

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STAVEBNÍ
OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování přesnosti dronu DJI Phantom 4 RTK

Vedoucí práce: doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

Katedra speciální geodézie

Červen 2019

Bc. Tomáš Reindl



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE


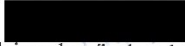
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE


I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Reindl</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>410912</u>
Zadávací katedra: <u>katedra speciální geodézie</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie a kartografie</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Testování přesnosti dronu DJI Phantom 4 RTK</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Testing the accuracy of drone DJI Phantom 4 RTK</u>	
Pokyny pro vypracování: Výběr vhodné lokality pro testování a zaměření vličovacích bodů pomocí totální stanice a přijímače GNSS. Nálet pomocí dronu Phantom 4 RTK v různých výškách a v několika variantách letu. Zpracování experimentu v programu Agisoft Photoscan. Zhodnocení přesnosti testovaného dronu, zejména s ohledem na technologii RTK.	
Seznam doporučené literatury: Urban, R.: Geodetické práce při měření posunů a přetvoření stavebních objektů. 1. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2015. Štroner, M. - Hampacher, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 1. vyd. Praha: CTU Publishing House, 2011. 313 s. ISBN 978-80-01-04900-6. Štroner a kol.: 3D skenovací systémy. 1. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2013.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>20.2.2019</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>20.5.2019</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příštího ak. roku</i>	
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>20.2.2019</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)



Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma „Testování přesnosti dronu DJI Phantom 4 RTK“ vypracoval samostatně pod odborným vedením mého vedoucího diplomové práce. Veškeré použité zdroje a podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Podpis



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Rudolfu Urbanovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, vstřícný a přátelský přístup. Děkuji Ing. Josefu Broučkovi za poskytnutí drona Phantom RTK, bez kterého by tato práce nevznikla. V neposlední řadě také děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za velikou podporu během celého studia.



ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá testováním přesnosti dronu Phantom 4 s RTK modulem od společnosti DJI. Testování proběhlo na čtvercové síti tvořené 100 vlícovacími body, které byly zaměřeny totální stanicí a přijímačem GNSS. Nálety pomocí dronu byly uskutečněny ve třech různých letových hladinách a ve dvou režimech letu. Získaná fotogrammetrická data byla zpracována a vyhodnocena v programu Agisoft PhotoScan.

KLÍČOVÁ SLOVA

Agisoft PhotoScan, dron, GNSS, letecká fotogrammetrie, přesnost kamer, přesnost vlícovacích bodů

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the testing of accuracy of drone Phantom 4 RTK designed by DJI company. The testing was conducted on square network which was composed of one hundred ground control points, that were localized using a total station and GNSS receiver. Drone measuring was realized in three different flight levels and in two flight regimes. The collected photogrammetric data were processed and assessed in Agisoft PhotoScan programme.

KEYWORDS

Agisoft PhotoScan, drone, GNSS, aerial photogrammetry, accuracy of cameras, accuracy of ground control points



Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Úvod	10
1 Použité metody	11
1.1 Tachymetrie	11
1.2 GNSS	12
1.2.1 Struktura systému GNSS	12
1.2.2 Princip výpočtu polohy	12
1.2.3 Metody měření	13
1.3 Letecká fotogrammetrie	14
1.3.1 Prvky vnitřní a vnější orientace	15
1.3.2 Metody snímkování	16
1.3.3 Souřadnicové soustavy	16
1.3.4 Zpracování dat	18
1.3.4.1 Svazkové vyrovnání	18
1.3.4.2 Epipolární geometrie	19
2 Přístroje a pomůcky	21
2.1 Totální stanice Trimble S6 HP	21
2.2 GNSS Trimble Geo XR a Trimble Zephyr Model 2	21
2.3 Phantom 4 RTK	22
2.4 Ostatní pomůcky	23
3 Použitý software	24
3.1 ExifTool	24
3.2 Easy Transform 2.3	24



3.3 Groma v. 8.0.....	24
3.4 Agisoft PhotoScan Professional v. 1.4.3.....	24
4 Popis experimentu	26
5 Postup měření.....	27
5.1 Lokalita měření.....	27
5.2 Rozmístění a stabilizace bodů	27
5.3 Zaměření bodového pole pomocí metody GNSS.....	28
5.4 Fotogrammetrické zaměření vlíčovacích bodů.....	29
5.5 Zaměření vlíčovacích bodů tachymetrickou metodou	31
6 Zpracování měření	32
6.1 Zpracování GNSS měření.....	32
6.2 Zpracování tachymetrického měření	33
6.3 Zpracování snímků	35
6.3.1 Příprava a import snímků	35
6.3.2 Generování řídkého mračka bodů	36
6.3.3 Označení vlíčovacích bodů	37
6.3.4 Optimalizace modelu	37
6.3.5 Vztahy pro kontrolu dosažené přesnosti	38
6.3.6 Export výsledků	40
7 Výsledky testování	41
7.1 Přesnost kamer	42
7.2 Přesnost vlíčovacích bodů.....	50
7.3 Eliminace odlehlých měření: L_1 – norma.....	58
7.3.1 L_1 – norma pro kamery.....	58
7.3.2 L_1 – norma pro vlíčovací body	62



8 Závěr	65
Seznam použitých zdrojů	68
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	72
Seznam příloh	74



Seznam použitých zkratk

Bpv	Balt po vyrovnání
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
HP	high precision
INS	inertial navigation system
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
MNČ	metoda nejmenších čtverců
PPK	Post Processing Kinematic
S-JTSK	Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
SfM	Structure from Motion
SBAS	Satelite Based Augmentation Systems
RTK	Real Time Kinematic
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
WGS84	World Geodetic System 1984

Úvod

V dnešní době se pro potřebu mapování rozlehlých oblastí používají zařízení UAV, která jsou pro dané účely rychlé, ekonomické a přesto disponují dostatečnou přesností. Bezpilotní prostředky se tak stávají v některých oblastech geodézie skoro nenahraditelnými a pomalu z nich vytlačují konvenční geodetické metody.

Obecně není známa poloha dronu, a tak je v praxi při mapování pomocí UAV zařízení nutné umístit vlíčovací body (pokud tam žádné už nejsou např. v podobě trigonometrického bodu) kolem zájmové oblasti tak, aby bylo možné „napasovat“ model do příslušného souřadnicového systému. Obecně se tedy používají měřící metody GNSS pro určení souřadnic vlíčovacích bodů. Právě nutnost použití externí GNSS aparatury by zabudováním RTK modulů do bezpilotních prostředků mohla vymizet. Na začátku roku 2019 se na český trh dostal dron Phantom 4 RTK od společnosti DJI, který už disponuje zmiňovaným RTK modulem.

Od DroneDeploy byla vypracována studie (leden 2019), podle které je možné s Phantomem 4 RTK dosáhnout relativní polohové přesnosti 1,2 cm a relativní výškové přesnosti 2 cm při letové hladině 33 m [20]. Je ale třeba upozornit na to, že při testování používali vlastní měřící pomůcky, které jsou odlišné od použitých v této diplomové práci (vyjma samotného testovacího dronu). Zpracování proběhlo také v rozdílném softwaru (Map Engine) a výsledkem této studie je právě chyba relativní, nikoliv chyba absolutní.

Tato diplomová práce je inspirována zmiňovanou studií, ale na rozdíl od ní se zabývá experimentem, který testuje absolutní přesnost určení prostorové polohy dronu Phantom 4 RTK od společnosti DJI a následnou přesnost vzniklého modelu. Testování probíhalo v různých letových hladinách a variantách letu.

1 Použité metody

V této kapitole budou vysvětleny metody, které byly použity v této diplomové práci.

1.1 Tachymetrie

Tachymetrie, neboli polární prostorová metoda (Obr. 1), je v geodetické praxi nejpoužívanější metodou. Při této metodě je současně určována poloha a výška bodu. Určované body jsou signalizovány výtyčkou s odrazným hranolem. Totální stanice pomocí elektronického dálkoměru určí šikmou vzdálenost a na kódových kruzích s čárovým kódem se elektronicky určí zenitové a vodorovné úhly. Z těchto změřených parametrů se určí prostorová poloha bodů (1). Text k této podkapitole byl čerpán ze zdrojů [1], [8].

$$X_P = X_S + sd \sin(\zeta) \cos(\sigma_{SO} + \omega)$$

$$Y_P = Y_S + sd \sin(\zeta) \sin(\sigma_{SO} + \omega)$$

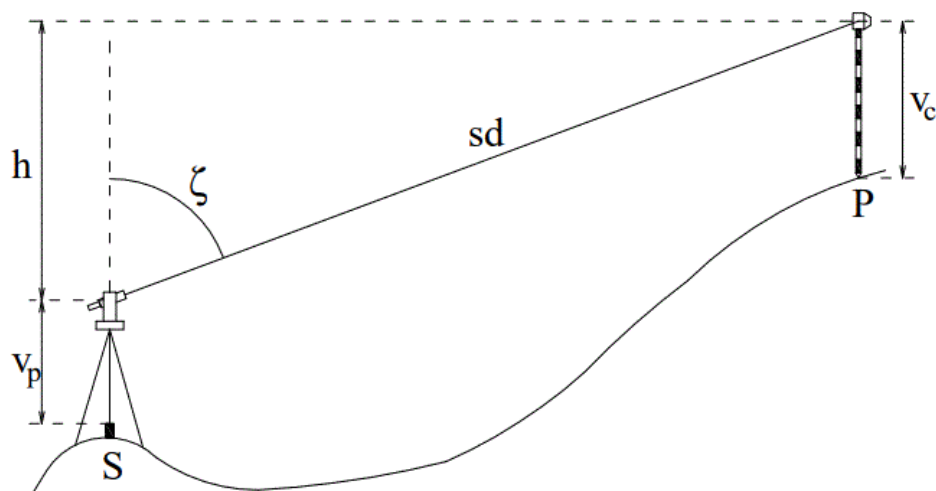
$$Z_P = Z_S + v_P + sd \cos(\zeta) - v_C \quad (1)$$

kde: sd je šikmá vzdálenost

ζ, ω je zenitový a horizontální úhel

σ_{SO} je směrnik ze stanoviska na orientaci

v_P, v_C je výška přístroje a cíle



Obr. 1 - Tachymetrie [8]

1.2 GNSS

GNSS je metoda určování prostorové polohy za pomoci globálních navigačních satelitů. Text k této podkapitole byl čerpán ze zdrojů [1], [4].

1.2.1 Struktura systému GNSS

Kosmický segment

Je tvořen družicemi jednotlivých navigačních systémů, z nichž nejvýznamnější jsou v současné době segmenty NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO.

Řídící segment

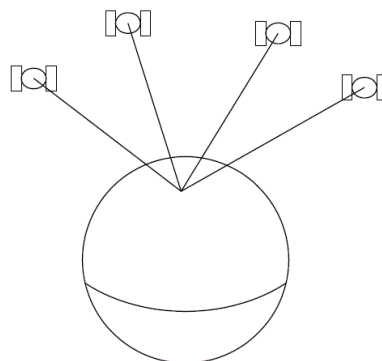
Je tvořen hlavními a pozorovacími pozemními stanicemi. Řídí a monitoruje kosmický segment. Provádí korekce atomových hodin a polohy družic.

Uživatelský segment

Je tvořen pasivním přijímačem, který přijímá signály z jednotlivých družic. Na základě přijatých dat přijímač vypočítá svoji polohu.

1.2.2 Princip výpočtu polohy

Základem metody GNSS je určování vzdáleností od družic k přijímači a následnému aplikování prostorového protínání z délek (Obr. 2). Družice vysílají signál, který se použije k výpočtu absolutní (kódové měření) a relativní (fázové měření) polohy přijímače.



Obr. 2 - Metoda GNSS [1]

Kódové měření

Kódové měření je založené na metodě měření tranzitního času. K určení prostorové polohy přijímače by teoreticky stačilo přijetí signálu od tří družic. Kvůli nesynchronizovanému času přijímače s družicemi (přijímač disponuje o několik řádů

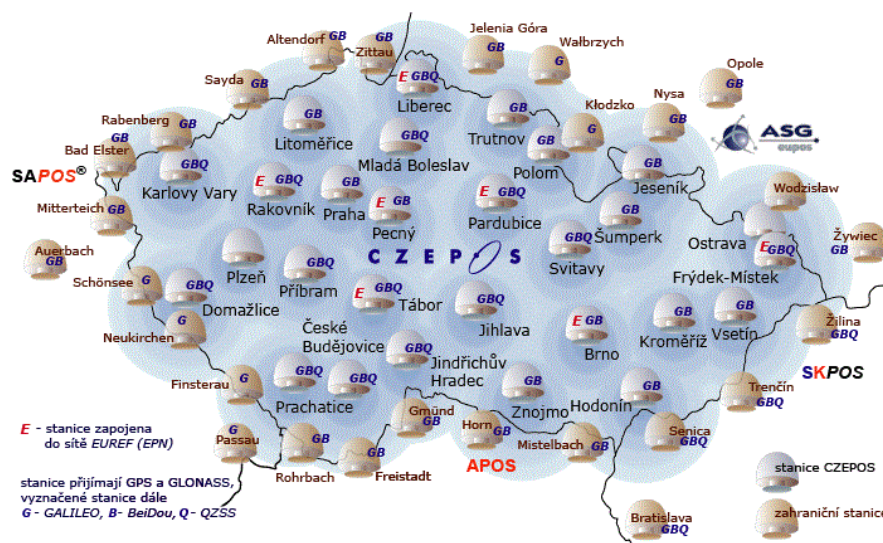
méně přesnými hodinami) je třeba do výpočtu zavést opravu hodin přijímače, tj. čtvrtou družici. Čím více je signálů z družic zachyceno, tím je výsledné určení polohy přesnější (dojde k vyrovnání).

Fázové měření

V geodézii je obvykle používáno právě fázové měření. Vzdálenost mezi satelitem a přijímačem je určována pomocí vyslaných nosných vln a změřeného fázového doměrku. Protože nelze měřit počet celých vlnových délek (ambiguit) je metoda vhodná pouze pro určení relativních souřadnic. Pro přesné určení polohy je tedy zapotřebí dvou přijímačů, z nichž je jeden umístěn na bodě o známých souřadnicích a druhý je na určovaném bodě. Pro prvotní určení vzdálenosti je použito kódové měření. Aby bylo fázové měření možné, tak musí oba dva přijímače nepřetržitě registrovat signál z družic.

1.2.3 Metody měření

Obecně je tedy k přesnému měření zapotřebí použití nejméně dvou přijímačů. V dnešní době se ale využívá síť referenčních stanic, která nahrazuje přijímač na známém bodě. Odpadá tak nutnost pořízení druhého přijímače. Připojení k referenční stanici je realizováno prostřednictvím internetového připojení pomocí GSM modulu v reálném čase. V České republice jsou tři takové sítě, a to CZEPOS, který provozuje Český úřad zeměměřický a katastrální (Obr. 3), Trimble VRS Now Czech, který provozuje firma Geotronics Praha, s. r. o. a TopNET, který provozuje GB-geodezie, spol. s r.o..



Obr. 3 - Síť referenčních stanic CZEPOS v České republice [15]

V praktické geodézii je nejvíce využívaná metoda RTK, při které jsou zpracovávány korekce ze systému referenčních stanic a v reálném čase jsou posílány do přijímače. Doba měření observací je v řádu několika vteřin. Absolutní polohová přesnost této metody je udávána od 2,5 cm do 5 cm při využití systému GPS. Případně se využívá rychlá statická metoda pro přesnější měření (např. při budování geodetické sítě).

1.3 Letecká fotogrammetrie

Obecně se fotogrammetrie zabývá bezkontaktním sběrem dat (měřením), která po vyhodnocení umožňují modelování ve trojrozměrném prostoru (Obr. 4). Text k této podkapitole byl čerpán ze zdrojů [1], [2], [3], [5], [9].

Mnoho prováděných fotogrammetrických prací spadá právě do letecké fotogrammetrie. Při této metodě je stanovisko umístěné v letadle, UAV nebo v jiném pohybujícím se leteckém dopravním prostředku. Lze s ní velice rychle vyhodnocovat velké územní celky, což by jinak konvenčními geodetickými metodami trvalo mnohonásobně déle. Není u ní však možné dostatečně přesně určovat prostorovou polohu snímku v momentě jeho pořízení, a tak se prvky vnější orientace určují na základě orientací a vlíčovacích bodů. V dnešní době je možné použít zařízení typu GPS/INS, které pomáhá a umožňuje určovat prvky vnější orientace snímků už během letu.



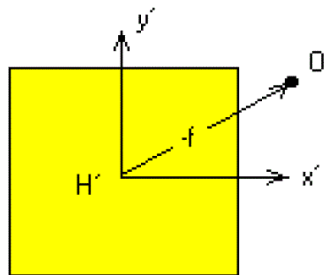
Obr. 4 - Letecká fotogrammetrie [16]

1.3.1 Prvky vnitřní a vnější orientace

Prvky vnitřní orientace

Prvky vnitřní orientace definují přesnou geometrii paprsků uvnitř měřické komory ve snímkových souřadnicích (Obr. 5). Jsou zpravidla už známé přímo od výrobce anebo je lze získat laboratorním měřením (kalibrací). Mezi prvky vnitřní orientace patří:

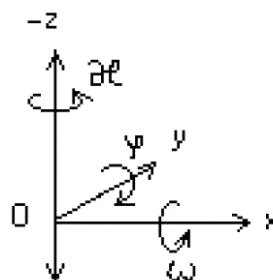
- Poloha hlavního snímkového bodu H' [x'_0, y'_0], která je definována jako průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím v předmětovém prostoru středem promítání, a který je kolmý na rovinu snímku.
- Konstanta komory f , která je definována jako vzdálenost od hlavního snímkového bodu H' ke středu promítání v předmětovém prostoru.
- Radiální a tangenciální distorze objektivu. Vliv tangenciální distorze je zpravidla zanedbatelný.



Obr. 5 - Prvky vnitřní orientace [2]

Prvky vnější orientace

Prvky vnější orientace definují polohu (střed vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0) a sklon (ω, φ, κ) měřické komory v modelových souřadnicích (Obr. 6). V oboru letecké fotogrammetrie jsou obecně považovány za neznámé. Přibližné hodnoty prvků vnější orientace lze získat pomocí zařízení typu GPS/INS přímo během letu. Přibližné hodnoty lze také získat z metadat ve formátu *Exif*.



Obr. 6 - Prvky vnější orientace [2]

1.3.2 Metody snímkování

Jednosnímková metoda

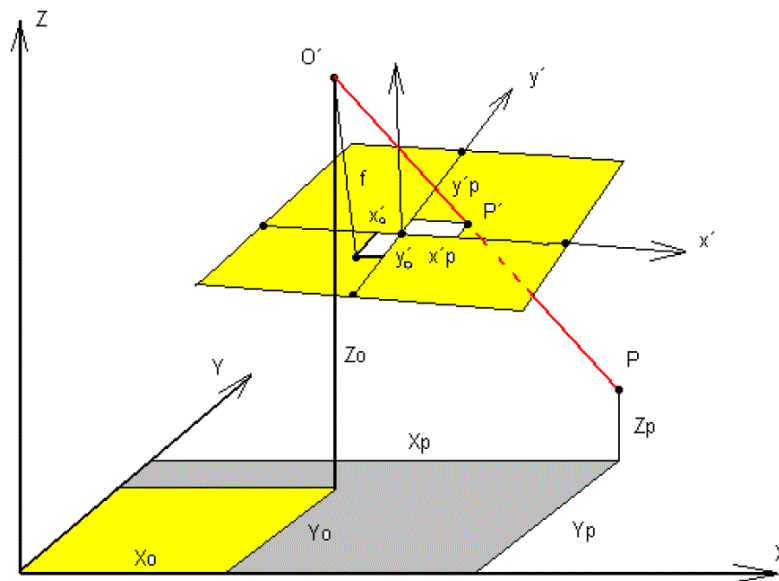
Lze použít pouze na rovinatém území k získání polohopisné složky. Využívá pouze samostatné měřické snímky. Výstup je ve 2D.

Vícesnímková metoda

Vyžaduje nejméně dva snímky stejné scény, které se navzájem překrývají. Objekt měření musí být zobrazen na obou snímcích. Ze snímkových souřadnic je pak možné vypočítat prostorovou polohu předmětu. Pokud se využije k vyhodnocení stereoskopického vjemu, jedná se o stereofotogrammetrii. Při snímání je nutné dodržet dostatečný překryv snímků, 80% v podélném směru a 60% ve směru příčném.

1.3.3 Souřadnicové soustavy

Obecně se osa x vkládá přibližně do směru letové dráhy. Kladný směr rotací je volen do směru otáčení hodinových ručiček (Obr. 7).



Obr. 7 - Souřadnicové soustavy v letecké fotogrammetrii [2]

Soustava snímkových souřadnic

Osy se ve snímkové souřadnicové soustavě označují jako: $x', y', (z' = -f)$. Počátek souřadnicové soustavy je umístěn do středu snímku M' . Je ale třeba měřit snímkové souřadnice od hlavního bodu H' , proto je nutné zavádět opravy o posun počátku soustavy. Osa x' je vložena mezi vodorovné rámové značky, osa y' leží kolmo na osu x' v matematickém smyslu.

Soustava geodetická

Osy se v geodetické souřadnicové soustavě označují jako: X, Y, Z . Jedná se výslednou souřadnicovou soustavu objektu. X_0, Y_0, Z_0 jsou souřadnice vstupní pupily.

Z podmínky kolinearity (2) a z rotací kolem tří (3) os lze přímo převést snímkové souřadnice na geodetické (4).

$$\frac{x' - x'_0}{-f} = \frac{X - X_0}{Z - Z_0}; \quad \frac{y' - y'_0}{-f} = \frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} \quad (2)$$

kde: X_0, Y_0, Z_0 jsou prvky vnější orientace
 X, Y, Z jsou geodetické souřadnice zájmového bodu
 x'_0, y'_0, f jsou prvky vnitřní orientace
 x', y' jsou snímkové souřadnice zájmového bodu

$$R = R_{X(\omega)} R_{Y(\varphi)} R_{Z(\kappa)}$$
$$R_{X(\omega)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix}$$
$$R_{Y(\varphi)} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$
$$R_{Z(\kappa)} = \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

kde: ω, φ, κ jsou prvky vnější orientace

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) - r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) - r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) - r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) - r_{33}(Z - Z_0)} \quad (4)$$

kde: x'_0, y'_0, f jsou prvky vnitřní orientace
 $X_0, Y_0, Z_0, r_{i,j}$ jsou prvky vnější orientace
 X, Y, Z jsou geodetické souřadnice zájmového bodu
 x', y' jsou snímkové souřadnice zájmového bodu

Pro snížení vlivu radiální distorze se snímkové souřadnice nahradí podle vzorců (5). K tomu se využívají polynomy druhého až třetího řádu.

$$\begin{aligned}x' &\leftrightarrow x' + (k_0 r^2 + k_1 r^4 + k_2 r^6)(x' - x'_0) = x' + R'(x' - x'_0) \\y' &\leftrightarrow y' + (k_0 r^2 + k_1 r^4 + k_2 r^6)(y' - y'_0) = y' + R'(y' - y'_0)\end{aligned}\quad (5)$$

kde: x', y' jsou snímkové souřadnice zájmového bodu
 x'_0, y'_0 jsou prvky vnitřní orientace
 r je vzdálenost bodu o souřadnicích x', y' od x'_0, y'_0

Po zavedení oprav do vzorců se získá rovnice, která popisuje přímý vztah mezi snímkovými souřadnicemi a geodetickými souřadnicemi s potlačením vlivu radiální distorze.

$$\begin{aligned}x &= x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) - r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) - r_{33}(Z - Z_0)} - R'(x' - x'_0) \\y &= y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) - r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) - r_{33}(Z - Z_0)} - R'(y' - y'_0)\end{aligned}\quad (6)$$

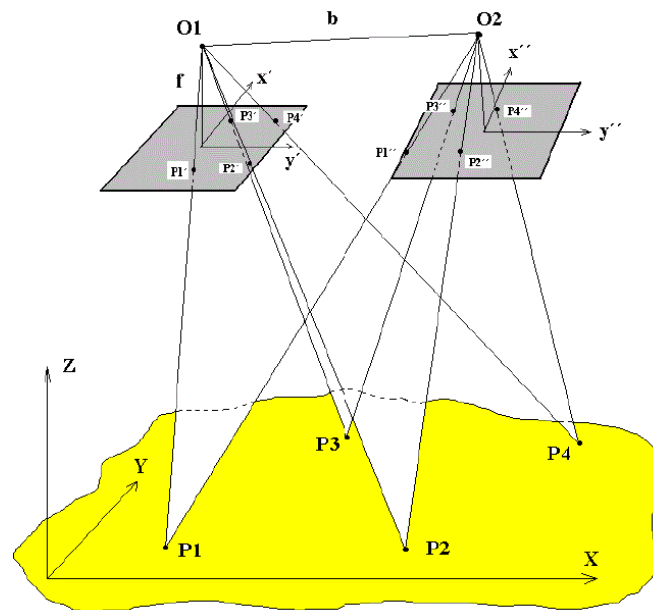
1.3.4 Zpracování dat

Pro výpočet prostorových souřadnic objektu jsou nejčastěji používány dva postupy. Prvním z nich je svazkové vyrovnání (takzvané komplexní řešení), které vyžaduje přibližné hodnoty neznámých (prvky vnitřní a vnější orientace) ke spuštění iteračního procesu. Druhým je pak epipolární geometrie, která vychází ze zpracování digitálního obrazu.

1.3.4.1 Svazkové vyrovnání

Základem metody je přímá prostorová transformace snímkových souřadnic na geodetické souřadnice (Obr. 8). Výpočet vychází z rovnice (6). Do výpočtu vstupují veškeré snímky najednou. Aby bylo možné svazkové vyrovnání použít, je třeba znát přibližné hodnoty prvků vnitřní a vnější orientace. Jak se jednotlivé prvky získávají již bylo řečeno v kapitole 1.3.1. Při nadbytečném počtu vlíčovacích bodů lze prvky vnější orientace vyrovnat. Pro společné určení prvků vnitřní a vnější orientace se využije vyrovnání zprostředkující metodou MNČ. Následně se rovnice linearizují Taylorovým

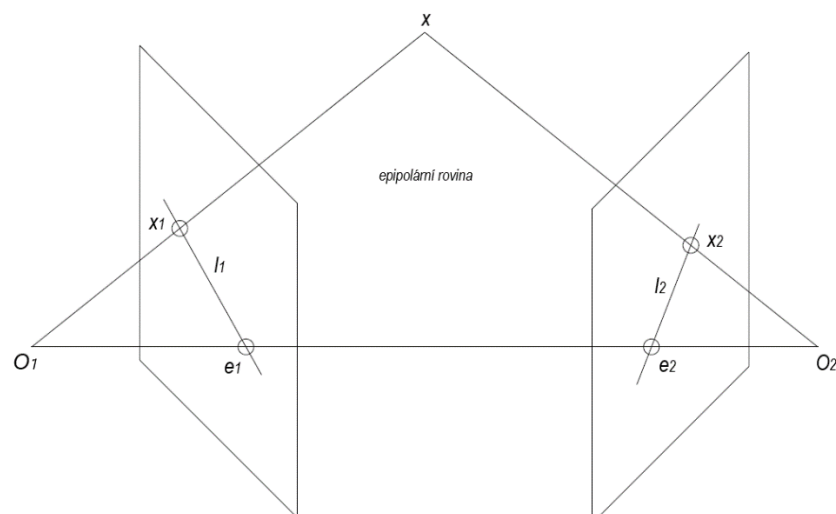
rozvojem a výpočet probíhá iterativně dokud suma čtverců oprav již dále neklesá. Podrobnější výklad lze nalézt v [1].



Obr. 8 - Svazkové vyrovnání [3]

1.3.4.2 Epipolární geometrie

Epipolární geometrie je metoda, která řeší vzájemné (geometrické) vztahy minimálně dvou snímků, které vycházejí z podmínky komplanarity. Na rozdíl od předchozí metody (svazkové vyrovnání) není třeba znát prvky vnitřní a vnější orientace. Vztah mezi dvěma snímky, bez znalosti prvků vnitřní a vnější orientace, lze popsat pomocí projekce bodů z jednoho snímku na snímek druhý (Obr. 9).



Obr. 9 - Epipolární geometrie

Hledá se tedy vztah snímkových souřadnic bodů, které lze najít na obou snímcích. Tento vztah popisuje fundamentální matice, která je nutným předpokladem pro další výpočet. Fundamentální matice umožňuje identifikaci bodu na jednom snímku přiřadit odpovídající epipolární linii na snímku druhém. Pro samotný výpočet se používá osmibodový algoritmus, který vyžaduje znalost 8 dvojic bodů ve snímkových souřadnicích. Podrobnější výklad lze nalézt v [1].

Metoda Structure from Motion

Fotogrammetrická zobrazovací technika, jejímž principem je rozpoznání charakteristických bodů, které jsou viditelné na vícero snímcích (minimálně na třech snímcích). Po jejich identifikaci se získají projekční centra kamer a orientace snímků v prostoru. Za použití metody epipolární geometrie lze pro všechny po sobě jdoucími snímky rekonstruovat v obraze a pohybu všechny kamery a snímky. Následně se provede svazkové vyrovnání pro určení všech parametrů (souřadnice bodů, prvky vnitřní a vnější orientace).

2 Přístroje a pomůcky

Pro účely diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení, která zapůjčila katedra speciální geodézie. Text k této kapitole byl čerpán ze zdrojů [6], [7], [10].

2.1 Totální stanice Trimble S6 HP

Totální stanice Trimble S6 HP (Obr. 10) je robotická totální stanice, která disponuje nekonečnými jemnými ustanovkami, dalekohledem s 30násobným zvětšením obrazu s rozsahem ostření od 1,5 m do nekonečna, laserovým pointerem a laserovou olovnicí. Na jedno nabití baterie (typu Li-Ion) vydrží v provozu přibližně šest hodin. Pro měření byl použit přístroj s výrobním číslem 92120086.

Vybrané parametry totální stanice:

Zdroj světla: Pulsní laserová dioda 905 nm (Laser třídy 1)

Přesnost úhlová: 1" (0,3 mgon)

Přesnost v režimu hranol: 1 mm + 1 ppm



Obr. 10 - Totální stanice Trimble S6 HP [7]

2.2 GNSS Trimble Geo XR a Trimble Zephyr Model 2

Pro účely diplomové práce byla použita GNSS aparatura, která se skládala z přijímače GNSS Trimble Geo XR (Obr. 11) a externí antény Trimble Zephyr Model 2 (Obr. 12). Přijímač umožňuje příjem signálů z družic GPS (L1C/A, L2C a L2E), GLONASS (L1C/A, L1P, L2C/A a L2P) a SBAS (L1C/A). Má zvýšenou odolnost dle standardu IP65.

Na jedno nabití baterie vydrží přibližně 9 hodin a baterii lze vyměnit i během používání bez ukončování práce v nastaveném režimu měření. Připojením externí antény se zvyšuje přesnost měření.

Přesnost GNSS aparatury při metodě měření RTK dle výrobce:

Bez připojené externí antény v poloze: 25 cm + 1 ppm

Bez připojené externí antény ve výšce: 50 cm + 1 ppm

S připojenou externí anténou v poloze: 10 mm + 0,5 ppm

S připojenou externí anténou ve výšce: 15 mm + 0,5 ppm



Obr. 11 - GNSS Trimble Geo XR [17]



Obr. 12 - Trimble Zephyr Model 2 [6]

2.3 Phantom 4 RTK

Phantom 4 RTK je malý čtyřvrtulový dron od společnosti DJI s RTK modulem (Obr. 13). Na jedno nabití baterie vydrží dron ve vzduchu přibližně 30 minut. Disponuje 20 megapixelovou kamerou s 1 palcovým CMOS senzorem. Objektiv má úhel záběru 84° s ohniskovou vzdáleností $f/2,8 - f/1,1$ a rozsahem ostření od 1 m do nekonečna. Maximální rozlišení videa je 3840x2160 pixelů při rychlosti 30 snímků za vteřinu. Je vybaven pozičním modulem GNSS, který umožňuje příjem signálů z družic GPS (L1/L2), GLONASS (L1/L2) a Galileo (E1/E5a). Uváděná přesnost (pro poziční modul GNSS) určování horizontální polohy je 1 cm + 1 ppm a ve výšce 1,5 cm + 1 ppm. Přesnost autonomního letu drona při zapnutém RTK je v poloze i ve výšce udávaná 0,1 m. Vysílač disponuje kromě klasických tlačítek i zobrazovacím zařízením, na kterém je nainstalovaný operační systém Android pro provozování aplikace DJI MG.



Obr. 13 - Phantom 4 RTK [10]

2.4 Ostatní pomůcky

Hranol Trimble VX/S

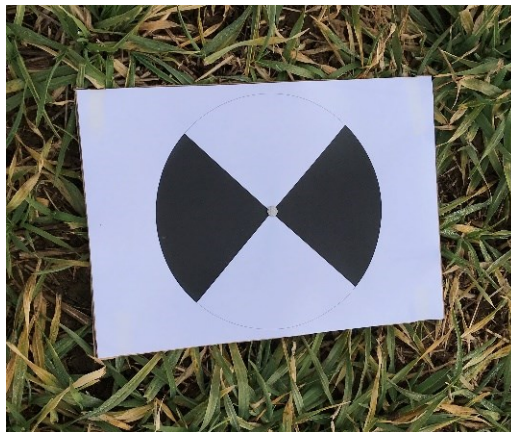
K signalizaci bodů byl použit 360° hranol Trimble VX/S (Obr. 14), jehož konstanta je 2 mm.



Obr. 14 - Hranol Trimble VX/S [18]

Vlícovací body

Vlícovací body byly vyrobeny z desky o rozměru A4 (210 x 297 mm) s kulatým černobílým terčem o poloměru 10 cm (Obr. 15). Terče byly vyrobeny z vytisknutého vzoru na jednotlivé papíry o rozměru A4, které byly následně nalepeny na kartóny.



Obr. 15 - Vlícovací bod

3 Použitý software

V této kapitole budou popsány veškeré softwary, které byly využity pro zpracování této diplomové práce. Text k této kapitole byl čerpán ze zdrojů [11], [12], [13], [14].

3.1 ExifTool

ExifTool je nezávislá aplikace pro čtení, zápis a editaci metadat u nejrůznějších typů souborů, včetně formátů EXIF, GPS, IPTC, XMP, JFIF, GeoTIFF, ICC atd. Jedná se o volně dostupnou aplikaci (tzv. open source aplikaci), která je dostupná pro systémy Windows a MacOS. Autorem je Phil Harvey.

3.2 Easy Transform 2.3

Easy Transform je softwarová aplikace od Adjust Solutions (jejímž autorem je Ing. Pavel Třasák, Ph.D.), která slouží pro snadný převod prostorových souřadnic bodů mezi jednotlivými souřadnicovými systémy. V případě této diplomové práce byl software využit pro převod souřadnic z WGS84 do S-JTSK / Bpv.

3.3 Groma v. 8.0

Groma je geodetický program od společnosti Geoline, spol. s r.o. a je určen pro komplexní zpracovávání geodetických dat (od surových dat z totální stanice až po výsledné seznamy souřadnic, protokoly a jednoduchou kontrolní grafiku). Umí zpracovávat data ve formátech všech běžných záznamníků, dávkově i jednotlivými počty.

3.4 Agisoft PhotoScan Professional v. 1.4.3

Agisoft PhotoScan Professional je software od společnosti Agisoft LLC, který umožňuje tvorbu ortofotomap, digitálních modelů terénu a obecně polygonových modelů, které mohou být pokryté texturami ve vysokém rozlišení. V programu lze zpracovávat několik tisíc leteckých snímků najednou. Připojení do souřadnicového systému je možné přes souřadnice vlíčovacích bodů anebo pomocí souřadnic, které odpovídají místu pořízení jednotlivých snímků. Program vyhodnocuje snímky metodou



SfM s pomocí epipolární geometrie. V současné době se jeho nejnovější verze už nejmenuje Agisoft PhotoScan ale Agisoft Metashape.

4 Popis experimentu

V této kapitole je popsán experiment, kterým se testovala přesnost dronu Phantom 4 RTK. Experiment se dělí na tři části, a to na měřickou, zpracovací a vyhodnocovací.

V první části bylo do vybrané lokality dočasně stabilizováno 100 vlícovacích bodů a čtyři body bodového pole. Vlícovací body byly rozmístěny tak, aby tvořily přibližně čtvercovou síť o rozměrech cca 100 m x 100 m. Body bodového pole pak byly rozmístěny na okrajích této čtvercové sítě. Síť byla fotogrammetricky nasnímána pomocí testovaného dronu, a to v několika letových hladinách (ve výšce 15 m, 25 m a 40 m) a ve dvou variantách letu (snímání snímků za letu bez stejné orientace GNSS přijímače a se statickým snímáním snímků se stejnou orientací GNSS přijímače). Body bodového pole byly zaměřeny GNSS aparaturou a vlícovací body tachymetrickou metodou pomocí totální stanice Trimble S6 HP.

V dalším kroku bylo měření z GNSS a z totální stanice zpracováno a následovalo zpracování jednotlivých režimů letu v programu Agisoft PhotoScan Professional.

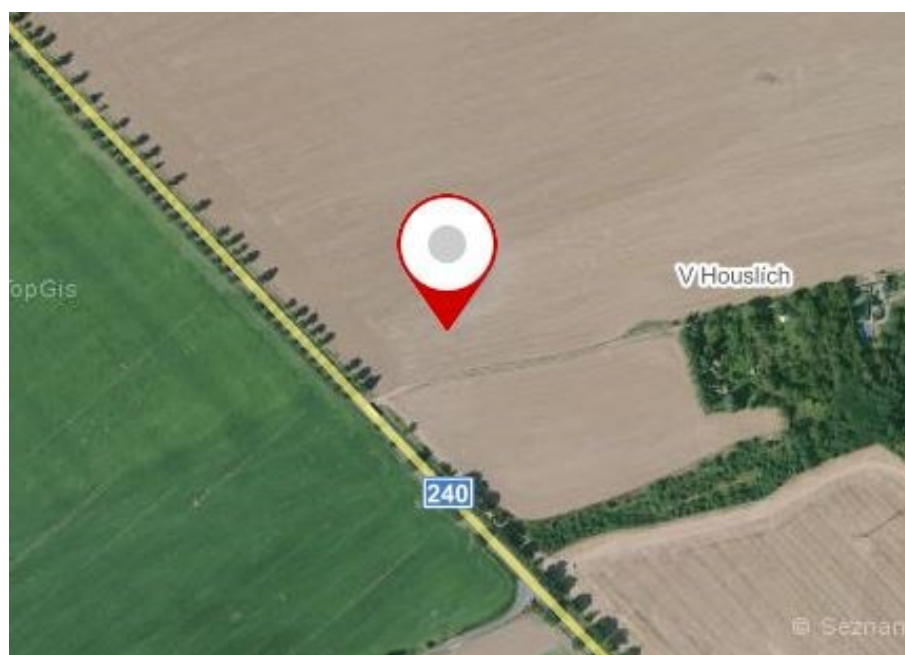
V závěrečné fázi se vyhodnocovaly jednotlivé zpracované lety a jejich dosažené přesnosti.

5 Postup měření

V této kapitole jsou popsány postupy a metody, které byly použity pro měřickou část experimentu testování přesnosti dronu DJI Phantom 4 RTK.

5.1 Lokalita měření

Pro účely testování byla vybrána lokalita, která se nachází kousek za rozhraním Středočeského kraje a Hlavního města Prahy (Obr. 16). Konkrétněji se vybrané území nachází u ulice V Houslích, Horoměřice. Místo je tvořeno ornou půdou a měření probíhalo jen na její části o přibližné rozloze 1 – 1,5 ha. Jelikož se jednalo o oblast bez vegetace, byla zaručena perfektní viditelnost pro snímání vlíčovacích bodů při náletech s testovacím dronem.



Obr. 16 - Lokalita [19]

5.2 Rozmístění a stabilizace bodů

Vlíčovací body

Na vybraném území bylo rozmístěno 100 vlíčovacích bodů (Obr. 17) tak, aby tvořily přibližnou čtvercovou síť o rozměrech cca 100 m x 100 m (tj. body byly voleny zhruba po 10 metrech). Stabilizovány byly pomocí 120 mm dlouhých hřebíků. Vlícovací body byly číslovány od 1 do 100.

Bodové pole

Kolem čtvercové sítě (na úhlopříčkách) byly dočasně vytvořeny čtyři body bodového pole, které byly stabilizovány pomocí dřevěných kolíků. Bodům byla přidělena čísla 4001, 4002, 4003 a 4004. Tyto body sloužily pro pozdější připojení vlíčovacích bodů do S-JTSK. Stanovisko 5002 bylo zvoleno přibližně uprostřed čtvercové sítě pro dosažení optimální konfigurace potřebné k výpočtu prostorovému protínání.



Obr. 17 - Rozmístění vlíčovacích bodů s body bodového pole a volným stanoviskem

5.3 Zaměření bodového pole pomocí metody GNSS

Bodové pole bylo zaměřeno metodou GNSS, konkrétněji metodou RTK, s připojením na síť referenčních stanic od poskytovatele CZEPOS pro získávání korekcí.

Každý bod byl zaměřen celkem pětkrát s dobou observace minimálně 30 vteřin. První měření všech bodů bylo provedeno ihned po ukončení prvního náletu

Phantomem 4 RTK. Druhé měření se také uskutečnilo hned po druhém náletu atd.. Poslední, tedy páté měření, se též provedlo až po skončení posledního náletu.

Důvodem pro takto opakované měření bodů ihned po jednotlivých náletech bylo, aby korekce, které přijímá dron, byly z cca stejného časového úseku jako ty, které přijímá GNSS aparatura (Tab. 1). Tím bylo do jisté míry docíleno zachování kontinuity měření. V tabulce chybí automatický nálet pro letovou hladinu 15 m, neboť v terénu se jí nepodařilo nastavit.

Etapa	Název náletu	Čas náletu		Čas měření GNSS	
		od	do	od	do
1	Auto. nálet pro letovou hladinu 40 m	11:16	11:41	11:48	12:07
2	Auto. nálet pro letovou hladinu 25 m	11:53	12:37	12:38	12:44
3	Manuální nálet pro letovou hladinu 40 m	12:44	12:55	12:57	13:03
4	Manuální nálet pro letovou hladinu 25 m	13:06	13:18	13:20	13:28
5	Manuální nálet pro letovou hladinu 15 m	13:31	13:54	13:59	14:07

Tab. 1 - Časy jednotlivých etap měření

5.4 Fotogrammetrické zaměření vlícovacích bodů

Pomocí dronu Phantom 4 RTK (Obr. 18) byly fotogrammetricky zaměřeny vlícovací body. Měření probíhalo ve třech různých letových hladinách. Konkrétněji v 15 m, 25 m a 40 m nad povrchem. Dále se měření dělilo podle způsobu realizace samotného letu, a to na čistě automaticky naplánovaný let a na ručně řízený let.



Obr. 18 - Phantom 4 RTK při vzletu

Pro automatický let byla naplánována trasa letu přímo v terénu. Na vysílači se přes aplikaci DJI MG ohraničila zájmová oblast okrajovými body (Obr. 19) a po zadání parametrů (výška, překryt a rychlost) systém automaticky vygeneroval letovou trasu. Podélný a příčný překryt byl nastaven na 70 %. Rychlost dronu v průběhu letu byla 5 m/s. Nasnímané fotografie byly pořizovány kontinuálně během letu, tj. bez zastavení. Tímto způsobem byly nasnímány dvě letové hladiny: 40 m a 25 m. Letová hladina 15 m nešla nastavit, a tak byla vynechána. Během obou náletů došlo k přerušení letu z důvodu vybité baterie. Tím vznikly dva soubory fotografií pro jeden nálet (celkem tedy vznikly čtyři soubory pro dva nálety).

V automatickém režimu bylo pro letovou hladinu 40 m celkem pořízeno 213 fotografií, pro letovou hladinu 25 m bylo celkem pořízeno 263 fotografií.



Obr. 19 - ukázka plánované trasy v aplikaci DJI MG

Pro ručně ovládaný let byl dron nastaven tak, aby udržoval předem nastavenou letovou hladinu. Horizontální pohyb se ovládal ručně. Rozdíl oproti automatickému náletu spočíval ve způsobu pořizování snímků, které se pořizovaly ze stacionární polohy dronu, tj. se zastavením. Další rozdíl spočíval ve stejné orientaci GNSS přijímače. Během letové hladiny 15 m došlo k přerušení letu z důvodu vybité baterie. Nevznikly tím ale dva soubory fotografií.

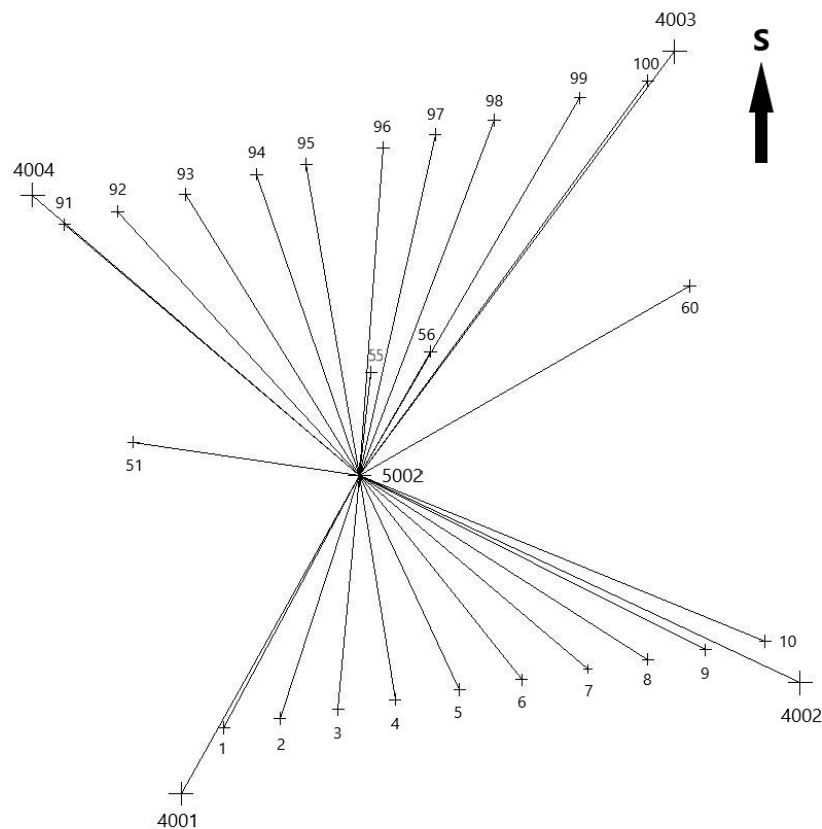
V ručně ovládaném režimu bylo pro letovou hladinu 40 m pořízeno 86 fotografií, pro letovou hladinu 25 m bylo pořízeno 105 fotografií a pro letovou hladinu 15 m bylo pořízeno 188 fotografií.

5.5 Zaměření vlíčovacích bodů tachymetrickou metodou

Vlíčovací body byly zaměřeny pomocí totální stanice Trimble S6 HP, a to prostorovou polární metodou. Pro měření bylo zvoleno volné stanovisko (5002), které leželo přibližně uprostřed čtvercové sítě tvořené vlíčovacími body. Tím se docílila optimální konfigurace pro jeho následný výpočet pomocí prostorového protínání.

Zaměření vlíčovacích bodů proběhlo vždy ve dvou polohách dalekohledu a v jedné měřické skupině. Měření na orientace (body 4001 až 4004) bylo provedeno ve dvou polohách dalekohledu a ve dvou měřických skupinách.

Na Obr. 20 je názorně vyobrazeno schéma měřické sítě ze stanoviska 5002 s naznačeným měřením na orientace a na vybrané vlíčovací body.



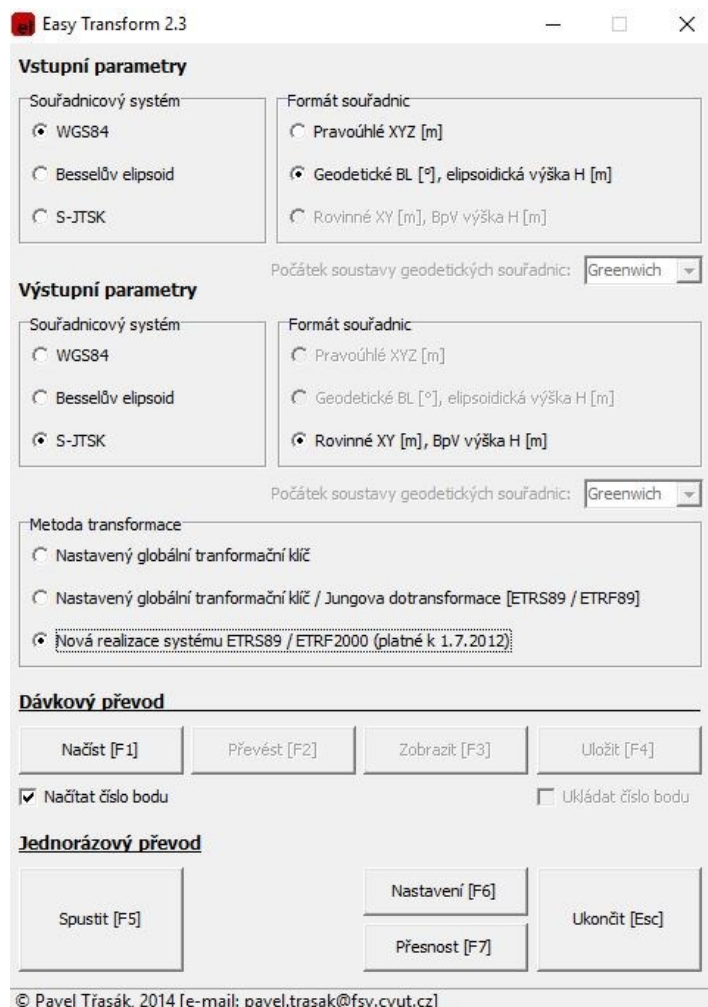
Obr. 20 - Schéma měřické sítě na stanovisku 5002

6 Zpracování měření

Zpracování měření zahrnovalo tři dílčí části. Nejprve bylo třeba zpracovat data z GNSS měření pro získání souřadnic bodů bodového pole a poté byla zpracována data z totální stanice. Tím byly získaly souřadnice vlíčovacích bodů v S-JTSK pro každou etapu. Výsledkem závěrečné části zpracování jsou pak vygenerované reporty ze zpracování, ve kterých jsou (mimo jiné) údaje o dosažených přesnostech.

6.1 Zpracování GNSS měření

Z GNSS aparatury byl exportován protokol s naměřenými body v souřadnicovém systému WGS84. Ty byly následně přetransformovány do souřadnicového systému S-JTSK pomocí programu Easy Transform, který byl nastaven dle Obr. 21. Tím se získaly souřadnice bodů 4001, 4002, 4003 a 4004 pro všech pět etap měření (Tab. 2).



Obr. 21 - Easy Transform

Bod	X [m]	Y [m]	Z [m]	Etapa
4001.1	1038223,459	747238,396	327,082	1
4001.2	1038223,442	747238,398	327,082	2
4001.3	1038223,449	747238,419	327,092	3
4001.4	1038223,466	747238,405	327,092	4
4001.5	1038223,446	747238,395	327,112	5

Tab. 2 - Ukázka přetransformovaných souřadnic pro bod 4001

6.2 Zpracování tachymetrického měření

Z totální stanice byl exportován zápisník z měření. V programu Groma byl nastaven měřítkový koeficient (Obr. 22) pomocí souřadnic bodu 4001 z první etapy měření a následně byl do programu nahrán zápisník.

Křovák

Pravouhlé souřadnice:

Y: 747238.396
X: 1038223.459
Z: 327.082

Polární souřadnice:

Ro: 1279168.938 m
Epsilon: 35.74361865 °

Kartografické souřadnice:

Šířka: 78.66946121 °
Délka: 36.47588277 °

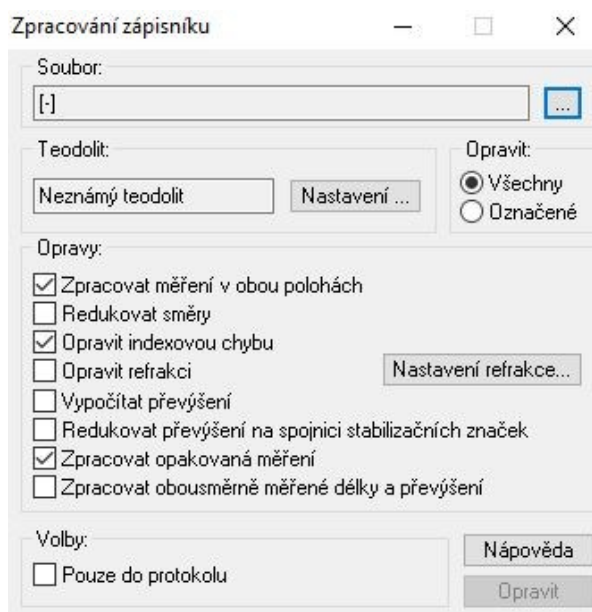
Měřitkový koeficient:

Oprava z kartografického zkreslení 0.999904394858
 Oprava z nadmořské výšky: 0.999948741510
Výsledný měřítkový koeficient: 0.999853141268

Nastavit Výpočet

Obr. 22 - Nastavený měřítkový koeficient

V dalším kroku proběhlo samotné zpracování zápisníku. Zpracování proběhlo s nastavením tak, aby se opravila indexová chyba, zpracovalo měření v obou polohách dalekohledu a opakovaná měření (Obr. 23).



Obr. 23 - Zpracování zápisníku

V posledním kroku byla aplikována na zpracovaný zápisník polární metoda dávkou, která protínáním vypočítá volné stanovisko 5002 a všechny vlíčovací body 1 – 100 v souřadnicích S-JTSK.

Tímto postupem byly získány souřadnice vlíčovacích bodů pro všech pět etap měření (Tab. 3). Pouze nastavený měřítkový koeficient se neměnil. Celé zpracování bylo zaznamenáváno do protokolu, který je součástí elektronické přílohy.

Bod	X [m]	Y [m]	Z [m]	Etapa
1	1038212,171	747231,281	326,841	1
1	1038212,166	747231,280	326,843	2
1	1038212,186	747231,284	326,846	3
1	1038212,171	747231,290	326,853	4
1	1038212,176	747231,277	326,865	5

Tab. 3 - Ukázka výsledných souřadnic pro vlíčovací bod 1

6.3 Zpracování snímků

V této podkapitole je popsán postup při zpracovávání snímků v programu Agisoft PhotoScan.

6.3.1 Příprava a import snímků

Z jednotlivých snímků byly vyextrahovány souřadnice vstupních pupil (v systému WGS84) pomocí programu ExifTool. Získané souřadnice byly přetřansformovány do systému S-JTSK pomocí programu Easy Transform, který byl opět nastaven dle Obr. 21. Dále pak byly osy X a Y prohozeny a vynásobeny -1 . To bylo provedeno z důvodu, že Agisoft PhotoScan pracuje s matematickým uspořádáním souřadnicových os.

V dalším kroku byl v programu Agisoft PhotoScan založen nový *Chunk* (soubor snímků). Pro každou etapu byl založen právě jeden *Chunk* (celkem bylo tedy založeno takových souborů pět) a do něj byly naimportovány příslušné snímky. Následně byly ke snímkům, pomocí funkce *Import CSV*, naimportovány přetřansformované a upravené souřadnice vstupních pupil (Obr. 24).

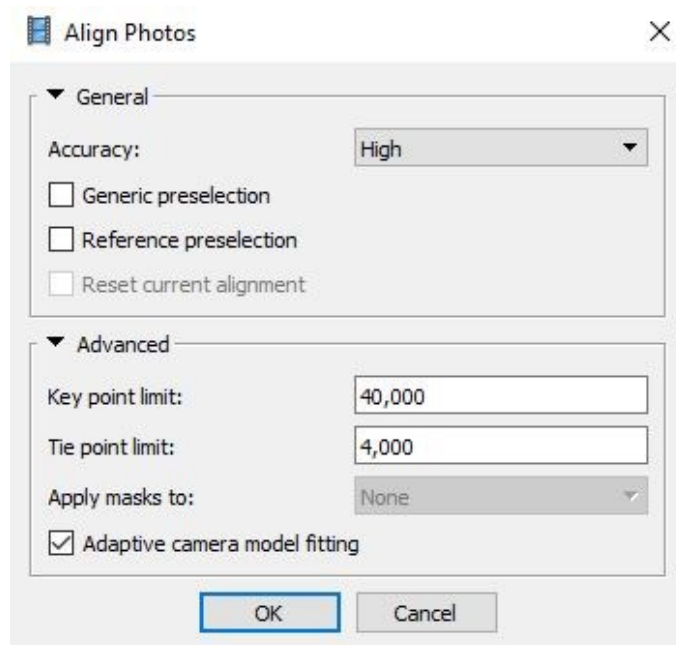
Label	X	Y	Z	Yaw	Pitch	Roll
100_0005_00...	-747211.606	-1038226.438	367.575			
100_0005_00...	-747199.87	-1038225.363	367.666			
100_0005_00...	-747188.261	-1038224.246	367.748			
100_0005_00...	-747176.518	-1038223.114	367.655			
100_0005_00...	-747164.789	-1038222.033	367.593			
100_0005_00...	-747153.150	-1038220.907	367.656			

Obr. 24 - Import CSV

6.3.2 Generování řídkého mračna bodů

Následně se vytvořilo řídké mračno bodů pomocí funkce *Align Photos*. Funkce, za využití epipolární geometrie, najde klíčové body na jednotlivých snímcích a vyhledává odpovídající body na ostatních snímcích. Tím vznikne řídké mračno bodů. Svazkovým vyrovnáním se poté přesně určí poloha jednotlivých snímků v prostoru a prvky vnitřní a vnější orientace.

Parametry výpočtu byly nastaveny dle Obr. 25. Generování řídkého mračna bodů proběhlo pro všech pět etap shodně se stejným nastavením.



Obr. 25 - Align Photos

První parametr *Accuracy* značí s jakou přesností mají být vypočteny prvky vnější orientace. Nastavit lze na *Lowest*, *Low*, *Medium*, *High* a *Highest*. Při nastavení přesnosti na *High* pracuje software se snímkem v plném originálním rozlišení. U nižších nastaveních je obraz zmenšen 4x (*Medium*), 16x (*Low*) a 64x (*Lowest*) svého původního rozlišení. Při nastavení přesnosti na *Highest* je snímek 4x rozšířen oproti svému originálnímu rozlišení. Volba nastavení na *Highest* je na výpočet velmi náročná (tj. časově náročná), proto se místo ní použila volba *High*.

Dalším parametrem je *Pair preselection*, který určuje, zda mají být vypočítány podмноžiny snímků, ve kterých se nachází klíčové body. Nastavit lze *Generic preselection* (určuje překrývající se snímky pomocí kopií snímků v nižším rozlišení)

a *Reference preselection* (určuje překrývající se snímky pomocí známých pozic kamer), přičemž obě dvě možnosti byly zamítnuty (software tak zkouší spojovat všechny snímky se všemi).

Dále lze nastavit *Key point limit* (limit klíčových bodů) a *Tie point limit* (limit spojovacích bodů) na jeden snímek. Zde byly ponechány referenční hodnoty, tj. *Key point limit* byl nastaven na 40 000 a byl *Tie point limit* nastaven na 4 000. Jako poslední parametr lze povolit anebo zakázat možnost *Adaptive camera model fitting*. Tato volba automaticky vybírá parametry kamery do výpočetního procesu a byla pro zpracování povolena.

6.3.3 Označení vlíčovacích bodů

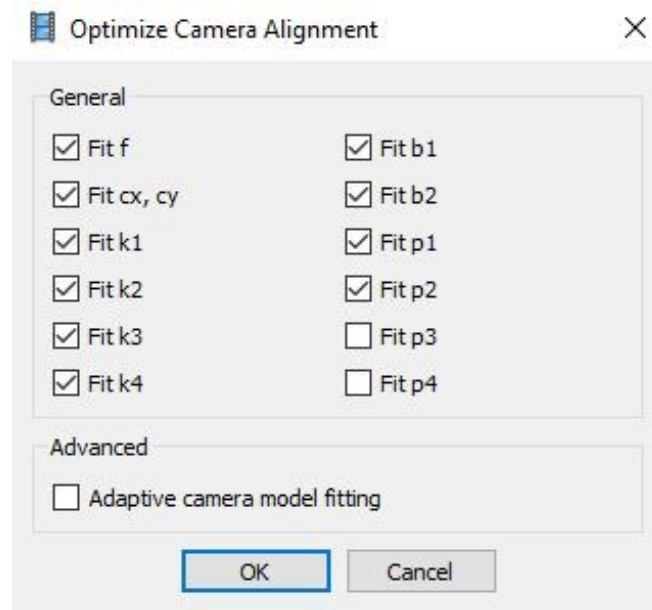
Souřadnice vlíčovacích bodů se do programu Agisoft PhotoScan naimportovaly obdobně jako v 6.3.1 a následně se body označily na jednotlivých snímcích (Obr. 26). Když byl bod označen alespoň na dvou snímcích, tak program automaticky dopočítal polohu tohoto bodu i na ostatních snímcích (za předpokladu, že se na nich tento bod vyskytoval) a pak už ho jenom stačilo poposunout na správné místo. Označeny byly jenom dobře a jasně identifikovatelné body.



Obr. 26 - Ukázka určování vlíčovacích bodů pro letovou hladinu 40 m, 25 m a 15 m

6.3.4 Optimalizace modelu

Po určení vlíčovacích bodů byl model optimalizován pomocí funkce *Optimize Camera Alignment* (Obr. 27). V této funkci se určují prvky vnitřní orientace, které mají být vyrovnány.

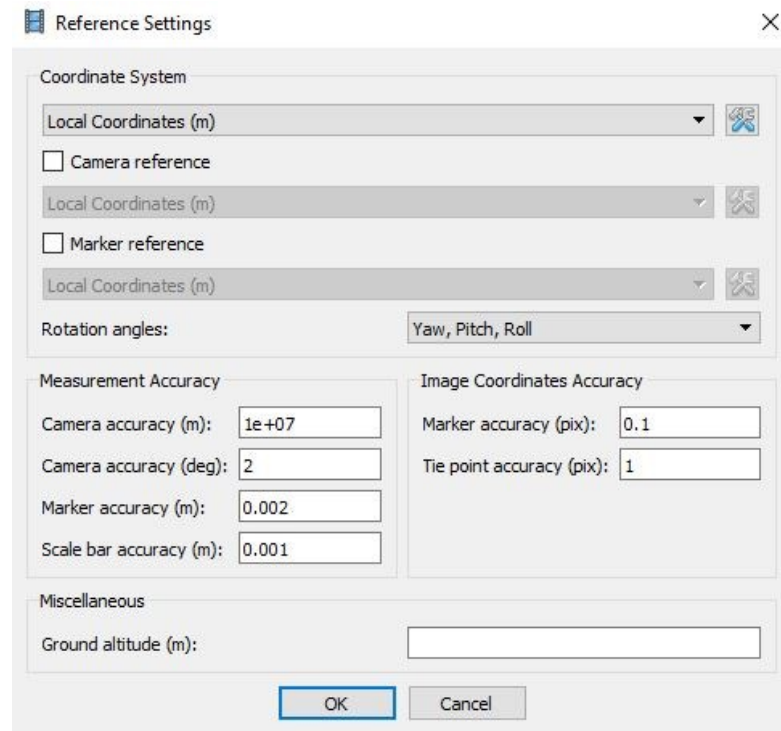


Obr. 27 - Optimize Camera Alignment

Kde f je ohnisková vzdálenost, cx a cy je poloha hlavního snímkového bodu, $k1 - k2$ a $p1 - p2$ jsou koeficienty radiální a tangenciální distorze objektivu, $b1$ a $b2$ je afinita a nekolmost souřadnicových os.

6.3.5 Vztahy pro kontrolu dosažené přesnosti

V nastavení *Reference Settings* byla nastavena přesnost kamer a vlíčovacích bodů. V jednom případě jsou považovány vlíčovací body jako přesné a po domluvě s vedoucím diplomové práce jim byla nastavena přesnost 2 mm (dle Obr. 28). Tím se určí přesnost kamer vůči vlíčovacím bodům. Ve druhém případě se naopak považují za přesné kamery a za nepřesné vlíčovací body. Nastavení v *Reference Settings* je tedy opačné.



Obr. 28 - Reference Settings

Po označení vlíčovacích bodů a optimalizaci modelu byly vypočteny souřadnicové rozdíly vlíčovacích bodů (a poté i kamer) $Xerr$, $Yerr$ a $Zerr$, jako rozdíl vypočtených souřadnic z modelu a referenčních souřadnic. Z toho pak byla vypočtena prostorová souřadnicová odchylka pro každý vlíčovací bod, která se značí jako $Error$ (7). Pro každou souřadnici pak byly vypočteny směrodatné odchylky, které se značí jako $TotalErrorX$, $TotalErrorY$ a $TotalErrorZ$ (8). Celková prostorová směrodatná odchylka se pak značí jako $TotalError$ (9).

$$Error = \sqrt{Xerr^2 + Yerr^2 + Zerr^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} TotalErrorX &= \sqrt{\frac{Xerr_1^2 + Xerr_2^2 + \dots + Xerr_n^2}{n}} \\ TotalErrorY &= \sqrt{\frac{Yerr_1^2 + Yerr_2^2 + \dots + Yerr_n^2}{n}} \\ TotalErrorZ &= \sqrt{\frac{Zerr_1^2 + Zerr_2^2 + \dots + Zerr_n^2}{n}} \end{aligned} \quad (8)$$

kde: n je celkový počet použitých bodů

$$TotalError = \sqrt{\frac{Error_1^2 + Error_2^2 + \dots + Error_n^2}{n}} \quad (9)$$

kde: n je celkový počet použitých bodů

Cameras	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 100_0005_0154	-0.006067	0.038017	-0.453960	10000000.000000	0.455589
<input checked="" type="checkbox"/> 100_0005_0155	-0.003070	0.033157	-0.447830	10000000.000000	0.449067
<input checked="" type="checkbox"/> 100_0005_0156	-0.001079	0.039376	-0.445705	10000000.000000	0.447442
<input checked="" type="checkbox"/> 100_0005_0157	-0.002811	0.044800	-0.442797	10000000.000000	0.445066
<input checked="" type="checkbox"/> 100_0005_0158	0.009775	0.045265	-0.438265	10000000.000000	0.440704
Total Error	0.013825	0.017425	0.468150		0.468678

Markers	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 96	-0.003649	0.001321	-0.005440	0.002000	0.006682	12	0.231
<input checked="" type="checkbox"/> 97	0.000307	0.003268	0.001460	0.002000	0.003593	11	0.225
<input checked="" type="checkbox"/> 98	-0.001875	0.001800	-0.002458	0.002000	0.003577	11	0.225
<input checked="" type="checkbox"/> 99	-0.003375	0.001671	-0.001805	0.002000	0.004176	13	0.152
<input checked="" type="checkbox"/> 100	0.004097	0.000041	-0.001996	0.002000	0.004557	14	0.309
Total Error							
Control points	0.002318	0.002684	0.002993		0.004640		0.269
Check points							

Obr. 29 - Ukázka odchylek

U automatického náletu, který byl prováděn z výšky 25 m, byla u jednoho snímku zjištěna abnormálně vysoká prostorová směrodatná odchylka (přes 3,7 m) a proto se s tímto snímkem dále nepracovalo a není zahrnut do výsledků.

6.3.6 Export výsledků

Pomocí funkce *Generate Report* byla vygenerována zpráva ve formátu PDF, která shrnuje informace o vytvořeném modelu. Mezi informace, které vygenerovaná zpráva obsahuje, patří počet použitých snímků, detaily o použité kameře i s kalibračními údaji a hlavně seznam všech vlíčovacích bodů včetně jejich jednotlivých odchylek. Vygenerované reporty všech náletů (modelů) jsou součástí elektronické přílohy.

Dodatečně byl ještě zpracován jeden, čili šestý, nálet. Ten se skládal z části automatického náletu pro letovou hladinu 40 m, která byla provedena po výměně baterie. První část (nepoužitá) obsahuje 55 snímků a druhá část (použitá) obsahuje 158 snímků. U automatického náletu pro letovou hladinu 25 m to už nebylo možné z toho důvodu, že první ani druhý soubor měření neobsahuje kompletní informace o testovacím bodovém poli (tj. ne všechny body jsou zobrazeny v jedné části měření).

7 Výsledky testování

Po dokončení zpracování dat a vygenerování reportů v programu Agisoft PhotoScan proběhlo vyhodnocení získaných výsledků.

Pro lepší přehlednost v názvech jednotlivých náletů se přešlo na následující zkratky:

Název náletu	Zkratka
Automatický nálet pro letovou hladinu 40 m (první a druhá část)	Auto 40 č.1
Automatický nálet pro letovou hladinu 40 m (jen druhá část)	Auto 40 č.2
Automatický nálet pro letovou hladinu 25 m	Auto 25
Manuální nálet pro letovou hladinu 40 m	Manu 40
Manuální nálet pro letovou hladinu 25 m	Manu 25
Manuální nálet pro letovou hladinu 15 m	Manu 15

Tab. 4 - Zkratky pro názvy jednotlivých náletů

V Tab. 5 jsou uvedeny rozlišovací schopnosti vytvořených modelů pro jednotlivé nálety. *Ground resolution* uvádí, jak velký se jeví jeden pixel v příslušném modelu *Reprojection error* uvádí velikost chyby mezi měřeným vlíčovacím bodem a jeho projekcí. V tabulce je uváděná její průměrná hodnota, která je vypočítaná pro všechny vlíčovací body. Značí to, s jakou přesností byly pro daný nálet označeny vlíčovací body. Obecně by mělo platit, že čím je velikost jednoho pixelu větší, tím by měla vzrůstat chyba z označení vlíčovacích bodů (horší rozlišení snímků vede ke zhoršení identifikace bodů).

Druh náletu	Ground resolution	Reprojection error
Auto 40 č.1	12,3 mm/pix	0,44 pix
Auto 40 č.2	12,3 mm/pix	0,45 pix
Auto 25	7,9 mm/pix	0,44 pix
Manu 40	12,2 mm/pix	0,41 pix
Manu 25	7,7 mm/pix	0,32 pix
Manu 15	4,7 mm/pix	0,29 pix

Tab. 5 - Rozlišovací schopnosti modelu pro jednotlivé nálety

7.1 Přesnost kamer

V této kapitole se porovnává a zkoumá dosažená přesnost kamer pro jednotlivé nálety. Přesnost kamer pro jeden nálet udává, s jakou prostorovou odchylkou se jeví pořízené snímky (pozice kamer) vůči vlčovací bodům.

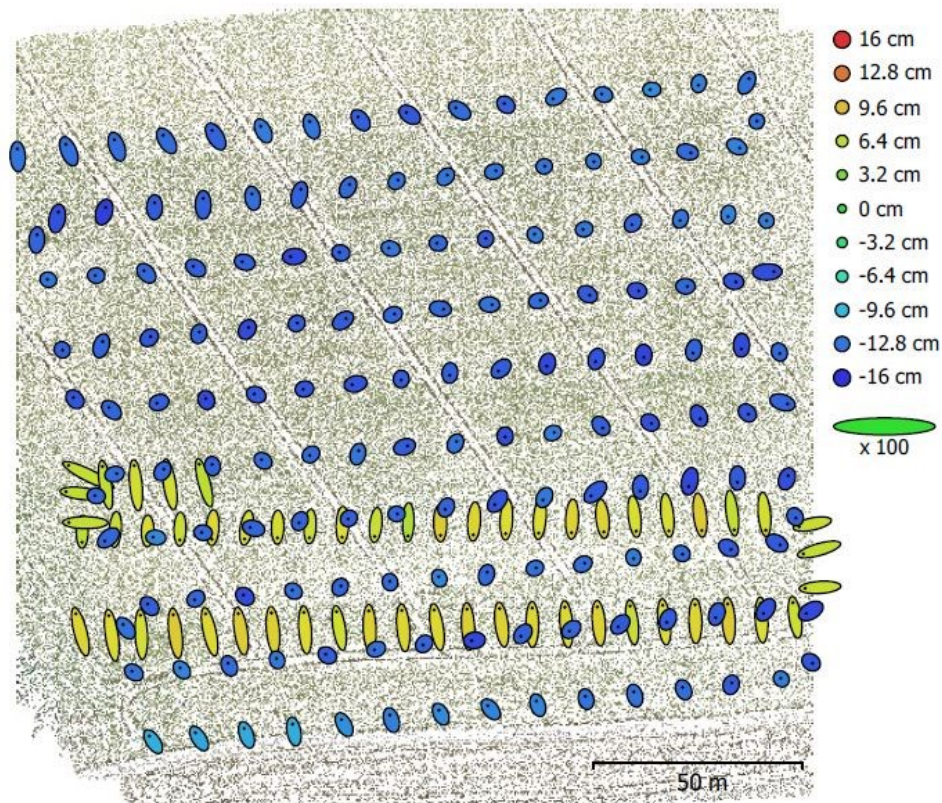
Na všech následujících obrázcích (Obr. 30 až Obr. 35) je přesnost polohy (X error, Y error) reprezentována tvarem elipsy chyb, výšková přesnost (Z error) je pak reprezentována barevnou hypsometrií a vypočítané pozice kamer jsou značeny černou tečkou. Pod obrázky jsou vždy umístěny tabulky (Tab. 6 až Tab. 11) s průměrnými hodnotami odchylek pro příslušný nálet.

Nejprve je pro každý nálet popsán obrázek a poté je zhodnocena dosažená přesnost.

Auto 40 č.1

Na Obr. 30 lze vidět žlutozeleně vyznačené elipsy, které reprezentují první část náletu, při kterém se dronu vybila baterie. Naopak modře vyznačené reprezentují druhou část, která proběhla už bez přerušení. Tvar elips pak demonstruje stočení a posun fázového centra během náletu, stočení je nejvíce patrné u první části (u žlutozelených elips). Nejlépe je to vidět na okrajích, kdy se dron otáčel, aby mohl nasnímat další linii. Z obrázku dále lze vidět, že polohově se obě části liší (první část se jeví o něco hůře, jak druhá) a výškově pak už k sobě vůbec nepasují. Důvod takové odlišnosti by mohl být ve výměně baterie. Během výměny došlo k logickému vypnutí a následnému zapnutí stroje, a tak i ke ztrátě a znovuzískání připojení ke korekcím. A tím je tedy možné, že došlo k připojení a získání odlišných korekcí.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 6. Dosažené odchylky v poloze se vzhledem k letové hladině náletu a k rozlišení modelu (Tab. 5) jeví jako přijatelné hodnoty. Odchylka ve výšce je při porovnání k polohové odchylce neúměrně velká, a tak ji lze označit za chybnou.



Obr. 30 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 40 č.1

Průměrné odchylky v umístění kamer pro Auto 40 č.1				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
15,9 mm	37,9 mm	41,1 mm	122,4 mm	129,2 mm

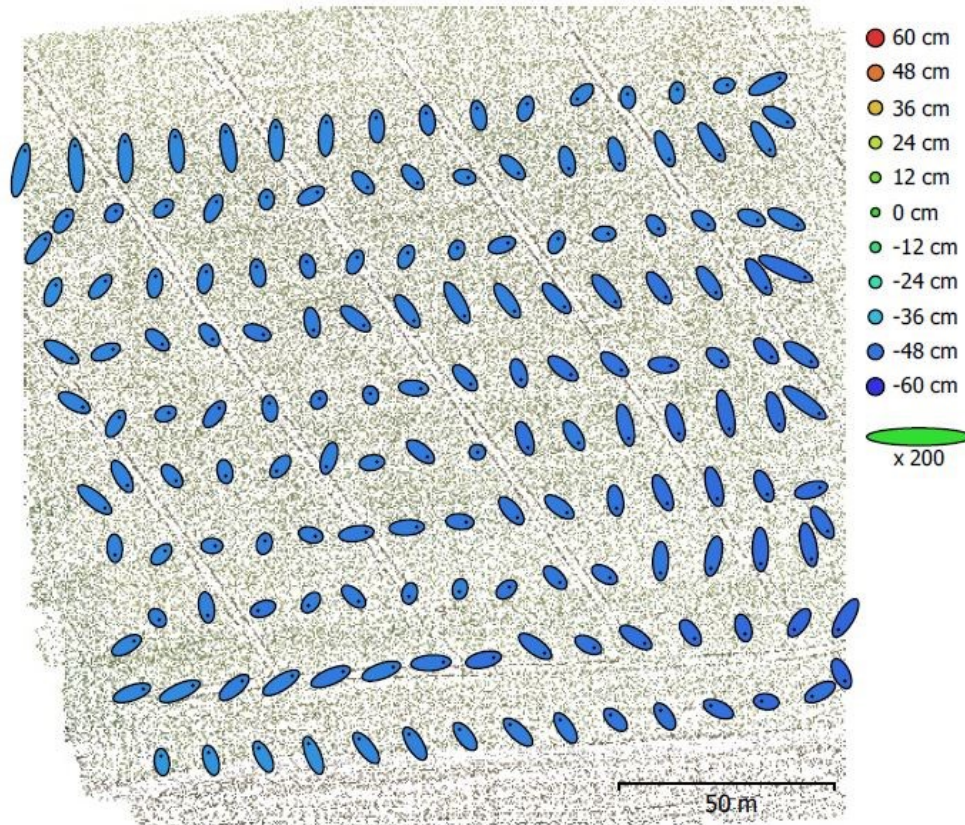
Tab. 6 - Přesnost umístění kamer pro Auto 40 č.1

Auto 40 č.2

Na Obr. 31 je zobrazena druhá část náletu. Jelikož do výpočtu už nevstupovala první část, není jí výsledný tvar elips ovlivněn, a proto mají při srovnání s Obr. 30 lehce odlišný tvar. I tady lze pozorovat stočení a posun fázového centra během náletu, ale jenom na okrajích testovacího pole. Čím blíže se kamera posouvá k pomyslnému středu pole, tím více mají na její výslednou polohu vliv ostatní kamery a dochází tak k lepšímu vyrovnání výsledku (z elipsy se stává prakticky kruh).

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 7. Dosažené odchylky v poloze se vzhledem k letové hladině náletu a k rozlišení modelu (Tab. 5) jeví jako velice dobré. Průměrná polohová chyba má v tomto případě velikost dvou pixelů, což je velice dobrý výsledek. Při porovnání s Auto 40 č.1 zde dochází skoro ke dvojnásobnému zlepšení

přesnosti, které lze připisovat jednotnému souboru měření (rozdíl oproti Auto 40 č.1). Odchylka ve výšce ale na druhou stranu dosahuje extrémních hodnot a lze ji bezpečně vyhodnotit jako chybnou.



Obr. 31 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 40 č.2

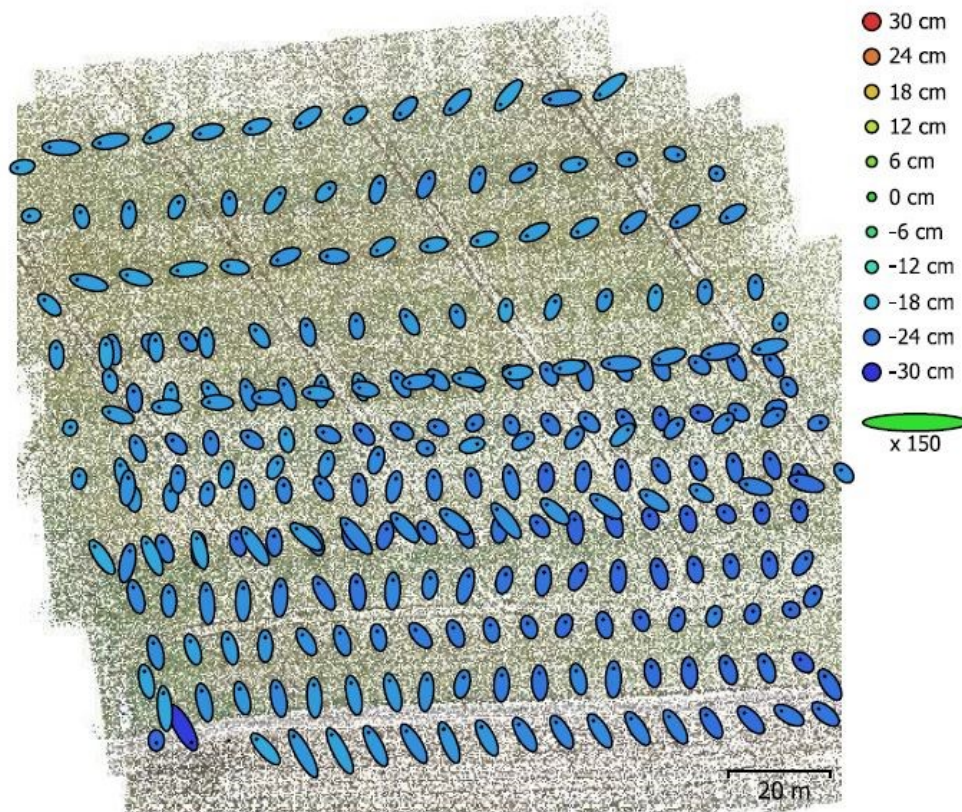
Průměrné odchylky v umístění kamer pro Auto 40 č.2				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
13,8 mm	17,4 mm	22,2 mm	468,2 mm	468,7 mm

Tab. 7 - Přesnost umístění kamer pro Auto 40 č.2

Auto 25

Tento nálet se skládá ze dvou souborů měření, ale jak už bylo řečeno výše (viz. 6.3.6) nešlo je použít samostatně, jako u předchozího případu. V dolní části Obr. 32 lze vidět, že stočení fázového centra je zde minimální. Naopak v horní části je už více patrné. Je to patrně dáno tím, že došlo k vzájemnému ovlivnění jednou částí náletu druhou. Dále lze z obrázku vyzorovat, kde se dronu vybila baterie a že po její výměně dron nepokračoval z místa přerušení. Dron po výměně naletěl zhruba tři stejné dráhy, než se dostal k místu přerušení.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 8. Dosažené odchylky v poloze lze ohodnotit, vzhledem k letové hladině náletu a k rozlišení modelu, jako dobré. Je ale zajímavé, že dosažená přesnost polohy je prakticky stejná jako u předchozího náletu, který byl proveden z daleko větší letové hladiny (Tab. 7). Pravděpodobně je to dáno tím, že se jedná o kombinaci dvou souborů měření. Odchylka ve výšce je opět neúměrně velká vzhledem k odchylce v poloze, a tak ji lze označit jako podezřelou.



Obr. 32 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 25

Průměrné odchylky v umístění kamer pro Auto 25				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
12,5 mm	17,7 mm	21,7 mm	223,8 mm	224,9 mm

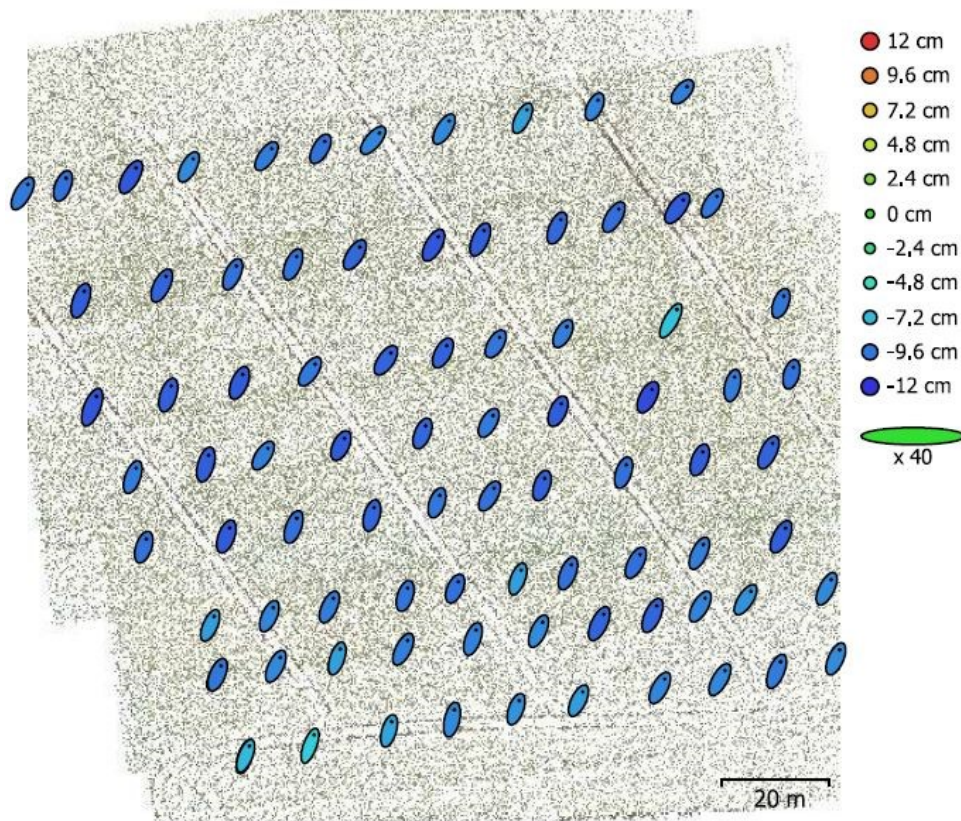
Tab. 8 - Přesnost umístění kamer pro Auto 25

Manu 40

Na Obr. 33 jsou vidět elipsy, jejichž stočení je shodné, a to díky stejné orientaci GNSS přijímače (fázového centra) během náletu (viz. 5.4). Následně je možné pozorovat, že většina elips má jednotné zbarvení (tmavě modré), ale pár jich disponuje odlišnou barvou (tyrkysová). Jelikož barevná hypsometrie značí výškovou přesnost, lze

předpokládat, že k těmto několika málo případům došlo v důsledku příjmu mírně odlišných korekcí. Dále si lze všimnout, že během náletu Manu 40 byla pořízena necelá půlka snímků při porovnání s Auto 40 č.1 (případně i s Auto č.2).

Průměrné dosažené odchylky, které lze vidět v Tab. 9, jsou pro polohu celkem vysoké. Při porovnání s Auto 40 č.1 (Tab. 6) a Auto č.2 (Tab. 7) lze vidět, že přesnost v poloze vychází pro manuálně řízený let hůře o více než 6 cm. To je pravděpodobně způsobeno menším počtem pořízených fotografií během měření. Je ale zajímavé, že rozlišovací schopnost modelu Manu 40 je lepší než pro Auto 40 č.1 a č.2. Odchylka ve výšce zde sice částečně koresponduje s polohovou odchylkou, ale i tak se jedná o velkou a pravděpodobně chybnou hodnotu.



Obr. 33 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 40

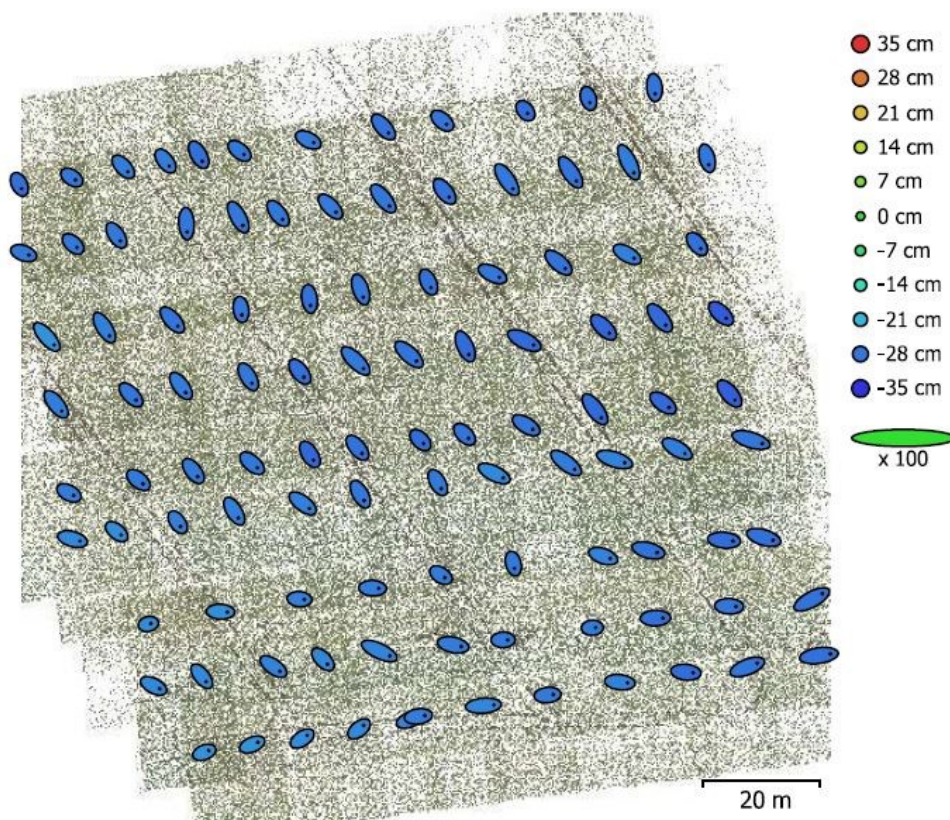
Průměrné odchylky v umístění kamer pro Manu 40				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
37,4 mm	78,5 mm	87,0 mm	94,6 mm	128,5 mm

Tab. 9 - Přesnost umístění kamer pro Manu 40

Manu 25

Na Obr. 34 lze vidět, že i přes stejnou orientaci GNSS přijímače během náletu mají počáteční elipsy (levý dolní roh) odlišné stočení, které se postupně vyvíjí až do cca půlky obrázku, kde poté už elipsy většinou drží shodné stočení. Pravděpodobně je to způsobeno přijímanými korekcemi. Dále si lze všimnout, že tento nálet obsahuje zhruba jednu třetinu snímků oproti náletu Auto 25 (viz. 5.4).

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 10. Dosažené odchylky v poloze jsou vzhledem k letové hladině náletu a rozlišení modelu poměrně slušné. Při porovnání s Auto 25 (Tab. 8) lze vidět, že přesnost v poloze vychází pro manuálně řízený let trochu hůře. To je pravděpodobně způsobeno menším počtem pořízených fotografií během měření. Překvapivě vychází polohová přesnost nepatrně hůře pro Manu 25 při porovnání s Auto 40 č.2 (Tab. 7). Odchylka ve výšce je i zde neúměrně velká oproti odchylce v poloze a lze ji označit za chybnou.



Obr. 34 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 25

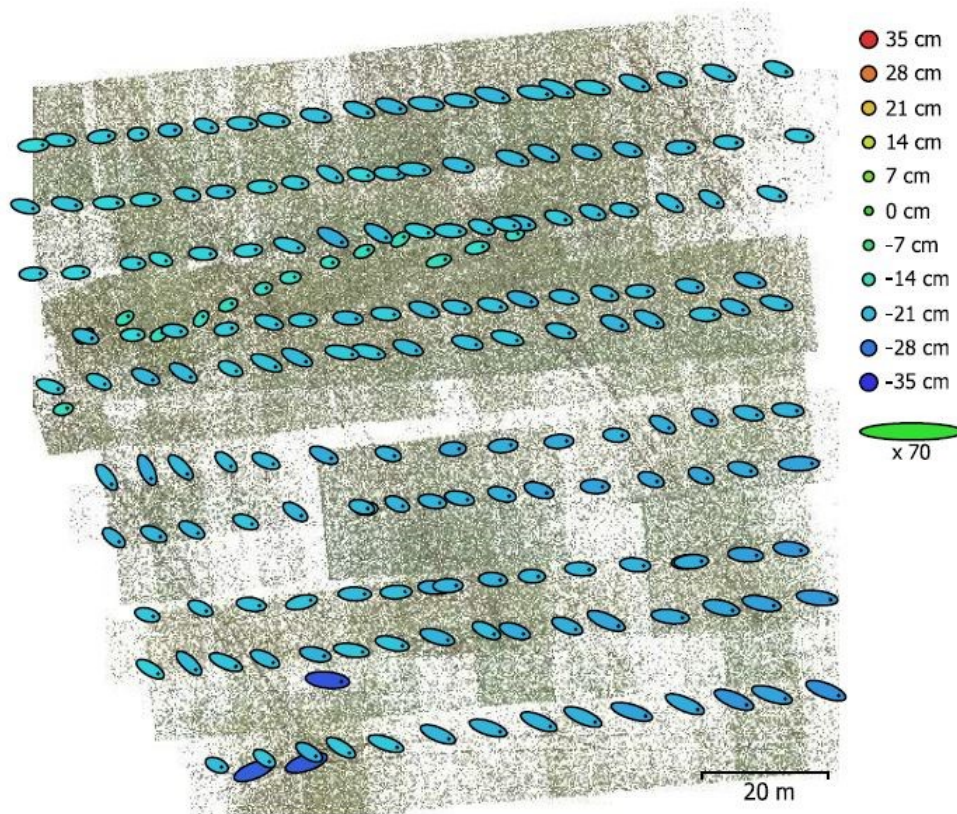
Průměrné odchylky v umístění kamer pro Manu 25				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
20,4 mm	17,2 mm	26,6 mm	276,5 mm	277,7 mm

Tab. 10 - Přesnost umístění kamer pro Manu 25

Manu 15

Na Obr. 35 lze vidět tři elipsy, které se od ostatních odlišují tmavě modrou barvou. Jedná se tři o snímky (z Manu 25), které byly dodatečně zahrnuty do zpracování tohoto náletu z důvodu, že bez nich se nedokázalo vygenerovat řídké mračno. Proto jsou tyto tři elipsy výrazně odlišné. Stočení fázového centra se zde postupně vyvíjí dle přijímaných korekcí.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 11. Dosažené odchylky v poloze nejsou vzhledem k nízké letové hladině náletu a rozlišení modelu (v nich logicky tento nálet dosahuje nejlepších výsledků) špatné. Při porovnání s nálety z větší letové hladiny, konkrétně s Auto 25 (Tab. 8), Manu 25 (Tab. 10) a dokonce i s Auto 40 č.2 (Tab. 7), dosahuje tento model horších odchylek. To by mohlo být způsobeno tím, že už jednotlivé fotografie neobsáhnou (vzhledem k letové hladině 15 m) dostatek vlíčovacích bodů potřebných pro získání lepších výsledků (model se už tak dobře „nenapasuje“). Odchylka ve výšce je i zde neúměrně větší oproti odchylce v poloze.



Obr. 35 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 15

Průměrné odchylky v umístění kamer pro Manu 15				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
37,6 mm	12,0 mm	39,5 mm	206,2 mm	209,9 mm

Tab. 11 - Přesnost umístění kamer pro Manu 15

Pro přehlednost dosažených odchylek v umístění kamer pro jednotlivé druhy náletů jsou výsledky uvedeny v následující tabulce (Tab. 12).

Druh náletu	Průměrné odchylky v umístění kamer				
	X error	Y error	XY error	Z error	Total error
Auto 40 č.1	15,9 mm	37,9 mm	41,1 mm	122,4 mm	129,2 mm
Auto 40 č.2	13,8 mm	17,4 mm	22,2 mm	468,2 mm	468,7 mm
Auto 25	12,5 mm	17,7 mm	21,7 mm	223,8 mm	224,9 mm
Manu 40	37,4 mm	78,5 mm	87,0 mm	94,6 mm	128,5 mm
Manu 25	20,4 mm	17,2 mm	26,6 mm	276,5 mm	277,7 mm
Manu 15	37,6 mm	12,0 mm	39,5 mm	206,2 mm	209,9 mm

Tab. 12 - Přesnost umístění kamer

Celkově je možné pozorovat, že automatické nálety dosahují lepší přesnosti pro umístění kamer v poloze než manuálně řízené lety. Pravděpodobně je to zapříčiněno

menším počtem snímků a odlišnou konfigurací GNSS přijímače. Hodnoty pro přesnost ve výšce se prakticky pro všechny nálety jeví jako velmi podezřelé.

7.2 Přesnost vlíčovacích bodů

V této kapitole byla porovnávána a zkoumána dosažená přesnost vlíčovacích bodů pro jednotlivé nálety. Přesnost vlíčovacích bodů pro jeden nálet udává s jakou prostorovou odchylkou byly vypočítány vlíčovací body. Jinými slovy, jak by dokázal testovaný dron Phantom 4 RTK přesně určit pomyslné body v terénu bez použití vlíčovacích bodů. Jedná se tedy o informace, které jsou pro geodetickou praxi nejvíce zajímavé.

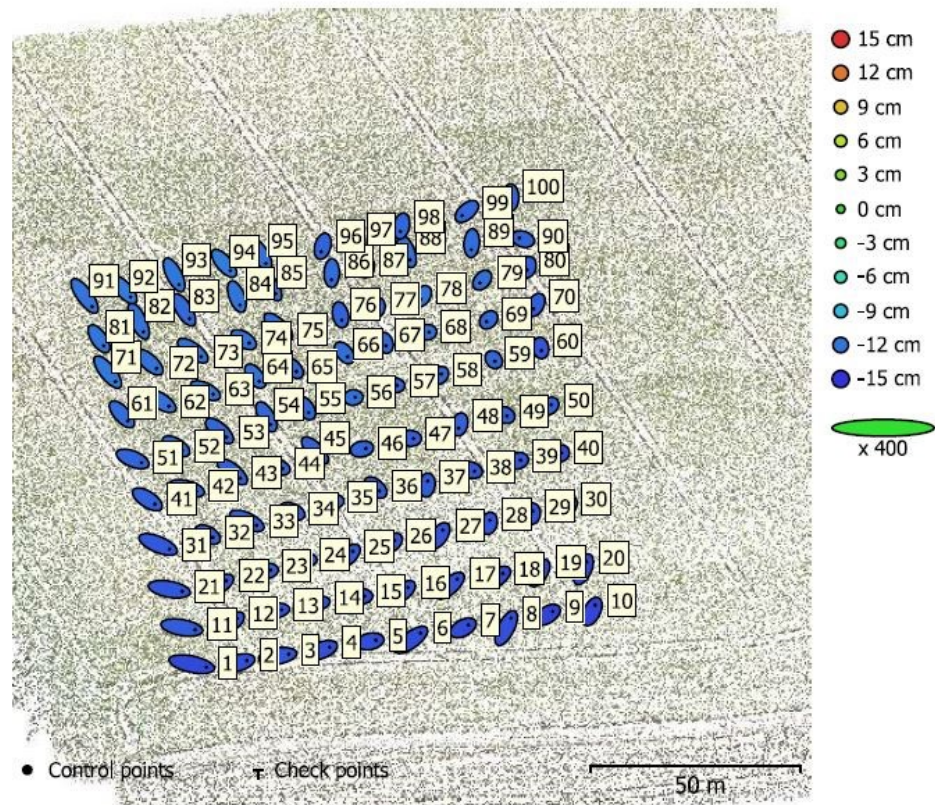
Na všech následujících obrázcích (Obr. 36 až Obr. 41) je přesnost polohy (X error, Y error) reprezentována tvarem elipsy chyb, výšková přesnost (Z error) je pak reprezentována barevnou hypsometrií a vypočítané pozice vlíčovacích bodů jsou značeny černou tečkou. Pod obrázky jsou vždy umístěny tabulky (Tab. 13 až Tab. 18) s průměrnými hodnotami odchylek pro příslušný nálet.

Nejprve je pro každý nálet popsán obrázek a poté je zhodnocena dosažená přesnost.

Auto 40 č.1

Z Obr. 36 je vidět, že stočení elips je nepravidelné. Jako pravděpodobný důvod se jeví v nestejně orientaci GNSS přijímače. Lze také pozorovat, že polohová odchylka bodů na okrajích testovaného území je větší než u bodů uprostřed pozorované oblasti. To je pravděpodobně dáno množstvím vzájemně překrývajících snímků.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 13. Dosažené odchylky v poloze jsou s ohledem na výšku letové hladiny naprosto výborné. Odchylka ve výšce je ale neúměrně velká oproti odchylce v poloze.



Obr. 36 - Pozice a přesnosti vličovacích bodů u Auto 40 č.1

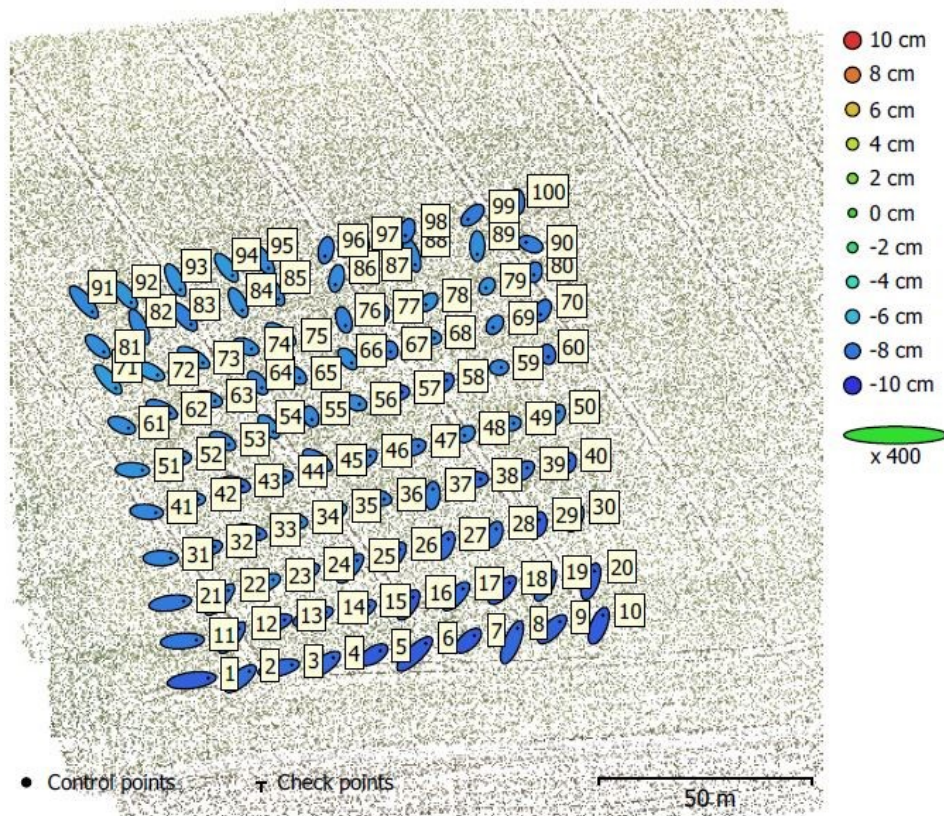
Průměrné odchylky u vličovacích bodů pro Auto 40 č.1				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
7,0 mm	5,9 mm	9,2 mm	129,0 mm	129,3 mm

Tab. 13 - Přesnost vličovacích bodů pro Auto 40 č.1

Auto 40 č.2

Na Obr. 37 jsou elipsy, které mají velice podobný charakter jako u předchozího náletu (Auto 40 č.1). To by mělo být dáno tím, že pro tento nálet byly použity cca tři čtvrtiny stejných snímků. Díky tomu lze opět pozorovat, že polohová přesnost bodů na okrajích testovaného území je menší než u bodů uprostřed pozorované oblasti.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 14. Dosažené odchylky v poloze jsou s ohledem na výšku letové hladiny opět výborné. Překvapivě ale nedošlo ke zlepšení přesnosti (oproti Auto 40 č.1), jako tomu došlo v předchozí podkapitole (viz. 7.1). Odchylka ve výšce je opět neúměrně velká oproti odchylce v poloze, lze ji označit jako podezřelou.



Obr. 37 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Auto 40 č.2

Průměrné odchylky u vlíčovacích bodů pro Auto 40 č.2				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
7,6 mm	6,5 mm	9,9 mm	78,0 mm	78,6 mm

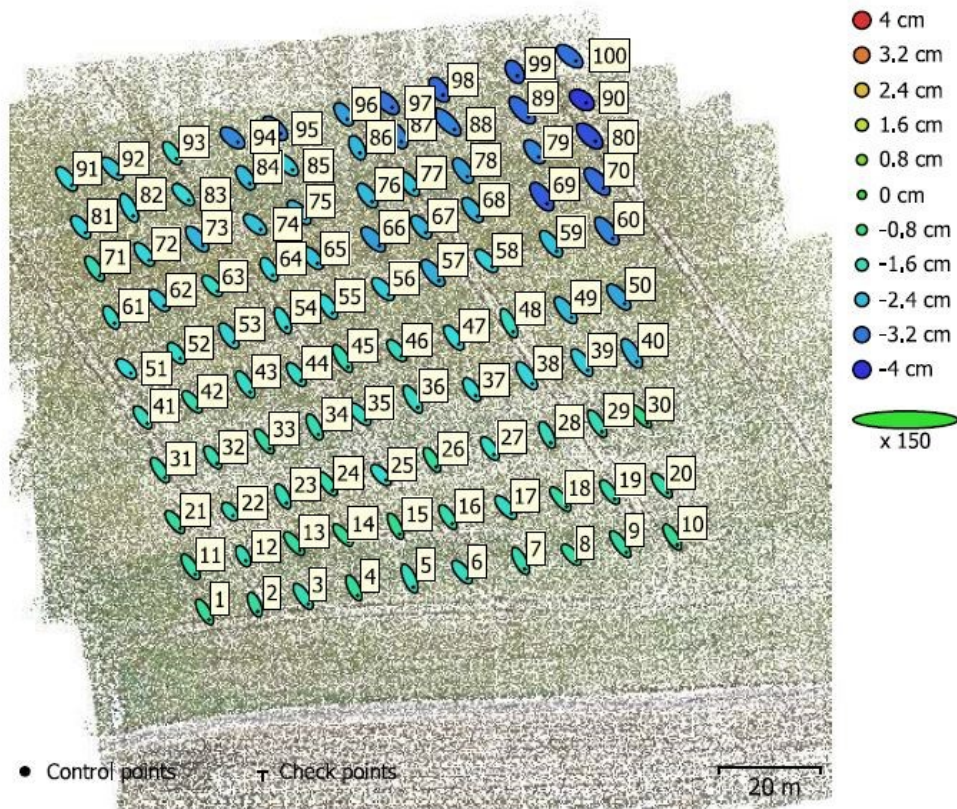
Tab. 14 - Přesnost vlíčovacích bodů pro Auto 40 č.2

Auto 25

Na Obr. 38 je patrné, že z nějakého důvodu dochází k postupnému zhoršování výškové přesnosti u pravého horního rohu. Je možné, že k tomu dochází kvůli zhoršení korekcí. Dále lze pozorovat, že stočení elips je překvapivě shodné. Jelikož se jedná o automatický nálet, kde není stejná orientace přijímače GNSS, je výsledek poměrně překvapující. Naopak ale tvar jednotlivých elips je prakticky stejný, a to by mohlo značit nějakou systematickou chybu drona.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 15. Dosažené odchylky v poloze jsou vzhledem k letové hladině velice dobré. Zajímavé ale je, že polohové odchylky vycházejí dvakrát horší než u předchozích náletů z vyšší letové hladiny (Tab. 13 a Tab. 14), a tím pádem s horší rozlišovací schopností daných modelů (Tab. 5). Odchylka ve

výšce zde poprvé dosahuje normálních (velice dobrých) hodnot. Vzhledem k předchozím případům se lze výsledná výšková odchylka považovat za dílo náhody.



Obr. 38 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Auto 25

Průměrné odchylky u vlíčovacích bodů pro Auto 25				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
12,9 mm	17,2 mm	21,5 mm	21,5 mm	30,4 mm

Tab. 15 - Přesnost vlíčovacích bodů pro Auto 25

Manu 40

Na Obr. 39 jsou shodně stočené elipsy, které jsou pravděpodobně důsledkem stejné orientace GNSS přijímače po dobu letu. Velikost elips je prakticky stejná, a to může značit systematickou chybu v konstrukci drona, jako je například posunutí fázové centrum. Dále je možné vidět, že výškově je model, až na pár výjimek, jednotný.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 16. Dosažené odchylky v poloze jsou vzhledem k letové hladině a při porovnání s Auto 40 č.1 a č.2 (Tab. 13 a Tab. 14) vysoké. Odchylka ve výšce zde však dosahuje prakticky dokonalé hodnoty. Vzhledem k předchozím hodnotám, které vycházely, se pravděpodobně jedná o chybu.



Obr. 39 - Pozice a přesnosti vřícovacích bodů u Manu 40

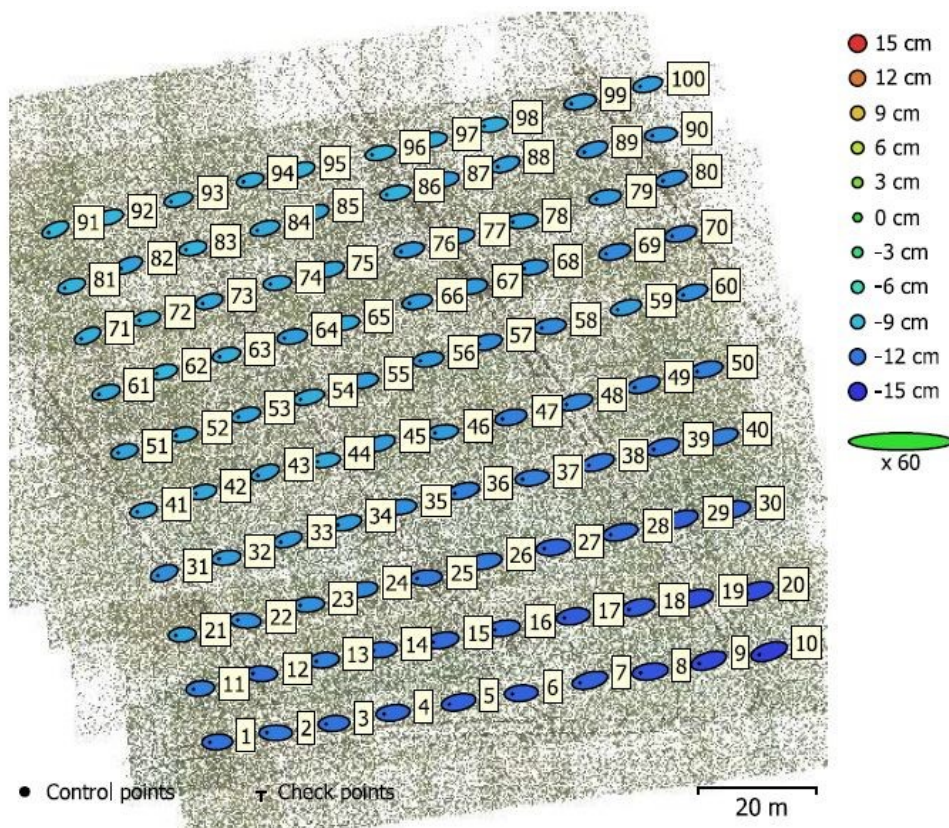
Průměrné odchylky u vřícovacích bodů pro Manu 40				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
50,2 mm	70,2 mm	86,3 mm	8,3 mm	86,7 mm

Tab. 16 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 40

Manu 25

Z Obr. 40 lze pozorovat, že stočení a tvar elips jsou velice podobné předchozímu případu (Manu 40) se shodným zhodnocením. Díky barevné hypsometrii je možné si všimnout, že výšková přesnost se od bodu 91 zhoršuje po úhlopříčce směrem k bodu 10. Pravděpodobný důvod je opět v získávání korekcí.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 17. Dosažené odchylky v poloze jsou vzhledem k letové hladině a rozlišení modelu slušné, ale jsou o trochu horší, jak u náletu ve stejné výškové hladině Auto 25 (Tab. 15). Odchylna ve výšce je zde neúměrně velká oproti odchylce v poloze.



Obr. 40 - Pozice a přesnosti vřícovacích bodů u Manu 25

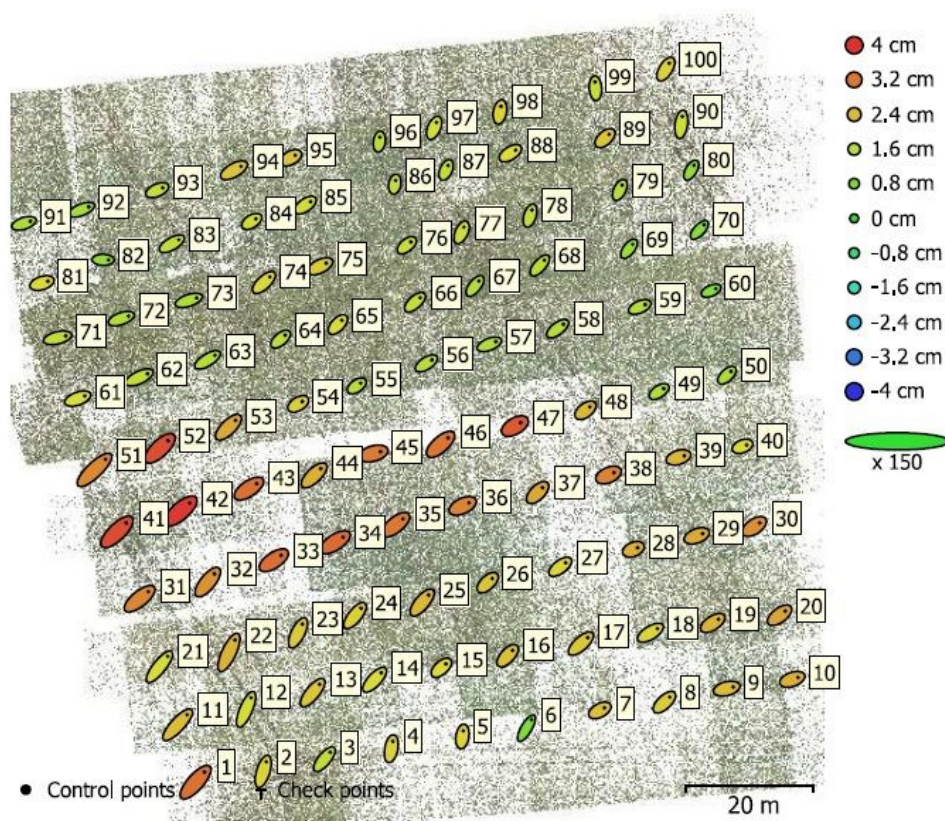
Průměrné odchylky u vřícovacích bodů pro Manu 25				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
45,6 mm	10,2 mm	46,7 mm	109,9 mm	119,4 mm

Tab. 17 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 25

Manu 15

Na posledním Obr. 41 jsou vidět poněkud chaotické rozměry (a v některých případech i stočení) jednotlivých elips. Pro stočení většiny elips platí to, co už bylo zmíněno výše u předchozích náletů (Manu 40 a Manu 25). Výškové zbarvení elips uprostřed zájmové oblasti značí určité vychýlení oproti ostatním na obrázku. Může na to mít vliv výměna baterie dronu během náletu, ke které došlo právě zhruba v těchto místech.

Průměrné dosažené odchylky lze vidět v Tab. 18. Dosažené odchylky v poloze jsou vzhledem k letové hladině rozlišení modelu velice dobré. Odchylka ve výšce zde dosahuje slušných výsledků, ale opět jde spíše o výjimku.



Obr. 41 - Pozice a přesnosti vřícovacích bodů u Manu 15

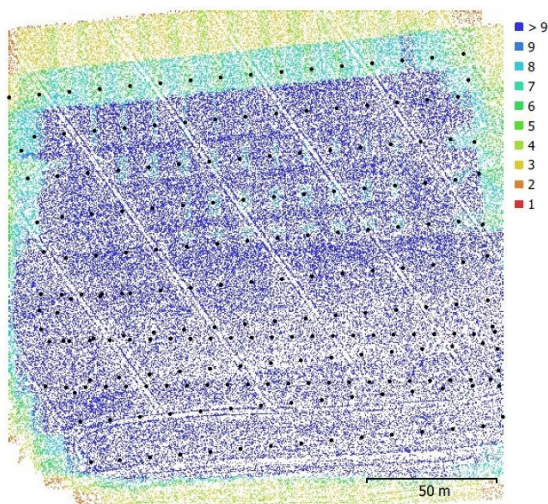
Průměrné odchylky u vřícovacích bodů pro Manu 15				
X error	Y error	XY error	Z error	Total error
12,1 mm	11,4 mm	22,5 mm	22,5 mm	27,9 mm

Tab. 18 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 15

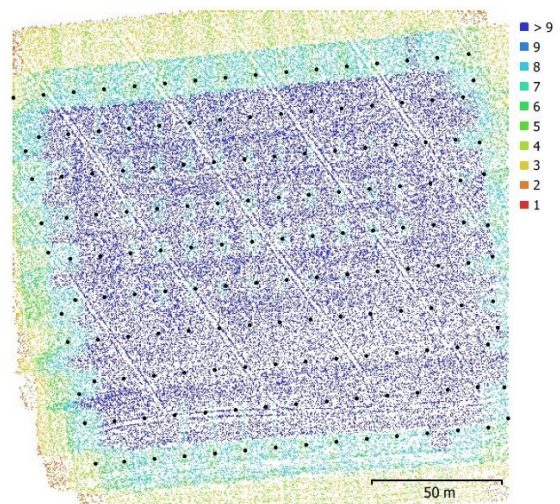
Pro přehlednost dosažených odchylek u vřícovacích bodů pro jednotlivé druhy náletů jsou výsledky uvedeny v následující tabulce (Tab. 19). Na Obr. 42 až Obr. 47 jsou graficky znázorněny překryty pořízených snímků pro příslušné nálety.

Druh náletu	Průměrné odchylky v umístění vřícovacích bodů				
	X error	Y error	XY error	Z error	Total error
Auto 40 č.1	7,0 mm	5,9 mm	9,2 mm	129,0 mm	129,3 mm
Auto 40 č.2	7,6 mm	6,5 mm	9,9 mm	78,0 mm	78,6 mm
Auto 25	12,9 mm	17,2 mm	21,5 mm	21,5 mm	30,4 mm
Manu 40	50,2 mm	70,2 mm	86,3 mm	8,3 mm	86,7 mm
Manu 25	45,6 mm	10,2 mm	46,7 mm	109,9 mm	119,4 mm
Manu 15	12,1 mm	11,4 mm	22,5 mm	22,5 mm	27,9 mm

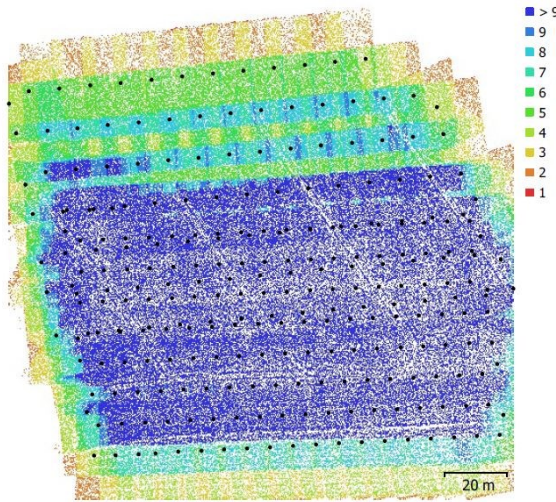
Tab. 19 - Přesnost umístění vřícovacích bodů



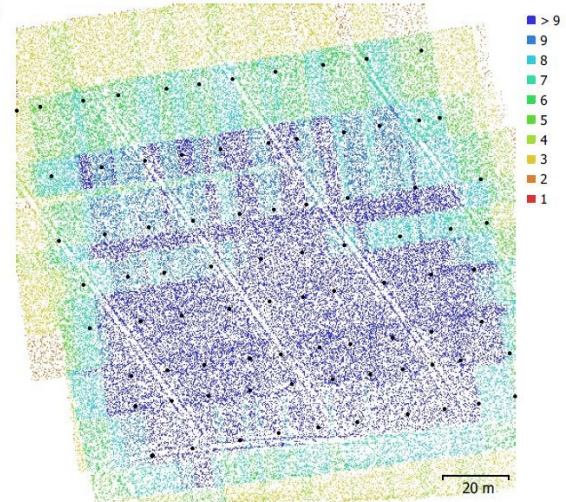
Obr. 42 - Překryv snímků u Auto 40 č.1



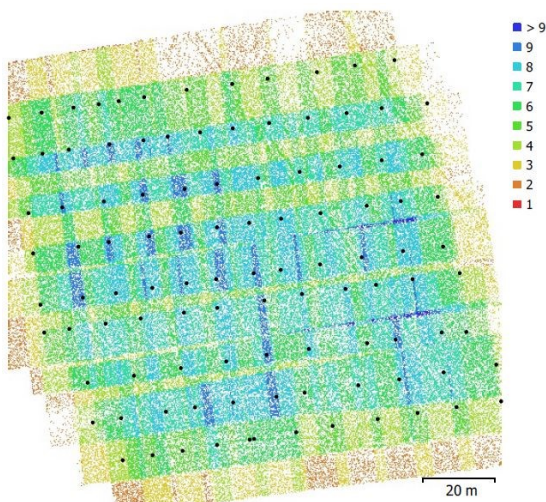
Obr. 43 - Překryv snímků u Auto 40 č.2



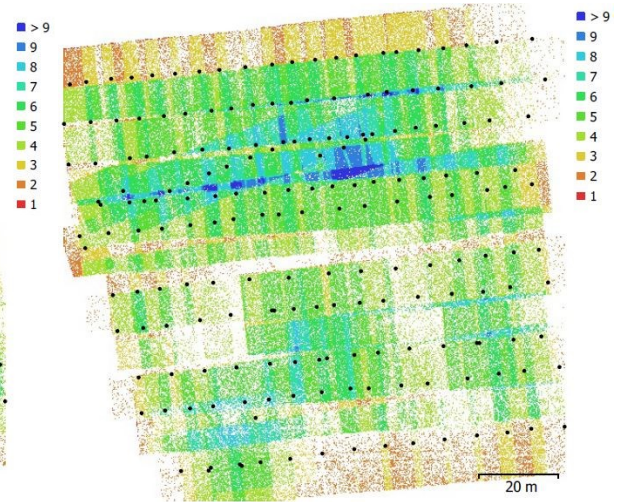
Obr. 44 - Překryv snímků u Auto 25



Obr. 45 - Překryv snímků u Manu 40



Obr. 46 - Překryv snímků u Manu 25



Obr. 47 - Překryv snímků u Manu 15

Celkově je možné pozorovat, že automatické nálety dosahují daleko lepší (při porovnání Auto 40 č.1, 2 s Manu 40 dokonce o řád) přesnosti v poloze než manuálně řízené lety. Je to pravděpodobně dáno tím, že automatické nálety obsahují více snímků s lepším vzájemným překryvem (Obr. 42 až Obr. 44) a také díky nestejně orientaci GNSS přijímače. Díky tomu, že dron během náletu mění orientaci GNSS přijímače, tak tím dochází k určitému vyrovnání chyby v poloze, která tím může nastat. K maximálnímu potlačení této chyby by se pak docílilo tím, že by trasa pro nálety byla naplánovaná tak aby se letové dráhy křížily (letová dráha ve tvaru čtvercové sítě). Hodnoty pro výškovou odchylku se jeví jako chybné pro nálety Auto 40 č.1, č.2 a pro Manu 25.

7.3 Eliminace odlehlých měření: L_1 – norma

K eliminaci odlehlých měření slouží robustní metody vyrovnání, a to za předpokladu normálního rozdělení chyb a dostatečně velkého počtu nadbytečných měření. Obecným principem robustního vyrovnání je, že se na základě vypočtených oprav z vyrovnání spočítají nové váhy pro měřené veličiny, které zvýhodňují anebo znevýhodňují příslušnou měřenou veličinu. Jedná se tedy o iterační výpočet, kde výsledkem jsou vyrovnané neznámé, které už nejsou zatěžovány odlehlými měřeními, neboť byly z vyrovnání eliminovány pomocí vah.

L_1 – norma je robustní metoda, která minimalizuje sumu absolutních oprav. Jedná se o metodu extrémně robustní, kde může být počet detekovaných chyb až $\frac{n}{2} - 1$.

Výpočetní skript byl poskytnut vedoucím této diplomové práce a je součástí přílohy. Text k této podkapitole byl čerpán ze zdroje [1].

7.3.1 L_1 – norma pro kamery

V následujících tabulkách (Tab. 27 až Tab. 32) jsou uvedeny výsledky po použití L_1 – normy pro přesnost kamer u jednotlivých náletů. V tabulkách jsou uvedeny počty odlehlých pozic kamer (dat), výsledný průměr (který značí systematický posun) ze všech dat pro příslušný typ souřadnice a procentuální podíl odlehlých dat.

Nejprve je pro každý nálet popsána výsledná tabulka s vypsáním všech odlehlých bodů (pozic kamer) a poté případně zhodnocena.

Auto 40 č.1

U tohoto náletu byla zjištěna odlehlá data pouze v souřadnici X (Tab. 20). Konkrétně se jednalo o vyřazení bodů 24, 25, 26, 49, 50, 51, 132 a 164.

Souřadnice	Auto 40 č. 1 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	8	- 3,3 mm	3,76 %
Y	0	6,9 mm	0
Z	0	- 79,5 mm	0

Tab. 20 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 40 č.1 po aplikování L1 – normy

Auto 40 č.2

U tohoto náletu byla zjištěna odlehlá data pouze v souřadnici X (Tab. 21). Konkrétně se jednalo o vyřazení pouze jednoho bodu 109.

Souřadnice	Auto 40 č. 2 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	1	7,6 mm	0,63 %
Y	0	- 2,8 mm	0
Z	0	- 467,9 mm	0

Tab. 21 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 40 č.2 po aplikování L1 – normy

Auto 25

U tohoto náletu byla zjištěna odlehlá data ve všech souřadnicích (Tab. 22). Pro souřadnici X se jednalo pouze o bod 3, pro Y souřadnici o body 2, 3, 261 a pro Z souřadnici o body 2 a 3. Lze vidět, že bod 3 vyšel chybně pro všechny souřadnice, prakticky i bod 2. Z toho je možné soudit, že na začátku náletu došlo k něčemu (pravděpodobně korekce), co znehodnotilo druhý a třetí snímek.

Souřadnice	Auto 25 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	1	7,1 mm	0,38 %
Y	3	13,3 mm	1,14 %
Z	2	- 223,0 mm	0,76 %

Tab. 22 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 25 po aplikování L1 – normy

Manu 40

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data v souřadnicích Y a Z (Tab. 23). Konkrétně se jednalo o vyřazení bodu 76 pro Y a u Z bodů 1, 2, 3, 4 a 56. Je vidět, že na začátku náletu byly pravděpodobně vychýlené korekce ve výšce.

Souřadnice	Manu 40 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	36,5 mm	0
Y	1	78,3 mm	1,16 %
Z	5	- 95,7 mm	5,81 %

Tab. 23 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 40 po aplikování L1 – normy

Manu 25

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data pouze v souřadnici Y (Tab. 24). Konkrétně se jednalo o vyřazení pouze jednoho bodu 13.

Souřadnice	Manu 25 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	18,7 mm	0
Y	1	- 13,7 mm	0,95 %
Z	0	- 276,2 mm	0

Tab. 24 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 25 po aplikování L1 – normy

Manu 15

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data v souřadnicích Y a Z (Tab. 25). Pro souřadnici Y se jedná o body 1, 2 a 68. Pro souřadnici Z se jedná o body 1, 2, 3, 17, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112 a 113. Lze vidět, že dron

měl ze začátku náletu pravděpodobně problémy s korekcemi (pro Y a Z). Dále je možné pozorovat, že v cca půlce náletu došlo pravděpodobně k výpadku korekcí pro Z souřadnici (mohlo dojít k dočasnému připojení na jiné), a to mohlo zapříčinit takové množství (téměř 10 % všech dat) odlehlých měření.

Souřadnice	Manu 15 - kamery		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	36,1 mm	0
Y	3	- 8,1 mm	1,57 %
Z	18	- 207,4 mm	9,42 %

Tab. 25 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 15 po aplikování L1 – normy

Pro přehlednost dosažených hodnot po aplikování L₁ – normy u pozic kamer pro jednotlivé druhy náletů jsou výsledky uvedeny v následující tabulce (Tab. 26).

Druh náletu	X průměr	Y průměr	Z průměr	Celkový počet odlehlých dat
Auto 40 č.1	- 3,3 mm	6,9 mm	- 79,5 mm	8
Auto 40 č.2	7,6 mm	- 2,8 mm	- 467,9 mm	1
Auto 25	7,1 mm	13,3 mm	- 223,0 mm	6
Manu 40	36,5 mm	78,3 mm	- 95,7 mm	6
Manu 25	18,7 mm	- 13,7 mm	- 276,2 mm	1
Manu 15	36,1 mm	- 8,1 mm	- 207,4 mm	21

Tab. 26 - Souhrn odlehlých měření pro umístění kamer

Lze pozorovat, že automatické a manuální nálety dosahují přibližně stejný počet odlehlých měření. Výjimka nastává u Manu 15 ve kterém došlo k téměř 10 % odlehlých dat pro souřadnici Z. Obecně lze říci, že jednotlivé nálety jako takové neobsahují žádnou hrubou chybu a naměřené hodnoty jsou konzistentní.

7.3.2 L₁ – norma pro vlícovací body

V následujících tabulkách (Tab. 20 až Tab. 25) jsou uvedeny výsledky po použití L₁ – normy pro přesnost vlícovacích bodů u jednotlivých náletů. V tabulkách jsou uvedeny počty případných odlehlých vlícovacích bodů (dat), výsledný průměr (který značí systematický posun) ze všech dat pro příslušný typ souřadnice a procentuální podíl odlehlých dat.

Nejprve je pro každý nálet popsána výsledná tabulka s vypsáním odlehlých vlícovacích bodů a poté případně zhodnocena.

Auto 40 č.1

U tohoto náletu nedošlo k žádnému zjištění odlehlých dat v podobě vypočítaných vlícovacích bodů (Tab. 27).

Souřadnice	Auto 40 č.1 – vlícovací body		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	8,9 mm	0
Y	0	26,0 mm	0
Z	0	80,0 mm	0

Tab. 27 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Auto 40 č.1 po aplikování L₁ – normy

Auto 40 č.2

U tohoto náletu také nedošlo k žádnému zjištění odlehlých dat (Tab. 28).

Souřadnice	Auto 40 č.2 – vlícovací body		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	5,8 mm	0
Y	0	- 0,1 mm	0
Z	0	- 77,8 mm	0

Tab. 28 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Auto 40 č.2 po aplikování L₁ – normy

Auto 25

Ani u tohoto náletu nedošlo k žádnému zjištění odlehlých dat (Tab. 29).

Souřadnice	Auto 25 – vřícovací body		
	Počct odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	12,7 mm	0
Y	0	- 16,9 mm	0
Z	0	- 20,5 mm	0

Tab. 29 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Auto 25 po aplikování L1 – normy

Manu 40

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data pouze v souřadnici X (Tab. 30). Konkrétně se jednalo o vyřazení dvou vřícovacích bodu 1 a 11.

Souřadnice	Manu 40 – vřícovací body		
	Počct odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	2	- 50,2 mm	2 %
Y	0	69,6 mm	0
Z	0	5,2 mm	0

Tab. 30 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Manu 40 po aplikování L1 – normy

Manu 25

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data v souřadnicích Y a Z (Tab. 31). Konkrétně se jednalo o vyřazení jednoho vřícovacího bodu 22 pro souřadnici Y a vřícovacího bodu 10 pro souřadnici Z.

Souřadnice	Manu 25– vřícovací body		
	Počct odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	- 45,3 mm	0
Y	1	- 9,6 mm	1 %
Z	1	- 108,8 mm	1 %

Tab. 31 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Manu 25 po aplikování L1 – normy

Manu 15

Pro tento nálet byla zjištěna odlehlá data pouze v souřadnici Y (Tab. 32). Konkrétně se jednalo o vyřazení dvou vřícovacích bodu 12 a 22.

Souřadnice	Manu 15 – vřícovací body		
	Počet odlehlých dat	Průměr	Procento odlehlých dat
X	0	11,2 mm	0
Y	2	- 9,8 mm	2 %
Z	0	21,5 mm	0

Tab. 32 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Manu 15 po aplikování L₁ – normy

Pro přehlednost dosažených hodnot po aplikování L₁ – normy u pozic kamer pro jednotlivé druhy náletů jsou výsledky uvedeny v následující tabulce (Tab. 33).

Druh náletu	X průměr	Y průměr	Z průměr	Celkový počet odlehlých dat
Auto 40 č.1	8,9 mm	26,0 mm	80,0 mm	0
Auto 40 č.2	5,8 mm	- 0,1 mm	- 77,8 mm	0
Auto 25	12,7 mm	- 16,9 mm	- 20,5 mm	0
Manu 40	- 50,2 mm	69,6 mm	5,2 mm	2
Manu 25	- 45,3 mm	- 9,6 mm	- 108,8 mm	2
Manu 15	11,2 mm	- 9,8 mm	21,5 mm	2

Tab. 33 - Souhrn odlehlých měření pro umístění vřícovacích bodů

Lze pozorovat, že pro automatické nálety L₁ – norma nevyhodnotila žádná odlehlá data. Pro všechny manuálně řízené nálety byly objeveny pouze dvě odlehlá měření. Obecně je možné nazvat (co se konzistentnosti dat týče) automatické nálety jako bezchybné a manuálně řízené lety lze nazvat jako téměř bezchybné.

8 Závěr

V této diplomové práci byla testována přesnost dronu Phantom 4 RTK od společnosti DJI. Cílem testování bylo zjistit (určit) a zhodnotit absolutní chybu pro různé letové hladiny ve dvou variantách letu. Jedna varianta letu spočívala v automaticky řízeném náletu s proměnlivou polohou GNSS přijímače a druhá varianta náletu byla řízena manuálně se stejnou orientací GNSS přijímače. U automatických náletů byly realizovány dvě letové hladiny (40 m a 25 m). U manuálně řízených náletů byly realizovány tři letové hladiny (40 m, 25 m a 15 m). Získaná data byla vyhodnocována v softwaru Agisoft PhotoScan. Dodatečně byl ještě zpracován jeden, čili šestý, nálet. Ten se skládal z části automatického náletu pro letovou hladinu 40 m, která byla provedena po výměně baterie. Pro zjištění odlehklých dat (měřeních) pro jednotlivé nálety byla aplikována L_1 – norma. Dále v textu jsou pro zlepšení přehlednosti jednotlivé nálety označovány zkratkou viz. Tab. 4.

V první části byla zkoumána dosažená přesnost kamer (pro jednotlivé druhy náletů), která udává, s jakou prostorovou odchylkou se jeví pořízené snímky (pozice kamer) vůči vlíčovacím bodům. Při srovnání dosažené polohové přesnosti pro letovou hladinu 40 m vychází pro manuálně řízený nálet (Manu 40) více než dvakrát horší odchylka než pro automatický nálet (Auto 40 č.1). To by mohlo být dáno tím, že Manu 40 obsahuje daleko méně snímků než Auto 40 č.1. Polohová přesnost pro Manu 40 je tak už na hranici použitelnosti (87 mm) a naopak Auto 40 č.1 dosahuje dobrých výsledků (41 mm). Při porovnání polohové přesnosti mezi Auto 40 č.1 a Auto 40 č.2 vyjde skoro dvakrát lépe právě druhý zmiňovaný nálet (Auto 40 č.2 dosahuje 22 mm). To je pravděpodobně způsobeno konzistentním měřením, neboť Auto 40 č.1 obsahuje dva soubory měření a Auto 40 č.2 pouze jeden z nich. Jedná se tedy o velice dobrý výsledek. Při srovnání dosažené polohové přesnosti pro letovou hladinu 25 m vychází Manu 25 (27 mm) o něco málo hůře než Auto 25 (22 mm) a lze je považovat za téměř shodné. Manu 25 a Auto 25 tedy podávají velice slušné výsledky pro danou letovou hladinu. U zkoumání polohové přesnosti Manu 15 (40 mm) pak dochází ke zhoršení oproti předchozím náletům. To může být dáno tím, že jednotlivé snímky vzhledem

k výšce náletu už neobsáhnou dostatek vlíčovacích bodů pro dosažení lepších výsledků. Naopak pro zlepšení přesnosti by zde měla přispívat dobrá rozlišovací schopnost samotného modelu. Hodnoty pro přesnost ve výšce se prakticky pro všechny nálety jeví jako chybné. Proč tato skutečnost nastala je čistě diskutabilní. Mohlo jít například o chybný příjem korekcí. Předpokladem bylo, že přesnost výškové složky metody RTK bude jistě horší než polohové, ale výsledky bohužel předčily toto očekávání.

Ve druhé části byla zkoumána dosažená přesnost vlíčovacích bodů (pro jednotlivé druhy náletů), která udává s jakou prostorovou odchylkou byly vypočítány vlíčovací body. Jinými slovy, jak přesně dokáže testovací dron určovat body bez napojení na vlíčovací body. Jedná se tedy o informaci, která je pravděpodobně nejvíce zajímavou. Při zhodnocení dosažené polohové přesnosti pro letovou hladinu 40 m vycházejí oba automatické nálety Auto 40 č.1 a č.2 naprosto famózně (9 mm a 10 mm). Naopak pro manuálně řízený nálet Manu 40 vychází polohová chyba 86 mm, což je prakticky o řád horší přesnost než v případě automatických náletů. Velice pravděpodobně je to způsobeno tím, že automatické nálety obsahují více snímků (prakticky dvakrát tolik) a také nestejnou orientací GNSS přijímače. U letové hladiny 25 m se automatický nálet Auto 25 dostává s polohovou přesností na 22 mm, což je velice dobrá hodnota a manuálně řízený nálet Manu 25 se s polohovou přesností dostává na 47 mm. Kupodivu došlo ke zhoršení přesnosti u automatického náletu a naopak zlepšení u manuálního, který už produkuje použitelné hodnoty. U letové hladiny 15 m se manuálně řízený nálet Manu 15 dostává na polohovou přesnost 23 mm, což je velice dobrý výsledek. Lze si povšimnout, že automatické nálety vycházejí znatelně lépe než manuálně řízené. Je to opět pravděpodobně dáno tím, že u automatických náletů není stejná orientace GNSS přijímače a díky tomu dochází k určitému vyrovnání chyby v poloze, která tím nastává. Pro ideální stav by se ještě musely jednotlivé letové dráhy křížit, tím by došlo k maximálnímu potlačení této chyby. Výsledná výšková odchylka poloviny náletů se jeví jako chybná, což je velice zvláštní a neočekávaný stav, na který nelze podat normální vysvětlení bez případného dalšího testování.

Ve třetí části byla na získaná data aplikována robustní metoda vyrovnání L_1 – norma, která eliminovala případná odlehlá data, a to jak pro přesnosti kamer,



tak i pro přesnosti vlíčovacích bodů. U obou dvou případů se zjistilo, že data jako celek jsou velice konzistentní a neobsahují nadměrný počet odlehlých dat. Vypočítané průměry pro jednotlivé souřadnicové osy pak vyjadřují systematický posun pro příslušný druh náletu.

Celkově lze říci o dosažené přesnosti s dronem Phantom 4 RTK, že se s ním dá dostat na absolutní chybu v poloze okolo 20 mm – 25 mm (pro rozmezí letové hladiny od 15 m do 40 m) bez použití žádného napojení na vlíčovací body, za předpokladu nestejně orientace GNSS přijímače během měření (hodnocení vychází z Tab. 19). Bohužel zhodnocení absolutní chyby pro výšku je trošku problematické, neboť se její hodnota pohybuje od 8 mm až do 129 mm. Je tedy možné, že docházelo k problémům s korekcemi. Více by řeklo případné další testování.

Seznam použitých zdrojů

- [1] URBAN, Rudolf. *Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05786-5.
- [2] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02649-3.
- [3] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02762-7.
- [4] TESAŘ, Pavel. *Úvod do GNSS* [online]. 2007 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <ftp://athena.fsv.cvut.cz/EMEG/uvodGNSS.pdf>
- [5] RÝGLOVÁ, Hana. *Testování metody SfM se zaměřením na UAV při zaměřování vodohospodářského modelu*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební.
- [6] BROUČEK, Josef. *Analýza terénu Horňojiřetínské výsypky*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební.
- [7] REINDL, Tomáš. *Testování dálkoměrů totálních stanic Trimble S6 a S8 na laboratorní základně*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta stavební.
- [8] ŠTRONER, Martin. *Geodézie 3: Prezentace k přednáškám* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GD3/index.html>
- [9] *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/index.php>
- [10] *DJI Phantom 4 RTK specifications* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/phantom-4-rtk/info>
- [11] *ExifTool by Phil Harvey* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.sno.phy.queensu.ca/~phil/exiftool/>
- [12] *Easy Transform* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <http://adjustsolutions.cz/easytransform/>
- [13] *Groma* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.groma.cz/cz/groma>
- [14] *Agisoft PhotoScan Professional* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://3dtechnologie.cz/agisoft-photoscan/>

- [15] *Síť referenčních stanic CZEPOS* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://czeapos.cuzk.cz/>
- [16] *DJI Phantom 4 RTK* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://dronelife.com/2018/10/15/phantom-4-rtk-launched-globally-today-djis-ultimate-mapping-solution/>
- [17] *GNSS Trimble Geo XR* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://plutongeo.ru/katalog/arhiv/arhiv-gps-priemniki/trimble-geoxr-6000>
- [18] *Hranol Trimble VX/S* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.geoteam.cz/eshop/hranol-360-trimble-vx-s>
- [19] *Lokalita* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [20] MULAKALA, Jay. *DJI Phantom 4 RTK case study* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://docs.djicdn.com/DJI+Enterprise/measurement-accuracy-dji-phantom-4-rtk-whitepaper-f%5B1%5D.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 - Tachymetrie [8].....	11
Obr. 2 - Metoda GNSS [1]	12
Obr. 3 - Síť referenčních stanic CZEPOS v České republice [15]	13
Obr. 4 - Letecká fotogrammetrie [16].....	14
Obr. 5 - Prvky vnitřní orientace [2]	15
Obr. 6 - Prvky vnější orientace [2].....	15
Obr. 7 - Souřadnicové soustavy v letecké fotogrametrii [2].....	16
Obr. 8 - Svazkové vyrovnání [3]	19
Obr. 9 - Epipolární geometrie	19
Obr. 10 - Totální stanice Trimble S6 HP [7].....	21
Obr. 11 - GNSS Trimble Geo XR [17]	22
Obr. 12 - Trimble Zephyr Model 2 [6]	22
Obr. 13 - Phantom 4 RTK [10]	23
Obr. 14 - Hranol Trimble VX/S [18]	23
Obr. 15 - Vlícovací bod	23
Obr. 16 - Lokalita [19]	27
Obr. 17 - Rozmístění vlícovacích bodů s body bodového pole a volným stanovištěm .	28
Obr. 18 - Phantom 4 RTK při vzletu.....	29
Obr. 19 - ukázka plánované trasy v aplikaci DJI MG	30
Obr. 20 - Schéma měřické sítě na stanovišti 5002	31
Obr. 21 - Easy Transform	32
Obr. 22 - Nastavený měřítkový koeficient	33
Obr. 23 - Zpracování zápisníku.....	34
Obr. 24 - Import CSV	35
Obr. 25 - Align Photos	36
Obr. 26 - Ukázka určování vlícovacích bodů pro letovou hladinu 40 m, 25 m a 15 m ..	37
Obr. 27 - Optimize Camera Alignment.....	38
Obr. 28 - Reference Settings	39

Obr. 29 - Ukázka odchylek	40
Obr. 30 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 40 č.1	43
Obr. 31 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 40 č.2	44
Obr. 32 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Auto 25	45
Obr. 33 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 40	46
Obr. 34 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 25	47
Obr. 35 - Pozice a přesnosti jednotlivých kamer u Manu 15	49
Obr. 36 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Auto 40 č.1	51
Obr. 37 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Auto 40 č.2	52
Obr. 38 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Auto 25	53
Obr. 39 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Manu 40	54
Obr. 40 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Manu 25	55
Obr. 41 - Pozice a přesnosti vlíčovacích bodů u Manu 15	56
Obr. 42 - Překryv snímků u Auto 40 č.1	57
Obr. 43 - Překryv snímků u Auto 40 č.2	57
Obr. 44 - Překryv snímků u Auto 25	57
Obr. 45 - Překryv snímků u Manu 40	57
Obr. 46 - Překryv snímků u Manu 25	57
Obr. 47 - Překryv snímků u Manu 15	57

Seznam tabulek

Tab. 1 - Časy jednotlivých etap měření.....	29
Tab. 2 - Ukázka přetransformovaných souřadnic pro bod 4001	33
Tab. 3 - Ukázka výsledných souřadnic pro vřícovací bod 1	34
Tab. 4 - Zkratky pro názvy jednotlivých náletů.....	41
Tab. 5 - Rozlišovací schopnosti modelu pro jednotlivé nálety	41
Tab. 6 - Přesnost umístění kamer pro Auto 40 č.1	43
Tab. 7 - Přesnost umístění kamer pro Auto 40 č.2	44
Tab. 8 - Přesnost umístění kamer pro Auto 25	45
Tab. 9 - Přesnost umístění kamer pro Manu 40	46
Tab. 10 - Přesnost umístění kamer pro Manu 25	48
Tab. 11 - Přesnost umístění kamer pro Manu 15	49
Tab. 12 - Přesnost umístění kamer	49
Tab. 13 - Přesnost vřícovacích bodů pro Auto 40 č.1.....	51
Tab. 14 - Přesnost vřícovacích bodů pro Auto 40 č.2.....	52
Tab. 15 - Přesnost vřícovacích bodů pro Auto 25	53
Tab. 16 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 40.....	54
Tab. 17 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 25.....	55
Tab. 18 - Přesnost vřícovacích bodů pro Manu 15.....	56
Tab. 19 - Přesnost umístění vřícovacích bodů.....	56
Tab. 20 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 40 č.1 po aplikování L1 – normy..	59
Tab. 21 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 40 č.2 po aplikování L ₁ – normy ..	59
Tab. 22 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Auto 25 po aplikování L1 – normy	60
Tab. 23 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 40 po aplikování L1 – normy.....	60
Tab. 24 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 25 po aplikování L1 – normy.....	60
Tab. 25 - Zjištěná odlehlá měření u kamer pro Manu 15 po aplikování L1 – normy.....	61
Tab. 26 - Souhrn odlehlých měření pro umístění kamer	61
Tab. 27 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Auto 40 č.1 po aplikování L1 – normy.....	62
Tab. 28 - Zjištěné odlehlé vřícovací body pro Auto 40 č.2 po aplikování L ₁ – normy	62



Tab. 29 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Auto 25 po aplikování L1 – normy	63
Tab. 30 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Manu 40 po aplikování L1 – normy.....	63
Tab. 31 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Manu 25 po aplikování L1 – normy.....	63
Tab. 32 - Zjištěné odlehlé vlícovací body pro Manu 15 po aplikování L1 – normy.....	64
Tab. 33 - Souhrn odlehlých měření pro umístění vlícovacích bodů.....	64

Seznam příloh

Přílohy na přiloženém digitálním médiu

Příloha A

Složka přílohy A obsahuje adresáře, které jsou spojené s prací v softwaru Agisoft PhotoScan.

- *Auto 40 č.1*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Auto 40 č.2*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Auto 25*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Manu 40*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Manu 25*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Manu 15*
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan spolu se snímky a souřadnicemi použitých pro daný nálet
- *Reporty přesnosti pro vlíčovací body*
 - Adresář obsahuje vygenerované reporty softwarem Agisoft PhotoScan ve formátu PDF s přesnostmi vlíčovacích bodů pro všechny druhy náletů.
- *Reporty přesnosti pro pozice kamer*
 - Adresář obsahuje vygenerované reporty softwarem Agisoft PhotoScan ve formátu *pdf* s přesnostmi pozic jednotlivých kamer pro všechny druhy náletů.

Příloha B

Složka přílohy B obsahuje adresáře, které jsou spojené s výpočtem L_1 – normy.

- *L1 – norma pro vlíčovací body*
 - Adresář obsahuje složky, ve kterých jsou seznamy souřadnic pro jednotlivé osy k příslušnému druhu náletu ve formátu *txt*.
- *L1 – norma pro pozice kamer*
 - Adresář obsahuje složky, ve kterých jsou seznamy souřadnic pro jednotlivé osy k příslušnému druhu náletu ve formátu *txt*.
- *L1norma*
 - Výpočetní skript pro L_1 – normu ve formátu *sce*.

Příloha C

Složka přílohy C obsahuje adresáře, které jsou spojené s výpočtem GNSS měření a tachymetrického měření.

- *protokol GNSS S-JTSK*
 - protokol z měření GNSS se zobrazenými hodnotami v S-JTSK ve formátu *txt*.
- *protokol GNSS WGS84*
 - protokol z měření GNSS se zobrazenými hodnotami ve WGS84 ve formátu *csv*.
- *protokol z totalni stanice 1*
 - protokol z tachymetrického měření ve formátu *asc*.
- *protokol z totalni stanice 2*
 - protokol z tachymetrického měření ve formátu *jxl*.
- *protokol groma*
 - protokol o výpočtu ze softwaru Groma ve formátu *txt*.