



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

## 3D MODEL VYBRANÉHO OBJEKTU

3D MODEL OF THE SELECTED OBJECT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Raclavský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KALVODA, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Studijní program</b>        | N3646 Geodézie a kartografie                                      |
| <b>Typ studijního programu</b> | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| <b>Studijní obor</b>           | 3646R003 Geodézie a kartografie (N)                               |
| <b>Pracoviště</b>              | Ústav geodézie  |

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| <b>Student</b>         | Bc. David Raclavský        |
| <b>Název</b>           | 3D model vybraného objektu |
| <b>Vedoucí práce</b>   | Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.   |
| <b>Datum zadání</b>    | 30. 11. 2019               |
| <b>Datum odevzdání</b> | 22. 5. 2020                |

V Brně dne 30. 11. 2019

---

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Hanzl, V.: Fotogrammetrie, Modul 01, Teoretické základy fotogrammetrie, Fakulta stavební VUT v Brně, 2007

PAVELKA, Karel, 2009. Fotogrammetrie 1. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04249-6.

PAVELKA, Karel, 2011. Fotogrammetrie 2. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04719-4.

PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ, 2008. Fotogrammetrie 3: digitální metody a laserové skenování. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-03978-6.

LUHMANN, T., Stuart ROBSON, Stephen KYLE a Jan BOEHM, [2014]. Close-range photogrammetry and 3D imaging. 2nd edition. Berlin: De Gruyter. ISBN 978-3-11-030278-3.

ČSN 01 3410. Mapy velkých měřítek: Základní a účelové mapy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 14 s.

Dokumentace k použitému software.

Odborné články v národních i zahraničních časopisech.

VÚGTK. Odborný slovník. Vugtk.cz [online]. © 2005-2012 [cit. 2012-1-16]. Dostupné

z: <http://www.vugtk.cz/slovník/>

Citační manažer Citace PRO dostupný z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Vypracujte rešerši metod tvorby 3D modelů objektů včetně softwarů pro vyhodnocení. Pořídte fotogrammetrické snímky tak, aby bylo umožněno automatické zpracování. Vyhotoďte georeferencovaný 3D model. Přesnost výsledného modelu otestujte dle ČSN 013410 na základě kontrolního zaměření reprezentativního výběru bodů. Vyhotoďte vhodné prezentace výsledných modelů.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Výsledkem diplomové práce georeferencovaný 3D model objektu s přilehlým okolím, nacházející se v areálu AdMaS. Práce podrobně popisuje všechny etapy tvorby 3D modelu objektu od výběru a kalibrace kamery až po editování 3D modelu. Zabývá se také softwary a metodami pro vyhodnocení 3D modelů. Práce navíc pojednává o optimálním nastavení parametrů programu ContextCapture. Přesnost výsledného 3D modelu je otestována s využitím metodiky dle ČSN 013410 na základě kontrolního měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

letecká fotogrammetrie, pozemní fotogrammetrie, 3D model objektu, editace 3D modelu, kalibrace kamery, testování přesnosti 3D modelu, ContextCapture, Photomodeler

## **ABSTRACT**

The result of the diploma thesis is a georeferenced 3D model of an object with its environment, located in the AdMaS complex. The work describes in detail all phases of creating a 3D model of the object from the selection and calibration of the camera to editing the 3D model. Discuss about software and methods for evaluating 3D models. The thesis deals with the optimal setting of ContextCapture software. The accuracy of the resulting 3D model is tested by the methodology according to ČSN 013410 on the basis of control measurements.

## **KEYWORDS**

aerial photogrammetry, ground photogrammetry, 3D object model, 3D model editing, camera calibration, 3D model accuracy testing, ContextCapture, Photomodeler

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. David Raclavský *3D model vybraného objektu*. Brno, 2020. 90 s., 20 s. příl.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.  
Vedoucí práce Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *3D model vybraného objektu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

---

Bc. David Raclavský  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *3D model vybraného objektu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

---

Bc. David Raclavský  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Kalvodovi, Ph.D. za rady, které mi během vyhotovování práce sdělil. Také chci poděkovat Bc. Lukáši Foglovi, Bc. Štěpánu Soukupovi a Bc. Janě Otrusinové za pomoc při měření. Dále děkuji všem zúčastněným na projektech „FAST-S-19-5704 Geometrická přesnost mobilních mapovacích systémů“ a „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ za poskytnutí dat, které sloužily jako podklady pro diplomovou práci.

# Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod .....   | 12 |
| 2     | Popis lokality Admas .....                         | 13 |
| 3     | Teoretický základ .....                            | 14 |
| 3.1   | Terminologie.....                                  | 14 |
| 3.1.1 | Prvky vnitřní orientace.....                       | 14 |
| 3.1.2 | Prvky vnější orientace.....                        | 14 |
| 3.1.3 | Absolutní orientace .....                          | 14 |
| 3.1.4 | Relativní orientace .....                          | 14 |
| 3.1.5 | Termíny využívané v oblasti letectví.....          | 15 |
| 3.1.6 | Polygonová síť (mesh).....                         | 15 |
| 3.1.7 | TIN (Triangular irregular networks).....           | 15 |
| 3.2   | Centrální projekce v prostoru .....                | 16 |
| 3.3   | Aerotriangulace.....                               | 17 |
| 3.3.1 | Přídavné parametry.....                            | 18 |
| 3.3.2 | Orientace snímače.....                             | 18 |
| 3.4   | Optické vady .....                                 | 18 |
| 3.4.1 | Dělení optických vad .....                         | 19 |
| 3.4.2 | Distorze objektivu.....                            | 19 |
| 3.5   | Obrazová korelace.....                             | 20 |
| 3.5.1 | Subpixelová korelace.....                          | 20 |
| 3.5.2 | Automatické vyhledávání bodů.....                  | 20 |
| 3.6   | Blízká fotogrammetrie.....                         | 21 |
| 3.6.1 | Přesnost blízké fotogrammetrie.....                | 21 |
| 3.6.2 | Digitální kamery v blízké fotogrammetrii .....     | 22 |
| 3.6.3 | Typy snímačů .....                                 | 23 |
| 3.6.4 | Objektivy.....                                     | 23 |
| 3.7   | Fotogrammetrie pomocí UAS.....                     | 24 |
| 3.7.1 | Vývoj UAS.....                                     | 24 |
| 3.7.2 | Legislativní omezení bezpilotních prostředků. .... | 24 |



|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.7.3  | Využití UAS ve fotogrammetrii .....                                | 24 |
| 3.7.4  | Výhody a nevýhody UAS využívaných pro fotogrammetrii .....         | 25 |
| 3.8    | Další metody získávání prostorových dat.....                       | 26 |
| 3.8.1  | Tachymetrie.....   | 26 |
| 3.8.2  | Laserové skenování .....   | 26 |
| 3.9    | Nejpoužívanější fotogrammetrické softwary.....                     | 27 |
| 3.9.1  | Photomodeler.....  | 27 |
| 3.9.2  | Pix4D .....  | 27 |
| 3.9.3  | Agisoft Metashape .....  | 28 |
| 3.9.4  | ContextCapture.....  | 28 |
| 3.10   | Typy modelů objektů.....   | 29 |
| 3.10.1 | Typ dimenze.....   | 29 |
| 3.10.2 | Nejpoužívanější typy modelů z hlediska dimenze .....               | 29 |
| 3.11   | Obecný popis práce v programu ContextCapture Master .....          | 30 |
| 3.12   | Vybrané výstupní formáty programu ContextCapture.....              | 34 |
| 4      | Výběr a kalibrace kamery .....                                     | 35 |
| 4.1    | Popis kamery a objektivu .....                                     | 35 |
| 4.2    | Kalibrace a testování kamery.....                                  | 37 |
| 4.2.1  | Důvod kalibrace a testování .....                                  | 37 |
| 4.2.2  | Kalibrace pomocí prostorového kalibračního pole v učebně B150..... | 38 |
| 4.2.3  | Kalibrace pomocí kalibrační desky .....                            | 43 |
| 4.2.4  | Vyhodnocení kalibrace .....  | 44 |
| 4.3    | Přepočet parametrů kamery do programu ContextCapture .....         | 45 |
| 4.3.1  | Přepočet souřadnic hlavního bodu snímku .....                      | 45 |
| 4.3.2  | Ověření shodnosti jednotek přídatných parametrů.....               | 46 |
| 4.3.3  | Závěr a navržené řešení .....                                      | 47 |
| 5      | Geodetické práce .....   | 47 |
| 5.1    | Tvorba měřické sítě.....   | 48 |
| 5.2    | Umístění vlíčovacích bodů .....                                    | 49 |
| 5.3    | Podrobné měření .....  | 50 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.4   | Zaměření kontrolních bodů.....                                | 51 |
| 5.4.1 | Kódování bodů .....   | 51 |
| 5.5   | Výpočetní práce .....   | 52 |
| 5.6   | Použité přístroje a pomůcky .....                             | 52 |
| 6     | Fotogrammetrické práce .....                                  | 54 |
| 6.1   | Přípravné práce pozemního snímkování .....                    | 54 |
| 6.2   | Pozemní snímkování .....                                      | 57 |
| 6.3   | Snímkování pomocí UAS.....                                    | 58 |
| 6.3.1 | Přípravné práce.....  | 58 |
| 6.3.2 | Použitý UAS.....  | 58 |
| 6.3.3 | Snímkování .....  | 59 |
| 7     | Vyhodnocení snímků a tvorba modelu .....                      | 60 |
| 7.1   | Editace snímků.....   | 60 |
| 7.1.1 | Radiometrické korekce snímků .....                            | 60 |
| 7.1.2 | Výsledky editace .....  | 61 |
| 7.1.3 | Zhodnocení editace.....                                       | 63 |
| 7.2   | Tvorba 3D modelu v programu ContextCapture .....              | 63 |
| 7.2.1 | Orientace snímků.....   | 63 |
| 7.2.2 | Protokol kvality aerotriangulace (Quality Report) .....       | 64 |
| 7.2.3 | Tvorba modelu .....   | 66 |
| 7.3   | Editace modelu.....   | 67 |
| 7.3.1 | Výběr softwaru pro editaci.....                               | 68 |
| 7.3.2 | Postup editace.....   | 68 |
| 7.4   | Výstupy.....  | 72 |
| 8     | Testování přesnosti .....                                     | 73 |
| 8.1   | Testování přesnosti 3D modelu budovy H a blízkého okolí ..... | 73 |
| 8.1.1 | Předmět testování .....                                       | 73 |
| 8.1.2 | Měření modelových souřadnic v programu Cloud Compare .....    | 73 |
| 8.1.3 | Testování přesnosti .....                                     | 74 |
| 9     | Závěr .....   | 78 |

|    |                                  |    |
|----|----------------------------------|----|
| 10 | Seznam použité literatury.....   | 79 |
| 11 | Seznam použitých zkratk .....84  | 84 |
| 12 | Seznam použitých obrázků .....85 | 85 |
| 13 | Seznam použitých tabulek .....87 | 87 |
| 14 | Seznam příloh.....88             | 88 |

# 1 Úvod

Cílem diplomové práce je vyhotovit georeferencovaný 3D model objektu. Přesnost modelu má být otestována na základě kontrolního měření reprezentativního výběru bodů dle metodiky ČSN 013410 [1]. V teoretické části práce jsou popsány základní metody, terminologie a principy využívané pro tvorbu 3D modelů objektů spolu s nejčastěji využívanými fotogrammetrickými softwary. V teoretické části je také blíže popsán obecný pracovní postup a různá nastavení v programu ContextCapture.

Během řešení diplomové práce bylo nutné otestovat, zda lze k fotogrammetrickým účelům využít kameru Panasonic Lumix DMC – G80. Další části práce se podrobně věnují tvorbě výsledného 3D modelu.

V rámci diplomové práce bylo provedeno snímkování všech budov nacházejících se v areálu AdMaS. Z časových důvodů bylo využito pro tvorbu 3D modelu pouze snímků zobrazující budovu H a rozvodnu elektrické sítě v její blízkosti.

Pro dosažení co nejkvalitněji vyhodnoceného výsledného 3D modelu je nad rámec diplomové práce provedeno testování nastavení programu ContextCapture, které je podrobně popsáno v příloze č.1.

## 2 Popis lokality Admas

Areál AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies) je moderní výzkumné centrum v oblasti stavebnictví nacházející se na severu Brna v městské části Medlánky. Je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně a spolu s dalšími vědeckými centry jako je CEITEC, NETME tvoří rozsáhlý výzkumný komplex. [2]

Výzkumné centrum AdMaS bylo vybudováno na základě finanční podpory z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace, jehož realizace započala v roce 2011 po obdržení dotace z již zmíněného programu. Samotná výstavba probíhala v roce 2012 až 2014. Spuštění centra v plném provozu proběhlo v roce 2015. [3]

Hlavní úlohou je vývoj a výzkum pokročilých stavebních materiálů, technologií a konstrukcí v oblasti stavebnictví, dopravních systémů, infrastruktury měst a obcí. V areálu se nachází čtyři objekty (tři laboratorní pavilony s názvy P1, P2, P4 a testovací hala s označením H). [2] V budově P4 se mimo jiné nachází i prostory geotechniky a geoinformatiky.



Obrázek 1: Vstup do areálu AdMaS. V pozadí se nachází budova P1.

## 3 Teoretický základ

### 3.1 Terminologie

#### 3.1.1 Prvky vnitřní orientace

Údaje charakterizující geometrii paprsků uvnitř kamery. [4]

##### **Poloha hlavního bodu snímku $H'$**

Definován jako průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím v obrazovém prostoru středem promítání a kolmý na rovinu snímku. Je počátkem snímkového souřadnicového systému. [5]

##### **Konstanta kamery $c$ ( $f$ )**

Vzdálenost od hlavního snímkového bodu  $H'$  ke středu promítání v obrazovém prostoru [5]

##### **Průběh radiálního a tangenciálního zkreslení**

Podrobně popsáno v odstavci 3.4.2.

#### 3.1.2 Prvky vnější orientace

Definují polohu a pootočení kamery v objektovém souřadnicovém systému. Souřadnice středu promítání  $X_0, Y_0, Z_0$ . Úhly pootočení  $\omega, \varphi, \kappa$ . [6]

#### 3.1.3 Absolutní orientace

Umístění stereoskopického modelu do referenčního souřadnicového systému. [7]

#### 3.1.4 Relativní orientace

Vzájemná orientace snímků a vytvoření stereoskopického modelu. [6] K vytvoření se využívají dobře rozmístěné navazovací body.

### 3.1.5 Termíny využívané v oblasti letectví

#### UAS (Unmanned Aircraft Systems)

Jsou označovány bezpilotní letecké systémy, které se skládají z bezpilotního letadla (UA), řídicí stanice a libovolného dalšího prvku nezbytného pro umožnění letu. [8]

Toto označení není však jediné a v praxi se využívá i dalších označení jako je např. RPAS (Remotely-Piloted Aerial System), nebo UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Nejběžnějším a odbornou i širokou veřejností používaným termínem bezpilotního prostředku je označení dron.

#### UA (Unmanned Aircraft)

Bezpilotní letadlo, které je většinou součástí bezpilotního systému. V ČR jsou za bezpilotní letadla považována všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 20 kg. [8]

#### Model letadla

Modelem letadla je míněno letadlo neschopné nést člověka na palubě. Je využíváno pro soutěžní, sportovní, nebo rekreační účely a není vybaveno žádným zařízením umožňující automatický let. Dálkově řízený model musí být po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízen pilotem a model musí být v jeho vizuálním dohledu. [8]

### 3.1.6 Polygonová síť (mesh)

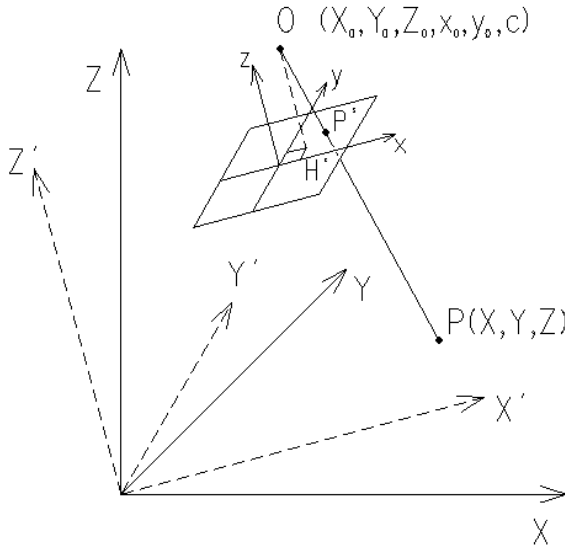
Je soubor vrcholů, hran a ploch popisující tvar 3D objektu. Vrchol je chápán jako samostatný bod, hrana jako přímý úsek spojující právě dva vrcholy. Hrana může být sdílena dvěma přilehlými polygony. Plochu tvoří povrch ohraničený hranami. Plochy jsou tvořeny mnohoúhelníky. [9] Specifickým případem je TIN, která využívá trojúhelníků.

### 3.1.7 TIN (Triangular irregular networks)

Trojúhelníková nepravidelná síť je konstruována na základě triangulace sady vrcholů. Vrcholy jsou spojeny množinou hran, které tvoří trojúhelníkovou síť. Hrany tvoří souvislé nepřekrývající se trojúhelníkové segmenty. K vytvoření trojúhelníkové sítě se používá řada algoritmů. Příkladem může být Delaunayova triangulace. [10]

### 3.2 Centrální projekce v prostoru

Fotogrammetrické snímky je možné s určitou přesností považovat za centrální projekci prostorových objektů. Podmínka kolinearit říká, že na jedné přímce leží bod na objektu, jemu odpovídající snímkový bod, projekční centrum a vyjadřuje tak vztah mezi snímkovými souřadnicemi  $(x,y,z)$  a objektovými souřadnicemi  $(X,Y,Z)$ . [6]



Obrázek 2: Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi. [6]

Podmínku kolinearit reprezentují rovnice: [6]

$$\frac{x - x_0}{z - z_0} = \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0}; \quad \frac{y - y_0}{z - z_0} = \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \quad (1)$$

Nahrazení souřadnic pootočeného systému  $(X', Y', Z')$  souřadnicemi původního systému: [6]

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{bmatrix} = m R \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde  $m$  je měřítkový koeficient a  $R = R_\omega R_\phi R_\kappa$ . Matice  $R$  je vytvořena jako součin tří matic rotací. Vynásobením vztahu rovnice (1) transponovanou maticí rotace  $R^T$  dostáváme rovnice: [6]

$$\begin{aligned} r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) &= (X' - X'_0) \\ r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) &= (Y' - Y'_0) \\ r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) &= (Z' - Z'_0) \end{aligned} \quad (3)$$



Zobrazovací rovnice dostaneme dosazením rovnic (3) do podmínky kolinearit y a nahradíme  $z = 0$ ,  $z_0 = c$  (kde „ $c$ “ je konstanta kamery): [6]

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

Prvky vnitřní orientace  $x_0, y_0, c$  definují polohu projekčního centra ve snímkovém souřadnicovém systému. V objektovém souřadnicovém systému pootočení a polohu pak definují prvky vnější orientace  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ . Díky těmto znalostem je možné rekonstruovat trs paprsků vycházejících z projekčního centra a orientovat jej v objektovém systému. [6]

Objektové souřadnice  $X, Y$  získáme z rovnice: [6]

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (5)$$

Z rovnic vyplývá, že pro rekonstrukci prostorového objektu jsou potřebné nejméně dva snímky.

### 3.3 Aerotriangulace

Umožňuje omezit počet, nebo překlenout území bez vlíčovacích bodů. Cílem aerotriangulace je určit prvky vnější orientace snímků, nebo prvky absolutní orientace modelů a souřadnice určovaných bodů v objektovém souřadnicovém systému. Navazovací body slouží pro překlenutí území bez vlíčovacích bodů a umožňují vzájemné propojení snímků. Pro řešení aerotriangulace se po rozvoji výpočetní techniky využívá vyrovnání bloků svazků. U tohoto přístupu se neuplatní zbytkové chyby z relativní orientace (opačně je tomu při modelovém řešení). Lépe se také přidávají další měření a přidavné parametry do vyrovnání. [6]

Další metodou je modelové řešení. Při tomto řešení jsou modely na sobě částečně závislé, nebo nezávislé. Tato metoda se používala především před rozvojem výpočetní techniky. [6]

### 3.3.1 Přídavné parametry

Využívají se v aerotriangulaci pro kompenzaci systematických chyb. Uplatnění nalézají především v blízké fotogrametrii pro velmi přesné projekty. Příkladem přídavných parametrů mohou být parametry Ebnerovy (využívají se v letecké fotogrametrii). Nejsou však zcela vhodné pro odstranění zkreslení objektivu. Matematický model je aproximací skutečnosti a nejistota v modelu má být menší než nejistota v měření. Celkový počet parametrů má být co nejmenší. Velký počet přídavných parametrů přináší nestabilitu do řešení. [6]

### 3.3.2 Orientace snímače

#### Přímá

Je určení vnější orientace snímače pomocí GNSS metody. Často bývá kombinována s údaji z IMU měření. [6]

#### Nepřímá

Pro určení prvků vnější orientace snímače slouží vlíčovací body a navazovací body. [11]

#### Integrovaná

Využívá data získána z GNSS, IMU společně se snímkovými souřadnicemi vlíčovacích a navazovacích bodů a souřadnicemi vlíčovacích bodů v geodetickém systému. Prvky vnější orientace snímače jsou určeny společným vyrovnáním výše zmíněných údajů. [6]

## 3.4 Optické vady

Centrální projekce je při fotografickém snímkování uskutečněna opticky. Vzhledem k tomu, že se při běžném snímkování využívá objektiv složený z více optických členů není optické promítání zcela shodné se středovým promítáním. Shodné by bylo (při zanedbání ohybu světla) pouze v případě použití tzv. „dírkového objektivu“. [5]

Pro ideální objektiv platí:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

kde  $a$  je předmětová vzdálenost bodu,  $b$  je obrazová vzdálenost bodu,  $f$  je ohnisková vzdálenost tenké čočky. [5]

Použitím jakéhokoli objektivu dochází k odklonění se od ideálního středového promítání. Kvalita objektivu značně ovlivňuje přesnost určení snímkových souřadnic. Odchylky skutečného zobrazení od ideálního se nazývají optické vady, nebo aberace. [5]

### 3.4.1 Dělení optických vad

**Chyby dle barevnosti:** [5]

- a) Jednobarevné (monochromatické)
- b) Barevné

**Podle vzniku:** [5]

- c) Při zobrazování bodu (sférická vada, astigmatismus)
- d) Zobrazování předmětu (zklenutí pole a zkreslení obrazu)

### 3.4.2 Distorze objektivu

Největší vliv na přesnost z výše uvedených vad má distorze objektivu. Distorzi objektivu může udávat výrobce. V případě, že ji výrobce neudává je možné ji určit laboratorním měřením, nebo se užije kalibračních postupů tzv. „on field calibration“. [5] [7]

#### **Radiální distorze**

Způsobena souhrnem geometrických nepřesností při výrobě objektivu. Úhel vstupujícího paprsku nebude stejný jako jeho výstupní úhel. Z toho důvodu se bude poloha zobrazovaného bodu lišit o hodnotu  $\Delta r$  (radiální distorze) od správné polohy. Průběh radiálního zkreslení není naprosto symetrický, ale při kompenzaci se tak uvažuje. U moderních fotogrammetrických objektivů dosahuje hodnot od 5 - 10  $\mu\text{m}$ . [5]

Pro eliminaci jeho vlivu se využívá následujících rovnic ve tvaru polynomu:

$$\begin{aligned}d_x &= x(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\d_y &= y(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)\end{aligned}\quad (7)$$

kde  $x, y$ , jsou snímkové souřadnice bodu,  $r^2 = x^2 + y^2$  a  $K_1, K_2, K_3$  jsou přídavné parametry radiální distorze. [6]

#### **Tangenciální distorze**

Vzniká nepřesnou centrací jednotlivých optických členů objektivu. Způsobuje nepravidelné, špatně definovatelné lokální posuny a působí kolmo na směr radiální. U měřických objektivů dosahuje přesnost sazení jednotlivých optických členů lepší než 5 $\mu\text{m}$ . [5]

Pro odstranění se využívá rovnic: [6]

$$\begin{aligned}d_x &= P_1(r^2 - 2x^2) + 2P_2xy \\d_y &= 2P_1xy + P_2(r^2 - 2y^2)\end{aligned}\quad (8)$$

kde  $P_1, P_2$  jsou přidavné parametry tangenciálního zkreslení. [6]

## 3.5 Obrazová korelace

Míru podobnosti obrazů můžeme vyjádřit pomocí korelačního koeficientu

$$r = \frac{s_{rs}}{s_r s_s} = \frac{\sum(g_r - g_r^p)(g_s - g_s^p)}{\sqrt{\sum(g_r - g_r^p)^2 \sum(g_s - g_s^p)^2}}\quad (9)$$

$g_s^p, g_r^p$  označujeme průměrné hodnoty obrazových intenzit v obrazovém okně referenčního obrazu  $g_r$  a intenzit korespondujícího obrazu  $g_s$ . Hledaný obraz je pak v místě, ve kterém je hodnota korelačního koeficientu největší. Takto nalezená poloha je určena pouze s přesností pixelu. [6]

### 3.5.1 Subpixelová korelace

Pro přesnější měření snímkových souřadnic se využívá tzv. subpixelová korelace. U této metody hledáme malé posuny  $d_x; d_y$ , o které jsou oba obrazy navzájem posunuty. [6]

$$g_s(x, y) = g_r(x + d_x, y + d_y).\quad (10)$$

### 3.5.2 Automatické vyhledávání bodů

Automatické zpracování fotogrammetrických snímků využívá princip korelace dvou obrazů. Výsledkem má být nalezení polohy dvou odpovídajících si bodů, bez zásahu operátora a za předpokladu znalosti prvků vnitřní orientace vypočítat horizontální (případně i vertikální) paralaxu, z které lze určit výšku bodu nad srovnávací rovinou. [12]

V případě hledání obrazu sdruženého bodu reprezentovaného jedním pixelem na jednom obrazu, bychom našli velké množství odpovídajících bodů na obrazu druhém. Z toho důvodu se využívá širší okolí bodu na prvním snímku, k hledání obdobného okolí na snímku druhém (za předpokladu unikátnosti okolí). [12]

Automatické vyhledávání bodů nemusí dávat vždy použitelné výsledky. To může být je dáno tím, že okolí vybraného bodu není dostatečně unikátní a mohou být k sobě přiřazeny rozdílné body.

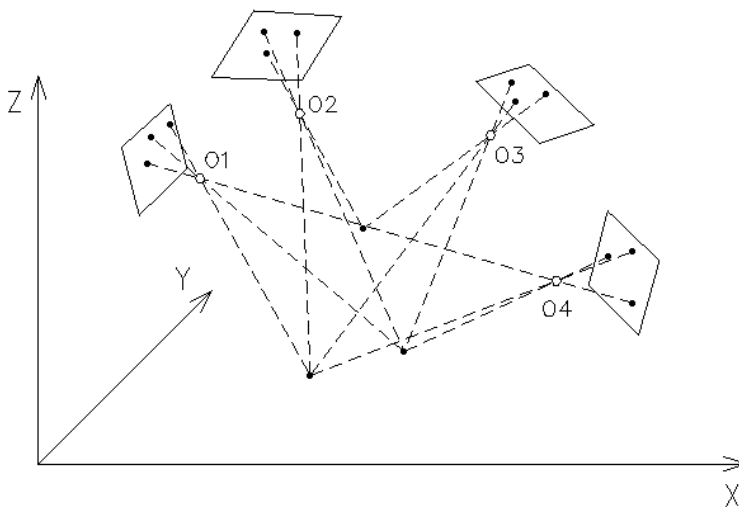
## 3.6 Blízká fotogrammetrie

### 3.6.1 Přesnost blízké fotogrammetrie

#### Geometrické faktory [6]

- 1) Měřítko snímku, dáno vzdáleností objektu od projekčního centra a ohniskovou vzdáleností kamery. Vyšší přesnosti dosáhneme u snímku s větším měřítkem.
- 2) Úhel protnutí paprsků. Ačkoli se optimální úhel protnutí paprsku jeví  $90^\circ$ , je pro kvalitní identifikaci bodu na snímku příliš velký. Je tedy vhodné, aby osa terče svírala s paprskem úhel do velikosti  $30^\circ$ .
- 3) Rozmístění vřícovacích bodů. Je důležité, aby vřícovací body obklopovaly rovnoměrně celý vyhodnocovací prostor. Není-li tato podmínka dodržena, přesnost se sníží. Vhodné také je doplnit do celé plochy snímku navazovací body, nejlépe signalizované.
- 4) Geometrie snímkování.
  - a) Normální případ. Osy záběru svírají pravý úhel se základnou a jsou rovnoběžné. Nedosahuje takové přesnosti jako konvergentní snímkování, ale lze jej využít v některých aplikacích, kdy je preferováno stereoskopického vidění.
  - b) Konvergenční snímkování z více stanovisek je snímkování, při kterém je zachycen zájmový prostor alespoň na třech snímcích a stanoviska snímkování jsou od sebe vzdálená. Z pohledu blízké fotogrammetrie nejlepší možnost pro dosažení vysoké přesnosti.

Výhody metody spočívají v tom, že bod je určen protnutím více než dvěma konvergentními paprsky a nadbytečnosti měření. Je tedy možné lépe nalézt a eliminovat odlehlá měření a systematické chyby.



Obrázek 3: Konvergentní snímkování. [6]

### Negeometrické faktory [6]

- 1) Vhodně zvolený matematický model pro eliminaci systematických chyb. Hlavní složku systematické chyby tvoří převážně zkreslení objektivu. Kvalitní objektivy nevyžadují složitý model.
- 2) Přesnost měření snímkových souřadnic.
- 3) Počet snímků pořízených z jednoho stanoviska.
- 4) Osvětlení, tvar bodů. Pro signalizování bodů se využívá symetrických terčů, přičemž u digitálních kamer je velikost terče v rovině snímku dána na 5-10 pixelů. Tuto velikost mohou dále specifikovat jednotlivé fotogrammetrické softwary pro různé typy terčů.
- 5) Způsob vyrovnaní z hlediska eliminace odlehlých měření. Jednou z možností zvýšení přesnosti měření je opakování expozic z jednoho stanoviska. Pokud budou pořízeny více jak tři snímky z jednoho stanoviska, zvýšení přesnosti pak bude minimální.

### 3.6.2 Digitální kamery v blízké fotogrammetrii

V dnešní době se pro aplikace blízké fotogrammetrie využívají převážně digitální neměřické digitální kamery. Nejvhodnější volbou jsou digitální zrcadlovky (DSLR) disponující objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností. V některých méně náročných aplikacích lze využít i digitální kamery nazývané jako kompakty. [13]

V blízké fotogrammetrii je nejvíce využíván typ kamer označovaných jako digitální zrcadlovky (DSLR). Jejich výhodou je přijatelná cena a poskytovaná kvalita. Tyto kamery mají obvykle robustní tělo a poskytují možnost výměny objektivů. Spolu s vysoce kvalitními objektivy a provedením kalibrace kamery lze dosáhnout velmi kvalitních výsledků. [13]

Kamery s velmi malou velikostí pixelu nemusí vždy poskytovat nejlepší kvalitu snímku. Generují vyšší šum, což je způsobeno nižší citlivostí na světlo. Objektivy pro tyto kamery podléhají vysokým požadavkům na kvalitu provedení, která často není dodržena, což má za následek snížení kvality obrazu. [13]

Středo-formátové kamery bývají převážně využívány pro náročné aplikace požadující maximální počet pixelů a velký obrazový formát. [13]

### 3.6.3 Typy snímačů

#### CCD snímače (Charge Coupled Device)

V překladu „zařízení s vázaným nábojem“. Je senzor skládající se z množství mikroskopických fotodiód usazených v těsné blízkosti. Tyto fotodiody nejčastěji obsahují amorfní světlocitlivý křemík. Fotovodivý náboj je vytvářen dopadem světla na fotodiodu a koresponduje pak s jasem na snímku. [12]

#### CMOS snímače (Complementary Metal Oxid Semikonduktor)

Elektronická součástka na bázi tranzistoru. Výroba je jednodušší, levnější, má výrazně nižší spotřebu elektrické energie a součástka je oproti CCD snímači menší. [12]

### 3.6.4 Objektivy

V blízké fotogrammetrii se často využívají objektivy s širokým úhlem záběru. Umožňují snímkovat z kratší vzdálenosti od objektu, pokrýt větší snímaný prostor a dosáhnout příznivějšího protínání paprsků. Obecně platí, že s rostoucím úhlem záběru roste i radiální zkreslení. [13]

Objektivy se zorným úhlem nad  $120^\circ$  (označované jako „rybí oko“) mají odlišnou konstrukci, která se odchyluje od centrální projekce. Z toho důvodu není vhodné využít (7),(8) pro kompenzaci radiálního a tangenciálního zkreslení, ale musí se sestavit jiný vhodný model. [13]

#### Dělení objektivů [5]

Objektivy s dlouhým ohniskem disponují obrazovým úhlem  $45^\circ$  až  $50^\circ$ . Zkreslení objektivu se pohybuje do cca 2-3  $\mu\text{m}$ .

Normální objektivy mají obrazový úhel do  $60^\circ$ . Zkreslení objektivu se pohybuje do cca 3-4  $\mu\text{m}$ .

Širokoúhlé objektivy dosahují hodnot obrazového úhlu do  $90^\circ$ . Zkreslení objektivu se pohybuje do cca 2-6  $\mu\text{m}$ .

Zvláště širokoúhlé objektivy. Disponují obrazovým úhlem kolem  $120^\circ$ , zkreslení objektivu se pohybuje do cca 10  $\mu\text{m}$ .

## 3.7 Fotogrammetrie pomocí UAS

### 3.7.1 Vývoj UAS

K nejstarším bezpilotním prostředkům můžeme řadit různé typy balónů a meteorologických draků. První zdokumentované použití rádiem řízeného bezpilotního prostředku se datuje k roku 1933, kdy jej Britské královské námořnictvo využívalo k nácvikům střelby. [14]

Zájem o bezpilotní prostředky pro vojenské účely vzrostl s miniaturizací technologií v osmdesátých a devadesátých letech minulého století. [15]

Bezpilotní prostředky se začaly využívat pro účely civilního snímkování v druhé polovině minulého století. K tomu docházelo především ve vyspělých zemích, jako je Německo a Japonsko. [16]

Na území bývalé ČSSR byly od druhé poloviny 70. let minulého století tehdejší Geografickým ústavem ČSAV v Brně využívány rádiem řízené modely. Ty byly vybaveny fotoaparátem Flexaret pro snímkování z malých výšek (do 500 m). [16] [17]

Moderní historie bezpilotních prostředků, které se využívají v komerční sféře se odhaduje k roku 2006, kdy byl bezpilotní prostředek použit k hlídání státní hranice mezi Mexikem a USA. [18]

### 3.7.2 Legislativní omezení bezpilotních prostředků.

Legislativní rámec v oblasti civilního letectví na území České republiky stanovuje Zákon o civilním letectví č.49/1997Sb. [19] Podrobné informace o provozu bezpilotních prostředků poskytuje doplněk X [20] leteckého předpisu L2 [21].

### 3.7.3 Využití UAS ve fotogrammetrii

Bezpilotní letadla jsou obvykle vybavena kamerami, což přirozeně vedlo k fotogrammetrii založené na UAS. Začaly se využívat snímky z dronů a díky nim provádět různá měření. [22]

Pro snímkování se nejčastěji využívá dronů s více rotory. Nejběžnější jsou drony s čtyřmi rotory, ale můžeme se také často setkat s šesti rotorovými, nebo s drony využívající pevné křídlo. Výjimečně se objevují drony s jedním rotorem.

Drony nyní běžně disponují GNSS přijímačem, IMU, a řadou dalších senzorů jako jsou například senzory umožňující detekci překážek, nebo výškové senzory. Spolu s kvalitními kamerami umístěnými na závěsných stabilizátorech jsou tak drony výkonnými mapovacími nástroji. [22]



V letecké fotogrametrii se za pomoci dronů nejčastěji využívá dvou stylů snímkování. Svislé snímkování, využívá kameru umístěnou na dronu tak, aby osa kamery svírala pravý úhel se snímanou rovinou. Kvalitní závěsný stabilizátor kamery umožňuje udržet tuto polohu kamery po celou dobu letu i během zhoršených povětrnostních podmínek. Druhým stylem je konvergentní snímkování, kdy osa kamery svírá se snímkováným povrchem jiný úhel než pravý. [22]

Při svislém snímkování jsou snímky pořizovány v mřížkách. [22] Snímkování se provádí s dostatečným podélným a příčným překrytím snímků. Snímky se pak často využívají pro tvorbu ortofotomapy.

Konvergentní snímkování se využívá pro mapování svislých ploch, jako jsou různé útesy, nebo stěny budov. Letový plán dronu je často naplánován tak, aby byl vytvořen kruh kolem snímaného objektu. Při konvergentním snímkování je nutné opět dodržet podmínku dostatečného překrytu snímků. [22]

Nejčastějšími výsledky letecké fotogrametrie s využitím UAS bývá ortofotomapa, 3D model, nebo tematická mapa. Z nízké letové výšky lze dosáhnout velikosti pozemního elementu v úrovni jednotek centimetrů. [16] S technologickým pokrokem v oblasti snímačů využívaných na bezpilotních prostředcích se velikost pozemního elementu ještě dále zmenšuje.

### **3.7.4 Výhody a nevýhody UAS využívaných pro fotogrametrii**

Princip využívání UAS ve fotogrametrii je obdobný jako u letecké fotogrametrie. Drony však umožňují snímat zájmové území z menších výškových úrovní a náklady na snímkování jsou mnohem menší.

Výhody UAS [16]

- Nízké náklady na pořízení dat
- Nízké náklady na pořízení UAS
- Operativní nasazení
- Relativně jednoduchý výcvik pilota
- Bezpečný provoz (využití sofistikovaných systémů jako je virtuální ohrada, návrat dronu na místo vzletu atd.)
- Let v nízkých výškových hladinách blízko objektu

Nevýhody UAS [16]

- Legislativní regulace a omezení
- Není zajištěna naprostá spolehlivost a stabilita
- Není možné ztratit vizuální kontakt s dronem
- Omezená váha přístrojů, které dron unese
- Omezený operační dosah
- Nutnost využití kvalifikovaného pilota

## 3.8 Další metody získávání prostorových dat

### 3.8.1 Tachymetrie

Metoda spadá mezi klasické konvenční geodetické metody. Princip tachymetrie spočívá v současném měření polohy i výšky bodu. Poloha bodu je určena polární metodou, výška trigonometricky. [23] Body jsou měřeny selektivně na základě výběru operátora. Měřených bodů je tedy omezené množství, ale body jsou vybírány tak, aby vhodně charakterizovaly měřený objekt. [12] U geometricky složitějších objektů nelze tuto metodu účinně využít, z důvodu značné časové náročnosti měření. V současné době se k bezkontaktnímu tachymetrickému měření využívá totálních stanic, které umožňují bez hranolové měření délek.

### 3.8.2 Laserové skenování

Metoda se charakterizuje vysokou produktivitou a umožňuje zaměření složitých objektů s vysokou přesností. Při využití této metody jsou na zájmovém objektu automaticky neselektivně měřeny podrobné body, které pokrývají celý objekt. [12] Výstupem měření je množina bodů (tzv. mračno bodů), které nesou informace o své prostorové poloze. Ke každému bodu mohou být přiřazeny i další informace jako je např. barva, nebo intenzita bodu.

Laserové skenování využívá pro měření prostorové vzdálenosti pulzní laserovou technologii. Paprsek je rozmítán pomocí zrcadla, nebo hranolu a souřadnice každého bodu jsou vypočítány prostorovou polární metodou. [24]

## 3.9 Nejpoužívanější fotogrammetrické softwary

### 3.9.1 Photomodeler

Je profesionální software pro tvorbu 3D modelů a měření. Využívá se napříč různými sektory a aplikacemi. Aktuální nabízená nejširší verze nese označení Photomodeler Premium. Poskytuje nástroje pro vytváření přesných 3D modelů a měření z fotogrammetrických snímků. Umožňuje vytvářet kódové terče, které slouží k automatickému vyhodnocení. Rovněž také poskytuje možnost klasického měření bodů v tzv. „manuálním projektu“. Od ostatních typů licencí navíc umožňuje modelování hustého povrchu (DSM), vyhodnocení 3D skenování, SmartMatch a snímání pohybu. [25] V diplomové práci byla použita starší verze programu Photomodeler Scanner v6.

### 3.9.2 Pix4D

Je fotogrammetrický software sloužící pro tvorbu 3D modelů, který využívá primárně snímky z UAS. Patří mezi celosvětově používané softwary pro mapování pomocí UAS. [26]

#### **Pix4Dcapture**

Mobilní aplikace sloužící pro plánovací letu bezpilotního prostředku. Aplikace umožňuje nastavovat parametry letu jako je příčný a podélný překryt snímků, rychlost bezpilotního prostředku atd. Letové řady bezpilotního prostředku jsou vytvořeny automaticky po zadání příčných parametrů a definování oblasti snímkování. [27]

#### **Pix4Dmapper**

Je profesionální fotogrammetrický software umožňující mapování čistě pomocí fotogrammetrických snímků. V programu lze vytvářet georeferencované 2D mapy a 3D modely. Program umožňuje automatické vyhodnocení snímků. [26] [28]

#### **Pix4Dbim**

Umí vytvářet 3D modely, vizualizace, vrstevnice a disponuje nástroji pro měření povrchu a objemu. Výstup je možné zpracovávat a analyzovat pomocí cloudového serverového řešení. Poskytuje pokročilé nástroje pro editování, měření, výpočtu objemů, tvorbu vrstevnic a inspekční funkce. Výstupy umožňuje zobrazit ve 2D, nebo 3D na časové ose s možností prohlížení, měření a tvorbou poznámek. [26]

Pix4Dbim umožňuje porovnání skutečného provedení stavby s původními výkresy a umí vytvářet diagramy pro kontrolu harmonogramu stavby. [26]

### **3.9.3 Agisoft Metashape**

Umožňuje zpracování fotogrammetrických digitálních snímků. Výstupní 3D data lze využít pro práci v GIS aplikacích, dokumentaci kulturních památek, nebo při tvorbě vizuálních efektů. Program dokáže automaticky zpracovávat data a je vhodný pro začátečníky v oblasti fotogrammetrie i odborníky, kterým umožňuje nastavovat parametry pro specifické úlohy. [29]

### **3.9.4 ContextCapture**

Řadí se do skupiny programů, které vyvíjí společnost Bentley. Je to software sloužící pro 3D modelování reality. Nabízí možnost rychle vytvořit složité stávající modely skutečnosti pomocí snímků. Výstupy programu lze použít například pro projektování, výstavbu a rozhodování o provozu. Umožňuje vytvářet přesné „mesh“ modely reality bez speciálních snímacích zařízení. Poskytuje prostor vyhodnocení do 100 gigapixelů dat. Nabízí také automatizaci tvorby 3D modelů. Umožňuje exportovat a dále pracovat s výsledky v jiných programech. [30]

Pro účely diplomové práce byl využit program ContextCapture ve verzích „Update 13“ a „Update 14“.

#### **ContextCapture Viewer**

Je vedlejší modul sloužící pro prohlížení vyhotovených 3D modelů. Podporuje přepínání zobrazení modelu na texturovaný, drátěný, nebo stínovaný. Umožňuje měření v 3D prostoru v jakémkoli měřítku. Naměřené výsledky lze interpretovat v různých jednotkách. [31]

#### **ContextCapture Editor**

Jak již napovídá název, modul je možné využít pro editaci polygonových sítí a mračen bodů. Využit jej lze i pro tvorbu ortofotosnímků, nebo pro extrakci modelu terénu z mračen bodů, nebo polygonových sítí. Retušování sítí, umožňuje vytvářet kvalitnější geometrické výstupy a odstraňovat chyby. [32] [33]

### **ContextCapture Engine**

Výpočetní modul programu ContextCapture. Pomocí něj jsou řešeny výpočetní algoritmy. Přes modul je například prováděn výpočet aerotriangulace, nebo vytváření celého 3D modelu. [34] Modul je propojen s modulem Master, který uděluje výpočetní příkazy. Před zahájením výpočetního řešení je proto nutné mít spuštěné oba tyto moduly.

### **ContextCapture Master**

Hlavní modul programu Contextcapture. Definuje grafické uživatelské rozhraní pro zadávání veškerých vstupních dat, nastavení a řídí výpočetní úlohy. [34]

## **3.10 Typy modelů objektů**

### **3.10.1 Typ dimenze**

#### **Vnitřní**

Odkazuje na nejvyšší dimenzi nejjednodušších geometrických objektů (tzv. geometrických primitiv např: bod, linie, ohraničená plocha, atd.), které daný model reality používá pro popis objektů. Například v případě, kdy je budova popsána množinou ploch, je vnitřní dimenze dva. [35]

#### **Vnější**

Vnější dimenze popisuje prostor, ve kterém je modelování prováděno. [35]

### **3.10.2 Nejpoužívanější typy modelů z hlediska dimenze**

#### **2D model**

Pracuje s 2D geometrií ve 2D dimenzi. Model je složen s geometrických segmentů jako je bod, linie, plocha. Tyto segmenty jsou umístěny v 2D dimenzi. [35]

#### **2.5D model**

Využívá 2D geometrie ve 3D prostoru. Model je tvořen 2D geometrickými útvary umístěnými ve 3D prostoru. Rozdíl oproti 3D modelu spočívá v tom, že pro každou souřadnici  $X, Y$  existuje pouze jedna souřadnice  $Z$ . Tento typ modelů bývá využíván často při tvorbě digitálních modelů terénů. V takovémto případě není možné popisovat jevy jako jsou například jeskyně, převisy, nebo kolmé stěny. [35]

### **3D model**

Využívá 3D geometrie v 3D prostoru. Ke každému bodu o souřadnicích  $X, Y$  existuje množina souřadnic  $Z$ . Hlavními metodami 3D modelování je metoda povrchová a objemová. [35]

## **3.11 Obecný popis práce v programu ContextCapture Master**

### **Import dat**

Program nabízí importovat dva typy dat. První je import snímků, druhou možností je import videa, tedy sekvence snímků.

Program umožňuje předdefinovat uživatelem parametry použité kamery, nebo vybrat parametry z již předdefinovaných kamer. V případě, že nejsou zadány parametry kamery, modul je částečně převezme z metadat importovaných snímků. Nastavení parametrů kamery se provádí po přidání snímků do programu.

### **Měření**

Panel měření poskytuje grafické rozhraní pro měření snímkových souřadnic. Zde se také provádí import souřadnic vlíčovacích a kontrolních bodů. Import je prováděn přes textový soubor, ve kterém jsou uloženy informace o měřených bodech.

Vlíčovací, nebo kontrolní body lze také přidávat manuálně podobně jako navazovací body. Při vytváření nového vlíčovacího bodu zvolíme možnost „control point“. Určíme souřadnicový systém a vložíme souřadnice. Chceme-li jej změnit na kontrolní bod, musíme v editovacím rozhraní označit možnost „check point“.

### **Aerotriangulace**

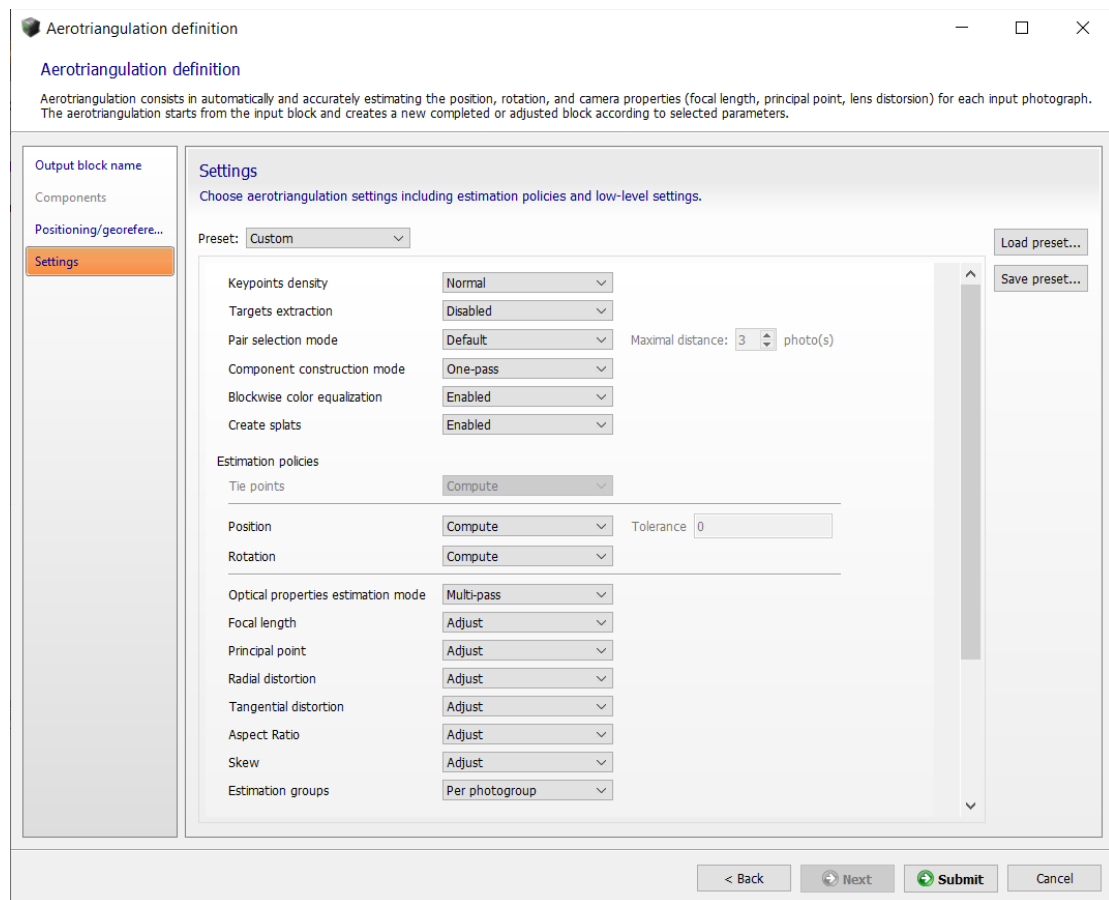
Slouží pro orientaci snímků. Program contextcapture Master poskytuje značné množství nastavení pro tuto operaci. Po výběru snímků vstupujících do aerotriangulace je možné natakavit pozici a způsob georeferencování snímků. Pro relativní orientaci snímků je možné využít jednu ze dvou možností a to „Arbitrary“, nebo „Automatic vertical“.

Pokud máme k dispozici informace o prostorové poloze snímače můžeme využít možnosti absolutní orientace snímků pomocí těchto dat. Program v tomto případě poskytuje možnost přímé orientace pomocí nastavení „Use photo positioning metadata for adjustment“. Při využití kvalitních vlíčovacích bodů se využije nepřímé orientace pomocí nastavení „Use control points for adjustment“.

Následuje nastavení na kartě „settings“. V horní části karty „settings“ lze nastavit různé parametry jako je nastavení hustoty klíčových bodů, nebo zpřístupnění funkce „blockwise“ pro následnou tvorbu textur. V případě použití kódových terčů na snímkaném objektu vybereme druh použitého terče v nastavení „Target extraction“.

Prostřední část karty „settings“ umožňuje nastavení, zda se bude vypočítávat během aerotriangulace rotace a pozice snímků.

Dolní část karty „setting“ dovoluje nastavit kalibraci jednotlivých parametrů kamery, které budou dopočteny během aerotriangulace.



Obrázek 4: Nastavení parametrů aerotriangulace.

Po dokončení aerotriangulace je možné nahlédnout na rozložení bodů pomocí nástroje „3D view“. Ten také umožňuje zobrazovat rozložení stanovisek, ze kterých bylo snímání provedeno.

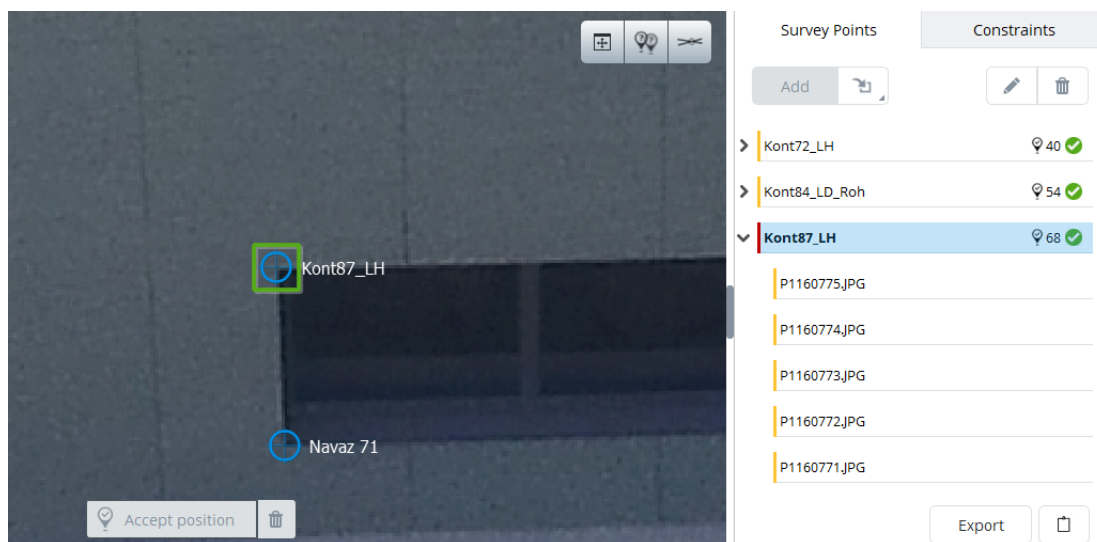
Lze také nahlédnout na automaticky vytvořené navazovací body. Nelze je však nijak editovat.



Obrázek 5: Automaticky vytvořené navazovací body. Kvalita bodu je rozlišena dle reprojekční chyby podle Tabulka 1.

### Protokol kvality aerotrinagulace

Požadovanou přesnost aerotriangulace je možné ověřit v automaticky vygenerovaném reportu. Kvalita určení bodů je rozlišena dle barvy na základě reprojekční chyby (Tabulka 1). Stejné rozlišení kvality bodů je využito i v panelu grafického rozhraní při měření snímkových souřadnic.



Obrázek 6: Prostředí měření snímkových souřadnic v programu ContextCapture. V pravé části nalezneme měřené body na snímcích. Lze vidět, že bod "Kont87\_LH" je zvýrazněn červeně. Reprojekční chyba tohoto bodu je tedy větší než tři pixely.



V případě, kdy je některý z bodů zvýrazněn červeně je nutné překontrolovat správnost určení jeho pozice na snímku a případně ho přeурčit, nebo odstranit ze snímku, je-li jeho poloha nejednoznačná. V takovémto případě je nutné provést aerotriangulaci nově a opět provést všechny kontroly. Může však nastat situace, že snímkové souřadnice červeně zvýrazněného bodu budou určeny správně a je třeba zjistit příčinu. Ta může spočívat v nesprávném určení okolních vlíčovacích či navazovacích bodů, které ovlivňují daný bod. Report programu je podrobně popsán v odstavci 7.2.2.

| Reprojekční chyba [px] | Úroveň přesnosti | Barva bodu |
|------------------------|------------------|------------|
| neznámá                | neznámá          | modrá      |
| <1                     | vysoká           | zelená     |
| [1 až 3)               | střední          | žlutá      |
| >3                     | nízká            | červená    |

*Tabulka 1: Barevné rozlišení bodu dle reprojekční chyby. Tabulka digitalizovaná dle předlohy uvedené v manuálu programu ContextCapture. [36]*

## Spojení projektů

V některých případech může nastat situace, kdy je potřebné využít pro tvorbu 3D modelu více sad snímků, ale nelze je standardním postupem vložit do jednoho projektu z důvodu, že proces aerotriangulace selže a vyhodnotí pouze část vložených dat. V takovémto případě lze využít funkce „merge blocks“. Ta umožňuje spojovat projekty do jednoho, ale pouze v případě, kdy jsou data v projektu georeferencována. Pokud je tedy požadované spojit více sad snímků do jednoho projektu, vytvoří se pro každou datovou sadu projekt, který se georeferencuje některou z možností uvedenou v odstavci Aerotriangulace. Následně se projekty spojí pomocí funkce „merge blocks“.

## Tvorba modelu

Je zahájena přes ikonu „new production“ na kartě „general“. Zde program nabízí nastavení parametrů 3D modelu na dalších kartách. Referenční systém a hranice boxu, ve kterých se model vyhodnocuje jsou nastaveny na kartě „spatial frameworks“. Dále je zde nastaven mód, který umožňuje modelovaný prostor rozložit do bloků v případě, kdy jsou kladeny nadměrné požadavky na RAM paměť.

Karta „reference 3D model“ umožňuje import editovaných modelů. Program umožňuje nahrát texturovaný i netexturovaný model. Tyto referenční modely pak vstupují do nového vyhodnocení.

Na kartě „processing setting“ se nachází důležitá nastavení ohledně geometrie a textury modelu. „Geometric precision“ udává přesnost geometrie modelu dle rozlišení

nejmenšího segmentu na snímku (např: 0,5px). Nastavení „Hole-filling“ umožňuje programu vyplňovat otvory v modelu dle jejich velikosti. „Geometric simplification“ dovoluje zjednodušovat polygonovou síť dle nastavené tolerance a vytvářet tak hladké plochy. „Resolution limits“ lze využít v případě je-li dán požadavek maximálního rozlišení výsledného modelu. „Color equalization“ mode poskytuje dva různé způsoby vyrovnání barev výsledných textur modelu. Dle nápovědy je doporučeno nastavení „Blockwise“, které by mělo dosahovat konzistentnějších výsledků textur modelu. [36]

### **Proces rekonstrukce modelu**

Ikou „submit new production“ je vyvoláno okno „Production definition“, ve kterém je možné nastavit účel rekonstrukce, formát, souřadnicový systém a další nastavení.

Účel rekonstrukce lze zvolit následovně:

- 3D mesh
- 3D point cloud
- Ottofoto/DSM
- 3D mesh for retouching
- Reference model only

Formát výstupu je volen v závislosti na účelu rekonstrukce. Formáty pro 3D modely jsou dále popsány v odstavci 3.12. Nastavení souřadnicového systému a rozsah modelovaného prostoru je vhodné ponechat dle jejich předchozího nastavení, které proběhlo na kartě „spatial frameworks“.

## **3.12 Vybrané výstupní formáty programu ContextCapture**

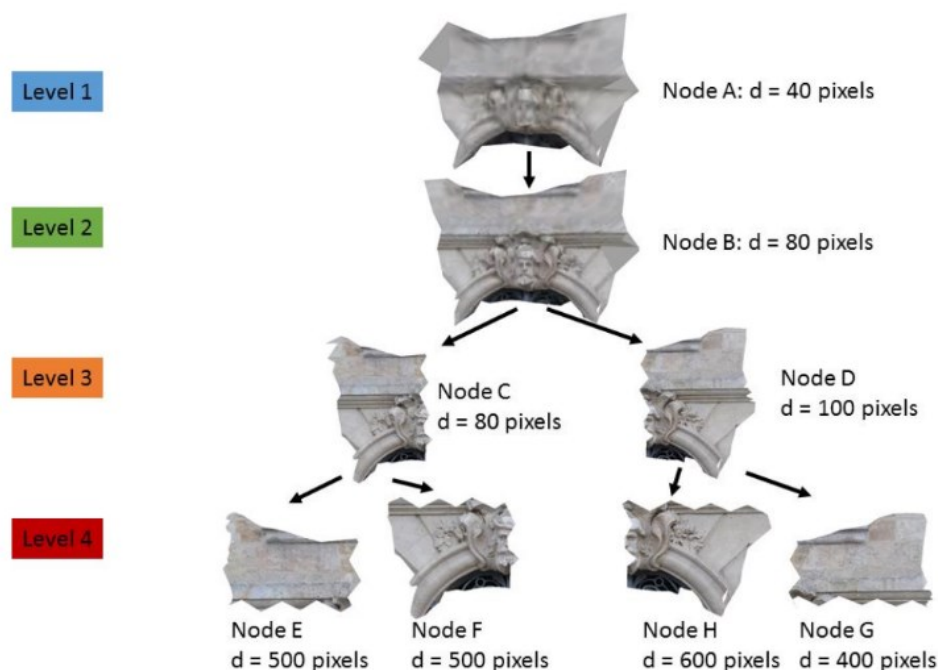
### **3MX (3D multiresolution Mesh eXchange)**

Formát, sloužící pro usnadnění distribuce dat z ContextCapture. Umožňuje publikaci modelu na vlastním webu pomocí bezplatné služby ContextCapture Web Viewer. Formát je interoperabilní s dalšími produkty společnosti Bentley Systems. V manuálu programu ContextCapture, je uváděna interoperabilita i s dalšími aplikacemi jiných vývojářů. [37]

Pro zajištění rychlého načtení obsahu, je formát založen na „multi-resolution“<sup>1</sup> přístupu. [38]

---

<sup>1</sup> Označení přístupu, který využívá více rozlišovacích úrovní pro různé úrovně detailu modelu. Tento přístup umožňuje rychlé načtení velmi objemných prostorových dat. [38]



Obrázek 7: Struktura LOD (level of detail) formátu 3MX. [38]

## OBJ wavefront

Formát, který je možný načíst většinu CAD a 3D softwarů, což je jeho velkou výhodou. Polygonová síť je v tomto formátu vyhotovena s vysokým rozlišením v jedné úrovni. ContextCapture však umožňuje generovat úrovně detailů polygonové sítě podle požadavku uživatele. [37]

## 4 Výběr a kalibrace kamery

Pro účely diplomové práce byla vybrána kamera Panasonic Lumix DMC-G80. Z důvodu ověření zda-li je tuto kameru možné využít pro fotogrammetrické účely, bylo nutné otestovat přesnost, kterou je možné kamerou dosáhnout.

### 4.1 Popis kamery a objektivu

#### Panasonic Lumix DMC-G80

Fotoaparát se řadí do kvalitní řady fotoaparátů (v dalším textu bude využito častějšího označení ve fotogrammetrii „kamera“) Lumix. Tento konkrétní model disponuje některými funkcemi, které nabízí digitální zrcadlové fotoaparáty vyšších řad, avšak si

zachová poměrně malé rozměry a nižší váhu. Přístroj obsahuje elektronický hledáček, čímž se kategoričsky řadí mezi bezzrcadlové fotoaparáty.

|                            |  |                                  |
|----------------------------|--|----------------------------------|
| <b>Typ</b>                 | <b>Typ</b>   | Digitální bezzrcadlovka          |
|                            | <b>Velikost senzoru</b>  | 17.3 x 13.0 mm (poměr stran 4:3) |
|                            | <b>Montáž objektivu</b>  | Bajonet 4/3                      |
| <b>Snímač obrazu</b>       | <b>Typ</b>   | Live MOS Sensor                  |
|                            | <b>Celkový počet pixelů</b>  | 16,84 megapixelů                 |
|                            | <b>Efektivní počet pixelů</b>  | 16,00 megapixelů                 |
| <b>Stabilizátor obrazu</b> | <b>Typ posunu snímače obrazu (5osý/5stopý), Dual I.S. (kompatibilní s Dual I.S. 2)</b> |                                  |
| <b>Systém záznamu</b>      | <b>Velikost fotografie</b>   | až 4592 x 3448                   |
|                            | <b>Barevný prostor</b>   | sRGB, AdobeRGB                   |
| <b>Ostření</b>             | <b>Typ</b>   | Systém Contrast AF               |
|                            | <b>Režim ostření</b>   | AFS / AFF / AFC / MF             |
| <b>Expozice</b>            | <b>ISO</b>   | min 200, max 25 600              |
| <b>Vyvážení bílé</b>       | <b>Nastavení teploty barev</b>   | 2 500 – 10 000 K ve 100 K        |
| <b>Závěrka</b>             | <b>Typ</b>   | Clona                            |

Tabulka 2: Specifikace kamery dle [39].



Obrázek 8: Tělo přístroje Panasonic Lumix DMC - G80. [40]

## Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II

Je objektiv, který byl spolu s kamerou Panasonic Lumix G80 využit pro snímkování. Objektiv řadí mezi objektivy širokoúhlé.



Obrázek 9: Objektiv Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II. [41]

|            |                             |  |
|------------|-----------------------------|--|
| Vlastnosti | Konstrukce objektivu        | 6 prvků v 5 skupinách (3 asférické členy)        |
|            | Objímka objektivu           | Bajonet 4/3                                      |
|            | Optický stabilizátor obrazu | Ne   |
|            | Ohnisková vzdálenost        | f=14mm (35mm camera equivalent 28mm)             |
|            | Typ závěrky                 | 7 diaphragm blades / Circular aperture diaphragm |
|            | Závěrka                     | F2.5   |
|            | Minimální clona             | F22  |
| Obecné     | Diagonální úhel pohledu     | 75°  |
|            | Velikost filtru             | φ46mm  |
|            | Max. průměr                 | φ55.5mm  |
|            | Hmotnost                    | Přibližně 55 g                                   |

Tabulka 3: Specifikace objektivu Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II. [42]

## 4.2 Kalibrace a testování kamery

### 4.2.1 Důvod kalibrace a testování

Kalibrace kamery je provedena ze dvou důvodů. Tím prvním a hlavním důvodem je zjistit, zda lze kameru použít pro fotogrammetrické účely. Problémem by mohl u zvolené kamery být stabilizátor čipu. Parametry vnitřní orientace pak nemusí být stále. Kamera

disponuje možností „vypnout“ funkci stabilizace čipu, avšak je účelné ověřit, zda se prvky vnitřní orientace přesto nemění.

Druhým účelem testování je zjistit, zda je lepší v programu Photomodeler použít parametry vnitřní orientace kamery určené některou z typů kalibrací, nebo využít nekalibrované parametry kamery a provést automatickou kalibraci během orientace snímků.

U kamer s pevně umístěným čipem a kvalitně určenými prvky vnitřní orientace by takovéto testování postrádalo pravděpodobně smysl, neboť by parametry vnitřní orientace byly určeny kvalitněji z kalibračního pole, nebo kalibrační desky a jejich hodnoty by se příliš neměnily v čase focení.

#### **4.2.2 Kalibrace pomocí prostorového kalibračního pole v učebně B150**

Pro kalibraci kamery bylo využito kalibrační pole nacházející se v místnosti B150 budovy B, která je součástí areálu Fakulty stavební VUT. Pro kalibraci kamery byl využit program Photomodeler scanner v6, který poskytuje rozsáhlé možnosti nastavení pro kalibraci kamery.

Původní kalibrační pole se nenacházelo ve stavu, kdy by jej bylo možné využít pro kalibraci kamery. Neposkytovalo dostatek terčů, které slouží jako navazovací body. Pro využití kalibračního pole bylo nutné tyto terče doplnit. Vlčovací a kontrolní body byly převzaty z původního kalibračního pole spolu s jejich souřadnicemi. Z důvodu, že se u těchto bodů nenachází žádný údaj o přesnosti, byly souřadnicové směrodatné odchylky (pro každou ze souřadnic) po konzultaci z vedoucím diplomové práce odhadnuty přibližně na 2 mm.

##### **Přípravné práce**

Nejprve byla navrhnutá přibližná velikost pixelu v reálném světě. Následovalo rozvržení snímkovacích stanovisek a vyhotovení zkušebních snímků. Z nich byl překontrolován skutečný rozměr pixelů. Následovalo navržení velikosti kódových terčů pro navazovací body, kterými bylo doplněno původní prostorové kalibrační pole. Doporučená minimální velikost průměru vnitřního kruhu kódových terčů je 10 pixelů na snímku. Po vložení parametrů kamery a přibližné vzdálenosti od snímaného objektu program dopočítá minimální požadovaný průměr vnitřního kruhu v milimetrech. Za nejvhodnější a nejehospodárnější byl shledán průměr vnitřního kruhu 30 mm. Terče nesou kromě vnitřního kruhu pro určení středu také vnější kruh. Ten nese údaje o specifickém čísle bodu. Vhodnost použití těchto terčů spočívá zejména při použití velkého množství terčů, kdy program sám rozpozná číslo terče podle jeho kódu a určí jeho snímkové souřadnice.

V případě použití klasických terčů by bylo nutné určovat snímkové souřadnice bodů ručně, což zabere velké množství času.

Při výběru počtu terčů byly k dispozici 4 možnosti. Opět s ohledem na hospodárnost, hustotu a kvalitu vyhotoveného kalibračního pole z terčů, bylo zvolena možnost #3 = 12 bit set. Tato možnost poskytuje 161 terčů.

Následovalo umístění terčů do oblasti původního prostorového kalibračního pole v učebně B150. Uchycení bylo provedeno pomocí univerzálního lepidla, nebo lepící pásky. Střed terče je na snímku určen nejpřesněji, je-li osa záběru kamery přibližně kolmá k rovině terče viz geometrické faktory přesnosti blízké fotogrammetrie uvedené v odstavci 3.6.1. Pro zachování tohoto požadavku v celém rozsahu kalibračního pole byly vytvořeny speciální kartonové stojany, na které se terče nalepily. Ty pak byly umístěny například na podlahu, nebo na boční stěny kalibračního pole. Terče byly umísťovány přibližně v konstantní vzdálenosti od sebe a pokrývaly rovnoměrně prostor mezi vřícovacími body.



Obrázek 10: Ukázka kódového terče umístěného na kartonovém podstavci.

### **Nastavení fotoaparátu**

Pro dosažení co nejlepší kvality snímků, bylo zvoleno manuální nastavení fotoaparátu. Místnost B150 se nachází v přízemí je zde nedostatek denního světla. Pro zlepšení světelných podmínek byly využity halogenové reflektory.



*Obrázek 11: Halogenový reflektor umístěný na geodetickém stativu.*

Pro vyhodnocení kalibrace bylo důležité, aby terče na snímcích byly zachyceny dostatečně ostrě v celém rozsahu snímku, tudíž nastavení clony objektivu bylo přibližně na hodnotě 6. Dalším faktorem ovlivňující kvalitu snímku byla délka expozice. Protože při pořizování snímků, nebyl použit stativ. Délka expozice byla nastavena tak, aby nedošlo při pořízení snímku k rozmazání z důvodu pohybu, nebo cuknutí kamery při stisku spouště. Expozice byla nastavena na 1/40 sekundy.

Dalším faktorem bylo nastavení citlivosti čipu, tzv. „ISO“. Ta byla nastavena tak, aby snímek nebyl přexponovaný, či podexponovaný a kompenzovala nedostatky předchozích dvou nastavení. Proto byla zvolena hodnota ISO 800.

### **Postup snímkování**

Kalibrační menu programu Photomodeler poskytuje možnost kalibrovat kameru pouze z dvanácti snímků, čemuž musela být přizpůsobena volba stanovisek. Snímkování kalibračního pole bylo provedeno celkem ze šesti stanovisek, a na každém stanovisku byl vyhotoven snímek se standardní (horizontální) a vertikální orientací. Snímkování proběhlo ve dvou výškových úrovních. Pro zajištění optimálního výškového rozdílu mezi stanovisky, byl pro snímkování horní úrovně použit hliníkový žebřík. Stanoviska byla volena tak, aby na každém snímku bylo co nejvíce vřícovacích, kontrolních a navazovacích bodů.





*Obrázek 12: Snímek sloužící pro kalibraci kamery. Na snímku je zachyceno nově doplněné kalibrační pole.*

### **Proces kalibrace v programu Photomodeler**

Po spuštění programu byl založen nový projekt, konkrétně „automated coded target project“. V dalších krocích následovalo nastavení typu automatických terčů, maximální a minimální velikosti průměrů terče a dalšího nastavení, volba parametrů kamery a načtení fotek pro kalibraci.

Program automaticky vyhledal terče, určil jejich čísla a provedl referenci viditelných bodů na všech snímcích podle nastavených parametrů. Malou část kódových terčů se nepodařilo určit, nebo referencovat automaticky, proto bylo nutné to provést manuálně. Při manuálním určování bylo využito především sub-pixelového vyhodnocení. Následovala relativní orientace všech snímků a kontrola hrubých chyb v projektu.

Dalším krokem byl import vlíčovacích a kontrolních bodů a určení jejich pozic na snímcích. K tomu byl využit sub-pixelový mód. Jako kontrolní body sloužily původně vlíčovací body, u kterých se využila možnost, aby nevstupovaly do procesu zpracování. Nijak tedy neovlivňovaly tvorbu modelu a proces orientace snímků. Pouze byly u těchto bodů určeny souřadnice v referenčním systému. Ty pak byly porovnány se souřadnicemi určenými tachymetricky totální stanicí.

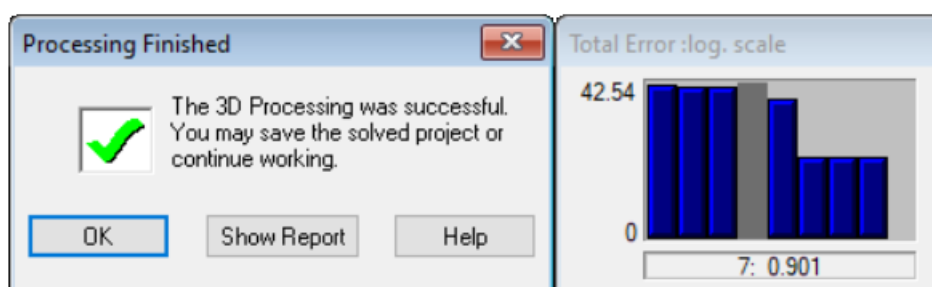
V nastavení kalibrace kamery byly vybrány přídatné parametry, které byly následně řešeny při spuštění kalibrace. Photomodeler nabízí řešení přídatných parametrů: K1, K2, K3, P1, P2. Kalibrace byla vyhotovena s výpočtem všech přídatných parametrů, tak i

kalibrace bez parametru K3. Kalibrace s přídatným parametrem K3 byla použita pouze pro účely ověření, že program ContextCapture využívá stejné jednoty přídatných parametrů jako program Photomodeler. Kalibrace parametrů kamery bez přídatného parametru K3 je považována za výslednou. Důvodem je, že velký počet přídatných parametrů snižuje stabilitu celého řešení [6]. Následně byla provedena absolutní orientace s vyžitím funkce „full field calibration“.

### Vyhodnocení kvality kalibrace

Okno „Total Error“ se vytváří při globální optimalizaci, nebo během kalibrace kamery. Znárodnuje sadu sloupců, přičemž každý z nich udává akumulovanou chybu (aposteriorní) uvnitř 3D modelu. Počet těchto sloupců je roven počtu iterací. Výsledná hodnota aposteriorní chyby je bezrozměrná a uvedena v dolní části okna. Kombinuje zbytkové chyby z parametrů kamery, kontrolních bodů, orientace snímků a nastavení dalších omezení (např. vkládání hran). V případě, že nejsou vloženy žádné kontrolní body, omezení, ani není provedena kalibrace kamery, hodnota této chyby reflektuje celkovou váženou chybu měření navazovacích bodů na snímcích. [43]

Potíže s řešením nastávají, když se sloupce zvětšují, nebo je-li více jak deset sloupců se stejnou výškou. Správné řešení nastává v případě, kdy se sloupce zmenšují. V pořádku je i řešení, které zobrazuje několik sloupců o stejné výšce za sebou, ale celkově se jejich výška zmenšuje. Okno „Total Error“ obvykle zobrazuje dvě části, oddělené šedou oblastí. První sada sloupců udává fázi optimalizace, druhá fázi autokalibrace a optimalizace. Může se stát, že počáteční sloupec v druhé části může být větší, než poslední sloupec v první části, což je v pořádku. [43]



Obrázek 13: Okno dialogu „Total Error“ na konci procesu kalibrace(vpravo).

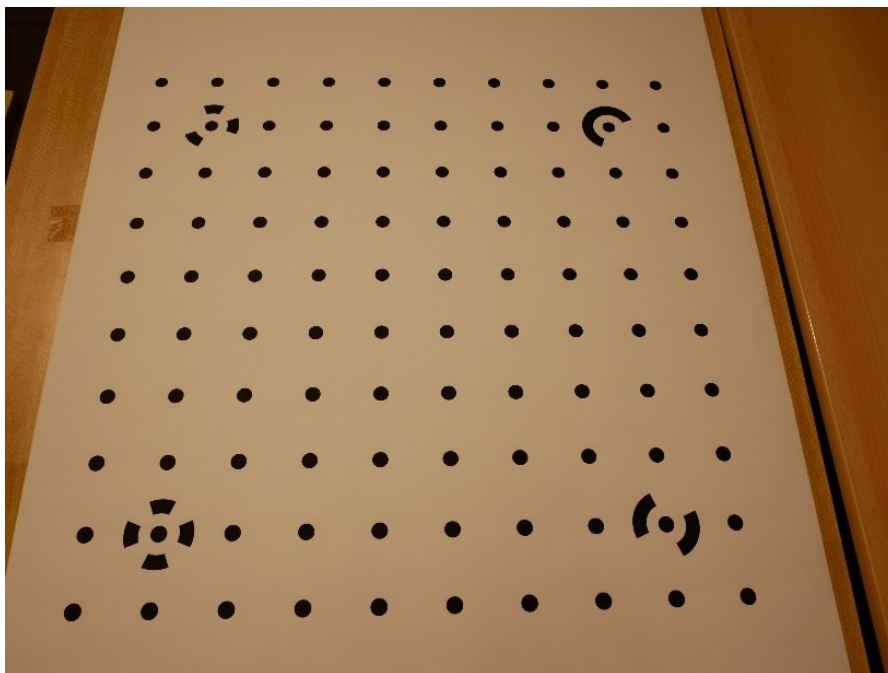
Hodnota na svislé stupnici v pravé části obrázku 13 dosahuje vysokých hodnot, což je pravděpodobně způsobeno nekalibrovanými vstupujícími parametry kamery, které se dosti liší od hodnot kalibrovaných. Výsledek se zdá být v pořádku.

Kalibrační protokol s kalibrovanými parametry kamery a s dosaženou přesností je uveden v příloze č.3.2.1. Pro zjištění skutečně dosažené přesnosti bylo provedeno testování pomocí kontrolních bodů. **Prostorová směrodatná odchylka kontrolních bodů dosáhla hodnoty 0,59 milimetrů.** Ta byla vypočtena na základě rovnice (21).

### 4.2.3 Kalibrace pomocí kalibrační desky

Program photomodeler poskytuje možnost vytisknout kalibrační desku a provést pomocí ní kalibraci kamery. Soubor s kalibrační deskou je uložen ve zdrojové složce programu Photomodeler ve formátu pdf. Kalibrační deska byla vytištěna na plotru v dostatečné velikosti a upevněna na rovný podklad. Obsahovala sto bodů ve čtvercovém rozložení, a pro určení orientace desky sloužily čtyři kódové body.

Následné snímkování proběhlo ze čtyř stanovisek a opět vždy ve dvou pozicích kamery (v horizontální a vertikální pozici). Při snímkování byla kamera umístěna na stativu a pro zhotovení snímku byla použita dálková spoušť.



*Obrázek 14: Ukázka kalibrační desky.*

V programu Photomodeler byl vytvořen speciální projekt přímo pro kalibraci kamery tzv. „camera calibration projekt“. Po importu fotografií bylo zahájeno automatické měření bodů na kalibrační desce. Před samotnou kalibrací bylo nutné editovat některé automaticky vytvořené body a chybně vyhodnocené odstranit.

Závěrem byla provedena kalibrace kamery (bez přídavného parametru K3) a její výsledky uloženy do protokolu. Kalibrační protokol je uveden v příloze č.3.2.2.



parametrů kamery z kalibrační desky a projekt s automatickou kalibrací kamery. Protokoly projektů spolu s testováním přesnosti jsou uvedeny v příloze č.3.3.

| Typ projektu dle parametrů kamery   | Prostorová směrodatná odchylka [mm] |
|---|-------------------------------------|
| Kalibrované parametry kamery získané z prostorového pole  | 3,3                                 |
| Kalibrované parametry kamery získané z kalibrační desky   | 5,8                                 |
| Parametry kamery získány z metadat snímků (provedena automatická kalibrace během procesu aerotriangulace) | 5,9                                 |

Tabulka 4: Testování přesnosti orientace snímků dle použitých parametrů kamery.

Na základě výsledků uvedených v tabulce 4 lze usoudit, že kameru Panasonic Lumix DMC – G80 (s neaktivní stabilizací snímacího čipu) je možné využít pro fotogrammetrické účely.

### 4.3 Přepočítání parametrů kamery do programu ContextCapture

Aby bylo možné využít kalibrované hodnoty parametrů kamery v programu ContextCapture je nutné některé parametry kamery přepočítat do požadovaných jednotek.

#### 4.3.1 Přepočítání souřadnic hlavního bodu snímku

Program ContextCapture vyžaduje vložení souřadnic hlavního bodu snímku v pixelech. Pro určení poměru mezi pixely a milimetry využijeme znalosti šířky a výšky snímacího čipu v obou jednotkách.

$$qw = \frac{Fw [px]}{Fw [mm]} \quad (11)$$

$$qh = \frac{Fh [px]}{Fh [mm]} \quad (12)$$

$$X_p = qw \left[ \frac{px}{mm} \right] \times Fw [mm] \quad (13)$$

$$Y_p = qh \left[ \frac{px}{mm} \right] \times Fh [mm] \quad (14)$$

Kde  $qw$  je označení pro poměr šířky čipu a  $qh$  pro poměr výšky čipu. Dále  $Fh$  značí výšku čipu a  $Fw$  šířku čipu. Souřadnice polohy hlavního bodu snímku ( $X_P, Y_P$ ) byly vypočteny pomocí (13)(14).

| Kalibrované parametry kamery z kalibračního pole |          | Přepočít kalibrovaných parametrů kamery do programu ContextCapture |            |
|--|----------|--|------------|
| Fw [px]  | 4592     | Fw [px]  | 4592       |
| Fh [px]  | 3448     | Fh [px]  | 3448       |
| Fw [mm]  | 17,99852 | Fw [mm]  | 17,99852   |
| Fh [mm]  | 13,51568 | Fh [mm]  | Neuvádí se |
| F [mm]   | 15,01875 | F [mm]   | 15,01875   |
| Xp [mm]  | 8,87347  | Xp [px]  | 2263,91    |
| Yp [mm]  | 6,76950  | Yp [px]  | 1726,97    |

Tabulka 5: Parametry kamery získané na kalibračním poli v učebně B150 a jejich přepočít do programu ContextCapture.

### 4.3.2 Ověření shodnosti jednotek přídatných parametrů

U jednotek přídatných parametrů kamery v programu ContextCapture bylo předpokládáno, že jsou shodné s jednotkami využívanými v programu Photomodeler. V manuálech obou programů jsou uvedené stejné matematické modely pro kompenzaci radiálního a tangenciálního zkreslení [36] [43]. V manuálu programu ContextCapture jednotky přídatných parametrů uvedeny nejsou.

Pro ověření tohoto předpokladu byl založen nový projekt v programu ContextCapture, ve kterém byly využity stejné snímky jako při kalibraci kamery na prostorovém kalibračním poli v učebně B150. Také byly využity stejné navazovací, vřícovací a kontrolní body. Do programu byly vloženy všechny kalibrované parametry kamery získané z prostorového kalibračního pole, kromě parametrů přídatných. Ty následně byly dopočteny v rámci automatické kalibrace během aerotriangulace.

Nově získané přídatné parametry kamery byly porovnány s původními hodnotami. Vzhledem k tomu, že byly použity stejné snímky, se stejnými body, předpokládalo se, že výsledné parametry budou téměř shodné.

| Přídavné parametry | Z programu photomodeler         | Z programu ContextCapture |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| K1                 | 2.064e-004 [mm <sup>-2</sup> ]  | -0.0427 [?]               |
| K2                 | -6.783e-007 [mm <sup>-4</sup> ] | 0.0271 [?]                |
| K3                 | 1.867e-009 [mm <sup>-6</sup> ]  | -0.00763 [?]              |
| P1                 | 8.333e-005 [mm <sup>-2</sup> ]  | -0.00121 [?]              |
| P2                 | 4.002e-005 [mm <sup>-2</sup> ]  | 0.000628 [?]              |

Tabulka 6: Porovnání přídavných parametrů kamery vypočtených programem Photomodeler a ContextCapture na podkladě stejných snímků, vřícovacích, kontrolních a navazovacích bodů.

Nově vypočtené přídavné parametry z programu ContextCapture se řádově liší od hodnot původně vypočtených z programu Photomodeler. Z toho bylo usouzeno, že jednotky přídavných parametrů budou pravděpodobně v obou programech rozdílné. Možné také je, že v manuálech některého z programů není popsán skutečně využitý matematický model pro kompenzaci radiálního a tangenciálního zkreslení.

### 4.3.3 Závěr a navržené řešení

Z důvodu nemožnosti jasně určit přepočtení vztah mezi přídavnými parametry kamery byly tyto parametry dopočteny v programu ContextCapture obdobně jako u testovacího projektu, avšak za vstupní parametry kamery byly využity kalibrované hodnoty kamery, které neobsahují parametr K3. Hodnoty přídavných parametrů pak byly nově dopočteny v průběhu aerotriangulace. Tyto přídavné parametry spolu s původními parametry kamery jsou považovány za finální, a byly využity pro tvorbu 3D modelu objektu v programu ContextCapture. Výsledky jsou uvedeny v příloze 3.4.

## 5 Geodetické práce

Aby bylo možné výsledný 3D model umístit a orientovat v systému JTSK a Bpv, je nutné zaměřit dostatečný počet vřícovacích bodů v těchto systémech. Pro tyto účely bylo využito měřických sítí, nacházejících se v lokalitě AdMaS.

V následujícím textu budou popsány práce, které jsem vykonal, nebo na kterých jsem se podílel a částečně také nezbytné informace o převzatých podkladech z jiných projektů.

Pod vedením Ing. Miroslavy Kubíčkové jsem se podílel na zaměření a částečném budování měřické sítě sloužící pro projekt „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44]. Také jsem se podílel na podrobném měření a zpracování podrobných bodů k tomuto projektu.

## 5.1 Tvorba měřické sítě

V lokalitě AdMaS se nachází dvě měřické sítě, které vychází ze čtyř bodů určených statickou metodou GNSS. Stabilizace těchto bodů je provedena měřickými hřeby. Doba observace na každém bodě byla přibližně 80 minut. První síť spolu s výchozími body byla zbudována pro účely specifického výzkumu „FAST-S-19-5704 Geometrická přesnost mobilních mapovacích systémů“. [45]

| Typ                             | $m_{xy}$ [mm] | $m_H$ [mm] |
|---------------------------------|---------------|------------|
| Páteřní síť                     | 0,80          | 0,53       |
| Celá síť včetně podrobných bodů | 1,66          | 1,42       |

Tabulka 7: Informace o dosažené přesnosti. [45]

Druhá síť slouží pro účely projektu „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44]. Body sítě jsou stabilizovány dřevěnými kolíky v nezpevněném terénu, nebo nastřelovacími hřeby na pevném podloží. Pro jejich zvýraznění v terénu je použit barevný sprej, kterým jsou nabarvené hlavy dřevěných kolíků, nebo podloží, v blízkém okolí nastřelovacích hřebů. Některé terče použité pro letecké snímkování slouží jako vrcholy měřické sítě. Zaměření sítě bylo provedeno přístrojem Trimble S8 (v.č. 98810133) v mezidobí od 17.4.2019 do 10.3.2020. Předmětem měření byly vodorovné směry, zenitové úhly a délky, které byly určeny oboustranně měřením na odrazný hranol.



Obrázek 16: Ukázka zřízení měřického stanoviště na střeše budovy P1.



## 5.2 Umístění vlíčovacích bodů

V areálu AdMaS se nachází tři typy terčů. Nejčtenějšími jsou pevné, čtvercové, černobílé terče o rozměrech 190x190 a 200x200 milimetrů. Menší z nich jsou vyrobeny z tvrzeného plastu a slouží primárně pro účely leteckého snímkování. Stabilizovány jsou na nezpevněném podloží pomocí speciální dřevěné konstrukce zaražené do zeminy, nebo jsou nalepeny na zpevněném rovném podloží např: na železobetonovém poklopu od kanalizační šachty.



*Obrázek 17: Fotogrammetrický terč umístěný na speciální konstrukci.*

Větší z pevných čtvercových terčů jsou vyrobeny z ocelového plechu. Plní primárně účel vlíčovacích bodů pro mobilní mapování. Nachází se na hlavních budovách, nebo na lampách v areálu. K lampám a budovám jsou připevněny speciálními úchyty.



*Obrázek 18: Příklad umístění terčů na budovách.*

Poslední typ čtvercových terčů má přibližně velikost 20x20 cm. Opět slouží primárně pro účely mobilního mapování, proto jsou tyto terče umístěny po okrajích živičných komunikací v areálu. Terče jsou stabilizované nastřelovacím hřebem a signalizované pomocí bílého nástřiku aplikovaného přes čtvercovou šablonu.



Obrázek 19: Příklad terče umístěného na živičných komunikacích.

### 5.3 Podrobné měření

Terče sloužící pro projekt „FAST-S-19-5704 Geometrická přesnost mobilních mapovacích systémů“ [45] byly zaměřeny jeho účastníky tachymetrickou metodou s využitím hranolového a bez hranolového měření délek podle umístění terčů. Veškeré terče jsou určeny dvakrát z odlišného stanoviska.

Terče pro projekt „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44] byly zaměřeny tachymetrickou metodou v období od 3.5.2019 do 10.3.2020. Některé terče byly zaměřeny během budování měřické sítě. Dvojití zaměření z odlišných stanovisek je provedeno u 92 podrobných bodů a výsledné souřadnice jsou určeny průměrem. Deset bodů je určeno pouze jedenkrát a tyto body slouží především pro kontrolní účely.

|   |       |
|---|-------|
| Výběrová směrodatná odchylka v souřadnici Y $S_Y [m]$ | 0,010 |
| Výběrová směrodatná odchylka v souřadnici X $S_X [m]$ | 0,010 |
| Výběrová směrodatná výšková odchylka $S_H [m]$        | 0,006 |

Tabulka 8: Dosažená přesnost podrobných bodů převzatých z projektu „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44]

## 5.4 Zaměření kontrolních bodů

Kontrolní tachymetrické měření proběhlo dne 12.2.2020. K měření byl využit přístroj Trimble M3 v.č. D036268. Měření vychází z bodů měřické sítě zbudované pro účely mobilního mapování.

Měření bylo provedeno tachymetrickou metodou s využitím bez hranolového měření délek a v první poloze dalekohledu. Předmětem měření byly jednoznačné a dobře identifikovatelné body, které je možné určit na snímcích a lze je v terénu zaměřit danou metodou.

Kontrolní body byly zvoleny rovnoměrně na fasádě budovy H. Několik kontrolních bodů se také nachází v jejím blízkém okolí. Na střeše budovy H se kontrolní body nenacházejí.

### 5.4.1 Kódování bodů

Při tachymetrickém měření kontrolních bodů nebyl vyhotovován náčrt, ale bylo provedeno kódování bodů. Z důvodu obtížného popisu polohy každého bodu bylo využito jednoduchého kódování. Přibližná poloha jednotlivých kontrolních bodů ať už na snímcích, nebo na 3D modelu byla zjištěna importem souřadnic kontrolních bodů do programů, v kterých probíhalo vyhodnocování. Přesná pozice bodu pak byla dána jednoduchým kódem, nebo celým názvem.



Obrázek 20: Ukázka rozmístění kontrolních bodů na fasádě budovy H. Vizualizace byla provedena v programu Cloud Compare.

Při kontrolním měření se typy některých bodů objevovaly opakovaně. Příkladem mohou být rohy jednotlivých segmentů fasádních obkladů, nebo rohy oken. Přesné označení rohu je pak dáno kódovým označením např. LH – levý horní roh. K měření byla vyhotovena tabulka kódů.

## 5.5 Výpočetní práce

Souřadnice sítí a terčů byly převzaty z jednotlivých projektů [45] [44]. Souřadnice kontrolních bodů a terčů sloužících pro leteckou fotogrammetrii byly vypočteny v S-JTSK a výšky v Bpv. K výpočtu byl využit program Groma v.12, ve kterém byly zavedeny matematické korekce. Fyzikální korekce byly zavedeny v přístrojích před měřením.

Pro import kontrolních bodů do programu ContextCapture bylo nejprve nutné transformovat souřadnice z S-JTSK do S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514), který podporuje program ContextCapture. Převod mezi systémy byl proveden jednoduše vynásobením souřadnic X, Y hodnotou -1.

## 5.6 Použité přístroje a pomůcky

### **Totální stanice Trimble M3 (v.č.D036268)**

Je mechanická totální stanice, disponující úhlovou přesností 2" a délkové přesnosti  $2+2ppm \times d$  mm. Přístroj je vybaven softwarem Trimble Access, který nabízí uživatelsky přátelské rozhraní. Tento přístroj byl využit při kontrolním měření. [46]

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Přesnost měření úhlů dle DIN 18723 (vodorovná a zenitová) | 2"/0,5 mgon               |
| Délková přesnost na hranol                                | $\pm(2+2ppm \times d)$ mm |
| Délková přesnost při bez hranolovém měření                | $\pm(3+2ppm \times d)$ mm |

Tabulka 9: Parametry Totální stanice Trimble M3 („d“ vyjadřuje měřenou vzdálenost). [47]



Obrázek 21: Totální stanice Trimble M3.

### **Totální stanice Trimble S8 (v.č. 98810133)**

Je robotická totální stanice od firmy Trimble. Díky servomotorům umožňuje využít funkce jako je autolock, nebo bezdrátové ovládání pomocí kontroleru. Pro běžné práce přístroj nabízí režim měření DR plus. Při vysokých požadavcích na přesnost nabízí režim DR HP, který dosahuje úhlové přesnosti  $0,5''$  a délkové přesnosti  $1+1ppm \times d$  mm. [47] Přístroj je taktéž vybaven softwarem Trimble Acces.

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Přesnost měření úhlů dle DIN 18723         | $0,5''/0,15$ mgon         |
| Délková přesnost na hranol                 | $\pm(1+1ppm \times d)$ mm |
| Délková přesnost při bez hranolovém měření | $\pm(3+2ppm \times d)$ mm |

Tabulka 10: Parametry totální stanice Trimble S8 („d“ vyjadřuje měřenou vzdálenost). [47]



Obrázek 22: Přístroj Trimble S8 během měření nad areálem AdMaS.

### Použité pomůcky

- Dřevěné stativy pro totální stanici a odrazné hranoly
- Odrazné hranoly
- Svinovací metr o délce 5 m

## 6 Fotogrammetrické práce

### 6.1 Přípravné práce pozemního snímkování

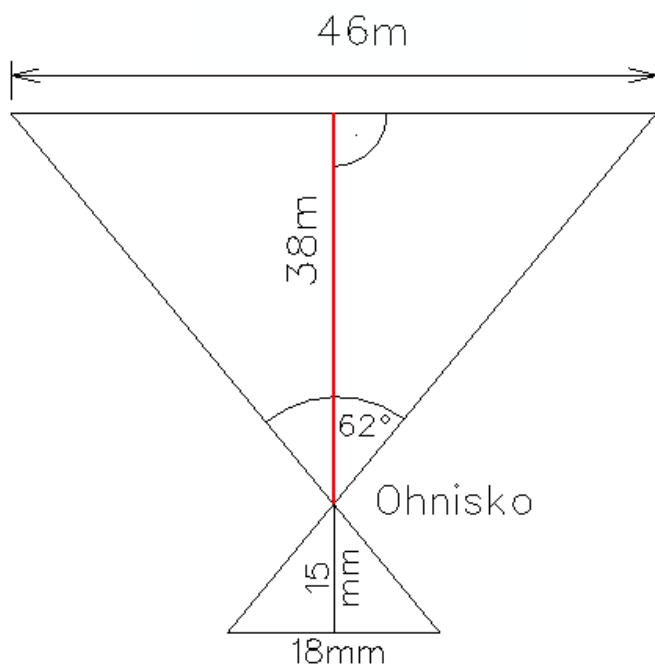
#### Plánované rozlišení a geometrie snímkování

Pro odhad kvality 3D modelu, bylo nutné naplánovat jakou velikost bude mít pixel v reálném světě. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce bylo zvoleno rozlišení minimálně 0,01 metru na pixel. Aby bylo zaručeno takovéto rozlišení, bylo nutné určit maximální přípustnou vzdálenost od snímkaného objektu.

#### Plánování geometrie snímkování

Použitá kamera se snímacím čipem o rozměrech přibližně **18,00 x 13,52 mm** dokáže pořizovat snímky v **rozlišení 4592 x 3448 pixelů**. Spolu s touto kamerou je využit

**objektiv s ohniskovou vzdáleností přibližně 15,02 mm.** Pro rozlišení 0,01 [m/px] bude tedy širší strana snímku zobrazovat 45,92 m ve skutečnosti.



Obrázek 23: Znárodnění situace (při pohledu shora) pro výpočet maximální vzdálenosti od objektu.

Ze znalostí těchto parametrů dopočteme maximální vzdálenost od objektu dle (15), při které ještě bude splněna podmínka požadovaného rozlišení.

$$\frac{15,02}{18,00} \times 45,92 \doteq 38 \text{ m} \quad (15)$$

Podle návodu „Acquisition Guide“ pro snímkování a vyhodnocení snímků objektu v programu ContextCapture, je doporučeno: [48]

- Provádět snímkování z několika úrovní od objektu
- Snímkovat stejnou část objektu alespoň ze 3 různých snímkovacích pozic
- Úhel mezi po sobě jdoucími snímky na jednom stanovisku se nesmí lišit více jak o 15°
- Překryt čelních snímků na každém stanovisku musí být minimálně 60%
- Při zalomení objektu, stanoviska plynule přechází po kružnici. Maximální úhel pootočení stanoviska vůči středu kružnice dosahuje 15°

Posun po sobě jdoucích stanovisek snímků je závislý na přímé vzdálenosti stanoviska od objektu. Na této vzdálenosti je také závislá délka posunu stanoviska při snímkování zalomené části objektu. V areálu se vyskytují místa, která nedovolují udržovat optimální

konstantní přímou vzdálenost od objektu. V některých ojedinělých, případech nelze provést snímkování z větší vzdálenosti než pět metrů. Je tedy nutné při rozdílných vzdálenostech od objektu délky těchto posunů upravovat.

Výpočty všech parametrů potřebných pro zajištění optimální geometrie snímkování jsou uvedeny v příloze 4.1.1.

### **Stanovení priority snímkových objektů a výběr vhodného dne pro snímkování**

Podstatnou úlohou bylo naplánování snímkování jednotlivých objektů dle jejich pořadí. Za prioritní byly považovány snímky budovy H a přilehlé rozvodny elektrické sítě. Následně proběhlo snímkování dalších budov areálu.

Nejdůležitější faktor pro zahájení snímkování byl dán konkrétním stavem počasí. Nejlepších fotogrammetrických výsledků je dosahováno při tzv. difuzního osvětlení. Takovéto podmínky nastávají, při zvýšené oblačnosti, kdy je elektromagnetické záření ze slunce rozptýleno v oblačnosti. Při takovémto osvětlení se nevytváří ostré stíny, které by mohly dělat potíže při vyhodnocování snímků.

Pro zhodnocení optimálních podmínek a výběr snímkovacího dne bylo s výhodou použito meteorologických mobilních aplikace ČHMÚ. Pomocí těchto aplikací byl pozorován stav předpovědi oblačnosti a celkového počasí, vždy večer před předpovídaným dnem. Tím bylo dosaženo relativně spolehlivých výsledků předpovídaných jevů na jejichž základě byly vybírány dny vhodné pro snímkování.

### **Podklady před focením**

Jako podklad pro snímkování sloužil, přehledný náčrt všech bodů v areálu AdMaS. [45]

### **Příprava na snímkování**

Pro snímkování byla využita kamera Panasonic Lumix DMC-G80 spolu s objektivem Panasonic Lumix G 14mm F2.5 II ASPH.

Aby se během snímkování zamezilo změně parametrů vnitřní orientace kamery, bylo nutné po celou dobu snímkování (v rámci každé budovy) zachovat kameru zapnutou. Vzhledem k rozsáhlosti snímkaného území bylo nutné nachystat paměťovou kartu pro danou kameru s dostatečnou záznamovou kapacitou. Byla použita paměťová karta SanDisk Extreme SDHC 32GB 90MB/s Class 10 UHS-I U3 V30.

S kapacitou záznamového úložiště souvisí i formát záznamu, který je na toto úložiště zapisován. Po dohodě s vedoucím diplomové práce byl zvolen formát JPG.



Posledním úkolem před samotným snímkováním, který bylo možné provést dopředu bylo nastavení ostření na manuální a vypnutí stabilizace snímacího čipu kamery.

## 6.2 Pozemní snímkování

Po příjezdu do areálu AdMas bylo potřebné kameru nastavit podle aktuálních podmínek prostředí. Ve snímkovací dny bylo oblačno a zataženo. Světlo bylo rozptýlené tzv. difuzní. Nastavení kamery bylo provedeno dle daných podmínek.

Pro zachování hloubky ostrosti v co největším rozsahu snímku, bylo nastaveno clonové číslo na hodnotu 9. Hodnota ISO byla nastavena na 200. Čas expozice se měnil během snímkování dle aktuálních podmínek. Vyvážení bílé barvy na snímku bylo nastaveno automaticky. To se později při zpracování snímků ukázalo jako nevhodné.

Na prvním stanovisku, které bylo zvoleno v takové vzdálenosti od objektu, v jaké bude většina snímků, bylo nastaveno manuální zaostření. To se již v průběhu snímkování objektu neměnilo. Následně se provedlo snímkování podle předem připravené trasy. Snímkovalo se převážně ve standardní, horizontální poloze kamery. V některých případech bylo nutné snímkovat v poloze vertikální. Většinou to bylo v místech, kde nebylo možné udržet si optimální vzdálenost od objektu.

Geometrie snímkování byla provedena dle 6.1. Vzdálenosti mezi snímkovými stanovisky byly krokovány. Počet snímků na stanovisku se pohyboval od jednoho až po pět. Každá z budov byla nasnímána ve dvou vzdálenostních úrovních. Obě úrovně však byly voleny tak, aby splňovaly minimální požadované rozlišení elementu na snímku. Po nasnímání objektu byla vždy provedena kontrola, zda se omylem nezměnily některé z předem nastavených parametrů.

Byly pořízeny snímky všech budov nacházejících se v areálu AdMaS. Nebylo totiž jisté, jak dlouhou dobu budou v areálu AdMaS umístěné terče.

### **Kontrola snímků a rozložení stanovisek**

Snímky byly zkopírovány na pevný disk počítače, kde proběhla vizuální kontrola kvality snímků a odstranění nesouvisejících, nebo nekvalitních snímků. Vizuální kontrola rozložení stanovisek proběhla v programu ContextCapture po dokončení předběžné aerotriangulace.

## 6.3 Snímkování pomocí UAS

Letecké snímky areálu AdMaS pořízené pomocí UAS, byly pro účely diplomové práce poskytnuty Ing. Miroslavou Kubíčkovou.

### 6.3.1 Přípravné práce

Rozlišení snímků bylo voleno dle potřeb projektu „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44]. Výška letu byla určena dle požadovaného minimálního rozlišení snímaného elementu obdobně jako je tomu v 6.3.1. K pořízení svislých leteckých snímků byla využita speciální aplikace, která umožňuje automatizaci svislého snímkování.

Pro snímkování byl vybrán vhodný den, kdy povětrnostní podmínky umožňovaly vzlet dronu a světelné podmínky byly vhodné pro provedení snímkování.

### 6.3.2 Použitý UAS

Pro účely snímkování byl využit dron DJI Phantom 4 Pro spolu s ovládacím zařízením a tabletem pro zobrazení snímaných dat kamerou dronu v reálném čase. Dron disponuje senzory, které umožňují identifikovat překážky v pěti směrech [49], díky čemuž lze pilotovat dron i ve stísněných prostorech. Kamera dronu je umístěna na třiosém stabilizátoru ve spodní části dronu a lze s ní pořizovat snímky v rozlišení 5472x3648 pixelů. V těle dronu je zabudována inerciální měřicí jednotkou (IMU) a GNSS přijímač. Díky tomu poskytuje pokročilejší funkce, jako je návrat dronu do výchozí pozice, z které startoval. Phantom 4 Pro nabízí tři letové režimy podle dostupnosti GNSS signálu, nebo manévrovatelnosti dronu. Pro fotogrammetrické potřeby se jeví jako nejvhodnější režim P, který využívá systém detekce překážek a GNSS. [50]



Obrázek 24: Snímek zachycuje Phantom 4 Pro před zahájením snímkování v areálu AdMaS.

|  |                             |                                |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>Parametry dronu<br/>Phantom 4 Pro</b> | Váha                        | 1388 g                         |
|  | Maximální rychlost          | 72 km/h                        |
|  | Odolnost proti větru o síle | 10 m/s                         |
|  | Kapacita baterie            | 6000 mAh                       |
|  | Doba letu s jednou baterií  | 30 minut                       |
|  | Podpora satelitních systémů | GPS/GLONASS                    |
|  | Rozsah detekce senzorů      | 0,7-30m                        |
| <b>Kamera</b>                            | Senzor                      | 1'' CMOS                       |
|  | Efektivní počet pixelů      | 20 megapixelů                  |
|  | Úhel záběru                 | 84 °                           |
|  | ISO (manuální režim)        | 100-12800                      |
|  | Maximální rozlišení snímku  | 5472 × 3648                    |
|  | Clona                       | f2,8 - f11                     |
|  | Uzávěrka                    | 8 - 1/8000s                    |
|  | Formát snímků               | JPEG, DNG (RAW),<br>JPEG + DNG |

Tabulka 11: Základní parametry dronu Phantom 4 Pro a jeho kamery. [50]

### 6.3.3 Snímkování

Snímkování bylo provedeno za vhodného počasí vyškoleným pilotem dne 6.4.2019. Předmětem snímkování byl celý areál AdMaS. Snímkování jsem se účastnil pouze jako pozorovatel. Při snímkování byly pořízeny svislé snímky areálu ve třech letových

hladinách dle požadované velikosti elementu. Svislé letecké snímky byly vyhotoveny automatizovaně na základě předem vytvořeného plánu letu. Dále byly pořízeny šikmé snímky budov za pomoci manuální pilotáže dronu. Ke konci snímkování začalo svítit přímé sluneční světlo, což mělo negativní vliv na kvalitu snímku. Tyto snímky byly následně editovány před jejich vyhodnocením.



Obrázek 25: Šikmý snímek budovy H pořízený dronem DJI Phantom 4 Pro. [44]

## 7 Vyhodnocení snímků a tvorba modelu

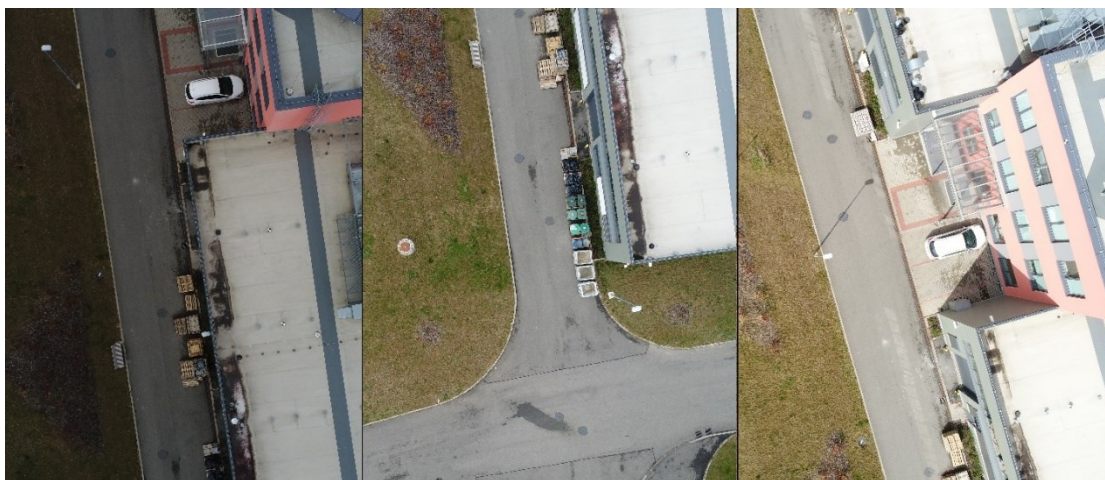
### 7.1 Editace snímků

#### 7.1.1 Radiometrické korekce snímků

Jednalo se korekci světelných podmínek a barev na snímcích s cílem dosáhnout co největší homogenity mezi na sebe navazujícími se snímky, ale i mezi soubory snímků z letecké a pozemní fotogrammetrie. Na nevhodně osvětleném snímku je obtížné, nebo není možné správně určit snímkové souřadnice bodů. Také je snížena kvalita textur výsledného 3D modelu. Korekce bylo nutné provést, protože se u některých snímků měnily světelné podmínky, což mělo negativní vliv na kvalitu snímků. Většina snímků měla v průběhu pořízení obdobné světelné podmínky a tvoří základní soubor. Na parametry těchto snímků jsou pak upravovány ostatní snímky, které se od nich výrazně

liší jasně nebo barvou. Snímky byly vždy upravovány ke snímkům blízkým (v pořadí), u nichž jsou světelné podmínky v pořádku.

Největší rozdíly byly zaznamenány při snímkování pomocí dronu, kdy se zřetelně střídaly světelné podmínky, ke konci snímkování. Editace těchto snímků byla provedena v programu Irfanview, v kterém bylo využito možnosti hromadné editace. Snímky s obdobně lišícími se parametry byly editovány hromadně. Editované snímky byly rozděleny na dva soubory. První obsahoval výrazně tmavší snímky, než základní soubor tzv. pod-světlené snímky. V druhém byly snímky výrazně světlejší tzv. pře-světlené snímky. Snímky, extrémně odlišné od ostatních byly editovány zvlášť, nebo byly vyloučeny a do vyhodnocení nevstoupily.



Obrázek 26: Porovnání světelných podmínek na snímcích („vlevo: „podsvětlené“, uprostřed: správně zachycený snímek, vpravo: „přesvětlené“). [44].

V programu Irfanview byly editovány tyto parametry:

- Kontrast
- Jas
- Sytost
- Korekce gamma
- RGB spektrum

Všechny snímky byly po úpravě uloženy v maximální kvalitě ve formátu JPG v původním rozlišení. Potřebné bylo také dbát na zachování originálních metadat snímků. Především šlo o orientaci snímků, která je pro správné vyhodnocení stěžejní.

### 7.1.2 Výsledky editace

Na obrázku 28 a 29 lze pozorovat viditelný rozdíl textur, mezi modely z původních snímků a radiometricky editovaných. V některých částech fasády modelu je zlepšení po

editaci výraznější, v některých méně. Na stěnách přilehlých k pravému rohu podlouhlé strany budovy H na *obrázku 28* je stále vidět barevné fleky. Ty jsou způsobené rozdílným nastavením expozice pro každou stěnu z důvodu odlišného nasvětlení, i když bylo snímkování provedené za difuzního světla. Delší strana budovy H byla mírně ve stínu, kdežto kratší strana byla osvětlena přímo.



*Obrázek 27: 3D Model vytvořený z původních snímků pozemní fotogrammetrie.*



*Obrázek 28: 3D Model vytvořený ze snímků pozemní fotogrammetrie radiometricky editovaných.*

### 7.1.3 Zhodnocení editace

Dle výsledků lze říci, že radiometrickými korekcemi lze dosáhnout lépe vyhodnocených textur a odstranit tak částečně barevné skvrny, které se reálně na objektu neobjevují. Nelze však odstranit veškeré nedostatky textury. Změna geometrie 3D modelu po radiometrických úpravách snímků nebyla zaznamenána.

V případě předpokladu že snímky bude nutné radiometricky upravovat, je vhodnější před samotným snímkováním zvolit formát uložení dat RAW, který zachovává více dat o snímku, a lépe se pak se snímkem pracuje. Snímky použité v této diplomové práci jsou uloženy ve formátu JPG.

## 7.2 Tvorba 3D modelu v programu ContextCapture

### 7.2.1 Orientace snímků

Po založení nového projektu v programu ContextCapture byly nahrány snímky z letecké a pozemní fotogrammetrie do jednoho projektu. Tyto snímky jsou rozděleny do dvou skupin podle způsobu pořízení. Při letecké a pozemní fotogrametrii nebyla použita stejná kamera, tudíž parametry jednotlivých kamer jsou rozdílné. Parametry kamery dronu byly převzaty dle specifikací kamery z *tabulky 11*.

Během aerotriangulace byly využita možnost kalibrace obou kamer. U snímků pořízených kamerou dronu lze předpokládat dosažení lepších výsledků při využití automatické kalibrace kamery během aerotriangulace. K tomuto předpokladu, vedl fakt, že snímky jsou kvalitně pořízeny a pro určení parametrů kamery je využito 90 snímků. V případě kamery Panasonic Lumix DMC - G 80 jsou využity kalibrované parametry kamery z prostorového kalibračního pole určené v programu photomodeler spolu s přídatnými parametry kamery získané z prostorového kalibračního pole v programu ContextCapture. Parametry vnitřní orientace kamery spolu s přídatnými parametry jsou optimalizovány během aerotriangulace. Odůvodnění využití těchto parametrů a nastavení je podrobně popsáno v příloze č.1.

Po vytvoření dostatečného počtu navazovacích bodů a určení jejich snímkových souřadnic byla provedena relativní orientace snímků pomocí aerotriangulace. Výsledky byly zkontrolovány v protokolu kvality aerotriangulace a následně byly opraveny nalezené chyby.

Další činnost spočívala v importu souřadnic vřícovacích a kontrolních bodů v souřadnicovém systému S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514) s výškami v Bpv. Těmto bodům se určily snímkové souřadnice na snímcích, na kterých byly viditelné a dobře identifikovatelné. Po doměření snímkových souřadnic u všech vřícovacích a

kontrolních bodů byla provedena absolutní orientace snímků. Ta byla provedena nepřímo s využitím vlíčovacích bodů. Po vyhotovení absolutní orientace všech snímků byla provedena kontrola v protokolu kvality aerotriangulace.

### **7.2.2 Protokol kvality aerotriangulace (Quality Report)**

Po dokončení procesu výpočtu aerotriangulace byl automaticky vygenerován protokol o dosažené přesnosti, který poskytuje podrobné informace o projektu. Ten je uveden jako příloha č.4.2 diplomové práce.

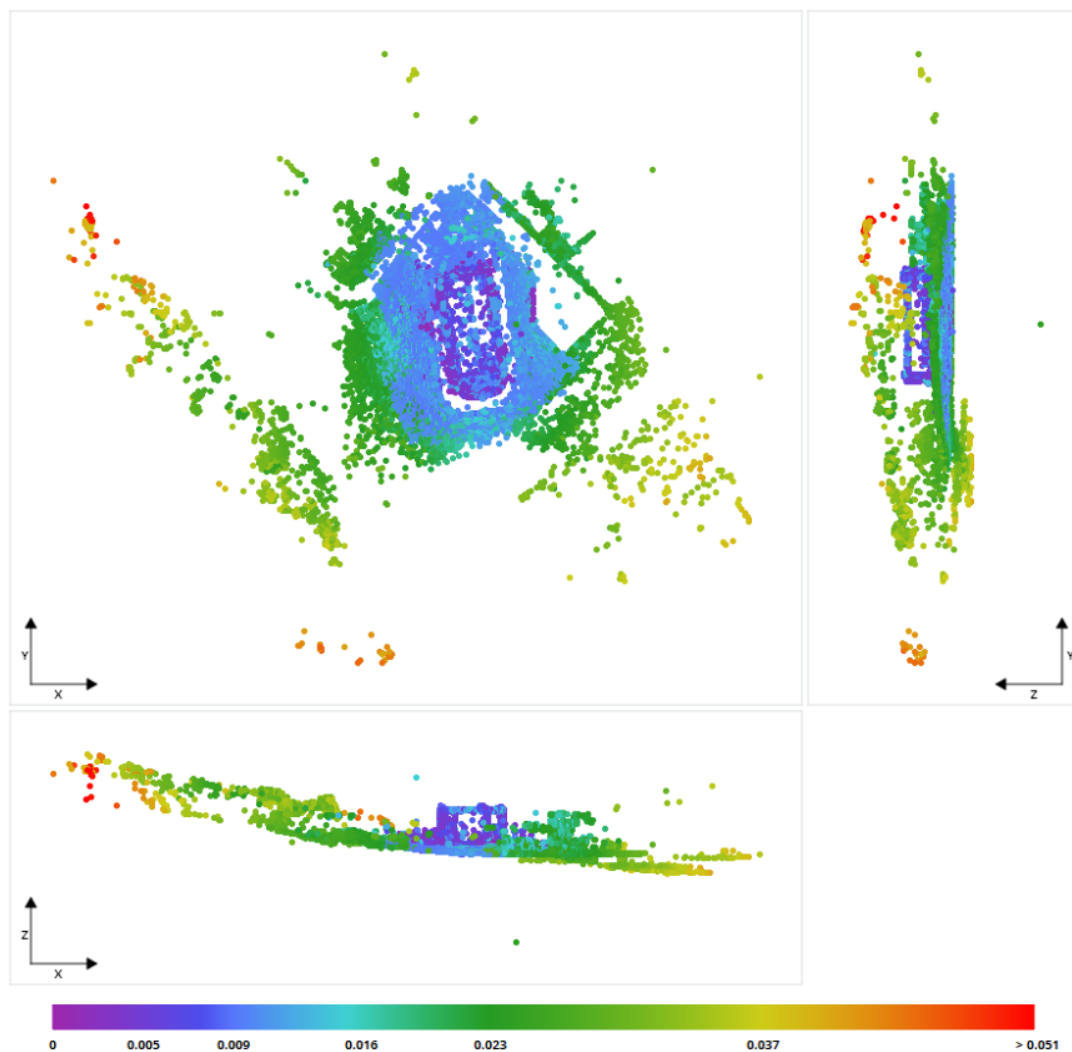
První oddíl reportu s názvem „Project Summary“ udává základní informace o projektu. Mezi nejdůležitější patří název projektu, počet využitých snímků a počet navazovacích bodů.

Druhý oddíl popisuje informace o kalibraci kamery. Hodnoty parametrů kamery jsou zde uvedeny na zaokrouhlený počet desetinných míst. Nezaokrouhlené hodnoty jsou uvedeny v informacích o použité kameře v daném projektu.

Třetí oddíl reportu se zabývá pozicí snímků v prostoru. Zde lze najít schéma rozložení pozic snímků s elipsami chyb, schéma zobrazující rozdíly vzdáleností mezi pozicemi snímků z metadat a z aerotriangulace, nebo schéma znázorňující překryt míst podle počtu snímků na, kterých se dané místo vyskytuje.

Čtvrtý oddíl udává informace o automaticky generovaných navazovacích bodech a jejich přiřazení ke snímkům. Zajímavou informací je například medián vyjadřující počet automaticky generovaných navazovacích bodů na snímek. Zde dosahuje hodnoty 354 bodů.





Obrázek 29: Schéma udává rozlišení automaticky vygenerovaných navazovacích bodů. Stupnice je uvedena v m/px.

Dodržení minimálního rozlišení elementu na snímku, stanoveného před zahájením prací bylo zkontrolováno podle schématu (obrázek 29 a 30) udávající dosažené rozlišení automaticky vygenerovaných navazovacích bodů. To lze považovat za směrodatné z důvodu velkého množství a relativně rovnoměrného rozložení těchto bodů na snímcích. Dle schématu je dosaženo rozlišení v oblasti fasády budovy přibližně 0,005 m na pixel. Požadované minimální rozlišení elementu bylo stanoveno tak, aby jeden pixel na snímku nebyl ve skutečnosti větší jak 1 centimetr což bylo splněno.

Četnost vlíčovacích, kontrolních a manuálně určených navazovacích bodů udává pátý oddíl reportu „Surveys“. V projektu bylo použito 33 vlíčovacích bodů („control points“), 51 kontrolních bodů („check points“) a 316 manuálně měřených navazovacích bodů („user tie points“).

|   | Vlícovací body [m] | Kontrolní body [m] |
|---|--------------------|--------------------|
| Prostorová směrodatná odchylka<br>(Global RMS - 3D error) | 0,0038             | 0,0131             |

Tabulka 12: Dosažená přesnost aerotriangulace. Hodnoty převzaty z automaticky vygenerovaného reportu.

### 7.2.3 Tvorba modelu

Za referenční systém byl zvolen S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514). Hranice modelovaného prostoru byly nastaveny tak, aby modelovaný prostor zachycoval budovu H, rozvodnu elektrické sítě a přilehlé okolí. K výběru hranic oblasti napomohlo schéma uvedené na obrázku 29. Hranice byly zvoleny tak, aby byl splněn požadavek minimálního rozlišení elementu na snímku. Program umožňuje vytvářet hranice modelované oblasti pouze ve tvaru kvádrů. Podrobnější ořezání 3D modelu bylo provedeno v programu Meshmixer.

Počítač, na kterém je 3D model generován disponuje RAM pamětí s kapacitou 64 GB. Pro vygenerování 3D modelu je potřeba kapacita RAM paměti 170 GB. Aby bylo možné 3D model na tomto počítači vygenerovat, bylo využito nastavení „adaptive titling“, které umožňuje 3D model generovat po jednotlivých částech.

Na kartě „processing settings“ byla ponechána základní nastavení. Změněno bylo nastavení „Geometric precision“, na hodnotu „Ultra“. Toto nastavení bylo zvoleno z důvodu, že při nastavení „High“ se v horní části fasády 3D modelu budovy H objevovaly otvory. Nastavením Ultra se tak částečně eliminovaly a byl zaznamenán pouze jeden otvor. Takovéto nastavení je však vykoupeno většími nároky na RAM paměť. Při nastavení „High“, by bylo možné generovat model vcelku, z důvodu nižších paměťových nároků.

Pro odstranění těchto otvorů bylo napřed vyzkoušeno použít nastavení „Hole - filling- Fill all holes except at the boundaries“, které má vyplnit všechny otvory v modelu. Při spuštění procesu tvorby 3D modelu se generování zastavilo přibližně na hodnotě padesáti procent a model se již dále netvořil.



*Obrázek 30: Otvory na fasádě budovy H.*

Nastavení „color equalization“ bylo zvoleno na Blockwise. Dle nápovědy programu má dosáhnout ve většině případů lepších výsledků, než nastavení standard, avšak výsledek se při změně těchto nastavení příliš neliší [36].

Účel 3D modelu byl zvolen jako „3D mesh for retouching“. Pro 3D model byl vybrán formát OBJ neobsahující texturu. Souřadnicový systém byl nastaven na S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514). Dále byl vyhotoven 3D model s nastavením „3D mesh“ a formátem OBJ s texturami. Kvalita textur byla ponechána na nejvyšší dostupnou hodnotu. Tento 3D model pak sloužil pouze pro lepší orientaci a hledání nevhodně vyhodnocených částí modelu. Souřadnicový systém byl ponechán stejný jako v předchozím kroku.

### **7.3 Editace modelu**

Předmětem editace a čištění modelu byly prvky u nichž bylo jasně znatelné, že jsou chybné, nebo nevhodně vyhodnocené. Editovány byly i některá okna na budově H z důvodu jejich chybného vyhodnocení.

### 7.3.1 Výběr softwaru pro editaci

Původně bylo zamýšleno editovat geometrii vygenerovaného modelu v programu ContextCapture Editor. Bylo však zjištěno, že některé operace s takto velkým objemem dat v tomto programu trvají příliš dlouho, nebo se program „zasekne“ a nelze dále pracovat. Takovéto potíže nastávali ve verzích programu (update 12 a 13). Při menších datových objemech tento problém nenastával. Z těchto důvodů byla editace geometrie modelu provedena v programu Meshmixer.

Meshmixer je volně dostupný software od společnosti Autodesk umožňující práci s trojúhelníkovou sítí. Meshmixer je jednoduchý a uživatelsky přátelský software. Je využíván převážně pro editaci, či tvorbu modelů pro 3D tisk. [51] [52]

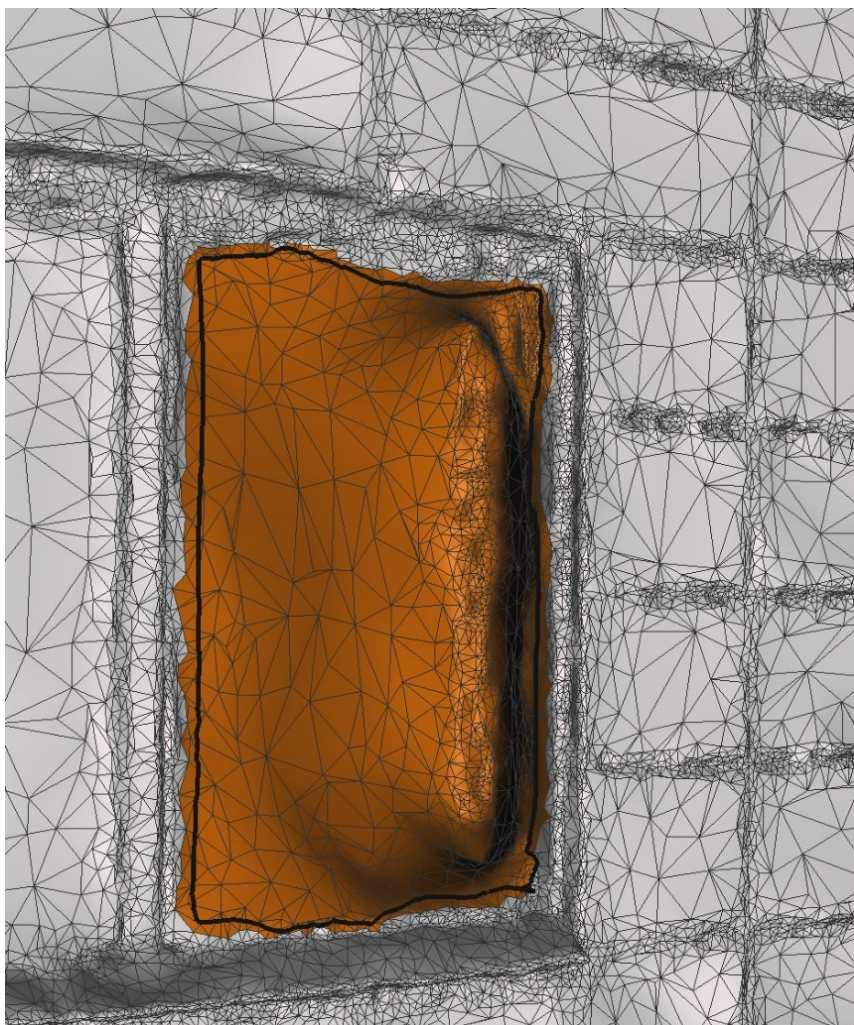
### 7.3.2 Postup editace

Jednotlivé části 3D modelu byly jednotlivě importovány do programu Meshmixer. Následovalo vyhledání chybných, nebo nevhodně vyhodnocených částí 3D modelu. V programu Meshmixer nebylo možné zobrazit texturovaný formát OBJ. K tomu byl využit program Cloud Compare, který podporuje texturovaný formát OBJ a sloužil tak pouze pro vizuální identifikaci chybně, nebo nevhodně vyhodnocených částí 3D modelu.



*Obrázek 31: Identifikace části automobilu v programu Cloud Compare, který se nachází pouze na leteckých snímcích. Díky textuře 3D modelu je jednodušší identifikace těchto částí, které v netexturovaném modelu často splývají s okolím.*

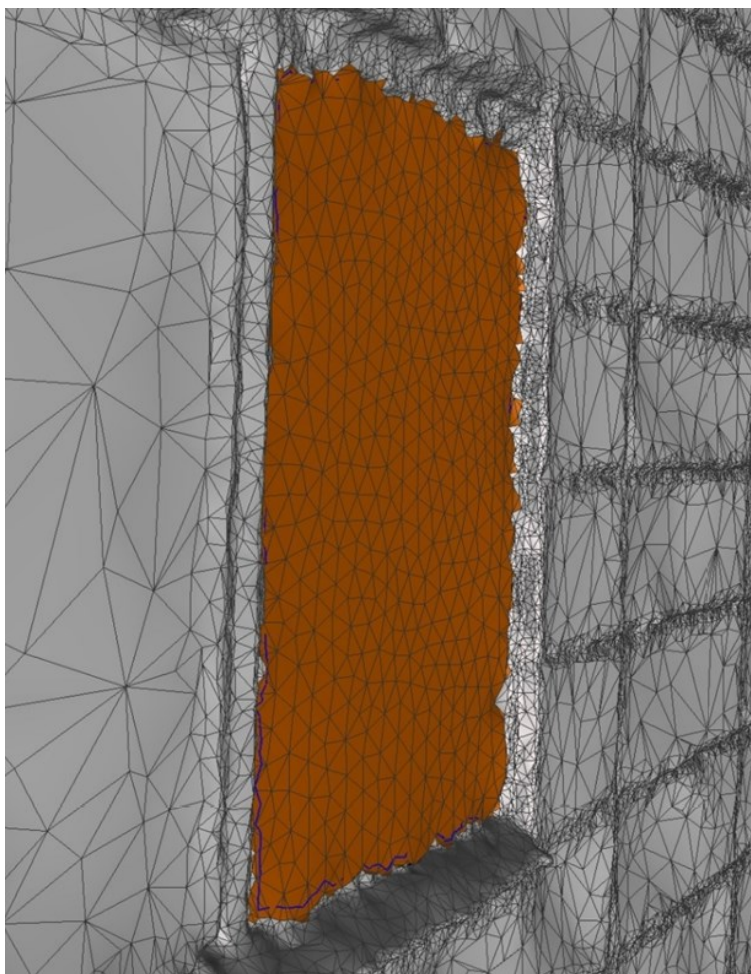
3D Model je tvořen trojúhelníkovou sítí a pro lepší orientaci při úpravě modelu byla aktivována vizualizace této sítě. Výběr jednotlivých trojúhelníků byl proveden přes nástroj „select“.



*Obrázek 32: Nevhodně vyhodnocené okno na budově H.*

Na *obrázku 32* je hnědě označena trojúhelníková síť která reprezentuje chybně vyhodnocené okno budovy H. Ta byla následně odstraněna. Vytvoření sítě, která zaplní vzniklý otvor bylo provedeno přes nástroj „edit – Erase & Fill“.

Obdobným způsobem byly editovány i další vybrané části 3D modelu. Příkladem může být odstranění zbytků nevhodně vyhodnoceného automobilu, nebo editace otvoru na fasádě budovy H, který se zde reálně nevyskytuje.

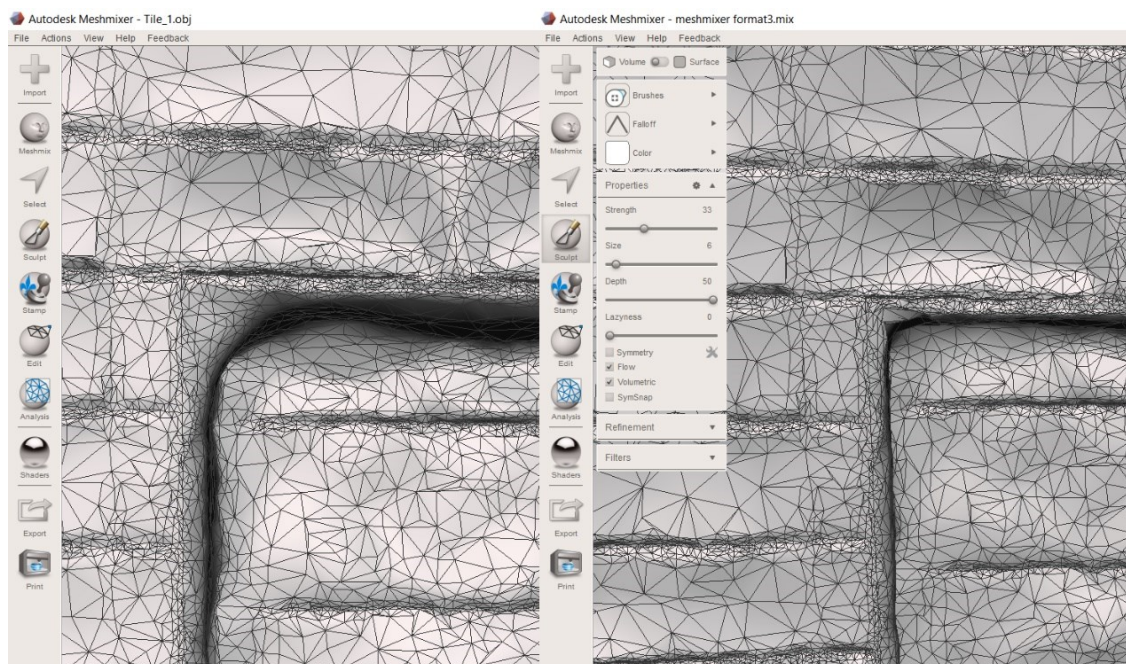


*Obrázek 33: Editované okno na budově H.*

### **Editace vnitřních rohů vrat budovy H**

Vnitřní rohy vrat jsou často zastíněny a nedostatečně osvětleny z čehož vzniká problém z hlediska nastavení expozice, která není na takovéto podmínky nastavená. Řešením by mohlo být nasnímkování těchto míst zvlášť, avšak je nutné dbát na celkovou souvislost s celým modelem, aby bylo možné tyto rohy vyhodnotit. Tato možnost vyžaduje další velmi kvalitní snímkování, co se týče rozmístění snímků (aby jej dokázal vyhodnotit program ContextCapture a navázat je na další snímky) a případně zaměření dalších vlíčovacích bodů, díky kterým jsou pak tato místa georeferencována na hlavní část modelu (pomocí funkce „merge“).

Druhou možností, která byla po zvážení situace zvolena je editace těchto rohů v programu Meshmixer. Na budově H se objevuje několik vrat, jejichž vnitřní rohy jsou na 3D modelu příliš zaoblené a neodpovídají skutečnosti. Pro editaci těchto rohů byl využit nástroj „sculpt“ s nastavením „move“. Ručně tedy byly skupiny trojúhelníků přesunuty a protáhnuty tak, aby výsledné rohy odpovídaly co nejvíce skutečnosti.



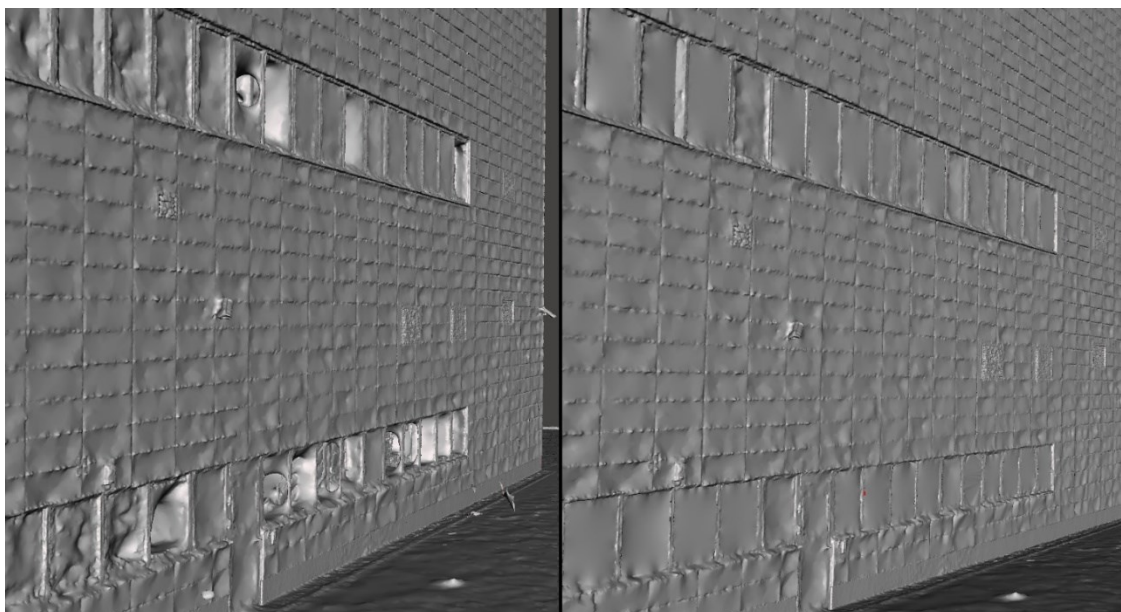
Obrázek 34: Vlevo: původní needitovaný roh vrat. Vpravo: roh vrat po editaci.

### Vygenerování nových textur

Editované 3D modely byly exportovány z programu Meshmixer, ve formátu OBJ a uloženy do původní lokace 3D modelů pod stejnými názvy. Do projektu, ve kterém byly vyhotoveny 3D modely pro editaci byly importovány retušované 3D modely. Předmětem importu byla pouze geometrie 3D modelů. Po importu editovaných 3D modelů byla spuštěna aktualizace a tím vytvořena nová textura.

### Porovnání 3D modelů po a před editaci

Při pohledu na 3D modely bez textur před a po editaci lze vidět, že editovaný model odpovídá více skutečnosti. Vyhodnocení nových textur na editovaném 3D modelu není však nejlepší.



*Obrázek 35: Na snímku je zachycen 3D modelu budovy H. Porovnání původního (vlevo) a editovaného (vpravo) 3D modelu.*

## **7.4 Výstupy**

Výsledný 3D model budovy H je tvořen z 5 částí a byl vyhotoven ve formátech OBJ a 3MX s podporou textur. Souřadnicový systém obou 3D modelů je S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514), výškový Bpv.



*Obrázek 36: Výsledný 3D model ve formátu 3MX.*



## 8 Testování přesnosti

### 8.1 Testování přesnosti 3D modelu budovy H a blízkého okolí

#### 8.1.1 Předmět testování

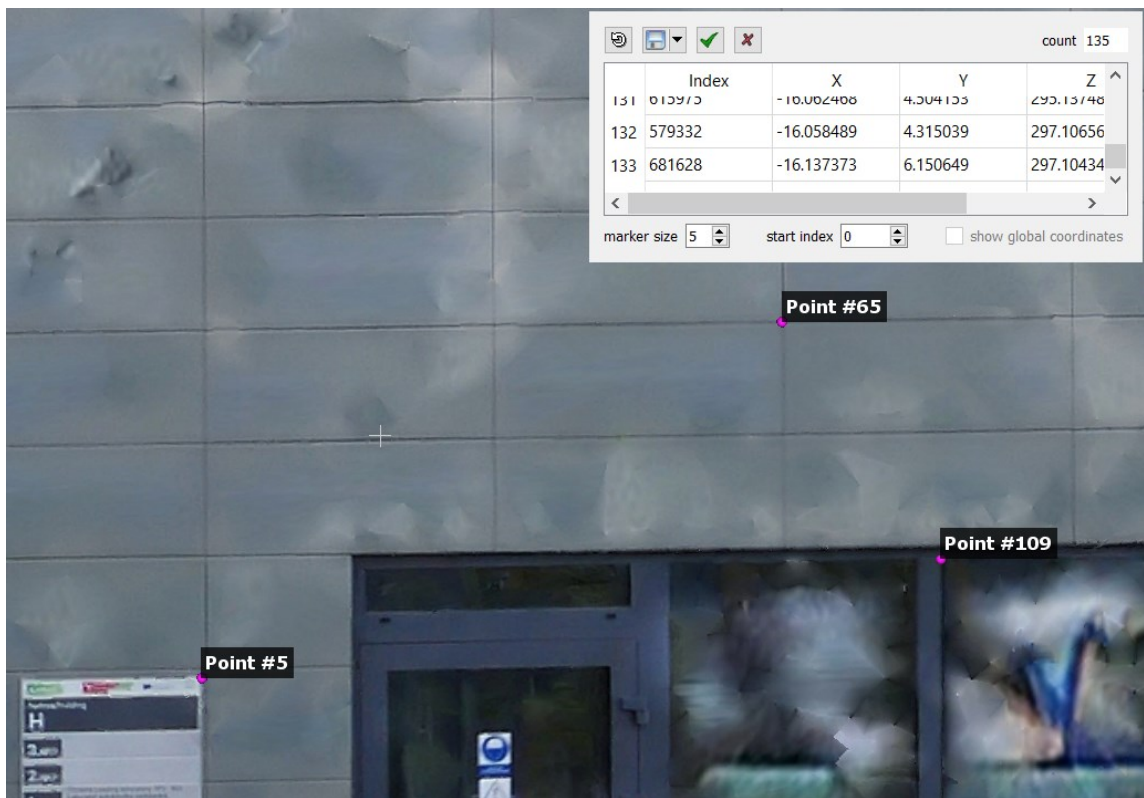
K testování přesnosti výsledného 3D modelu byly využity tachymetricky zaměřené kontrolní body, které se nachází na budově H a v její blízkém okolí. K testování přesnosti byl využit výsledný 3D model skládající se z pěti částí ve formátu OBJ s podporou textur.

#### 8.1.2 Měření modelových souřadnic v programu Cloud Compare

Odměření bodů na 3D modelu, které odpovídají kontrolním bodům ve skutečnosti bylo provedeno v programu Cloud Compare. Pro rychlejší orientaci a odměření správné polohy kontrolních bodů na 3D modelu byly do programu Cloud Compare nahrány souřadnice kontrolních bodů redukované o souřadnice počátku 3D modelu. Přesnou polohu na 3D modelu pak udával kód bodu.

Vyhotovený 3D model ve formátu OBJ pracuje s relativními souřadnicemi. Pro zachování co největšího rozlišení posouvá počátek souřadnicové soustavy do blízkosti 3D modelu (souřadnice výšek byly ponechány původní). Souřadnice počátku lokální souřadnicové soustavy jsou uvedeny v metadatech daného 3D modelu. Metadata informující o počátku modelu jsou uložena do souboru ve formátu XML. Tento soubor je pro všechny části 3D modelu stejný.

K měření modelových souřadnic bylo využito nástroje „point list picking“. Tento nástroj umožňuje měřit souřadnice v prostoru přímo na 3D modelu. Měření následně bylo uloženo ve formátu xyz.



Obrázek 37: Ukázka měření modelových souřadnic pomocí nástroje „point picking list“.

Pro převedení modelových souřadnic naměřených bodů do S-JTSK bylo nutné k těmto bodům přičíst souřadnice počátku lokální souřadnicové soustavy modelu a dále vynásobit každou ze souřadnic hodnotou -1.

### 8.1.3 Testování přesnosti

Pro testování přesnosti souřadnic a výšek kontrolních bodů byla převzata metodika dle normy ČSN 013410 [1]. Kontrolní body jsou zaměřeny ze stejných výchozích bodů (bez dalšího přeúčtení) jako body vlíčovací, tudíž neodpovídají nezávislosti měření dle výše uvedené normy. Důvodem využití původní měřické sítě pro potřeby kontrolního měření bez jakéhokoli přeúčtení je ten, že měřická síť byla určena s velkým množstvím nadbytečných měření a síť dosahuje vysoké přesnosti viz *Tabulka 7*.

Pro účely testování bylo využito 140 bodů. Přesnost 3D modelu byla ověřena kontrolním měřením výběru bodů a porovnáním těchto bodů s totožnými body odměřenými na 3D modelu. K tomu byly vypočteny souřadnicové a výškové rozdíly.

$$\Delta X = X_m - X_k; \Delta Y = Y_m - Y_k, \Delta H = H_m - H_k \quad (16)$$

Kde  $X_m$  a  $Y_m$  jsou souřadnice bodu odměřené z 3D modelu,  $X_k$  a  $Y_k$  vyjadřují souřadnice stejného bodu určeného kontrolním tachymetrickým měřením.

$H_m$  vyjadřuje výšku bodu odměřenou z 3D modelu a  $H_k$  vyjadřuje výšku téhož bodu určenou kontrolním tachymetrickým měřením.

Dosažená přesnost byla testována na základě výběrové směrodatné souřadnicové odchylky  $S_{XY}$  a výškové odchylky  $S_H$ .

$$s_X = \sqrt{\frac{1}{k \times N} \sum_{j=1}^N \Delta X_{j=1}^2} \quad (17)$$

$$s_Y = \sqrt{\frac{1}{k \times N} \sum_{j=1}^N \Delta Y_{j=1}^2} \quad (18)$$

$$s_{XY} = \sqrt{\frac{1}{2} (s_X^2 + s_Y^2)} \quad (19)$$

$$s_H = \sqrt{\frac{1}{k \times N} \sum_{j=1}^N \Delta H_j^2} \quad (20)$$

Koeficient  $k$  byl zvolen 2 za předpokladu, že kontrolní měření je určeno se stejnou přesností jako body odměřené z 3D modelu.

Pro komplexní představu o dosažené přesnosti byla vypočtena výběrová prostorová směrodatná odchylka dle vztahu (21).

$$s_{3D} = \sqrt{s_X^2 + s_Y^2 + s_H^2} \quad (21)$$

**Přesnost určení souřadnic bylo pokládáno za vyhovující, když:**

a) polohové odchylky (22) vyhovují kritériu (23)

$$\Delta p = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (22)$$

$$|\Delta p| = 1,7 \times u_{XY} \quad (23)$$

b) výběr přísluší stanovené třídě přesnosti vyhovuje-li výběrová směrodatná souřadnicová odchylka  $S_{XY}$  kritériu (24)

$$S_{XY} \leq \omega_{2N} \times u_{XY}. \quad (24)$$

| Dosažená výběrová směrodatná souřadnicová odchylka $S_{XY}$ [m] | Mezní souřadnicová odchylka $\omega_{2n} \times u_{xy}$ [m] | Stanovená podmínka $S_{XY} \leq \omega_{2n} \times u_{xy}$ [m] |
|---|---|--|
| 0,008   | 0,044   | <b>Splněno</b>   |

Tabulka 13: Porovnání dosažené výběrové směrodatné souřadnicové odchylky s mezní souřadnicovou odchylkou ( $\omega_{2n}=1,1$  a  $u_{xy}=0,04$  [m]).

**Přesnost určení výšek je vyhovující při splnění následujících požadavků:**

- a) výškové rozdíly  $\Delta H$  vyhovují kritériu (25)

$$|\Delta H| \leq 2u_H \times \sqrt{k} \quad (25)$$

- b) výběr odpovídá stanovené třídě přesnosti vyhovuje-li výběrová směrodatná výšková odchylka  $S_H$  kritériu (26) pro body na zpevněném povrchu.

$$S_H \leq \omega_N \times u_H \quad (26)$$

Testování bylo prováděno pro **první třídu přesnosti**, kde  $u_{XY} = 0,04$  m a  $u_H = 0,03$  m. Hodnota koeficientů  $\omega_{2N}$  a  $\omega_N$  byla stanovena pro 140 kontrolních bodů 1,1 pro hladinu významnosti  $\alpha=5\%$ . Podmínky (23) a (25) jsou splněny u všech bodů.

| Dosažená výběrová směrodatná výšková odchylka $S_H$ [m] | Mezní výšková odchylka $\omega_n \times u_H$ [m] | Stanovená podmínka $S_H \leq \omega_n \times u_H$ [m] |
|---|--|---|
| 0,008   | 0,033  | <b>Splněno</b>  |

Tabulka 14: Porovnání dosažené výběrové směrodatné výškové odchylky s mezní výškovou odchylkou ( $\omega_n=1,1$  a  $u_H=0,03$  [m]).

|  |       |
|--|-------|
| Maximální absolutní rozdíl v souřadnici $ \Delta Y $ [m]       | 0,051 |
| Maximální absolutní rozdíl v souřadnici $ \Delta X $ [m]       | 0,045 |
| Maximální absolutní rozdíl ve výšce $ \Delta H $ [m]           | 0,049 |
| Maximální absolutní hodnota polohové odchylky $ \Delta p $ [m] | 0,068 |
| Výběrová prostorová směrodatná odchylka $S_{3D}$ [m]           | 0,014 |

Tabulka 15: Výsledky testování přesnosti modelu budovy H, rozvodny elektrické sítě a přilehlého okolí.

### **Posouzení testování přesnosti**

Výsledný 3D model dosahuje na základě kontrolního měření první třídy přesnosti dle ČSN 013410 [1]. Tato přesnost však nereprezentuje všechny části modelu a je zřejmé, že reálné body, které nejsou dobře signalizovány a nemají dostatečně jedinečné okolí této přesnosti nedosáhnou.

## 9 Závěr

Výsledkem diplomové práce je digitální georeferencovaný 3D model budovy H s přilehlým okolím a rozvodnou elektrické sítě. Referenčním souřadnicovým systémem je S-JTSK / Krovak East North (EGSP:5514), výškovým Bpv.

Výsledný 3D model se skládá z pěti částí a je vyhotoven ve formátech 3MX a OBJ. Testování přesnosti je provedeno na základě kontrolního měření dle metodiky ČSN 013410 [1]. Přesnost 3D modelu splňuje podmínky pro první třídu přesnosti dle uvedené normy. Pro testování přesnosti bylo použito 140 rovnoměrně rozmístěných kontrolních bodů na fasádě budovy H, na vybraných místech rozvodny elektrické sítě a přilehlém okolí. Dosažená přesnost reprezentuje pouze dobře identifikovatelné body s jednoznačným okolím. Nejednoznačně identifikovatelné body mohou dosahovat řádově nižší přesnosti. Příkladem mohou být vnitřní části fasádních obkladů budovy H, které jsou v celé vnitřní ploše hladké a jednobarevné.

Diplomová práce dále pojednává o optimálním pracovním postupu pro tvorbu 3D modelu v programu ContextCapture. Touto problematikou se zabývá příloha č.1.

Na základě výsledků testování kamery Panasonic Lumix DMC – G80 bylo rozhodnuto, že je tuto kameru možné využít pro fotogrammetrické účely i když disponuje stabilizátorem snímacího čipu. Obdobné výsledky z hlediska přesnosti lze očekávat u podobných typů kamer.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] ČSN 013410 *Mapy velkých měřítek. Základní a účelové mapy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [2] *AdMaS | Výzkumné centrum* [online]. 2018 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://admas.eu/>
- [3] Základní údaje centra | AdMaS. *AdMaS | Výzkumné centrum* [online]. 2018 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://admas.eu/zakladni-udaje-centra/>
- [4] VÚGTK. *Slovník VÚGTK* [online]. [cit. 2020-05-31].
- [5] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [6] HANZL, Vlastimil. *Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie*. Fakulta stavební VUT v Brně, 2007.
- [7] VÚGTK. *Slovník VÚGTK* [online]. [cit. 2020-05-31].
- [8] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. Co je to bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, model letadla? - Úřad pro civilní letectví. *Úřad pro civilní letectví - Bezpečně a s nadhledem* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/provoz-ostatnich-letadel-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla/>
- [9] FOLEY, James, Andries VAN DAM, Steven K. FEINER a John HUGHES. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Second edition. Addison-Wesley, 1995. ISBN 0-201-84840-6.
- [10] ESRI. What is a TIN surface?—Help | ArcGIS for Desktop. *ArcGIS Desktop | Documentation* [online]. Redlands, Kalifornie, USA, 2019 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- [11] KALVODA, Petr. *GE10 - Mapování: 10\_GE10\_Další možnosti sběru dat* [online]. Fakulta stavební VUT v Brně [cit. 2020-06-03].
- [12] PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ. *Fotogrammetrie 3: digitální metody a laserové skenování*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03978-6.

- [13] LUHMANN, Tomas, Stuart ROBSON, Stephen KYLE a Jan BOEHM. *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. 2nd edition. Berlin: De Gruyter, 2014. ISBN 978-3-11-030269-1.
- [14] COLOMINA, I. a P. MOLINA. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014, **92**, 79-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>
- [15] Unmanned Aerial Systems (UAS) - SKYbrary Aviation Safety. *SKYbrary Aviation Safety* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Unmanned\\_Aerial\\_Systems\\_\(UAS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Unmanned_Aerial_Systems_(UAS))
- [16] HANZL, Vlastimil. *Bezpilotní prostředky*. Brno, 2016.
- [17] KOLEJKA, Jaromír, Ladislav PLÁNKA a Jiří TRNKA. Rádiem řízené modely snímají naši krajinu | Masarykova univerzita. *Masarykova univerzita* [online]. Praha, 2001 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.muni.cz/vyzkum/publikace/704437>
- [18] *What is a Drone? - Definition from WhatIs.com* [online]. [cit. 2020]. Dostupné z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/drone>
- [19] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví. In: *Sbírka zákonů*. Praha, 1997, číslo 49.
- [20] ČESKÁ REPUBLIKA. *Letecký předpis: Doplněk X - Bezpilotní systémy*. In: . 2014. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. *Letecký předpis: Pravidla létání*. In: . 2014. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2\\_cely.pdf](https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf)
- [22] UAV and Drone Photogrammetry and Drone Mapping. *Photogrammetry* [online]. 2017 [cit. 2020]. Dostupné z: <http://www.photogrammetry.com/UAV-drone-photogrammetry.htm>
- [23] VONDRÁK, Jiří. *Geodézie II*. 2004. Vysoké učení technické, Fakulta stavební.
- [24] ŘÍHA, Jan. *Terestrické 3D skenování* [online]. In: . [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/67/3D-skenovani-2013.pdf>
- [25] UAV and Drone Photogrammetry and Drone Mapping. *Photogrammetry* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.photogrammetry.com/UAV-drone-photogrammetry.htm>



- [26] Pix4D | BEZPILOTNĚ. *Úvod* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://bezpilotne.cz/pix4d/>
- [27] Pix4Dcapture: Free drone flight planning mobile app | Pix4D. *Professional photogrammetry and drone mapping software* | *Pix4D* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>
- [28] Pix4Dmapper: professional drone mapping and photogrammetry software | Pix4D. *Professional photogrammetry and drone mapping software* | *Pix4D* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
- [29] *Agisoft Metashape* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.metashape.cz/>
- [30] Software pro 3D modelování reality - ContextCapture. *Bentley – architektonická a inženýrská softwarová řešení* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/cs/products/product-line/reality-modeling-software/contextcapture>
- [31] ContextCapture Viewer - Explore and analyze reality meshes. *Bentley - Infrastructure and Engineering Software and Solutions* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/en/products/product-line/reality-modeling-software/contextcapture-viewer>
- [32] BENTLEY SYSTEMS. Bentley ContextCapture Editor Readme. *Bentley - Product Documentation* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture%20Editor%20Readme-v6/en/GUID-DF26FA89-D5B3-4DF5-973D-FCAE836E58CF.html>
- [33] ContextCapture - GeoSLAM. *Home - GeoSLAM* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://geoslam.com/contextcapture/>
- [34] BENTLEY SYSTEMS. ContextCapture Help. *Bentley - Product Documentation* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture%20Help-v10/en/GUID-1D6739CD-B03D-4AFE-B6FA-6AF73D5476E1.html>
- [35] BRŮHA, Lukáš. Modely prostorových dat v GIS: od 2D k 3D. *Geografické rozhledy*. P3K, 2017, **20162017**(264), 18-19.
- [36] BENTLEY SYSTEMS. *ContextCapture: User Guide*. USA, 2019.

- [37] BENTLEY SYSTEMS. 3D mesh. *Bentley - Product Documentation* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture%20Help-v9/en/GUID-817E1113-2882-46CF-8C07-549ECCA04BCE.html>
- [38] BENTLEY SYSTEMS. *3D multiresolution Mesh eXchange format (3MX) specification*. Version 1.0. USA, 2016.
- [39] Lumix DMC-G80 Digitální bezzrcadlový fotoaparát - Panasonic CZ. *Panasonic Česká republika* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.panasonic.com/cz/consumer/fotoaparaty-a-videokamery/fotoaparaty-lumix-g-dslm/dmc-g80.html>
- [40] PANASONIC CORPORATION. LUMIX G80. In: *Panasonic Česká republika* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: [https://www.panasonic.com/services/bc/file/download?path=/content/dam/Panasonic/europe/news-download/Photokina\\_2016/G80/G80\\_G85\\_body\\_slant\\_K.jpg&\\_charset\\_=utf-8](https://www.panasonic.com/services/bc/file/download?path=/content/dam/Panasonic/europe/news-download/Photokina_2016/G80/G80_G85_body_slant_K.jpg&_charset_=utf-8)
- [41] PANASONIC CORPORATION. Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II. In: *Koupit Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II - černý | CEWE FOTOLAB* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: [https://www.fotolab.cz/eshop/out/pictures/z1/80052010\\_\\_panasonic\\_lumix\\_g\\_14mm\\_f25\\_asph\\_ii\\_cerny\\_\(1\)\\_z1.jpg](https://www.fotolab.cz/eshop/out/pictures/z1/80052010__panasonic_lumix_g_14mm_f25_asph_ii_cerny_(1)_z1.jpg)
- [42] PANASONIC CORPORATION. Specifikace - H-H014A Širokoúhlý objektiv s pevným ohniskem - Panasonic CZ. *Panasonic Česká republika* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.panasonic.com/cz/consumer/fotoaparaty-a-videokamery/objektivy/h-h014ae.specs.html>
- [43] PHOTOMODELER TECHNOLOGIES. *PhotoModeler Scanner: Photomodeler 6 Help File*. Kanada, 2007.
- [44] KUBÍČKOVÁ, Miroslava a Vlastimil HANZL. *FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi..* Fakulta stavební VUT v Brně.
- [45] KALVODA, Petr, Lada HOFFMANNOVÁ, Miroslava KUBÍČKOVÁ, Michal KURUC, Jakub NOSEK, Jana OTRUSINOVÁ, Petra STRÁNSKÁ a Tomáš VOLAŘÍK. *FAST-S-19-5704 Geometrická přesnost mobilních mapovacích systémů.*

- [46] TRIMBLE NAVIGATION. *TOTÁLNÍ STANICE TRIMBLE M3* [online]. Sunnyvale, Kalifornie, USA, 2014 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-788113/022543-155J-CZE\\_TrimbleM3\\_DS\\_A4\\_0414\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-788113/022543-155J-CZE_TrimbleM3_DS_A4_0414_LR.pdf)
- [47] TRIMBLE NAVIGATION. *Trimble S8 Total Station* [online]. Sunnyvale, Kalifornie, USA, 2015 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H\\_TrimbleS8\\_DS\\_0115\\_LR\\_sec.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf)
- [48] BENTLEY SYSTEMS. *Acquisition Guide: ContextCapture Guide for photo acquisition*. USA, 2017.
- [49] DRONPRO. Dron DJI Phantom 4 Pro V2.0 | DronPro. *DronPro | Svět dronů pod jednou střechou* [online]. Praha [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: [https://dronpro.cz/dji-phantom-4-pro-v2-0-1?gclid=CjwKCAjwk6P2BRAIEiwAfVJ0rPC7J16vNPRzvK2vSKReMEY0IBFeoaF7thEni1yJSJbLKTxffS3m1xoCBNIQAvD\\_BwE](https://dronpro.cz/dji-phantom-4-pro-v2-0-1?gclid=CjwKCAjwk6P2BRAIEiwAfVJ0rPC7J16vNPRzvK2vSKReMEY0IBFeoaF7thEni1yJSJbLKTxffS3m1xoCBNIQAvD_BwE)
- [50] DÀ-JIĀNG INNOVATIONS. DJI Phantom 4 Pro – Specs, Tutorials & Guides – DJI. *DJI - The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography* [online]. 14th Floor, West Wing, Skyworth Semiconductor Design Building, No.18 Gaoxin South 4th Ave, Nanshan District, Shenzhen, China, 518057 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/phantom-4-pro/info>
- [51] Meshmixer: 3D Modeling Software 3D Printing. *Sculpteo | Online 3D Printing Service for your 3D designs* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/meshmixer-definition/>
- [52] *Autodesk Meshmixer* [online]. San Rafael, Kalifornie, USA, 2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.meshmixer.com/>

## 11 Seznam použitých zkratek

|        |   |
|--------|---|
| AdMaS  | Advanced Materials, Structures and Technologies               |
| Bpv    | Výškový systém baltský po vyrovnání                           |
| CAD    | Computer aided design   |
| CCD    | Charge cloupled divice  |
| CEITEC | Central European Institute of Technology                      |
| CMOS   | Complementary metal oxid Semikonduktor)                       |
| ČHMÚ   | Český hydrometeorologický ústav                               |
| ČR     | Česká republika   |
| ČSAV   | Československá akademie věd                                   |
| ČSSR   | Československá socialistická republika                        |
| DSLR   | Digital single-lens reflex                                    |
| DSM    | Digital surface models  |
| FAST   | Fakulta stavební  |
| GIS    | Geografické informační systémy                                |
| GNSS   | Globální navigační satelitní systém                           |
| IMU    | Inerciální měřící jednotka                                    |
| ISO    | International Organization for Standardization                |
| NETME  | New Technologies for Mechanical Engineering                   |
| ppm    | Parts per milion  |
| RAM    | Random access memory  |
| RGB    | Barevné spektrum červená-zelená-modrá                         |
| RPAS   | Remotely-piloted aerial system                                |
| S-JTSK | Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální |
| TIN    | Triangular irregular networks                                 |
| UA     | Unmanned aircraft   |
| UAS    | Unmanned aircraft systems)                                    |
| UAV    | Unmanned aerial vehicle                                       |
| USA    | Spojené státy americké  |
| VUT    | Vysoké učení technické  |

## 12 Seznam použitých obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Vstup do areálu AdMaS. V pozadí se nachází budova P1. ....  | 13 |
| Obrázek 2: Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi. [6].....  | 16 |
| Obrázek 3: Konvergentní snímkování. [6] .....  | 21 |
| Obrázek 4: Nastavení parametrů aerotriangulace. ....   | 31 |
| Obrázek 5: Automaticky vytvořené navazovací body. Kvalita bodu je rozlišena dle reprojekční chyby podle tabulky 1.....   | 32 |
| Obrázek 6: Prostředí měření snímkových souřadnic v programu ContextCapture. V pravé části nalezneme měřené body na snímcích. Lze vidět, že bod "Kont87_LH" je zvýrazněn červeně. Reprojekční chyba tohoto bodu je tedy větší než tři pixely..... | 32 |
| Obrázek 7: Struktura LOD (level of detail) formátu 3MX. [38] .....   | 35 |
| Obrázek 8: Tělo přístroje Panasonic Lumix DMC - G80. [40].....   | 36 |
| Obrázek 9: Objektiv Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II. [41].....  | 37 |
| Obrázek 10: Ukázka kódového terče umístěného na kartonovém podstavci. ....   | 39 |
| Obrázek 11: Halogenový reflektor umístěný na geodetickém stativu. ....   | 40 |
| Obrázek 12: Snímek sloužící pro kalibraci kamery. Na snímku je zachyceno nově doplněné kalibrační pole.....  | 41 |
| Obrázek 13: Okno dialogu „Total Error“ na konci procesu kalibrace(vpravo).....   | 42 |
| Obrázek 14: Ukázka kalibrační desky.....   | 43 |
| Obrázek 15: Snímek zachycuje rozmístění vlíčovacích, kontrolních a navazovacích bodů při testování parametrů kamery v programu Photomodeler. Na snímku je zachyceno původní prostorového kalibračního pole. ....                                 | 44 |
| Obrázek 16: Ukázka zřízení měřického stanoviska na střeše budovy P1. ....  | 48 |
| Obrázek 17: Fotogrammetrický terč umístěný na speciální konstrukci. ....   | 49 |
| Obrázek 18: Příklad umístění terčů na budovách. ....   | 49 |
| Obrázek 19: Příklad terče umístěného na živých komunikacích. ....  | 50 |
| Obrázek 20: Ukázka rozmístění kontrolních bodů na fasádě budovy H. Vizualizace byla provedena v programu Cloud Compare. ....   | 51 |
| Obrázek 21: Totální stanice Trimble M3. ....   | 53 |
| Obrázek 22: Přístroj Trimble S8 během měření nad areálem AdMaS.....  | 54 |
| Obrázek 23: Znázornění situace (při pohledu shora) pro výpočet maximální vzdálenosti od objektu. ....  | 55 |
| Obrázek 24: Snímek zachycuje Phantom 4 Pro před zahájením snímkování v areálu AdMaS.....   | 59 |
| Obrázek 25: Šikmý snímek budovy H pořízený dronem DJI Phantom 4 Pro. [44].....   | 60 |
| Obrázek 26: Porovnání světelných podmínek na snímcích („vlevo: „podsvětlené“, uprostřed: správně zachycený snímek, vpravo: „přesvětlené“,). [44].....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 27: 3D Model vytvořený z původních snímků pozemní fotogrammetrie. ....   | 62 |
| Obrázek 28: 3D Model vytvořený ze snímků pozemní fotogrammetrie radiometricky editovaných. ....  | 62 |
| Obrázek 29: Schéma udává rozlišení automaticky vygenerovaných navazovacích bodů. Stupnice je uvedena v m/px. ....  | 65 |
| Obrázek 30: Otvory na fasádě budovy H. ....  | 67 |
| Obrázek 31: Identifikace části automobilu v programu Cloud Comppare, který se nachází pouze na leteckých snímcích. Díky textuře 3D modelu je jednodušší identifikace těchto částí, které v netexturovaném modelu často splývají s okolím. .... | 68 |
| Obrázek 32: Nevhodně vyhodnocené okno na budově H. ....  | 69 |
| Obrázek 33: Editované okno na budově H. ....   | 70 |
| Obrázek 34: Vlevo: původní needitovaný roh vrat. Vpravo: roh vrat po editaci. ....   | 71 |
| Obrázek 35: Na snímku je zachycen 3D modelu budovy H. Porovnání původního (vlevo) a editovaného (vpravo) 3D modelu. ....   | 72 |
| Obrázek 36: Výsledný 3D model ve formátu 3MX. ....   | 72 |
| Obrázek 37: Ukázka měření modelových souřadnic pomocí nástroje „point picking list“. ....  | 74 |

## 13 Seznam použitých tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1: Barevné rozlišení bodu dle reprojekční chyby. Tabulka digitalizovaná dle předlohy uvedené v manuálu programu ContextCapture. [36].....                                    | 33 |
| Tabulka 2: Specifikace kamery dle [39].....  | 36 |
| Tabulka 3: Specifikace objektivu Panasonic LUMIX G 14mm f/2.5 ASPH II. [42] .....  | 37 |
| Tabulka 4: Testování přesnosti orientace snímků dle použitých parametrů kamery. ....   | 45 |
| Tabulka 5: Parametry kamery získané na kalibračním poli v učebně B150 a jejich přepočítání do programu ContextCapture. V tabulce nejsou uvedené přídatné parametry. ....             | 46 |
| Tabulka 6: Porovnání přídatných parametrů kamery vypočtených programem Photomodeler a ContextCapture na podkladě stejných snímků, vřícovacích, kontrolních a navazovacích bodů. .... | 47 |
| Tabulka 7: Informace o dosažené přesnosti. [45] .....  | 48 |
| Tabulka 8: Dosažená přesnost podrobných bodů převzatých z projektu „FAST-J-20-6174, Efektivita a kvalita využití leteckého snímkování RPAS v geodetické praxi“ [44] .....            | 50 |
| Tabulka 9: Parametry Totální stanice Trimble M3 („d“ vyjadřuje měřenou vzdálenost). [47] .....   | 52 |
| Tabulka 10: Parametry totální stanice Trimble S8 („d“ vyjadřuje měřenou vzdálenost). [47] .....  | 53 |
| Tabulka 11: Základní parametry dronu Phantom 4 Pro a jeho kamery. [50] .....   | 59 |
| Tabulka 12: Dosažená přesnost aerotriangulace. Hodnoty převzaty z automaticky vygenerovaného reportu. ....   | 66 |
| Tabulka 13: Porovnání dosažené výběrové směrodatné souřadnicové odchylky s mezní souřadnicovou odchylkou ( $\omega_{2n}=1,1$ a $u_{xy}=0,04$ [m]). ....                              | 76 |
| Tabulka 14: Porovnání dosažené výběrové směrodatné výškové odchylky s mezní výškovou odchylkou ( $\omega_n=1,1$ a $u_H=0,03$ [m]). ....  | 76 |
| Tabulka 15: Výsledky testování přesnosti modelu budovy H, rozvodny elektrické sítě a přilehlého okolí. ....  | 76 |

# 14 Seznam příloh

## Tištěné přílohy

1.2\_Testování parametrů kamery a nastavení v programu ContextCapture

6.Pohledy 3D modelu

6.1\_Pohled\_1

6.2\_Pohled\_2

6.3\_Pohled\_3

6.4\_Pohled\_4

6.10\_Pohled\_10

## Digitální přílohy přílohy

1. Testování parametrů kamery a nastavení programu ContextCapture

1.1\_Protokoly testování

1.1.1\_Kalibrace - Adjust - high density

1.1.2\_Kalibrace - Keep - normal density

1.1.3\_Kalibrace - Keep - high density

1.1.4\_Kalibrace - Adjust - normal density

1.1.5\_EXIF - Adjust - high density

1.1.6\_EXIF - Adjust - normal density

1.2\_Testování parametrů kamery a nastavení v programu ContextCapture

2. Převzatá data

2.1\_Kalibrační pole B150

2.1.1\_Vlícovací\_body

2.2\_AdMaS

2.2.1\_Projekt mobilní mapování

2.2.1.2\_SS\_AdMaS\_JTSKBpv

2.2.1.1\_Admas\_pms

2.2.2\_Projekt testování RPAS

3.Kalibrace kamery



### 3.1\_Výsledky kalibrace

#### 3.1.1\_Prostorové kalibrační pole

3.1.1.1\_Protokol kalibrace - kalibrační pole B150 + K3

3.1.1.2\_Protokol kalibrace - kalibrační pole B150

3.1.1.3\_Testování přesnosti kalibrovaných parametrů

#### 3.2.1\_Kalibrační deska

3.2.1.1\_Protokol kalibrace - kalibrační pole B150

### 3.2\_Testování kalibrovaných parametrů v programu Photomodeler

3.2.1\_Protokol - Test - kalibrované parametry z desky

3.2.2\_Protokol - Test - kalibrované parametry z pole B150

3.2.3\_Protokol - Test automatická kalibrace

3.2.4\_Testování přesnosti parametrů kamery

### 3.3\_Přepočítání parametrů kamery do programu ContextCapture

3.3.1\_Finální parametry kamery (ContextCapture)

3.3.2\_Výpočet finálních přidavných parametrů (ContextCapture)

3.3.3\_Výpočet přidavných parametrů pro ověření stejných jednotek (contextCapture)

## 4.Tvorba 3D modelu budovy H

### 4.1\_Geometrie snímkování

### 4.2\_Protokol aerotriangulace (quality report)

## 5.Testování přesnosti 3D modelu budovy H

### 5.1\_Kontrolní měření

#### 5.1.1\_Rajon

5.1.1.1\_Zápisník

5.1.1.2\_Protokol o importu

5.1.1.3\_Protokol o výpočtu

5.1.1.4\_Redukce o druhou polohu

5.1.1.5\_Rajon 7001 YXZ souřadnice

#### 5.1.2\_Kontrolní podrobné body

5.1.2.1\_Zápisník

5.1.2.2\_Protokol o importu

5.1.2.3\_Protokol o výpočtu

5.1.2.4\_Redukce o druhou polohu

5.1.2.5\_Souřadnice kontrolních bodu JTSK east north

5.1.2.6\_Souřadnice kontrolních bodu YXZ

5.1.3\_Kódová tabulka

5.2\_Odměřené kontrolní body z 3D modelu

5.3\_Testování přesnosti 3D modelu budovy H

6.Pohledy 3D modelu (Pohledy\_1-35)