



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS

INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

Iveta Ulianskaitė

**FOTOGRAMETRIJOS METODŲ TAIKYMAS SKAITMENINIAMS
VAIZDAMS ANALIZUOTI IR 3D MODELAMS KURTI**

**APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR DIGITAL
IMAGE ANALYSIS AND 3D MODELING**

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų mokslo studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

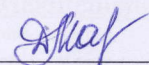
Inžinerinės ir kompiuterinės grafikos specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas



(Parašas)



(Vardas, pavardė)

2018-06-01

(Data)

Iveta Ulianskaitė

FOTOGRAMETRIJOS METODŲ TAIKYMAS SKAITMENINIAMS
VAIZDAMS ANALIZUOTI IR 3D MODELiams KURTI

APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR
DIGITAL IMAGE ANALYSIS AND 3D MODELING

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų mokslo studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

Inžinerinės ir kompiuterinės grafikos specializacija

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. Arvydas Rimkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2018-05-31

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

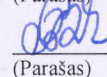
(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2018-05-21

(Data)

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Informacinių technologijų mokslo studijų programa, valstybinis kodas 621E14004

Inžinerinės ir kompiuterinės grafikos specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Daiva Makutėnienė

(Vardas, pavardė)

2018-05-08

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2018-05-08 Nr. 6

Vilnius

Studentui (ei) Ivetai Ulianskaitei.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: FOTOGRAMETRIJOS METODŲ TAIKYMAS SKAITMENINIAMS
VAIZDAMS ANALIZUOTI IR 3D MODELiams KURTI

patvirtinta 2018 m. gegužės 8 d. dekanų potvarkiu Nr. 199fm

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2018 m. birželio 6 d.

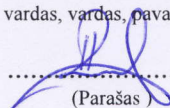
BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išanalizuoti nuotolinio matavimo sistemų taikymo galimybes, apžvelgti fotogrametrijos metodus bei jų privalumus ir trūkumus. Praktiniais bandymais parinkti tinkamiausius fotogrametrinius metodus bei jų taikymo būdus erdviniams modeliams kurti ir jų paviršiams analizuoti. Taikant parinktus fotogrametrinius metodus sukurti aukšto tikslumo erdvinį modelį ir atlikti skaitmeniniuose vaizduose užfiksuoto objekto paviršių deformacijų analizę. Įvertinti parinktų fotogrametrijos metodų tikslumą.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas


(Parašas)

.....dr. Arvydas Rimkus.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau


(Parašas)

.....Iveta Ulianskaitė.....
(Vardas, pavardė)

2018-05-08

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Fundamentinių mokslų fakultetas
Inžinerinės grafikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Informacinių technologijų** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Fotogrametrijos metodų taikymas skaitmeniniams vaizdams analizuoti ir 3D modeliams kurti**

Autorius **Iveta Ulianskaitė**

Vadovas **Arvydas Rimkus**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami skaitmeniniai vaizdai, kurie yra apdorojami keliais fotogrametriniais metodais. Pirmasis yra skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas, o antrasis aerotrianguliacijos metodas. Baigiamajame darbe buvo apžvelgti analogiški fotogrametrijos metodų panaudojimo būdai tiek užsienio šalyse, tiek Lietuvoje. Pateikta metodinė dalis, kurią sudaro dvi tiriamosios dalys. Pirmojoje dalyje atlikta paviršių deformacijos analizė pritaikius skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą. Antrojoje dalyje – pritaikius aerotrianguliacijos metodą sukurtas 3D modelis ir įvertintas jo tikslumas. Atsižvelgiant į surinktą informaciją ir gautus rezultatus pateikiamos baigiamojo darbo išvados.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, nuotolinių matavimų sistemos, fotogrametrinių metodų taikymas paviršių analizei ir erdvinių modelių kūrimui, fotogrametrinių metodų patikimumo analizė dalis, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 73 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 9 lent., 41 bibliografiniai šaltiniai

Prasminiai žodžiai: skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas, DIC, aerotrianguliacija, fotogrametrija, skaitmeniniai vaizdai, fotonuotraukos, fotovaizdai, aerofotogrametrija, 3D modeliavimas

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Fundamental Sciences
Department of Engineering Graphics

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Information Technologies** study programme Master Graduation Thesis 4

Title **Application of Photogrammetric Techniques for Digital Image Analysis and 3D Modeling**

Author **Iveta Ulianskaitė**

Academic supervisor **Arvydas Rimkus**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

This master thesis presents the information about the digital images, how these images could be modified to solve some problems or even to create 3D models. In this paper, digital images have been used for analysis in two ways. First method is digital image correlation and second - aerotriangulation.

Final master thesis describes other studies, which were conducted on similar methods of photogrammetry in Lithuanian and other countries. Also, suggestions on how these methods could be used for digital image analysis and 3D modeling were presented. Furthermore, two types of experiments that are associated with the science of photogrammetry were done. In the first, the cracks of the surface of construction from the digital images by using digital image correlation method were analysed. In the second, 3D model from photos by using aerotriangulation was generated. Moreover, the accuracy of the 3D model was estimated as well.

In the end, depending on the collected information and given results, conclusions of the final master thesis were made.

Structure: introduction, analysis of scientific sources, methodological analysis, summary of the results, conclusions and references.

Thesis consist of: 73 p. text without appendixes, 35 pictures, 9 tables, 41 bibliographical entries.

Keywords: digital image correlation, DIC, aerotriangulation, photogrammetry, digital image, aerophotogrammetry, 3D modeling

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Iveta Ulianskaitė, 20123582

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Fundamentinių mokslų fakultetas

(Fakultetas)

Informacinės technologijos, IKGfm-16

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

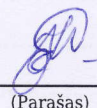
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2018 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Fotogrametrijos metodų taikymas skaitmeniniams vaizdams analizuoti ir 3D modeliams kurti“ patvirtintas 2018 m. gegužės 08 d. dekanų potvarkiu Nr. 199fm, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė. Mano darbo vadovas dr. Arvydas Rimkus.

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



(Parašas)

Iveta Ulianskaitė
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

ĮVADAS	12
1. NUOTOLINIO MATAVIMO SISTEMOS	14
1.1. Nuotolinio matavimo sistemų raida	14
1.2. Nuotolinio matavimo sistemų tipai	16
1.2.1. Antžeminė sistema	16
1.2.2. Avia sistema	17
1.2.3. Lazerinio skenavimo sistema	19
1.3. Fotogrametrijos metodai	20
1.3.1. Skaitmeninių vaizdų koreliacija	20
1.3.2. Aerotrianguliacija	24
1.4. Nuotolinio matavimo sistemų taikymas	28
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas	32
2. FOTOGRAMETRINIŲ METODŲ TAIKYMAS PAVIRŠIŲ ANALIZEI IR ERDVINIŲ MODELIŲ KŪRIMUI	34
2.1. Duomenų rinkimo ir apdorojimo etapuose naudoti įrenginiai ir jų specifikacija	34
2.1.1. Duomenų rinkimo būdai	34
2.1.2. Tyrimui naudoti įrenginiai ir programinė įranga	35
2.1.3. Tyrimo metodika	36
2.2. Paviršiaus deformacijų nustatymas taikant skaitmeninių vaizdų koreliaciją	38
2.2.1. Plokštuminės koreliacijos duomenų rinkimas ir analizavimo procesas	40
2.2.2. Erdvinės koreliacijos duomenų rinkimas ir analizavimo procesas	46
2.3. Erdvinio modelio kūrimas taikant aerotrianguliacijos metodą	48
2.4. Antrojo skyriaus išvados	54
3. FOTOGRAMETRINIŲ METODŲ PATIKIMUMO ANALIZĖ	56
3.1. Etaloniniai duomenys	56
3.2. Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodo patikimumas	58
3.2.1. Plokštuminės koreliacijos metodu gauti rezultatai	59
3.2.2. Erdvinės koreliacijos metodu gauti rezultatai	61
3.2.3. Apibendrinti statybinės konstrukcijos paviršiaus deformacijų tyrimo rezultatai	61
3.3. Aerotrianguliacijos metodo patikimumas	64
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	66
BENDROSIOS IŠVADOS	68
LITERATŪROS SĄRAŠAS	70

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. DIC sistemoms naudojamos fotokameros: a) metrinė, b) įprasta skaitmeninė (nemetrinė), c) stereometrinė	22
2 pav. Fotografinio vaizdo iškreipimas dėl objektyvo distorsijos: a) neiškreipto vaizdo schema, b) būgninė, c) pagalvinė, d) kombinuota distorsija	24
3 pav. Svarbiausios aerovaizdo geometrinės savybės: S – objektyvo centras, oo' ($2f$) – dvigubas fotokameros židinio atstumas, So – pagrindinis spindulys arba kameros ašis	25
4 pav. Aerotrianguliacijoje naudojamos koordinatinių sistemos: a) Gauso stačiakampė koordinatinių sistema, b) laisvai pasirenkama koordinatinių sistema	26
5 pav. Aerofotonuotraukos orientavimo elementai	27
6 pav. Fotogrametrijos technologijos taikymas medicinoje.....	29
7 pav. Povandeninio archeologinio radinio 3D modelis (Kaufmana <i>et al.</i> 2015).....	30
8 pav. Atlikti fotogrametriniai 3D modelio sudarymo bandymai: a) atviroje aplinkoje, b) uždaroje dirbtinėje aplinkoje, kai sukuriamos sienos.....	30
9 pav. Dekoratyviniai elementai iš Užutrakio dvaro.....	31
10 pav. Anglijos Alnwick'o pilies 3D modelis iš taškų debesies	32
11 pav. Tiriamojo darbo metodinės dalies iliustravimas	38
12 pav. Plyšio pločio matavimas optini mikroskopu	39
13 pav. Armuotojo betoninio bloko tempimo bandymas fiksuojant elemento paviršiaus deformacijas poslinkių matuokliais	39
14 pav. Aptikti pririšimo taškai fotonuotraukose.....	42
15 pav. Kontrolinių taškų skaičius fotonuotraukose laiko atžvilgiu	42
16 pav. Dvimatės fotonuotraukos kalibravimas.....	43
17 pav. Ekstensometro funkcijos veikimo schema ir formulė	44
18 pav. Ekstensometru matuotas armuotojo betoninio bloko paviršiuje atsivėrusios siūlės tarpas..	45
19 pav. Ekstensometru matuotų duomenų deformacijos pokyčių diagrama nuo apkrovos	45
20 pav. Armuotojo betoninio bloko prizmių tempimo bandymas fiksuojant elemento paviršiaus deformacijas bei pleišėjimą greitaeigėmis vaizdo kameromis	46
21 pav. <i>LaVision</i> sistemoje naudojama kalibravimo lenta (modelis – 309-15-SSDP)	47
22 pav. „ <i>Stain Gauge</i> “ funkcijos rezultatų diagrama.....	48
23 pav. 3D modelio kūrimo proceso schema	50
24 pav. Fotonuotraukų grupavimas pagal fotokameros židinio nuotolį.....	52
25 pav. Fotonuotraukoje aptikti pagrindiniai taškai.....	52
26 pav. 3D fotomodelis su tekstūros žemėlapiu ir trianguliacijos (TIN) tinklu	53
27 pav. LVDT sistemos užfiksuotų duomenų pokyčių diagrama	58

28 pav. Bandinio Nr. P1-4x10-C40 plyšinėji schema.....	59
29 pav. 2D skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautos plyšių schemos	59
30 pav. Plokštuminių vaizdų analizavimas	60
31 pav. 3D skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautos pleišėjimo schemos	61
32 pav. Analoginių tyrimo rezultatų diagramos, kuriose yra vertinamas 3D–DIC metodo tikslumas (Gribniak <i>et al.</i> 2017)	62
33 pav. Trejais metodais matuotų duomenų palyginimas	63
34 pav. Vilniaus senosios observatorijos pastato 3D modelis	64
35 pav. GNSS Trimble Geo 7x imtuvas ir Context Capture programoje matuojami ilgiai.....	66

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. 2D–DIC ir 3D–DIC sistemų funkcionalumo palyginimas	23
2 lentelė. Bandyje naudotų fotonuotraukų vidiniai parametrai	41
3 lentelė. Stereometrinių kamerų kalibravimo rezultatai	48
4 lentelė. <i>Zenmuse X3</i> fotokameros pritvirtintos prie drono vidiniai parametrai.....	51
5 lentelė. Plyšių matavimas optiniu mikroskopu	56
6 lentelė. LVDT sistemos fiksuojami rodmenys.....	57
7 lentelė. Optiniu mikroskopų matuotų plyšių rezultatų palyginimas su GOM programa matuotais plyšių rezultatais	63
8 lentelė. Vilniaus senosios observatorijos pastato 3D fotomodelio tikslumo vertinimas.....	65
9 lentelė. 3D fotomodelio matmenų palyginimas su realaus statinio matmenimis ir tikslumo įvertinimas	66

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

2D – dvimatis vaizdas, kuris turi tik dvi x ir y koordinatas

3D – trimatis vaizdas, kuris turi erdvinę koordinačių sistemą (x, y, z koordinatas)

BIM (angl. k. *Building Information Modeling*) – Informacinis Pastato Modeliavimas

DB – duomenų bazė

DIC (angl. k. *Digital image correlation system*) – skaitmeninių vaizdų koreliacijos sistema

dpi (angl. k. *dots per inch*) – taškų skaičius viename colyje

DSM (angl. k. *digital surface models*) – skaitmeninis paviršiaus modelis

GNSS (angl. k. *Global Navigation Satellite System*) – vietos nustatymo sistema, kuri priima duomenis iš visų pasaulio palydovų

GOM – trumpinys *GOM Correlate* programos

LiDAR (angl. k. *Light Detection and Ranging*) – vietovės skenavimo lazeriu iš orlaivio technologija

LVDT (angl. k. *Linear Variable Displacement Transducers*) – skaitmeninis poslinkių matuoklis

POS – padėties nustatymo ir orientavimo duomenų analizė

px – nuotraukos/vaizdo sudedamasis elementas – pikselis

RMS (angl. k. *root – mean – square*) – vidutinės nuokrypos technologija

SSDP – kalibravimo lentos modelis

TIN – netaisyklingų trikampių tinklinis modelis

UML (angl. k. *Unified Modeling Language*) – unifikuota modeliavimo kalba

WGS-84 (angl. k. *World Geodetic System 1984*) – globalinė geocentrinė koordinačių sistema, išleista 1984 metais

IVADAS

Fotogrametrija – mokslas apie žemėlapių ir įvairių 3D fotomodelių sudarymo metodus, naudojant fotovaizdus. Tai sudėtingas, visiškai automatizuotas procesas, kuris nereikalauja didelių ir labai brangių technologinių išteklių ir lėšų norint pasiekti aukšto tikslumo rezultatų.

Fotogrametrija naudojama daugelyje mokslo ir technikos sričių, pvz., archeologai fotogrametriją naudoja įvairių radinių dokumentacijoje, medicinos darbuotojai – protezavime, o inžinieriai pastatų modeliavime ir t.t. Kiekvienoje mokslo srityje yra pritaikoma vis kitoks fotogrametrijos metodas. Automatizavus visų metodų algoritmus, analizuoti fotovaizdus tapo paprasčiau ir lengviau. Tačiau norint pritaikyti tinkamą fotogrametrijos metodą skaitmeniniams vaizdams analizuoti ar 3D modeliui sukurti, būtina žinoti metodų taikymo principus.

Šiuo metu rinkoje yra didžiulė paklausa įvairių mokamų ir nemokamų programinių sistemų, kurios yra paremtos skirtingais fotogrametriniais metodais. Dauguma metodų reikalauja nemažai technologinių žinių ir laiko juos įsisavinant, todėl šiuo magistriniu darbu siekiama atlikti skaitmeninių vaizdų analizę ir sukurti 3D modelį taikant du skirtingus fotogrametrijos metodus: skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą ir fotovaizdų aerotrianguliacijos metodą.

Darbo tikslas

Taikant fotogrametrinius metodus sukurti aukšto tikslumo erdvinį modelį ir atlikti skaitmeniniuose vaizduose užfiksuoto objekto paviršių deformacijų analizę.

Darbo uždaviniai

- 1) Surinkti ir išanalizuoti mokslinėje literatūroje pateiktą informaciją apie fotogrametrijos metodų taikymą skaitmeniniams vaizdams analizuoti ir erdviniams modeliams kurti.
- 2) Atlikti laboratorinį bandymą, kurio metu fotokameromis fiksuojamos pasirinkto objekto paviršiaus deformacijos.
- 3) Atlikti pasirinkto objekto fotografavimą bepilote skraidykle.
- 4) Išanalizuoti bandymų metu gautus fotovaizdus, pritaikius atitinkamą fotogrametrijos metodą.
- 5) Įvertinti nagrinėtų fotogrametrijos metodų tikslumą.

Tyrimo aktualumas ir naujumas

Šiomis skaitmeninės informacijos eros dienomis, žmogui įvairią informaciją priimti yra žymiai paprasčiau, kai ji pateikta vizualiai gražia forma, todėl pastarąjį dešimtmetį ši informacija

yra pateikiama įvairiomis piktogramomis, histogramomis, paprasčiausiais paveikslėliais ir kt. Grafine forma pateikta informacija yra greičiau suprantama ir lengviau įsisavinama.

Tobulėjant technologijoms, atsiradus lazeriniam skenavimui, pradėti kurti erdviniai modeliai naudojant nuskanuotų taškų koordinates, tačiau ši lazerinė technologija kol kas yra itin brangi bei reikalauja didelių kompiuterinės sistemos resursų. Kadangi informacijos vizualizacijos poreikis yra labai didelis, pradėta taikyti pigesnė technologija erdviniams modeliams kurti. Fotogrametrija, kaip paprastesnė alternatyva lazeriniam skenavimui, 3D modelių kūrimui naudoja visiems lengvai prieinamus dvimačius vaizdus. Paprastai šis procesas reikalauja daugiau laiko ir rankinio darbo lyginant su 3D modelio kūrimu naudojant tiesioginį skenavimą. Naudojant fotogrametriją kyla grėsmė prarasti dalį informacijos, todėl inžinieriai nenustoja kurti naujesnes ir tobulesnes programines įrangas, kurios leistų kuo tiksliau įvertinti ir analizuoti fotonuotraukus ir sugebėtų išlaikyti didžiąją dalį informacijos.

Tyrimo objektas

Baigiamojo darbo objektas yra skaitmeniniai vaizdai gauti skaitmeninių vaizdų koreliacijos ir aerotrianguliacijos metodais. Atsižvelgiant į taikomus metodus, skirtingais aspektais nagrinėjami skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gauti statybinės konstrukcijos paviršiaus vaizdai ir aerotrianguliacijos metodu gauti senosios Vilniaus observatorijos pastato vaizdai.

Darbo struktūra

Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, trys skyriai, išvados ir literatūros šaltinių sąrašas. Bendra darbo apimtis – 73 puslapiai be priedų, 35 iliustracijos, 9 lentelių, 41 literatūros šaltiniai. Pirmajame skyriuje atlikta mokslinės literatūros analizė, apie nuotolinių tyrimų sistemas, jų atsiradimo istoriją ir technologijas. Pateikta dviejų fotogrametrijos metodų, oro trianguliacijos ir skaitmeninių vaizdų koreliacijos, apžvalga. Antrajame skyriuje aprašoma tyrimo metodinė analizė, tyrimui naudota technika, algoritmai ir programinės įrangos *GOM Correlate*, *DaVis* ir *Context Capture* veikimo principai. Trečiajame skyriuje aptariami gauti rezultatai ir pateikiama fotogrametrijos metodų patikimumo analizė.

1. NUOTOLINIO MATAVIMO SISTEMOS

1.1. Nuotolinio matavimo sistemų raida

Fotogrametrijos mokslo pradžia slypi net 1480 m., kai garsus išradėjas Leonardas Da Vinčis parašė koncepciją apie projekcinę ir perspektyvinę geometriją. Nors nėra jokių apčiuopiamų ar rašytinių įrodymų, yra manoma, kad 1492 metais Leonardas Da Vinčis pradėjo dirbti su centriniu projektavimu, kuris buvo panaudotas jo išradime „*Magic Lantern*“. 1759 metais Jonas Heinrichas Lambertas išrado matematinę taisyklę, skirtą surasti erdvės tašką, iš kurio buvo užfiksuotas vaizdas – tai davė pradžią fotogrametrijos mokslui. Fotogrametrijos mokslo raidą skirstoma į keturis etapus:

- Pradinė fotogrametrija (1850–1900 m.)
- Analoginė fotogrametrija (1900–1960 m.), kuri naudoja optinius – mechaninius prietaisus apdoroti nuotraukas;
- Analitinė fotogrametrija (1960–1980 m.), kuri naudoja kompiuterizuotus prietaisus fotonuotraukų apdorojimui;
- Skaitmeninė fotogrametrija (nuo 1980 m. iki dabar) – visiškai kompiuterizuotas fotonuotraukos analizavimo metodas.

Ryšį tarp projekcinės geometrijos ir fotogrametrijos pirmiausia atrado vokiečiai R. Sturmsas ir Guido'as Hauckas 1883 metais. Pirmuoju fotografu yra laikomas Josephas Nicephone'as Niepce'as, kuris pirmąją savo fotografiją fiksavo net 8 valandas. Apie 1840 metais prancūzas geodezininkas Francoisas Jeanas Arago'as pradėjo vartoti mokslinį žodį „fotogrametrija“. Tačiau fotogrametrijos mokslo įkūrėjų laikomas prancūzas topografas Colonelis A. Laussedatas, kuris 1859 metais Paryžiaus mokslų akademijoje pristatė objekto koordinacių nustatymo erdvinių spindulių sankirtos būdu iš dviejų fotonuotraukų metodą. Labai panašiu metu vokiečių mokslininkas A. Maydenbaueris pritaikė fotogrametrinius metodus architektūriniams statiniams matuoti.

XIX amžiaus pabaigoje ypač didelę įtaką fotogrametrijos moksle padarė stereofotogrametrijos mokslo atsiradimas, o tai paskatino išrasti stereoautografo prietaisą. Vėliau imta tobulinti fotogrametrines kameras ir braižymo prietaisus, taip pat plačiai pradėti naudoti optiniai – mechaniniai fotogrametriniai prietaisai. 1946–1950 metais, panaudojus spalvų spektrą sukurti fotografiniai filmai, įautrūs infraraudoniesiems spinduliams (History 2008).

Fotogrametrijos atsiradimas Lietuvoje

Fotogrametrijos mokslą Lietuvoje pirmiausia pradėjo naudoti Karo aviacijos tarnyba, tiksliau, ši institucija labiau gilinosi į aerofotografiją. Ši tarnyba 1934 metais įsigijo perspektyvų

fotogrametrinį prietaisą ir perėjo prie sistemingos areofotogrametrijos naudojimo topografiniams tikslams.

Karo topografijos skyrius, 1934–1939 metais vadovaujamas Antano Krikščiūno, pradėjo senų M 1:42000 kontūrinių žemėlapių atnaujinimą naujomis aerofotonuotraukomis. Šiam tikslui buvo naudojami įvairių mastelių maršrutinės vertikaliosios aerofotografinės nuotraukos su nedideliais nuotraukų persiklojimais. Karo aviacijos tarnyba aerofotonuotraukų redagavimui naudojo aerovaizdų dalinę pantografiją, taip grafiniu–mechaniniu būdu transformuodavo vaizdus. Taip pat tuo metu aerofotogrametrija buvo naudota ir miestų bei miestelių planavimui. Šiam tikslui dažniausiai naudojo dar netransformuotas aeronuotraukas, pvz., šiuo metodu buvo sudarytas šiaurinės Kauno dalies fotoplanas.

Vienas iš tų laikų fotogrametrijos garsintojų Lietuvoje yra laikomas geodezijos inžinierius Jonas Deksnys, kuris to meto publikacijose panaudojo žodį „fotogrametrija“ bei tuo pačiu išaiškino fotogrametrijos mokslo metodų esmę. 1933 metais J. Deksnys pradėjo pirmasis skaityti paskaitas apie fotogrametrijos mokslą Kėdainių aukštesniojoje kultūros technikos mokykloje geodezijos skyriuje. Jonas Deksnys, Adolfas Guogis, Petras Variakojis bei kiti to meto garsūs geodezijos specialistai įsitraukdami į fotogrametrijos srities tarptautines konferencijas ir kongresus gilindavo savo žinias apie šią mokslo sritį.

Nemažai Lietuvos geodezijos inžinerijos atstovų buvo susidomėję fotografijos galimybių panaudojimu bei pritaikymu Lietuvoje. Didžiausias dėmesys buvo skirtas aerofotografiniams metodams, tačiau tuo metu Lietuva buvo gerokai atsilikusi nuo to meto kitų Europos šalių geodezijos mokslo srityje, dar iki 1938 metų Lietuvoje nebuvo tinkamai sutankintas trianguliacijos tinklas. Dėl šios priežasties Lietuva neturėjo tvirto koordinuoto ir tikslaus pagrindo, skirto tinkamiems kartografavimo ir aerofotonuotrauko darbams.

Fotogrametrija Lietuvoje sparčiai vystėsi pokario metais. Fotogrametrijos paskaitos pradėtos dėstyti ne vienoje mokslo įstaigoje, pvz., Kaune įsteigta „Žemės ūkio aerofotonuotraukos Vakarų įmonė“, kuri teikė aerofotonuotraukas žemėtvarkininkams. Kadangi tuo laiku sparčiai keitėsi besivystančios Lietuvos kraštovaizdis, imta sistemingai atnaujinti aerofotonuotraukos. Ši įstaiga kartu su Respublikiniu žemėtvarkos projektavimo institutu atliko didelės Lietuvos Tarybų Socialistinės Respublikos teritorijos dalies kombinuotą ištisinę aerofotonuotrauką masteliu 1:10000, parinkus 1 metro horizontalių laiptą. Institutas buvo gerai aprūpintas fotogrametriniais ir kartografiniais prietaisais, todėl galėjo atlikti sudėtingus aerofotografavimo darbus, skaitmeninę aerotrianguliaciją ir gaminti fotoplanus. Ši naujai atsiradusi gamyba stipriai prisidėjo prie fotogrametrijos mokslo plėtojimo bei naujų specialistų rengimo Lietuvoje.

Pirmoji mokslo tiriamoji inžinerinės fotogrametrijos laboratorija Vilniaus valstybinio V. Kapsuko universiteto Fizinės geografijos ir kartografijos katedroje buvo įsteigta 1969 metais. Svarbiausia šios laboratorijos paskirtis – sudaryti kultūros paminklų fotogrametrinį archyvą. Šios laboratorijos darbuotojai ėmėsi inventorizuoti architektūrinius paminklus, dvarus, senuosius kaimus, pilis, bažnyčias. Tai pat buvo atliekami pastatų fasadų, lauko fotografavimo darbai, kartu su tiesioginiais matavimais sudaryti statinių planai ir paminklų aplinkos topografiniai planai masteliu M 1:500. Didelę istorinę reikšmę turinčiuose pastatuose buvo atliekami interjero fotografavimo darbai. Gauta fotografinė medžiaga buvo apdorota – sudaryti grafiniai pastatų planai, kurie buvo panaudoti kai kurių objektų restauracijos projektams.

Nuo tiriamosios inžinerinės fotogrametrijos laboratorijos atsiradimo laikų, labai greitai pradėti tirti gamtos objektai ir jų pokyčiai žemėje, laiko tėkmėje. Sujungus geodezijos ir fotogrametrijos mokslus imta tyrinėti Neries upės kratų atodangas, Kuršių nerijos kopas, jų judėjimą ir Kauno marių krantų dinamiką.

Lietuvoje 1992 metais įkurta valstybinė įmonė Nuotolinių tyrimų ir geoinformatikos centras „GIS–Centras“. Ši įmonė yra atsakinga už Lietuvos erdvinės informacijos portalo (www.geoportal.lt) ir valstybinio georeferencinio pagrindo kadastro tvarkymą ir vystymą, valstybinių georeferencinių erdvinių duomenų rinkinių tvarkymą ir duomenų teikimą visuomenei.

Iki šių laikų Lietuvoje vis dar fotogrametriniais metodais yra sudaromi įvairaus mastelio topografiniais planai ir žemėlapiai. Taikant skaitmenizuotas technologijas efektyviai sprendžiami įvairūs kartografiniai, žemės kadastro, architektūriniai restauracijos ir kiti uždaviniai.

1.2. Nuotolinio matavimo sistemų tipai

Fotogrametrija – tai mokslas, kuris skirtas geometrinės informacijos apie objektą kaupimui bei matavimams fotonuotraukose atlikti. Taip pat fotogrametrija yra aprašoma kaip technologija, skirta fizinių objektų padėčiai ar įvairių reiškinių padėties pokyčiams nustatyti neprisiliečiant prie tiriamojo objekto. Objektų erdvinė padėtis ar jų dydžiai randami netiesioginiais matavimais iš fotonuotraukų. Pagal fotografavimui naudojamą technologiją ir gaunamus rezultatus fotogrametrija yra skirstoma į antžeminę, povandeninę, kosminę bei aerofotogrametrinę.

1.2.1. Antžeminė sistema

Antžeminė fotogrametrija – fotogrametrijos mokslo atšaka, kuri nagrinėja objektų fotografavimo metodus nuo Žemės paviršiaus. Dažniausiai fotografavimas atliekamas atstumu nuo 1 metro iki 100 metrų, o gauti rezultatai yra apdorojami fotogrametriniais metodais (Ruzgienė 2008).

Antžeminiams objektams fotografuoti yra keli būdai: kairysis, dešinysis ir normalusis. Dažniausiai yra naudojamas pastarasis – normalusis būdas, tai yra, kai pagrindinis fotografavimo spindulys nukreipiamas statmenai į fotografuojamojo objekto plokštumą, o fotografavimo bazė yra lygiagreti su šia plokštuma. Paprastai normalus fotografavimas yra sunkiai įgyvendinimas, nes dažniausiai fotokameros objektyvo ašys yra pasuktos arba pasviros, todėl tokiu atveju yra sudėtingiau apskaičiuoti fotonuotraukos koordinatas.

Fotografuojant objektus, keliami šie pagrindiniai reikalavimai: dviejų fotografavimo spindulių sankirtos kampas, turi būti kiek įmanoma artimas kampui 90° , fotografuoti būtina mažiausiai iš 2 stočių, jei tikslas yra gauti dviejų koordinačių sistemos fotonuotrauką, o jei trimatį modelį – privaloma fotografuoti ne mažiau kaip iš 3 stočių. Pagrindiniai fotografuojamojo objekto taškai turi būti matomi mažiausiai trijose fotonuotraukose. Tarp dviejų greta esančių nuotraukų privalo būti ne mažesnė nei 60 % sankloda. Jei yra galimybė, fotografuoti reikia ne tik nuo Žemės paviršiaus, be ir nuo greta esančių pastatų ar oro, tokiu metodu bus išgaunamas kuo didesnis nuotraukų persidengimo procentas.

Siekiant pasiekti kuo tikslesnius rezultatus, tyrimams yra atrenkamos geriausios kokybės nuotraukos. Fotonuotraukos masteliui nustatyti būtina išmatuoti pasirinktą atstumą tarp dviejų fotografuojamojo objekto taškų, kurie turėtų būti kuo toliau vienas nuo kito ir fotografuojant aiškiai matomi. Fotografuojamojo objekto taškų padėtis nustatoma tiksliau, jeigu fotografavimo spinduliai iš dviejų stočių susikerta 90° kampu. Kuo smailesnis kampas, tuo didesnis fotografuojamojo objekto poslinkis. Fotografavimo stočių parinkimas priklauso nuo fotografuojamojo objekto geometrinės formos, padėties, dydžio, aukščio, medžiagos bei kitų savybių, pvz., dažniausiai fotografuojant fasadą užtenka dviejų stočių, o memorialą – trijų, bet stočių skaičius visuomet priklauso nuo fotografuojamojo objekto, jo geografinės padėties ir dydžio.

1.2.2. Avia sistema

Aerofotogrametrija – tai mokslas apie fotomodelių, fotožemėlapių sudarymo metodus, naudojant aerovaizdinius. Tai maksimaliai automatizuotas procesas, kurio metu pritaikius kompiuterines programas yra išgaunamas rezultatas. Aerofotografavimo produktas vadinamas aerofotonuotrauka, kurios svarbiausi elementai yra šie: fotografavimo aukštis, fotografavimo bazės ilgis, atstumas tarp ekspozicijų ir aerovaizdų skaičius viename objekte. Aerofotonuotraukos daromos, kai lauke geras oras, kai nėra debesų arba atvirkščiai, kai diena ūkanota ir dangų ištisai dengia debesys, bet šie yra pakankamai aukštai ir praleidžia saulės spindulių tinkamą kiekį. Geriausia fotografuoti ankstyvą pavasarį, kol dar nesužaliavusi augmenija (Vainauskas 1977). Aukšti pastatai dažniausiai fotografuojami nuo žemės arba nuo kitų greta esančių statinių, arba panaudojus kitą fotografavimo technologiją – droną. Šio metodo fotografavimo metu gaunamos

fotonuotraukos būna skirtingų mastelių, nes skraidyklės neturi ypatybės išlaikyti pastovų atstumą iki statinio.

Siekiant fotografuojamą objektą susieti su geodezine koordinačių sistema, ant tiriamojo objekto yra pritaissomos žymės, kurių koordinatės yra išmatuojamos atitinkamais geodeziniais prietaisais, taip sudarant fotonuotraukos geodezinę atramą. Absoliutiniam fotonuotraukų orientavimui atlikti reikia žinoti mažiausiai keturių atramos taškų koordinatės, kurie būtų išdėstyti fotonuotraukos kampuose. Norint sutankinti atramos tinklą yra naudojamas fototrianguliacijos metodas.

Pastaruoju laiku labai išpopuliarėjo 3D vaizdų kūrimas naudojant skaitmeninius prietaisus. 3D modeliavimas – tai procesas, kai pritaikius matematinius veiksmus per specialias programines įrangas yra sukuriamas 3D produktas. 3D modeliai gali būti kuriami dviem atvejais: perskaičiuojant 2D vaizdus ir paleidžiant juos per tam tikrą programinę įrangą arba sukuriant panaudojus kompiuterinę simuliaciją. Trijų dimensijų vaizdavimas tapo ypač populiarius įvairioje industrijoje, tokiose kaip filmų kūrimas, 3D grafikos pritaikymas kompiuteriniuose žaidimuose ar net pardavimų marketinge. Taip pat tai ypatingai paplito tarp interjerų dizainerių ar architektų. Šiais laikais 3D modeliavimas yra naudojamas ir medicinoje. Panaudojus trimačius modelius yra gerokai lengviau tyrinėti objektus, apžiūrėti juos iš visų pusių bei nagrinėti jų sandarą net neprisilietus prie jų.

Fotogrametriniu būdu apdorojamos nuotraukos gali būti gautos 2D arba 3D formatu. Nuo to priklausys, kokia informacija bus pateikta apie objektą, pvz., jei statinio fasado nuotrauka pateikta tik 2D formatu, analizuojantis nuotrauką žmogus neturės jokios informacijos apie statinio fasade esančias išsišokusias detales kaip balkonai. Tačiau visada būtina suvokti, kokia būtent informacija apie objektą yra ar bus reikalinga ateityje, nes ne visuomet informacijos perteklius yra būtinas. Skaitmeninis 3D modelių kūrimas nėra lengvas darbas, tam reikia turėti nemažai sukauptų žinių apie rastrinius vaizdus bei naujausias kompiuterines technologijas. Tokiems modeliams kurti klasikiniiais fotogrametriniais metodais reikia laiko bei tinkamos kvalifikacijos. Erdviniams modeliams sudaryti yra sukurtos automatinės ir pusiau automatinės programinės sistemos.

3D modeliavimui atlikti dažniausiai yra naudojamas skaitmeninių vaizdų sugretinimo metodas. Šiuo metodu automatiškai randami vienodi taškai tarp dviejų skirtingų fotovaizdų. Sumodeliuoto vaizdo parametrai yra objekto ilgis, plotis, aukštis ir pasirinkta koordinatė. Objekto skirtingi aukščiai – atstumai gaunami automatiškai, koreliacijos būdu, sugretinus homogeninius taškus dvejose ar daugiau fotonuotraukų sanklodose. Gautas 3D modelis tikrinamas vizualiniu ir tekstūriniu būdu.

1.2.3. Lazerinio skenavimo sistema

Šiuo metu visame pasaulyje ypač populiari yra atlikti įvairius tyrimus nuotoliniu būdu. Vienas iš jų yra skenavimas lazeriu. Šiuo metodu yra gaunamas didžiulis taškų debesis, sudarytas iš labai tankių trijų dimensijų taškų. Skenavimo metu gaunami duomenys labai priklauso nuo objekto paviršiaus tankio ir būklės. Naudojantis šiuo metodu gaunama geometrinė ir radiometrinė informacija. Nuotolinio skenavimo metodu galima nustatyti įvairių objektų geografinę vietą bei nustatyti to objekto fizines savybes.

Nuotolinis skaitymas yra labai paplitęs ir brangus pirminis duomenų surinkimo būdas (kai duomenys yra tiesiogiai matuojami realiu laiku), suteikiantis galimybę surinkti įvairius duomenis apie objektą, t. y. skenuojant yra gaunamos fizinės, cheminės ir biologinės objekto savybės, nepanaudojus jokio fizinio kontakto su tiriamuoju objektu. Informacija yra gaunama pasitelkus elektromagnetinių bangų jutiklius. Svarbi nuotolinio skenavimo savybė yra ta, kad rezultatai yra objektyviai patikimi (Ingensand 2006).

Svarbiausia lazerinio skenavimo fizinė charakteristika yra skiriamoji geba, kuri skirstoma į tris grupes – erdvinė, spektrinė ir laiko (Ruzgienė 2008).

1. **Spektrinė** – tai skiriamoji geba, kuri priklauso nuo objekto elektromagnetinių bangų atspindžio dydžio. Visi, skenavimo būdu, gauti duomenys yra skaitmeniniai dydžiais. Regimosios šviesos bangos nuo 0,4 iki 0,7 μm ilgio ir yra plačiai naudojamos nuotoliniuose tyrimuose, nes jas sugeba fiksuoti net įprasti fotoaparatai.

2. **Erdvinė** – skiriamosios gebos rodiklis, kuris parodo vaizdo elemento dydį. Įvairių skirtingų skenavimo prietaisų erdvinė geba gali skirtis nuo dešimčių centimetrų iki kelių kilometrų dydžio.

3. **Laiko** – skiriamoji geba, kitaip periodas, kuris apibūdina per kiek laiko skenavimo prietaisas apsisuks aplink savo ašį ir vėl sugrįš į pradinį tašką.

Lazerinio skenavimo technologija yra gerai išvystyta antžemio nuskaitymui. Įvairūs antžeminiai objektai gali būti skenuojami ir iš viršaus, tokia technologija yra vadinama LiDAR. LiDAR (angl. k. *Light Detection and Ranging*) yra vietovės skenavimo lazeriu iš orlaivio technologija, kurios dėka atsivėrė didelės galimybės trimatėje erdvėje tirti ir modeliuoti žemės paviršių, jo reljefą, įvairius statinius ir kitus objektus (Žalnierukas 2006). LiDAR tikriausiai yra labiausiai paplitusi technologija topografinių planų kūrimui. Didžiausias šios technologijos privalumas yra tiesioginis, aukšto tikslumo 3D duomenų surinkimas, kuris yra pasiektas iki kelių milimetrų. LiDAR technologija yra neatsiejama nuo POS sistemos (Shan 2018).

Visapusiškai išnaudoti 3D lazerinio skenavimo potencialą ir jo pajėgumą yra ganėtinai sunku. Tinkamai ir tikslingai apdoroti duomenis, gaunamus lazerinio skenavimo metu, yra sudėtinga. Skenuotų duomenų apdorojimo metodai truputį skiriasi nuo tradicinės fotogrametrijoje naudojamų metodų, todėl pastarąjį dešimtmetį šioje srityje buvo įvykdyta daugybė reikšmingų pokyčių ir atradimų, kurie yra siejami su naujų metodų atradimu. Dėl naujai sukurtų metodų, atsirado galingesnės kompiuterinė įranga, kuri yra žymiai brangesnė nei įprastai naudojama.

Šiuo metu lazerinio skenavimo technologija yra plačiai naudojama topografiniuose tyrimuose, žemėlapių kūrime ir modeliavime. Nuotolinio skenavimo metodas reikalauja brangios techninės ir kompiuterinės įrangos, todėl šios technologijos metodai nėra nagrinėjami šiame tiriamajame darbe.

1.3. Fotogrametrijos metodai

1.3.1. Skaitmeninių vaizdų koreliacija

Atliekant statinius ar dinامينius įvairios paskirties objektų bandymus ne retai fizinių bei mechaninių savybių stebėjimas yra itin sudėtingas ar net negalimas dėl pavojingo tiriamojo objekto suirimo pobūdžio ar nenuspėjamos jo elgsenos. Vienas racionaliausių sprendimų, patikimai bei saugiai fiksuoti mechanškai apkraunamų objektų elgseną – bekontaktis tiriamųjų objektų paviršių stebėjimas naudojant skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą, paremtą fotogrametrijos principais (White *et al.* 2017). Šis metodas taikomas įvairiuose nuotoliniuose tyrimuose objektų paviršių pokyčiams stebėti. Geometriniai paviršių pokyčių duomenys leidžia nustatyti nagrinėjamo objekto deformacijas, įtempimų pasiskirstymą paviršiuje bei identifikuoti plyšius ar kitas pažaidas atsiradusias bandymo metu. Sukombinavus kelius metodus bei pritaikius pilno lauko matavimą galima analizuoti įvairių medžiagų deformacijas nuotoliniu būdu. Vienas iš tokių kombinuotų metodų yra skaitmeninio vaizdo koreliacijos metodas, kuris yra paremtas plataus vaizdo deformacijos matavimu.

Skaitmeninio vaizdo koreliacijos sistema (angl. k. *Digital image correlation system*), sutrumpintai DIC – tai paprasta, tačiau galinga optinė metrologija skirta poslinkių matavimui. DIC matavimo technika, kuri nustato pagrindinio taško poslinkį pagal aplink jį esančius pagalbinus taškus. Gautas poslinkis yra pradinio ir galutinio vaizdų skirtumo įvertis (Pan *et al.* 2010). Skaitmeninių vaizdų koreliacijos sistema gali būti taikoma dvimačių ir trimačių poslinkių identifikavimui.

Skaitmeninių vaizdų koreliacijos sistema sukurta 1980 metais. Per pirmuosius kelis dešimtmečius šis metodas daugiausia buvo taikomas tik viena kamera gautiems vaizdams, tai yra 2D poslinkių fiksavimui. Šis metodas dabar žinomas kaip skaitmeninių vaizdų dvimatės

koreliacijos metodas, kurio metu galima gauti tik dvimatę informaciją: objekto paviršiuje esančių taškų poslinkį plokštumoje, todėl dešimtojo dešimtmečio viduryje, siekiant patobulinti 2D–DIC sistemą, buvo pasiūlyta skaitmeninių vaizdų trimatės (3D) koreliacijos metodas (Li *et al.* 2016).

Koreliacijos funkcija automatiškai randa ieškomo taško atitikimą kitame vaizde. Pavyzdžiui, ieškomasis objektas yra fotonuotraukos vaizdo koordinatinė žymė, kurios padėtis yra dažniausiai apytiksliai žinoma. Skaitmeninio vaizdo matricos laukas apie šį tašką yra vadinamas paieškos matrica, o laukas apie tikslesnę padėtį – taikinio matrica.

Tinkamiausiai padėčiai, paieškos lauke, nustatyti šablono matrica elementas po elemento paslenkamas didesniame paieškos lauke, ir kiekvienoje padėtyje skaičiuojama koreliacijos (ρ) funkcija Nr.1:

$$\rho_{(i,j)} = \frac{\sigma_{12}(i,j)}{\sigma_1 \sigma_2(i,j)} \quad (1)$$

Funkcijoje (Nr.1), σ_1 – pikselio pilkumo šablono lauke reikšmės standartinis nuokrypis, $\sigma_2(i,j)$ – pikselio pilkumo paieškos lauke reikšmės standartinis nuokrypis, $\sigma_{12}(i,j)$ – kovariacija.

Skaičiuojamas visų galimų šablono laukų padėčių tyrimo lauke koreliacijos koeficientas ρ . Koreliacijos koeficiento reikšmė gali būti nuo -1 iki 1 . Nustatytoji padėtis, kai koreliacijos koeficiento reikšmė didžiausia, laikoma šablono atitikmeniu paieškos lauke.

2D–DIC metodas skaitmeninių vaizdų koreliacijoje yra plačiai žinomas dėl savo paprastumo ir nesudėtingos struktūros, tačiau šiuo metodu pasiekti aukštą matavimų tikslumą yra ganėtinai sudėtinga. Siekiant užtikrinti, kad matavimai būtų patikimi ir tikslūs, kiekvieno bandymo metu būtina atlikti rezultatų tikslumo stebėseną, tai yra matavimo metu identifikuoti, įvertinti ir sumažinti atsiradusius techninius netikslumus kaip optinio lęšio distorsiją ar aplinkos oro refrakciją. (Pan *et al.* 2013). Būtina pabrėžti, kad matavimo klaidos, susijusios su nepakankamu 2D–DIC vaizdų stabilumu, negali būti visiškai pašalintos net ir pritaikius sudėtingus algoritmus objekto padėčiai atstatyti. Dėl šios priežasties išsami klaidų analizė yra būtina ir naudinga, norint pasiekti didesnio tikslumo poslinkių matavimus.

Lyginant 2D–DIC, 3D–DIC turi daugiau privalumų nei 2D–DIC. Šiuo metodu galima stebėti objekto kitimą trimatėje erdvėje. Trimatė skaitmeninio vaizdo koreliacijos sistema sudaroma panaudojus stereokameras. Šiam būdui yra pritaikoma optinė technika, skirta išmatuoti plokščią ar neplanarinį objektą ir rezultate gauti jo tikslią formą ir poslinkio lauką. 3D–DIC metode naudojami algoritmai, kurie suranda atitinkamus taškus tarp dviejų vaizdinių, kurie išgauti iš dviejų stereometrinių fotokamerų (Chen *et al.* 2016). Šiuo metodu pirmiausia yra išgaunama tiriamojo objekto 3D forma, o tik tuomet ieškomi ir identifikuojami reikalingi taškai ir sulyginami pradinis ir galutinis vaizdai, norint gauti taškų poslinkių pokyčio rezultatą.

Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu galima apdoroti tiek dvimačius, tiek trimačius fotovaizdus, nepriklausomai kokia fotokamera šie buvo užfiksuoti. Fotokameros pagal savo vidinius parametrus yra skirstomos į metrinės ir nemetrinės. 2D–DIC koreliacijos metodas tiria mėgėjiška kamera fiksuotus fotovaizdus, o 3D–DIC metodas analizuoja setreometriniu kamera gautus vaizdinius. Fotokamerų tipų nuotraukos pateiktos iliustracijoje (1 pav.).



1 pav. DIC sistemoms naudojamos fotokameros: a) metrinė, b) įprasta skaitmeninė (nemetrinė), c) stereometrinė

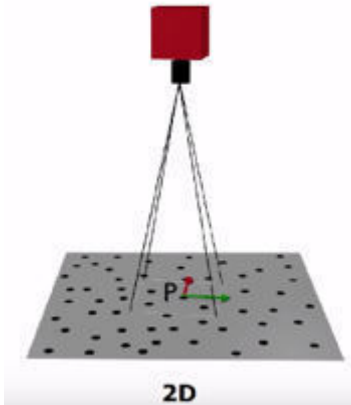
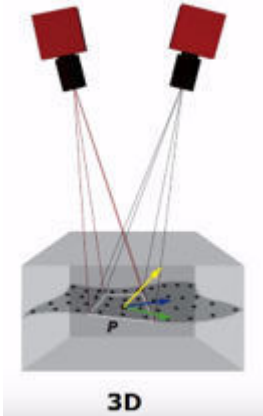
1. **Metrinės fotokameros.** Šios kameros pasižymi pastoviais ir tiksliai žinomais vidiniais parametrais bei maža lęšio deformacija, todėl yra labai brangios. Židinio nuotolis išlaikomas pastovus, nėra objektyvo didinimo ar mažinimo galimybės. Taigi tokio tipo metrinės fotokameros skirtos riboto atstumo fotografavimui atlikti. Fotonuotraukos koordinatų sistemos pradžios taško padėtis nustatoma kalibravimo metu.

2. **Stereometrinės fotokameros.** Šio tipo kameros yra sudarytos iš dviejų metrinių kamerų, esančių skirtingose pozicijose, bet turinčios bendrą projekcijos centrą. Tokio tipo fotokameros turi vienodus vidinius parametrus bei tas pačias geometrines savybes. Taip pat stereokameros yra prilyginamos žmogaus matymo laukui, todėl šių fotokamerų persidengimo vieta yra matoma kaip trimatis vaizdas. Praktikoje persidengęs vaizdas gali būti padarytas tik su viena fotokamera iš dviejų stočių, o panaudojus stereometrinę kamerą, persidengimas gaunamas tik iš vienos stoties.

3. **Nemetrinės fotokameros.** Taip pat šias kameras galima vadinti mėgėjiškomis. Tokios kategorijos fotokameros turi kintamus vidinius parametrus, tai yra šių kamerų geometrines savybės nėra stabilios, tačiau jas galima lengvai sukalibruoti. Tokio tipo kameros nėra tokios tikslios kaip metrinės, todėl jos gali būti naudojamos tik tokiais atvejais, kai nėra reikalingi didelio tikslumo rezultatai. Nemetrinės kameros sugeneruoja nemetrinius vaizdus – kurie yra paveikti operatoriaus veiksmų, bet tuo pačiu yra išlaikomas pagrindinis taškas ir atstumas (Kolbl 1976).

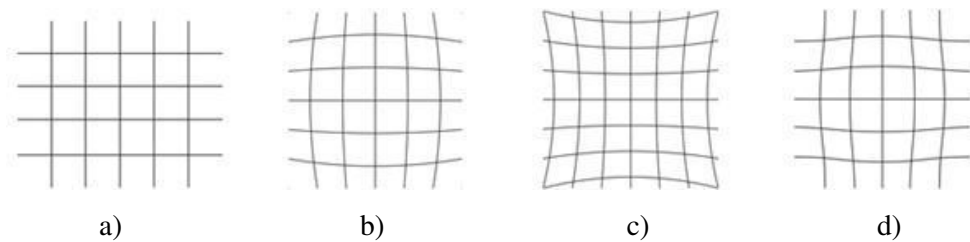
Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą galime atlikti dvejais būdais, tai yra pritaikius dvi skirtingas fotokameras: skaitmeninę mėgėjišką ir stereokamerą. Šiomis kameromis užfiksuoti fotovaizdai gali būti skirtingi dėl šių įrenginių nevienodo funkcionalumo. 2D ir 3D–DIC kamerų sistemų veikimo principas ir funkcionalumas pateiktas lentelėje (1 lentelė).

1 lentelė. 2D–DIC ir 3D–DIC sistemų funkcionalumo palyginimas

Schemas		
	Įprastinė kamera	Stereometrinė kamera
Koordinačių sistema	Planinė koordinačių sistema (dvimatės koordinatės: XY)	Galimos 2D ir 3D koordinačių sistemos (XYZ)
Subjekto paviršius	Fiksuojamas tik vienu metu vienas paviršiaus plotas	Matuoja įvairių formų ir dydžių subjektus
Matavimo nustatymai	Fotokamera privalo būti pastatyta griežtai vertikaliai į tiriamąjį objektą	Kameros pozicija galima įvairu kampu priešais subjektą
Mastelio nustatymas	Rankinis mastelio nustatymas	Mastelio tikslumas priklauso nuo kalibravimo
Vidiniai parametrai	Nemetrinė fotokameros duomenys	Metrinės kameros vidiniai parametrai

Įprastinė skaitmeninė ir stereometrinė fotokamera vienu požiūriu yra panašios – abi fiksuoja momentą, bet iš kitos perspektyvos jos atlieka skirtingas funkcijas. Įprastinė kamera yra lengva, pigi, panaudojimo spektras yra didelis nuo mėgėjiško fotografavimo iki mokslinių tyrimų, o stereofotokamera palyginus yra labai brangi, ne visiems prieinama kaina, turi konkretų panaudojimo tikslą – laboratorijos tyrimai, sunkiai sudedama, neveikia be atskiros kompiuterinės įrangos, reikalauja didelės sandėliavimo vietos bei tinkamų fotografavimo žinių. Neatsižvelgiant į tai kokia fotokamera yra naudojama, norint gauti kuo preciziškesnius rezultatus, fotokamera privalo būti stabiliai pastatyta ir nejudinama viso tyrimo metu. Jei reikalaujama kuo didesnio tikslumo rezultatų, tuo aukštesnės raiškos įrenginiai yra pritaikomi, bet jei užtenka vidutinio tikslumo rezultatų, tai įprastinė skaitmeninė fotokamera yra puikiai tam tinkama.

Fotokameros turi dviejų tipų objektyvo distorsijas – optinę ir perspektyvinę. Optinė distorsija yra objektyvo lęšio išlinkio rezultatas, o perspektyvinė yra siejama su kameros ir objekto padėtimi. Optinė distorsija yra skirstoma į dvi pagrindines deformacijas (vaizdo iškraipymas dėl lęšio išgaubimo): išgaubtąją ir įgaubtąją. Taip pat yra ir trečioji, kuri dar vadinami mišrioji arba kitaip dviejų pagrindinių distorsijų kombinuotoji deformacija (2 pav.).



2 pav. Fotografinio vaizdo iškreipimas dėl objektyvo distorsijos: a) neiškreipto vaizdo schema, b) būgninė, c) pagalvinė, d) kombinuota distorsija

1.3.2. Aerotrianguliacija

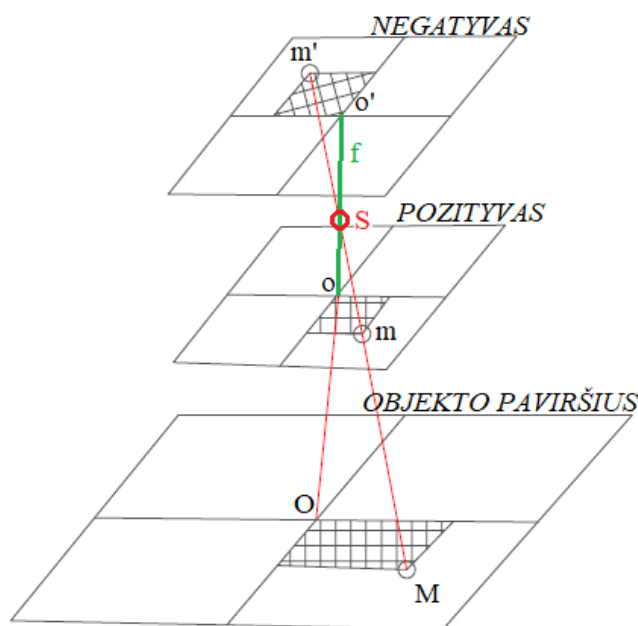
Galima teigti, kad oro balionas yra seniausia mums žinoma žemės vaizdo iš aukštai stebėjimo priemonė. Vėliau supaprastintas fotokamerų versijas pritaikius prie aitvarų ar raketų buvo sukurta pradinė aerofotogrametrija. Po įvairių eksperimentų su balandžiais bei po 50 metų išradus lėktuvus, fotogrametrijos mokslas buvo pritaikytas žemės paviršiaus stebėjimams iš oro. Staigiai po to šis mokslas buvo pritaikytas karinėje žvalgyboje (Colomina *et al.* 2014).

Visame pasaulyje technologijos sparčiai vystosi, kuriami nauji mažesni, bet galingesni prietaisai, taip ir fotogrametrijoje: kuriamos mažesnės, bet galingesnės fotokameros, kurios dažnai pritaikomos prie kitų įrenginių. Vienas iš labiausiai naudojamų tokių įrenginių yra bepilotė skraidyklė arba kitaip dronas, kuris yra pritaikytas tiek pramogai, tiek įvairiems valstybės svarbos tyrimams.

Šiuolaikinėje visuomenėje, besivystant aukštosioms technologijoms, vis didesnė reikšmę tyrimams turi nuotoliniai matavimai. Nuotoliniai tyrimai – tai nuotoliniai duomenų stebėjimai ir matavimai per atitinkamas technologijas. Vienas iš pagrindinių šio matavimo privalumų yra pasikeitimų identifikavimas skirtinguose laiko tarpuose (Hegazy *et al.* 2015). Pastaraisiais metais vis labiau išpopuliarėjo nepilotuojamų orlaivių sistemos (angl. k. *Unmanned Airborne Systems*), kurios tapo svarbia matavimo technologija, skirta surinkti periferinius erdvinius oro duomenis nuotoliniu metodu. Šios bepilotės technologijos yra paremtos oro trianguliacijos (aerotrianguliacijos) metodais, taip pat žinomos kaip „SfM“ ir „DSMs“ junginiu. „SfM“ arba lietuviškai „struktūra iš judesio“, pateikia ortofotografijas, o skaitmeninio paviršiaus modelio sistema (angl. k. *digital surface models*), sukurta ortofotonuotrauką pateikia atitinkamu masteliu (Zhang *et al.* 2016). Tokios sistemos gaunami duomenys daro didžiulę pažangą įvairiose tyrimuose kaip transporto infrastruktūros vertinime, žemės sklypų derliaus tyrime, miestų infrastruktūros modelio kūrimo ir kt.

Aerotrianguliacijos sistema yra paremta aerofotogrametrija, kurios esminis elementas yra aerovaizdas. Skaitmeninė fotonuotrauka daryta iš oro yra atitinkamos vietovės centrinė projekcija. Šios projekcijos spinduliai eidami nuo vietovės taškų per projekcijos centrą S , sudaro projektuojamų spindulių pozityvinį pluoštą, o už jo – negatyvinį (3 pav.). Fotokameros, įtaisytos

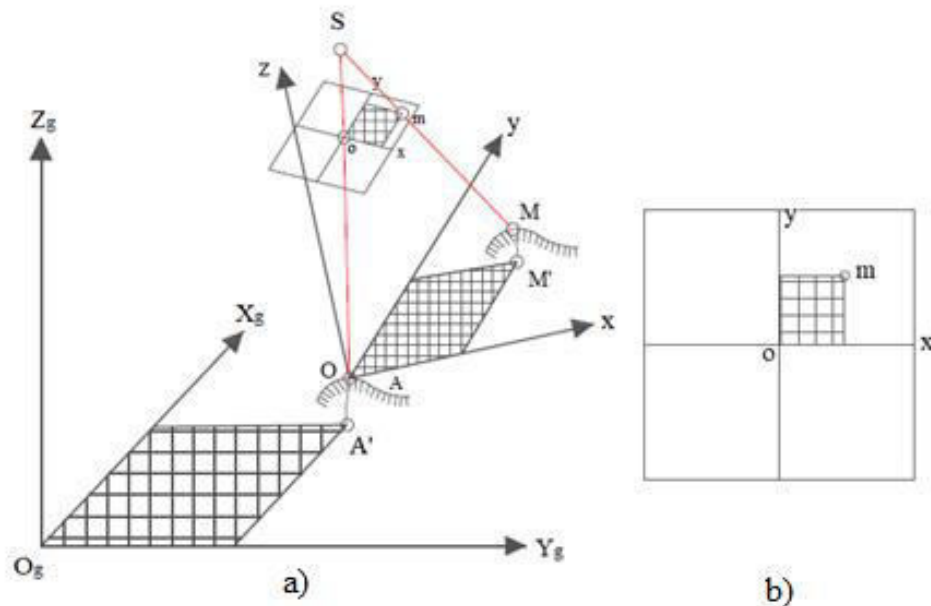
skraidyklėje, židinio plokštumoje gaunamas negatyvas, o už jo esantis kontaktinis atspaudas – pozityvas. Visi fotomodeliai fotografuoti iš įvairių oro įrenginių sudaromi ortogonalinėje projekcijoje.



3 pav. Svarbiausios aerovaizdo geometrinės savybės: S – objektyvo centras, oo' ($2f$) – dvigubas fotokameros židinio atstumas, So – pagrindinis spindulys arba kameros ašis

Objekto paviršiaus plokštumos taško padėtis nustatoma geodezinėje arba fotogrametrinėje koordinatinių sistemoje. Geodezijoje dažniausiai naudojama koordinatinių sistema yra Gauso stačiakampių koordinatinių sistema $O_gX_gY_gZ_g$, kuri pavaizduota paveiksle 4b. Laisvai pasirinktos koordinatinių sistema $OXYZ$ yra vadinama fotogrametrine koordinatinių sistema, kurios schema yra pavaizduota paveiksle 4a. Taškų padėtis aerovaizde nustatoma stačiakampių koordinatinių sistemoje oxy . Koordinatinių pradžia yra taškas o , kuris sutampa su koordinatinių indeksu, jungiančiu tiesių susikirtimo tašką. Koordinatės yra indeksuojamos kiekvienoje fotonuotraukoje taip, kad šio duotojo taško pradžia sutaptų su aerovaizdo pagrindiniu tašku o . Koordinatinių pradžia apskaičiuojama išvedus koordinatinių indeksų atskaitų vidurkį.

Fotokameros padėtį ore galima nustatyti pagal šios kameros orientavimo elementus, kurie yra identifikuojami kiekvienoje užfiksuotoje fotonuotraukoje. Svarbus aerovaizdų apdorojimo etapas yra fotonuotraukų orientavimas ir sąsaja tarp nuotraukų vietovės koordinatinių sistemoje. Procesas šiuo metu yra visiškai automatizuotas pagal iš anksto nustatytus matematinius algoritmus, kurie yra susieti su kompiuterine programine įranga.

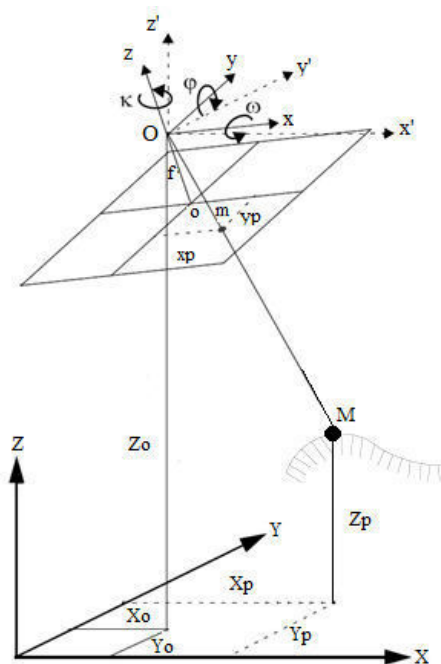


4 pav. Aerotrianguliacijoje naudojamos koordinatinių sistemos: a) Gauso stačiakampė koordinatinių sistema, b) laisvai pasirenkama koordinatinių sistema

Aerovaizdo orientavimo elementai skirstomi į dvi grupes: vidinio ir išorinio. Vidinio orientavimo elementais atkuriami projektuojamų spindulių geometrija kiekvienos ekspozicijos momentu. Žinant vidinio orientavimo elementus, galima rasti projekcijos centrą ir atkurti spindulių pluoštą. Nei viena kamera nėra tobula, jos visos generuoja fotonuotraukas su geometriniais iškraipymais, kurie yra aprašomi kameros vidiniais parametrais. Vidinio orientavimo elementai: židinio nuotolis, projekcinės koordinatės, distorsijos radialinės simetrijos ir asimetrijos reikšmės, jei kamera yra metrinė – koordinatinių žymių reikšmės ir visi kiti vidiniai parametrai nustatomi kalibravimo metu. Normaliose sąlygose šie geometriniai parametrai yra pastovūs visoms fotonuotraukoms, darytoms ta pačia skaitmenine fotokamera. Skaitmeninėse fotokamerose vidinis orientavimas yra atliekamas tiesiogiai fotografavimo momentu (Paladino *et al.* 2015).

Išorinio orientavimo elementais (5 pav.) nustatoma spindulių pluošto padėtis geodezinių koordinatinių sistemos atžvilgiu. Išoriniai orientavimo elementai yra posūkio ir posvyrio kampai φ , ω , κ apie X , Y ir Z ašis ir λ – mastelio koeficientas.

Kampai φ , ω ir κ laikomi teigiamais, jei sukama laikrodžio rodyklės kryptimi (Schermerhorn 1960). Ši sistema priimta 1960 metais Tarptautinės fotogrametrijos mokslo draugijos kongrese (*ISP – International Society for Photogrammetry*). Įvairiose literatūros šaltiniuose galima pastebėti, kad yra naudojami ir kitokie variantai.



5 pav. Aerofotonuotraukos orientavimo elementai

Aerofotonuotraukos orientavimo elementus sudaro: XYZ – fotografavimo taško koordinatės, κ – aerovaizdo posūkio kampas, ω – aerovaizdo posvyrio kampas, φ – išilginis aerovaizdo posvyrio kampas ir koordinačių sąsaja su vietovės koordinačių sistema (Schenek 1999). Taigi nustatant aerovaizdo padėties orientavimą būtina žinoti devynis elementus, trys iš jų yra vidiniai – pagrindinio taško x_o ir y_o koordinatės bei židinio nuotolis, o likę šeši išoriniai. Kartais išoriniai orientavimo elementai yra vadinami absoliutaus orientavimo elementais. Visų devynių orientavimo elementų nustatymas yra svarbiausias fotogrametrijos uždavinys.

Naudojant nuotraukos vidinius ir išorinius orientavimo parametrus, specialiai parinktos programinės įrangos automatiškai atpažįsta panašus taškus persidengiančiuose fotonuotraukose. Tokie panašūs taškai dar vadinami pririšimo taškai (angl. k. *tie points*). Naudojant pririšimo taškus, absoliutaus ir reliatyvaus orientavimo parametrus, žinomus tvirtus taškus, esančius ant objekto paviršiaus ir panaudojus atitinkamą programinę įrangą yra apibrėžiama fotokameros poziciją fotonuotrukos atžvilgiu, tuo pat metu surandami gretimi taškai, kurie sukuria homogeninių taškų bloką aerofotonuotrukoje. Šis veikslas kitaip žinomas kaip aerotrianguliacija.

Dvi persidengiančios fotonuotrukos vadinamos aerovaizdų pora, kurių koordinatės yra aprašomos stačiakampėmis koordinatėmis. Tokiu atveju taškai esantys ekspozicijos vietovėje patenka į keletas skirtingas fotonuotraukas. Tokiuose stereoporose, dėl kameros pasislinkimo, atsiranda tų pačių taškų nesutapymai – paralaksas. Per koordinačių indeksus išvestų linijų susikirtimas – laikomas nauja koordinačių sistemos pradžia. Stereoporos atitinkamų taškų abscisių skirtumas yra vadinamas išilginiu paralaksu, o ordinačių – skersiniu paralaksu (Kraus 2007).

Aerotrianguliacijos tikslumo įvertinimas yra grindžiamas RMS – vidutinės nuokrypos (angl. k. *root-mean-square*) technologiją (Vainauskas 1998). Ši technologija yra paremta skaičiavimais pagal pikselio žinomų ir išlygintų kontrolinių taškų koordinatų skirtumus. RMS – šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos gali būti apskaičiuojama dvejais būdais. Pirmas būdas yra RMS skaičiavimas iš vieno skaitmeninio vaizdo, kuriame yra vertinamas kiekvieno pikselio intensyvumas, o šių vidurkis prilyginamas RMS rodikliui. Tokie rezultatai yra išreiškiami skaliarine verte, kuri reiškia pikselio intensyvumo standartinį nuokrypį nuo pikselio vidutinio intensyvumo. Antras būdas gauti RMS paklaidą yra įvertinti kelių skaitmeninių vaizdų pikselių koordinatų pasiskirstymo vidurkį ir standartinį nuokrypį. Tokiu būdu gautas rezultatas yra visų fotonuotraukų vidutinis pikselių koordinatų nuokrypis. Pirmuoju būdu gautas RMS iš vieno vaizdo yra prilyginamas likusiems, o antru atveju gautas visų fotonuotraukų RMS paklaidos vidurkis prilyginamas visiems vaizdiniais. Pateikta RMS paklaidos formulė Nr. 2, kuri kartojama keliais ciklais:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Šis formulė yra dviejų ciklų ir aprašo standartinį nuokrypį, šioje formulėje n yra skaitmeninių vaizdų skaičius, i – atitinkama fotonuotrauka, x_i – pikselio intensyvumas, $\bar{x}$ – pikselių intensyvumo vidurkis, kuris gaunamas iš formulės Nr. 3:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Formulė Nr. 2 sudaro labai ilgą algoritmą, kuris užima didelę kompiuterio kietojo disko atmintį ir ją įgyvendinti užima daug laiko, todėl dviejų ciklų formulė Nr. 2 buvo suprastinta iki vieno ciklo formulės Nr. 4:

$$RMS = \sqrt{\frac{n \sum_i x_i^2 - (\sum_j x_j)^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

Vidutinės kvadratinės paklaidos šaknies gaunami rezultatai iš formulių Nr. 2 ir Nr. 3 yra vienodi.

1.4. Nuotolinio matavimo sistemų taikymas

Nagrinėjant įvairius šaltinius pastebėta, kad fotogrametrijos mokslas yra pabrėžiamas kaip pigi alternatyva dabar jau labai populiarijančiais lazeriniai skenavimo technologijai. Daug kur yra aprašyta, kaip galima panaudojus fotogrametriją sukurti virtualų 3D modelį be jokių didelių kompiuterinių žinių ir taip pat be brangaus 3D lazerinio skenerio aparatinės. Internete skelbiama, kad yra daug įvairių programinių įrangų, kurios sugeba 2D vaizdinį konvertuoti į 3D objektą, bet

panagrinėjus kelias panašias programas išaiškėjo, kad daugelis jų yra tik kūrimo būsenos, be to kai kurios komercinės programos nėra tinkamai sukurtos, norint sudėlioti 3D objektą iš skirtingų nuotraukų.

Fotogrametrijos mokslo šaka yra plačiai taikoma įvairiems nuotoliniams tyrimams. Aerofotogrametrija yra naudojama žemėtvarkoje, miestų planavime, geologiniuose tyrimuose, miškotyroje, kelių infrastruktūroje ir hidrotechninėje statyboje. Taip pat antžeminė fotogrametrija yra pritaikyta balistikos, architektūros, archeologijos, medicinos, geologijos srityse.

Kuo toliau, tuo labiau fotogrametrijos panaudojimas plečiamas. Šiuo metu šis mokslas yra plačiai pritaikytas medicinoje nuo implantų gaminimo iki įvairių žaizdų 3D modeliavimo. Viena iš straipsnių yra aprašoma, kaip fotogrametrija yra pritaikyta mirusio žmogaus kūno sužeidimams tirti, t. y. straipsnio autoriai pateikia, kaip tinkamai paruošti kūną ir aplinką tyrimui ir kaip būtina paruošti fotokamerą, siekiant sukurti norimą tikslumą (Buck 2017). Oltra'o straipsnyje fotogrametrijos mokslo technologija buvo pritaikyta dantų implantams sukurti. Tame pačiame straipsnyje yra pateikiama informacija kaip tiksliai, kokia ir koku kampu buvo pritaikyta fotokamera prie paciento. Šios procedūros metu buvo panaudota metrinė fotokamera, dėl to, kad šis tyrimas reikalauja labai tikslų rezultatų. Tyrimo metu, burnos srityje padarytos net 50–60 fotonuotraukos. Taigi šiuo bandymo metu buvo įrodyta, kad fotogrametrija leidžia tiksliai nustatyti implantų poziciją žandikaulio srityje ir iš gautų fotonuotraukų sukurti 3D modelį. Gaunama patikima ir svarbi informacija tiesiogiai iš paciento (Oltra *et al.* 2015). Taigi jau dabar yra gaunami realūs ir naudingi rezultatai medicinoje panaudojus fotogrametrijos mokslą, bet norint užtikrinti šio mokslo pritaikymo tikslumą būtini tikslesni matavimai, tokie kaip lazerinis skenavimas. Fotogrametrijos technologijos pritaikymo variantai medicinoje pateikiami iliustracijoje (6 pav.).



6 pav. Fotogrametrijos technologijos taikymas medicinoje

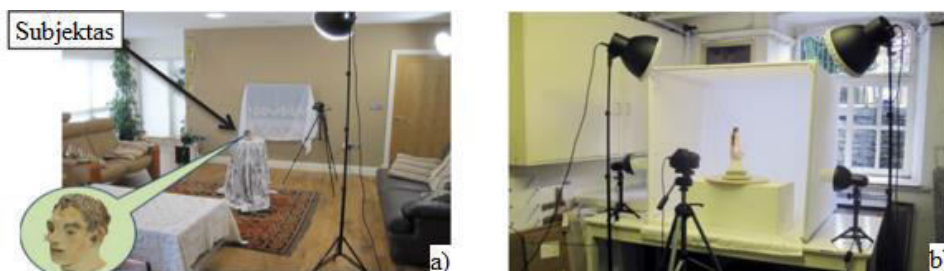
Fotogrametrija – vienas iš būdų dokumentuoti labai svarbų ir brangų istorinį paveldą. Šis būdas padeda lengviau analizuoti ir interpretuoti įvairias hipotezes, susijusias su žmonijos atsiradimu. Atsižvelgiant į šią technologijos raidą, visi archeologiniai atradimai iš piešinių turi būti perkelti į skaitmenizuotą erdvę, kuri gali būti sudaryta tiek iš fotografijų, tiek iš palydovinių

vaizdinių ar radarų užfiksuotų objektų, esančių po vandeniu ir po žemės paviršiumi. Pastaroji povandeninė fotogrametrija yra itin svarbi archeologijoje, nes visa informacija susijusi su žmonių atsiradimų vis dar glūdi vandenyje. Niekam nėra paslaptis, kad lazerinis skenavimas yra tikslesnis matavimo būdas nei fotografavimas, bet tam tikroje nepalankioje aplinkoje skenavimo darbai nėra galimi, pvz., kaip povandeniniai kartografavimo darbai (7 pav). Literatūroje galima aptinkti įvairios informacijos, kaip yra atliekami povandeniniai fotografavimo darbai, kaip yra apdorojami gauti duomenys ir kaip jie tiriami nuotoliniu būdu, pvz., viename McCarthy'io straipsnyje yra pateikiami vieno eksperimento rezultatai, kurie gauti vieno bandymo metu, kai buvo sukurtas aukštos raiškos povandeninio archeologinio radinio 3D modelis. Tyrimo metu gauti rezultatai yra neįtikėtini, nors šiam bandymui buvo naudotos vos 200–300 svarų kainuojančios fotokameros (McCarthy *et al.* 2014).

Pateikti tik būtiną informaciją apie subjektą yra sudėtinga, nes dažniausiai jis yra apsuptas skirtingos aplinkos, kuri daro tam tikrą poveikį 3D fotomodelio kūrimui. Viename tyrime buvo dirbtinai sukurtos dvi skirtingos aplinkos – atvira ir uždara (8 pav.). Bandymo metu dirbta su dvejomis skirtingomis programinėmis įrangomis (*AutoDesk's 123D Catch* ir *PhotoScan Pro*). Taip pat gautiems taškų masyvams filtruoti bei konvertuoti juos į STL failą panaudota trečia programinė įranga *Netfabb's Studiopro4*. Šio bandymo metu stengtasi įrodyti, kad norint sukurti vizualų 3D modelį, kuris tiktų tolimesniems tyrimams, reikalingos minimalios kompiuterinės žinios bei vidutinio diapazono skaitmeninė kamera. Taip pat pastebėta, kad sukurti tinkamą 3D modelį iš pirmų fotonuotraukų nėra įmanoma, nes galutiniame rezultate gaunama daugybė netinkamų taškų, kuriems pakeisti reikalingos naujos nuotraukos. Pastebėta, kad skaitmeninis fotografavimas tinkamas yra tik tuomet, kai nebūtini labai tikslūs geometriniai 3D modelio duomenys (Kaufmana *et al.* 2015).



7 pav. Povandeninio archeologinio radinio 3D modelis (Kaufmana *et al.* 2015)



8 pav. Atlikti fotogrametriniai 3D modelio sudarymo bandymai: a) atviroje aplinkoje, b) uždaroje dirbtinėje aplinkoje, kai sukuriamos sienos

Fotogrametrijos mokslas yra neatsiejamas nuo programinės įrangos ir skaitmeninių fotokamerų. Kiekvieno panašaus bandymo metu yra naudojami vis kitokie įrenginiai ir technologijos, todėl galima teigti, kad analitikas tyrinėjantis fotogrametrijos metodų pritaikymą turi turėti dideles žinias apie naujausias programines sistemas, kurios būtų skirtos greitam vaizdų apdorojimui.

Lietuvių autorių straipsnyje yra pateikiama kultūros paveldo objektų fotogrametrinių bei lazerinio skenavimo technologijų svarba (Sužiedelytė–Visockienė *et al.* 2015). Sužiedelytės–Visockienės ir kitų autorių straipsnyje detalai aprašomos fotogrametrijos taikymo sritys, tikslai ir metodai, norint išsaugoti objektų kultūrinės vertybės ne vien Lietuvoje, bet ir kitose pasaulio šalyse, tokiose kaip JAV ir Anglijoje. Taip pat aptarti kultūros paveldo objektų duomenų bazių kūrimo būdai ir galimybės tiek Lietuvos rinkos, tiek kitų šalių rinkos atžvilgiu. Šiame straipsnyje tirtų objektų dekoratyvinių elementų vaizdai iš Užutrakio dvaro pateikti iliustracijoje (9 pav.).

Kitame, iš dalies, tų pačių lietuvių autorių straipsnyje yra aptarta fotogrametrinių ir lazerinio skenavimo darbų svarba įvairiems kultūros paveldo objektams įvairiose pasaulio šalyse – Amerikoje, Anglijoje bei Lietuvoje (Naprytė *et al.* 2017). Išnagrinėtas šių technologijų taikymas, metodai ir tikslai, norint įvertinti jų svarbą bandant išsaugoti įvairias kultūrinės vertybes. Aprašomi tiriamų objektų duomenų bazių kūrimo būdai ir jų panaudojimo galimybės, pvz., kaip iš jau turimų sukauptų skaitmeninių duomenų saugojamų Anglijos Kultūros paveldo duomenų bazėje, buvo sukurtas Alnwick'o pilies 3D vaizdas (10 pav.). Atliktos analizės įvairių šalių kultūrinių duomenų bazėms, nustatant tikslingą jų panaudojimą, šiomis dienomis ir ateityje. Nustatyta, kad daugelis šalių renkasi loginį modelį (kas, koku, kokia ir kt.), kuriant kultūrinio paveldo objektų duomenų bazes (DB). Daugelyje pasaulio šalių yra paplitusi *ArcGIS* kultūrinių objektų informacinių duomenų bazių kūrimo programa, kuri skirta generuoti paprastas statistines duomenų bazes bei sudaryti interaktyvius žemėlapius. Tai gi, šiame straipsnyje yra pateikta tekstinis duomenų bazės panaudojimo būdas, kai iš seniai išmatuotų fotogrametrinių duomenų sumodeliuotas kultūrinio paveldo 3D objekto modelis. Pabrėžiama, kad Anglijoje fotogrametrinių duomenų bazės yra sudarytos 2000–2005 metais, taip pat ir Lietuvoje analogiški duomenys pradėti kaupti 2000 metais.



9 pav. Dekoratyviniai elementai iš Užutrakio dvaro



10 pav. Anglijos Alnwick'o pilies 3D modelis iš taškų debesies

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir darbo uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros apie nuotolinio matavimo sistemas apžvalgą nustatyta, kad fotogrametrija yra labai senas mokslas, kuris siekia net Leonardo Da Vinčio laikus. Nuo pat pirmųjų išradimų panašių į fotokameras buvo matyti, kad jos naudojamos tyrimams, o ne menui, kas ir lėmė fotogrametrijos mokslo pradžią. Pirmiausia, fotogrametrija buvo pradėta naudoti ortofotografiniams žemėlapiams kurti, po to tobulėjant technologijoms, fotogrametrijos mokslas buvo pritaikytas prie kitų įvairių ir populiarių specialybių, pvz., kaip prie archeologijos, medicinos, geodezijos ir kt. Platus šio mokslo panaudojimo diapazonas privertė inžinierius nepaliaujamai kurti įvairias technologijas, kurios automatinio būdu analizuotų skaitmeninius vaizdus.

Šiame skyriuje buvo išanalizuoti trys nuotolinių matavimų sistemos: antžeminė, oro ir lazerinio skenavimo. Seniausiu metodu yra laikoma antžeminė fotogrametrija, kuri nagrinėja objektų fotografavimo metodus nuo Žemės paviršiaus. Šiais laikais labiausiai naudojama nuotolinių tyrimų sistema yra fotografavimas iš aukšto (oro). Ši sistema yra populiariausia dėl to, kad objektai yra fotografuojami viena fotokamera iš visų pusių ir iš oro. Naujausia sistema yra lazerinis skenavimas. Ši sistema plačiai naudojamas daugelyje specialybių, pvz., kaip kartografavime. Skenavimas lazeriu yra naujas efektyvus žemės paviršiaus bei objektų skaitmeninio atvaizdavimo metodas. Skenavimas lazeriu ypač veiksmingas ten, kur sunku arba negalima taikyti stereofotogrametrijos būdo (užstatyta, medžiais apaugusi teritorija, jūros pakrantė), taip pat kuriant 3D pastatų bei miestų modelius, tiriant miškų, elektros linijų, užsemtų teritorijų, augmenijos ir kitokių objektų būklę. Galimybė greitai ir lengvai padaryti detalią miškingos teritorijos reljefo nuotrauką, formuoti miestų 3D modelius, atlikti kai kuriuos kitus specialius tyrimus – tai lazerinio skenavimo metodo pranašumui, palyginti su aerofotonuotraukos būdais. Tačiau yra vietų, kur

tradicinė fotogrametrija yra efektyvesnė, pvz.: sudarant planimetrinę vietovės nuotrauką, ją patogiau daryti aerofotogrametriniu būdu, toks metodas dažnai yra tikslesnis ir kokybiškesnis.

Tam tikrais atvejais rekomenduojama lazerinio skenavimo atsisakyti, jei reikiamas duomenų tikslumas nėra aukštas. Dėl skenavimo procesui būtinos brangios techninės ir kompiuterinės įrangos – lazerinis skenavimo metodas tolimesnėje darbo eigoje nėra nagrinėjamas.

Taip pat šioje darbo dalyje buvo aptarti du fotogrametriniai metodai: skaitmeninių vaizdų koreliacijos ir aerotrianguliacijos metodai. Šios dvi technologijos leidžia lengvai ir pilnai automatiškai analizuoti skaitmeninius vaizdus ir kurti 3D modelius iš fotovaizdų. Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas (DIC) yra plačiai fotogrametrijoje naudojama matavimo technika, kuri nustato pagrindinio taško poslinkį pagal aplink jį esančius pagalbinus taškus. Aerotrianguliacijos metodas yra oro technologija, kuri fiksuoja ortofotografiją iš judančios skraidyklės, kitaip tariant tai yra „SfM“ ir „DSM“ junginis arba lietuviškai „struktūra iš judesio“ pateikia ortofotografijas, o skaitmeninio paviršiaus modelio sistema sukurta ortofotonuotrauką pateikia atitinkamu masteliu.

Iš sudarytų išvadų formuojami tolimesni darbo uždaviniai:

1. Atlikti laboratorinį bandymą, kurio metu fotokameromis fiksuojamos pasirinkto objekto paviršiaus deformacijos.
2. Atlikti fotografavimą bepilote skraidykle.
3. Pritaikyti aerotrianguliacijos ir skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodus skaitmeniniams vaizdams analizuoti ir erdviniam modeliui kurti.
4. Įvertinti fotogrametrijos metodų patikimumą.

2. FOTOGRAMETRINIŲ METODŲ TAIKYMAS PAVIRŠIŲ ANALIZEI IR ERDVINIŲ MODELIŲ KŪRIMUI

Skaitmeniniai vaizdai gali būti atpažįstami fotogrametriniais skaitmeniniais metodais. Tokie metodai yra taikomi kaip matematinės operacijos. Skaitmeninis vaizdas yra aprašomas pikselio erdvine padėtimi, kuri yra apibrėžiama matrica (Skeivalas *et al.* 2010).

Šioje darbo dalyje nagrinėjamas dviejų fotogrametrinių metodų taikymas. Pirmasis – paviršiaus deformacijų nustatymas taikant skaitmeninių vaizdų koreliaciją, antrasis – erdvinio modelio kūrimas taikant aerotrianguliacijos metodą. Taip pat šioje dalyje aptariami duomenų surinkimo ir apdorojimo metodai bei kokia kompiuterinė įranga ir programos yra naudojamos tyrimų metu.

2.1. Duomenų rinkimo ir apdorojimo etapuose naudoti įrenginiai ir jų specifikacija

Kokybiškiems ir tiksliems tyrimams yra reikalingas tinkamas duomenų rinkinys, o jų apdorojimui būtina gera kompiuterinė įranga ir programos. Be to, kad duomenys būtų vertingi, būtinas ir vartotojas, todėl galima teigti, kad nei vienas duomenų rinkinys nebus veiksmingas, jeigu jame nebus nors vieno iš šių komponentų (Gurklys 2011).

Tinkami duomenis, kurie yra skirti modeliuoti, stebėti ar analizuoti, yra gaunami iš aplinkos, naudodami kompiuterinę ir programinę įrangą, tokie duomenys yra talpinami į duomenų bazę (DB), kuria toliau naudojasi vartotojas. Tokių duomenų rinkimas ir apdorojimas yra būtinas.

2.1.1. Duomenų rinkimo būdai

Duomenų rinkiniai gali būti sudaryti iš įvairiai gautų duomenų. Informacijos rinkimas gali būti gaunamas atliekant tiesioginius matavimus arba netiesioginius. Tiesioginiai matavimai yra vadinami tokie, kurių metu matuojami dydžiai yra nustatomi tiesiogiai iš prietaiso rodmenų, o netiesioginiai matavimai yra tokie, kurių dydžio vertė randama kaip kito dydžio funkcija arba panaudojus kitus įrenginius ar technologijas. Fotogrametriniai darbai yra kombinuoti tiesioginių ir netiesioginių matavimų sistema (Vilūnas 1975). Skirtingai nuo autorių, tiesioginiai matavimai gali būti įvardyti kaip pirminiai duomenų surinkimo būdai, o netiesioginiai – antriniai.

Fotogrametrijoje pirminis duomenų surinkimas vyksta tiesiogiai objektuose, tai yra laukuose ar laboratorijoje. Tokiu būdu gaunami duomenys yra reikiamo tikslumo ir apimties. Populiariausi rastrinių (fotonuotraukų) duomenų rinkimo būdas iš pirminių duomenų šaltinių yra nuotolinių matavimų sistemos (lazerinis skenavimas, aerofotografavimas, antžeminis fotografavimas). Šis matavimo būdas yra tiesiogiai siejamas su laiku. Šiame darbe atliekami dvejopi pirminiai duomenų rinkimo būdai – techniniais įrenginiais ir fotokameromis. Pirmoje dalyje darbas atliekamas

laboratorijoje, tiriant armuotojo betoninio bloko paviršiaus poslinkį. Bandymo metu prie bloko buvo prijungti jutikliai, kurie tiesiogiai matavo paviršiaus deformaciją realiu laiku. Antroje darbo dalyje tiesioginiai matavimai buvo atliekami lauke fotografuojant pastatą su bepilote skraidykle. Šiuo būdu skaitmeninės fotonuotraukos gautos iš drono, buvo tiesiogiai importuojamos į reikiamą fotonuotraukų saugyklą – atminties kortelę.

Antrinis duomenų rinkimo būdas dar vadinami netiesioginis, kai rezultatai yra funkcijomis išvedami iš žinomų verčių arba gaunami tiesiogiai gautus duomenis perleidžiant per jau sukurtas programines įrangas. Šis būdas tampo plačiai naudojamas tarp įvairių specialistų kaip inžinierių, architektų, archeologų ar medicinos darbuotojų. Inžinieriai kuria įvairias skaitmenines duomenų bazines kaip BIM – Informacinis Pastato Modeliavimas (angl. k. *Building Information Modeling*). BIM – tai procesas, kurio metu yra kuriama ir valdoma visa statinio informacija visais jo gyvavimo ciklais, nuo pirminės projekto koncepcijos iki jo nugriovimo (He *et al.* 2017). Fotogrametrijoje iš jau sujungtų fotonuotraukų kuriamas naujas gaminyss kaip 3D statinio modelis, kuris gali būti apjungtas su BIM ir įgyti naują reikšmę moduliavime. Taip pat fotonuotraukose gali būti atlikti tiesioginiai matavimai, bet gauti duomenys bus antriniai. Šiame tiriamajame darbe antriniai duomenys buvo renkami: pirmoje darbo dalyje iš fotonuotraukų apskaičiuotas armuotojo betono bloko paviršiaus poslinkis, o antroje iš tiesiogiai gautų duomenų surasta RMS paklaida.

2.1.2. Tyrimui naudoti įrenginiai ir programinė įranga

Tyrimo metu naudotos skaitmeninės kameros yra *Imager E-lite* stereomerinė kamera, *Canon EOS 77D* ir *Zenmuse X3*. Trumpai apie kiekvieną naudotą fotokamerą:

- ***Imager E-lite***. Ši kamera pasižymi dideliu jautrumu, aukšto rezoliucijos, skaitmeninė kamera, kuri turi įterptą lustą su pažangia nuskaitymo programa. Kameros fiksuoja 12 bit dydžio skaitmenines fotonuotraukas. *Imager E-lite* kameros įrenginys turi glaudžią sąsają su „*Gigabis Ethernet*“ technologija, kuri yra skirta matavimams atstumu iki 100 metrų. Šios kameros palyginti su kitomis metrinėmis stacionariomis kameromis yra lengvos, todėl to labai lengva keisti jų padėtį. Bandymo metu naudota 2–5 megapikselių kameros.
- ***Canon EOS 77D*** skaitmeninė, mėgėjiško tipo, nemetrinė kamera.
- ***Zenmuse X3*, *DJI FC350*** skaitmeninė kamera, kuri tyrimo metu buvo pritvirtinta prie bepilotės skraidyklės *DJI Inspire*.

Tyrimui naudota programinė įranga:

- ***GOM Correlate 2017***. Ši programa yra nemokama, skaitmeninio vaizdo koreliacijos ir medžiagų tamprumo vertinimo, testavimo ir rezultatų apdorojimo programinė įranga.

• **DaVis iš LaVision.** Optinis įrankis skirtas tyrinėti kietus bei granuliuoto paviršiaus objektų formas ir jų deformacijas dėl aplinkos jėgų. „DaVis“ apjungia pažangią skaitmeninio vaizdo koreliacijos (DIC) sistemos algoritmus su aukščiausios kokybės fotokameros įrenginiais. Šia kombinuota sistema galima sukurti ir išsamiai atlikti medžiagų analizę. Ši sistema yra pritaikyta dirbti tiek lauko sąlygomis, kiek specializuotoje laboratorijoje. Taip pat ši įranga yra susieta su skaitmeninio garso koreliacija, tai yra ši programinė įranga suteikia galimybę kiekybinei vizualizacijai. Būtent šiais sistemai yra sukurta „DaVis“ programinė įranga, su kuria galima ne tik identifikuoti defektus ir įtrūkius, kol šie matomi neapdorotame paveiksle, bet tuo pačiu kiekybiškai įvertinti viso tūrio deformacijos pasiskirstymą, medžiagos pasislinkimo svyravimą bei juos susieti su medžiagos faktiniais neatitikimais.

• **Context Capture (Bentley sistema).** Programa skirta įvairias fotonuotraukas rekonstruoti į 3D modelį. Ši programa naudoja aerotrianguliacijos metodą (Alrajhi *et al.* 2016). Naudojant Bentley kompanijos produktą „Context Capture“ galima kurti įvairaus dydžio 3D modelius nuo paprasčiausių iki sudėtingiausių realaus pasaulio modelių. Kūrimo procesas vykdomas parinkus paprasčiausias fotonuotraukas. Priklausomai nuo projekto apimties yra dvi galimybės pasirinkti programą arba „Context Capture“ arba „Context Capture Center“. Pastaroji naudojama, kai projektas yra didžiulės apimties, kai reikalingas ne vienas darbalaukis lygiagrečiai duomenų apribojimams vykdyti ir kai projektavimui reikalingi serveriai, norint duomenis apdoroti greičiau. Paprastesnė versija yra „Context Capture“, kuri leidžia darbus atlikti personaliniu kompiuteriu su iki 10 gigų pikselių fotonuotraukomis. Su mažomis investicijomis į laiką ir kaštus brangiai kompiuteriniai įrangai įsigyti bei specialistų parengimui, su „Context Capture“ galima sukurti tikslius realaus pasaulio modelius. Taip pat galima sukurti smulkių detalių, aštrių kampų ir geometriškai tikslius 3D modelius, panaudojus fotonuotraukas iki 30 gigų pikselių, kurios padarytos panaudojus paprasčiausias fotokameras.

2.1.3. Tyrimo metodika

Fotogrametrija plačiai naudojama tarp įvairių sričių specialistų. Bandant šią mokslo šaką pritaikyti skirtingose srityse, kyla skirtingos problemos, todėl kiekvienai jų yra parenkami skirtingi fotogrametrijos metodai, įrenginiai ir tyrimo metodika. Šiame tiriamajame darbe pateikiami du skirtingi fotogrametrijos mokslo šakos pritaikymo būdai. Pirmojoje darbo dalyje skaitmeniniams vaizdams analizuoti pritaikoma skaitmeninių vaizdų koreliacijos (DIC) metodas, o antrojoje dalyje panaudojamas aerotrianguliacijos metodas, kurio pagrindu kuriamas erdvinis modelis.

Darbo eiga apibrėžiama žingsnių modeliu, kuris dažniausiai vaizduojama kaip būsenų ryšių schema. Jeigu modeliui sudaryti naudojami ryšiai tarp būsenų yra sudėtingi, atitinkamai projektuojamos schemas, kurios taikomos į objektus, tai tokie ryšiai bus orientuoti į modeliavimo

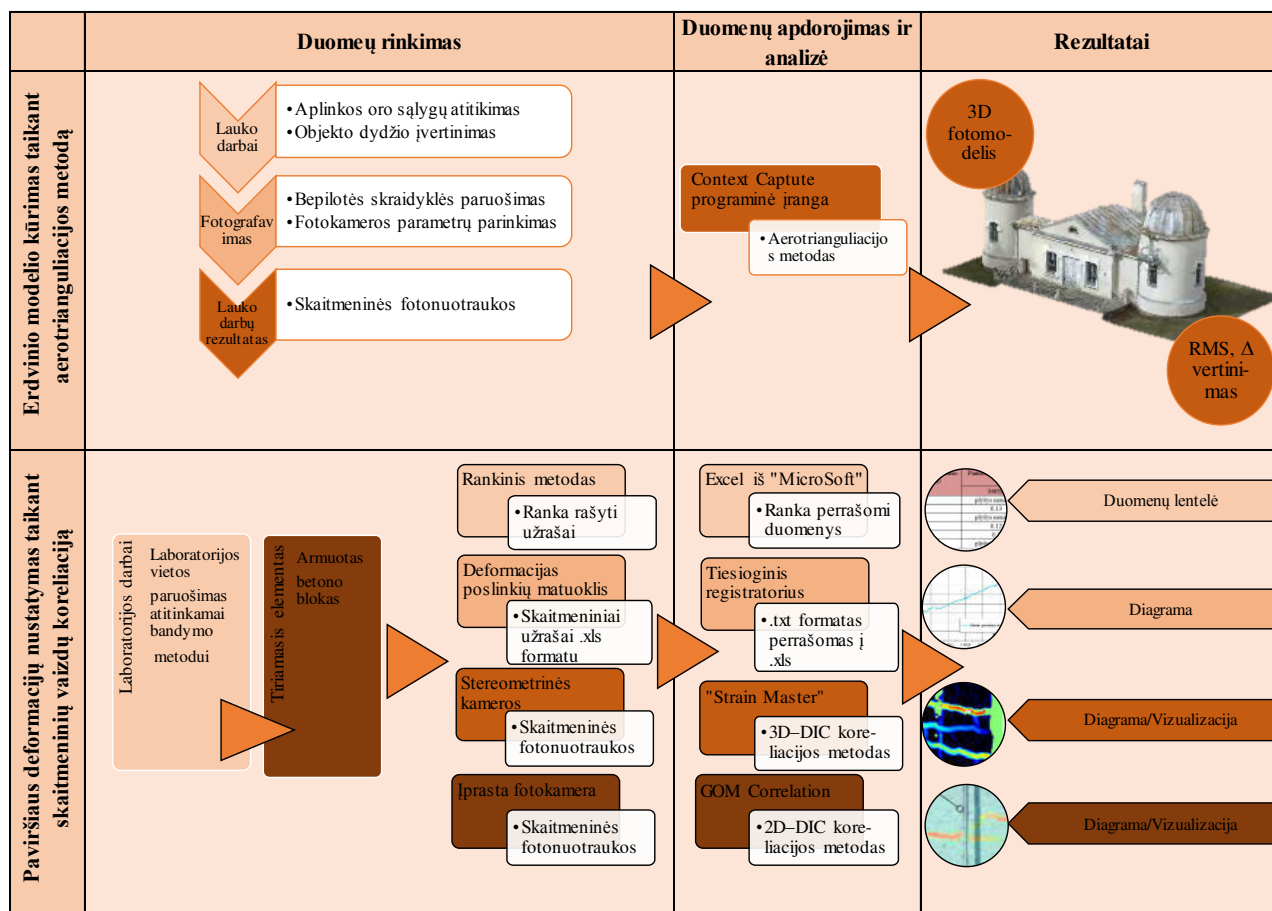
sistemą. Daugeliui tokių sistemų pritaikyta yra UML – unifikuota modeliavimo kalba (angl. k. *Unified Modeling Language*), kuri atitinkamomis žymėmis išreiškia objektų modelį. UML taiko daugelis įmonių, pirmaujančių programinės įrangos ir duomenų bazių sudarymo srityje. UML nėra projektavimo metodologija, tai žymėjimo sistema. UML kalba leidžia taikyti į objektus orientuotą projektavimo metodiką, pasirinktam modeliui realizuoti (Kumetaitienė 2010).

UML yra trumpinys nuo „*Unified Modeling Language*“, išvertus į lietuvių kalbą suprantamas kaip „Vieninga modeliavimo kalba“. Būtina įsidėmėti, kad tai kalba, o ne metodas. UML neapibrėžiama kaip sistema, kuri turi būti realizuota, tai tik priemonė skirta kuriamos sistemos dokumentavimui. Kaip anksčiau buvo minėta, vieningo modeliavimo kalba naudojama programinės įrangos dokumentavimui. Kai sistema yra sudėtinga, ji privalo turėti išsamią specifikaciją, kurioje pateikiamos UML diagramos. Šių diagramų pagalba yra atskleidžiama programos logika, jos sudėtiniai elementai ir sąveikos tarp jų (Faitelson 2017). Įmonėse analitikai kuria specifikaciją pagal užsakovo poreikius, toliau specifikacija yra naudojama programuotojų ir testuotojų. Klaidinga ir neišsami specifikacija, gali būti viena iš pagrindinių projekto žlugimo priežasčių, nes analitiko klaidos atsispindi sistemos realizacijoje, o tada jas ištaisyti tampa labai brangu. Norint išvengti šių nemalonumų, būtina mokėti skaityti ir tikslingai panaudoti UML diagramas.

Apžvelgus vaizdinio modeliavimo ypatumus, peršasi išvada, kad UML yra geriausias metodas programinio produkto dokumentacijai sudaryti. UML yra standartinė tam reikalui skirta kalba. Prieš pradėdant bet kokį bandymą ar tyrimą, būtina iš anksto susidėlioti darbo žingsnius, todėl šiame tyrime yra naudojama grafinis darbo eigos atvaizdavimo metodas, kai žingsniai yra pateikiami diagrama (11 pav.). Šio tiriamojo darbo metodinės dalies išdėstymo schemoje yra pateiktos dvi pagrindinės grafos, kurios atvaizduoja dviejų skirtingų fotogrametrijos metodų panaudojimo būdus. Pirmasis yra skirtas DIC sistemai, kuri skirta statybinių konstrukcijų deformacijoms analizuoti, o antroji grafa simbolizuoja aerotrianguliacijos metodo pritaikymą 3D modeliui kurti.

Pagal pateiktą darbo metodiką (11 pav.) matyti, kad šiame žingsnyje darbas skaidomas į dvi dalis. Pirmoje darbo dalyje tiriamas daiktas yra statybinė konstrukcija – armuotojo betono blokas. Bandymo metu yra stebimas deformacijos pasiskirstymas betono bloko paviršiuje. Šioje dalyje gaunami rezultatai fiksuojami keturiais skirtingais būdais, iš kurių du yra fotogrametriniai: pirmasis paprasčiausias būdas yra betono bloke esančius įtrūkius matuoti optiniu mikroskopu, antras – automatiškai poslinkiu jutikliu fiksuojami duomenys, kurie laidais perduodami į kompiuterinę įrangą, o kiti likę du yra fotogrametriniai, kurių rezultatai yra gaunami iš programinės įrangos apdorotų fotovaizdų. Visais šiais būdais yra stebima betoninio bloko deformacija. Pirmieji du yra fiksuojami dėl duomenų tikslumo įvertinimo. Deformacijos poslinkio matuokliu gauti duomenys yra atskaitiniai ir priimami kaip tiksliausi, pagal kuriuos bus galima vertinti kitus, fotogrametrinius

būdu gautus rezultatus. Antroje tyrimo dalyje yra kuriamas pastato 3D modelis iš fotovaizdų, kurie yra sujungiami panaudojus fotogrametrijos metodą – aerotrianguliaciją. Antrame darbo etape yra vertinamas modelio tikslumas.



11 pav. Tiriamojo darbo metodinės dalies iliustravimas

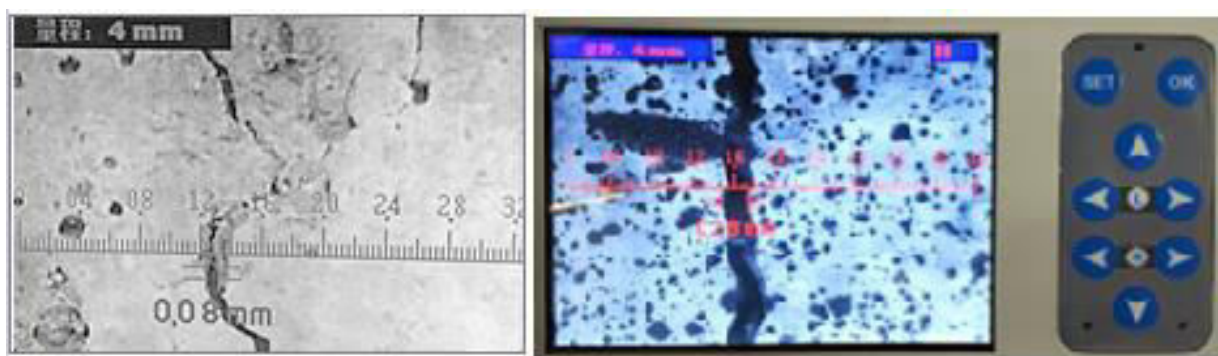
2.2. Paviršiaus deformacijų nustatymas taikant skaitmeninių vaizdų koreliaciją

Šis bandymas yra skirtas nustatyti kaip kinta betoninio bloko paviršiaus plotas priverstinai veikiamos tempimo jėgai, laiko diapazone. Bandymas vyksta laboratorijoje armuotą betoninį bloką pritvirtinus prie preso mašinos. Vienu metu atliekami keturi bandymai su viena statybine konstrukcija, gaunami duomenys fiksuojami keliais būdais: optiniu mikroskopu, deformacijos poslinkių matuokliu – LVDT, stereometrinėmis kameromis ir mėgėjiška fotokamera. Šie tyrimai yra atliekami vienu metu dėl to, kad šiuo metu nėra vienos geros technologijos, kuri leistų matuoti ir stebėti statybinės konstrukcijos paviršiaus deformaciją realiu laiku. Po kol kas paviršių pleišėjimą galima užfiksuoti tik paskutinėje stadijoje ir pamatuoti tikslią deformaciją tik tarp dviejų taškų.

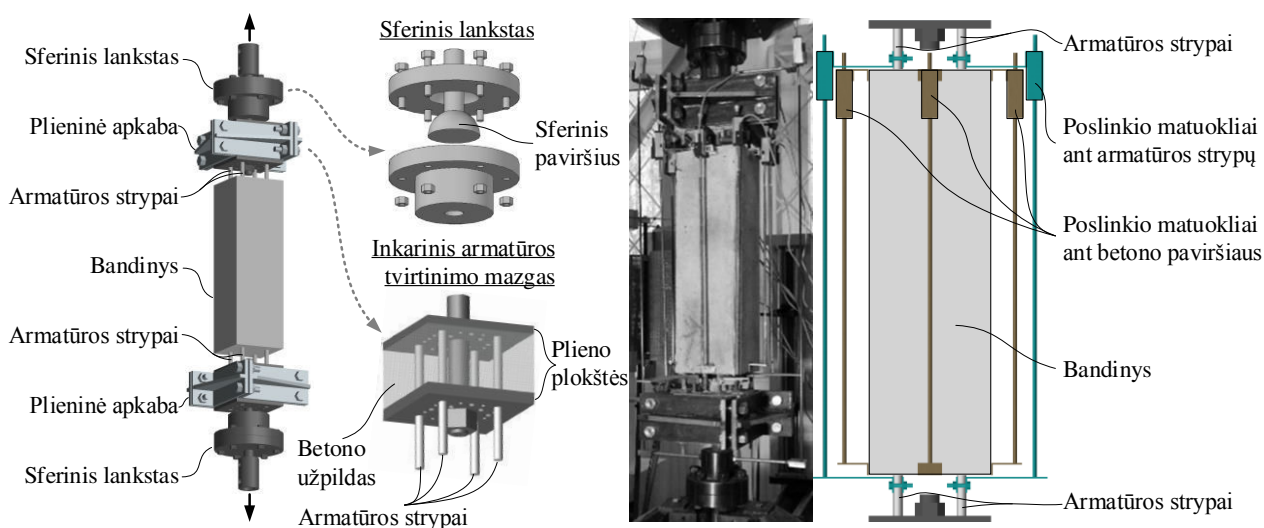
Pirmasis būdas yra, atsivėrusį plyšį betono paviršiuje, išmatuoti optiniu mikroskopu. Matavimai vyksta sustabdžius preso mašiną, pažymimi ir išmatuojami, tik akimi įžiūrimi, atsiradę įtrūkimai. Viso bandymo metu presas buvo stabdomas du sykius, kai apkrova pasiekė 94,2 kN jėgą ir ties 122 kN. Plyšiai matuoti optiniu mikroskopu, kuris matuoja siūlės įtrūkį 0,01 cm tikslumu.

Vaizdų pavyzdžiai, kuriuos matome optinio mikroskopo ekrane, priklausomai juo mikroskopo rūšies (12 pav.).

Tuo pačiu metu yra atliekamas antras bandymas – betoninio bloko paviršiaus poslinkio tyrimas LVDT sistema, tai yra armuotojo betono prizminis tempimo bandymas deformacijos poslinkių matuokliais. Šiuo metodu ties tiriamojo bloko paviršiaus plotu įtaisomi metaliniai strypai, ties kurių galais yra pritvirtinami jutikliai – poslinkio matuokliai. Šie jutikliai fiksuoja, ties bloko paviršiuje esančiais metaliniais strypais, atsiradusias įvairias anomalijas, kurios yra interpretuojamos kaip betoninio bloko paviršiaus įtrūkiai. Jutikliais rezultatai yra pirmiausia registruojami, po to tiesiogiai įkeliami į kompiuterį, kurio monitoriuje galima stebėti realiu laiku gaunamus rezultatus. Iš gautų duomenų sudaroma kitimų diagrama. Poslinkių matuokliai yra tvirtinami prie statybinės konstrukcijos paviršiaus (13 pav.).



12 pav. Plyšio pločio matavimas optini mikroskopu



13 pav. Armuotojo betoninio bloko tempimo bandymas fiksuojant elemento paviršiaus deformacijas poslinkių matuokliais

Kiti du būdai atlikti tyrime yra fotogrametriniai, kai įtrūkimai yra fiksuojami fotokameromis. Pirmasis toks metodas yra panaudoti dvi metrinės kameras sujungtas į vieną sistemą, kurios vadinamos yra stereometrinėmis kameromis. Šiam būdai yra naudojamos stereokameros, kurios fiksuoja viso bloko paviršiaus deformacijas per atitinkamą laiką. Visi

gaunami duomenys tiesiogiai perduodami į kompiuterinę sistemą. Kitas metodas yra betoninio bloko paviršiuje atsiradusias siūles fiksuoti įprasta skaitmenine fotokamera. Šiuo būdu gaunamos skaitmeninės fotonuotraukos, kurios yra apdorojamos kompiuterine programa.

Stebint armuotojo betoninio bloko prizmių tempimo bandymą šiais keturiais būdais, atitinkamai kiekvieną yra pritaikomi įvairūs prietaisai, kompiuterinės įrangos ir programinės sistemos. Mažiausiai įrenginių reikalaujantis būdas yra rankinis, kuriam reikalingas tik optinis mikroskopas. Sekantis metodas yra poslinkio matuokliais – LVDT, kuris fiksuoja pokyčius, įvykusius ant betoninio bloko paviršiaus. Norit gauti duomenis realu laiku, šie yra stebimi ir analizuojami, todėl privalu turėti atskirą kompiuterinę įrangą, kurios monitoriuje būtų įmanoma atlikti gaunamų duomenų monitoringą. Kiti du būdai yra fotogrametriniai. Šiems tyrimo būdams reikalingos fotokameros, kurios skiriasi savo vidiniais parametrais. Dėl skirtingų kameros vidinių geometrinių parametrų, gaunamas skirtingas rezultatų tikslumas. Taip pat skirtingu būdu gauti duomenys analizuojami atitinkamai fotogrametriniais metodais: stereometriniu būdu gauta informacija analizuoja erdvinės koreliacijos metodu, o įprasta fotokamera gauti duomenys yra analizuojami skaitmeninių vaizdų plokštuminės koreliacijos metodu. 2D–DIC metodo tyrimą galima atlikti nemokamai, panaudojus atviro kodo programinę įrangą *GOM Correlate*, o 3D–DIC tyrimas yra paremtas brangios sistemos „*LaVision*“ sistema.

2.2.1. Plokštuminės koreliacijos duomenų rinkimas ir analizavimo procesas

Pirmiausia norint gauti kuo tikslesnius tyrimo rezultatus yra privalu tinkamai parengti vietą laboratorijoje bei parinkti tinkamą aplinką ir ją veikiančius veiksnius, pvz., kaip tinkamas šviesos kiekis. Kadangi vienu metu bandinys yra tiriamas keturiais būdais, tai ir aplinka privalo būti sukurta kuo palankesnė jiems visiems. Daugiausia pasirengimo reikalauja fotografavimas, šiems būdams keliamo sąlygos yra tokios: subjekto ir operatoriaus tinkama padėtis, parenkamas tinkamas apšvietimas bei reikiama kompiuterinė įranga. Tiriamas objektas turi būti paruoštas atitinkamai pagal dydį, spalvą ir paviršių. Subjektas negali būti, šiuo atžvilgiu, per didelis ar per mažas, patogiausia yra jei daiktas yra spalvingas ir turi didelę spalvų įvairovę. Svarbiausia yra, kad objektas neturėtų požymio atspindėti krentančią šviesą, todėl betoninio bloko tiriamoji pusė yra išpurškiamas dažais, kad bloke esantys oro plyšiai būtų kuo tiksliau atpažįstami fotokameros objektyvo. Šis blokas pasižymi mažu šviesos atspindėjimo koeficientu. Būtina pašalinti aplinkinius objektus, kurie darytų įtaką galutiniams rezultatams.

Priklausomai nuo subjekto, apšvietimas privalo būti parinktas taip, kad pagerintu matomą lauką, todėl atliekant bandymą buvo kiek įmanoma labiau sumažintas natūralaus šviesos šaltinis bei panaudota dirbtinė šviesa, kuri buvo tiesiogiai nukreipta į tiriamą betoninį bloko paviršių. Tyrimui parenkamos fotokameros su atitinkamais vidiniais parametrais

Fotogrametrinių tyrimų rezultatai pateikiami skaitmeniniai fotovaizdais, dėl kurių kiekio ir rezoliucijos priklauso duomenų apdorojimo greitis. Kuo didesnis duomenų apdorojimo kiekis, tuo ilgiau rezultatai yra analizuojami ir ruošiami (Li *et al.* 2016). Todėl šio tyrimo dalyje naudojami kompiuteriai yra parinkti pagal naudojamas programines įrangas. Vykdam bet kokius tyrimus, kuriems reikalingos įvairios programos, būtina atsižvelgti į šių programų keliamus kompiuterinės įrangos reikalavimus.

Visi tyrimų duomenys gauti keturiais metodais yra parengiami analizei. Šiame bandyme svarbiausi metodai yra fotogrametriniai, kurie ir bus toliau analizuojami. Kiti du būdai prilyginami atraminiais ir laikomi tiksliais. LVDT sistema gauti rezultatai laikomi tiksliausiais, su kuriais bus lyginami fotogrametriniu būdu gauti duomenys. Taigi toliau aptariamos fotogrametriniu būdu gautų duomenų apdorojimas programine įranga *GOM Correlate* ir *DaVis*.

Dirbant su šia *GOM Correlate* programa kaip ir su bet kuria kita, pirmiausia yra kuriamas naujas projektas, kuriam yra suteikiamas pavadinimas ir parenkama failo vieta kompiuteryje.

Įjungus naują projektą, atsivėrusiame pradiniam laukia parenkamas „*Inspection*“ langas, kuriama pradedamas tyrimas. Į projektą atrenkamos ir importuojamos tyrimui reikalingos fotonuotraukos. Visos fotonuotraukos yra užfiksuotos *Canon EOD 77D* fotokamera, fotografuojant parinktas „*manual*“ fotografavimo režimas, todėl visų nuotraukų vidiniai parametrai yra vienodi (2 lentelė).

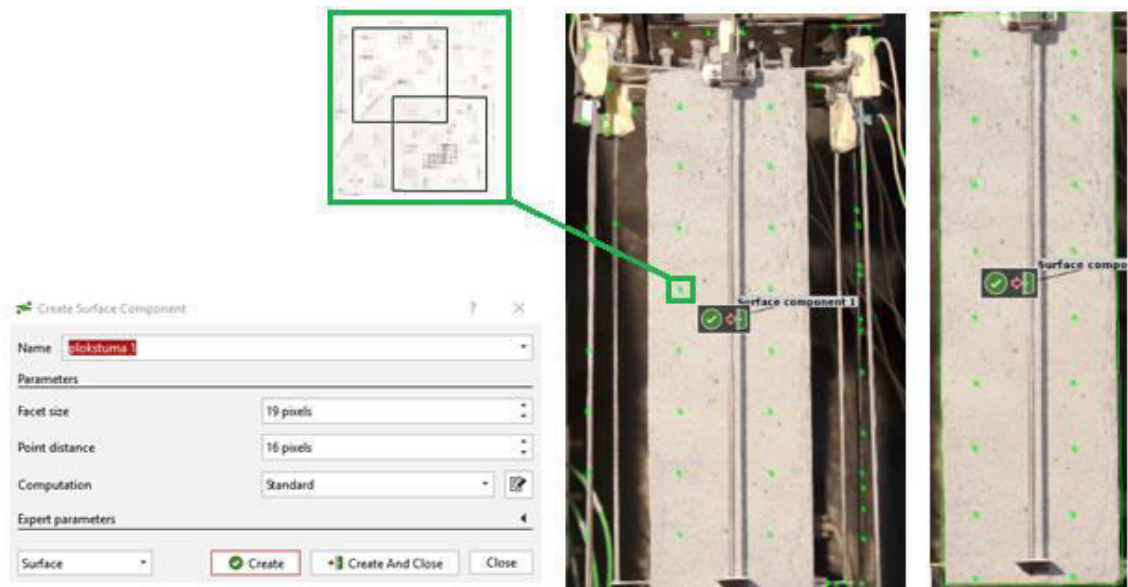
2 lentelė. Bandyme naudotų fotonuotraukų vidiniai parametrai

Parametras	Reikšmė
Dydis	6000x4000 pikseliai
Rezoliucija	72 dpi
Spalvų intensyvumas	24 bit
Spalvų gama	sRGB
ISO greitis	100
Židinio nuotolis	50 mm
Objektyvo dydis	35 mm

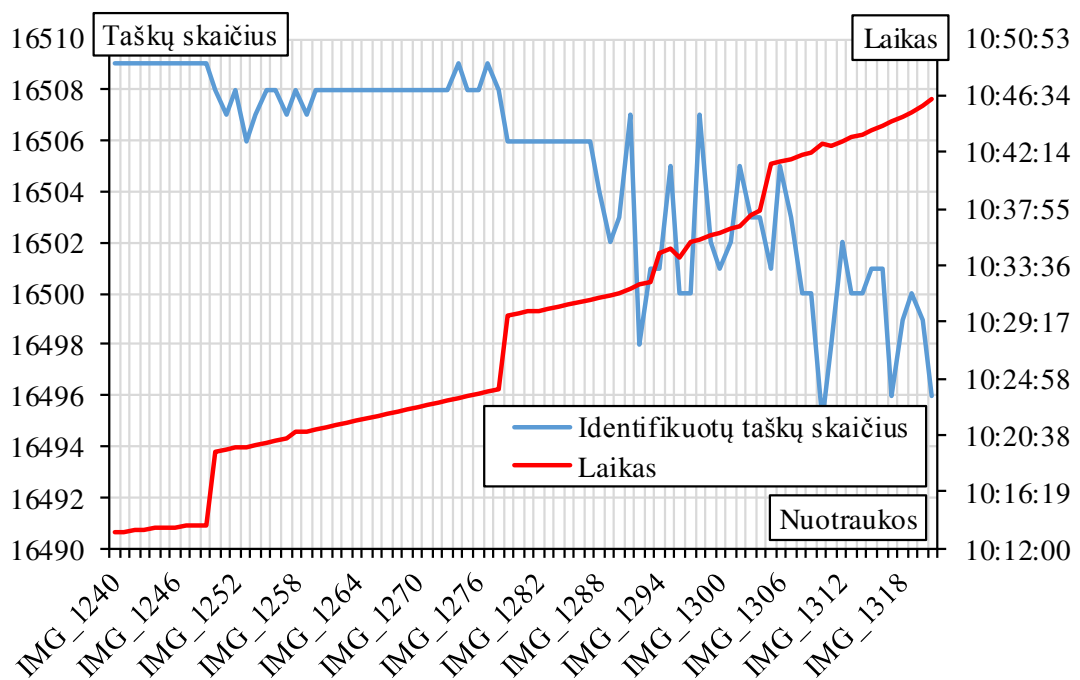
Įkėlus visas fotonuotraukas, programa automatiškai kiekvienoje fotonuotraukoje išbraižo kvadratus 19 ir 19 pikselio dydžio (14 pav.). Programa šiuos taškus identifikuoja pagal stochalinį modelį. Stochalinė struktūra yra atsitiktinai parinkto taško stebėjimas. Norint, kad taškas būtų surastas, jis privalo turėti unikalų pilkos spalvos lygį, pagal kurį yra identifikuojamas programinės įrangos. Tokie taškai yra randami visame fotonuotraukos plote ir visose įkeltose nuotraukose, todėl būtina parinkti tik tiriamąjį plotą, norint sumažinti surastų taškų skaičių. Su atitinkamu programos įrankiu apibrėžiamas tik betoninio bloko stebimas paviršius.

Kuriant paviršinį plotą, galimi keli pasirinkimai: aspekto dydis, atstumas tarp taškų ir apskaičiavimo tipas. Aspekto dydis parenkamas kuo įmanoma mažesnis, bet pakankamai didelis, kad įvyktų apskaičiavimai. Stebėjimas yra atliekamas mėgėjišką kamera, todėl šiuo matavimo būdu atstumas tarp taškų nėra reikalingas. Atstumas yra parenkamas, kai bandymai yra atliekami

metrinėmis kameromis. Apskaičiavimo būdas parenkamas – standartinis. Šiuo būdu parenkami jau *GOM* programos nustatyti parametrai. Tokiu būdu programa identifikuoja kontroliniai taškai – šalia pagrindinio taško esančius kitus taškus, dvikubinės interpoliacijos metodu. Sukūrus tiriamojo paviršiaus plotą, perskaičiuojamas nuotraukoje rastų taškų skaičius. Diagramoje (15 pav.) pateikiamas rastų taškų skaičius, kuris vis kinta laiko atžvilgiu kiekvienoje fotonuotraukoje.



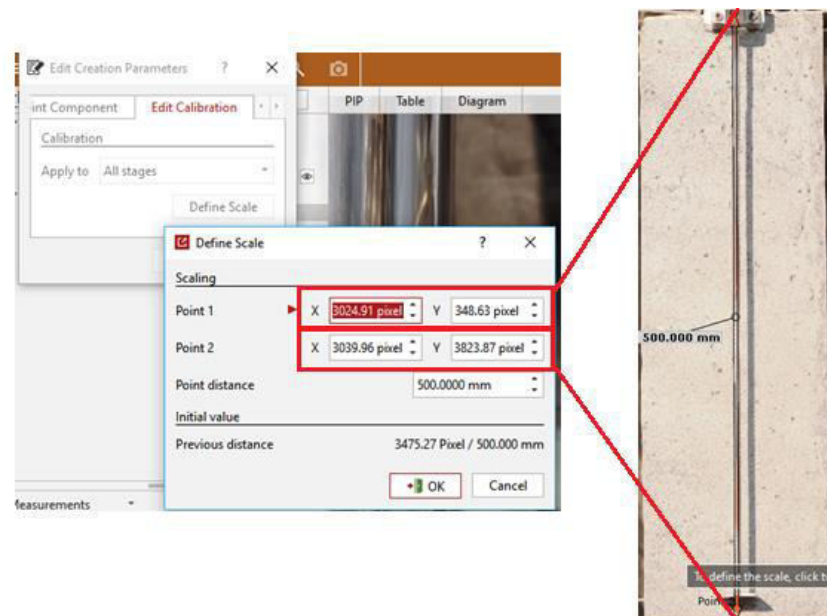
14 pav. Aptikti pririšimo taškai fotonuotraukose



15 pav. Kontrolinių taškų skaičius fotonuotraukose laiko atžvilgiu

Diagramoje mėlyna linija žymi taškų skaičių, o raudona – laiko tėkmę. Kiekvienoje fotonuotraukoje aptiksliai yra randami apie 16505 pagrindiniai taškai, kurių poslinkis tyrimo eigoje bus stebimas. Fotografavimo laikas yra 33 min. Iš viso padarytos ir bandymui parinktos yra 82 fotonuotraukos, iš kurių 81 yra panaudota bandyme.

Siekiant kuo tikslesnių rezultatų, tyrimui yra atrenkamos geriausios kokybės nuotraukos. Fotonuotraukos masteliui nustatyti yra būtina išmatuoti pasirinktą atstumą tarp dviejų fotografuojamojo objekto taškų, kurie privalo būti kuo toliau vienas nuo kito ir fotografuojant aiškiai matomi. Tiriamojo objekto – betoninio bloko ilgis yra apytiksliai 50 cm. Žinant šį dydį visos nuotraukos padaromos mastelinėmis – vykdomi kalibravimo darbai. Pagal programos parinktis pažymime du taškus ir įrašome apytikslį ilgį milimetrais. Programa pagal du atpažįstamus taškus ir atstumą tarp jų, fotonuotraukoms priskiria mastelį (16 pav.). Kalibravimo metu gauti rezultatai yra: fotonuotraukos dydis – 4000 ir 2250 px, rezoliucija – 6,24 dpi. Kadangi kamera buvo stacionariai pastatyta ant trikojo ir valdoma (fotografuojama) per atstumą, visų fotonuotraukų židinio nuotolis vienodas – 3,647 mm. Gauti perspektyvinės distorcijos kampai apie x, y, z : $K1 = -0,1368$, $K2 = 0,119$ ir $K3 = -0,022$. Kadangi kalibravimas vyko iš vienos pirmos fotonuotraukos, tai šios nuotraukos centro koordinatės: $x = 1999,614$, o $y = 1116,174$. Visi šie kalibravimo metu gauti rezultatai dar kitaip vadinami vidiniais kameros parametrais.



16 pav. Dvimatės fotonuotraukos kalibravimas

Tyrimui parenkama funkcija „*Epsilon nuo Y ašies*“. Ši funkcija vadinama „Deformacijos paieška“ pagal pasirinktą ašį. Programoje parenkama vietinė x, y, z koordinatinių ašis. Mūsų atveju tiriamasis objektas buvo tempiamas išilgai, tai yra y ašies kryptimi, palaipsniui didėjant tempimo jėgą kilo. Pagrindinė savybė, kurią reikia žinoti atliekant „*Epsilon Y*“ funkcija yra tai, kad ji paremta spalvos gradiento tenzoriumi, tai yra spalvos gradiento įtempimo pokyčiu, kuris yra aprašomas dvejais elementais : įtėpiu ir posūkiu. Įtempimo pokytis aprašomas funkcija Nr. 5.

$$F = U \cdot R \quad (5)$$

R – posūkio kampas, o U – aprašo tempimą. U elementas dar yra vadinamas dešiniojo ruožo tenzoriumi, kuris aprašo ruožo posūkio kampą ir deformaciją. U elemento funkcija aprašoma Nr. 6.

$$U = \begin{pmatrix} \Delta_x & \Delta_{xy} \\ \Delta_{yx} & \Delta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x + 1 & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y + 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Šioje funkcijoje ε yra elemento santykinio ilgio pokytis.

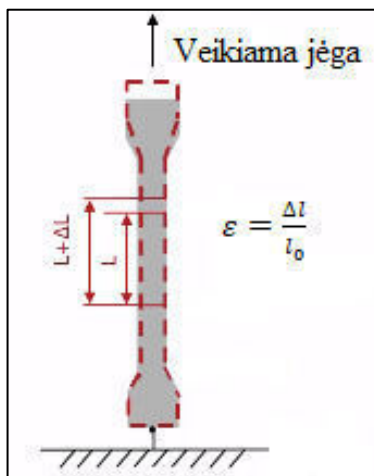
Šioje programoje deformacijos ties ašimis X ir Y visados yra apskaičiuojamos materialinėje koordinačių sistemoje, tai vietinė koordinačių sistema, kuri sukasi kartu su objektu. Kiekvienas tiriamojo objekto surastas taškas turi savo materialinę koordinačių sistemą. Rezultato pavaizdavimui parenkami keli svarbūs elementai, nuo kurių priklauso duomenų vizualizavimas: deformacijos atvaizdavimo tipas, filtras ir tolerancija. Deformacijai pavaizduoti naudotas „*Technical strain*“ tipas, kuris yra aprašomas formule Nr. 7:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

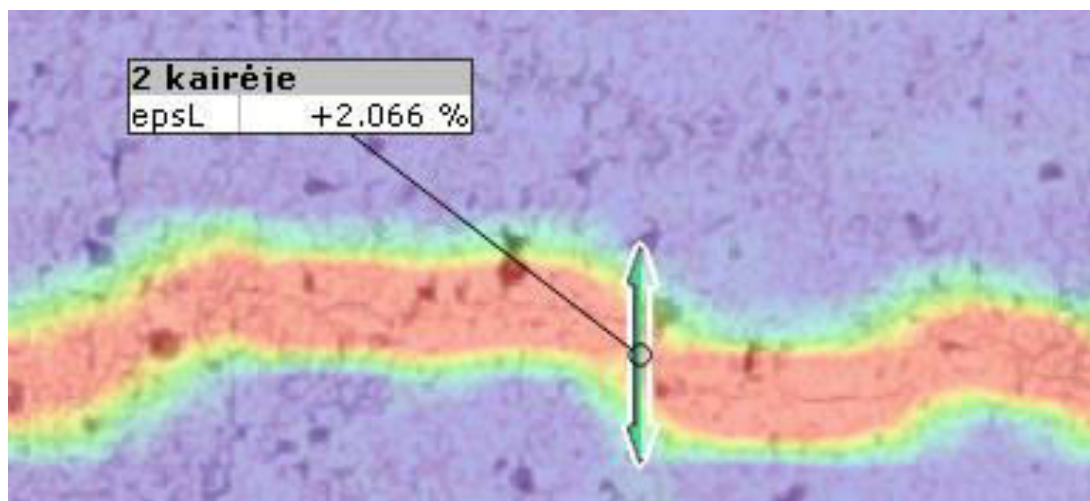
Funkciją aprašyta numeriu Nr. 7 puikiai galima iliustruoti tempimo schema (17 pav.).

GOM Correlate programa turi funkciją „*Ekstensometer*“, kurios dėka yra galimybė stebėti pasirinktos linijos kitimą laiko tėkmėje, kai ši yra veikiamą aplinkinių jėgų. Pavyzdžiui, parenkama vieną prasivėrusią siūlę. Ties ją uždedame ekstensometrą maždaug 1 cm ilgio. Ir aktyvinam funkciją „*Length Change Y*“, kuri perskaičiuoja ties šia linija įvykusį taškų persislinkimą, linijos pokytį. Šioje programoje linija, atvaizduojama rodykle, kurios abiejose galuose yra tvirti, paties užfiksuoti taškai (18 pav.).

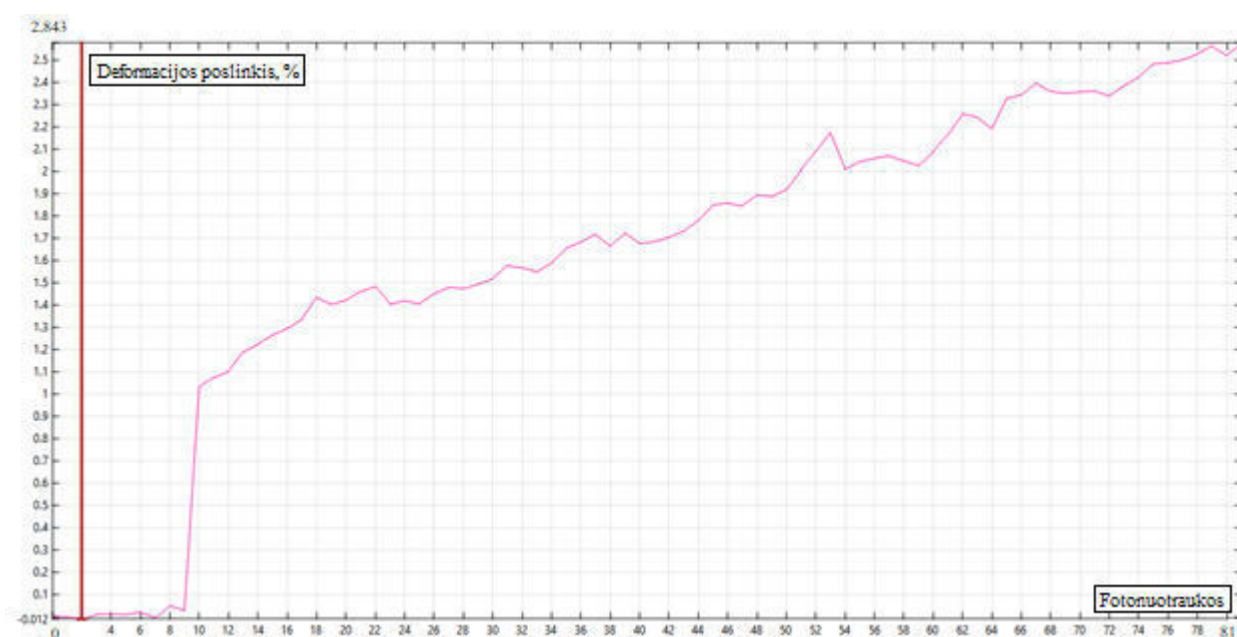
Norint aiškiau pamatyti kaip keitėsi ši linija (18 pav.), ties visomis 81 fotonuotaukomis. Ši programinė įrangą turi vadinamą „*Inspektorių*“, kuriuo galima patikrinti sugeneruotus duomenis. Apačioje diagramoje (19 pav.), yra matoma informacija, kaip palaipsniui linija (18 pav.) kito, tai yra kaip kito atstumas tarp dviejų stebimų, tvirtų taškų.



17 pav. Ekstensometro funkcijos veikimo schema ir formulė



18 pav. Ekstensometru matuotas armuotojo betoninio bloko paviršiuje atsivėrusios siūlės tarpas



19 pav. Ekstensometru matuotų duomenų deformacijos pokyčių diagrama nuo apkrovos

Šios diagramos (19 pav.) apačioje yra pateiktos visos nuo 1 iki 81 fotonuotaukos, o kairėje pusėje yra pateikta deformacijos dydis procentais. Pradinis linijos „2 kairėje“ ilgis buvo 10 mm, kuris lygus 0 % deformacijos. Šiame paveiksle (19 pav.) yra pateikti duomenys, pagal kuriuos galime spręsti, kad užsibrėžta linija (18 pav.), per visą bandymo laiką pakito 2,843 %. Pvz., vertikali linija yra uždėta ties 50 fotonuotauka, šioje vietoje linijos deformacija vertinama 2,066 %, tai reiškia, kad linijos ilgis ties 50 fotonuotauka yra 10,2066 mm. Diagramos kairiajame viršutiniame kampe matome skaičius 2,843 %, kuris aprašo linijos „2 kairėje“ visą deformaciją, o tai yra 0,2843 mm.

Programa deformaciją ϵ apskaičiuoja kaip ilgio koeficiento ir pradinio ilgio santykį. Duomenų tikslumo funkcija parenkama „No tolerances“, tai reiškia, kad elementas nėra limituotas visame diapazone. Statistinis šios funkcijos įvertinimas pateikiamas spalvų spektru, kuris yra

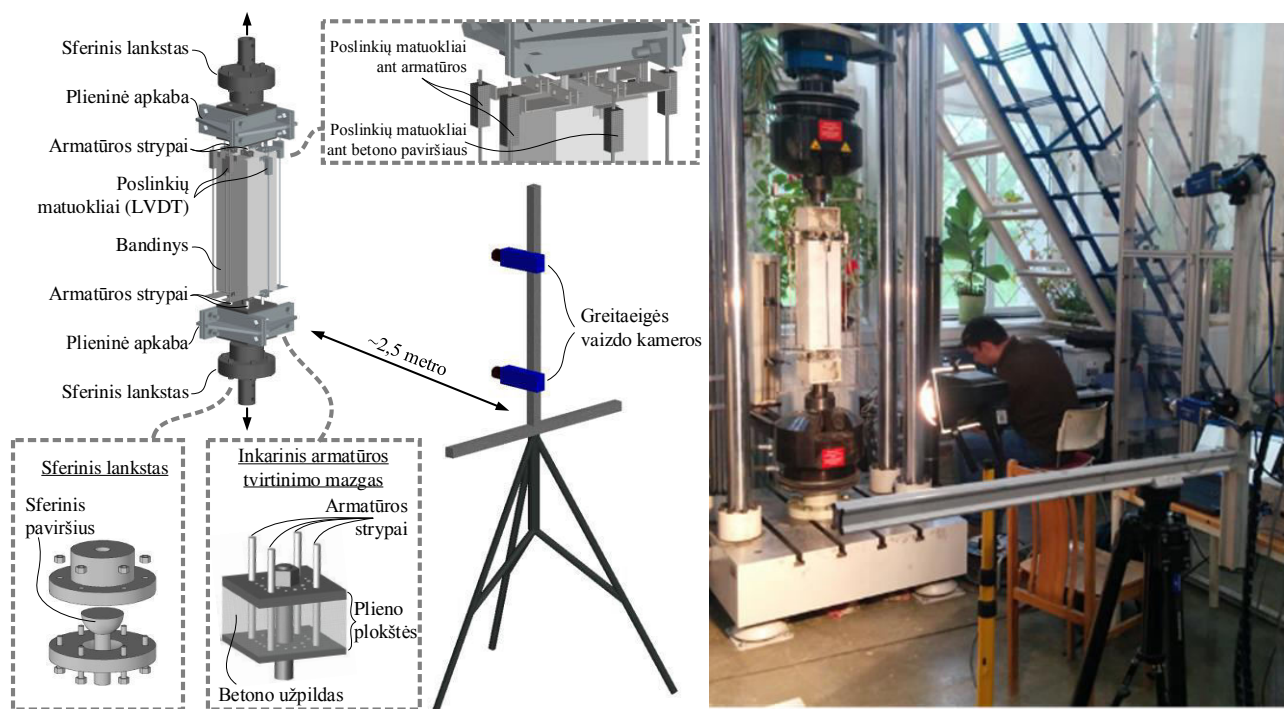
valdomas pagal reikšmes. Kiekviena spalva turi savo įvertį. Ši statistika pateikia: minimalią, maksimalią taško vertę, rezultatų aritmetinį vidurkį, sigma ir intervalą, kuriuo galima įvertinti taško didžiausią ir mažiausią reikšmes. Sigma – tai rodiklis, kuris apibrėžia standartinį taško nuokrypį nuo pasirinktos padėties.

2.2.2. Erdvinės koreliacijos duomenų rinkimas ir analizavimo procesas

Eksperimente naudojamos įrangos reikalavimai

DaVis yra CCD vaizdo kaupimo ir apdorojimo programinė įranga, kuri yra sukurta „LaVision“ įmonės specialistų. Ši programinė įranga yra sukurta kartu su „LaVision“ sistema, kuri skirta valdyti įvairius įrenginius, pvz., kaip spektrografus ar lazerius. Ši sistema kartu su *DaVis* programa geba įvertinti platų, matavimo metu, gautų duomenų spektrą įvairiomis funkcijomis. Ši programinė įranga yra neatsiejama „LaVision“ sistemos dalis, atliekant skaitmeninių vaizdų koreliacijos tyrimus.

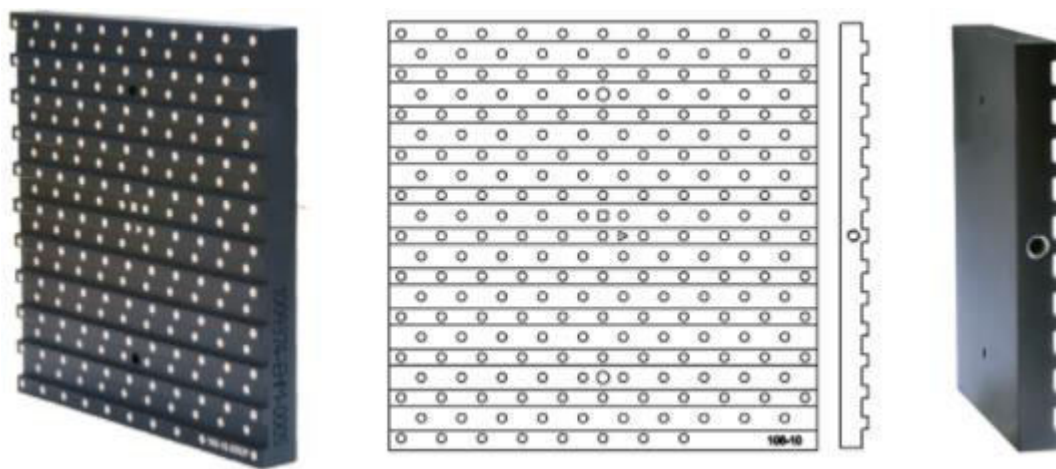
Pradedant bandymą su stereometrinėmis kameromis privalu tinkamai paruošti betoninio bloko paviršių ir sujungti visus įrenginius, kurie sudaro „LaVision“ sistemą (20 pav.).



20 pav. Armuotojo betoninio bloko prizmių tempimo bandymas fiksuojant elemento paviršiaus deformacijas bei pleišėjimą greitaeigėmis vaizdo kameromis

Sutvarkius ir sujungus įrenginius atitinkamai schemai (20 pav.), pradedami darbai. Kaip ir daugumoje programų, pirmiausia sukuriamas naujas projektas, nurodoma projekto laikmenos failo vieta. Kadangi ši programa yra tiesiogiai sujungta su metrinėmis kameromis – *DaVis* programos aplinkoje atliekamas abiejų fotokamerų kalibravimas. Pirmiausia ties tiriamuoju objektu pastatoma kalibravimo lenta (21 pav.). Ši lenta turi aiškiai matomas žymes – simbolius, tarp kurių yra išmatuoti

fiksuoti atstumai. Kalibravimo reikšmė fotogrametriniams darbams yra labai didelė, nuo to priklauso tyrimo tikslumas. Kamerų kalibravimas nustato fotovaizdo pikselio ir tikrojo pasaulio fiksuoto taško sąveiką (Luhmann *et al.* 2016). Kamerų kalibravimas tai pat ištaiso lęšio distorsiją.



21 pav. *LaVision* sistemoje naudojama kalibravimo lenta (modelis – 309-15-SSDP)

Greitaeigių kamerų kalibravimo darbai:

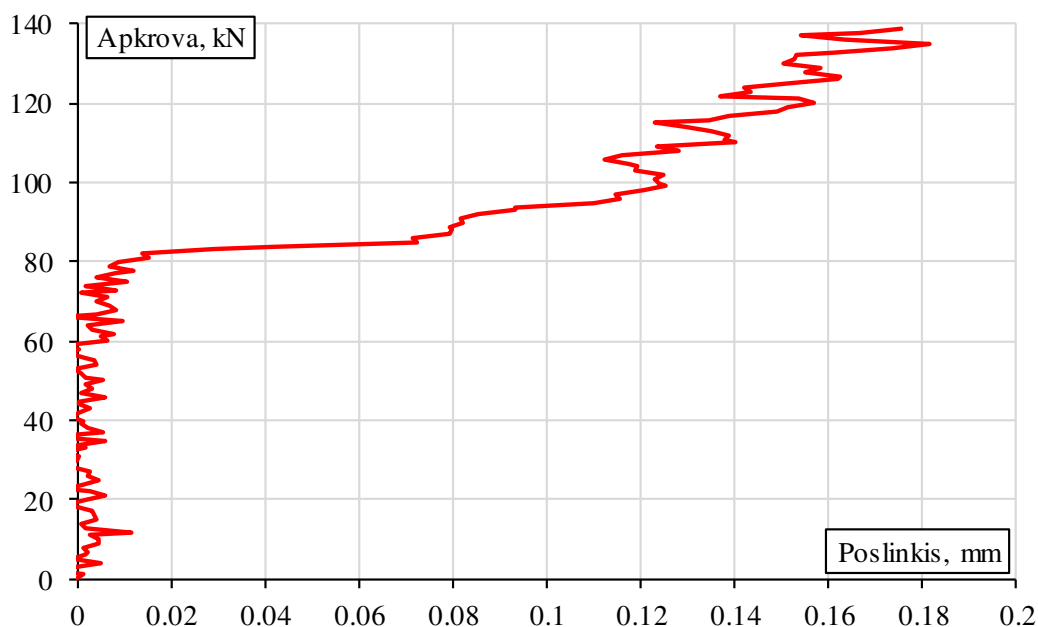
- 1) Parenkamas stereometrinių kamerų išdėstymas – dvi metrinės kameros, kurių matymo laukas persidengia mažiausiai 80 %;
- 2) Aprašoma naudojama koordinačių sistema – koordinačių sistema parenkama x, y, z kryptimis: x ašis yra vertikaloji, y – horizontalioji, z ašis nukreipiama nuo kalibravimo lentos į kamerų pusę.
- 3) Parenkama kalibravimui naudojama lenta – *309-15-SSDP*, kurios parametrai sistemoje yra žinomi, todėl nereikia papildomai įvesti jų;
- 4) Nustatomas matavimo laukas – abiejų metrinų kamerų persidengimo vieta, fotografuojama kalibravimo lenta;
- 5) Gautame fotovaizde pažymimi trys unikalūs taškai, pagal kurių pozicijas sistema sukalibruoja abi kameras;
- 6) Surandami kalibravimo lentoje esančios žymės, jų teoriškai yra 440. Pirmoji kamera suranda 420, o antroji 371 žymę;
- 7) Apskaičiuojamos ir įvertinamos abiejų fotokamerų RMS paklaidos (3 lentelė): pirmosios kamera – 0,154648 mm, o antrosios yra 0,15509 mm. Abi fotokameros yra tinkamos bandymui. Fotovaizdų tikslumas yra aukštas, jei RMS dydis yra iki 0,3 mm, o tinkami matavimams yra iki 1 mm.

3 lentelė. Stereometrinių kamerų kalibravimo rezultatai

Parametrai	Kamera Nr. 1	Kamera Nr. 2
Židinio nuotolis (mm)	32,9	32,1
Atstumas nuo kamerų iki objekto (mm)	1614,8	1540,8
Kampų apie x,y,z ašis kampų didžiai (°)	-10/1/92	4/1/91
Centrinis taškas (px)	1228/1029	1228/1029
Lęšio iškraipymas (px)	0,125/0,064	-0,235/0,127
Pikselio formato santykis	1	1
RMS paklaida	0,155	0,155

Tinkamai sukalibravus metrinės kameras pradedamas armuotojo betono bloko paviršiaus deformacijos stebėjimo darbai. Programa aktyvuojama „Recording“ funkcija, kurios aplinkoje atliekamas fotografavimas. Bandymo metu iš viso padarytos bendros 140 fotonuotraukos, kiekviena nuotrauka buvo daryta, kai traukimo jėga pakildavo 1 kN.

Pabaigus fotografuoti visos fotonuotraukos automatiškai yra išsaugojamos projekto aplankale. Nors fotografuojama viena sistema, bet kameros yra dvi, todėl ir fotonuotraukų kiekis yra dvigubas net 280 fotovaizdai per abi metrinės kameras. Peržiūrėti gauti vaizdiniai, įsitikiname, kad nėra nereikalingų atspindžių nuotraukose ir tęsiami tyrimai su „Strain Gauge“ funkcija. *DaVis* programa sugeneruoja vaizdinius ir gauname antrinius rezultatus – plyšių pasiskirstymą armuotojo betoninio bloko paviršiuje (22 pav.). Diagramoje aiškiai matyti, kad didinant apkrovą didėja ir įtrūkimas betoninio bloko paviršiuje. Didžiausias šuolis buvo ties 85 kN.



22 pav. „Strain Gauge“ funkcijos rezultatų diagrama

2.3. Erdvinio modelio kūrimas taikant aerotrianguliacijos metodą

Šis tyrimas yra atliekamas keliais etapais. Pirmiausia tiriamasis objektas fotografuojamas belipote skraidykle – lauko darbai, po to atliekama gautų aerofotonuotraukų analizė – laboratorijos

darbai. Šis kaip ir pirmasis bandymas reikalauja gerų kompiuterinių žinių, didelio atidumo ir įvairių technologijų išmanymo.

Prieš išvažiuojant į lauko darbus būtina įsitikinti ar visa reikalinga bepilotės skraidyklės sistema yra tvarkingai sukomplektuota (sraigta, baterijos, fotokameros, modelis ir kt.), ar oro sąlygos nepakito. Objekto vietovėje taip pat dar sykį įvertinamos meteorologinės sąlygos, atliekami parengiamieji darbai: sumontuojama skraidyklė, patikrinamas ryšio stiprumas, nustatomas kameros fokusavimas, nustatomi maršruto parametrai ir dar sykų peržiūrima technika. Atliekami objekto fotografavimo darbai.

Bandymas laboratorijoje atliekamas *Context Capture* programine įranga, kuri veikia tik su atitinkama kompiuterine įranga. Šios sistemos keliama reikalavimai: mažiausiai 8 GB RAM atminties, NVIDIA arba AMD vaizdo plokštės, arba Inter su OpenGL 3.2. mažiausiai 1 GB grafikai skirtos vidinės atminties. Galimi ir silpnesnė kompiuterinė įrangą, bet rezultatai atitinkamai išgaunami greičiau.

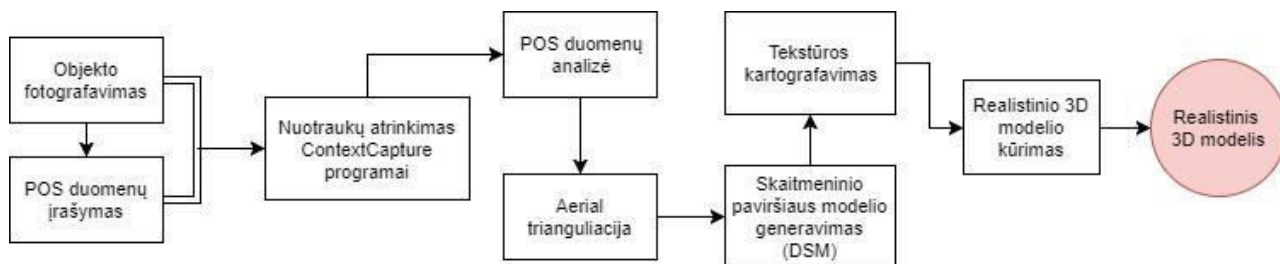
Be reikiamos kompiuterinės įrangos šiam tyrimui keliama keli fotografavimo reikalavimai: fotografavimo aplinka – lauko sąlygos turi būti palankios, tai yra nevėjuota, kad dronas skraidytų stabiliai, ir ne per daug saulėta, ar debesuota. Geriausia fotografavimo laikas – ankstyvas pavasaris. Skraidyklės padarytos fotonuotraukos privalo būti padarytos taip, jog objektas būtų nufotografuotas mažiausiai iš trijų skirtingų pozicijų. Iš eilės einančių fotonuotraukų persidengimas negali būti mažesnis nei greta jos esančios fotonuotraukos trečdalis bei greta esantis vaizdinio fotonuotraukos kampas negali skirtis daugiau nei 15°. Subjektas privalo būti nufotografuotas mažiausiai 30–50 kartų. Aerofotografavime rekomenduojama, jog išilginis posvyrio kampas neviršytų 80 % šalia esančios fotonuotraukos kampo, o skersinė vaizdo projekcija 50 %.

Sukurto 3D modelio raiška ir tikslumas yra tiesiogiai susijęs su fotokameros pikselio dydžiu. Norint pasiekti pageidautiną projekcinį pikselio dydį, privaloma tinkamai suderinti fotokameros židinio nuotolį ir atstumą iki subjekto. Privalu laikyti fiksuota židinio nuotolį viso fotografavimo metu. Jei yra būtina pakeisti židinio nuotolį, yra patartina fotografuoti grupėmis, atitinkamai šiam rodikliui. Fotokameros išlaikymas, kuris sumažina išsiliejamą, vaizdo fokusavimą, triukšmą fotonuotraukose privalo būti išjungtas, kitu atveju rimtai paveiks 3D modelio kūrimo procesą bei rezultatus. Kuriant 3D modelį *Context Capture* programa negalima retušuoti ar kitaip modifikuoti fotonuotraukas.

Erdvinio modelio kūrimo procesas programine įranga

Context Capture programinė įranga išrasta Bentley Systems kompanijos, kuri laikoma lyderė programinių įrangų tobulesnės infrastruktūros klausimams spręsti. Ši programinė įranga

automatiškai generuoja aukštos rezoliucijos 3D modelius iš paprasčiausių fotonuotraukų ar taškų debesies be jokio žmogaus įsikišimo. Naudojant šią programinę įrangą yra galimybė dirbti su nuotraukomis padarytomis tiesiog su išmaniojo telefono kamera. Taip pat ši programa apdoroja nuotraukas, kurios yra užfiksuotos ir su kitomis fotografavimo priemonėmis kaip dronai ar sraigtasparniais, prie kurių pritaikomos daugiakryptės kameros. 3D modelio kūrimo procesas yra sudėtingas, todėl jam aprašyti parengiama schema (23 pav.).



23 pav. 3D modelio kūrimo proceso schema

3D modelio kūrimo proceso schemos detalizavimas:

- Kaip ir visose programinėse įrangose, kuriomis ruošiami įvairūs projektai, taip ir šioje programoje, pradžioje kuriamas naujas projekto failas;
- Į programinę įrangą įkeliamos tyrimui naudojamos fotonuotraukos. Nuotraukos sugrupuojamos pagal fotokameros židinio nuotolį. Programa automatiškai atrunka geras/blogas fotonuotraukas, tai yra *Context Capture* programinė įranga įvertinta nuotraukos tinkamumą;
- Norint pririšti fotonuotraukas prie išmatuotų markių, tai yra galimybę pririšimą daryti rankiniu būdu ir pririšimo taškus suvesti ranka;
- Vykdoma aerotrianguliacija, kuri taip pat yra galima keliais variantais priklausomai nuo parinktų parametrų.
- Generuojamas DSM – skaitmeninis paviršiaus modelis;
- Kuriamas bei gaunamas realistinis 3D objekto modelis.

Erdvinio modelio kūrimo proceso schemos žingsnių detalizavimas

Pirmiausia būtina tinkamai surinkti duomenis apie tiriamąjį objektą, tai yra fotonuotraukos privalo būti tinkamai padarytos. *Context Capture* įranga kelia kelis reikalavimus: objektas turi būti fotografuojamas mažiausiai iš trijų pozicijų. Operatoriaus žiūrėjimo kampas negali būti didesnis nei 15° ir gretos fotonuotraukos privalo turėti mažiausiai 60 % tarpusavio persidengimą. Į programą *Context Capture* gali būti importuotos *JPEG*, *TIFF* ir *RAW* formatų fotonuotraukos

(Sun *et al.* 2017). Prieš pradedant nuotraukų apdorojimą, įsitikiname ar nėra susiliejusių, išblukusių ar dubliuotų nuotraukų. Visi šie netikslumai gali daryti įtaką galutiniam modelio variantui.

Į programą įkeliamos 191 iš 350 padarytų fotonuotraukų, kurios užfiksuotos bepilote skraidykle – *DJI Inspire*. Atmetamos 159 fotonuotraukos dėl pasikartojimų, didelio persidengimo, tokios nuotraukos galutiniam rezultatui įtakos nedaro, tačiau apdorojamų duomenų kiekis padidėja, tuo pat metu ir apdorojimo laikas gali būti labai ilgas dėl menkos kompiuterinės įrangos. Dėl to stengiasi kuo labiau optimizuoti nuotraukų kiekį, išlaikant tinkamą persidengimą tarp aerovaizdinių.

Kadangi šiam tyrimui fotokamera yra nemetrinė, tai kalibruoti šią fotokamerą nereikia. Įkėlus visas fotonuotraukas į programą, joje galima peržiūrėti fotokameros vidinio orientavimo elementus. Fotokameros reliatyvaus orientavimo elementai: židinio nuotolis yra 3,6 mm, mastelio koeficientas – 6,24 dpi, fotonuotraukos dydis – 4000 ir 2250 px, pirmosios fotonuotraukos centrinio taško koordinatės $x=2019,27$, $y=1141,61$. posūkių apie x,y,z ašis kampai (rad): $K1=-0,132486$, $K2=10449$, $K3=-0,0131445$, kryptis yra tiesioginė.

Fotokamera pritaisyta prie bepilotės skraidyklės yra *Zenmuse X3*, *DJI FC350*. Šios kameros vidinių rodyklių parametrai aprašomi lentelės forma (4 lentelė).

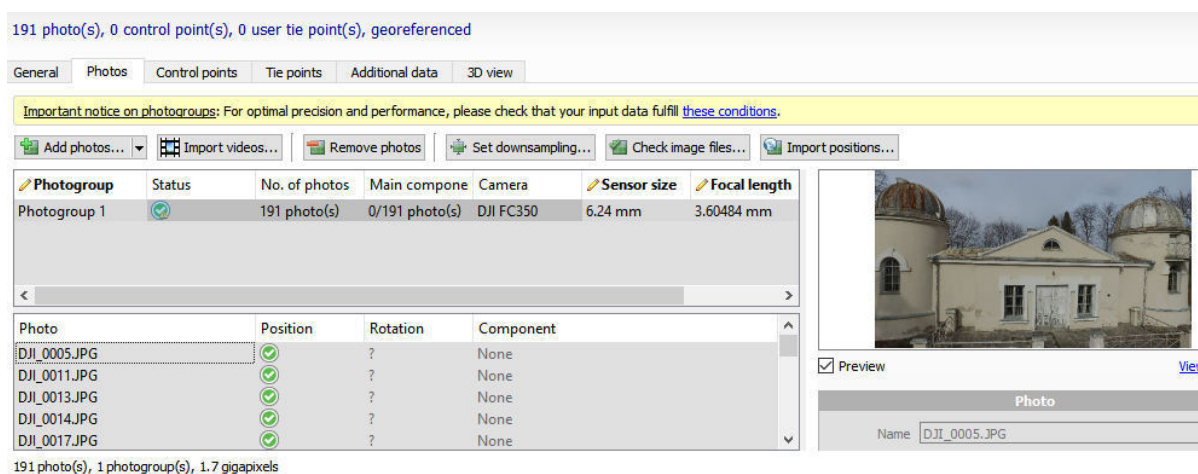
4 lentelė. *Zenmuse X3* fotokameros pritvirtintos prie drono vidiniai parametrai

	Parametrai	Kameros reikšmės
	Maksimali raiška	12.4M pikseliai
	Iškraipymai	0.90 %
	Maksimalus židinio nuotolis	20mm
	Diafragma	F/2.8

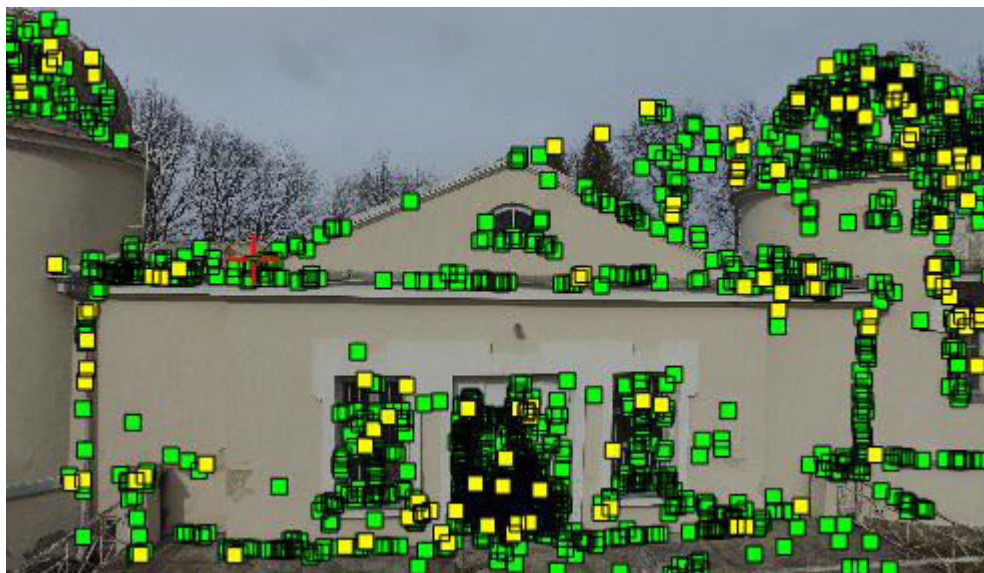
Context Capture programoje įkėlus visas reikiamas nuotraukas, programa automatiškai atrenka netinkamas fotonuotraukas, apskaičiuoja židinio nuotolį bei raiškos dydį (24 pav.). Kiekvieną parametą galima redaguoti. Vilniaus miesto senosios observatorijos 3D modelis kurtas automatiiniu būdu, parinkus pagrindinius ir kontrolinius taškus. Šioje programoje galima suvesti priryšimo taškus (angl. k. *tie points*) ranka, jei reikalingas labai tikslus modelis. Rankiniu būdu tas pats taškas keliose fotonuotraukose pažymi pelyte ir įvedami būtini duomenys. Būtina tašką pažymėti bent dvejose nuotraukose, tai padeda programai parinktą tašką atpažinti 3D modelyje.

Sekančiuose žingsniuose, programa derina fotomodelį jau prie modeliuotojo įvestų taškų. Kadangi šitas observatorijos modelis kuriamas nereikalaujant didelio tikslumo, pririšimo taškai surandami automatiškai pačios programos.

Sekantis operacinės sistemos žingsnis yra POS duomenų analizavimas. POS duomenys – tai padėties nustatymo ir orientavimo duomenų analizė, kurios metu yra įvertinami vidiniai fotonuotraukos parametrai: nuotraukos padėtis, altitudė, latitudė, greitis ir kita (Lo *et al.* 2016). Šioje dalyje programa leidžia rinktis geografinę padėtį ir per naujo nustatyti reikiamą koordinačių projekciją. Taip pat šioje programoje orientavimo taškai gali būti importuojami iš failų arba suvedami ranka. Atlikus nuotraukų analizę pagal POS gaunamas rezultatas – pagrindiniai taškai fotonuotraukose (25 pav.). Kiekvienas taškas šioje programoje turi reikšmes: X,Y,Z koordinates WGS–84 koordinačių sistemoje, apskaičiuota vidutinė kvadratinė projekcinio nuokrypio paklaidą pikseliai ir vidutinę kvadratinę distorsijos paklaidą metrais.



24 pav. Fotonuotraukų grupavimas pagal fotokameros židinio nuotolį



25 pav. Fotonuotraukoje aptikti pagrindiniai taškai

Atlikus pagrindinių taškų paiešką, pradedamas kitas žingsnis – oro tianguliacija (angl. k. *aerial triangulation*). Šis bendrų taškų jungimas pagrįstas tiesios linijos metodu, tai labai panašus į bendrų taškų metodą, nes išskiriami parametrai yra labai panašūs, skirtumas yra toks, kad linija geba atvaizduoti objekto padėtį erdvėje. T. Schenk, 2004 metų straipsnyje yra pagrįsta, kodėl linijos

yra labiau patikimos nei taškai. Oro trianguliacijos pagrindinė paskirtis yra sutankinti atkarpą, tarp dviejų gretimų taškų, taip siekiant padidinti kontrolinių taškų skaičių. Šio proceso metu yra nustatomi taškų išorinė padėtis bei trimatės jo koordinatės. Oro trianguliacijos tikslas – sutankinti taškus taip, kad būtų įmanoma nuotrauką susieti su geografinė jos padėtini, kuri paskirtis yra pasiekti kuo geresnį rezultatą – sukurti kuo tikslesnį skaitmeninį paviršiaus modelį (DSM). Atlikus oro trianguliaciją bei gavus visus įmanomus taškus, pradedamas skaitmeninio paviršiaus modelio generavimas.

Paskutinis žingsnis dirbant su *Context Capture* programine įranga yra tekstūros žemėlapių kūrimas. Ši programa taip pat labai paprastai bei automatiškai sukuria tekstūros žemėlapi. Tekstūros žemėlapis šioje programoje yra kuriamas su 0,5 pikselio tolerancijos tikslumu. Parenkama funkcija, kuri užpildo visas susidariusias skyles.

Automatinis DSM generavimas iš linijų masyvo yra tikslus ir patikimas, nes būtent šiuo metodu yra paprasta įterpti norimus algoritmus, modifikuoti liniją, ją ištrinant ar sujungiant (Zhang 2005). DMS generavimo procese yra labai svarbūs du parametrai: tikslinė tiriamoji riba ir persidengiančios nuotraukos pikselio dydis, nes tik tokiu atveju, kai šie parametrai yra tinkamai suskirstyti yra galimas pagreitinotas efektyvus gamybos procesas. Galutiniame rezultate yra galimybė ant modelio uždėti trianguliacijos tinklą (26 pav.).



26 pav. 3D fotomodelis su tekstūros žemėlapiu ir trianguliacijos (TIN) tinklu

Erdvinio modelio kūrimas taikant aerotrianguliacijos metodą yra ganėtinai sudėtingas procesas, kuris reikalauja ilgo pasiruošimo ir didelio žinių багаžo apie tam tikras programines įrangas. Taip pat būtina išsiaiškinti visų įrenginių veikimo principus ir naudojamus metodus.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Geriausias ir patikimiausias metodas programinio produkto dokumentacijai sudaryti yra UML modeliavimo kalba. Šiame skyriuje buvo pateikiama darbo eiga, kuri buvo aprašyta grafiniu modeliu. Šio baigiamojo darbo tiriamosios dalies išdėstymo modelio schemą sudarė dvi pagrindinės grafos: pirmoji – skaitmeninių vaizdų koreliacijos sistemos dalis, kurioje atvaizduojama statybinių konstrukcijų deformacijos analizės eiga, o antroji grafa – aerotrianguliacijos metodo pritaikymas 3D fotomodeliui kurti.

Taip pat šioje darbo dalyje buvo aptarta informacijos rinkimo būdai. Duomenys gali būti gaunami atliekant tiesioginius arba netiesioginius matavimus. Tiesioginiai matavimai yra vadinami tokie, kurių metu matuojami dydžiai yra nustatomi tiesiogiai iš prietaiso rodmenų, o netiesioginiai matavimai yra tokie, kurių dydžio vertė randama kaip kito dydžio funkcija arba panaudojus kitus įrenginius ar technologijas. Fotogrametriniai darbai yra kombinuoti tiesioginių ir netiesioginių matavimų sistema. Taip pat fotonuotraukose gali būti atlikti tiesioginiai matavimai, bet gauti duomenys bus antriniai.

Tyrimo metu buvo naudotos skaitmeninės kameros *Imager E-lite* stereomerinė kamera, *Canon EOS 77D* ir *Zenmuse X3*. Visos šios kameros buvo kalibruojamos, siekiant užtikrinti rezultatų tikslumą. Kamrų kalibravimo metu buvo nustatyti fotovaizdo pikselio ir tikrojo pasaulio fiksuoto taško sąveiką. Kalibravimas parodė kiekvienos tyrimui naudotos fotokameros vidinius geometrinius parametrus. Fotovaizdų tikslumas yra aukštas, jei RMS dydis yra iki 0,3 px, o tinkami matavimams yra iki 1 px. Visus kamrų kalibravimo atvejais RMS paklaida neviršijo 1 px.

Armutojo betoninio bloko prizmių tempimo bandymo metu duomenys buvo fiksuojami keturiais prietaisais: optiniu mikroskopu, LVDT – poslinkių matuoklių sistema, greitaieigėmis fotokameromis ir įprasta mėgėjiško tipo fotokamera. Mažiausiai įrenginių reikalaujantis būdas buvo rankinis, kuriam reikalingas tik optinis mikroskopas. Šio bandymo metu duomenys buvo stebimi keturiais būdais dėl to, kad po kol kas paviršių pleišėjimą galima užfiksuoti tik paskutinėje stadijoje ir deformacija gali būti išmatuojama tik tarp dviejų, darbo pradžioje, parinktų taškų. Taip pat skirtingu būdu gauti duomenys buvo analizuojami atitinkamais fotogrametriniais metodais: stereometriniu būdu gauta informacija buvo analizuojama erdvinės koreliacijos metodu, o įprasta fotokamera gauti duomenys buvo analizuojami skaitmeninių vaizdų plokštuminės koreliacijos metodu. Šiais dvejais fotogrametriniais metodais gauti statistiniai duomenys buvo atvaizduoti spalvų spektru, kurios kiekviena spalva turi savo įvertį. 2D–DIC metodo tyrime buvo panaudotos

81 fotonuotrauka iš 82, o 3D–DIC 280 (140x2) fotonuotraukos. Visi fotovaizdai buvo fiksuojami atitinkamai, kai apkrova pakildavo 1 kN.

Kuriant senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastato 3D fotogrametrinį modelį buvo surinkta informacija apie būtinus pasiruošimo darbus, pvz., prieš išvažiuojant į lauko darbus būtina įsitikinti ar visa reikalinga bepilotės skraidyklės sistema yra tvarkingai sukomplektuota (sraigta, baterijos, fotokameros, modelis ir kt.) ir įvertinti esamas oro sąlygas. Paaiškėjo, kad prieš atliekant fotografavimo darbus būtina nusistatyti skraidyklės maršruto schemą. Taip pat buvo pastebėta, kad prieš lauko darbus reikia įvertinti naudojamos kompiuterinės programos keliamus reikalavimus. Šioje darbo dalyje 3D fotomodeliui kurti panaudotas fotogrametrijos metodas – aerotrinaguliacijos, kuris savo specifikacijoje įvardija reikalavimus: geriausias fotografavimo laikas – ankstyvas pavasaris, skraidyklės padarytos fotonuotraukos privalo būti padarytos taip, jog objektas būtų nufotografuotas mažiausiai iš trijų skirtingų pozicijų. Iš eilės einančių fotonuotraukų persidengimas negali būti mažesnis nei greta jos esančios fotonuotraukos trečdalis bei greta esantis vaizdinio fotonuotraukos kampas negali skirtis daugiau nei 15°. Objektas privalo būti nufotografuotas mažiausiai 30–50 kartų. Aerofotografavime rekomenduojama, jog išilginis posvyrio kampas neviršytų 80 % šalia esančios fotonuotraukos kampo, o skersinė vaizdo projekcija 50 %. Mano projekto atveju, pastatas buvo fotografuotas su bepilote skraidykle – *DJI Inspire 350* kartu. 159 fotonuotraukos buvo atmestos dėl pasikartojimų, didelio persidengimo. Tokios nuotraukos galutiniam rezultatui įtakos nepadarė, tik sutrumpino duomenų apdorojimo laiką.

Pagal pasirinktą metodiką darbas buvo sudarytas iš dviejų praktinių dalių: pirmoje dalyje darbas atliekamas laboratorijoje, tiriant armuotojo betoninio bloko paviršiaus deformaciją. Bandymo metu prie bloko buvo prijungti jutikliai, kurie tiesiogiai matavo paviršiaus deformaciją realiu laiku. Antroje darbo dalyje tiesioginiai matavimai buvo atliekami lauke fotografuojant pastatą su bepilote skraidykle. Pirmoje darbo dalyje buvo atlikta skaitmeninių vaizdų analize, kuriai pritaikytas – skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas, o antroje dalyje 3D fotomodelis sudarytas, panaudojus aerotrianguliacijos metodą. DIC metodas buvo pritaikytas statybinės konstrukcijos (armuotojo betoninio bloko) paviršinei deformacijai stebėti nuotoliniu būdu, o oro trianguliacijos metodas buvo pritaikytas senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastato 3D fotomodeliui kurti. Šias abi praktines darbo dalis sieja fotogrametrijos mokslas ir jos platus panaudojimas. Abejose darbo dalyse buvo pritaikyti du skirtingi fotogrametrijos metodai, bet tuo pačiu šie du metodai gali būti pritaikyti ir atvirkščiai, pvz. pastato sienų paviršių ilgalaikiams įtūriams stebėti. Iš praktinių dalių matyti, kad abejose dalyse buvo panaudotos skaitmeninės fotokameros, kurių modifikuoti fotovaizdai yra vertinamos kaip pigios skaitmeninio lazerinio skenavimo vaizdinių alternatyvos.

3. FOTOGRAMETRINIŲ METODŲ PATIKIMUMO ANALIZĖ

Atlikti du tyrimai, kurių metodai yra siejami su fotogrametrijos mokslo šaka. Pirmasis bandymas buvo atliekamas laboratorijoje, kurioje buvo vykdomas bandymas su betoniniu bloku. Šio tyrimo metu armuotas betoninis blokas buvo veikiamas apkrovos nuo 0 kN iki 137,8 kN, atitinkamai laike. Ši statybinė konstrukcija veikiant apkrovai skeldėjo, kitaip tariant, atsirado paviršiaus deformacijos, šis vyksmas buvo stebimas keturiais skirtingais būdais, iš kurių du buvo fotogrametriniai. Betoninio bloko paviršiaus pokyčiams fiksuoti panaudota fotogrametrijos metodas – skaitmeninių vaizdų koreliacijos technika. Kiti du likę būdai buvo naudoti tam, kad gauti referencinius atskaitos duomenis, kurie buvo laikomi tiksliais.

Sekanti darbo dalis yra skaitmeninio fotogrametrinio 3D modelio kūrimas ir tikslumo įvertinimas. Šis tyrimas buvo atliktas lauke, tiriamasis objektas – senasis Vilniaus miesto astronomijos observatorijos pastatas, kuris buvo fotografuotas iš oro panaudojus bepilotę skraidyklę. Modelio kūrimui panaudotas kitas fotogrametrijos metodas – aerotrianguliacija, kurios metu sumodeliuojamas 3D fotomodelis ir įvertinamas jo tikslumas. Kiekvienas bandymas buvo atliktas su skirtinga technine įranga ir atsižvelgiant į tai, gauti skirtingi rezultatai.

3.1. Etaloniniai duomenys

Optinio mikroskopo duomenys

Optiniu mikroskopu matuojami duomenys yra gaunami 0,01 mm tikslumu. Šis matavimo būdas nėra labai tikslus, nes tik nuo žmogaus regos priklauso gaunami rezultatai. Šiuo būdu gauti rezultatai yra pateikiami lentelės forma (5 lentelė). Optiniu mikroskopu buvo išmatuotos šešios siūlių vietos (26 pav.).

5 lentelė. Plyšių matavimas optiniu mikroskopu

Apkrova, kN	Plyšio numeris	Pamatuotas plyšio plotis, mm (naudojant optinį mikroskopą)	
		karėje	dešinėje
94,2	1	plyšys nesimato	0,09
	2	0,13	0,16
	3	plyšys nesimato	plyšys nesimato
122	1	0,12	0,16
	2	0,2	0,17
	3	plyšys nesimato	0,14
Vidurkis, mm		0,15	0,14

Iš lentelės (5 lentelė) matyti, kad kai objektas yra veikiamas 94,2 kN jėgos, žmogaus akis neužfiksavo trijų plyšių, o ties 122 kN apkrova, žmogaus akis nesugebėjo atrasti tik vieno

plyšio. Šis metodas nėra tikslus, nes matuojama yra tik vienoje plyšio vietoje, o iš duomenų matyti, kad ne visuomet toje vietoje galima įžiūrėti įtrūkimą. Nors ir ties kai kuriais plyšiais trūksta duomenų, iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad betoninio bloko matuojamas paviršius pailgėjo 0,75 %, kai betoninis blokas buvo veikiamas 122 kN apkrovos jėga.

Poslinkio matuokliais gauti rezultatai

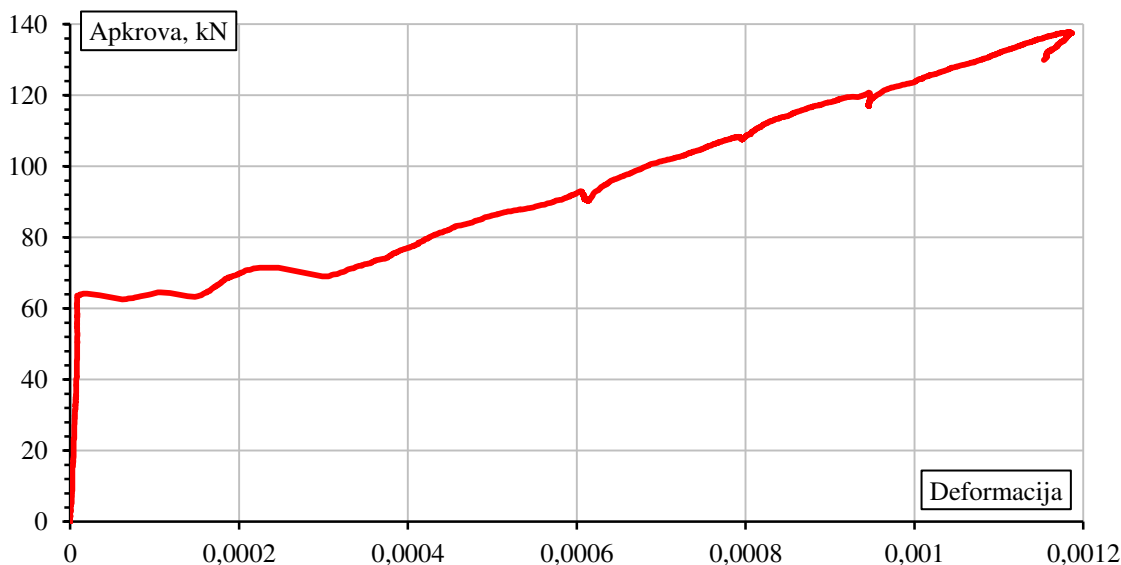
Deformacijos poslinkio matuokliais LVDT gauti duomenys laikomi tiksliausiai. Šie duomenys yra matuojami tiesiogiai pokyčio metu, tai yra realiu matavimo laiku. Visi duomenys yra tiesiogiai registruojami ir saugomi kompiuteryje. Kompiuterio monitoriuje automatiškai yra braižoma diagramą (27 pav.), kuri yra tiesiogiai braižoma iš poslinkių jutikliais fiksuojamų duomenų (6 lentelė).

6 lentelė. LVDT sistemos fiksuojami rodmenys

Apkrova P, kN	Betono paviršiaus deformacija, mm
0,00	0,000000
0,00	0,000000
0,06	0,000000
0,06	0,000000
0,06	0,000000
...	...
50,16	0,000008
50,34	0,000008
50,4	0,000009
50,64	0,000009
50,82	0,000008
...	...
100,08	0,000684
100,14	0,000684
100,26	0,000685
100,38	0,000685
100,44	0,000687
...	...
137,64	0,001180
137,70	0,001181
137,70	0,001181
137,70	0,001182
137,76	0,001182

Iš gautų duomenų (6 lentelė) matome, kad duomenų tikslumas yra labai didelis net 0,001 mm, bet jų gavimo būdas nėra labai patogus, reikalauja inžinierinių žinių bei armatūros. Taip pat kaip ir optiniu mikroskopu, taip ir šiuo būdu, siūlė matuojama tik ties viena vieta – ties strypu. O strypas yra privirtinamas ties bloko paviršiaus viduriu. Iš gautų rezultatų matome, kad

blokas ties viduriu vidutiniškai pailgėjo tik 0,0005 %. Galutinis rezultatas yra fiksuotas, kai apkrovos jėga siekė 137,76 kN. Iš gautų rezultatų braižoma pokyčių diagrama (27 pav.).



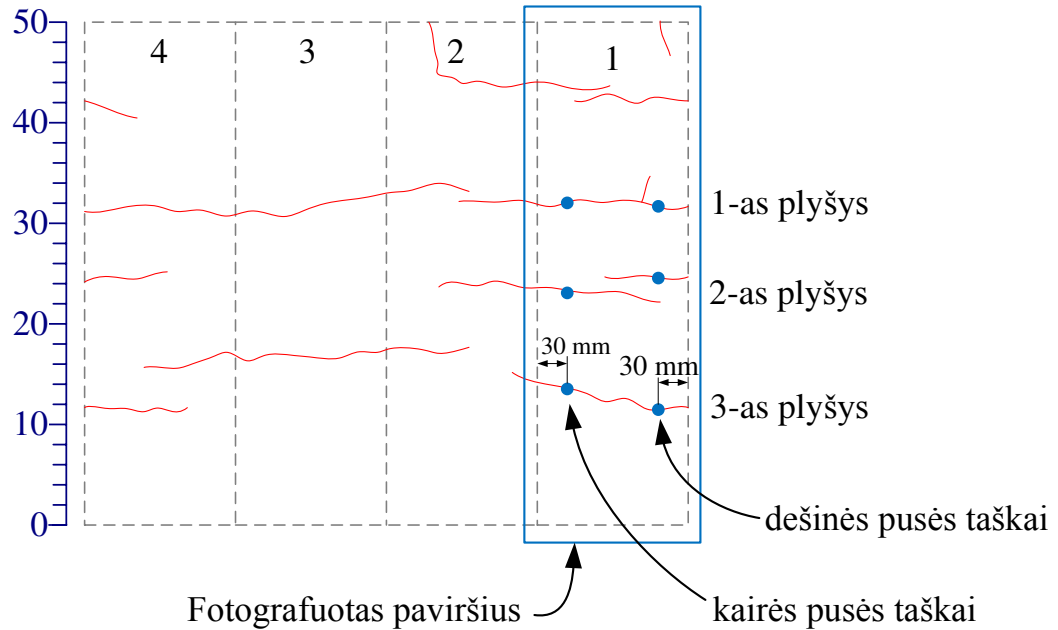
27 pav. LVDT sistemos užfiksuotų duomenų pokyčių diagrama

Paveiksle (27 pav.) pateiktoje diagramoje matoma, kad deformacija kinta atitinkamai didinat apkrovai. Kadangi ši diagrama yra sudaryti iš tiesiogiai gautų duomenų, todėl joje galima pastebėti nežymius mažėjimo šuolius, kuriuose apkrovos jėga krito. Iš šių duomenų taip pat galima spręsti, kada buvo atlikti matavimai optiniu mikroskopu, kai apkrovos jėga buvo ties pirmu žemėjimu – bandymo viduryje ir darbo pabaigoje, kai apkrova nukrito nuo aukščiausios iki maždaug 122 kN. Šiuo metodu gauti duomenys yra etaloniniai ir laikomi tiksliausiais.

3.2. Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodo patikimumas

Šio bandymo metu gauti rezultatai yra pateikiami skirtingais būdais. Vieni yra pateikiami lentelės forma, kiti diagramomis ir nuotraukomis. Šių duomenų pateikimas priklauso nuo matavimo metodikos. Statybinės konstrukcijos paviršiaus įtrūkiai buvo matuoti optiniu mikroskopu, fiksuoti deformacijos poslinkio matuokliais – LVDT ir stebimi dviejų tipų fotokameromis: stereometrine ir skaitmenine mėgėjiško tipo fotokamera. Pastarieji dviejų tipų gauti duomenys (fotovaizdai) buvo apdorojami skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodai 2D–DIC ir 3D–DIC. Viso bandymo metu buvo fiksuojamas tik vienas iš keturių betoninio bloko paviršių, bet apkrovos jėga veikė ne tik jį, todėl apačioje pateikiama schema (28 pav.), kurioje matyti įtrūkimų pasiskirstymas per visas keturias bloko puses. Taip pat labai svarbu pabrėžti, kad fotografuojamas paviršius yra išpurškiamas dažnais, tam kad subjekto šviesos koeficientas būtų sumažintas ir fotokamerų gaunami fotovaizdai būtų mažiau iškraipyti radialinės distorsijos.

P1-4x10-C40 bandinio paviršių išsklotinė, kai apkrova $P=137,8$ kN

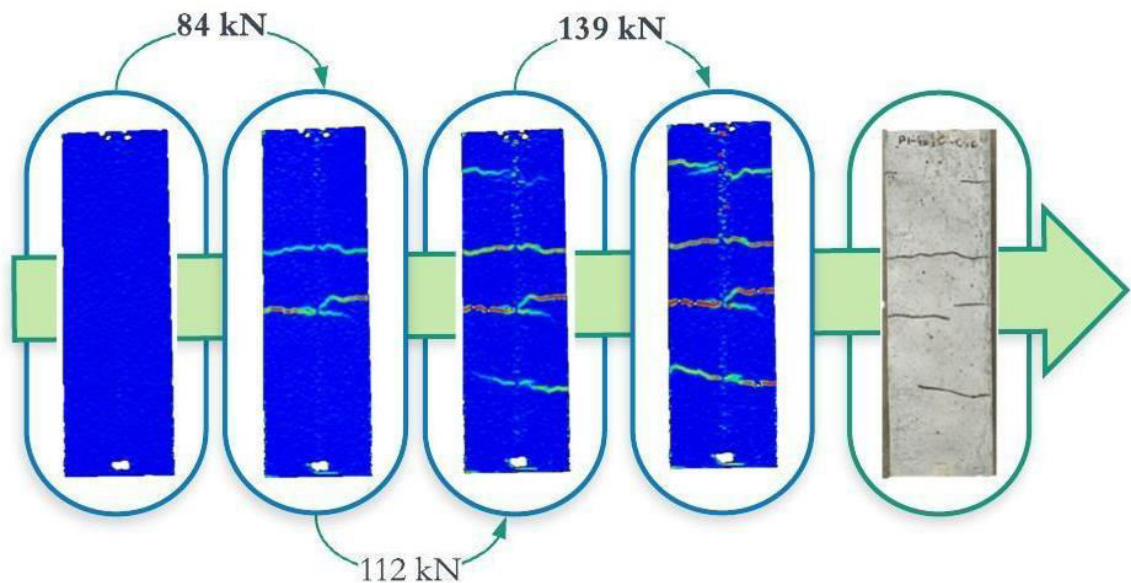


28 pav. Bandinio Nr. P1-4x10-C40 plyšinėji schema

Bandinys dokumentuojamas pavadinimu „Nr. P1-4x10-C40“, kurio metmenys yra: ilgis 500 mm, o plotis 150 mm. Armuotojo betoninio bloko tempimo bandymas buvo atliktas 2018-03-06.

3.2.1. Plokštuminės koreliacijos metodu gauti rezultatai

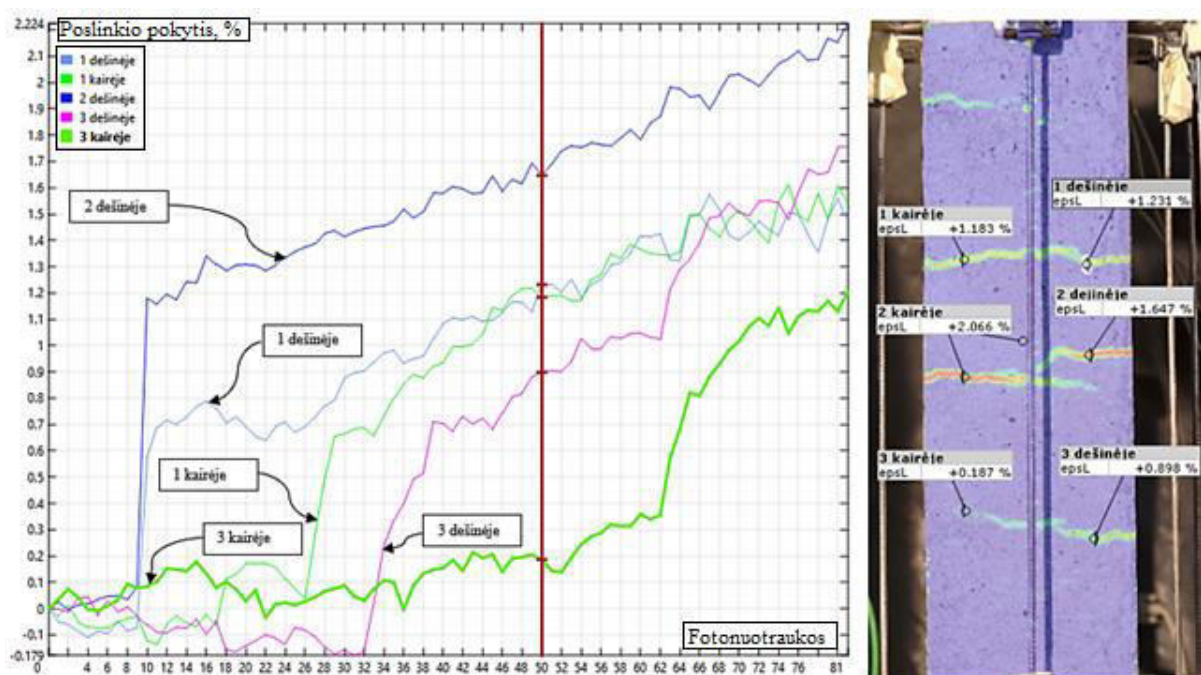
Plokštuminės koreliacijos metodu analizuojami dvimačiai skaitmeniniai vaizdai. Šiuo metodu gauti rezultatai yra pateikiami schema (29 pav.).



29 pav. 2D skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautos plyšių schemas

GOM programa sugeneruoja tinkamus rezultatus tik tada, jei yra laikomasi keliamų reikalavimų. Pirmiausia fotografavimui naudojama fotokamera privalo būti sureguliuota tinkamai, šviesos kiekis į subjektą privalo būti kuo natūralesnis, fotokamera turi būti pastatyta stacionariai ir stačiu kampu nukreipta į subjektą. Fotografavimas turi vykti nuotoliniu būdu, nes kitaip rezultatai nebus patikimi.

Atsižvelgus ir įvykdžius visus reikalavimus, tyrimas įvyko sklandžiai. Gauti rezultatai *GOM Correlate* programa buvo išanalizuoti. Analizė vyko pagal schemą (28 pav.), kuri buvo naudota duomenims matuoti su optiniu mikroskopu, analogiškai plyšiai iš skaitmeninių vaizdų buvo išmatuoti ir su GOM programa. Iš viso matuoti šeši plyšiai apytiksliai panašiuose vietose kaip ir matuoti optiniu mikroskopu. Sudėjus taškus skaitmeniniuose vaizduose ir paleidus ilgio skirtumo funkciją, matuojami taškų persislinkimai, kurie yra vertinami kaip bloko pleišėjimas. Iš gautų duomenų automatiškai sudaromos diagramos (30 pav.).

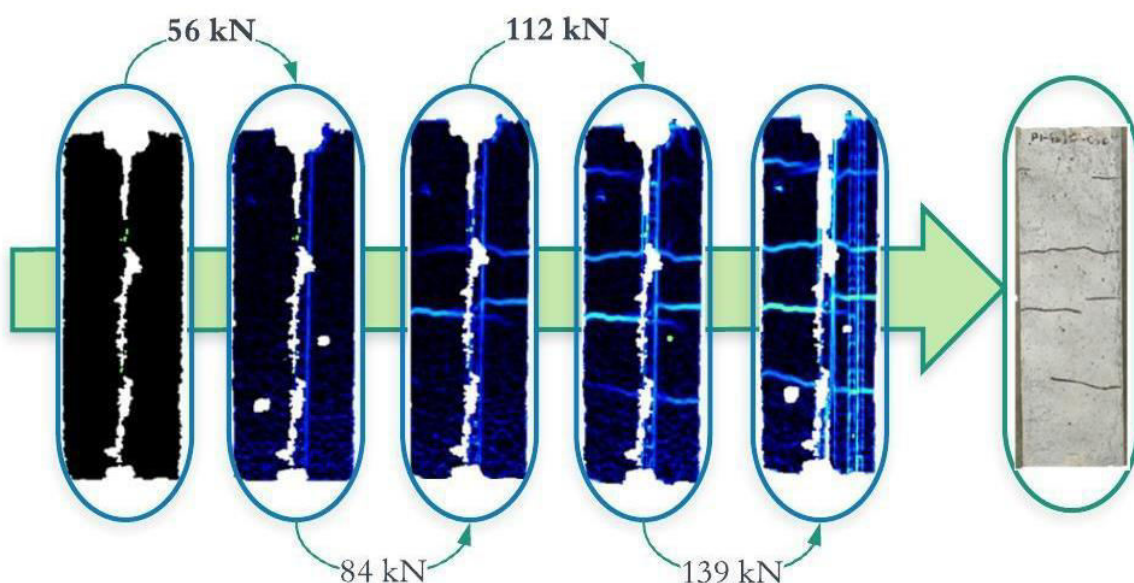


30 pav. Plokštuminių vaizdų analizavimas

2D–DIC metodas buvo atliktas nemokama *GOM Correlate* programinė įranga, į kurią įkeltos paprasta mėgėjiška skaitmeninė kamera užfiksuoti vaizdai. Fotonuotraukos darytos *Canon EOS 77D* skaitmeninė kamera, kuri buvo statoma ant trikojo ir fotografavimas vyko nuotoliniu būdu, tam kad žmogaus mygtuko spustelėjimas nepadarytų jokios įtakos galutiniam rezultatui. Dvimačių skaitmeniniu vaizdų koreliacijos metodas atliktas *GOM Correlate* programa leidžia išgauti statybinės konstrukcijos – armuotojo betoninio bloko pleišijimo schemą, analizuoti pavienes siūles, generuoti rezultatus į diagramas (30 pav.). Taip pat su GOM programa galima stebėti betoninio bloko paviršiaus deformacijas viso bandymo metu.

3.2.2. Erdvinės koreliacijos metodu gauti rezultatai

DaVis programinė įranga yra neatsiejama *LaVision* sistemos dalis, kurią sudaro stereometrinės kameros, registratorius ir *DaVis* programa. Šis programinės įrangos pagrindas yra sudarytas iš paprastų matematinių operacijų, kurios apskaičiuoja ir įvertina įvairius duomenų rinkinius, tai yra fotonuotraukas. Taip pat ši programa turi ir kitokias funkcijas, kurių pagalba fotonuotraukoms yra pritaikomi įvairūs filtrai ir buferiai. Rezultate (31 pav.) yra aiškiai matyti statybinės konstrukcijos – armuotojo betoninio bloko pleišėjimo schema, viso bandymo metu, atitinkamai traukiamos apkrovos dydžiui.



31 pav. 3D skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautos pleišėjimo schemas

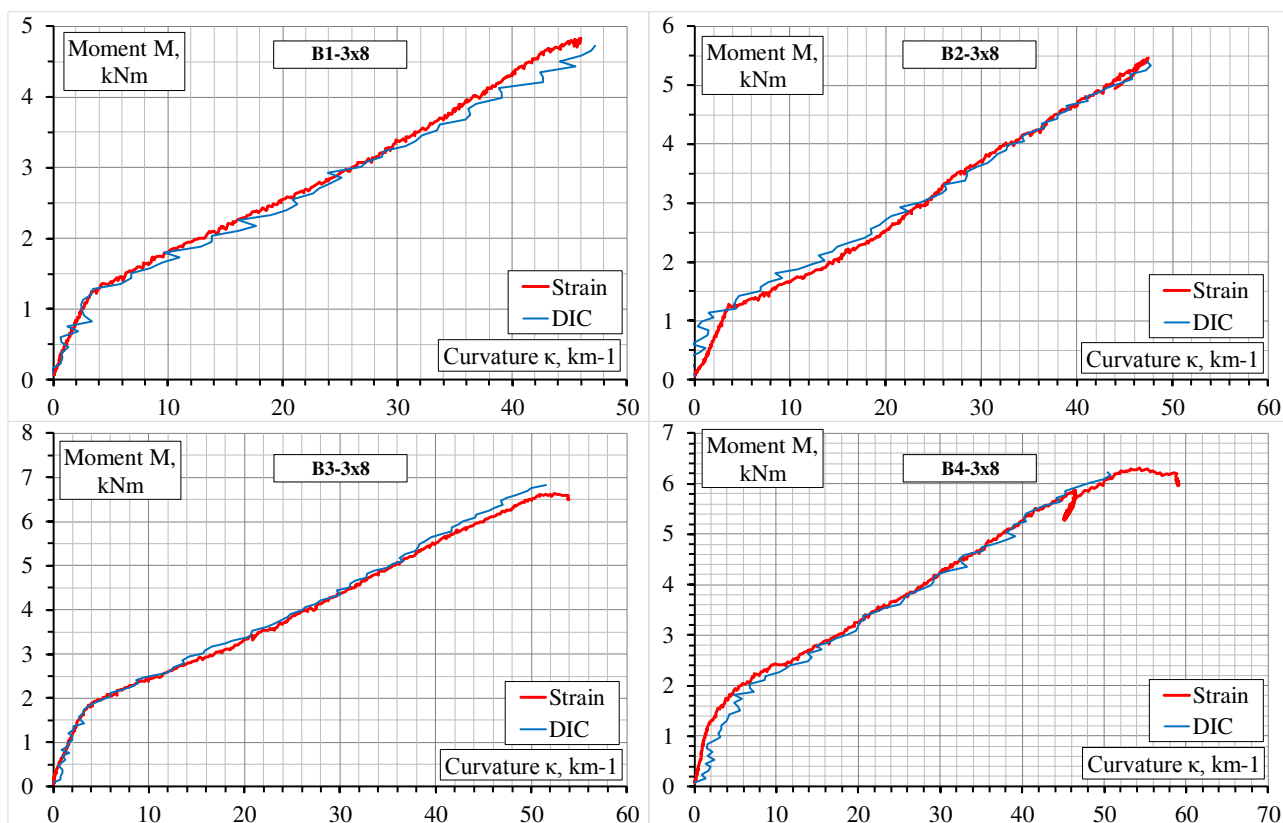
LaVision sistema yra sudėtinga ir brangi, ją įsigyti gali ne kiekvienas, bet būtent šia sistema yra galimas 3D–DIC metodo tyrimas. Prie šios sistemoje prijungtos stereometrinės kameros sukuria trimačius fotovaizdus. Skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas leidžia išgauti paviršiaus deformaciją iš trimačių vaizdų. Stereometrinės kameros fiksuoja didelės raiškos fotonuotraukas, iš kurių sudaryta serija yra naudojama vertinant didžiulį kiekį duomenų, laiko diapazone.

3.2.3. Apibendrinti statybinės konstrukcijos paviršiaus deformacijų tyrimo rezultatai

Statybinė konstrukcija – armuotas betoninis blokas buvo tiriamas laboratorijoje keturiais metodais. Šiandiena dar nėra nei vienos technologijos, kuria būtų galima fiksuoti duomenis bet kurio bandymo metu ir bet kurioje paviršiaus vietoje, dėl šių priežasčių bandinys yra matuojamas keturiais būdais: LVDT – poslinkių jutiklių sistema, optiniu mikroskopu ir fotogrametriniais metodais.

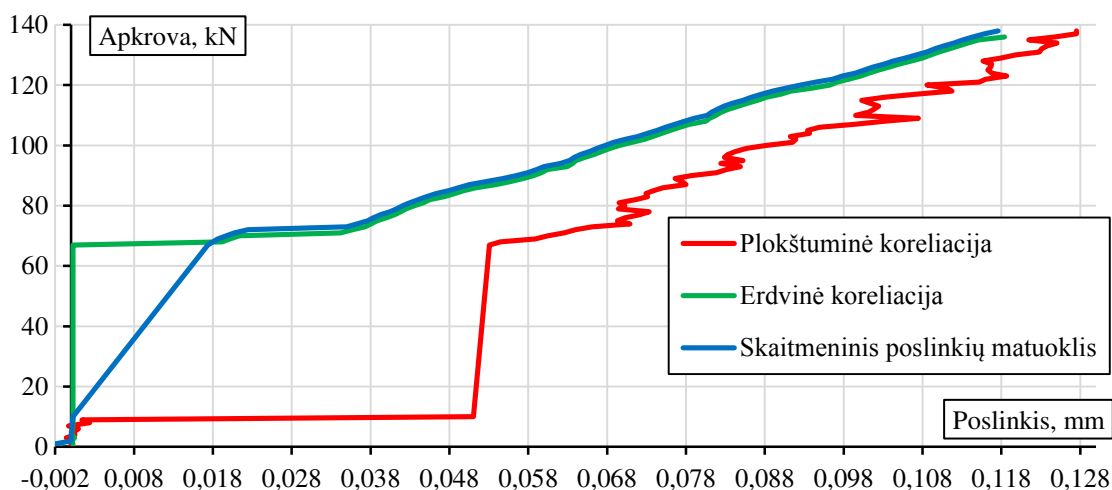
Poslinkių jutikliais užfiksuoti duomenys yra laiko pamatiniais (Gribniak *et al.* 2017). Atsižvelgus į Gribniako ir į kitų analoginius tyrimus, kurių rezultatų diagramose (32 pav.) yra

pavaizduotos LVDT ir 3D–DIC sistemų matavimų duomenų palyginimas. Palyginus šiuos duomenis buvo prieita prie išvados, kad *LaVision* sistemos duomenys yra 95 % tikslumo.



32 pav. Analoginių tyrimo rezultatų diagramos, kuriose yra vertinamas 3D–DIC metodo tikslumas (Gribniak *et al.* 2017)

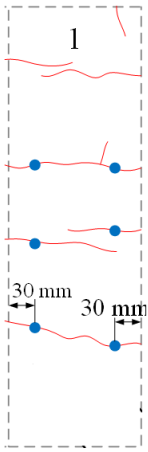
Atsižvelgus į anksčiau buvusius tyrimus, savo darbe taip pat palyginau visų trijų sistemų rezultatus ir duomenis pateikiau diagrama (33 pav.). Informacija diagramoje (33 pav.) yra iš trijų duomenų šaltinių: raudonos spalvos linija žymi plokštuminės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautus duomenis, žalia linija simbolizuoja erdvinės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gautus duomenis, o mėlyna spalva yra atraminiai duomenys, kurie yra pamatuoti ir gauti LVDT poslinkio matuokliais.



33 pav. Trejais metodais matuotų duomenų palyginimas

Mano tyrimo rezultatuose vizualiai matyti, kad erdvinės koreliacijos (žalia linija) duomenys yra kur kas panašesni į etaloninius, jų tikslumas yra vertinamas 93 %, o dvimatės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodu gauti duomenys yra 3 kartus didesni, jų neatitikimas yra 226 %. Šis didžiulis skirtumas yra dėl to, kad atliekant 2D–DIC tiriamąją dalį su mėgėjiška skaitmenine kamera nebuvo laikytasis visų būtiniausių reikalavimų, kas ir lėmė tokį didžiulį duomenų neatitikimą. Tačiau tie patys 2C–DIC duomenys (7 lentelė) buvo sulyginami su optinio mikroskopo gautais rezultatais.

7 lentelė. Optiniu mikroskopu matuotų plyšių rezultatų palyginimas su GOM programa matuotais plyšių rezultatais

Apkrova, kN	Plyšių schema	Plyšio numeris (pagal kairėje pateiktą schemą)	Pamatuotas plyšio plotis, mm (naudojant optinį mikroskopą)		2D–DIC sistema pamatuoti plyšiai, mm	
			karėje	dešinėje	karėje	dešinėje
94,2		1	plyšys nesimato	0,09	0,1252	0,1431
		2	0,13	0,16	0,1234	0,1475
		3	plyšys nesimato	plyšys nesimato	0,2275	0,2638
122		1	0,12	0,16	0,1771	0,1986
		2	0,2	0,17	0,0274	0,1104
		3	plyšys nesimato	0,14	0,0987	0,1548
Vidurkis, mm			0,15	0,14	0,1633	0,1697

Rezultatų lentelėje (7 lentelė) yra pateikta schema, kurioje yra pažymėtos plyšių matavimo vietos. Šie taškai buvo matuoti dvejais būdais. Pirmasis yra optiniu mikroskopu, o kitas 2D–DIC sistema. Mikroskopu, viso bandymo metu, statybinės konstrukcijos pleišėjimas buvo matuotas tik

du sykius, darbo viduryje ir pabaigoje. Optinis prietaisas suteikia 0,01 mm tikslumą, GOM programa 0,0001 mm tikslumą. Šių matavimų nesutapymas yra 15 %, nepaisant to, kad plokštuminės koreliacijos metodo bandymas buvo atliekamas nesilaikant visų reikalavimų.

3.3. Aerotrianguliacijos metodo patikimumas

Baigiant fotografavimo darbus būtina dokumentacija, kurioje nurodomi duomenys: fotografavimo data ir laikas, fotografuojamojo objekto informaciniai duomenys, fotokameros techniniai duomenys bei gamintojas, stočių skaičius, fotografuojamojo objekto pavadinimas ir charakteristika, įvardinti kiek nuotraukų buvo padaryta, kiek iš jų panaudota tyrimams, fotokameros aukštis nuo žemės paviršiaus, fotografavimo metodika bei kiti su fotomatastavimais susiję svarbūs duomenys.

Subjekto fotografavimas vykdytas bepilote skraidykle *DJI Inspire*, prie kurio pritaisyta fotokamera *Zenmuse x3*. Objektas fotografuotas 350 kartų, tai yra padarytos 350 fotonuotraukos ir išsaugotos .jpg formatu. Fotografavimo laikas – 45 minutes. 3D fotomodeliui panaudotos tik 191 fotonuotraukos, dėl prastos turimos kompiuterinės įrangos. Fotografavimo objektas – senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastatas. Trimatis modelis sudarytas aerotrianguliacijos metodu. Fotokameros aukštis kiekvienoje pozicijoje skiriasi, bet galima sakyti, kad Z koordinatės reikšmė WGS-84 sistemoje yra kameros aukštis nuo jūros paviršiaus. Fotografavimo darbai vykdyti ankstyva pavasarį, kai dar nebuvo sužaliavusi augmenija ir saulė nebuvo pakilusi aukštai horizonto. Lauko sąlygos, darbų vykdymo dieną, atitiko reikalavimus, nes nebuvo saulės, diena buvo ūkanota. Optimalus paros laikas aerofotografavimui yra vidurdienis, kai Saulė yra zenite, optimalus metų laikas yra pavasaris, kol nesuvešėjusi augmenija (Daniulis 1998). Atsižvelgus į visus fotografavimui keliamus reikalavimus buvo įvykdyti lauko darbai ir fotovaizdams pritaikius aerotrianguliacijos metodą buvo sukurtas pastato fotogrametrinis 3D modelis (34 pav.).



34 pav. Vilniaus senosios observatorijos pastato 3D modelis

Atlikus senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastato fotografavimą, buvo sudarytas 3D pastato fotmodelis (34 pav.) *Context Capture* programine įranga, kurios aplinkoje taip pat vyko šio modelio analizė. Pateikiama aerotrianguliacijos rezultatai (8 lentelė), kokios fotonuotraukos buvo panaudotos, kiek pagrindinių taškų buvo rasta atitinkamai fotonuotraukos ir keli iš jų buvo panaudoti fotonuotraukų jungimui. Pagal vidutinės nuokrypos technologiją buvo apskaičiuotas ir įvertintas modelio tikslumas.

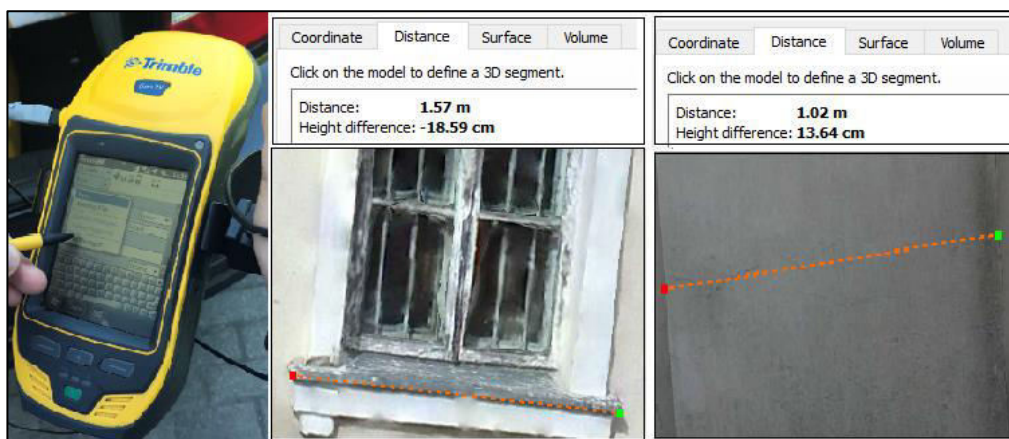
Aerotrianguliacijos tikslumo įvertinimas yra grindžiamas RMS – vidutinės nuokrypos (angl. k. *root – mean – square*) technologiją (Vainauskas 1998). Ši technologija yra paremta skaičiavimais pagal pikselio žinomų ir išlygintų kontrolinių taškų koordinatų skirtumus. Teorijoje teigiama, jei RMS yra mažesnis už 1 px, tai toks modelis yra tinkamas.

8 lentelė. Vilniaus senosios observatorijos pastato 3D fotomodelio tikslumo vertinimas

Fotonuotrauka	Surasti taškai (angl. k. <i>key points</i>)	Taškų skaičius	Atramos taškų RMS paklaida, px	Ryšio taškų RMS paklaida, m
DJI_0005.JPG	14232	1531	0,66	0,004
DJI_0011.JPG	17741	377	0,51	0,004
DJI_0014.JPG	20360	320	0,4	0,003
DJI_0017.JPG	19480	455	0,44	0,003
DJI_0020.JPG	17380	794	0,53	0,004
DJI_0021.JPG	16302	924	0,55	0,004
DJI_0024.JPG	12903	1520	0,58	0,003
DJI_0025.JPG	14475	1343	0,57	0,003
...	...	...	...	...
DJI_0333.JPG	24806	1910	0,45	0,004
DJI_0334.JPG	24742	2144	0,63	0,006
	Vidurkis		0,55	0,04

Rezultatų lentelėje (8 lentelė) matyti, kad senosios Vilniaus observatorijos pastato fotogrametrinio 3D modelio tikslumas yra 0,55 px, todėl šis modelis yra tinkamas, o ryšio taškų paklaida siekia 4 cm, tai yra kad modelyje paimtas atstumas gali svyruoti 4 cm, nei originalioje fotonuotraukoje esantis atstumas. Galima sakyti, kad šio bandymo metu sukurtas 3D modelis yra tikslus ir tinkamas tolimesniam panaudojimui.

Taip pat savo darbe Vilniaus senosios observatorijos gautą fotogrametrinį 3D modelį sulyginau su realybėje esančia situacija. Pastato keturios kertės buvo pamatuotos GNSS imtuvu *Trimble Geo 7X*. Iš šių koordinatų gauti dviejų sienų ilgiai. Taip pat rulete išmatuoti palangės ilgis ir kamino plotis. Atitinkamai visi šie ilgiai išmatuoti ir 3D modelyje. *Context Capture* programoje matuojamo atstumo tikslumas vertinamas 0,01 cm, ruletės 0,1 cm, GNSS imtuvo koordinatų tikslumas yra 0,01 cm.



35 pav. GNSS Trimble Geo 7x imtuvus ir Context Capture programoje matuojami ilgiai

Pateikiama informacija (9 lentelė) ir įvertinamas senosios Vilniaus astronomijos observatorijos 3D fotogrametrinio modelio tikslumas. Palyginami modelio atstumai su realiais. Iš viso pamatuoti 6 ilgiai realybėje, juo ir vertiname modelyje.

9 lentelė. 3D fotomodelio matmenų palyginimas su realaus statinio matmenimis ir tikslumo įvertinimas

Matavimo vieta	Atstumas realybėje (R), cm	Atstumas modelyje (M), cm	Skirtumas, cm	Tikslumas Δ , %
Kaminas	103	102	1	99,03
Palangė	156	157	1	99,36
Šiaurinė siena	8426*	8340	86	98,98
Pietinė siena	8248*	8330	82	99,01
Š. sienos dešinė pusė	366	362	4	98,91
Š. sienos kairė pusė	364	362	2	99,45
		Vidurkis	29	99,12

* - duomenys gauti naudojant GNSS Trimble Geo 7x imtuvą

Δ yra laikomas modelio tikslumas procentais. Šio elemento skaičiavimo formulė yra:

$$\Delta = 100 \% - \sqrt{\left(\frac{R-M}{R} \times 100 \%\right)^2} \quad (8)$$

Iš formulės apskaičiavus visų matavimo vietų tikslumą Δ , gauname, kad apytiksliai observatorijos pastato 3D fotogrametrinis modelio tikslumas yra 99 %. Taip pat iš duomenų esančius lentelėje (9 lentelė), matome, kad kuo ilgesnis matuojamas atstumas, tuo didesnis netikslumas yra fiksuojamas.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

Atlikus statybinės konstrukcijos, armuotojo betoninio bloko paviršių deformacijos bandymą, rezultatai buvo gauti keturiais skirtingais metodais. LVDT sistema gauti duomenys yra laikomi etaloniniais. 3D–DIC sistema gauti duomenys yra tikslūs ir jų neatitikimas buvo gautas vos 7 %. Optiniu mikroskopu matuoti duomenys yra tikslūs tiek kiek žmogaus akis gali įžiūrėti, tokiu būdu

matuojami duomenys nėra patikimi. Optiniu mikroskopu buvo išmatuoti šeši bloko paviršiaus taškai, pagal kuriuos galutiniame rezultate buvo apskaičiuotas 0,03 % paviršiaus pailgėjimas. Paskutinis metodas, kuriuo yra gauti betoninio bloko paviršiaus deformacijos siūlių plokčių duomenys, yra 2D–DIC. Iš rezultatų (33 pav.) matyti, kad tokie duomenys nėra patikimi tiriant siūlių plokčius, jų skirtumas nuo etaloninių yra 3 kartus didesnis. Plokštuminės koreliacijos metodas gali būti panaudojamas kaip pigi alternatyva, patikimai plyšių pleišėjimo schemai gauti (29 pav.). Taip pat tolimesniuose tyrimuose, įvertinus 2D sistemai keliamus būtinus reikalavimus, tikrai galima gauti patikimas betoninio bloko paviršiaus deformacijos reikšmes.

Toliau buvo sudarytas senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastato 3D fotomodelis aerotrianguliacijos metodu. Gauto modelio tikslumas buvo vertinamas RMS paklaidos technologija. Įvertinus visų fotonuotraukų RMS paklaidą vidutinis fotomodelio taško tikslumas yra 0,55 px, o atstumas tarp taškų yra 4 cm tikslumo. Taip pat norint įsitikinti, kad sukurtas 3D fotogrametrinis modelis yra tikslus, pastatas buvo išmatuotas natūroje. Šis rodiklis darbe yra žymimas Δ ženklų. Apskaičiavus vidutinę Δ reikšmę gauname, kad mano sukurtas modelis nuo realybės skiriasi vos 0,88 %, tai yra mažiau nei 1 %. Kadangi 3D modelių kūrimo technika pasaulyje yra ganėtinai naują ir iki galo nėra ištirti jų panaudojimo tikslai, todėl pasaulyje nėra reglamentų ar įstatytų, kuriuose būtų pasakyta, kur ir kokio tikslumo 3D fotomodeliai gali būti panaudoti.

Šiame darbo skyriuje buvo aptariami skaitmeninių vaizdų analizavimo metu gauti rezultatai, įvertinamas tokių fotovaizdų tikslumas ir panaudojimo galimybės. Tyrimo metu paaiškėjo, kad panaudojus fotogrametrinius metodus ir atlikus nuotolinius matavimus yra galimybė sukurti matavimams tikslumus 3D fotomodelius ir atlikti objektų paviršių deformacijos analizę.

BENDROSIOS IŠVADOS

Šiame darbe atlikta skaitmeninių vaizdų, gautų naudojant fotogrametrinius metodus, analizė. Naudojant skaitmeninių vaizdų koreliacijos ir aerotrianguliacijos metodus, sukurtas erdvinis statinio modelis iš fotonuotraukų bei atlikta konstrukcinio elemento paviršiaus deformacijų analizė.

1. Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą galima teigti, kad:
 - 1.1. erdvinių objektų modeliavimui tinkamiausias aerotrianguliacijos metodas, kuriuo kitaip nei įprastos trianguliacijos metodu, yra nustatomi ne tik kampai tarp fotokameros fotografavimo ašių, bet ir kampai apie šias ašis;
 - 1.2. paviršių deformacijų analizei tinkamiausias skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas, kuris leidžia rezultatus pateikti spalvos gradiento spektru;
 - 1.3. atvejais, kai aukštas tiriamųjų objektų tikslumas nėra būtinas, pvz. sudarant planimetrinę vietovės nuotrauką, dėl perteklinio duomenų kiekio rekomenduojama riboti ar iš viso atsisakyti sudėtingų nuotolinio matavimo sistemų, tokių kaip lazerinio skenavimo, naudojimo.
2. Apibendrinus eksperimentinius rezultatus, galima teigti, kad fotogrametrinių metodų taikymui būtina tinkamai paruošti stebimų objektų aplinką ir atsižvelgti į šiuos aspektus:
 - 2.1. fotografuojant kameros padėtis privalo būti stacionari ir stabili viso stebėjimo metu;
 - 2.2. atliekant fotografavimo darbus su nemetrine fotokamera, jos padėtis privalo būti nukreipta į tiriamąjį objektą stačiu kampu;
 - 2.3. būtina užtikrinti vienodą tiriamojo objekto apšvietimą viso stebėjimo metu;
 - 2.4. geriausia lauko fotografavimo darbus atlikti ankstyvą pavasarį, kai augmenija nėra sužaliavusi ir kai saulė nėra pakilusi aukštai horizonto. Jei fotografavimas atliekamas kitais metų laikais, būtina atsižvelgti į debesuotumą ir saulės padėtį;
 - 2.5. jei fotografavimas yra atliekamas naudojant mėgėjišką fotokamerą, būtinas natūralus apšvietimas, jei tai nėra įmanoma privalu tiriamąjį objektą apšviesti dirbtiniu šviesos šaltiniu.
3. Eksperimentiškai nagrinėtos trumpalaikė apkrova veikiamų armuoto betono prizmių paviršiaus charakteristikos, kurios stebėtos naudojant optinį mikroskopą, LVDT skaitmeninius poslinkių matuoklius bei fotogrametrinius metodus. Apibendrinus tyrimų rezultatus galima teigti, kad:
 - 3.1. erdvinės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas leidžia nustatyti nagrinėjamo objekto paviršiaus deformacijas 93 % tikslumu (atskaitos taškui naudoti LVDT skaitmeniniais poslinkių matuokliais gauti rezultatai);

- 3.2. plokštuminės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas leidžia nesudėtingai nustatyti nagrinėjamo objekto paviršiaus deformacijų pasiskirstymo schemą, kuri atitinka objektų pleišėjimo schemą, tačiau šiuo metodu nustatytos paviršiaus deformacijos nėra tikslios, gauti duomenys yra 3 kartus didesni nei etaloniniai (LVDT skaitmeniniais poslinkių matuokliais gauti rezultatai);
- 3.3. taikant plokštuminės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodą nagrinėjamo objekto plyšių pločių nustatymui gauta 15 % paklaida, lyginant su plyšių pločių duomenimis gautais naudojant optinį mikroskopą;
- 3.4. plokštuminės skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas leidžia stebėti paviršių deformacijas viso eksperimento metu, nereikalaujant papildomos brangios įrangos.
- 3.5. skaitmeninių vaizdų koreliacijos metodas buvo taikomas statybinės konstrukcijos elemento paviršiaus deformacijoms stebėti ir analizuoti, tačiau toks metodas taip pat gali būti taikomas ir pastatų fasadų paviršių charakteristikų ilgalaikiams stebėjimams.
4. Panaudojus aerotrianguliacijos metodą sukurtas senosios Vilniaus astronomijos observatorijos pastato 3D fotomodelis. Šio modelio tikslumas buvo vertinamas dviem būdais: RMS paklaida ir realių matmenų bei modelio atskaitų palyginimu. Apibendrinus rezultatus galima teigti, kad:
- 4.1. aerotrianguliacijos metodas yra tinkamas erdviniams fotomodeliams kurti tik tada, kai fotografavimas yra atliekamas iš oro su bepilote skraidykle;
- 4.2. kuriant erdvinį fotomodelį būtina galinga kompiuterinė įranga – kuo didesnis fotonuotraukų kiekis ir kuo detalesnis fotomodelis, tuo ilgesnis fotonuotraukų apdorojimo laikas;
- 4.3. fotovaizdų tikslumas yra aukštas, kai RMS dydis nesiekia 0,3 px, fotovaizdų tikslumas tinkamas matavimams, kai RMS neviršija 1 px. Sukurtas erdvinis fotomodelis yra tinkamas matavimams – jo RMS taško paklaida yra 0,5 px, kuri tiesiniams objekto matmenims sudaro 40 mm paklaidą;
- 4.4. palyginus realiai išmatuotus nagrinėjamo objekto matmenis su atitinkamais modelio matmenimis, gautas 99 % fotomodelio tikslumas;
- 4.5. aerotrianguliacijos metodas gali būti naudojamas ne tik erdviniams pastatų fotomodeliams kurti, bet ir mažesnių objektų modeliavimui, pvz., darbe nagrinėtų betoninių elementų modeliams.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Alrajhi, M.; Alam, Z.; Khan, M. A.; Alobeid, A. 2016. Influence of gsd for 3D city modeling and visualization from aerial imagery. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, p. 561–565

Buck, U.; Buße, K.; Campana, L.; Schyma, C. 2018. Validation and evaluation of measuring methods for the 3D documentation of external injuries in the field of forensic medicine. International journal of legal medicine, p. 551–561

Chen, Y.; Wei, J.; Huang, H.; Jin, W.; Yu, Q. 2018. Application of 3D-DIC to characterize the effect of aggregate size and volume on non-uniform shrinkage strain distribution in concrete. Cement and Concrete Composites, p. 178–189

Colomina, I.; Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, p. 79–97

Daniulis, J.; Deltuvas, A.; 1998. Ortofotoplanų naudojimas miškų inventorizacijai. The value of orthophotomaps in forest inventory. Forest Science, p. 5–11

Faitelson, D.; Tyszberowicz, S. 2017. UML Diagram Refinement (focusing on class-and use case diagrams). In Proceedings of the 39th International Conference on Software Engineering, p. 735–745

Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Juozapaitis, A.; Kliukas, R.; Meskenas, A. 2017. Efficient technique for constitutive analysis of reinforced concrete flexural members. Inverse Problems in Science and Engineering, p. 27–40

Gurklys, V. 2011. Aplinkos geografinės informacinės sistemos, Kaunas: Ardiva. 62 p.

He, Q.; Wang, G.; Luo, L.; Shi, Q.; Xie, J.; Meng, X. 2017. Mapping the managerial areas of Building Information Modeling (BIM) using scientometric analysis. International Journal of Project Management, p. 670–685

Hegazy, I. R.; Kaloop, M. R. 2015. Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. International Journal of Sustainable Built Environment, p. 117–124

History of photogrammetry. 2008. The Center for Photogrammetric Training Surveying Engineering Department Ferris State University

Ingensand, H. 2006. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria Nr. 2224

- Kaufman, J.; Rennie, A. E. W.; Clement, M. 2015. Single camera photogrammetry for reverse engineering and fabrication of ancient and modern artifacts. *Procedia CIRP*, 36, p. 223–229
- Kölbl, O. R. 1976. Metric or non-metric cameras. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(1), p. 103–113
- Kraus, K. 2007. *Photogrammetry. Geometry from Image and Laser Scans*. 2nd edition. Berlin: Walter de Gruyter. 459 p.
- Kumetaitenė, A.; Stanionis, A. 2010. *Skaitmeninių žemėlapių sudarymas ir duomenų apdorojimas*. Vilnius: Technika. 111p.
- Li, J.; Xie, X.; Yang, G.; Zhang, B.; Siebert, T.; Yang, L. 2017. Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system. *Optics and Lasers in Engineering*, 90, p. 19–25
- Lo, C. F. 2017. Positioning and orientation data analysis system and method thereof. U.S. Patent Application Nr. 15/261, 177 p.
- Luhmann, T.; Fraser, C., Maas, H. G. 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, p. 37–46
- McCarthy, J.; Benjamin, J. 2014. Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: an accessible, diver-based approach. *Journal of maritime archaeology*, 9(1), p. 95–114
- Naprytė, M.; Rudis, R., Latvytė, J., Sužiedelytė–Visockienė, J. 2017. Kultūros paveldo objektų fotogrametrinių matavimų statistika bei duomenų bazių kūrimo analizė Lietuvoje bei kitose pasaulio šalyse. In 20-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas–Lietuvos ateitis“ teminė konferencija Civilinė inžinerija ir geodezija, 2017 m. kovo 24 d., p. 1–6
- Oltra, D.; Agustín- Panadero, R.; Pradíes, G.; Gomar- Vercher, S.; Peñarrocha- Diago, M. 2017. Maxillary Full- Arch Immediately Loaded Implant- Supported Fixed Prosthesis Designed and Produced by Photogrammetry and Digital Printing: A Clinical Report. *Journal of Prosthodontics*, 26(1), p. 75–81
- Paladino, A.; Widing, R.; Whitwell, G. 2015. Internal and external organisational orientations: Comparing the resource based view and market orientation. In *Global perspectives in marketing for the 21st century*, p. 338–338
- Pan, B.; Yu, L.; Wu, D. 2013. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification. *Experimental Mechanics*, 53(9), p. 1719–1733

- Pan, B.; Wang, Z.; Lu, Z. 2010. Genuine full-field deformation measurement of an object with complex shape using reliability-guided digital image correlation. *Optics express*, 18(2), p. 1011–1023
- Quan Li, X.; An Chen, Z.; Ting Zhang, L.; Jia, D. 2016. Construction and Accuracy Test of a 3D Model of Non-Metric Camera Images Using Agisoft PhotoScan. *Procedia Environmental Sciences*, 36, p. 184–190
- Ruzgienė, B. 2008. *Fotogrametrija: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 203 p.
- Schenk, T. 1999. *Digital photogrammetry: Vol. I: Background, fundamentals, automatic orientation procedures*. TerraScience.
- Schenk, T. 2004. From point-based to feature-based aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(5-6), p. 315–329
- Schermerhorn, W. 1960. Impressions of the 1960 London Congress of the International Society for photogrammetry. *Photogrammetria*, 17, p. 39–45
- Shan, J.; Toth, C. K. 2018. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press
- Skeivalas, J.; Zigmantiene, E.; Tumeliene, E.; Birvydiene, R. 2010. Fotogrametrijos metodai analizuojant akies ležiuko skaitmeninius vaizdus. *Geodezija ir Kartografija*, 36(1), p. 25-29
- Sun, T.; Xu, Z.; Yuan, J.; Liu, C.; Ren, A. 2017. Virtual Experiencing and Pricing of Room Views Based on BIM and Oblique Photogrammetry. *Procedia Engineering*, 196, p. 1122–1129
- Sužiedelytė–Visockienė, J.; Bagdžiūnaitė, R., Malys, N., Maliene, V. 2015. Close-range photogrammetry enables documentation of environment-induced deformation of architectural heritage. *Environmental engineering and management journal*, 14(6), p. 1371–1381
- Vainauskas, V. 1977. *Fotogrametrija*. Vilnius: Mokslas. 214 p.
- Vainauskas, V. 1998. Skaitmeninės aerotrianguliacijos tikslumas. *Geodezija ir Kartografija*, 24(4), p. 193–201
- Vilūnas, R.; Pilypaitis, A. 1975. Pastatų fotogrametrinių fiksacijos metodų klausimu. *Geodezijos Darbai*, 7(1), p. 82–87
- White, T. G.; Patten, J. R. W.; Wan, K. H.; Pullen, A. D.; Chapman, D. J.; Eakins, D. E. 2017. A single camera three- dimensional digital image correlation system for the study of adiabatic shear bands. *Strain*, 53(3)

Zhang, L. 2005. Automatic digital surface model (DSM) generation from linear array images. ETH Zurich.

Zhang, S.; Lippitt, C. D.; Bogus, S. M.; Loerch, A. C.; Sturm, J. O. 2016. The accuracy of aerial triangulation products automatically generated from hyper-spatial resolution digital aerial photography. *Remote Sensing Letters*, 7(2), p. 160–169

Žalnierukas, A.; Čypas, K. 2006. Žemes paviršiaus skenavimo lazeriu iš orlaivio technologijos analize. *Geodezija ir kartografija*, 32(4), p. 101–105