

Testování přesnosti fotogrammetrického snímkování s využitím RPAS: Kalibrační základna AdMaS

Ing. Miroslava Kubičková,
Ústav geodézie,
Fakulta stavební VUT v Brně

Abstrakt

Článek se zabývá využitelností dálkově pilotovaných leteckých systémů z hlediska jejich přesnosti a popisuje kalibrační základnu AdMaS vytvořenou speciálně pro testování RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). Je zde zhodnocen vliv různých parametrů na dosaženou přesnost vzhledem k počtu výchozích bodů, velikosti pixelu a použitého softwaru. Pro testování bylo použito šedesát bodů rozložených rovnoměrně v lokalitě AdMaS, které byly postupně vkládány do výpočtů jako výchozí nebo kontrolní body. Výpočty ukazují, že pro dosažení maximální přesnosti je optimální využití 12 výchozích bodů. Nadbytečným počtem výchozích bodů lze dosáhnout sub-pixelové přesnosti u snímkových sad s velikostí pixelu 2,5 cm a 5 cm. Byl prokázán vliv užití různých softwarů na výpočet ohniskové vzdálenosti kamery.

Testing of Photogrammetric Imaging Accuracy using RPAS: AdMaS Calibration Base

Abstract

The paper deals with usage of remotely piloted aircraft systems in terms of their accuracy and describes the AdMaS calibration base created especially for RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) testing. The influence of various parameters on achieved accuracy is evaluated with respect to the number of ground control points, pixel size and software used. Sixty points distributed uniformly in AdMaS locality were used for testing and were gradually inserted to calculations as ground control points or checkpoints. Results show that 12 ground control points are optimal for getting maximum accuracy. Using higher number of GCPs helps to achieve sub-pixel accuracy with datasets of 2.5 cm and 5 cm pixel size. Calculation of focal length of the camera was influenced by using of various software.

Keywords: Structure-from-Motion, calibration, ground control points, ground sample distance, checkpoints

1. Úvod

Dálkově pilotované letecké systémy (Remotely Piloted Aircraft System – RPAS) jsou v dnešní době hojně využívaným nástrojem pro pořizování geoprostorových dat. Zřejmé výhody kombinace rychlosti, komplexnosti a efektivity pracovního procesu řadí RPAS ve fotogrametrii mezi stále oblíbenější geodetické metody měření podrobných bodů. Přesnost pořízených výstupů je závislá na řadě parametrů mezi základní patří: počet a rozložení výchozích bodů, velikost překrytí snímků, lineární vzdálenost mezi středy pixelů na zemi (Ground sample distance – GSD), kvalita použité digitální kamery včetně přesnosti určení prvků vnitřní orientace, termín a podmínky snímkování.

Legislativně se testování přesnosti fotogrammetrického snímkování opírá o Návod na obnovu katastrálního operátu a převod [1] vydaný Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). Tento návod popisuje fotogrammetrické metody s využitím kalibrovaných měřických kamer nesených letouny s posádkou. Doposud nebyl doplněn o specifikaci využití fotogrammetrie z RPAS. Nelze ho využít pro určení kvality takto pořízených fotogrammetrických výstupů.

Státní pozemkový úřad (po schválení ČÚZK) vydal osvědčení pro Metodiku určení prostorových objektů pro komplexní pozemkové úpravy s využitím systému bezpilotních prostředků (UAS) [2], kterou zpracoval Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i. (VÚGTK). Tato metodika podrobně popisuje využití RPAS pro pozemkové úpravy, včetně způsobů ověření přesnosti.

Základním krokem pro získání kvalitních výstupů je kalibrace senzorů nesených RPAS. Vzhledem k nestabilitě prv-

ků vnitřní orientace neměřických kamer [3] je v moderních programových nástrojích kalibrace řešena samostatně v rámci konkrétního projektu na základě velkého množství automaticky nalezených spojovacích bodů.

Vybudovaná přesná kalibrační základna umožňuje soukromým či jiným subjektům jednoduše otestovat přesnost svého RPAS a současně získat přesné kalibrační parametry kamery. Optimalizací pořizování snímků je možné předejít případným nekvalitám fotogrammetrických produktů s ohledem na finanční náklady a počet pořízených snímků.

2. AdMaS kalibrační základna pro RPAS

Pro tvorbu kalibračního pole byla vybrána lokalita výzkumného centra AdMaS¹⁾ v Brně. Výběr střežené lokality částečně zaručuje ochranu bodů před zničením, nabízí dobrou dostupnost a výškovou členitost. Pro signalizaci výchozích bodů byly, na základě [4] zvoleny černobílé čtvercové terče z tvrzeného plastu o rozměrech 19 x 19 cm, které umožňují fotogrammetrické snímkování lokality v rozsahu GSD = 1 až 6 cm [4]. Body byly stabilizovány tak, aby byla zajištěna jejich neměnná poloha a byly umístěny v různých výškových úrovních. Terče byly rozmístěny rovnoměrně po lokalitě výzkumného centra AdMaS (obr. 1) tak, aby krajní body tvořily obálku definované oblasti dle [4].

1) Advanced Materials, Structures and Technologies (AdMaS) je centrum vědy a komplexní výzkumná instituce v oblasti stavebnictví, která je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.



Obr. 1 Rozložení signalizovaných bodů v lokalitě AdMaS

Pro účel zaměření souřadnic výchozích bodů byla vytvořena měřická síť. Tato síť byla terestricky zaměřena pomocí totální stanice Trimble S8 a trojpodstavcové soustavy. Pro navázání měřické sítě do Souřadnicového systému Jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK) bylo použito statické metody globálních navigačních družicových systémů (GNSS). Střední chyba vyrovnané sítě je 4 mm. Výchozí body byly následně zaměřeny polární metodou z jednotlivých vrcholů měřické sítě. Body byly určeny dvakrát nezávisle. Dosažená $m_{xy} = 8$ mm a $m_z = 7$ mm.

3. Snímkování kalibrační základny

Snímkování lokality bylo naplánováno pro tři výškové úrovně odpovídající rozlišení snímků 1 cm, 2,5 cm a 5 cm. Podélný a příčný překryt byl stanoven 85 %. Pro testování byl zvolen běžně dostupný bezpilotní letoun DJI Phantom 4 Advanced poskytnutý firmou Jamcopters. Charakteristiky kamery lze vidět v tab. 1. Na základě daného GSD, což je lineární vzdálenost mezi středy pixelů na zemi [5], byla stanovena maximální přípustná hodnota zbytkového smazu 0,33 pixelu a k tomu byla přizpůsobeno i nastavení rychlosti letounu a rychlost závěrky a clony kamery při expozici snímků.

Vzhledem k tomu, že lokalita se nachází v CTR (řízený okřesek) Tuřany, bylo nutné koordinovat let ve výšce nad 100 m s řízením letového provozu letiště Brno-Tuřany. Sa-

Tab. 1 Charakteristiky použité digitální kamery

Typ	Celokovový kompaktní DJI FC6310
Typ snímače	1 palcový CMOS, rozlišení 20 Mpix (5 472 x 3 648 pix)
Velikost snímače	13,2 x 8,8 mm
Velikost pixelu na čipu	2,4 x 2,4 μ m
Expoziční čas	1/2000 s
Formát záznamu	JPEG, RAW
ISO	100-3 200

motná letová mise proběhla 6. 4. 2019 za vhodných meteorologických podmínek a difúzního světla tak, aby na snímcích nebyly znatelné tvrdé stíny, odrazy či reflexe (tab. 2). Letové řady byly orientovány sever-jih (obr. 2).

4. Zpracování dat

Na trhu je v současnosti celá řada programů umožňujících rychlé určení parametrů vnitřní a vnější orientace snímků

Tab. 2 Parametry snímkování

GSD	Rychlost letu [m/s]	Výška letu [m]	Počet snímků	Počet řad	Doba letu	Datum	Meteorologické podmínky
1 cm	1,9	36,6	710	29	43 min 47 s	6. 4. 2019	Souvislá oblačnost, 17°C, vítr 2 m/s
2,5 cm	3,5	91,2	139	12	11 min 31 s	6. 4. 2019	Souvislá oblačnost, 17°C, vítr 2 m/s
5 cm	7	183,3	60	7	4 min 57 s	6. 4. 2019	Souvislá oblačnost, 17°C, vítr 2 m/s



Obr. 2 Letové řady pro GSD 1 cm

v snímkovém bloku pomocí automaticky vygenerovaných spojovacích bodů. Softwary jsou založeny na Hirschmullerově metodě semi-globální obrazové korelace (SGM) nebo na postupech Structure from Motion²⁾ (SfM) [6]. Ve většině případů dostupných programů se však jedná o tzv. černé skříňky, které neumožňují výraznější zásah uživatele do výpočtu výše uvedených parametrů. Pro zpracování snímků kalibrační základny AdMaS byly vybrány tři komerční softwary Bentley Context Capture, Agisoft Metashape a software Pix4D Zpracování v softwaru Pix4D probíhalo ve spolupráci s geodetickou společností Hrdlička, spol. s r. o.

V rámci kalibrace systému a testování přesnosti bylo použito 60 bodů. Body byly rozděleny na výchozí (Ground Control Points – GCP) a kontrolní (Check Points – CP) [5], které nevstupují do fotogrammetrického výpočtu. Pro testování bylo zvoleno 5 variant výpočtů s různým počtem výchozích a kontrolních bodů **tab. 3**.

Do softwarů byly postupně naimportovány snímky, informace o parametrech kamery, souřadnice výchozích a kontrolních bodů, prvky vnější orientace získané z aparatury dGPS/INS. Jedná se o integrovaný polohový systém složený z diferenciální globálního polohového systému (GPS) a inerciálního navigačního systému (INS). INS je navigační pomůcka využívající počítač, pohybové senzory (akcelerometry), senzory rotace (gyroskopy) a magnetické senzory pro průběžný výpočet směru a rychlosti pohybu bez nutnosti externí reference.

2) Fotogrammetrická metoda postavena na základních principech stereoskopické fotogrammetrie s kombinací metody průsekové fotogrammetrie.

V následující etapě zpracování byly zaměřeny snímkové souřadnice výchozích a kontrolních bodů na všech snímcích. Z takto připravených dat byla vypočteny a vyrovnány prvky vnitřní orientace a prvky vnější orientace. Na základě rozdílů mezi terestricky určenými souřadnicemi a vypočtenými souřadnicemi výchozích bodů byly vypočteny střední kvadratické chyby (RMSE – Root mean

square error). Výpočet byl proveden v Softwaru Bentley Context Capture v.10, tato verze neumožňuje porovnání RMSE pro jednotlivé souřadnice X a Y, ale pouze pro horizontální a vertikální složku $RMS_{x,y}$ a RMS_z .

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{\text{referenční}} - x_{\text{vypočtený}})^2},$$

kde x je souřadnice kontrolního bodu CP a n je počet kontrolních bodů. Analogicky jsou vypočteny RMSE pro souřadnice Y a Z.

Vzorec pro výpočet střední polohové chyby $RMSE_{x,y}$:

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}.$$

Tab. 3 Varianty počtu výchozích a kontrolních bodů pro snímkování 1 cm, 2,5 cm a 5 cm

GSD [m]	počet GCP	počet CP	počet snímků
0,01	3	57	710
	7	53	
	12	48	
	30	30	
	60	0	
0,025	3	57	139
	7	53	
	12	48	
	30	30	
	60	0	
0,05	3	57	60
	7	53	
	12	48	
	30	30	
	60	0	

5. Výsledky

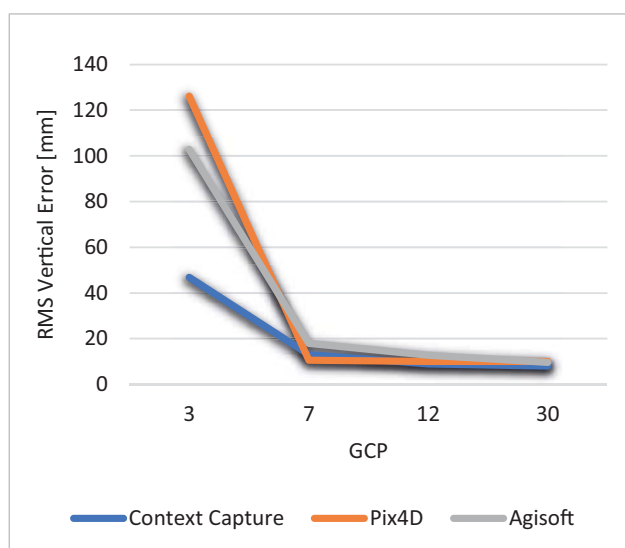
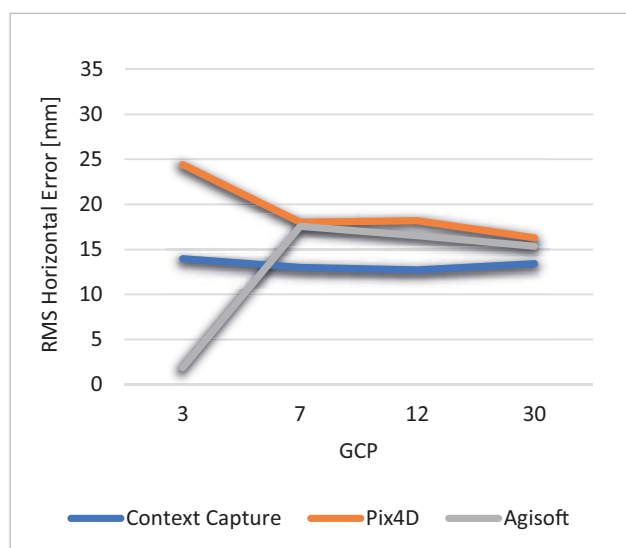
Dosažené výsledky lze hodnotit z různých hledisek s ohledem na velikost pixelu a zpracovatelský software, počet výchozích bodů. Separátně byly posouzena horizontální a vertikální složka (**obr. 3**, **obr. 4**, **obr. 5**).

5.1 Porovnání výsledků mezi softwary Pix4D, Agisoft a Context Capture

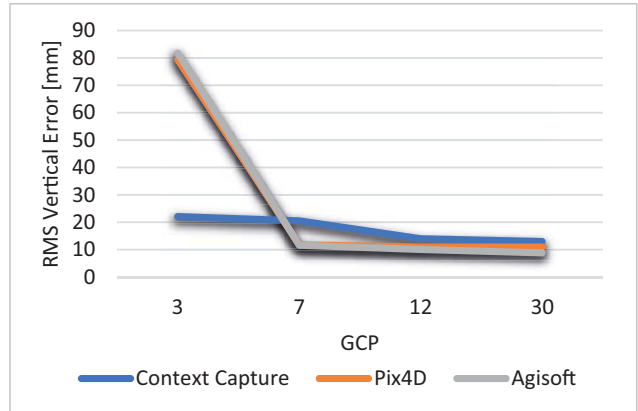
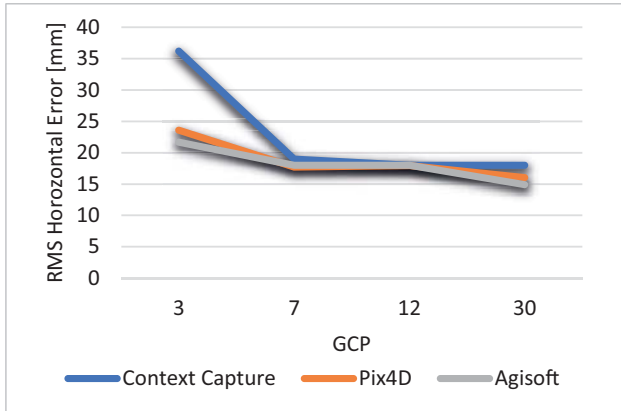
Porovnání výsledků výpočtů v různých softwarech ukazují **obr. 3**, **obr. 4** a **obr. 5**.

5.2 Porovnání kalibračních parametrů kamery

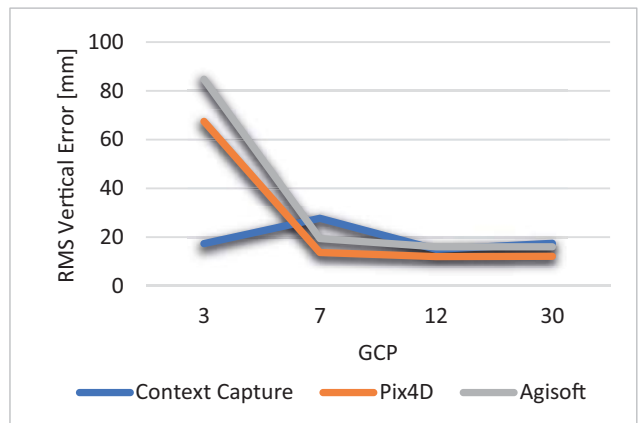
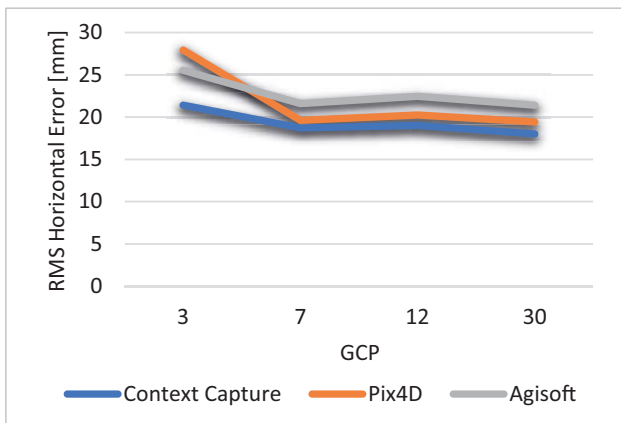
V rámci sledování stability řešení byly porovnávány prvky vnitřní orientace kamery pro jednotlivá řešení (interior orientation – IO). Jedná se o ohniskovou vzdálenost f (**obr. 6**) a polohu hlavního snímkového bodu C_x (**tab. 4**), C_y (**tab. 5**) [5]. Velikost zkreslení a tvar distorzní křivky v rámci této práce nebyly analyzovány.



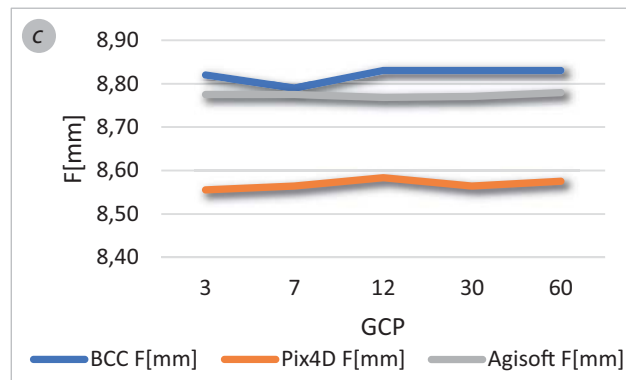
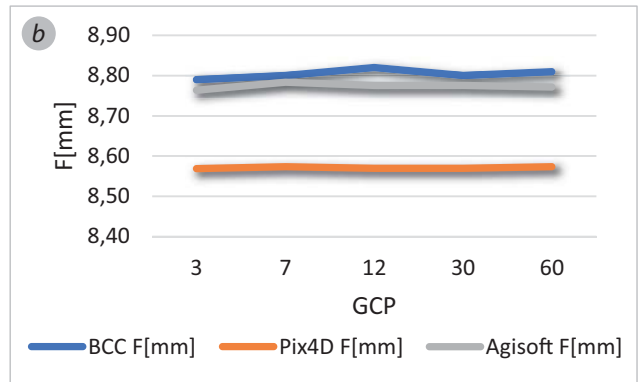
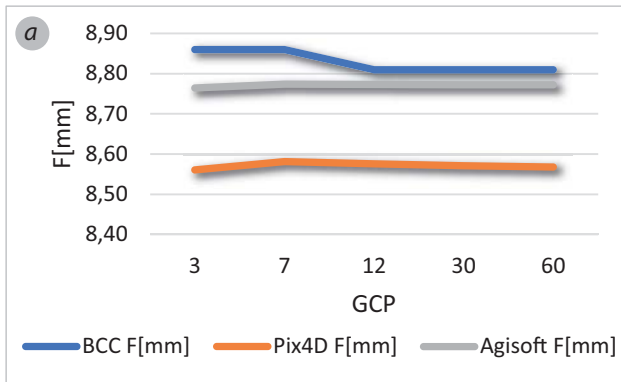
Obr. 3 RMSE versus počet GCP – porovnání výpočtů v různých softwarech pro GSD = 1 cm



Obr. 4 RMSE versus počet GCP – porovnání výpočtů v různých softwarech pro GSD = 2,5 cm



Obr. 5 RMSE versus počet GCP – porovnání výpočtů v různých softwarech pro GSD = 5 cm



Obr. 6 Porovnání ohniskové vzdálenosti vzhledem k počtu GCP – a) GSD = 1 cm, b) GSD = 2,5 cm, c) GSD = 5 cm

Tab. 4 Hodnoty x-ové souřadnice polohy snímkového bodu v různých výpočetních variantách

počet VB	1 cm			2,5 cm			5 cm		
	BCC Cx [pix]	Pix4D Cx [pix]	Agisoft Cx [pix]	BCC Cx [pix]	Pix4D Cx [pix]	Agisoft Cx [pix]	BCC Cx [pix]	Pix4D Cx [pix]	Agisoft Cx [pix]
3	2725,37	2725,06	2726,94	2719,22	2723,26	2728,23	2733,16	2710,13	2724,38
7	2722,50	2723,95	2726,66	2723,80	2721,49	2726,34	2719,42	2718,89	2721,66
12	2723,50	2723,48	2726,59	2723,50	2719,75	2724,21	2720,80	2719,72	2718,60
30	2722,99	2724,05	2726,71	2723,27	2722,70	2724,58	2725,01	2723,69	2720,04
60	2721,88	2724,58	2726,79	2722,49	2724,73	2724,64	2725,89	2726,03	2718,63

Tab. 5 Hodnoty y-ové souřadnice polohy snímkového bodu v různých výpočetních variantách

počet VB	1 cm			2,5 cm			5 cm		
	BCC Cy [pix]	Pix4D Cy [pix]	Agisoft Cy [pix]	BCC Cy [pix]	Pix4D Cy [pix]	Agisoft Cy [pix]	BCC Cy [pix]	Pix4D Cy [pix]	Agisoft Cy [pix]
3	1835,07	1834,48	1835,31	1862,20	1837,57	1830,72	1837,25	1838,85	1834,95
7	1835,27	1834,75	1834,61	1840,26	1841,40	1830,37	1844,14	1841,82	1831,39
12	1837,43	1836,05	1834,77	1843,97	1843,23	1831,38	1843,84	1841,43	1830,31
30	1836,69	1838,66	1835,08	1839,57	1845,95	1831,80	1842,43	1846,79	1831,15
60	1836,24	1840,07	1835,22	1838,86	1844,11	1832,39	1840,78	1844,43	1834,03

6. Zhodnocení

Při výpočtech byly porovnávány separátně horizontální a vertikální složky ve zvolených softwarech. U horizontální složky lze jednoznačně pozorovat stabilizaci RMSE_{x,y} při užití 7 výchozích bodů, a to u všech variant výpočtů (obr. 3, obr. 4, obr. 5). Další navyšování počtu GCP neprokázalo v horizontální složce zvýšení přesnosti. RMSE_{x,y} se pohybuje od 13 mm – 18 mm pro GSD 1 cm, pro GSD 2,5 cm je to 17 mm – 19 mm, pro GSD 5 cm je RMSE_{x,y} 19 mm – 22 mm. Poměr počtu GCP a počtu snímků pro jednotlivé datové sady je 1/100, 1/20 a 1/9.

U vertikální složky je možné sledovat ustálení RMSE_y při výpočtech s dvanácti výchozími body (obr. 3, obr. 4, obr. 5). Dosažená RMSE_y při využití 12 výchozích bodů se pohybuje od 9 mm – 13 mm pro GSD 1 cm, 10 mm – 14 mm pro GSD 2,5 cm a pro GSD 5 cm je od 12 mm – 16 mm. Poměr počtu GCP a počtu snímků je v poměru 1/60, 1/12 a 1/5.

Počet výchozích bodů ovlivňuje výrazněji přesnost z-ové souřadnice. Nejvyšší přesností bylo dle očekávání dosaženo na snímcích s GSD 1 cm, a to jak v horizontální, tak vertikální složce [7]. Doporučený poměr výchozích bodů a počtu snímků je v tomto případě 1/60. Tato hodnota potvrzuje jiné uveřejněné studie např. [1]. U GSD 2,5 cm a 5 cm je díky velkému počtu výchozích bodů (díky vysoké stabilitě řešení) a vysoké přesnosti určení souřadnic GCP dosaženo sub-pixelové přesnosti, její hodnoty jsou menší než 0,5 pixelu. Tato hodnota odpovídá předpokladům uveřejněným v [8]. Testování zahrnovalo porovnání výsledků v třech různých softwarech. Z hlediska dosažených RMSE nebyla prokázána významná odchylka. Malé rozdíly mezi hodnotami RMSE jsou způsobeny přesností

zaměření snímkových souřadnic v jednotlivých softwarech. U software Context Capture není prostředí uživatelsky přívětivé a ani podpora není, ve srovnání s Agisoft a Pix4D, propracovaná. Context Capture umožňuje následnou výrobu fotogrammetrických produktů, bez možnosti jejich přímé editace.

V klasické fotogrammetrii jsou prvky vnitřní orientace určeny laboratorní kalibrací snímače a jsou neměnné. U fotogrammetrie s využitím RPAS je do výpočtů zahrnuta self-calibration, pomocí které jsou vypočteny prvky vnitřní orientace pro daný projekt. Na základě výsledků testování v rámci kalibračního pole AdMaS pozorujeme výraznější rozdíl určení ohniskové vzdálenosti f (obr. 6) při výpočtu v programu Pix4D. Rozdíl výpočtu ohniska v Pix4D a BCC je max. 0,25 mm a rozdíl ohniska vypočteným v Pix4D a Agisoft se liší maximálně o 0,21 mm (varianta 12GCP). Určení ohniska v softwarech BCC a Agisoft se liší minimálně, rozdíl je v setinách milimetru, což odpovídá závěru uvedenému v [9]. V případě testování v rámci této práce, uvedený rozdíl ovšem neovlivňuje RMSE kontrolních bodů v Pix4D. To je dáno algoritmy konkrétního softwaru a velkým počtem nadbytečných měření umožňujícím přizpůsobení výpočtu výchozím bodům. Při porovnání výpočtů s různým počtem výchozích bodů pozorujeme ustálení výpočtu ohniska při využití 12-ti GCP (obr. 6).

U horizontální složky se stabilizuje výpočet polohy hlavního bodu při využití sedmi výchozích bodů (tab. 4, tab. 5). Rozdíly mezi výpočty v různých softwarech a s různou velikostí pixelu jsou v řádu jednotek pixelu. Maximálních hodnot dosahují v souřadnici Cy ve směru letu RPAS. Ani v tomto případě, nelze pozorovat vliv určení polohy hlavního bodu na výslednou RMSE_{x,y} na kontrolních bodech.

7. Závěr

V rámci této práce byla zkoumána geometrická kvalita fotogrammetrického snímkování s využitím RPAS. Práce byla zaměřena na využití speciálně vybudovaného kalibračního pole AdMaS, které splňuje potřeby pro testování z hlediska přesnosti určení výchozích bodů, a velikosti fotogrammetrických terčů umožňujících testování v rozsahu GSD 1 – 6 cm. Rozložení výchozích bodů je zobrazeno na **obr. 1**. Pro testování byly pořízeny tři sady snímků pomocí RPAS.

Studie prokázala vliv počtu GCP na horizontální a vertikální přesnost. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při užití 12 GCP: 0,013 m pro $RMSE_{xy}$ a 0,009 m pro $RMSE_z$. Optimální počet GCP vstupujících do výpočtu je 12.

V rámci testování byl prokázán vliv velikosti pixelu na přesnost. Rozdíly jsou však minimální. Při poměru GCP a počtu snímků 1/9 – 1/5 lze dosáhnout sub-pixelové přesnosti odpovídající 0,3 – 0,5 pixelu (**obr. 5**) pro GSD 5 cm.

Výpočty v různých softwarech neukazují na rozdíly ve výpočetních algoritmech, dosažené RMSE jsou minimální ve všech variantách. Testování výpočtu kalibračních parametrů ukazuje odchylky při výpočtech v různých softwarech, neovlivňuje však přímo výsledné RMSE na kontrolních bodech.

Kalibrační pole AdMaS nabízí možnost testování přesnosti a kalibrace konkrétního RPAS a ověření maximální dosažitelné přesnosti pro různé typy projektů. V dalším testování budou výpočty doplněny o kontrolní body na střeších objektů pro testování výškové stability řešení.

LITERATURA:

- [1] ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ: Návod pro obnovu katastrálního operátu a převod. Ve znění dodatku č. 1 ze dne 18. 12. 2019, č.j. ČÚZK-14085/2018-22, účinného od 1. 1. 2019.
- [2] VÝZKUMNÝ ÚSTAV GEODETICKÝ, TOPOGRAFICKÝ A KARTOGRAFICKÝ, v. v. i.: Metodika určení prostorových objektů pro komplexní pozemkové úpravy s využitím systému bezpilotních prostředků (UAS), 2018.
- [3] RÝGLOVÁ, H.: Distorze objektivu, možnosti odstranění jejího vlivu ze snímků. České vysoké učení technické v Praze – Fakulta stavební, katedra geometiky, 2016. Bakalářská práce.
- [4] ŠAFÁŘ, V.: Porovnání přesnosti a efektivitu měřických metod určení objemu při povrchovém dobývání v návaznosti na novelizaci vyhlášky Českého báňského úřadu č. 435/92 Sb. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta, 2017. Disertační práce.
- [5] ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ: Terminologický slovník zeměměřičtví a katastru nemovitostí. Terminologický slovník zeměměřičtví a katastru nemovitostí [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/>.
- [6] AGUERA-VEGA, F.-CARVAJAL-RAMÍREZ, F.: Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle, Elsevier, 2016.
- [7] SANZ ABLANEDO, E.-CHANDLER, J.: Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ans SfM Photogrammetry Survey as a Function of the number and Location of Ground Control Points Used, Remote Sensing, 2018.
- [8] LUHMAN, T.-ROBSON, S.: Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2020.
- [9] YUSOFF, A.-ARIFF, M.: Camera Calibration Accuracy At Different UAV Flying Heights. The International Archvec of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3, 2017.

Do redakce došlo: 3. 4. 2020

Lektoroval:
Ing. Václav Šafář, Ph.D.,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i