



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Fotogrametrinių 3D modelių panaudojimo galimybių tyrimas tiltų konstrukcijų geometrinėms charakteristikoms nustatyti**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Martynas Arbačas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Pupeikis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Fotogrametrinių 3D modelių panaudojimo galimybių tyrimas tiltų konstrukcijų geometrinėms charakteristikoms nustatyti**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių (6211EX008)

---

**Martynas Arbačas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Pupeikis**

Vadovas

**Lekt. Vytautas Bocullo**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Martynas Arbačas

## **Fotogrametrinių 3D modelių panaudojimo galimybių tyrimas tiltų konstrukcijų geometrinėms charakteristikoms nustatyti**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Martynas Arbačas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

**Studijų programa:** STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

**Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):**

**FOTOGRAMETRINIŲ 3D MODELIŲ PANAUDOJIMO GALIMYBIŲ TYRIMAS TILTŲ  
KONSTRUKCIJŲ GEOMETRINĖMS CHARAKTERISTIKOMS NUSTATYTI**

**Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.:** 2021 m. gruodžio 3 d. Nr. ST18-F-09-1

**(lietuvių k.):**

**FOTOGRAMETRINIŲ 3D MODELIŲ PANAUDOJIMO GALIMYBIŲ TYRIMAS TILTŲ  
KONSTRUKCIJŲ GEOMETRINĖMS CHARAKTERISTIKOMS NUSTATYTI**

**(anglų k.):**

**INVESTIGATION OF PHOTOGRAMMETRIC 3D MODELS APPLICATION POSSIBILITIES  
TO DETERMINE BRIDGES GEOMETRIC CHARACTERISTICS**

**Pradiniai duomenys darbui:**

Tikslas - ištirti fotogrametrinių 3D modelių panaudojimo galimybes statiniuose.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti fotogrametrijos ir statinių informacinio modeliavimo (BIM) metodologijas bei nustatyti jų tarpusavio integracijos galimybes.
2. Eksperimentiniu būdu nustatyti fotogrametrinių 3D modelių geometrinį tikslumą, lyginant su teorinėmis objektų charakteristikomis.
3. Ištirti fotogrametrijos 3D modelių pritaikymo ir panaudojimo galimybes statybinių konstrukcijų defektams identifikuoti.
4. Nustatyti fotogrametrinių 3D modelių konversijos į BIM ekosistemai pritaikytų semantinių modelių galimybes.

Praktinė vertė; mokslinis naujumas.

Literatūros analizė:

- ❖ Kas yra fotogrametrija? Realybės modeliavimo technikos; metodologija; fotogrametrijai naudojama programinė įranga; nuotraukų surinkimo praktikos ir iššūkiai.
- ❖ Fotogrametrijos tikslumas 3D modeliuose; Smulkesnių objektų – konstrukcijų defektų aptikimo tikslumas naudojant fotogrametriją.
- ❖ Fotogrametrijos modelių konversija į BIM ekosistemai pritaikytą semantinį modelį.
- ❖ Literatūros analizės išvados.

Tyrimų dalis:

- ❖ Pasiruošimas eksperimentui: bepiločio orlaivio techninės specifikacijos; skrydžio planas; oro sąlygos. Eksperimento atlikimas bepiločiu orlaiviu naudojant skirtingas praktikas.
  - ❖ 3D fotogrametrinių modulių sukūrimas naudojant specialią programinę įrangą.
  - ❖ Modelio matavimo tikslumo tyrimas.
  - ❖ Fotogrametrinio modelio konversijos į BIM semantinį modelį tyrimas.
- Galutinės išvados.

**Baigiamojo projekto dalys:****Atlikti**

Įvadas	<b>x</b>
Literatūros apžvalga	<b>x</b>
Metodologija	<b>x</b>
Eksperimentiniai tyrimai	<b>x</b>
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	<b>x</b>

**Kita informacija (pagal poreikį):**

<b>KONSULTACIJŲ LAIKAS: LYGINĖMIS SAVAITĖMIS ANTRADIENIAIS 08:15-9:00 (NUOTOLINĖS KONSULTACIJOS)</b>
--

**Vadovas:**

doc. dr. Darius Pupeikis

(indėlis 100 %)

---

*pareigos, vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu***Konsultantas:**

(indėlis \_\_\_\_\_ %)

---

*pareigos, vardas, pavardė***Konsultantas:**

(indėlis \_\_\_\_\_ %)

---

*pareigos, vardas, pavardė***Studentas:**

Martynas Arbačas

---

*vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Arbačas, Martynas. Fotogrametrinių 3D modelių panaudojimo galimybių tyrimas tiltų konstrukcijų geometrinėms charakteristikoms nustatyti. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Pupeikis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: realybės skenavimo technologijos, fotogrametrija, lazerinis skenavimas, bepilotis orlaivis, geometrinis tikslumas, tiltai.

Kaunas, 2022. 49 p.

### **Santrauka**

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti realybės skenavimo technologijų (LiDAR, fotogrametrijos) pagrindu sukurtų 3D modelių geometrinį tikslumą bei jų panaudojimo galimybes tiriant tiltų konstrukcijas, duomenis surenkant bepiločiu orlaiviu.

Darbas pradedamas nuo literatūros apžvalgos, kurioje aptariamas fotogrametrijos veikimo principas, naudojimo sritys. Analizuojami veiksniai, darantys įtaką fotogrametrinio 3D modelio tikslumui. Aprašoma BIM metodologija, BIM ir fotogrametrinio 3D modelių panašumai ir skirtumai. Aptariama lazerinio skenavimo technologija bei pažaidų konstrukcijose nustatymo tyrimai naudojant realybės skenavimo technologijas.

Antroje dalyje analizuojami du tyrimo objektai. Pirmojo tyrimo tikslas yra ištirti realybės skenavimo technologijų panaudojimo galimybes konstrukcijų defektams nustatyti. Antrojo tyrimo tikslas yra nustatyti sukurto fotogrametrinio 3D modelio geometrinį tikslumą. Nustačius fotogrametrinio 3D modelio tikslumą analizuojamos fotogrametrijos technologijos panaudojimo galimybės konstrukcijų matavimams. Gautiems rezultatams suformuluojamos išvados.

Projekto sudedamosios dalys: lentelių sąrašas (6 lentelių), paveikslėlių sąrašas (24 paveikslėliai), įvadas, literatūros apžvalga, eksperimentinė dalis, išvados, literatūros sąrašas (36 šaltinis), priedai (4 dalys).

Arbačiauskas, Martynas. Investigation of Photogrammetric 3D Models Application Possibilities to Determine Bridges Geometric Characteristics. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Darius Pupeikis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: reality capture technologies, photogrammetry, laser scanning, unmanned aerial vehicles, bridges.

Kaunas, 2022. 49 pages.

### **Summary**

The purpose of this master's thesis is to investigate the geometric accuracy of 3D models based on reality capture technologies (LiDAR, photogrammetry) and to determine its use cases analysing bridge structures, capturing data using unmanned aerial vehicle.

The thesis begins with a literature review that examines photogrammetry's working principle and its use cases. Analyses factors that affect the accuracy of photogrammetric 3D models. Examines BIM methodology, determines BIM and photogrammetric 3D models' similarities and differences. Examines laser scanning technology and investigates reality capture technologies' possibility to determine constructions defects.

There are two case studies in the second part. The first case study's purpose is to investigate reality capture technologies possibilities to determine construction defects. The second case study's purpose is to investigate created photogrammetric 3D models' geometric accuracy. After establishing the geometric accuracy of photogrammetric 3D model possibilities of measuring constructions are investigated. Conclusions are given for the results.

Components of the thesis are as follow: list of tables (6 tables), list of pictures (24 pictures), introduction, literature review, experimental part, conclusions, list of literature (36 sources), appendixes (4 parts)

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Įvadas į fotogrametriją.....	12
1.2. Fotogrametrijos veikimo principas .....	13
1.3. Fotogrametrijos naudojimo sritys.....	14
1.4. Metodologija.....	15
1.4.1. Naudojamų įrenginių charakteristikos.....	15
1.4.2. Nuotraukų atlikimo technikos .....	15
1.4.3. Kontroliniai taškai .....	17
1.4.4. Oro sąlygos.....	18
1.5. BIM metodologija .....	19
1.6. BIM ir fotogrametrinių 3D modelių palyginimas .....	19
1.7. LiDAR technologija .....	20
1.8. Pažaidų konstrukcijoje tyrimai .....	22
<b>2. Eksperimentinė dalis .....</b>	<b>27</b>
2.1. Pirmasis objektas .....	27
2.1.1. Pirmojo tyrimo objektas ir jo tikslas .....	27
2.1.2. Pirmajam tyrimui naudojama įranga .....	29
2.1.3. Pirmojo tyrimo eiga.....	29
2.1.4. Pirmojo tyrimo rezultatai.....	31
2.2. Antrasis objektas .....	35
2.2.1. Antrojo tyrimo objektas ir jo tikslas.....	35
2.2.2. Antrajam tyrimui naudojama įranga.....	36
2.2.3. Antrojo tyrimo eiga .....	36
2.2.4. Antrojo tyrimo rezultatai .....	38
2.2.5. Fotogrametrijos technologijos panaudojimo galimybės konstrukcijų matavimams .....	41
<b>Išvados .....</b>	<b>46</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>47</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>50</b>
1 priedas. Pirmojo tyrimo objekto nuotraukų atlikimo ataskaita .....	50
2 priedas. Pirmojo tyrimo objekto fotogrametrinio 3d modelio kūrimo kokybės ataskaita .....	51
3 priedas. Antrojo tyrimo objekto nuotraukų atlikimo ataskaita.....	60
4 priedas. Antrojo tyrimo objekto fotogrametrinio 3d modelio kūrimo kokybės ataskaita .....	62



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Pirmojo tyrimo metu naudojama įranga .....	29
<b>2 lentelė.</b> Antrojo tyrimo metu naudojama įranga .....	36
<b>3 lentelė.</b> Elektroniniu tacheometru gauti rezultatai .....	39
<b>4 lentelė.</b> Fotogrametrinio 3D modelio ir BIM modelio lyginimo rezultatai.....	40
<b>5 lentelė.</b> Gelžbetoninių monolitinių konstrukcijų leistinieji nuokrypiai [28].....	41
<b>6 lentelė.</b> Surenkamo gelžbetonio sieninių elementų leistinieji gamybos nuokrypiai [31].....	43

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Fotogrametrijos laikotarpiai [1].	12
<b>2 pav.</b> Fotogrametrijos veikimo principinė schema [2].	13
<b>3 pav.</b> Bepiločio orlaivio skrydžio plano šablonai [6].	16
<b>4 pav.</b> Fotogrametrijos taikinių išdėliojimo principas [9].	18
<b>5 pav.</b> Nuotraukų atlikimo vietos [22].	23
<b>6 pav.</b> Tilto atramos tiriamų defektų plotas [22].	23
<b>7 pav.</b> Automatiškai nustatytas plyšio ilgis ir plotis [22].	24
<b>8 pav.</b> Simuliuotų konstrukcijų pažaidų nuotraukų palyginimas su sugeneruotu 3D modeliu [25].	25
<b>9 pav.</b> Pirmojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].	25
<b>10 pav.</b> Antrojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].	26
<b>11 pav.</b> Trečiojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].	26
<b>12 pav.</b> Pirmojo tyrimo objekto lokacija.	27
<b>13 pav.</b> Pirmojo objekto vaizdas iš palydovo	27
<b>14 pav.</b> Pirmojo tyrimo objekto konstrukcijų defektai	28
<b>15 pav.</b> Kontrolinių taškų nužymėjimo principas	30
<b>16 pav.</b> Pirmojo objekto nuotraukų atlikimo vietos (žalia spalva)	31
<b>17 pav.</b> Bendras pirmojo objekto fotogrametrinio 3D modelio vaizdas	32
<b>18 pav.</b> Sugeneruotas tilto apačios fotogrametrinio 3D modelio vaizdas	33
<b>19 pav.</b> Pirmojo objekto lazerinio skenavimo 3D taškų debesis.	34
<b>20 pav.</b> Antrojo tyrimo objekto lokacija	35
<b>21 pav.</b> Esama antrojo objekto situacija.	36
<b>22 pav.</b> Antrojo tyrimo matavimams pasirinkti taškai / matavimų zona	37
<b>23 pav.</b> Antrojo tyrimo objekto matuojami atstumai reikalingi rezultatų palyginimui.	39
<b>24 pav.</b> Antrojo tyrimo objekto matuojami atstumai reikalingi rezultatų palyginimui.	45

## **Įvadas**

### **Darbo aktualumas**

Periodinė konstrukcijų patikra kainuoja brangiai, ypatingai, jeigu patikra atliekama rankiniu būdu. Patikros rezultatus yra sunku sekti bėgant laikui, nes skirtingiems ekspertams tikrinant konstrukcijas pažaidos gali būti įvertinamos skirtingai. Šių problemų galima išvengti pasitelkiant realybės skenavimo technologijas. Realybės skenavimo technologijų matavimo rezultatas gali būti 3D taškų debesis ar tinklelis, kuris rodo tikrinamo objekto esamą situaciją. Matavimus atliekant periodiškai galima matyti konstrukcijų pažaidų skirtumus bėgant laikui ir nebelieka vietos skirtingų ekspertų interpretacijai. Tiriamajame darbe numatoma išanalizuoti realybės skenavimo technologijų (LiDAR ir fotogrametrijos) geometrinį tikslumą, jo galimybes nustatyti konstrukcijų pažaidas, bei galimas realybės skenavimo technologijų pritaikymo galimybes statybos pramonės srityje.

### **Darbo tikslas ir uždaviniai:**

Darbo tikslas – ištirti realybės skenavimo technologijų (LiDAR, fotogrametrijos) pagrindu sukurtų 3D modelių geometrinį tikslumą bei jų panaudojimo galimybes tiriant tiltų konstrukcijas, duomenis surenkant bepiločiu orlaiviu.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti realybės skenavimo (LiDAR, fotogrametrijos) ir statinių informacinio modeliavimo (BIM) metodologijas bei nustatyti jų tarpusavio integracijos galimybes.
2. Eksperimentiniu būdu nustatyti fotogrametrinių 3D modelių geometrinį tikslumą lyginant jį su teorinėmis objektų charakteristikomis.
3. Atsižvelgiant į gautą fotogrametrinių 3D modelių tikslumą nustatyti šių technologijų pagrindu sukurtų modelių panaudojimo galimybes statybos pramonės srityje.
4. Ištirti lazerinio skenavimo (LiDAR) ir fotogrametrijos pagrindu suformuoto taškų debesies pritaikymo galimybes konstrukcijų defektams nustatyti.

### **Mokslinis naujumas**

Tyrimais nustatyta dabartinis tiltų konstrukcijoms būdingų geometrinių charakteristikų tikslumas duomenis surenkant bepiločiais orlaiviais ir taikant realybės skenavimo technologijas.

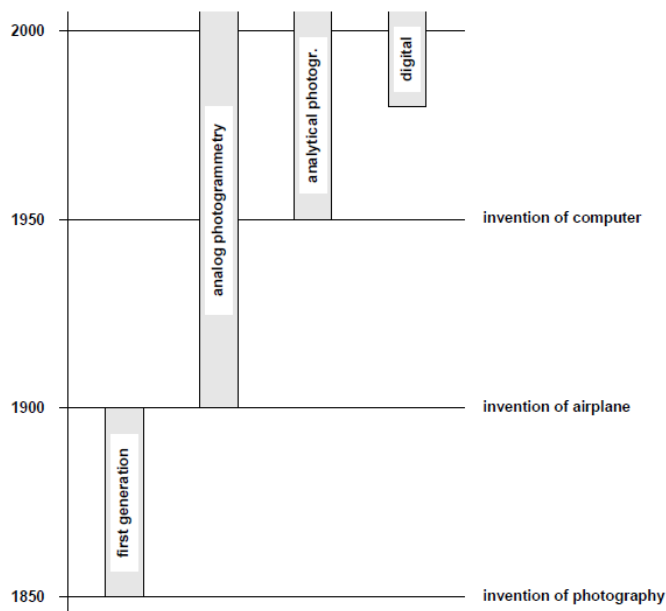
### **Praktinė vertė**

Naudojantis fotogrametrijos tyrimų metodika galima efektyviau tyrinėti sunkiai prieinamas ar sudėtingos geometrijos konstrukcijas tokiu būdu sutaupant resursų tyrimams.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Įvadas į fotogrametriją

Fotogrametrija – tai matavimų atlikimo iš nuotraukų mokslas. Žodis fotogrametrija yra kilęs iš trijų graikų kalbos žodžių – „phos“, „gramma“ ir „metrein“. Šie žodžiai reiškia šviesą, piešti ir matavimus. Galima matyti, kad žodis fotogrametrija yra susijęs su šviesos fiksavimu nuotraukomis, bei matavimų atlikimu naudojant nuotraukas. Šio mokslo pradžia tapatinama su fotografijos atsiradimu 1839 m. Kaip mokslas fotogrametrija pirmą kartą tarptautiniu mastu buvo paminėta 1867 m. Albrecht'o Meydenbauer'io straipsnyje „Die Photometrographie“ [1]. Fotogrametrija pagal laikotarpius yra skirstoma į keturias kartas. Pirmoji karta buvo eksperimentinė, su daugybe įspūdingų antžeminės ir balionų fotogrametrijos pasiekimų. Antroji karta dažnai vadinama analogine, šiuo laikotarpiu stengiantis išvengti ilgų skaičiavimų buvo naudojami optiniai prietaisai. Trečioji karta vadinama analitine, ji prasidėjo su kompiuterio atsiradimu. Šiuo laikotarpiu sudėtingi skaičiavimai buvo atliekami kompiuteriu. Tai padidino fotogrametrijos tikslumą dešimtimis kartų. Nors darbus jau atlikdavo kompiuteris, gauti ir interpretuoti matavimų rezultatai galėdavo tikrai šios srities specialistai. Na ir ketvirtoji fotogrametrijos karta yra skaitmeninė [1]. Ši karta tęsiasi iki šiol. Ketvirtosios kartos laikotarpiu pradėtos naudoti skaitmeninės nuotraukos, visi skaičiavimai buvo atliekami kompiuteriu ar netgi išmaniuoju telefonu. Fotogrametrijos mokslas šiomis dienomis tapo prieinamas visiems. Gauti paprastą fotogrametrinį 3D modelį gali kiekvienas turintis išmanųjį telefoną. Tam nebereikia būti fotogrametrijos srities specialistu. Fotogrametrijos laikotarpiai iliustruoti 1-ame paveikslėlyje.



1 pav. Fotogrametrijos laikotarpiai [1].

Sparčiai tobulėjant kompiuteriams atsiranda galimybė apdoroti vis didesnius duomenų kiekius. Prieš daugiau nei 150 metų fotogrametrijos gautas rezultatas apsiribojo atstumo išmatavimu iki pasirinkto taško. Dabar – turint šimtus ar tūkstančius nuotraukų, apskaičiuojami milijonai ar net milijardai taškų koordinatų. Šis didelis duomenų rinkinys suteikia neapsakomas fotogrametrijos panaudojimo galimybes. Jos bus aprašomos sekančiuose skyriuose.

## 1.2. Fotogrametrijos veikimo principas

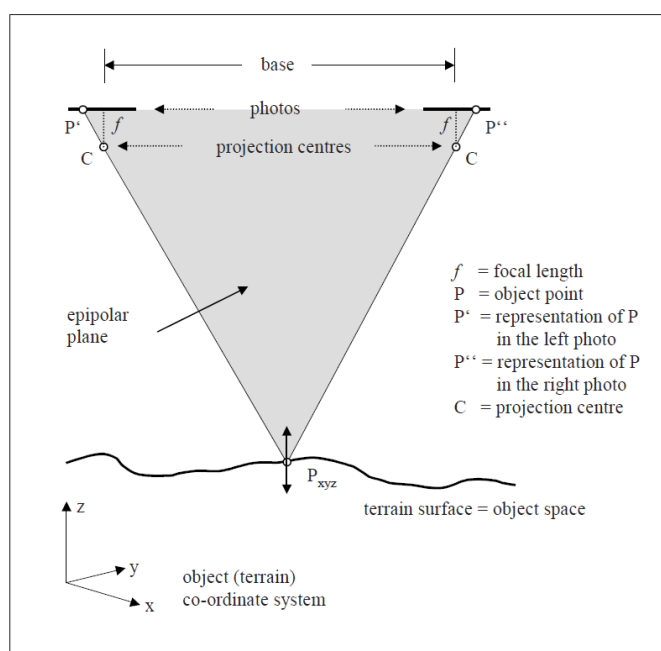
Fotogrametrijos užduotis yra nustatyti santykį tarp 2D taškų nuotraukose ir 3D taškų realybėje. Sparčiai keičiantis ir tobulėjant technologijoms fotogrametrijos veikimo principas lieka toks pat. Norint išmatuoti atstumą iki objekto ar gauti jo koordinatas reikia turėti bent dvi to objekto nuotraukas, padarytas skirtingu kampu. Žinant koordinatas, iš kurių buvo atliekamos nuotraukos, galima nustatyti atstumą iki fotografuojamo objekto.

Naudojant vieną nuotrauką ir žinant atstumą iki objekto galima gauti objekto koordinatas, bet jos būtų tik 2D koordinatas. Norint gauti trečią dimensiją – atstumą iki objekto, reikia turėti antrą to paties objekto nuotrauką, atliktą kitu kampu.

Kad būtų paprasčiau suvokti atstumo iki objekto apskaičiavimo principą, galima prisiminti kaip veikia žmogaus rega. Kadangi žmogus vaizdą mato vienu metu iš dviejų skirtingų taškų, kurie yra tam tikru kampu vienas nuo kito – mūsų smegenys preliminariai sugeba nustatyti atstumą iki žiūrimo objekto ir tai mums suteikia savotišką gylį suvokimą (erdvės pojūtį).

Būtent šiuo principu, dar vadinamu stereoskopiniu žiūrėjimu gaunama 3D informacija fotogrametrijoje. Jeigu turima dvi ar daugiau to paties objekto nuotraukų, atliktų iš skirtingų pozicijų, galima nesunkiai apskaičiuoti atstumą iki objekto.

Iliustruotas fotogrametrijos veikimo principas pavaizduotas 2-ame paveikslėlyje. Kiekvienas reljefo taškas yra matomas dviejose skirtingu kampu atliktose nuotraukose. Jeigu žinomos koordinatės, iš kurių yra atliekamos nuotraukos – galima apskaičiuoti atstumą iki objekto. Tai atliekama iš lygčių sistemos, apskaičiuojant kur susikerta spinduliai P-P' ir P-P''. Artėjant taškui P, spinduliai P-P' ir P-P'' ilgiai iki jų susikirtimo taško trumpėja, dėl to galima suprasti, kad objektas yra arčiau [2]. Šis atstumo apskaičiavimo principas yra vadinamas trianguliacija.



2 pav. Fotogrametrijos veikimo principinė schema [2].

### 1.3. Fotogrametrijos naudojimo sritys

Fotogrametrija yra skirstoma į dvi pagrindines šakas – aerofotogrametrija (aerial photogrammetry) ir artimo atstumo fotogrametrija (terrestrial photogrammetry). Aerofotogrametrija dažnai naudojama žemėlapių kūrimui, vietovės reljefui nustatyti ar žemės darbų kiekių skaičiavimui karjeruose. Artimo atstumo fotogrametrija yra atliekama iš stabilių vietų, artimų matuojamam objektui. Paprastai ji atliekama nuo žemės paviršiaus arba netoli jo.

Dažnai praktikoje naudojamas minėtų dviejų fotogrametrijos šakų mišinys. Bepiločio orlaivio pagalba objektas fotografuojamas norint gauti bendrą objekto vaizdą. Objekto vietose, kuriose reikia didesnio detalumo ar kur bepilotis orlaivis priskristi negali, naudojama artimo atstumo fotogrametrija. Minėtas fotogrametrijos šakų mišinys padeda gauti gerokai tikslesnį ir pilnesnį rezultatą tiriamam objektui.

Esant atvejams, kai bendro išorinio statinio vaizdo neužtenka ir norima gauti vidinį pastato vaizdą, dažnai kartu su fotogrametrija naudojama lazerinio skenavimo (LiDAR) technologija. Plačiau ši technologija bus aprašoma sekančiuose skyriuose.

Statybos inžinerijos srityje, prieš numatant kuri iš šių dviejų fotografavimo metodikų bus naudojama, reikia žinoti kas bus matuojama. Matuojant geometrinį statinio tikslumą, pavyzdžiui, lyginant „as-planned“ ir „as-built“ modelius ar atliekant tiltų monitoringą naudojama aerofotogrametrija [X]. Tuo tarpu norint matuoti statinio įlinkius atliekant bandymus, ar norint aptikti ir išmatuoti konstrukcijų pažaidas reikėtų naudoti artimo atstumo fotogrametrija. Jos pagalba gaunama daugiau tiriamų objekto vietų nuotraukų, atliktų iš artimesnio atstumo. Tai didina fotogrametrinio 3D modelio paviršių detalumą ir leidžia atlikti tikslesnę objekto analizę.

Žinant fotogrametrijos rezultatą galima suprasti, kad šio mokslo panaudojimo sritys yra beribės. Vienas iš dažniausiai šiomis dienomis pasitaikančių fotogrametrijos matavimų rezultatų yra 3D taškų debesis ar tinklelis. Taškų debesies panaudojimo galimybės yra labai įvairios. Pradedant žemės darbų kiekių skaičiavimu, baigiant žemėlapių kūrimu kompiuteriniams žaidimams. Fotogrametriją šiomis dienomis naudoja ne tik geodezininkai, bet ir architektai ar statybininkai.

Statybos srityje, tiriant statinių konstrukcijas fotogrametrijos naudojimo privalumai yra šie [3]:

- Naudojama mažiau fizinio darbo;
- Lengva išmatuoti sunkiai pasiekiamas konstrukcijas;
- Informaciją apie išmatuotą konstrukciją galima lengvai saugoti.
- Vėliau, išmatavus konstrukciją po tam tikro laiko tarpo galima matyti informacijos skirtumą (deformacijas);
- Darbai vyksta gerokai sparčiau;
- Prieš atvykstant į objektą nebūtina iš anksto parinkti taškus, kurie bus matuojami, sukūrus fotogrametrinį 3D modelį galima matuoti visus norimus taškus;
- Sutaupoma resursų lyginant su tradiciniais konstrukcijų tyrimo metodais (ypatingai tiriant sudėtingus 3D konstrukcijas ar didelės apimties statinius).

## **1.4. Metodologija**

Fotogrametrinio modelio tikslumui įtaką daro daugybė skirtingų faktorių. Šiame poskyryje bus aprašomi pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką fotogrametrinio 3D modelio tikslumui.

### **1.4.1. Naudojamų įrenginių charakteristikos**

Pagrindinis įrenginys, darantis įtaką fotogrametrinio modelio tikslumui yra bepilotis orlaivis su kartu ant jo sumontuota fotokamera. Svarbiausios bepiločio orlaivio charakteristikos yra jo skrydžio laikas ir galimybė pakelti fotokamerą aukščiau nei horizontali plokštuma [4]. Bepiločio orlaivio skrydžio laikas svarbus, nes turint ilgiau galiojančią bateriją galima išlaikyti nuoseklesnį skrydžio planą. Nuoseklumas fotogrametrijoje yra svarbi savybė norint gauti kuo tikslesnius rezultatus. Skraidyklės galimybė pakelti fotokamerą aukščiau nei horizontali plokštuma yra ypatingai svarbu tiriant horizontalius statinių paviršius. Neturint galimybės pakelti fotokameros aukščiau horizontalios plokštumos prarandama milžiniška duomenų imtis, kuri yra viena svarbiausia tiriant tiltų konstrukcijų pažaidas.

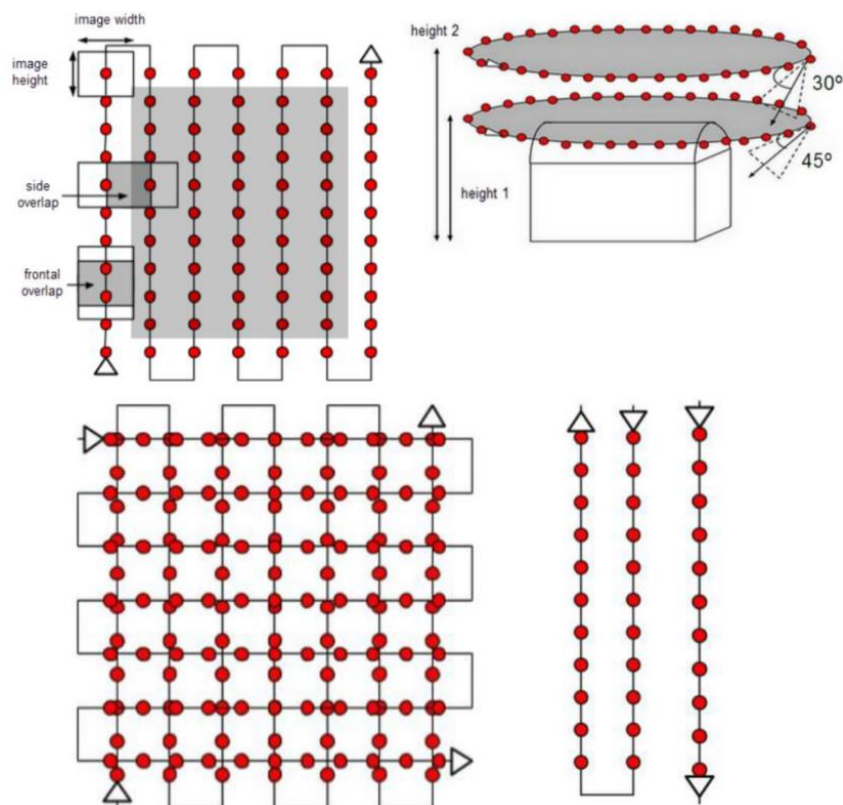
Sekantis įrenginys, pritvirtintas prie bepiločio orlaivio ir darantis didelę įtaką fotogrametrinio modelio tikslumui yra fotokamera. Svarbiausi fotokameros parametrai yra rezoliucija, fotokameros sensoriaus dydis ir diapazonas. Esant didesnei fotokameros rezoliucijai toje pačioje nuotraukoje gaunamas didesnis taškų (pikselių) skaičius. Turint daugiau taškų gaunama, kad vienam taškui tenkanti šviesos plotelis yra mažesnis. Kuo mažesnis šviesos plotelis tenka vienam taškui, tuo tikslesnis realybės atspindys yra pavaizduotas nuotraukoje, o tai taip pat didina ir fotogrametrinio modelio tikslumą. Kuo didesnis šviesos plotas tenka vienam taškui, tuo didesnis jautrumas šviesai gaunamas, o tai daro neigiamą įtaką vaizdų kokybei. Fotokameros diapazonas nusako plačiai fiksuojamas vaizdas fotokameroje. Esant mažesniajam diapazonui matomas platesnis vaizdas fotokameroje. Esant didesniajam fotokameros diapazonui, matoma siauresnis vaizdas, bet jis yra labiau priartinamas. Nagrinėjant skirtingų diapazonų fotokameras kuriant fotogrametrinį 3D modelį [5] pastebėta, kad geriausias rezultatas yra gaunamas naudojant vidutinio diapazono fotokamerą. Tiek fotokameros rezoliucija, tiek diapazonas ar sensoriaus dydis turi būti žinomi prieš atliekant trianguliaciją. Nežinant šių fotokameros specifikacijų trianguliacija netgi nebūtų vykdoma, nes programinė įranga nesugebėtų suprasti ir nustatyti realių atstumų iki matuojamų objektų

### **1.4.2. Nuotraukų atlikimo technikos**

Šiame skyrelyje išskiriami trys pagrindiniai nuotraukų atlikimo technikos akcentai, darantys įtaką fotogrametrinio modelio tikslumui – bepiločio orlaivio skrydžio planas, nuotraukų persidengimas ir fotokameros orientavimas.

Prieš pradėdant bepiločio orlaivio skrydį svarbu numatyti, koku skrydžio planu bus vadovaujama. Šiais laikais bepiločio orlaivio pilotas gali rinktis ar skraidyklę nori valdyti pats, ar tai patikėti kompiuteriui. Norint turėti nuoseklesnį skrydį (nuoseklumas tiesiogiai įtakoja geresnį 3D modelio rezultatą) dažniau yra renkamasis automatinis bepiločio orlaivio skrydžio planas, kuris yra parenkamas iš daugybės galimų skrydžio planų šablonų. Reikia atkreipti dėmesį – nėra vieno universalus skrydžio plano, tinkančio visoms pasitaikančioms situacijoms. Jis priklauso nuo to, ką norima išmatuoti. Kuriant žemėlapius ar aerofotografines nuotraukas dažniausiai naudojamas paprasčiausias tinklelio arba įstrižo tinklelio formos skrydžio planas. Tuo tarpu tiriant aukštus statinius skraidyklė aplink statinį skraido ratu. Tiriant tiltus bepiločio orlaivio skrydžio planas turi

būti šiek tiek specifiškesnis. Jis turi būti pritaikytas norimiems tirti tilto parametrams. Kuo tyrimų užduotis yra specifiškesnė, tuo labiau pritaikytas turi būti ir skrydžio planas. Keletas skrydžio plano šablonų pateikiami 3-ame paveikslėlyje.



3 pav. Bepiločio orlaivio skrydžio plano šablonai [6].

Sekantis skrydžio plano akcentas, darantis didelę įtaką fotogrametrinio modelio tikslumui yra nuotraukų persidengimas. Kaip ir minėta skyriuje apie fotogrametrijos veikimo principą – norint atlikti matavimus reikia turėti du ar daugiau to paties taško nuotraukų, atliktų skirtingu kampu. Šiam tikslui užtikrinti reikalingas nuotraukų persidengimas. Nuotraukų persidengimas reiškia, kad dalis nuotraukos persidengia su šalia esančia nuotrauka, todėl vaizdas minimame plote matomas iš dviejų pozicijų (fotokameros vietų). Tai leidžia fotogrametrijos metodu atlikti skaičiavimus ir gauti taškų, esančių persidengimo plote koordinates. Skirtinguose šaltiniuose rekomenduojamas nuotraukų persidengimo procentas yra skirtingas, bet dažniausiai rekomenduojamas 60%–70% nuotraukų persidengimas. Juo gaunamas geriausias laiko ir kokybės santykis [7]. Tiriant sudėtingos 3D konstrukcijos statinius nuotraukų persidengimas turėtų būti šiek tiek didesnis. Nuotraukų persidengimo procentas ir fotokameros orientavimas parenkami kuriant automatinį skrydžio planą. Fotografuojant objektą rankiniu būdu, tikrai sukaupus didelę skraidymo patirtį galima suprasti nuotraukų persidengimo specifiką ir fotokameros orientavimo kampus, todėl dažniausiai lengvesnis ir kokybiškesnis būdas yra riktis automatinį skrydžio planą. Papildomas būdas gauti kokį tikrai norima nuotraukų persidengimą yra ne fotografavimas, bet filmavimas [5,8]. Filmuojant objektą, iš nufilmuotos medžiagos galima gauti kokį tikrai norimą nuotraukų persidengimą. Didžiausias filmavimo minusas yra tai, kad gaunamas labai didelis duomenų rinkinys, kuris labai apkrauna naudojamą programinę įrangą.

Trečiasis skrydžio plano akcentas yra fotokameros orientavimas. Jis labai priklauso nuo matuojamo objekto. Kuo objektas ar plotas yra horizontalesnis, be reljefo nelygumų, tuo fotokameros



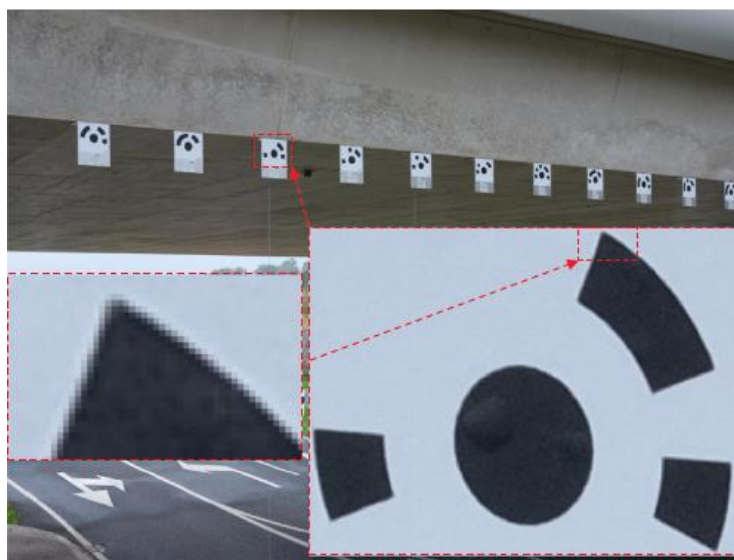
orientavimo kampas gali būti vertikalesnis. Norint išmatuoti reljefo nelygumus reikia fotokamerą laikyti tam tikru kampu. Tai galėtų būti 45°, 30° ar netgi 10° nuo horizontalios plokštumos. Kuo vertikalesnius paviršius stengiamasi išmatuoti, tuo fotokameros kampas turi būti artimesnis horizontaliam. Deja, mėginant pasiekti kuo tikslesnį vertikalių modelio tikslumą, smarkiai prarandamas horizontalus modelio tikslumas. Lygiai taip pat siekiant gauti kuo tikslesnį plokštuminių modelio tikslumą, prarandamas vertikalus modelio tikslumas. Norint gauti kuo tikslesnį fotogrametrinį modelį reikia atlikti labai daug bepiločio orlaivio skrydžių su skirtingais fotokameros orientavimo kampais. Taip gaunamas pilnavertiškesnis, visomis kryptimis tikslesnis 3D modelis. Žinoma, šio modelio tikslumas kainuoja daugiau laiko tiek objekto fotografavimui, tiek 3D modelio kūrimui programinės įrangos pagalba. Todėl žinant kokio tikslo siekiama kuriant fotogrametrinį modelį (vertikalių ar plokštumos tikslumą), fotokameros orientavimo kampai turi būti nuspręsti iš anksto.

### **1.4.3. Kontroliniai taškai**

Kontroliniais (georeferenciniais) yra vadinami taškai, kurių globalios koordinatės yra žinomos. Jos gaunamos naudojantis geodeziniais prietaisais tokiais kaip GPS imtuvai. Kontroliniai taškai yra reikalingi fotogrametrinio modelio sukoordinavimui ir pririšimui prie globalios koordinatės sistemos. Literatūroje nėra tiksliai nurodoma kiek kontrolinių taškų reikia naudoti. Nurodoma, kad reikalingi minimaliai du kontroliniai taškai tam, kad modelis būtų pririštas prie realaus mastelio. Taip pat, modelyje turint peraukštėjimus reikia turėti trečiąjį kontrolinį tašką, esantį skirtingoje altitudėje. Jo pagalba modelis tampa sukoordinuotas ir aukščio (z) ašyje. Turint didelį modelį kontroliniai taškai turėtų būti išdėliojami ties modelio kraštais, kartu išdėliojant keletą jų arčiau modelio centro. Tiriant ilgą modelį, pavyzdžiui – kelią ar traukinio bėgius, kontrolinius taškus reikia išdėlioti tolygiai abiejose kelio pusėse, maždaug vienodu tarpu per visą modelio ilgį. Kuriant fotogrametrinį modelį be kontrolinių taškų gaunamas blogesnis modelio tikslumas ir pririšimas prie globalių koordinatės sistemos. Pririšimas vis tiek yra, nes bepilotis orlaivis atlikdamas nuotraukas kartu su jomis įrašo ir koordinates, iš kurių buvo atlikta nuotrauka, bet pririšimo tikslumas labai skiriasi.

Norint gauti didžiausią įmanomą fotogrametrinio modelio tikslumą, objektas papildomai turi būti pažymimas dirbtiniais taikiniais (taškais). Jie turi būti kuo labiau kontrastingi, pavyzdžiui, balti arba juodi, priklausomai nuo situacijos. Jie padeda tiksliai sukoordinuoti modelį. Taikiniai turi būti gerai matomi, su žinomais atstumais tarp jų. Jie gali būti tiesiog popieriaus lapai, priklijuoti prie tiriamo objekto arba specialiai tam tikslui sukurti taikiniai. Taikinių pavyzdys pateikiamas 4-ame paveikslėlyje.

Fotogrametrinio modelio pagalba matuojant tilto deformacijas šie taikiniai turi būti išdėstomi vietose kur tikimasi didžiausių konstrukcijų deformacijų – tarpatramio viduryje. Taip pat, norint matyti bendrą konstrukcijų deformacijų schemą, taikinius reikia išdėlioti vienodais atstumais per visą konstrukcijos ilgį [9]. Turint daugiau taikinių gaunamas tikslesnis tilto deformacijų modelis. Kad būtų žinomas realus konstrukcijos dydis, šie taikiniai išmatuojami išoriniu įrenginiu – teodolitu ar tacheometru. Šie prietaisai apskaičiuoja faktines taškų vietas, kurios yra sujungiamos su fotogrametrijos taškų debesimi. Tai labai padidina taškų debesies tikslumą. Dėl trianguliacijos metodo veikimo būtina, kad kiekvienas iš taškų būtų matomas bent dvejose nuotraukose. Vis dėlto keturios ar daugiau to paties taško nuotraukų duoda didesnę modelio tikslumą, bet kartu tai labai „apsunkina“ 3D modelį [9].



**4 pav.** Fotogrametrijos taikinių išdėliojimo principas [9].

#### 1.4.4. Oro sąlygos

Oro sąlygos taip pat turi didelę įtaką fotogrametrinio 3D modelio tikslumui. Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką modelio tikslumui yra saulėtumas ar debesuotumas (susiję su šešėliais), vėjo greitis, oro temperatūra ir drėgmė. Saulėtumas ar debesuotumas įtakoja šešėlius, kurie mažina fotogrametrinio modelio tikslumą. Šešėlių zonos tampa šiek tiek neaiškiomis. Net ir žiūrint į objektą akimis, esant šešėliams akys labiau koncentruojasi į apšviestą objekto dalį. Neapšviesta objekto dalis tampa ne tokia svarbi. Neapšviestos objekto dalies detalumas mažėja. Kadangi fotogrametrijos metodu rezultatas gaunamas naudojant nuotraukas, o ne lazeriniu skenavimu (plačiau apie jį sekančiuose skyriuose), norint gauti matavimus yra būtina aiškiai matyti matuojamą objektą, dėl to šešėlių įtaka modelio tikslumui yra tikrai nemaža. To vengiant rekomenduojama objekto fotografavimą atlikti esant debesuotam orui. Jeigu to atlikti nepavyksta, stengiantis kuo labiau eliminuoti šešėlius fotografavimus reikia atlikti vidurdienį, kai esantys šešėliai yra mažiausi [10].

Kitas oro sąlygų veiksnys, įtakojantis modelio tikslumą yra vėjo greitis. Esant smarkiam vėjui nerekomenduojama skraidyti bepiločiu orlaiviu, kas netgi neleidžia atlikti matavimų. Esant leidžiamam, bet visgi stipriam vėjo greičiui reikėtų sumažinti fotokameros išlaikymo trukmę. Esant ilgesnei išlaikymo trukmei yra galimybė, kad skraidyklę nors ir minimaliai pakreips vėjas ir to rezultate bus gauta šiek tiek susiliejęsi nuotrauka, kuri nebus tinkama matavimams atlikti [7]. Žinoma, bepilotis orlaivis viduje turi visus reikalingus įrenginius padedančius išlaikyti jį stabilu, bet neretai nutinka, kad nors ir minimalūs vėjo gūšiai gali trumpam įtakoti skraidyklės nestabilumą. Jeigu tai nutinka nuotraukos atlikimo metu, nuotrauka tampa nieko verta. Dėl to rekomenduojama matavimus atlikti esant kuo silpnesniam vėjui.

Oro temperatūra ir drėgmė taip pat tiesiogiai įtakoja naudojamą įrangą. Bepiločiam orlaiviui dažniausiai rekomenduojama oro temperatūra turėtų būti nuo 0°C iki +40°C. Skirtingi gamintojai gali pateikti skirtingas oro temperatūros rekomendacijas. Taip pat esant per drėgnam orui ant fotokameros gali susiformuoti rasos lašeliai, kurie iškraipo atliekamas nuotraukas. Reikia paminėti, kad fotografavimų esant lietingam orui atlikti negalima, nes naudojama elektronika nėra atspari drėgmės poveikiui.

Tobuliausias oro sąlygų derinys yra debesuotas ir ne vėjingas oras. Taip pat reikia vengti tankaus rūko ar lietaus. Nepaisant to reikia atsižvelgti ir į rekomenduojamą oro temperatūrą.

Matoma, kad fotogrametrinio modelio tikslumui įtaką daro galybė skirtingų faktorių. Tai parodo, kad kiekvienas iš matavimų yra individualus. Reikia paminėti, kad sekančiuose skyriuose aprašomų tyrimų metu aptariamai rezultatai nebus pritaikomi visoms galimoms situacijoms.

### **1.5. BIM metodologija**

Šiame poskyryje bus aprašoma BIM technologija ir jos taikymo sritys. Bus išskiriami BIM bei fotogrametrinio modelio skirtumai.

BIM yra trijų anglišku žodžių (building information modeling) trumpinys, kas išvertus į lietuvių kalbą yra „informacinis pastato modeliavimas“. BIM technologija yra naudojama statybos srityje, ji vienija architektus, konstruktorius, ir kitas statybos disciplinas. Ši technologija apima visus projektuojamo pastato gyvavimo ciklus – nuo pastato projektavimo iki jo griovimo. Į BIM įeina ne tik gaminių geometrinės charakteristikos, bet ir jų tarpusavio jungtys, geografinė informacija, elementų kiekiai ir jų parametrai, preliminarios sąmatos, medžiagų kiekiai, gaminių montavimo eiliškumas ir t.t. Matoma, kad norint taikyti BIM technologiją reikalingas didelis informacijos kiekis. Tai yra reikalaujanti nemažo pradinio įdirbio technologiją, bet pradžioje skirtas laikas labai sumažina galimų klaidų tikimybę ateityje ir galutiniame variante tai neabejotinai atsiperka [11]. Taip pat, kadangi visa sukaupta informacija yra laikoma duomenų bazėse, prireikus galima lengvai sužinoti norimą informaciją apie reikiamus gaminius.

BIM technologija yra paremta informacijos tarp architektų, konstruktorių ir inžinierių dalinimusi. Tai dažniausiai vyksta 3D aplinkoje. Šis informacijos dalinimasis 3D aplinkoje skatina atidžiau stebėti kitų projektavimo dalių darbus, tai leidžia lengviau pastebėti kitų projektavimo disciplinų klaidas, elementų susikirtimus. Klaidų sutvarkymas projektavimo stadijoje sutaupo daug resursų, nes jų tvarkymas statybos aikštelėje dažnu atveju yra gerokai brangesnis.

Iš BIM modelio subraižyti elementų brėžiniai yra siunčiami gamybai, kur jie yra gaminami. Reikia paminėti, kad gamyklos turi savo leistinas nuokrypas, pagaminti elementai ne visada atitinka elementus esančius BIM modelyje. Nepaisant to, montuojant konstrukcijas taip pat reikia įvertinti leistinus nuokrypius, kas gali dar šiek tiek padidinti faktinės situacijos nukrypimus nuo BIM modelio. Iš šių sąlygų išplaukia vienas iš dviejų pagrindinių BIM ir fotogrametrinio modelio skirtumų. Šis skirtumas yra toks, kad tobulu atveju (esant tobuloms oro sąlygoms, pritaikytam skrydžio planui, turint kuo geresnius darbo įrenginius) fotogrametrija fiksuoja realią esamą situaciją, kai BIM modelis duoda atskirų elementų geometriją (kuri gali pagal leistinus nuokrypius skirtis nuo realios situacijos).

Antrasis šių dviejų modelių skirtumas yra informacija, pateikiama modeliuose. Fotogrametrinis modelis suteikia tik geometrinę informaciją, kai BIM modelio viduje yra visa statinio gyvavimo ciklo informacija, su gaminių kiekiais, jų charakteristikomis ir t.t.

### **1.6. BIM ir fotogrametrinių 3D modelių palyginimas**

Kadangi BIM modelis suteikia informaciją apie gaminius, neįvertinant gamybos ir montavimo nuokrypių, šį modelį būtų galima vadinti „taip suplanuota“ („as-planned“) modeliu. Tuo tarpu fotogrametrinis 3D modelis fiksuoja esamą statinio situaciją, todėl jį būtų galima vadinti „taip pastatyta“ („as-built“) modeliu [12].

Šių modelių palyginimas parodo realius pastatytų konstrukcijų nuokrypius nuo planuotų jų pozicijų. Jeigu nuokrybiai viršija leistinus, juos būtina sutvarkyti prieš pastato pridavimą. Dėl to anksti gauti informacija apie nuokrypius yra tikrai naudinga ir reikalinga [13]. Norint užtikrinti, kad pastato geometrija neviršija leistinų nuokrypių, prieš priduoiant pastatą reikia atlikti išpildomasias nuotraukas. Tai yra geodeziniai matavimai, reikalingi norint patvirtinti dokumentus, kad konkretus statinys gali būti naudojamas pagal savo paskirtį. Juos atlieka profesionalūs geodezininkai.

Taigi, galbūt ateityje, nustatčius fiksuotus reikalavimus fotogrametrinio modelio sukūrimui, dokumentavus fotogrametrijos tikslumą, būtų galima pakeisti išpildomasias nuotraukas fotogrametrinio 3D modelio sukūrimu. Tai būtų greitesnis, vizualesnis ir paprastesnis būdas pateikti matavimų informaciją. Lyginant fotogrametrinį modelį su BIM modeliu galima nesunkiai padaryti reikiamus statinių pjūvius ir matyti jų nukrypimus. Be to, matomas bendras statinio vaizdas ir iš jo išryškėja labiausiai probleminės statinio vietos, kurioms esant poreikiui galima atlikti matavimus tradiciniais matavimo prietaisais.

Statinio BIM modelio ir fotogrametrinio 3D modelio palyginimą nebūtina atlikti baigiant statinį, naudingą informaciją galima išgauti ir statinio statybos metu. Ši informacija nėra tikrai išankstinių statinio nuokrypių nustatymui, bet ji gali būti naudinga ir statybos procesų organizavimui. Automatinis sumontuotų elementų aptikimas fotogrametriniame modelyje leidžia priskirti jau sumontuotas konstrukcijas, kas sutaupo brangų statybos darbų vadovo laiką. Faktinis sumontuotos situacijos žinojimas palengvina statybos organizavimo darbus. Šiuo metu sumontuotų elementų kiekį į BIM sistemą įveda pats statybos darbų vadovas. Tai yra nemažai laiko užimantis darbas. Nepaisant to, neretai statybos darbų vadovai suveda ne visiškai realybę atitinkančią informaciją. Tai iškraipo realios statinio situacijos suvokimą kitiems statybos dalyviams. Fotogrametrijos pagalba įmanoma aptikti ir priskirti sumontuotus elementus jau pastatytiems. To efektyvumas dar nėra didelis, Miuncheno Technikos Universiteto atliktame bandyme jis siekia viso labo 60,7% tikslumą [13]. Taip yra dėl to, kad statybvietėje yra begalė pašalinių elementų, tokių kaip klojiniai, laikinos atramos ir t.t. Tai iškraipo fotogrametrijos gautą rezultatą. Kad išvengtų fotogrametrinio modelio išbalansavimą dėl papildomų elementų, autoriai rekomenduoja fotogrametriniam modeliui priskirti tikrai tam tikros spalvos elementus. Galbūt tai sumažintų reikalingos informacijos išbalansavimą dėl nereikalingų papildomų elementų.

Matoma, kad fotogrametrinio 3D modelio ir BIM modelio palyginimas suteikia gerai apčiuopiamą naudą tiek baigiant statinio statybas, tiek statybos metu. Tai ne tik padeda aptikti statybos nuokrypas, bet ir taupo statybos darbų vadovo laiką, eliminuojant vieną iš jo atliekamų darbų – sumontuotų elementų įvedimą į BIM modelį.

## **1.7. LiDAR technologija**

LiDAR (light detection and ranging) technologija, dar kitaip vadinama lazeriniu skenavimu, yra pagrįsta lazerio keliavimo nuo prietaiso iki tiriamojo objekto, atspindėjimo ir į prietaisą grįžimo greičiu. Žinant koordinates vietos, iš kurios buvo paleistas lazeris, jo trajektoriją ir laiko tarpą iki jo sugrįžimo į prietaisą, galima nesunkiai gauti atstumą iki matuojamo objekto. Ši technologija puikiai veikia su daugeliu paviršių tipų. Deja, su ypatingais lygiais paviršiais tokiais kaip stiklas, veidrodis ar vanduo, lazerinio skenavimo tikslumas mažėja.

Lazerinis skenavimas yra skirstomas į tris pagrindines kategorijas:

- Lazerinis skenavimas naudojant stovus [14,15,16,17];
- Mobilus lazerinis skenavimas (prietaisas pritvirtinamas prie automobilio, laivo (vandenyno dugno skenavimui) ar kita);
- Orinis lazerinis skenavimas (prietaisas tvirtinamas prie lėktuvų ar bepiločių orlaivių). [18]

Kiekvienas iš šių lazerinio skenavimo būdų susiduria su vibracijoms. Jos gali atsirasti dėl nestabilumų pritvirtinus jį ant automobilio ar bepiločio orlaivio. Jautriausias vibracijoms yra lazerinis skenavimas naudojant stovus, bet kartu jis laikomas pačiu tiksliausiu.

Tyrimo metu bus naudojamas universalus, nešiojamas LiDAR prietaisas, juo naudojantis bus mėginama sukurti 3D taškų debesį. Su sukurtu 3D taškų debesimi bus papildyti fotogrametrinį modelį ir suteikti didesnę bendrą 3D modelio tikslumą. Apie tai plačiau bus rašoma sekančiuose skyriuose.

Lazerinio skenavimo rezultatas, kaip ir fotogrametrijos, yra 3D taškų debesis. Tiksliai šių 3D taškų debesų sukūrimo būdai skiriasi. Lazerinis skenavimas matuoja atstumus lazerio atspindžių pagalba, kai fotogrametrija atstumus matuoja apdorojant informaciją pateikiamą nuotraukose. Kadangi šių dviejų metodikų rezultatas yra 3D taškų debesis – juos galima sujungti tam, kad gauti tikslesnę bendrą 3D taškų debesį, eliminuojant triukšmą (papildomus taškus, kurie yra nereikalingi tyrimui. Angliškai – „noise“).

Bene dažniausiai statybos srityje naudojamas lazerinio skenavimo būdas yra skenavimas naudojant stacionarius lazerinio skenavimo prietaisus. [19] šaltinyje lyginami lazerinio skenavimo naudojant stovus 3D taškų debesis su bepiločio orlaivio pagalba sukurtu 3D taškų debesimi. Nagrinėjami didelės apimties taškų debesis. Tiriamas objektas yra paveldo tiltas Australijoje. Nustatyta, kad kuriant taškų debesis lazerinio skenavimo pagalba gautas taškų debesis tankumas yra beveik 2 kartus tankesnis lyginant su fotogrametrijos pagrindu sukurtu taškų debesimi. Tankesnis taškų debesis tiksliau atvaizduoja konstrukcijų paviršius, kas didina konstrukcijų pažaidų aptikimo galimybę. Taip pat gaunamas geresnis minėtų paviršių detalumo lygis, tai padeda gauti tikslesnę „taip pastatyta“ 3D modelį. Pastebėta, kad nors šių dviejų 3D taškų debesų tankumai skyrėsi, jų geometrinis tikslumas vienas nuo kito nesiskyrė. Nors geometriniai modelių tikslumai nesiskyrė, analizuojant 3D taškų modelius pastebėta, kad fotogrametrijos pagrindu sukurtame taškų debesyje, tilto važiuojamojoje dalyje gauta anga. Taip nutiko greičiausiai dėl nepakankamo nuotraukų persidengimo fotografuojant tiltą. Pastebėta, kad fotogrametrijos pagrindu sukurtame taškų debesyje yra mažiau triukšmo (pašalinių nereikalingų elementų).

Kitame šaltinyje lyginant fotogrametrijos pagrindu ir lazerinio skenavimo pagrindu sukurtus 3D taškų debesis („taip pastatyta“) su BIM modeliu („taip suplanuota“) [16] pastebėta, kad lyginant LiDAR taškų debesį su BIM modeliu buvo gaunami daug tikslesni rezultatai negu fotogrametrinio ir BIM modelių lyginimo atveju. Taip greičiausiai buvo dėl to, nes buvo matuojami lygūs konstrukcijų paviršiai ir fotogrametriniam modeliui nebuvo kuriami kontroliniai taškai. Nepaistant to, fotogrametrinis modelis turėjo vieną pranašumą – galimybė nufotografuoti statinio stogą, ko padaryti lazerinio skenavimo atveju nebuvo galimybės.

Lyginant lazerinio skenavimo ir fotogrametrijos pagrindu sukurtų taškų debesų technikas pastebėta, kad norint gauti tankesnę taškų debesį ir didesnę paviršių detalumo lygį reikėtų rinktis lazerinį skenavimą naudojant stovus. Dar keletas lazerinio skenavimo pranašumų lyginant su fotogrametrija

yra fotogrametrijos didelis priklausomumas nuo oro sąlygų – ypačingai vėjo [15]. Taip pat teoriškai lazerinį skenavimą galima naudoti 24 valandas per parą, nes atstumų matavimui nėra reikalinga šviesa [20]. Deja, norint išmatuoti sunkiai prieinamas vietas to padaryti lazeriniu skenavimu naudojant stovus neįmanoma. Tokiu atveju tektų rinktis fotogrametriją.

Žinant lazerinio skenavimo privalumus būtų naudinga išvardinti ir fotogrametrijos pranašumus lyginant su lazeriniu skenavimu.

Fotogrametrijos pranašumai lyginant su lazeriniu skenavimu yra:

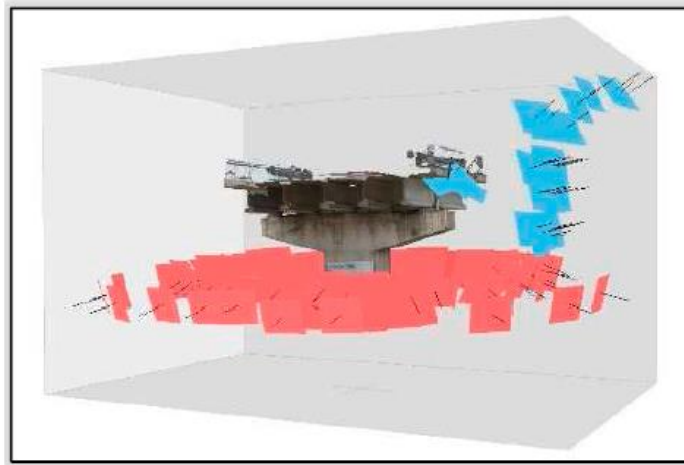
- galimybė tirti sunkiai prieinamas vietas;
- naudojama mažiau fizinio darbo;
- greitesnis informacijos surinkimas ir taškų debesies generavimas;
- vizualesnės 3D modelio tekstūros;
- reikalinga pigesnė technika norint atlikti matavimus.

Žinant lazerinio skenavimo ir fotogrametrijos panašumus bei skirtumus vis tiek negalima atsakyti kuri iš šių technologijų yra geresnė. Abi jos turi savo pritaikymo sritis ir stipriąsias puses. Naudojamos technologijos pasirinkimas priklauso nuo norimo gauti rezultato.

### **1.8. Pažaidų konstrukcijoje tyrimai**

Periodines patikros įvertinti konstrukcijos saugumą ir ilgaamžiškumą bėgant laikui yra reikalingos tam, kad pamačius pažaidas laiku būtų galima imtis tam tikrų pažaidų likvidavimo priemonių. Tai padėtų išvengti didesnių problemų konstrukcijoje bėgant laikui. Gelžbetoninėse konstrukcijose, tokiose kaip tiltai ar tuneliai, betono plyšių pločiai ir jų formos yra du pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos nusakomas konstrukcijos ilgaamžiškumas. Šias pažaidas pakankamai tiksliai galima išmatuoti fotogrametrijos pagalba [21].

Mėginant aptikti ir išmatuoti konstrukcijų pažaidas [22] šaltinyje tyrimui buvo pasirinkta viena iš tilto atramų. Duomenų surinkimas buvo atliekamas fotografuojant tiriamą objektą apskrendant jį bepiločiu orlaiviu bei fotografuojant jį nuo žemės paviršiaus. Nuotraukų atlikimo vietos pavaizduotos 5-ame paveikslėlyje. Nuotraukų atlikimo vietos naudojantis bepiločiu orlaiviu pavaizduotos mėlyna spalva, o nuotraukų atlikimo vietos nuo žemės paviršiaus – raudona.



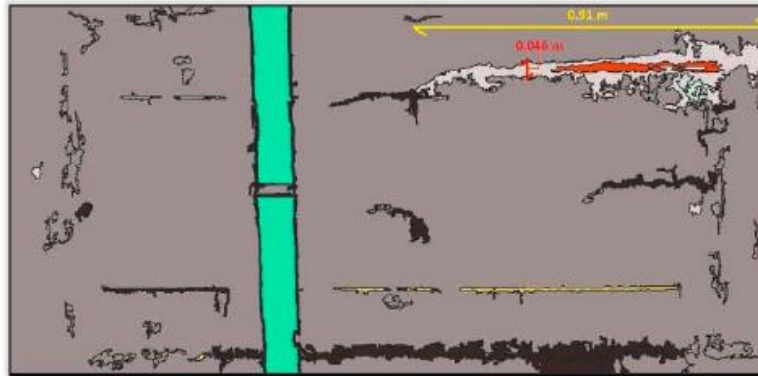
**5 pav.** Nuotraukų atlikimo vietos [22].

Iš gautų duomenų sukūrus fotogrametrinį 3D modelį buvo ieškoma konstrukcijos defektų. Kadangi defektai buvo matomi plika akimi, juos buvo nesunku matyti ir 3D taškų modelyje. Iš nuotraukų atlikimo vietų galima numatyti į kurį konstrukcijos plotą buvo orientuotasi. Tyrimui buvo pasirinktas labiausiai matomas konstrukcijos plotas, turintis mažiausiai šešėlių. Tiriamasis konstrukcijos plotas pavaizduotas 6-ame paveikslėlyje.



**6 pav.** Tilto atramos tiriamų defektų plotas [22].

Kompiuteriu atlikus mašininio mokymosi užduotis buvo gauti ne tik plyšio ilgis ir plotis, bet ir išlindusios armatūros plotas, kalkių išplovimo plotai, betono suskilinėjimo plotai ir t.t. Naudojant fotogrametriją gaunamas 92%-93% tikslumas aptinkant konstrukcijų pažaidas. Automatiškai nustatytas plyšio ilgis ir plotis pateikiamas 7-ame paveikslėlyje.



**7 pav.** Automatiškai nustatytas plyšio ilgis ir plotis [22].

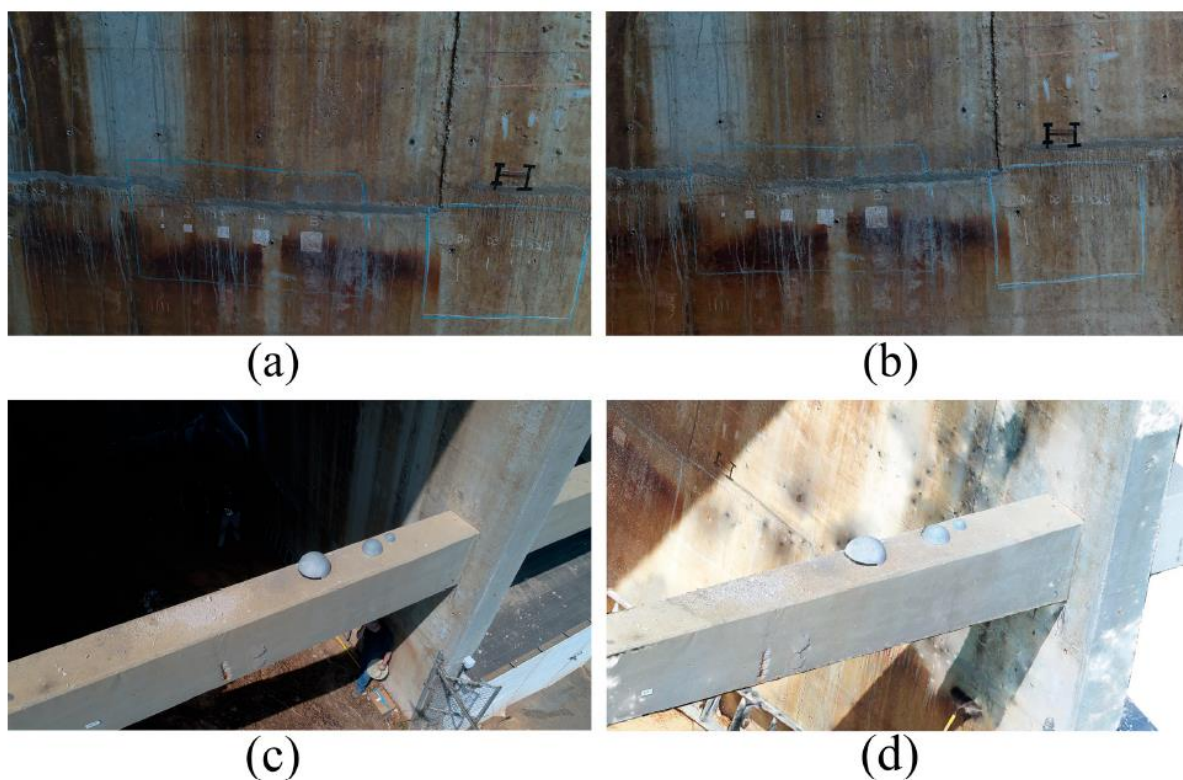
Norint išvengti netikslumų stengiantis išmatuoti plyšių ilgius ir pločius rankiniu būdu, dažnai į pagalbą pasitelkiamas mašininis mokymasis [22,23]. Tyrinio metu, dėl programavimo žinių stokos, nebūtų galimybės naudotis mašininio mokymosi galimybėmis, todėl plyšio pločio bei ilgio skaičiavimai būtų atliekami rankiniu būdu. Plačiau apie tai sekančiuose skyriuose.

[24] šaltinyje tiriant Ridracoli užtvanką Italijoje buvo pasitelkiama fotogrametrija naudojant bepilotį orlaivį ir stacionarųjį lazerinį skenavimą. Šiomis dviem skirtingomis technologijomis sukurti 3D taškų debesys buvo lyginami vienas su kitu. Buvo pastebėta, kad esant dideliems atspindžiams ir esant saulėtam orui, naudojant fotogrametrijos metodą gaunami ne tokie tikslūs rezultatai, lyginant su lazerinio skenavimo metodu.

[25] šaltinyje buvo tiriama užtvanka esanti Jungtinėse Amerikos Valstijose. Tyrimo tikslas buvo aptikti konstrukcijų pažaidas, kurios būtų mažesnės nei 1 mm. Buvo pasiektas 80% nuotraukų persidengimas, kas labai apsunkino modelį didinant taškų tankį ir skaičių. Bendras išmatuotų taškų skaičius viršijo vieną milijardą. Objekto fotografavimas buvo atliekamas dvi dienas. Pirmąją dieną buvo fotografuojamas bendras užtvankos vaizdas. Antrąją dieną buvo koncentruojamasi į konstrukcijų pažaidas. Renkantis dienas buvo labai atsižvelgiama į oro sąlygas. Reikia vengti  $<5^{\circ}\text{C}$  temperatūros, lietaus, sniego, stipraus vėjo. Taip pat visiškai giedra diena nėra tinkama, nes gaunami stiprūs šešėliai, kurie iškraipo rezultatus.

Prieš atliekant patikrą, konstrukcija buvo pažymima tam tikrais žymenimis, kurių matmenys buvo žinomi. Tai buvo reikalinga norint tiksliai gauti fotogrametrinio modelio rezultatus ir išvengti rezultatų interpretacijų. Buvo naudoti trijų tipų žymenys – linijinis žymėjimas, su žinomu linijos storiu ir ilgiu; kvadratiniai žymenys ir tūriniai žymenys. Linijiniai žymenys buvo simuliuoti įtrūkimo defektus. Linijos storis buvo 0,7 mm, 1 mm ir 3 mm, o linijų ilgiai buvo 12.7 mm ir 152.4 mm kiekvienai iš linijų. Kvadratinio tipo žymenys buvo simuliuoti betono kalkių išplovimą ar dėmių atsiradimui dėl armatūros korozijos. Trečio tipo žymėjimas buvo simuliuoti tūrinius konstrukcijų defektus, tokius kaip betono ištrupėjimas. Simuliuotų konstrukcijų pažaidų nuotraukų palyginimas pavaizduotas 8-ame paveikslėlyje. (a) – atlikta 2D nuotrauka su pirmo ir antro tipo simuliuotais defektais (su linijomis ir kvadratiniais žymenimis). (b) – 3D sugeneruoto taškų debesies vaizdas pirmo ir antro tipo simuliuotiems defektams. (c) – atlikta 2D nuotrauka trečiojo tipo simuliuotiems defektams (tūriniams žymenims). (d) – 3D sugeneruoto taškų debesies vaizdas trečiojo tipo simuliuotiems defektams.





**8 pav.** Simuliuotų konstrukcijų pažaidų nuotraukų palyginimas su sugeneruotu 3D modeliu [25].

Šios vietos buvo fotografuojamos su keturiomis skirtingos rezoliucijos kameromis – 2 MP, 4 MP, 8 MP ir 16 MP. Fotografuojant šias vietas, nuotraukos buvo atliekamos 2,5m atstumu. Esant 16MP kamerai, vienam fotokameros taškui gaunamas maždaug 1 mm<sup>2</sup> plotas. Mažėjant fotokamerų rezoliucijai mažėjo ir aptinkamų pažaidų galimybės kartu su jų tikslumais. Pastebėta, kad tikrai 16 MP fotokameros pagalba pavyko aptikti 1 mm storio plyšį, kurio ilgis buvo 12,7 mm. Pažaidų aptikimo rezultatai pateikiami 9-ame, 10-ame ir 11-ame paveikslėliuose.

**Table 4.** Measurement Accuracy of 1 Millimeter Type 1 Defects at Various Image Resolutions.

Ground truth defect length (mm)	Length measured in point cloud (mm)			
	16 MP	8 MP	4 MP	2 MP
12.7	13	-	-	-
25.4	27.0	23	-	-
76.2	73	72	-	-
152.4	150.2	142	-	-

**Table 5.** Measurement Accuracy of 3 Millimeter Type 1 Defects at Various Image Resolutions.

Ground truth defect length (mm)	Length measured in point cloud (mm)			
	16 MP	8 MP	4 MP	2 MP
12.7	13	10	-	-
25.4	26	25	-	-
76.2	76	72	68	-
152.4	151	152	139	-

**9 pav.** Pirmojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].

**Table 6.** Measurement Accuracy of Type 2 Defects at Various Image Resolutions.

Ground truth defect size (mm × mm)	Size measured in point cloud (mm × mm)			
	16 MP	8 MP	4 MP	2 MP
25.4 × 25.4	26 × 25	26 × 24	-	-
50.8 × 50.8	51 × 50	52 × 51	-	-
76.2 × 76.2	76 × 76	76 × 76	62 × 70	-
101.6 × 101.6	100 × 100	97 × 100	98 × 93	-
127 × 127	127 × 127	125 × 125	121 × 125	-

**10 pav.** Antrojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].

**Table 7.** Measurement Accuracy of Type 3 Volumetric Defects at Various Image Resolutions.

Ground truth defect size (mm <sup>3</sup> )	Volume measured in point cloud (mm <sup>3</sup> )			
	16 MP	8 MP	4 MP	2 MP
536265	430145	367809	190852	166519
2196540	2113300	2032190	1852990	1526810
7413330	7210900	7068580	6652890	6253830
Mean error	8.8%	14.5%	30.1%	38.4%

**11 pav.** Trečiojo tipo pažaidų aptikimo rezultatai [25].

Iš pateiktų rezultatų aiškiai matoma, kad mažėjant fotokameros rezoliucijai krenta ne tik rezultatų tikslumas, bet ir pažaidų aptikimo galimybė. Deja, nei vienai iš naudojamų fotokamerų nepavyko aptikti 0,7 mm pločio plyšio.

Pateiktų pavyzdžių dėka matoma, kad konstrukcijų pažaidas naudojant fotogrametrijos technologiją aptikti tikrai įmanoma. Siekiant aptikti konstrukcijų pažaidas yra būtina į tai orientuotis. Tai turi būti pagrindinis fotogrametrinio modelio kūrimo tikslas. 3D taškų debesis turi būti orientuotas ne į bendrą konstrukcijos vaizdą, bet į tiriamąsias vietas. Siekiant gauti kuo tikslesnius tyrimo rezultatus fotografuoti specifines statinio vietas reikia iš kuo artimesnio atstumo. Rekomenduojama turėti kuo didesnę nuotraukų persidengimą. Tai apsunkina fotogrametrinio modelio apdorojimą, bet didesnis nuotraukų persidengimas lemia tankesnę 3D taškų debesį, o tai suteikia geresnę tiriamų paviršių detalumo lygį.

## 2. Eksperimentinė dalis

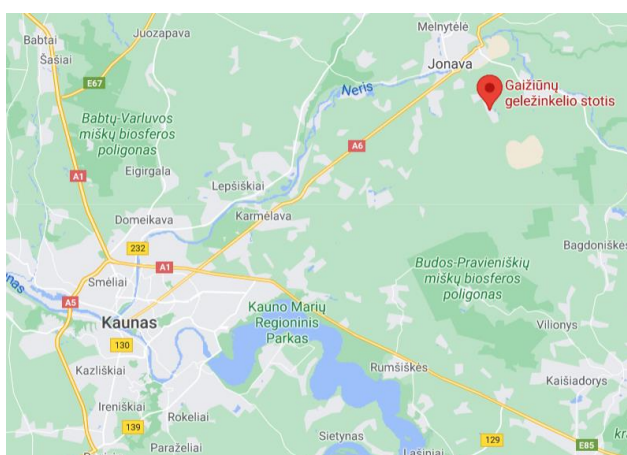
Eksperimentinėje tiriamojo projekto dalyje bus aprašomi atlikti du tyrimai atlikti su dviem skirtingais objektais. Abiejų tyrimų aprašymus sudarys:

- tyrimo objektas ir jo tikslas;
- tyrimui naudojama įranga;
- tyrimo eiga;
- gauti rezultatai.

### 2.1. Pirmasis objektas

#### 2.1.1. Pirmojo tyrimo objektas ir jo tikslas

Pirmasis tyrimo objektas yra pėsčiųjų tiltas, esantis Gaižiūnų geležinkelio stotyje, netoli Jonavos miesto. Šis objektas pasirinktas dėl to, jog traukinių eismas minimoje geležinkelio stotyje nėra labai intensyvus. Traukinių eismo stabdymas yra labai brangus ir ilgų biurokratinių procedūrų reikalaujantis procesas. Todėl norint išvengti traukinių eismo trikdžių tyrimui buvo pasirinktas būtent šis objektas. Objekto lokacija ir vaizdas iš palydovo pavaizduoti 12-ame ir 13-ame paveikslėliuose.



12 pav. Pirmojo tyrimo objekto lokacija



13 pav. Pirmojo objekto vaizdas iš palydovo

Pirmojo tyrimo tikslas yra nustatyti fotogrametrijos ir lazerinio skenavimo galimybes aptikti ir išmatuoti statinio konstrukcijų defektus.

Papildomai prie fotogrametrinio 3D modelio sukūrimo dar yra kuriamas ir lazerinio skenavimo 3D taškų debesis. Jo tikslas yra papildyti fotogrametrinį modelį ir suteikti didesnę bendrą 3D modelio tikslumą.

Nepaisant lengvesnių biurokratinių procedūrų eksperimento leidimams gauti šis tiltas tyrimui pasirinktas taip pat todėl, kad jame galima nesunkiai matyti ryškius tilto konstrukcijų defektus. Kadangi tilto konstrukcijų defektai yra nesunkiai plika akimi, juos turėtų būti nesunku aptikti ir sukurtame 3D taškų debesyje. Tilto konstrukcijų defektai pavaizduoti 14-ame paveikslėlyje. Kadangi tilto konstrukcijų defektai yra tikrai ryškūs, pėstiesiems uždarius peroną Gaižiūnuose šis tiltas 2017 m. taip pat buvo prie uždarymo ribos. Norėta tiltą paskelbti nebeeksploatuojamu, bet dėl tilto poreikio vietiniams gyventojams buvo prieita išvada, kad tiltas laikinai dar gali būti eksploatuojamas. Tiesa, laiko limitai tam nebuvo nustatyti.



**14 pav.** Pirmojo tyrimo objekto konstrukcijų defektai



### 2.1.2. Pirmajam tyrimui naudojama įranga

Pirmajam tyrimui atlikti buvo naudojama Kauno Technologijos Universiteto bei Išmaniųjų miestų ir infrastruktūros centro turima įranga. Tyrimą atlikti taip pat padėjo universiteto dėstytojų bei Išmaniųjų miestų ir infrastruktūros centro darbuotojų pagalba. Tyrimui naudojama įranga pateikiama 1-oje lentelėje.

**1 lentelė.** Pirmojo tyrimo metu naudojama įranga

Eil. Nr.	Įrenginio tipas	Įrenginio modelis
1.	GPS imtuvas	Trimble R8s geonovus
2.	Bepilotis orlaivis	DJI Mavic 2 Pro
3.	Nešiojamas LiDAR skenavimo prietaisas	Geoslam ZEB GO
4.	Nešiojamas kompiuteris	

Tyrimui naudojamo GPS imtuvo deklaruojamos paklaidos horizontalia kryptimi gali siekti apie 3 mm ir vertikalioji kryptimi apie 3,5mm. Matavimų tikslumas priklauso nuo prisijungusių palydovų skaičiaus ir jų išsidėstymo, kliūčių (pastatai, medžiai), atstumo iki bazinės stoties ir t.t.

Naudojamo bepiločio orlaivio fotokameros sensoriaus dydis – 13,2 mm ir diapazonas – 10,39 mm. Skraidyklės fotokameros rezoliucija yra 5472x3648. Deklaruojama bepiločio orlaivio veikimo temperatūra yra nuo -10°C iki 40°C. Matoma, kad bepiločio orlaivio specifikacijos yra tikrai pakankamai geros atlikti konstrukcijų pažaidų matavimus, lyginant jį su literatūros analizėje aptartuose tyrimuose naudojamų bepiločių orlaivių specifikacijomis. Vienintelis ir didžiausias naudojamo bepiločio orlaivio minusas yra tai, kad skraidyklė neturi galimybės fotokameros pakelti aukščiau horizontalios plokštumos. Šis minusas yra milžiniškas faktorius tiriant tiltus, nes prarandama bene svarbiausia tyrimams reikalinga informacija iš labiausiai pažeistų tilto vietų.

Tyrime taip pat naudojamas universalus nešiojamas lazerinio skenavimo (LiDAR) prietaisas. Kadangi šis matavimo prietaisas yra universalus, jo tikslumas yra mažesnis nei kitų lazerinio skenavimo prietaisų (žr. 1.7 poskyrį). Šio tyrimo naudojamo lazerinio skenavimo prietaiso viduje nėra GPS nustatymo galimybės, todėl dirbant su šiuo prietaisu nėra žinomos globalios jo koordinatės skenavimo metu. Minėtas prietaisas savo viduje turi akcelerometrą – tai yra prietaisas, leidžiantis išmatuoti ir išanalizuoti tiesinį ir kampinį pagreitį. Skenuojant lazerinio skenavimo prietaisu akcelerometras fiksuoja nešančiojo prietaisą žmogaus pasisukimus. Deja, matuojant ilgus objektus šio lazerinio skenavimo prietaiso tikslumas drastiškai prastėja. Dėl to, kad būtų galimybė patikrinti objekte atliktus matavimus, objekte reikia turėti ir nešiojamą kompiuterį su įrašyta reikiama programine įranga.

### 2.1.3. Pirmojo tyrimo eiga

Pirmojo objekto tyrimas buvo atliekamas 2021 m. birželio 8 dieną. Oro temperatūra siekė 24° C, buvo giedra, su pavieniais debesimis. Vėjuota nebuvo.

Tyrimo eiga susideda iš šių etapų:

- kontrolinių (georeferencinių) taškų nužymėjimas ir šių taškų koordinatinių nuėmimas naudojant GPS imtuvą.

- objekto fotografavimas bepiločio orlaivio pagalba;
- objekto skenavimas lazerinio skenavimo (LiDAR) prietaisu.

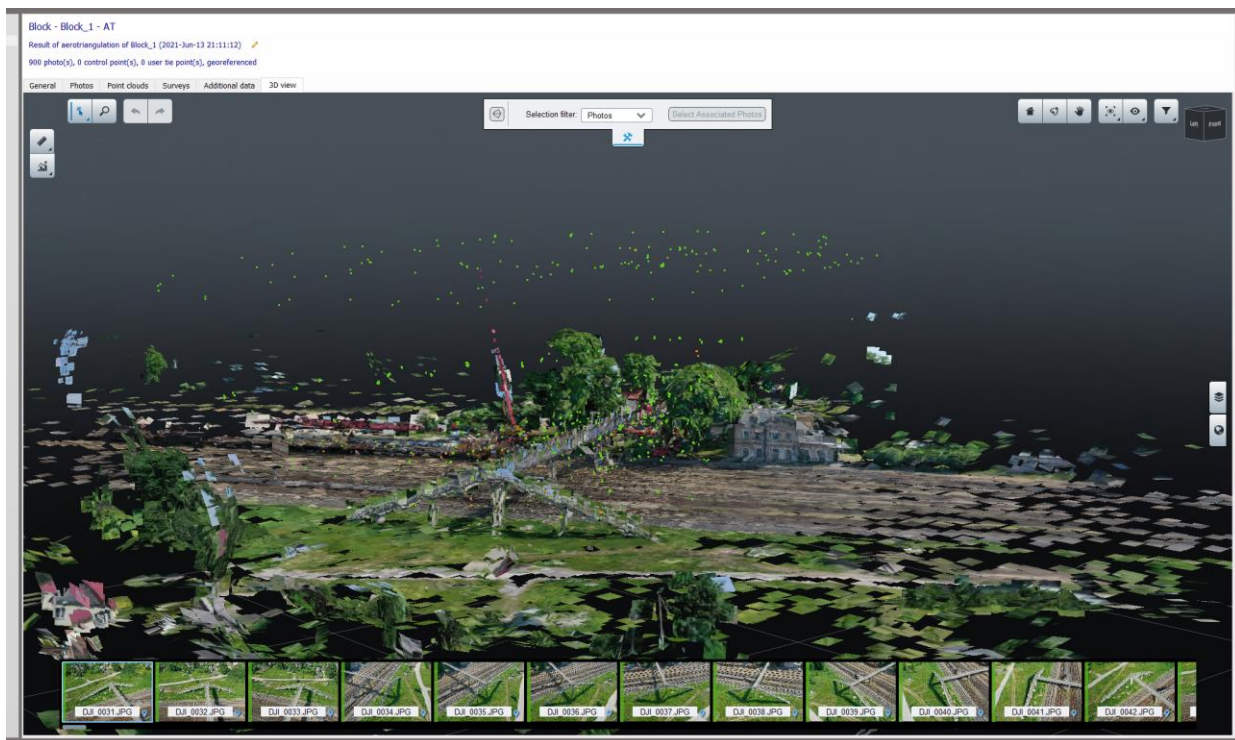
Prieš pradėdant fotografavimą bepiločiu orlaiviu yra nužymimi kontroliniai taškai kuriuose bus nuimamos GPS koordinatės. Jie pažymimi purškiamais kreidininiais nuplaunamais dažais. Svarbu šiuos taškus išdėlioti plačiai ir skirtingose altitudėse tam, kad modelis būtų tvarkingai susietas su globalia koordinacijų sistema. Jie reikalingi bendrai modelio koordinacijai ir tikslumui užtikrinti. Tyrimo metu buvo nužymimi aštuoni kontroliniai taškai. Kadangi objektas nėra didelis, toks didelis kontrolinių taškų skaičius nėra reikalingas, bet jis neblogina 3D modelio tikslumo. Taškai buvo pažymimi X ir taško numeriu. Kontrolinių taškų žymėjimo principas pavaizduotas pavaizduoti 15-ame paveikslėlyje. Kontroliniai taškai pažymimi X tam, kad kuriant modelį šių taškų pririšimo vieta būtų kaip įmanoma aiškesnė.



**15 pav.** Kontrolinių taškų nužymėjimo principas

Nužymėjus taškus buvo pradėdama taškų koordinacijų nuėmimas GPS imtuvu. Gavus taškų koordinates buvo pradėtas objekto fotografavimas naudojant bepilotį orlaivį.

Bepiločio orlaivio skrydžio planas buvo sudarytas iš trijų dalių. Dviejų ratų aplink tiltą, laikant fotokamerą  $\sim 45^\circ$  kampu; vieno rato aplink tiltą, skrendant žemiau ir laikant fotokamerą  $\sim 30^\circ$  kampu; fotografavimo esant tilto aukštyje ir laikant fotokamerą horizontaliai. Nuotraukų atlikimo vietos žaliais taškais pavaizduotos 16-ame paveikslėlyje. Tiltu fotografavimas skrendant aplink jį yra reikalingas bendram tilto vaizdui gauti. Dėl žinių stokos, bandymo atlikimo metu, ir komunikacijos problemų bendras tilto vaizdas buvo pagrindinis fotogrametrinio modelio prioritetas. Dėl konstrukcijų pažaidų nustatymo papildomai tiltas buvo fotografuojamas laikant fotokamerą horizontaliai. Šios nuotraukos buvo atliktos maždaug 10 m atstumu nuo fotografuojamo objekto. Buvo stengiamasi gauti bendrą 60%-70% nuotraukų persidengimą. Naudojant bepilotę skraidyklę viso buvo atlikta 900 nuotraukų.



**16 pav.** Pirmojo objekto nuotraukų atlikimo vietos (žalia spalva)

Kadangi tilto denginio apačia yra išgaubta į viršų, jos nufotografuoti turimo bepiločio orlaivio pagalba nebuvo įmanoma. Tyrimo metu naudojamo bepiločio orlaivio fotokameros pakelti virš horizontalaus fotografavimo kampo galimybės nebuvo, todėl tilto apačia liko nesufotografuota. Tilto apačios fotografavimą buvo mėginama atlikti išmaniuoju telefonu, bet naudojamas telefonas nefiksavo metaduomenų (koordinacių, iš kurių buvo atliktos nuotraukos), todėl nuotraukos buvo tiesiog bevertės.

Atlikus objekto fotografavimo darbus buvo pradėtas lazerinis tilto skenavimas LiDAR prietaisu. Skenavimas buvo atliekamas nešant mobilų lazerinio skenavimo prietaisą aplink visą objektą. Objektas buvo apeitas kartu su lazerinio skenavimo prietaisu pradedant tilto viršumi ir grįžtant tilto apačia – apeinant ratu kiekvieną koloną ir laiptų nusileidimą. Skenuojant statinius svarbu, kad jie būtų apeinami sugrįžtant į skenavimo pradžios vietą. Skenavimų pabaigoje grįžimas į pradžios tašką leidžia modeliui turėti vieną pradžios ir pabaigos tašką, kas padeda labiau sukoordinuoti 3D taškų debesį, o tai modelį padaro tikslesniu.

#### **2.1.4. Pirmojo tyrimo rezultatai**

Iš gautų nuotraukų buvo atliekamas fotogrametrinio 3D modelio sukūrimas. Prieš generuojant 3D modelį į jį turi būti įvedami kontroliniai taškai, gauti naudojant GPS imtuvą. Fotogrametrinis 3D modelis buvo kuriamas naudojantis Bentley ContextCapture programine įranga [26]. Programinės įrangos fotogrametrinio 3D modelio kūrimo ataskaita pateikiama 1-ame ir 2-ame prieduose. Sukūrus tilto modelį pastebėta, kad žiūrint į statinį iš toli bendras statinio vaizdas atrodo tikrai kokybiškai. Bendras pirmojo objekto sukurto fotogrametrinio 3D modelio vaizdas pavaizduotas 17-ame paveikslėlyje.





**17 pav.** Bendras pirmojo objekto fotogrametrinio 3D modelio vaizdas

Deja, vietos, kuriose buvo tikimasi aptikti ryškiausius konstrukcijų defektus (išgaubta į viršų tilto denginio apačia) fotogrametriniame 3D modelyje liko nesugeneruotos. Nepaisant to, kadangi objektas buvo fotografuojamas orientuojantis į bendrą statinio vaizdą, priartinus vaizdą paviršių detalumo lygis labai krenta. Tai puikiai iliustruoja 18-tas paveikslėlis. Iš paveikslėlio matoma, kad išgaubta į viršų tilto apačia liko nesugeneruota. Iš arčiau matomų tilto konstrukcijų paviršių detalumo lygis taip pat prastas. Gavus tokį paviršių detalumo lygį buvo atsisakyta idėjos nustatyti konstrukcijų defektus. Tokių konstrukcijų defektų kaip plyšiai išmatuoti turint matomą paviršių detalumo lygį būtų neįmanoma. Matuoti lengviau matomus konstrukcijų defektus, tokius kaip išplautas kalkių nuosėdas ant betono paviršių, betono ar armatūros korozija, tam tikrus betono atplyšimus ir pan. [27] nėra tikslo, nes gaunant tokį paviršiaus detalumo lygį rezultatai nekelia pasitikėjimo. Išmatuoti defektų charakteristikų rezultatai nebūtų realūs, o išmatuoti faktinius konstrukcijų defektų parametrus reikėtų dar kartą vykti į objektą, turėti galimybę pasiekti ir išmatuoti defektų parametrus, o tam galimybės nėra. Nepaisant to reikėtų dar kartelį praeiti visą biurokratinį procesą norint gauti leidimus objekte atlikti matavimus.





**18 pav.** Sugeneruotas tilto apačios fotogrametrinio 3D modelio vaizdas

Remiantis literatūros apžvalga galima suteikti rekomendacijas norint nustatyti konstrukcijų defektus naudojantis fotogrametriniu 3D modeliu. Visų pirma reikėtų aiškiai apibrėžti vietą, kurią norima tikrinti. Koncentravimasis į tam tikrą statinio vietą, o ne į bendrą statinio vaizdą yra reikalingas norint pasiekti didesnę paviršių detalumo lygį. Pasirinkta tyrimui vieta turėtų būti nesunkiai pasiekiamą, kad būtų galima lengvai patikrinti gautus fotogrametrinio 3D modelio rezultatus ir lyginti juos su faktiniais. Žinoma, lengvai pasiekiamos vietos pasirinkimas eliminuotų vieną pagrindinių fotogrametrijos naudojant bepiločius orlaivius privalumų – sunkiai prieinamų vietų matavimą. Bet toks pasirinkimas yra reikalingas būtent tyrimo tikslais. Nustačius fotogrametrijos technologijos galimybes aptikti konstrukcijų defektus naudojant bepiločius orlaivius toliau būtų galima analizuoti tiltus, užtvankas ar kitus sunkiai prieinamus statinius.

Pasirinkus tiriamąją vietą fotografavimus naudojant bepilotį orlaivį reikėtų atlikti iš kaip įmanoma arčiau. Tai priklauso nuo norimų aptikti pažeidimų tipų. Tiriant smulkiausias pažeidimus (betono plyšius) literatūroje randami pasirinkti 2,5 m ar 2 m [25,5] atstumai iki matuojamo objekto. Matavimus reikia atlikti iš tokio atstumo, kad tiriami konstrukcijų defektai būtų matoma plika akimi. Kadangi fotogrametrijos technologijos pagalba duomenys yra gaunami tiriant fotografijas, daugiau informacijos nei žiūrint akimis fotogrametrijos pagalba gauti neįmanoma. Kaip ir akimis žiūrint į objektą iš yra arčiau matomas detalesnis vaizdas, taip fotografuojant objektą iš arčiau yra gaunamas didesnis paviršių detalumo lygis.

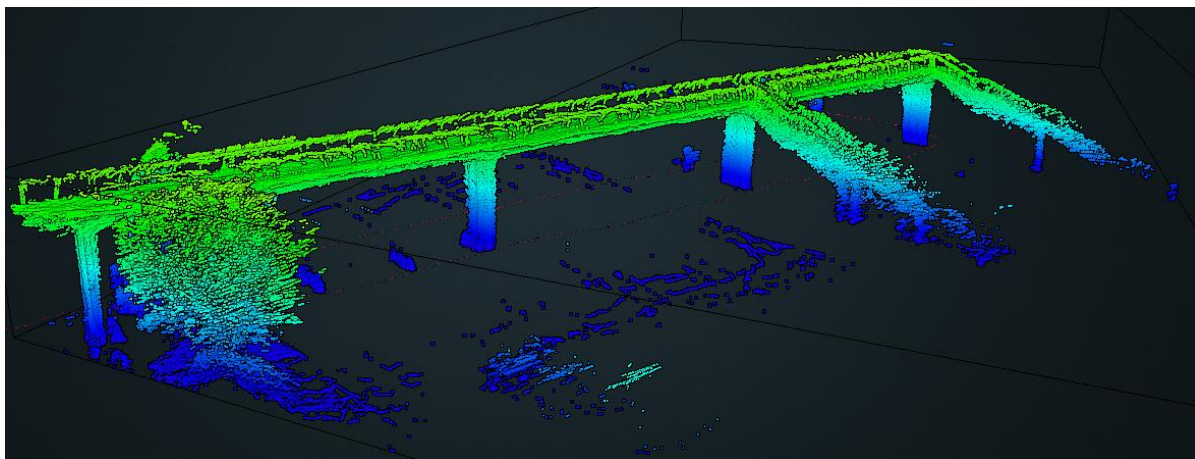
Analizuojant konstrukcijų defektus viena pagrindinių fotogrametrinio 3D modelio charakteristikų yra paviršių detalumo lygis. Siekiant gauti kuo didesnę paviršiaus detalumo lygį reikia ne tik fotofiksacijas atlikti iš kaip įmanoma arčiau, bet ir atlikti gerokai daugiau nuotraukų ir turėti didesnę nei fotogrametriniam modeliui rekomenduojama nuotraukų persidengimą. Dažniausiai praktikoje naudojamas nuotraukų persidengimas yra 60-70%, jis naudojamas bendro statinio vaizdo kūrimui. Analizuojant konstrukcijų pažeidimus, tiriamosiose vietose rekomenduojama turėti netgi 80-90% nuotraukų persidengimą. Daugiau atliktų nuotraukų sugeneruoja daugiau taškų fotogrametriniame

3D modelyje, o tai tikslina paviršių detalumo lygį modelyje. Turint geresnį paviršiaus detalumo lygį jame galima aptikti smulkesnius konstrukcijų defektus.

Žinant tyrimo objektą ir išsikėlus tyrimo tikslą svarbu pasirinkti tinkamus prietaisus matavimams atlikti. Fotokameros pasirinkimas tiesiogiai įtakoja kuriamo fotogrametrinio 3D modelio paviršių detalumo lygį. Kuo didesnės rezoliucijos fotokamera naudojama, tuo mažesnį šviesos plotą atvaizduoja vienas taškas (pikselis). Mažesnis plotas tenkantis vienam taškui leidžia pastebėti smulkesnes detales sukurtame modelyje. Bepiločio orlaivio pasirinkimas ne taip tiesiogiai įtakoja fotogrametrinio 3D modelio detalumą. Bet skraidyklės galimybė fotokamerą pakelti aukščiau horizontalios plokštumos yra labai svarbi tiriant tiltus, viadukus, estakadas ar panašius statinius. Be minėtos bepiločio orlaivio galimybės prarandama bene svarbiausia informacija šių statinių tyrime.

Atlikus lazerinį skenavimą, gauti duomenys vietoje buvo tikrinami naudojant nešiojamąjį kompiuterį. Taškų debesies generavimas užtruko ~10 min. Pastebėjus, kad duomenys nėra tikslūs, buvo nuspręsta atlikti daugiau skenavimo bandymų. Viso pirmu atvykimu į objektą buvo atliekami 5 lazerinio skenavimo bandymai. Vėliau, iš gautų duomenų buvo sugeneruojami taškų debesys. Analizuojant gautus rezultatus pastebėta, kad tiltas taškų debesyje buvo susidvigubinęs. Taip greičiausiai nutiko dėl to, kad lazerinio skenavimo prietaise nėra GPS imtuvo, prietaisas naudoja tiksliai akselerometrą. Dėl šios priežasties turint ilgą skenavimą paprastai yra prarandamas modelio tikslumas. Kadangi tiltas buvo skenuojamas pradėdamas jo viršumi ir grįžtant apačia – taškų debesyje gaunami du išilgai tilto ašies šiek tiek prasilenkiantys tiltai. Išanalizavus gautus rezultatus buvo nuspręsta dar kartelį nuvykti į objektą ir atlikti keletą papildomų tilto skenavimo bandymų mažinant skenavimo atstumą. Antruoju atvykimu į objektą buvo atliekami 4 lazeriniai skenavimai. Atvykus į objektą pastebėta, kad viduryje traukinio bėgių buvo sustatyti vagonai, todėl skenuojamą atstumą teko mažinti perpus. Antruoju atvykimu į objektą skenavimai buvo pradėdami šalia vagonų ir baigiami ant tilto virš jų. Atlikus šiuos skenavimus ir išanalizavus rezultatus buvo pastebėtos tokios pačios taškų debesies susidubliavimo tendencijos kaip ir pirmųjų 5 lazerinio skenavimo bandymų atveju. Geriausias lazerinio skenavimo rezultatas iliustruotas 19-ame paveikslėlyje.

Iš paveikslėlio matoma, kad lazerinio skenavimo 3D taškų debesis nėra tikslus. Taip greičiausiai nutiko dėl to, jog skenavimai buvo atlikti esant saulėtam orui. Saulėtas oras ir atspindžiai įtakoja lazerinio skenavimo tikslumą. Taip galima spręsti iš to, jog atliekant matavimus vidaus patalpose, nesant tiesiogiai saulės šviesai, rezultatai dažniausiai gaunami realūs ir patikimi.

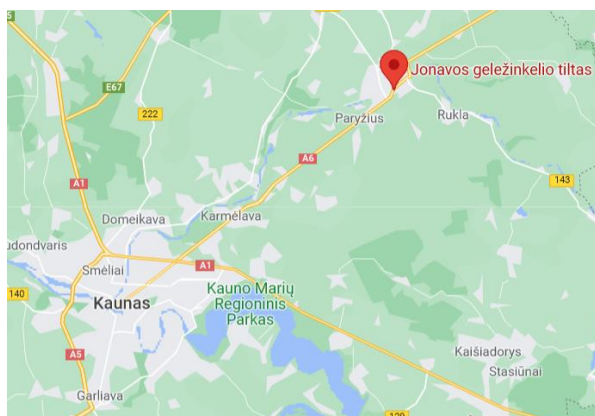


19 pav. Pirmojo objekto lazerinio skenavimo 3D taškų debesis

## 2.2. Antrasis objektas

### 2.2.1. Antrojo tyrimo objektas ir jo tikslas

Antrasis tyrimo objektas yra geležinkelio tiltas, esantis Jonavoje. Šis objektas pasirinktas dėl to, jog šiuo metu vyksta tilto rekonstrukcija – viena iš buvusių senų santvarų keičiama nauja. Santvarų keitimas vyksta prastūmimo būdu, nestabdant traukinių eismo. Tyrimo atlikimo metu buvo sumontuota apie 2/3 tilto konstrukcijos. Tiriant šį objektą turima neeilinė galimybė sugeneruotą fotogrametrinį 3D modelį palyginti su projektiniu BIM modeliu. Antrojo tyrimo objekto lokacija pavaizduota 20-ame paveikslėlyje.



20 pav. Antrojo tyrimo objekto lokacija

Antrojo tyrimo tikslas yra nustatyti fotogrametrinio 3D modelio geometrinį tikslumą. Šiam tikslui pasiekti bus lyginami atstumai tarp tam tikrų pasirinktų taškų. Atstumų lyginimas vyks ne tik fotogrametriniame 3D modelyje, BIM modelyje, bet ir faktinėje situacijoje naudojant elektroninį tacheometrą. Tyrimo papildymas elektroninio tacheometro matavimais suteiks galimybę prisirišti prie faktinių matmenų esančių objekte, kas suteiks papildomą kontrolę matavimams. Esama tilto situacija tyrimo metu pavaizduota 21-ame paveikslėlyje.



### 2.2.2. Antrajam tyrimui naudojama įranga

Antrajam tyrimui atlikti taip pat buvo naudojama Kauno Technologijos Universiteto bei Išmaniųjų miestų ir infrastruktūros centro turima įranga. Tyrimą atlikti padėjo universiteto dėstytojų bei Išmaniųjų miestų ir infrastruktūros centro darbuotojų pagalba. Tyrimui naudojama įranga pateikiama 2-oje lentelėje. Antrajame tyrime nebebuvo naudojamas lazerinio skenavimo prietaisas, nes prieti ir išmatuoti statinį lazerinio skenavimo prietaisu galimybės nėra. Vietoje to dėl rezultatų palyginimui su faktine situacija buvo naudojamas elektroninis tacheometras.

2 lentelė. Antrojo tyrimo metu naudojama įranga

Eil. Nr.	Įrenginio tipas	Įrenginio modelis
1.	GPS imtuvas	Trimble R8s geonovus
2.	Bepilotis orlaivis	DJI Mavic 2 Pro
3.	Elektroninis tacheometras	Leica TCR405power

Kadangi antrajame tyrime naudojami tie patys tiek GPS imtuvas, tiek bepilotis orlaivis – jų techninės charakteristikos nesiskiria. Naudojamo elektroninio tacheometro deklaruojamas tikslumas yra ~3 mm. Deklaruojamas maksimalus matavimo ilgis yra 80 m.

### 2.2.3. Antrojo tyrimo eiga

Antrojo objekto tyrimas buvo atliekamas 2021 m. spalio 13 dieną. Oro temperatūra dieną siekė 13°C, buvo debesuota, iki kol buvo atlikta apie pusė objekto fotografijų, ore tvyrojo lengvas rūkas. Vėjuota nebuvo.

Antrojo tyrimo eiga susideda iš šių etapų:

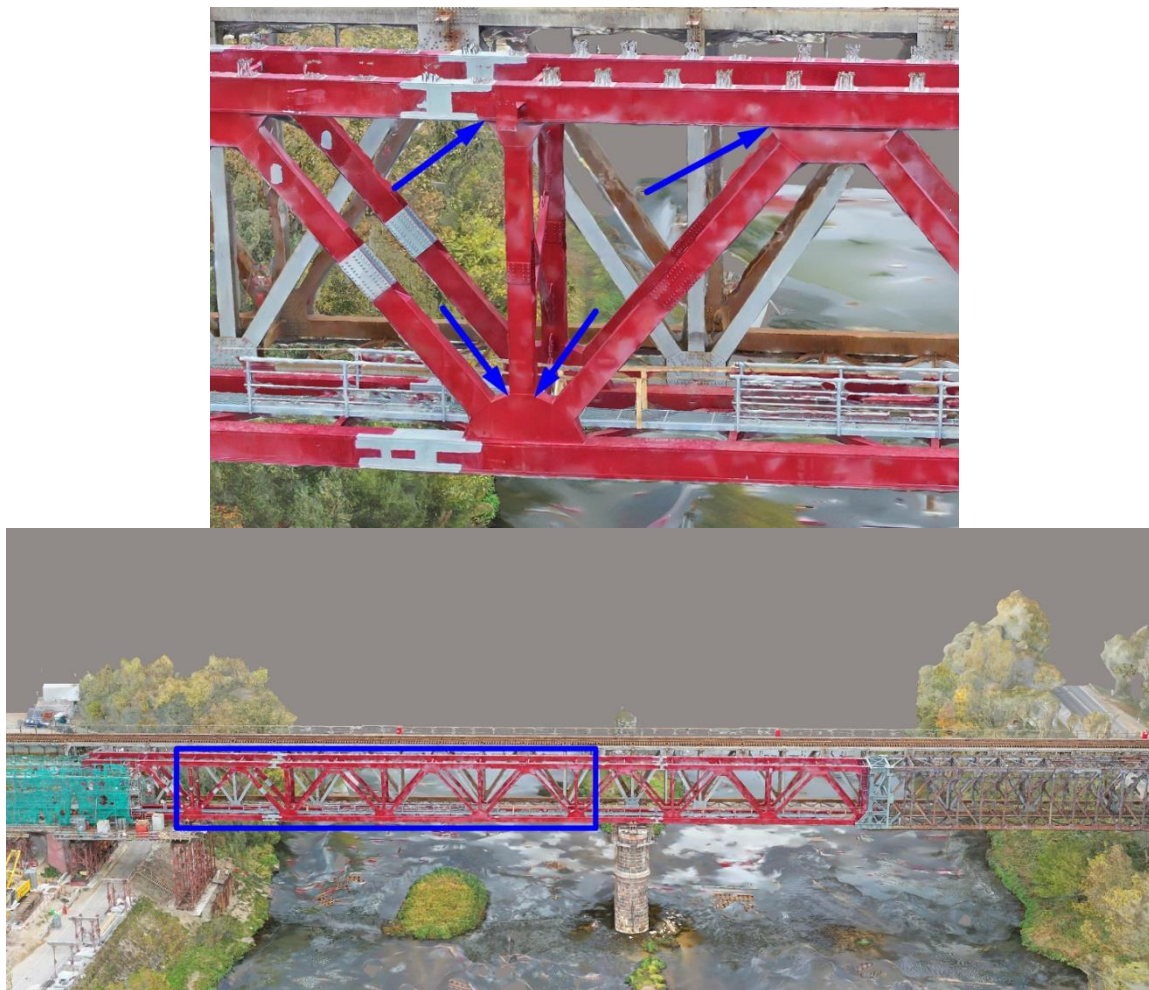
- kontrolinių (georeferencinių) taškų nužymėjimas ir šių taškų koordinatčių nuėmimas naudojant GPS imtuvą.
- matavimams pasirinktų taškų koordinatčių nuėmimas naudojant elektroninį tacheometrą;
- objekto fotografavimas bepiločio orlaivio pagalba;

Kaip ir pirmojo tyrimo objekto atveju, prieš pradėdant fotografavimą buvo nužymimi kontroliniai taškai kuriuose bus nuimamos GPS koordinatės. Nors antrasis tyrimo objektas yra gerokai didesnis, tyrimo metu nuspręsta nedaryti tiek daug kontrolinių taškų kaip pirmajame. Abiejose tilto pusėse buvo nužymima ir numatuoja po 3 kontrolinius taškus. Kairėje tilto pusėje buvo nužymimas ir numatuojamas vienas papildomas kontrolinis taškas. Jis reikalingas elektroninio tacheometro pagrindinei linijai gauti, nuo kurios bus atliekami matavimai. Taškų pažymėjimo principas buvo toks pats kaip ir pirmojo tiriamojo objekto atveju.

Fotogrametrinio 3D modelio geometriniam tikslumui nustatyti buvo pasirenkami taškai, tarp kurių vėliau bus matuojami atstumai. Pasirinkti taškai pavaizduoti 22-ame paveikslėlyje. 4 taškai yra pasirenkami viename santvaros segmente. 5 tokie santvaros segmentai pasirenkami bendram geometriniam fotogrametrinio 3D modelio tikslumui nustatyti. Pavaizduoti taškai tyrimui



pasirenkami todėl, jog jie yra geriausiai matomi iš elektroninio tacheometro stovėjimo pozicijos, kuri yra kairiame upės krante. Elektroninio tacheometro stovėjimo pozicija pavaizduota 21-ame paveikslėlyje. Taip pat šiuos taškus yra nesunku pamatuoti tiek BIM modelyje, tiek fotogrametriniame modelyje. Atstumų matavimas tarp santvaros spyrių ir statramsčių ašių susikirtimo centrų būtų tikslingesnis, bet jie nėra vizualiai matomi, todėl stengiantis išvengiant nereikalingų matavimo paklaidų geometriniam tikslumui nustatyti pasirinkti pavaizduoti plokštelių kampai.



**22 pav.** Antrojo tyrimo matavimams pasirinkti taškai / matavimų zona

Numatavus kontrolinius taškus, naudojanti GPS imtuvu, buvo pradedamas geometriniame fotogrametrinio 3D modelio tikslumui reikalingų taškų koordinacių matavimas, naudojantis elektroniniu tacheometru. Elektroninis tacheometras yra pastatomas viename iš kontrolinių taškų. Matavimai pradami laikant reflektorių šalia esančiame kontroliniame taške. Elektroninio tacheometro pagalba numatuojama pagrindinę liniją link papildomo kontrolinio taško, ant kurio laikomas reflektorius. Papildomo kontrolinio taško koordinatės yra taip pat žinomos. Matuojant sekančius taškus apskaičiuojamas pasisukimo kampas tarp matuojamo taško ir pagrindinės linijos, aukščio skirtumas tarp elektroninio tacheometro ir matuojamo taško, bei atstumas tarp elektroninio tacheometro ir matuojamo taško. Šių trijų dedamųjų pagalba galima apskaičiuoti globalias matuojamų taškų koordinates. Šiuo principu buvo atlikta po vieną matavimą visiems 20-čiai tyrimui pasirinktų taškų.

Atliktus elektroninio tacheometro matavimus pradedamas objekto fotografavimas naudojant bepilotį orlaivį. Bepiločio orlaivio skrydžio planas, kaip ir pirmajame tyrimo objekte yra sudarytas iš trijų dalių. Pradžioje objektas buvo fotografuojamas įstrižo tinklelio formos skrydžio planu, laikant fotokamerą ~45° kampu. Vėliau bepilotis orlaivis fotofiksacijas atliko iš žemesnės altitudės, laikantis tokio paties skrydžio plano, laikant fotokamerą ~30° kampu. Šiais dviem fotofiksacijų variantais yra gaunamas bendras statinio vaizdas. Galiausiai buvo centruojamasi į matavimų zoną, kurioje yra taškai, naudojami geometrinio 3D modelio tikslumui nustatyti. Ši zona, kaip ir pirmajame tyrimo objekte, fotografuojama laikant bepilotį orlaivį matuojamos zonos aukštyje, fotokamerą laikant horizontaliai ir fotofiksacijas atliekant ~10 m atstumu nuo statinio. Fotogrametrinio 3D modelio sukūrimui buvo stengiamasi gauti bendrą 60%-70% nuotraukų persidengimą. Naudojant bepilotę skraidyklę antrajame tyrime viso buvo atlikta 1179 nuotraukų. Kuriant fotogrametrinį 3D modelį buvo orientuotasi į bendrą statinio vaizdą, atkreipiant daugiau dėmesio zonai, kurioje bus atliekami geometrinio tikslumo matavimo palyginimai. Matavimų zona mėlynai pažymėta 22-ame paveikslėlyje.

#### **2.2.4. Antrojo tyrimo rezultatai**

Iš gautų nuotraukų buvo atliekamas fotogrametrinio 3D modelio sukūrimas. Modelio pririšimui prie globalių koordinatinių ašių viso buvo įvedami 7 kontroliniai taškai. Antrojo tyrimo fotogrametrinis modelis taip pat buvo kuriamas naudojantis Bentley ContextCapture programine įranga [26]. Antrojo tyrimo objekto programinės įrangos fotogrametrinio 3D modelio kūrimo ataskaita pateikiama 3-ame ir 4-ame prieduose. Sukūrus geležinkelio tilto modelį pastebėta, kad gautas stebėtinai tvarkingas tilto modelis. Taip greičiausiai buvo dėl to, jog tyrimo metu pasitaikė puikios oro sąlygos. Tyrimo atlikimo dieną oras buvo debesuotas, nebuvo jokių matomų šešėlių. Tai labai stipriai įtakojo fotogrametrinio modelio tikslumą. Bendrą antrojo objekto sukurto fotogrametrinio 3D modelio vaizdą galima matyti 22-ame paveikslėlyje.

Kaip ir pirmajame objekte, horizontalios statinio plokštumos žiūrint į jas iš apačios liko nesugeneruotos. Antrojo tyrimo atveju tyrimo rezultatams tai įtakos neturi, tačiau tai yra dar vienas priminimas, kad bepilotės skraidyklės galimybė pakelti fotokamerą virš horizontalios ašies yra svarbi skraidyklės charakteristika.

Fotogrametrinio 3D modelio geometrinio tikslumo nustatymui buvo pasirenkama lyginti atstumus tarp 23-ame paveikslėlyje nurodytų taškų. Palyginimui buvo matuojami horizontalūs atstumai tarp taškų 101-102 bei 103-104 ir vertikalus atstumas tarp taškų 103-101. Reikia paminėti, matuojamas ne tiesioginis atstumas tarp taškų 103-101, bet tikrai vertikalus atstumas nuo taško 103 iki 101 taško lygio – plokštelės, kurios kampe yra 101 taškas viršaus. Šie atstumai yra matuojami fotogrametriniame 3D modelyje ir BIM modelyje. Taip pat naudojant elektroninę tacheometrą gavus faktines minėtų taškų koordinatas apskaičiuojami faktiniai atstumai reikalingi rezultatų palyginimui.

23-ame paveikslėlyje parodyti tikrai pirmojo santvaros segmento atstumai, lygiai tokiu pačiu principu (201-202; 203-204; 203-201...) lyginami likusių 4 segmentų atstumai. Taigi, viso buvo nustatoma 20 taškų globalios koordinatės naudojantis elektroniniu tacheometru. Geometrinio fotogrametrinio 3D modelio tikslumui nustatyti buvo matuojama 15 skirtingų atstumų.



**23 pav.** Antrojo tyrimo objekto matuojami atstumai reikalingi rezultatų palyginimui

Prieš rezultatų lyginimą su BIM modeliu šį modelį reikėjo pakoreguoti. Buvo turimas tikrai galutinės projektinės situacijos BIM modelis, o tai neatitiko faktinės situacijos tyrimo metu. Modelį teko šiek tiek pastumti įvertinant ne tiktilo padėtį išilgai tilto ašies, bet kartu įvertinti ir statybines pakylas konstrukcijoje. BIM modelį pastūmus į faktinę tilto poziciją buvo pradamas rezultatų lyginimas. Pradžioje buvo tikrinami elektroniniu tacheometru gauti rezultatai. Jie pateikiami 3-ioje lentelėje.

**3 lentelė.** Elektroniniu tacheometru gauti rezultatai

Matavimai tarp taškų nr.	Atstumas BIM modelyje, mm	Elektroniniu tacheometru gauti atstumai, mm (n=1)	Skirtumas, mm
101-102	5537	5627.36	90.36
103-104	350	350.00	0.00
101-103	5586	5561.00	25.00
201-202	5499	5561.54	62.54
203-204	500	neteisingai nuvizuotas taškas	X
201-203	5598	5591.00	7.00
301-302	5526	5118.48	407.52
303-304	350	361.39	11.39
301-303	5586	5571.00	15.00
401-402	5500	5533.00	33.00
403-404	350	330.72	19.28
401-403	5587	5567.00	20.00
501-502	5497	5502.70	5.70
503-504	350	299.31	50.69
501-503	5589	5561.00	28.00
Max			<b>407.52</b>
Vidurkis			<b>55.39</b>

Iš rezultatų matoma, kad vienas iš taškų buvo nuvizuotas neteisingai – gautos 204 taško koordinatės buvo maždaug 2 m atstumu nuo matuojamojo taško. Vieno atstumo matavimai visiškai sutapo. Iš likusių rezultatų matoma, kad gauti elektroninio tacheometro rezultatai toli gražu neatitinka realios

situacijos. Tam įtaką turėjo atstumas tarp elektroninio tacheometro ir matuojamo statinio. Nemaža dalis (nuo trečiojo santvaros segmento 301, 302....) matavimų viršijo rekomenduojamą 80 m atstumą iki matuojamo objekto, kuris yra deklaruojamas elektroninio tacheometro techninėse specifikacijose. Greičiausiai didžiausią įtaką matavimų netikslumams turėjo žmogiškoji klaida. Žmogiškoji klaida dėl matavimų patirties stokos yra matoma visuose matavimuose, nes matavimai buvo atliekami tyrimo autoriaus (studento) rankomis.

Gauti elektroninio tacheometro matavimų rezultatai nėra skaitomi patikimais, todėl tolimesniame tyrime jie naudojami nebus. Tolimesniame fotogrametrinio 3D modelio geometrinio tikslumo tyrime yra daroma prielaida, kad pakoreguotas BIM modelis atitinka faktinę statinio situaciją.

Siekiant nustatyti fotogrametrinio 3D modelio geometrinį tikslumą BIM modelio atstumai tarp pažymėtų taškų yra lyginami su fotogrametrinio 3D modelio atstumais. Paklaidų matuojant atstumus fotogrametriniame 3D modelyje išvengti neįmanoma, nes paspausti pelės žymeklį ant tikslų plokštelių kampų yra tiesiog neįmanoma. Dėl to kiekvienas iš atstumų fotogrametriniame 3D modelyje buvo matuojamas 20 kartų, stengiantis pelės žymekliu paspausti kaip įmanoma arčiau matuojamų plokštelių kampų. Gauti rezultatai pateikiami 4-oje lentelėje.

**4 lentelė.** Fotogrametrinio 3D modelio ir BIM modelio lyginimo rezultatai

Matavimai tarp taškų nr.	Atstumas BIM modelyje, mm	Fotogrametrinio 3D modelio matavimų vidurkis, mm (n=20)	Skirtumas, mm	Atsitiktinė (matavimo rezultato) paklaida $\Delta$ , mm (n=20)	Bendroji matavimo rezultato santykinė paklaida, $\delta, b$ % (n=20)
101-102	5537	5526.90	10.10	4.563	0.085
103-104	350	347.35	2.65	3.313	0.996
101-103	5586	5554.70	31.30	5.201	0.095
201-202	5499	5505.80	6.80	4.141	0.077
203-204	500	486.35	13.65	3.720	0.792
201-203	5598	5562.80	35.20	2.389	0.047
301-302	5526	5528.00	2.00	4.985	0.092
303-304	350	347.43	2.57	5.193	1.522
301-303	5586	5543.40	42.60	4.965	0.091
401-402	5500	5503.90	3.90	2.824	0.054
403-404	350	351.07	1.07	5.689	1.645
401-403	5587	5574.30	12.70	2.893	0.055
501-502	5497	5499.75	2.75	2.694	0.052
503-504	350	329.85	20.15	5.696	1.753
501-503	5589	5563.50	25.50	3.569	0.067
MAX			<b>42.60</b>	<b>5.70</b>	<b>1.75</b>
Vidurkis (atmetus išskirtų tendencijų rezultatus)			<b>3.98</b>	<b>4.18</b>	<b>0.57</b>

Iš rezultatų matoma, kad fotogrametrinio 3D modelio rezultatai lyginant su elektroninio tacheometro matavimų rezultatais yra gerokai tikslesni. Taip greičiausiai nutiko dėl žmogiškųjų paklaidų ir dėl per didelio matavimo atstumo matuojant objektą elektroniniu tacheometru. Iš to išryškėja vienas



pagrindinių fotogrametrijos technologijos pliusų lyginant ją su tradiciniais matavimo metodais – galimybė tyrinėti sunkiai pasiekiamas konstrukcijas.

Išanalizavus duomenis išryškėjo dvi tendencijos – visų matuotų vertikalių atstumų tikslumas yra gerokai mažesnis lyginant jį su horizontalių atstumų tikslumu (4 lentelėje pažymėta oranžine spalva) ir matavimų patikimumas matuojant trumpus atstumus krenta (4 lentelėje pažymėta raudona spalva).

Vertikalus matavimų tikslumas greičiausiai prarandamas dėl per stataus fotokameros orientavimo kampo objekto fotografavimo metu. Kuo vertikalesniu kampu laikoma fotokamera, tuo labiau prarandamas vertikalus matavimų tikslumas. Tiesa, objektas taip pat buvo fotografuojamas laikant fotokamerą horizontaliai, tačiau tikėtina, kad horizontalių fotofiksacijų kiekis buvo per mažas suteikti didesnę fotogrametrinio 3D modelio vertikalų tikslumą.

Mažėjantis matavimo tikslumas matuojant trumpus atstumus pastebėtas ne visuose matavimuose. Ši tendencija pastebėta tikrai 2 iš 5 trumpų atstumų matavimų (350 mm ir 500 mm), todėl matavimų tikslumo mažėjimas manomai yra susijęs su nepakankamu nuotraukų kiekiu minėtuose tiriamuosiuose paviršiuose.

Atmetus dviejų minėtų tendencijų rezultatus galima matyti, kad didelė dalis, netgi 87,5% atliktų matavimų neviršija 10 mm paklaidos. Priimant, 10 mm paklaidos galutinį rezultatą lieka nustatyti fotogrametrijos technologijos panaudojimo galimybes statybos pramonės srityje.

### 2.2.5. Fotogrametrijos technologijos panaudojimo galimybės konstrukcijų matavimams

Norint nustatyti fotogrametrijos technologijos panaudojimo galimybes statybos pramonės srityje reikia suprasti, kad skirtingos konstrukcijos turi skirtingas gamybos bei montavimo tolerancijas. Tyrimo metu analizuojamos monolitinės, surenkamo gelžbetonio ir plieninės konstrukcijos. Monolitinės konstrukcijos yra gaminamos objekte, todėl gamybos nuokrypių joms nėra. Nors gamybos nuokrypių monolitinėms konstrukcijoms nėra, jų tikslumas yra gerokai prastesnis nei surenkamo gelžbetonio konstrukcijų pagamintų gamykloje. Dėl sudėtingumo užtikrinti tinkamą kokybę objekte monolitinės konstrukcijos pasižymi didžiausiomis leistinomis tolerancijomis. Nesvarbu kokios konstrukcijos yra matuojamos (monolitinės, surenkamo gelžbetonio ar plieninės), leistinų nuokrypių dydis priklauso nuo matuojamojo ilgio. Gelžbetoninių monolitinių konstrukcijų leistinieji nuokrypiai pateikiami 5-oje lentelėje.

**5 lentelė.** Gelžbetoninių monolitinių konstrukcijų leistinieji nuokrypiai [28]

Nuokrypio pavadinimas	Leistinieji nuokrypiai, mm
Pamatų vertikalių plokštumų ir jų susikirtimo linijų nuokrypiai nuo vertikalės per visą konstrukcijos aukštį	20
Sienu, išbetonuotų nejudamuose klojiniuose, ir kolonų, laikančių monolitines perdangas	15
Sienu ir kolonų, laikančių surenkamąsias sijų konstrukcijas	10
Horizontalių plokštumų nuokrypis nuo horizontalės per visą patikrinto ruožo plokštumą	20
Vietiniai betono paviršiaus nelygumai pridėtos dviejų metrų ilgio liniuotės ruože (išskyrus atraminius paviršius)	5
Elementų ilgio ir tarpatramio	20
Elemento skerspjūvio matmenų	-3 iki +6

Monolitinių ar surenkamųjų gelžbetonio kolonų ir kitokių surenkamųjų elementų atramų paviršiaus altitudžių	5
--	---

Iš pateiktos lentelės leistinų nuokrypių matoma, kad matuoti vietinių betono paviršiaus nelygumų, skerspjūvio matmenų ir monolitinių ar surenkamųjų gelžbetonio kolonų bei kitokių surenkamųjų elementų atramų paviršiaus altitudžių pagal gautą fotogrametrijos modelio tikslumą nėra tikslinga. Fotogrametrinio modelio paklaidos yra didesnės nei matuojant išvadintas monolitines konstrukcijas. Matuojant likusias monolitines konstrukcijas fotogrametrinio 3D modelio tikslumas yra pakankamas. Matoma, kad sienų, laikančių surenkamo gelžbetonio sijas, tolerancijos yra mažesnės lyginant su sienų, laikančių monolitines perdangas tolerancijomis. Šis tolerancijų pagal konstrukcijų svarbą ar matuojamų elementų ilgį išskyrimas egzistuoja ne tiktai monolitinėse gelžbetonio konstrukcijose, bet ir surenkamo gelžbetonio bei plieno konstrukcijose.

Teoriškai, išmatavus konstrukcijas, kurių tolerancijos yra 10 mm ir daugiau, fotogrametriniame 3D modelyje pastebėjus, jog matuojamos elementų charakteristikos viršija 10 mm neatitikimą, reikėtų fiziškai patikrinti matuojamas konstrukcijas. Tai reikalinga, nes kiekvieno fotogrametrinio 3D modelio tikslumas yra skirtingas.

Surenkamojo gelžbetonio konstrukcijos yra gaminamos gamyklose. Dalis gamyklų deklaruoja savo leistinus elementų geometrijos nukrypimus, kurie priklauso nuo gamyklos turimo inventoriaus [29]. Dalis gamyklų leistinų gaminių geometrinių nuokrypų nedeklaruoja, bet pateikia sertifikatus, kad jų gaminamos konstrukcijos atitinka reikiamus standartus. Tyrimė nagrinėjami Lietuvos ir Europos standartai tiesiniams konstrukcijų elementams (kolonomis, rygeliams) [30], sienų elementams [31], kiaurymėtuųjų perdangos plokščių elementams [32] ir pamatams [33]. Bendrose surenkamųjų betoninių gaminių taisyklėse yra apibrėžta formulė, rekomenduojama apskaičiuoti maksimalioms gaminių gamybos ilgių tolerancijoms [34]:

$$\Delta l = \pm \left( 10 + \frac{L}{1000} \right) \leq 40 \text{ mm.} \quad (2.2.5.1)$$

Čia: L – elemento ilgis pateikiamas milimetrais.

Jeigu atskirų gaminių standartuose nenurodoma kitaip, gamybos tolerancijos elementų ilgiams apskaičiuojamos pagal pateiktą formulę. Tiesinių gaminių ir pamatų ilgių tolerancijoms nustatyti naudojama pateikta formulė.

Taip pat bendrose surenkamųjų betoninių gaminių taisyklėse yra apibrėžiama elementų skerspjūvio charakteristikų maksimalios leistinos gamybos nuokrypos. Jos taip pat priklauso nuo elemento skerspjūvio dydžio. Esant mažesniai nei 150 mm elemento skerspjūvio pločiui ir aukščiui, leistinos skerspjūvio pločio ir aukščio gamybos nuokrypos yra nuo -5 iki +10. Matuojant 150 mm – 400 mm skerspjūvių leistinos nuokrypos yra nuo -10 mm iki 15 mm [34]. Matuojant didesnius elemento skerspjūvius, gamybos tolerancijos matavimams taip pat didėja. Minimos tolerancijos yra tinkamos matuoti tiesinių elementų ir pamatų skerspjūvių charakteristikas.

Matoma, kad kaip ir matuojant monolitines konstrukcijas – matuojant didesnius atstumus (tokius kaip konstrukcijos ilgis, lyginant su skerspjūvio matmenimis) gamybos tolerancijos matavimams taip pat didėja.

Surenkamo gelžbetonio sieninių elementų leistinieji gamybos nuokrypiai pateikiami 6-oje lentelėje.

**6 lentelė.** Surenkamo gelžbetonio sieninių elementų leistinieji gamybos nuokrypiai [31]

Matuojamas atstumas	0 – 0,5 m	0,5 m – 3 m	>3 m – 6 m	> 6 m – 10 m	>10 m
Leistini nuokrypiai	±8 mm	±14 mm	±16 mm	±18 mm	±20 mm

Iš pateiktos lentelės leistinų gamybos nuokrypių matoma, kad matuoti sienų atstumus mažesnius nei 0,5 m ilgio fotogrametrijos technologijos pagalba nėra tikslinga, nes tyrimo metu nustatytos fotogrametrinio 3D modelio paklaidos viršija leistinus gamybos nuokrypius matuojant mažesnius nei 0,5 m sienų ilgius. Tai gali pasikeisti įvertinant surenkamo gelžbetonio gaminių montavimo nuokrypas, apie kurias bus kalbama toliau. Matoma, kad kaip ir matuojant kitas konstrukcijas, didėjant matuojamam atstumui leistini gamybos nuokrypiai taip pat didėja.

Matuojant surenkamo gelžbetonio kiaurymėjų plokščių storį, plokštės storiui esant  $h \leq 150$  mm, leistinieji gamybos nuokrypiai yra nuo -5 iki +10 mm. Didėjant plokštės storiui, jam esant  $h \geq 250$  mm, leistinieji nuokrypiai yra  $\pm 15$  mm. Tarpinėse plokštės storio reikšmėse leistinieji gamybos nuokrypiai gaunami tiesinės interpoliacijos būdu. Matuojant plokštės ilgį, skirtingos gamybos tolerancijos pagal plokštės ilgio pokytį nėra apibrėžtos, jos visuomet yra  $\pm 25$  mm. Bendro plokštės pločio leistinieji gamybos nuokrypiai yra  $\pm 5$  mm. Bendro plokštės pločio nuokrypiai yra tokie nedideli, nes kiaurymėjų perdangos plokščių plotis yra standartinis ir visada atitinka 1,2 m. Jeigu plokštė yra išilgai pjauta, pjovimo metu gali atsirasti tam tikrų netikslumų, todėl išilgai pjautų perdangos plokščių pločio leistini gamybos nuokrypiai yra gerokai didesni ir siekia netgi  $\pm 25$  mm [32].

Nustačius leistinus gamybos nuokrypius tiriamoms surenkamo gelžbetonio konstrukcijoms reikia nepamiršti įvertinti ir leistinus montavimo nuokrypius minėtoms konstrukcijoms. Leistinieji surenkamo gelžbetonio montavimo nuokrypiai pateikiami statybos taisyklėse [35]. Pradedant pamatais, statybos taisyklėse išskiriami trys skirtingi pamatų tipai – juostiniai pamatai iš surenkamų blokų, lizdiniai ir poliniai pamatai. Tolerancijos matuojant juostinius pamatus iš surenkamų blokų nėra mažesnės nei 10 mm. Tolerancijos matuojant lizdinius pamatus yra mažesnės nei 10 mm tik tai matuojant pamatų blokų atraminių paviršių altitudžių nuokrypius nuo projektinių, įrengiant išlyginamąjį sluoksnį, jos yra  $\pm 5$  mm, (prieš įrengiant išlyginamąjį sluoksnį tolerancijos yra  $\pm 20$  mm) ir pamatų lizdo matmenų nuokrypius, jie taip pat yra  $\pm 5$  mm. Likusios lizdinių pamatų montavimo tolerancijos yra didesnės nei 10 mm. Kaltinių polinių pamatų padėties plane tolerancijos ir polių galvų altitudžių su monolitiniiais rostverkais tolerancijos gerokai viršija tyrimo metu nustatytą fotogrametrinio 3D modelio geometrinės paklaidos ribą.

Montuojant tiesinius surenkamo gelžbetonio elementus leistinieji elementų nuokrypiai yra matuojami nuo gaminių ašių iki projektinių ašių. Leistini kolonų ašių nukrypimai nuo vertikalės kolonos viršuje priklauso nuo kolonos ilgio. Kolonos ilgiui esant iki 4,0 m leistini montavimo nukrypimai yra 10 mm, esant nuo 16,0 m iki 25,0 m kolonos ilgiui leistini montavimo nukrypimai yra 30 mm. Tarpinės reikšmės yra pateikiamos statybos taisyklėse [35]. Leistini kolonos ašies montavimo nukrypimai nuo projektinės ašies, matuojant kolonos apačioje, yra 8 mm. Surenkamų gelžbetoninių rygelių leistini montavimo nuokrypiai yra mažesni nei kolonų. Rygelio ilgiui esant iki 4,0 m leistini rygelio nuokrypiai nuo simetrijos ašies angos perdengimo kryptimi yra 5 mm, o rygelio ilgiui esant nuo 16,0 m iki 25,0 m leistinieji nuokrypiai yra 10 mm.

Surenkamo gelžbetonio sienų elementų montavimo nukrypimai statybos taisyklėse [35] nėra pateikiami. Perdangos plokščių montavimo nuokrypiai, kaip ir visų aptartų konstrukcijų, priklauso nuo elementų ilgio. Perdangos plokštės ilgiui esant iki 4,0 m leistini nukrypimai nuo simetrijos ašies

angos perdengimo kryptimi yra 5 mm, perdangos plokštės ilgiui esant nuo 8,0 m iki 16,0 m leistini nukrypimai yra 8 mm.

Norint gauti bendrą gamybos ir montavimo paklaidą reikėtų ne sudėti šių paklaidų reikšmes, bet naudoti šaknies iš šių paklaidų kvadratų sumos reikšmę. Jeigu gauta reikšmė neviršija tyrimo metu apskaičiuotos fotogrametrinio 3D modelio paklaidos, kuri yra lygi 10 mm, naudotis šia realybės skenavimo technologija matuojant aptartas konstrukcijas yra galima.

Plieninių konstrukcijų leistini gamykliniai nuokrypiai yra gerokai mažesni nei gelžbetoninių konstrukcijų. Kaip ir surenkamo gelžbetonio konstrukcijų, plieninių konstrukcijų leistinieji nuokrypiai susideda iš gamybos bei montavimo leidžiamųjų nuokrypų. Plieninių konstrukcijų techniniuose reikalavimuose [36] išskiriama daugybė skirtingų leistinų nuokrypų, priklausančių nuo matuojamų kriterijų. Tiriamajame darbe bus aptariama keletas pasirinktų kriterijų. Leidžiamosios gamybos nuokrypos matuojant suvirintų profiliuotųjų aukštį apskaičiuojamos pagal:

$$-\Delta = h/50. \quad (2.2.5.2)$$

Reikia atkreipti dėmesį, kad gamybos nuokrypos šiuo atveju gali būti tikrai į mažąją virintinio profiliuotųjų pusę. Virintinio profiliuotųjų lentynos pločio leidžiamos nuokrypos apskaičiuojamos pagal formulę:

$$-\Delta = b/100. \quad (2.2.5.3)$$

Virintinio profiliuotųjų leidžiamos gamybos nuokrypos taip pat gali būti tikrai į mažąją virintinio profiliuotųjų pusę. Elementų ilgio leidžiamos gamybos nuokrypos bendru atveju apskaičiuojamos pagal formulę:

$$\Delta = \pm \left( \frac{L}{5000} + 2 \right) \text{ mm}. \quad (2.2.5.4)$$

Jeigu elemento galai yra paruošti visiško sąlyčio atramai, leistinos ilgio gamybos nuokrypos yra tikrai  $\pm 1$  mm. Matoma, kad gamybos nuokrypos plieninėms konstrukcijoms yra gerokai mažesnės lyginant su surenkamo gelžbetonio konstrukcijomis.

Leidžiamos montavimo nuokrypos aukšto aukščiui yra  $\pm 10$  mm, o bendro pastato aukščiui yra  $\pm 20$  mm, kai bendras pastato aukštis yra iki 20 m. Bendram pastato aukščiui esant nuo 20 m iki 100 m leistinos montavimo nuokrypos apskaičiuojamos pagal formulę:

$$\Delta = \pm 0,5(h + 20) \text{ mm}. \quad (2.2.5.5)$$

Čia: h – bendras pastato aukštis pateikiamas metrais.

Maksimalios leidžiamos montavimo nuokrypos tarp sijų centrų linijų yra  $\pm 10$  mm.

Iš visų pateiktų gamybos bei montavimo tolerancijų išryškėja gauto fotogrametrinio 3D modelio panaudojimo galimybės tirti plienines, surenkamo gelžbetonio bei monolitines konstrukcijas. Nustačius 10 mm fotogrametrinio 3D modelio paklaidą matoma, kad galima matuoti beveik visas aptartas monolitines konstrukcijas su keletu išimčių, aptartų anksčiau. Surenkamo gelžbetonio ir plieninių elementų padėties tolerancijas apibrėžia leistini montavimo nuokrypiai. Jie apibrėžiami elemento ašies nukrypimu nuo projektinės ašies. Esant ilgesniam elementui montavimo nuokrypiai jam matuoti didėja. Skirtingiems elementams išskiriamos skirtingos montavimo tolerancijos, bet

didžiąją elementų dalį montuojamų elementų geometrinių padėčių (tiek surenkamo gelžbetonio, tiek plieninių konstrukcijų) fotogrametrijos technologijos pagalba matuoti galima, nes montavimo tolerancijos yra ne mažesnės nei 10 mm. Analizuojant leistinas gamybos nuokrypas matoma, kad surenkamo gelžbetonio konstrukcijų nuokrypos yra gerokai didesnės lyginant su plieninių konstrukcijų leistinomis gamybos nuokrypomis. Matuoti didžiąją dalį surenkamo gelžbetonio konstrukcijų charakteristikų fotogrametrijos technologijos pagalba galima, nes didžioji dalis g/b konstrukcijų charakteristikų turi ne mažesnes nei 10 mm tolerancijas. Tai priklauso nuo elementų dydžio, matuojant didesnius elementus tolerancijos matavimams yra taip pat didesnės. Matuoti plieninių konstrukcijų profilių charakteristikas fotogrametrijos pagalba nėra tikslinga, nes plieninių konstrukcijų leistinos gamybos nuokrypos yra ženkliai mažesnės lyginant su surenkamo gelžbetonio konstrukcijomis. Jos taip pat priklauso nuo plieninių profilių dydžio, bet dažniausiu atveju tyrimo metu gautos fotogrametrinio modelio paklaidos yra per didelės matuoti plieninių konstrukcijų skerspjūvių charakteristikoms matuoti.

Kadangi statybos industrija sparčiai skaitmenizuojasi, BIM naudojimas statybos srityje tampa vis dažnesnis. Norint išvengti rankinio fotogrametrinio 3D modelių rezultatų tikrinimo, sukurtą fotogrametrinį 3D modelį galima tikrinti su projektiniu BIM modeliu. Taip suplanuota (BIM) ir taip pastatyta (fotogrametrinis 3D modelis) modelių lyginimas suteikia svarbią informaciją apie statinio geometrinius nuokrypius, kurie, atsižvelgiant į montavimo, gamybos ir fotogrametrinio 3D modelio tolerancijas turi būti sutvarkomi prieš pridodant statinį. Šių skirtingų 3D modelių vieno su kitu apjungimas vizualiai labai aiškiai parodo labiausiai nukrypusias statinio vietas, kurias esant reikalui reikėtų patikrinti tradiciniais matavimo prietaisais.

Atliekant antrąjį tyrimą, norint nustatyti realios situacijos nukrypimus nuo projektinės, buvo mėginama apjungti fotogrametrinį 3D modelį kartu su esamu projektiniu BIM modeliu. Šių modelių apjungimo rezultatas pavaizduota 24-ame paveikslėlyje.



**24 pav.** Antrojo tyrimo objekto matuojami atstumai reikalingi rezultatų palyginimui

Atlikus modelių palyginimą didelių modelių neatitikimų nebuvo pastebėta.

## Išvados

1. Remiantis atlikta literatūros analize nustatyta, kad vienas populiariausių realybės skenavimo technologijų ir BIM modelių tarpusavio integracijos būdų yra „taip suplanuota“ ir „taip pastatyta“ modelių lyginimas. Jis gali būti atliekamas tiek statybos etape (sekti statybos progresą, nuokrypių stebėsenai), tiek statybos užbaigimo stadijoje (bendrų statinio rodiklių tikrinimui).
2. Atlikus konstrukcijų matavimus pastebėtos dvi tendencijos: visų matuotų vertikalų geometrinių charakteristikų tikslumas yra mažesnis lyginant su horizontalių geometrinių charakteristikų tikslumu; trumpų atstumų (iki 0,5 m) matavimų patikimumas sumažėja. Atmetus šių dviejų tendencijų rezultatus, didžioji dalis (86%) likusių matavimų neviršijo 10 mm ir 1,65 % santykinės paklaidos vertės.
3. Atsižvelgiant į leistinas konstrukcijų montavimo tolerancijas nustatyta, kad sugeneruoto fotogrametrinio 3D modelio tikslumas yra pakankamas matuoti surenkamo gelžbetonio ir plieninių konstrukcijų geometrinei padėčiai nustatyti. Įvertinant monolitinių konstrukcijų tolerancijas ir surenkamo gelžbetonio konstrukcijų leistinus gamybos nuokrypius nustatyta, kad sugeneruoto fotogrametrinio 3D modelio tikslumas yra pakankamas daliai minėtų konstrukcijų geometriniams charakteristikoms matuoti (ilgiui, aukščiui).
4. Fotogrametrinio modelio kokybė (vizualinė ir geometrinė), kuomet duomenų surinkimas atliekamas bepiločiais orlaiviais, yra įtakojama skrydžio ir klimato parametrais: fotografijų persidengimas (70%-80%), fotofiksacijų kampai (90° ir 60°; 90° ir 45°), fotografavimo aukščiai ir atstumai iki fotografuojamų objektų, naudojamų įrenginių charakteristikos, oro sąlygos.
5. Tyrime panaudotas mobilus lazerinio skenavimo prietaisas pademonstravo nepakankamą taškų debesies pagrindu suformuoto modelio tikslumą statinių konstrukcijų defektams nustatyti. Norint gauti pakankamą tikslumą konstrukcijų defektams nustatyti rekomenduojama naudoti stacionarius lazerinio skenavimo prietaisus.
6. Realybės skenavimo technologijų pagrindu sugeneruoti statinių 3D modeliai gali būti palyginami su BIM modeliais identifikuojant geometrinius statinio nuokrypius ir kitus parametrus. Šio metodo taikymas yra efektyvus lyginant „taip suplanuota“ ir „taip pastatyta“ informacija apie statinius. Antrojo tyrimo objekto BIM ir fotogrametrinio 3D modelių lyginimo metu konstrukcijų nuokrypių aptikta nebuvo.

## Literatūros sąrašas

1. SCHENK T. *Introduction to Photogrammetry*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, (OH), USA, 2005.
2. LINDER WILFRIED. *Digital Photogrammetry. A Practical Course*. 3rd ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2009. ISBN:978-3-540-92724-2.
3. SEO J., DUQUE L., WACKER J. Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 2018, vol. 94. pp. 112-126 ISSN 0926-5805. DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006>.
4. HALLERMANN N., MORGENTHAL G. From Aerial Photography to 3-Dimensional Inspection of Bridges. *IABSE Conference: Bridges and Structures Sustainability - Seeking Intelligent Solutions*, 2016, vol. 106, no. 8. pp. 546-553. DOI [10.2749/222137816819258898](https://doi.org/10.2749/222137816819258898).
5. BYRNE J., O'KEEFFE E., LENNON D., LAEFER D.F. 3D Reconstructions Using Unstabilized Video Footage from an Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Imaging*, 2017, vol. 3, no. 2. pp. 15 ISSN 2313-433X. DOI <https://doi.org/10.3390/jimaging3020015>.
6. RODER M., HILL R., LATIFI H. Best practice tutorial: Technical handling of the UAV "DJI Phantom 3 Professional" and processing of the acquired data. *Technical report*. DOI [10.13140/RG.2.2.36355.91680](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36355.91680).
7. RUZGIENĖ B., KUKLIENĖ L., JANKAUSKIENĖ D., KUKLYS I., VRUBLIAUSKAITĖ R. Fotogrametriniai reikalavimai, keliami aerokartografavimui: UAV fotogrametrija. *Inžinerinės ir edukacinės technologijos*, 2017, pp. 21-28. ISSN 2029-9303.
8. KIM B., CHO S. Automated Vision-Based Detection of Cracks on Concrete Surfaces Using a Deep Learning Technique. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 10. pp. 3452 ISSN 1424-8220. DOI <https://doi.org/10.3390/s18103452>.
9. ERDENBAT D., WALDMANN D. Application of the DAD method for damage localisation on an existing bridge structure using close-range UAV photogrammetry. *Engineering structures*, 2020, vol. 218. pp. 110727 ISSN 0141-0296. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110727>.
10. BOLOGNESI M., FURINI A., RUSSO V., PALLEGRINELLI A., RUSSO P. Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, vol. XL-5. pp. 113-119 ISSN 1682-1750. DOI <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-113-2014>.
11. AZHAR SALMAN. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 2011, vol. 11, no. 3. ISSN 1532-6748. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127).
12. LOREDO CONDE, A. J., GARCÍA-SANZ-CALCEDO, J. and REYES RODRÍGUEZ, A. M. Use of BIM with photogrammetry support in small construction projects. Case study for commercial franchises. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, vol. 26. pp. 513-523 ISSN 1392-3730. DOI <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12611>.
13. BRAUN A., TUTTAS S., BORRMANN A., STILLA U. A concept for automated construction progress monitoring using BIM-based geometric constraints and photogrammetric point clouds. *Journal of Information Technology in Construction*, 2015, vol. 20. pp. 68-79 ISSN 1874-4753. DOI <http://www.itcon.org/2015/5>.



14. CHEN S., LAEFER D.F., MANGINA E., ZOLANVARI S.M.I., UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, vol 24, no. 4. pp. ISSN 1084-0702. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343).
15. BARBA S., BARBARELLA M., BENEDETTO A.D., FIANI M., GUJSKI L., LIMONGIELLO M. Accuracy Assessment of 3D Photogrammetric Models from an Unmanned Aerial Vehicle. *Drones*, 2019, vol. 3, no. 4. pp. 79 ISSN 2504-446X. DOI <https://doi.org/10.3390/drones3040079>.
16. KIM S., KIM S., LEE D-E. 3D Point Cloud and BIM-Based Reconstruction for Evaluation of Project by As-Planned and As-Built. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 9. pp. 1457 ISSN 0924-2716. DOI <https://doi.org/10.3390/rs12091457>.
17. LEE J.S., PARK J., RYU Y.M. Semantic segmentation of bridge components based on hierarchical point cloud model. *Automation in Construction*, 2021, vol. 130. pp. 103847 ISSN 0926-5805. DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103847>.
18. BOLOURIAN N., SOLTANI M.M., ALBAHRI A.H., HAMMAD A. High Level Framework for Bridge Inspection Using LiDAR-equipped UAV. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2017, vol. 34. pp. 683-688 ISSN 2413-5844. DOI <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0095>.
19. MOHAMMADI M., RASHIDI M., MOUSAVI V., KARAMI A., YU Y., SAMALI B. Quality Evaluation of Digital Twins Generated Based on UAV Photogrammetry and TLS: Bridge Case Study. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 17. pp. 3499 ISSN 0924-2716. DOI <https://doi.org/10.3390/rs13173499>.
20. BALTSAVIAS E.P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 54, no. 2-3. pp. 83-94 ISSN 0924-2716. DOI [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3).
21. ATTARD L., DEBONO C. J., VALENTINO G., CASTRO M. D. Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 144. pp. 180-188 ISSN 0924-2716. DOI <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.010>.
22. ZOLLINI S., ALICANDRO M., DOMINICI D., QUARESIMA R., GIALLONARDO M. UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 19:3180 ISSN 2072-4292. DOI <https://doi.org/10.3390/rs12193180>.
23. RAU J.Y., HSIAO K.W., JHAN J.P., WANG S.H., FANG W.C., WANG J.L. Bridge Crack Detection Using Multi-Rotary UAV and Object-Base Image Analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, vol. XLII-2/W6, pp. 311-318 ISSN 2194-9034. DOI <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-311-2017>.
24. BUFFI G., MANCIOLA P., GRASSI S., BARBERINI M., GAMBI A. Survey of the Ridracoli Dam: UAV-based photogrammetry and traditional topographic techniques in the inspection of vertical structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, vol. 8, no. 2. pp. 1562-1579 ISSN 1947-5705. DOI <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1362039>.
25. KHALOO A., LATTANZI D., JACHIMOWICZ A. M., DEVANEY C. Utilizing UAV and 3D Computer Vision for Visual Inspection of a Large Gravity Dam. *Preprint*, 2018, DOI [10.20944/preprints201801.0235.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201801.0235.v1)

26. Contextcapture. User guide [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-01-03 d.]. Prieiga per: [https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture\\_User\\_Guide\\_EN\\_PDF-v18/en/ContextCapture%20User%20Guide%20EN.pdf](https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture_User_Guide_EN_PDF-v18/en/ContextCapture%20User%20Guide%20EN.pdf)
27. JOKŪBAITIS Vidmantas, ŠAUČIUVENAS Gintas. *Statinių konstrukcijų techninės būklės vertinimas*. Mokomoji knyga. Vilnius, :Technika, 2012. ISBN 978-609-457-178-7.
28. STATYBOS TAISYKLĖS [ST 121895674.06:2009] Betonavimo darbai. Lietuvos statybininkų asociacija, 2009.
29. Betonika. Techninis vadovas [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2022-01-03 d.]. Prieiga per: [http://www.betonika.lt/files/failai/techninis\\_vadovas\\_2015.pdf](http://www.betonika.lt/files/failai/techninis_vadovas_2015.pdf)
30. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13225:2013] Surenkamieji betono gaminiai. Tiesiniai konstrukcijų elementai = Precast concrete products - Linear structural elements : Europos standartas EN 13225:2013 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
31. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14992:2007+A1:2012] Gamykliniai betono gaminiai. Sienos elementai = Precast concrete products - Wall elements : Europos standartas EN 14992:2007+A1:2012 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
32. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1168:2005+A3] Gamykliniai betono gaminiai. Kiaurymėtosios plokštės = Precast concrete products - Hollow core slabs : Europos standartas EN 1168:2005+A3:2011 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
33. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14991:2007] Gamykliniai betoniniai gaminiai. Pamato elementai = Precast concrete products - Foundation elements : Europos standartas EN 14991:2007 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
34. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 13369:2005] Bendrosios surenkamųjų betoninių gaminių taisyklės = Common rules for precast concrete products : Europos standartas EN 13369:2004 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
35. STATYBOS TAISYKLĖS [ST 121895674.205.01.02:2012] Betono ir g/b surenkamų konstrukcijų montavimo darbai. Lietuvos statybininkų asociacija, 2012.
36. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1090-2:2018] Darbų, susijusių su plieninėmis ir aliumininėmis konstrukcijomis, atlikimas. 2 dalis. Techniniai reikalavimai, keliami plieninėms konstrukcijoms = Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures : Europos standartas EN 1090-2:2018 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021.

# Priedai

## 1 priedas. Pirmojo tyrimo objekto nuotraukų atlikimo ataskaita

ACQUISITION REPORT



### Project Summary

Project:	Gaiziunu tilto modelis
Number of photos:	900
Number of calibrated photos:	861 ( 96% )
Number of lost or disconnected photos:	39 ( 4% )
Positioning:	Adjustment constraints: control points and photo positioning metadata Rigid registration: none

### Warnings

⚠ Not all photos are connected.

You may try to improve the result by adding more photos or user tie points that overlap between the disconnected components or isolated photos below.

### Components

Component 1: 861 photos (861 kept in the final result)

*too many photos for preview*

Isolated: 39 photos (not kept in the final result)



A total of 39 photos are lost or disconnected and will not be used:



⚠ Low control point density. The maximum pixel distance to the control points (about 10200px) is above recommendation (10000px).

## 2 priedas. Pirmojo tyrimo objekto fotogrametrinio 3d modelio kūrimo kokybės ataskaita

### QUALITY REPORT



#### Contents

- [Project Summary](#)
- [Camera Calibration](#)
- [Photo Positions](#)
- [Photo Matching](#)
- [Surveys](#)
- [Control Points](#)

For more information, please see our online manual: <https://www.acute3d.com/QualityReportManual/en/v2.0/index.html>

#### Project Summary

Project:	Gaiziunu tilto modelis
Number of photos:	900
Ground coverage:	91864.4 square meters
Average ground resolution:	5.82508 mm/pixel
Scale:	1 : 17
Camera model(s):	Hasselblad L1D-20c
Processing date:	2021-09-06 08:35
Processing time:	21min 26s

#### Quality Overview



Dataset:	861 of 900 photos calibrated (96%)
Keypoints:	Median of 48016 keypoints per image
Tie points:	103519 points, with a median of 443 points per photo.
Reprojection error (RMS):	0.64 pixels
Positioning / scaling:	Georeferenced using control points and photo metadata

## Camera Calibration

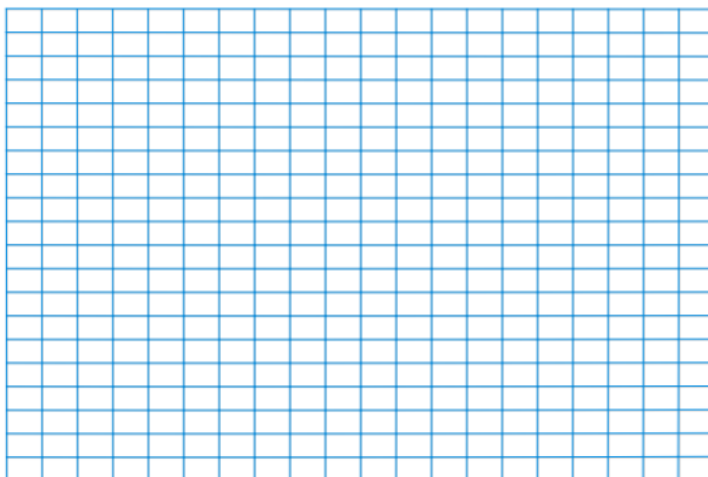
### Hasselblad L1D-20c 10.26mm 5472x3648

Name:	Hasselblad L1D-20c
Model type:	Perspective
Image dimensions:	5472x3648 pixels
Sensor size:	13.2 mm
Number of photos:	900

#### Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	10	27.2727	2713.77	1746.49	-0.0160525	0.0257427	-0.0280151	-0.00131033	0.000998429
Optimized Values	10.3876	28.3299	2717.28	1811.52	0.000988366	-0.010788	0.00824968	-0.00125757	-0.00116116
Difference Previous / Optimized	0.3876	1.0572	3.51	65.03	0.0170409	-0.0365307	0.0362648	5.276e-05	-0.00215959

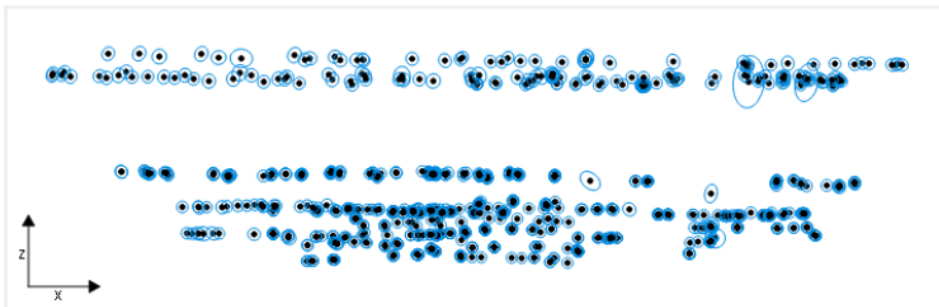
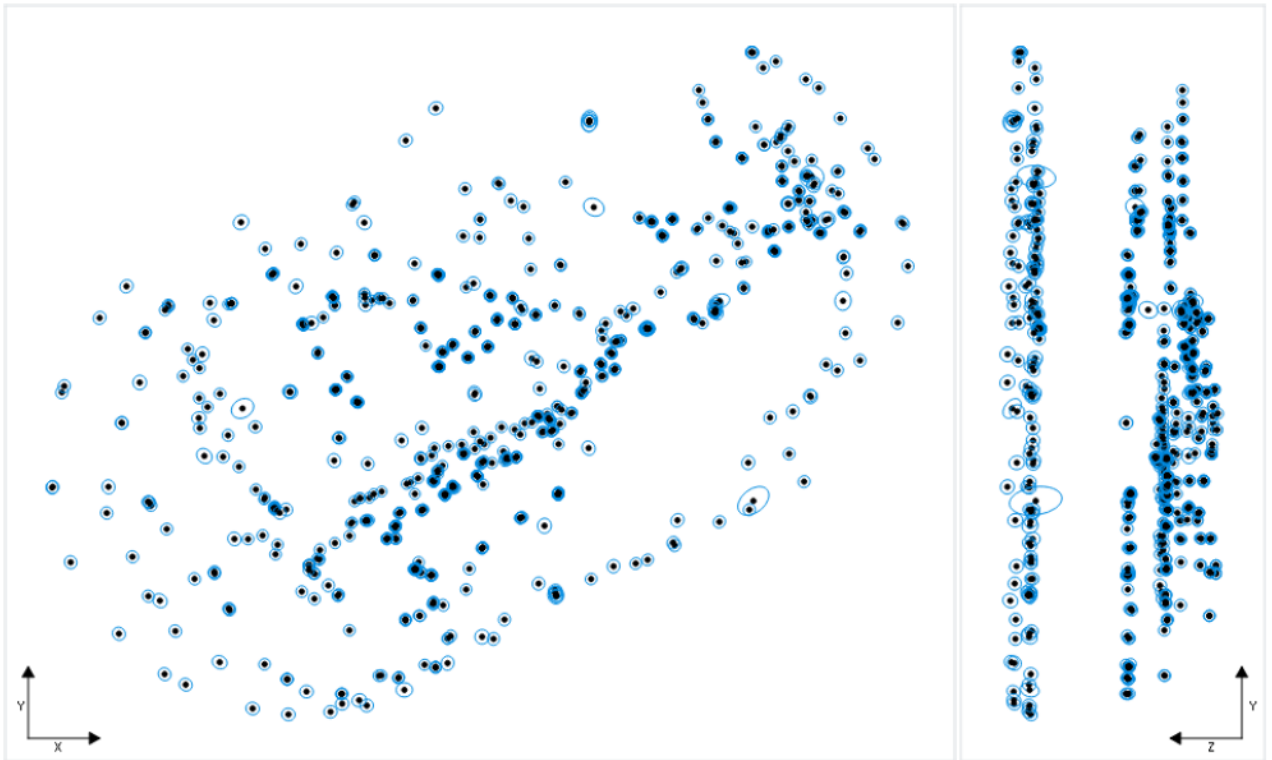
#### Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

## Photo Positions

### Photo Position Uncertainties

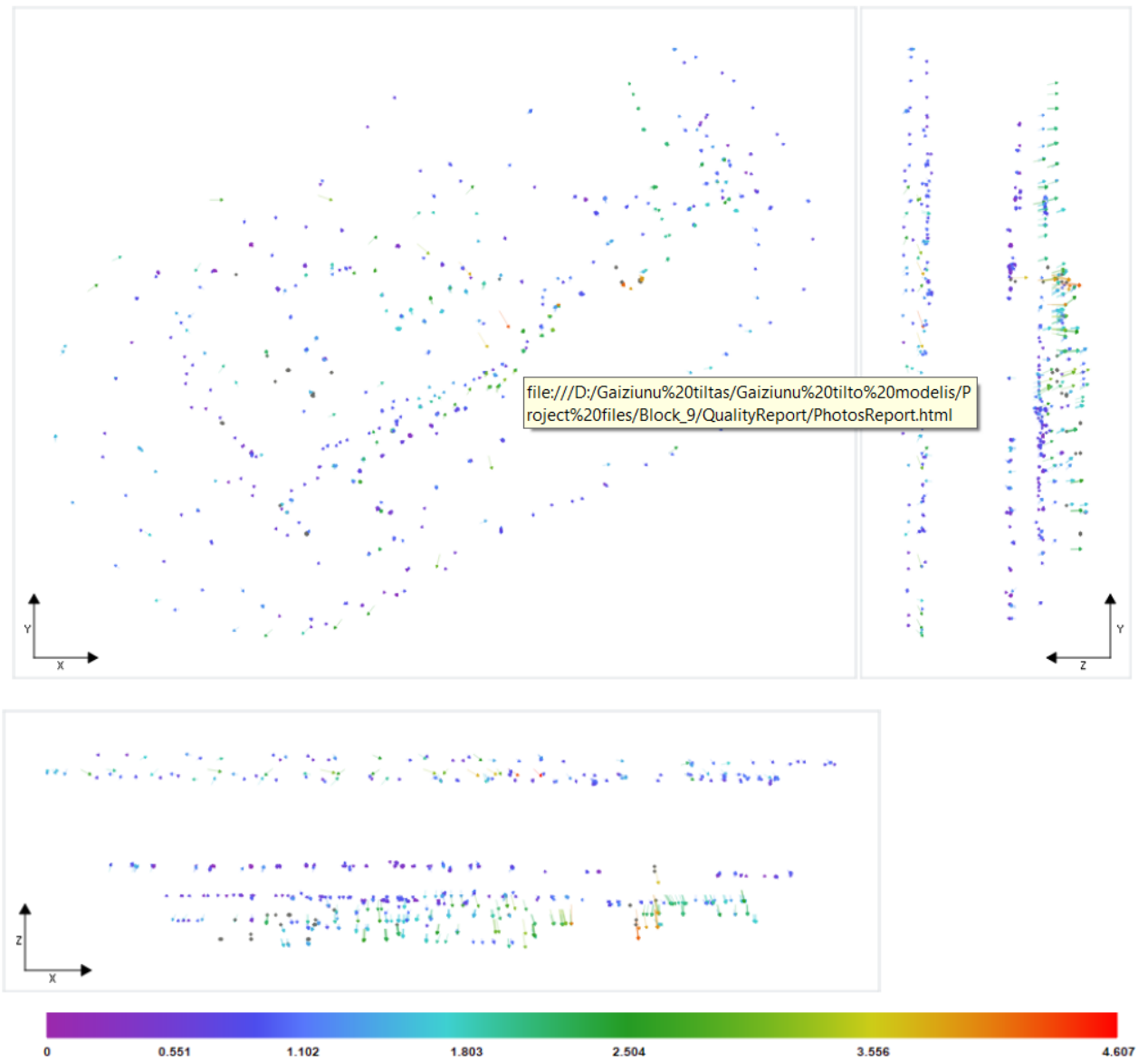


**Position Uncertainties:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) of computed photo positions (black dots). Blue ellipses indicate the position uncertainty, scaled for readability. The minimum and maximum values, as well as the average value, can be found in the table below.

Position Uncertainties			
	X [meters]	Y [meters]	Z [meters]
Minimum	0.00023	0.00019	0.0002
Mean	0.00138	0.00141	0.0016
Maximum	0.02726	0.02419	0.05496

For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

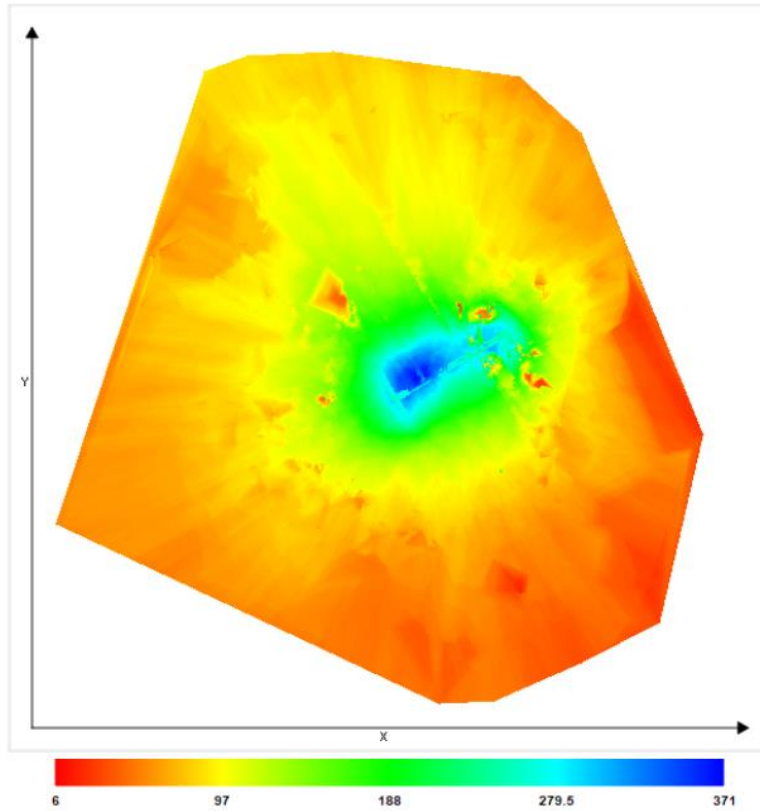
## Distance to Input Positions



**Position Distance to Metadata:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane), with arrows indicating the offset between the metadata positions and the computed photo positions; all arrows start from the metadata positions and point toward the computed positions. Gray points ◉ indicate uncalibrated photos that have metadata. Pink points ● indicate calibrated photos that have no metadata. The values are in meters, with a minimum distance of 0.06628 meters and a maximum of 4.57072 meters. The median position distance equals 1.10244 meters.



## Scene Coverage



Number of photos seeing the scene: Top view (XY plane) display of the scene, with colors indicating the *number of photos* that potentially see each area.

## Photo Matching

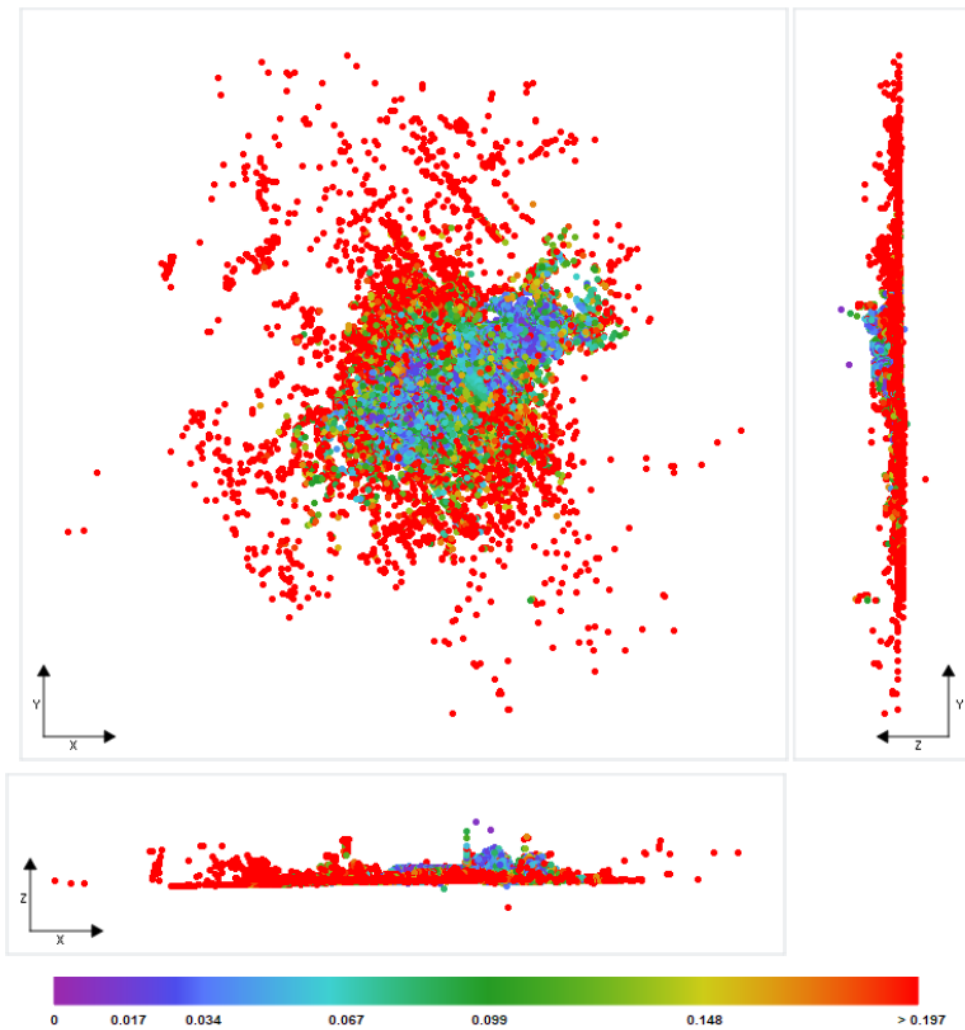
### Quality Measures on Tie Points

Generated Tie Points					
Number of Points	Median Number of Photos per Point	Median Number of Points per Photo	Median Reprojection Error [pixels]	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]

103519	4	443	0.44	0.64	0.0326
--------	---	-----	------	------	--------

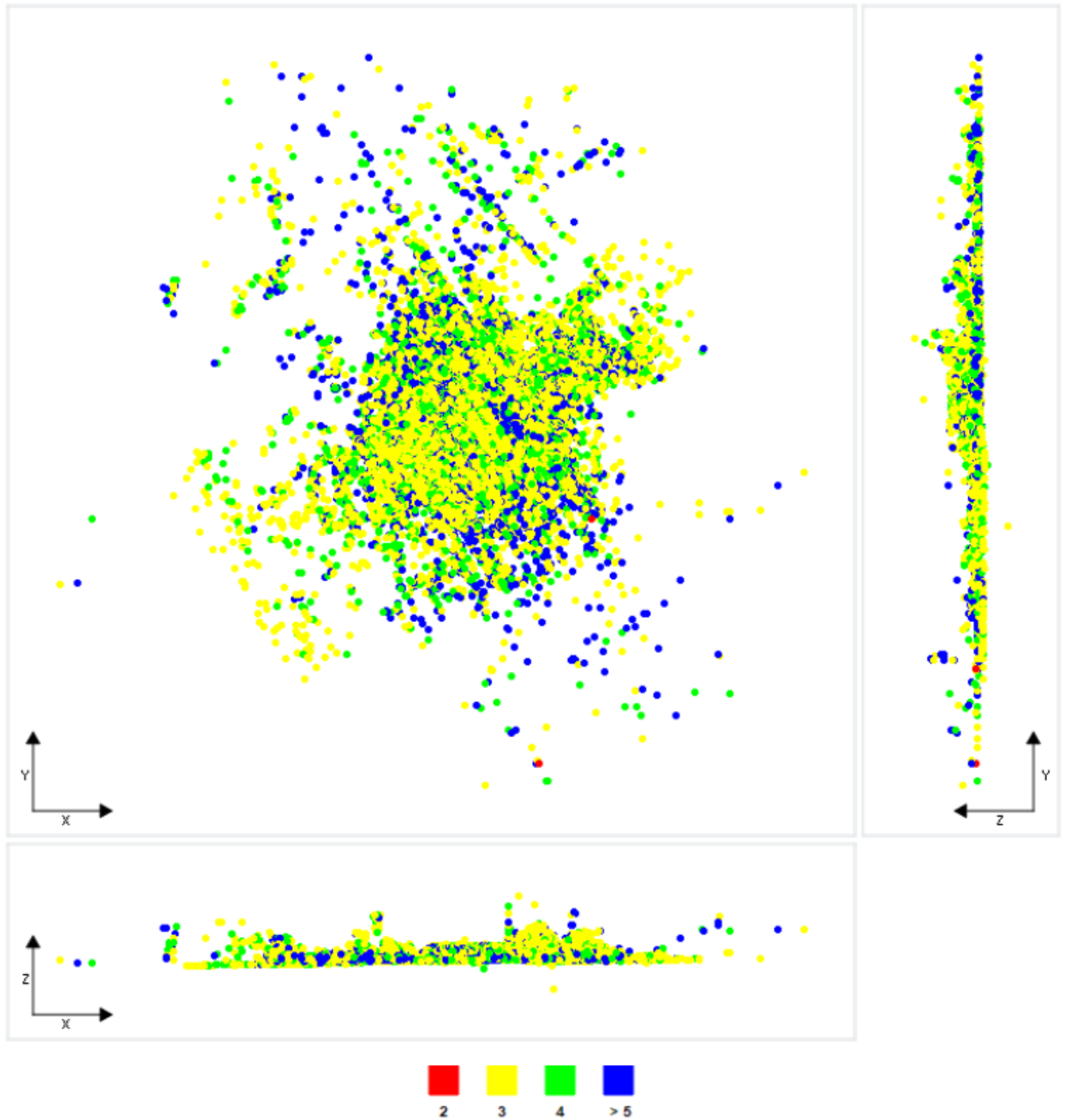
For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

#### Tie Point Position Uncertainties



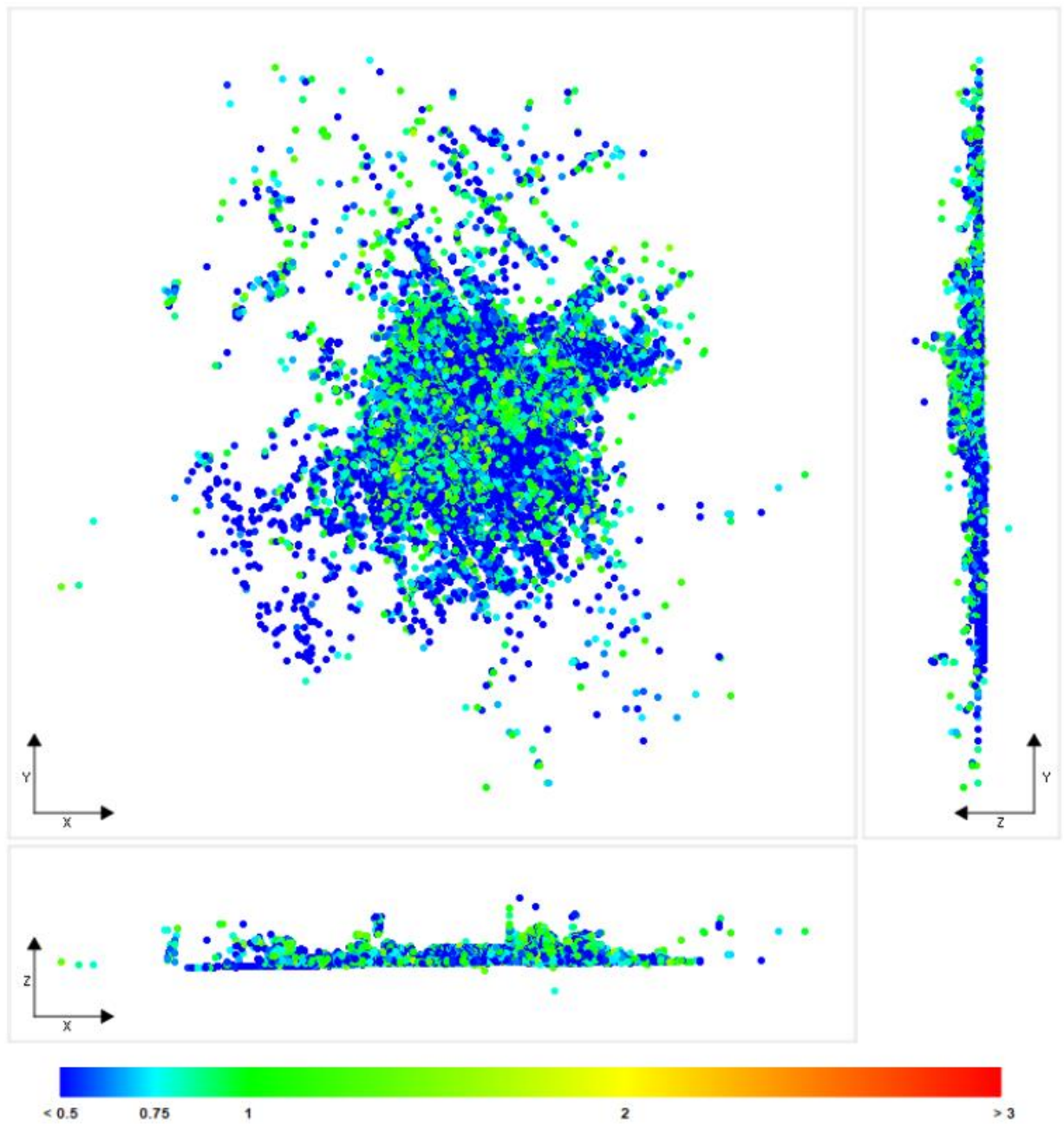
**Position Uncertainties:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing uncertainty in the individual point position. The values are in meters, with a minimum uncertainty of 0.00089 meters and a maximum of 57.84585 meters. The median position uncertainty equals 0.034 meters.

#### Number of Photos Observing the Tie Points



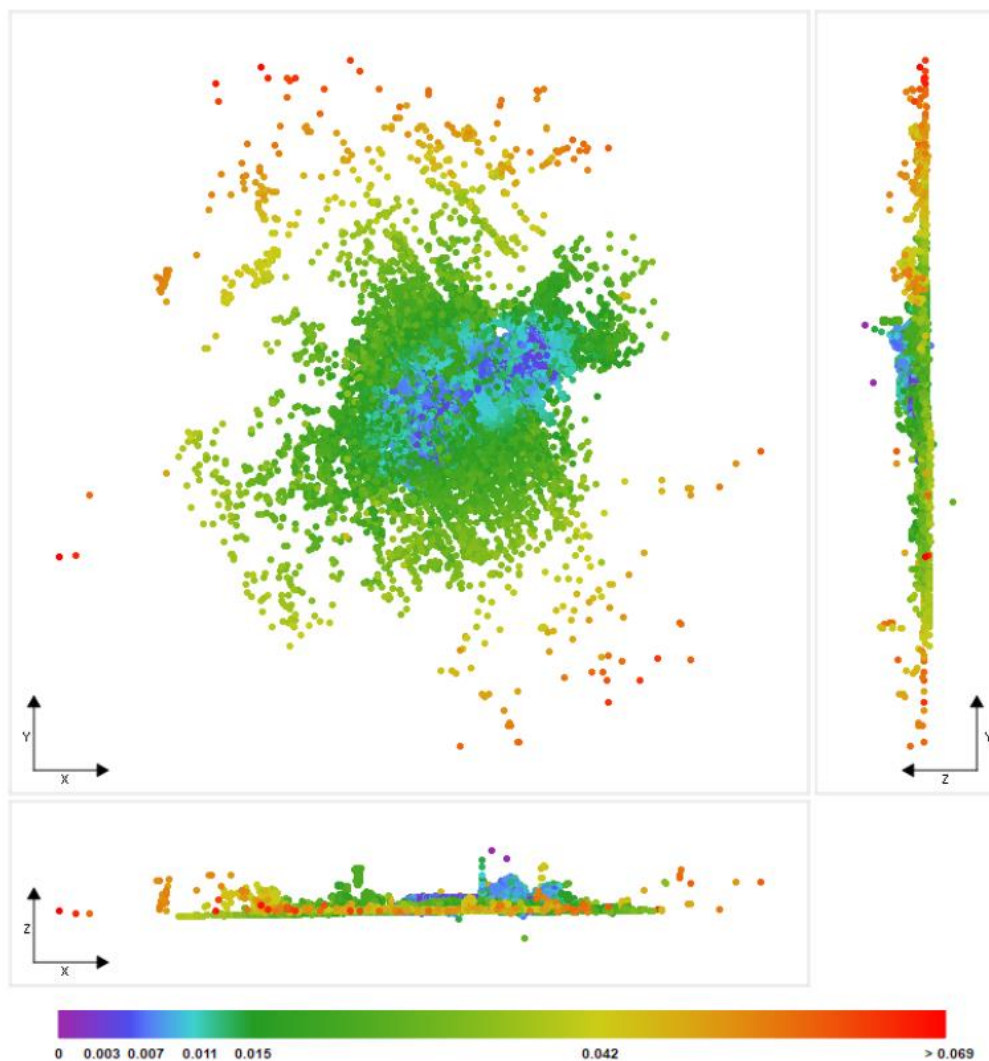
**Number of Observations per Tie Point:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the number of photos that have been used to define each point. The minimum number of photos per tie point is 2, and the maximum is 48. The average number of photos observing a tie point is 4.

Reprojection Error



Reprojection Errors per Tie Point: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the reprojection error in pixels. The minimum reprojection error is 0.01 pixels and the maximum is 1.92 pixels. The average reprojection error is 0.58 pixels.

#### Tie Point Resolution



Resolution: Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing resolution in the individual point position. The values are in meters/pixel, with a minimum resolution of 0.00043 meters/pixel and a maximum of 0.06882 meters/pixel. The median resolution equals 0.0068 meters/pixel.

## Surveys

Number of control points: 8. No control point is used as check point.

Number of user tie points: 0

Number of positioning constraints: 0

## Control Points

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
8	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	923.18	17.68057	20.8295	X: 0.18986; Y: 0.67174	20.8178	⚠
1	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	927.68	14.9405	20.39239	X: 0.53417; Y: 0.80479	20.3695	⚠
6	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	2453.2	17.24589	20.80526	X: 0.28569; Y: 0.82317	20.78701	⚠
2	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	1082.8	17.79795	21.15163	X: -0.02684; Y: 0.81385	21.13595	⚠

3	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	896.93	14.93022	21.14476	X: -0.0484; Y: 0.62843	21.13536	⚠
4	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	1264.69	14.89203	21.15657	X: -0.049; Y: 0.58168	21.14851	⚠
5	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	895.14	18.34648	21.31238	X: -0.15445; Y: 0.5645	21.30434	⚠
7	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.01	5 (5 marked photos)	864.09	18.95308	21.29617	X: -0.27352; Y: 0.82554	21.27841	⚠
Global RMS				1267.64	16.92079	21.01313	X: 0.25178; Y: 0.72218	20.99921	
Median				927.68	17.68057	21.15163	X: -0.02684; Y: 0.80479	21.13595	

No data are available

Horizontal and vertical errors are given according to each control point respective spatial reference system

### 3 Priedas. Antrojo tyrimo objekto nuotraukų atlikimo ataskaita

ACQUISITION REPORT



#### Project Summary

Project:	Jonavos geležinkelio tiltasa
Number of photos:	1179
Number of calibrated photos:	1138 ( 97% )
Number of lost or disconnected photos:	41 ( 3% )
Positioning:	Adjustment constraints: control points Rigid registration: none

#### Warnings

⚠ **Not all photos are connected.**  
You may try to improve the result by adding more photos or user tie points that overlap between the disconnected components or isolated photos below.

#### Components

Component 1: 1138 photos (1138 kept in the final result)

*too many photos for preview*

Isolated: 41 photos (not kept in the final result)





A total of 41 photos are lost or disconnected and will not be used:



⚠ Some groups of photos are weakly connected. Coverage may be insufficient between these groups.

1 photo is detected as articulation node (connection weaknesses) :



DJL\_0352.JPG

## 4 priedas. Antrojo tyrimo objekto fotogrametrinio 3d modelio kūrimo kokybės ataskaita

### QUALITY REPORT



#### Contents

- [Project Summary](#)
- [Camera Calibration](#)
- [Photo Positions](#)
- [Photo Matching](#)
- [Surveys](#)
- [Control Points](#)

For more information, please see our online manual: <https://www.acute3d.com/QualityReportManual/en/v2.0/index.html> 

### Project Summary

Project:	Jonavos gelezinkelio tiltasa
Number of photos:	1179
Ground coverage:	361230.45 square meters
Average ground resolution:	11.7907 mm/pixel
Scale:	1 : 35
Camera model(s):	Hasselblad L1D-20c
Processing date:	2021-10-20 12:07
Processing time:	25min 59s

### Quality Overview

Dataset:	1138 of 1179 photos calibrated (97%)
Keypoints:	Median of 24473 keypoints per image
Tie points:	114590 points, with a median of 468 points per photo.
Reprojection error (RMS):	0.67 pixels
Positioning / scaling:	Georeferenced using control points

### Camera Calibration

#### Hasselblad L1D-20c 10.26mm 5472x3648

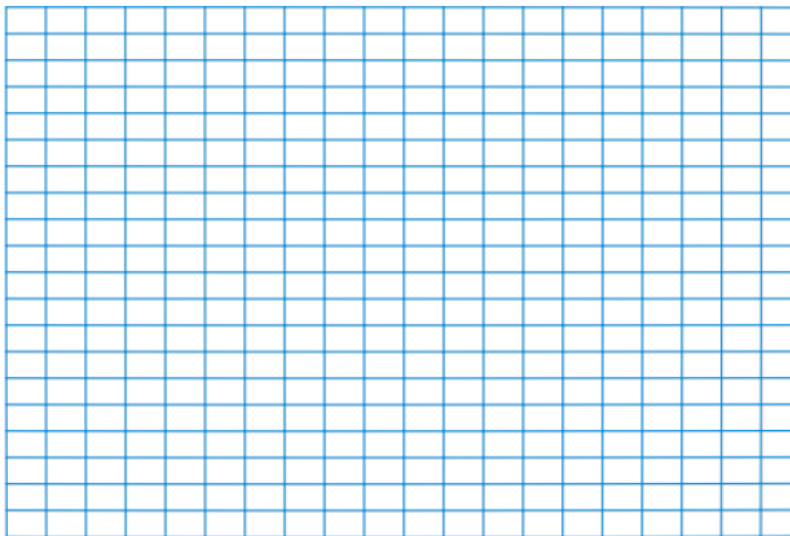
Name:	Hasselblad L1D-20c
Model type:	Perspective
Image dimensions:	5472x3648 pixels
Sensor size:	13.2 mm
Number of photos:	687

#### Calibration Results

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	10.391	28.339	2720.27	1817.49	-0.00530686	0.0041627	-0.00787027	-0.000877805	-0.000865624
Optimized Values	10.3927	28.3438	2720.66	1815.05	-0.00543804	0.00750097	-0.0135998	-0.000903983	-0.00103944
Difference Previous / Optimized	0.0017	0.0048	0.39	-2.44	-0.00013118	0.00333827	-0.00572953	-2.6178e-05	-0.000173816

#### Distortion Grid



Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

#### Hasselblad L1D-20c 10.26mm 5472x3648

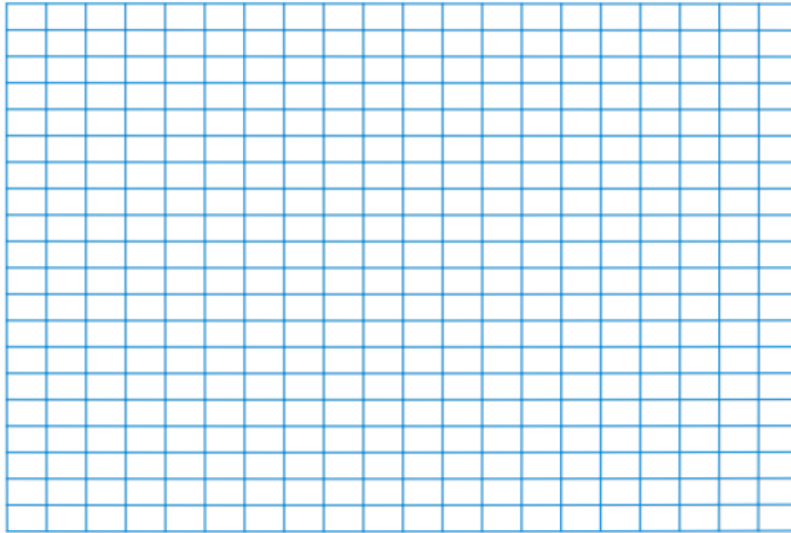
Name:	Hasselblad L1D-20c
Model type:	Perspective
Image dimensions:	5472x3648 pixels
Sensor size:	13.2 mm
Number of photos:	492

#### Calibration Results

	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	10.3915	28.3404	2718.79	1817.32	-0.00459099	0.0025561	-0.00561964	-0.00100048	-0.000932762
Optimized	10.3954	28.3511	2719.05	1815.50	-0.00453716	0.00404446	-0.0073985	-0.00103038	-0.00110713

Values									
Difference Previous / Optimized	0.0039	0.0107	0.26	-1.82	5.383e-05	0.00148836	-0.00177886	-2.99e-05	-0.000174368

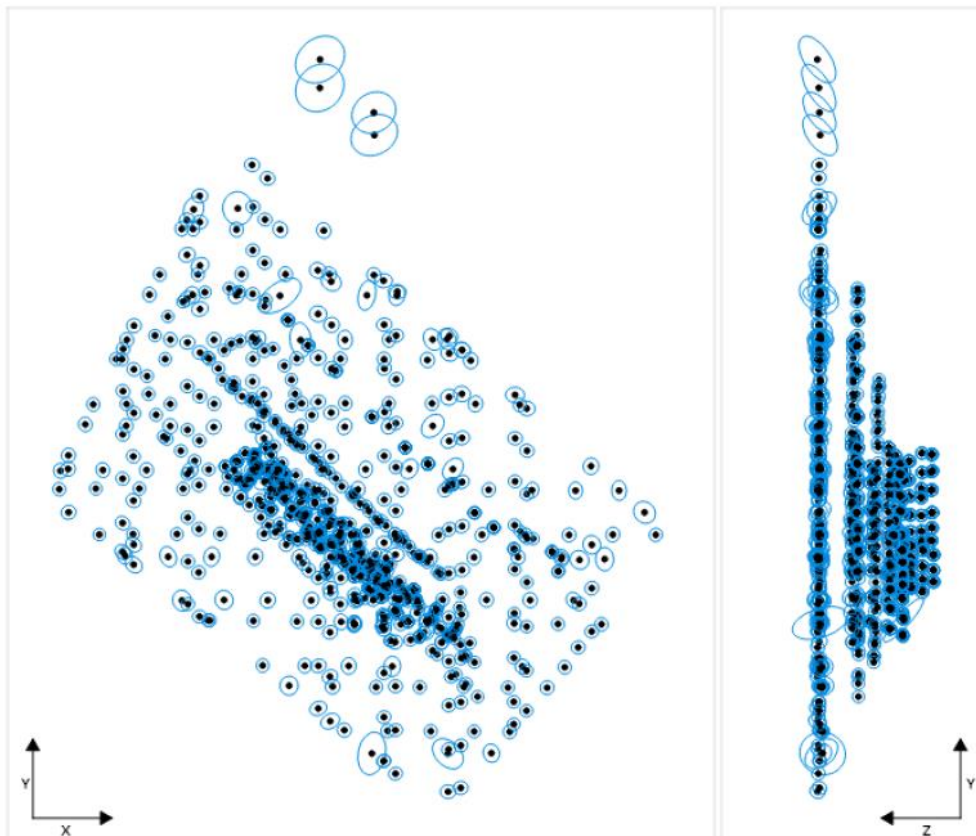
### Distortion Grid

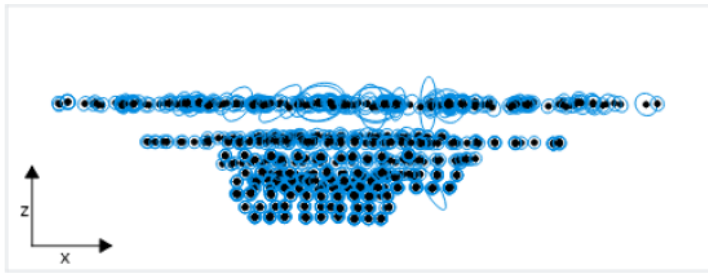


Camera Lens Distortion: Gray lines represent the zero distortion grid, and blue lines represent the real camera values.

### Photo Positions

#### Photo Position Uncertainties





**Position Uncertainties:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) of computed photo positions (black dots). Blue ellipses indicate the position uncertainty, scaled for readability. The minimum and maximum values, as well as the average value, can be found in the table below.

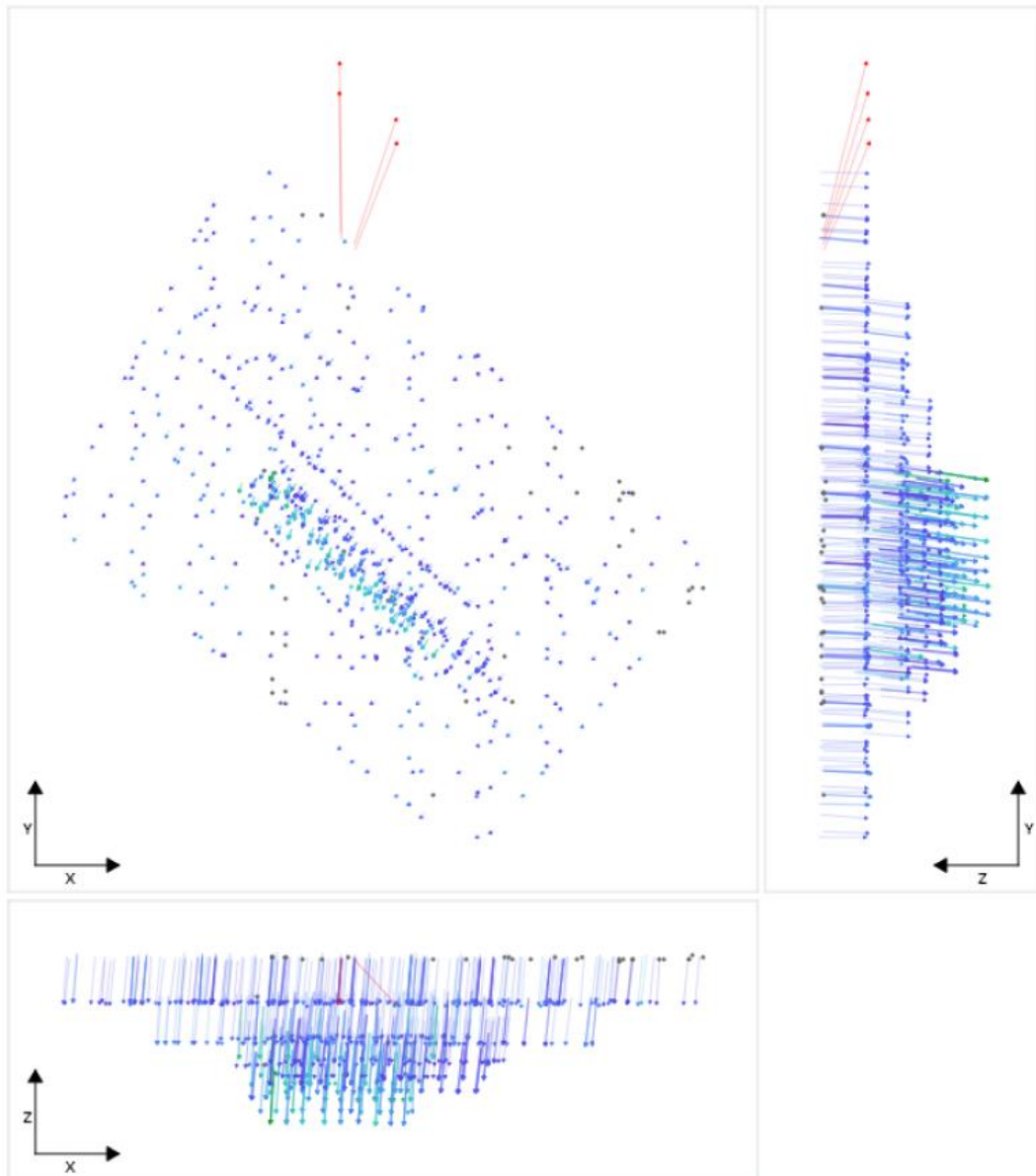
Position Uncertainties			
	X [meters]	Y [meters]	Z [meters]
Minimum	0.0004	0.00039	0.00047
Mean	0.00422	0.00444	0.00484
Maximum	0.11156	0.10761	0.13037

For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

#### Distance to Input Positions

---



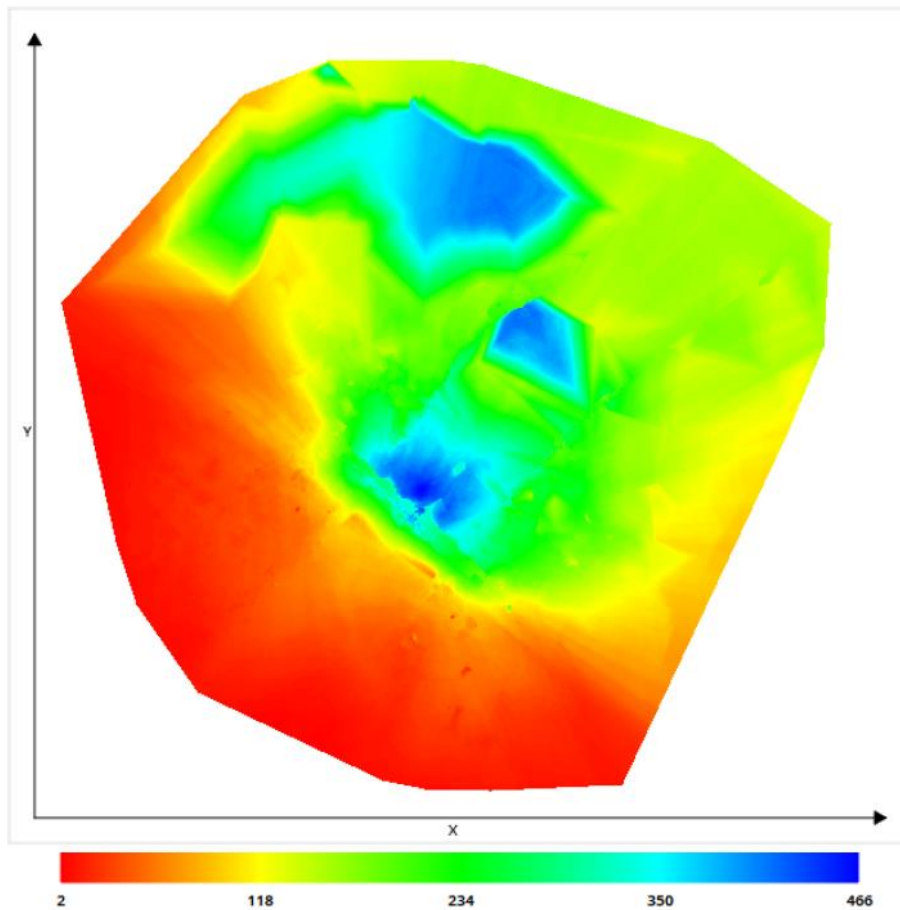


**Position Distance to Metadata:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane), with arrows indicating the offset between the metadata positions and the computed photo positions; all arrows start from the metadata positions and point toward the computed positions. Gray points • indicate uncalibrated photos that have metadata. Pink points • indicate calibrated photos that have no metadata. The values are in meters, with a minimum distance of 20.55761 meters and a maximum of 84.32492 meters. The median position distance equals 22.94887 meters.

### Scene Coverage

---





Number of photos seeing the scene: Top view (XY plane) display of the scene, with colors indicating the *number of photos* that potentially see each area.

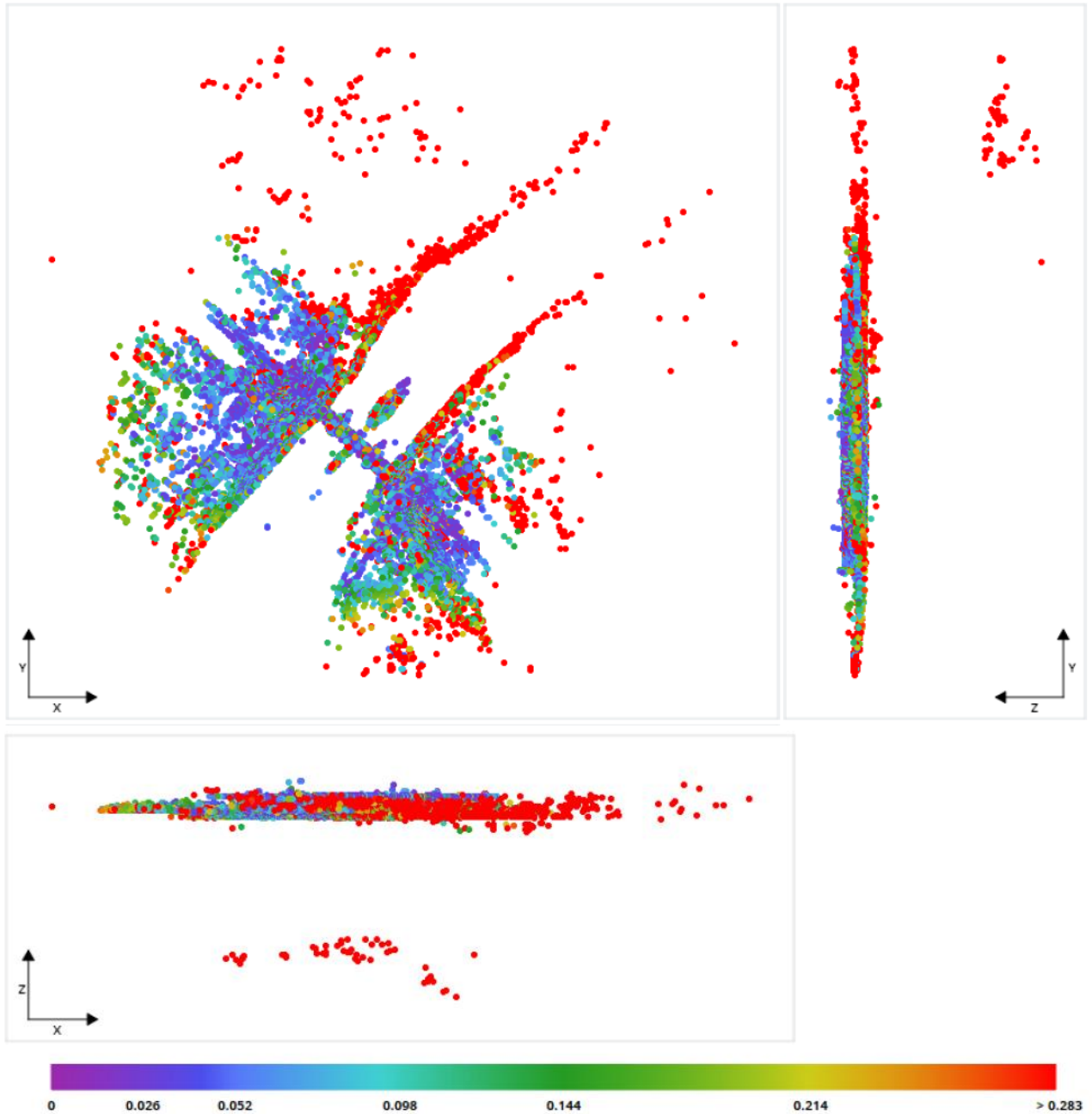
## Photo Matching

### Quality Measures on Tie Points

Generated Tie Points						
	Number of Points	Median Number of Photos per Point	Median Number of Points per Photo	Median Reprojection Error [pixels]	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]
Previous Values	120044	4	472	0.41	0.63	0.03509
Processed Values	114590	4	468	0.45	0.67	0.0381

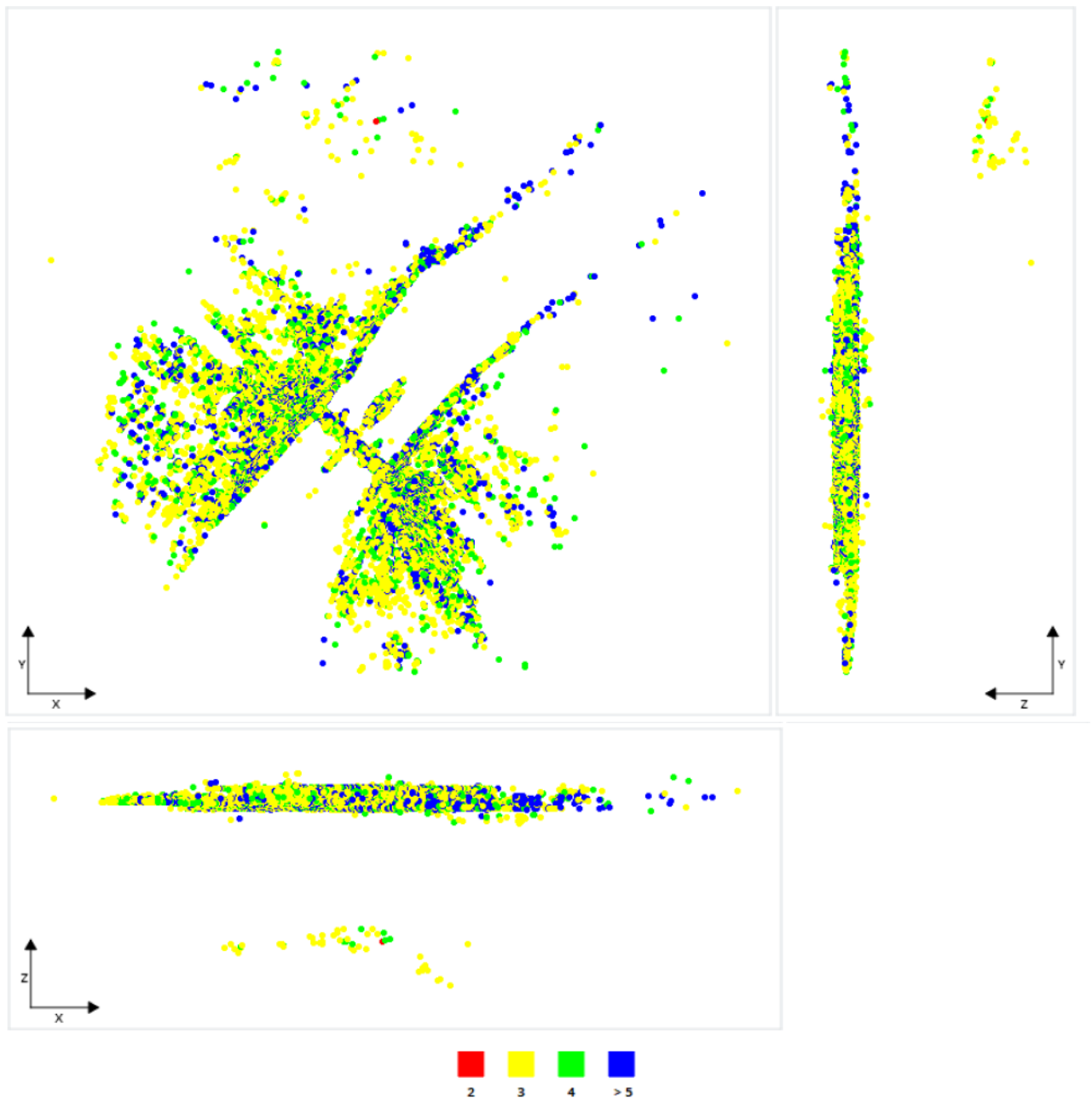
For more information on individual photos, please refer to the [Photos Report](#).

### Tie Point Position Uncertainties



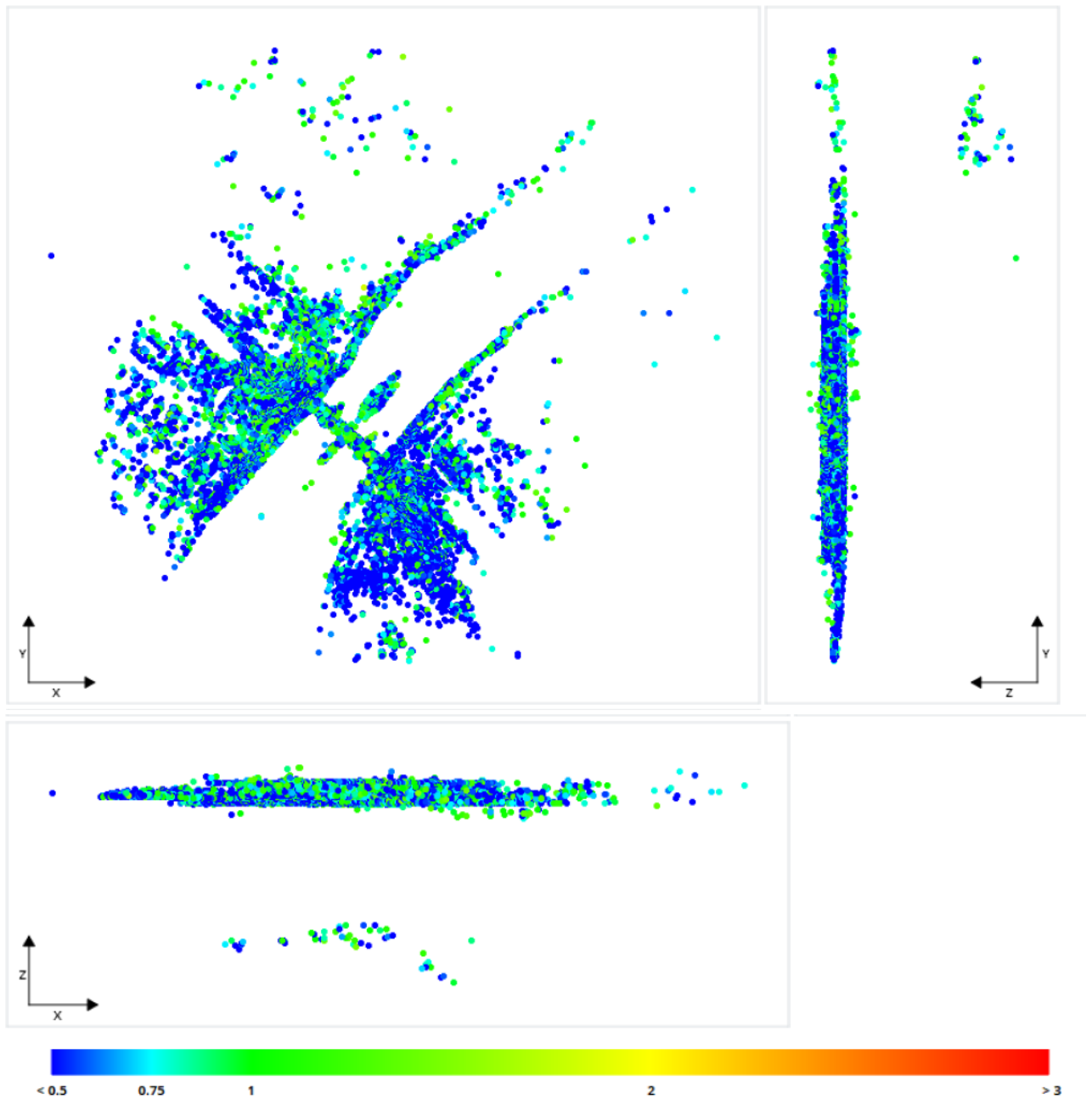
**Position Uncertainties:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing uncertainty in the individual point position. The values are in meters, with a minimum uncertainty of 0.00117 meters and a maximum of 8.95228 meters. The median position uncertainty equals 0.05185 meters.

#### Number of Photos Observing the Tie Points



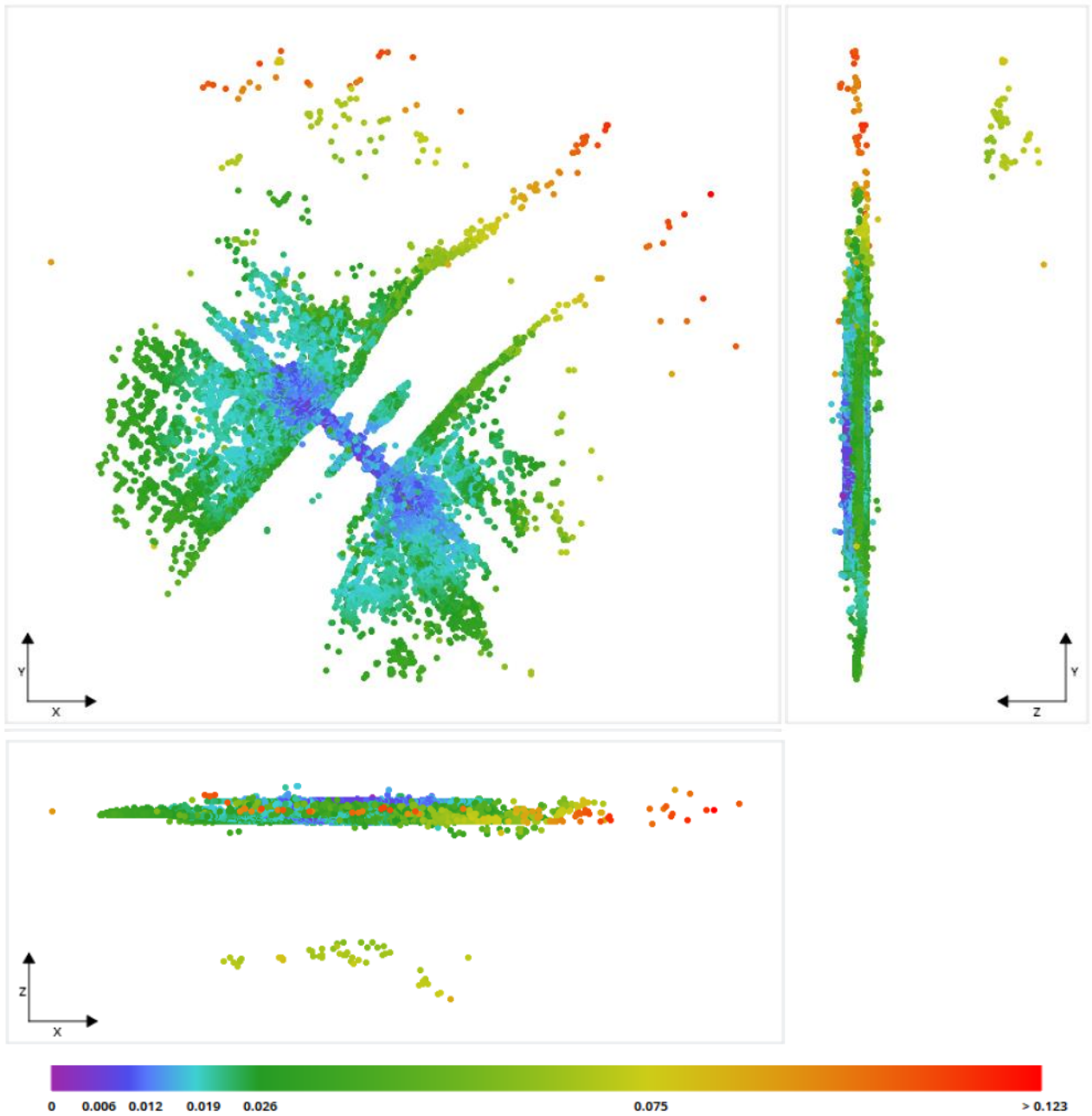
**Number of Observations per Tie Point:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the number of photos that have been used to define each point. The minimum number of photos per tie point is 2 and the maximum is 86. The average number of photos observing a tie point is 5.

#### Reprojection Error



**Reprojection Errors per Tie Point:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing the reprojection error in pixels. The minimum reprojection error is 0.01 pixels and the maximum is 1.91 pixels. The average reprojection error is 0.60 pixels.

**Tie Point Resolution**



**Resolution:** Top view (XY plane), side view (ZY plane) and front view (XZ plane) displays of all tie points, with colors representing resolution in the individual point position. The values are in meters/pixel, with a minimum resolution of 0.00032 meters/pixel and a maximum of 0.12318 meters/pixel. The median resolution equals 0.01174 meters/pixel.

## Surveys

Number of control points: 7. No control point is used as check point.

Number of user tie points: 0

Number of positioning constraints: 0

## Control Points

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy	Number of	RMS of	RMS of	3D Error	Horizontal	Vertical	

		[meters]	Calibrated Photos	Reprojection Error [pixels]	Distances to Rays [meters]	[meters]	Error [meters]	Error [meters]	
Point 6	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	25 (25 marked photos)	1.17	0.0376	0.02293	X: -0.01196; Y: -0.00081	-0.01955	⚠
Point 4	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	23 (23 marked photos)	2.96	0.08231	0.06574	X: -0.01077; Y: -0.06465	0.00507	⚠
Point 2	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	28 (28 marked photos)	4.10	0.10652	0.09912	X: -0.07805; Y: -0.04344	0.04295	⚠
Point 3	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	72 (72 marked photos)	293.09	4.30811	0.43511	X: 0.28593; Y: 0.31095	-0.10425	⚠
Point 1	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	19 (19 marked photos)	2.93	0.07446	0.05991	X: -0.03071; Y: -0.05127	-0.00418	⚠
Point 5	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	32 (32 marked photos)	1.53	0.06221	0.02832	X: -0.02807; Y: 0.00302	0.00218	⚠
Point 7	3D	Horizontal: 0.01; Vertical: 0.010	41 (41 marked photos)	0.87	0.02532	0.01187	X: -0.00703; Y: -0.00356	0.00888	✅
Global RMS				110.8	1.62961	0.17259	X: 0.11332; Y: 0.12271	0.04346	
Median				2.93	0.07446	0.05991	X: -0.01196; Y: -0.00356	0.00218	

No data are available

Horizontal and vertical errors are given according to each control point respective spatial reference system