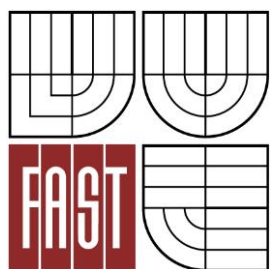




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE**

**FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY**

ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ POŘÍZENÝCH Z UAS PROCESSING OF IMAGES TAKEN FROM UAV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PAVEL ROUBAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTIMIL HANZL, CSc.

BRNO 2014

Zde vložit zadání.

Abstrakt

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit snímky pořízené technologií UAS a především otestovat přesnost této metody na kontrolních bodech různého typu. K tomuto testování sloužily kontrolní body, které byly zaměřeny geodetickou metodou. Následně došlo k porovnání s body určenými fotogrammetricky.

Klíčová slova

fotogrammetrie, UAV, vlícovací bod, kontrolní bod

Abstract

The aim of the thesis was to process the images taken by UAS technology and especially to test the accuracy of this method on the checkpoints of various types. For this testing were used checkpoints that were measured by geodetic method. Subsequently these points were compared with points measured photogrammetrically.

Keywords

fotogrammetry, UAV, ground control point, checkpoint

...

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Pavel Roubal *Zpracování snímků pořízených z UAS*. Brno, 2014. 64 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28.5.2014

.....
podpis autora

Bc. Pavel Roubal

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce Doc. Ing. Vlastimilu Hanzlovi CSc., za odborné vedení a rady při zpracování diplomové práce. Velké poděkování náleží i mé rodině za podporu, trpělivost a povzbuzování po celou dobu studia.

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 9 |
| 1.1 Lokalita | 10 |
| 2. UAS (Unmanned Aircraft Systems), UAV (Unmanned Aerial Vehicles) | 11 |
| 2.1 Historie UAV..... | 11 |
| 2.2 Historie UAV v Československu..... | 12 |
| 2.3 Rozdělení..... | 14 |
| 2.4 Nejpoužívanější platformy UAS | 14 |
| 2.4.1 Microdrone | 14 |
| 2.4.2 Aibotix x6..... | 16 |
| 2.4.3 Swinglet CAM, EBEE | 17 |
| 2.4.4 Gatewing x100, Gatewing UX5 | 18 |
| 2.4.5 Další platformy UAV..... | 19 |
| 2.4.6 Senzory často používané pro UAS | 19 |
| 3. Snímkování | 22 |
| 3.1 Legislativní omezení | 22 |
| 3.1.1 Rozdíl mezi modelem letadla a bezpilotním letadlem..... | 22 |
| 3.1.2 Podmínky omezení a pravidla provozu..... | 23 |
| 3.1.3 Potřebná povolení | 24 |
| 3.2 Vlíčovací body..... | 25 |
| 3.2.1 Metody měření vlíčovacích bodů | 26 |
| 3.3 Plánování letu | 26 |
| 4. Zpracování snímků..... | 28 |
| 4.1 Photomodeler..... | 28 |
| 4.1.1 Zpracování..... | 29 |
| 4.1.2 Zhodnocení..... | 30 |
| 4.2 Orient/Orpheus | 31 |
| 4.2.1 Zpracování..... | 31 |
| 4.3 Pix4D | 32 |
| 4.3.1 Tvorba projektu | 32 |
| 4.3.2 Výpočet | 33 |
| 4.3.3 Zhodnocení..... | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4 | Kalibrace kamery..... | 36 |
| 4.5 | Další možnosti zpracování | 36 |
| 4.5.1 | DroneMapper..... | 37 |
| 4.5.2 | Icaros..... | 37 |
| 4.5.3 | Menci Software | 38 |
| 5. | Zpracování výsledků | 39 |
| 5.1 | Měřická síť | 39 |
| 5.1.1 | Rozbor přesnosti..... | 39 |
| 5.1.2 | Měřické práce | 40 |
| 5.1.3 | Zpracování měření | 41 |
| 5.2 | Vyhodnocení získaných souřadnic | 44 |
| 5.2.1 | Četnosti chyb..... | 45 |
| 5.2.2 | Střední chyby..... | 50 |
| 5.2.3 | Rovnost variací normálně rozdělených souborů | 52 |
| 6. | Závěr..... | 54 |
| | Seznam použitých zdrojů | 56 |
| | Seznam použitých zkratk..... | 59 |
| | Seznam obrázků | 60 |
| | Seznam tabulek..... | 62 |
| | Seznam grafů | 63 |
| | Seznam elektronických příloh | 64 |
| | Další přílohy | 64 |

1. Úvod

V posledních několika letech začal prudký zájem o sběr dat pomocí bezpilotních leteckých prostředků. Tato znovuobjevená technologie má velmi širokou oblast využití a je ceněna pro svou přesnost, aktuálnost a nízké náklady. Stává se nástrojem pro sběr dat z menších ploch, než je běžné u leteckého snímkování.

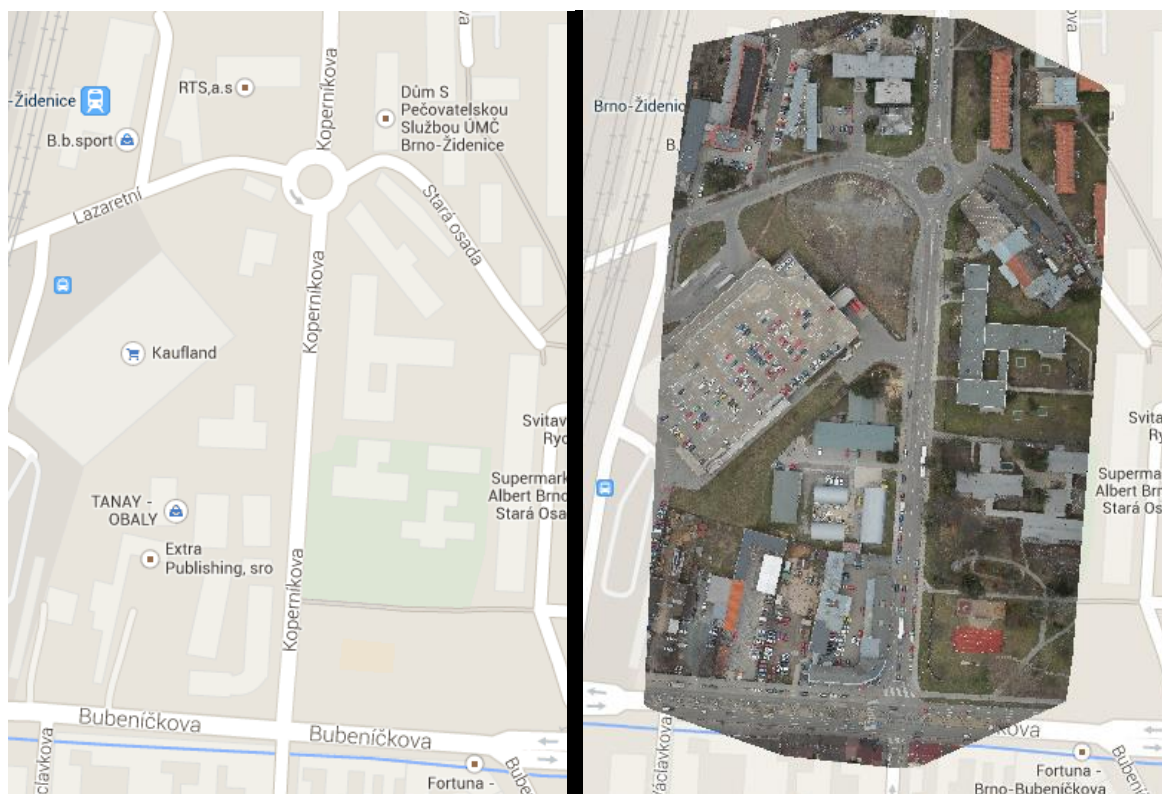
Úkolem mé diplomové práce je provést identifikaci a zaměření vlícovacích bodů včetně analýzy jejich přesnosti. Dále vyhodnocení leteckých snímků a posouzení dosažených přesností na kontrolních bodech různého typu. Jako podklady sloužily souřadnice vlícovacích bodů, snímky a souřadnice projekčních center. Vše bylo pořízeno na jaře roku 2013 pracovníky společnosti GEODIS BRNO spol. s.r.o.

Vlícovací body byly změřeny metodou RTK. Snímky byly nasnímány fotoaparátem Canon EOS 5D mark III s objektivem o ohniskové vzdálenosti 50 mm. Tento fotoaparát byl nesen na kvadrokoptéře Microdrone md4-1000. Nálet proběhl ve dvou řadách a bylo pořízeno 30 snímků. Výška letu byla přibližně 230 m, nasnímané území má rozlohu přibližně 10 ha. Při náletu byly zároveň měřeny souřadnice projekčních center pomocí GNSS přijímače na kvadrokoptéře.

Pro zaměření vlastních vlícovacích a kontrolních bodů byla vybudována měřická síť a to zejména pro svoji přesnost a spolehlivost. K měření byla použita totální stanice a trojpodstavcová souprava. Pro vyhodnocení snímků sloužily programy Photomodeler, Orpheus a Pix4D.

1.1 Lokalita

Zájmové území se nachází v Brně - Židenicích a tvoří ho části ulic Bubeníčková, Koperníková a Lazaretní. Jelikož se jedná o městskou zástavbu, nachází se zde velké množství bodů, které lze označit za přirozeně signalizované. Tato skutečnost je pro zpracování a testování měřených hodnot velmi výhodná. Jelikož se jedná o členitý terén, mohlo dojít k vyhodnocení a kontrole bodů nacházejících se v různých výškách.



Obr. č. 1.1 Snímkovaná lokalita [13]

2. UAS (Unmanned Aircraft Systems), UAV (Unmanned Aerial Vehicles)

Jedná se o letecké prostředky bez posádky. I když neexistuje žádný pilot fyzicky přítomen v letadle, neznamená to, že stroj letí sám o sobě nezávisle. Letoun je ovládán ze země z pozemní kontrolní stanice – GCS (Ground Control Station), toto vyžaduje spolehlivé komunikační propojení CGS a letounu.

[2]

Jelikož UAV a pilot tvoří systém, je vhodnější používat název spíše UAS-g, kde přípona g znamená využití pro geodetické a geotechnické aplikace. [3]

2.1 Historie UAV

Pokud budeme mluvit o počátcích bezpilotního leteckého snímkování, pak se musíme zmínit o využití systémů jako draků (Athur Batut, 1888 and Lawrence and Myers, 1906), holubů (Neubronner, 1903) a raket (Alfred Maul, 1904).

Jedny z nejstarších publikovaných pokusů využívajících UAV model, který měl pevné křídlo, proběhl v roce 1979 (Przybilla, Wester-Ebbinghaus 1979). První test proběhl s použitím ručně ovládaného modelu letadla ve výšce 150 m nad zemí a rychlostí $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. První použití UAV s rotačním křídlem proběhlo v roce 1980 (Wester-Ebbinghaus 1980). Jednalo se o model helikoptéry Schlüter (Bell 222) s maximálním nákladem 3 kg. Obecně můžeme říct, že počátky provozování UAV modelů započaly především ve vyspělých zemích, jako je Japonsko a Německo. V těchto zemích se rozvíjelo letecké modelářství, což byl důležitý předpoklad pro použití těchto modelů ke snímkování. Asi největším problémem snímkování z těchto modelů bylo následné zpracování snímků, které probíhalo analogově. Bylo tedy velmi technicky a ekonomicky náročné.

Bohužel prameny související s touto problematikou se vyhledávají velmi těžce a existují pouze v tištěné podobě.

[1]

2.2 Historie UAV v Československu

Do vývoje a hlavně do prosazování radiem řízených modelů letadel pro pořizování operativních snímků malých zájmových ploch za účelem jejich mapování a monitorování zasáhl, jen s velmi malým zpožděním za okolním světem (Japonsko) v druhé polovině 60. letech 20. století i Geografický ústav Československé akademie věd (dále jen GgÚ ČSAV). V obtížných společensko-politických podmínkách prosadil RNDr. Otakar Stehlík, CSc., tehdejší vedoucí pracovní skupiny pro výzkum současných reliéfových procesů, výrobu a provozování těchto létajících prostředků zpočátku pro studium eroze půdy na zemědělských plochách.[4]

Za počátek leteckého snímkování z malých výšek v Československu můžeme považovat rok 1967, kdy došlo k prvnímu snímkování pomocí RC (radio controlled) modelu. Docházelo k postupnému vývoji od modelů s pevným křídlem až k modelu „rogallo“, který lépe vyhovoval tehdejším požadavkům pro snímkovací lety. Model „rogallo“ byl nasazen v roce 1976, a tato koncepce letounu (označován jako „mikroletoun“) vydržela po celou dobu působení GgÚ ČSAV. Model byl poháněn spalovacím motorem, jeho nosnou plochu tvořilo rogalové křídlo z polyethylenové fólie. Toto křídlo umožňovalo rychlou stoupavost a dostatečně pomalý pohyb, což bylo pro snímkování velmi vhodné. Díky tomuto křídlu se dokázal model v dostatečném protivětru také „fixovat“ nad jedním bodem.



Obr. č. 2.1 Model „rogallo 1977“ [plánka článku]

Mikroletouny byly vybaveny kamerami Leica, později výhradně kamerami Flexaret. Jednalo se o kamery na svitkové filmy, z produkce Meopty Přerov. V rámci spolupráce GgÚ ČSAV a Meopty Přerov došlo k vývoji několika multispektrálních kamer. Například šestikanálová multispektrální kamera Flexaret M-6 na Obr. č. 2.2.



Obr. č. 2.2 Kamera Flexaret M-6 umístěná na modelu „rogallo 1981“ [plánka článku]

Pořízené snímky sloužily především pro potřeby vědy, výzkumu, hospodářství a státní správy. V zemědělství ke studiu eroze půdy, pro identifikaci zemědělských plodin a jejich vývojových fází, či na identifikace poškození, podmáčení a toxického znečištění půd. V lesnictví k dokumentaci lesních kalamit a sledování skladby stromů. V neposlední řadě došlo k využití snímků v archeologii, vodním hospodářství a v mnoha dalších odvětvích.

Navzdory administrativním a technologickým problémům se snímkování z malých výšek dostávalo v Československu do popředí uživatelského zájmu. Jednoznačným kladem využití výše uvedených technických prostředků byla operativnost jejich nasazení, což znamenalo získávání snímkových materiálů bezprostředně po nastalé potřebě dokumentace jevu. Velmi cennou devízou popisované technologie byly její nízké provozní náklady.

Upraveno dle [4]

2.3 Rozdělení

Tab č. 2.1 Rozdělení UAV Přeloženo a upraveno z [1]

| | Lehčí než vzduch | Těžší než vzduch | | |
|-------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Typ křídla | | Stavitelná křídla | Pevná křídla | Rotující křídla |
| Bezmotorový | Balón | Drak | Kluzáky | |
| Motorový | Vzducholod' | Paraglida | Vrtulová letadla | Vrtulníky |
| | | Rogalo | | Multikoptéry |

2.4 Nejpoužívanější platformy UAS

Pro širší povědomí čtenáře se zde pokusím popsat některé druhy dronů, které jsou aktuálně na trhu. Popisovat zde všechny dostupné stroje je časově nemožné, proto se zaměřím na technologicky nejvyspělejší, nejpoužívanější a nejznámější.

Uváděné letové parametry, jako je doba a rychlost letu se můžou velmi lišit v závislosti na hmotnosti nákladu a povětrnostních podmínkách!

2.4.1 Microdrone

Jedná se o čtyřmotorové UAV s vertikálním systémem vzletu a přistání. Může být buď pilotované pomocí dálkového ovládání, nebo létat autonomně pomocí GPS navigace. Stroje jsou odolné proti dešti a prachu a můžou pracovat v teplotním rozsahu od -20 až do +50°C. Tělo je vyrobeno z karbonu a k pohonu slouží 4 bezkartáčové motory.

[14]

Microdrone md4-200

Nejmenší z dronů, které společnost nabízí. Doba letu může dosahovat až 35 min v závislosti na nákladu a povětrnostních podmínkách.



Obr. č. 2.3 Microdrone md4-200 [14]

Tab č. 2.2 Parametry md4-200

| Microdrone md4-200 | |
|--------------------|--------|
| doba letu | 35 min |
| rychlost stoupání | 7 m/s |
| rychlost letu | 8 m/s |
| maximální náklad | 300 g |

[14]

Microdrone md4-1000

Tento dron byl použit pro snímkování našeho území. Jedná se jeden z nejpoužívanějších prostředků vůbec.



Obr. č. 2.4 Microdrone md4-1000 [14]

Tab č. 2.3 Parametry md4-1000

| Microdrone md4-1000 | |
|---------------------|---------|
| doba letu | 88 min |
| rychlost stoupání | 7,5 m/s |
| rychlost letu | 15 m/s |
| maximální náklad | 1200 g |

[14]

Microdrone md4-3000

Nejnovější člen rodiny společnosti Microdrone, který je stále ještě ve vývoji. Teoreticky by mohl nést i náklad o hmotnosti 15 kg.



Obr. č. 2.4 Microdrone md4-3000 [14]

Tab č. 2.4 Parametry md4-3000

| Microdrone md4-3000 | |
|---------------------|--------|
| doba letu | 45 min |
| rychlost stoupaní | |
| rychlost letu | 16 m/s |
| maximální náklad | 3000 g |

[14]

2.4.2 Aibotix x6

Jedná se o hexakoptéru německé společnosti Aibotix, která distribuuje i kompletní příslušenství pro tento stroj. Momentálně je na trhu nová verze tohoto stroje Aibotix x6 V2. Přístroj je napájený baterií a disponuje možností autonomního letu. Je schopen nést velké množství senzorů včetně laserového scanneru.

Technické parametry:

Tab č. 2.5 Parametry Aibotix-x6

| | aibotix-X6 |
|-------------------|---------------|
| délka/šířka | 104/104 cm |
| výška | 46 cm |
| vzletová hmotnost | 4600 - 6600 g |
| maximální náklad | 5000 g |
| rychlost letu | 40 km/h |
| doba letu | 30 min |

[15]



Obr. č. 2.5 Aibotix s příslušenstvím [15]

2.4.3 Swinglet CAM, EBEE

Jsou drony švýcarské společnosti SenseFly. Jedná se o bezpilotní letadla na baterie s autonomním systémem letu, která jsou schopna nést rozmanité druhy senzorů. Výhodou těchto strojů je dlouhá doba letu, nevýhodou nízká hmotnost nákladu. Vzlet probíhá vyhozením z ruky, k přistání je třeba krátká přistávací dráha.

Technické parametry:

Tab č. 2.6 Parametry Ebee a SwingletCAM

| | Ebee | Swinglet CAM |
|----------------------|------------------------|-----------------------|
| rozpětí křídel | 96 cm | 80 cm |
| vzletová hmotnost | 700 g | 500g |
| doba letu | 45 min | 30 min |
| rychlost letu | 36-57 km/h | 36 km/h |
| odolnost proti větru | do 45 km/h | do 25 km/h |
| rozsah mapování | 1,5-10 km ² | 1,5-6 km ² |

[16]



Obr. č. 2.6 Ebee [16]



Obr. č. 2.7 SwingletCAM [16]

2.4.4 Gatewing x100, Gatewing UX5

Drony společnosti Trimble, které se vyznačují svou dlouhou letovou dobou a kvalitním zpracováním. Start letounu probíhá pomocí katapultu, k přistání je třeba krátká přistávací dráha. Nevýhodou je možnost nesení pouze určitého typu fotoaparátu. V případě UX5 se jedná o fotoaparát Sony NEX-7.

Technické parametry:

Tab č. 2.7 Parametry UX5 a X100

| Gatewing | UX5 | X100 |
|----------------------|--------------|--------------|
| hmotnost | 2500 g | 2200 g |
| rozpětí křídel | 100 cm | 100 cm |
| rozměry | 100x65x10 cm | 100x60x10 cm |
| doba letu | 50 min | 45 min |
| rychlost letu | 80 km/h | 80 km/h |
| odolnost proti větru | 65 km/h | 65 km/h |

[17]



Obr. č. 2.8 X100 [17]



Obr. č. 2.9 UX5 [17]

2.4.5 Další platformy UAV

<http://www.mavinci.de>

<http://www.draganfly.com>

<http://www.steadidrone.com>

<http://www.trigger.pl/pteryx/>

<http://www.aerialtronics.com>

2.4.6 Senzory často používané pro UAS

Fotoaparáty:

Sony Nex-7, Canon S110, Canon IXUS/ELPH, Canon 700D a další

Termokamery:

Optris PI400/PI450

Multispektrální kamery:

TetraCam ADC lite, Mini-MCA6



Obr. č. 2.10 Optris PI450 [21]



Obr. č. 2.11 TetraCam ADC Lite [20]

Lidary:

Velodyne Lidar HDL 32E, Riegel LMS-Q160



Obr. č. 2.12 Velodyne Lidar HDL 32E [18]



Obr. č. 2.13 Riegel LMS-Q160 [19]

Canon EOS 5D mark III

Fotoaparát, kterým byly pořízeny snímky pro tuto diplomovou práci. Rozlišení fotoaparátu je 22,3 MP se snímačem CMOS o velikosti 36x24. Dokáže snímat rychlostí až 6 snímků za sekundu.

Rozsah citlivosti ISO 100 až 25 600, rozšířitelný do ISO 102 400. Odolný proti povětrnostním vlivům.

Objektiv Canon EF 50mm

Objektiv o vysoké světelnosti f/1.2L USM



Obr. č. 2.14 Canon EOS 5D mark III [22]



Obr. č. 2.15 Canon EF 50mm [22]

Cena kompletní soupravy (platforma Microdrone md4-1000, pozemní stanice, pouzdro, baterie, RC ovladač, držák kamery, fotoaparát, software mdCockpit) je cca 40 000 € bez DPH (24.2.2014 [14])

Cena fotoaparátu Canon EOS 5D Mark III je 77 990 Kč včetně DPH.(ceník Canon duben 2013)

Cena objektivu je cca 42 000 Kč (www.zboží.cz 25. 2. 2014)

3. Snímkování

Snímkování probíhalo na podzim roku 2012 a prováděla ho společnost GEODIS BRNO spol. s.r.o. Pro práci byla použita kvadrokoptéra Microdrone md4-1000 společně s fotoaparátem Canon EOS 5D Mark III. Snímkování jsem se bohužel osobně nezúčastnil.

3.1 Legislativní omezení

V České republice panují poměrně přísná legislativní opatření pro provoz bezpilotních letadel. Tato skutečnost je dána především obavami o bezpečnost leteckého provozu a o další možné škody způsobené provozem, případně dokonce pádem letadla. V dalších odstavcích se pokusím shrnout aktuální informace k provozování bezpilotních letadel.

Novela leteckého zákona, která by měla upravovat provoz především profesionálních UAS je ve stádiu zpracování. Předpokládané vydání je plánováno na rok 2016.

3.1.1 Rozdíl mezi modelem letadla a bezpilotním letadlem

Dle předpisů platných v České republice se model letadla vyznačuje těmito znaky:

a) je provozován pouze za účelem rekreačním nebo sportovním, této podmínce neodpovídá žádná forma komerční činnosti, prováděná právnickou nebo podnikající fyzickou osobou.

Pokud je let nabízen formou inzerce a prováděn za úplatu a smyslem letu je zajištění služby, která je následně prodána, jedná se o **letecké práce**. Typickými příklady jsou: letecké snímkování ve viditelném nebo infračerveném spektru, zaměřování terénu, geomagnetický průzkum, chemické rozbory ovzduší, hlídkovací a monitorovací lety apod.

Pokud je let prováděn ve vlastní režii právnické nebo podnikající fyzické osoby na podporu její činnosti, tedy kdy letadlo je využito jako výrobní nástroj jiné finální služby/zboží, jedná se o **letecké činnosti pro vlastní potřebu**. Typickými příklady jsou: propagační lety, lety hlídkovací pro ochranu vlastního areálu, monitorovací lety vlastních

produktovodů, kartografické služby, lety pro zajištění výkonu státní správy, práškovací lety vlastních polí. Této podmínce naopak vyhovují např. soukromé lety (i tzv. fotolety) pro výhradně vlastní bezúplatnou potřebu soukromých osob.

b) je provozován pouze v přímém vizuálním dohledu pilota (odpovědné osoby); Model letadla musí být stále dostatečně viditelný prostým zrakem pilota, bez využití dalekohledů, kamer s objektivy apod. Brýle a kontaktní čočky na předpis jsou samozřejmě použitelné. Výraz dostatečně znamená, aby pilot byl schopen stále bezpečně řídit let vlastního letadla, byl schopen včas zaznamenat možná nebezpečí (např. překážky, jiný letový provoz) a byl schopen se jim vyhnout.

Kamera na palubě s živým přenosem obrazu k pilotovi, sledovaným pro účely řízení modelu letadla (tzv. FPV let), může být využita pouze a jen tehdy, pokud je let prováděn dvěma osobami, z nichž druhá udržuje stálý vizuální dohled s modelem letadla a má možnost a schopnost okamžitě převzít řízení, vyžaduje-li to situace (zejména po selhání přenosu obrazu, ztrátě orientace nebo pro vybrání nestabilního manévru).

a současně

c) nemá vlastní navigační a řídicí systémy, které by umožnily let na předem zvolené místo. Tyto systémy (nejčastěji založené na bázi GPS a autopilota) jsou stále častěji montovány do bezpilotních letadel, která se na trhu objevují s nesprávným označením model letadla. Dle definice se nicméně již jedná o bezpilotní letadlo, jehož provoz podléhá povolení ÚCL.

[23]

3.1.2 Podmínky omezení a pravidla provozu

Obecně si každý musí počínat tak, aby neohrožoval ostatní letecký provoz, osoby a jejich majetek. Konkrétněji pak hovoří letecký předpis Ministerstva dopravy L2 – Pravidla létání, Doplněk X. Ten obsahuje jednak závazná pravidla pro provoz bezpilotních letadel, jednak pravidla pro modely letadel. Ta jsou uvedena hlavně ve formě doporučení (zejména nelétat nad lidmi a hustě obydlenými místy), ale obsahují i několik závazných požadavků, zejména těch, která mají za cíl chránit letový provoz.

Lze říci, že pokud bude model letadla provozován tak, aby:

a) na něj odpovědná osoba měla dobrý výhled a dokázala se tak vyhnout překážkám a ostatním letadlům (i bezpilotním)

b) nelétal nad lidmi a hustě obydlenými místy ani v jejich nebezpečné blízkosti

c) nepřekračoval výšku 300 m nad zemí

d) nelétal blíže než 5,5 km od středu letiště (malé modely do 0,91 kg mohou i blíže, pokud nepoletí výše, než je výška okolní zástavby, stromů či překážek),

může si pilot plně vychutnat zábavu, jež je hlavním smyslem létání s modelem letadla a vyhne se případným problémům.

[23]

3.1.3 Potřebná povolení

Bezpilotní letadla je obecně možné provozovat pouze s povolením ÚCL. Jedná se zejména o povolení k létání (§ 52 zákona č. 49/1997 Sb. o civilním letectví) a dále o povolení k provozování leteckých prací, leteckých činností pro vlastní potřebu nebo k provozování obchodní letecké dopravy.

Provoz bezpilotních letadel bez patřičných povolení Úřadu může být předmětem sankčního řízení s možností udělení pokuty až do výše 5 000 000 Kč.

Povolení ÚCL není potřeba pouze pro modely letadel do maximální vzletové hmotnosti 20 kg. Definice modelu letadla a vymezení druhů leteckých činností nicméně vylučují provoz modelu letadla pro činnosti jiné, než rekreační a sportovní.

[23]

3.2 Vlčovací body

Vlčovací body jsou body zřetelně viditelné na snímku mající známé snímkové i objektové (geodetické souřadnice). Jsou přirozeně nebo uměle signalizované. Uměle signalizované body jsou stabilizované vhodným způsobem. U nových bodů určíme souřadnice geodetickou metodou s potřebnou přesností (nejméně takovou jakou očekáváme u nově určovaných bodů). [7]

Rozmístění a počet vlčovacích bodů mají zásadní vliv na výsledek a přesnost AAT. Při konvenčním leteckém snímkování se v praxi používá 4-5 symetricky rozmístěných bodů. Teoretické minimum pro výpočet správného řešení jsou u digitální fotogrammetrie tři plné body. V praxi se však doporučuje použít větší počet bodů, které potom umožní nejen určení prvků vnější orientace, ale také například zpřesnění radiální distorze objektivu

Z praxe vyplynulo, že jako dostatečný počet pro UAV fotogrammetrii se jeví 10 až 15 vlčovacích bodů, které byly rozmístěny na daném území. [5]

Pro naši aplikaci byly zvoleny přirozeně signalizované vlčovací body. Zejména tam, kde není dostatek přirozeně signalizovaných bodů, se dají využívat speciální terče, případně značky z barvy. Celkový počet vlčovacích bodů použitých pro vyhodnocení našich snímků byl 30.

K vlčovacím bodům se obvykle vyhotovuje místopis. Místopis by měl obsahovat širší okolí vlčovacího bodu tak, aby byla možná jeho identifikace při zpracování snímků. V našem případě byla použita jiná alternativa a to pořízení fotodokumentace bodů.



Obr. č. 3.1 Fotografie vlčovacích bodů

Je výhodné, aby stejná osoba měřila vlíčovací body a zároveň je i identifikovala během zpracování. Odpadá tak nutnost tvorby místopisů vlíčovacích bodů.

3.2.1 Metody měření vlíčovacích bodů

K měření vlíčovacích bodů se používají klasické geodetické metody, díky své rychlosti však převládá metoda RTK. K výhodám této metody patří dostatečná přesnost a především získání souřadnic v reálném čase. To velkou měrou přispívá k rychlému vyhodnocení snímků.

V našem případě bylo z důvodu potřeby vyšší přesnosti zvoleno zaměření polární metodou z vybudované měřické sítě. Více se této problematice věnuji v kapitole 5.

3.3 Plánování letu

Prvním předpokladem pro snímkový let je dobrá znalost legislativy. Tato skutečnost je částečně zaručena tím, že snímkový let pro komerční účely může provádět pouze kvalifikovaný pilot. Velmi obecně je část legislativy uvedena výše, avšak pro bezpečný let je třeba ji prostudovat podrobně. S tímto souvisí i důkladné prostudování leteckých map ICAO. Alternativou je používání mapového prohlížeče AIS view.

Plánování letu můžeme realizovat klasickým výpočtem, pro který platí následující vztahy:

Měřítkové číslo snímku $m_s = h/c$,

Výška letu nad terénem $h = c m_s$,

Absolutní výška letu $Z = Z_{ter} + h$.

Délka fotogrammetrické základny pro p % podélném překrytu $B = s m_s (1 - p/100)$

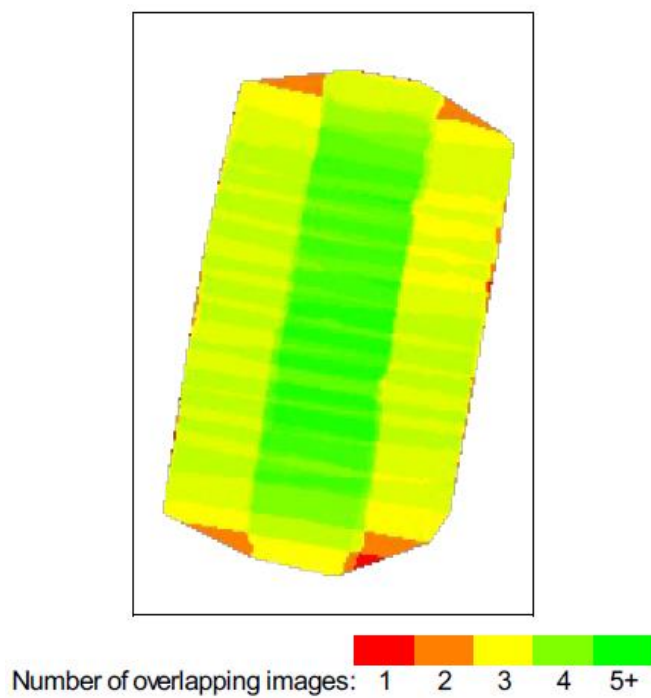
Vzdálenost os letových sousedních řad při q % příčném překrytu $A = s m_s (1 - q/100)$

[7]

Častější je ovšem použití specializovaných programů pro výpočet plánování letu. Tyto programy jsou často součástí zakoupeného UAS. Umožňují vypočítání všech důležitých

parametrů, včetně takzvaných waypointů (bodů průletu). Tyto programy často pracují na mapovém podkladu Google Earth.

Pro aplikace UAV je doporučen příčný překryt 80% a podélný 60%.



Obr. č. 3.2 Překryt snímků

4. Zpracování snímků

Celkem bylo ke zpracování 30 snímků o rozlišení 5760 x 3840 pixelů. Samotné snímky nebyly přímo georeferencovány, ale součástí podkladů byl seznam souřadnic projekčních center pořízených pomocí přijímače GNSS. Tento přijímač byl nesen přímo na kvadrokoptěře, a jeho přesnost se pohybuje v řádech metrů.

Dále souřadnice vlivovacích bodů, o jejich zaměření je více v kapitole 5.1.



Obr. č. 4.1 Jeden z pořízených snímků

4.1 Photomodeler

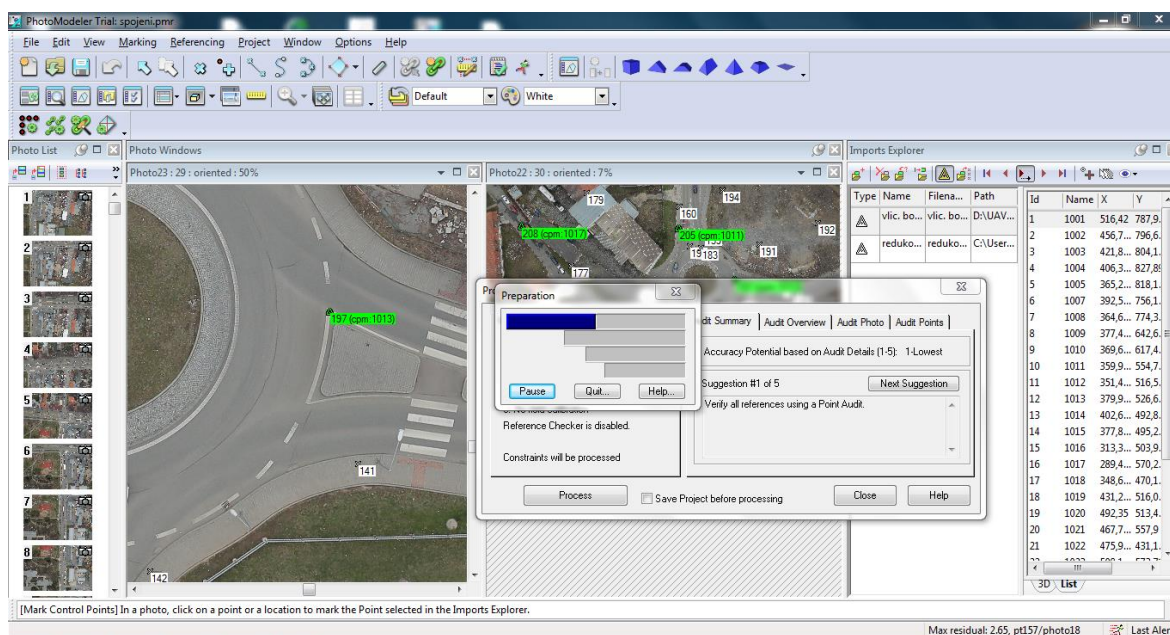
Photomodeler je fotogrammetrický systém určený k bezdotykovému 2D a 3D měření. Je založen na principech metody průsekové fotogrammetrie. Umožňuje získat mnoho údajů ze snímků daného objektu během krátké doby. Kombinuje snímky a umístění bodů ve třírozměrném prostoru. Výsledkem je 3D model, který může být exportován do jiných grafických programů.[11]

Zpracování bylo provedeno ve verzi Photomodeler Scanner v. 6.

4.1.1 Zpracování

Po založení projektu dojde k nahrání snímků. Následně se zvolí typ kamery a její parametry. Snímky je třeba zpracovávat po menších skupinách, například po osmi snímcích. Také je třeba nahrát souřadnice vřícovacích bodů, bohužel program má problémy se souřadnicemi většími než 1000, proto se souřadnice S-JTSK musí zredukovat na vhodné hodnoty. Například souřadnice 595985,42 se odečtem 595500 zredukuje na 485,42.

Na snímcích byly měřeny vřícovací body (Ground Control Points) a poté byl proveden první výpočet. Po každém výpočtu se zobrazí protokol. Nyní je třeba změřit kontrolní (navazovací) body. Takto označené body je třeba referencovat. Refrencování probíhá manuálně a musí se při něm ztotožnit označené body na všech snímcích. Tyto operace jsou značně časově náročné, obzvláště pokud se nejedná o zkušeného uživatele programu.



Obr. č. 4.2 Prostředí Photomodeler

Konečný výpočet probíhá po změření všech vřícovacích a kontrolních bodů na všech zpracovávaných snímcích. Při tomto výpočtu můžeme provést i kalibraci kamery. Výsledkem je tabulka bodů a jejich souřadnic, společně s dosaženými přesnostmi. Photomodeler umožňuje tvorbu ortofotosnímku i 3D modelu a následný export do mnoha dalších uživatelských formátů.

4.1.2 Zhodnocení

Pro zpracování ve Photodeleru byl projekt rozdělen na dvě poloviny. V této práci je zpracována severní polovina (15 snímků). Kolega Bc. Ondřej Ptáček, zpracovával ve své práci druhou polovinu zájmové oblasti. Oba projekty byly spojeny (merging project) a další zpracování probíhalo samostatně.

Zpracování snímků ve Photodeleru doprovázely drobné potíže. Zejména zde chybí nástroje na zjišťování a eliminaci chyb. Takže pokud byly některé z bodů chybně označeny nebo referencovány, bylo velmi složité tuto skutečnost odhalit.

Tab. č. 4.1 ukázka point table Photodeleru

| Id | Name | Photos | X (m) | Y (m) | Z (m) | X Precisi... | Y Precisi... | Z Precisi... | Precisior Vector Length | Tightnes (perce... | Tightne: (m) | Angle (deg.) | Control Name | RMS Resic (pi... | Largest Residual (pixels) |
|-----|------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------------------------|
| 57 | | 4,5 | 420.64... | 863.26... | 202.28... | 0.0187... | 0.0295... | 0.1004... | 0.1063... | 0.0005... | 0.0025... | 15.794... | | 0.0461... | 0.0461... |
| 56 | | 3,4,5 | 411.85... | 844.15... | 202.38... | 0.0186... | 0.0211... | 0.0809... | 0.0857... | 0.0007... | 0.0035... | 15.929... | | 0.0597... | 0.0791... |
| 6 | | 4,5 | 423.21... | 849.88... | 202.37... | 0.0122... | 0.0128... | 0.0175... | 0.0249... | 0.0013... | 0.0067... | 16.047... | 1024 | 0.1678... | 0.2019... |
| 212 | | 15,28,2... | 351.64... | 624.34... | 208.70... | 0.0136... | 0.0107... | 0.0808... | 0.0827... | 0.0018... | 0.0095... | 16.457... | | 0.1753... | 0.2307... |
| 17 | | 2,1,3,4,... | 484.12... | 756.56... | 202.87... | 0.0118... | 0.0115... | 0.0696... | 0.0715... | 0.0017... | 0.0090... | 21.949... | | 0.1893... | 0.2148... |
| 26 | | 3,4,5 | 458.30... | 818.27... | 202.10... | 0.0131... | 0.0151... | 0.0774... | 0.0800... | 0.0020... | 0.0104... | 16.662... | | 0.1900... | 0.2676... |
| 96 | | 9,14,15 | 393.38... | 671.35... | 202.87... | 0.0122... | 0.0122... | 0.1174... | 0.1187... | 0.0026... | 0.0134... | 11.883... | | 0.1969... | 0.2447... |
| 217 | | 21,22,23 | 293.48... | 539.30... | 216.87... | 0.0406... | 0.0204... | 0.1375... | 0.1448... | 0.0013... | 0.0066... | 11.198... | | 0.2026... | 0.2786... |
| 101 | | 8,9,14,15 | 365.84... | 693.57... | 207.77... | 0.0132... | 0.0110... | 0.0775... | 0.0794... | 0.0018... | 0.0094... | 17.432... | | 0.2061... | 0.2459... |
| 129 | | 15,28,2... | 332.01... | 624.86... | 208.35... | 0.0193... | 0.0112... | 0.0833... | 0.0862... | 0.0029... | 0.0147... | 16.241... | | 0.2075... | 0.3122... |
| 153 | | 16,17,18 | 429.62... | 460.70... | 218.28... | 0.0169... | 0.0184... | 0.1322... | 0.1346... | 0.0021... | 0.0108... | 11.268... | | 0.2088... | 0.2949... |
| 39 | | 5,6,7 | 365.85... | 793.98... | 203.23... | 0.0199... | 0.0148... | 0.0996... | 0.1027... | 0.0027... | 0.0139... | 14.512... | | 0.2092... | 0.2698... |
| 171 | | 20,21,2... | 329.32... | 517.80... | 205.47... | 0.0144... | 0.0115... | 0.0847... | 0.0867... | 0.0026... | 0.0135... | 16.445... | | 0.2319... | 0.2818... |
| 114 | | 11,12,13 | 472.48... | 656.67... | 203.52... | 0.0159... | 0.0129... | 0.1264... | 0.1281... | 0.0016... | 0.0085... | 11.324... | | 0.2361... | 0.3317... |
| 40 | | 5,6,7,8 | 333.06... | 785.49... | 202.57... | 0.0258... | 0.0148... | 0.0838... | 0.0889... | 0.0034... | 0.0175... | 19.204... | | 0.2409... | 0.3630... |
| 105 | | 10,11,1... | 507.14... | 676.63... | 207.59... | 0.0240... | 0.0132... | 0.0914... | 0.0954... | 0.0032... | 0.0164... | 16.632... | | 0.2458... | 0.3524... |
| 140 | | 16,20 | 349.09... | 440.51... | 204.87... | 0.0210... | 0.0201... | 0.1048... | 0.1088... | 0.0027... | 0.0138... | 15.776... | | 0.2476... | 0.2485... |
| 218 | | 20,21,2... | 276.36... | 511.93... | 206.11... | 0.0356... | 0.0141... | 0.1023... | 0.1092... | 0.0033... | 0.0170... | 15.751... | | 0.2669... | 0.4402... |

- [-] Point Tightness
 - [+] Maximum: 0.12 m
 - [+] Minimum: 0.0026 m
- [-] Point Precisions
 - Overall RMS Vector Length: 0.0757 m
 - [+] Maximum Vector Length: 0.162 m
 - [+] Minimum Vector Length: 0.019 m
 - Maximum X: 0.0423 m
 - Maximum Y: 0.0295 m
 - Maximum Z: 0.156 m
 - Minimum X: 0.00739 m
 - Minimum Y: 0.00721 m
 - Minimum Z: 0.0158 m

Obr. č. 4.3 Ukázka části protokolu z Photodeleru

Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v kapitole 5.

Cena licence 2495 \$

4.2 Orient/Orpheus

Orient je univerzální programový systém pro určení bodu vyrovnáním, v oblasti fotogrammetrie, který je vyvíjen na Technické univerzitě ve Vídni. Umožňuje zpracovávat různé druhy měření a parametrů současně.

Měření:

- snímkové souřadnice (x, y)
- modelové souřadnice (X, Y, Z)
- polární prvky (směr, zen. úhel, vzdálenost)
- fiktivní měření
- souřadnice vřícovacích bodů

Parametry:

- transformační parametry (rotace, poloha počátku ...)
- doplňkové parametry pro
 - obrazové deformace
 - vytváření tvarů objektů

4.2.1 Zpracování

Zpracování proběhlo za pomoci měřených snímkových souřadnic z programu Photomodeler. Jelikož škola disponuje pouze jednou licencí tohoto programu, samotný výpočet provedl vedoucí práce Doc. Ing. Vlastimil Hanzl CSc. Výsledkem zpracování je protokol, který obsahuje souřadnice určených bodů, jejich přesnosti a parametry kalibrace kamery.

Celkově bylo pro zpracování nutných 846 měření, celkový počet měření byl 2308. Poměr apriorní a aposteriorní chyby byl 0,9. Můžeme tedy prohlásit, že očekávané přesnosti výpočtu byly velmi dobře odhadnuty. Výsledky provedené kalibrace kamery jsou uvedeny v Tab. č. 4.2.

4.3 Pix4D

Švýcarská společnost sídlící v Lausanne, která se zabývá vývojem stejnojmenného programu pro zpracování dat z profesionálních UAS. Program umožňuje zpracování snímků ze všech typů bezpilotních letadel, z běžných letadel, také zpracování snímků z rozmanitých typů snímačů včetně multispektrálních a termokamer. Z dat umožňuje tvorbu ortofotomozaiky (orthomosaic), mračen bodů (point cloud), digitálního modelu povrchu (digital surface model), vrstevnic (contour lines) a jiné. V programu je možné měření vzdáleností, kubatur, souřadnic a dalších. Data z programu lze exportovat do Cad, Gis a 3D modelačních programů. [24]

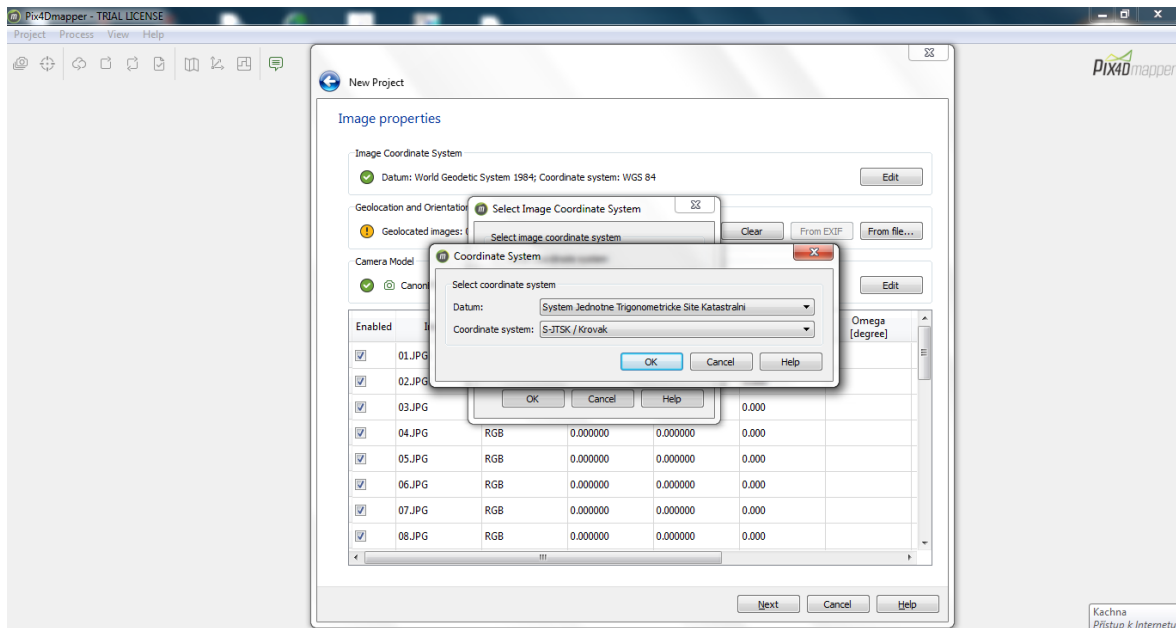
4.3.1 Tvorba projektu

Po založení projektu je třeba nahrát snímky v podporovaném formátu (*.jpg, *.jpeg, *.tif, *.tiff).

Následně je třeba zvolit souřadnicový systém. Na výběr je z velkého množství souřadnicových systémů včetně místního. Pro potřeby této práce byl zvolen S-JTSK.

Dalším krokem byl import souřadnic snímků, respektive středu projekčních center (geolocation and orientation). Tyto souřadnice byly získané z měření GNSS přijímače umístěném na letadle. Polohová přesnost by měla být přibližně 5 m, výšková přesnost 10 m. Tento krok sice není nutný, ale pomůže k dosažení lepší přesnosti a přehlednosti.

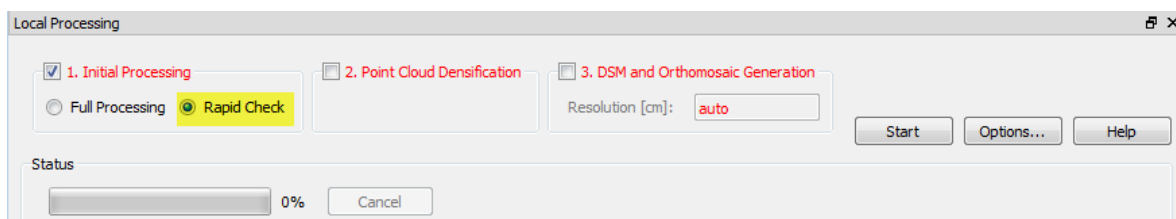
Posledním krokem při tvorbě projektu je nastavení typu kamery. Tento krok je většinou proveden automaticky. Případně můžeme vybrat typ kamery manuálně, nebo si nadefinovat vlastní kameru.



Obr. č. 4.3 Tvorba projektu

4.3.2 Výpočet

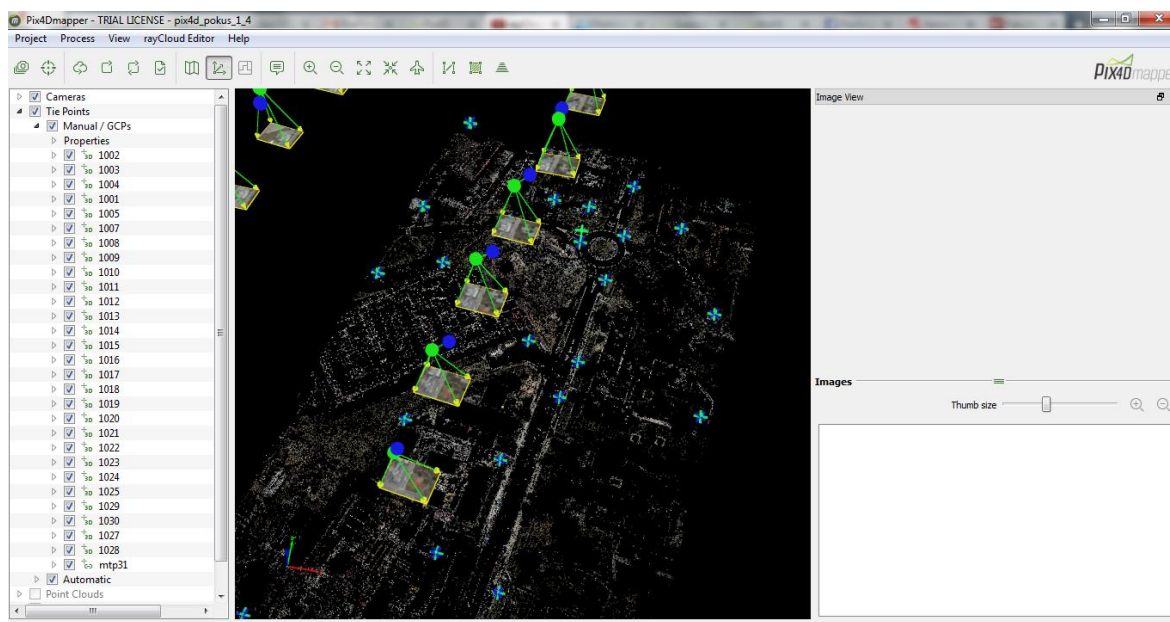
Nyní přišel na řadu předběžný výpočet (Rapid Check). Tento proces snižuje původní rozlišení snímků, proto může probíhat rychleji. Během výpočtu dojde ke kalibraci kamery, výpočtu polohy a orientaci snímků. Dále dojde k automatické letecké triangulaci (AAT-Automatic Aerial Triangulation) a vyrovnání bloku svazků (BBA-Block Bundle Adjustment). Je generováno mračno bodů, digitální výškový model a ortofotomozaika. Výsledky předběžného výpočtu se zobrazí v protokolu. Pokud se v protokolu objeví nějaké problémy, je pravděpodobné, že problémy nastanou i při úplném zpracování (full procesing).



Obr. č. 4.4 Rapid check [24]

Po provedení předběžného výpočtu je vhodný čas pro přidání vřícovacích bodů (GCP-Ground Control Points). Body byly importovány z textového souboru ve formátu „Y,X,Z“. Po importu se údaje bodů doplní o jejich přesnost. Tato přesnost však není rozdělena na polohovou a výškovou složku. Následně došlo k označení bodů na snímcích. Toto lze provést buď klasickým označováním na jednotlivých snímcích, nebo pomocí nástroje rayCloud

Editor. Tento nástroj velmi zjednodušuje označování bodů. Po označení bodu na jednom snímku program automaticky vyhledá body na ostatních snímcích, poté dojde k manuálnímu označení. Tento systém značně urychluje práci a byl využit i při měření kontrolních bodů (tie points).



Obr. č. 4.5 Zobrazení projekčních center a vlíčovacích bodů

Následně by měl opět proběhnout předběžný výpočet, který může ukázat případné nesrovnalosti a hrubé chyby. Jakmile se odstraní všechny problémy, může proběhnout plný výpočet (full processing), při kterém jsou snímky zpracovány v plné kvalitě. Po dokončení procesu je třeba opět zkontrolovat protokol, případně provést úpravy a proces spustit znovu.

Nyní bylo možné provést výpočet mračna bodů (point cloud) digitálního modelu povrchu (Digital Surface Model) a ortofotomozaiky (orthomosaic). Generované dokumenty se ukládají do složky projektu. Digitální model povrchu ve formátech: (*.tif, *.las, *.laz, *.xyz). Mozaika ve formátech: (*.tif, *.kml, *.html). Tento proces je poměrně časově náročný, proto je vhodné, aby byly chyby odstraněny už po úplném výpočtu. Při ploše cca 9 hektarů a výpočetní kapacitě 4 GB ram může doba zpracování přesahovat až 1 hodinu.

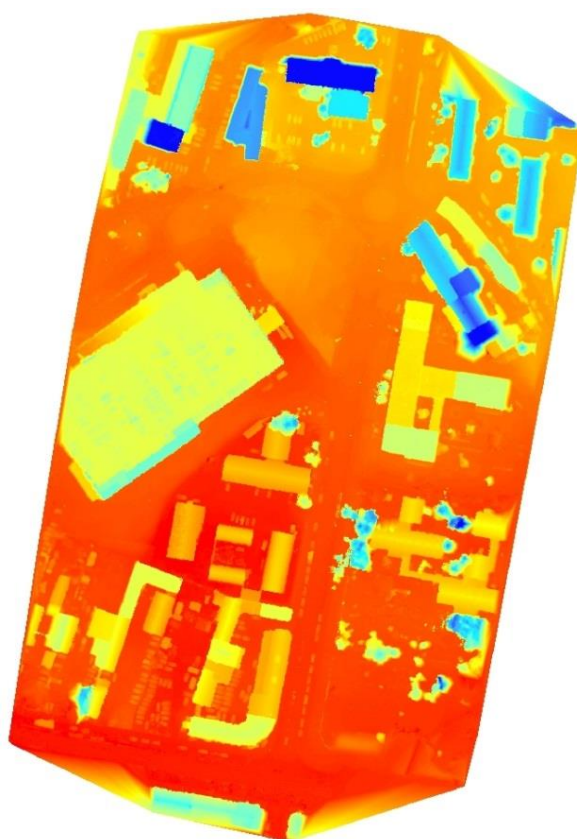
4.3.3 Zhodnocení

Pro zpracování tohoto projektu mi byla poskytnuta pouze týdenní trial licence. Prodloužení této licence bylo zamítnuto na základě politiky firmy. Ale pro školu byla nabídnuta vzdělávací verze, popřípadě bylo možné si zakoupit měsíční licenci za 260 €.

Tato týdenní licence však nakonec pohodlně stačila ke zpracování projektu a to zejména díky uživatelské přívětivosti programu. Uživatelská podpora se skládala z velmi rozsáhlého a podrobného manuálu, video tutoriálů, a osobní podpory pracovníka Pix4D.



Obr. č. 4.6 Ortofotomozaika



Obr. č. 4.7 DSM

Celkově bylo použito pro zpracování 25 vlíčovacích bodů. Hodnota GSD (Ground Sample Distance) byla 2,81 cm. Znamená to tedy, že jeden pixel na snímku reprezentuje 2,81 cm na povrchu země.

Podrobnější výsledky zpracování jsou uvedeny v kapitole 5.1. Vyhodnocení dat.

Cena licence je 6500 € zdroj [24]

4.4 Kalibrace kamery

Pro zpracování snímků je třeba znát prvky vnitřní orientace. Jelikož nebyly dostupné kalibrované parametry kamery, bylo potřeba kameru kalibrovat při zpracování snímků.

Kalibrace systému snímků slouží k určení vlastností použitého fotografického přístroje a popisuje skrze níže uvedené parametry tzv. prvky vnitřní orientace:

- Konstanta komory
- Poloha hlavního snímkového bodu
- Zkreslení

[12]

Tab. 4.2 Parametry kalibrace kamery

| parametry kalibrace | | | souřadnice hlavního bodu | | | | |
|-----------------------|------------------|---------|--------------------------|---------|--------|---------|-----------------|
| Canon EOS 5D mark III | konstanta kamery | | X | | Y | | Velikost pixelu |
| jednotky | [mm] | [pix] | [mm] | [pix] | [mm] | [pix] | [mm] |
| tovární parametry | 50,000 | 8000,00 | 18,000 | 2880,00 | 12,000 | 1920,00 | 6,25 |
| Orpheus | 50,445 | 8071,19 | 17,946 | 2871,41 | 11,901 | 1904,16 | 6,25 |
| Pix4D | 53,533 | 8309,26 | 18,441 | 2862,31 | 12,363 | 1919,03 | 6,44 |

Z Tab. 4.2 je zřejmé, že konstanta kamery v programu Pix4D je značně rozdílná od uvedené tovární hodnoty. Tato odchylka je však způsobena tím, že program Pix4D neprovádí klasickou kalibraci, ale pouze jakousi optimalizaci. Při dotazu na pracovníka podpory jsem byl ujištěn, že tato hodnota může být značně odlišná od tovární hodnoty a rozdílná pro každou sadu snímků. Vypovídající je také to, že v tomto programu se nedá nastavit pevná ohnisková vzdálenost. Otázkou tedy je, jak důležitá je laboratorní kalibrace kamery pro snímkování UAS.

4.5 Další možnosti zpracování

Pro zpracování snímků pořízených UAS se příliš nehodí programy pro klasickou leteckou fotogrammetrii, proto vzniká velké množství programů zaměřených právě na tyto snímky. V dalších kapitolách je uvedeno několik z nich. Z dalších můžeme jmenovat například EnsoMOSAIC (www.mosaicmill.com), Aerogis (www.aerogis.de), UASMaster (www.trimble.com).

4.5.1 DroneMapper

Program malé americké společnosti, která sídlí v Coloradu. Slouží ke zpracování snímků pořízených z pilotovaných i nepilotovaných letadel. Umožňuje tvorbu ortofotomozaiky (orthomosaic), mračen bodů (point cloud), digitálního modelu povrchu (Digital Surface Model), vrstevnic (contour lines), digitálního výškového modelu (Digital Elevation Model) a dalších.

Cena se odvíjí od snímkové plochy.

Tab. 4.3 Ceník Dronemapper [25]

| oblast | cena (USD) |
|----------------------|------------|
| < 1 km ² | 20 |
| < 2 km ² | 40 |
| < 3 km ² | 60 |
| < 4 km ² | 80 |
| < 5 km ² | 100 |
| < 10 km ² | 200 |

Společnost momentálně neposkytuje, ani neprodává licenci.

[25]

4.5.2 Icaros

Jedná se o společnost založenou roku 2014 v USA. Zabývá se především GIS a leteckým mapováním. Jednou z jejich činností je i tvorba fotogrammetrického softwaru – Icaros Photogrammetric Software (IPS). Používá se pro mapování a inženýrské aplikace, včetně sledování přírodních katastrof, zemědělské a lesnické analýzy, mapování potrubí a energetických auditů. Software IPS je vysoce automatizovaný, což znamená velmi krátkou dobu od sběru až po dodání výsledků, s minimálními zásahy obsluhy.

Program umožňuje zpracování snímků pořízených z UAV včetně termálních a šikmých snímků. Výstupem může být ortofotomozaika, DMT, DSM, DEM a mnoho dalších. Velkou výhodou je, že program funguje na základech ESRI Arcgis, proto je zaručena vysoká kompatibilita s tímto programem.

[26]

Nejnižší cena jedné licence činí 3350 \$

4.5.3 Menci Software

Je italský vývojář softwaru a poskytovatel GIS softwarových produktů používaných v geodézii, mapování a fotogrammetrických aplikacích. Menci bylo založeno v roce 1999 a dnes patří k předním společnostem v Evropě pro fotogrammetrii, 3D modely, mapování, digitální kartografii a v dalších aktivitách.

Společnost je tvůrcem programu APS-Automatic photogrammetric processing station. Jedná se o program určený přímo pro zpracování snímků pořízených z UAV. Nabízena je zkušební verze programu. Společnost spolupracuje se společností SenseFly.

Umožňuje import snímků z jakéhokoliv typu UAV ve formátu *.tif, nebo *.jpg. Snímky vyžaduje georeferencované, podélný a příčný překryt 70-80%. Program podporuje vstup vličovacích bodů. Výsledkem jsou DSM, DTM, DEM, ortofotomozaika a některé další.
[27]

5. Zpracování výsledků

Pro zpracování výsledků, tedy především souřadnic měřených bodů ve fotogrammetrických programech, bylo stěžejní jejich porovnání s kontrolními body zaměřenými geodetickou metodou. Tyto body sloužily jako etalon pro následnou kontrolu přesnosti.

5.1 Měřická síť

Pro přesné a spolehlivé zaměření vlíčovacích a kontrolních bodů byla vybudována měřická síť. Před samotným budováním musela být stanovena metoda měření a přístrojové vybavení a následně byla stanovena střední souřadnicová a střední výšková chyba. Z těchto hodnot se pak vycházelo při výpočtu chyb kontrolních a vlíčovacích bodů.

5.1.1 Rozbor přesnosti

Před samotným měřením byl proveden rozbor přesnosti, který měl určit metodu měření a použité přístroje. Potřebná přesnost, která měla být stejná, nebo lepší než fotogrammetrická metoda, byla odhadnuta na střední souřadnicovou chybu 3 cm a střední výškovou chybu na 6 cm. Při tomto odhadu se vycházelo z [3].

Na základě těchto zjištění byla vybudována měřická síť, jejíž body byly vhodně umístěny a stabilizovány pomocí měřických hřebů. Umístěny byly tak, aby z nich mohly být přímo zaměřeny vlíčovací a kontrolní body. Síť byla tvořena i s ohledem na dostatečnou provázanost. K měření byla použita totální stanice Topcon GPT-3003N společně s trojpodstavcovou soupravou. Díky této soupravě došlo k eliminaci chyb z centrace.

Jedním z požadavků bylo připojit tuto síť do S-JTSK a do výškového systému Bpv. Připojení do S-JTSK mělo být realizováno pomocí bodů PPBP, které byly stabilizovány jako rohy budov. Navázání do Bpv mělo být realizováno trigonometricky, prostřednictvím nivelačních značek.

5.1.2 Měřické práce

Měřické práce probíhaly na podzim roku 2013. Nejdříve došlo k rekognoskaci území, poté k identifikaci vřícovacích bodů použitými pracovníky Geodisu. Pro připojení do státních referenčních systémů byly vyhledány body PPBP a body ČSNS. U bodů PPBP nastal problém s jejich identifikací, jelikož oměrné míry v místopisech neodpovídaly měřeným kontrolním mírám v terénu. Příčinou bylo zateplení budov, na kterých byly body stabilizovány. Proto musela být zvolena jiná metoda navázání do S-JTSK. U nivelačních značek žádný takový problém nenastal, v okolí se nacházely 3 značky.

Po rozmístění a stabilizaci bodů začalo samotné měření. Nejprve byla zaměřená síť, v jedné skupině, délky byly měřeny protisměrně. Při měření byla snaha o dostatečné provázání sítě. Síť byla trigonometricky připojena na 3 nivelační značky ČSNS. Pro navázání do S-JTSK byla nakonec zvolena metoda RTK. Touto metodou bylo zaměřeno 7 bodů sítě a to 2x s odstupem jedné hodiny.

Kontrolní a vřícovací body byly měřeny polární metodou z jednotlivých bodů sítě. Bylo nutné, aby tyto body bylo možné dobře identifikovat na snímcích. V našem případě jsme měli možnost disponovat v terénu předem vytištěnými snímky a tedy vybírat body podle nich. Důraz byl kladen na to, aby byly body rozmístěny rovnoměrně a bylo možné je zaměřit dostatečně kvalitně. Při měření jsme vedli náčrt a měření bylo kódováno. Takto bylo zaměřeno 30 vřícovacích bodů a asi 150 kontrolních bodů. Při měření těchto bodů byly některé zaměřeny z více stanovisek, aby byla možná kontrola.



Obr. č. 5.1 Příklad stabilizace bodu sítě



Obr. č. 5.2 Příklad kontrolního bodu (roh vpusti)

5.1.3 Zpracování měření

Vyrovnání sítě probíhalo v programu Groma v.8. Nejprve došlo k výpočtu v místním souřadném systému. Výsledkem zpracování jsou souřadnice bodů sítě společně s protokolem vyrovnání. Souřadnice i protokoly jsou součástí příloh. Střední souřadnicová chyba bodů sítě je **7 mm**, výšková chyba bodů sítě je **14 mm**.

VÝSLEDKY VYROVNÁNÍ:

```
=====
[pvv] : 1039.2349
[pvv] (1. kontrola) : 1039.2194
[pvv] (2. kontrola) : 1039.2194
Počet nadbytečných měření : 9
základní střední chyba m0 apriorní [cc]: 10.00
základní střední chyba m0 aposteriorní [cc]: 10.75
m0 aposteriorní / m0 apriorní : 1.07
Interval spolehlivosti : 0.53 - 1.47
Stopa matice L : 41.0000 (má být 41.0000)
Stopa submatice L - délky : 14.2941
Stopa submatice L - směry : 26.7059
```

Obr. č. 5.3 Výsledky polohového vyrovnání

```
|střední souřadnicová chyba mxy [mm]: 7.11
```

Obr. č. 5.4 Střední souřadnicová chyba sítě

VÝSLEDKY VYROVNÁNÍ:

```
=====
Počet nadbytečných měření : 4
[pvv] : 4697.7245
[pvv] (kontrola) : 4697.7245
základní střední chyba m0 apriorní [mm] : 30.00
základní střední chyba m0 aposteriorní [mm] : 34.27
m0 aposteriorní / m0 apriorní : 1.14
Interval spolehlivosti : 0.29 - 1.71
Stopa matice L : 16.0000 (má být 16.0000)
Norma vektoru atpv : 0.0000 (má být 0)
Průměrná střední chyba vyrovnaných výšek [mm] : 13.88
Průměrná střední chyba vyrovnaných měření [mm] : 8.78
Norma matice reziduí A*inv(A) : 0.00e+000 (má být 0)
Norma matice reziduí inv(A)*A : -4.44e-016 (má být 0)
```

Obr. č. 5.5 Výsledky výškového vyrovnání

Po vyrovnání v místním systému byla provedena transformace do S-JTSK. K této transformaci sloužily body zaměřené metodou RTK. Transformace byla zvolena podobností, aby byla zachována vysoká vnitřní přesnost sítě. Protokol o transformaci je součástí příloh.

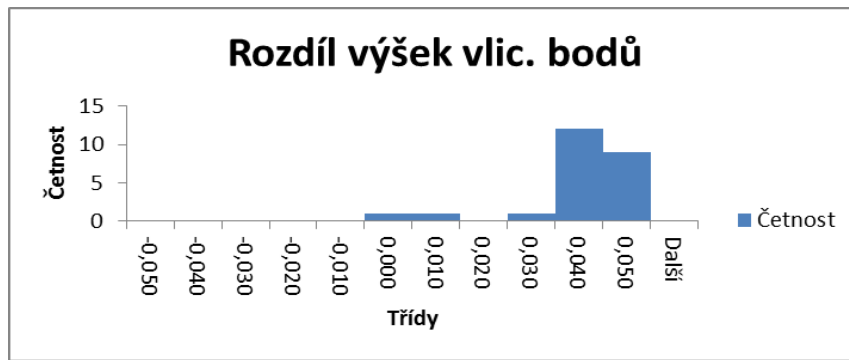
Posledním krokem je výpočet podrobných bodů, tedy vřícovacích a kontrolních. Ten také proběhl v programu Groma v.8. Výsledkem jsou souřadnice, výšky bodů a protokol o výpočtu. V protokolu jsou také uvedeny kolize bodů. Některé body byly zaměřeny z více stanovisek a sloužily pro kontrolu. Souřadnice, výšky i protokol o výpočtu jsou součástí příloh.

Tab. č. 5.1 Rozdíly vřícovacích bodů

| GCP | ϵ_y [m] | ϵ_x [m] | ϵ_H [m] |
|------|------------------|------------------|------------------|
| 1001 | -0,008 | -0,006 | 0,043 |
| 1002 | -0,009 | 0,003 | 0,039 |
| 1003 | -0,023 | 0,004 | 0,049 |
| 1004 | -0,016 | -0,007 | 0,030 |
| 1005 | -0,032 | 0,000 | 0,045 |
| 1007 | 0,003 | 0,014 | 0,036 |
| 1008 | -0,028 | -0,019 | 0,033 |
| 1009 | 0,009 | -0,004 | 0,032 |
| 1010 | -0,015 | 0,003 | 0,043 |
| 1011 | -0,012 | -0,013 | 0,033 |
| 1012 | -0,001 | -0,012 | 0,048 |
| 1013 | 0,013 | -0,011 | 0,042 |
| 1014 | -0,071 | -0,120 | 0,048 |
| 1016 | 0,053 | 0,022 | 0,033 |
| 1017 | -0,016 | 0,000 | 0,050 |
| 1018 | 0,014 | 0,002 | 0,032 |
| 1019 | -0,002 | 0,002 | 0,047 |
| 1020 | 0,002 | -0,014 | 0,006 |
| 1021 | -0,015 | -0,006 | 0,035 |
| 1022 | 0,015 | -0,006 | 0,037 |
| 1023 | 0,003 | -0,006 | 0,047 |
| 1024 | -0,035 | 0,004 | -0,002 |
| 1025 | 0,001 | -0,015 | 0,054 |
| 1028 | -0,009 | -0,002 | 0,034 |
| 1029 | -0,022 | -0,022 | 0,040 |
| 1030 | 0,002 | -0,002 | 0,028 |

Průměrná absolutní hodnota odchylky byla $\Delta y=0,023$ m a $\Delta x=0,026$ m. Odchylka pro výšku $\Delta h=0,039$ m. U výšky je z Grafu č. XX patrná systematická chyba určení.

Graf. č. 5.1 Rozdíly výšek vlic. bodů



Spočítané mezivýsledky byly porovnávány s výpočty Bc. Ondřeje Ptáčka, který prováděl výpočet v programu VKM G-net mini. Výsledky se lišily v řádech jednoho až dvou milimetrů.

Střední souřadnicová chyba kontrolních a vlicovacích bodů byla spočtena podle vzorců:

$$m_{x,yi}^2 = \frac{m_s^2 + sm_\omega^2}{2} \quad (5.1)$$

[9]

$$m_{x,y0}^2 = \left(1 - \frac{s}{s_{A,B}} \cos \omega + \frac{s^2}{s_{A,B}^2} \right) m_{x,yA}^2 \quad (5.2)$$

[9]

$$m_{x,y}^2 = m_{x,yi}^2 + m_{x,y0}^2 \quad (5.3)$$

Střední souřadnicová chyba vlicovacího nebo kontrolního bodu $m_{x,y}=0,015\text{m}$.

$$m_{hi}^2 = \cos^2 z_{PB} m_{S_{PB}}^2 + \cos^2 z_i m_{S_i}^2 + (S_{PB}^2 \cos^2 z_{PB} + S_i^2 \cos^2 z_i) m_z^2 \quad (5.4)$$

[10]

$$m_h^2 = m_{hi}^2 + m_{h0}^2 \quad (5.5)$$

Střední výšková chyba bodu $m_h=0,025\text{m}$.

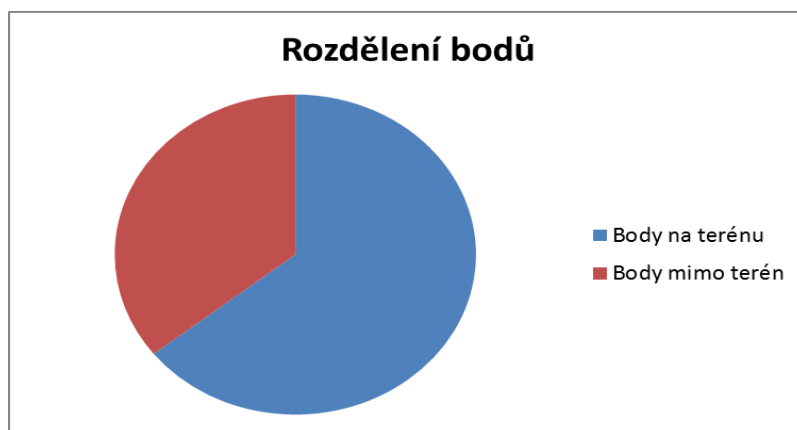
5.2 Vyhodnocení získaných souřadnic

Pro vyhodnocení byly spočteny 4 sady souřadnic. Jedna sada souřadnic byla měřena přímo v terénu. Vzhledem k dosažené přesnosti jsou tyto souřadnice považovány dále za bezchybné. Další dvě sady pochází z programu Photomodeler. Jedna z nich byla spočítána přímo v Photomodeleru a druhá v programu Orpheus. Souřadnice v programu Orpheus byly spočteny z měřených dat ve Photomodeleru. Poslední sada souřadnic pochází z programu Pix4D.

Sada souřadnic určená v programu Photomodeler nebyla nakonec do vyhodnocení použita. Výstupní přesnost souřadnic deklarovaná protokolem z tohoto programu byla kvalitní, ovšem při porovnání se souřadnicemi měřenými geodeticky byly zjištěny velké odchylky. Celková střední souřadnicová a výšková chyba bodů z programu Photomodeler byla 3x větší než chyby v programu Orpheus, či Pix4D. To byl také důvod k dalšímu výpočtu v programu Orpheus. Ačkoliv vstupní data pro výpočet byla stejná (měřené snímkové souřadnice), výsledky byly velmi odlišné. Program Orpheus byl zvolen i z důvodu zkušeností se zpracováním snímků pořízených UAS, který je popsán v [3].

Pro zpracování byly sady souřadnic rozděleny do dvou částí. Na body nacházející se přímo na terénu (povrchové znaky inženýrských sítí, vodorovné dopravní značení, praskliny v betonu, změny povrchu apod.) a body mimo terén (horní rohy zdí, budov, vršky sloupků plotu apod.). Důvodem rozdělení byla předpokládaná rozdílná přesnost těchto souborů. Zejména u výškové složky.

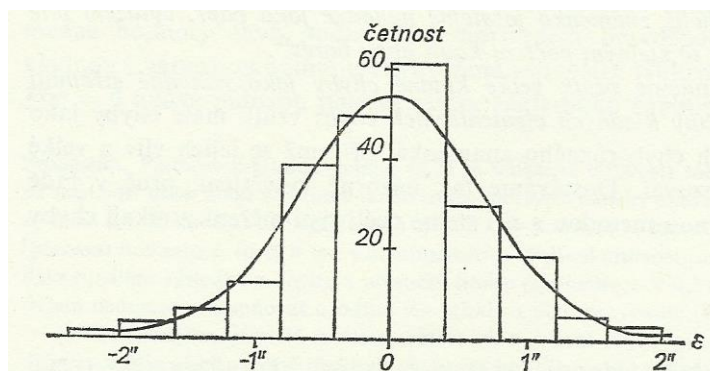
Graf č. 5.2 Rozdělení bodů



5.2.1 Četnosti chyb

Pro zjištění lepšího povědomí o rozdělení chyb v souborech byly vytvořeny grafy četnosti chyb (histogramy). Můžeme tak například zjistit, zda chyby v těchto souborech jsou náhodné, nebo jsou zatíženy například systematickou chybou. Chyby byly rozděleny do 30 tříd. Od $-0,15$ m až $+0,15$ m.

Náhodné měřické chyby jsme definovali jako chyby, které jednotlivě nepodléhají žádným zákonitostem. Nemůžeme např. předvídat, jaká bude velikost nebo znaménko chyby právě prováděného měření. Zkušenost však ukazuje, že při větším množství měření stejného druhu nebo téže veličiny můžeme pozorovat u náhodných chyb stejné zákonitosti jako u hromadných náhodných jevů. Náhodné chyby stejného druhu mají charakter náhodné veličiny s příslušným rozdělením.



Obr. č. 5.6 Histogram [6]

Zákonitosti u náhodných chyb stejného druhu vyniknou již v menších souborech (stačí i několik desítek), jestliže chyby uspořádáme podle velikosti, sdružíme do 8-12 tříd a jejich počty vyneseme graficky v podobě histogramu. Na základě empiricky zjištěných vlastností náhodných chyb formuloval již Gauss tyto jejich zákonitosti:

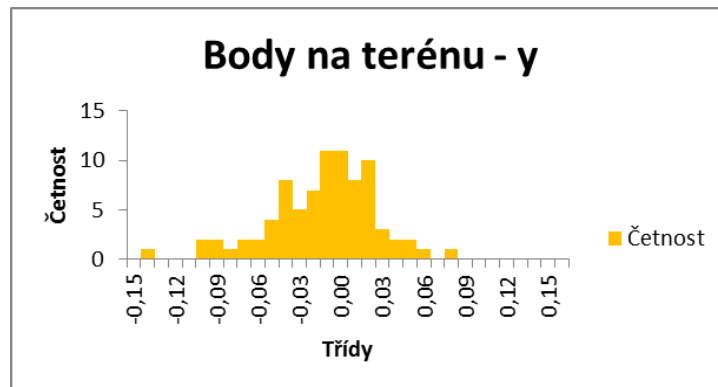
- pravděpodobnost vzniku kladné nebo záporné chyby určité velikosti je stejná.
- malé chyby jsou pravděpodobnější (četnější) než velké-pravděpodobnost výskytu chyb je funkcí jejich velikosti
- Chyby nad určitou mez se nevyskytují (při překročení meze je považujeme za hrubé - nenáleží do základního souboru náhodné chyby).

[6]

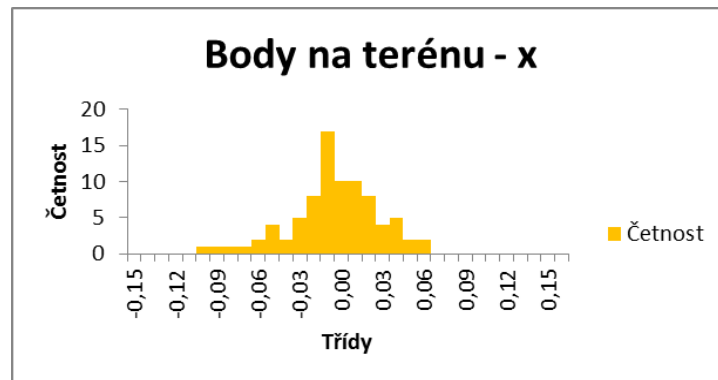
Body na terénu (poloha):

Geodetické-Orpheus

Graf č. 5.3 Geodetické - Orpheus y

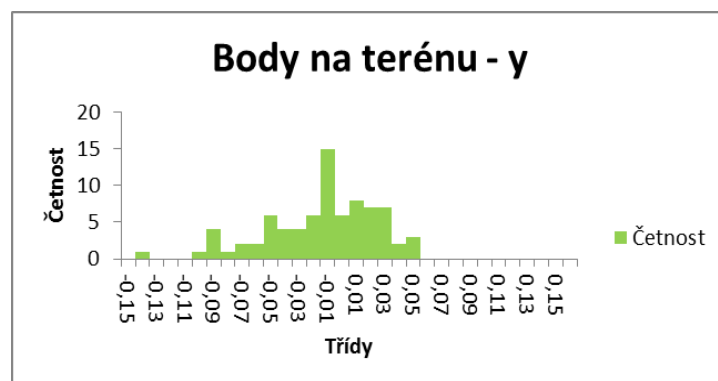


Graf č. 5.4 Geodetické - Orpheus x

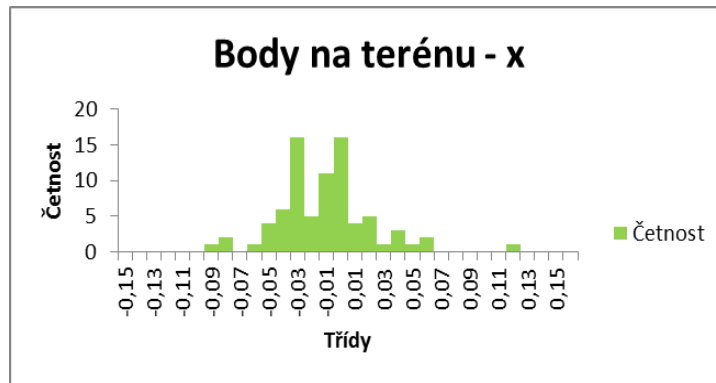


Geo-Pix4D

Graf č. 5.5 Geodetické - Pix4D y



Graf č. 5.6 Geodetické-Pix4D x

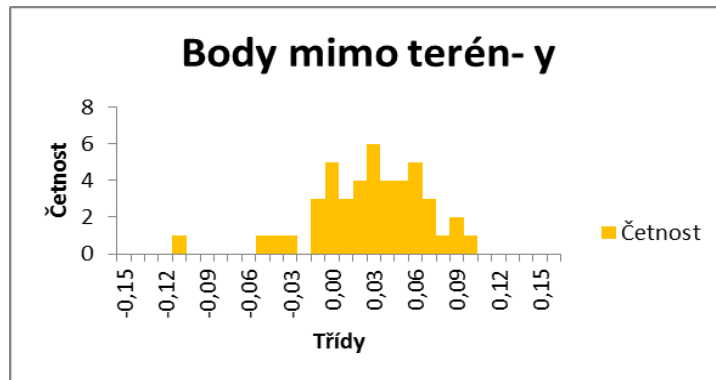


Z uvedených grafů je zřejmé, že chyby jsou náhodné.

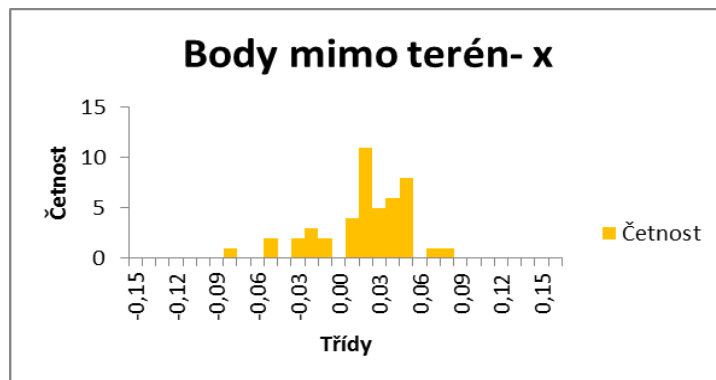
Body mimo terén (poloha):

Geo-Orpheus

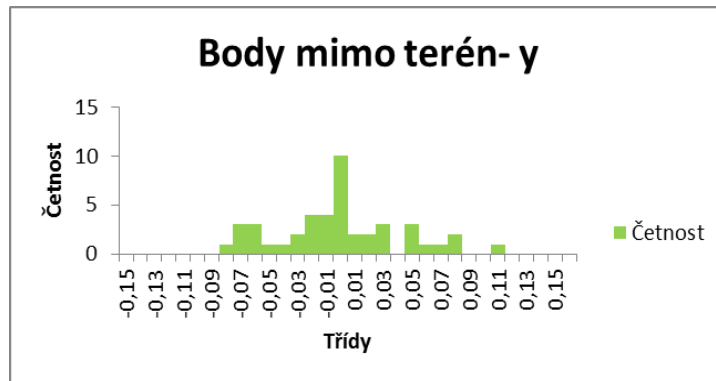
Graf č. 5.7 Geodetické - Orpheus y



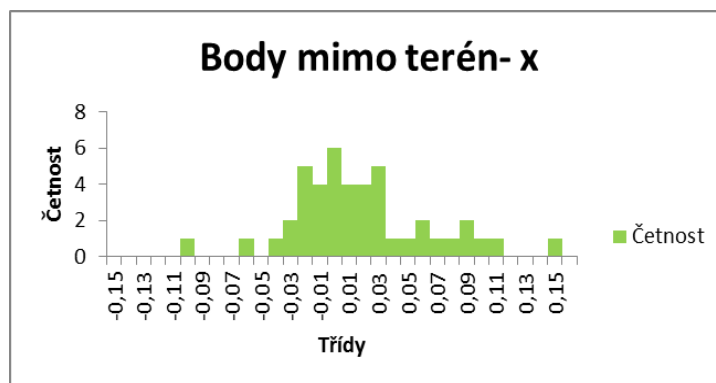
Graf č. 5.8 Geodetické - Orpheus x



Graf č. 5.9 Geodetické - Pix4D y



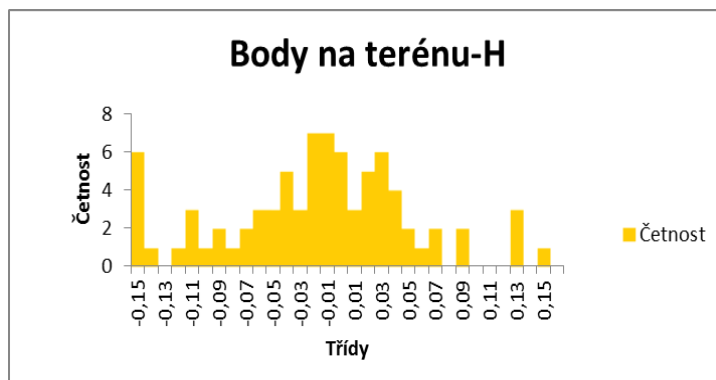
Graf č. 5.10 Geodetické - Pix4D x



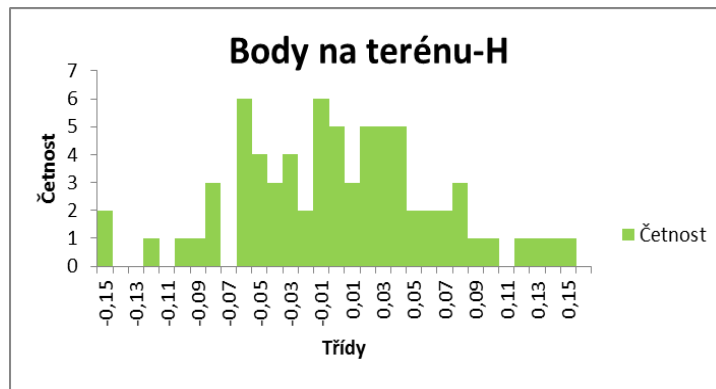
Ani u bodů mimo terén není vidět žádný výrazný systematický vliv.

Body na terénu (výška):

Graf č. 5.11 Geodetické - Orpheus H



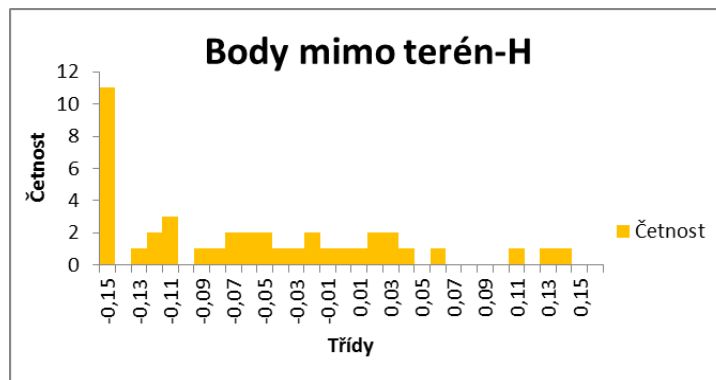
Graf č. 5.12 Geodetické – Pix4D H



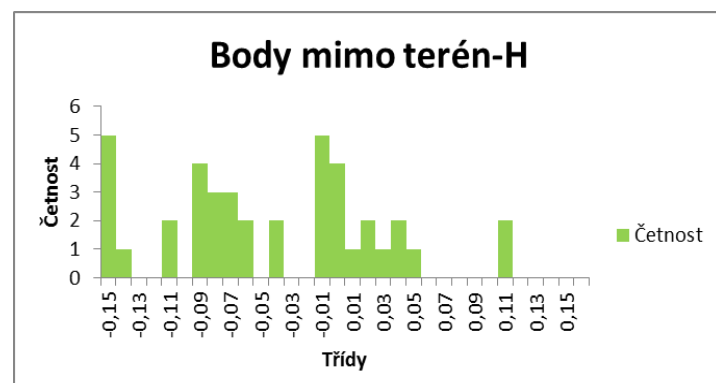
Z těchto grafů je vidět že rozdělení chyb je méně náhodné.

Body mimo terén (výška):

Graf č. 5.13 Geodetické - Orpheus H



Graf č. 5.14 Geodetické – Pix4D H



Zde můžeme vidět vyšší četnost záporných chyb. Ta je dána pravděpodobně tím, že paprsky se protnou spíše pod měřeným bodem a nikoliv nad ním.

5.2.2 Střední chyby

V běžné praxi se většinou vyskytují malé soubory opakovaných měření, nebo chyb stejného druhu (jednotlivé menší sítě apod.). Mírou koncentrace chyb kolem střední nulové hodnoty bude zde

$$m^2 = \frac{[\varepsilon^2]}{n}, \quad m = \sqrt{\frac{[\varepsilon^2]}{n}} \quad (\text{náhodná veličina}) \quad (5.6)$$

Výsledkem je empirická střední kvadratická chyba měření m , zkráceně střední chyba, která reprezentuje jedním číslem daný soubor n chyb. Je to náhodná veličina, protože je vypočítána z konečného počtu n chyb (z neúplných informací o hodnotě m) a její hodnota závisí na střetnutí n náhodných hodnot jednotlivých chyb.

[6]

Střední souřadnicová chyba $m_{x,y}$ je charakteristikou přesnosti polohy bodu vypočtenou ze vztahu:

$$m_{x,y}^2 = 0,5(m_x^2 + m_y^2) \quad (5.7)$$

[8]

$$\varepsilon_y = y_{geo} - y_{fot} \quad (5.8)$$

ε_yskutečná chyba v souřadnici y

y_{geo}souřadnice y měřené geodeticky

y_{fot}souřadnice y měřené fotogrammetricky

$$m_y = \sqrt{\frac{\varepsilon_y \varepsilon_y}{n}} \quad (5.9)$$

m_ystřední chyba v ose y

Střední chyby byly opět určeny zvláště pro body na terénu a body mimo terén. Z dat byly vyloučeny odlehlé hodnoty, které přesahovaly trojnásobek střední chyby. Součinitel konfidence t byl volen roven 3 z důvodu složitosti výpočetního aparátu. Vyloučeno tedy bylo poměrně malé množství hodnot. Procento vyloučených hodnot se pohybovalo kolem 5%.

Tab. č. 5.2 Střední chyby body na terénu

| | body na terénu | | |
|-----------|----------------|-------|-----|
| | Orpheus | Pix4D | |
| m_y | 0,042 | 0,043 | [m] |
| m_x | 0,033 | 0,036 | [m] |
| $m_{x,y}$ | 0,038 | 0,040 | [m] |
| m_H | 0,115 | 0,104 | [m] |

Tab. č. 5.3 Střední chyby body mimo terén

| | body mimo terén | | |
|-----------|-----------------|-------|-----|
| | Orpheus | Pix4D | |
| m_y | 0,052 | 0,044 | [m] |
| m_x | 0,036 | 0,048 | [m] |
| $m_{x,y}$ | 0,044 | 0,046 | [m] |
| m_H | 0,186 | 0,196 | [m] |

Z výsledků je patrné, že rozdíly těchto dvou souborů v poloze jsou významně menší, než ve výšce.

Chyby celého souboru.

Tab. č. 5.4 Střední chyby pro celý soubor

| | Orpheus | Pix4D | |
|-----------|---------|-------|-----|
| m_y | 0,044 | 0,044 | [m] |
| m_x | 0,034 | 0,043 | [m] |
| $m_{x,y}$ | 0,039 | 0,044 | [m] |
| m_H | 0,134 | 0,117 | [m] |

Pro ilustraci byly zjištěny i chyby u vlíčovacích bodů.

Tab. č. 5.5 Střední chyby vlíčovacích bodů

| | vlíčovací body | | |
|-----------|----------------|-------|-----|
| | Orpheus | Pix4D | |
| m_y | 0,026 | 0,033 | [m] |
| m_x | 0,029 | 0,027 | [m] |
| $m_{x,y}$ | 0,027 | 0,030 | [m] |
| m_H | 0,020 | 0,177 | [m] |

Tyto chyby ovšem nejsou příliš reprezentativní, jelikož výpočetní aparát se snaží snímky těsně přimknout k vlíčovacím bodům.

Vzájemné porovnání Orpheus-Pix4D

Průměrná absolutní hodnota odchylky rozdílu mezi programy Orpheus a Pix4D byla $\Delta y=0,022$ m, v ose $\Delta x=0,023$ m a ve výšce $\Delta h=0,103$ m.

5.2.3 Rovnost variací normálně rozdělených souborů

Testujeme hypotézu, že dvě výběrové variance m_1^2 a m_2^2 ze dvou výběrů o rozsahu n_1 a n_2 odpovídají výběrům ze dvou základních souborů, pro které platí rovnost variancí, tedy $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Test se většinou používá jako oboustranný. Testovacím kritériem bude veličina

$$F = \frac{m_1^2}{m_2^2}, \text{ kde } m_1 = \sqrt{\frac{[vv]}{n_1 - 1}} \text{ a } m_2 = \sqrt{\frac{[vv]}{n_2 - 1}} \quad (5.10)$$

kteřá má F-rozdělení s $n_1' = n_1 - 1$ a $n_2' = n_2 - 1$ stupni volnosti. Ve vzorci volíme vždy $m_1^2 > m_2^2$. Z tabulek F-rozdělení najdeme pro zvolenu hladinu významnosti α kritickou hodnotu $F_{\alpha/2}$ na pravé straně rozdělení (oboustranný test). Nulovou hypotézu budeme zamítat při $F > F_{\alpha/2}$.

[6]

Byla testována hypotéza, zda si dva výběrové soubory odpovídají. V našem případě se jedná o body na terénu a body mimo terén. Toto testování probíhalo zvlášť pro Orpheus a Pix4D.

Hladina významnosti pro tuto analýzu $\alpha = 0,05$.

Stanovíme hypotézu, že se rovnají variance dvou základních souborů.

Tab. č. 5.6 F-test Orpheus

| $\alpha=0,05$ | m_y | m_x | m_H |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Zem | 0,042 | 0,033 | 0,115 |
| Mimo zem | 0,052 | 0,036 | 0,186 |
| F | 1,224 | 1,077 | 1,619 |
| F_α | 1,563 | 1,563 | 1,562 |
| hypotéza | $F < F_{\alpha/2}$ | $F < F_{\alpha/2}$ | $F > F_{\alpha/2}$ |
| | nezamítá se | nezamítá se | zamítá se |

Tab. č. 5.7 F-test Pix4D

| $\alpha=0,05$ | m_y | m_x | m_H |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Zem | 0,043 | 0,036 | 0,104 |
| Mimo zem | 0,044 | 0,048 | 0,196 |
| F | 1,015 | 1,349 | 1,874 |
| F_α | 1,580 | 1,580 | 1,587 |
| hypotéza | $F < F_{\alpha/2}$ | $F < F_{\alpha/2}$ | $F > F_{\alpha/2}$ |
| | nezamítá se | nezamítá se | zamítá se |

S pravděpodobností omylu 5% nemůžeme zamítnout hypotézu o rovnosti variancí pro souřadnice y a x.

S pravděpodobností omylu 5% můžeme zamítnout hypotézu o rovnosti variancí pro výšku.

Je zřejmé, že toto platí jak pro body vypočtené v programu Orpheus tak i v programu Pix4D.

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit snímky pořízené technologií UAS a otestovat přesnost bodů měřených fotogrammetrickou metodou na kontrolních bodech různého typu. Jako podklad sloužily snímky, souřadnice vlíčovacích bodů a souřadnice projekčních center.

Pro zaměření vlíčovacích a kontrolních bodů byla vybudována měřická síť. Polohová přesnost této sítě byla charakterizována střední souřadnicovou chybou $m_{x,y} = 7$ mm, výšková přesnost $m_h = 14$ mm. Vlícovací body byly identifikovány z podkladů firmy Geodis s.r.o, kontrolní body byly voleny tak, aby rovnoměrně pokrývaly území. Jejich zaměření bylo provedeno pomocí polární metody ze stanovisek měřické sítě. Výsledná přesnost těchto bodů byla stanovena na $m_{x,y} = 15$ mm a $m_h = 25$ mm.

Zpracování snímků proběhlo ve třech programech. Prvním byl Photomodeler, který byl ovšem při zhodnocení výsledků vyřazen z dalšího testování. Další byl program Orpheus z TU Wien. Pro výpočet v tomto programu byly použity měřené snímkové souřadnice z programu Photomodeler. V programu Pix4D, který osobně sledávám jako uživatelsky nejpříznivější, došlo k vyhodnocení snímků a následně k vytvoření ortofotomozaiky a digitálního modelu povrchu.

Při vyhodnocení výsledků byly porovnávány body měřené geodetickými metodami s body měřenými fotogrammetricky. Body měřené geodeticky měly několikanásobně lepší střední chybu než fotogrammetrické, pro další vyhodnocení byly tedy považovány za bezchybné. Kontrolní body byly rozděleny do dvou skupin, na body na terénu a body mimo terén. Střední souřadnicová chyba bodů na terénu byla 5 cm, přibližně stejná chyba byla i chyba bodů mimo terén. Střední chyba výšky bodů na terénu byla přibližně 11 cm, u bodů mimo terén 19 cm. Pomocí F-testu bylo prokázáno, že si výškové rozptyly bodů na terénu a mimo terén neodpovídají. Nižší výšková přesnost je dána nepříznivým úhlem protínání paprsků. Těchto výsledků bylo dosaženo při výšce letu cca 230 m. Při snížení výšky letu je možné dosahovat lepších přesností.

I když vstupní data, tedy především měřené snímkové souřadnice byly pro programy Photomodeler i Orpheus stejné, výsledná střední souřadnicová chyba u programu

Photomodeler byla 3x větší než u programu Orpheus. Spočtené souřadnice kontrolních bodů z Photomodeleru nakonec byly z dalšího zpracování vyřazeny.

Výsledné souřadnicové a výškové chyby potvrzují, že technologie UAS může být použita ve velkém množství aplikací. Je však třeba brát v potaz její nižší výškovou přesnost.

Seznam použitých zdrojů

- [1] [ZÜRICH], Henri Eisenbeiss. [Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hoch. *UAV photogrammetry*. Zürich: Inst. Für Geodäsie und Photogrammetrie, 2009. ISBN 978-390-6467-863.
- [2] EVERAERTS, J. *THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) FOR REMOTE SENSING AND MAPPING*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008
- [3] Hanzl V., Káňa D.: Fotogrammetrická kvalita a využití snímků z pořízených z nepilotovaných prostředků. In: Geodézia, Kartografia a Geografické informačné systémy – VII. Vedecká-odborná konferencia s medzinarodnou účasťou. Tatranská Lomniva, Slovensko 2012, CD, 5 str., ISBN 978-80-553-1173-9.
- [4] PLÁNKA, L. Počátky snímování RC- modely letadel v Československu. In Sborník příspěvků z konference "Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství" 27.-28.2. 2014 Mendelova univerzita v Brně. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014.s. 1-12. ISBN: 978-80-7375-958- 2.
- [5] MIŘIJOVSKÝ, Jakub. Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Olomouc, 2013. disertační práce (Ph.D.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta
- [6] BÖHM, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet*. 2. uprav. vyd. Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1990, 416 s. ISBN 80-701-1056-2.
- [7] HANZL, Vlastimil. *FOTOGramMETRIE: MODUL 01 TEORETICKÉ ZÁKLADY FOTOGramMETRIE*. Brno, 2006.

- [8] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *INŽENÝRSKÁ GEODÉZIE I: GE16 MODUL 03 NÁVODY KE CVIČENÍM*. Brno, 2006.
- [9] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *INŽENÝRSKÁ GEODÉZIE II: GE03 MODUL 01 ANALÝZA PŘESNOSTI VYTYČENÍ POLOHY*. Brno, 2007.
- [10] MICHAL, Ondřej. *Analýza trigonometrické metody pro měření průhybu mostní konstrukce: Bakalářská práce*. Praha, 2013.
- [11] Photomodeler manuál. [cit. 20. 5. 2014]
Dostupné z: www.lfgm.fsv.cvut.cz/data/download/m_PhotoModeler_manual.pdf
- [12] Kalibrace neměřických komor. [cit. 20. 5. 2014]
Dostupné z: www.lfgm.fsv.cvut.cz/data/download/m_PhotoModeler_kalibrace.pdf
- [13] <https://www.google.cz/maps> [cit. 18. 5. 2014]
- [14] <http://www.microdrones.com> [cit. 24. 2. 2014]
- [15] <http://www.aibotix.com> [cit. 16. 5. 2014]
- [16] <https://www.sensefly.com> [cit. 23. 4. 2014]
- [17] <http://uas.trimble.com> [cit. 24. 4. 2014]
- [18] <http://velodynelidar.com> [cit. 23. 4. 2014]
- [19] <http://www.riegl.com> [cit. 23. 5. 2014]
- [20] <http://www.tetracam.com> [cit. 23. 4. 2014]

- [21] <http://www.optris.com> [cit. 22. 4. 2014]

- [22] <http://www.canon.cz> [cit. 24. 2. 2014]

- [23] <http://www.caa.cz> [cit. 29. 3. 2014]

- [24] <http://pix4d.com> [cit. 25. 4. 2014]

- [25] <http://dronemapper.com> [cit. 3. 5. 2014]

- [26] <http://www.icaros.us> [cit. 3. 5. 2014]

- [27] <http://www.menci.com> [cit. 4. 5. 2014]

- [28] <http://photo.geo.tuwien.ac.at> [cit. 12. 5. 2014]

Seznam použitých zkratek

| | |
|-----------------|--|
| UAS | bezpilotní letecké systémy (unmanned aircraft systems) |
| UAV | bezpilotní letoun (unmanned aerial vehicle) |
| RC | rádiem řízené (radio controlled, remote control) |
| GgÚ ČSAV | Geografický ústav Československé akademie věd |
| ÚCL | úřad pro civilní letectví |
| BBA | vyrovnání bloku svazků (block bundle adjustment) |
| AAT | automatická aerotriangulace (automatic aerial triangulation) |
| GNSS | globální navigační satelitní systémy |
| GSD | ground sample distance |
| DMT | digitální model terénu |
| DSM | digitální model povrchu (digital surface model) |
| DEM | digitální model výšek (digital elevation model) |
| S-JTSK | Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální |
| Bpv | výškový systém Balt po vyrovnání |

Seznam obrázků

- Obr. č. 1.1 Snímkovaná lokalita
- Obr. č. 2.1 Model „rogallo 1977“
- Obr. č. 2.2 Kamera Flexaret M-6 umístěná na modelu „rogallo 1981“
- Obr. č. 2.3 Microdrone md4-200
- Obr. č. 2.4 Microdrone md4-1000
- Obr. č. 2.4 Microdrone md4-3000
- Obr. č. 2.5 Aibotix s příslušenstvím
- Obr. č. 2.6 Ebee
- Obr. č. 2.7 SwingletCAM
- Obr. č. 2.8 X100
- Obr. č. 2.9 UX5
- Obr. č. 2.10 Optris PI450
- Obr. č. 2.11 TetraCam ADC Lite
- Obr. č. 2.12 Velodyne Lidar HDL 32E
- Obr. č. 2.13 Riegel LMS-Q160
- Obr. č. 2.14 Canon EOS 5D mark III
- Obr. č. 2.15 Canon EF 50mm
- Obr. č. 3.1 Fotografie vřícovacích bodů
- Obr. č. 3.2 Překryt snímků
- Obr. č. 4.1 Jeden z pořízených snímků
- Obr. č. 4.2 Prostředí Photomodeler
- Obr. č. 4.3 Ukázka části protokolu z Photomodeleru
- Obr. č. 4.4 Tvorba projektu
- Obr. č. 4.5 Rapid check
- Obr. č. 4.6 Zobrazení projekčních center a vřícovacích bodů
- Obr. č. 4.7 Ortofotomozaika
- Obr. č. 4.8 DSM
- Obr. č. 5.1 Příklad stabilizace bodu sítě
- Obr. č. 5.2 Příklad kontrolního bodu (roh vpusti)
- Obr. č. 5.3 Výsledky polohového vyrovnání
- Obr. č. 5.4 Střední souřadnicová chyba sítě

Obr. č. 5.5 Výsledky výškového vyrovnání

Obr. č. 5.6 Histogram

Seznam tabulek

Tab. č. 2.1 Rozdělení UAV

Tab. č. 2.2 Parametry md4-200

Tab. č. 2.3 Parametry md4-1000

Tab. č. 2.4 Parametry md4-3000

Tab. č. 2.5 Parametry Aibotix-x6

Tab. č. 2.6 Parametry Ebee a SwingletCAM

Tab. č. 2.7 Parametry UX5 a X100

Tab. č. 4.2 Ukázka point table Photomodeler

Tab. č. 4.2 Parametry kalibrace kamery

Tab. č. 4.1 Ceník Dronemapper

Tab. č. 5.1 Rozdíly Vlíčovacích bodů

Tab. č. 5.2 Střední chyby body na terénu

Tab. č. 5.3 Střední chyby body mimo terén

Tab. č. 5.4 Střední chyby pro celý soubor

Tab. č. 5.5 Střední chyby vlíčovacích bodů

Tab. č. 5.6 F-test Orpheus

Tab. č. 5.7 F-test Pix4D

Seznam grafů

Graf č. 5.1 Rozdíly výšek vlíc. bodů

Graf č. 5.2 Rozdělení bodů

Graf č. 5.3 Geodetické - Orpheus y

Graf č. 5.4 Geodetické - Orpheus y

Graf č. 5.5 Geodetické - Pix4D y

Graf č. 5.6 Geodetické-Pix4D x

Graf č. 5.7 Geodetické - Orpheus y

Graf č. 5.8 Geodetické - Orpheus x

Graf č. 5.9 Geodetické - Pix4D y

Graf č. 5.10 Geodetické - Pix4D x

Graf č. 5.11 Geodetické - Orpheus H

Graf č. 5.12 Geodetické – Pix4D H

Graf č. 5.13 Geodetické - Orpheus H

Graf č. 5.14 Geodetické – Pix4D H

Seznam elektronických příloh

- Příloha č.1 Snímky
- Příloha č.2 Souřadnice projekčních center
- Příloha č.3 Vlíčovací body-Geodis
- Příloha č.4 Ortofotomozaika-Geodis
- Příloha č.5 Zápisníky měření
- Příloha č.6 Protkol polohového vyrovnání
- Příloha č.7 Protkol výškového vyrovnání
- Příloha č.8 Protokol transformace
- Příloha č.9 Protokol bodů GNSS
- Příloha č.10 Seznam souřadnic bodů sítě
- Příloha č.11 Seznam souřadnic kontrolních bodů
- Příloha č.12 Seznam souřadnic vlíčovacích bodů
- Příloha č.13 Fotodokumentace vlíčovacích bodů
- Příloha č.14 Přehledka vlíčovacích bodů
- Příloha č.15 Převodní tabulka pro vlíčovací body
- Příloha č.16 Výstupní tabulka a protokol Photomodeler
- Příloha č.17 Seznam souřadnic bodů Photomodeler
- Příloha č.18 Převodní tabulka pro body Photomodeler a Orpheus
- Příloha č.19 Protokol Orpheus
- Příloha č.20 Seznam souřadnic bodů Orpheus
- Příloha č.21 Protokol Pix4D
- Příloha č.22 Seznam souřadnic bodů Pix4D
- Příloha č.23 Ortofotomozaika Pix4D
- Příloha č.24 DSM Pix4D
- Příloha č.25 Ukázka výpočetního excelu

Další přílohy

1 x DVD příloh