

Určení polohové a výškové přesnosti digitálního modelu povrchu vytvořeného prostředky RPAS

Jaroslav ŠEDINA, Zdeňka BÍLÁ, Eliška HOUSAROVÁ

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
Thákurova 7, Praha 6

jaroslav.sedina@fsv.cvut.cz, zdenka.bila@fsv.cvut.cz, eliska.housarova@fsv.cvut.cz,

Klíčová slova:

RPAS, UAV, UAS, digitální model povrchu, fotogrammetrie

Abstrakt:

Tvorba digitálních modelů povrchů a digitálních modelů terénu leteckými bezpilotními prostředky (RPAS) je moderní metodou sběru dat u nás i zahraničí. Tato technologie prodává v posledních letech bouřlivý rozvoj. Vytvíjí se neustále dokonalejší bezpilotní systémy a software na zpracování dat.

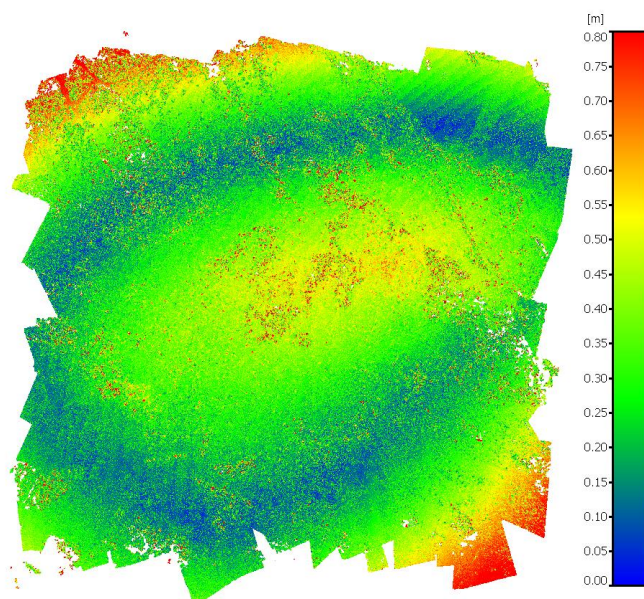
Tato práce je zaměřena na určení dosažitelné přesnosti při zpracování digitálních modelů povrchů a terénu z dat pořízených systémem RPAS. Je zde vyhodnocena polohová a výšková přesnost digitálních modelů povrchu a terénu, vytvořených obrazovou korelací z dat ze systému RPAS. Vyhodnoceny jsou i další efekty mající ovlivňující přesnost digitálního modelu povrchu a terénu.

1. ÚVOD

Určení přesnosti digitálního modelu povrchu (DMP), ze snímků pořízených RPAS, vytvořeného v software Agisoft PhotoScan bylo provedeno na pěti projektech. Tři projekty snímkovali božídarské rašeliniště o rozměrech cca 1500x1500 m v různých časových obdobích. Dalším projektem byla část pole u Litoměřic s rozměry cca 150x150 m a pole u Lipan o rozměrech cca 550x200 m. U každého projektu byly v terénu rozmístěny vlíčovací body, které byly zaměřeny GPS. Snímky byly pořízeny RPAS eBee od společnosti Sensefly, ve viditelném a blízkém infračerveném spektru. Projekt Lipany byl pořízen jen v blízkém infračerveném spektru. Při snímkování odpovídala velikost pixelu 5 cm pro projekty božídarského rašeliniště a 4 cm pro projekty Litoměřice a Lipany. Tvorba DMP a jeho transformace do S-JTSK měla být provedena v software Agisoft PhotoScan, software však vykazoval lokální deformace modelu a nejasnosti v prostorové transformaci.

2. SVAZKOVÉ VYROVNÁNÍ S VLÍCOVACÍMI BODY

Bylo zjištěno, že Agisoft PhotoScan vytvoří DMP, který je v zásadě vyrovnán na vlíčovací body, tyto vlíčovací body se jeví jako podmínka svazkového vyrovnání. To způsobí uchycení DMP na vlíčovací body. Je to jakási deformace DMP na vlíčovací body. Toto nastane již ve fázi řídkého mračka, kdy je provedeno svazkové vyrovnání (optimize). Software tedy minimalizuje odchylky na vlíčovacích bodech. Toto tvrdé kritérium způsobí změny v prvcích vnější orientace kamer a DMP se deformuje, jak ukazuje obr. 1. Deformace modelu nejsou snadno detekovatelné a odchylky na vlíčovacích bodech jsou minimální. Takto obdržená maximální odchylka na vlíčovacích bodech byla do 1 cm, u projektu Lipany NIR byly odchylky největší, viz tab. 1.



Obr. 1: Relativní deformace DMP způsobená svazkovým vyrovnáním (optimize) s vlíčovacími body v porovnání s DMP vytvořeným svazkovým vyrovnáním (optimize) bez vlíčovacích bodů, projekt Boží Dar VIS

Projekt Lipany NIR				
Bod	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]
1	-0,005	0,001	-0,002	0,005
2	0,000	-0,004	0,001	0,004
3	0,005	0,007	0,000	0,009
4	0,001	-0,004	0,000	0,004
5	-0,001	-0,001	0,000	0,001
6	0,000	0,000	0,000	0,001

δ – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu
dX, dY, dZ – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

Tab. 1: Odchytky souřadnic vlíčovacích bodů po vyrovnání v Agisoft PhotoScan

Z obr. 1 je patrné, že průměrná odlehlost modelů, které jsou vytvořeny svazkovým vyrovnáním s vlíčovacími body a svazkovým vyrovnáním bez vlíčovacích bodů, je v rozmezí 0,2 až 0,4 m. Porovnáním modelů v software CloudCompare V2 byla zjištěna průměrná odlehlost 0,309 m, se střední chybou 0,158 m. Tab. 2 ukazuje odchylky na vlíčovacích bodech, které nebyly zahrnuty do svazkového vyrovnání a byly ponechány jako kontrolní body. Odchytky jsou největší v souřadnici Z a nabývají hodnot až jednoho metru. Výsledky u snímků ve viditelném spektru, vykazují větší odchylky, než u snímků v blízkém infračerveném spektru.

	Boží Dar							
	NIR				VIS			
Bod	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]
1	0,058	0,013	-2,026	2,027	0,243	-0,574	-16,216	16,228
7	-0,001	0,073	0,573	0,577	0,000	0,120	-3,284	3,286
8	-0,017	-0,053	-0,013	0,057	-0,069	-0,093	1,546	1,551
9	0,048	0,114	-0,108	0,164	0,185	0,185	-2,770	2,782
	Boží Dar 2							
1	-0,026	0,004	0,126	0,129	-0,076	0,019	-0,042	0,089
2	0,085	0,060	-0,196	0,222	0,126	0,038	0,010	0,132
7	-0,032	0,067	-0,152	0,169	0,065	-0,007	-1,119	1,121
8	-0,061	-0,068	-0,201	0,221	-0,069	-0,053	0,879	0,883
9	0,210	0,065	0,393	0,450	0,194	0,099	-1,248	1,267

	Boží Dar 3							
1	0,028	-0,009	-0,343	0,344	-0,020	-0,020	-0,278	0,279
2	0,086	-0,043	0,478	0,488	0,066	0,115	0,316	0,342
7	0,079	0,088	0,487	0,501	-0,020	0,139	-0,523	0,542
8	-0,084	-0,042	0,095	0,134	-0,046	-0,087	0,933	0,938
9	0,190	0,074	-0,220	0,300	0,125	0,162	-1,363	1,378
	Litoměřice							
1	-0,014	-0,008	0,097	0,098	0,014	0,001	0,055	0,057
2	-0,021	0,011	-0,126	0,128	-0,054	-0,037	-0,112	0,130
3	-0,008	-0,001	0,100	0,101	0,053	-0,032	0,084	0,104
4	-0,033	0,007	-0,125	0,129	-0,010	-0,005	-0,124	0,125
5	0,010	-0,001	0,028	0,030	0,002	0,013	0,081	0,082
	Lipany							
1	-0,037	0,001	-0,054	0,066				
2	0,000	-0,012	0,013	0,018				
3	0,011	0,019	0,004	0,022				
4	0,007	-0,028	0,013	0,032				
5	-0,009	-0,002	-0,043	0,044				
6	-0,005	0,001	0,033	0,033				

dX, dY, dZ – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho měřením GPS

δ – velikost odchylky vlíčovacího bodu

Tab. 2: Odchylky souřadnic vlíčovacích bodů vynechaných ze svazkového vyrovnání, jako kontrolní body

2. SVAZKOVÉ VYROVNÁNÍ BEZ VLÍCOVACÍCH BODŮ

Druhou variantou vytvoření DMP v souřadnicovém systému je provést svazkové vyrovnání (optimize) bez vlíčovacích bodů. Tím je vytvořen model, který optimalizuje prvky vnitřní a vnější orientace bez přísné podmínky vlíčovacích bodů. Pomocí vlíčovacích bodů je možno umístit DMP do souřadnicového systému prostorovou transformací (update). Odchylky vlíčovacích bodů jsou uvedeny v tab. 3. V projektech Boží Dar VIS byl vynechán bod 8 z vyrovnání, vykazuje systematickou chybu ve výšce.

	Boží Dar							
	NIR				VIS			
Bod	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]
1	-0,025	0,026	0,001	0,036	-0,053	0,022	-0,005	0,058
7	0,017	-0,018	0,015	0,029	0,038	-0,054	0,003	0,066
8*	-0,012	-0,059	-0,042	0,073	-0,040	-0,121	1,687	1,692
9	0,020	0,051	0,023	0,059	0,014	0,033	-0,001	0,036
	Boží Dar 2							
1	0,001	-0,030	0,060	0,067	-0,037	0,006	0,236	0,239
2	0,070	0,122	-0,042	0,147	-0,006	0,030	-0,260	0,262
7	-0,162	0,010	0,058	0,173	-0,002	-0,098	-0,105	0,144
8*	-0,054	-0,043	-0,075	0,102	-0,071	-0,050	1,032	1,036
9	0,123	-0,051	0,061	0,146	0,063	0,044	0,026	0,081
	Boží Dar 3							
1	-0,012	0,023	-0,112	0,115	-0,023	-0,021	0,211	0,213
2	0,030	0,042	0,117	0,128	0,010	0,022	-0,179	0,181
7	-0,023	-0,012	0,125	0,128	0,032	-0,014	-0,101	0,107
8*	-0,091	-0,061	-0,160	0,194	-0,058	-0,104	1,097	1,103
9	0,104	0,025	0,124	0,164	0,000	0,016	0,020	0,025
	Litoměřice							
1	0,003	0,005	0,004	0,007	-0,011	0,009	-0,017	0,022
2	-0,011	0,003	0,005	0,012	-0,028	-0,015	-0,052	0,061
3	-0,012	-0,022	0,004	0,025	0,026	-0,022	0,000	0,034

4	0,018	-0,013	0,002	0,022	0,008	0,020	-0,055	0,059
5	0,000	0,027	-0,011	0,029	0,009	0,012	0,112	0,113
Lipany								
1	-0,040	0,013	-0,105	0,113				
2	-0,002	0,012	0,034	0,036				
3	0,017	0,001	0,034	0,038				
4	0,027	-0,015	0,018	0,035				
5	-0,004	-0,002	-0,063	0,063				
6	-0,010	-0,023	0,080	0,084				

dX, dY, dZ – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

δ – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu

* bod 8 byl vynechán jako identický bod při transformaci VIS modelu

Tab. 3: Odchytky vlíčovacích bodů po vyrovnání (update)

Při porovnání prostorové transformace (update), v software Agisoft PhotoScan, vlíčovacích bodů do souřadnicového systému bylo zjištěno, že tato transformace není vyrovnáním MNČ, $\Sigma v \neq 0$ a že výsledky této transformace jsou horší než výsledky Helmertovy sedmiprvkové transformace, dle kritéria $\Sigma vv \rightarrow \min$. Helmertova sedmiprvková transformace byla aplikována na transformované body, výstupní souřadnice z prostorové transformace (update) v software Agisoft PhotoScan. Souřadnicové rozdíly oproti GPS měření udává tab. 4, kde jsou také uvedena kritéria Σv a Σvv . Algoritmus a podmínky transformace jsou nejasné a neshodují se s Helmertovou sedmiprvkovou transformací.

Bod	Agisoft PhotoScan				Helmertova sedmiprvková transformace			
	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]
1	0,001	-0,030	0,060	0,067	-0,007	0,028	-0,049	0,057
2	0,070	0,122	-0,042	0,147	-0,073	-0,127	0,028	0,149
7	-0,162	0,010	0,058	0,173	0,153	-0,007	-0,010	0,154
8	-0,054	-0,043	-0,075	0,102	0,050	0,048	0,092	0,115
9	0,123	-0,051	0,061	0,146	-0,124	0,058	-0,060	0,149
Σ [m]	-0,023	0,009	0,062	0,635	0,000	0,000	0,000	0,624
Σvv [m ²]	0,088				0,085			

dX, dY, dZ – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

δ – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu

Σ – suma oprav jednotlivých souřadnic

Σvv – suma čtverců oprav projektu

Tab. 4: Porovnání výsledků prostorové transformace v Agisoft PhotoScan (update) a Helmertovy sedmiprvkové transformace

3. SVAZKOVÉ VYROVNÁNÍ BEZ VLÍCOVACÍCH BODŮ S HELMERTOVOU SEDMIPRVKOVOU TRANSFORMACÍ

K vytvoření DMP s optimální transformací do souřadnicového systému JTSK, byl zvolen následující postup. Model řídkého mračna byl svazkově vyrovnán (optimize) bez vlíčovacích bodů. Bylo vytvořeno husté mračno bodů a z něho vygenerována polygonová síť. Následně byl exportován rastrový DMP a ortofoto. Z ortofota a rastrového DMP byly odečteny modelové souřadnice (X, Y, Z) vlíčovacích bodů, ty byly transformovány do S-JTSK Helmertovou sedmiprvkovou transformací. Obdržené souřadnicové odchylky vlíčovacích bodů Helmertovy sedmiprvkové transformace jsou uvedeny v tab. 5.

Boží Dar								
Bod	NIR				VIS			
	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	δ [m]
1	0,040	-0,013	-0,001	0,042	0,049	0,004	0,001	0,049
7	-0,034	0,033	-0,008	0,048	-0,052	0,027	-0,001	0,058
8*	0,002	0,016	0,022	0,027	0,033	0,148	-1,807	1,813

9	-0,009	-0,035	-0,013	0,038	0,003	-0,031	0,001	0,031
Boží Dar 2								
1	-0,050	0,038	0,066	0,091	0,020	0,012	-0,229	0,230
2	-0,077	-0,144	-0,047	0,170	0,022	-0,048	0,152	0,161
7	0,204	-0,030	-0,056	0,214	0,000	0,065	0,094	0,115
8*	0,066	0,043	0,087	0,117	0,073	0,056	-1,047	1,051
9	-0,144	0,093	-0,049	0,179	-0,042	-0,029	-0,017	0,054
Boží Dar 3								
1	0,049	0,027	0,021	0,060	0,135	0,208	-0,197	0,316
2	-0,060	-0,071	-0,018	0,095	-0,041	-0,252	0,133	0,288
7	0,010	0,004	-0,041	0,042	0,015	0,063	0,080	0,102
8*	0,106	0,027	0,092	0,143	0,017	0,136	-1,000	1,010
9	-0,104	0,013	-0,054	0,118	-0,109	-0,018	-0,016	0,111
Litoměřice								
1	0,002	-0,013	0,001	0,013	-0,013	-0,017	0,020	0,029
2	0,023	-0,015	-0,014	0,031	0,055	0,001	0,037	0,066
3	0,011	0,030	0,004	0,032	-0,022	0,038	0,010	0,045
4	-0,019	0,000	-0,012	0,023	-0,003	-0,002	0,034	0,034
5	-0,017	-0,001	0,021	0,027	-0,017	-0,020	-0,101	0,105
Lipany								
1	0,022	0,029	0,090	0,097				
2	0,013	-0,034	-0,003	0,037				
3	-0,015	-0,029	-0,100	0,106				
4	-0,032	0,014	-0,004	0,035				
5	0,003	-0,012	0,100	0,100				
6	0,009	0,032	-0,082	0,089				

dX, dY, dZ – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

δ – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu

* bod 8 byl vynechán jako identický bod při transformaci VIS modelu

Tab. 5: Odchylky vlíčovacích bodů modelových souřadnic po Helmertově sedmiprvkové transformaci

Tab. 6 ukazuje rozdíly polohových odchylek bodů vyrovnaných Helmertovou sedmiprvkovou transformací a bodů prostorové transformace ze software Agisoft PhotoScan. Suma rozdílů velikosti polohových odchylek značí, že Helmertova sedmiprvková transformace měla lepší výsledky u projektů Boží Dar NIR i VIS, Boží Dar 2 VIS, Boží Dar 3 NIR a Litoměřice VIS. Vážený průměr sumy rozdílů polohových odchylek je téměř nula, obě metody mají přibližně stejný výsledek.

	Boží Dar		Boží Dar 2		Boží Dar3		Litoměřice		Lipany
	NIR	VIS	NIR	VIS	NIR	VIS	NIR	VIS	NIR
Point	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]	$\delta_H - \delta_A$ [m]
1	0,006	-0,009	0,024	-0,009	-0,055	0,103	0,006	0,007	-0,016
2			0,023	-0,101	-0,033	0,108	0,019	0,005	0,001
3/7	0,019	-0,008	0,041	-0,030	-0,085	-0,005	0,007	0,011	0,068
4/8	-0,046		0,016		-0,051		0,000	-0,026	0,000
5/9	-0,021	-0,005	0,032	-0,026	-0,046	0,086	-0,002	-0,009	0,037
6									0,005
Σ [m]	-0,042	-0,021	0,136	-0,166	-0,271	0,293	0,030	-0,011	0,095
									ϕ_w [m]
									0,006

δ_H – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu Helmertovy sedmiprvkové transformace

δ_A – velikost polohové odchylky vlíčovacího bodu v software Agisoft PhotoScan

Σ – součet rozdílů velikostí polohových odchylek vlíčovacích bodů projektu

ϕ_w – vážený průměr součtu polohových odchylek, váha je rovna počtu bodů

Tab. 6: Rozdíly velikostí polohových odchylek Helmertovy sedmiprvkové transformace a prostorové transformace (update) ze software Agisoft PhotoScan

4. URČENÍ DOSAŽITELNÉ PŘESNOSTI DMP

4.1. Určení dosažitelné přesnosti na vlíčovacích bodech

Pro testování přesnosti byly použity výsledky Helmertovy sedmiprvkové transformace, u které známe podmínky a algoritmus vyrovnání. Během testování bylo zjištěno, že na polohovou přesnost má vliv vzrůst vegetace. Projekty s málo vzrostlou vegetací znázorňuje tab. 7. V tab. 8 jsou vyhodnoceny projekty s vzrostlou vegetací. U projektů bez vegetace byla určena střední souřadnicová chyba 0,028 m na vlíčovacích bodech. Projekty s vzrostlou vegetací vykazují podstatně horší výsledky, byla vypočtena střední souřadnicová chyba rovna 0,103 m. Výsledné střední souřadnicové chyby v tab. 8 a v tab. 9 jsou váženým kvadratickým průměrem středních souřadnicových chyb jednotlivých projektů, kde váha je počet vlíčovacích bodů v projektu. Dalším zjištěním bylo, že polohová přesnost vlíčovacích bodů prakticky nezávisí na viditelném spektru a blízkém infračerveném spektru.

	Projekty s minimem vegetace									
	Boží Dar				Litoměřice				Lipany	
	NIR		VIS		NIR		VIS		NIR	
Bod	dX	dY	dX	dY	dX	dY	dX	dY	dX	dY
1	0,040	-0,013	0,049	0,004	0,002	-0,013	-0,013	-0,017	0,022	0,029
2					0,023	-0,015	0,055	0,001	0,013	-0,034
3/7	-0,034	0,033	-0,052	0,027	0,011	0,030	-0,022	0,038	-0,015	-0,029
4/8	0,002	0,016			-0,019	0,000	-0,003	-0,002	-0,032	0,014
5/9	-0,009	-0,035	0,003	-0,031	-0,017	-0,001	-0,017	-0,020	0,003	-0,012
6									0,009	0,032
σ_X/σ_Y [m]	0,031	0,030	0,050	0,029	0,018	0,018	0,031	0,023	0,020	0,029
σ_{XY} [m]	0,031		0,041		0,018		0,028		0,025	
									σ_X [m]	σ_Y [m]
									0,032	0,026
									0,028	

dX, dY – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

σ_X , σ_Y – střední chyba v X, Y souřadnic vlíčovacích bodů

σ_{XY} – střední souřadnicová chyba XY

Tab. 7: Výpočet střední chyby X, Y a střední souřadnicové chyby u projektů s minimem vegetace

	Projekty s vzrostlou vegetací							
	Boží Dar 2				Boží Dar 3			
	NIR		VIS		NIR		VIS	
Bod	dX	dY	dX	dY	dX	dY	dX	dY
1	-0,050	0,038	0,020	0,012	0,049	0,027	0,135	0,208
2	-0,077	-0,144	0,022	-0,048	-0,060	-0,071	-0,041	-0,252
7	0,204	-0,030	0,000	0,065	0,010	0,004	0,015	0,063
8	0,066	0,043			0,106	0,027		
9	-0,144	0,093	-0,042	-0,029	-0,104	0,013	-0,109	-0,018
σ_X/σ_Y [m]	0,137	0,092	0,030	0,050	0,084	0,041	0,103	0,193
σ_{XY} [m]	0,117		0,041		0,066		0,154	
							σ_X [m]	σ_Y [m]
							0,097	0,111
							0,103	

dX, dY – souřadnicový rozdíl vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením

σ_X , σ_Y – střední chyba v X, Y souřadnic vlíčovacích bodů

σ_{XY} – střední souřadnicová chyba XY

Tab. 8: Výpočet střední chyby v X, Y a střední souřadnicové chyby u projektů s vzrostlou vegetací

Stejná závislost platí u výškových směrodatných odchylek. U projektů s málo vzrostlou vegetací byla určena střední výšková chyba 0,051 m a u projektů s vzrostlou vegetací byla určena střední výšková chyba na 0,115 m. Střední výšková chyba, pro projekty bez vegetace a s vegetací, je vypočtena váženým kvadratickým průměrem, kde vahou je počet bodů v projektu.

	Projekty s minimem vegetace					Projekty s vzrostlou vegetací			
	Boží Dar		Litoměřice		Lipany	Boží Dar 2		Boží Dar 3	
	NIR	VIS	NIR	VIS	NIR	NIR	VIS	NIR	VIS
Bod	dZ	dZ	dZ	dZ	dZ	dZ	dZ	dZ	dZ
1	-0,001	0,001	0,001	0,020	0,090	0,066	-0,229	0,021	-0,197
2			-0,014	0,037	-0,003	-0,047	0,152	-0,018	0,133
3/7	-0,008	-0,001	0,004	0,010	-0,100	-0,056	0,094	-0,041	0,080
4/8	0,022		-0,012	0,034	-0,004	0,087		0,092	
5/9	-0,013	0,001	0,021	-0,101	0,100	-0,049	-0,017	-0,054	-0,016
6					-0,082				
σ_z [m]	0,016	0,001	0,014	0,058	0,084	0,070	0,168	0,059	0,145
	σ_z s minimem vegetace [m]				0,051	σ_z s vzrostlou vegetací [m]			
						0,115			

dX, dY – souřadnicový rozdíl vypočteného vlícovacího bodu s jeho GPS měřením

σ_z – střední chyba v souřadnici Z vlícovacích bodů

Tab. 9: Výpočet střední výškové chyby u projektů s vzrostlou vegetací a s minimem vegetace

4.2. Určení dosažitelné přesnosti na podrobných bodech

U projektu Litoměřice bylo GPS změřeno 180 podrobných bodů ve čtyřech profilech, u projektu Lipany bylo změřeno 8 podrobných bodů v jednom profilu, v projektech Boží Dar bylo změřeno 42 podrobných bodů na různých typech povrchu. Tab. 10 a tab. 11 udávají vyhodnocení obdržených souřadnicových rozdílů, v souřadnici Z, mezi GPS měřením a výškou bodu určenou v digitálním modelu povrchu. Porovnáním projektů v tab. 10, Litoměřice NIR a VIS je patrné, že model, vytvoření ze snímků pořízených kamerou snímajících v blízkém infračerveném pásmu je přesnější. Má menší průměrnou odchylku v souřadnici Z, která je rovna -0,067 m a je zhruba poloviční oproti modelu vytvořenému ze snímků ve viditelném spektru, který má průměrnou odchylku v souřadnici Z rovnu -0,165 m. Střední chyba Z modelu NIR je 0,028 m a střední chyba Z modelu VIS je přibližně trojnásobná, a je rovna 0,083 m. Dále je uvedena střední chyba Z modelu při průměru rovném 0.

	Litoměřice		Lipany
	NIR	VIS	NIR
ϕ_z [m]	-0,067	-0,165	0,000
σ_z [m]	0,028	0,083	0,095
Min [m]	-0,142	-0,308	-0,173
Max [m]	-0,003	0,100	0,120
Počet testovaných podrobných bodů	180	180	8

ϕ_z – průměrná odchylka v souřadnici Z

σ_z – střední chyba odchylky v souřadnici Z

Tab. 10: Dosažená přesnost na podrobných bodech

Pro tab. 11 platí, že v projektech NIR roste střední chyba s vzrůstající vegetací. Povrch louky vykazuje systematickou chybu s rostoucí vegetací (dle pravidla „má být – jest“), tedy růst vegetace mezi obdobími. Pro projekty VIS byla zjištěna systematická chyba podrobných bodů ve středu projektu, zejména v okolí vlícovacího bodu č. 8. Deformace modelu Boží Dar 3 VIS oproti modelu Boží Dar 3 NIR je znázorněna na obr. 2. Tuto deformaci ve středu modelu Boží Dar 3 VIS, i ostatních projektech Boží Dar VIS, potvrzují odchylky podrobných bodů NIR a VIS projektů a odchylky kontrolních vlícovacích bodů při svazkovém vyrovnání. Oproti NIR projektům mají VIS projekty zhruba stejnou střední chybu na podrobných bodech, pro každý typ povrchu. Samostatná statistika podrobných bodů v deformovaném území je uvedena v tab. 12. Jedná se o 5 bodů v rašeliništi poblíž středu území projektu VIS. Systematická chyba se pohybuje přibližně mezi 1,00 m a 1,75 m. Zde se ukázalo, že projekty NIR mají vyšší přesnost podrobných bodů, než projekty VIS. A že projekty VIS vykazují deformace v projektech Boží Dar, což nebylo patrné z obdržených odchylek na vlícovacích bodech.

	Boží Dar						
	NIR			VIS			
Pokryv	Rašelina	Louka	Pevné objekty	Rašelina	Rašelina*	Louka	Pevné objekty
ϕ_z [m]	-0,169	-0,242	0,143	-0,308	0,161	0,818	0,331
σ_z [m]	0,076	0,058	0,048	0,919	0,387	0,311	0,198
Min [m]	-0,279	-0,375	0,059	-2,063	-0,613	0,372	0,111
Max [m]	-0,044	-0,115	0,180	0,762	0,762	1,477	0,513
Boží Dar 2							
ϕ_z [m]	-0,262	-0,312	0,014	-0,088	0,238	0,460	0,055
σ_z [m]	0,147	0,074	0,056	0,643	0,297	0,296	0,091
Min [m]	-0,611	-0,424	-0,063	-1,372	-0,353	0,034	-0,053
Max [m]	0,007	-0,166	0,079	0,603	0,603	1,061	0,130
Boží Dar 3							
ϕ_z [m]	-0,060	-0,592	-0,144	-0,042	0,318	0,381	0,283
σ_z [m]	0,136	0,116	0,085	0,691	0,257	0,249	0,172
Min [m]	-0,389	-0,736	-0,273	-1,414	-0,280	-0,013	0,063
Max [m]	0,147	-0,372	-0,039	0,623	0,623	0,817	0,443
Počet bodů	20	17	5	20	15	17	5

Rašelina* – ze statistiky bylo vyloučeno 5 odlehklých pozorování

ϕ_z – průměrná odchylka v souřadnici Z

σ_z – střední chyba odchylky v souřadnici Z

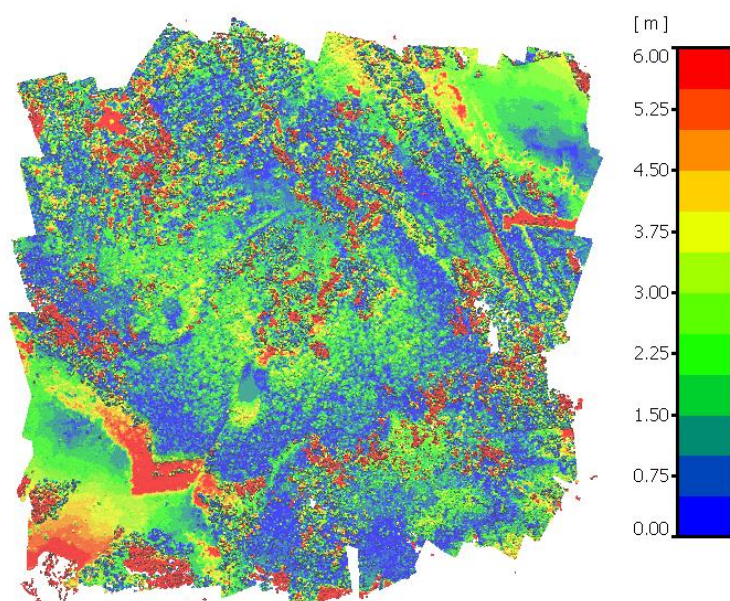
Tab. 11: Vyhodnocení podrobných bodů Boží Dar

	VIS – Rašelina		
Projekt	Boží Dar	Boží Dar 2	Boží Dar 3
ϕ_z [m]	-1,718	-1,066	-1,125
σ_z [m]	0,415	0,255	0,288
Min [m]	-2,063	-1,372	-1,414
Max [m]	-1,156	-0,754	-0,763

ϕ_z – průměrná odchylka v souřadnici Z

σ_z – střední chyba odchylky v souřadnici Z

Tab. 12: Statistika pěti odlehklých podrobných bodů v oblasti středu projektů Boží Dar VIS



Obr. 2: Porovnání mračen projektů Boží Dar 3 NIR a VIS

5. ZÁVĚR

Svazkové vyrovnaní (optimize) spolu s vlíčovacími body deformuje DMP, to je způsobeno minimalizací odchylek na vlíčovacích bodech a tím jsou upraveny prvky vnější a vnitřní orientace snímků, aby bylo této podmínky dosaženo.

Použitím prostorové transformace (update) s vlíčovacími body, může být DMP transformován do souřadnicového systému. Prostorová transformace (update) není jasně definována a bylo zjištěno, že není transformací vyrovnanou MNČ. Suma oprav není rovna nule. Helmertova sedmiprvková transformace, dává srovnatelné výsledky a je vyrovnaním MNČ.

U projektů Boží Dar byla zjištěna systematická chyba modelu pro snímky VIS v jeho středu, v okolí vlíčovacího bodu číslo 8. Dále u těchto projektů byla zjištěna závislost polohové a výškové přesnosti na vzrůstu vegetace, tuto domněnku potvrdili výsledky z projektů Litoměřice a Lipany, kde byla minimální vegetace a střední chyby svými velikostmi odpovídali prvnímu projektu Boží Dar. Pro projekty s minimem vegetace byla určena střední souřadnicová chyba 0,028 m a střední výšková chyba 0,051 m. Pro projekty s vzrostlou vegetací byla určena střední souřadnicová chyba 0,103 m a střední výšková chyba 0,115 m.

Při testování přesnosti digitálního modelu povrchu bylo zjištěno, že odchylka GPS měření výšky podrobného bodu od výšky obdržené z digitálního modelu povrchu je složena ze systematické složky a nahodilé složky. Systematickou složkou může být i vzrostlá vegetace. Velikost obou složek byla výrazně menší pro NIR model. Dále bylo zjištěno, že modely Boží Dar VIS jsou ve svém středu deformované a lepší výsledky DMP jsou obdrženy z modelů ze snímků NIR.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl podpořen projektem SGS ČVUT číslo SGS14/052/OHK1/1T/11 - Rozvoj progresivních metod geomatiky.

LITERATURA

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

Marčíš, M. (2013). Quality of 3D Models Generated by SFM Technology, Slovak Journal of Civil Engineering, 11,4, 13-24

Pavelka, K., Řehák, M. (2012). Using of UAV for photogrammetry and thermal imaging. Proceedings of ACRS 2012. Chang Wattana Road, Bangkok: Asian Association of Remote Sensing (AARS), vol. 1, pp. 589-601.

Pavelka, K., Řezníček, J., Faltýnová, M., Matoušková, E (2014). RPAS as a tool for the monitoring of a natural reserve 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Conference Proceedings volume III. Sofia: STEF92 Technology Ltd., pp. 291-298

Remondino, F. (2011). UAV Photogrammetry for mapping and 3D modelling: Current status and future perspectives. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1-C22/papers/remondino.pdf>

Řezníček, J., Straková, H. (2013). Documentation of dumps and heaps by use of UAV. 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2013, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Conference Proceedings volume I. Sofia: STEF92 Technology Ltd., pp.151-158.