital Aerial Cameras, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland: 185–190 p.
15. Jefferies, D. 2012. Swinglet CAM. [cited 20 March 2014]. Available from Internet: <<http://tech.malaysia.msn.com/photoviewer.aspx?cp-documentid=6099789&page=2>>.
16. Kraus, K. 2007. *Photogrammetry*. Geometry from Image and Laser Scans. 2<sup>nd</sup> edition. Berlin: Walter de Gruyter. 459 p.
17. Küng, O.; Strecha, C.; Beyeler, A.; Zufferey, J-C.; Floreano, D.; Fua, P.; Gervais, F. 2011. The Accuracy Of Automatic Photogrammetric Techniques On Ultra-Light UAV Imagery, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume. XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland: 125–130 p.
18. Lietuvos Respublikos aviacijos įstatymas. 2000. [žiūrėta 2014-02-10]. Prieiga per internetą: <[http://vartotojuteises.lt/teises\\_aktai/lietuvos\\_respublikos\\_aviacijos\\_istatymas](http://vartotojuteises.lt/teises_aktai/lietuvos_respublikos_aviacijos_istatymas)>.
19. Lietuvos Respublikos ortofotografinis žemėlapis. [žiūrėta 2014-02-10]. Prieiga per internetą: <<http://www.maps.lt/map/>>.
20. Linder, W. 2006. *Digital Photogrammetry*. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Printed in The Netherlands.
21. LISA Geo Software. [cited 20 April 2014]. Available from Internet: <http://www.lisa-geosoftware.de/>
22. *Manual of Photogrammetry* (Edited by Cris McGlone). Fifth Edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, USA, 2004. 1151 p.
23. Malin, D.; Lihgt, D. 2014. [cited 20 April 2014]. Available from Internet: <http://encyclopedia.jrank.org/articles/pages/1109/Aerial-Photography.html>
24. Marzan, G. T.; Karara, H. M. 2003. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition, and some applications of it. *In Proc of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, 420–476 p.
25. Matavimo įranga. Nepilotuojamas eBee. [žiūrėta 2014.04.01]. Prieiga per internetą: <<http://www.hnit-baltic.lt>>.
26. Mikhail, E. M.; Bethel, J. S.; McGlone, J. C. 2001. *Modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons. 479 p.
27. Nilsson, H. F.; Grundberg, D. 2009. *Plane-Based Close Range Photogrammetric Reconstruction of Buildings* [cited 20 September 2012]. Available from Internet: <<http://www8.cs.umu.se/research/uminf/reports/2009/018/part1.pdf>>.
28. Paršeliūnas, E. 2001. Geoinformacinės sistemos: technologija. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 229 p.

29. Pérez, M.; Agüera, F.; Carvajal, F. 2013. Low Cost Surveying Using An Unmanned Aerial Vehicle, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W2, Rostock, Germany: 311–315 p.
30. Profesionali aerokartografavimo sistema Topcon SiriusPRO RTK. [žiūrėta 2014.04.20]. Prieiga per internetą: <<http://www.topcon.lt>>.
31. RGB spalvų modelis. [žiūrėta 2013-02-01]. Prieiga per internetą: <[http://aldona.mii.lt/pms/terminai/term/r/rz2m\\_spalvu1\\_modelis.html](http://aldona.mii.lt/pms/terminai/term/r/rz2m_spalvu1_modelis.html)>.
32. Rudinskas, D. 2011. Bepiločių orlaivių skrydžio parametrų matavimų duomenų perdavimo saugos metodikos sukūrimas. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius: Technika. 85 p.
33. Ruzgienė B. 2011. Fotogrametrija: ortofotografinė nuotrauka. Vilnius: Technika. 170 p.
34. Ruzgienė, B. 2010. Skaitmeninio reljefo modelio kurimo metodai ir tikslumo tyrimas, taikant skaitmenines fotogrametrijos technologija, *Geodezija ir Kartografija* [Geodesy and Cartography], 36:2, 57-62 p.
35. Ruzgienė, B. 2008. Fotogrametrija: vadovėlis. Vilnius: Technika. 203 p.
36. Sauerbier, M.; Siegrist, E.; Eisenbeiss, H.; Demir, N. 2011. The Practical Application Of UAV-Based Photogrammetry Under Economic Aspects, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland: 45–50 p.
37. Schenek, T. 1999. Digital Photogrammetry 1. Laurelville, OH: TerraScience USA. 428 p.
38. Schiffman, D.; Kaufmann, M. 2008. Learning Processing. [cited 16 May 2014]. ]. Available from Internet: <<http://www.processing.org/tutorials/color/>>.
39. Skaitmeninių fotoaparātų palyginimas. [žiūrėta 2013-03-01]. Prieiga per internetą: <<http://www.efoto.lt/fotoaparatai/palyginimas>>.
40. Sužiedelytė – Visockienė, J. 2007. Skaitmeninės matuojamosios fotokameros kalibravimo parametrų įtaka nuotraukos transformuojant į plokštumą. *Geodezija ir kartografija*, 33(1), 26–30 p. ISSN 1392–1541.
41. The perfect frame camera for large area mapping. [cited 16 March 2014]. ]. Available from Internet: <[http://www.ziimaging.com/en/zi-dmc-iiie-230\\_31.htm](http://www.ziimaging.com/en/zi-dmc-iiie-230_31.htm)>.
42. UAV Systems–Unmanned Aerial Photography. AUVSI. [cited 20 March 2013]. Available from Internet: <http://www.uavsystems.com.au/>
43. Vallentino 2010. Spalvų derinimo pagrindai. [žiūrėta 2013-09-01]. Prieiga per internetą: <<http://www.prodesign.lt/2010/11/25/spalvu-derinimo-pagrindai/>>.
44. Vallet, J.; Panissod, F.; Strecha, C.; Tracol, M. 2011. Photogrammetric Performance Of An Ultra Light Weight Swinglet “UAV”, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland: 253–258 p.

45. Watt, A.; Policarpo F. 1998. *The Computer Image*. Addison-Wesley Longman, Harlow. 784 p.
46. Watts, A. C.; Ambrosia, V. G.; Hinkey E. A. 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use, *Remote Sensing* 4(6): 1671-1692 p.

PRIEDAI

A Priedas. Straipsnis publikuotas moksliniame žurnale “*Geodesy and Cartography*”

B Priedas. Pranešimas tarptautinėje konferencijoje „Nuo kartografijos iki geografinės informacijos mokslo“

C Priedas. Pranešimas tarptautinėje konferencijoje “*Environmental Engineering*”

D Priedas. Pranešimas respublikinėje konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ „Civilinė inžinerija ir geodezija“

E Priedas. Aukščių profiliai sudaryti naudojant autopilotu registruotus duomenis

F Priedas. Atramos taškų parinktų interaktyviu būdu ortofotografiniame žemėlapyje išsidėstymo aerofotonuotraukose schemas