

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

Bc. Martin ŠIMÍČEK

**IMPLEMENTACE METODY STRUCTURE FROM
MOTION DO UAV FOTOGRAMMETRIE**

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci magisterského studia oboru Geoinformatika a geografie/Geoinformatika vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Jakuba Miřijovského, Ph.D.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Všechna poskytnutá i vytvořená digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 18. dubna 2014

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakobovi Miřijovskému, Ph.D. za rady, podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji všem, kteří pomáhali v průběhu práce, a svým blízkým za pomoc a podporou.

Za poskytnuté rady a podnětné připomínky děkuji Ing. Janu Jemelkovi.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
ÚVOD	9
1 CÍLE PRÁCE.....	10
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	11
3 TEORETICKÝ ÚVOD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
3.1 Fotogrammetrie	13
3.1.1 Dělení fotogrammetrie.....	14
3.1.2 Princip fotogrammetrie.....	15
3.2 Structure from Motion.....	18
3.3 Unmanned Aerial Vehicle.....	20
3.3.1 Definice pojmu	20
3.3.2 Historie	20
3.3.3 Platformy a využití	21
3.3.4 UAV fotogrammetrie.....	22
4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ	23
4.1 Kalibrace	23
4.1.1 Pozemní kalibrace.....	25
4.1.2 Letecká kalibrace	27
4.2 Předletová příprava	29
4.2.1 Optimalizace návrhu předletové přípravy	31
4.3 Zpracování dat metodou Structure from Motion	32
4.3.1 Základní proces tvorby výstupu v programu PhotoScan.....	33
4.3.2 Rozšířené možnosti základního procesu v programu PhotoScan.....	39
5 VÝSLEDKY	42
5.1 Vyhodnocení kalibrace kamer.....	42
5.1.1 Výsledky pozemní kalibrace.....	42
5.1.2 Výsledky letecké kalibrace	45
5.2 Vyhodnocení optimalizace předletové přípravy	46
5.3 Vyhodnocení zpracování metodou Structure from Motion	49
5.3.1 Optimalizace výpočetních parametrů dílčích procesů zpracování	49
5.3.2 Volba optimálního souřadnicového systému.....	50
5.3.3 Porovnání přesností výstupů.....	51
6 PŘÍPADOVÁ STUDIE	59
6.1 Zpracování případové studie	59
6.2 Vyhodnocení případové studie.....	60
7 DISKUZE	62

8 ZÁVĚR	64
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
SUMMARY	
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
ASC	ASCII file format
BIL	Band Interleaved by Line
BMP	BitMaP image file
CAD	Computer Aided Design
CCD	Chraged-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPU	Central Processor Unit
CSV	Coma Separated Value
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DAE	Digital Elevation Model
DEM	Joint Picture Experts Group
DXF	Drawing Exchange Format
EXIF	Exchangeable Image File
FAA	Federal Aviation Administration
FBX	FilmBox
GCP	Ground Control Points
GeoTIFF	Georeferencing Tag Image File Format
GPU	Grafic Processor Unit
GSD	Ground Sample Distance
CHKO	Chráněná krajinná oblast
JPEG	Joint Picture Experts Group
LAI	Leaf Area Index
LAS	Laser file format
LPS	Leica Photogrammetry Suit
OBJ	Object file format
OS	Operační systém
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphic
RAM	Random-Access Memory
RMS	Root Mean Square
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SfM	Structure from Motion
SPOT-1	Satellite Pour l'Observation de la Terre 1

SVD	Singular Value Decomposition
TIFF	Tag Image File Format
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unamnned Aerial Vehicle
UAVS	Unmanned Aircraft Vehicle System
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
VRML	Virtual Reality Modeling Language

ÚVOD

Pořizování a zpracování prostorových dat, založených na principu leteckého snímkování a fotogrammetrie, již dlouhou dobu není záležitostí státních orgánů, jako je například armáda, či velkých soukromých firem. V současné době se hranice pokroku různých technologií neustále překonává. S tím souvisí i rozvoj technologií pro sběr dat pořizovaných ze vzduchu. Velká pilotovaná letadla, vybavená speciálními přístroji pro pořizování leteckých snímků, byly doménou pouze již zmíněných státních a soukromých institucí. S tím navíc souvisí i jejich nákladný provoz a potřeba četného a odborného personálu, který se stará jak o měřickou aparaturu, tak i o samotný nosič.

V posledních několika letech zaznamenala velký rozmach technologie tzv. UAV neboli bezpilotních prostředků. Ty lze v kombinaci s neměřickými kamerami využít k pořizování leteckých snímků stejně dobře jako konvenčních pilotovaných prostředků. V mnoha případech i se značnými výhodami.

V některých aplikacích je potřeba detailnějších dat. Taková data ovšem zpravidla nelze získat ze snímků pořízených z konvenčních nosičů. V porovnání s nimi sice UAV nezachytí tak velkou oblast, ale dokážou nasnímat menší scénu s potřebným větším detailem. Navíc tyto bezpilotní prostředky nejsou ani tak finančně nákladné. Pořizování dat pomocí UAV fotogrammetrie ovšem potřebuje pečlivou přípravu a naplánování. S tím souvisí i proces předletové přípravy, kdy je potřeba zjistit základní parametry pro snímkový let, jako je průměrná výška letu, apod. V případě použití neměřických kamer je potřeba provést kalibrace použitých komor. V neposlední řadě je zde proces samotného zpracování pořízených snímků. Během pořizování snímků z bezpilotních prostředků se ovšem hůře dodržují zásady pořizování měřických snímků a vznikají tak sady neuspořádaných, různě se překrývajících, snímků. Následné zpracování klasickými fotogrammetrickými metodami je pak obtížné a je zapotřebí použít metody jako je Structure from Motion.

1 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem magisterské práce je analyzovat tři, velice důležité, dílčí části konceptu nasazení UAV prostředků ve fotogrammetrické praxi. První z těchto částí je kalibrace neměřické komory. Zde bude provedeno studium nových kalibračních metod a jejich následná aplikace na použitých přístrojích. Během kalibračního procesu budou zjištěny parametry neměřické komory a objektivů s pevnou ohniskovou vzdáleností, které budou využity během dalšího zpracování. Při plánování fotogrammetrické mise je potřeba předem stanovit parametry pro snímkování. Výsledkem této části bude optimalizace procesu předletové přípravy do poloautomatického režimu.

Nejrozsáhlejší část je věnována komplexnímu slovnímu, statistickému i grafickému zhodnocení nových metod zpracování fotogrammetrických dat, pořízených pomocí bezpilotních prostředků. Na základě nejnovějších poznatků jsou data zpracována programem, využívajícího metodu Structure from Motion. Mezi plánované výstupy této části patří krom samotného zpracování leteckých snímků i porovnání přesnosti výstupů s referenčními body, tvorba ortofotosnímků, 3D modelů a výškových modelů. Veškeré teoretické poznatky, získané během práce, budou prakticky ověřeny prostřednictvím testovacích náletů a aplikace na případovou studii.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Metoda rekonstrukce reality z 2D obrazu Structure from Motion (dále jen SfM) je velice zajímavou technikou, doplňující klasické fotogrammetrické pořizování a zpracování snímků. Jedná se však o relativně mladou metodu, jejíž implementace a rozšíření v praxi je teprve na začátku. Ovšem potenciál metody je skutku obrovský a tuto metodu lze krom sběru geodat použít například i v archeologii, lékařství, architektuře, apod. Úsilí věnované prozkoumání a prohloubení této problematiky stojí opravdu za to. Obzvláště, když je kombinována s technologií bezpilotních prostředků, které jsou čím dál víc rozšířené a mají bezesporu velké výhody oproti klasickým konvenčním pilotovaným strojům používaným ke snímkování zemského povrchu.

Publikací, zabývajících se tématem zpracování snímků pořízených fotogrammetrickými metodami z UAV nosičů, je v české literatuře poskromnu a vyskytují se především na akademické půdě. Zajímavá je diplomová práce *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii* (Řehák, 2012), zabývající se aplikací bezpilotních prostředků při plánování a sběru dat a následnou tvorbou 3D modelů a ortofotosnímků. Ale přímo metodu SfM nezmiňuje a nepoužívá. Ovšem obsáhlejší a komplexnější práce zabývající se problematikou UAV a fotogrammetrií vznikla na půdě Univerzity Palackého v Olomouci. Disertační práce *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení* (Miřijovský, 2013) poskytuje koncept nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii pro velmi přesný sběr geografických dat a předkládá ucelený popis činností související s problematikou UAV. Od legislativních opatření bezpilotních prostředků až po finální zpracování snímků. V rámci této práce je i zmíněna tematika SfM, jejíž výstupy jsou ve finále porovnávány s výstupy "klasické" stereofotogrammetrie. Tím ovšem končí výčet prací zabývajících se SfM na české půdě.

Celkově bohatší na tematiku je zahraniční literatura. Samotnou implementací metody SfM v UAV fotogrammetrii se zabývá článek *Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle Collected High Density Structure from Motion Point Cloud* (Mathews and Jensen, 2013). Autoři popisují vyhodnocení listové pokrývnosti a stav listů vinice za pomoci LAI indexu na základě snímků pořízených metodou SfM z bezpilotních prostředků. Další podobnou studií je *An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicles Imagery, Based on Structure from Motion Point Cloud* (Turner, Lucieer, Watson, 2012). V ní generují georeferencované mozaiky z mračna bodů, které bylo vytvořeno za pomoci SfM.

Součástí práce jsou i metody kalibrace kamer, nesených na bezpilotních prostředcích. Nejčastěji nesenými aparáty jsou neměřické kamery. Nejznámější publikací, která řeší problematiku kalibrace kamer je *Fotogrammetrie 10* (Pavelka, K., 2003). Ta ale užití neměřických kamer ve fotogrammetrii komentuje jen okrajově. Problematicou kalibrace neměřických kamer se přímo zabývala bakalářská práce *Využití neměřických kamer při fotogrammetrickém studiu památkových objektů* (Šimíček, 2012), která krom kalibrace

klasických digitálních fotoaparátů zjišťovala vhodnost, či schopnost, použití těchto přístrojů za účelem sběru dat pro fotogrammetrické účely, leč pro toto užití nebyly konstruovány. Kalibraci řeší i práce *Využití digitálního fotoaparátu v kartografické reprodukci* (Vala, O., 2011), ovšem zde není problematika použitých kamer spojena s UAV fotogrammetrií a fotogrammetrií vůbec. Téma kalibrace neměřických komor, související s bezpilotními vzdušnými prostředky, je řešeno i ve výše zmíněných pracích autorů Miřijovského a Řeháka.

3 TEORETICKÝ ÚVOD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

3.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor, který se zabývá získáváním informací o předmětech na základě přesného měření bezkontaktním způsobem. Existuje více definic fotogrammetrie, ale jejich znění se v průběhu času mění v závislosti na použitých metodách a technologiích, které se stále zlepšují a zdokonalují a v závislosti na využití a zpracování výsledků. Pavelka, K. (2003) obecně definuje fotogrammetrii jako vědu, způsob a technologii, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.

Jak vychází z definice fotogrammetrie, základním prostředkem pro zaznamenávání aktuálního stavu objektů a krajiny je fotografie. To dělá z fotografie důležitý zdroj informací a je potřeba klást na ní vysoké nároky. Slovo fotografie vychází ze složení dvou řeckých slov fotos (světlo) a graphos (kresba). Tradiční fotogrammetrie vychází z fotografického záznamu v analogové podobě, kdy je obraz ukládán na světlo citlivé vrstvy filmu. Ty jsou následně vyvolány v laboratoři a zvětšeny na fotografický papír. Pro fotogrammetrické účely se snímkovalo na velkoformátové komory a výsledný snímek měl rozměry 23 x 23 cm (Miřijovský, 2013). Dnes se již od klasického analogového přístupu upustilo a nejrozšířenější a v mnoha ohledech výhodnější je zaznamenávání digitální formou, pomocí digitálních kamer. Pro získání fotografie lze použít zařízení s různou výstupní přesností, od běžných digitálních fotoaparátů až po speciální měřické komory určené pro fotogrammetrické snímkování. Pořízený snímek slouží k zachycení reality. Na základě polohy bodů na snímku lze odvozovat tvar, velikost, umístění objektu v prostoru, vzájemnou prostorovou polohu jednotlivých bodů, vyhodnotit polohopis a výškopis a zjišťovat další vlastnosti (Šimíček, 2012).

Pojem fotogrammetrie byl poprvé použit německým inženýrem Albrechtem Meydenbauerem v roce 1858 a jedná se o složeninu tří slov: fotos - světlo, gramma - záznam a metrie - měření). V roce 1861 Francouz Aimé Laussedat, který byl průkopníkem letecké fotogrammetrie a její aplikace v kartografii, použil fotografie země k tvorbě topografických map. Od okamžiku, kdy bylo poprvé fotogrammetrie použito, uběhlo víc než 150 let a během této doby prošla různorodým vývojem. První půlstoletí bylo ve znamení hledání uplatnění nové metody, zkoumání matematických základů a pořizování snímků. Technologicky se používalo jen principu pozemní průsekové fotogrammetrie. V průběhu první poloviny 20. století se začalo využívat principů stereoskopie a leteckého snímkování. Jejich aplikace vedla ke konstrukci řady důmyslných analogových přístrojů pro vyhodnocení snímků a dalších inovací, které vedly ke zdokonalení fotogrammetrie (Šimíček, 2012). Dle Pavelky, K. (2003) se za posledních 50 let změnila koncepce fotogrammetrie díky velkému rozvoji počítačů. Postupně se upouštělo od používání analogových metod a přecházelo se na metody analytické. Ty následně nahradily metody digitální, které znamenaly zásadní technologickou změnu

a v současné době jejich využití zcela převládlo. Vznikem družicové fotogrammetrie a laserového skenování ve spojení s digitální fotogrammetrií se zcela mění pohled na 3D dokumentaci objektu a prostoru.

3.1.1 Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie může být dělena podle několika kritérií. K. Pavelka (2003) jí dělí podle:

- polohy stanoviště,
- počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků,
- technologického způsobu zpracování.

Dělení podle polohy stanoviště

Z geodetického hlediska je stanoviště bod zemského povrchu, na který je stroj centrován. V případě aplikace na fotogrammetrii představuje stanoviště pozici kamery vůči objektu při snímání. Dle polohy stanoviště rozlišujeme tři druhy fotogrammetrie: pozemní, leteckou a družicovou.

V případě metody pozemní (blízké) fotogrammetrie je stanoviště zpravidla nepohyblivé, umístěné na zemi. Při pořizování snímků je dostatek času i technických možností k přesnému geodetickému určení souřadnic stanoviště a prostorové orientace snímku. Tímto je zpracování snímku jednodušší. Nevýhodou pozemní fotogrammetrie ovšem je, že jednotlivé předměty měření jsou na snímku vzájemně zakrývány a snímek obsahuje často velkou část nevyhodnotitelných oblastí. Pozemní fotogrammetrie je vhodná pro dokumentaci objektů, které jsou přibližně ve stejné vzdálenosti (fasády domů, strmé břehy říčních koryt a pod). Její dosah záleží na konstantě komory a je maximálně 500m (Böhm, 2002). V současnosti jsou trendem speciální aplikace pozemní fotogrammetrie, které lze najít v odlišných oborech, od designu až po strojírenství. Rozvoj v oblasti dokumentace objektů je dán cenově dostupnými digitálními kamerami a zpracovatelskými programy a tím stále vzrůstá význam této metody.

V letecké fotogrammetrii je stanoviště pro pořízení snímku umístěno v letadle, či jiném vzduchem se pohybujícím dopravním prostředku. Oproti metodě pozemní fotogrammetrie je na snímku zobrazena mnohem větší plocha. Metoda má ovšem nevýhodu v podobě obtížného určení polohy snímku, tzn. jeho geodetických souřadnic, v době jeho pořízení a tím pádem jsou i způsoby zpracování komplikovanější. Dnes již existují matematické postupy pro výpočet polohy a orientace snímku v době jeho pořízení a s rozvojem techniky vznikají i nové metody pro přímé georeferencování snímku za letu. V této oblasti jsou ale ještě nedostatky, a proto je početní zpřesnění stále využíváno (Miřijovský, 2013). Při snímání stereoskopických snímků je požadováno aby byly snímky kolmé a s rovnoběžnou osou záběru. Rovněž musí být stejná vzdálenost objektů od místa fotografování, resp. vzdálenost kamery od povrchu, čímž je zajištěna podobná přesnost snímků.

Snímky pořízených družicovou fotogrammetrií se používá například pro tvorbu fotomap. Civilní uplatnění této metody bylo umožněno po startu družice SPOT-1 v roce

1984 (Pavelka, 2003). Stereodvojice se touto metodou pořizují tzv. tandemem, kdy dvě blízko sebe letící družice snímají stejné místo z rozdílných poloh. Tyto snímky pak mohou být zpracovány klasickými metodami fotogrammetrie. Pro toto zpracování je však potřeba speciálních programových vybavení. Metoda je považována za speciální a prostorová rozlišovací schopnost komerčních družic dosahuje hodnot lepších než jeden metr.

Dělení podle počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků

Jednosnímková fotogrammetrie je nejjednodušším typem fotogrammetrie a při měření je využíváno samotných měřických snímků. Jelikož lze na snímku měřit pouze rovinné souřadnice, lze jednosnímkovou fotogrammetrií určit opět jen rovinné souřadnice předmětu měření. Tím pádem nelze vytvořit stereo vjem a tudíž není možné vyhodnocovat polohu objektů se souřadnicí Z. Tuto metodu lze použít pouze pro objekty rovinné, či blízké rovině. V pozemní fotogrammetrii se využívá jednosnímkových metod pro tvorbu fotoplánů rovinných objektů, jako jsou například málo členité fasády domů. V letecké fotogrammetrii, kde bývá osa záběru svislá, lze jednosnímkovou metodou vyhodnocovat polohopisnou složku mapy rovinného území.

Vícesnímková fotogrammetrie slouží pro 3D zpracování území a objektů, které nejsou rovinné a pro tyto účely je potřeba aspoň dvou vzájemně se překrývajících snímků. Předmět měření musí být zobrazen na obou snímcích a ze snímkových souřadnic lze vypočítat jeho prostorovou polohu a určit tak jeho souřadnice X, Y a Z. Do této skupiny patří průseková fotogrammetrie, která se zabývá zjišťováním geometrických vlastností objektů. Princip spočívá v protínání os záběru měřických snímků pod velkým konvergentním úhlem. Využijeme-li k vyhodnocení stereoskopického vjemu, mluvíme o tzv. stereofotogrammetrii. Do této skupiny patří i metoda Structure from Motion, kterou lze zjednodušeně charakterizovat jako kombinaci stereofotogrammetrie s fotogrammetrií průsekovou.

Dělení podle technologického způsobu zpracování

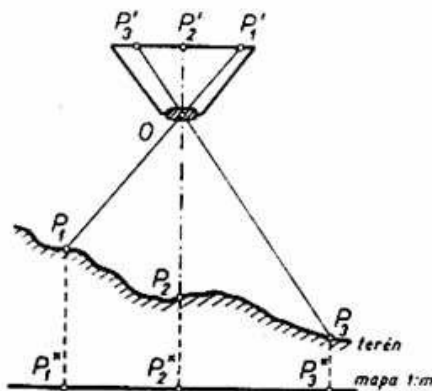
Podle technického zpracování snímků lze fotogrammetrii, resp. metody zpracování, dělit na metody analogové, analytické a digitální. Hlavním rozdílem je, že se různé vstupy v podobě snímků (analogového či digitálního) zpracovávají různými přístroji. Například při analogové metodě je k vyhodnocení snímků využíváno mechanických či optických metod a u digitální metody je veškeré vyhodnocení provedeno v počítači, který bývá pro tyto specifické práce speciálně vybaven (Šimíček, 2012).

3.1.2 Princip fotogrammetrie

Centrální projekce

Základním principem fotogrammetrie, popř. stereofotogrammetrie, je centrální projekce. Na tomto principu fungují všechny kamery. Obraz reality, tzn. fotografie, vzniká centrální projekcí. Základem je střed centrálního promítání, který je v ideálním případě reprezentován středem objektivu. Avšak v dnešní době, kdy jsou moderní objektivy složitě konstruovány a skládají se z několika skupin optických členů je těžké

určit přesný střed promítání. Paprsky od předmětových bodů P_1 , P_2 a P_3 snímaného objektu procházejí středem objektivu a pokračují na obrazovou rovinu, reprezentovanou citlivou vrstvou filmu, dnes CCD či jiný druh čipu, na které tvoří obraz P'_1 , P'_2 a P'_3 (Böhm, 2002). Princip centrální projekce je dobře patrný na obrázku 1.

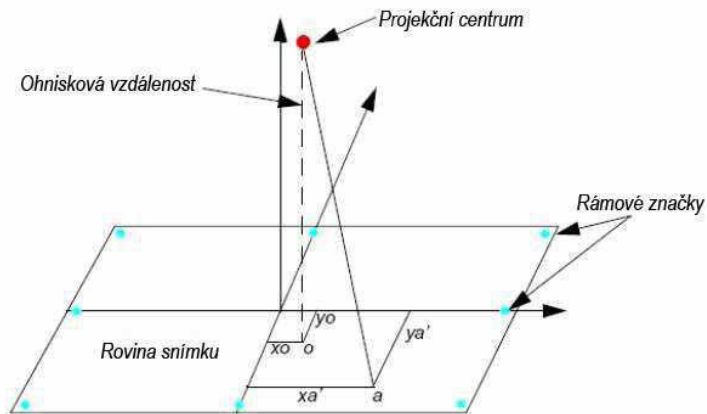


Obrázek 1: Princip centrální projekce (zdroj: Böhm, 2002).

Prvky vnitřní a vnější orientace

V případě, že je požadováno, aby byly snímky fotogrammetricky zpracovávány, je potřeba znát a matematicky definovat vybrané charakteristiky kamery a výstupního snímku. Z tohoto hlediska jsou velice důležité dvě skupiny charakteristik: prvky vnější a prvky vnitřní orientace.

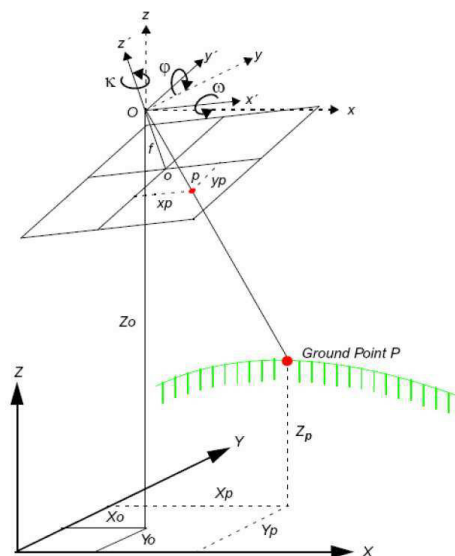
Prvky vnitřní orientace se týkají především kamery samotné, resp. jejího objektivu. Určují vztah projekčního centra a roviny snímku. Prvním prvkem je konstanta komory, také nazývána ohnisková vzdálenost (označována "f" nebo "c", udávaná v milimetrech). Tento údaj říká, jak daleko je střed optické soustavy objektivu od snímače kamery. Čím menší je hodnota ohniskové vzdálenosti tím větší je úhel záběru kamery. Dalším prvkem je poloha hlavního bodu (označována H'). Böhm, J. (2002) uvádí, že se v podstatě jedná o polohu paty kolmice, která představuje paprsek procházející v předmětovém prostoru středním promítáním, na obrazové rovině (viz obrázek 2). V praxi se však většinou při zpracování dat ve fotogrammetrických aplikacích nezadáva poloha hlavního snímkového bodu, ale jeho tzv. offset, vzdálenost skutečného bodu, kterým prochází průsečík, od ideální polohy hlavního bodu (Miřijovský, 2013). Posledním prvkem je distorze objektivu, která je způsobena nepřesným urovnáním konstrukčních prvků objektivu do ideální optické osy. Z tohoto důvodu dochází k rozdílu úhlu vstupujícího paprsku a úhlu vystupujícího paprsku, tzn. ohyb paprsků, a poloha zobrazovaného bodu na snímku se s drobnými odchylkami liší od správné polohy (Pavelka, 2003).



Obrázek 2: Prvky vnitřní orientace (upraveno z: LPS User's Guide).

Prvky vnější orientace určují vztah projekčního centra k vnějším souřadnicím a orientaci osy záběru vůči souřadnicovým osám. Souřadnicový systémem se myslí geodetický souřadnicový systém, ve kterém bude výsledek fotogrammetrického zpracování. Böhm, J. (2002) udává šest prvků vnější orientace, které určují polohu fotogrammetrického svazku paprsků v prostoru. Jsou to:

- prostorové souřadnice x_0, y_0, z_0 stanoviště, tzn. středu optického systému,
- směr osy záběru, resp. rotace, tzn. vodorovný úhel, který svírá průmět osy záběru
- s určeným stanoveným směrem, označován ω ,
- sklon osy záběru, měřený ve svislé rovině od horizontály, nebo jeho doplněk
- měřený od vertikály, označován φ ,
- pootočení, tj. úhel, který vyjadřuje otočení snímku ve vlastní rovině kolem osy
- záběru, označován κ .



Obrázek 3: Znázornění prvků vnější orientace (zdroj: LPS User's Guide).

Rovnice kolinearity

Na základě znalosti prvků vnější a vnitřní orientace lze provést transformaci mezi souřadnicovými systémy, kdy snímkové souřadnice jsou sladěny se souřadnicemi geodetickými. Z transformací kolem jednotlivých os x, y, z o úhly ω, ϕ, κ vznikne matice rotace R :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_x R_y R_z \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R^T = R^{-1} \quad (3)$$

Po dosazení matice rotace do rovnic:

$$\frac{x_p - x_0}{-f} = \frac{X_p - X_0}{Z_p - Z_0} * \frac{y_p - y_0}{-f} = \frac{Y_p - Y_0}{Z_p - Z_0} \quad (4)$$

které vycházejí z vektorů:

$$a = (x_p - x_0, y_p - y_0, -f) \quad (5)$$

$$A = (X_p - X_0, Y_p - Y_0, Z_p - Z_0) \quad (6)$$

kde:

$$a = k * A \quad (7)$$

a k představuje měřítkové číslo, získáme rovnice kolinearity:

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (8)$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (9)$$

Díky této transformaci je dosažena podmínka kolinearity, která říká, že projekční centrum, bod v terénu a jeho obraz na snímku leží v jedné přímce (Bělka, 2009). Výše uvedené rovnice jsou pouze nejdůležitější výpočetní operace určené k pochopení problematiky. Matematické pozadí fotogrammetrických výpočtů je mnohem složitější a detailnější informace o této problematice lze najít v odborné literatuře (Mířijovský, 2013).

3.2 Structure from Motion

Structure from Motion (SfM) je zobrazovací technika, která je založena na odhadování trojrozměrné struktury z dvourozměrných obrazových sekvencí, které jsou spjaty s pohybem nosiče. Je studována v oblasti počítačové vizualizace a vizuálního vnímání. Je inspirována biologickým zrakem, díky kterému mohou lidé a ostatní

živočichové obnovovat 3D strukturu okolí z 2D obrazu, promítaného na sítnici, během pohybu okolo objektu, či ve scéně.

Lidé vnímají množství informací o trojrozměrné struktuře v jejich okolí tím, že se kolem nich nebo přes ně pohybují. Když se pozorovatel pohybuje, nebo se přesouvá objekt, je informace získána z obrazů snímaných v průběhu času. Nalezení "struktury z pohybu" (doslovný překlad) představuje obdobný problém jako rekonstrukce objektů ze stereo snímků. V obou případech se hledá korelace mezi snímky na jejímž základě je objekt rekonstruován v 3D prostředí.

Metoda kombinuje výhody stereofotogrammetrického přístupu s metodami průsekové fotogrammetrie. Díky tomu mohou do výpočtů a zpracování vstupovat snímky jak s rovnoběžnou osou záběru, tak s osami konvergentními. S tím tedy souvisí i výhoda, že se nemusí dbát na přesné dodržování zásad pořizování snímků, jako je tomu v případě snímků stereofotogrammetrických.

Ze sekvence navazujících snímků, pořízených pohybující se kamerou v čase, se určí posloupnost (3D pohyb) pozic kamery a 3D struktura scény. Sledováním množiny bodových prvků napříč sekvencí snímků lze odvodit, kde se kamera nachází a jaké je 3D rozmístění bodů, které byly zaznamenány. SfM generuje objekty s ohledem na odvozenou geometrii scény a kamer.

SfM je založena na principu faktorizace (rozkladu). Jejím cílem je kombinovat body, a k nim korespondující informaci, ze snímků, pořízených z různých míst tak, aby mohla být rekonstruována struktura scény na základě pohybu kamery. Využívá numericky stabilní přístup založený na SVD faktoru matic, zaznamenávající pozice bodů. SVD (Singular Value Decomposition) je metoda lineární algebry, která rozkládá matice na singulární hodnoty, resp. jednodušší celky. Jde o jeden z nejdůležitějších teoretických a praktických nástrojů maticových výpočtů. Univerzálnost a síla tohoto nástroje je ovšem vykoupena vysokými výpočetními nároky (Tichý, 2012). Faktorizace (rozklad za použití SVD) byl prakticky jedním z prvních SfM algoritmů. Do té doby se většina prací zabývajících se SfM věnovala minimální konfiguraci a datům bez šumu.

Asi nejznámějším SfM systémem je open source algoritmus Bundler. Algoritmus je napsán v jazyce C a C++. Ze sady neorientovaných snímků na vstupu provede 3D rekonstrukci objektu. Velký překryt snímků a nadbytečná měření umožňují Bundleru rekonstruovat krom objektů a vnitřních prvků orientace kamery, také prvky vnější orientace. Tento algoritmus je základ mnoha komerčních i nekomerčních programů, které zpracovávají data pořízené nejen z UAV prostředků. Hojně je využíván i ve webových projektech, kdy jsou na server společnosti nahrány snímky a za poplatek obdrží uživatel vygenerovaný 3D model, popřípadě ortofotosnímky (Řehák, 2012).

3.3 Unmanned Aerial Vehicle

3.3.1 Definice pojmu

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) v překladu znamená bezpilotní létající prostředek, někdy také označován pojmem "drone". Jak je z názvu patrné, jedná se o létající prostředek bez pilota na palubě, což je hlavní rozdíl oproti klasickým létajícím strojům s lidskou posádkou. Tyto stroje nemají pilota přímo, fyzicky, na palubě, ale jsou jím řízené (popřípadě jen částečně řízené) na dálku ze vzdáleného stanoviště. Jsou i možnosti, že je stroj řízen automaticky na základě předprogramovaných letových misí nebo komplexnějších dynamických autonomních systémů. Ale není bezpodmínečně nutné, aby se letoun řídil sám. V mnoha případech je za trajektorii letu zodpovědný pilot a posádka, která však není fyzicky na palubě (Everaets. 2008).

Někdy je akronymum rozšířeno na UAVS (Unmanned Aircraft Vehicle System). Federální úřad pro letecké velení (FAA USA) oficiálně změnil termín na UAS (Unmanned Aircraft System), který reflektuje na fakt, že tyto komplexní systémy se skládají nejen ze samotných bezpilotních strojů, ale i pozemních stanic a dalších prvků potřebných pro jejich provoz. Avšak tento termín není tak široce používán jako UAV, který se stal i součástí moderních slovníků.

Úřad pro civilní letectví (ÚCL) definuje bezpilotní letadlo jako "Letadlo určené pro provoz bez pilota na palubě". Bepilotní systém je definován jako "Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například datového spoje pro řízení a kontrolu a prvku pro vypouštění a návrat" (Řehák, 2012).

3.3.2 Historie

Historie bezpilotních prostředků sahá až do druhé poloviny 19. století. Prvními bezpilotními prostředky můžeme označit horkovzdušné balóny vybavené závěsným košem s výbušninou a časovacím mechanismem pro spoušť. Balóny byly vypouštěny nad území nepřítele, kde působily škody. Dále byly prováděny pokusy s draky a raketami. Využívání těchto prostředků k mapovacím a špionážním účelům má počátky v dobách první světové války.

V meziválečném období a v období druhé světové války se objevila první rádiem řízená letadla. Za bezpilotní létající prostředky můžeme považovat i německé střely V-1, které se staly postrachem Londýna. Během války ve Vietnamu jsou již UAV naplno používány americkou armádou (např. D-21, Firebee, apod.). Bepilotními špionážními prostředky se zabýval i Izrael, který vyvinul v 80. letech hojně využívané stroje Pioneer a Scout. Ty byly vybaveny nejmodernějšími sledovacími zařízeními a radary a umožňovaly online přenos videa. Do této doby sloužily UAV pouze jako špionážní stroje, ale v současné době se těchto strojů využívá i jako prostředků pro ničení taktických cílů. Příkladem mohou být letouny Reaper, Raptor a jím podobné, které se začaly ve větší míře využívat v konfliktech v Afghánistánu a Iráku.

V současné době zaznamenaly UAV prostředky rozmach využití i v civilním sektoru, od sofistikovaných činností pro vědecké účely až po rekreační a modelářské účely. S tím také souvisí rozvoj technologií zdokonalující konstrukci a hnací jednotky samotných strojů, systémy řízení a dálkového ovládání, a v neposlední řadě nástrojů pro zpracování a přenos dat.

3.3.3 Platformy a využití

V průběhu času bylo vyzkoušeno velké množství platform. Každá má ovšem své sporné výhody a nevýhody a lze je dělit do kategorií podle mnoha kritérií. Jedním z hlavních kritérií je, zda se jedná o UAV s motorovým pohonem nebo se jedná o nemotorový model. Další dělení může být například podle toho, zda je model volně letící, či je spojen se zemí třeba lanem. Níže je uveden výčet platform se stručným popisem. Podrobně jsou platformy popsány v disertační práci Miřijovského, J. (2013).

Jednou z prvních platform, která byla používána, je drak. V dnešní době zaznamenává tato platforma návrat především v oblasti snímkování pro vědecké aplikace. Bohužel draci jsou oproti platformám typu letadlo a vrtulník omezení rychlostí větru, dosahem lana a rozlohou snímkaného území.

Vhodná platforma pro snímkování menších oblastí jsou balóny, popřípadě vzducholodě. Pokud jsou ale tyto nosiče plněny héliem, či jiným plynem lehčím než vzduch, nelze tyto modely převážet na jiné zájmové plochy a nejsou vhodné pro aplikace s častou frekvencí snímkování. Výhodou je zase jejich schopnost viset na místě, což je vhodné pro aplikace, kdy je vyžadována delší doba snímkování. Také cena je nižší oproti modelům poháněným motorem.

Velmi populární platformou využívanou pro snímkování jsou vrtulníky, které jsou oblíbené díky schopnosti držet se ve vzduchu na jednom místě. Ale i přes tuto nespornou výhodu jsou vrtulníky náročné na obsluhu a přesnou pilotáž. Také cena za profesionální stroj se může vystoupat až k jednomu milionu korun.

V současné době jsou v UAV fotogrammetrii velmi rozšířené platformou multirotorové systémy, tzv. multikoptéry. Ty spojují výhody vrtulníku společně se snadnou pilotáží. Tyto systémy pracují na obdobném principu jako vrtulníky s tím rozdílem, že místo hlavního a vyrovnávacího rotoru využívá soustavu horizontálních rotorů s vertikálním tahem a nevyžadují tedy zadní rotor, který kompenzuje rotaci kolem svislé osy. Jedná se o mladou platformu s velkým potenciálem.

Nejrozšířenějším typem platformy jsou letadla. Ovšem pro fotogrammetrické účely disponuje tato platforma několika omezeními. Jde především o velkou rychlost letu, která znemožňuje použití delšího času expozice při snímkování. Na konstrukci bezpilotních letadel se hůře montují snímací zařízení tak, aby se předešlo jejich poškození během vzletu a přistání.

Co se týče všeobecné aplikace UAV prostředků, tak jejich škála je relativně rozmanitá. Jak bylo popsáno výše, základní poslání bezpilotních prostředků bylo pro vojenské účely. Od provádění špionáží, přes sledování objektů a bojiště, až po

zneškodňování cílů. Ovšem široké uplatnění našly v nevojenském sektoru a to v různorodých oborech. Nejčastěji se bezpilotní systémy používají pro obrazovou dokumentaci, jejíž výstupy slouží pro mapování, dokumentaci památek, hledání archeologických nálezů, apod. Hojně jsou využívány při monitorování katastrof, jako je sledování záplav, lesních požárů, monitoring oblastí zamořených radioaktivitou. Také jsou vhodným prostředkem pro pátrání a záchranu v nebezpečných oblastech a podmínkách (Řehák, 2012). Tento výčet je jen zlomkem toho, k čemu všemu lze UAV systémy použít, ale tato problematika není náplní této práce. Ovšem toto téma je často řešeno nejen v naší, ale i zahraniční odborné literatuře.

3.3.4 UAV fotogrammetrie

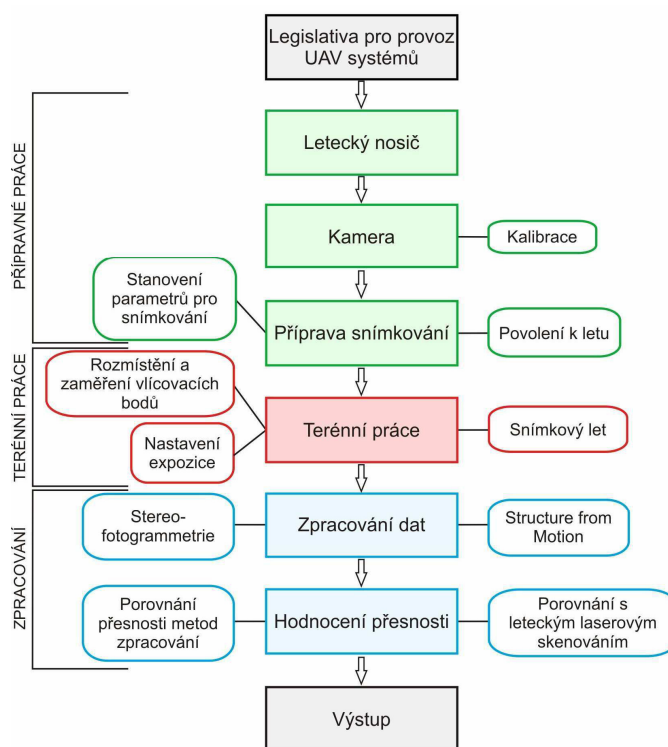
Pojem UAV fotogrammetrie byl poprvé použit v roce 2008 (Eisenbeiss). Zároveň jí definuje jako nástroj pro měření, kdy je využíváno UAV platform, které jsou schopny fotogrammetrického měření. Hlavní podmínkou je, že pilot nesmí být fyzicky přítomný v zařízení. UAV fotogrammetrie kombinuje výhodu vertikálního pohledu letecké fotogrammetrie s blízkou vzdáleností, a s tím související vysoký detail snímku, pozemní fotogrammetrie. Stejně jako u klasického fotogrammetrického měření, je i v případě UAV fotogrammetrie základním principem geometricko-matematická rekonstrukce směru fotografických paprsků na snímku. Teoretické a matematické pozadí UAV fotogrammetrie vychází z fotogrammetrie letecké a je velmi podobné. Je ale nutné trochu upravit standardní postupy zpracování, a to z důvodů specifických vlastností a charakteristik letových modelů a použitých kamer.

Z důvodů rozměru, váhy a ceny nelze ve většině případů použít na UAV přístrojích přesných INS jednotek. Je tudíž nutné použít výpočet aerotriangulace bez prvků vnější orientace. Toho se docílí například určením prvků vnitřní orientace pomocí vřícovacích bodů (tzv. GCP) se známými X, Y, Z souřadnicemi (Aber, 2010). Přesnost aerotriangulace je pak závislá na přesnosti GCP a je tedy požadováno, aby byly tyto body zaměřeny přesnými geodetickými či GPS přístroji. Prvky vnitřní orientace lze určit ve speciálních laboratořích nebo svépomocí. Zatímco letecké měřické kamery jsou kalibrovány výrobcem, malé neměřické komory užívané v UAV aplikacích nemají kalibrační protokoly známy a je potřeba tyto přístroje zkalibrovat (Miřijovský, 2012).

4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Na obrázku č. 4 lze vidět koncept pro nasazení bezpilotních prostředků při fotogrammetrickém snímkování (Miřijovský, 2013). V rámci této práce jsou řešeny tři části tohoto konceptu. První dvě spadají do přípravných prací. Jedná se o proces kalibrace a stanovení parametrů pro snímkování. Třetí část je zpracování dat pomocí metody Structure from Motion, která je zahrnuta v zpracovatelském procesu.

Sekce terénní práce a sběru dat byly pro účely této práce zařízeny jejím vedoucím. Proces pořízení dat pomocí UAV prostředků je totiž legislativně omezen a pro používání multikoptéru je potřeba zkušená a zodpovědná osoba, která splnila státem dané zkoušky pro pilotování těchto modelů a má oprávnění pro jejich provozování.



Obrázek 4: Základní koncept nasazení UAV systému (autor: J. Miřijovský, 2013).

4.1 Kalibrace

Dle K. Pavelky (2003) se kalibrací rozumí určení vlastností fotografického přístroje, zejména zjištění prvků vnitřní orientace. Mezi tyto základní parametry používaných komor se řadí:

- konstanta komory, taktéž nazývaná ohnisková vzdálenost (je uváděna v milimetrech a značí se písmeny f nebo c),
- poloha hlavního snímkového bodu (souřadnice hlavního bodu označované x_0 a y_0),
- radiální distorze objektivu (K_1, K_2, K_3).

Provedení kalibrace je možné uskutečnit několikerým způsobem. Lze ji rozdělit na tři základní druhy. Ty jsou dány různým typem referenčního objektu, místem a časem kalibrace. Jedná se o kalibraci laboratorní, simultánní a kalibraci pomocí testovacího pole. Každá metoda má svá specifika na přesnost, provedení a speciální vybavení, a ne všechny způsoby kalibrace jsou dosažitelné pro neměřické kamery. Například laboratorní kalibrace se provádí pouze pro měřické komory se speciálními přístroji a na specializovaných pracovištích.

Inovace v oblasti kalibrace nebo pořizování snímku určených ke kalibraci zatím nezaznamenala významnějších či novějších poznatků. Nejznamenatelnější je progres v oblasti vývoje kalibračních algoritmů a to především pro program MATLAB. Nejvhodnějším a zároveň stále nejčastěji používaným typem kalibrace pro digitální neměřické komory je kalibrace pomocí kalibračního pole.

Kalibrace byla prováděna pro digitální zrcadlovku s výměnnými objektivy Canon, model EOS 500D. Stejný fotoaparát byl kalibrován během bakalářské práce, ovšem se standardním objektivem Canon EF-S 18-55mm. Přehled základních parametrů použité neměřické komory můžeme vidět v následující tabulce.

Tabulka 1: Základní parametry digitální neměřické komory Canon EOS 500D (autor: M. Šimíček, 2014).

Kamera	Canon EOS 500D
Typ snímače	CMOS
Velikost snímače [mm]	22,334 x 14,889
Rozlišení snímače [px]	4752 x 3168
Poměr stran snímače	3:2
Velikost pixelu [μm]	4,7

Při kalibraci kamery bylo použito dvou nových objektivů s pevnou ohniskovou vzdáleností. Prvním je ultra-širokoúhlý objektiv Voigtlander Color Skopar 20mm f/3.5 SL II Aspherical. Řadí se do skupiny tzv. pancake lens, což je označení pro ploché a tenké čočky prvotřídních objektivů. Ty jsou ceněny především pro schopnost poskytnout kvalitní optickou soustavu v kompaktní velikosti. Svou výškou 28,8 mm a hmotností okolo 200 g jde opravdu o kompaktní záležitost. Umožňuje montáž na kamery značky Canon, Pentax a Nikon. Je vybaven manuálním ostřením a elektronicky řízenou clonou.

Druhým testovaným objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností je Voigtlander Ultron 40mm f/2 SL II. I tento objektiv spadá to tzv. pancake lens objektivů (výška 25 mm) a jeho pole záběru je ekvivalentní s klasickými 60 milimetrovými objektivy. Objektiv taktéž disponuje manuálním ostřením a elektronicky řízenou clonou.



Obrázek 5: Kamera Canon EOS 500D (zdroj: www.fotoradce.cz).

4.1.1 Pozemní kalibrace

Během práce byly provedeny dva druhy kalibrace. Prvním z nich byla klasická kalibrace, pozemní. Při realizaci pozemní kalibrace byla využita metoda pomocí kalibračního pole. Princip metody spočívá ve snímkování rovinného, nebo prostorového kalibračního pole z několika optimálně konfigurovaných stanovisek. Z těchto stanovisek je pořízena sada konvergentních snímků s vhodným úhlem protnutí os záběru. Existuje více principů volby stanoviska kamery, ale všechny se shodují v dodržení zásad průsekové fotogrammetrie, tzn. konvergence os a natáčení kamery o 90° pro fixaci polohy hlavního snímkového bodu.

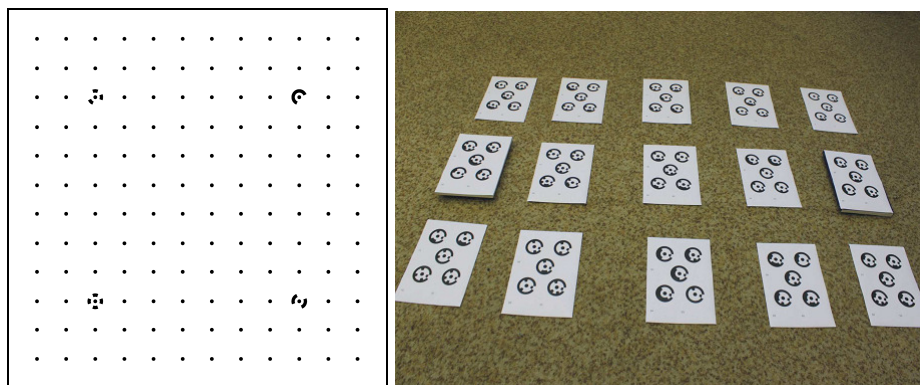
V tomto případě byly stanoviska zvoleny po každé straně kalibračních polí, čímž byl mezi osami záběrů úhel 90° . Na každém stanovisku byly ze stativu pořízeny tři snímky. V normální poloze kamery a další dva otočené ve vlastní rovině o $+90^\circ$ a -90° . Z jednoho snímkování vzniklo 12 snímků.

Kamera měla nastaveno nejvyšší rozlišení snímků a vypnuto automatické ostření, pokud to tedy umožňuje. U zoom objektivů se nastavuje přiblížení do krajní polohy a v našem případě byla tato pozice zafixovaná páskou, čímž se zabránilo pohybu optických členů objektivu. Po vytvoření snímků se snímky nesmí jakkoli upravovat (např. ořezávat, apod.). Může se tím totiž snížit jejich původní kvalita a rozlišení a snímky se pak stávají pro proces kalibrace nepoužitelné. Z toho vyplývá, že kalibrace je velmi závislá na kvalitě snímků.

Při práci na kalibraci kamery Canon EOS 500D s výměnnými objektivy bylo použito dvou kalibračních polí. Jedno rovinné a druhé prostorové. Na těchto polích se vyskytují specifické značky, tzv. kódované terče. Mají specifický tvar a software na základě vyhodnocení jejich tvaru dokáže určit přesnou polohu na kalibračním poli.

První pole se skládá z matice bodů, která obsahuje dvanáct na dvanáct bodů, kde čtyři z nich jsou výše zmíněné kódované terče. Pole se tiskne na velký formát, ideálně 36 x 36 palců (tzn. 90 x 90 cm). Slouží především ke kalibraci kamer s vysokým rozlišením, popřípadě pro kalibrace, kdy v rámci projektu budou snímány velké objekty, či rozsáhlé scény. Toto pole je součástí programu PhotoModeler ve formátu pdf, nazývané jako Large Sheet pro proces tzv. SingleSheet kalibrace.

Druhé kalibrační pole, prostorové, bylo složeno ze 75 kódovaných terčů na 15 listech formátu A4. Správné rozložení pole můžeme vidět na obrázku 6. Dva krajní listy pole byly umístěny výše než ostatní, čímž byla zajištěna prostorová složka. Výhodou tohoto testovacího pole je to, že může být rovnoměrně rozloženo tak, aby výsledný snímek co nejvíc vyplňovaly kalibrační listy. Pole je také dodáváno k programu PhotoModeler jako MultiSheet.



Obrázek 6: Použitá kalibrační pole, LargeSheet (vlevo), MultiSheet (vpravo) (autor: M. Šimíček, 2011).

Kalibrace byla provedena ve dvou programech, zaměřených na zpracování fotogrammetrických snímků. Oba tyto programy mají ve svém portfoliu modul pro kalibraci neměřických kamer. Jedná se o programy PhotoModeler Scanner 2013 kanadské firmy EOS Sytsem a iWitness PRO verze 3.05 (2013). V obou případech byly použity trial verze s plnou funkcí programů po dobu 30 dní.

Kalibrace v programu PhotoModeler Scanner vytváří několik druhů projektů a jeden z nich je určen přímo ke kalibraci kamer. Po spuštění programu se v úvodním okně (Getting Started) vybere potřebný projekt (Camera Calibration Project). V menu pro nahrání snímku vybereme snímky s nasnímaným kalibračním polem. V dalším kroku je okno, kde se již spouští samotná kalibrace. V této části je důležité správně nastavit kalibraci podle kalibrovaného pole. Nasnímaná pole jsou různá a každé slouží k jinému kalibračnímu mechanismu (algoritmu) programu. Pokud jsou nahrány snímky s LargeSheet polem, je zvolena SingleSheet Calibration. V případě pole MultiSheet je vybrán proces MultiSheet Calibration. Po nastavení druhu kalibrace lze kalibraci spustit. Kalibrační proces v programu PhotoModeler je zcela automaticky a uživatel do něj nemusí nějakým způsobem zasahovat, v podstatě mu to není ani nijak umožněno. Výsledek kalibrace je zobrazen v okně s výsledky a je možnost exportu kalibračního reportu do textového souboru.

Při kalibraci ve PhotoModeleru je ovšem potřeba dát pozor na hodnoty velikosti snímače kamery. Během kalibrace se totiž vypočte ze snímků velikost snímače, která se ke skutečné velikosti jen blíží. Proto je potřeba v okně s parametry kamery opravit hodnoty velikosti snímače za skutečné a bez jakýchkoliv dalších změn provést kalibraci ještě jednou.

Druhým programem umožňující proces kalibrace je iWitnessPRO. Práce v tomto programu je ovšem pracnější a časově náročnější, protože není automatizována a je potřeba zásahu uživatele. Prvním krokem je import snímků s kalibračními poli. Výhodou je, že iWitness dokáže zpracovat jakékoliv nasnímané kalibrační pole, jelikož jednotlivé elementy kalibračního pole (body, kódované terče, atd.) jsou na snímcích spojovány manuálně uživatelem. Právě tento proces dělá práci v programu časově náročnou. Po spojení odpovídajících si bodů bylo otevřeno okno s vlastnostmi kamery a spuštěn kalibrační proces (tzv. Calibration Bundle).

Krom základních požadovaných hodnot určených kalibrací lze zobrazit "Distorsion Grid" a "Distorsion Curve". Distorsion Grid (distorzní mříž) ukazuje, kde na snímku se projevuje distorze objektivu. Z Distorsion Curve (distorzní křivka) lze odečíst hodnoty radiální distorze ve vzdálenosti od středu snímku.

4.1.2 Letecká kalibrace

Druhým typem prováděné kalibrace byla kalibrace letecká. Ta spočívala v nasnímání kalibračního pole ze vzduchu. K tomu bylo použito kalibrační pole MultiSheet. Důvodem použití právě tohoto pole byl fakt, že se skládá z 15 částí na listech formátu A4, které bylo možno rozmístit s požadovaným rozestupem na určité ploše.

Metodou letecké kalibrace byl kalibrován objektiv 20 mm, jelikož je pro účely snímkování ze vzduchu používán častěji, než druhý objektiv 40 mm. Prostřednictvím vytvořené aplikace pro optimalizaci předletové přípravy (viz. kapitola 4.2) byly určeny parametry potřebné pro nálet kalibračního pole. Parametry byly určeny pro průměrnou výšku letu 30, 40 a 50 metrů. Za optimální parametry snímkového letu byly vybrány tyto: průměrná výška letu 40 metrů a rozložení pole takové, aby zabíralo plochu o délce okolo 40 metrů a šířce 30 metrů (podrobné hodnoty jsou v reportu v příloze na DVD).

Poté bylo pole nasnímáno vedoucím práce doktorem Miřijovským pomocí multikoptéru Hexakopter XL (viz. obrázek 7). Polohy středových terčů jednotlivých částí kalibračního pole MultiSheet byly následně zaměřeny pomocí totální stanice v místním souřadnicovém systému. Před nadcházejícím zpracováním byly snímky protříděny, jelikož některé snímky nebyly vhodné pro proces kalibrace. Kalibrace těchto snímků byla provedena v programu iWitness PRO a PhotoScan PRO.



Obrázek 7: Model Hexakopter XL před startem (autor: Miřijovský, 2013).

Kalibrace v programu iWitness probíhala analogicky, jako v případě kalibrace pozemní. Do programu byly importovány snímky, identifikovány shodné body a spuštěn proces kalibrace "Run Calibration Bundle".

Druhým programem, ve kterém byly zpracovávány letecké kalibrační snímky, byl program PhotoScan PRO. V něm byly identifikovány shodné body pomocí markerů. Těmto identifikovaným bodům byly definovány souřadnice. Podrobný popis těchto procesů je popsán v kapitole 4.3.1. PhotoScan nabízí plně automatizovanou kalibraci. Dialogové okno pro kalibrační proces najdeme v menu "Tools", položka "Camera Calibration". V něm se nacházejí dvě záložky obsahující parametry kalibrace, "Initial" a "Adjusted".

V záložce Initial lze nastavit hodnoty kalibrace, samozřejmě za předpokladu, že byla již předtím provedena kalibrace použité kamery (možnost "Precalibrated"). V případě, že parametry kamery nejsou známy (možnost "Auto"), jsou základní parametry kamery, tzn. ohnisková vzdálenost a velikost pixelu v milimetrech, extrahovány z EXIF metadat snímků. Po zadání hodnot, či ponechání hodnot automatických, proběhne proces vyrovnání snímků (Align), kdy jsou kalibrační hodnoty přepočítány a zobrazí se v záložce "Adjusted". V případě, že uživatelem zadané hodnoty jsou považovány za fixní a uživatel si nepřeje tyto hodnoty přepočítávat, je v záložce "Initial" zvolena možnost "Fix calibration". V tomto případě bude program v dalších krocích zpracování považovat tyto kalibrační hodnoty za pevné.



Obrázek 8: Snímek kalibračního pole se zvýrazněnými středy (autor: J. Miřijovský, M. Šimíček, 2014).

Kalibrace v programu PhotoScan má ovšem velice specifické zadávání hodnot. Oproti běžným programům neudává jednotlivé parametry kalibračního procesu v milimetrech, nýbrž v pixelech. Tím je potřeba přepočítávat jednotlivé parametry z milimetrů na pixely a pro porovnání s ostatními hodnotami opět z pixelů na milimetry. Veličiny zjišťované kalibračním procesem jsou tedy v programu označovány následovně:

- f_x, f_y ... ohnisková vzdálenost v směru x a y v pixelech,
- c_x, c_y ... poloha hlavního snímkového bodu v pixelech.

Ve starších manuálech k programu PhotoScan byl zjištěn vzorec pro přepočet ohniskové vzdálenosti v pixelech, z kterého lze matematicky vyjádřit parametr ohniskové vzdálenosti v milimetrech:

$$f_x = f \cdot \frac{x(px)}{x(mm)} \quad (10)$$

kde:

f_x ... velikost ohniskové vzdálenosti v pixelech,

f ... velikost ohniskové vzdálenosti v milimetrech,

$x_{(px)}$... velikost snímače ve směru x v pixelech,

$x_{(mm)}$... velikost snímače ve směru x v milimetrech.

Přepočet polohy hlavního snímkového bodu proběhne jednoduchým vynásobením hodnoty c_x a c_y skutečnou velikostí obrazového prvku senzoru (p). Pro zjištění offsetu hlavního snímkového bodu je od výsledné hodnoty odečtena polovina délky (šířky) senzoru v milimetrech.

4.2 Předletová příprava

Základem každého projektu pro pořízení kvalitních fotogrammetrických snímků je pečlivé naplánování mise. V rámci tohoto procesu je nutné určit parametry potřebné pro snímání. Mezi hlavní parametry patří: výška letu, měřítko snímku, délka základny mezi středy snímků (tzn. mezi stanovisky), prostorové rozlišení snímku a hodnota ohniskové vzdálenosti kamery, která ovšem bývá známá. V rámci přípravy lze dopočítat i jiné parametry potřebné pro dané typy snímání, jako je počet stanovisek a počty snímků, a pod (viz. níže). Základní rovnice pro stanovení parametrů snímání jsou relativně jednoduché a v mnoha případech lze určité parametry z těchto rovnic odvozovat.

Jak již bylo zmíněno základním parametrem je výška letu. Na základě její znalosti lze odvodit prostorovou rozlišovací schopnost a velikost snímané scény zachycené na snímku. Je dána vztahem:

$$Hg = \frac{GSD * f}{p} \quad (11)$$

kde:

Hg ... průměrná výška letu,

GSD ... prostorové rozlišení snímku,

f ... ohnisková vzdálenost,

p ... skutečná velikost obrazového prvku senzoru.

Měřítka snímku vychází z vypočtené výšky letu a hodnoty ohniskové vzdálenosti. Je nutno dodat, že měřítko snímku se k němu vztahuje v době pořízení. Po nahrání do zobrazovacího či zpracovatelského software může být měřítko různé.

$$M = 1 : m_g \quad (12)$$

$$m_g = Hg / f \quad (13)$$

kde:

M ... měřítko,

m_s ... měřítkové číslo,

Hg ... průměrná výška letu,

f ... ohnisková vzdálenost.

Ovšem dnes, v době pořizování především digitálních snímků, není vhodné používat klasické měřítko obrazu. To se nahrazuje hodnotou GSD (Ground Sample Distance neboli prostorová rozlišovací schopnost). GSD vyjadřuje skutečnou vzdálenost, která je na snímku vyjádřena jedním pixelem. Hodnota GSD je dána výškou letu, ohniskovou vzdáleností objektivu a velikostí jednoho obrazového prvku snímáče. Vzorec pro výpočet tohoto parametru si lze matematicky odvodit ze vzorce pro výpočet výšky letu (viz. vzorec 1).

Dalším parametrem je velikost zachycené scény. Pro výpočet velikosti nasnímané scény je potřeba znát její délku a šířku. Tu vypočteme na základě znalosti velikosti snímáče použitého v kameře. Tento parametr je běžně dohledatelný v technické dokumentaci kamery.

$$D = Dsn * m_g \quad (14)$$

$$S = Ssn * m_g \quad (15)$$

kde:

D ... délka skutečné snímané scény,

S ... šířka skutečné snímané scény,

Dsn ... délka snímáče,

Ssn ... šířka snímáče,

m_s ... měřítkové číslo.

Dalším parametrem je délka základny mezi středy snímků. V podstatě se jedná o rozteč mezi stanovisky, místy z kterých je snímek pořízen. Tento parametr souvisí s požadovaným procentuálním překrytem sousedních snímků. V konvenční fotogrammetrii se rozlišují dva typy překrytu: podélný a příčný. Velikost základny mezi středy snímků je dána vztahem:

$$A = \check{S} * \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \quad (16)$$

$$B = D * \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \quad (17)$$

kde:

A ... je vzdálenost mezi stanovisky v příčném směru,

B ... je vzdálenost mezi stanovisky v podélném směru,

\check{S} ... je šířka skutečné snímané scény,

D ... je délka skutečné snímané scény,

PE ... požadovaný procentuální překryv snímků.

Na základě výše uvedených vzorců lze vypočítat základní potřebné parametry pro snímkování. Tyto parametry ovšem můžeme rozšířit o výpočty a parametry podle vlastního uvážení, či účelu a potřeb snímkování. Velice praktickými výpočty jsou zjištění počtu stanovisek v příčném a podélném směru nebo celkový počet stanovisek v rámci snímané scény (oblasti). Většina bezpilotních prostředků je poháněna elektrickými motory a tyto modely jsou ovlivněny výdrží baterie. Tudiž při větších rozměrech snímkané oblasti je potřeba tuto oblast rozdělit na menší části. Proto by byla potřeba znát i počet startů. Nebo dále celkové množství snímků, atd.

4.2.1 Optimalizace návrhu předletové přípravy

Existují softwary, či aplikace zabývající se předletovou přípravou a plánováním letových misí. Tyto software bývají ovšem ve většině případů specializované a dodávají se ke konkrétním produktům, popřípadě si je lze dokoupit. Některé firmy, zabývající se problematikou fotogrammetrie a leteckého snímkování, tento problém řeší pomocí jednoduché tabulky v tabulkovém kalkulátoru.

Za účelem stanovení parametrů snímkování byla na základě výše uvedených rovnic vytvořena jednoduchá aplikace. Tato aplikace byla vytvořena pomocí programovacího jazyka Visual Basic v trial verzi programu Visual Basic 2010 Express. Ten byl zvolen na základě jednoduchého rozhraní a kombinace vizuálního aranžování ovládacích prvků na formuláři, specifikace atributů a akcí na těchto prvcích.

Nejprve byl v programu vytvořen nový projekt definovaný jako "Windows Forms Application". Následně byly na formulář vloženy základní prvky aplikace, v našem případě to jsou: "TextBox", "Button" a "Label" (textová pole, tlačítka a popisky). Program Visual Basic samozřejmě nabízí velké množství jiných prvků (rolovací seznamy, zadržovací pole, a pod), ale pro námi vytvářenou aplikaci stačily tři již zmiňované prvky. Tyto prvky mají předem dané vlastnosti a funkcionalitu. Prvek Label má v podstatě informační charakter a slouží pro vytváření řekněme nadpisů. Prostřednictvím prvku TextBox zadáváme parametry potřebné pro výpočet a v případě naší aplikace vypisujeme i výsledky počítaných hodnot. Tlačítka (Button) mají funkci "spouštěčů" nadefinovaných reakcí.

Při umisťování prvků byl každému elementu přiřazen název a text, který na nich můžeme vidět. Podle nastaveného názvu prvku se orientovalo při definování parametrů a reakcí v kódu programu, při interakci uživatele s prvkem. Ukázkou kódu můžeme vidět na obrázku 7, kde je vyobrazena část kódu, která řeší reakci na tlačítko výpočtu. Po kliknutí na tlačítko se podle výše uvedených rovnic vypočítají potřebné parametry pro snímkování. Celý kód můžeme nalézt v příloze.

```

'Reakce na tl. Compute 1
Private Sub Button1Compute_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1Compute.Click
    'Vypocty -Zakladni hodnoty
    PromF = TextBoxF.Text
    PromP = TextBoxP.Text
    PromGSD = TextBoxGSD.Text
    PromDsn = TextBoxDsn.Text
    PromSsn = TextBoxSsn.Text
    PromA = TextBoxA.Text
    PromB = TextBoxB.Text

    VyslHG = ((PromGSD * PromF) / PromP) / 1000
    VyslMs = (VyslHG * 100) / (PromF / 10)
    VyslScD = ((PromDsn / 10) * (VyslMs)) / 100
    VyslScS = ((PromSsn / 10) * (VyslMs)) / 100
    VyslA = VyslScS * (1 - (PromA / 100))
    VyslB = VyslScD * (1 - PromB / 100)

    'zobrazeni zaokrouhlenych vysledku do textboxu
    TextBoxHG.Text = Math.Round(VyslHG, 2)
    TextBoxMs.Text = Math.Round(VyslMs, 2)
    TextBoxScena.Text = Math.Round(VyslScD, 2) & " x " & Math.Round(VyslScS, 2)
    TextBoxA2.Text = Math.Round(VyslA, 2)
    TextBoxB2.Text = Math.Round(VyslB, 2)

    If VyslHG >= 300 Then
        LabelPozn2.Text = "Varování: Nacházíte se za hranici prostoru třídy G (Hg nad 300m AGL)!"
    Else : LabelPozn2.Text = "..."
    End If

    LabelPozn1.Text = "Zadejte parametry do bílých polí v část 'Rozšířené' a zmáčkněte tlačítko 'Compute 2.'"
End Sub

```

Obrázek 9: Ukázka kódu vytvořené aplikace (autor: M. Šimíček, 2014).

4.3 Zpracování dat metodou Structure from Motion

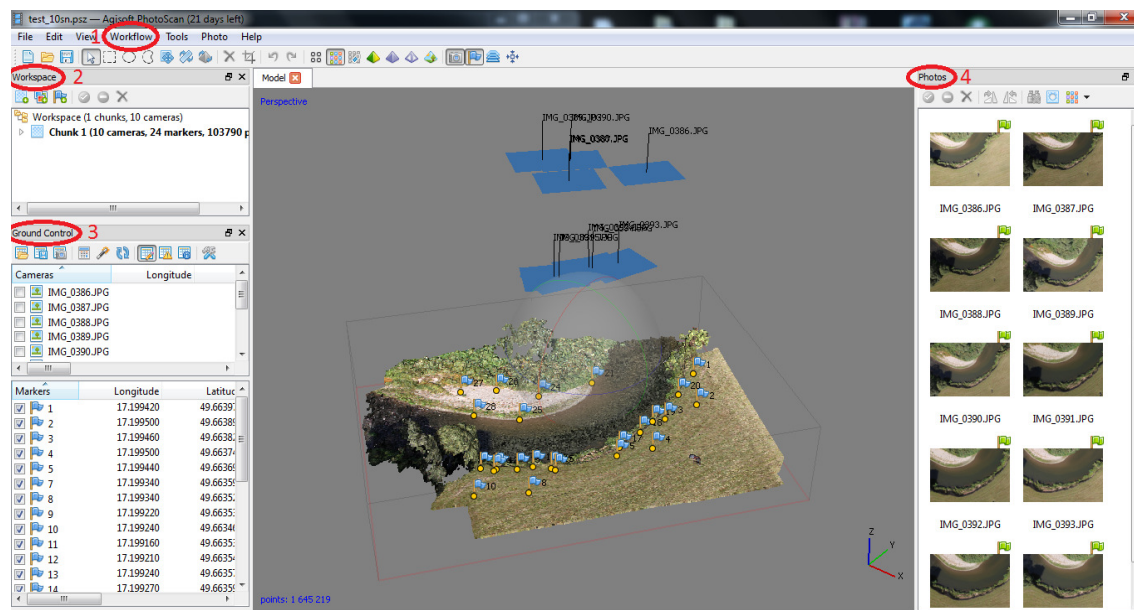
Zpracování dat metodou Structure from Motion bylo donedávna z větší části prováděno prostřednictvím webových aplikací. V tomto případě uživatel uploadoval snímky na server poskytovatele služeb a po zpracování byl výsledek poslán zpět uživateli. V roce 2006 vznikla firma AgiSoft LLC (Petrohrad, Rusko), zabývající se výzkumem a vývojem řešení pro automatické 3D modelování a mapování, založeným na technologii počítačového zobrazení a digitálního obrazu. Jedním z jejich softwarových produktů, umožňující zpracování metodou SfM, je program PhotoScan. V rámci zpracovávané práce byla použita desktop verze programu s označením Pro Edition (Professional) v plně funkční třicetidenní trial verzi.

Program PhotoScan Pro umožňuje vytvářet georeferencované ortofotosnímky s vysokým rozlišením, detailní DEM a texturované modely a to s přesností GCP menší než 5 cm. Plně automatizovaný pracovní postup umožňuje zpracovávat tisíce leteckých snímků a produkovat prvotřídní fotogrammetrická data i lidem, kteří se rekonstrukcí objektů z obrazového záznamu věnují jen okrajově.

Při zkoumání možností, testování parametrů a detailnějším seznámením s programem byla využívána testovací data. Ty byly poskytnuty vedoucím práce. Jedná se o sadu snímků, zachycující meandr u obce Štěpánov v CHKO Litovelské Pomoraví. Snímky byly nasnímány pomocí kalibrované kamery Canon EOS 500D z bezpilotního multikoptéru.

Jeden ze základních výstupů programu PhotoScan Pro jsou ortofotosnímky vytvořené ze vstupní sady snímků. Jakým způsobem probíhá proces tvorby ortofotosnímku (a dalších výstupů) dané oblasti je popsáno v této kapitole. Celkově lze proces tvorby rozčlenit do čtyř základních procesů, kterými jsou: "Align Photos" (vyrovnání snímků), "Build Dense Cloud" (generování hustého mračna bodů), "Build Mesh" (tvorba sítě

povrchu), "Build Texture" (generování textury povrchu modelu). Veškeré základní procesy potřebné pro zpracování snímků v programu se vyskytují v menu "Workflow".



Obrázek 10: Pracovní prostředí programu PhotoScan Pro s vyznačenými prvky programu:
 1. Workflow menu; 2. panel Workspace; 3. panel Ground Control; 4. panel Photos
 (autor: M. Šimíček, 2014).

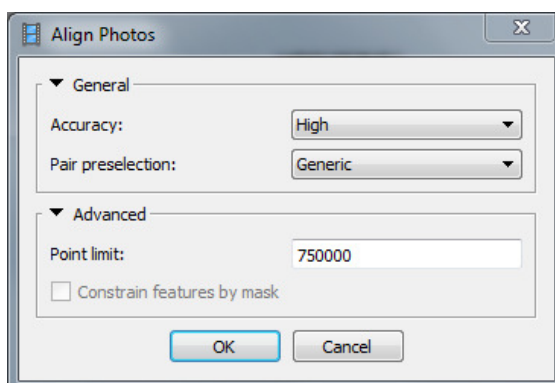
4.3.1 Základní proces tvorby výstupu v programu PhotoScan

Prvním krokem je nahrání snímků mapované oblasti. V našem případě byly nahrány snímky ve formátu JPEG, ale program dokáže zpracovávat i další formáty, jako je TIFF, PNG a BMP. Nahrání snímků z příslušného adresáře se provádí pomocí funkce "Add Photos" v záložce "Workflow".

Dalším krokem je identifikace GCP bodů, v programu označovaných jako "Markers". Tyto body slouží k měření vzdáleností, nastavení souřadnicového systému a vzájemnému vyrovnání snímků. Nejvhodnější je zcela manuální přístup a jejich identifikace probíhá následovně. V panelu "Photos" byl vybrán snímek, který byl dvojklikem na levé tlačítko otevřen v hlavním okně programu. Ve snímku byl nalezen zvláště výrazný bod představující GCP. Kliknutím levého tlačítka a zvolením možnosti "Create marker" byl na zvoleném bodě vytvořen marker. Takto se pokračovalo u ostatních příslušných bodů ve snímku. Následně se toto učinilo i pro další snímky. Minimální počet markerů je čtyři na snímek, přičemž minimální počet snímků s vyznačenými markery jsou dva. Při splnění těchto minimálních podmínek umožňuje program jistou pomocnou výhodu. Při spuštění procesu "Align Photos", kde byly ponechány defaultní hodnoty nastavovaných parametrů, proběhne vyrovnání snímků s vyznačenými, minimálně čtyřmi, body. Po dokončení procesu jsou identifikované body lokalizovány i na ostatních snímcích v místech odhadovaných programem a označené šedým plamínkem. Takto označené body stačí již jen přetažením opravit do správné polohy, přičemž program vyhodnocuje body relativně

přesně a odchylka takto umístěného bodu bývá minimální. Celkem bylo k dispozici 28 zaměřených bodů. Na snímcích bylo ale identifikováno pouze 24 bodů, které byly zahrnuty do výpočtů modelu. Zbylé čtyři posloužily jako referenční body pro následné porovnání přesností.

Po identifikaci všech markerů na snímcích následuje proces vzájemného vyrovnání snímků vůči sobě, odhadu pozic kamer a vygenerování mračna bodů označovaného jako "Sparse Cloud". K tomu byla využita funkce "Align Photos" (menu Workflow). Tento proces byl již použit pro zběžné vyrovnání snímku během identifikace markerů. Ovšem v tomto kroku byly parametry procesu změněny dle potřeb. Prvním parametrem procesu vyrovnání je "Accuracy" ta nabízí tři možnosti: Low, Medium a High. Parametr "Pair preselection" urychluje proces výběrem podмноžiny obrazových dvojic ze sady vstupních snímků na základě překrytu snímků (Generic) nebo na základě pozic kamery (Ground Control). Možnost "Generic" je vybrána v případě, že není známa pozice kamery v době pořízení snímku, což je případ této práce. Naopak možnost "Ground Control" vybírá dvojice snímku na bázi zaměření pozice kamery, například z EXIF souboru snímku. "Point limit" udává počet bodů obsažených v základním řídkém mračnu bodů (Sparse cloud). V případě, je-li na snímcích vybrána jen určitá část pomocí masky, bude v případě zatržení možnosti "Constrain features by mask" vygenerováno mračno bodů pouze ve vymaskované oblasti.



Obrázek 11: Dialogové okno procesu Align Photos (autor: M. Šimíček, 2014).

Dále je potřeba definovat souřadnicový systém budoucího modelu, výstupních ortofotosnímků, apod. To bylo provedeno přes tlačítko "Settings" v panelu "Ground Control", kdy bylo otevřeno dialogové okno "Ground Control Settings". PhotoScan obsahuje knihovnu s přibližně 750 souřadnicovými systémy celého světa. S-JTSK je zde zastoupen čtyřmi variantami a to pod EPSG označením: 4156, 4818, 5228 a 5229. Ovšem ani jedna z těchto možností není vhodná pro další zpracování (viz. kapitola 5.3.2) a byl tudíž zvolen defaultní systém místních souřadnic "Local Coordinates". V tomto okně se ještě nachází parametry "Measurement Accuracy", definující přesnost umístění markerů, vázacích bodů, atd.

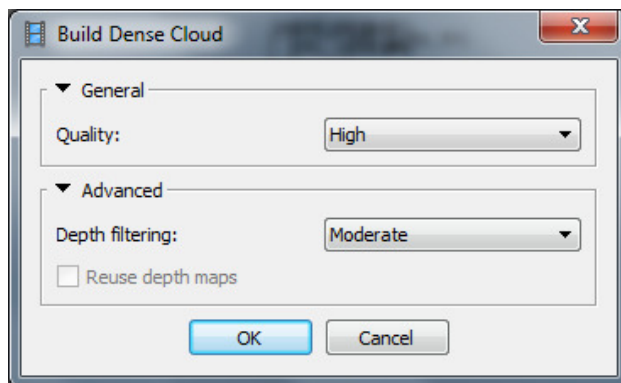
PhotoScan umožňuje dvě možnosti pro přiřazení souřadnic modelu. Jedním způsobem je definice souřadnicového systému pomocí pozice kamer. Ty mohou být nahrány pomocí funkce "Import" (v panelu Ground Control Pane), kde je nahrán CSV soubor se

souřadnicemi pozic kamer. Ovšem v tomto případě je potřeba mít kameru vybavenou modulem zaznamenávající polohu kamery při pořízení snímků. Proto byly souřadnice modelu přiřazeny prostřednictvím vyznačených markerů. V panelu Ground Control se nachází přehled vyznačených markerů s prázdnými poli ve sloupcích, definující souřadnice X(m), Y(m) a Z(m) jednotlivých GCP. Do nich byly vyplněny souřadnice v S-JTSK Křovák inverzní, s hodnotami -500 000 pro osu X a -1 000 000 pro osu Y. V případě desetinného čísla v souřadnici se musí dbát na oddělení desetinnou tečkou, nikoliv čárkou.

Po nastavení souřadnicového systému, vyrovnání snímků a určení přesnosti identifikace markerů je doporučeno provést optimalizaci procesu vyrovnání snímků. K tomu slouží funkce "Optimize" v panelu "Ground Control", kde se nachází ikona podobná kouzelné hůlce. Tato funkce slouží k dosažení vyšší přesnosti a opravám případného zkreslení. Tento krok je doporučován zejména v případě, kdy jsou souřadnice GCP bodů známy přesně, s přesností několika centimetrů. To je případ této práce, kdy GCP body byly zaměřeny totální stanicí.

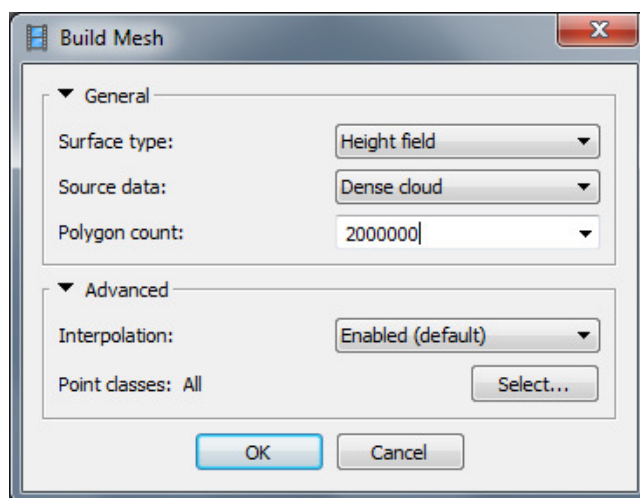
Celý model je ohraničen tzv. "Bounding Box". Toto ohraničení lze jakkoliv měnit dle potřeb uživatele, myšleno co do velikosti a pootočení. Pokud je Bounding Box zmenšen natolik, že určité části modelu z něj vyčnívají ven, jsou tyto prvky na výstupu ořezány. Červeně zvýrazněné hrany Bounding Boxu indikují rovinu, která je považována za základní, řekněme nulovou, rovinu modelu. Je dobré tuto rovinu nastavit pokud možno co nejbližší k nejnižší položenému elementu modelu.

"Build Dense Cloud" ("Workflow" menu) je jedním ze stěžejních procesů zpracování v programu PhotoSan. V tomto kroku je generováno husté mračno bodů, kdy jsou programem vypočítávány informace o hloubce obrazu všech snímků, které mají být sloučeny do jednoho mračna bodů. Tato část umožňuje nastavit dva parametry. Prvním je "Quality". Dává na výběr z pěti možností: Lowest, Low, Medium, High a Ultra High. Je dobré podotknout, že s rostoucí kvalitou hustého mračna roste i doba zpracování a požadavky na výpočetní výkon. Dalším parametrem je "Depth Filtering". Jde o možnost volit mezi metodami filtrující hloubku obrazu: Aggressive, Moderate a Mild. Aggressive je určen pro modelování scén bez drobných detailů. V případě, že je rekonstruovaná scéna komplexní, s velkou četností malých detailů nebo netexturovaných povrchů, jako jsou střechy, je doporučeno zvolit metodu Mild. Moderate lze nazvat jako "průměr" předchozích metod.



Obrázek 12: Dialogové okno procesu Build Dense Cloud (autor: M. Šimíček, 2014).

Dalším krokem bylo vytvoření polygonální sítě povrchu, tzv. meshe, na základě hustého mračna bodů. V menu "Workflow" byla vybrána možnost "Build Mesh". Parametrizace této části je oproti předchozím krokům bohatší. Parametr "Surface Type" určuje, jakým způsobem bude povrch modelu zpracován. Zda budou vertikální části modelu zpracovány detailněji, apod. Nabízí dvě možnosti: "Arbitrary" a "Height Field". Arbitrary je vhodný pro členité objekty s detaily, jako jsou sochy, budovy, stromy, břehové nátrže, apod. Ovšem úskalím této metody jsou vyšší požadavky na výpočet. Height Field je optimalizován pro modelování rovinných povrchů a nízkých reliéfů. Tato volba je vhodná při zpracování leteckých snímků, kdy ve výstupním ortofotosnímku není potřebný detail vertikálních ploch. Tato možnost vyžaduje méně paměti pro výpočet a umožní zpracovat větší množství snímků. "Source data" dává uživateli na výběr, zda bude polygonální síť vytvářena na základě "Sparse cloud" (řídce mračno bodů) vytvořeného během vyrovnání snímků nebo na základě "Dense cloud" (husté mračno bodů) vytvořeného v předešlém kroku. "Polygon count" udává, kolika polygony bude výsledný povrch tvořen. Program v tomto případě sám nabízí tři základní úrovně: Low, Medium, High. V závorkách jsou tyto možnosti doplněny o počet polygonů daných zvolenou úrovní a počtem bodů v mračně. Tyto tři možnosti jsou ještě doplněny o položku "Custom", kde si může uživatel nastavit počet polygonu dle vlastního uvážení. Posledním parametrem je "Interpolation", která dává na výběr, zda bude interpolace povolena či nikoliv. V případě, že byla provedena klasifikace "Dense cloud", je možné vybrat, z kterých klasifikovaných tříd bude model vytvořen (viz. níže).



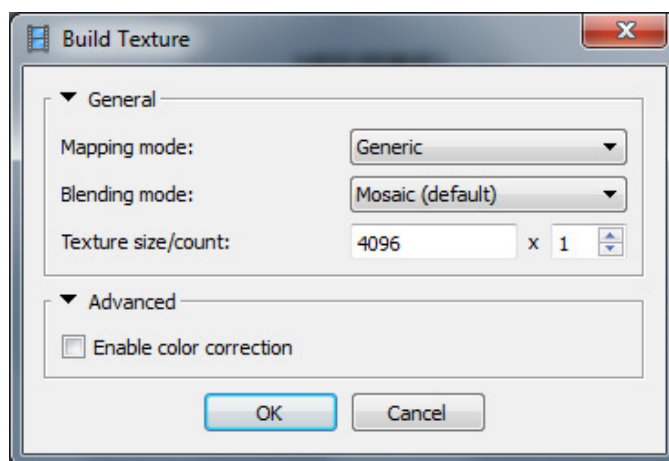
Obrázek 13: Dialogové okno procesu Build Mesh (autor: M. Šimíček, 2014).

Při vytváření polygonálního povrchu modelu může dojít k situacím, kdy se v modelu objeví díry. Ty mohou být způsobeny tím, že v daném místě nebyl dostatek bodů, aby byl povrch programem vytvořen, nebo je uživatel udělal záměrně, například vymazáním bodů a objektů, které do snímané scény nepatří a mohly by zkreslit výsledek (stojící operátor multikoptéry, apod.). Za tímto účelem se nachází v záložce "Tools - Mesh" nástroj "Close Holes". Ten vyplní všechny díry o velikosti dané uživatelem, vyjádřené procentuálně z celkové velikosti plochy modelu. Dalším nástrojem, který se v této záložce nachází je "Decimate Mash", který redukuje množství ploch modelu. Tato možnost je nabízena proto, že PhotoScan produkuje 3D modely s nadměrným rozlišením geometrie. Tuto detailní geometrii nemusí jiné externí programy zpracovat a je proto doporučeno před případným exportem do jiného editačního nástroje (CAD systémy, ArcGIS, atd.) redukovat množství ploch povrchu modelu.

Jedním z posledních kroků je generování textury povrchu modelu. Tomuto účelu slouží "Build Texture" ve "Workflow" menu. "Mapping Mode" určuje, jakým způsobem bude na objekt textura "nalepena". Správná volba mapping módu pomáhá získat optimální texturu povrchu a v důsledku toho i lepší vizuální kvalitu konečného modelu či ortofotosnímku. Prvním z mapping módů je "Generic". V tomto případě se program snaží vytvářet jednotnou strukturu povrchu a je vhodný pro texturování povrchu 3D modelu. Mapping mód "Adaptive orthophoto" rozděluje povrch objektu na vertikální a horizontální plochy. Horizontálním plochám je následně přiřazena textura pomocí ortografické projekce a vertikálním zase textura daná reprezentací v daném místě. Program tak vytváří kompaktní texturu rovinné scény při zachování relativně kvalitní textury na plochách svislých. "Orthophoto" texturuje celý povrch výsledného modelu pouze ortografickou projekcí. Produkuje ještě kompaktnější texturu než "Adaptive orthophoto", ovšem na úkor kvality textury vertikálních ploch. Tento mód je nejvhodnější v případě, že bude výstupem ortofotosnímek. "Spherical" mapping mód je určen pro objekty, které jsou oblé nebo mají tvar koule. Poslední možnost "Single photo" generuje strukturu celého modelu na základě jednoho snímku.

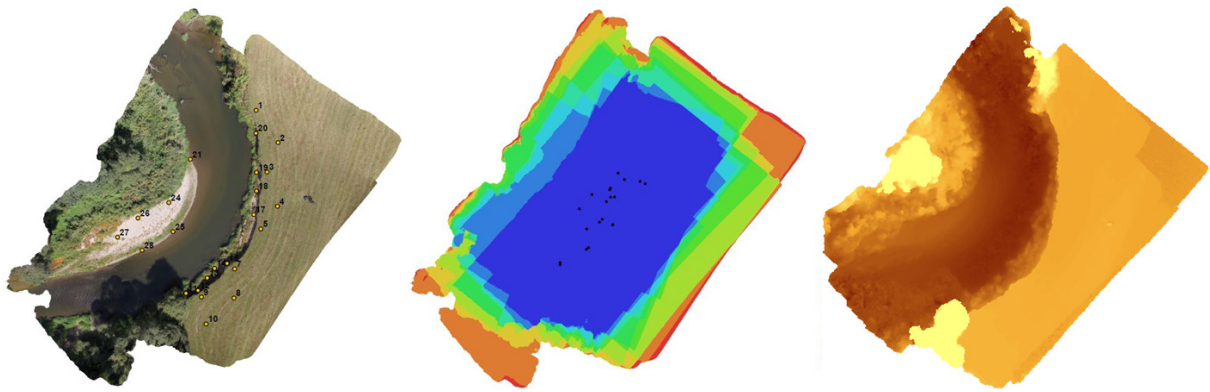
Dalším parametrem generování textury je "Blending mode", který udává způsob, jakým budou hodnoty pixelu z různých snímků kombinovány ve finální textuře. Program nabízí čtyři možnosti výpočtu hodnoty pixelu:

- Average - je vypočítán průměr hodnot pixelů z různých snímků, který je dosazen na příslušné místo v textuře,
- Max intensity - pixelu je přiřazena hodnota s maximální intenzitou,
- Min intensity - pixelu je přiřazena hodnota s minimální intenzitou,
- Mosaic - je vybrána hodnota pixelu ze snímku, jehož středu je daný pixel nejbližší, vhodná pro generování textury ortofotosnímků.



Obrázek 14: Dialogové okno procesu Build Dense Cloud (autor: M. Šimíček, 2014).

Program PhotoScan umožňuje export výsledného modelu v různých formách a do formátů několika programů. Možnosti exportu se v programu nachází ve "File" menu. V případě, že výstupem bude 3D model ("Export Model") jsou na výběr formáty jako například VRML, DXF a FBX (formáty programu CAD), OBJ, DAE, apod. Je možnost model vyexportovat i do formátu PDF, kdy k jeho zhlédnutí není potřeba specializovaný software, ovšem tento způsob slouží jen pro vizuální demonstraci modelu. Je také možnost exportovat model v podobě mračna bodů ("Export Points") a to v klasickém textovém souboru s X, Y a Z souřadnicemi bodů, nebo ve formátu LAS. Export ortofotosnímku ("Export Orthophoto") je umožněn do formátů JPEG, PNG a TIFF/GeoTIFF. Poslední možností exportu je digitální výškový model ("Export DEM"). DEM lze vyprodukovat ve formátech TIFF, BIL, ASC a XYZ.



Obrázek 15: Různé příklady výstupů z programu PhotoScan: vlevo ortofotosnímek, uprostřed pokrytí a překryv snímků v oblasti, vpravo výškový model mapované oblasti (autor: M. Šimíček, 2014).

4.3.2 Rozšířené možnosti základního procesu v programu PhotoScan

Velice užitečným a zajímavým způsobem exportu je vytvoření reportu ("Generate Report"), shrnující informace o vytvořeném modelu ve formátu PDF. V něm jsou obsaženy informace, jako je počet snímků, průměrná výška pořízených snímků, rozloha modelované oblasti, počet vázacích bodů, RMS chyba, apod. Součástí jsou i překrytí snímků v oblasti, ortofoto s vyznačenými GCP a výškový model.

PhotoScan Pro umožňuje i editaci v průběhu práce. Například, vyskytují-li se ve vytvořeném mračně body, které jsou jasnými outliery, lze je pomocí nástroje pro výběr označit. V záložce "Edit" se pak nalézají nástroje pro mazání ("Delete Selection") nebo ořezání ("Crop Selection") výběru.

Pokud je modelovaná oblast nasnímána velkým počtem snímků, které by nebylo možné zpracovat najednou, umožňuje PhotoScan rozdělit sadu snímků na dvě, či více, zpracovat je samostatně a posléze je spojit dohromady. V panelu "Workspace" je defaultně po nahrání snímků vytvořen tzv. "Chunk" (volně přeloženo jako "kus" modelu), ve kterém jsou zpracovávány snímky tak, jak bylo popsáno výše. Aby mohl být model zpracován po částech, je zapotřebí vytvořit nový chunk. Po kliknutí pravého tlačítka v panelu "Workspace" zvolíme jedinou nabízenou možnost "Add Chunk". Poté je na nový chunk kliknuto opět pravým tlačítkem a zvolena možnost "Set Active". Pak lze do vytvořeného chunk nahrát snímky a vytvořit model dle výše popsaného postupu.

Následně je ze záložky "Workflow" vybrána možnost "Align Chunks". Vyrovnání jednotlivých chunků vůči sobě je umožněno pomocí tří metod. První je vyrovnání na základě podobnosti snímků v jednotlivých dílech (resp. určitých částí snímků), nazývaná jako "Point Based". Vyrovnání pomocí markerů "Marker based" je založeno na shodnosti GCP bodů v modelech. Podmínkou pro použití této metody je, že se markery v obou modelech musí jmenovat stejně. Poslední možností je vyrovnání chunků na základě odhadovaného umístění pozice kamer "Camera based". V tomto případě musí být v každém chunku obsaženy minimálně tři stejné snímky podle kterých jsou modely vyrovnány. Dále jsou v "Align Chunks" nastavovány parametry "Accuracy" (možnosti:

High, Medium, Low) a "Point limit". S vyšší úrovní parametru přesnosti "Accuracy" roste kvalita propojení jednotlivých chunků. Poté je zvoleno "Merge Chunks", menu "Workflow". V okně může být ponecháno přednastavených hodnot, popřípadě může být zatržena možnost spojení markerů, čímž ve výsledném nebudou markery duplikovány.

Program nabízí i klasifikaci bodů obsažených v Dense Cloudu. Klasifikace mračna bodů otevírá způsob, jak přizpůsobit proces tvorby polygonálního povrchu "Build Mesh". Na základě klasifikace tak může být vytvořen digitální model terénu, který neobsahuje například stromy. Proces klasifikace je vhodné, v případě potřeb uživatele, realizovat mezi kroky generování mračna bodů "Build Dense Cloud" a tvorbou povrchu modelu "Build Mesh".

Existují dvě možnosti jak Dense Cloud klasifikovat. První je automatická klasifikace všech bodů do dvou tříd, "ground points" (zem) a zbytek. Manuální přístup, druhá možnost klasifikace, umožňuje uživateli pomocí nástrojů pro výběr přiřadit body do určité třídy ze standardního seznamu využívaného pro data pořízená systémem LIDAR. Třídy systému LIDAR použité v programu PhotoScan Pro jsou: *Created (never classified), Unclassified, Ground, Low Vegetation, Medium Vegetation, High Vegetation, Building, Low Point (noise), Model Key.point (mass point), Water, Overlap Points*.

Nástroj pro automatickou klasifikaci bodů reprezentující zem je nazýván "Classify Ground Points" a je umístěn v menu "Tools - Dense Cloud". V prvním kroku automatické klasifikace je mračno bodů rozděleno do buněk o určité velikosti, ve kterých je zjišťován nejnižší bod. Tyto body vytváří první aproximaci modelu terénu. V druhém kroku jsou body přiřazovány do třídy reprezentující zem (třída "Ground"). Musí ovšem splňovat dvě podmínky:

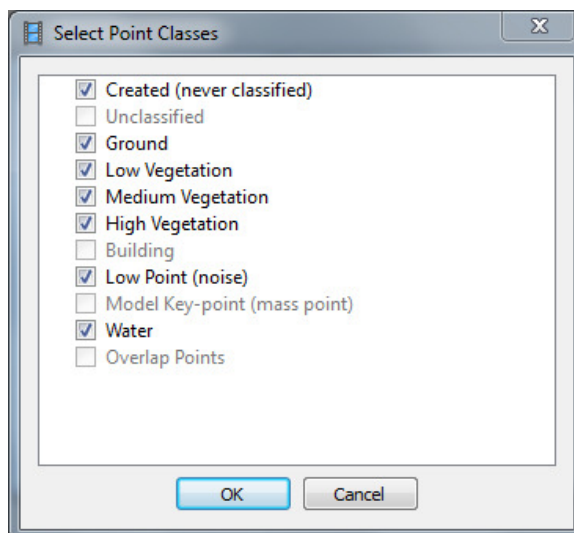
- vzdálenost mezi klasifikovaným bodem a terénem není větší než hodnota zadaná uživatelem,
- úhel mezi rovinou terénu a pomyslnou spojnicí klasifikovaného bodu s bodem třídy "Ground" je menší než hodnota úhlu zadaná uživatelem.

S těmito podmínkami souvisí i zadávané parametry automatické klasifikace. "Max angle" udává velikost úhlu mezi rovinou terénu a spojnicí klasifikovaného bodu s bodem třídy "Ground" a určuje předpoklad pro maximální sklon terénu. "Max distance" definuje vzdálenost mezi klasifikovaným bodem a terénem. Posledním parametrem je "Cell size", určující velikost buněk, na které bude mračno bodů děleno. Tento parametr by měl být volen s ohledem na velikost největší plochy v rámci scény, která neobsahuje žádné pozemní body (Ground points), tj. budovy, stromy, apod.

Manuální klasifikace je realizována pomocí nástrojů pro výběr. Ty jsou umístěny v nástrojové liště a jsou trojího druhu: výběr obdélníkem, kruhem a nebo free-form nástrojem, umožňujícím kresbu libovolných výběrových obrazců. V režimu zobrazení "Dense Cloud" nebo "Dense Cloud Classes" jsou vybírány příslušným nástrojem části mračna bodů, které mají být klasifikovány. Je-li potřeba vybrat k aktuálnímu výběru další body, je to umožněno držením klávesy Ctrl a označením dané množiny bodů. Je-li potřeba odebrat body z výběru, je proveden výběr množiny bodů za pomoci klávesy

Shift. Po výběru bodů, které mají být přiřazeny určité třídě, je z menu "Tools - Dense Cloud" zvolena možnost "Assign Class". V dialogovém okně je zvolen zdroj ("From"), ze kterého mají být body vyjmuty, a cíl nebo skupina ("To"), do které budou body přiřazeny.

Po dokončení klasifikace může být opět spuštěn proces "Build Mesh". V okně procesu u parametru "Point classes" jsou zvoleny třídy klasifikovaných bodů, ze kterých bude vytvořen model. Seznam těchto tříd se zobrazí při kliknutí na tlačítko "Select" a jsou zatrhnuty potřebné třídy.



Obrázek 16: Dialogové okno volby klasifikovaných tříd vstupujících do procesu Build Mesh (autor: M. Šimíček, 2014).

Program samozřejmě disponuje i dalšími zajímavými a neméně potřebnými funkcemi. Za zmínku stojí vymaskování oblasti dané části snímků. To může být výhodou při vytváření například břehových nátrží, kdy je ke zpracování potřeba jen určitá část snímků a zbylá část není při zpracování zahrnuta do výpočtu. Také umožňuje několik druhů pohledů pro zobrazení jednotlivých částí procesů.

5 VÝSLEDKY

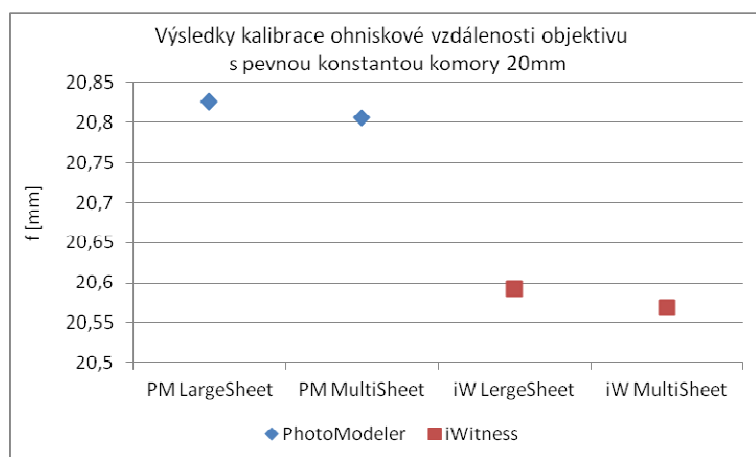
5.1 Vyhodnocení kalibrace kamer

5.1.1 Výsledky pozemní kalibrace

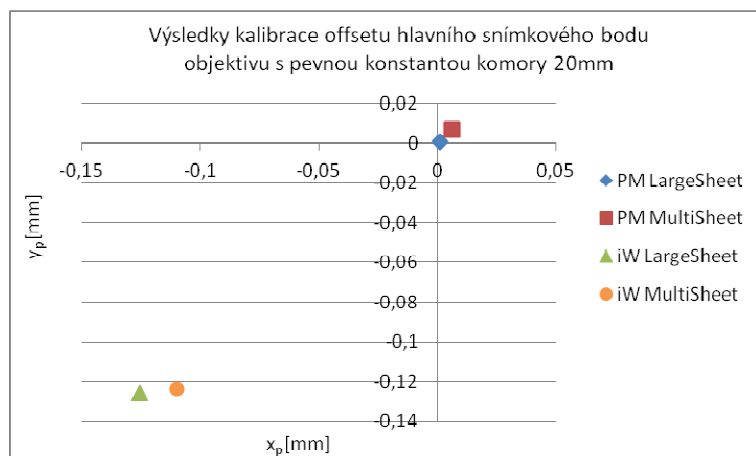
V rámci pozemní kalibrace byly pořízeny dvě sady snímků pro každý kalibrovaný objektiv. Na jedné bylo nasnímáno kalibrační pole LargeSheet a na druhé MultiSheet. Všechny pořízené snímky byly zkalibrovány v programech PhotoModeler a iWitness. Aby kalibrace mohla být prohlášena za správnou a vhodnou k vyvozování závěru, nesmí její výsledná hodnota střední kvadratické chyby (RMS error) být vyšší než 0,5 mm na pixel. Žádná z pozemních kalibrací, provedená během této práce, však nepřesáhla tuto mezní hranici. Výsledky kalibrací objektivů v jednotlivých programech můžeme vidět v tabulkách 2 a 3.

Tabulka 2: Výsledky kalibrace kamery EOS 500D s objektivem s konstantou komory 20 mm (autor: M. Šimíček, 2014).

program	kalibrační pole	f	x _p	y _p	K1	K2	K3	uznaných snímků	RMS error
		[mm]	[mm]	[mm]					
PM	Large	20,8256	0,00067	0,00085	$2,31 \cdot 10^{-4}$	$-4,2 \cdot 10^{-7}$	0,00	11	0,099
	Multi	20,8249	0,00054	0,00063	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$-4,1 \cdot 10^{-7}$	0,00	11	0,05
iW	Large	20,5920	-0,12600	-0,12600	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$-2,7 \cdot 10^{-7}$	$-8,1 \cdot 10^{-10}$	12	0,1
	Multi	20,5690	-0,11000	-0,12400	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$-8,7 \cdot 10^{-8}$	$-9,3 \cdot 10^{-10}$	12	0,4



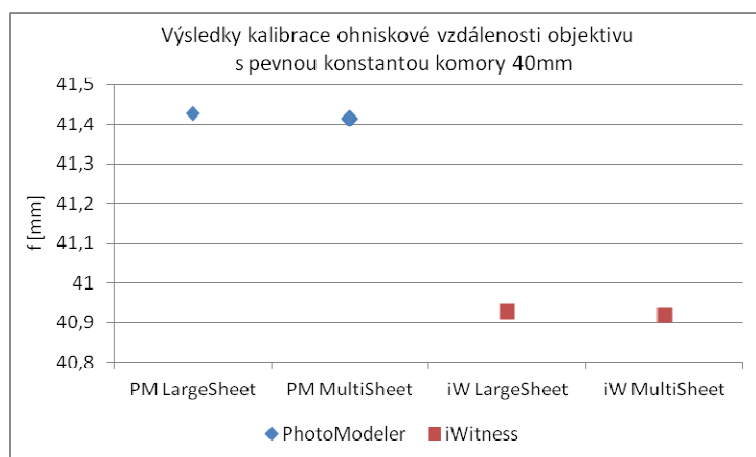
Obrázek 17: Výsledky ohniskové vzdálenosti kamery s objektivem 20 mm (autor: M. Šimíček, 2014).



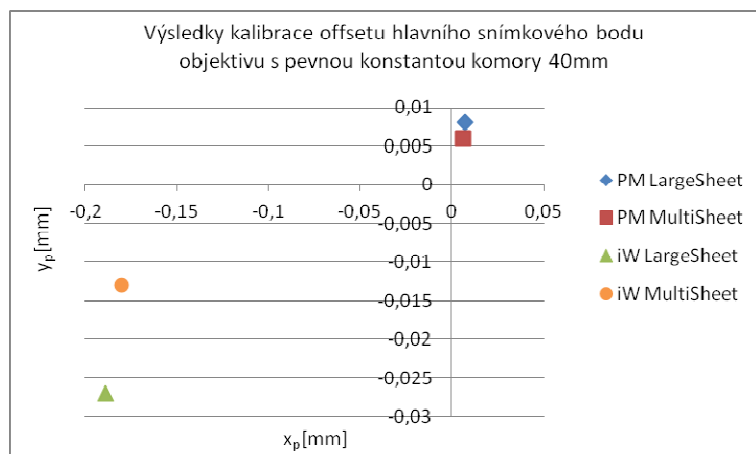
Obrázek 18: Offset souřadnic hlavního snímkového bodu kamery s objektivem 20 mm (autor: M. Šimíček, 2014).

Tabulka 3: Výsledky kalibrace kamery EOS 500D s objektivem s konstantou komory 40 mm (autor: M. Šimíček, 2014).

program	kalibrační pole	f	x_p	y_p	K1	K2	K3	uznaných snímků	RMS error
		[mm]	[mm]	[mm]					
PM	Large	41,4265	0,007	0,008	$7,22 \cdot 10^{-5}$	$-7,5 \cdot 10^{-8}$	0,00	8	0,198
	Multi	41,4138	0,006	0,006	$7,19 \cdot 10^{-5}$	$-6,9 \cdot 10^{-8}$	0,00	12	0,17
iW	Large	40,9270	-0,189	-0,027	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$-2,1 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-10}$	12	0,15
	Multi	40,9190	-0,180	-0,013	$7,64 \cdot 10^{-5}$	$-1,8 \cdot 10^{-7}$	$7,16 \cdot 10^{-10}$	12	0,15



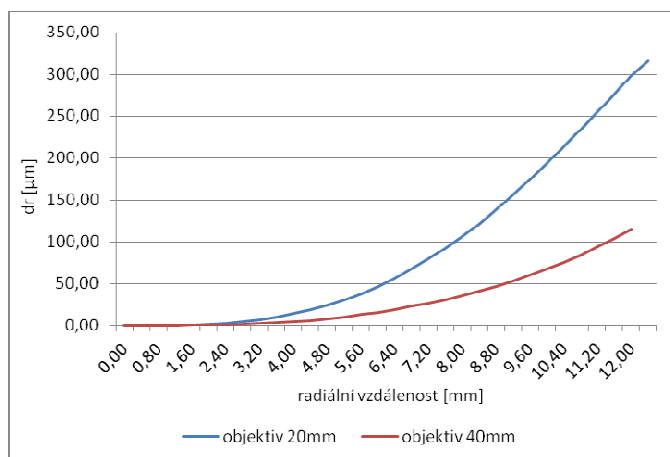
Obrázek 19: Hodnoty ohniskové vzdálenosti kamery s objektivem 40 mm (autor: M. Šimíček, 2014).



Obrázek 20: Offset souřadnic hlavního snímkového body kamery s objektivem 40 mm (autor: M. Šimíček, 2014).

Z výsledků lze pozorovat, že zjišťované prvky vnitřní orientace vycházejí obdobně, nehledě na použité kalibrační pole, či kalibrační software. Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami se pohybuje v řádech setin až desetin milimetrů, například u konstanty komory. A to i v případě, kdy při kalibraci objektivu 20 mm program PhotoModeler nebyl schopen identifikovat na snímku kódované terče, čímž do výpočtu vstupovalo jedenáct snímků. Obdobně u objektivu 40 mm, kdy nebylo rozpoznány terče dokonce na čtyřech snímcích.

Všeobecně je známo, že na velikosti ohniskové vzdálenosti je závislý průběh radiální distorze objektivu, s čímž souvisí i celkové zkreslení. Objektivy s menší ohniskovou vzdáleností mají širší úhel záběru a na okrajích snímků dochází k výraznějšímu zkreslení snímaných objektů. Dobře patrný je tento jev na průběhu radiálních distorzí testovaných objektivů. Způsob, jak zjistit průběh radiální distorze, nabízí program iWitness (PhotoModeler bohužel tuto funkci nemá) odečtením hodnot z "Distorsion Curve". Hodnoty zkreslení objektivu 20 mm jsou více než dva a půl krát vyšší, než v případě objektivu s konstantou komory 40 mm (viz. obrázek 21).



Obrázek 21: Průběh radiální distorze testovaných objektivů (autor: M. Šimíček, 2014).

Při porovnání aktuálních výsledků s výsledky pozemních kalibrací provedených během bakalářské práce (Šimíček, 2012) lze zjistit, že hodnoty ohniskové vzdálenosti a offsetu hlavního snímkového bodu vykazují obdobné tendence, i když byly kalibrovány objektivy s ohniskovými vzdálenostmi 18 a 50 mm. Soudobá kalibrace opět vykazuje trend semknutosti hodnot konstanty komory podle použitého kalibračního programu. Obdobně i poloha hlavního snímkového bodu vykazuje různorodé vyhodnocení jeho přesné pozice. Program PhotoModeler jej "opět" lokalizuje mnohem blíže k předpokládanému středu oproti programu iWitness (viz. grafy výše).

Jelikož výsledné hodnoty vykazují normální rozdělení, jsou si blízké a bez výrazných odchylek, naskytují se dvě možnosti, jak výsledky vyhodnotit. První variantou je, že bude pro následné fotogrammetrické aplikace opět vypočítán průměr dílčích hodnot kalibrací. V tomto případě se bude předpokládat, že opakovaně provedený kalibrační proces bude vykazovat výsledky blízké spočítanému průměru bez větších odchylek. Nebo v druhém případě provést kalibraci pro každou fotogrammetrickou aplikaci zvlášť, ovšem tento způsob bude časově náročnější. Jak vychází hodnoty v případě, je-li z nich spočítán průměr, můžeme vidět v tabulce 4.

Tabulka 4: Výsledky kalibrovaných objektivů po vypočtení průměru z výsledných hodnot (autor: M. Šimíček, 2014).

objektiv	f	x _p	y _p	K1	K2	K3
	[mm]	[mm]	[mm]			
20 mm	20,703	-0,05865	-0,06211	2,24*10 ⁻⁴	-2,95*10 ⁻⁷	-4,38*10 ⁻¹⁰
40 mm	41,172	-0,089	-0,007	7,51*10 ⁻⁵	-1,35*10 ⁻⁷	3,94*10 ⁻¹⁰

5.1.2 Výsledky letecké kalibrace

Při snímkování kalibračního pole bylo pořízeno celkem 32 snímků. Některé snímky byly vyříděny, jelikož nebyly vhodné pro proces kalibrace a mohly by její výsledky zkreslit. Co se týče celkové RMS chyby leteckých kalibrací, byly hodnoty programu iWitness i PhotoScan téměř shodné a opět menší, než hraničních 0,5 pixel. Výsledky letecké kalibrace jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Výsledky letecké kalibrace objektivu 20mm provedených v programech iWitness a PhotoScan (autor: M. Šimíček, 2014).

program	f	x _p	y _p	K1	K2	K3	uznaných snímků	RMS error
	[mm]	[mm]	[mm]					
iW	20,432	-0,110	-0,311	2,370*10 ⁻⁴	-3,517*10 ⁻⁷	-6,449*10 ⁻¹⁰	15	0,32
PhSc	20,530	0,057	0,291	-9,250*10 ⁻²	-6,090*10 ⁻²	-3,160*10 ⁻²	15	0,325

V případě programu PhotoScan jsou brány za výsledné hodnoty kalibrace parametry v záložce Adjusted, tzn. přepočítané hodnoty. To proto, že původní hodnoty (Initial) nastavené programem jsou jen orientační. Při porovnání výsledků letecké kalibrace

s hodnotami kalibrace pozemní lze pozorovat odlišnosti v závislosti na použitém programu.

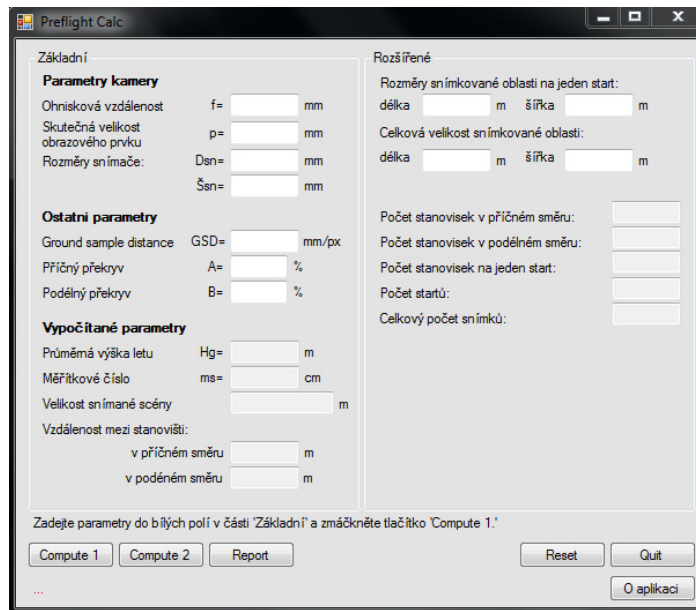
V případě konstanty komory se výsledky obou programů podobají těm z předešlé kalibrace. V případě ostatních hodnot, tzn. koeficienty radiální distorze a offset hlavního snímkového bodu, však tato shoda končí. iWitness se v těchto hodnotách s předešlými kalibracemi opět shoduje. Výstupní hodnoty zbylých parametrů kalibrace v programu PhotoScan se ale výrazně liší. S největší pravděpodobností mohou být tyto rozdíly způsobeny například odlišnými kalibračními algoritmy.

Z výsledků, jak letecké, tak pozemní kalibrace, je vidět, že i při použití různých kalibračních polí a programů vycházejí zjišťované prvky vnitřní orientace obdobně, opět s rozdílem desetin až setin. Výsledné hodnoty letecké kalibrace z programu iWitness by bylo možné zahrnout do celkového vypočteného průměru pro objektiv 20mm (viz. tabulka 4), aniž by byly výsledky nějak výrazně změněny. Výjimkou však zůstávají kalibrované hodnoty programu PhotoScan. Kvůli velkým rozdílům by nebylo vhodné zahrnovat je do celkového průměru, jelikož by jej mohly výrazně ovlivnit.

Všechny provedené kalibrace mají svá specifika a většina z nich vychází obdobně. Ve finále záleží tedy na uživateli, pro jaký druh kalibrace se rozhodne. V případě více provedených kalibrací s obdobnými výsledky je možné uvažovat o kompromisu a zvolit za vhodnou statistickou metodu zmíněný průměr a dále používat pro zpracování průměrné hodnoty. Ačkoliv se kalibrace programu PhotoScan liší od ostatních, neznamená to, že by tento rozdíl neměl svůj účel a při použití těchto hodnot v následujících procesech v daném programu nepřinášel možné výhody.

5.2 Vyhodnocení optimalizace předletové přípravy

Jak již bylo zmíněno výše, optimalizace předletové přípravy byla vyřešena jednoduchou aplikací, která byla pojmenována jako PreflightCalc. Ta je založena na znalosti základních parametrů použité neměřické (měřické) komory a rozlišení a překrytu snímků. Z těchto údajů byly vypočteny podle rovnic pro plánování snímkového letu potřebné parametry. Na obrázku č. 22 můžeme vidět základní uspořádání vytvořené aplikace.



Obrázek 22: Finální podoba vytvořené aplikace pro výpočet parametrů snímkování (autor: M. Šimíček, 2014).

Levá strana aplikace pojmenovaná jako "Základní" je rozdělená na tři dílčí části: *Parametry kamery*, *Ostatní parametry* a *Vypočtené parametry*. Do první jmenované části se zadávají parametry komory, která bude použita při snímkování. Mezi tyto údaje patří ohnisková vzdálenost f , skutečná velikost obrazového prvku p a rozměry snímače použitého v komoře, označené jako D_{sn} (délka snímače) a \check{S}_{sn} (šířka snímače). Všechny tyto hodnoty jsou udávány v milimetrech a lze je zjistit z technické dokumentace fotoaparátu. Pokud je použita komora s výměnnými objektivy, záleží velikost ohniskové vzdálenosti na použitém objektivu. Hodnotu ohniskové vzdálenosti lze taktéž zjistit z výstupu kalibračního procesu, jelikož se jedná o jeden z hlavních testovaných parametrů kalibrace.

V části *Ostatní parametry* jsou zadávány hodnoty prostorového rozlišení snímku, tzv. *GSD* (viz výše). Tato hodnota je vyjádřena v milimetrech na jeden obrazový prvek (např. 20mm/px). Dalšími parametry v této části jsou požadovaný příčný (A) a podélný (B) překryv. V běžných fotogrammetrických aplikacích se uvádí hodnoty překrytu od 60% pro podélný a 40% pro příčný. V případě, že výstupem snímkování má být dvojice stereoskopických snímků, je udáván podélný překryv kolem 80%.

V těchto dvou částech jsou zadávány hodnoty uživatelem a v aplikaci jsou tyto hodnoty psány do bílých polí. V poslední části *Vypočítané parametry* jsou již pouze počítány základní údaje pro snímkování. Po zmáčknutí tlačítka "Compute 1" se do šedých polí vypíší výsledky parametrů:

- průměrná výška letu (H_g),
- měřítkové číslo (m_s),
- velikost snímané scény zachycené na jednom snímku,
- délka základny v příčném směru,

- délka základny v podélném směru.

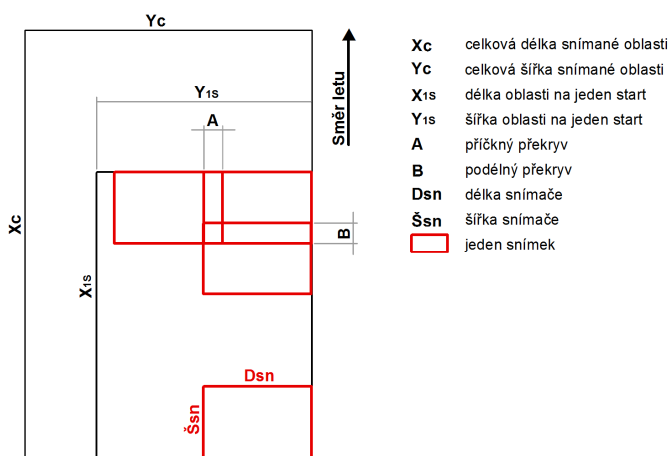
Pravá strana aplikace je nazvána jako "Rozšířené" a dává přehled o celkovém procesu snímkování určité oblasti. Jelikož jsou současné bezpilotní prostředky z větší části poháněny elektromotory, jejichž zdrojem je baterie, jsou tyto nosiče omezeny kapacitou baterie. S tím souvisí to, že s modelem nemusíme snímkovanou oblast pokrýt na jeden start.

Prvním parametrem je "Rozměry snímkové oblasti na jeden start". Tímto parametrem je udávána plocha, kterou jsme schopni nasnímat na jeden start, neboli také jedno nabití baterie. Dalším udávaným parametrem je "Celková velikost snímkové oblasti." Na základě těchto dvou parametrů, a hodnot vypočtených v "Základní" části, lze získat následující parametry:

- počet stanic v příčném směru,
- počet stanic v podélném směru,
- počet stanic na jeden start,
- počet startů,
- celkový počet snímků.

Aplikace při výpočtu stanic v příčném a podélném směru zaokrouhlí vypočtené hodnoty na nejbližší vyšší celé číslo, např. 1,15 na 2,0. Toto zaokrouhlení je zde ze dvou důvodů. Prvním je, že v případě desetinného čísla nelze vyjádřit přesný počet stanic. A druhým důvodem je, že kdyby byl výsledek zaokrouhlen k nižšímu číslu, nebyla by zcela pokryta snímková oblast. V případě zaokrouhlení nahoru zachytíme na snímcích větší plochu oblasti, kterou lze ve zpracovatelském software ořezat dle potřeby.

Při zadávání rozměrů je potřeba si uvědomit, jak zadávané rozměry oblastí a snímače nastavit. Například v některých případech bude vyžadováno snímkování na šířku ve směru letu, v jiných zase na výšku. Základní koncept zadávání hodnot, týkající se rozměrů oblastí, atd. je vidět na obrázku níže.



Obrázek 23: Základní nastavení orientace snímku vůči snímkové oblasti (autor: M. Šimíček, 2014).

Základní orientace snímku vůči snímkové oblasti je na šířku ve směru letu. V případě, kdy je vyžadována orientace snímku na výšku ve směru letu (snímkování), stačí při zadávání parametrů týkajících se rozměrů snímače (Dsn a Šsn) prohodit hodnoty, hodnotu šířky snímače dosadit do kolonky pro délku snímače a naopak. Také se může stát, že snímková oblast bude nasnímana pouze na jeden start. Tím pádem budou "Rozměry snímkové oblasti na jeden start" totožné s "Celkovou velikostí snímkové oblasti."

Veškeré zadané a vypočítané hodnoty lze uložit do textového souboru. Tato možnost je nastavena tak, že při stisknutí tlačítka "Report" se tento výpis otevře v poznámkovém bloku. Zde si může uživatel uložit report kdekoliv do adresáře. Po výpočtech jsou pole s parametry editovatelná a uživatel nemusí pro nový výpočet zadávat opět všechny parametry.

Aplikace ještě obsahuje tlačítka "Reset". To aplikaci vynuluje a do všech oken parametrů nastaví nulové hodnoty (prázdná pole). Posledním tlačítkem aplikace je "Quit". Jak je již z jeho názvu patrné, slouží k ukončení aplikace.

5.3 Vyhodnocení zpracování metodou Structure from Motion

5.3.1 Optimalizace výpočetních parametrů dílčích procesů zpracování

Jedním z prvních kroků při seznamování se s programem bylo zjištění, že PhotoScan umožňuje nastavit relativně velké množství parametrů. V porovnání s jinými fotogrammetrickými programy, jako je PhotoModeler nebo Erdas LPS, jsou sice parametry obecněji formulovány a programem nabízené možnosti jsou kamuflvány pod jednoduchým členěním, např. Low, Medium a High. Ovšem bez prostudování jednotlivých parametrů a při neuvážené volbě hodnot lze hardware zahltit i na několik hodin.

Optimalizace výpočetních parametrů je silně závislá na použitém hardware, přesněji na jeho výkonu. AgiSoft uvádí za optimální desktop sestavu následující konfiguraci:

- CPU: 3.4 GHz, čtyři jádra
- RAM: 16 GB
- GPU: minimálně GeForce GTX 580 1.5 GB paměti s grafickým akcelerátorem pro podporu OpenCL
- OS: Windows 7 64 bit

Během práce nebyla využívána stolní sestava. Testování programu PhotoScan proběhlo na notebooku s následujícími parametry:

- CPU: 2.3 GHz, čtyři jádra, s funkcí TurboBoost až na 3.3 GHz
- RAM: 6 GB
- GPU: GeForce GT 630M 2 GB paměti s grafickým podporu OpenCL
- OS: Windows 7 64 bit

Jelikož je zpracování v programu značně náročné na operační paměť systému a vzhledem k doporučené velikosti RAM, byl využit flash disk, který zvýšil operační paměť notebooku. Ten prostřednictvím funkce ReadyBoost operačního systému Windows umožnil navýšení operační paměti o 3 GB. I s navýšením operační paměti byla optimalizace limitována její velikostí a při hledání vhodných parametrů byla často programem zhlášena chyba: "Not enough memory". Konečné parametry optimalizace pro použitou hardwarovou sestavu lze vidět v tabulce 6. Ty byly rozděleny do dvou částí v závislosti na druhu výstupu z programu. Za základní výstupy lze považovat 3D model a ortofotosnímek. Proces optimalizace je individuální podle použitého hardware. Výsledné hodnoty v tabulce tudíž nemohou být použity jako univerzální, ale mohou posloužit jako orientační pro sestavy s obdobným výpočetním výkonem.

Tabulka 6: Optimalizované výpočetní parametry dílčích procesů zpracování pro použitou hardwarovou sestavu (autor: M. Šimíček, 2014).

3D model			Ortofotosnímek		
Proces	Parametr	Hodnota	Proces	Parametr	Hodnota
align photos	accuracy	high	align photos	accuracy	high
	pair preselection	generic		pair preselection	generic
	point limit	500000		point limit	750000
dense cloud	quality	medium	dense cloud	quality	high
	depth filtering	moderate		depth filtering	moderate
mesh	surface type	arbitrary	mesh	surface type	high field
	source data	dense cloud		source data	dense cloud
	polygon count	250000		polygon count	2000000
	interpolation	enabled		interpolation	enabled
texture	mapping mode	generic	texture	mapping mode	generic
	blending mode	mosaic		blending mode	mosaic
	texture size	4096x1		texture size	4096x1

5.3.2 Volba optimálního souřadnicového systému

Jak již bylo dříve zmíněno, PhotoScan obsahuje rozsáhlou knihovnu s přibližně 750 souřadnicovými systémy. S-JTSK je v ní zastoupen čtyřikrát a to pod EPSG kódy 4156, 4818, 5228 a 5229. Všechny tyto systémy jsou geografické souřadnicové systémy a jsou charakterizovány zeměpisnou šířkou a délkou udávanými ve stupních. Jelikož jsou body zaměřeny totální stanicí, která body zaměřuje v S-JTSK Křovák s inverzními hodnotami - 500 000 m pro osu X a -1 000 000 m pro osu Y (projekční souřadnicový systém), vzniká zde kolize v nastavení adekvátního souřadnicového systému.

Souřadnicový systém potřebný pro zobrazení námi využívaných souřadnic je S-JTSK Křovák EastNorth, v EPSG soustavě označován kódem 5514. Ten je i hlavním podporovaným souřadnicovým systémem ČÚZK pro prohlížecké služby resortu a pro výdej souborů vektorových a rastrových dat. EPSG 5514 je také znám pod označením 102067 v databázi souřadnicových systémů produktů firmy Esri.

PhotoScan umožňuje v dialogovém okně pro volbu souřadnicových systémů nahrát projekční soubory ze souboru. Prvním pokusem pro řešení této kolize bylo nahrání *.prj souboru odpovídajícího souřadnicového systému z programu ArcMap. Tato možnost však nedopadla úspěšně, jelikož program nedokázal přečíst projekční soubor z ArcMapu.

Druhou možností byl pokus o definici vlastního projekčního souboru. Za tímto účelem byla kontaktována podpora firmy AgiSoft s dotazem na vytvoření *.prj souboru pro PhotoScan a možností nahrání systému 5514 do knihovny se souřadnicovými systémy. Odpověď na problematiku tvorby *.prj souboru nebyla poskytnuta a byl jsem odkázán na zatím nabízené souřadnicové systémy. Jedinou zmínkou bylo jen to, že vývojáři programu pracují na zařazení dalších souřadnicových systémů (včetně EPSG 5514).

Problém nekompatibility souřadnicových systémů byl vyřešen následovně. Byl zvolen místní souřadnicový systém "Local coordinates" a GCP bodům byly přiřazeny hodnoty v požadovaném souřadnicovém systému (-500 000 pro osu X a -1 000 000 pro osu Y). S těmito hodnotami byl vyexportován i výsledný ortofotosnímek. Souřadnicový systém ortofotosnímku byl přiřazen až pomocí programu ArcMap a funkce "Define Projection".

5.3.3 Porovnání přesností výstupů

Porovnání přesnosti proběhlo pomocí souřadnic bodů zaměřených totální stanicí a vygenerovaných ortofotosnímků a DEM. Během identifikace markerů byly úmyslně vynechány čtyři body, které posloužily jako referenční body pro porovnání přesnosti. Ortofotosnímky DEM byly nahrány do programu ArcMap, kde byly zjištěny souřadnice čtyř zvolených bodů 6, 16, 22 a 23. Prostřednictvím ortofota byly zjištěny horizontální souřadnice bodů a z DEM byly zjištěny souřadnice osy Z. Charakteristikou pro přesnost výstupů byla výběrová střední chyba m , která je získána z malého počtu měření. V práci je přesnost výstupů hodnocena na základě středních chyb souřadnic m_x , m_y , m_z a střední souřadnicové chyby m_{xy} referenčních bodů. Výpočet těchto chyb vychází z následujících rovnic:

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - x_i)^2}{n}} \quad (18)$$

kde:

X... je skutečná hodnota měřené veličiny,

x_i ... naměřená hodnota veličiny,

n... počet měření.

$$m_{x,y} = \sqrt{\frac{m_x^2 + m_y^2}{2}} \quad (19)$$

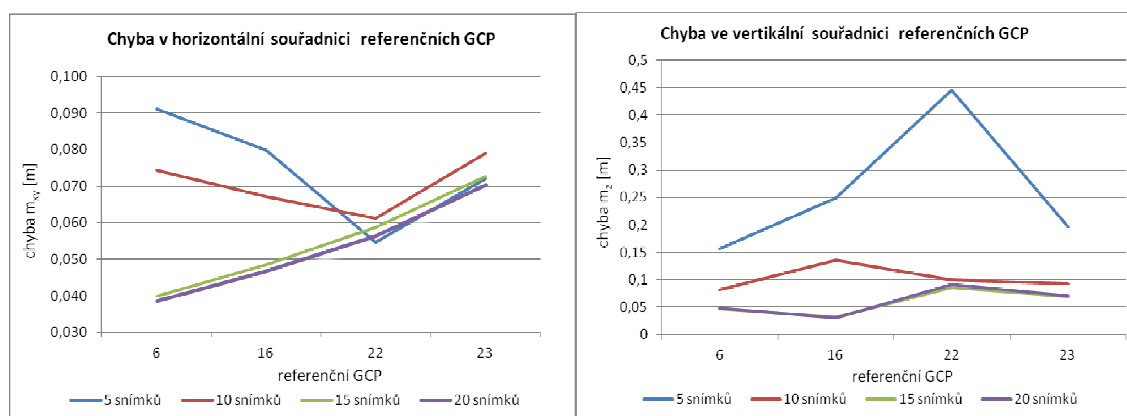
Výběrová (střední) chyba souřadnic osy Y a Z byla vypočítána analogicky podle vzorce (8), ovšem s dosazením příslušných hodnot. Vzorec (8) počítá koncentraci kolem skutečné hodnoty, tedy čím menší hodnota střední chyby, tím vyšší přesnost určení polohy (Minařík, 2013).

Porovnání přesnosti výstupů v závislosti na počtu snímků

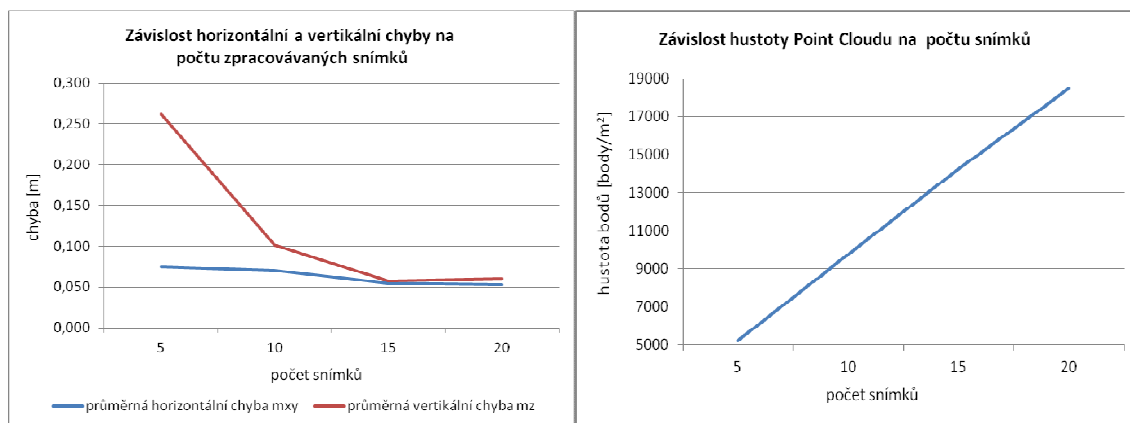
Pro ověření, zda má počet snímků vliv na přesnost výstupů z programu, byly vytvořeny čtyři modely. Jejich výpočet byl založen na různém množství vstupních snímků. Souhrnné výsledky pro referenční body lze vidět v tabulce 7. Podrobná tabulka i se skutečnými a odečtenými souřadnicemi se nachází v příloze.

Tabulka 7: Výsledky chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na počtu snímků (autor: M. Šimíček, 2014).

	bod	chyba souřadnic [m]				počet tie-points	průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
		m_x	m_y	m_z	m_{xy}			
model 5 snímků	6	0,113	0,062	0,156	0,091	50734	0,074	0,262
	16	0,088	0,071	0,249	0,080			
	22	0,033	0,070	0,446	0,055			
	23	0,048	0,090	0,196	0,072			
model 10 snímků	6	0,082	0,066	0,081	0,074	103790	0,070	0,102
	16	0,064	0,070	0,135	0,067			
	22	0,045	0,074	0,099	0,061			
	23	0,059	0,095	0,092	0,079			
model 15 snímků	6	0,054	0,016	0,047	0,040	168254	0,055	0,058
	16	0,051	0,046	0,031	0,049			
	22	0,048	0,068	0,085	0,059			
	23	0,058	0,085	0,069	0,073			
model 20 snímků	6	0,053	0,013	0,048	0,039	227690	0,053	0,060
	16	0,051	0,042	0,030	0,047			
	22	0,046	0,065	0,091	0,056			
	23	0,058	0,081	0,071	0,070			



Obrázek 24: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů s rostoucím počtem snímků (autor: M. Šimíček, 2014).



Obrázek 2: Závislost: vlevo chyby souřadnic na počtu snímků, vpravo hustoty bodů v Point Cloudu a počtu snímků (autor: M. Šimíček, 2014).

Jak je patrné z tabulky a z grafů, počet snímků má výrazný vliv na přesnost výstupů z programu. S větším počtem snímků dochází k zpřesňování horizontální chyby souřadnic. Velmi výrazný vliv má pak počet snímků na souřadnici Z, reprezentující výšku jednotlivých bodů. V tomto případě lze pozorovat, že průměrné hodnoty vertikální souřadnice zaznamenaly v případě modelu z pěti a dvaceti snímků rozdíl až 20 centimetrů. Také je možno pozorovat, že čím větší počet snímků vstupuje do výpočtu modelu, tím je i větší počet vázacích bodů (tzv. tie-points) na snímcích. S tím souvisí i vznik hustšího Point Cloudu a kvalitnější reprezentace povrchu modelu.

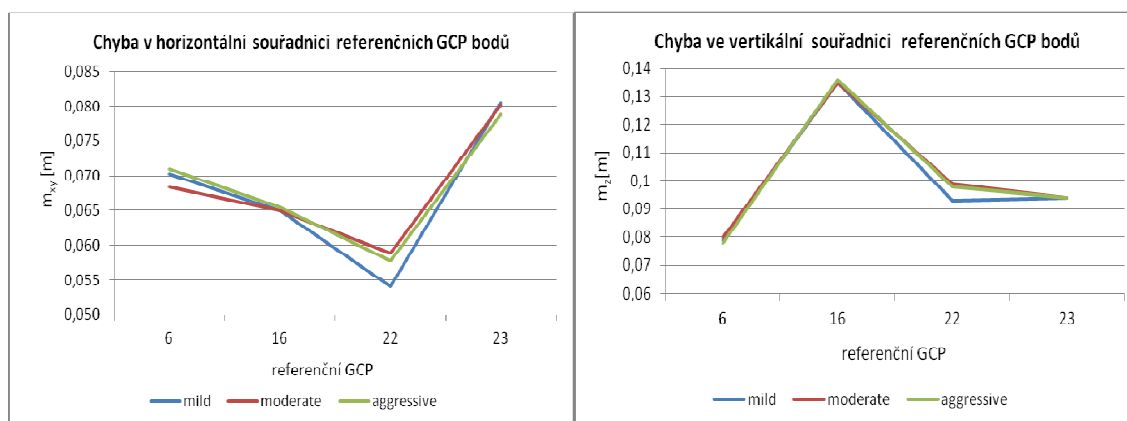
Porovnání přesnosti výstupů při použití různých filtrů hloubky obrazu

Během vytváření mračna bodů ("Build Dense Cloud") je jedním z volitelných parametrů "Depth Filtering", neboli volba filtru ostrosti hloubky obrazu. Program nabízí tři možnosti a každá má své specifické určení. Byly vytvořeny tři modely (resp. ortofota a DEM) za použití různého filtru.

Hodnoty v tabulce 8 reprezentují chyby souřadnic jednotlivých referenčních GCP na výstupech za použití různých filtrů. Lze pozorovat, že hodnoty se vůči sobě nijak výrazně neliší. Tohoto trendu si lze všimnout i na grafickém znázornění střední chyby souřadnic. Volba filtru tudíž nemá na přesnost výstupu vliv. Jediným výrazným vlivem různých filtrů je hustota mračna bodů, kdy rozptyl filtrů se pohybuje okolo 20 bodů na metr čtvereční. To se může výrazně projevit na celkovém počtu bodů v "Dense Cloudu" v rámci celé snímané oblasti.

Tabulka 8: Výsledky chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na použitém filtru ostrosti hloubky obrazu (autor: M. Šimíček, 2014).

	bod	chyba souřadnic [m]				tie-points	point density
		m_x	m_y	m_z	m_{xy}		[points/m ²]
mild	6	0,080	0,059	0,079	0,070	103790	3384,06
	16	0,064	0,066	0,135	0,065		
	22	0,042	0,064	0,093	0,054		
	23	0,058	0,098	0,094	0,081		
moderate	6	0,079	0,056	0,080	0,068	103790	3377,69
	16	0,064	0,066	0,135	0,065		
	22	0,045	0,070	0,099	0,059		
	23	0,057	0,098	0,094	0,080		
aggressive	6	0,082	0,058	0,078	0,071	103790	3399,04
	16	0,067	0,064	0,136	0,066		
	22	0,042	0,070	0,098	0,058		
	23	0,060	0,094	0,094	0,079		



Obrázek 26: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů podle použitého "Depth filer" (autor: M. Šimíček, 2014).

Bylo také provedeno subjektivní porovnání výstupů v závislosti na použitém filtru. Výsledné ortofotosnímky a modely v samotném programu byly poskytnuty několika subjektům k bližšímu prozkoumání. Ty hodnotily vizuální dojem výstupů. Ani jeden ze subjektů nebyl schopen posoudit, zda je ten či onen výstup vizuálně lepší, resp. kvalitnější. Z toho lze usoudit, že ani po stránce vizuálního vnímání není patrný rozdíl mezi jednotlivými nabízenými filtry hloubky ostrosti obrazu.



Obrázek 27: Výřezy z ortofotosnímků s různými "Depth filtry" pro posouzení subjektivního vjemu kvality výstupu (autor: M. Šimíček, 2014).

Porovnání přesnosti výstupů vytvořených vcelku nebo po částech

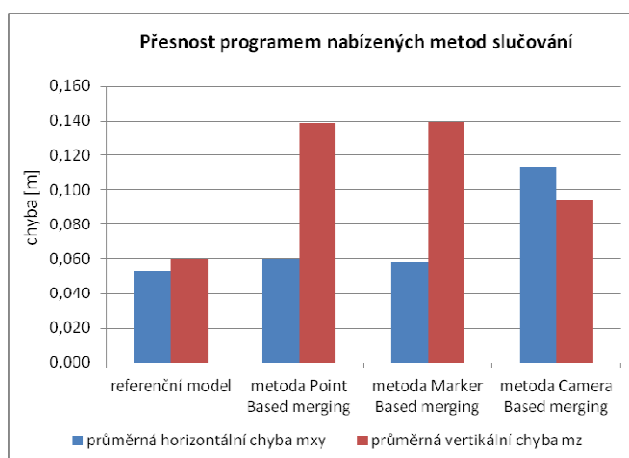
Přesnost výstupů, vytvořených pomocí spojování menších dílů (tzv. "chunks"), byla porovnávána na základě čtveřice modelů. První, referenční, byl model vytvořen z 20 snímků najednou (20 snímků v chunku). V podstatě se jednalo o stejný model použitý při měření přesnosti v závislosti na počtu snímků, který dosahoval nejvyšší přesnosti. Zbýlé tři byly modely, skládající se ze stejných snímků, ovšem rozdělených do dvou dílčích modelů po deseti snímcích (dva chunky po deseti snímcích), které byly následně spojovány (lépe řečeno vyrovnány) pomocí tří metod. Ty jsou: spojení dílčích modelů na základě podobnosti snímků, na základě markerů (GCP) a na základě pozice kamer.

V tabulce lze vidět, že každá metoda má v konečném stavu svá specifika. Při pohledu na výsledky je potřeba zvážit, za jakým účelem bude výstup z programu vytvářen a následně zvolit metodu spojení. Bude-li prioritním výstupem ortofotosnímek, bude vhodnější využít ke spojení jednotlivých částí metody "Marker based" či "Point based", jelikož jejich chyba horizontálních souřadnic je velmi blízká chybě referenčního modelu. Ovšem bude-li hlavním výstupem výškový model mapované oblasti, jeví se jako optimálnější volba metoda "Camera based". Otázkou zůstává, zda by metoda pomocí pozice kamer byla přesnější, kdyby byl fotoaparát vybaven zařízením zaznamenávajícím polohu kamery v době pořízení snímku.

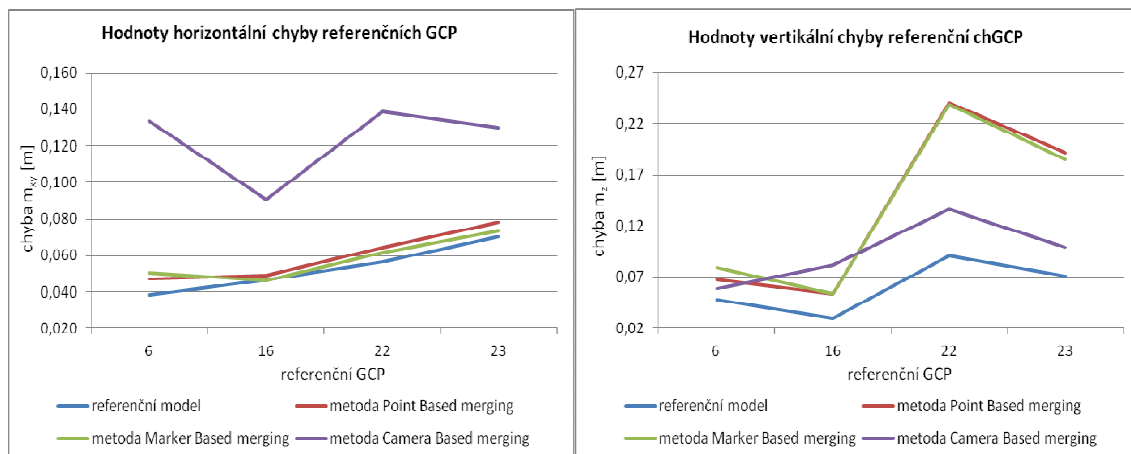
Je nutné podotknout, že celý proces "Align/Merge chunks" má jednu relativně velkou nevýhodu. Při využití této možnosti by uživatel předpokládal, že po realizaci tohoto procesu bude výsledek již kompletní bez jakýchkoliv větších úprav a zásahů. Po spojení dílčích modelů nevznikne ucelený model, nýbrž "Dense cloud", založený na sloučení bodů z dílčích chunků. Je tudíž potřeba provést opět procesy "Build Mesh" a "Build Texture". Tím se nabízí otázka, zda není jednodušší vytvořit ucelený model z celé sady snímků a počítat s delší dobou zpracování, než v podstatě provádět celý proces na třikrát pomocí "Align/Merge chunks".

Tabulka 9: Výsledky středních chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na metodě spojení dílčích modelů (autor: M. Šimíček, 2014).

	bod	chyba souřadnic [m]				průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
		m_x	m_y	m_z	m_{xy}		
model 20 snímků (referenční)	6	0,053	0,013	0,048	0,039	0,053	0,060
	16	0,051	0,042	0,030	0,047		
	22	0,046	0,065	0,091	0,056		
	23	0,058	0,081	0,071	0,070		
point based	6	0,065	0,016	0,068	0,047	0,060	0,138
	16	0,068	0,014	0,054	0,049		
	22	0,075	0,051	0,240	0,064		
	23	0,085	0,071	0,192	0,078		
marker based	6	0,068	0,022	0,079	0,051	0,058	0,139
	16	0,064	0,014	0,054	0,046		
	22	0,074	0,046	0,239	0,062		
	23	0,081	0,065	0,185	0,073		
camera based	6	0,027	0,187	0,059	0,134	0,113	0,094
	16	0,067	0,025	0,082	0,051		
	22	0,195	0,023	0,136	0,139		
	23	0,168	0,075	0,099	0,130		



Obrázek 28: Grafické porovnání přesností "align" metod procesu "Merge chunks" (autor: M. Šimíček, 2014).

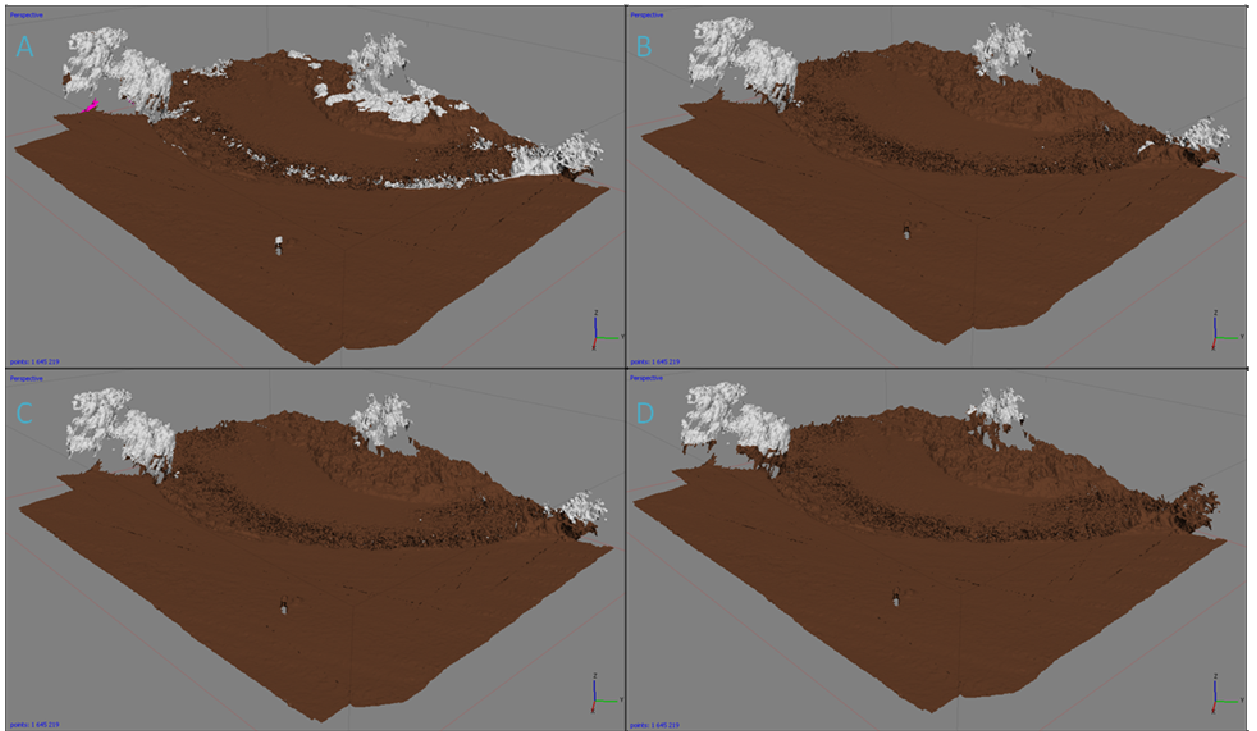


Obrázek 3: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů podle použitých "align" metod procesu "Merge chunks" (autor: M. Šimíček, 2014).

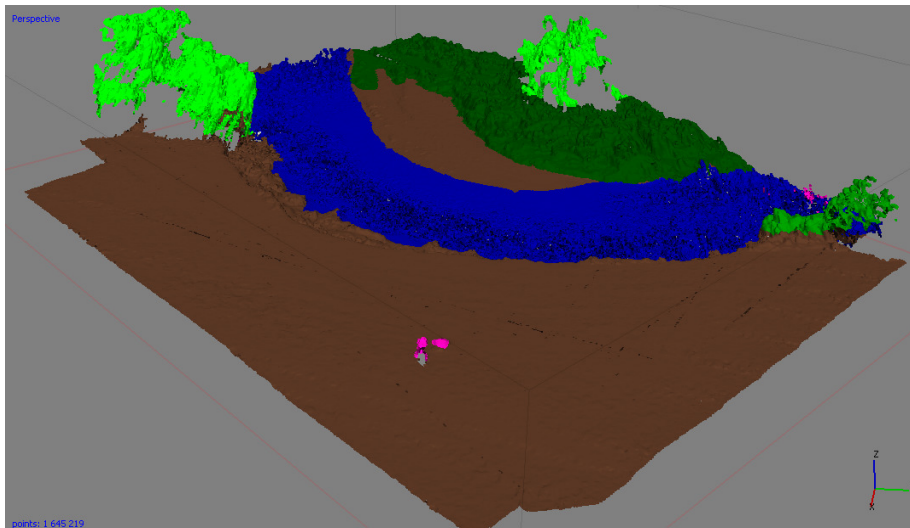
Hodnocení procesu klasifikace

Hodnocení automatických klasifikačních nástrojů proběhlo zcela subjektivně, prostřednictvím vizuálního působení na uživatele. Při zadávání různých parametrů automatické klasifikace ("Max angle", "Max distance" a "Cellsize") se projevovaly nepatrné změny. Největší změny byly zaznamenány při změně parametru "Max distance", kdy s jeho rostoucí hodnotou roste i výšková úroveň klasifikované třídy "ground". Také závisí na prioritách uživatele a modelované oblasti, jakým způsobem budou hodnoty zvoleny. V případě automatické klasifikace by to nemuselo být vnímáno jako výraznější problém, jelikož její účel je pouze rozčlenit klasifikované mračno bodů do dvou skupin, a to do "Groud" a "never classified".

Ideálním řešením, jak klasifikovat mračno bodů, je kombinace nabízených metod automatické a manuální klasifikace. Pomocí automatické klasifikace budou body začleněny do nejrozsáhlejší skupiny "Ground". Nezatříděný zbytek bude pak pomocí manuální klasifikace zařazen dle úsudku uživatele. Jak vypadá model klasifikovaný pomocí obou metod, je vidět na obrázku 31.



Obrázek 30: Model klasifikovaný procesem automatické klasifikace při nastavení různých parametrů: A) Max angle: 10°, Max distance: 1 m, Cellsize: 5 m; B) Max angle: 20°, Max distance: 2 m, Cellsize: 10 m; C) Max angle: 30°, Max distance: 2 m, Cellsize: 15 m; D) Max angle: 40°, Max distance: 4 m, Cellsize: 20 m (autor: M. Šimíček, 2014).



Obrázek 31: Model klasifikovaný pomocí metody automatické i manuální klasifikace. Parametry automatické klasifikace: Max angle: 20°, Max distance: 2 m, Cellsize: 10 m (autor: M. Šimíček, 2014).

6 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Kalibrační proces je jeden z důležitých kroků konceptu nasazení UAV ve fotogrammetrii. Jak tvrdí Miřijovský (2013) kalibrace kamery má podstatný vliv na celkovou přesnost výstupu. Během práce bylo vytvořeno několik kalibrací. Tím je myšleno, že byly provedeny za použití různého software a různými metodami. Jelikož je práce zaměřená na zpracování fotogrammetrických snímků pomocí metody Structure from Motion v programu PhotoScan, je v rámci případové studie řešena situace, kdy do zpracovatelského programu dosadíme hodnoty, které vzešly z vybraných kalibrací.

Pro tuto studii byly vybrány čtyři kalibrace. Jsou to ty, které byly provedeny pro objektiv 20 mm pomocí kalibračního pole MultiSheet a to jak ze země, tak ze vzduchu. První je kalibrace letecká, zpracovaná v programu PhotoScan. Druhá vybraná kalibrace je taktéž letecká, ovšem zpracovaná v programu iWitness. Třetí je kalibrace provedená ze země a zpracovaná v programu iWitness a poslední vybranou kalibrací je opět pozemní zpracovaná programem PhotoModeler.

Cílem případové studie je prozkoumat vliv různé kalibrace na přesnost výstupu při zpracování snímků v programu PhotoScan a možnost kombinace tohoto programu s jinými programy, určenými například pro kalibraci komor. Zároveň jsou na případové studii aplikovány teoretické poznatky z předchozích částí práce. Jako data posloužily snímky pořízené během procesu letecké kalibrace. Při tvorbě ortofotosnímků, porovnávaných v této části, byly použity parametry, vyhodnocené jako optimální pro tvorbu ortofota za použití specifikované hardwarové konfigurace (viz. kapitola 5.3.1). Počet snímků pro zpracování studie byl dán počtem snímků, použitých v kalibraci, tzn. 15.

6.1 Zpracování případové studie

Jak již bylo zmíněno výše, program PhotoScan umožňuje vlastní kalibraci na základě zpracování snímků nebo do něj lze zadat hodnoty kalibrace provedené předem, například v jiném programu. Také umožňuje buď zadané hodnoty kalibrace upřesnit v průběhu procesu Align anebo je považovat za pevné pomocí nastavení "Fix calibration".

Prvním krokem bylo zjistit a porovnat, jak moc se zadané kalibrační hodnoty změní v případě, že je necháme programem přepočítat na Adjusted. Dosazovány byly přepočítané hodnoty ohniskové vzdálenosti, offsetu hlavního snímkového bodu a koeficienty radiální distorze. Možnost "Fix calibration" tedy nebyla použita. Po zadání hodnot bylo spuštěno vyrovnání snímků Align. Po dokončení byly zaznamenány pozměněné hodnoty.

V druhém kroku byl zjišťován vliv různých hodnot kalibrací na přesnost výstupů. K tomu již byla využita možnost "Fix calibration". Následně byl proveden celý proces vytváření výstupu tak, jak byl popsán v kapitole 4.3. Při určování souřadnic bodů byly souřadnice přiřazeny osmi bodům z patnácti. Zbýlých sedm bylo bez souřadnic a nevstupovaly do výpočtu. Tyto body posloužily k porovnání jednotlivých výstupů.

Ve finále vznikly čtyři ortofotosnímky a čtyři DEM, pomocí nichž byla porovnána přesnost. Charakteristikou pro porovnání přesnosti byla opět střední chyba souřadnic.

6.2 Vyhodnocení případové studie

Při zpracování první části studie, tzn. změna hodnot jednotlivých kalibrací po dosazení do programu PhotoScan a přepočítání, bylo zjištěno, že i přes rozdílnost výstupních hodnot dílčích kalibrací, přepočítává program tyto hodnoty na hodnoty sobě blízké. Jakým způsobem se hodnoty změnilly lze vidět v tabulce 10.

Zajímavé je, že přepočítané výsledky (Adjusted) se sobě velice podobají. Nezávisí na tom, zda jsou počáteční Initial hodnoty brány orientačně z EXIF souborů snímků nebo jsou dosazeny jako počáteční hodnoty výsledky kalibrací, které lze prohlásit za více než jen orientační. S těmito výsledky tudíž nemá smysl porovnávat přesnost, jelikož analýza přesnosti by vycházela obdobně ve všech čtyřech případech. Za tímto celkovým výsledkem s největší pravděpodobností nelze vidět nic jiného, než různé kalibrační algoritmy použitých programů. To ovšem nemůže být přesně posouzeno, jelikož mechanismy algoritmů použitých v jednotlivých programech si ponechávají výrobci programů pro sebe.

Tabulka 10: Změna kalibračních hodnot při jejich dosazení do zpracovatelského programu PhotoScan (autor: M. Šimíček, 2014).

	kalibrace	hodnoty	f	x _p	y _p	K1	K2	K3
			[mm]	[mm]	[mm]			
letecká kalibrace	PhotoScan	auto	19,721	0,1594	0,1064	0,000	0,000	0,000
		adjusted	20,531	0,0561	0,2883	-8,831*10 ⁻²	3,345*10 ⁻²	8,123*20 ⁻²
	iW letecká	precalibrated	20,432	-0,1100	-0,3110	2,370*10 ⁻⁴	-3,517*10 ⁻⁷	-6,449*10 ⁻¹⁰
		adjusted	20,530	0,0566	0,2889	-8,820*10 ⁻²	3,296*10 ⁻²	8,196*10 ⁻²
pozemní kalibrace	iW 20	precalibrated	20,569	-0,1100	-0,1240	2,096*10 ⁻⁴	-8,687*10 ⁻⁸	-9,295*10 ⁻¹⁰
		adjusted	20,530	0,0564	0,2891	-8,829*10 ⁻²	3,371*10 ⁻²	8,012*10 ⁻²
	PM 20	precalibrated	20,825	0,0005	0,0006	-2,286*10 ⁻⁴	-4,058*10 ⁻⁷	0,000
		adjusted	20,531	0,0569	0,2888	-8,825*10 ⁻²	3,314*10 ⁻²	8,168*10 ⁻²

V druhém případě, kdy byly dosazeny hodnoty jednotlivých kalibrací, které byly považovány za pevné ("Fix calibration"), bylo zjištěno, že výstupy zpracované s kalibračními hodnotami z jiných programů dosahují nižší přesnosti (viz. tabulka 11, podrobná tabulka v příloze). Ty se pohybovaly v průměru okolo pěti centimetrů v horizontálním směru, což není nijak špatný výsledek, když vezmeme v úvahu, že běžná odchylka pro blízkou fotogrammetrii je udávána až do deseti centimetrů. Avšak při pohledu na střední chybu souřadnic výsledků, zpracovaných s kalibračními hodnotami programu PhotoScan, je vidět, že střední chyba souřadnic dosahuje v průměru jednoho centimetru, jak v případě směru horizontálního, tak i vertikálního. To je celku markantní rozdíl.

Zároveň tedy vyplývá, že při zpracování snímků v programu PhotoScan se nevyplácí kalibrovat kameru zvlášť v jiném kalibračním software, jelikož automatická kalibrace tohoto programu přináší oproti ostatním znatelné rozdíly v přesnosti. Samozřejmě to platí i opačně. Díky specifickým výsledkům kalibračního procesu PhotoScanu se lze domnívat, že při použití těchto hodnot v jiném zpracovatelském programu by výsledky v porovnání dosahovaly naopak hodnot horších. V případě, že se uživatel rozhodne použít pro zpracování předem kalibrovaných hodnot, bude lepší, když je zadá jako počáteční a nechá je při zpracování programem PhotoScan přepočítat.

Tabulka 11: Průměrná chyba souřadnic výstupů s různými kalibračními hodnotami (autor: M. Šimíček, 2014).

	použitý program	průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
letecká kalibrace	PhotoScan	0,0094	0,0074
	iWitness	0,0570	0,0295
pozemní kalibrace	iWitness	0,0566	0,0242
	PhotoModeler	0,0460	0,0245

7 DISKUZE

Předkládaná diplomová práce Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie řeší téma využití poměrně mladé metody pro zpracování fotogrammetrických snímků pořízených z bezpilotních prostředků. S tím také souvisí znalost parametrů používané kamery pro další zpracování snímků. Ta je řešena stále omílanou problematikou kalibrace běžně dostupných neprofesionálních, tzv. neměřických kamer. Důležitým aspektem ovšem zůstává kvalita pořízených snímků, na nichž je závislý celý postup zpracování výstupů. To znamená, že je potřeba takových snímků, aby na nich bylo možné rozeznat jednotlivé objekty zachycené ve scéně. Tudíž je potřeba předem definovat parametry snímků a přizpůsobit jim snímkový let. Z toho vyplývá, že je i potřeba mít aplikace, či programu počítající parametry snímkového letu.

V oblasti kalibrace byly zjišťovány nové metody, které mohly být otestovány. Jedinou inovací v této oblasti jsou kalibrační algoritmy určené pro program MATLAB v laboratorních podmínkách. Pro neměřické kamery je stále nejnadhnější a nejdostupnější metodou klasická kalibrace pomocí testovacího pole. V rámci práce byly realizovány dva druhy kalibrace. Prvním byla kalibrace pozemní, kdy byla nasnímána dvě nejčastěji používaná pole dodávaná k programu PhotoModeler. Zpracování bylo provedeno programem PhotoModeler a iWitness. Jak je zmíněno výše, při porovnání soudobých výsledků s výsledky z bakalářské práce (Šimíček, 2012) vykazují výsledky obdobné tendence, jako je určitá semknutost hodnot ohniskové vzdálenosti a offsetu hlavního snímkového bodu v závislosti na použitém programu.

Do jisté míry novým, alespoň na půdě katedry Geoinformatiky, byl druhý způsob kalibrace, a to kalibrace letecká za pomoci bezpilotního prostředku. Kalibraci předcházela výpočet parametrů pomocí aplikace pro předletovou přípravu, z které byly vyhodnoceny parametry pro nasnímání kalibračního pole MultiSheet. Zpracování proběhlo v programu iWitness a přineslo v podstatě očekávané výsledky. Druhým programem, který provedl kalibraci snímků pořízených ze vzduchu, byl PhotoScan. Výsledky oproti předchozím kalibracím vycházely poněkud odlišně, ale tím není řečeno, že by byly špatné. Jak se ukázalo v případové studii, ony rozdílné hodnoty přinesly při zpracování v tomto programu výhodu v podobě přesnějších výstupů.

Při porovnání dílčích výsledků kalibrací v rámci jednotlivých programů lze říci, že odchylky jsou způsobeny převážně nestabilitou optických členů objektivů. V případě srovnání výsledků z různých programů se k této nestabilitě může přidat i použití různých kalibračních algoritmů v programech. Jedinou komplikací v průběhu kalibrací, byla nevhodná volba kalibračního pole pro leteckou kalibraci. Jelikož se jedná o pole určené pro pozemní kalibraci, rozpoznání kódovaných terčů z tak velké výšky bylo problematické až nemožné. Naštěstí však dílčí částí tohoto pole (listy formátu A4) tvořily na výsledných snímcích body, pro jejichž vyhodnocení posloužil pomyslný střed a použité programy mohly tyto snímky vyhodnotit bez větších obtíží. V případě budoucí

letecké kalibrace by bylo vhodné použít pole s dostatečně velkými terči, které by byly z letové výšky UAV prostředku detekovatelné.

Za účelem optimalizace předletové přípravy byla vytvořena aplikace, která uvádí proces stanovení parametrů pro snímkový let do poloautomatického režimu. K tomu byl využit programovací jazyk Visual Basic. Ten byl vybrán pro svou jednoduchost a snadnou tvorbu grafického rozhraní aplikace. Pomocí něj jsou v aplikaci implementovány základní fotogrammetrické rovnice pro výpočet parametrů snímkového letu. Bylo provedeno několik kontrolních výpočtů, zda výsledné parametry vychází správně. Při ověření vyšly výsledky vždy shodné, čímž bylo dokázáno, že rovnice jsou aplikovány bezchybně.

Nejrozsáhlejší částí bylo zpracování snímků pořízených z bezpilotního prostředku pomocí metody Structure from Motion, k tomu slouží program PhotoScan, který během zpracování splnil stanovená očekávání. Naskytly se ale i problémy s nastavením vhodného souřadnicového systému, které byly vyřešeny volbou lokálního souřadnicového systému. I přes to program vytvořil kvalitní výsledky v různých konfiguracích, které byly otestovány z hlediska přesnosti a kvality. Program díky metodě SfM umožňuje zpracovat velké množství snímků najednou a jednoduše s relativně minimální zásahem uživatele, který nemusí být nutně odborníkem. Čímž při porovnání s programem Erdas LPS, kde musí uživatel definovat velké množství parametrů a vyžaduje větší znalost problematiky, proces znatelně ulehčuje. Na jednu stranu je to kladná, ale více méně marketingová vlastnost, jelikož výrobce předpokládá využití programu nejen odborníky. Ovšem na stranu druhou, profesionální komunita mu tuto možnost minimálních zásahů do výpočetních procesů může vytýkat.

Na příkladu případové studie byla testována jistá kompatibilita tohoto programu s jinými specializovanými programy, například určenými právě pro kalibraci kamer. Za použití kalibrovaných parametrů, které vzešly z programů PhotoModeler a iWitness, byl testován vliv těchto hodnot na výstupy, reprezentované formou ortofotosnímků a DEM. V tomto případě se program PhotoScan ukázal jako určitá nekompatibilní jednotka, která dosahuje lepších výsledků s hodnotami vlastní kalibrace. Ovšem při využití možnosti přepočtu výchozích hodnot se tyto rozdíly ve výsledku eliminují.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit tři části konceptu nasazení bezpilotních prostředků ve fotogrametrii. Těmi byly kalibrace nových objektivů v kombinaci s kamerou Canon EOS 500D, optimalizace předletové přípravy a největší částí bylo zhodnotit vhodnost metody Structure from Motion pro zpracování fotogrammetrických snímků.

Teoretická část práce seznamuje se základními principy a metodami fotogrametrie a vysvětluje problematiku metody Structure from Motion a bezpilotních prostředků. Další část práce se zabývá popisem postupů a řešením problémů kalibrace, stanovení parametrů snímkování a zpracováním snímků.

Cílem kalibračních procesů bylo zjistit parametry potřebné pro další zpracování, ať již v rámci této či jiné práce. I přes více druhů kalibrací, ať ze země nebo ze vzduchu, vycházely výsledky podobně. V rámci toho bylo zjištěno, že hodnoty vykazují obdobné tendence v závislosti na použitém kalibračním programu. To se ukázalo i při porovnání hodnot z dřívějších kalibrací.

Optimalizace procesu předletové přípravy do poloautomatického režimu byla vyřešena tvorbou aplikace. Primárně je zaměřena pro výpočty při použití bezpilotních prostředků (ošetřeno varováním o hraniční výšce pro UAV). To však neznamená, že by aplikace, založená na základních fotogrammetrických rovnicích pro výpočty parametrů snímkového letu, nebyla vhodná pro klasické konvenční nosiče. Právě naopak, autor by uvítal, kdyby byla aplikace otestována i na tomto případě.

Největší část je věnována vyhodnocení programu PhotoScan, který aplikuje principy metody Structure from Motion, pro použití při zpracování leteckých snímků. Jedná se o velice zajímavý produkt, který je schopen vygenerovat výsledky, které posouvají běžné meze fotogrametrie do nižších hodnot, pohybujících se i v hodnotách pod jeden centimetr. I když je zpracovatelský proces méně náročný na odborné znalosti uživatele a možnost zásahu uživatele do výpočtů, umožňuje program zpracovat velké množství snímků s velkou výslednou přesností. Tento program nabízí opravdu široké možnosti využití. Software PhotoScan, a prakticky i metoda Structure from Motion, tak dokázaly projevit schopnost jejich využití ve fotogrametrii. Výrobce také bere v úvahu i názory a připomínky uživatelů a snaží se tyto podněty zpracovat a odstranit případné chyby. S tímto přístupem je zvyšován jeho potenciál a je možné od tohoto programu očekávat ještě zajímavé působení na poli fotogrametrie či jiných oborů, které se zabývají rekonstrukcí objektů z 2D záznamu.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Použitá literatuta:

ABER, J.,S., MARZOLFF, I., RIES, J. (2010): *Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications*, Elsevier, first edition, 268 p. ISBN: 978-0-444-53260-2

AGISOFT LLC. *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.1*. Petrohrad, 2013, 62 s.

BÖHM, Jozef. *Fotogrammetrie*, vydavatelství VŠB - TUO, Ostrava 2002.

EOS SYSTEMS Inc. *PhotoModeler 6 User Guide*. Vancouver, 2008, 83 s.

MATHEWS, A., J. a J., L., R. JENSEN. *Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud*. Remote Sensing. 2013, č. 5.

MIŘIJOVSKÝ, Jakub. *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení*. Olomouc, 2013. Disertační práce (Ph.D.). Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*, vydavatelství ČVUT, Praha 2003, 194 s. ISBN 80-01-02649-3

PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*, vydavatelství ČVUT, Praha 2003, 193 s. ISBN 80-01-02762-7

ŘEHÁK, Martin. *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrammetrii*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.

ŠIMÍČEK, Martin. *Neměřické kamery při fotogrammetrickém studiu památkových objektů*. Olomouc, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

EOS SYSTEMS Inc. *PhotoModeler 6 User Guide*. Vancouver, 2008, 83 s.

AGISOFT LLC. *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.1*. Petrohrad, 2013, 62 s.

Elektronické zdroje:

A Short History of Unamnned Aerial Vehicles. *Dragonfly* [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.draganfly.com/news/2009/03/04/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>

Agisoft [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.agisoft.ru/>

EOS SYSTEM. *PhotoModeler: Tutorials* [online]. 2012 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.photomodeler.com/tutorial-vids/online-tutorials.htm>

Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <https://www.cs.cornell.edu/~snave/bundler/>

COLLINS, Robert. Lecture 25: Structure from Motion. In: *Penn State University: Department of Computer Science and Engineering* [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.cse.psu.edu/~rcollins/CSE486/lecture25.pdf>

EPSG Geodetic Parameter Registry [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.epsg-registry.org/>

Fotorádce. *Canon EOS 500D* [online]. 2005 - 2012 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/fotoaparaty/canon-eos-500d-cislo1776>

Lidar Point Classification. *ArcGIS Resource Center: ArcGIS Help 10.1* [online]. 2013 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000005q000000>

Souřadnicové systémy. *Geoportál ČÚZK: přístup k mapovým produktům a službám resortu* [online]. 2010 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z:

[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(hcuwye55xywj3a5505nyhriz\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=sit.trans&text=souradsystemy](http://geoportal.cuzk.cz/(S(hcuwye55xywj3a5505nyhriz))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=sit.trans&text=souradsystemy)

Structure form Motion. *Wikipedia.org* [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion

The UAV [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://theuav.com/>

Time Line of UAVs. *NOVA: Science Programming on Air and Online* [online]. 2002 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/spiesfly/uavs.html>

Voigtlander Color Skopar 20mm Lab Test/Review. *Photozone* [online]. 2010 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: http://www.photozone.de/canon_eos_ff/504-voigtlander20f35eosff

Voigtlander Ultron 40mm Review / Test Report. *Photozone* [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.photozone.de/reviews/263-voigtlander-ultron-40mm-f2-ii-nikon-mount-review--test-report>

What are geographic coordinate systems? *ArcGIS Resource Center: Desktop 10* [online]. 2013 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//003r00000006000000>

What are projected coordinate systems? *ArcGIS Resource Center: Desktop 10* [online]. 2013 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What_are_projected_coordinate_systems/003r0000000p000000/

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Princip centrální projekce.

Obrázek 2: Prvky vnitřní orientace.

Obrázek 3: Znázornění prvků vnější orientace.

Obrázek 4: Základní koncept nasazení UAV systému.

Obrázek 5: Kamera Canon EOS 500D.

Obrázek 6: Použitá kalibrační pole: LargeSheet (vlevo), MultiSheet (vpravo).

Obrázek 7: Model Hexakopter XL před startem.

Obrázek 8: Snímek kalibračního pole se zvýrazněnými středy.

Obrázek 9: Ukázka kódu vytvořené aplikace.

Obrázek 40: Pracovní prostředí programu PhotoScan Pro s vyznačenými prvky programu: 1. Workflow menu; 2. panel Workspace; 3. panel Cround Control; 4. panel Photos.

Obrázek 11: Dialogové okno procesu Align Photos.

Obrázek 12: Dialogové okno procesu Build Dense Cloud.

Obrázek 13: Dialogové okno procesu Build Mesh.

Obrázek 14: Dialogové okno procesu Build Dense Cloud.

Obrázek 15: Různé příklady výstupů z programu PhotoScan: vlevo ortofotosnímek, uprostřed pokrytí a překryv snímků v oblasti, vpravo výškový model mapované oblasti.

Obrázek 16: Dialogové okno volby klasifikovaných tříd vstupujících do procesu Build Mesh.

Obrázek 17: Výsledky ohniskové vzdálenosti kamery s objektivem 20 mm.

Obrázek 18: Offset souřadnic hlavního snímkového bodu kamery s objektivem 20 mm.

Obrázek 19: Hodnoty ohniskové vzdálenosti kamery s objektivem 40 mm.

Obrázek 20: Offset souřadnic hlavního snímkového body kamery s objektivem 40 mm.

Obrázek 21: Průběh radiální distorze testovaných objektivů.

Obrázek 22: Finální podoba vytvořené aplikace pro výpočet parametrů snímkování.

Obrázek 23: Základní nastavení orientace snímku vůči snímkové oblasti.

Obrázek 24: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů s rostoucím počtem snímků.

Obrázek 5: Závislost: vlevo chyby souřadnic na počtu snímků, vpravo hustoty bodů v Point Cloudu a počtu snímků.

Obrázek 26: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů podle použitého "Depth filer".

Obrázek 27: Výřezy z ortofotosnímků s různými "Depth filtry" pro posouzení subjektivního vjemu kvality výstupu.

Obrázek 28: Grafické porovnání přesností "align" metod procesu "Merge chunks".

Obrázek 6: Vývoj horizontální chyby (vlevo) a vertikální chyby souřadnic (vpravo) referenčních bodů podle použitých "align" metod procesu "Merge chunks".

Obrázek 30: Model klasifikovaný procesem automatické klasifikace při nastavení různých parametrů: A) Max angle: 10°, Max distance: 1 m, Cellsize: 5 m; B) Max angle: 20°, Max distance: 2 m, Cellsize: 10 m; C) Max angle: 30°, Max distance: 2 m, Cellsize: 15 m; D) Max angle: 40°, Max distance: 4 m, Cellsize: 20 m.

Obrázek 31: Model klasifikovaný pomocí metody automatické i manuální klasifikace. Parametry automatické klasifikace: Max angle: 20°, Max distance: 2 m, Cellsize: 10 m.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 10: Základní parametry digitální neměřické komory Canon EOS 500D..

Tabulka 11: Výsledky kalibrace kamery EOS 500D s objektivem s konstantou komory 20 mm.

Tabulka 12: Výsledky kalibrace kamery EOS 500D s objektivem s konstantou komory 40 mm.

Tabulka 13: Výsledky kalibrovaných objektivů po vypočtení průměru z výsledných hodnot.

Tabulka 14: Výsledky letecké kalibrace objektivu 20mm provedených v programech iWitness a PhotoScan.

Tabulka 15: Optimalizované výpočetní parametry dílčích procesů zpracování pro použitou hardwarovou sestavu.

Tabulka 16: Výsledky chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na počtu snímku.

Tabulka 17: Výsledky chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na použitém filtru ostrosti hloubky obrazu.

Tabulka 18: Výsledky středních chyb souřadnic referenčních bodů v závislosti na metodě spojení dílčích modelů.

Tabulka 10: Změna kalibračních hodnot při jejich dosazení do zpracovatelského programu PhotoScan.

Tabulka 11: Průměrná chyba souřadnic výstupů s různými kalibračními hodnotami.

SUMMARY

Taking and processing of spatial data based on the principle of aerial photography and photogrammetry is not matter of state-owned organisations, such as military services, or large private companies for a long time. Currently, the boundaries of progress between different technologies has been constantly overcomes. This is related to the development of technologies for data collection acquired from the air. Large piloted aircraft, equipped by special devices for aerial photogrammetry, are being replaced by smaller, less expensive and more accessible means. Technology UAV has gone through rapid expansion in the last few years. Due to combination with non-metric cameras it is possible to use UAVs comparable with conventional carriers. However, data capturing using UAV photogrammetry requires careful preparation and precision planning. This is related to the process of pre-flight preparation, when it is necessary to determine the basic parameters for imaging flight, e.g. average altitude etc. Calibration of devices is required when it is used non-metric cameras. At the end, there is the processing of captured images. Processing using classical photogrammetric methods is in some cases more difficult and time-consuming. Method Structure from Motion was developed for the purpose of faster processing of captured images.

The main goal of diploma thesis is analyse of three important parts of UAV deployment concept in photogrammetry. The first of these parts is calibration of non-metric cameras. This section studied the new calibration methods and their application on the used devices. During the planning of photogrammetry mission it is required to determine parameters for imaging flight. The largest part of thesis is devoted to complex statistical, graphical and written evaluation of new methods of processing of photogrammetric data, captured using by UAVs. On the base of newest knowledges are data processed by program, using Structure from Motion method.

Important innovations were not found in the area of calibration. Due to previous information it has been used proven calibration methods using calibration grid. It has been executed several types of calibrations (from air, from ground etc.). It was reached supposed values and differences between results were caused by instability of optical parts of used lenses and various calibration algorithms in software.

The optimization of preflight preparation has been solved by creation of application, that makes automation of process. The application was created in programming language Visual Basic and includes implementation of basic photogrammetry equations for setting of parameters for imaging flight.

The main part of thesis is interested in processing of data by Structure from Motion. Programm PhotoScan was used for this purpose. Due to SfM method, program allows processing of large set of images at the same time and easily with minimum intervention of user. In case of study compatibility of program with another specialized software has been tested. By using the results of the partial calibrations influence of values on the accuracy the outputs was tested. Outputs were represented by orthophoto images and DEM.

Calibration processes brought results, which show same tendencies like results, drawn during bachelor thesis, two years ago. Application for optimization of preflight preparation has been adjusted during testing by author and thesis supervisor. During the test calculations the application was counting the resulting values without errors. However, usability of this application still has to go through testing in real practice. The main part of the thesis devote to data processing by SfM method in program PhotoScan. It provides really wide scale of usability options. PhotoScan and SfM as well were able to demonstrate the ability of their usage in photogrammetry during the workflow and testing. Producer of program takes into account the views and comments of users and try to incorporate these suggestions and fix possible errors. Potential of PhotoScan program is increased with this approach and it is possible we can expect interesting and important role of this program in the field of photogrammetry or different branches, interested in objects reconstruction from 2D images.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na počtu snímku.
- Příloha 2 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na použitém filtru ostrosti hloubky obrazu.
- Příloha 3 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na metodě spojení dílčích modelů.
- Příloha 4 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic výstupů zpracovaných s různými kalibračními hodnotami (část 1).
- Příloha 5 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic výstupů zpracovaných s různými kalibračními hodnotami (část 2).

Volné přílohy

- Příloha 6 DVD

Popis struktury DVD

Adresáře:

1_Kalibrace - obsahuje kalibrační snímky, projektové soubory, tabulky týkající se kalibrace

2_Predletova_priprava - obsahuje programový kód, aplikaci a složku s projektem aplikace

3_SfM_zpracovani - obsahuje data, tabulky, výstupy a reporty použité v části zpracování metodou SfM

4_Pripad_studie - obsahuje tabulky a výstupy vzniklé v části případové studie

Metadata - obsahuje XML metadatové záznamy informačního systému MICKA

Text_prace - obsahuje text diplomové práce ve formátu .pdf

WEB - obsahuje webové stránky vytvořené v rámci diplomové práce

Příloha 1 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na počtu snímku.

	bod	souřadnice						chyba souřadnic [m]				průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]	point density
		skutečné (GPS/totální stanice)			odečtené (SW)			m_x	m_y	m_z	m_{xy}			points/m ²
		X	X	Z	x	y	z							
model 5 snímků	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,774	-1113435,89	219,960	0,113	0,062	0,156	0,091	0,074	0,262	2102,1
	16	-550211	-1113428,392	218,464	-550210,912	-1113428,463	218,215	0,088	0,071	0,249	0,080			
	22	-550224,1	-1113413,256	217,885	-550224,067	-1113413,326	217,439	0,033	0,070	0,446	0,055			
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,905	-1113416,759	217,755	0,048	0,090	0,196	0,072			
model 10 snímků	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,805	-1113435,894	220,035	0,082	0,066	0,081	0,074	0,070	0,102	3377,69
	16	-550211	-1113428,392	218,464	-550210,936	-1113428,462	218,329	0,064	0,070	0,135	0,067			
	22	-550224,1	-1113413,256	217,885	-550224,055	-1113413,33	217,786	0,045	0,074	0,099	0,061			
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,894	-1113416,764	217,467	0,059	0,095	0,092	0,079			
model 15 snímků	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,833	-1113435,844	220,163	0,054	0,016	0,047	0,040	0,055	0,058	3542,72
	16	-550211	-1113428,392	218,464	-550210,949	-1113428,438	218,433	0,051	0,046	0,031	0,049			
	22	-550224,1	-1113413,256	217,885	-550224,052	-1113413,324	217,800	0,048	0,068	0,085	0,059			
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,895	-1113416,754	217,490	0,058	0,085	0,069	0,073			
model 20 snímků	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,834	-1113435,841	220,164	0,053	0,013	0,048	0,039	0,053	0,060	3759
	16	-550211	-1113428,392	218,464	-550210,949	-1113428,434	218,434	0,051	0,042	0,030	0,047			
	22	-550224,1	-1113413,256	217,885	-550224,054	-1113413,321	217,794	0,046	0,065	0,091	0,056			
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,895	-1113416,75	217,488	0,058	0,081	0,071	0,070			

Příloha 2 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na použitém filtru ostrosti hloubky obrazu.

	bod	souřadnice						chyba souřadnic [m]				tie-points	point density
		skutečné (GPS/totální stanice)			odečtené (SW)			m_x	m_y	m_z	m_{xy}		[points/m ²]
		X	X	Z	x	y	z						
mild	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,807	-1113435,887	220,037	0,08	0,059	0,079	0,070	103790	3384,06
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,936	-1113428,458	218,329	0,064	0,066	0,135	0,065		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,058	-1113413,32	217,792	0,042	0,064	0,093	0,054		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,895	-1113416,767	217,465	0,058	0,098	0,094	0,081		
moderate	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,808	-1113435,884	220,036	0,079	0,056	0,08	0,068	103790	3377,69
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,936	-1113428,458	218,329	0,064	0,066	0,135	0,065		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,055	-1113413,326	217,786	0,045	0,07	0,099	0,059		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,896	-1113416,767	217,465	0,057	0,098	0,094	0,080		
aggressive	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,805	-1113435,886	220,038	0,082	0,058	0,078	0,071	103790	3399,04
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,933	-1113428,456	218,328	0,067	0,064	0,136	0,066		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,058	-1113413,326	217,787	0,042	0,07	0,098	0,058		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,893	-1113416,763	217,465	0,06	0,094	0,094	0,079		

Příloha 3 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic referenčních bodů v závislosti na metodě spojení dílčích modelů.

	bod	souřadnice						chyba souřadnic [m]				průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
		skutečné (GPS/totální stanice)			odečtené (SW)			m_x	m_y	m_z	m_{xy}		
		X	X	Z	x	y	z						
model 20 snímků (referenční)	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,834	-1113435,841	220,164	0,053	0,013	0,048	0,039	0,053	0,06
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,949	-1113428,434	218,434	0,051	0,042	0,03	0,047		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,054	-1113413,321	217,794	0,046	0,065	0,091	0,056		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,895	-1113416,750	217,488	0,058	0,081	0,071	0,070		
point based	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,822	-1113435,812	220,184	0,065	0,016	0,068	0,047	0,060	0,1385
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,932	-1113428,406	218,410	0,068	0,014	0,054	0,049		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,025	-1113413,307	217,645	0,075	0,051	0,24	0,064		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,868	-1113416,740	217,367	0,085	0,071	0,192	0,078		
marker based	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,819	-1113435,806	220,195	0,068	0,022	0,079	0,051	0,058	0,13925
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,936	-1113428,406	218,410	0,064	0,014	0,054	0,046		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,026	-1113413,302	217,646	0,074	0,046	0,239	0,062		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550221,872	-1113416,734	217,374	0,081	0,065	0,185	0,073		
camera based	6	-550205,887	-1113435,828	220,116	-550205,860	-1113436,015	220,175	0,027	0,187	0,059	0,134	0,113	0,094
	16	-550211,000	-1113428,392	218,464	-550210,933	-1113428,417	218,382	0,067	0,025	0,082	0,051		
	22	-550224,100	-1113413,256	217,885	-550224,295	-1113413,279	217,749	0,195	0,023	0,136	0,139		
	23	-550221,953	-1113416,669	217,559	-550222,121	-1113416,744	217,460	0,168	0,075	0,099	0,130		

Příloha 4 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic výstupů zpracovaných s různými kalibračními hodnotami (část 1).

		bod	souřadnice						chyba souřadnic [m]				průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
			skutečné (GPS/totální stanice)			odečtené (SW)			m_x	m_y	m_z	m_{xy}		
			X	X	Z	x	y	z						
letecká kalibrace	PhotoScan	2	4,838	43,230	0,085	4,826	43,217	0,0786	0,012	0,013	0,0064	0,0125	0,0094	0,0074
		4	9,374	26,110	0,084	9,365	26,106	0,0723	0,009	0,004	0,0117	0,0070		
		6	-2,052	13,519	-0,015	-2,056	13,508	-0,0195	0,004	0,011	0,0045	0,0083		
		8	-5,935	30,694	0,036	-5,946	30,695	0,0496	0,011	0,001	0,0136	0,0078		
		10	-9,575	48,005	0,073	-9,562	48,013	0,0633	0,013	0,008	0,0097	0,0108		
		12	-21,800	37,271	-0,073	-21,811	37,268	-0,0723	0,011	0,003	0,0007	0,0081		
		14	-17,124	19,226	0,002	-17,139	19,219	-0,0031	0,015	0,007	0,0051	0,0117		
	iW letecká	2	4,838	43,230	0,085	4,798	43,304	0,0771	0,040	0,074	0,0079	0,0595	0,0570	0,0295
		4	9,374	26,110	0,084	9,428	26,135	0,0399	0,054	0,025	0,0441	0,0421		
		6	-2,052	13,519	-0,015	-2,039	13,422	0,0196	0,013	0,097	0,0346	0,0692		
		8	-5,935	30,694	0,036	-5,930	30,744	0,0377	0,005	0,050	0,0017	0,0355		
		10	-9,575	48,005	0,073	-9,581	48,079	0,0263	0,006	0,074	0,0467	0,0525		
		12	-21,800	37,271	-0,073	-21,861	37,374	-0,0633	0,061	0,103	0,0097	0,0846		
		14	-17,124	19,226	0,002	-17,185	19,177	0,0637	0,061	0,049	0,0617	0,0553		

Příloha 5 Tabulka s výsledky střední chyby souřadnic výstupů zpracovaných s různými kalibračními hodnotami (část 2).

		bod	souřadnice						chyba souřadnic [m]				průměrná m_{xy} [m]	průměrná m_z [m]
			skutečné (GPS/totální stanice)			odečtené (SW)			m_x	m_y	m_z	m_{xy}		
			X	X	Z	x	y	z						
pozemní kalibrace	iW 20mm	2	4,838	43,230	0,085	4,816	43,300	0,0602	0,022	0,070	0,0248	0,0519	0,0566	0,0242
		4	9,374	26,110	0,084	9,414	26,137	0,1053	0,040	0,027	0,0213	0,0341		
		6	-2,052	13,519	-0,015	-2,102	13,409	0,0056	0,050	0,110	0,0206	0,0854		
		8	-5,935	30,694	0,036	-5,928	30,733	0,0412	0,007	0,039	0,0052	0,0280		
		10	-9,575	48,005	0,073	-9,582	48,081	0,0352	0,007	0,076	0,0378	0,0540		
		12	-21,800	37,271	-0,073	-21,865	37,361	-0,0702	0,065	0,090	0,0028	0,0785		
		14	-17,124	19,226	0,002	-17,193	19,167	0,0587	0,069	0,059	0,0567	0,0642		
	PM 20mm	2	4,838	43,230	0,085	4,842	43,286	0,0693	0,004	0,056	0,0157	0,0397	0,0460	0,0245
		4	9,374	26,110	0,084	9,411	26,121	0,1279	0,037	0,011	0,0439	0,0273		
		6	-2,052	13,519	-0,015	-2,083	13,445	0,0017	0,031	0,074	0,0167	0,0567		
		8	-5,935	30,694	0,036	-5,925	30,712	0,0611	0,010	0,018	0,0251	0,0146		
		10	-9,575	48,005	0,073	-9,577	48,068	0,0441	0,002	0,063	0,0289	0,0446		
		12	-21,800	37,271	-0,073	-21,861	37,345	-0,0699	0,061	0,074	0,0031	0,0678		
		14	-17,124	19,226	0,002	-17,199	19,158	0,0401	0,075	0,068	0,0381	0,0716		