

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie a kartografie



Robert MAREK

TVORBA 3D MODELŮ Z DAT UAV

CREATING OF 3D MODELS BY UAV DATA

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Eva Štefanová, Ph.D

Praha, 2018

Zadání bakalářské práce

pro Roberta Marka
obor Geografie a kartografie

Název tématu: Tvorba 3D modelů objektů z dat UAV

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je tvorba 3D modelu objektu z dat UAV. Bude navržena vhodná metodika pro sběr vstupních dat – příprava a realizace letové mise. Z pořízených dat bude vytvořen 3D model objektu ve vybraných programech, porovnána bude i přesnost těchto modelů.

Dílčí cíle jsou následující:

- I. Literární rešerše týkající se používaných programů pro tvorbu 3D modelů z dat UAV.*
- II. Literární rešerše týkající se problematiky pořizování a zpracování dat UAV.*
- III. Navržení vhodné metodiky pro správnou letovou misi.*
- IV. Pořízení dat vybraného objektu pomocí UAV pro tvorbu 3D modelu.*
- V. Tvorba 3D modelu ve vybraných programech.*
- VI. Hodnocení přesnosti výsledných modelů a vzájemné srovnání s programem Photoscan.*

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 30 stran

Seznam odborné literatury:

KRAUS, K. (2007): Photogrammetry: geometry from images and laser scans. Walter de Gruyter, Berlin, 459 p.

LUHMANN, T. et al. (2006): Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. Whittles Publishing, Dunbeath, 510 p.

EISENBEISS, H. (2011): The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. Photogrammetric Week '11, Wichmann/VDE Verlag, Belin & Offenbach, 135–145.

COLOMNIA, I., MOLINA, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 21, 79–97

TICHÝ, T., KARAS, J. (2016): Drony. Computer Press. Brno. ISBN 978-80-251-4874-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Štefanová, Ph.D

Datum zadání bakalářské práce: 9.12.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: prosinec 2018

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....
Vedoucí bakalářské práce

.....
Vedoucí katedry

V Praze dne 09.12.2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 31. července 2018

.....

Robert Marek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí své práce Ing. Evě Štefanové, Ph.D. především za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval Katedře aplikované geoinformatiky a kartografie za zapůjčení geodetických přístrojů. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkému okolí, za podporu nejen při zpracování bakalářské práce, ale po celou dobu studia.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje využití UAV ke sběru dat pro fotogrammetrické účely. Jejím cílem je tvorba 3D modelů z dat použitého UAV. Ty jsou zpracovány na základě analýzy ve vybraných softwarech specifických pro UAV data. Teoretická část obsahuje kromě základních principů UAV fotogrammetrie rešerši vhodné metodiky pro přípravu a realizaci letové mise. Zpracování dat proběhlo v prostředí Pix4D, 3DSurvey a referenčním Photoscanu, využívaným k obecné vizualizaci. V závěrečné části je zhodnocena výsledná přesnost výstupů. Vybrané softwary byly celkem porovnány z 16 různých kritérií, čímž se prokázalo, že nejvýhodnějším softwarem pro zpracování UAV dat je Pix4D. Smyslem práce je tedy poukázat nejen na potenciál běžných UAV prostředků ve vizualizaci prostorových dat, ale i na softwary pro tato data specifické.

Klíčová slova

UAV, UAV fotogrammetrie, 3D model, dron, Agisoft Photoscan, Pix4D, 3DSurvey

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the utilization of UAV for data collection for photogrammetric purposes. Its goal is to create 3D models from the data used by the UAV. These are processed in selected UAV softwares based on analysis. In addition to the basic principles of UAV photogrammetry, the theoretical part includes a search for appropriate methodology for the preparation and implementation of the flight mission. Data processing took place in the Pix4D, 3DSurvey, and the Reference Photoscan used for general visualization. The final part evaluates the resulting accuracy of the outputs. Selected softwares were compared from 16 different criteria, making the Pix4D software the most convenient for processing UAV data. The aim of the thesis is not only to point out the potential of UAV resources in visualization of spatial data, but also the softwares used for this specific data.

Keywords

UAV, UAV photogrammetry, 3D model, drone, Agisoft Photoscan, Pix4D, 3DSurvey

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM PŘÍLOH.....	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VÝZNAMŮ	11
1 ÚVOD.....	12
2 UAV V ČASE A VE SVĚTĚ	14
2.1 Úvod do historie	14
2.2 Dnešní využití.....	15
2.3 Směr vývoje v blízké budoucnosti.....	16
2.4 Legislativa	17
3 UAV FOTOGRAMMETRIE.....	18
3.1 Fotogrammetrie	18
3.2 Historie UAV ve fotogrammetrii	19
3.3 Sběr UAV dat ve fotogrammetrii	20
3.4 Zpracování UAV dat ve fotogrammetrii.....	22
3.4.1 Structure from Motion	22
3.4.2 Aerotriangulace.....	23
3.4.3 Vlíčovací body.....	24
3.5 Software pro sběr a zpracování UAV dat	25
3.5.1 Licence a softwarové požadavky.....	26
3.5.2 Hardwarové požadavky.....	28
3.5.3 Kompatibilita z hlediska vstupů a výstupů	28
3.5.4 Podpora SW.....	29
3.6 Příprava fotogrammetrické mise	30
3.6.1 Kalibrace.....	31
3.6.2 Obrazové rozlišení snímků	32
3.6.3 Překrytí snímků.....	33
3.6.4 Interval snímkování	34

4	FOTOGRAMMETRICKÁ MISE	35
4.1	Objekt modelování	35
4.2	Metodika	36
4.3	Popis použitého UAV	38
4.3.1	Integrovaná kamera	40
4.3.2	Princip letu	40
4.4	Letová mise	41
4.4.1	Snímkování	42
4.4.2	Zaměření vlíčovacích a kontrolních bodů.....	44
4.4.3	Sběr dat	45
5	TVORBA MODELŮ	47
5.1	Zpracování dat v prostředí Photoscan.....	48
5.2	Zpracování dat v prostředí Pix4D	51
5.3	Zpracování dat v prostředí 3Dsurvey	54
5.4	Hodnocení přesnosti	57
5.5	Srovnání vybraných SW	58
6	DISKUZE	61
7	ZÁVĚR	63
	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Nejznámější vojenský dron MQ – 1 Predator	15
Obrázek 2: Analýza využití UAV v blízké budoucnosti	16
Obrázek 3: První snímek ze vzduchu	19
Obrázek 4: Drak s připevněným fotoaparátém	19
Obrázek 5: Metoda využití holubů.....	19
Obrázek 6: Schéma přesnosti měření UAV oproti jiným metodám.	21
Obrázek 7: Funkce BRDF.....	21
Obrázek 8: Zobrazení metody SfM.....	22
Obrázek 9: Základní procesní kroky k vizualizaci UAV dat.....	23
Obrázek 10: Princip aerotriangulace	24
Obrázek 11: Bundle block adjustment.....	24
Obrázek 12: Základní koncept UAV fotogrammetrie podle Miřijovského	30
Obrázek 13: a) manuální režim s plánovaným intervalem b) levnější navigační systém c) kvalitní navigační systém.....	31
Obrázek 14: Zobrazené parametry pro výpočet GSD.....	33
Obrázek 15: Metoda nadir (vlevo).....	33
Obrázek 16: Metoda oblique ve dvou letových hladinách (vpravo)	33
Obrázek 17: Grafické znázornění výpočtu intervalu snímkování.....	34
Obrázek 18: Snímaný objekt	35
Obrázek 19: Omezení vzdušného prostoru pro provoz leteckých prací	36
Obrázek 20: Schéma průběhu přípravy letové mise komerčním dronem	37
Obrázek 21: Popis kvadrokoptéry.....	38
Obrázek 22: Obvod snímacích senzorů	39
Obrázek 23: Základní pohyby letu kvadrokoptéry (vlevo) a pohyb throttle (vpravo)	40
Obrázek 24: Podmínky pro let na daném území podle aplikace UAV Forecast	41
Obrázek 25: Různé intervaly metody oblique, zleva– 20°, 12°, 4°:.....	43
Obrázek 26: Terče použité v terénu – vlíčovací bod (vlevo).....	44
Obrázek 27: Terče použité v terénu – kontrolní bod (vpravo)	44
Obrázek 28: Rozmístění vlíčovacích bodů v zájmovém území z výšky 70 m	44
Obrázek 29: Trajektorie dronu během mise (vlevo)	45
Obrázek 30: Waypointy pořizovaných snímků (vpravo)	45
Obrázek 31: Protokol pořizovaných snímků.....	46
Obrázek 32: 3D výstup skrze mobilní aplikaci Altizur	47

Obrázek 33: 3D výstup z DroneDeploy.....	47
Obrázek 34: Zjednodušené bodové mračno po orientaci snímků.....	48
Obrázek 35: Výběr souřadnicového systému.....	49
Obrázek 36: Identifikace vlíčovacích a kontrolních bodů [Photoscan].....	49
Obrázek 37: Rozmístění vlíčovacích a kontrolních bodů [Photoscan].....	50
Obrázek 38: Výběr kvality bodového mračna.....	50
Obrázek 39: Model z prostředí Photoscan.....	50
Obrázek 40: Výběr souřadnicového systému [Pix4D].....	51
Obrázek 41: Inicializace kamer [Pix4D].....	51
Obrázek 42: Identifikace vlíčovacích a kontrolních bodů [Pix4D].....	52
Obrázek 43: Ruční editace přebytečného (červeného) bodového mračna.....	52
Obrázek 44: Výsledný model bez editace bodového mračna.....	53
Obrázek 45: Model z prostředí Pix4D.....	53
Obrázek 46: Inicializace kamer.....	54
Obrázek 47: Rozmístění vlíčovacích a kontrolních bodů [3DSurvey].....	54
Obrázek 48: Husté bodové mračno.....	55
Obrázek 49: Funkce zvětšení pixelů pro lepší editaci bodového mračna.....	55
Obrázek 50: Nastavení parametrů pro vytvoření DSM.....	56
Obrázek 51: Model z prostředí 3DSurvey.....	56
Obrázek 52: Srovnání bodového mračna z Pix4D a 3Dsurvey s referenčním Photoscanem.....	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Funkce UAV v porovnání s jinými metodami.....	20
Tabulka 2: Popis vlastností jednotlivých aplikací pro nastavení letové mise.....	25
Tabulka 3: Licence a OS SW.....	26
Tabulka 4: HW požadavky.....	28
Tabulka 5: Přehled vstupních a výstupních formátů.....	29
Tabulka 6: Hodnocení kritérií pro podporu SW.....	29
Tabulka 7: Automatická kontrola správné kompatibility dronu s aplikací.....	42
Tabulka 8: Naměřené souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů.....	45
Tabulka 9: Parametry letové mise.....	46
Tabulka 10: Výsledné odchylky souřadnic mezi SW.....	57
Tabulka 11: Míra detailu a chyba projekce v SW.....	58
Tabulka 12: Evaluace využitých SW.....	59

SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha 1: Podmínky pro provoz bezpilotního letadla</i>	I
<i>Příloha 2: Legenda pro provoz UAV ve vzdušných prostorech</i>	I
<i>Příloha 2 Provoz UAV v ATZ třídy E a G (neřízené okrsky letišť)</i>	II
<i>Příloha 3: Provoz UAV v CTR (řízené okrsky letišť)</i>	II
<i>Příloha 5: Výstupy softwarů z přední strany (shora Photoscan, Pix4D, 3DSurvey)</i>	III
<i>Příloha 6: Výstupy softwarů ze zadní strany (shora Photoscan, Pix4D, 3DSurvey)</i>	IV
<i>Příloha 7: Detailní výstup z přední strany (shora Photoscan, Pix4D, 3DSurvey)</i>	V

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VÝZNAMŮ

2D	<i>Dvojdimenzionální</i>
3D	<i>Trojdimenzionální</i>
AAT	<i>Aerotriangulace</i>
BBA	<i>Bundle Block Adjustment</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor – snímač citlivý na světlo</i>
DPZ	<i>Dálkový průzkum Země</i>
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GPS	<i>Global Positional System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
HW	<i>Hardware</i>
IMU	<i>Inertial Measurment Unit</i>
ISO	<i>Citlivost snímku</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group – formát snímku</i>
PVO	<i>Prvky vnitřní orientace</i>
RAW	<i>Nezpracovaný formát snímku</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
S-JTSK	<i>Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální</i>
SW	<i>Software</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
ÚCL	<i>Úřad civilního letectví</i>
WGS 84	<i>World Geodetic Systém</i>

1. ÚVOD

Tvorba trojrozměrných modelů se v dnešní době využívá v mnoha různých odvětvích. Setkáváme se s nimi například v archeologii, stavebnictví, dálkovém průzkumu Země (DPZ), zdravotnictví nebo strojírenství. Prostorová vizualizace slouží především k získávání podrobnějších informací o vlastnostech objektů, ke kterým je nesnadný přístup. Dnes se vizualizace dat a s ní i sběr prostorových dat stále vyvíjí. To může řešit moderní technologie bezpilotních letounů.

V posledních letech se komerční drony staly fenoménem a začínají být nejen běžnou volnočasovou aktivitou, ale i aplikovaným prostředkem na různých pracovištích. Dnes jsou k dispozici drony za přijatelnou cenu na kvalitní úrovni pro běžné uživatele. Disponují vysokou umělou inteligencí, dostatečným výkonem a kvalitními kamerovými systémy.

Spolu s kvalitou letounů roste i objem produkce. Původní rozvoj byl motivován výhradně pro vojenské účely. Bepilotní letouny v současnosti najdeme již v různých specifických odvětvích. Těmi je například průmysl, zemědělství, transportace, monitoring, filmografie nebo průzkum těžko dostupných míst v krajině či na moři (pohyb velryb). Využívají se také ke sběru dat pro vizualizaci terénu, objektů a prostorových dat, a tímto aspektem se bude zabývat předkládaná bakalářská práce.

Práce se zabývá využitím nízkonákladového UAV nosiče v oboru fotogrammetrie. Hlavním cílem bakalářské práce je tvorba 3D modelu objektu z dat UAV. Bude navržena vhodná metodika pro sběr vstupních dat – příprava a realizace letové mise. Z pořízených dat bude vytvořen 3D model objektu ve vybraných programech, porovnána bude i přesnost těchto modelů

- I. *Literární rešerše týkající se používaných programů pro tvorbu 3D modelů z dat UAV.*
- II. *Literární rešerše týkající se problematiky pořizování a zpracování dat UAV.*
- III. *Navržení vhodné metodiky pro letovou misi.*
- IV. *Pořízení dat pomocí UAV vybraného objektu pro tvorbu 3D modelu.*
- V. *Tvorba 3D modelu ve vybraných programech.*
- VI. *Hodnocení přesnosti výsledných modelů a vzájemné srovnání s programem Photoscan.*

Úvod práce představuje odvětví bezpilotních letounů z hlediska stručné historie, jejich využití v různých disciplínách a předpokládaný vývoj v blízké budoucnosti. Nedílnou součástí je legislativa, především předpisy týkající se českého území. Tato kapitola je vhodně nazvaná *UAV v čase a ve světě*.

Kapitola *UAV fotogrammetrie* se zabývá popisem vzájemného prolínání *UAV* s oborem fotogrammetrie a charakterizuje její základní principy. Představena je i stručná historie bezpilotních nosičů v tomto odvětví. Tato část práce uvádí literární rešerši domácích a zahraničních autorů zabývajících se právě *UAV* fotogrammetrií. Zároveň popisuje vlastnosti sběru a zpracování dat z *UAV* a vytváří analýzu nejužívanějších SW na 3D modelaci *UAV* dat z hlediska několika vlastností. Uvedenou kapitolu zakončuje teoretická příprava letové mise pro sběr dat.

V kapitole *Fotogrammetrická mise* je hlavním tématem navržení a realizace vhodné metodiky ke sběru spolehlivých dat. Je zmíněn výběr snímaného objektu i technické parametry použitého dronu. Popsán je podrobný postup přípravy letové mise, až k jejímu samotnému provedení. Kapitola se poté zaměřuje na sběr dat.

Kapitola *Tvorba 3D modelů* je věnována zpracování dat ve všech vybraných softwarech spolu s cloudovými uložišti. Vylíčená je tvorba 3D modelů, jejichž detailnější náhled je poté patrný v přílohách. V závěru této kapitoly jsou zhodnoceny dosažené výsledky, především přesnost modelů. Dále jsou použité softwary porovnány z hlediska několika kritérií.

Diskuze se zamýšlí nad získanými daty a podle dosažených výsledků vyhodnocuje, zda vybrané metody a výsledky odpovídají navržené metodice. Řeší také problematiku tématu.

V *Závěru* jsou shrnuty dosažené výsledky a celkový přínos práce.

2. UAV V ČASE A VE SVĚTĚ

Poprvé se s pojmem *UAV* (z anglického *Unnamed aerial vehicle*) setkáváme na půdě americké vlády ve spojitosti s vývojem vojenských letounů. *UAV* neboli bezpilotní létající prostředek má ve světě několik názvu a akronym. Mimo termín *UAV* je běžně používaným výrazem i *Unnamed aerial system (UAS)*, odkazující na systém bezpilotních letounů. Často se setkáme i s označením *Aerial robot*. Nejobvyklejším je termín *dron* (Colomna, Molina 2014). Tento název vznikl pravděpodobně díky podobnosti zvuku motoru připomínající včelí roj, respektive včelích trubců, kteří se v angličtině nazývají právě *drones* (Etymoline 2018).

Z názvu *UAV* je patrné, že pilot letounu není na palubě. Zařízení je buď ovládáno automaticky nebo dálkově. Definice bezpilotního letadla podle Úřadu civilního letectví (ÚCL) zní: „letadlo určené pro provoz bez pilota na palubě“. Uvedený systém pak ÚCL definuje 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 pro vypuštění a návrat“ (ÚCL 2011). V současnosti se s pojmem *UAV* setkáváme v mnoha vědních oborech, jakými jsou např. počítačové systémy, umělá inteligence, dálkový průzkum Země nebo fotogrammetrie.

2.1 Úvod do historie

Za vůbec první výskyt *UAV* se dá považovat nevydařený pokus rakouské armády v roce 1849, která zaútočila na Benátky pomocí balónů vybavených výbušninami (O'Donnell 2017). Balóny byly tedy patrně nejstaršími vzdušnými vojenskými, ale i pozorovacími bezpilotními prostředky. Během I. světové války se setkáváme se snahou vyřešit koncept bezpilotního letadla. Poprvé se to povedlo vynálezci Archibaldovi Montgomerymu v roce 1916 s letounem *Lowa Aerial Target* neboli *Vzdušný cíl*. V roce 1917 následoval *Hewitt-Sperry Automatic Airplane* (Karas, Tichý 2016).

Dnes je tomu přesně 100 let, kdy se povedlo sestrojít skutečně schopné a funkční bojové bezpilotní letadlo, pojmenované *Kettering Bug*. Jednalo se o experimentální bezpilotní letecké torpédo, které dokázalo zasáhnout cíl až na 64 km od místa vzletu a jeho rychlost dosahovala 80 km/h. Letoun fungoval na bázi počtu otáček vzhledem k cílené vzdálenosti. Po dosažení předpokládaného počtu otáček (při započtení fyzikálního působení větru) se odjistily pojistky, které zadržovaly výbušniny. Tento důmyslný předchůdce dronů nebyl nikdy použit v akci. Vzniklo tak ale nové odvětví, které mělo velký potenciál. Za vznikem letadla *Kettering Bug* stojí vynálezce CH. F. Kettering, spolupracující s O. Wrightem, vynálezcem prvního letadla na světě.

Ve 30. letech 20. století se bezpilotní letouny používaly jako cvičné terče pro britské královské námořnictvo. To v 50. letech testovalo drony k nácvičku střelby a reakcí pilotů. V 60. letech se například ve Vietnamu začaly využívat jako průzkumná letadla. Většího využití nachází tento obor v 90. letech při monitoringu válečných konfliktů.

Nejčastěji byl vývoj zaměřen na bezrizikový průzkum, dlouhé udržení ve vzduchu a pořízení kvalitního obrazu v reálném čase. Změna nastala 11. září 2001 po teroristických útocích v USA. Od té doby se bezpilotní letouny začaly aplikovat v přímém boji.

Na **Obrázku 1** je zobrazen nejznámější vojenský dron užívaný americkou armádou především v bojích proti terorismu. Drony se vyvíjely zásadně v oblasti vojenské. S postupem času, zejména na přelomu milénia, se rozmohly i do civilní sféry a zažívají tak obrovský boom po celém světě.

Obrázek 1: MQ – 1 Predator



Zdroj: <https://tl.upost.info>

2.2 Dnešní využití

„Nechte je létat a samy vytvoří nový trh“ (Colomna, Molina 2014). Dnes se již tato prognóza dá považovat za uskutečněnou. Tendence minimalizovat technologii, volné šíření GPS a technické možnosti, umožnily šíření dronů pro běžné uživatele. I proto se UAV objevují v mnoha vědních oborech, které se jejich možnostmi velmi rychle chopily a díky jejich možnostem dosáhly velkých úspěchů. (Karas, Tichý 2016).

Karas a Tichý (2016) uvádějí, že „letecké mapování v přírodním prostředí, je vzhledem ke kvalitě dat a velikosti snímaného objektu přesnější než z družic“. Se zdokonalováním senzorů se dají předpovídat i situace z oborů zcela odlišných. Například v energetice (tepelné úniky), stavebnictví (skryté poškození staveb), zemědělství (identifikace podpovrchových poruch) nebo ochrana zvěře (kontrola a identifikace druhů). Díky snadné dostupnosti se drony dnes hojně využívají i ve fotogrammetrii k pořízení ortofotomap, 3D map nebo 3D modelů.

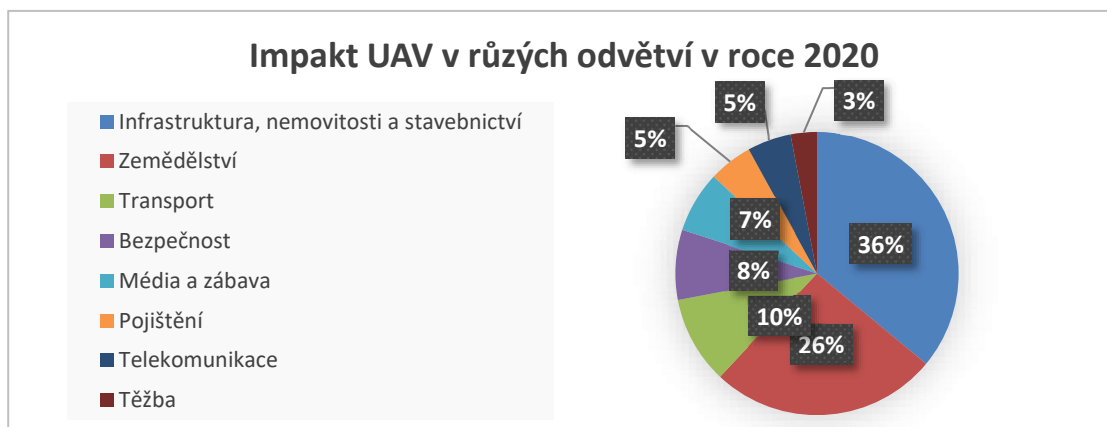
2.3 Směr vývoje UAV v blízké budoucnosti

Jak již bylo výše uvedeno v dnešní době vnímáme využití dronů v mnoha odvětvích. Zprávy o jednotlivých experimentech ukotvují jejich rostoucí pozici na trhu. Díky nabízeným možnostem tedy můžeme v blízké době očekávat stále větší nárůst zájmu o jejich využití.

Analýzou výzkumné firmy *Gartner* bylo prokázáno, že objem trhu s komerčními drony byl v roce 2017 více než 6 mld. USD. V roce 2020 je odhadován vzrůst objemu na 11,2 mld. USD. Každoročně se tedy předpokládá nárůst o 28,5 % (Conner 2017).

Ekonomický portál (pwc.com) zveřejnil analýzu klíčových sektorů využití UAV v roce 2020 s celkovým objemem 127 mld. USD. Výsledky analýzy jsou zobrazeny na **Obrázku 2**. Lze si všimnout, že UAV bude mít největší impakt na sektor *infrastruktury, nemovitostí a stavebnictví*, a to 45 mld. USD. Využití nalezne například i v monitorování infrastruktury, inventury majetku nebo kontroly stavenišť. V druhém nejvýznamnějším odvětví – *zemědělství*, to pak bude dohled nad farmami, jehož výsledkem by měl být nárůst jejich výnosů. Různé společnosti již testují využití UAV v *transportním* a *logistickém* systému například jako nosiče zboží pro zákazníky. Drony lze využít pro transport potravin i lékařského vybavení. Není vyloučena ani přeprava osob. V *bezpečnosti* se cílí na dohled strategických míst jako hranice či přístavy. Svě místo najdou v kriminalistice i při řešení krizových situací. V široké oblasti *médií a zábavy* se UAV využívá nejčastěji k inovaci filmografie. V *pojišťovnictví* umožňuje analyzovat rizika spojená s erozí a geologickými změnami. V *telekomunikační sféře* zlepšuje kontrolu a údržbu zařízení. V *těžbě* pak sběr dat z UAV nalezne využití pro tvorbu 3D mapy či zjišťování rizika (Winder 2016).

Obrázek 2: Analýza využití UAV v blízké budoucnosti



Zdroj: Winder 2016

Drony se tedy stávají běžnou součástí dnešního světa a směr jejich vývoje bude záležet nejen na technických pokrocích či popularitě, ale také na patřičné legislativě. Regulace se zdají být velmi důležitým faktorem pro budoucí vývoj, a proto jsou uvedeny v další části této kapitoly.

2.4 Legislativa

S velkým nekontrolovatelným nástupem tohoto odvětví se vyvíjí i nezbytné zákony na jeho regulaci. Snadná dostupnost na trhu umožňuje užití dronů i amatérům, kteří neznají základní pravidla letového provozu. Vzhledem k nedávnému vzniku tohoto odvětví se legislativa v mnoha zemích liší (například maximální letová výška v ČR je 300 m, zatímco v USA je to 500 m).

Mezinárodním orgánem pro letový dozor je *International civil aviation organization* (ICAO). V USA tento úřad zastává *Federal aviation administration* (FAA) a v ČR se jedná o Úřad civilního letectví. Evropská agentura pro bezpečnost letectví připravuje jednotný unifikovaný zákon pro členské státy EU, obsahující povinnou registraci, bezpečnostní výbavu či odpovědnost za škody (EASA 2018).

Úřad pro civilní letectví má na starosti civilní letecké předpisy, jejichž hlavním cílem je především zajištění bezpečnosti. Základním právním předpisem je zákon Ministerstva dopravy Zákon o civilním letectví 49/1997 Sb., letecký předpis L2. Opatřením pro bezpilotní systémy je tzv. Doplněk X, platný od roku 2012. Zaměřuje se na opatření ve směru bezpečnosti, zodpovědnosti, vizuálního kontaktu nebo nutném ukončení letu v případě rizika nehody. Tento doplněk určuje legislativu pro provoz letounů podle hmotnosti a účelu nebo vzdušného prostoru. Doplněk se dělí na třídu G (do 300 m nad zemí) a třídu E (nad 300 m nad zemí). Další oblasti jsou pak rozděleny podle řízených letišť (CTR) a neřízených letišť (ATZ). Podmínky a rozlišení provozu podle vzdušného prostoru je patrné z **Přílohy 1, 2, 3 a 4**.

Zakázanou oblastí je hustě osídlený prostor tzv. HOP. K němu se dron nemůže přiblížit na úroveň jeho dopadové zóny. Ta je definována jako pomyslný kruh, jehož poloměr je roven 1:1 výšce při vertikálním letu a 1:2 při horizontálním letu (ÚCL 2011). Dalšími rizikovými zónami jsou vodní zdroje a jejich okolí, trasy telekomunikačních sítí a trasy nadzemních sítí inženýrských. Jedná se především o chráněné objekty a objekty důležité pro obranu státu (Karas, Tichý 2016). V neposlední řadě musí uživatel UAV také respektovat Zákon č. 101/2000 Sb. o ochranně osobních údajů.

3. UAV FOTOGRAMMETRIE

Termín *UAV fotogrammetrie* byl zaveden roku 2008, kdy jej Eisenbeiss (2009) popsal jako „nový fotogrammetrický měřicí nástroj, který otevírá nové možnosti aplikace v oblasti blízkého stanoviska, kombinující leteckou a pozemní fotogrammetrii“. V našich krajích se tomuto oboru nevěnuje velké množství autorů. Za zmínku stojí publikace *Drony* od autorů Karas a Tichý (2016). Tato práce se ale zaměřuje spíše na technický rozbor bezpilotních nosičů, než na sběr a zpracování dat. Velmi kvalitní údaje poskytli v diplomové práci Srnský (2017), Řehák (2012) a Šimíček (2014). Častým odkazovaným dílem je pak rozsáhlá disertační práce Miřijovského (2013) - *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení*, který se věnuje komplexnímu využití *UAV* ve fotogrammetrii.

Zahraniční literatura nabízí prameny bohatší. Významné je Krausovo (2007) dílo *Photogrammetry: Geometry from images and Laser scans*, které je ale zaměřeno pouze na klasickou leteckou fotogrammetrii. Naopak Aber, Marzolf a Ries (2010) se v publikaci *Small-Format Aerial Photography Principles, techniques and geoscience applications* věnují menším leteckým nosičům. Stěžejním zdrojem *UAV* fotogrammetrie je disertační práce od Eisenbeisse (2009) *UAV Photogrammetry*. Mezi významné odborníky na využití *UAV* ve fotogrammetrii patří Fabio Remondino, který na toto téma prezentuje spoustu studií. Dále je nutné připomenout i mnoho zahraničních odborných článků, především od společnosti *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. Některé z těchto studií jsou zmiňovány v dalších částech textu.

3.1 Fotogrammetrie

Pojem fotogrammetrie byl poprvé použit v roce 1867. Je odvozen z řeckých slov *fotos* – světlo, *gramma* – písmo a *metron* – měřit. Znamená tedy měření na záznamu pořízeném pomocí světla (Staněk 2013). Kemp (2008) definuje fotogrammetrii jako „aplikovanou vědní disciplínu, která pomocí fotografických snímků získává trojrozměrnou informaci o zemském povrchu nebo o vybraném objektu“. Jedná se o bezkontaktní metodu měření. Pavelka (2003) fotogrammetrii dělí podle *polohy stanoviska, počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků, technologického způsobu zpracování* a dodatečně i *typu výstupu*.

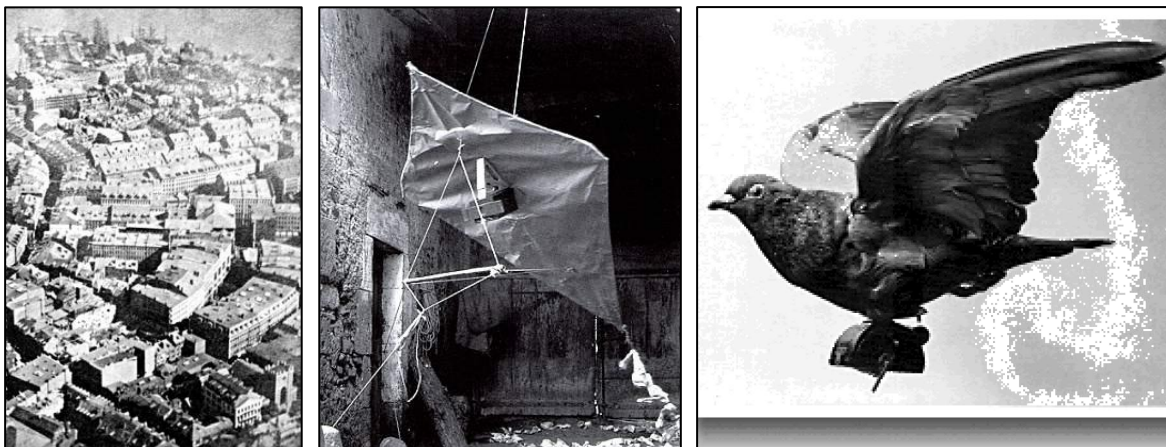
Za posledních 50 let se díky rozvoji počítačů změnila koncepce fotogrammetrie. Postupně se přecházelo z *analogových* metod k *analytickým* a následně k principům *digitálním*, které ovlivnily technologii nejvýznamněji. Spolu se vznikem družicové fotogrammetrie a laserového skenování mění digitální metody práci s 3D tvorbou objektů a prostoru (Kemp 2008).

Fotogrammetrie se dělí podle polohy stanoviště na *družicovou, leteckou, blízkou, pozemní, makrofotogrammetrii* a nejnovější metodu *UAV fotogrammetrie* (Luhman 2006). Dále se fotogrammetrie dělí podle počtu vyhodnocovaných snímků na *jednosnímkovou* nebo *vícesnímkovou*. Prostorové zpracování 3D modelu vychází z vícesnímkové fotogrammetrie. Tu můžeme dělit na *průřezovou fotogrammetrii* a *stereofotogrammetrii*.

3.2 Historie UAV ve fotogrammetrii

Přestože je obor *UAV* fotogrammetrie poměrně mladý, jeho počátky můžeme najít v Bostonu v druhé polovině 19. století. Snímek města pochází z fotoaparátu umístěného na horkovzdušném balónu z roku 1858 (**Obrázek 3**). To je považováno za začátek DPZ z létajících prostředků bez pilota přímo na palubě (Newhall 1982). Na přelomu 19. st. se setkáváme s dalšími pokusy o letecké fotografie. Využito bylo například i draků s připevněnými fotoaparáty – metoda *Kite Aerial Photography*. (**Obrázek 4**). Další možností bylo využití holubů v roce 1903 inženýrem Neubronnerem s periodickým snímáním připevněného fotoaparátu (**Obrázek 5**) (*Brief History of Aerial Photography 2005*).

Obrázek 3, 4, 5: Snímek Bostonu (vlevo), *Kite Aerial Photography* (uprostřed), využití holubů (vpravo)



Zdroj: Brief History of Aerial Photography (2005)

Samozřejmě, ne všechny způsoby byly úspěšné. Za zmínku méně spolehlivých pokusů stojí instalace kamery na raketu vystřelenou do vzduchu. První historická fotografie z letadla, které pilotoval W. Wrightem byla pořízena v roce 1906 L. P. Bonvillianem ve francouzském Le Mans. V období obou světových válek došlo k mohutnému rozvoji i mimo vojenskou oblast. První využití *UAV* pro mapování s archeologickým zaměřením uskutečnil v roce 1967 Whittlesley. Použil balón, který nosil fotogrammetrickou kameru. Většina experimentálních metod ale neprodukovala spolehlivá vědecká data. To se změnilo až s vývojem letecké technologie.

3.3 Sběr UAV dat ve fotogrammetrii

Metoda UAV fotogrammetrie je kombinací blízké a letecké fotogrammetrie. V **Tabulce 1** jsou tyto tři metody porovnány z hlediska velikosti pokrytého území, sběru dat, počtu snímků atd. Je zde patrné výhodné využití UAV fotogrammetrie v malých, středních i velkých oblastech. Výhodou je i velká míra detailu a vysoká přesnost.

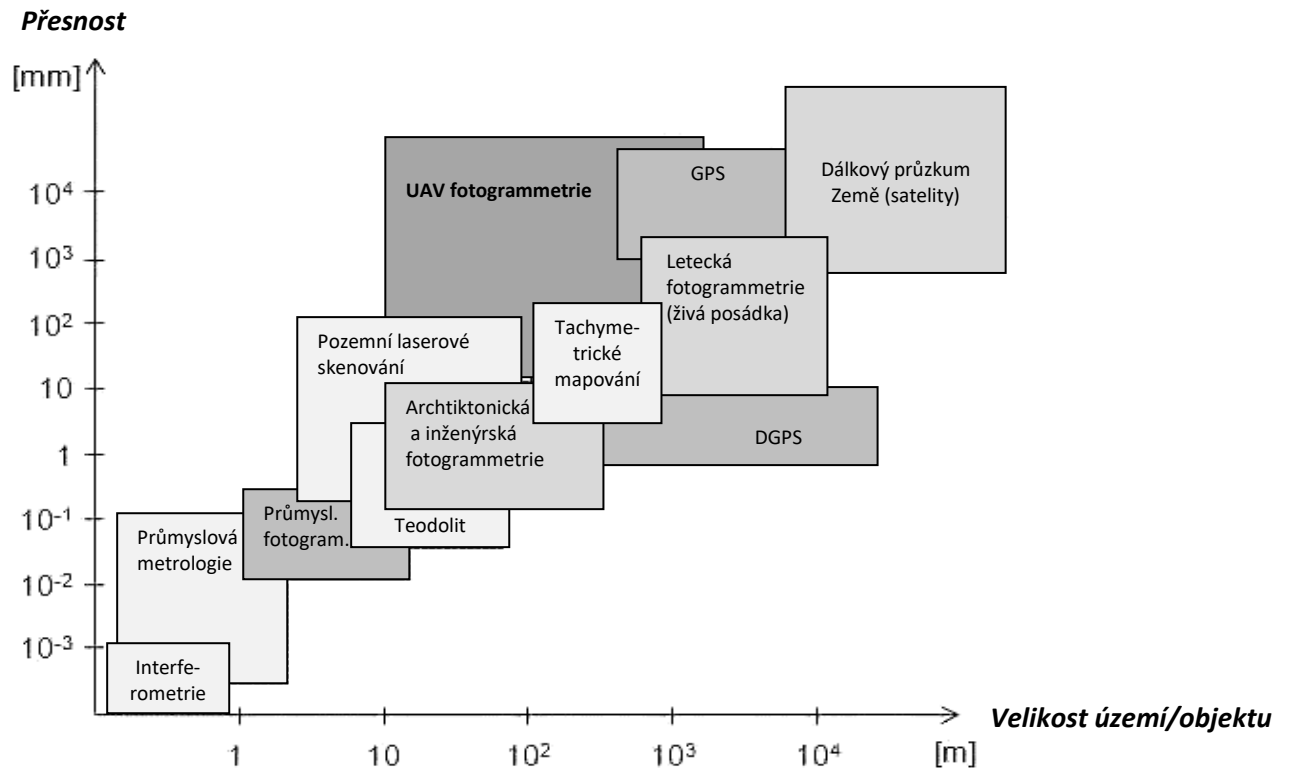
Tabulka 1: Funkce UAV v porovnání s jinými metodami

	letecká	blízka	UAV
plánování	poloautomatické	ruční	automatické, ruční
sběr dat	asistovaný, manuální	autonomní, asistovaný, manuální	autonomní, asistovaný, manuální
rozsah území	km ²	mm ² – m ²	m ² – km ²
míra detailu	cm – m	mm – dm	mm – m
orientace	klasická	klasická / oblique	klasická / oblique
přesnost	cm – dm	mm – m	cm – 10 m
počet snímků	10–1000	1–500	1–1000

Zdroj: Eisenbeiss (2009)

Často zmiňované faktory, které charakterizují metodu UAV jsou: *bezkontaktní a přesná metoda měření, umělá inteligence, krátká doba sběru dat, operabilita dat a dostupnost*. V porovnání s běžnou leteckou fotogrammetrií zmiňuje Eisenbeiss (2009) právě výhodu bezkontaktního měření: „UAV lze aplikovat v rizikových situacích bez ohrožení lidského života, v nepřístupných oblastech, v nízké nadmořské výšce a blízko objektu.“ Výhody UAV zmiňují například i autoři Murtiyoso, Grussenmeyer a Freville (2017) ve výzkumu *Close range UAV accurate recording and modeling od St-Pierre-le-Jeune neo-romanesque church in Strasbourg (France)*. V tomto zkoumání byly ke sběru dat pro rekonstrukci 3D modelu využity dva komerční drony. Došli k závěru, že tato metoda je potenciálním nástrojem k tvorbě 3D modelů, především díky schopnosti měřit vzdálenost objektu od kamery. Uvedená funkce je velmi užitečná pro udržení konstantní míry detailu GSD, která je popsána v kapitole 3.6.2. **Obrázek 6** zobrazuje kategorizace různých měřících metod ve vztahu velikosti měřeného objektu/území k požadované přesnosti měření. Eisenbeiss (2009) toto schéma převzal od Luhmana a kol. (2006), a doplnil jej o kategorii UAV fotogrammetrie. V této třídě je kombinace všech bezpilotních letounů.

Obrázek 6: Schéma přesnosti měření UAV proti jiným metodám



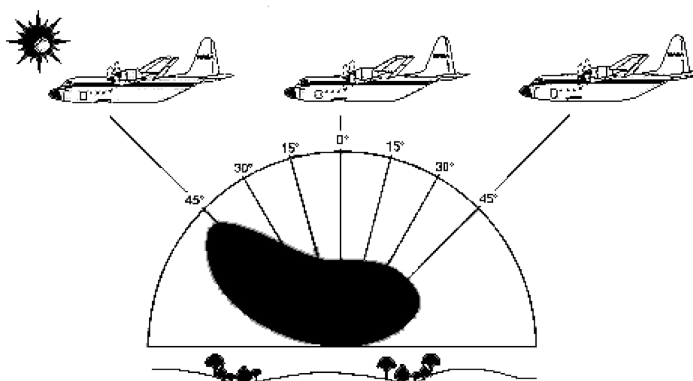
Zdroj: Eisenbeiss (2009)

Naopak nevýhodou UAV fotogrammetrie může být dosah radiovysílače, překážky v letu, hustý vegetační kryt, zástavba, citlivost na meteorologické podmínky, nosnost nebo doba letu.

Autor Höhle (2008), zabývající se piktometrií¹, klade důraz na poziční systém, databázi a softwarové vybavení. Popisuje také důležitost metody *oblique* pro dosažení požadovaného modelu. Tato metoda je vylíčena v kapitole 3.6.3.

Důležitý je i vliv odrazivosti slunečního záření, které je označováno jako funkce BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Tato funkce popisuje odrazivost záření v závislosti na úhlu snímkování a pozice slunce (Aber, Marzloff, Ries 2010). Z **Obrázku 7** je patrné, že největší odrazivost je při směru letu přímo zpět ke slunci.

Obrázek 7: Funkce BRDF



Zdroj: Aber, Marzloff, Ries (2010)

¹ Piktometrie - způsob zachycení leteckých snímků získání všech částí snímaného objektu.

3.4 Zpracování UAV dat ve fotogrammetrii

Řehák (2012) ve své práci shrnul hlavní problémy při zpracování dat z UAV nosičů:

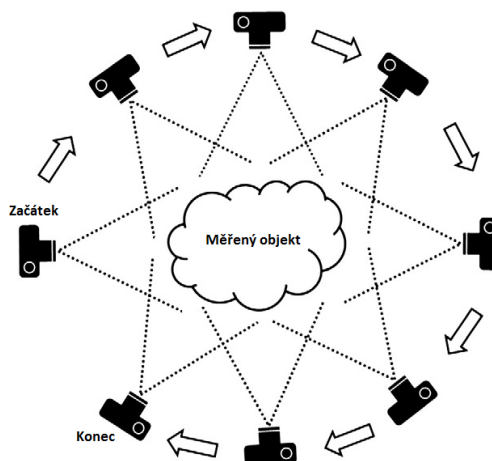
- určování prvků vnější orientace – *absence kvalitní GPS/inerciální měrné jednotky (IMU)*
- určování prvků vnitřní orientace (PVO) – *neměřická kamera*
- nestandardní data – *snímky upravené v SW fotoaparátu.*

Eisenbeiss (2009) zmiňuje nutnost započítání prvků vnější orientace (viz kapitola 3.4.2) přímo v terénu, a proto je podle něj nezbytné, aby model disponoval GPS a IMU. Naopak Miřijovský (2013) uvádí, že „pro vynikající výsledky v UAV fotogrammetrii je nutné mít dokonale zkalibrovanou kameru a pečlivě plánovat všechny fáze projektu od plánu letu až po zpracování snímků.“ Snaží se vyvrátit tvrzení Eisenbeisse (2009) a svým výzkumem dokázat, že prvky vnější orientace je možné dopočítat zpětně v SW pomocí aerotriangulace bez prvků vnější orientace. Toho je možné docílit například určením prvků vnitřní orientace pomocí vlíčovacích bodů se známými X, Y, Z souřadnicemi (Aber, Marzloff, Ries 2010). Princip vlíčovacích bodů a aerotriangulace je zmíněný v kapitole 3.4.2 a 3.4.3.

3.4.1 Structure from Motion

Vyhodnocování snímků pořízených UAV technikou se zpracovává stereofotogrammetrií a zobrazovací technikou *Structure from Motion*. Ta je v posledních letech stále užívanější, zejména z důvodu velkého pokroku v oblasti vývoje nových a přesnějších algoritmů zpracování (Miřijovský 2013). *SfM* je založena na odhadování 3D struktury z 2D obrazových sekvencí, které jsou spjaté s pohybem nosiče. Je inspirována biologickým zrakem zachycující 3D strukturu z 2D obrazu během pohybu okolo objektu (patrné z **Obrázku 8**).

Obrázek 8: Zobrazení metody SfM



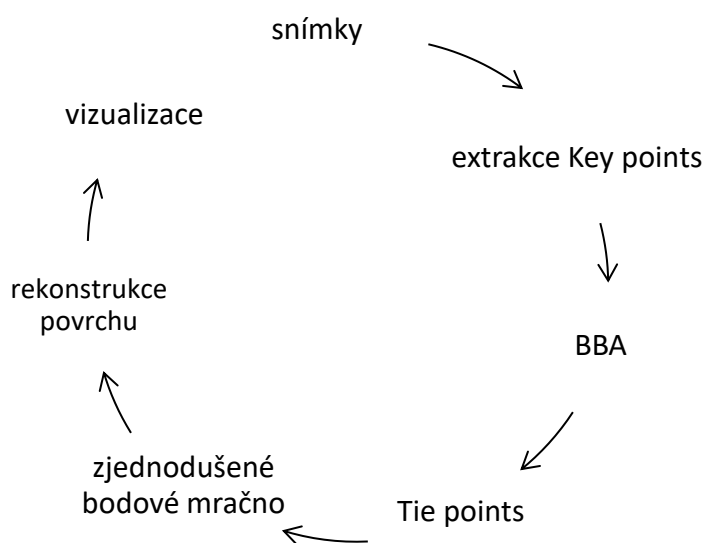
Zdroj: Westoby, Brasington, Glasser a kol. (2012)

Proto se SfM nazývá doslova „struktura z pohybu“. Můžeme ji chápat jako kombinaci stereofotogrammetrie a průřezové fotogrammetrie (Šimíček 2014). Na rozdíl od průřezové fotogrammetrie se počítá s pořadím snímků a pohybem kamery. Díky tomu je korelace mezi obrazovými body automaticky vypočítána pomocí algoritmů a struktury scény (Snavely 2008).

Šimíček (2014) uvádí: „i když je zpracovatelský proces méně náročný na odborné znalosti uživatele, umožňuje program zpracovat velké množství snímků s velkou výslednou přesností.“ S větší přesností souhlasí i Miřijovský (2013), předpokladem je podle něj použití většího množství snímků. Nevýhodou je však větší časová náročnost.

Jednotlivé kroky metody SfM jsou znázorněny na **Obrázku 9**. Zpracování začíná vyhodnocováním Key points², které se identifikují na vstupních snímcích. Propojením těchto bodů metodou *Bundle block adjustment* (viz kapitola 3.4.2) do rozhraní pak vznikají Tie points³, které vytváří bodové mračno. Následně se tvoří povrch a textura 3D modelu.

Obrázek 9: Základní procesní kroky k vizualizaci UAV dat



Zdroj: Rossi a kol. (2012)

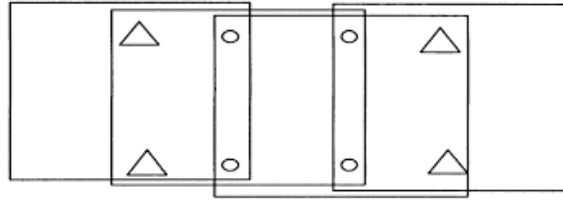
3.4.2 Aerotriangulace

Aerotriangulace (AAT) je výpočetní metoda, která určuje polohu a orientaci jednotlivých leteckých snímků v prostoru (prvky vnější orientace). U UAV se tyto prvky dají určit pomocí GPS modulu a inerciální jednotky. AAT se odvíjí od vlíčovacích bodů, sloužících k výpočtu souřadnic středů snímků a jejich natočení (Miřijovský 2013). Princip AAT je patrný, z **Obrázku 10**.

² Key points – shodné nebo neshodné body na snímcích, které se identifikují pro tvorbu prostorových dat.

³ Tie points – „vázací body“ jsou 3D body v rozhraní.

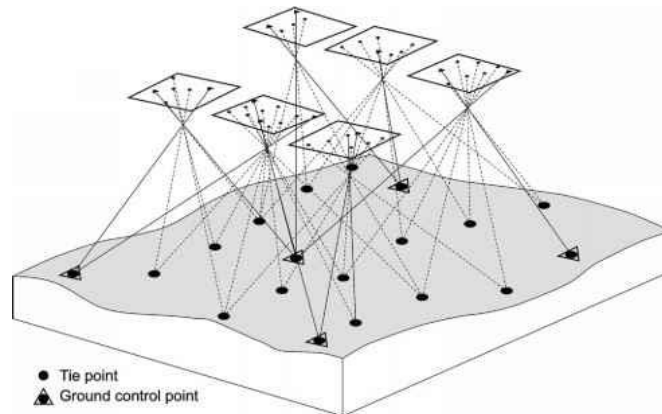
Obrázek 10: Princip aerotriangulace



Zdroj: Hanzl (2006)

Body na snímcích, *Tie points* (označené kolečkem), nám umožní navzájem spojit snímky dohromady. Na vyřešení je využívána metoda vyrovnání bloku svazků, z angl. *Bundle block adjustment (BBA)*, která je zobrazena na **Obrázku 11**. Vyrovnáním bloku svazků paprsků se vypočtou přímo vztahy mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi.

Obrázek 11: Metoda budle block adjustment



Zdroj: Hanzl (2006)

3.4.3 Vlívovací body

Bosak (2011) uvádí, že „GPS nebo IMU v malých UAV nikdy nebudou tak přesné jako stacionární GPS. Je to proto, že „měření jsou méně časově korelovaná a objekt je vystaven konstantním vertikálním zrychlení vlivem atmosférické turbulence.“ Odchylka může být až několik metrů, což se projevuje ve výpočetních operacích během zpracování dat (Höhle 2008).

Uvedený problém řeší vlívovací body, z angl. *Ground Control Points (GCP)*, které je důležité identifikovat nejen v terénu ale i na snímku. Slouží k určení polohy a výšky předmětů měření v daném souřadnicovém a výškovém systému (VÚGTK 2018). Body lze signalizovat umělými nebo přirozenými terči. GCP by měly být dobře viditelné v kontrastu s pozadím. V digitální fotogrammetrii je nutné zaměřit nejméně tři body (Miřijovský 2009). Chandler (1999) doporučuje pro zaměření bodů použít totální stanici nebo dvoufrekvenční přístroj s GPS korekčními daty.

3.5 Software pro sběr a zpracování UAV dat

Stejně jako zpracování dat je i jejich sběr závislý na vhodném SW. Proto byla provedena analýza vlastností aplikací na letovou misi. **Tabulka 2** zobrazuje cenu licence, podporu operačního systému (OS), typ snímání (*double grid* - dvojí mřížka, kdy letoun snímá objekt ze čtyř směrů a *oblique* - kruhové snímání) (více v kapitole 3.6.3) a formát snímání.

Tabulka 2: Popis vlastností jednotlivých aplikací pro nastavení letové mise

	licence	OS	double grid	oblique	formát
Litchi	599 CZK	iOS, Android	ne	ano	JPEG
Map Pilot	1050 CZK	iOS	ano	ne	RAW, JPEG
Drone Deploy	zdarma	iOS, Android	ano	ne	JPEG
Precision Flight	zdarma	iOS, Android	ano	ne	JPEG
Pix4DCapture	zdarma	iOS, Android	ano	ano	RAW, JPEG
DJI GS	zdarma	iPad, Android	ano	ano	RAW, JPEG
Tower	zdarma	Android	ne	ne	RAW, JPEG
Altizur	zdarma	IoS, Android	ano	ne	RAW, JPEG

Zdroj: Vlastní zpracování

Níže jsou popsány důležité vlastnosti nejčastěji využívaných softwarů pro tvorbu 3D modelů z dat UAV. I když je těchto SW větší množství, tak některé nejsou uvedené (například *Bentley ContextCapture*, *RealityCapture*, *3DF Zephyr*, *Correlator 3D*, *Menci APS*, *Autodesk ReCap 360*, *Inpho UASMaster a Drone Mapper*). Zmíněné byly pouze ty nejpobulárnější v tomto oboru. SW jsou hodnoceny z různých hledisek, přičemž těmi výchozími jsou: licence, operační systém, podpora SW (uživatelská komunita, tutoriály), hardwarové (HW) požadavky a kompatibilita.

Kromě SW specifických ke zpracování UAV dat je zde popsán i fotogrammetrický **Photoscan** od firmy Agisoft, který byl vybrán jako referenční software pro tuto práci. Photoscan je SW s širokým využitím od pozemní a letecké fotogrammetrie až po filmový či herní průmysl. Vznikl v ruském Petrohradu v roce 2006.

Px4Dmapper je velmi často zmiňován ve spolupráci s UAV fotogrammetrií. Ve své práci ho využily i Srnský (2017) a Řehák (2012). Je také populárním SW v zahraničních výzkumech. Vznikl ve Švýcarsku v roce 2011 pro transformaci RGB a multispektrálních snímků do 3D výstupů.

3DSurvey je nový SW na poli UAV fotogrammetrie, který vznikl v roce 2015 ve Slovinsku. I přes krátkou dobu působení na trhu je často využíván v zahraničních fotogrammetrických výzkumech. Velmi často se s ním můžeme setkat ve stavebním a inženýrském monitorování.

Společnost **Icaros** byla založena v roce 2004 zkušenými pracovníky GIS a elektrooptických technologií jako poskytovatel leteckých mapových služeb. Icaros komplexně zpracovává letecké geoprostorové výstupy, nabízející nejmodernější technologie dálkového snímání. Dále nabízí fotogrammetrické SW produkty, získávání a zpracování obrazových dat nebo analytické služby.

OpenDroneMap z roku 2014 se dá považovat za jediný spolehlivý opensource software. Dokáže převádět kamerové snímky do 2D a 3D v kombinaci s dalšími geografickými daty. Pro desktopovou instalaci je nutné vytvořit virtuální knihovnu Docker.

PhotoModeler UAS je nejnovějším produktem společnosti PhotoModeler. Ta vznikla ve Vancouveru v roce 1990 jako jedna z prvních společností v oblasti fotogrammetrického zpracování. PhotoModeler produkuje přesné náčrty map, CAD data a 3D modely. Využívá se v inženýrství, výzkumech průmyslového měření, architektuře a v mnoha dalších odvětvích. PhotoModeler UAS obsahuje veškeré funkce klasického PhotoModeleru, navíc však dokáže zpracovat letecké UAV snímky. Disponuje autokalibrací kamery, prací se souřadnicovými systémy, georeferencovanou ortofotomozaikou a podporou multispektrálních snímků.

Mezi velmi užívané SW patří i cloudová uložiště **Altizur** (2013) a **DroneDeploy** (2015). Tyto SW jsou populární jak u začátečníků, tak mezi profesionály. Kromě online zpracování dat na straně serveru, nabízí tyto společnosti i aplikace na sběr dat a sdílení výstupů mezi uživateli.

3.5.1 Licence a softwarové požadavky

Níže je vložena **Tabulka 3**, která zobrazuje typ licence, celkovou cenu SW nebo cenu za rok. Dále znázorňuje možnost zkušební (trial) verze jednotlivých platforem a operačního systému.

Tabulka 3: Licence a OS SW

	Licence	Cena	Trial	Operační systém
Photoscan	Agisoft SE	179 \$	30 dní	Windows, Linux, Mac
	Agisoft PE	3499 \$	30 dní	
Pix4D	proprietární	6500 €	15 + 10 dní	Windows, Linux, Mac
3DSurvey	proprietární	3000 €	14 dní	Windows
Icaros	Standart	2995 \$	30 dní	Windows
	Professional	7995 \$	30 dní	
Opendronemap	opensource	—————	—————	Windows, Linux, Mac
PM UAS	proprietární	3995 \$	individuální	Windows, Mac, (Linux)
Altizur	Bronze	62 \$ / rok	—————	Windows
	Silver	310 \$ / rok	—————	
	Gold	3105 \$ / rok	—————	
DroneDeploy	PRO	996 \$ / rok	14 dní	Windows, Linux, Mac
	Business	3000 \$ / rok	14 dní	

Zdroj: Vlastní zpracování

Photoscan je dostupný ve dvou verzích: Standard Edition (SE) a Professional Edition (PE). SE nabízí základní balíček funkcí, kterými je generace a editace bodového mračka (PC z angl. Point cloud), 3D modelu a textury. Poskytuje i fotogrammetrickou triangulaci, podporu tzv. „rybího oka“ – objektiv zabírající úhel 180° a sférické panorama. Profesionální verze nabízí desítky dalších funkcí jako například klasifikace PC nebo podporu GCP. Výhodou je plně funkční trial verze obou edic a široká podpora OS. Photoscan má v nabídce ještě edukativní licenci – SE za 59\$ a PE za 549\$.

Pix4Dmapper je jedním z nejdražších SW na trhu. Nabízí zpracování v cloudovém rozhraní, kde je možnost šířit výstup mezi ostatními uživateli. Stejně jako u Photoscanu je zde možnost akademické licence. Professor licence účtuje 1500 EUR na dvě zařízení a Classroom licence 5000 EUR na 25 zařízení.

3DSurvey nabízí pouze 14denní zkušební verzi. Pro studenty je zde v nabídce zcela zdarma edukativní verze. Software je nabízen pouze na platformě Windows.

Icaros má k dispozici několik variant produktů. Zakoupit lze Standartní a Profesionální verzi. Každou z nich pouze na rok nebo permanentně, možná je i 30denní trial verze. Standartní verze obsahuje například zdokonalený algoritmus pro zpracování snímků s nízkým překryvem, lepší výpočet a korekci letové výšky nebo podporu termálních senzorů. Profesionální verze vyžaduje nainstalovaný Esri ArcGIS nebo ArcEngine. Dále disponuje navíc nástrojem Inspect and Measure Tool, který zpřesňuje výsledek 3D modelů. Celkově je Profesionální verze méně zautomatizovaná a umožňuje zasahovat více do jednotlivých kroků zpracování. Těmi je například optimalizace parametrů, Tie points nebo opakované spuštění jednotlivých procesů.

OpenDroneMap (ODM) kromě „svobodného“ SW má i placenou verzi, která nabízí rychlejší zpracování snímků, technickou podporu a průvodce. K dispozici je v ceně 42,05 €.

PhotoModelerUAS nabízí hned tři licence – standartní, scanner a UAS. UAS obsahuje všechny funkce jako předešlé, navíc s možností zpracovávat UAV snímky. V nabídce je také demo, roční či permanentní verze. Trial verze je k dispozici po kontaktování podpory na různá období. Operační systém Linux však může podle technické podpory způsobit nekompatibilitu.

Altizur nabízí krom cloudu 3 licence – Bronze, Silver a Gold. Výhodou je větší množství zpracovaných snímků, velikost uložení (500 MB, 4 GB, 50 GB, 1 TB) a ztráta vodoznaku.

Cloudová verze **DroneDeploy** má určitá omezení, jakými jsou míra detailu (5cm/pxl) nebo počet uploadovaných snímků na projekt. Uvedený problém má řešení v zakoupení dvou placených licencí – Pro a Business. V zásadě se jedná o vyšší počet snímků, které lze nahrát. U cloudové verze je to 500, u Pro verze 1000 a u Business verze 3000 snímků. Dalším rozdílem je například bezlimitní míra detailu nebo kvalitnější podpora. Pro verze navíc nabízí měření objemů, povrchu či práci s RGB či vegetačními indexy. V Business verzi najdeme navíc export shapefilů, práci s různými překryvy či místními souřadnicovými systémy.

3.5.2 Hardwarové požadavky

Vektorová grafika, kterou 3D modelace objektů bezesporu je, výpočetní techniku příliš nezatěžuje. Kalkulaci geometrie vypočítává především procesor. Pokud se k modelu připojují jiné vrstvy (například textura či osvětlení apod.), výpočetní náročnost přebírá grafická karta, což se projeví především v časové úspoře při výsledném renderování. Výhodnější je tedy mít základní desku s více sloty na více grafických karet. Zároveň je vhodné, když grafická karta disponuje více jádry, na kterých se výpočetní operace rozloží. RAM paměť je při práci s 3D modelem využita pro uložení obsahu v pracovním okně. Pokud je RAM výkonnější, umožňuje rychlejší reakce, zobrazení a plynulejší vykreslování. Čas zpracování závisí pochopitelně i na velikosti projektu.

V **Tabulce 4** jsou popsány hardwarové nároky všech analyzovaných softwarů. První tři sloupce zobrazují minimální hardwarové požadavky potřebné pro fungování SW, v následujících třech sloupcích jsou pak požadavky doporučované.

Tabulka 4: HW požadavky

	min CPU	min RAM	min grafická k.	CPU	RAM	grafická k.
Photoscam	Intel i7 (čtyřjádrový)	8Gb	4gb	Intel i7 (šestijádrový)	32Gb	4 Gb
Pix4D	Intel i5	4Gb	OpenGL 3.2	Intel i7	8Gb	2 Gb, OpenGL 3.2
3DSurvey	Intel i5	8Gb	nVidia GTX 1050, OpenGL 3.0	Intel i7	16Gb	nVidia GTX 1070, OpenGL 3.0
Icaros	Doujádrový	4Gb	nVidia CUDA	Šestijádrový	32Gb	nVidia CUDA
ODM	64bit, MMX, SSE, SSE2, SSE3,SSSE3	4Gb	VT-X podpora	64bit, MMX, SSE, SSE2, SSE3,SSSE3	16Gb	VT-X podpora
PM UAS	Intel i5	16Gb	—————	Intel i7	32Gb	—————

Zdroj: vlastní zpracování

3.5.3 Kompatibilita z hlediska vstupů a výstupů

V následující **Tabulce 5** jsou zobrazeny kompatibilní formáty jednotlivých softwarů. Byly vybrány kategorie nejdůležitější pro práci s UAV a tvorbou 3D modelu. Těmi jsou formáty snímků, kamery a formáty výstupního bodového mračna (*point cloud*) a sítě (*mesh*).

Tabulka 5: Přehled vstupních a výstupních formátů

	Import snímků	Import kamery	Point cloud export	Mesh export
Photoscan	JPG; TIFF; PNG; BMP; OpenEXR; DNG; PGM; PPM; MPO; SEQ	JPG; TXT; TEL; CSV; LOG	OBJ; PLY; TXT; LAS; LAZ; DFX; E57; PTS; U3D; ZIP; OC3; CL3; PDF	OBJ; 3DS; DAE; PLY; STL; DXF; FBX; U3D; WRL; KMZ; PDF
Pix4D	JPG; JPEG; TIF; TIFF	JPG; TXT, CSV	LAS; LAZ; XYZ; PLY	OBJ; FBX; DXF; PLY; PDF; OSGB; SLPK
3DSurvey	JPG	TXT	PLY; LAS	PLY; LAS
Icaros	JPEG; TIF; BMP; PNG; PCX; PXT; PSD; IFF	JPG; TXT, CSV	3DS; 3DM; FBX; KMZ; OBJ; LAS; BYU	3DS; 3DM; FBX; KMZ; OBJ; LAS; BYU
ODM	PNG; TIF	TXT; CSV;	LAZ; PLY	LAZ; PLY
PM UAS	JPEG; TIF; BMP; PNG; PCX; TGA; PXT; PSD; PPM; IFF; CAL; PCD; SGI; RGB; MAC	TXT; CSV; LOG	3DS; 3DM; FBX; KML; KMZ; OBJ; LAS; STL; BYU; PLY; FACET; IV; TXT	3DS; 3DM; FBX; KML; KMZ; OBJ; LAS; STL; BYU; PLY; FACET; IV; TXT

Zdroj: vlastní zpracování

3.5.4 Podpora SW

V **Tabulce 6** jsou shrnuty kritéria pro podporu jednotlivých softwarů. Ke každému kritériu je přiřazeno číslo od 1 do 3, přičemž 3 má nejvyšší hodnotu. Hodnocení je uděleno na základě provedené analýzy. Hodnotila se uživatelská komunita, přesněji aktivita na sociálních skupinách a fórech. Dále volné tutoriály, především v podobě videí, vytvořené uživateli. Poté oficiální tutoriály, sdílené samotnou společností. Dalším hodnocením je kvalita technické podpory ze strany společnosti. Jako poslední bylo vybráno využití SW odbornou veřejností.

Tabulka 6: Hodnocení kritérií pro podporu SW

	uživatelská komunita	volné tutoriály	oficiální tutoriály	technická podpora	výzkumné recenze	celkem bodů
Photoscan	3	3	2	3	3	14
Pix4D	3	3	3	3	3	15
3DSurvey	1	1	3	3	3	11
Icaros	1	2	1	3	1	8
ODM	2	3	2	1*	2	11
PM UAS	1	2	3	3	1	10
Altizur	1	2	2	2	2	9
DroneDeploy	3	3	3	2*	3	14

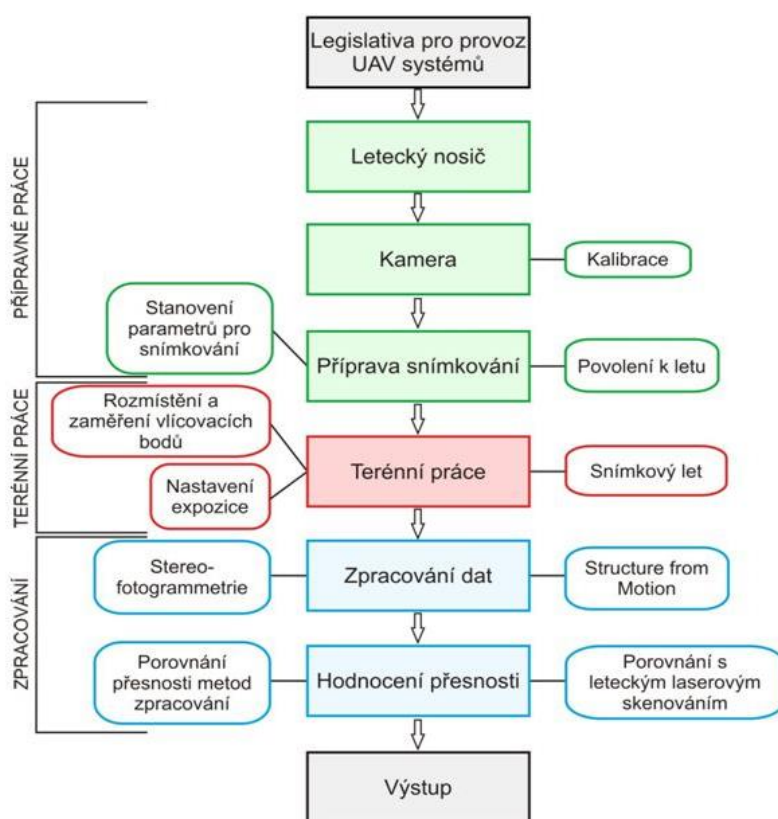
* závisí na typu licence

Zdroj: vlastní zpracování

3.6 Příprava fotogrammetrické mise

V této části je popsána teoretická příprava pro naplánování přesné letecké mise. Podrobné plánování při sběru dat z UAV zdůrazňuje i Murtiyoso, Grussenmeyer a Freville (2017). Celý koncept procesu UAV fotogrammetrie zpracoval Miřijovský (2013), který graficky znázorňuje jednotlivé body této metody (viz **Obrázek 12**). Nutné činnosti jsou plně podbarveny, na ně následně navazují ty, které se mohou lišit podle zařízení, metody či cíle práce.

Obrázek 12: Základní koncept UAV fotogrammetrie podle Miřijovského (2013)

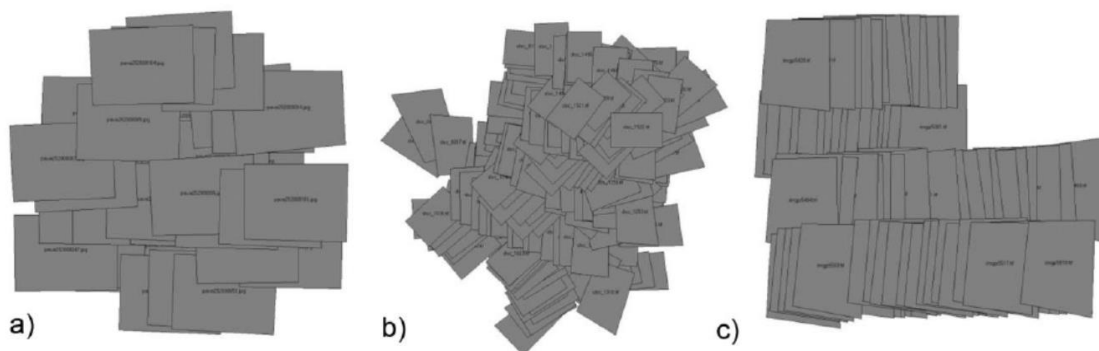


Zdroj: Miřijovský (2013)

Prvním krokem je vždy potřebná legislativa, od povolení ÚCL, k průkazu užívaného dronu, pojištění či povolení v dané oblasti. Let musí být v souladu s předpisem Doplněk X. Přípravné práce (zeleně) zahrnují činnost s leteckým nosičem a kalibraci kamery, případně dronu samotného. Velmi důležitým bodem je příprava snímkování. Zde se určují parametry letové mise na základě celkového výstupu. Červenou barvou jsou znázorněné terénní práce, do kterých patří samotný let a zaměření vlíčovacích bodů. Po sběru dat následuje jejich zpracování jednou z výše zmíněných způsobů, a to stereofotogrammetrie a SfM. Závěrem jsou zhodnoceny výsledky podle užitých metody, buď porovnáním přesnosti zpracovaného výstupu, nebo porovnáním s laserovým skenováním.

Zásadním prvkem pro spolehlivý sběr dat z dronu je možnost automatické mise. **Obrázek 13** znázorňuje patrné rozdílné lety. Z toho je patrné, že při kvalitním automatickém letu je dosaženo větší pravidelnosti překrytu a základem fotogrammetrické mise je UAV disponující automatickým systémem (Remondino 2014).

Obrázek 13: a) manuální režim s plánovaným intervalem b) levnější navigační systém c) kvalitní navigační systém



Zdroj: Remondino (2014)

Je důležité zmínit rozdíl v termínech autonomního a automatického systému, které jsou v mnoha publikacích zaměňovány. Odlišnost autonomního systému od automatického je ve schopnosti stroje vypořádat se s krizovými situacemi na základě předem naprogramovaných pravidel (Vergouw a kol. 2016). U bezpilotních letounů je to například návrat na místo vzletu během ztráty signálu nebo nízké kapacity baterie. Dříve se u dronů využívalo převážně manuálního letu. Dnes je u většiny UAV základním prvkem automatický let. Postupně se ale přechází na systém autonomní. To umožňuje rychlejší a přesnější sběr dat s minimálním rizikem nehody letounu.

3.6.1 Kalibrace

U bezpilotních letounů se kalibruje kamera a samotný stroj, přesněji IMU pro spolehlivou orientaci v prostoru. To se provádí otočením stroje v různých polohách. I když Miřijovský (2013) uvádí, „že pro UAV fotogrammetrii mohou být s úspěchem použity téměř všechny typy digitálních kamer,“ přesto je nutná její kalibrace. A to především u kamery neměřické. K určení prvků vnitřní orientace (PVO) patří velikost senzoru, souřadnice hlavního snímkovacího bodu, hodnota konstanty komory a hodnoty radiální a tangenciální distorze objektivu. Kalibrace PVO se provádí v laboratoři, simultánně a pomocí testovacího pole.

3.6.2 Obrazové rozlišení snímků

Obrazové rozlišení snímků je základním parametrem pro výstup projektu. Jedná se o zobrazovací míru detailu GSD (z anglického *ground sample distance*). Ta je definována jako vzdálenost mezi středem dvou bodů (pixelů) měřených na zemském povrchu. V praxi to znamená, že čím je tato hodnota menší, tím je míra detailu větší. Stanovením teoretické hodnoty GSD se znalostí dalších parametrů lze vypočítat letovou hladinu, díky které je možné skutečně dosáhnout této míry.

$$H = \frac{(Imw * GSD * Fr)}{(Sw * 100)} \quad \text{kde:}$$

H = výška letu [m], Imw = šířka snímku [px], Fr = konstanta kamery [mm], Sw = šířka senzoru [mm]

Vertikální rozdíly v terénu ovlivňují vzdálenost snímaného povrchu ke kameře. U zpracování 3D objektů je tento rozdíl mnohem výraznější. Proto se musí počítat s výškovým rozsahem objektu, který ovlivňuje výslednou GSD. Obvykle se doporučuje zpracovávat snímky zachycené ve stejné výšce, protože mají stejnou vzdálenost od povrchu země, a tedy i stejnou hodnotu GSD. To usnadňuje přizpůsobení Key points mezi snímky během zpracování, a tím pomáhá při rekonstrukci. Nicméně algoritmus většiny SW na zpracování UAV dat GSD průměrují. Tyto SW mohou zpracovávat snímky s různými mírami detailu, pokud platí následující: hodnota nejvyšší GSD je menší než dvojnásobek nejnižší GSD (Pix4D).

$$GSD_{max} \leq 2 * GSD_{min}$$

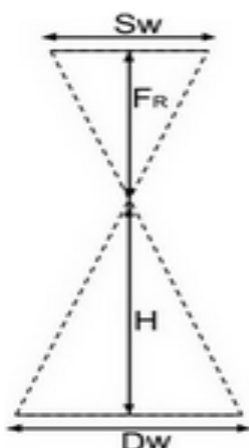
Výška letu a GSD mají lineární vztah, proto by nejvyšší letová hladina neměla u výstupu zachyceného stejným fotoaparátém překročit dvojnásobek nejnižší výšky letu. (Pix4D)

$$\frac{(Sw * H_{max} * 100)}{(Fr * Iw)} \leq 2 * \frac{(Sw * H_{min} * 100)}{(Fr * Iw)} \quad \text{nebo} \quad H_{max} \leq 2 * H_{min}$$

Pomocí následujícího vzorce lze vypočítat šířku (D_w) a výšku (D_h) snímku ve skutečnosti na zemském povrchu. Tento údaj je potřebný pro výpočet intervalu snímkování v kapitole 3.6.4. Všechny tyto parametry jsou graficky znázorněny na **Obrázku 14**.

$$D_w [m] = \frac{Imw * GSD}{100} \quad D_h [m] = \frac{Imh * GSD}{100}$$

Obrázek 14: Zobrazené parametry pro výpočet GSD



Zdroj: Pix4D

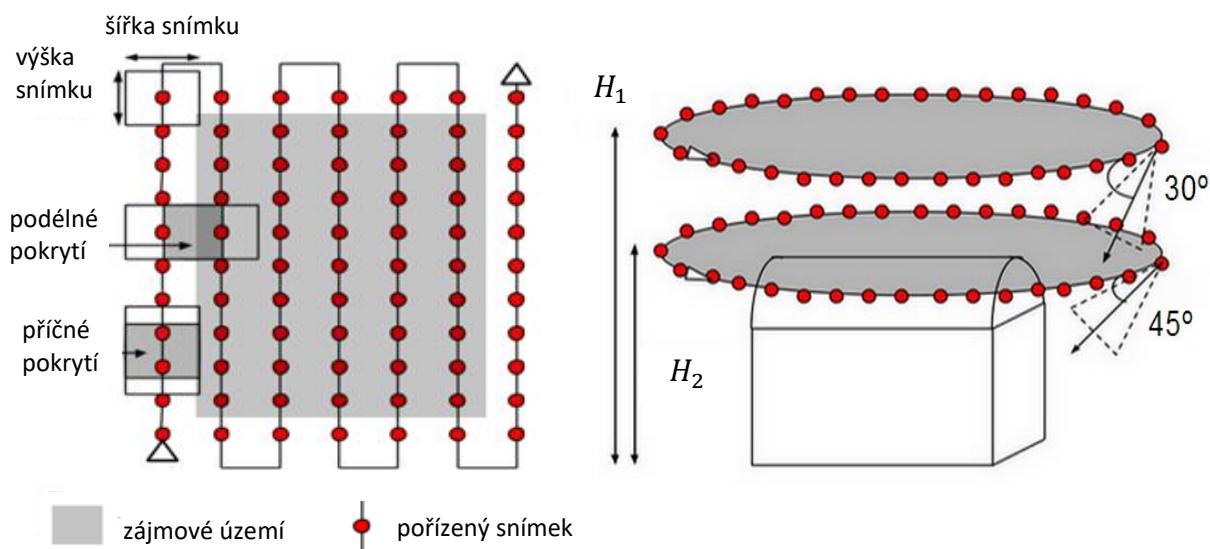
3.6.3 Překrytí snímků

Pro dostatečné zaznamenání objektu je potřeba provést dva typy snímkování (jiný úhel snímání kamery objektu). První metoda je *nadir* a druhá *oblique*.

Snímkování *nadir* je zřetelné na **Obrázku 15**, kdy letoun prolétává přímo nad objektem a kamera snímá kolmo k povrchu. Překrytí snímků by mělo být dle manuálu Pix4D alespoň 70% pro p podélné snímky ve směru letu a 60% pro q příčné snímky v bočním směru. Srnský (2017) doporučuje pro 3D modelaci překrytí 85 % pro p snímky a 70 % pro q snímky.

Druhý typ snímkování je *oblique*, kdy letoun krouží okolo objektu. Ideální provedení této metody je patrné z **Obrázku 16**. Doporučují se dvě letové hladiny (přičemž druhá je v poloviční výšce té první) pod úhlem kamery 30° a 45° k objektu (Pix4D).

Obrázek 15 a 16: Metoda *nadir* (vlevo) a metoda *oblique* ve dvou letových hladinách (vpravo)



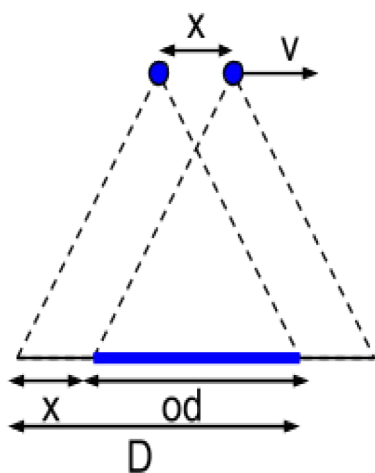
Zdroj: Pix4D

3.6.4 Interval snímkování

Pro správný sběr dat je důležitý i přesný interval snímkování. Dron bude prolétávat předem definovanou trajektorií a nad každým bodem zůstává krátký čas ve visu, proto je vhodné nastavit kontinuální snímkování s patřičným intervalem.

Následující **Obrázek 17** znázorňuje parametry, ze kterých lze vypočítat interval snímkování pro metodu *nadir*. K tomu je potřeba znát procentuální překrytí dvou snímků, vzdálenost pokrytého povrchu jedním snímkem a rychlost letu.

Obrázek 17: Grafické znázornění výpočtu intervalu snímkování



x = vzdálenost mezi dvěma pozicemi kamery ve směru letu [m]

v = rychlost letu [m/s]

D = délka pokrytého povrchu jedním snímkem ve směru letu [m]

od = pokrytí povrchu mezi dvěma snímky ve směru letu [m]

overlap = procentuální pokrytí stejného povrchu dvěma snímky

t = uplynulý čas mezi dvěma snímky [s]

Výpočet:

$$od = \text{overlap} * D$$

$$x = D - od$$

$$t = x/v$$

nebo

$$t = \frac{(imW * GSD)}{(100)} * \frac{(1 - \text{overlap})}{(v)}$$

Zdroj: Pix4D

Metoda *oblique* je zásadní při tvorbě prostorového modelu. Interval této metody závisí na velikosti snímaného objektu. Využívané je rozmezí snímkování po 4° až po 20° (Pix4D). Høhle (2008) navíc uvádí, že „*oblique* vyžaduje schopnost aparátu udržovat nadmořskou výšku a pořizovat prostorová data.“

4. FOTOGRAMMETRICKÁ MISE

Tato kapitola podrobně popisuje průběh fotogrammetrické práce na základě teoretických poznatků. Zásadními kroky byl výběr snímaného objektu v souladu s legislativou a příprava a realizace letové mise pro sběr spolehlivých dat.

Na základě analýzy aplikací ke sběru dat byl využit populární software *Pix4DCapture*. Důležitými pro tento výběr byla možnost mise *double grid* pro potřebné pokrytí kolmých snímků. Zásadní vlastností byla možnost kruhového snímání s nastavením různých intervalů mezi snímky. Praktické je i snímání v RAW formátu. Jeho softwarová konverze nezhorší kvalitu tak jako při uložení snímku do JPEG.

4.1 Objekt modelování

Vzhledem ke složitému získání povolení letu v určitých lokalitách je primárním faktorem výběru objektu legislativa. Pro realizaci letové mise bylo nutné vybrat objekt nacházející se mimo HOP, s polohou na otevřenějším prostranství a nízkým výskytem liniových překážek (silnice, elektrické vedení...). Snímaným objektem je budova (viz **Obrázek 18**) v obci Vykáň ve Středočeském kraji, v okresu Nymburk se souřadnicemi 50.1179056 s. š. a 14.8351097 v. d.

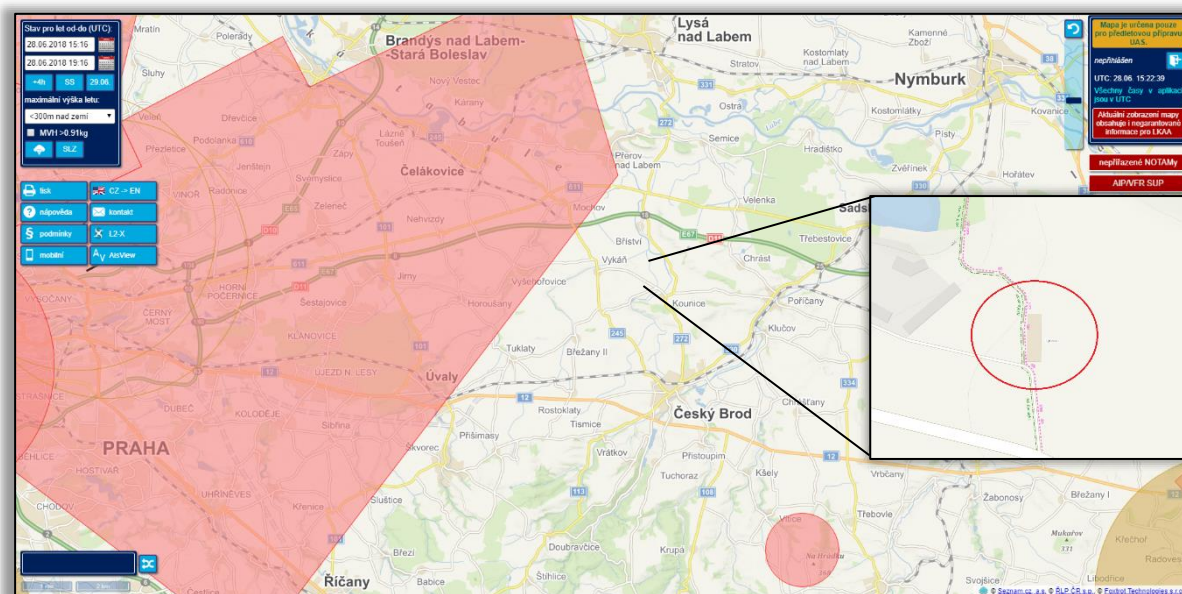
Obrázek 18: Snímaný objekt



Zdroj: vlastní zpracování

Na portálu www.aisview.com je možné zkontrolovat omezené zóny pro veškerý letecký provoz přes interaktivní mapu (viz **Obrázek 19**). Z mapy je zřejmé, že prostor vybraného objektu splňoval potřebné náležitosti pro provoz UAV. Zřetelná je například omezená zóna Prahy a jejího okolí. Za povšimnutí stojí i omezený prostor ve městě Kouřim jihovýchodně od Českého Brodu z důvodu vypouštění plynu. Na obrázku je patrné vymezené zájmové území.

Obrázek 19: Omezení vzdušného prostoru pro provoz leteckých prací



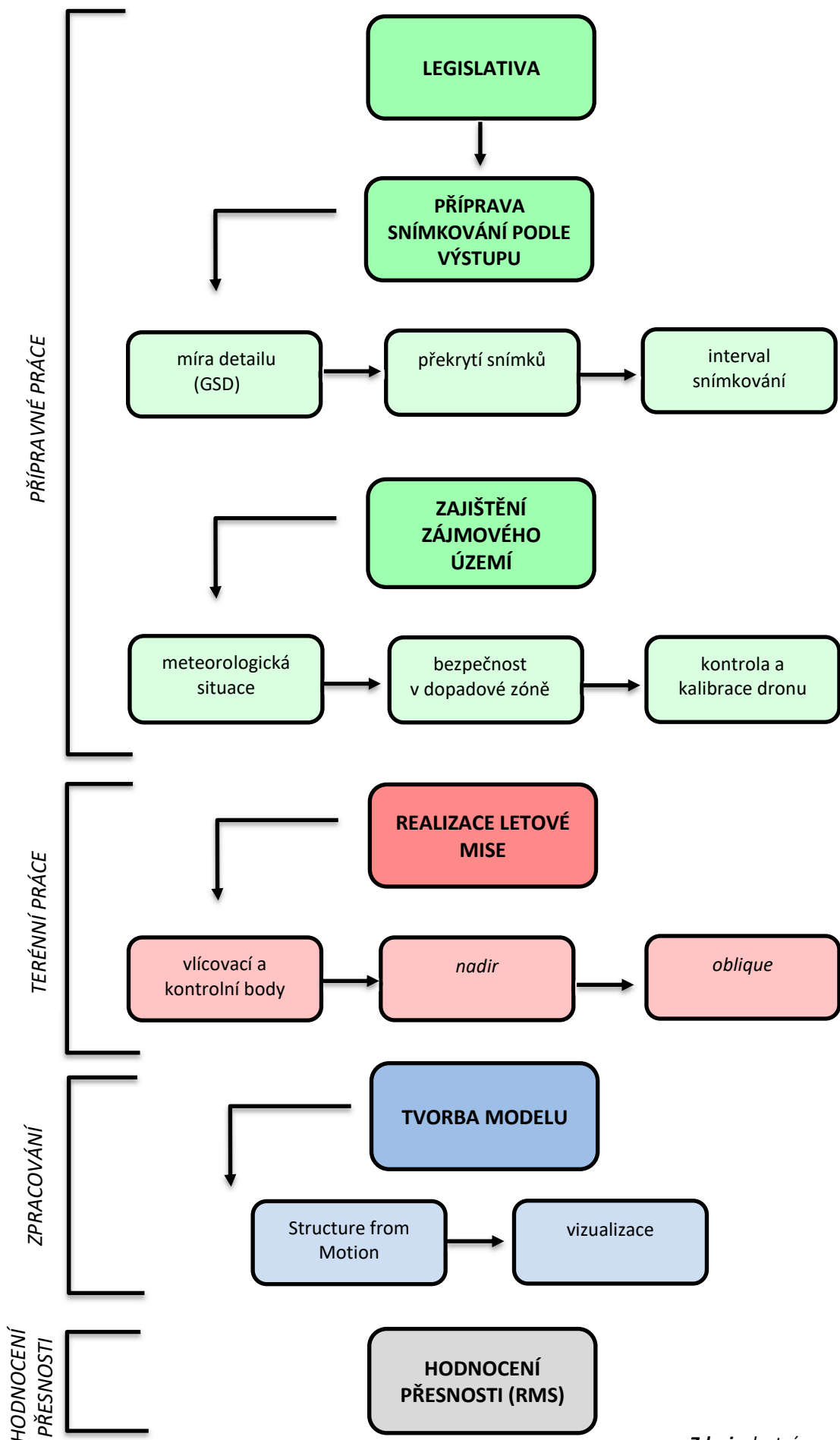
Zdroj: www.aisview.com

4.2 Metodika

Pro účely této práce byl převzat a upraven koncept Miřijovského (2013) popisující obecné procedury UAV fotogrammetrie (viz **Obrázek 12**). Výsledkem je specifické schéma pro tvorbu 3D modelu z dat nízkonákladového UAV. To je zobrazené na **Obrázku 20**. Schéma je rozděleno na čtyři části. Těmi jsou *přípravné práce*, *terénní práce*, *zpracování* a *hodnocení přesnosti*. Každá z těchto částí zobrazuje hlavní činnosti (zobrazené tučně) a konkrétní procedury (navazující).

Metodika práce začíná výpočetní přípravou letecké mise, poté je na řadě zajištění zájmového území, provedení letové mise a zpracování modelu a jeho hodnocení. Stěžejním krokem práce bylo stanovení GSD. Ze získaných informací byla vypočítána přesná letová hladina pro sběr dat. Důležité bylo určit i procentuální překryv a interval snímkování. Sběr dat pro tvorbu prostorového modelu řeší dva typy snímkování – metoda *nadir* a *oblique*. Pro výsledné porovnání přesnosti v jednotlivých SW bylo potřeba zaměřit vlíčovací body pozemním GPS přístrojem. Část těchto bodů je pak označena jako kontrolní body, které ověřují přesnost modelu. Odchyly mezi jednotlivými SW jsou porovnány statistickou veličinou střední kvadratické chyby (RMS).

Obrázek 20: Schéma průběhu přípravy letové mise komerčním dronem

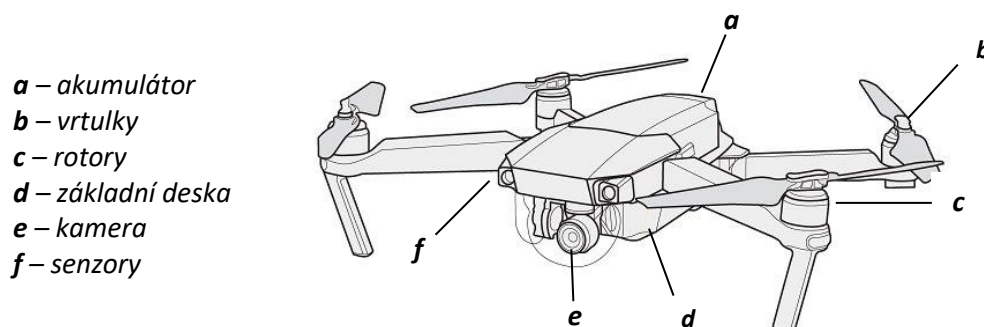


Zdroj: vlastní zpracování

4.3 Popis použitého UAV

Pro tento výzkum byla použita kvadrokoptéra Mavic Pro. Díky současnému trendu miniaturizace disponuje velmi malými rozměry (při složení 198 mm x 83 mm x 83 mm). Transport je velmi snadný a vzhledem k poměru výkonu a ceně je velmi oblíbená. Zakládá tak novou kategorii komerčních UAV. Dokáže létat až 65 km/h. Rozsah letu od ovládnání je až 7 km a ve výšce 5000 m nad mořem. Systém snímacích senzorů monitoruje překážky, kterým je dron schopen se automaticky vyhnout, což samozřejmě snižuje riziko nehody. Na **Obrázku 21** jsou zobrazeny základní komponenty (manuál Mavic Pro 2017).

Obrázek 21: Popis kvadrokoptéry

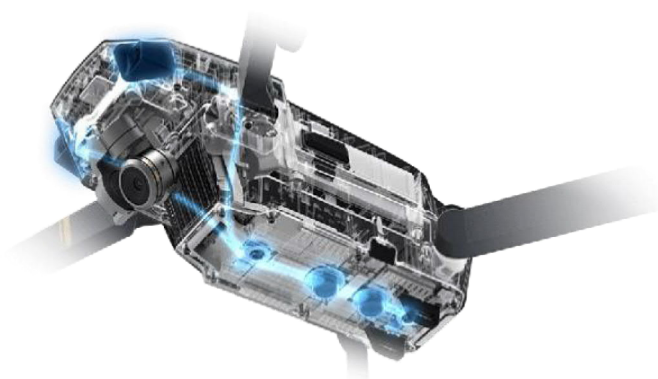


Zdroj: manuál Mavic Pro 2017

Zdrojem energie je akumulátor s ochrannými funkcemi proti přebíjení či automatickému vybití na určitou část kapacity po delší nečinnosti. Mavic Pro může při plném nabití vydržet ve vzduchu až 27 minut (za předpokladu bezvětří a konstantní rychlosti 7 km/s). Baterie má třetinovou hmotnost dronu (240 g) a kapacitu 3830 mAh, což se v porovnání s dnešními telefony může zdát jako velmi nízká hodnota, koreluje to ale právě s nízkou hmotností, která výrazně snižuje spotřebu energie zařízení. Autonomní funkce dronu upozorní, pokud se baterie blíží vybití a dron se sám vrátí na místo vzletu (manuál Mavic Pro 2017).

Mavic Pro má šest senzorů zobrazených na **Obrázku 22**. Monokulární optické snímače v přední a spodní části umožňují přední a svislé vidění. Ve spodní části uprostřed najdeme navíc dva ultrazvukové senzory, které kontrolují vzlet a přistání. Přední senzory detekují překážky pod úhlem 60°, spodní senzory pod úhlem 40°. Podmínkou detekce je maximální rychlost 36 km/h a rozmezí světelnosti od 300 lux – 10 000 lux. Díky tomu stroj funguje i po ztrátě radiového signálu bez vizuálního kontaktu, kdy může obletět nebo se zastavit před překážkami (do 15 m) (manuál Mavic Pro 2017).

Obrázek 22: Obvod snímacích senzorů



Zdroj: DJI 2018

Dálkové ovládání je multifunkční bezdrátové komunikační zařízení. Obsahuje přijímací kanál videa a systém dálkového ovládání letounu. K dispozici jsou specifická tlačítka, dva joysticky pro pohyb v prostoru a LCD displej zobrazující základní letové parametry. Těmi jsou například rychlost letu, otáček motorů, vzdálenost a výška letu, úroveň nabití baterie i ovladače nebo intenzita signálu GPS a vysílače. Ovladač má dvě skládací antény, které vysílají a zachycují signál k bezpilotnímu letounu na frekvenci 2,4 GHz. Vysílá se elektromagnetická vlna směrem k stroji. Pro bezpečnější signál je lepší klopat antény kolmo k dronu. Stejně jako baterie se i ovladač musí nabíjet (manuál Mavic Pro 2017).

Dron obsahuje základní desku, která řídí celý systém. Disponuje nejnovějším IMU systémem, který Eisenbeiss (2009) zdůrazňuje. Jejimi hlavními součástkami je gyroskop k orientaci, akcelerometr pro určení rychlosti, barometr pro zjištění nadmořské výšky a kompas pro identifikaci magnetického pole a určení severu (manuál Mavic Pro 2017).

Dron Mavic Pro má k dispozici technologii letové stabilizace, díky níž lze nastavit libovolný počet tzv. *waypoints*⁴. Ty umožňují létat v předem definované trajektorii. Další výhodou je velká výdrž letu, orientace podle GPS a autonomní funkce *Return to home*. Senzory detekující překážky umožňují let i uvnitř budovy.

Ke zmíněným součástkám patří i další části, které jsou nutné ke sběru dat. Jednou z nich je chytrý mobilní telefon, obsahující sekundární software s veškerými informacemi o systému letounu. Dálkové ovládání je navíc pomocí USB kabelu propojeno s chytrým telefonem, který funguje jako displej a zobrazuje pohled kamery v reálném čase. Druhou je paměťová karta sloužící k uložení dat. Nezbytnou součástí dronu pro fotogrammetrické využití je kamera, která je popsána v následující kapitole 4.3.1

⁴ Waypoints – sada souřadnic, které identifikují specifický bod ve fyzickém prostoru (Hansen, 2016).

4.3.1 Integrovaná kamera

Mavic Pro je vybaven stabilizovaným kamerovým systémem s vysokým rozlišením. Kamera se může pohybovat po vlastní ose a snímat jak horizontální, tak vertikální plochu. Integrovaný fotoaparát nabízí několik možností snímání: jednotlivé snímky, sekvenční snímání, expoziční bracketing (stejný snímek různými expozičními hodnotami) a intervalové snímání. Součástí kamery je trojosý gimbal (klonění, klopení a otáčení) – stabilizátor, který umožňuje klopit kameru kolmo k zemi a až 30° nad horizontální linii. To činí úhel snímání v rozmezí 120°, zároveň stabilizuje obraz i ve vysoké rychlosti (manuál Mavic Pro 2017).

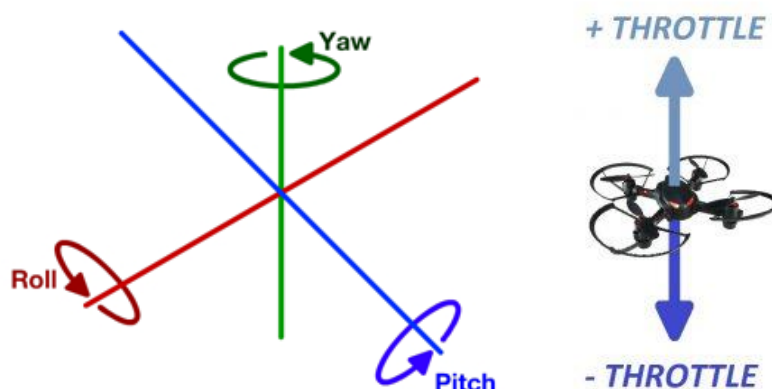
Nejvyšší rozlišení snímků je vysoké 4K rozlišení, přesněji 4000 x 3000 pixelů, ve kterém lze objekt snímat. Optický snímač CMOS 1/2.3" nabízí 12,3 Mpx. Konstanta komory je 26 mm se světelností f/2.2. Rozměry senzoru jsou 6,17 mm x 3,47 mm a zorný úhel kamery 78,8°. Distorze, udávající posun bodu snímku od jeho správné polohy v rovině může být podle výrobce až 1,5 %. Hodnota ISO je pro fotografie v rozmezí 100–1600 (manuál Mavic Pro 2017).

Některé prvky vnitřní orientace u kamery nejsou známy, a proto lze určit kameru jako neměřickou. UAV však díky GPS/IMU systému zaznamenává prvky vnější orientace. Pro účely použití běžného komerčního UAV neproběhla klasická kalibrace kamery. Využití softwaru navíc během zpracování disponují automatickou funkcí autokalibrace kamery.

4.3.2 Princip letu

Princip letu je znázorněn na **Obrázku 23**. Ten je definován tzv. *tříosým souřadnicovým systémem*. Zobrazuje tři základní pohyby – zdvih (*pitch*), otočení (*yaw*) a naklonění (*roll*). Dále zobrazuje i pohyb specifický pro kvadrokoptéry – *throttle*⁵, vertikální pohyb nahoru a dolů.

Obrázek 23: Základní pohyby letu kvadrokoptéry (vlevo) a pohyb throttle (vpravo)



Zdroj: <https://www.touringmachine.com> a <https://www.robotlink.com/>

⁵ *Throttle* – v překladu škrcení, zde ve významu „škrcení“ otáček motoru a omezování jeho výkonu.

Zdvih (úhel ϕ) umožňuje stroji stoupat nebo klesat, naklonění pak pohyb do stran (úhel ω). Důležitým pohybem pro snímání objektu, například při metodě *oblique*, je pohyb otočení (úhel κ), což umožňuje dronu otočit se okolo vlastní osy o 360°. Tyto úhly mohou být vyjádřeny v intervalu od -180° do 180°. Pokud je kamera integrovaná s dronem lze tyto pohyby aplikovat i na kameru. Pokud je úhel ϕ 0°, potom kamera směřuje kolmo k zemi (nadir), úhel ω je při dispozici gimbalu vždy 0°. Pokud je úhel κ například 180° a úhel ϕ 0°, kamera směřuje na jih a kolmo k zemi (Skylinesoft 2018).

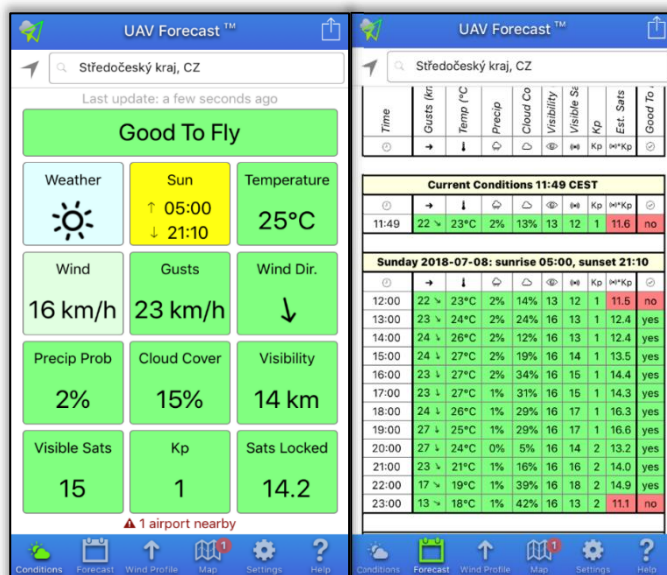
Kromě těchto pohybů, jejichž kombinací dokážeme manipulovat se zařízením ve 3D prostoru, jsou důležité i vrtule motoru a jejich tvar. Jejich působení dokáže přeměnit rotační pohyb na tah a naopak. Opačnými pohyby je možno vytvořit vztlak a podtlak a letoun je tak schopen se pohybovat ve vzduchu (Karas, Tichý 2016).

4.4 Letová mise

Před samotným snímáním bylo kromě výběru objektu nutné zajistit i dané území a vzít v úvahu i aktuální stav meteorologických podmínek. Podle funkce BRDF zmíněné v kapitole 3.3 je zřejmé, že nejvhodnější dobou k létání je právě poledne, kdy jsou paprsky slunce kolmé k zemi a neodrážejí se do kamery. Minimální je i tvorba stínů, které by mohly znehodnotit snímky.

Ke zjištění stavu aktuálního počasí byla použita aplikace *UAV Forecast*, specifická pro let dronů. Aplikace na základě polohy znázorňuje veškeré prvky, které je nutné vzít v úvahu – směr a rychlost větru, oblačnost, viditelnost nebo počet dostupných satelitů. Na **Obrázku 24** je v aplikaci zobrazen meteorologický stav před samotným měřením, kdy nebylo vhodné létat v poledne, kvůli nízké dostupnosti satelitů. Proto let započal ve 13 hodin.

Obrázek 24: Podmínky pro let na daném území podle aplikace UAV Forecast



Zdroj: UAV Forecast

Druhou fází přípravy je zajištění bezpečnosti. To znamená ověření osídlení v dopadové zóně a kontrola nebezpečných prvků pro samotný let (například elektrické vedení). Pomocí aplikace *Flightradar24* je zkontrolována i poloha možných letadel v blízkém okolí. Po bezpečnosti je na řadě kontrola a příprava samotného zařízení. Prvotní je stav dronu, poté dobytí všech baterií, ovladače i použitého smartphonu. Dále stav vrtulek, kamery, gimbalu a dalších součástí.

Poslední fází před vzletem bylo připojení stroje k GPS, to probíhá automaticky. Ručně se kalibroval kompas a IMU systém, kompas otočením dronu okolo své vertikální a horizontální osy. IMU (gyroskop a akcelerátor) polohováním dronu v pěti různých směrech. Během kalibrace je důležité vyhnout se feromagnetickým předmětům a objektům. V případě manuálního letu lze provést i kalibraci ovladače pro velmi přesnou manipulaci. V **Tabulce 7** jsou zobrazeny funkce, které aplikace pro sběr dat ověřuje těsně před vzletem pro správnou kompatibilitu SW s dronem.

Tabulka 7: Automatická kontrola správné kompatibility dronu s aplikací

Připojení k dronu	Připojení dronu k dálkovému ovladači (wi-fi, usb)
Úroveň baterie	Ověření, že úroveň baterie a ovladače je alespoň 20 %
GPS	Připojení dronu k alespoň 6 satelitům
Načtení mise	Ověření připojení dronu k aplikaci a úspěšně nahrání mise do UAS
Bodová vzdálenost	Vzdálenost mezi pozicí dronu a středem mise je méně než 250 m.
Bod vzletu	Vzdálenost mezi bodem vzletu a středem mise je méně než 150 m.
Spínač	Ověření správné polohy spínače k možnému autopilotu
Připojení ke stanici	Připojení dronu k aplikaci
Kalibrace	Ověření kalibrace dronu
Poslední firmware	Ověření nejaktuálnějšího firmwaru

Zdroj: vlastní zpracování

4.4.1 Snímkování

Letová mise vychází z míry detailu GSD, která byla předem stanovena na 1 cm/pxl, kdy jeden pixel zobrazuje jeden cm na zemském povrchu (kapitola 3.6.2) s rozměry snímku 4000 x 3000 pixelů. Hodnota konstanty komory se musí přepočítat podle tzv. *crop faktoru*⁶. Pro velikost senzoru (1/2.3") je koeficient 5,6, což vykazuje reálnou ohniskovou vzdálenost 4,64 mm. Výsledná výška je poté 30,1 metrů. Pro získání míry detailu 1 cm/pxl se v tomto případě musí kalkulovat s letovou hladinou 30 metrů. Při splnění této letové výšky lze očekávat dosažení požadované míry detailu se skutečnou mírou snímků 40 x 30 metrů. Pro tvorbu 3D modelu byla aplikována metoda *nadir* i *oblique*. Celkově proběhly tři lety – jedno kolmé pokrytí a dva kruhové lety v odlišných hladinách.

⁶ Koeficient, kterým se přepočítá F_r , aby měl objektiv se stejným zorným úhlem na kinofilmovém fotoaparátu.

I když Srnský (2017) doporučuje kolmé překrytí 85 % pro p snímky a 70 % pro q snímky, byla metoda *Nadir* nastavena s lehce větším překryvem, a to 90 % a 80 %. Tento hustý pokryv by měl být dostatečný pro sběr potřebných dat. Kapitola 3.6.4 popisuje výpočet pro určení intervalu snímkování. Nejdříve bylo potřeba vypočítat vzdálenost pokrytého povrchu jedním snímkem ve směru letu a poté vzdálenost kamery mezi dvěma snímky ve směru letu. Při podélném 90% překrytí je pohyb kamery mezi dvěma snímky 4 m. Při rychlosti 2 m/s, která byla určena pro co nejplynulejší let, zachytila kamera snímek každé 2 s. Během tohoto letu byla nutné vyřešit problém. Dron se těsně před dokončením snímání začal vracet na místo vzletu. Řešením bylo nahrazení chybějících snímků manuálním letem.

Kapitola 3.6.2 popisuje rozdílné rozlišení budovy vzhledem k nízké letové dráze k povrchu budovy na rozdíl od celého objektu. Proto bylo důležité dbát na důkladné překrytí snímků kruhovou metodou. Při 3D modelaci se doporučuje kruhový oblet dvakrát pod jiným úhlem. Společnost *DroneDeploy* (2018) doporučuje při vysokých objektech dokonce tři až čtyři kruhové oblety. V tomto případě byl proveden jeden let ve 30 m a druhý let v poloviční výšce 15 m. Pro ověření důležitosti tohoto snímkování byly vytvořeny 3D modely s odlišnými intervaly kruhového letu mezi snímky (4°, 12° a 20°) (viz **Obrázek 25**).

Obrázek 25: Různé intervaly metody oblique, zleva – 20°, 12°, 4°.



Zdroj: vlastní zpracování

Z modelů je patrné, že interval po 20° je nedostačující. Model vytvořený s intervalem 12° odpovídá realitě. Nicméně nelze přehlédnout nekvalitní detaily – špatně vykreslené okenice nebo linie střechy. Obecná hranice úhlu snímání se v tomto případě nedá určit, vzhledem k odlišné potřebě počtu snímků v závislosti na velikosti modelovaného objektu. Nejspolehlivější zpracování bylo s úhlem po 4°. Kvalitní zpracování modelu lze ale předpokládat i při intervalu snímání po 8°.

Důležitým prvkem pořízených dat jsou tzv. EXIF data, které přiřazují hodnoty určitých parametrů (úhly pohybu os *pitch*, *roll*, *yaw*) k daným snímkům. Souřadnice jsou v systému WGS 84, proto bylo vhodné je georeferencovat do místního souřadnicového systému.

4.4.2 Zaměření vlčovacíh a kontrolních bodů

Spolu s vlčovacími body byly zaměřeny i kontrolní body. Zaměření proběhlo pomocí dvoufrekvenčního RTK (*real time kinematic*) GPS přístroje Trimble R10 s přesností na 0,02 m. Před měřením se přístroj připojil na nejbližší kontrolní stanici, pražskou CPRG. Velikost terčů byla v rozmezí okolo 50 cm. Zaměřeno bylo šest vlčovacíh bodů a čtyři kontrolní body. Pro větší viditelnost terčů byl použit fluorescentní oranžový sprej (viz **Obrázek 26** a **Obrázek 27**).

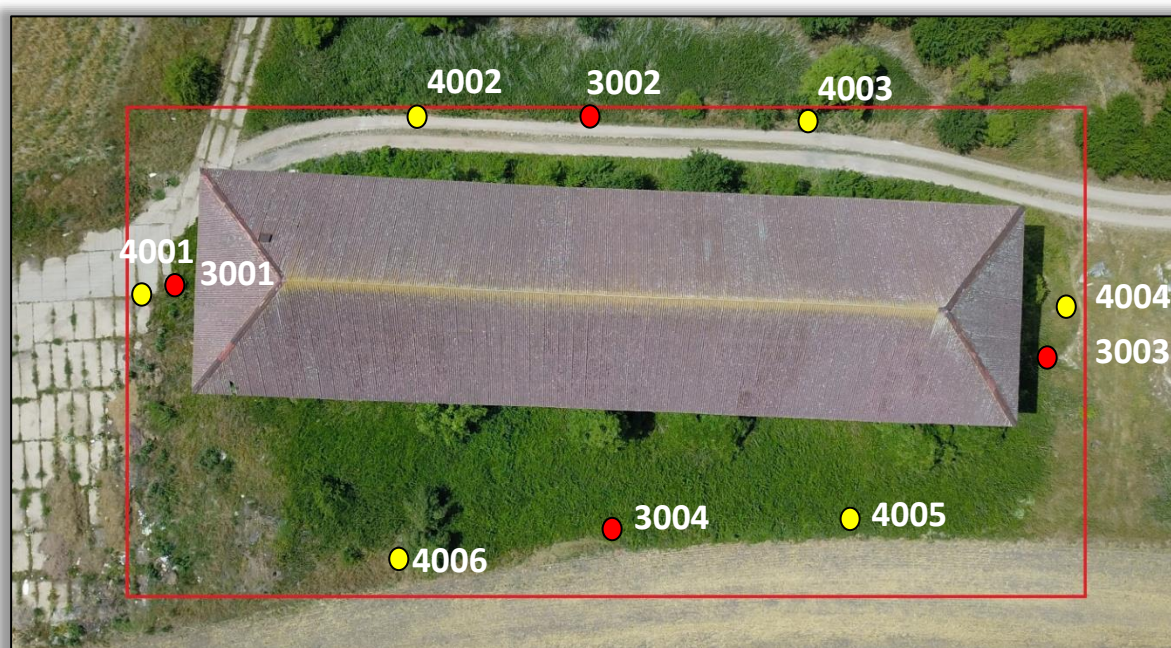
Obrázek 26 a 27: Terče použité v terénu – vlčovací bod (vlevo) a kontrolní bod (vpravo)



Zdroj: vlastní zpracování

Snahou bylo rozdělit vlčovací a kontrolní body pravidelně, což je patrné z **Obrázku 28**. Celkem bylo zaměřeno 10 bodů. Čtyři vlčovací body (žluté) byly rozmístěné po obou dlouhých stranách budovy a dva po stranách kratších. Následně pak byl umístěn jeden kontrolní bod (červený) na každé straně budovy.

Obrázek 28: Rozmístění vlčovacíh a kontrolních bodů v zájmovém území z výšky 70 m.



Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 8 zobrazuje zaměřené vlíčovací a kontrolní body v terénu. Souřadnice zaměřených bodů jsou v souřadnicovém systému S-JTSK, BpV.

Tabulka 8: Naměřené souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů

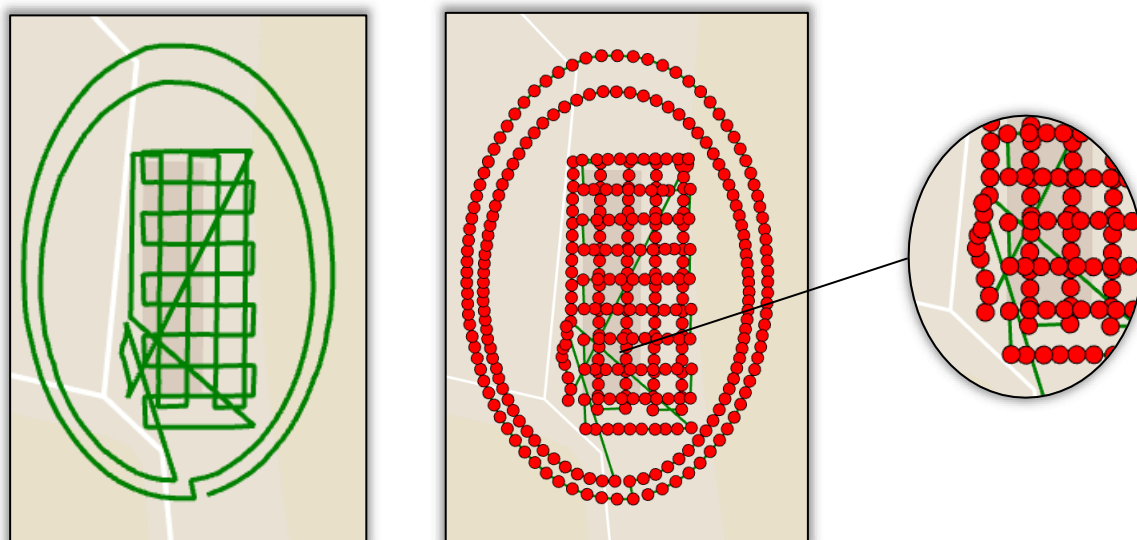
	souřadnice X [m]	souřadnice Y [m]	souřadnice Z [m.n.m]
GCP3001	1043641.164	713017.155	211.097
GCP3002	1043611.480	713028.291	210.357
GCP3003	1043576.675	713007.251	210.138
GCP3004	1043611.419	712996.014	211.005
GCP4001	1043645.542	713017.529	211.248
GCP4002	1043622.993	713029.952	210.726
GCP4003	1043595.322	713026.141	209.932
GCP4004	1043574.171	713009.007	209.951
GCP4005	1043595.985	712995.167	210.886
GCP4006	1043628.054	712995.488	211.231

Zdroj: vlastní zpracování

4.4.3 Sběr dat

Problém, který se vyskytl při snímkování metody nadir, byl vyřešen. (viz kapitola 4.4.1). Zájmové území bylo nasnímané podle plánu. Na následujících **Obrázcích 29 a 30** je zobrazena trajektorie letu a jednotlivé polohy snímků. Z obrázků je patrný ruční let oproti předem nastavené autonomní misi. Manuální let by vzhledem k hustému pokrytí snímkování neměl mít na tvorbu modelu vliv.

Obrázek 29 a 30: Trajektorie dronu během mise (vlevo), polohy pořízených snímků (vpravo)



Zdroj: vlastní zpracování

V **Tabulce 9** jsou zobrazeny základní parametry pro každý typ letu. *Letová hladina* byla po vypočítání teoretické GSD nastavena na 30 metrů. V druhém kruhovém snímání let proběhl v polovičních 15metrech. *Úhel kamery* byl v případě kolmého snímání 0°, při prvním kruhovém obletu 45° a při druhém 30°. Dále je v **Tabulce 9** zobrazen *interval snímání*, který je nastaven pro dostatečné překrytí objektu. Je zde i kategorie *rychlost letu*, která byla ve všech případech 2 m/s. Znázorněn je i čas jednotlivých letů a počet snímků. Neočekávaný počet snímků u metody *nadir* (207) je ovlivněn manuálním letem, u metody *oblique* je dán intervalem 4° (90). Celkem bylo nasnímáno 387 snímků.

Tabulka 9: Parametry letové mise

	Nadir	Oblique	
Letová hladina [m]	30	30	15
Úhel kamery	0°	45°	30°
Interval snímání	90 % x 80 %	4°	4°
Rychlost letu [m/s]	2	2	2
Doba letu [s]	780	400	394
Počet snímků	207	90	90

Zdroj: vlastní zpracování

Na **Obrázku 31** je ukázán protokol několika pořízených snímků. Zobrazena je nadmořská výška, zeměpisná šířka a délka, horizontální a vertikální přesnost a úhly základních pohybů, zmiňované v kapitole 4.3.2.

Obrázek 31: Protokol pořízených snímků

Enabled	Image	Group	Latitude [degree]	Longitude [degree]	Altitude [m]	Accuracy Horz [m]	Accuracy Vert [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0216.JPG	group1	50.11817919	14.83538378	190.197	5.000	10.000	-9.99898	0.14348	179.18623
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0217.JPG	group1	50.11815025	14.83538164	190.297	5.000	10.000	-9.99872	0.16085	179.08774
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0218.JPG	group1	50.11812596	14.83538214	190.197	5.000	10.000	-9.99872	0.16085	179.08774
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0219.JPG	group1	50.11810008	14.83538125	190.197	5.000	10.000	-9.99843	0.17821	178.98927
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0220.JPG	group1	50.11807406	14.83538133	190.297	5.000	10.000	-9.99872	0.16085	179.08774
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0221.JPG	group1	50.11804706	14.83538094	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0222.JPG	group1	50.11802058	14.83538039	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0223.JPG	group1	50.11799467	14.83537997	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0224.JPG	group1	50.11796808	14.83537953	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0225.JPG	group1	50.11794194	14.83537903	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0226.JPG	group1	50.11791536	14.83537892	190.197	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0227.JPG	group1	50.11788883	14.83537856	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0228.JPG	group1	50.11786242	14.83537778	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0229.JPG	group1	50.11783633	14.83537722	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0230.JPG	group1	50.11780983	14.83537728	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0231.JPG	group1	50.11778350	14.83537656	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0232.JPG	group1	50.11775694	14.83537614	190.297	5.000	10.000	-9.99811	0.19557	178.89078

Zdroj: vlastní zpracování

5. TVORBA 3D MODELŮ

Tato kapitola popisuje zpracování modelů ve všech softwarech, které byly vybrány na základě analýzy v teoretické části. Softwary jsou v závěru kapitoly porovnány z několika hledisek, a to i podle přesnosti zpracovaných modelů. Jedním z hlavních faktorů pro výběr těchto softwarů byla plnohodnotná zkušební verze. Dále byl kladen důraz na podporu, zejména na uživatelskou komunitu a různé tutoriály. V neposlední řadě se bralo v úvahu i časté recenzování v domácích i zahraničních výzkumech v tomto oboru.

Referenčním softwarem byl zvolen *Photoscan* od firmy Agisoft. Dalšími vybranými software, ve kterých byl model zpracován jsou Pix4D a 3DSurvey. V rámci výzkumu je zajímavé porovnat i cloudového uložště s robustními software. Proto jsou data zpracovaná i skrze uložště Altizur a DroneDeploy.

Pro porovnání vytvořených modelů byl v závěrečné práci použit volně dostupný software *Cloud Compare*. Tento software dokáže ze dvou na sebe přiložených mračen vypočítat rozdílový rastr.

S dnešními technologickými možnostmi je možné vytvořit 3D model i pomocí chytrých mobilů. V rámci tohoto výzkumu byla otestována aplikace společnosti *Altizur*, která zpracování dat přes mobilní telefon umožňuje. Platforma *Altizur*, která je dostupná i na stránkách, vyžaduje pro možnost použití pouze vytvoření účtu a jeho následnou verifikaci. Po importování snímků na cloudové uložště trvalo zhruba dvě hodiny vytvořit daný model. Použití limitované verze umožňovalo nahrát pouze 300 snímků na toto uložště. I přesto výsledný model splňuje požadovanou GSD, a to 1 cm/pxl (viz **Obrázek 32**). Dalším otestovaným cloudovým uložštěm byl populární *DroneDeploy*. Míra detailu byla omezená zkušební verzí na 5 cm/pxl. Na **Obrázku 33** si lze povšimnout nedokonalého zpracování modelu, například u okenic či přebytečné střešní struktury.

Obrázek 32 a 33: 3D výstup skrze mobilní aplikaci Altizur (vlevo) a uložště DroneDeploy (vpravo)



Zdroj: vlastní zpracování

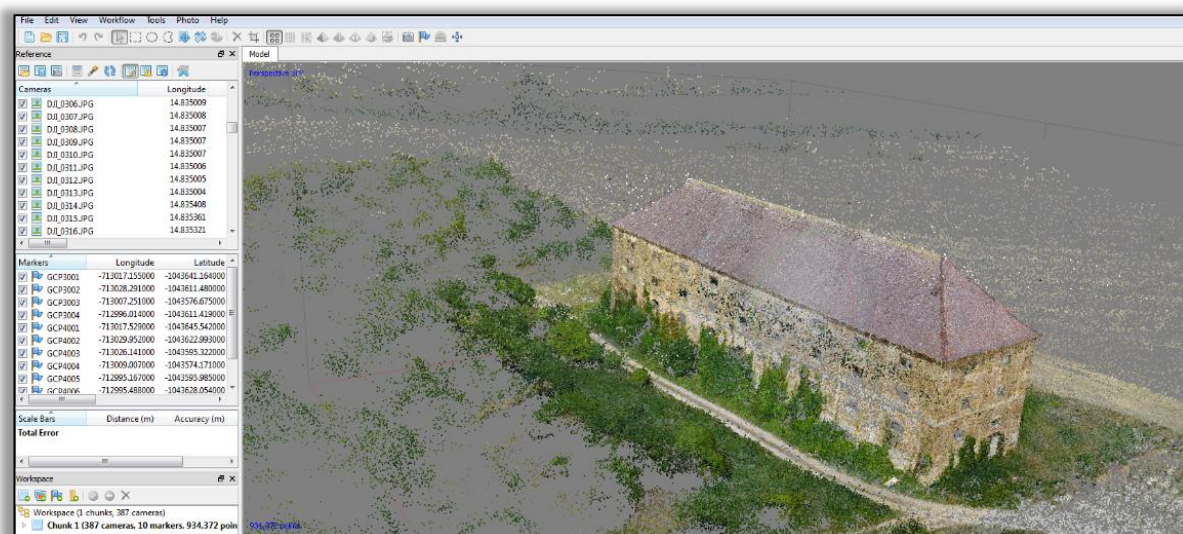
5.1 Zpracování dat v prostředí Photoscan

Pro zpracování projektu byl původně použit software na školním počítači. Zde bylo zjištěno, že starší verze *Photoscanu* nepodporuje funkci *rolling shutter*⁷ a je zde větší pravděpodobnost výsledné odchylky. Pro lepší porovnání s ostatními softwary byla stažena trial verze 1.4, kde lze funkci *compensation rolling shutter* zvolit.

Prvním krokem bylo vytvoření tzv. *Chunk*, kam se importovaly všechny snímky. Pro jejich zpracování se určila jejich orientace. K tomuto účelu slouží funkce *Align Photos*.

Důležité bylo vybrat způsob jakým budou nalezeny překrývající se páry snímků. V rozbalovacím okně pro parametr *Pair preselection* se definuje možnost výběru dvojic snímků k následnému vyhodnocení. Lze vybrat jednu nebo obojí z možností *Generic a Reference*. Pokud je pozice kamery neznáma, použije se *Generic preselection*. V tomto případě se vybrala funkce *Reference preselection*, jelikož dataset obsahuje EXIF data, v němž jsou pozice snímků definovány. Pro rychlejší zpracování se nabízí možnost nastavit limit klíčových a vázacích bodů. Poté vzniklo zjednodušené bodové mračno zobrazené na **Obrázku 34**.

Obrázek 34: Zjednodušené bodové mračno po orientaci snímků

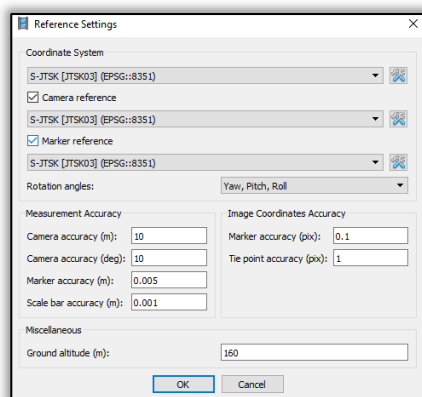


Zdroj: vlastní zpracování

Poté byl naimportován soubor s vlčovacími body a definoval se souřadnicový systém. Do pole *Ground altitude* byla vyplněna maximální letová hladina, odečtená od průměrné nadmořské výšky snímků (viz **Obrázek 35**).

⁷ Efekt, jímž disponuje spousta digitálních CMOS snímačů. Snímek je zachycován postupně horizontálně nebo vertikálně, to může mít výsledný vliv především na objekty v pohybu, které jsou rozmazané.

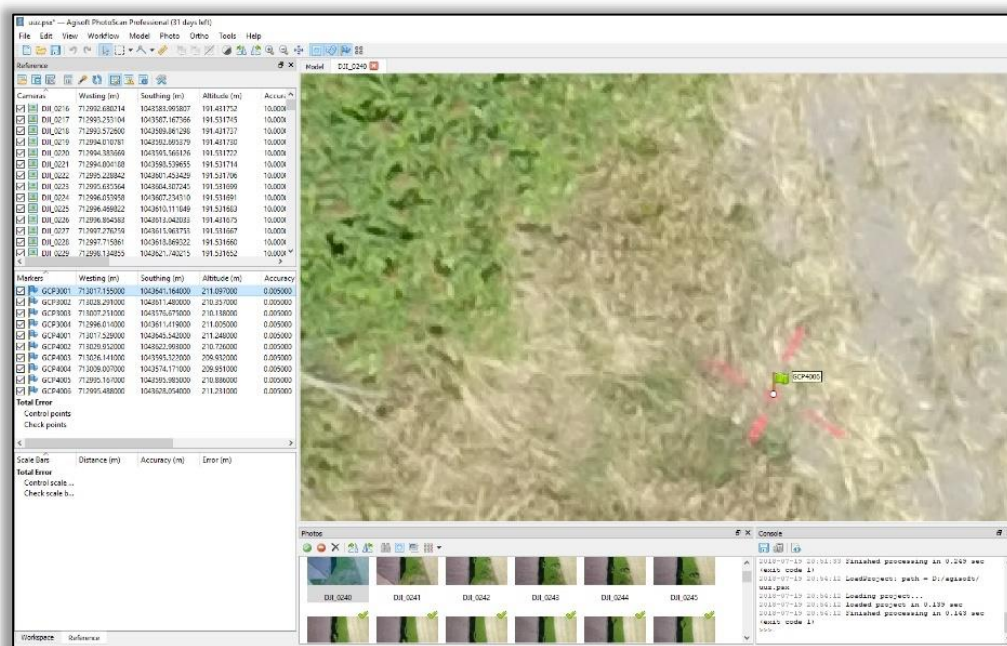
Obrázek 35: Volba souřadnicového systému



Zdroj: vlastní zpracování

Vlícovací body bylo potřeba ručně zpřesnit. Body byly dobře identifikovány v terénu, což je patrné z **Obrázku 36**. Následně se odškrtnuly kontrolní body. Dalším krokem byla optimalizace snímků (funkce *Optimize Photo Alignment*) pro dosažení větší přesnosti prvků vnitřní a vnější orientace. To se provedlo podle naimportovaných vlícovacích bodů.

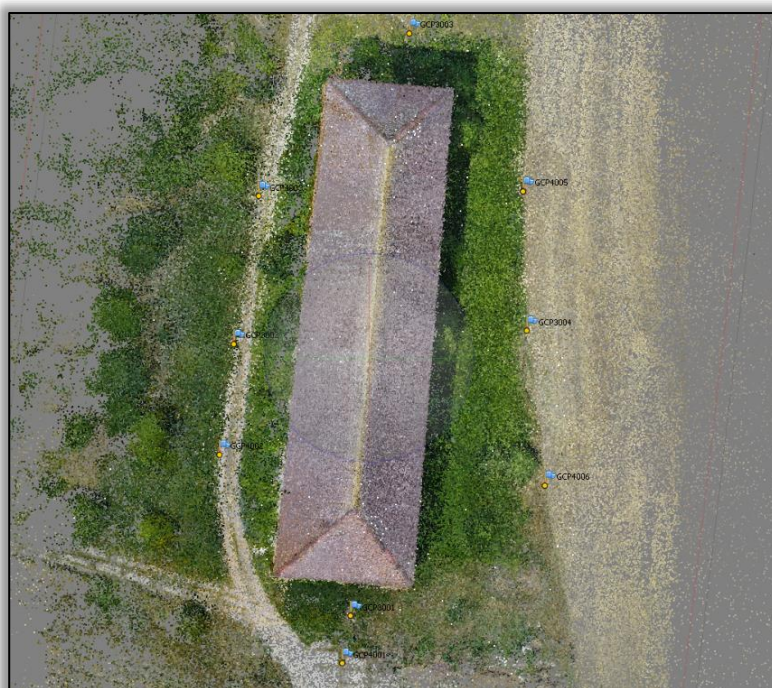
Obrázek 36: Identifikace vlícovacích a kontrolních bodů



Zdroj: vlastní zpracování

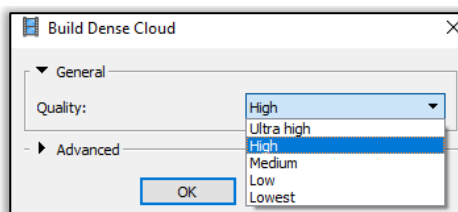
Na **Obrázku 37** je vidět rozmístění vlícovacích bodů jako ve skutečnosti (**Obrázek 25**). Poté bylo vytvořilo husté bodové mračno, pomocí funkce *build dense cloud* v záložce *workflow*. Míra kvality byla zvolena *High* (viz **Obrázek 38**). Možnost *Ultrahigh* nebyla vzhledem k množství snímků použita, zároveň bylo vhodné vytvořit stejnou úroveň kvality ve všech softwarech. Nižší výběr kvality se doporučuje při málo výkonných sestavách, protože tento proces je časově nejnáročnější.

Obrázek 37: Rozmístění vřícovacích a kontrolních bodů



Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 38: Výběr kvality bodového mračka



Zdroj: vlastní zpracování

Po tomto kroku byla použita funkce *build mesh*, která vytvořila síť budovy. Následně bylo možné exportovat výsledný protokol, zobrazující parametry zpracování, odchylky vřícovacích bodů, výsledné GSD a projekční chybu. Výsledný model je zobrazen na **Obrázku 39**, detail je přiložen v Příloze 5, 6 a 7.

Obrázek 39: Model z prostředí Agisoft Photoscan

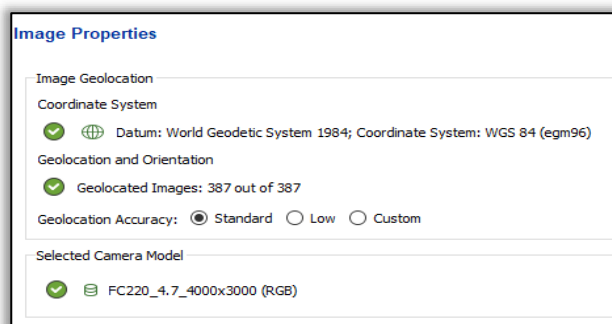


Zdroj: vlastní zpracování

5.2 Zpracování dat v prostředí Pix4D

Prvním krokem bylo vytvoření nového projektu s výběrem souřadnicového systému a kartografického zobrazení. (viz **Obrázek 40**). Poté byly naimportovány snímky v souřadnicovém systému WGS 84 a s prvky vnější orientace. Byla definována i použitá kamera. Pro nej přesnější zpracování byla vybrána možnost standart 3D model, která je sice pomalejší, ale zachovává původní rozlišení snímků. Naopak je mnohonásobně rychlejší metoda *Rapid* pracuje až s 16x menším množstvím *Key points*.

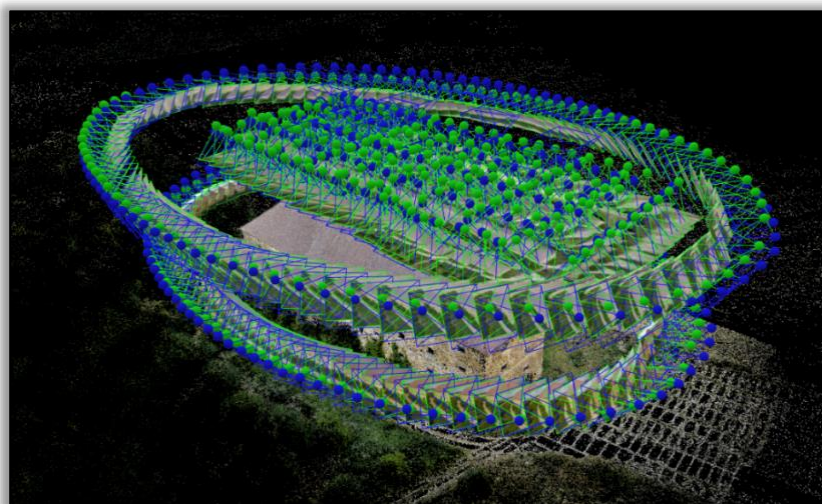
Obrázek 40: Výběr souřadnicového systému [Pix4D]



Zdroj: Pix4D

Zpracování dat bylo zahájeno procesem inicializace, ve kterém probíhá digitální AAT metodou BBA. To se provedlo ve čtyřech krocích. Prvním byla extrakce klíčových bodů, poté protnutí klíčových bodů, optimalizace kamery a na závěr lokalizace modelu v prostoru. Na **Obrázku 41** je zobrazena inicializace kamer v prostoru, kde je patrná letová mise dronu.

Obrázek 41: Inicializace kamer [Pix4D]



Zdroj: vlastní zpracování

Po tomto kroku byla potřeba nahrát vlíčovací body, které byly nejprve transformovány do souřadnicového systému S-JTSK. Pro upřesnění bylo potřeba tyto body ručně přiřadit k signalizovaným bodům. Nutností bylo přiřadit body alespoň ke dvěma snímkům, ideálně však ke třem až osmi (Pix4D). V tomto případě byl každý GCP ručně přiřazen k osmi snímkům. Předem určené kontrolní body byly označily jako *check points*. Ruční přiřazení vlíčovacích bodů je zobrazeno na **Obrázku 42**.

Obrázek 42: Identifikace vlíčovacích a kontrolních bodů [Pix4D]

Label	Type	X [m]	Y [m]	Z [m]	Accuracy Horz [m]	Accuracy Vert [m]
5 GCP3001	Check Point	-713017.155	-1043641.164	211.097		
0 GCP3002	Check Point	-713028.291	-1043611.480	210.357		
0 GCP3003	Check Point	-713007.251	-1043576.675	210.138		
0 GCP3004	Check Point	-712996.014	-1043611.419	211.005		
0 GCP4001	3D GCP	-713017.529	-1043645.542	211.248	0.020	0.020
0 GCP4002	3D GCP	-713029.952	-1043622.993	210.726	0.020	0.020
0 GCP4003	3D GCP	-713026.141	-1043595.322	209.932	0.020	0.020
0 GCP4004	3D GCP	-713009.007	-1043574.171	209.951	0.020	0.020
0 GCP4005	3D GCP	-712995.167	-1043595.985	210.886	0.020	0.020

Zdroj: vlastní zpracování

Před posledním krokem, který vytvoří síť modelu, bylo zapotřebí odstranit přebytečné body z bodového mračna. Ty by mohly vytvořit nežádoucí strukturu. Tento krok se provedl v záložce *ray cloud* nástrojem *edit densified point cloud*, pomocí tvorby polygonů. Na **Obrázku 43** jsou zobrazeny vybrané body, které se smazaly.

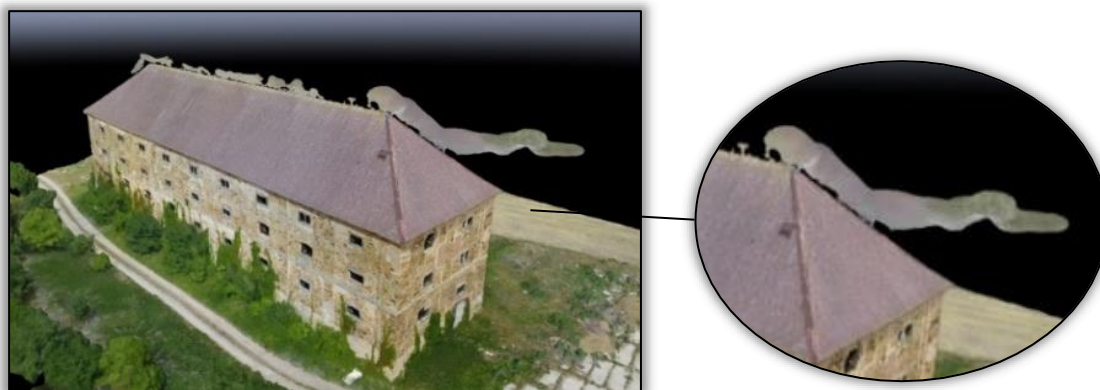
Obrázek 43: Ruční editace přebytečného (červeného) bodového mračna



Zdroj: vlastní zpracování

Výstup bez ruční editace je zobrazen na **Obrázku 44**. Zde model obsahuje nežádoucí struktury nad střešním krytem, příčinou může být až příliš hustý pokryv snímků metody *nadir*, kdy software zpracovává velké množství bodů na malém území.

Obrázek 44: Výsledný model bez editace bodového mračna



Zdroj: vlastní zpracování

Druhý krok, *Point cloud and mesh*, vytvořil bodové mračno a síť modelu. 3D model z prostředí Pix4D po editaci ručních bodů je zobrazen na **Obrázku 45**. Detailnější zobrazení modelu je v *Přílohách 5, 6, a 7*.

Obrázek 45: Model z prostředí Pix4D



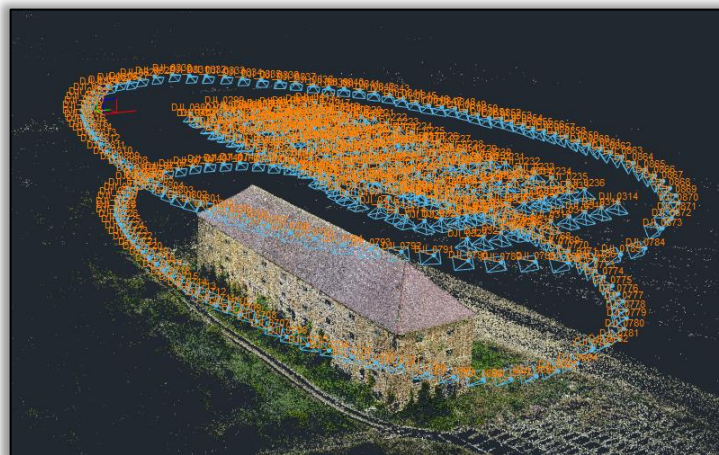
Zdroj: vlastní zpracování

Stejně jako v softwaru Photoscan je po zpracování výstupu k dispozici výsledný protokol se všemi informacemi. Zde je zobrazena dosažená hodnota GSD, chyba projekce, množství zpracovaných Key points, množství vytvořených Tie points či odchylka zaměřených vlíčovacích bodů. Odchylka vlíčovacích bodů ze všech SW je dále zobrazena v **Tabulce 10** v podkapitole 5.4.

5.3 Zpracování dat v prostředí 3DSurvey

Tvorba výstupu ve 3DSurvey se skládá ze tří hlavních kroků. Prvním je *Bundle block adjustment*, ve kterém algoritmus provede digitální aerotriangulaci. Identifikuje *Key points* a shodné *Tie points* a inicializuje jednotlivé snímky v prostoru. Poté vzniká zjednodušené bodové mračno, které je vidět na **Obrázku 46**.

Obrázek 46: Inicializace kamer



Zdroj: vlastní zpracování

Druhý krok *orientation* slouží pouze pro georeferenci vlíčovacích a kontrolních bodů, které se stejně jako u předešlých programů nahrají a ručně zpřesní na střed terčů. Tento program prochází stále vývojem a poslední verze nemá dostupný souřadnicový systém S-JTSK. Proto byly vlíčovací body nahrány v systému WGS84. Vlícovací body byly ručně zpřesněny na třech snímcích a poté program automaticky detektoval správnou polohu těchto bodů. Stejně jako v předešlých softwarech bylo potřeba oddělit kontrolní body od vlíčovacích. Kontrolní body byly označeny jako *validation points*. Ruční upřesnění vlíčovacích a kontrolních bodů je patrné z **Obrázku 47**.

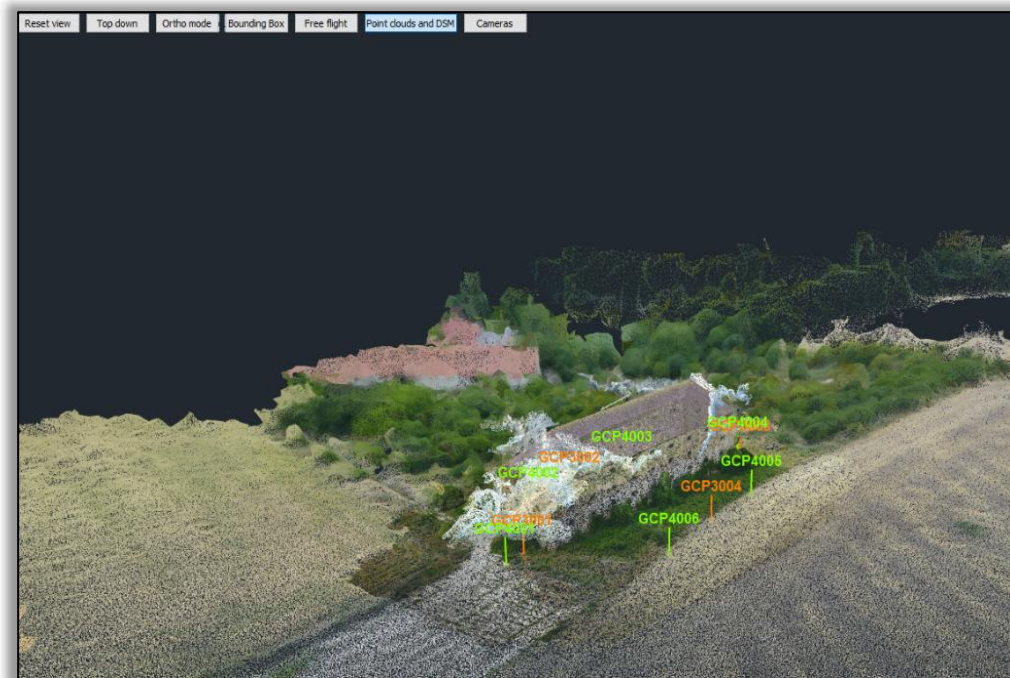
Obrázek 47: Ruční upřesnění vlíčovacích bodů



Zdroj: vlastní zpracování

Druhý krok je zpracován téměř okamžitě a následuje poslední krok – *construction*, ve kterém se vytvoří husté bodové mračno (**Obrázek 48**) a orientuje se model v prostoru. Proto je tento proces časově nejnáročnější.

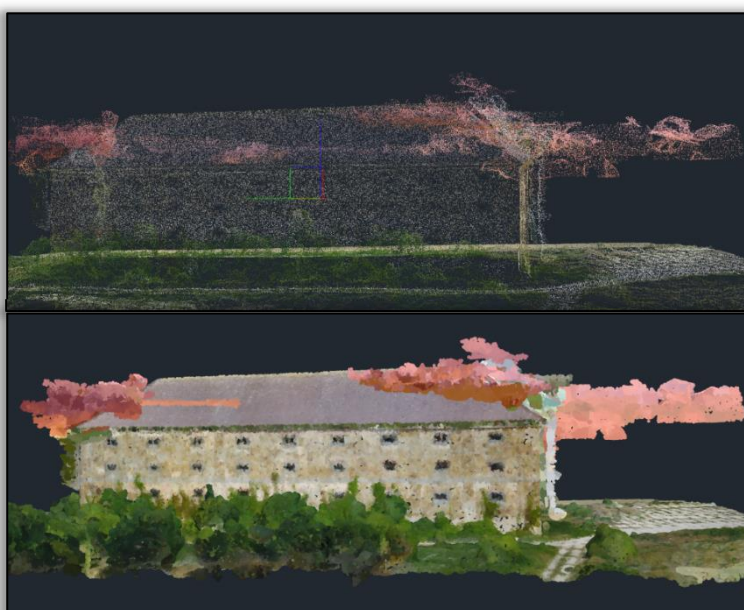
Obrázek 48: Husté bodové mračno



Zdroj: vlastní zpracování

Následně lze provádět veškeré funkce pro editaci modelu. Například úprava bodového mračna na základě klasifikace (vegetace, budovy), ořez území (praktická funkce *matching box*), tvorba digitálního povrchu, textury nebo výpočet vzdáleností. Velmi užitečnou funkcí se ukázalo zvětšení pixelů pro lepší editaci bodového mračna, které je zobrazené na **Obrázku 49**.

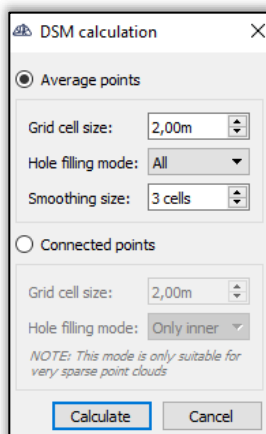
Obrázek 49: Funkce zvětšení pixelů pro lepší editaci bodového mračna



Zdroj: vlastní zpracování

Digitální model povrchu (textura), z anglického *Digital Surface Model* (DSM) lze vytvořit na základě dvou parametrů, které jsou zobrazeny na **Obrázku 50**. Ty byly nastaveny podle oficiálního manuálu. Pomocí funkce *DSM calculation* byla modelu přidána textura.

Obrázek 50: Nastavení parametrů pro vytvoření DSM



Zdroj: vlastní zpracování

Pro vygenerování výsledného protokolu je potřeba vytvořit bodové mračno, digitální model povrchu a ortofotomapu. Výsledný model je zobrazen na **Obrázku 51**. Větší detailnost je vidět v Příloze 5, 6 a 7.

Obrázek 51: Výsledny model z prostředí 3DSurvey



Zdroj: vlastní zpracování

5.4 Hodnocení přesnosti

Přesnost jednotlivých modelů byla zhodnocena statistickou metodou střední kvadratické chyby RMS (z anglického *root mean square*) souřadnic X, Y, Z. Výchozí hodnotou je polohová chyba souřadnic XY a celková prostorová chyba XYZ.

Každý SW vygeneroval zprávu s odchylkou v jednotlivých souřadnicích všech zaměřených vlíčovacích bodů. Odchylna těchto bodů je ověřena pomocí kontrolních bodů, které byly předem označeny. Z těchto odchylek byla vypočítána RMS_X , RMS_Y , RMS_Z . Po odmocnění součtu druhých mocnin RMS_X a RMS_Y , byla vypočítána polohová chyba – odchylka vytyčeného bodu ve vodorovné rovině. Odmocnil se i součet druhých mocnin RMS_X a RMS_Y , tím byla vypočítána prostorová chyba – stanovená z odchylek v poloze a z vertikálního směru. Výsledné odchylky v poloze a prostoru mezi jednotlivými SW jsou zobrazené v **Tabulce 10**.

Výpočet celkových skutečných chyb souřadnic X, Y, Z:

$$RMS_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad RMS_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad RMS_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Z_i - \bar{Z})^2}{n}}$$

Výpočet celkové skutečné polohové chyby:

$$RMS_{XY} = \sqrt{RMS_X^2 + RMS_Y^2}$$

Výpočet celkové skutečné chyby v prostoru:

$$RMS_{XYZ} = \sqrt{RMS_{XY}^2 + RMS_Z^2}$$

Tabulka 10: Výsledné odchylky souřadnic mezi SW

	Agisoft Photoscan	Pix4Dmapper	3DSurvey
RMS_X [cm]	4,1	3,5	3,8
RMS_Y [cm]	3,5	2,0	2,6
RMS_Z [cm]	8,6	6,8	7,2
RMS_{XY} [cm]	5,4	4,0	4,6
RMS_{XYZ} [cm]	10,2	7,9	8,6

Zdroj: vlastní zpracování

Z **Tabulky 10** je patrné, že nejmenší odchylku v poloze i v prostoru vykazují specifické softwary na zpracování UAV dat. Nejmenší celková odchylka v prostoru je v prostředí Pix4D, a to **7,9 cm**. 3DSurvey vykazuje odchylku **8,6 cm**. Naopak největší odchylku vykazuje Photoscan a to **10,2 cm**.

Výchozím předpokladem bylo dosáhnout GSD, která byla předem stanovena na 1 cm/pxl. Výsledky, které jsou zobrazené v **Tabulce 11** ukazují, že se této hodnoty podařilo dosáhnout dokonce ve všech SW, a to 0,99 cm/pxl. Dalším ukazatelem, který je porovnaný mezi softwary, je projekční chyba. To je geometrická chyba odpovídající vzdálenosti snímku mezi projekčním bodem a změřeným bodem.

Tabulka 11: Míra detailu a chyba projekce v SW

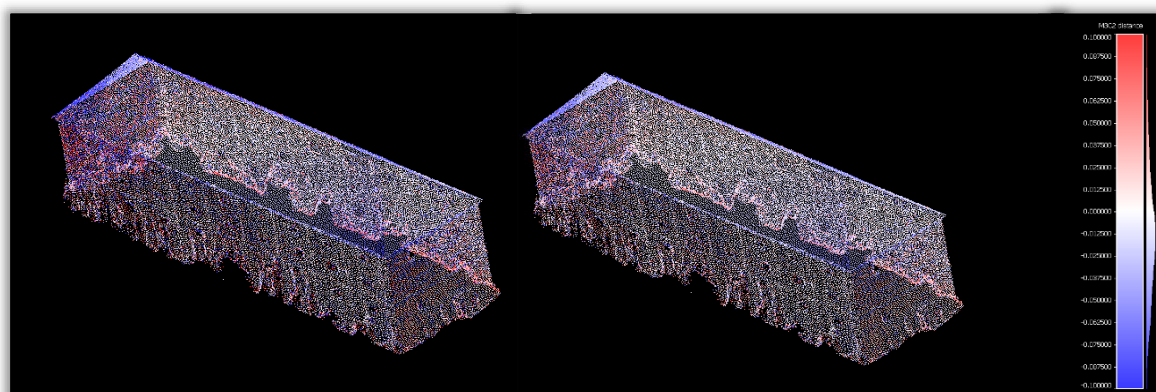
	Agisoft Photoscan	Pix4Dmapper	3DSurvey
GSD [cm/pxl]	0,99	0,99	0,99
Chyba projekce [pxl]	0,35	0,25	0,31

Zdroj: vlastní zpracování

5.5 Srovnání vybraných SW

Dále bylo provedeno porovnání obou modelů v programu *CloudCompare*. Zde bylo potřeba nejdříve modely ořezat do stejného tvaru. Poté byly oba modely pomocí čtyř spojovacích bodů ukotveny na identickém místě, což se provedlo funkcí *match bounding box-centres* a *align photos*. Následně byla vybrána funkce *M3C2*, která umožňuje rychlou analýzu hustých bodových mračen s komplexními povrchy. Modely byly porovnány s výstupem z *Photoscanu*. Výsledkem byly obarvené modely zobrazené na **Obrázku 52**, kde nalevo je porovnání s modelem 3DSurvey a vpravo s modelem z prostředí Pix4D. Bílá barva představuje shodu. Interval vzdálenosti je určen od – 10 cm (modrá barva) do 10 cm (červená).

Obrázek 52: Srovnání bodového mračna z Pix4D a 3Dsurvey s referenčním Photoscanem



Zdroj: vlastní zpracování

Dosažený výsledek ztotožnění bodových mračen v *CloudCompare* dokazuje obdobné algoritmičké zpracování SW specifických na zpracování *UAV* dat. Příčinou může být například autokalibrace kamery, která probíhá v každém softwaru na jiné bázi nebo i manuální přiřazení vlíčovacích bodů.

Vizualizace budovy byla z hlediska výpočetních operací časově náročná. Data byla zpracována na notebooku s parametry CPU: Intel(R) Core (TM) i5-7200U CPU, 2,50GHz, RAM 8 GB. Jednotlivé procesy se časově lišily, nejnáročnější byl vždy proces vytvoření hustého bodového mračna. Vytvoření celého modelu trvalo v prostředí Pix4D přibližně 24 h. O pár hodin náročnější byly v tomto ohledu Photoscan a 3DSurvey.

Na závěr jsou robustní SW, využitě v této práci, porovnány z několika hledisek. Evaluace byla provedena v rámci praktické části a je zobrazena v **Tabulce 12**. Stejně jako v **Tabulce 6** je i v **Tabulce 12** hodnocení od 1 do 3, přičemž 3 je nejvyšší. Hodnocena byla **dostupnost a trvání licence**, množství **operačních systémů**, na kterých lze SW spustit, **HW požadavky** a celková **podpora SW**, zmíněna v kapitole 3.5.4. Dále byla ohodnocena **kompatibilita formátů a množství nabízených souřadnicových systémů a funkčnost SW offline**. Mezi porovnaná kritéria patří i **stabilita** (zda má SW tendenci „kolabovat“), **přesnost**, vyhodnocena na základě výsledků v úvodu této kapitoly (**Tabulka 10 a Tabulka 11**) a **rychlost zpracování** modelu. Ve srovnání byly zhodnoceny i vlastnosti SW jako orientace a intuitivnost **rozhraní, náročnost osvojení** SW uživatelem i **vliv uživatele** ve významu možnosti zásahu do procesů. Dále byly hodnoceny funkce SW jako **podpora kamery, práce s vlíčovacími body** a také obecná **funkcionalita**.

Tabulka 12: Evaluace využitých SW

	Agisoft Photoscan	Pix4Dmapper	3DSurvey
Licence	2	2	3
Operační systém	3	3	1
HW požadavky	1	2	3
Podpora SW	2	3	2
Kompatibilita formátů	3	2	1
Dostupnost souř. sys.	3	3	2
Funkčnost offline	3	3	1
Stabilita	3	3	2
Přesnost	1	3	2
Rychlost zpracování	2	3	2
Rozhraní	2	3	2
Jednoduchost osvojení	1	3	2
Vliv uživatele	3	1	2
Funkcionalita	3	1	2
Práce s GCP	3	2	3
Podpora kamery	2	3	2
Celkem	37	40	32

Zdroj: vlastní zpracování

PhotoScan je velmi flexibilní nástroj a současně má pro pokročilé uživatele velké množství možností. Mezi hlavní přednosti patří funkcionalita nebo podrobné oficiální manuály pro začátečníky. Výhodou je i široká kompatibilita formátů. *Photoscan* má k dispozici mnoho konfigurací, které mohou zkušenějšímu uživateli usnadnit dosažení přijatelných výsledků i při horších vstupních datech, především při práci s bodovým mračnem. Skvělá podpora softwaru je zřejmá i ze strany uživatelů nacházející se na sociálních sítích. Naopak osvojení širších funkcí je náročnější. Program navíc vyžaduje poměrně silnou hardwarovou vybavenost a zpracování vyžaduje delší čas. Nevýhodou je i nerozdělení scén, kdy při větším rozsahu je uživatel upozorněn až po několika krocích a musí se začít od začátku.

Pix4D je jedním z nejpobulárnějších SW pro zpracování UAV dat mezi běžnými uživateli i odbornou veřejností. Hlavními přednostmi jsou vysoce automatizovaná výpočetní technika, uživatelsky přívětivé, intuitivní rozhraní, podpora širokého spektra fotoaparátů, včetně 360°, videa a vlastní cloudová (limitovaná) služba. Velmi zdařilou vlastností je vysoká podpora jak od běžných uživatelů, tak ze strany společnosti v podobě videotutoriálů. *Pix4D* v rámci této práce vykazuje nejpřesnější výsledky. Jak nevýhodnou může být malá možnost zásahu uživatele do procesu zpracování, omezená tvorba modelu a editace výsledných výstupů. Cena licence je navíc v rámci trhu dražší než cena licence většiny ostatních softwarů.

3DSurvey se snadno ovládá a má velkou sadu nástrojů. Výhodou je praktická práce s GCP body, stačí vyhledat tři body a SW vyhledá ostatní body automaticky. Velmi zdařilými funkcemi je *matching box* a funkce zhuštění bodů pro editaci bodového mračna. Kromě trial verze je zdarma dostupná i roční licence pro studenty. Nevýhodou je nutnost připojení k síti při spuštění projektu a větší časová náročnost zpracování. Dále je nutné uvést typ bezpilotního prostředku, bez kterého SW nedokáže pracovat. Další nevýhodou je nízká stabilita SW. Projekt se několikrát zastavil nebo dokonce „zhroutil“. Nepříliš šťastným řešením je také i nepraktické umístění nástrojů či nízká kompatibilita s formáty. Software navíc neobsahuje úplný balíček souřadnicových systémů. Většina uvedených záporů patrně vyplývá z teprve krátkého působení SW na trhu a lze předpokládat postupné vylepšování.

6. DISKUZE

Po vytvoření 3D modelů ve všech SW lze přistoupit k jejich vzájemnému porovnání. Hlavními aspekty kritérií je celková přesnost modelu a zobrazovací míra detailu. Zhodnoceno je i prostředí, ve kterém byly jednotlivé modely zpracovány, a to na základě závěrečné analýzy SW.

Cílem letové mise bylo dosažení hodnoty GSD 1 cm/pxl. To se podařilo ve všech SW identicky, což dokazuje, že tato míra závisí na parametrech a kombinaci snímkování. Je tedy nanejvýš důležité sestavit kvalitní letový plán.

Základem letové mise byla správná kombinace metody *nadir* a *oblique*. Překryv snímků u metody *nadir* 90 % a 80 % se ukázal jako nadbytečný. Příliš mnoho informací ze snímků sesbíraných touto metodou může u modelu vytvářet nežádoucí struktury, které je pak nutné ručně vymazat. Vhodné by tedy bylo použít ověřeného překrytí 85 % a 70 %, které doporučuje Srnský (2017). Jako zásadní se ukázal kruhový let okolo objektu v primární výšce, zatímco druhý let v poloviční výšce. Významnost metody *oblique* pro tvorbu trojrozměrných výstupů byla ověřena v kapitole 4.4.1, kde byl porovnán interval po 4°, 12° a 20°. Ideální interval se ukázal při rozmezí snímků po 4°, dostačující může být pravděpodobně i interval po 8°. Interval s 12° již na první pohled nevyhovoval dostatečné kvalitě.

Na základě analýzy byla pro sběr dat vybrána aplikace Pix4DCapture. Před dokončením první letové mise ale nastal problém, kdy byl sběr dat přerušen. Příčinou mohla být ztráta signálu GPS, pravděpodobný je ale i limit snímků aplikace při jednom letu. Tento problém byl vyřešen manuálním letem. I když Remondino (2014) uvádí, že „manuální let není vhodný pro fotogrammetrické aplikace“, v tomto případě nijak neovlivnil výsledný model. Důvodem bylo dostatečné množství snímků. Pro spolehlivější sběr dat lze ale doporučit jinou aplikaci, konkrétně robustnější licencovaný software.

UAV data lze zpracovat klasickou stereofotogrammetrií nebo zobrazovací metodou *Structure from Motion*. Miřijovský (2013) uvádí, že: „i když je SfM časově náročnější, přináší přesnější výsledky“. Dnes navíc většina SW využívá právě tuto metodu ke zpracování UAV dat. Časovou náročnost metody SfM lze řešit kvalitní výpočetní sestavou podle doporučených HW požadavků.

V kapitole 3.5 byla provedena analýza využívaných SW v UAV fotogrammetrii spolu s referenčním SW Photoscan. Analýza byla zpracována z několika hledisek, které byly rozhodující pro jejich výběr – licence, operační systém, kompatibilita z hlediska vstupů a výstupů, HW požadavky či podpora software. Nejzásadnějšími faktory byla dostupnost licence a podpora softwaru z hlediska několika vlastností (tutoriály, návody, uživatelská komunita) a především

využití odbornou veřejností. To kromě referenčního Photoscanu splňovaly i Pix4D a 3DSurvey.

Vybrané SW byly statisticky porovnány. Každý SW vygeneroval protokol s výslednými odchylkami jednotlivých souřadnic vlíčovacích bodů. Z těchto bodů byla vypočítána polohová a prostorová chyba. Na základě dosažených výpočtů byl jako nejpřesnější SW vyhodnocen Pix4D (7,9 cm), poté 3DSurvey (8,6 cm). Jako nejméně přesný byl označen model z prostředí Photoscanu (10,2 cm). Výsledné odchylky mezi SW ale nejsou nijak extrémně výrazné a pouze podle tohoto faktoru nelze obecně doporučit nejvíce relativní software.

Proto byly SW zhodnoceny i z hlediska dalších 15 kategorií (viz **Tabulka 12**). Podrobněji byly rozebrány i výhody a nevýhody SW, které byly zřetelné během zpracování dat. Z této evaluace plyne, že referenční Photoscan se sice na základě doporučení jeví jako nejspolehlivější, výsledky jsou ale závislé na uživatelském osvojení a nastavení. Pix4D, který je vůbec nejzmiňovanějším SW v této oblasti, nakonec vykazuje nejomezenějšími možnostmi v průběhu zpracování. Jeho vysoká automatická je výhodná spíše při zpracování nenáročnějších projektů. 3DSurvey, který byl nejvíce podceňován, nakonec nabízí širokou funkcionalitu a zároveň snadnější ovládání než Photoscan. Naopak četné problémy se dají zdůvodnit krátkým působením SW na trhu.

Během zpracování se práce potýkala se stejnými problémy, které zmiňuje Řehák (2012) (viz kapitola 3.4). Těmi je určování prvků vnější orientace – absence *kvalitní GPS/IMU*, určování prvků vnitřní orientace – *použití neměřických kamer* a nestandardní data – *snímky upravené již v SW fotoaparátu*.

Absence kvalitního GPS použitého dronu byla nahrazena digitální aerotriangulací, konkrétně pomocí vlíčovacích bodů. Část těchto bodů byla použita jako kontrolní body, které ověřily přesnost modelu. Pro větší přesnost lze předpokládat užití většího množství vlíčovacích bodů.

Sběr dat proběhl integrovanou digitální kamerou, jejíž některé PVO nebyly znány. Tento problém se obecně řeší kalibrací kamery v laboratoři. V tomto případě byla provedena automaticky. Snahou bylo ověřit schopnost komerční kamery, přesněji nízkonákladového dronu pro fotogrammetrické účely. UAV navíc obsahuje EXIF data s parametry prvků vnější orientace.

Třetím ze zmíněných problémů byly již upravené snímky v softwaru letounu. To lze řešit výstupem dat v RAW formátu, který snímky nekomprimuje, ale zachovává všechny původní informace. Pix4DCapture podle manuálu RAW formát podporoval, během letu zde ale tato možnost nebyla. Důvodem byl krátký interval snímání mezi jednotlivými fotografiemi. Proto byly snímky uloženy v JPEG formátu, který je kompatibilní se všemi softwary.

Analýzou výsledků byl vytvořen závěr. Jako nejspolehlivější software pro zpracování dat z nízkonákladového bezpilotního letounu je Pix4D. A to především díky spolehlivosti, kompatibilitě s UAV daty, licenci a snadnému osvojení uživatelem.

7. ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo pořízení dat z *UAV* nosiče a tvorba 3D modelu z těchto dat. Dílčími cíli byla literární rešerše týkající se problematiky pořizování a zpracování dat *UAV* a navržení vhodné metodiky pro letovou misi. Dále literární rešerše softwarů zaměřených na tvorbu 3D modelu z dat *UAV*, sběr dat pomocí *UAV* a následné zpracování těchto dat ve 3D model. Posledním cílem bylo zhodnocení přesnosti výsledných modelů a vzájemné srovnání použitých softwarů spolu s referenčním Photoscanem.

V teoretické části jsou představeny dostupné metody a potřebné informace k sestavení kvalitní letové mise. Byla zde také popsána analýza programů pro sběr a zpracování dat z *UAV* nosiče. V praktické části bylo na základě uvedené metodiky sestaveno schéma letové mise pro dosažení předem určené míry detailu 3D modelu. Zároveň bylo popsáno i zpracování dat, které proběhlo v softwarech vybraných na základě analýzy (Pix4D a 3DSurvey a referenční Photoscan). V kapitole *UAV fotogrammetrie* byl popsán letový plán, výběr objektu, použitý dron a především průběh letové mise a samotný sběr dat. Zpracování dat bylo popsáno v kapitole *Tvorba 3D modelu*, v které byla zároveň zhodnocena přesnost jednotlivých modelů a srovnání použitých softwarů na tvorbu 3D modelu.

Cíle práce se podařilo naplnit, a to především cíl hlavní – sestavení a uskutečnění funkčního letového plánu pro sběr dat a jejich zpracování v podobě 3D modelu. To se ověřilo dosažením předem stanoveného parametru GSD ve všech modelech robustních SW. Tento výsledek ukazuje, že závisí nejen na zpracování dat, ale především na jejich sběru, a právě správné kombinaci letové mise. Závěrečnou analýzou byly dále vyhodnoceny vlastnosti jednotlivých SW, na jejichž základě se jako nejlepší ukazuje Pix4D.

Práci bylo dokázáno, že *UAV* metoda je efektivním prostředkem pro zachycení prostorových dat s vysokým rozlišením jako je například 3D model jednotlivých objektů, sídelních struktur nebo kulturní památky. Dále bylo prokázáno, že nízkonákladový dron lze užít pro fotogrammetrické účely. Vzhledem k rozvoji *UAV* v dnešní době bylo snahou poukázat na velký potenciál této technologie spolu se softwary pro tato data specifické.

SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

ABER, J., MARZOLFF, I., RIES, J. (2010). *Small-Format Aerial Photography Principles, techniques and geoscience applications*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science, 268 s.

BOSAK, K. (2011): *Secrets of UAV Photomapping*. Dostupné z:
http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mappingsecrets.pdf

COLOMNA, I., MOLINA, P. (2014): *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 21, 79–97 s.

CHANDLER, J., (1999): *Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research*. Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, United Kingdom.

Česká Republika. *DOPLNĚK X – BEZPILOTNÍ SYSTÉMY*. In: Hlava 3, ust. 3.1.12. 2008. Dostupné z:
<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>

EISENBEISS, H. (2009): *UAV Photogrammetry*. Disertační práce Curych. Dostupné z:
http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf DISS. ETH NO. 18515.

EISENBEISS, H. (2011): *The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. Photogrammetric Week '11, Wichmann/VDE Verlag, Belin & Offenbach*, 135–145.

HANZL, V. (2002): *Fotogrammetrie: Modul 01 – Teoretické základy fotogrammetrie*. Brno: Akademické Nakladatelství Cerm.

HÖHLE, J. (2008). *Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images*. Photogrammetrie. Fernerkundung. Geoinformation, (1), 7-14 s.

KARAS, J., TICHÝ, T. (2016). *Drony*. Computer Press. Brno.

KEMP, K., K. (2008): *Encyclopedia of geographic information science*. Los Angeles: SAGE Publications. 558 s.

KRAUS, K. (2007): *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter, Berlin, 459 s.

LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., HARLEY, I. (2006): *Close Range Photogrammetry*. Whittles Publishing, Dunbeath, 300 s.

MIŘIJOVSKÝ, J. (2013): *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení*. Disertační práce. Katedra geoinformatiky přírodovědecké fakulty. Univerzita palackého v Olomouci. Olomouc.

MURTYOSO, A., GRUSSENMEYER, P., FREVILLE, T. (2017): *Close range UAV accurate recording and modeling od St-Pierre-le-Jeune neo-romanesque church in Strasbourg*. A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 22, s. 519-526. Dostupné z: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W3/519/2017/isprs-archives-XLII-2-W3-519-2017.pdf>

NEWHALL, B. (1982): *The history of photography: from 1839 to the present*. New York Graphic Society Books. New York.

REMONDINO, F., NEX, F. (2014): *UAV for 3D mapping applications: A review*. *Applied Geomatics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlín. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260529522_UAV_for_3D_mapping_applications_A_review

ROSSI, A.J., RHODY, H., SALVAGGIO, C. and WALVORD, D. J., (2012): *November. Abstracted workflow framework with a structure from motion application*. In Image Processing Workshop (WNYIPW), New York]. Dostupné z: <https://www.cis.rit.edu/~cnspci/references/rossi2012.pdf>

ŘEHÁK, M. (2012): *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii*. Diplomová práce. Katedra mapování a kartografie. Stavební fakulta, ČVUT, Praha.

SNAVELY, K., N. (2008): *Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections*. Disertační práce. UW, Washington. Computer Science & Engineering. [online]. [cit. 2018-06-22]. Dostupné z: <https://www.cs.cornell.edu/~snavely/publications/thesis/thesis.pdf>

STANĚK, J. (2013): *Kapitoly z fotogrametrie* [online]. SPŠ zeměměřická, Praha. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/68/Kapitoly-z-FOT-2013.pdf>

ŠIMÍČEK, M. (2014): *Implementace metody structure from motion do UAV fotogrametrie*. Diplomová práce. Katedra geoinformatiky. Přírodovědecká fakulta. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc. Dostupné z: http://theses.cz/id/xve1ij/Simicek_DP_2014.pdf

Uživatelská příručka Mavic Pro v1.3. (2017)

VERGOUW, B., NAGEL, H., BONDT, G., CUSTERS, B. (2016): *Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments*. in: CUSTERS, B. *The Future of Drone Use*. Loyola Marymount University, Los Angeles, 21-45 s.

WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M. (2012): *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology*, č. 179, s. 300–314.

Internetové zdroje

AGISOFT LLC (2018): *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf

AisView [online]. *Řízení letového provozu České republiky* [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <http://aisview.rlp.cz>

O'DONNELL, S. (2017): *A Short History of Unmanned Aerial Vehicles*. [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://consortiq.com/media-centre/blog/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>

BÍLÁ, L. (2012): *Stereofotogrametrie*. ČVUT, Praha. Laboratoře fotogrametrie, Fakulta stavební. [online – prezentace]. [cit. 2018-06-05]. Dostupné z: http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm10/ftg1-cv3_stereoskopie_teorie.pdf

-
- Brief History of Aerial Photography, (2005)* In: Northstar Imaging [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z:
<http://northstargallery.com/aerialphotography/history%20aerial20photography/history.htm>
- CloudCompare (2016): *User's Manual*. [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z:
<http://www.danielgm.net/cc/>
- CONNER, F. (2017): *www.techrepublic.com* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z:
<https://www.techrepublic.com/article/global-drone-market-to-hit-11-2b-by-2020-report->
- DJI (2018): Technological Company. [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z:
<https://www.dji.com/mavic>
- DRONEDEPLOY (2018): [online]. [cit. 2018-06-29]. Dostupné z: <https://www.dronedeploy.com>
- EASA (2018): *European Aviation Safety Agency* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:
(<https://www.easa.europa.eu>)
- Etymonline (2018): *Online Etymology Dictionary* [online]. [cit. 2018-06-29]. Dostupné z:
<https://www.etymonline.com/word/drone>
- HANSEN, A. (2016): *Using Waypoints To Do More With Your Drone*. [online]. [cit. 2018-05-29].
Dostupné z: <https://www.autelrobotics.com/blog/using-waypoints-to-do-more-with-your-drone/>
- History of Aerial Photography. In: *Professional Aerial Photographers Associations* [online]. [cit. 2018-06-29]. Dostupné z:
http://professionalaerialphotographers.com/content.aspx?page_id=22&club_id=808808&module_id=158950
- Gisgeography (2018): [online]. [cit. 2018-06-18].
Dostupné z: <https://gisgeography.com/wgs84-world-geodetic-system/>
- Pix4D 4.1 User Manual (2017). *www.pix4d.com* [online]. [cit. 2018-06-21]. Dostupné z:
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf>
- Skyline (2018): *Softwarová společnost*. [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z:
<http://www.skylinesoft.com>
- ÚCL (2011): *Úřad civilního letectví*. [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.caa.cz>
- VERHOEVEN, J., J. (2009): *Providing an Archaeological Bird's-eye View – an Overall Picture of Ground - based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology*. DOI: 10.1002/arp. Dostupné z:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/arp.354>
- VÚGTK (2018): *Terminologický slovník Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického*. [online]. [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník>
- WINDER, U., A. (2016): *New FAA Drone Regulations Take Effect August 29, 2016: The New Rules And What They Could Mean For Industry*. [online]. Dostupné z:
<http://www.foster.com/resources/news/new-faa-drone-regulations-take-effect-august-29,-2>
-



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Podmínky pro provoz bezpilotního letadla

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 20 kg		> 20 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LCPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 3	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

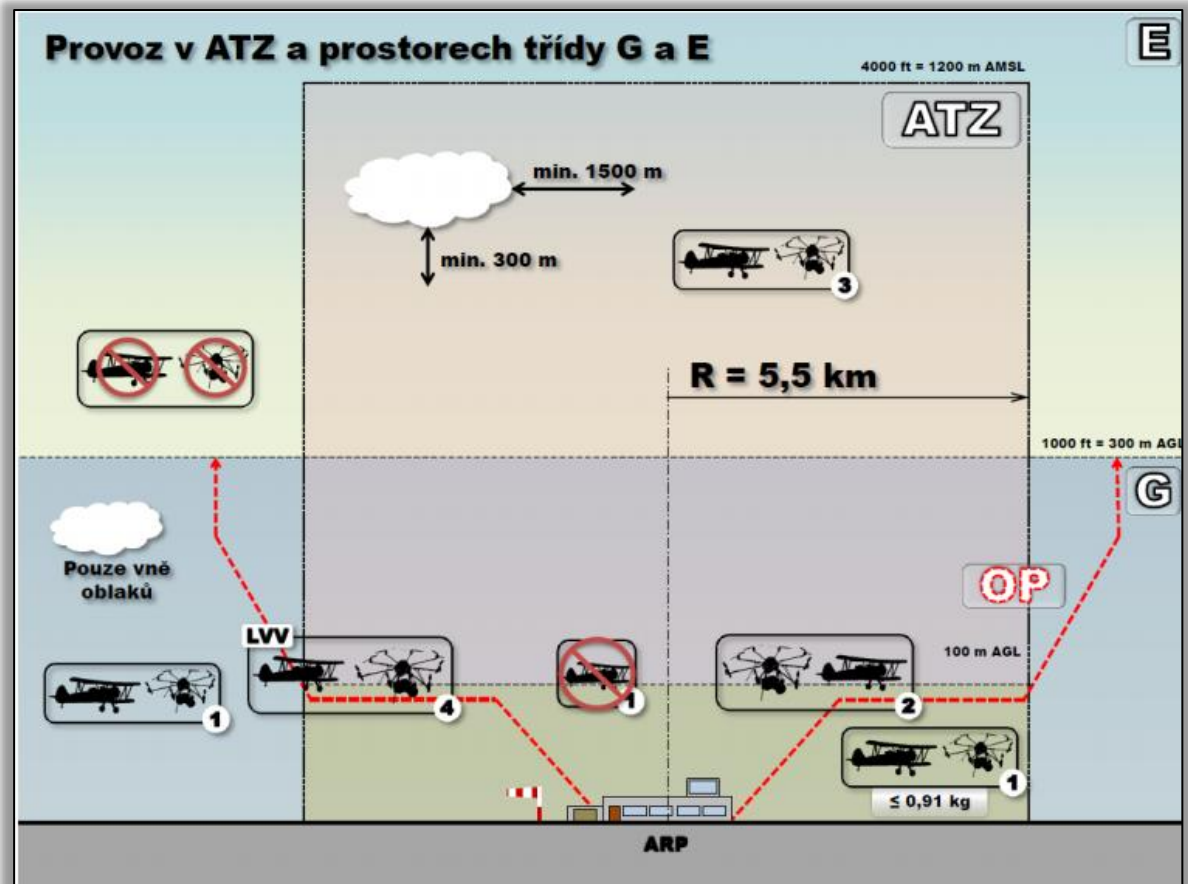
Zdroj: vlastní zpracování

Příloha 2: Legenda pro provoz UAV ve vzdušných prostorech

Legenda k obrázkům 1 a 2:	
	Modely letadel s maximální vzletovou hmotností do 25 kg
	Bezpilotní letadla (tj. včetně modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nad 25 kg)
CTR	Řízený okresek letiště
ATZ	Letištní provozní zóna neřízeného letiště
OP	Ochranná pásma letišť
G / E	Označení třídy vzdušného prostoru
ARP	Vztažný bod letiště
AMSL	Nadmořská výška
LKR	Omezený prostor
LKP	Zakázaný prostor
LKD	Nebezpečný prostor
TSA	Dočasně vyhrazený prostor
TRA	Dočasně vymezený prostor
AGL	Nad úroveň země
1	Lety bez koordinace
2	Splnění podmínek provozovatele letiště (PL) + koordinace s letištní informační službou (AFIS)
3	Splnění podmínek PL + koordinace s AFIS
4	Souhlas/povolení ÚCL
5	Letové povolení příslušného stanoviště řízení letového provozu (ŘLP). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
6	Povolení ÚCL (nebo v případě leteckých prací (LP) koordinace s ŘLP + koordinace s PL). ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru
7	Povolení ÚCL (nebo v případě LP koordinace s ŘLP + koordinace s PL) + letové povolení ŘLP. ŘLP může dále požadovat: stálé obousměrné spojení a odpovídač sekundárního radaru

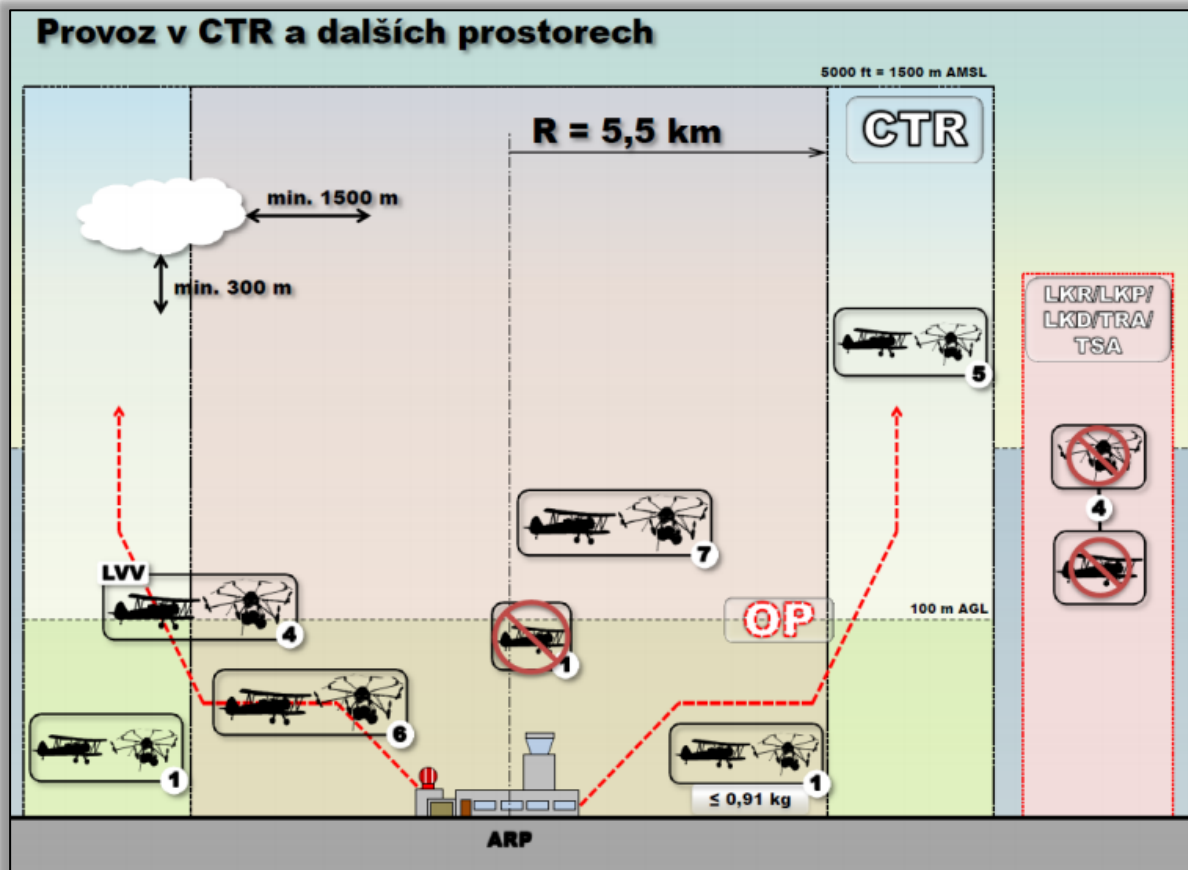
Zdroj: vlastní zpracování

Příloha 3: Provoz UAV v ATZ třídy E a G (neřízené okrsky letišť)



Zdroj: vlastní zpracování

Příloha 3: Provoz UAV v CTR a dalších prostorech (řízené okrsky letišť).



Zdroj: vlastní zpracování





Zdroj: vlastní zpracování

Příloha 7: Detailní výstup z přední strany (shora Agisoft, Pix4D, 3DSurvey)



Zdroj: vlastní zpracování