



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geomatiky**

Vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS

Influences affecting the accuracy of RPAS outputs

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jaroslav Šedina

Doktorský studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Praha, 2021

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za vstřícnost, pomoc a rady při zpracování této práce a v průběhu celého doktorského studia. Hlavní poděkování patří mé ženě a synovi za podporu v posledních dnech dokončování této práce. Poděkování patří také celé mé rodině, která mě vždy vytrvale podporovala a bez které bych tuto práci nikdy nedokončil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Dr. Ing. Karla Pavelky. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze, 26. února 2021

Ing. Jaroslav Šedina

Abstrakt

V této práci jsou přestaveny jednotlivé vlivy působících na přesnost výstupů z RPAS (systém dálkově řízeného letadla) a možné způsoby jejich eliminace. V práci je probrána problematika kalibrace kamery, stability prvků vnitřní orientace, korelace prvků vnitřní a vnější orientace, varianty provedení snímkového letu, minimalizace počtu vřícovacích bodů při snímkování RPAS s RTK/PPK GNSS aparaturou, a další vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS. Část této práce se zabývá návrhem a testováním algoritmu (*DEAn*), který detekuje, zda v modelu působí systematická chyba. Algoritmus *DEAn* určí velikost této chyby na základě analýzy souřadnicových oprav projekčních center. Algoritmus určí optimální hodnotu středních chyb oprav, pokud je odstraněna systematická chyba modelu. Algoritmus *Korata* je druhým výstupem, který iteračně optimalizuje prvky vnitřní orientace kamery na základě minimalizace střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center snímků. Algoritmus *Korata* dosahoval zlepšení průhybu fotogrammetrického modelu o cca 50%. V jednom případě byly výsledky aplikace algoritmu *Korata* výrazně horší. Výsledky této práce naznačují nezanedbatelný dopad povětrnostních podmínek při snímkovém letu na přesnost výstupů z RPAS.

Klíčová slova: fotogrammetrie, RPAS, přesnost výstupů, deformace modelů, prvky vnitřní orientace, prvky vnější orientace, projekční centrum, kalibrace kamery

Abstract

The aim of this work is to introduce the individual influences affecting the accuracy of the RPAS (remotely piloted aircraft system) outputs. This work suggests possible ways of elimination of their action. The issues of camera calibration are widely discussed here, also the stability of interior orientation elements, correlation between interior and exterior orientation elements, survey flight design, control points reduction by using RPAS equipped with RTK / PPK GNSS receivers, and other influences affecting the accuracy of RPAS outputs. The next part of this thesis deals with the design and implementation of an algorithm (*DEAn*). Algorithm detects and describes systematic error of photogrammetric models known as „dome error“. The *DEAn* algorithm determines dome error magnitude based on the analysis of corrections of projection centre coordinates. The algorithm smoothes the height coordinate corrections and fit sphere to corrections. The *Korata* algorithm is the second output that iteratively optimizes the interior orientation elements by minimizing the spatial standard deviation of coordinate's correction of projection centres. The *Korata* algorithm improved the dome error of the photogrammetric model by about 50%. The results of the *Korata* apply were significantly worse just in one case. A poor light conditions and relatively strong wind can cause the weak results of imaged area. Results suggests considerable impact of weather conditions on the accuracy of RPAS outputs.

Keywords: photogrammetry, RPAS, outputs accuracy, model deformation, elements of interior orientation, elements of exterior orientation, projection center, camera calibration

Title translation:

Influences affecting the accuracy of RPAS outputs

Obsah

Úvod	1	2 Použité prostředky RPAS a kamerové vybavení pro sběr dat	15
1 Seznámení s problematikou vlivů působících na přesnost výstupů z RPAS	3	2.1 Popis a specifikace RPAS eBee .	15
1.1 Vliv kalibrace kamery a optimalizace svazkového vyrovnaní .	3	2.2 Popis použitého kamerového vybavení.....	17
1.1.1 Stabilita prvků vnitřní orientace	5	2.2.1 Kamery snímající ve viditelném spektru	17
1.1.2 Korelace prvků vnitřní a vnější orientace	6	2.2.2 Kamery snímající v blízkém infračerveném spektru	18
1.1.3 Systematická deformace fotogrammetrického modelu	8	2.2.3 Multispektrální kamery	19
1.2 Provedení snímkového letu	9	2.2.4 Termální kamera.....	20
1.2.1 Rozlišovací schopnost na zemském povrchu - GSD	9	3 Algoritmus DEAn - analýza průhybu fotogrammetrického modelu	21
1.2.2 Překryty snímků	10	3.1 Popis algoritmu DEAn	22
1.2.3 Návrh sítě projekčních center	10	3.1.1 Vyhlazení oprav	24
1.2.4 Vliv přesného GNSS měření souřadnic projekčních center na výstupy z RPAS	11	3.1.2 Statistická váha oprav	27
1.3 Další vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS	12	3.1.3 Odhad parametrů sféry	27
		3.1.4 Výpočty středních chyb	28
		3.1.5 IDW analýza území	29

3.2 Popis výstupů algoritmu DEAn	29	5 Algoritmus Korata - Iterační optimalizace prvků vnitřní orientace	47
3.2.1 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center	30	5.1 Popis algoritmu iterační optimalizace prvků vnitřní orientace	48
3.2.2 Analýza proložení sférou vyhlazených oprav výškových souřadnic projekčních center	31	5.1.1 Iterační výpočet f, k_1, p_1	48
3.2.3 Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center	31	5.1.2 Volba křivky pro odhad minima funkce střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center	51
3.2.4 Tabulkové výstupy pro opravy výškové souřadnice projekčních center	32	5.2 Popis výstupů algoritmu Korata	52
3.2.5 Statistika počtu bodů ve filtrační masce	34	5.2.1 Popis protokolu	52
3.2.6 Analýza oprav pro souřadnici X projekčních center	34	6 Návrh řešení a ověření postupů zpřesňující výstupy z RPAS	55
3.2.7 Analýza oprav pro souřadnici Y projekčních center	35	6.1 Testování velikosti systematické deformace fotogrammetrického modelu v komerčních aplikacích	55
4 Určení optimálního počtu projekčních center vstupujících do filtrační masky	37	6.2 Porovnání vlivu změny výšky při snímkovém letu a zapojení šikmých snímků do sítě projekčních center	57
4.1 Určení optimálního parametru n, k	39	6.3 Ověření minimálního počtu vlíčovacích bodů pro RPAS vybaveného GNSS RTK/PPK měřením	60
4.1.1 Grafická analýza dat	39	6.4 Vliv meteorologických podmínek na snímkový let	61
4.1.2 Detailní analýza dat	41		
4.2 Optimální počet snímků pro zvolené území	43		

7 Testování algoritmu DEAn	63		
7.1 Výstupy algoritmu DEAn pro VIS kameru	63		
7.1.1 Výstupy algoritmu DEAn pro testovací pole u Litoměřic	63		
7.2 Výstupy algoritmu DEAn pro NIR kamery	65		
7.2.1 Výstupy algoritmu DEAn pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku	65		
7.2.2 Výstupy algoritmu DEAn pro archeologickou lokalitu Ctiněves	67		
7.3 Výstupy algoritmu DEAn pro multispektrální kamery	68		
7.3.1 Výstupy algoritmu DEAn pro opevnění z Třicetileté války u obce Sedliště, multispektrální snímkování	68		
7.3.2 Výstupy algoritmu DEAn pro lokalitu u obce Tuhaň, multispektrální snímkování	71		
7.4 Výstupy algoritmu DEAn pro termální kameru	72		
7.4.1 Výstupy algoritmu DEAn pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování	72		
7.4.2 Výstupy algoritmu DEAn pro opevnění z Třicetileté války u obce Sedliště, termální snímkování	75		
7.5 Shrnutí výsledků aplikace algoritmu DEAn na vybraných lokalitách	77		
8 Hodnocení výsledků algoritmu Korata	79		
8.1 Hodnocení dosažené přesnosti na vlíčovacích bodech	79		
8.2 Porovnání rastrových digitálních modelů	81		
Chatová osada Mariánská u Jáchymova	82		
Území u Mšených-lázní	83		
Oblast u obce Počáply	84		
8.3 Shrnutí výsledků aplikace algoritmu Korata	85		
Závěr	87		
Seznam zkratk	89		
Literatura	91		
A Přehled testovacích území	99		

A.1 Archeologická lokalita Makhmur al-Qadima (severní Irák)	99	B Generování dat pro testování parametrů metody	109
A.2 Testovací pole u Litoměřic	100	Rovnice pro určení parametrů náletu	110
A.3 Mapování obchvatu u Kardašovy Řečice	101	Určení parametrů náletu	111
A.4 Katastrální mapování obce Skoránov	101	C Analýza generovaných dat pro optimalizaci parametrů n a k	113
A.5 Katastrální mapování obce Nová Ves	102	C.1 Grafická analýza dat	113
A.6 Mapování pohybu ledovce Knud Rasmussen v Grónsku	103	C.2 Optimální počet snímků pro let	118
A.7 Archeologická lokalita Ctiněves	103	D Obsah CD	121
A.8 Detekce opevnění z Třicetileté války nacházející se u obce Vysoké Sedliště	104		
A.9 Porovnání metod sběru dat pro vegetační index u obce Tuhaň	105		
A.10 Mapování terénu pro křížení rychlodráhy u Chlumce	106		
A.11 Snímkování osady Mariánská	106		
A.12 Mapování železničního oblouku u obce Mšené-lázně	107		
A.13 Průzkum napojení koridoru rychlodráhy u obce Počápy	108		

Obrázky

1 Diference konstanty kamery vyrovnané pro každý snímek v projektu, zdroj [34].	5	12 Kamera Sequoia se spektrálními křivkami.	20
2 Optimalizace parametru k_1 radiální distorze objektivu, zdroj [35].	6	13 Termální kamera thermoMAP se spektrální křivkou.	20
3 Vliv počtu a konfigurace vlčovacíh bodů na systematickou deformaci fotogrammetrického modelu v aplikaci RealityCapture, zdroj [43].	8	14 Schéma algoritmu <i>DEAn</i>	23
4 Ukázka eliminace systematické deformace fotogrammetrického modelu, zdroj [42].	9	15 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro území Makhmur al-Qadima.	30
5 RPAS eBee.	16	16 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro území Makhmur al-Qadima.	31
6 RPAS eBee Plus.	16	17 Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro území Makhmur al-Qadima.	32
7 Kamera Canon IXUS 127 HS se spektrálními křivkami.	18	18 IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center.	35
8 Kamera S.O.D.A. se spektrálními křivkami.	18	19 IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center.	36
9 Kamera Canon PowerShot ELPH 110 HS se spektrálními křivkami. . .	18	20 Grafická vizualizace vygenerovaných dat.	38
10 Kamera Canon S110 se spektrálními křivkami.	19	21 Grafické vyhodnocení snímkového letu s kolmými liniemi, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 %.	40
11 Kamera multiSPEC 4C se spektrálními křivkami.	19	22 Grafické vyhodnocení jednoduchého snímkového letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 %. .	40

23 Schéma algoritmu iterační optimalizace prvků vnitřní orientace.	49	32 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro testovací pole u Litoměřic.	64
24 Schéma iteračního procesu určení optimálních parametrů f, k_1, p_1 . . .	50	33 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro testovací pole u Litoměřic.	64
25 Průběh funkce střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center a jejich aproximací	51	34 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.	65
26 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro oblast Sedliště, multispektrální kamera, zpracování v Pix4Dmapper.	56	35 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.	66
27 Analýza proložení sférou opravami výškové souřadnice projekčních center pro oblast Sedliště, multispektrální kamera, zpracování v Pix4Dmapper.	57	36 IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro čelo ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.	66
28 Vliv změny výšky snímkového letu na eliminaci systematické deformace fotogrammetrického modelu.	59	37 IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro čelo ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.	67
29 Vliv zařazení šikmých snímků do snímkového letu na eliminaci systematické deformace fotogrammetrického modelu.	59	38 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves.	67
30 Ukázka střední souřadnicové chyby projekčních center a GNSS kódového měření pro lokalitu Mariánská.	61	39 Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves.	68
31 Detail vlíčovacího bodu pořízený kamerou Canon IXUS 127 HS pořízený za větrného počasí v lokalitě Chlumeč.	62	40 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.	69

<p>41 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování. 69</p> <p>42 Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování. 70</p> <p>43 IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování. 70</p> <p>44 IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování. 71</p> <p>45 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro lokalitu u obce Tuhaň. 71</p> <p>46 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro lokalitu u obce Tuhaň. 72</p> <p>47 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování. 73</p> <p>48 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování. 73</p>	<p>49 IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování. 74</p> <p>50 IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování. 74</p> <p>51 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování. 75</p> <p>52 Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování. 76</p> <p>53 IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování. 76</p> <p>54 IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování. 77</p> <p>55 Dosažené odchylky na vlíčovacím bodě po aplikaci prostorové transformace. 80</p> <p>56 Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlíčovacích bodů. 82</p>
---	---

57 Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu <i>Korata</i> . 83	68 Archeologické naleziště Ctiněves, zdroj [55]..... 104
58 Diferenční DMP trati u Mšených-lázní vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlíčovacích bodů. 83	69 Lokalita opevnění z Třicetileté války, zdroj [55]. 105
59 Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu <i>Korata</i> . 84	70 Snímkovaná louka u obce Tuhaň na Českolipsku, zdroj [55]. 105
60 Diferenční DMP u obce Počáply vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlíčovacích bodů. 84	71 Lokalita křížení rychlodráhy u Chlumce, zdroj [55]. 106
61 Diferenční DMP u obce Počáply vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu <i>Korata</i> . 85	72 Osada Mariánská u Jáchymova, zdroj [55]..... 107
62 Archeologické naleziště Makhmur al-Quadima, zdroj [55]. 99	73 Železniční oblouk nacházející se u obce Mšené-lázně, zdroj [55]. .. 107
63 Testovací pole u Litoměřic, zdroj [55]..... 100	74 Varianta napojení koridoru rychlodráhy a přemostění řeky Labe u obce Počáply, zdroj [55]. 108
64 Snímkované území u obce Kardašova Řečice, zdroj [55]. 101	75 Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 %. .. 114
65 Snímkované území obec Skoránov, zdroj [55]..... 102	76 Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 %. .. 114
66 Snímkované území obec Nová Ves, zdroj [55]..... 102	77 Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 3:2, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %. 115
67 Čelo ledovce Knud Rasmussen (Grónsko), zdroj [55]..... 103	78 Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 4:3, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %. 115

79 Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 % . . .	116
80 Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 % . . .	116
81 Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 3:2, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %	117
82 Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %	117

Tabulky

1 Tabulka korelací prvků vnitřní a vnější orientace, zdroj [36].	7
2 Tabulka korelací prvků vnitřní orientace a distorzních parametrů, zdroj [39].	7
3 Tabulka korelací prvků vnitřní orientace s využitím šikmých snímků, zdroj [39].	11
4 Technické specifikace systému eBee.	16
5 Technické specifikace systému eBee Plus.	17
6 Technické specifikace použitých kamer.	17
7 Hodnocení dosažené přesnosti odhadu parametrů sféry pro prostý průměr.	25
8 Porovnání vlivu vah na vyhlazený průměr a na odhad sféry.	26
9 Statistické vyhodnocení vlivu rotačně symetrické systematické chyby (sféry) na střední chyby oprav výškových souřadnic projekčních center.	33
10 Parametry vypočtené sféry.	33
11 Posun těžiště souřadnic projekčních center od středu sféry.	33

12	Hodnoty korekcí výškové opravy ze sféry.	34	23	Porovnání hodnot korekce po proložení sférou ve středu sféry pro aplikace Metashape a Pix4Dmapper.	56
13	Statistika počtu bodů ve filtrační masce.	34	24	Změna prvků vnitřní orientace s kombinacemi různých výšek snímkového letu a kombinací kamer.	58
14	Statistické vyhodnocení oprav souřadnice X projekčních center. ...	35	25	Porovnání průmětu velikosti složky Δ do roviny snímku, pro změnu výšky snímkového letu a zařazení šikmých snímků do snímkového letu.	59
15	Statistické vyhodnocení oprav souřadnice Y projekčních center. ...	36	26	Porovnání dosažených středních chyb na vlíčovacích bodech s použitím RPAS vybaveného GNSS RTK měřením.	60
16	Sumarizace vyhodnocených dat pro $n = 0.65$ a $k = 30$	41	27	Hodnocení aplikace algoritmu Korata na vlíčovacích bodech.	81
17	Určení optimálních parametrů n a k	42	28	Porovnání očekávaného poklesu středních chyb ve výšce z algoritmu <i>DEAn</i> a vypočtených středních chyb po aplikaci algoritmu <i>Korata</i>	88
18	Bodové hodnocení odlehlosti testovaných hodnot, kde ϕ je průměr, σ je střední chyba a x je testovaná hodnota.	43	29	Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, let s kolmými liniemi, poměr stran čipu 4:3. ...	118
19	Detailní určení vhodného parametru k , kde ϕ je vypočtený průměr a σ je střední chyba.	43	30	Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, jednoduchý let, poměr stran čipu 4:3.	119
20	Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, let s kolmými liniemi, poměr stran čipu 3:2.	44			
21	Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, jednoduchý let, poměr stran čipu 3:2.	45			
22	Protokol o výpočtech pro území Makmur al-Qadima.	53			



Úvod

Fotogrammetrie je vědní a technický obor o získávání spolehlivých informací o fyzických objektech a prostředí, zaznamenávání, měření a interpretaci snímků. Fotogrammetrie se zabývá zjišťováním geometrických vlastností a polohy objektů a jejich změn z fotografických měřických snímků a obrazových záznamů [1]. Fotogrammetrie se dělí na pozemní, leteckou a družicovou. Tato práce je zaměřena na nízko nákladovou leteckou fotogrammetrii, která se v posledních patnácti letech značně rozšířila. K získávání dat jsou využívány dálkově řízená letadla (RPA - *remotely piloted aircraft*) neboli systémy dálkově řízeného letadla (RPAS - *remotely piloted aircraft system*), někdy též označované v odborné literatuře jako UAV (*unmanned aerial vehicle*) a UAS (*unmanned aircraft system*), či široké veřejnosti známé pod pojmem „dron“. RPAS jsou obvykle malé letecké prostředky nesoucí zpravidla kameru, nebo několik kamer, multispektrální kameru, hyperspektrální kameru/skener či laserový skener, nebo dokonce i jiná specializovaná čidla a detektory, jako je senzor detekující gama záření [2]. Výhodou těchto prostředků je, že pořizují data s vyšším rozlišením, než je tomu u profesionálních leteckých systémů letecké fotogrammetrie, nebo u systému dálkového průzkumu země. Mezi další výhody patří nízké pořizovací náklady, relativně jednoduchá obsluha systému, rychlé nasazení v terénu, atd. RPAS se staly během poslední dekády jedním z obrovských témat moderní fotogrammetrie a zároveň hnacím motorem oboru moderní digitální fotogrammetrie a počítačového vidění. Vývoj zasáhl nejen hardware, jako jsou samotné letecké systémy, inerciální měřicí jednotky, navigační systémy, stabilizátory kamer – gimbalů, řídicí jednotky systémů, vysílače telemetrických údajů, ale i dalšího programového vybavení jako jsou aplikace pro plánování a samotnou realizaci a záznam letu, tak i aplikace umožňující zpracování a vyhodnocení pořízených dat. Tato práce je zaměřena na určení vhodných postupů sběru a zpracování dat a hodnocení dosažených výsledků při zpracování dat. Práce se zabývá možnostmi detekce

.....

působení systematické chyby ve fotogrammetrickém modelu a popisem této systematické chyby. U fotogrammetricky vytvořených modelů lze pozorovat jejich průhyb ve středu modelu, pokud je provedeno svazkové vyrovnání bez vlíčovacích bodů, nebo při geometricky nevhodném rozmístění vlíčovacích bodů v terénu. Svazkové vyrovnání fotogrammetrických modelů má velké množství stupňů volnosti a prvky vnitřní orientace s prvky vnější orientace velmi významně korelují. Pro určité kombinace prvků vnitřní a vnější orientace dosahuje korelace více jak 90%. U současných algoritmů fotogrammetrických komerčních aplikací chybí ve svazkovém vyrovnání mechanismus kontrolující výpočet svazkového vyrovnání z lokálního hlediska. Hlediska zdali určitý bod (projekční centrum) a jeho blízké okolí nejsou zatíženy systematickou chybou. V této práci je navržen algoritmus, který za určitých podmínek potlačí působení systematické chyby ve fotogrammetrickém modelu a zpřesní prvky vnitřní orientace použité kamery.

■ Cíle práce

- Definovat jednotlivé vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS, určit jejich možnost eliminace při snímkovém letu, či při vyhodnocení snímků.
- Navrhnout algoritmus, který by byl schopen určit a popsat působení systematické chyby ve fotogrammetrickém modelu.
- Vytvořit algoritmus, který by byl schopen potlačit působení systematické chyby ve fotogrammetrickém modelu, při použití reverzní kalibrace kamery ve svazkovém vyrovnání.

Kapitola 1

Seznámení s problematikou vlivů působících na přesnost výstupů z RPAS

Jednotlivé vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS a jejich rozbor jsou uvedeny v této kapitole a příslušných podkapitolách. Fotogrammetrie používá nejčastěji fotografická zařízení (kamery), které jsou buď profesionální, přímo určené pro fotogrammetrii, nebo běžné digitální fotoaparáty různé kvality. Z teorie fotogrammetrie plyne, že pro technické využití záznamů z libovolné kamery je nutno znát její parametry, které popisují geometrii chodu paprsků uvnitř zařízení nazývané prvky vnitřní orientace kamery. Ty jsou určovány měřickým či početním postupem, nazývaným kalibrace kamery. Dominantním procesem mající největší dopad na přesnost výstupů z RPAS je kalibrace kamery. Tu především ovlivňuje přesnost určení prvků vnitřní orientace, jejich stabilita a časová platnost. Vhodnou volbou konfigurace snímkového letu a možnost využití přesného GNSS RTK/PPK měření může být přesnost RPAS výstupů výrazně vylepšena. Neméně důležitý dopad na přesnost výstupů z RPAS mají meteorologické podmínky při snímkovém letu.

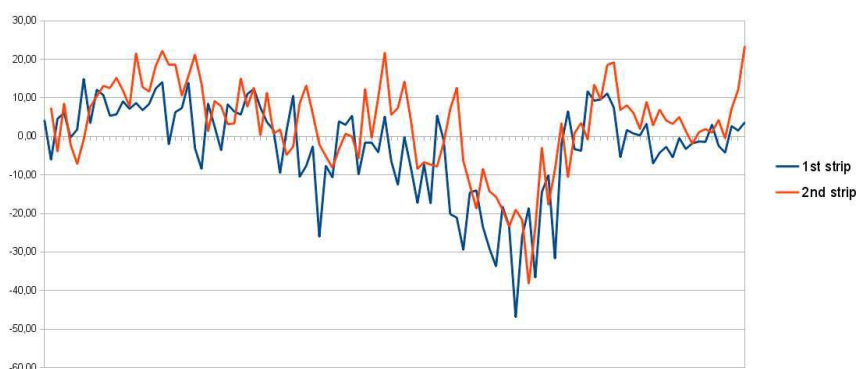
1.1 Vliv kalibrace kamery a optimalizace svazkového vyrovnání

Obecným pravidlem fotogrammetrie je mít kameru kalibrovanou [3], nebo provést alespoň kalibraci před měřením. Teoreticky nejméně vhodnou, ale často používanou kalibrací kamery je reverzní kalibrace (*self-calibration*) [4], která provádí kalibraci kamery z automaticky určeného souboru speciálních

1.1.1 Stabilita prvků vnitřní orientace

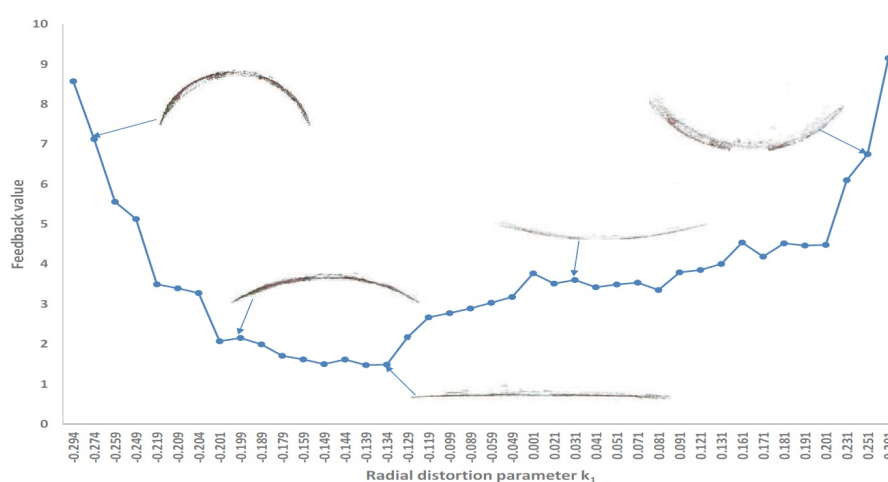
Stabilita prvků vnitřní orientace je významným faktorem ovlivňujícím přesnost výstupu při provádění fotogrammetrických prací. Ta je dalším činitelem, přispívajícím k přesnosti výstupů z RPAS. Mezi nejčastěji studované prvky vnitřní orientace patří časové změny konstanty kamery a distorze objektivu. Studium stability konstanty kamery bylo provedeno v mnoha projektech zaměřených na hodnocení výstupů RPAS [19, 20, 21, 22, 23]. Rozdíl konstanty kamery v provedených výzkumech byl zjištěn jen ve velikosti několika pixelů. Vliv časové stability konstanty kamery byl jako nezanedbatelný popsán v [24, 25]. Ve studii [26] dosahuje změna konstanty kamery 10 až 15 pixelů během necelých dvou let sledování. Poloha hlavního bodu je proměnlivá pro každý snímek [27]. Dále je hodnocena stabilita radiální distorze objektivu, která dosahuje variace kolem 1%. Změna průběhu radiální distorze se změnou ohniskové vzdálenosti je přirozenou vlastností zoom objektivů [28]. Pokud jsou RPAS vybaveny kamerou, která při pořizování snímků přeostrňuje, pak je stabilita prvků vnitřní orientace narušena. Studium radiální distorze ukázalo, že distorze objektivu je závislá na vzdálenosti kamery od snímkaného objektu [29, 30, 31].

Kromě časové závislosti je také možné studovat vztah prvků vnitřní orientace na teplotě [32]. To může být pro některé RPAS jedním z faktorů ovlivňujících přesnost výstupů. Teplo ze zařízení může být přenášeno až na kameru. Dalším nezanedbatelným vlivem určující kvalitu prvků vnitřní orientace kamery, je samotná aplikace (programové vybavení). Každá aplikace používá trochu odlišný postup reverzní kalibrace kamery a prvky vnitřní orientace se tak od sebe liší v závislosti na použitém algoritmu [10, 19, 33].



Obrázek 1: Diference konstanty kamery vyrovnané pro každý snímek v projektu, zdroj [34].

Jedním z možných přístupů potlačení těchto vlivů je vyrovnání konstanty kamery pro každý snímek zvláště ve svazkovém vyrovnání [34]. Konstanta kamery v uvedeném projektu dosahovala maximálního rozdílu ± 25 pixelů, jak je ukázáno na obrázku 1. Dalším netypickým přístupem je iterační vyhledání parametrů radiální distorze [35]. Samotné vyhledání minimálních hodnot radiální distorze je implementováno do upraveného svazkového vyrovnání zohledňující *reprojection error* a souřadnicové rozdíly projekčních center vyrovnaných souřadnic a měřených metodou GNSS. Modifikované svazkové vyrovnání dává zpětnou vazbu iteračnímu algoritmu optimalizujícího radiální distorzi objektivu. Postup optimalizace radiální distorze a vliv radiální distorze na model je uveden na obrázku 2.



Obrázek 2: Optimalizace parametru k_1 radiální distorze objektivu, zdroj [35].

1.1.2 Korelace prvků vnitřní a vnější orientace

Korelace prvků vnitřní a vnější orientace je nepřetržitě studovanou problematikou provázející fotogrametrii po dlouhou dobu [36, 37]. Výrazný rozdíl v korelaci prvků vnitřní a vnější orientace byl obdržen, pokud byla kalibrace provedena pozemní, nebo leteckou fotogrametrií. U pozemní kalibrace byla dosažena vysoká korelace konstanty kamery s výškou projekčního centra, naopak u letecké kalibrace kamery byla vysoká korelace polohy hlavního bodu a úhlu rotace kolem os X a Y [37]. Typické korelace prvků vnitřní a vnější orientace obdržené v profesionální letecké fotogrametrii jsou uvedeny v tabulce 1. Z tabulky je možné pozorovat vysoké korelace mezi výškou projekčního centra a konstantou kamery, které dosahují přes 90%. Dále poměrně významně koreluje poloha hlavního bodu se souřadnicemi X a Y projekčních center.

		X_0	Y_0	Z_0	ϕ	ω
Typical of	c_x	0.49	0.23	0.25	-0.62	0.08
Mt. Graham	c_y	0.47	0.66	-0.36	-0.31	0.19
photo No. 1	f	0.35	0.31	-0.93	0.34	0.04
Typical of	c_x	-0.66	-0.37	0.17	0.08	-0.09
Casa Grande	c_y	0.39	-0.76	0.038	-0.02	-0.13
photo No. 7	f	0.75	-0.32	-0.93	-0.03	0.021

Tabulka 1: Tabulka korelací prvků vnitřní a vnější orientace, zdroj [36].

Hodnoty X_0 , Y_0 a Z_0 jsou souřadnice projekčního centra, ω a ϕ jsou úhly rotace kolem osy X a Y, f je konstanta kamery a c_x a c_y je poloha hlavního bodu.

Kromě korelace prvků vnitřní a vnější orientace lze pozorovat korelace mezi samotnými prvky vnitřní orientace a distorzí objektivu [5, 37, 38, 39]. Korelace prvků vnitřní orientace a distorze objektivu nabývá na významu s nástupem digitálních neměřických kamer ve fotogrammetrii. Tyto kamery nemají nijak korigovanou distorzi objektivu a je nutné zavádět distorzní modely eliminující její vliv na snímkové souřadnice [13, 40]. Typická korelace parametrů vnitřní orientace pro leteckou fotogrammetrii se snímky orientovanými do nadiru je ukázána v tabulce 2. Tabulka vykazuje vysoké korelace mezi konstantou kamery a parametry radiální distorze, vzájemně mezi parametry radiální distorze a parametry tangenciální distorze s polohou hlavního bodu.

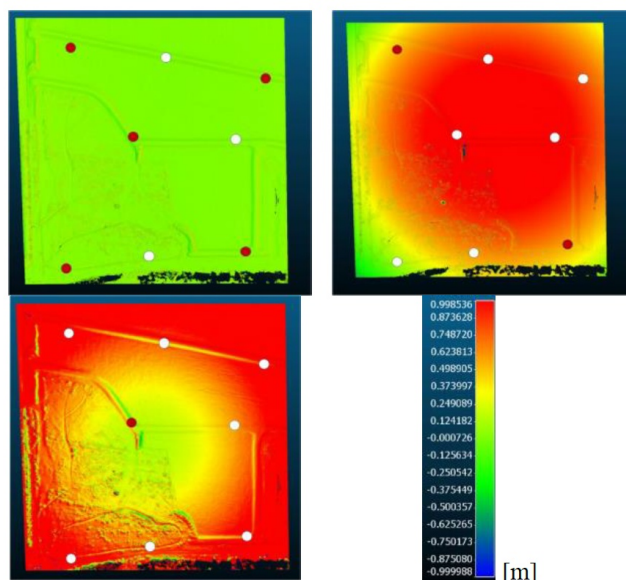
Nadir	f	c_x	c_y	b_1	b_2	k_1	k_2	k_3	k_4	p_1	p_2
f	1										
c_x	0.04	1									
c_y	0.03	0.04	1								
b_1	0.05	0.06	0.09	1							
b_2	0.01	0.03	0.13	0.05	1						
k_1	0.92	0.03	0.06	0.08	0.00	1					
k_2	0.88	0.03	0.03	0.05	0.01	0.95	1				
k_3	0.59	0.02	0.02	0.00	0.01	0.77	0.90	1			
k_4	0.55	0.02	0.01	0.01	0.02	0.71	0.86	0.99	1		
p_1	0.02	0.67	0.07	0.13	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	1	
p_2	0.10	0.09	0.62	0.13	0.16	0.11	0.10	0.07	0.06	0.18	1

Tabulka 2: Tabulka korelací prvků vnitřní orientace a distorzních parametrů, zdroj [39].

Možnosti potlačení korelace prvků vnitřní orientace volbou vhodné sítě projekčních center jsou uvedeny v kapitole 1.2.

1.1.3 Systematická deformace fotogrammetrického modelu

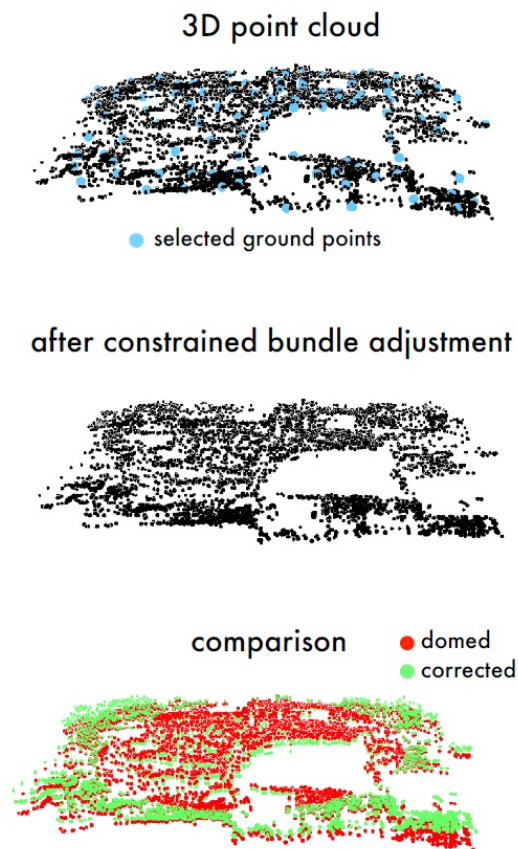
Systematické deformace fotogrammetrického modelu (*dome error*) vzniká primárně při použití reverzní kalibrace kamery a je způsobena nedostatečným určením prvků vnitřní orientace kamery a parametrů distorze objektivu, což je typické pro neměřické kamery [41, 42, 43, 44, 45, 46]. Průhyb fotogrammetrického modelu vzniká, pokud jsou v modelu nevhodně rozmístěny vlčovací body, nebo zcela chybí. Reverzní kalibrace kamery vypočte nedostatečně přesně konstantu kamery a parametry distorze objektivu [41]. Aby byl výpočet prvků vnitřní orientace a parametrů distorze objektivu reverzní kalibrací kvalitní, je nutné použít dostatečný počet vlčovacích bodů ve vhodné konfiguraci [43], jak je ukázáno na obrázku 3. V článku jsou použity různé konfigurace rozmístění vlčovacích bodů. K eliminaci systematické deformace (průhybu) modelu dochází až při použití standardního fotogrammetrického rozmístění vlčovacích bodů (tvar číslice pět na házečí kostce) v terénu.



Obrázek 3: Vliv počtu a konfigurace vlčovacích bodů na systematickou deformaci fotogrammetrického modelu v aplikaci RealityCapture, zdroj [43].

Způsobů eliminace průhybu fotogrammetrického modelu existuje několik. Kompenzovat průhyb fotogrammetrického modelu je možné vhodnou konfigurací snímkového letu [41, 44], více o této možnosti je uvedeno v kapitole 1.2. Dále je možné omezit svazkové vyrovnání podmínkou, která by eliminovala průhyb fotogrammetrického modelu [42]. Odstranění průhybu modelu je ukázáno na obrázku 4. Ve fotogrammetrickém modelu jsou detekovány body na terénu (modré body na obrázku 4) a mračnem bodů je prokládán paraboloid. Do svazkového vyrovnání je zavedena podmínka eliminace průhybu modelu. Omezení tohoto postupu je pouze na snímkané oblasti, které se nacházejí v rovinatém území. Porovnání modelů před odstraněním a po odstranění

systematické deformace fotogrammetrického modelu je ukázáno na obrázku 4.



Obrázek 4: Ukázka eliminace systematické deformace fotogrammetrického modelu, zdroj [42].

1.2 Provedení snímkového letu

Způsob provedení snímkového letu, volba GSD a volba překrytu snímků výrazně ovlivňují přesnost výstupů z RPAS [9, 18, 23, 39, 47, 48].

1.2.1 Rozlišovací schopnost na zemském povrchu - GSD

Volba GSD má zásadní vliv na přesnost výstupů z RPAS [47, 48], respektive pokud jsou kladeny určité požadavky na přesnost výstupů z RPAS, pak je třeba zvolit vhodné GSD. Volba GSD se provádí na základě obecně známých

Vliv zařazení šikmých snímků do sítě projekčních center je pro reverzní kalibraci kamery velmi vhodný [9, 18, 39, 44]. Ve všech studiích byla stabilita sítě projekčních center výrazně zpřesněna použitím šikmých snímků. Tím se také zlepšily podmínky pro reverzní kalibraci a snížila se korelace mezi prvky vnitřní orientace, jak dokazuje tabulka 3. Z tabulky 3 plyne, že korelace mezi konstantou kamery a radiální distorzí objektivu a korelace mezi polohou hlavního bodu a tangenciální distorzí objektivu je výrazně potlačena, v porovnání s tabulkou 2. Vysoká korelace mezi parametry radiální distorze zůstává beze změny.

Nadir + šikmý	f	c_x	c_y	b_1	b_2	k_1	k_2	k_3	k_4	p_1	p_2
f	1										
c_x	0.02	1									
c_y	0.20	0.03	1								
b_1	0.14	0.01	0.03	1							
b_2	0.04	0.09	0.02	0.07	1						
k_1	0.09	0.03	0.01	0.07	0.01	1					
k_2	0.23	0.01	0.04	0.02	0.01	0.90	1				
k_3	0.12	0.02	0.01	0.05	0.01	0.86	0.98	1			
k_4	0.13	0.03	0.02	0.06	0.01	0.79	0.95	0.99	1		
p_1	0.05	0.12	0.01	0.09	0.09	0.06	0.00	0.01	0.01	1	
p_2	0.19	0.02	0.21	0.10	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02	0.13	1

Tabulka 3: Tabulka korelací prvků vnitřní orientace s využitím šikmých snímků, zdroj [39].

1.2.4 Vliv přesného GNSS měření souřadnic projekčních center na výstupy z RPAS

Dostupnost RPAS vybavených GNSS senzorem, který je schopný fázového měření, je již běžnou záležitostí v profesionální fotogrammetrii. Přesnost určení polohy projekčních center dosahuje řádu centimetrů až jednoho decimetru. Požadavkem doby je minimalizovat práce v terénu a proto jsou testovány možnosti úplné, nebo alespoň částečné eliminace vlíčovacích bodů. Úplná eliminace vlíčovacích bodů by byla možná za předpokladu, že bude kamera kalibrována a bude zaručena stabilita prvků vnitřní orientace. Testy dokazují, že přesné určení polohy projekčních center je pro reverzní kalibraci a tím i dosažení přesnosti modelů nedostatečnou podmínkou [18, 19, 23, 43, 50, 51, 52]. Vzhledem k závislostem prvků vnitřní orientace, která je uvedena v kapitole 1.1.1, je třeba zajistit vhodné podmínky pro reverzní kalibraci kamery, aby bylo možné provést dostatečně přesnou orientaci snímků. Některé pokusy naznačují, že jeden vlíčovací bod umístěný ve středu snímkováného území je dostatečné omezení pro reverzní kalibraci kamery a tím je dosaženo požadované přesnosti orientace snímků [18, 43, 50, 51]. Dosažená přesnost obdržena na kontrolních

a kvalita ortofota byla výrazně nižší z důvodu barevných přechodů snímků.

1.4 Resumé vlivů působících na přesnost výstupů z RPAS

Z předchozích kapitol vyplývá, že prvky vnitřní orientace se mohou měnit dokonce i během jednoho snímkového letu. Ať už z důvodů časové nestability prvků vnitřní orientace a parametrů distorze objektivu, teplotní změny kamery a objektivu, či různých vzdáleností od snímkaného objektu, které mají vliv na průběh radiální distorze. Proto je vhodné využít reverzní kalibraci kamery i přes to, že se jedná podle literatury o nejméně vhodnou metodu kalibrace kamery [3]. Korelaci prvků vnitřní orientace lze ovlivnit vhodnou konfigurací sítě projekčních center snímků a zařazením šikmých snímků. Tím lze zároveň minimalizovat systematickou chybu fotogrammetrického modelu (průhyb modelu). Volba velikosti GSD by neměla být výrazně menší než přesnost zaměření vlíčovacích bodů, aby byla udržena požadovaná přesnost fotogrammetrického modelu. Velké překryty snímků obecně neznamenají výrazně vyšší přesnost modelu, neboť důležitým geometrickým kritériem je základnový poměr. Ukázalo se, že překryty snímků 60/60% jsou optimálním kompromisem. Snaha minimalizovat práce v terénu a nasazení RPAS osazených GNSS umožňující fázové měření vedou k myšlence odstranění vlíčovacích bodů z fotogrammetrického procesu. Ukázalo se, že je třeba alespoň jednoho vlíčovacího bodu umístěného ve středu snímkaného území. Optimální počet vlíčovacích bodů je pět, jejich rozmístění je ve standardním fotogrammetrickém rozložení ve snímkaném území. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost výstupů z RPAS jsou meteorologické podmínky při snímkovém letu. Je přirozené, že pokud bude snímkový let proveden ve zhoršeném počasí, tak obdržíme nekvalitní snímky a nepřesnost se projeví v celém fotogrammetrickém procesu.

Kapitola 2

Použité prostředky RPAS a kamerové vybavení pro sběr dat

Aby bylo možné otestovat výsledky aplikace algoritmů *DEAn* (kapitola 3) a *Korata* (kapitola 5) byl proveden vhodný výběr snímkových lokalit. Lokality se liší převážně v použitých kamerách a způsobu geolokace souřadnic projekčních center. Sběr dat byl proveden RPAS typu křídlo a jednalo se o systémy eBee a eBee Plus společnosti Sensefly. Testovaná data byla získána v průběhu studia během různých projektů od mapování archeologických lokalit, přes mapování území pro různé studie až po snímkování pro účely precizního zemědělství a sledování vývoje vegetace.

2.1 Popis a specifikace RPAS eBee

Použité systémy se od sebe liší zejména v použité GNSS aparatuře, velikostí a výdrží baterie. Systém eBee je vlnkovým letounem společnosti Sensefly, obrázek 5. Systém eBee je mnohem starší a méně robustní, než systém eBee Plus, ale i přes to najde i dnes široké uplatnění. Systém lze osadit nejrůznějšími kamerami, od kamer snímkových ve viditelném spektru, přes infračervené kamery, multispektrální kamery až po termální kameru. Díky této univerzálnosti je systém využíván pro mapování, precizní zemědělství, v lesnictví, ve výstavbě, v měření kubatur, dokumentace při živelných pohromách atd. Technické specifikace systému eBee jsou uvedeny v tabulce 4.



Obrázek 5: RPAS eBee.

Váha	0.69 kg
Rozpětí křídel	96 cm
Materiál	EPP pěna, karbonová kostra a kompozitní materiály
Napájení	11.1 V, 2150 mAh
Maximální doba letu	50 minut
Nominální rychlost	11-25 m/s
Dosah rádiového spojení	do 3 km
Maximální pokrytí území jedním letem GNSS	12 km ² (974 m AGL) kódové měření

Tabulka 4: Technické specifikace systému eBee.



Obrázek 6: RPAS eBee Plus.

Systém eBee Plus (obrázek 6), je vybaven RTK/PPK GNSS přijímačem, který umožňuje určit trajektorii letu a souřadnice projekčních center snímků s přesností několika centimetrů. Systém je schopen dodávat přesná data a rozšiřuje možnosti využití a zjednodušuje práci v terénu. Nevýhodou tohoto systému je, že RTK/PPK GNSS měření nelze využít pro multispektrální a termální kamery. Specifikace systému je uvedena v tabulce 5.

Váha	1.1 kg
Rozpětí křídel	110 cm
Materiál	EPP pěna, karbonová kostra a kompozitní materiály
Maximální doba letu	59 minut
Nominální rychlost	11-30 <i>m/s</i>
Dosah rádiového spojení	do 3 km
Maximální pokrytí území jedním letem	40 <i>km²</i> (2000 m AGL)
GNSS	RTK/PPK měření

Tabulka 5: Technické specifikace systému eBee Plus.

Kromě hardwarového vybavení (jako je samotné křídlo, radiomodem, ovladač atd.) je k systému dodáváno i softwarové vybavení. Softwarové vybavení umožňuje plánovat snímkovací mise, exportovat snímky s geotagem, exportovat seznamy souřadnic projekčních snímků atd.

2.2 Popis použitého kamerového vybavení

K eBee a eBee Plus systémům jsou dodávány kamery snímající ve viditelném spektru, v blízkém infračerveném spektru, multispektrální kamery a termální kamera. Technické specifikace použitých kamer jsou uvedeny v tabulce 6.

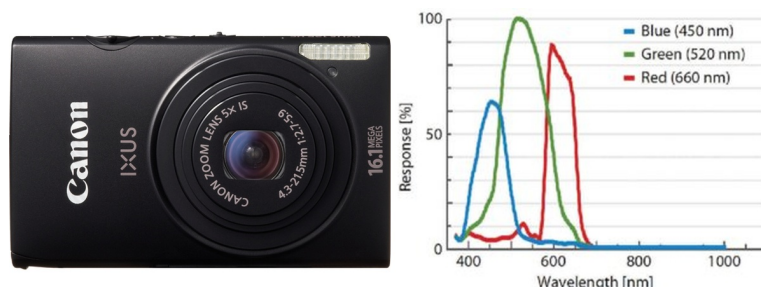
Kamera	Rozlišení [MPix]	Rozměr senzoru [mm]	Velikost detektoru [μ m]	GSD ve 100 AGL [cm]
S.O.D.A.	20	12.75×8.5	2.33	2.4
multiSPEC 4C	4×1.2	4.8×3.6	3.75	10.5
Sequoia	4×1.2/1×16	4.8×3.6/6.16×4.62	3.75/1.34	9.4/2.7
thermoMAP	0.3	10.88×8.70	17	18.9
Canon S110NIR	12.1	7.44×5.58	1.86	3.5
canon IXUS 127 HS	16.1	6.16×4.62	1.33	3.1
Canon ELPH 110 HS	16.1	6.16×4.62	1.33	3.1

Tabulka 6: Technické specifikace použitých kamer.

2.2.1 Kamery snímající ve viditelném spektru

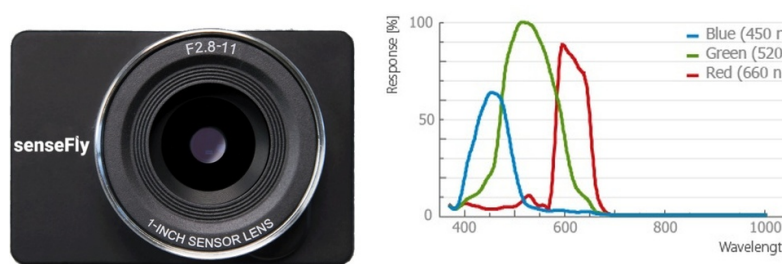
V projektech byly využity dvě kamery snímající ve viditelném spektru. První kamera je Canon IXUS 127 HS. Jedná se o standardní upravenou kompaktní kameru. Během práce s kamerou bylo zjištěno, že kamera při snímování přestřuje a že data z této kamery jsou velmi často rozmazaná i za

poměrně malých větrných podmínkách. Kamera vyžaduje slunečné počasí, aby kvalita obrazových dat byla uspokojivá pro další fotogrammetrické využití. Kamera se svými spektrálními křivkami je uvedena na obrázku 7.



Obrázek 7: Kamera Canon IXUS 127 HS se spektrálními křivkami.

Kamera S.O.D.A. je vytvořena pro aplikaci na systémech RPAS. Kamera se svými spektrálními křivkami je uvedena na obrázku 8. Kamera poskytuje mnohem kvalitnější obrazová data.



Obrázek 8: Kamera S.O.D.A. se spektrálními křivkami.

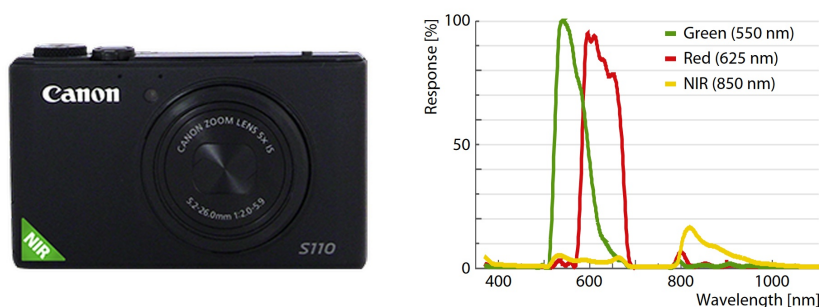
2.2.2 Kamery snímající v blízkém infračerveném spektru



Obrázek 9: Kamera Canon PowerShot ELPH 110 HS se spektrálními křivkami.

V uvedených projektech byly použity dvě kamery snímající v blízkém infračerveném spektru. Starší kamerou je Canon PowerShot EPLH 110 HS. Je to upravená standardní kompaktní kamera. Kamera a její spektrální křivky jsou zobrazeny na obrázku 9.

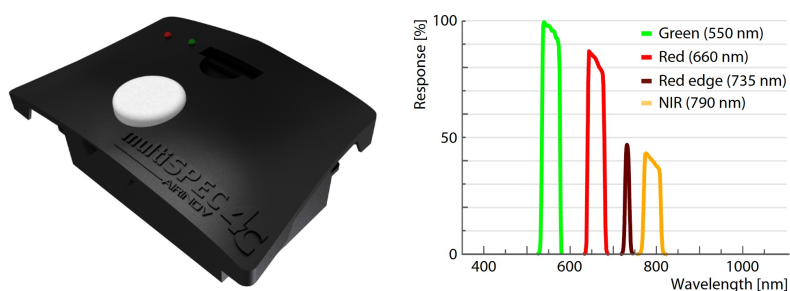
Druhou kamerou je Canon S110 NIR. Je to upravená standardní kompaktní kamera. Kamera a její spektrální křivky jsou uvedeny na obrázku 10.



Obrázek 10: Kamera Canon S110 se spektrálními křivkami.

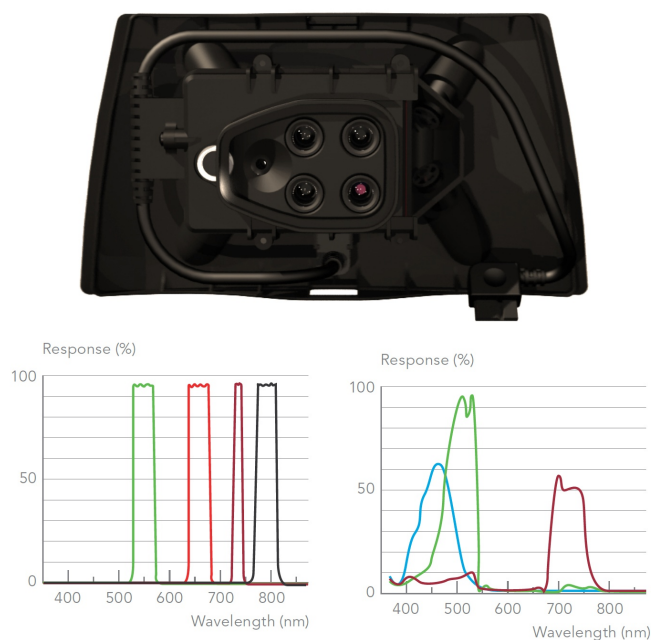
2.2.3 Multispektrální kamery

Ke snímkování vyhodnocovaných území byly použity dvě multispektrální kamery. Kamera multiSPEC 4C je čtyř kanálová multispektrální kamera snímající v zeleném pásmu, červeném pásmu, na hraně červeného pásma a v blízkém infra červeném pásmu. Každý kanál je vybaven vlastním objektivem. Kamera je vybavena spektrálním senzorem slunečního svitu. Kamera se svými spektrálními křivkami je uvedena na obrázku 11.



Obrázek 11: Kamera multiSPEC 4C se spektrálními křivkami.

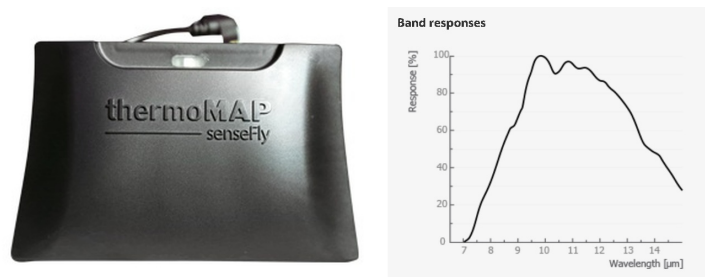
Druhou použitou multispektrální kamerou je Sequoia. Kamera se skládá z kamery snímající ve viditelném spektru a multispektrální kamery. Multispektrální kamera snímá ve čtyřech kanálech, v zeleném pásmu, červeném pásmu, na hraně červeného pásma a v blízkém infra červeném pásmu. Každý kanál multispektrální kamery je vybaven vlastním objektivem. Kamera je vybavena spektrálním senzorem slunečního svitu. Multispektrální kamera a kamera snímající ve viditelném spektru jsou spolu se svými spektrálními křivkami uvedeny na obrázku 12.



Obrázek 12: Kamera Sequoia se spektrálními křivkami.

2.2.4 Termální kamera

Kamera thermoMAP byla využita k termálnímu snímkování zpracovaných projektů. Kamera provádí test tepelné stability systému před snímkováním i během snímkování RPAS. Termální kamera snímá rozsah teplot od -40°C do $+160^{\circ}\text{C}$ s rozlišením 0.1°C . Kamera je se svou spektrální křivkou uvedena na obrázku 13.



Obrázek 13: Termální kamera thermoMAP se spektrální křivkou.

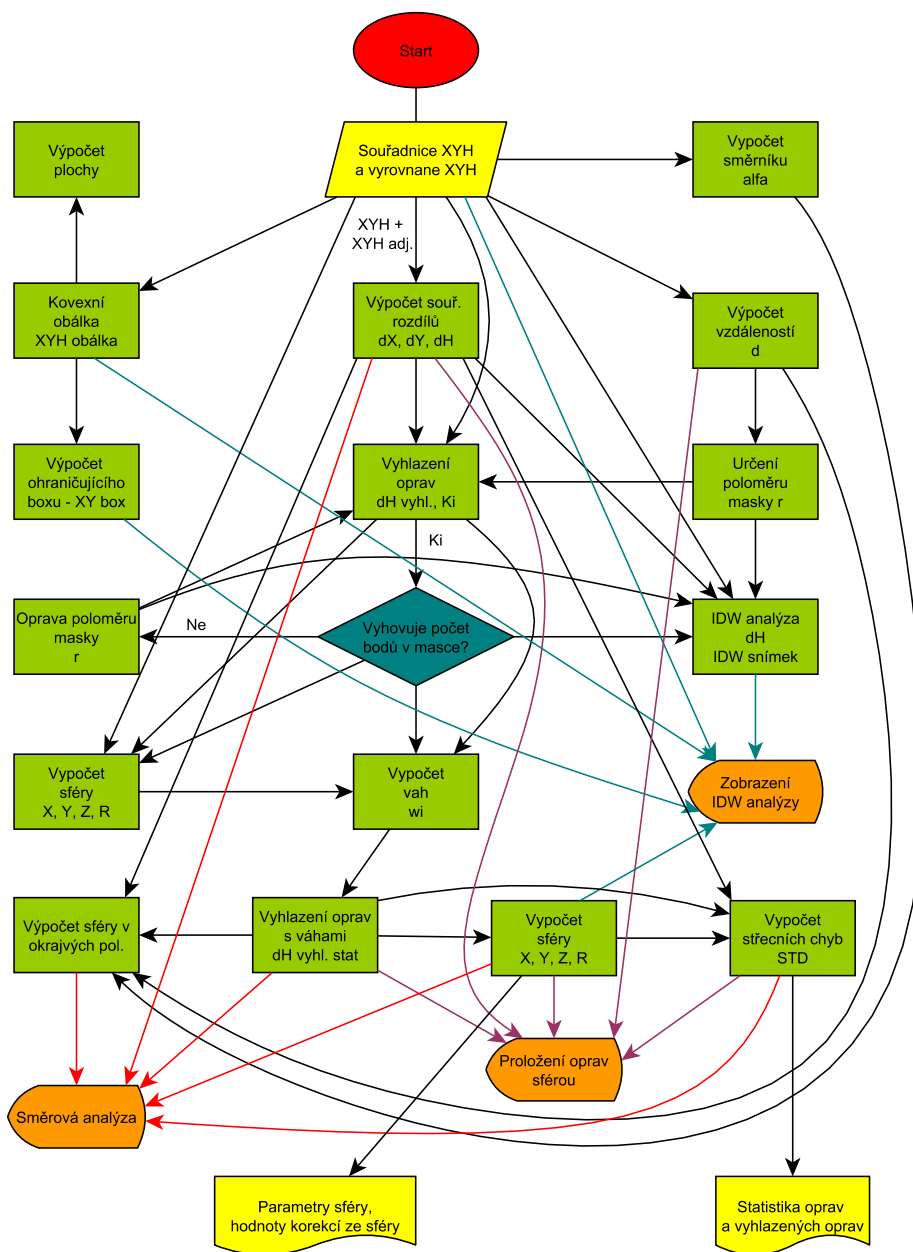
Kapitola 3

Algoritmus DEAn - analýza průhybu fotogrammetrického modelu

Pro potřeby studování systematických chyb fotogrammetrických modelů byl vytvořen algoritmus *DEAn* (*Dome Error Analysis*). Vliv systematických chyb se projeví při svazkovém vyrovnání bez použití vlícovacích bodů, více o této systematické chybě je uvedeno v kapitole 1.1.3. Algoritmus *DEAn* je primárně vytvořen pro modely, kde jsou snímky pořízeny pro účely mapování, tj. snímky jsou orientovány do snímkového nadíru. Hlavní myšlenka pro vytvoření tohoto nástroje je, že pokud jsou snímky zatíženy systematickou chybou z nedostatečně přesného určení prvků vnitřní a vnější orientace (souřadnic projekčních center), projeví se tento efekt, jak v prvcích vnitřní orientace, tak v prvcích vnější orientace v důsledku jejich velmi vysoké korelace, která je popsána v kapitole 1.1.2.

Algoritmus *DEAn* se zaměřuje na vyhodnocení výškové komponenty oprav souřadnic projekčních center, která je nejvíce ovlivněna systematickou chybou (deformací fotogrammetrického modelu) pro případ orientace snímků do nadíru. *DEAn* produkuje tyto výstupy:

- IDW (*Inverse Distance Weighting*) analýza oprav výškové souřadnice projekčních center – graf,
- analýza proložení sférou vyhlazených výškových oprav souřadnic projekčních center – graf,
- směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center – graf,



Obrázek 14: Schéma algoritmu DEAn.

3.1.1 Vyhlazení oprav

Vyhlazení oprav je závislé na odhadu parametrů sféry a probíhá ve dvou výpočtech. V prvním výpočtu je určena vyhlazená oprava prostým průměrem, dle vhodnosti volby vah uvedených v tabulce 8. Druhé vyhlazení oprav využívá k výpočtu váhy a obsahuje několik kroků. Do výpočtu vstupují váhy ze statistického vyhodnocení velikosti oprav vztahených ke sféře. Váha je popsána v kapitole 3.1.2. Vyhlazená oprava je vypočtena jako vážený průměr. Následně jsou určeny odchylky od průměru a nový průměr je určen dle vzorce 1. Vzorec kombinuje váhu ze statistického vyhodnocení velikosti oprav vztahených ke sféře a váhu nepřímo úměrně závislou velikosti absolutní hodnoty odchylky od průměru ve filtrační masce.

$$v_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{H(i)} \times w_{stat(i)} \times \frac{1}{v_{x(i)}}}{w_{stat(i)} \times \frac{1}{v_{x(i)}}} \quad (1)$$

Proměnná v_{ϕ} je vážený průměr opravy, $v_{H(i)}$ je oprava výšky projekčního centra, $w_{stat(i)}$ je statistická váha a $v_{x(i)}$ je oprava od průměru.

Během vývoje algoritmu *DEAn* byly testovány různé typy vah. Jednalo se o váhy, které závisely na vzdálenosti projekčního centra od středu filtrační masky a váhy závislé na velikosti odchylky od průměru při výpočtu váženého průměru ve filtrační masce. Mezi testované váhy, které závisely na vzdálenosti projekčního centra od středu filtrační masky, patřily váhy $\frac{1}{d}$, $\frac{1}{d^2}$, kde d je vzdálenost od středu filtrační masky, a váha uvedená ve vzorci 2. Váhy závislé na velikosti odchylky od průměru byly $\frac{1}{v}$ a $\frac{1}{v^2}$, kde v je odchylka od průměru ve filtrační masce.

$$w_i = \begin{cases} \frac{1 + \cos(\frac{r_i}{r_0} \times \pi)}{2}, & r_i \leq r_0 \\ 0, & r_i > r_0 \end{cases} \quad (2)$$

Hodnota r_i je vzdálenost od středu filtrační masky a r_0 je poloměr filtrační masky.

Aby byla ověřena vhodná volba vah, bylo vytvořeno syntetické pole dat. Body pole byly vygenerovány na povrchu sféry, tak že střed sféry je ztotožněn se středem pole dat. Výška vrchlíku byla definována na 3 m a v krajním bodě

byla výška vrchlíku 0. Rozměr pole byl ± 1000 m pro souřadnici X a Y. Krok pole byl stanoven na 25 m. Každému bodu pole byla vygenerována chyba z normálního rozdělení se střední hodnotou 0 a směrodatnou odchylkou 1 m. Následně byla data vyhlazena dle typu váhy, zdrojová data byla totožná pro všechny testované typy vah. Vyhlazenými hodnotami byla proložena sféra. Šum v datech byl vygenerován celkem 10 krát, pro eliminaci nahodilých výsledků.

	Vyhlazená data			Vstupní data			Parametry sféry			
	σ_v [m]	ϕ_v [m]	Σ_v [m]	σ_v [m]	ϕ_v [m]	Σ_v [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	R [m]
Výchozí sf.	0.165	0.019	865.8	1.003	0.016	5260.4	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.163	-0.001	854.2	1.003	-0.004	5259.9	9.3	5.1	-332693.2	332696.3
Δ	0.002	0.020	11.6	0.000	0.020	0.420	-9.3	-5.1	-638.6	638.6
Výchozí sf.	0.190	0.019	996.5	1.012	0.015	5302.6	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.196	-0.047	1037.3	1.013	-0.052	5312.2	11.6	-11.6	-327926.7	327929.8
Δ	-0.006	0.066	-40.8	-0.001	0.066	-9.602	-11.6	11.6	-5405.1	5405.1
Výchozí sf.	0.175	0.010	905.7	1.003	0.009	5222.4	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.174	0.007	902.5	1.003	0.005	5220.1	-15.8	5.8	-332349.9	332352.9
Δ	0.001	0.004	3.2	0.000	0.004	2.320	15.8	-5.8	-981.9	981.9
Výchozí sf.	0.175	0.002	911.4	1.008	-0.002	5299.9	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.174	0.021	908.7	1.008	0.017	5304.0	-7.8	11.9	-346309.6	346312.6
Δ	0.001	-0.019	2.7	0.000	-0.019	-4.125	7.8	-11.9	12977.8	-12977.7
Výchozí sf.	0.167	-0.010	868.2	1.000	-0.013	5245.9	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.166	-0.006	864.6	1.000	-0.009	5245.6	2.3	-4.6	-333335.6	333338.6
Δ	0.001	-0.004	3.6	0.000	-0.004	0.283	-2.3	4.6	3.8	-3.8
Výchozí sf.	0.178	-0.005	939.3	1.023	-0.007	5346.1	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.180	-0.009	945.7	1.023	-0.010	5348.4	-10.2	-12.7	-325966.7	325969.8
Δ	-0.002	0.003	-6.4	0.000	0.003	-2.301	10.2	12.7	-7365.1	7365.1
Výchozí sf.	0.160	0.005	834.4	0.998	0.002	5216.5	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.161	0.026	845.2	0.998	0.023	5217.5	-0.6	-10.0	-338244.2	338247.2
Δ	-0.001	-0.021	-10.8	0.000	-0.021	-0.930	0.6	10.0	4912.4	-4912.4
Výchozí sf.	0.167	-0.012	871.5	0.999	-0.014	5236.5	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.167	0.005	867.4	0.999	0.003	5237.7	7.7	-5.6	-333164.1	333167.1
Δ	0.000	-0.017	4.1	0.000	-0.017	-1.207	-7.7	5.6	-167.7	167.7
Výchozí sf.	0.163	0.010	854.7	0.996	0.007	5194.6	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.164	-0.026	863.9	0.996	-0.029	5193.0	4.8	-0.2	-335267.9	335270.9
Δ	-0.001	0.036	-9.2	0.000	0.036	1.570	-4.8	0.2	1936.0	-1936.1
Výchozí sf.	0.155	0.010	809.2	1.000	0.007	5246.4	0.0	0.0	-333331.8	333334.8
Odhad sf.	0.155	0.008	807.1	0.999	0.005	5245.8	-0.8	2.6	-330160.4	330163.4
Δ	0.000	0.002	2.1	0.000	0.002	0.552	0.8	-2.6	-3171.4	3171.4
$\Sigma\Delta$	-0.005	0.071	-39.9	-0.001	0.071	-13.0	-0.4	19.3	2100.1	-2100.2
$\Sigma \Delta $	0.014	0.193	94.4	0.002	0.193	23.3	70.8	70.2	37559.8	37559.6
$\phi\Delta$	0.000	0.007	-4.0	0.000	0.007	-1.3	0.0	1.9	210.0	-210.0
$\sigma\Delta$	0.002	0.026	13.9	0.000	0.026	3.3	8.5	7.9	5392.4	5392.4

Tabulka 7: Hodnocení dosažené přesnosti odhadu parametrů sféry pro prostý průměr.

Tabulka 7 uvádí porovnávané hodnoty pro 10 generovaných hodnot šumu v syntetických datech. V řádku nadepsaném *Výchozí sféra* je výpočet vztažen k výchozím parametrům sféry, tedy ke sféře s výškou vrchlíku 3 m ve středu

pole a výškou 0 v rohu území. V řádku označeném *Odhad sféry* je výpočet vztážen k vypočteným parametrům sféry. Parametry sféry jsou vždy uvedeny na konci příslušného řádku. Sloupec *Vyhlazená data* porovnává statistické hodnoty pro vyhlazené opravy dle příslušné váhy. Sloupec *Vstupní data* porovnává zašuměná data normálním rozdělením. Řádek Δ je rozdílem předchozích dvou řádků a zkoumá rozdíly mezi vstupními daty a daty z odhadu sféry. V tomto řádku na konci je přímo viditelná odchylka v odhadu poloměru sféry. To bylo jedno z hlavních hodnotících kritérií pro volbu váhy v tabulce 8. Na konci tabulky 7 je uvedeno statistické vyhodnocení rozdílů mezi vstupními daty sféry a odhadem sféry.

Typ váhy	Vyhlazená data			Vstupní data			Parametry sféry			
	σ_v [m]	ϕ_v [m]	Σ_v [m]	σ_v [m]	ϕ_v [m]	Σ_v [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	R [m]
$\Sigma\Delta$	-0.005	0.071	-39.9	-0.001	0.071	-13.0	-0.4	19.3	2100.1	-2100.2
$\Sigma \Delta $	0.014	0.193	94.4	0.002	0.193	23.3	70.8	70.2	37559.8	37559.6
$\phi\Delta$	0.000	0.007	-4.0	0.000	0.007	-1.3	0.0	1.9	210.0	-210.0
$\sigma\Delta$	0.002	0.026	13.9	0.000	0.026	3.3	8.5	7.9	5392.4	5392.4
$\Sigma\Delta$	-0.031	-0.023	-148.6	-0.006	-0.023	-37.8	-1.9	19.6	-138534.1	138533.7
$\Sigma \Delta $	0.031	0.180	148.6	0.006	0.180	42.2	69.5	73.5	138534.1	138533.7
$\phi\Delta$	-0.003	-0.002	-14.9	-0.001	-0.002	-3.8	-0.2	2.0	-13853.4	13853.4
$\sigma\Delta$	0.002	0.022	9.7	0.000	0.022	4.0	8.5	8.1	4348.8	4348.8
$\Sigma\Delta$	-0.003	0.066	-23.5	0.000	0.066	-1.6	-8.4	8.4	-23659.4	23659.2
$\Sigma \Delta $	0.009	0.157	66.1	0.002	0.157	15.5	81.7	72.3	46914.9	46914.7
$\phi\Delta$	0.000	0.007	-2.3	0.000	0.007	-0.2	-0.8	0.8	-2365.9	2365.9
$\sigma\Delta$	0.001	0.020	10.5	0.000	0.020	2.1	10.6	8.0	5749.8	5749.8
SD_i	-0.010	0.069	-52.5	-0.002	0.069	-4.2	-3.7	12.7	-56581.5	56581.2
$\Sigma \Delta $	0.013	0.146	73.2	0.002	0.146	12.1	93.9	72.4	72800.3	72800.0
$\phi\Delta$	-0.001	0.007	-5.2	0.000	0.007	-0.4	-0.4	1.3	-5658.1	5658.1
$\sigma\Delta$	0.001	0.018	9.6	0.000	0.018	1.6	12.5	8.2	6393.9	6393.8

Tabulka 8: Porovnání vlivu vah na vyhlazený průměr a na odhad sféry.

Hodnota ϕ je prostý průměr, \cos je funkce dle vzorce 2 a v je oprava od

průměru.

Tabulka 8 zkoumá statistické vyhodnocení rozdílů pro různé váhy. Do tabulky byly vybrány slibné váhy. Výjimku tvoří váha dle vzorce 2. Ta byla vybrána na ukázkou, jako zástupce vah, které jsou závislé vzdálenosti projekčního centra od středu filtrační masky. Z tabulky vyplývá, že prostý průměr nejlépe odhaduje poloměr sféry, to je také jedno z hlavních kritérií pro výběr váhy. Další vhodnou volbou je váha nepřímo úměrná absolutní hodnotě velikosti odchylky od průměru $\frac{1}{v}$. Proto byl prostý průměr použit pro výpočet vyhlazených vah v prvním kroku algoritmu a vážený průměr, kde váha je nepřímo úměrná absolutní hodnotě velikosti odchylky od průměru, pro výpočet konečných vyhlazených oprav (spolu se statistickou vahou oprav).

■ 3.1.2 Statistická váha oprav

Statistická váha oprav byla zavedena, jako nástroj eliminující vliv statisticky vysoké hodnoty opravy. Vysoké hodnoty oprav mohou být obdrženy v důsledku špatného GNSS signálu, či malého počtu zachycených družic (to může nastat bezprostředně po startu RPAS). Významné zhoršení kvality GNSS signálu je vázáno na změnu ionosférické refrakce pro GNSS signál. To lze detekovat, např. pomocí *K-indexu* solární aktivity. Pokud by podobná situace nastala během letu, je zde právě statistická váha oprav, která sníží vliv chybných měření v důsledku tohoto jevu. Statistická váha je uvedena ve vzorci 3, kde v_{sf} je vyhlazená oprava vztahovaná ke sféře a σ je střední chyba oprav vztahovaných ke sféře.

$$w_i = \begin{cases} \frac{\sigma}{|v_{sf}|}, & v_{sf} > 2 \times \sigma \\ 1, & v_{sf} \leq 2 \times \sigma \end{cases} \quad (3)$$

■ 3.1.3 Odhad parametrů sféry

Aby bylo možné správně odhadnout parametry sféry, je třeba vypočítat váhy jednotlivých projekčních center snímků. Váha musí být citlivá na počet projekčních center snímků nacházejících se v těsné blízkosti středu území je výrazně menší, než počet snímků v následujících částech území. Pokud budou projekční centra snímků rovnoměrně rozložena po území, lze hledat analogii s plochou mezikruží. Území je rozděleno do zón o konstantním kroku

směrem od středu území. Krok je definován jako poloměr filtrační masky. Zároveň má být počet zón větší než šest, pro přesnější odhad křivky vah. Pokud je počet zón menší, zmenší se krok. Pro každou zónu je určen počet projekčních center spadajících do příslušné zóny N_{Zi} . Následně je vypočtena váha zóny jako převrácená hodnota N_{Zi} . Odhad vah je bodový a aby na hranici zón nebyl skok mezi váhami, je váhami proložena spline křivka. Tím je docíleno plynulého přechodu mezi zónami a váha bodů v těsné blízkosti středu území (levá okrajová hodnota vah) je také vyšší, než ve středových částech území. Váha se také zvýší na okraji území (pravá okrajová hodnota vah). Aby tento jev na okraji území byl potlačen, vstupuje do odhadu parametrů sféry další váha. Tato váha je rovna počtu projekčních center vstupujících do filtrační masky. Projekční centra na okraji území tím obdrží menší váhu. Odhad parametrů sféry je ve dvou krocích. Parametry sféry jsou odhadnuty lineárně dle modelu uvedeného v rovnici 4, zdroj [53].

$$x^2 + y^2 + z^2 = \begin{bmatrix} 2 \times x & 2 \times y & 2 \times z & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ R^2 - x_o^2 - y_o^2 - z_o^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hodnoty x, y, z jsou vyrovnané souřadnice sféry, x_o, y_o, z_o jsou souřadnice středu sféry a R je poloměr sféry.

Následně jsou odhady parametrů sféry iteračně zpřesněny. Je minimalizována vzdálenost mezi projekčním centrem a sférou ve směru průvodiče, jak je uvedeno v rovnici 5. Pokud je poloměr sféry větší než 500 km, jsou nastaveny souřadnice středu sféry X a Y jako souřadnice X a Y těžiště projekčních center. Vyrovnání MNC produkuje matici plánu, která má vysokou lineární závislost jednotlivých vektorů. Z tohoto důvodu je při výpočtu využívána pseudoinverze.

$$\sqrt{R^2 - (x - x_o)^2 - (y - y_o)^2 - (z - z_o)^2} \rightarrow \min \quad (5)$$

3.1.4 Výpočty středních chyb

Během zpracování dat bylo nutné rozlišovat různé střední chyby oprav souřadnic projekčních center. Střední chyba oprav souřadnic projekčních

center je klasický výpočet střední chyby vztažený k průměrné opravě souřadnic projekčních center. Protože průměrná oprava není vždy zcela nulová, byla zavedena střední chyba oprav souřadnic projekčních center vztažená k nule. Tato střední chyba je vypočtena přímo z velikosti oprav souřadnic projekčních center. *DEAn* sleduje pokles středních chyb, pokud jsou vztaženy ke sféře, jak je uvedeno v tabulce 9. Střední chyba vztažená ke sféře vznikne z oprav souřadnic projekčních center, od kterých je odečtena hodnota výšky sféry (výška je vztažena k nulové hladině oprav) pro danou opravu výšky souřadnic projekčního centra. Na obrázku 16 je tato oprava vzdálenost bodu v ose y od sféry, která je znázorněna červenou barvou.

3.1.5 IDW analýza území

Z obálky území je určen krok pro IDW analýzu. Krok je volen takový, že krok dělí maximální hranu ohraničujícího obdélníku na 100 až 200 dílů (pixelů). Pokud není vyhověno této podmínce, krok se upraví. *DEAn* určí minimální a maximální hodnotu pro souřadnice X a Y. Hodnota buňky IDW analýzy je vypočtena, pokud buňka leží uvnitř ohraničujícího obdélníku s maximálním přesahem jednoho násobku kroku. Samotný výpočet hodnoty buňky je proveden upravenými Shepardovými váhami [54]. Úprava spočívá v omezení vzdálenosti na poloměr filtrační masky a omezením maximální hodnoty váhy na 1. Rovnice 6 je funkce pro výpočet vah IDW analýzy.

$$w_i = \sqrt{\frac{\max(0, r - d_i)}{\max(r, r \times d_i)}} \quad (6)$$

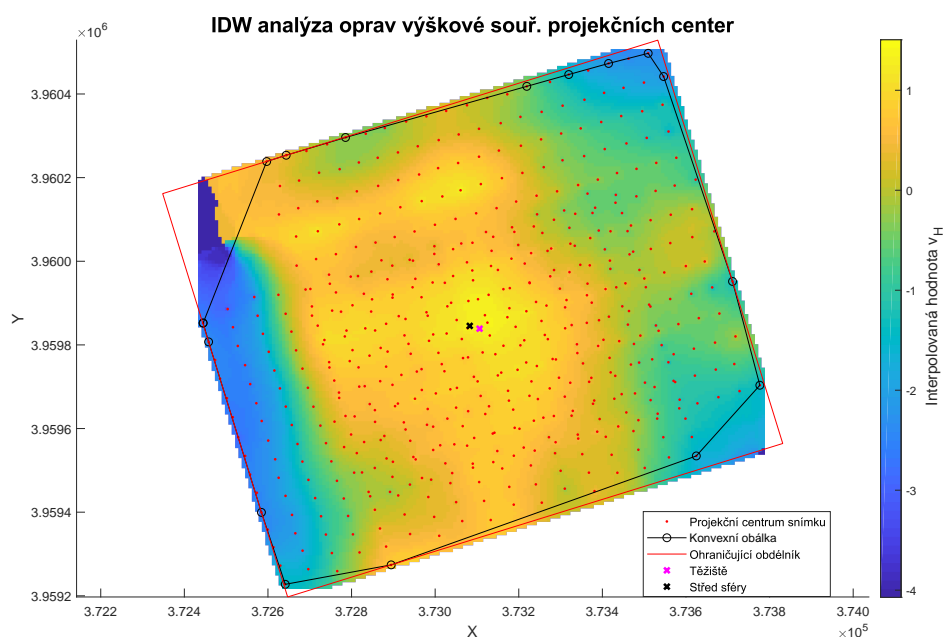
Proměnná w_i je váha, r je poloměr filtrační masky a d_i je vzdálenost k projekčnímu centru od středu filtrační masky.

3.2 Popis výstupů algoritmu DEAn

V této části jsou popsány výstupy algoritmu *DEAn* na archeologickém nalezišti Makhmur al-Qadima, podrobnější informace o území jsou uvedeny v příloze A.1. Území bylo snímkováno bez použití vlíčovacích bodů. V tomto příkladu je použita pouze kamera snímající ve viditelném spektru. Území bylo navíc snímkováno NIR kamerou, kamera má červený kanál vyměněný za kanál pořizující data v blízkém infračerveném spektru.

Cílem algoritmu je popsat působení systematické chyby (*dome error*), která působí při orientaci snímků. Tato systematická chyba je dále dělena na středově symetrickou část a zbytkovou část systematické chyby.

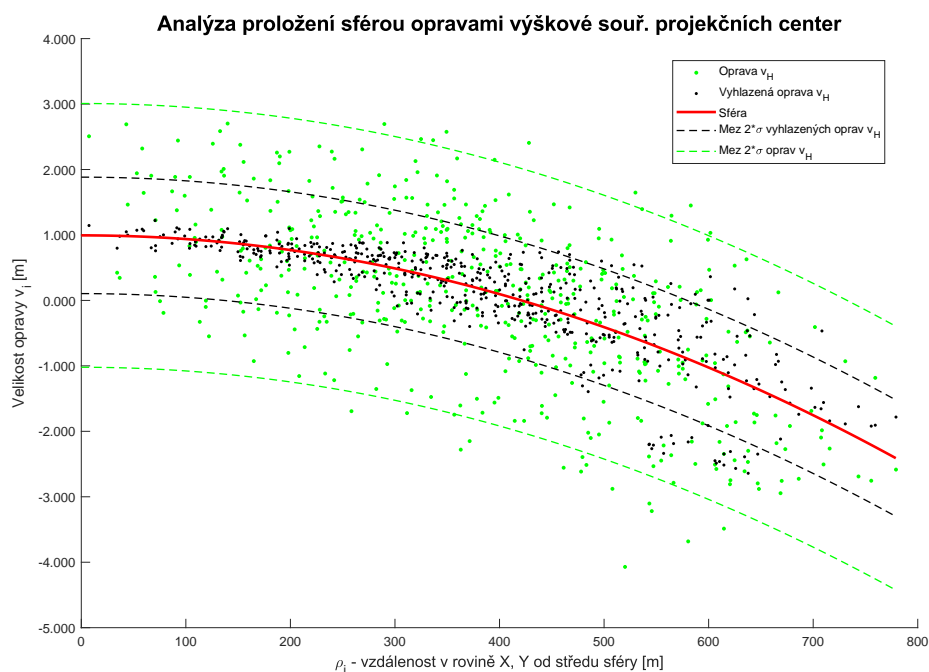
3.2.1 IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center



Obrázek 15: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro území Makmur al-Qadima.

Výstup je grafický a zobrazuje rozložení průměrné opravy výškové souřadnice projekčních center. IDW analýza dává prvotní informaci o působení systematických chyb při orientaci snímků a reverzní kalibraci kamery. IDW analýza je zobrazena hypsometricky. Pokud v modelu působí systematická chyba, je ve středové části modelu znaménko opačné, než v okrajové části modelu. Působení systematické chyby je patrné z obrázku 15. Kromě IDW analýzy oprav výškové souřadnice je v obrázku 15 zobrazena obálka oblasti spolu s ohraničujícím obdélníkem. Dále je v obrázku zobrazena poloha těžiště souřadnic projekčních center snímků a poloha středu proložené sféry. Pokud je střed sféry blízko těžiště souřadnic projekčních center snímků, pak je proložení sférou uspokojující aproximací systematické chyby modelu. K výraznému posunu středu sféry od těžiště souřadnic projekčních center snímků může dojít, pokud působení systematické chyby v modelu je minimální, nebo pokud je systematická chyba rozložena jinak než rotačně symetricky, jak je například uvedeno na obrázku 34.

3.2.2 Analýza proložení sférou vyhlazených oprav výškových souřadnic projekčních center



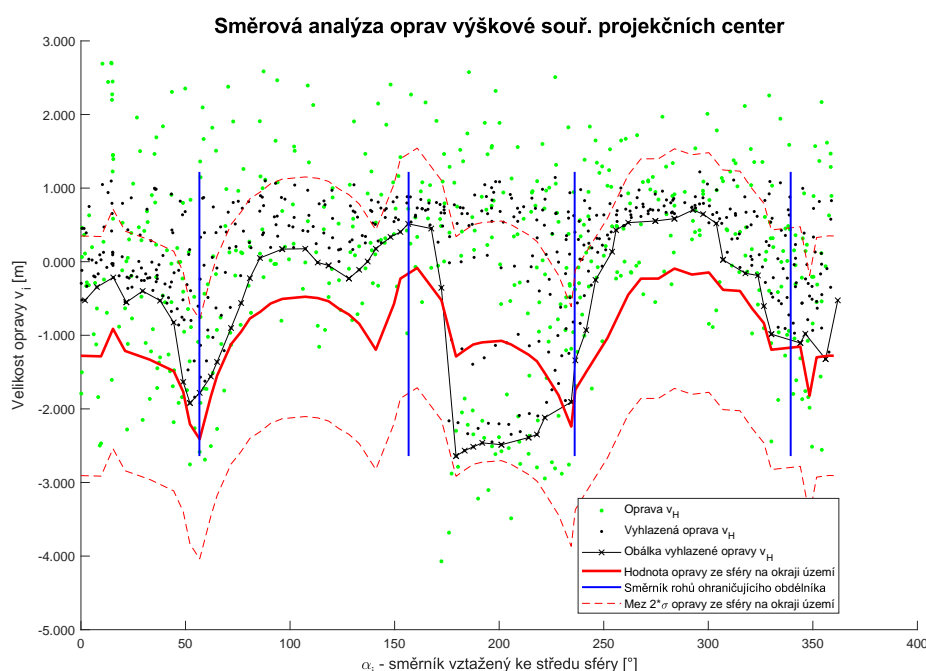
Obrázek 16: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro území Makhmur al-Qadima.

Tato část analýzy je hlavním výstupem, který nejlépe zachycuje vliv středově symetrické části systematické chyby. Z obrázku 16 je patrné, že pro zvolené území je hodnota systematické chyby poblíž středu sféry přibližně $+1\text{ m}$ a v nejbližších oblastech přesahuje hodnota systematické chyby -2 m . Zároveň je z obrázku zřejmé, že v krajních oblastech působily další neurčené vlivy, které způsobily poměrně vysoký rozptyl hodnot od proložení sféry. Vyšší rozptyl má také za následek vyšší meze $2 \times \sigma$ pro vyhlazené opravy. V okrajových partiích modelu je větší rozptyl očekávatelnější, ale obvykle nedosahuje až takových hodnot, jak dokazuje např. obrázek 41.

3.2.3 Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center

Úkolem této části algoritmu *DEAn* je zjistit, zda se na okraji modelu v určitém směru vyskytuje vyšší rozptyl oprav a vyhlazených oprav výškové souřadnice projekčních center. Ukázka směrové analýzy je na obrázku 17. Obálka vyhlazených oprav by měla být co nejblíže hodnotě opravy ze sféry. Výraznější odchylky jsou důkazem působení výše neurčeného vlivu v daném

směru. Z této směrové analýzy je zřejmé, že model je zatížen dále neurčenou chybou pro interval směrnicku $\alpha = \langle 170^\circ, 240^\circ \rangle$, vyhlazené opravy se zde významněji odchyľují od hodnoty opravy ze sféry na okraji modelu. K této analýze je třeba vždy uvažovat tvar snímkaného území, který má na výsledek analýzy výrazný vliv. Pokud je tvar snímkaného území ve tvaru písmene „L“, jako je i tento případ, pak v liniích ohraničujícího obdélníku nebudou lokální minima obálky vyhlazených oprav. Tato lokální minima je možné vidět na obrázku 17 pro směrnicku 50° a 340° . Lokální minimum zcela chybí pro směrnicku 150° a lokální minimum pro směrnicku 240° je deformované. Právě tato deformace pro interval $\langle 170^\circ, 240^\circ \rangle$ odpovídá deformaci modelu v IDW analýze v obrázku 15 v levé (východní) části modelu, kde je poměrně výrazný přechod (zlom) posledních tří řad do modrých odstínů.



Obrázek 17: Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro území Makhmur al-Qadima.

3.2.4 Tabulkové výstupy pro opravy výškové souřadnice projekčních center

DEAn produkuje kromě grafických výstupů také tabulkové výstupy pro opravy výškové souřadnice projekčních center. Nejvíce vypovídajícím tabulkovým výstupem popisujícím působení rotačně symetrické systematické chyby na opravy výškových souřadnic projekčních center, je tabulka 9. V tabulce jsou uvedeny hodnoty středních chyb oprav výškových souřadnic projekčních center, pro opravy obdržené po svazkovém vyrovnání, opravy korigované

o vliv rotačně symetrické systematické chyby (sféry), vyhlazené opravy a vyhlazené opravy korigované o vliv rotačně symetrické systematické chyby (sféry). Z tabulky 9 je patrné, že působení této rotačně symetrické systematické chyby (sféry) má nezanedbatelný dopad na střední chyby oprav výškové souřadnice projekčních center. V tomto ukázkovém případě je možný pokles střední chyby oprav výškové souřadnice projekčních center o cca 22%. Pro vyhlazené opravy výškové souřadnice projekčních center je očekávaný pokles výrazně větší, okolo 46%.

Statistika území	ϕ [m]	σ [m]	σ k 0 [m]
Oprava v_H	0.041	1.282	1.281
Oprava v_H vztažená ke sféře	0.002	1.004	1.003
Δ	0.039	0.278	0.279
Vyhlazená oprava v_H	0.072	0.810	0.812
Vyhlazená oprava v_H vztažená ke sféře	0.033	0.438	0.439
Δ	0.039	0.372	0.373

Tabulka 9: Statistické vyhodnocení vlivu rotačně symetrické systematické chyby (sféry) na střední chyby oprav výškových souřadnic projekčních center.

Hodnota ϕ je průměr, σ je střední chyba a σ k 0 je střední chyba vypočtená přímo z velikosti oprav, tj. vztažená k 0.

V tabulce 10 jsou uvedeny parametry sféry. Poloměr sféry je velmi velký, téměř 90 km. Z toho také plyne, že studium vlivu sféry na souřadnice X a Y, nemá valný význam, neboť oprava ze zakřivení sféry je zanedbatelná vzhledem k tomu, že střední chyby oprav souřadnic X a Y jsou větší jak 0.5 m. V tomto případě je posun v rovině XY menší než 10.8 mm (výpočet je pro vzdálenost 800 m s poloměrem sféry uvedeným v tabulce 10).

X [m]	Y [m]	Z [m]	R [m]
373081.945	3959844.826	-88950.029	88951.024

Tabulka 10: Parametry vypočtené sféry.

Tabulka 11 uvádí posun těžiště souřadnic projekčních center od středu sféry v rovině XY.

ΔX [m]	ΔY [m]
24.332	-6.086

Tabulka 11: Posun těžiště souřadnic projekčních center od středu sféry.

Tabulka 12 uvádí hodnoty maximální a minimální korekce výškové opravy ze sféry. Maximální hodnota korekce je uvedena pro nulovou vzdálenost od středu sféry v rovině XY. Minimální hodnota korekce je uvedena pro maximální vzdálenost projekčního centra od středu sféry v rovině XY.

Maximální hodnota korekce [m]	Minimální hodnota korekce [m]
0.996	-2.534

Tabulka 12: Hodnoty korekcí výškové opravy ze sféry.

3.2.5 Statistika počtu bodů ve filtrační masce

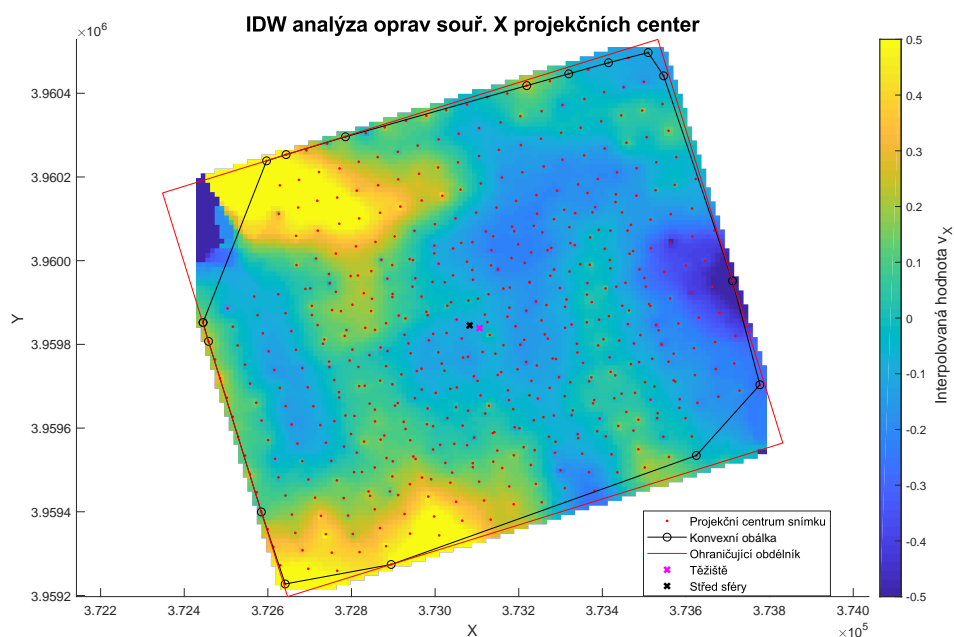
Statistika počtu bodů ve filtrační masce je uvedena v tabulce 13. Tabulka udává průměrný počet souřadnic projekčních center vstupujících do výpočtu vyhlazených oprav. Dále je uvedena střední chyba počtu souřadnic projekčních center vstupujících do výpočtu vyhlazených oprav a modus počtu souřadnic projekčních center vstupujících do výpočtu vyhlazených oprav. *DEAn* je nastaven tak, aby průměrná hodnota počtu souřadnic projekčních center vstupujících do výpočtu vyhlazených oprav byla okolo hodnoty 31, dle kapitoly 4.1.2, tabulky 19. Větší rozdíl mezi průměrnou hodnotou a modem je způsoben konfigurací snímkového letu. Část území je překryta dvojnásobně oproti okrajovým částem území. To je patrné na obrázku 15. Stejně tak o nehomogenitě náletu vypovídá poměrně vysoká střední chyba počtu souřadnic projekčních center vstupujících do výpočtu vyhlazených oprav.

ϕ	σ	modus
33.272	11.266	46

Tabulka 13: Statistika počtu bodů ve filtrační masce.

3.2.6 Analýza oprav pro souřadnici X projekčních center

Analýza oprav souřadnice X projekčních center se skládá z IDW analýzy, ta je uvedena na obrázku 18. Tato IDW analýza je shodná s IDW analýzou uvedenou v kapitole 3.2.1, jen je aplikována na souřadnici X. Z obrázku 18 je patrné, že největší zatížení chybami je v okrajové části modelu zasahující přibližně do vzdálenosti tří letových řad. Tento jev je také možné pozorovat v obrázku 15 a v obrázku 19.



Obrázek 18: IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center.

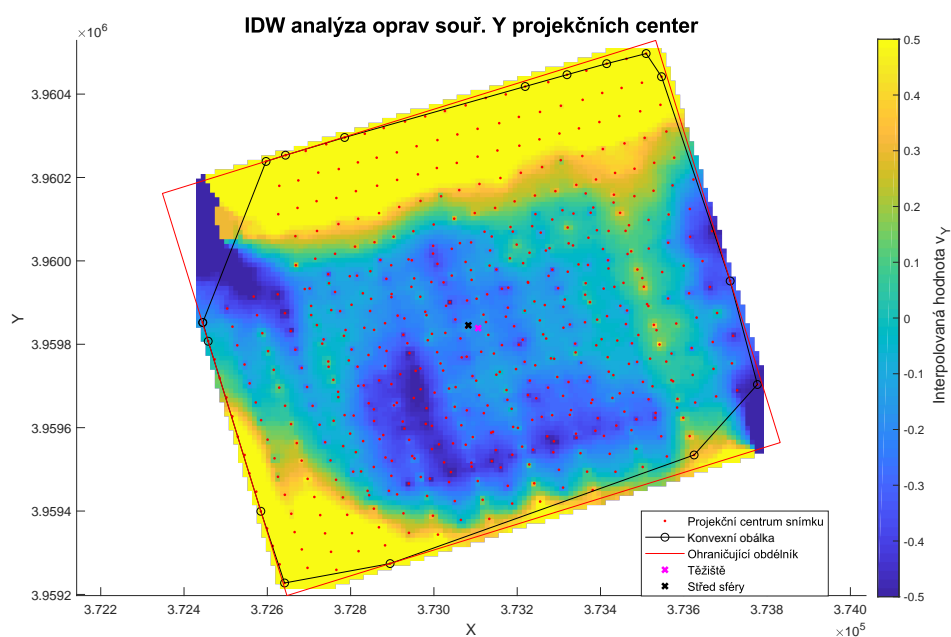
Statistické vyhodnocení oprav souřadnice X projekčních center je uvedeno v tabulce 14.

ϕ [m]	σ [m]	σ_{k0} [m]
0.011	0.394	0.394

Tabulka 14: Statistické vyhodnocení oprav souřadnice X projekčních center.

3.2.7 Analýza oprav pro souřadnici Y projekčních center

Výstup je totožný jako v kapitole 3.2.6, jen je zpracován pro souřadnici Y. IDW analýza je uvedena na obrázku 19. Z obrázku je patrné, že celá severní část území je zatížena chybou do hloubky přibližně čtyř letových řad. Stejně je zatížena i jihovýchodní část snímkaného území.



Obrázek 19: IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center.

Statistické vyhodnocení oprav souřadnice Y projekčních center je uvedeno v tabulce 15.

ϕ [m]	σ [m]	σ_{k0} [m]
0.048	0.874	0.874

Tabulka 15: Statistické vyhodnocení oprav souřadnice Y projekčních center.

Kapitola 4

Určení optimálního počtu projekčních center vstupujících do filtrační masky

Aby bylo možné určit optimální počet projekčních center vstupujících do filtrační masky algoritmu *DEAn*, bylo přistoupeno ke generování syntetických dat s různými parametry náletu. Algoritmus vygeneruje data náletu ve zvoleném rozměru pole a vyhodnotí kolik snímků je obsaženo uvnitř filtrační masky ve středu pole, na okraji pole a v rohu pole.

Do algoritmu vstupují tyto parametry:

- rozměr stran území pro osu X a Y (je předpokládáno obdélníkové území + čtvercové území),
- poměr stran senzoru (4:3, 3:2),
- podélný a příčný překryt snímků (60%, 80%),
- požadovaná procentní část území, která je očištěna o neúplná/okrajová data n – oblast dostatečně naplněné filtrační masky,
- počet snímků ve filtrační masce – k ,
- zda snímkový let obsahuje i kolmé letové linie,
- volitelná omezení výpočtu – minimální počet snímků v oblasti dostatečně naplněné filtrační masky, omezení maximální velikosti poloměru masky.

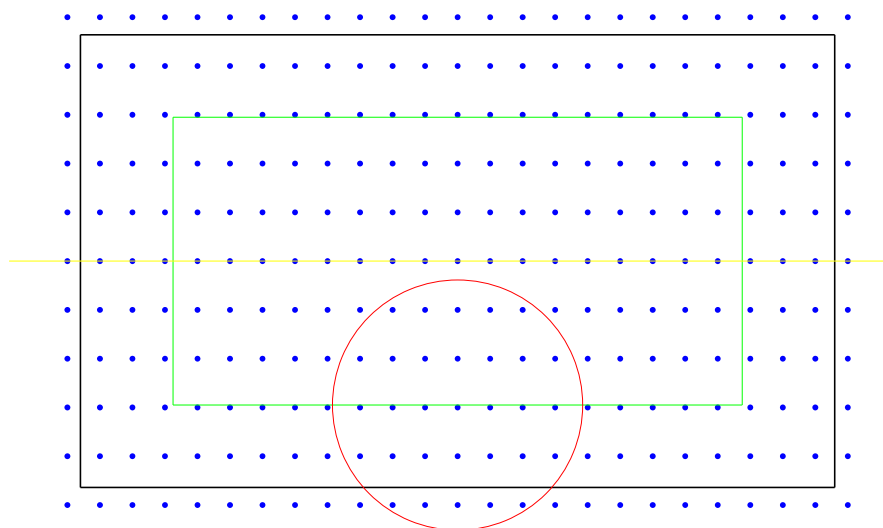
4. Určení optimálního počtu projekčních center vstupujících do filtrační masky

Do algoritmu je zakomponována úprava výpočtu velikosti části pole, kde je dostatečně naplněná filtrační maska. Tato úprava posouvá kruhovou masku maximálně o jednu řadu a sloupec směrem za okraj, aby byla zvětšena oblast pole s vyhovujícím naplněním filtrační masky, úpravu zahrnuje rovnice 7. Rovnice 8 je výchozí rovnicí pro výpočet parametrů náletu.

$$[X - 2 \times r + 2 \times S_x \times (1 - P_o)] \times [Y - 2 \times r + 2 \times S_y \times (1 - P_{\check{r}})] = X \times Y \times n \quad (7)$$

$$N = \frac{X}{S_x \times (1 - P_o)} \times \frac{Y}{S_y \times (1 - P_{\check{r}})} + \frac{X}{S_y \times (1 - P_{\check{r}})} \times \frac{Y}{S_x \times (1 - P_o)} \quad (8)$$

Hodnoty X , Y jsou strany území, r je poloměr filtrační masky, S_x a S_y je rozměr výšky a šířky snímku zobrazeného na úroveň terénu a P_o a $P_{\check{r}}$ je podélný a příčný překryt snímků.



Obrázek 20: Grafická vizualizace vygenerovaných dat.

Obrázek 20 zobrazuje generovaná data pro jednoduchý let pro pole $X = 500$ m, $Y = 300$ m, $W = 3$, $H = 2$, podélný a příčný překryt snímků 60%, $n = 0.5$, $k = 30$. Poloha projekčních center je zobrazena modrým bodem, oblast dostatečně naplněné filtrační masky je zobrazena zeleným obdélníkem, filtrační maska je znázorněna červenou kružnicí, osa pole je znázorněna žlutou linií.

V Příloze B je detailně popsán algoritmus generování dat pro testování parametrů metody, použité nastavení a omezení algoritmu.

4.1 Určení optimálního parametru n , k

Pro určení optimálního parametru n (procentní část území očištěná o neúplná data - oblast dostatečně naplněné filtrační masky) a parametru k (počet snímků ve filtrační masce) byly vygenerovány sady syntetických dat s proměnnými parametry n , k :

- n od 0.3 po 0.7 v kroku 0.1,
- k v hodnotách 30, 50 a 100.

4.1.1 Grafická analýza dat

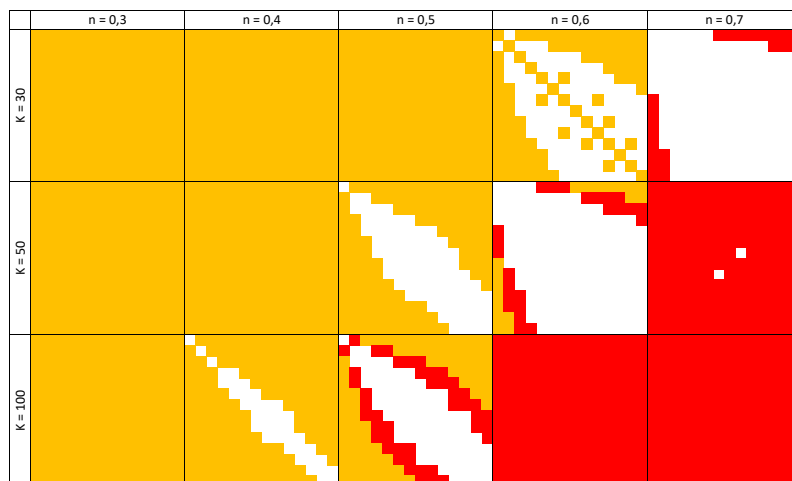
Grafickou analýzou dat byl upřesněn interval pro parametry n a k , které byly následně detailně analyzovány. Ukázka grafické analýzy dat je uvedena na následujících obrázcích. Obrázek 21 je pro data obsahující snímkový let s kolmými letovými liniemi a obrázek 22 je pro data jednoduchého snímkového letu. Červená barva značí, že pro let bylo nutno více jak 1000 snímků. Hranice 1000 snímků byla zvolena jako omezení pro výpočetní náročnost orientace snímků a další výpočetní kroky při tvorbě modelu. Oranžová barva značí, že v průběhu výpočtu byla aplikována omezení:

- minimální počet snímků v oblasti dostatečně naplněné filtrační masky - 100,
- maximální omezení poloměru filtrační masky, tak aby filtrační maska zasahovala maximálně do 1/2 území.

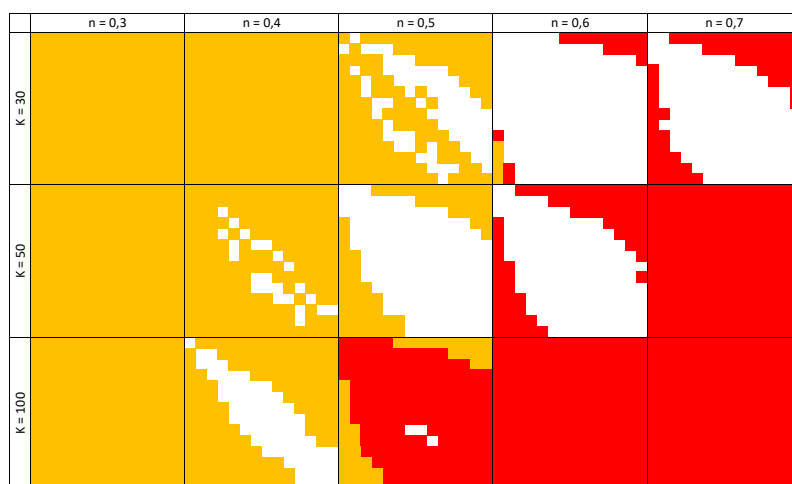
4. Určení optimálního počtu projekčních center vstupujících do filtrační masky

Z obrázků 21 a 22 je patrné, že optimální parametry n a k leží v intervalu pro parametr n od 0.5 po 0.7 a v rozmezí 30 až 50 pro parametr k .

Grafickou analýzou byl upřesněn interval pro parametr n od 0.5 po 0.7 a krok byl zvolen 0.05. Parametr k v hodnotách 30, 35, 40, 45 a 50. Kompletní grafická analýza pro generovaná data je uvedena v příloze C.1.



Obrázek 21: Grafické vyhodnocení snímkového letu s kolmými liniemi, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 %.



Obrázek 22: Grafické vyhodnocení jednoduchého snímkového letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 %.

4.1.2 Detailní analýza dat

Podrobná analýza dat byla zaměřena na porovnávání průměrného počtu snímků v letu, procentního počtu omezení na let a procentního počtu letů s více jak 1000 snímky. Vyhodnocovaná data byla jednoduchý snímkový let a snímkový let s kolmými letovými liniemi, poměr stran senzoru 3:2 a 4:3, podélný překryt snímků 60% a 80%, příčný překryt snímků 60%.

Byly vytvořeny tabulky obsahující údaje o počtu snímků, počtu omezení a počtu případů s více jak 1000 snímky. Ukázka tabulky pro $n = 0.50$ a $k = 30$ je uvedena v tabulce 16. Pro každé hodnocené kritérium jsou uvedeny dva sloupce. V prvním sloupci jsou uvedeny hodnoty náletu s kolmými letovými liniemi a v druhém sloupci hodnoty jednoduchého letu. V prvních dvou řádcích tabulky jsou uvedeny hodnoty podélného překrytu 60% zbylé dva řádky mají podélný překryt 80%, příčný překryt je vždy 60%. První a třetí řádek má poměr stran senzoru 3:2, druhý a poslední řádek mají poměr stran senzoru 4:3.

Počet snímků		Počet omezení		Nad 1000 sn.		Podélný př./
jedn.	+ kolmý	jedn.	+ kolmý	jedn.	+ kolmý	Poměr stran
96355	152044	16	0	14	31	60% / 3:2
92606	132462	84	9	18	25	60% / 4:3
98048	146143	6	0	16	31	80% / 3:2
94657	138334	68	4	20	28	80% / 4:3
950649		187		183		

Tabulka 16: Sumarizace vyhodnocených dat pro $n = 0.65$ a $k = 30$

Pro samotné vyhodnocení dat byl vypočten průměrný počet snímků na let pro zvolené n a k , procento omezení na let a procento počtu letů s více jak 1000 snímky. Vhodná volba parametrů n a k splňuje následující požadavky: minimální počet snímků na let, procentní část omezení na let je minimální, procentní počet letů se více jak 1000 snímky je minimální.

Vyhodnocení syntetických dat je provedeno v několika krocích. Je vypočten průměr a střední chyba pro dané kritérium. Následně jsou data ohodnocena a zvýrazněna na základě odlehlosti od průměru, jak je uvedeno v tabulce 18. Data jsou vyřazena na základě bodového součtu, který musí být menší než 1 a jejichž směrodatná odchylka bodového hodnocení je větší než 1. Tím jsou odfiltrována data s vysokými odchylkami a odlehlá data s vysokými hodnotami jednotlivých kritérií. Vyhodnocení syntetických dat je uvedeno v tabulce 17.

Kritérium	Body
$x > \phi + \sigma$	2
$\phi + \sigma > = x > \phi + \sigma/2$	1
$\phi + \sigma/2 > = x > = \phi - \sigma/2$	0
$\phi - \sigma/2 < x = < \phi - \sigma$	-1
$x < \phi - \sigma$	-2

Tabulka 18: Bodové hodnocení odlehlosti testovaných hodnot, kde ϕ je průměr, σ je střední chyba a x je testovaná hodnota.

k	ϕ			σ		
	počet snímků	Počet omezení [%]	Počet letů nad 1000 snímků [%]	počet snímků	Počet omezení [%]	Počet letů nad 1000 snímků [%]
30	606	0.119	0.117			
31	623	0.105	0.122	623	0.105	0.122
32	645	0.099	0.128	645	0.099	0.128
33	684	0.079	0.143	684	0.079	0.143
34	732	0.074	0.162			
35	753	0.070	0.168			
ϕ	674	0.091	0.140	651	0.094	0.131
σ	54	0.018	0.019	25	0.011	0.009

Tabulka 19: Detailní určení vhodného parametru k , kde ϕ je vypočtený průměr a σ je střední chyba.

V prvním kroku detailního testování parametru k jsou dvě testované hodnoty v nižší polovině testovaných vzorků, konkrétně se jedná o interval od $\langle \phi - \sigma, \phi - \sigma/2 \rangle$ a jeden ve vyšší polovině testovaných vzorků. V posledním kole testování leží dvě testované hodnoty v intervalu $(-\infty, \phi - \sigma)$ a jedna testovaná hodnota v intervalu $\langle \phi + \sigma/2, \phi + \sigma \rangle$.

4.2 Optimální počet snímků pro zvolené území

Dalším výstupem jsou tabulky optimálního počtu snímků pro území o rozměru $X \times Y$ dle volby typu náletu, poměru stran senzoru a podélného a příčného překrytu snímků. Let probíhá ve směru osy X .

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1250	1500	1750	2000
100	478	648	850	906	1072	1298	1540	1652	1911	2097	2238	2646	3497	3463
200	539	478	500	648	666	850	786	906	943	1072	1402	1563	1785	2097
300	668	481	478	556	546	648	671	757	850	760	890	1072	1268	1542
400	748	539	523	478	498	500	583	648	628	666	728	825	923	1072
500	867	556	489	498	478	541	563	589	590	648	666	850	786	906
600	988	668	539	481	450	478	538	556	500	546	575	666	765	760
700	1054	726	540	520	453	474	478	464	501	567	588	583	666	790
800	1234	748	571	539	461	523	474	478	463	498	507	601	678	666
900	1429	807	668	506	523	481	498	522	478	462	537	546	556	624
1000	1407	867	673	556	539	489	454	498	522	478	498	500	583	648
1250	1704	915	846	682	556	492	522	459	501	498	478	541	563	589
1500	2221	1112	867	720	668	556	497	555	489	481	450	478	538	556
1750	2426	1259	967	792	726	627	556	555	561	520	453	474	478	464
2000	2742	1407	1015	867	748	673	590	556	531	539	461	523	474	478
100	458	612	763	800	944	1147	1301	1672	1691	1855	2371	2801	3377	3826
200	528	458	472	612	592	763	729	800	917	944	1185	1515	1885	1855
300	565	541	458	505	594	612	600	679	763	816	867	944	1066	1311
400	744	528	459	458	547	472	525	612	559	592	783	884	987	944
500	1001	518	527	434	458	446	587	508	558	612	592	763	729	800
600	886	565	528	541	433	458	515	505	472	594	538	592	716	816
700	998	686	616	482	510	528	458	514	550	465	529	662	592	707
800	1110	744	533	528	448	459	527	458	512	547	504	567	668	592
900	1436	846	565	579	460	541	434	480	458	488	586	594	577	556
1000	1491	1001	667	518	528	527	487	434	480	458	547	472	525	612
1250	1621	1180	764	610	518	563	459	520	461	434	458	446	587	508
1500	2127	1054	1001	678	565	518	541	491	527	541	433	458	515	505
1750	2447	1195	1018	871	686	589	518	545	523	482	510	528	458	514
2000	2478	1491	960	1001	744	667	551	518	576	528	448	459	527	458

Tabulka 21: Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, jednoduchý let, poměr stran čipu 3:2.

Tabulka 21 uvádí počet snímků pro jednoduchý snímkový let s poměrem stran senzoru 3:2 a příčném překrytu snímků 60%. V horní části tabulky je uveden podélný překryt snímků 60% a ve spodní části je podélný překryt snímků 80%. Pro jednoduchý snímkový let je třeba více snímků, aby ve filtrační masce bylo stejné množství souřadnic projekčních center. Zároveň neplatí zrcadlení hodnot kolem diagonály jako u snímkového letu s kolmými liniemi. Vhodnější případ nastává, když je senzor natočen kolmo širší stranou ke směru letu. Obdobné tabulky pro poměr stran senzoru 4:3 jsou uvedeny v příloze C.2.

Kapitola 5

Algoritmus Korata - Iterační optimalizace prvků vnitřní orientace

Algoritmus *Korata* iteračně optimalizuje vybrané prvky vnitřní orientace. Podobnou tematikou se zabývá práce [18, 35]. Práce [18] je zaměřena na úpravu svazkového vyrovnání, do kterého je implementována podmínka minimalizace odchylky souřadnic projekčních center od GNSS měření, minimalizace průsečíku na vřícovacím bodě a minimalizace odchylky v rovině snímku pro spojovací a vřícovací body. Práce [35] také upravuje svazkové vyrovnání do kterého implementuje podmínku minimalizace rozdílu výšek souřadnic projekčních center od GNSS měření a minimalizace odchylky spojovacích bodů v rovině snímku. Navíc je iteračně optimalizována radiální distorze objektivu kamery. *Korata* je algoritmus vytvořený v rámci této práce a je nadstavbou v aplikaci Metashape. Využívá python knihovny Metashape a dalších python knihoven. *Korata* zpřesňuje **konstantu** kamery, parametry **radiální** a **tangenciální** distorze objektivu na základě minimalizace střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center. *Korata* využívá korelace prvků vnitřní a vnější orientace a je primárně určen pro snímkovací lety s kódovým měřením GNSS, kde je velikost střední prostorové chyby největší a dává volnost reverzní kalibrací kamery. Výstupy algoritmu jsou:

- Analýza proložení sférou vyhlazených výškových oprav souřadnic projekčních center pro každý krok – graf v pdf,
- vyrovnané souřadnice projekčních center pro každý krok – textový soubor,
- kalibrační parametry kamery pro každý krok – xml soubor,
- protokol – textový soubor.

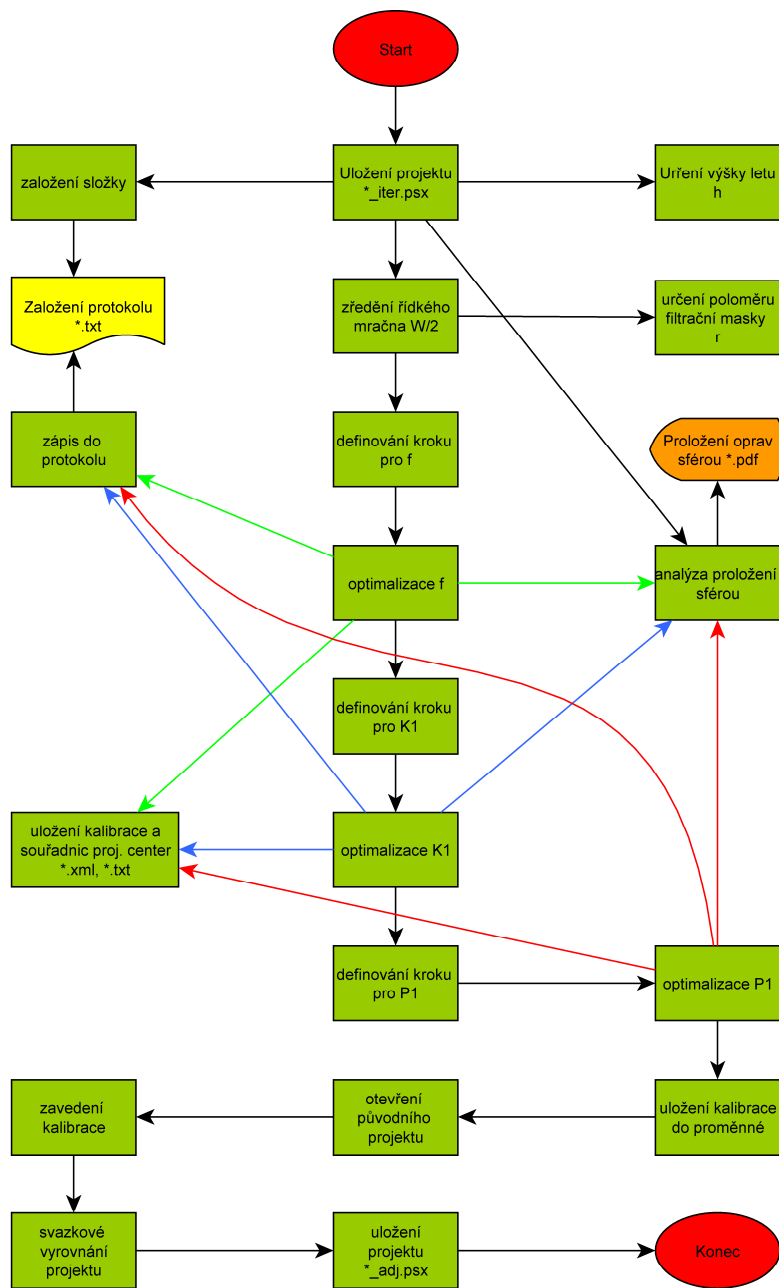
Kromě těchto výstupů je vytvořen nový projekt v aplikaci Metashape. Projekt má optimalizované prvky vnitřní orientace a prvky vnější orientace, kde je minimalizována velikost střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center.

5.1 Popis algoritmu iterační optimalizace prvků vnitřní orientace

Korata vyhledá funkční hodnoty střední prostorové chyby pro různé hodnoty konstanty kamery. Algoritmus *Korata* je spouštěn po svazkovém vyrovnání a filtraci spojovacích bodů. *Korata* vyhledá funkční hodnoty střední prostorové chyby pro konstanty kamery v určitém kroku od vyrovnané hodnoty konstanty kamery. Je implementován požadavek, aby minimální hodnota střední prostorové chyby ležela ve středu zkoumaného intervalu. Funkčními hodnotami střední prostorové chyby je proložena křivka a z parametrů křivky je odhadnuta minimální hodnota konstanty kamery. Proces probíhá iteračně a vyhledání optimalizované konstanty kamery je ukončeno v případě, že rozdíl dvou po sobě jdoucích vyrovnaných konstant kamery je menší než zvolená hodnota (1 mm). *Korata* dále pokračuje optimalizací parametru k_1 radiální distorze objektivu a následně parametru p_1 tangenciální distorze objektivu. Postup je stejný, jako pro konstantu kamery, s tím že již optimalizované parametry jsou fixovány. *Korata* má v sobě zakomponovanou část *DEAn* algoritmu uvedenou v kapitole 3.2.2. Během výpočtu jsou generovány obrazové výstupy s proloženou sférou a vyhlazenými výškovými opravami souřadnic projekčních center. Schéma algoritmu je uvedeno na obrázku 23.

5.1.1 Iterační výpočet f, k_1, p_1

Schéma uvedené na obrázku 24 popisuje iterační proces určení optimální hodnoty konstanty kamery. Proces je totožný pro optimalizaci parametru k_1 radiální distorze objektivu a parametru p_1 tangenciální distorze objektivu. Pro optimalizaci parametrů k_1 a p_1 platí pravidlo, že předchozí vyrovnané parametry musí být fixovány. Pořadí optimalizace parametrů je: konstanta kamery f , parametr k_1 radiální distorze objektivu a parametr p_1 tangenciální distorze objektivu.



Obrázek 23: Schéma algoritmu iterační optimalizace prvků vnitřní orientace.

```

f/k1/p1, krok - vstupní parametry
vytvoření vektoru středních prostorových chyb - STDP
while  $\Delta f > mez$ 
  naplnění vektoru fi dle kroku f
  while STDP není naplněné
    for přes prvky fi
      nastavení fi a zafixování
      svazkové vyrovnání
      výpočet prvku STDPi
    if testování zda STDP obsahuje minimální hodnotu
      pokud ve STDP není minimum, vygenerování nového setu fi
    else
      ukončení vnořeného while cyklu
  určení parametrů hyperboly
  odhad  $f_{(STDP \rightarrow min)}$ 
  zjemnění kroku
  if testování dosažené přesnosti  $f_{(STDP \rightarrow min)}$ 
    pokud je dosažena požadovaná přesnost, ukončení vnějšího while cyklu
  nastavení  $f = f_{(STDP \rightarrow min)}$ 
  svazkové vyrovnání
  výpočet prvku STDP pro  $f = f_{(STDP \rightarrow min)}$ 
  tisk do protokolu

```

Obrázek 24: Schéma iteračního procesu určení optimálních parametrů f, k_1, p_1 .

■ Volba kritérií f, k_1, p_1 pro ukončení cyklu

Kritéria byla volena tak, aby rozdíl dvou kroků iterace byl menší než zvolená hodnota. Tato hodnota byla volena jako absolutní o velikosti 1 mm. Implementace kritéria pro konstantu kamery je uvedena ve vzorci 9, pro radiální distorzi objektivu je uvedena ve vzorci 10 a pro tangenciální distorzi objektivu je uvedena ve vzorci 11.

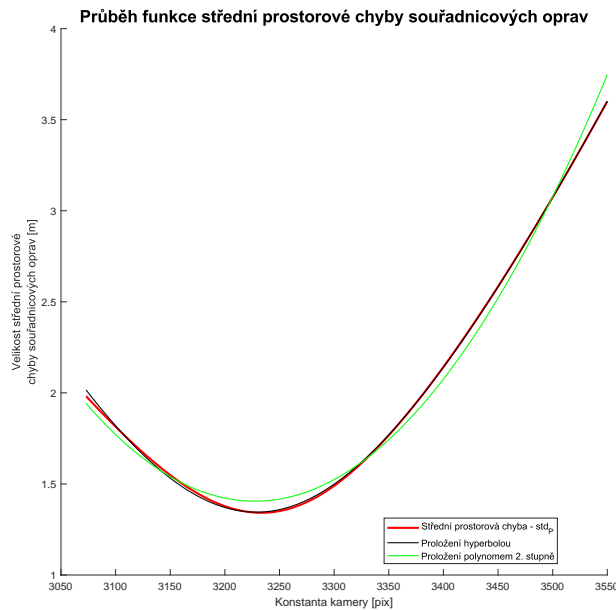
$$|f_i - f_{i-1}| \leq 1 \text{ mm} \quad (9)$$

$$|r \times [(k_{1(i)} - k_{1(i-1)}) \times r^2 + (k_{2(i)} - k_{2(i-1)}) \times r^4 + (k_{3(i)} - k_{3(i-1)}) \times r^6]| \leq 1 \text{ mm} \quad (10)$$

$$|r^2 \times [3 \times (p_{1(i)} - p_{1(i-1)}) + 2 \times (p_{2(i)} - p_{2(i-1)})]| \leq 1 \text{ mm} \quad (11)$$

5.1.2 Volba křivky pro odhad minima funkce střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center

Křivka aproximující funkci střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center by měla co nejlépe odhadnout její minimum. Funkce musí obsahovat malé množství parametrů, aby byl počet vstupních hodnot (výpočet std_P) co nejmenší. Byly testovány polynomy až do 4. stupně. Polynomy vykazovaly neuspokojivý odhad minima funkce, jak je vidět na obrázku 25, kde je uveden polynom 2. stupně. Vhodnou aproximací je hyperbola, i z hlediska počtu určovaných parametrů. Aproximace hyperbolou je uvedena na obrázku 25. Využití hyperboly je dále opodstatněné tím, že mnohem věrněji aproximuje funkci střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center a má pouze jednu derivaci rovnou nule (to nemusí vždy platit u polynomů vyšších řádů) a že je 2. stupně, jak je uvedeno v rovnici 12. Věrnější aproximace je důležitým hlediskem, neboť odhad minima funkce je proveden na základě proložení hyperboly pouze minimem bodů (polynomy mohou dávat nepřesné výsledky). Odhad minima funkce vyjadřuje rovnice 13. V rovnici vystupuje jen poměr dvou parametrů hyperboly.



Obrázek 25: Průběh funkce střední prostorové chyby souřadnicových oprav projekčních center a jejích aproximací

$$A \times f^2 + B \times std_P^2 + C \times f + D \times std_P + E = 0 \quad (12)$$

$$f_{\rightarrow \min} = \frac{-C}{2 \times A} \quad (13)$$

5.2 Popis výstupů algoritmu Korata

Analýza proložení sférou

Je grafický výstup generovaný pro každý krok algoritmu a je shodný s výstupem generovaným analytickým nástrojem uvedeným v kapitole 3.2.2.

Kalibrační parametry kamery

XML soubor je generovaný pro každý krok algoritmu, je to standardní výstup aplikace Metashape.

Optimalizované souřadnice projekčních center

Je tabulkový výstup generovaný pro každý krok algoritmu *Korata*, jedná se o standardní výstup aplikace Metashape.

5.2.1 Popis protokolu

Protokol je textový soubor generovaný pro celý výpočetní cyklus. V protokolu jsou uvedena data jako je určená výška letu nad terénem a odhad GSD. Protokol obsahuje tabulku, která ukazuje na postupné změny optimalizovaných parametrů. První řádek tabulky jsou vstupní údaje před aplikací algoritmu *Korata*. Dále je zde patrná změna střední prostorové chyby oprav souřadnic projekčních center. Kromě této střední chyby je možné z protokolu vyčíst i změny středních chyb jednotlivých souřadnic. Střední chyby jsou vypočteny standardně, tak i vztažením oprav k 0. Rozdíl je ve značení, první střední chyba je značena malými písmeny *std*, střední chyba vztažená k 0 oprav je značena *STD*. Indexy u *std* a *STD* značí příslušnou souřadnici pro *X* a *Y*, *H* je označení pro výšku a *P* je označení pro prostorovou střední chybu. Ukázka protokolu je uvedena v tabulce 22. Z tabulky je zřejmé, že rozdíl konstant kamery je cca 80 pixelů, to odpovídá rozdílu výšky 3.34 m. Vzhledem k určené výšce letu 138.3 m nad terénem je chyba v konstantě kamery přibližně 2.4%. Střední prostorová chyba oprav souřadnic projekčních center klesne z 1.566 m na 1.355 m. Po optimalizaci parametru radiální distorze k_1 je pokles střední prostorové chyby oprav souřadnic projekčních center na 1.282 m a po optimalizaci parametru p_1 klesne střední prostorová chyba

na 1.275 m. Pokles střední prostorové chyby je přibližně 18.6% (vztaženo k inicializační hodnotě z prvního řádku tabulky).

	f	k_1	p_1	std_P	std_X	std_Y	std_H	STD_X	STD_Y	STD_H
Ini.	3310.55	-0.040704	0.0031037	1.566	0.386	0.869	1.245	0.387	0.871	1.247
f	3213.31	-0.037561	0.0030109	1.365	0.518	0.746	1.019	0.519	0.747	1.022
	3230.74	-0.038113	0.0030276	1.355	0.453	0.733	1.045	0.454	0.734	1.048
	3230.85	-0.038116	0.0030277	1.355	0.453	0.733	1.045	0.453	0.734	1.048
	3230.85	-0.038116	0.0030277	1.355	0.453	0.733	1.045	0.453	0.734	1.048
	3230.85	-0.040423	0.0030220	1.282	0.442	0.732	0.956	0.443	0.734	0.960
p_1	3230.85	-0.040420	0.0030220	1.282	0.442	0.732	0.956	0.443	0.734	0.960
	3230.85	-0.040420	0.0024349	1.275	0.452	0.723	0.948	0.452	0.725	0.952
	3230.85	-0.040420	0.0024278	1.275	0.452	0.723	0.948	0.452	0.725	0.952
	3230.85	-0.040420	0.0024277	1.275	0.452	0.723	0.948	0.452	0.725	0.952

Tabulka 22: Protokol o výpočtech pro území Makhmur al-Qadima.

Kapitola 6

Návrh řešení a ověření postupů zpřesňující výstupy z RPAS

V této části práce je pozornost zaměřena na testování stávajících postupů, metod a opatření zpřesňující výstupy z RPAS. Byl proveden test zaměřený na přesnost výsledků při zpracování v různých komerčních aplikacích, modely byly zpracovány bez použití vlčivacích bodů. Byl testován vliv zapojení změny výšky snímkového letu do svazkového vyrovnání, který byl proveden na námi vytvořeném testovacím poli. Byla ověřena možnost snížení počtu vlčivacích bodů při použití RPAS vybaveného GNSS RTK/PPK přijímačem. Nakonec je hodnocen vliv počasí při snímkovém letu na přesnost výstupů.

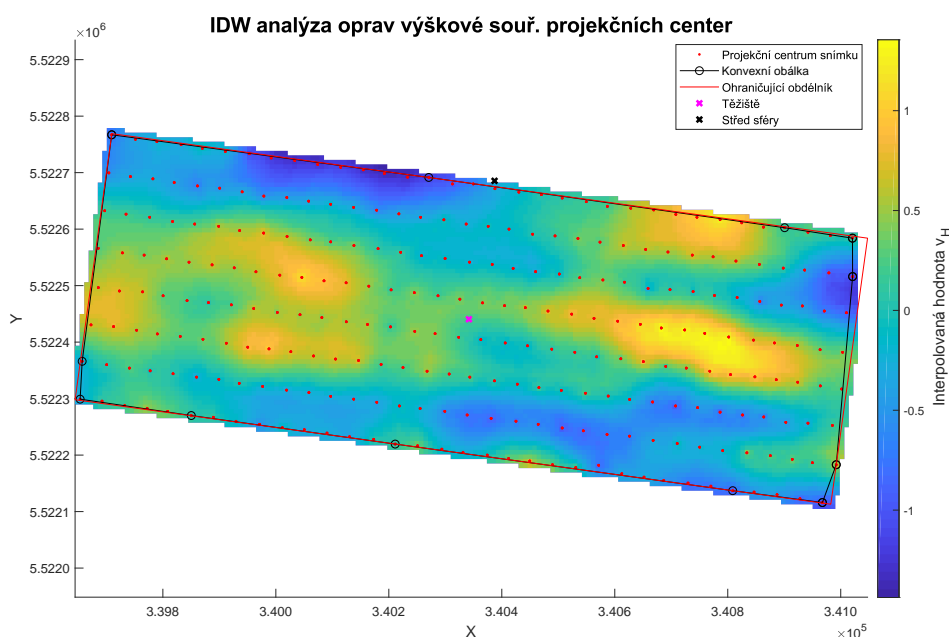
6.1 Testování velikosti systematické deformace fotogrammetrického modelu v komerčních aplikacích

Porovnání velikosti systematické deformace fotogrammetrického modelu pro aplikace Agisoft Metashape a Pix4Dmapper je uvedeno v tabulce 23. V tabulce je hodnocena velikost korekce po proložení sférou ve středu sféry (odpovídá výšce vrchlíku vztažené k nule oprav) dle tabulky 12 uvedené v kapitole 3.2.4. V tabulce 23 lze pozorovat výrazný rozdíl v hodnotách korekce pro lokalitu Vysokého Sedliště snímkané multispektrální a termální kamerou. Částečný vliv lze připsat tomu, že systém eBee a jeho kamery byly vyvinuty na spřáteleném pracovišti u Université de Lausanne, kde obě

společnosti vznikly. Aplikace Metashape zde dosahovala výraznějších chyb, jak dokazuje porovnání IDW analýzy souřadnicových oprav výšek projekčních center snímků uvedených na obrázcích 26 a 40. Porovnání obrázků vede k závěru, že aplikace Metashape určila nejméně přesně prvky vnitřní orientace. Pro multispektrální kameru je velmi názorně viditelná systematická chyba (průhyb) fotogrammetrického modelu.

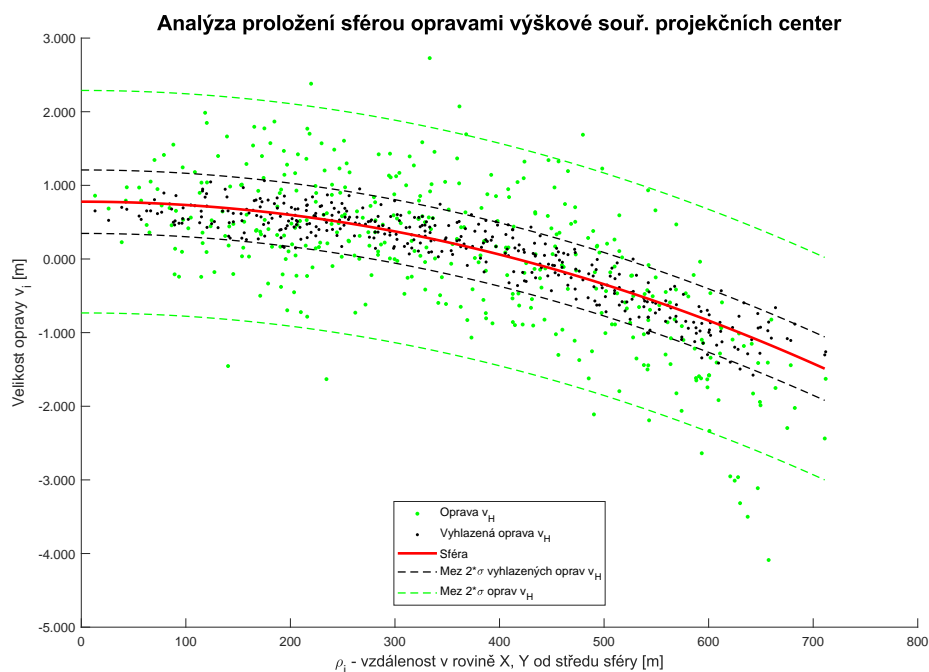
Lokalita	Korekce ze sféry [m]	
	Pix4Dmapper	Metashape
Makmur al-Qadima	0.806	0.994
Ctiněves multispektrální	-0.098	-0.092
Ledovec Knud Rasmussen	0.286	0.156
Sedliště multispektrální	0.172	1.195
Sedliště termální	0.778	0.172

Tabulka 23: Porovnání hodnot korekce po proložení sférou ve středu sféry pro aplikace Metashape a Pix4Dmapper.



Obrázek 26: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro oblast Sedliště, multispektrální kamera, zpracování v Pix4Dmapper.

Důvod rozdílných výsledků pro termální kameru je viditelný na obrázcích 27 a 52. Na obrázcích je uvedeno proložení sférou dle kapitoly 3.2.2. Obrázek 27 vykazuje výrazně menší rozptyl vyhlazených oprav (dle kapitoly 3.1.1) a lepší proložení sférou, než je uvedeno na obrázku 52.



Obrázek 27: Analýza proložení sférou opravami výškové souřadnice projekčních center pro oblast Sedliště, multispektrální kamera, zpracování v Pix4Dmapper.

Obě aplikace vykazují systematické deformace fotogrammetrického modelu, pokud nejsou použity vlíčovací body, jsou nevhodně rozmístěny v území, nebo je jich nedostatečný počet. Odhad prvků vnitřní orientace a distorze objektivu je lepší pro aplikaci Pix4Dmapper. Provedení snímkového letu nebylo ve vhodné konfiguraci (jednoduchý snímkový let). Systematickou deformaci fotogrammetrického modelu také vykazuje RealityCapture, jak je ukázáno na obrázku 3.

6.2 Porovnání vlivu změny výšky při snímkovém letu a zapojení šikmých snímků do sítě projekčních center

V kapitole 1.2.3 je řečeno, že pokud jsou snímky orientovány pouze směrem do nadiru, tak je to nejméně vhodnou sítí projekčních center snímků. Naopak nejužší sítí je obdržena, pokud jsou do snímkového letu zařazeny šikmé snímky. Zařazení šikmých snímků do tvorby modelu může být buď velmi komplikované, nebo zcela vyloučené pro RPAS typu křídlo. Testování změny výšky letu na přesnost výstupů z RPAS bylo provedeno na testovacím poli u Litoměřic. Popis lokality je uveden v příloze A.2. Z tabulky 24 je patrné, že maximální korekce ve středu sféry (dle kapitoly 3.2.4) se zmenšuje s výškovým

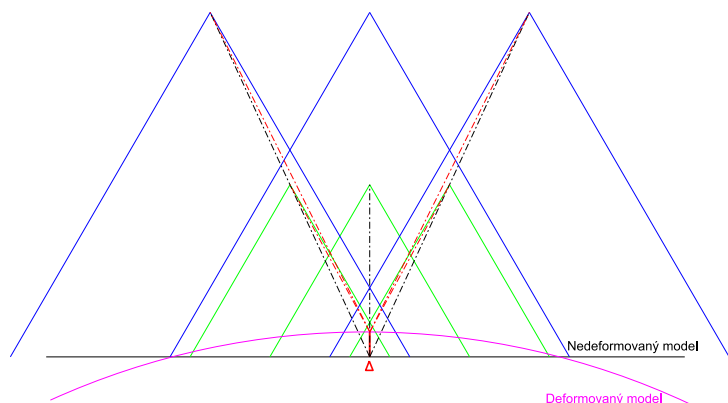
rozdílem. Výjimku tvoří let *LTM VIS 3.5 Po*, kde je sice hodnota korekce menší. To může být způsobeno tím, že poloměr filtrační masky je závislý na počtu vstupujících bodů. Je tedy dvojnásobný, než u následující hodnoty. Lze tedy očekávat teoretickou hodnotu o něco více než dvojnásobnou. Za povšimnutí stojí, že konstanta kamery je poměrně neměnná (s přihlédnutím, že GSD je cca 3.5 cm) a že vliv radiální distorze v rohu snímku je prakticky identický (velikost opravy).

V tabulce 24 je VIS (*Visible Spectrum*) označení pro kameru snímající ve viditelném spektru, NIR (*Near-infrared*) je označení pro kameru, která má červený kanál vyměněný za kanál snímající v blízkém infračerveném spektru, číselná hodnota značí použité GSD snímkování a J/K značí, jak byl let proveden, jestli podél nejdelší hrany území (J), nebo kolmo na ni (K). Hodnota *Dist. max* značí velikost radiální distorze v rohu snímku.

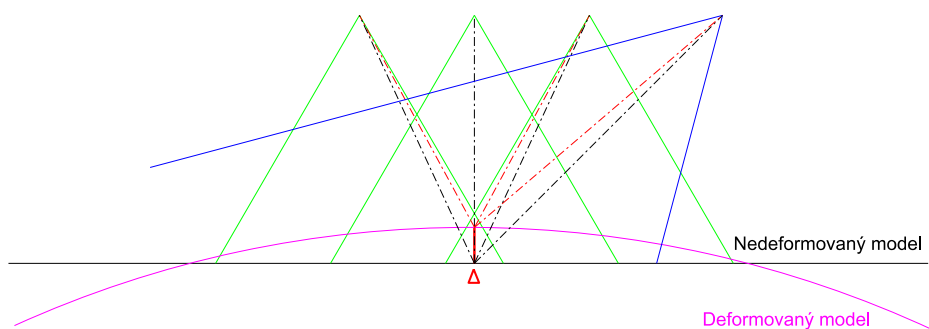
	LTM VIS 3.5 Po	LTM VIS 3.5 Po J	LTM VIS 3.0 J 3.5 K	LTM VIS 3.5 J 6.0 K	LTM VIS 3.5 J NIR 3.5 K	LTM VIS 3.5 J NIR 3.0 K	LTM VIS 3.5 J NIR 6.0 K
f	3296.19	3292.69	3293.14	3293.88	3292.66	3286.52	3293.48
c_x	35.67	36.40	35.35	35.62	33.35	36.45	35.66
c_y	73.23	74.06	72.01	74.10	73.79	74.91	73.51
k_1	-0.0401	-0.0400	-0.0403	-0.0399	-0.0399	-0.0401	-0.0398
k_2	0.0437	0.0437	0.0426	0.0420	0.0428	0.0428	0.0426
k_3	-0.0226	-0.0221	-0.0208	-0.0206	-0.0212	-0.0215	-0.0216
p_1	0.0032	0.0033	0.0032	0.0032	0.0028	0.0033	0.0032
p_2	0.0058	0.0056	0.0055	0.0057	0.0057	0.0057	0.0057
Dist. max	-43.78	-42.98	-43.72	-43.59	-43.57	-43.83	-43.68
Korekce sf.	0.244	0.538	0.565	0.285	0.893	0.460	0.320
Počet snímků	139	254	299	197	281	307	202

Tabulka 24: Změna prvků vnitřní orientace s kombinacemi různých výšek snímkového letu a kombinací kamer.

Možnosti tohoto řešení jsou omezené geometrickou podstatou úlohy, jak je ukázáno na obrázku 28. Z obrázku je patrné, že průmět deformace modelu, označený jako Δ , je minimalizován nevhodnou konfigurací sítě. Výšková komponenta deformace modelu, která nabývá největších hodnot, je zobrazena do roviny snímku, tím dojde ke značné ztrátě informace o skutečné velikosti složky Δ .



Obrázek 28: Vliv změny výšky snímkového letu na eliminaci systematické deformace fotogrammetrického modelu.



Obrázek 29: Vliv zařazení šikmých snímků do snímkového letu na eliminaci systematické deformace fotogrammetrického modelu.

Z obrázku 29 je patrné, že průmět složky Δ je pro šikmý snímek mnohem příznivější, nedochází k výrazné ztrátě informace o velikosti této složky, jako v předchozím případě, jak potvrzuje tabulka 25. Tím jsou zlepšeny podmínky pro reverzní kalibraci.

Změna výšky letu		Použití šikmých snímků - 45°	
Nižší výška letu	3.6°	Snímek orientovaný do nadiru	3.6°
Vyšší výška letu	1.7°	Šikmý snímek	4.5°

Tabulka 25: Porovnání průmětu velikosti složky Δ do roviny snímku, pro změnu výšky snímkového letu a zařazení šikmých snímků do snímkového letu.

Z tabulky 25 je patrné, že úhlová velikost složky Δ je podstatně vyšší pro šikmý snímek. Tím lze přesněji eliminovat deformaci fotogrammetrického modelu a odhadnout prvky vnitřní orientace a distorze objektivu.

6.3 Ověření minimálního počtu vlíčovacích bodů pro RPAS vybaveného GNSS RTK/PPK měřením

Ověření hypotézy, že postačuje pouze jeden vlíčovací bod umístěný ve středu snímkaného území proběhlo na lokalitách Kardašova Řečice, Skoránov a Nová Ves. Informace o lokalitách jsou uvedeny v pořadí v přílohách A.3, A.4 a A.5. Pro každou lokalitu byla vytvořena sada tří modelů. První model byl svazkově vyrovnán bez vlíčovacích bodů, na které byla provedena prostorová transformace. V druhém modelu vstupoval jeden vlíčovací bod ve středu území do svazkového vyrovnání. V posledním modelu vstupovaly všechny vlíčovací body do svazkového vyrovnání. Hodnocení přesnosti modelu bylo provedeno porovnáním středních souřadnicových chyb dosažených na vlíčovacích bodech. Tabulka 26 udává dosažené střední chyby souřadnicových oprav pro uvedené projekty. Použití všech vlíčovacích bodů vedlo k maximálnímu poklesu jednotlivých středních chyb v průměru jen o 1 cm, maximální rozdíl byl necelé 3 cm. Použitý RPAS byl eBee Plus vybavený kamerou S.O.D.A., která je vytvořena speciálně pro použití v RPAS. Konzistentnost dosažených středních chyb byla pravděpodobně ovlivněna kvalitní kamerou a mohutnějším a stabilnějším RPAS.

	Počet a typ bodů	VB			KB/TB		
		σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_H [m]	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_H [m]
Kardašova	12 TB				0.012	0.018	0.114
Řečice	1 VB 11 KB	0.006	0.001	0.120	0.012	0.017	0.114
	12 VB	0.011	0.014	0.096			
Skoránov	12 TB				0.011	0.023	0.057
	1 VB 11 KB	0.013	0.013	0.026	0.010	0.024	0.060
	12 VB	0.011	0.019	0.033			
Nová Ves	12 TB				0.010	0.021	0.022
	1 VB 11 KB	0.003	0.008	0.005	0.010	0.021	0.022
	12 VB	0.010	0.019	0.017			

Tabulka 26: Porovnání dosažených středních chyb na vlíčovacích bodech s použitím RPAS vybaveného GNSS RTK měřením.

VB značí vlíčovací bod vstupující do svazkového vyrovnání, TB je vlíčovací bod určený pro prostorovou transformaci modelu a KB je kontrolní bod.















Vyšší střední chyba ve výšce u lokality Kardašova Řečice je způsobena z části kotvením desek vlíčovacích bodů přímo na terén. Odhad vlivu kotvení na střední chybu ve výšce může být jen okolo 1 až 2 cm. Vstupem vlíčovacích bodů do svazkového vyrovnání byla dosažena střední chyba ve výšce 9.6 cm, což je téměř dvojnásobek apriorní střední chyby GNSS RTK měření. Povětrnostní podmínky nebyly ideální při snímkovém letu. Při snímkovém letu bylo poměrně větrno cca 7 m/s a tím že byl snímkový let proveden

21.2.2020, tak byly světelné podmínky pro snímkový let také nepříznivé. V lokalitě se vyskytoval jakýsi opar/mlha.

Pokud bude hodnocen přínos RPAS vybaveného GNSS RTK měřením, tak obdobných přesností je dosaženo při použití RPAS vybaveného GNSS s kódovým měřením. S tím rozdílem, že pro kódové měření je nutné vždy použít vhodně rozmístěné vlíčovací body po snímkovaném území.

6.4 Vliv meteorologických podmínek na snímkový let

Moderní RPAS jsou vybaveny nejrůznějšími senzory umožňující systému orientaci v prostoru, mezi které patří GNSS přijímač, gyroskopy, akcelerometry a kompas. Systém snímá velké množství dat, které je možné později využít ke zpřesnění dráhy letu. Mnoho aplikací dokáže všemi těmito daty ze senzorů proložit křivku aproximující dráhu letu. Za ideálních podmínek lze proložením křivky, či aplikací filtrů na tyto data zpřesnit souřadnice projekčních center snímků. Zpřesnění souřadnic projekčních center je ukázáno na obrázku 30. Na obrázku jsou patrné střední chyby z GNSS kódového měření, které dosahují přibližně 5 metrů v poloze a ve výšce. Odhad středních chyb souřadnic projekčních center po orientaci snímků dosahuje necelých 80 cm a 60 cm v poloze a 1.20 m ve výšce. Tyto hodnoty středních chyb jsou významně vzdáleny od středních chyb z GNSS měření, proto muselo dojít k vyhlazení trajektorie letu a tím ke zpřesnění odhadu souřadnic projekčních center.

<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1884	-1.328716	-0.100829	1.715953	5.18/5.136
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1885	-0.604144	0.468317	2.053018	5.053/4.966
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1886	-0.866827	0.472037	1.642666	5.018/4.918
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1887	-1.173605	0.311125	0.903674	5.096/5.006
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1888	-1.255971	0.222491	0.449585	5.041/5.043
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1889	-1.294703	0.397459	-0.638430	5.08/5.022
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1890	-1.574130	0.575151	-0.232960	5.224/5.166
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1891	-0.571066	1.141670	-0.144858	5.105/4.974
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1892	0.022441	1.080877	0.208732	5.078/5.043
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1893	-0.434606	0.925531	0.232529	5.013/4.855
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1894	-0.585801	0.934017	1.233532	5.244/5.237
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1895	-0.551770	0.036731	1.414327	5.076/5.023
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1896	-0.469716	0.065864	0.554750	5.231/5.038
<input checked="" type="checkbox"/>		IMG_1897	-0.416256	0.072856	0.749481	5.351/5.544
		Total Error	0.796919	0.573212	1.222389	

Obrázek 30: Ukázka střední souřadnicové chyby projekčních center a GNSS kódového měření pro lokalitu Mariánská.

Problém nastává, pokud meteorologické podmínky snímkového letu nejsou zcela ideální. Jestliže snímkový let probíhá za větrného počasí, pak lze očeká-

vat, že proložení trajektorií letu bude komplikované. Tím se zhorší aproximace trajektorie snímkového letu a vzrostou střední chyby souřadnic projekčních center. Nevýhodou mají RPAS typu křídlo, kde je kamera obvykle spojena se samotným RPAS bez další kompenzace pohybu při pořizování snímku. Výhodou představuje nasazení multikoptér, které jsou obvykle vybaveny gimballem. Gimbal je zařízení udržující kameru ve stabilní poloze během letu. Multikoptéru je možno zastavit na požadovaném místě ve vzduchu a tím docílit ještě větší stability při pořizování snímků. Obvyklá váha RPAS je jen několik jednotek kilogramů a významnější poryv větru způsobí změnu trajektorie letu. Pohyb RPAS v poryvu větru způsobí smaz snímku a kvalita a přesnost výstupů jsou tím následně ovlivněny. O vlivu meteorologických podmínek vypovídají střední chyby uvedené v kapitole 8.1, tabulce 27. Lokalita Litoměřice byla snímkována 2.2.2016 s rychlostí větru okolo 5 m/s a nárazovým větrem dosahujícím až 10 m/s . Lokalita Chlumeck byl snímkována dne 27.12.2018 a vítr dosahoval rychlosti od 5 do 8 m/s . Území obce Skoránov bylo snímkováno dne 4.10.2019 s vítr dosahoval rychlosti okolo 7 m/s . Obec Nová Ves byla snímkována při rychlosti větru okolo 3 m/s . Z tabulky lze vypočítat korelaci mezi rychlostí větru, závislosti na světelných podmínkách snímkového letu a dosažených středních souřadnicových chyb na vlíčovacích bodech. Obdobnou korelaci lze pozorovat v tabulce 26. Při snímkování Karlova Řečice bylo větrno a světelné podmínky nebyly optimální. Ukázka smazu vlíčovacího bodu ve snímku v důsledku nepříznivých povětrnostních a světelných podmínek je uvedena na obrázku 31. Vlícovací bod byl signalizován deskou s černo bílým šachovnicovým vzorem o velikosti strany čtverce 50 cm . Smaz vlíčovacího bodu v jednom směru dosahuje okolo 1.8 m , to je přibližně 3.5 násobek velikosti terče. Pro GSD 5 cm je smaz více jak třiceti násobek GSD ve směru shora dolů. Při očekávané přesnosti fotogrammetrických modelů okolo dvou násobku GSD v poloze je tato hranice výrazně překročena.



Obrázek 31: Detail vlíčovacího bodu pořízený kamerou Canon IXUS 127 HS pořízený za větrného počasí v lokalitě Chlumeck.

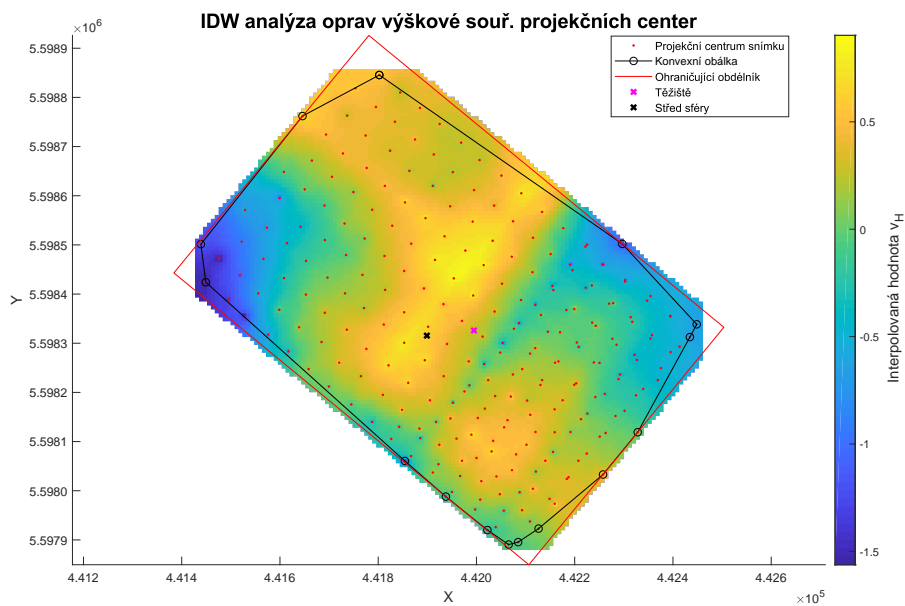
Kapitola 7

Testování algoritmu DEAn

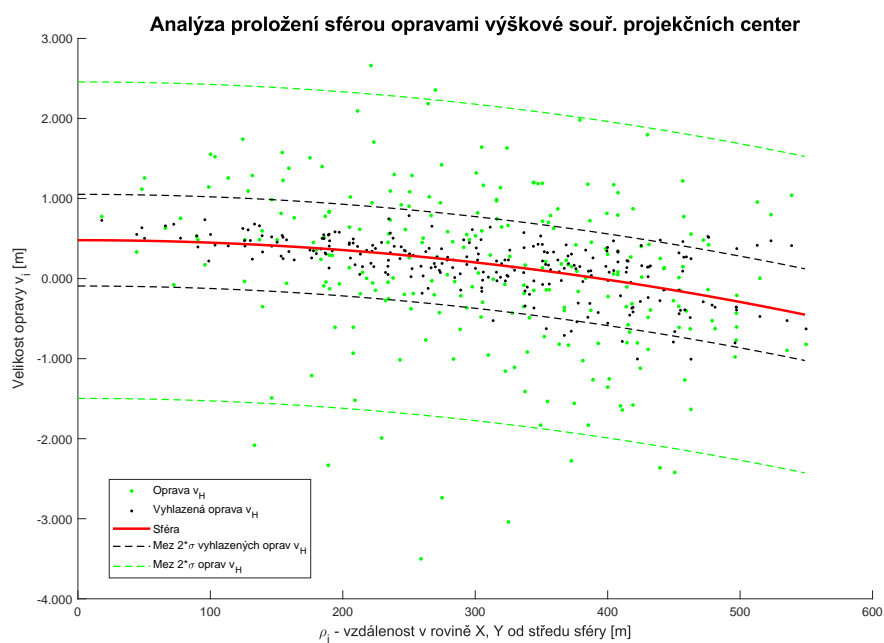
7.1 Výstupy algoritmu DEAn pro VIS kameru

7.1.1 Výstupy algoritmu DEAn pro testovací pole u Litoměřic

Podrobný popis lokality je uveden v příloze A.2. Zde je použit nálet s VIS kamerou, s GSD 3.5 cm, nálet je proveden spolu s druhým kolmým náletem. Z výstupů je uvedena IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center na obrázku 32 a analýza proložení sférou vyhlazených oprav výškových souřadnic projekčních center na obrázku 33. Z IDW analýzy je patrné, že systematická chyba ve středu území nabývá kladných hodnot a na východním a západním okraji území nabývá záporných hodnot. Maximální oprava ve středu sféry nabývá přibližně 0.5 m, jak je patrné z obrázku 33. Použitá VIS kamera je Canon IXUS 127 HS.



Obrázek 32: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro testovací pole u Litoměřic.

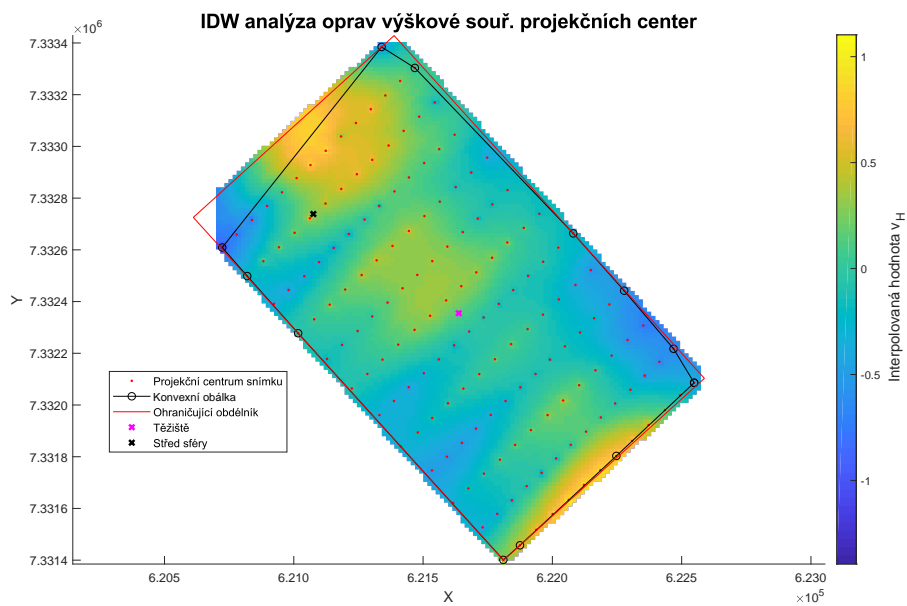


Obrázek 33: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro testovací pole u Litoměřic.

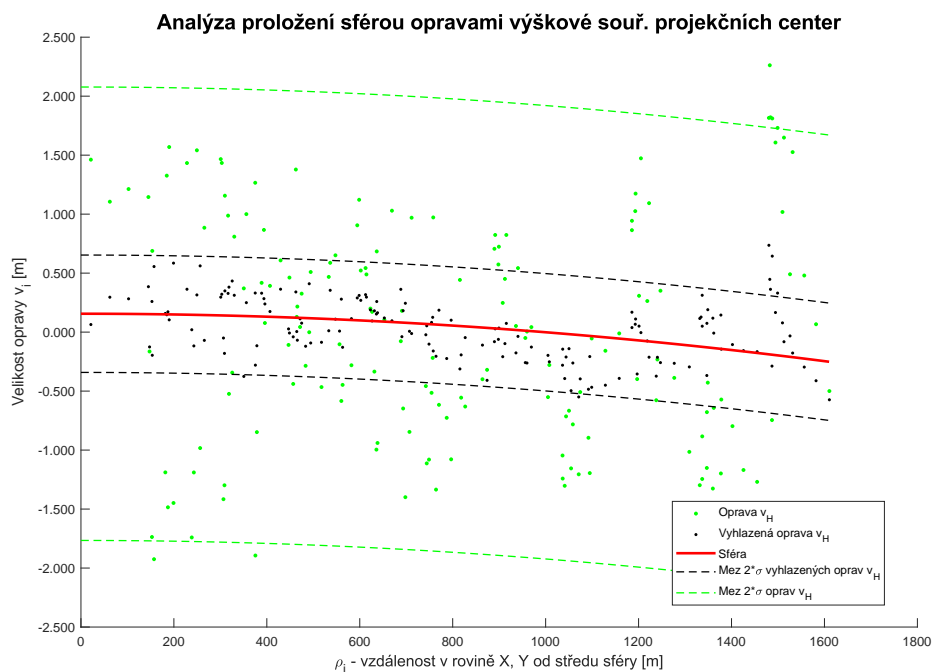
7.2 Výstupy algoritmu DEAn pro NIR kamery

7.2.1 Výstupy algoritmu DEAn pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku

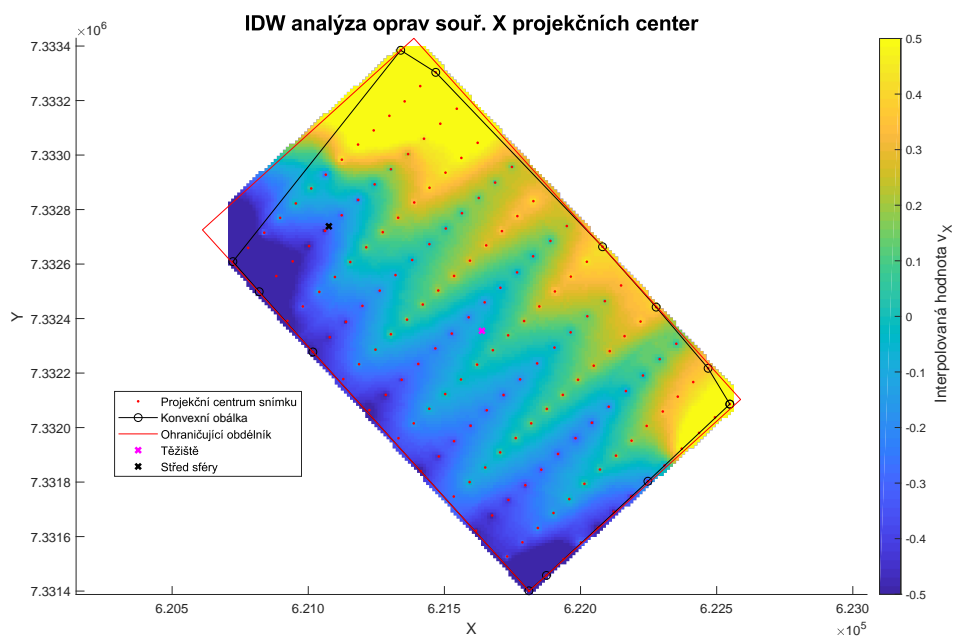
Více o lokalitě je uvedeno v příloze A.6. Z obrázků 34 a 35 je zřejmé, že působení systematické chyby je zde minimální, ve středu sféry dosahuje 0.15 až 0.20 m. Avšak IDW analýza oprav souřadnic X, Y projekčních center ukazuje systematickou chybu. V souřadnici X chyba působila podél dvou protilehlých hran území (severovýchodní a jihozápadní), jak dokazuje obrázek 36. Pro souřadnici Y chyba působila ve východním a v západním rohu území, to je patrné z obrázku 37. Použitá NIR kamera je Canon PowerShot ELPH 110 HS.



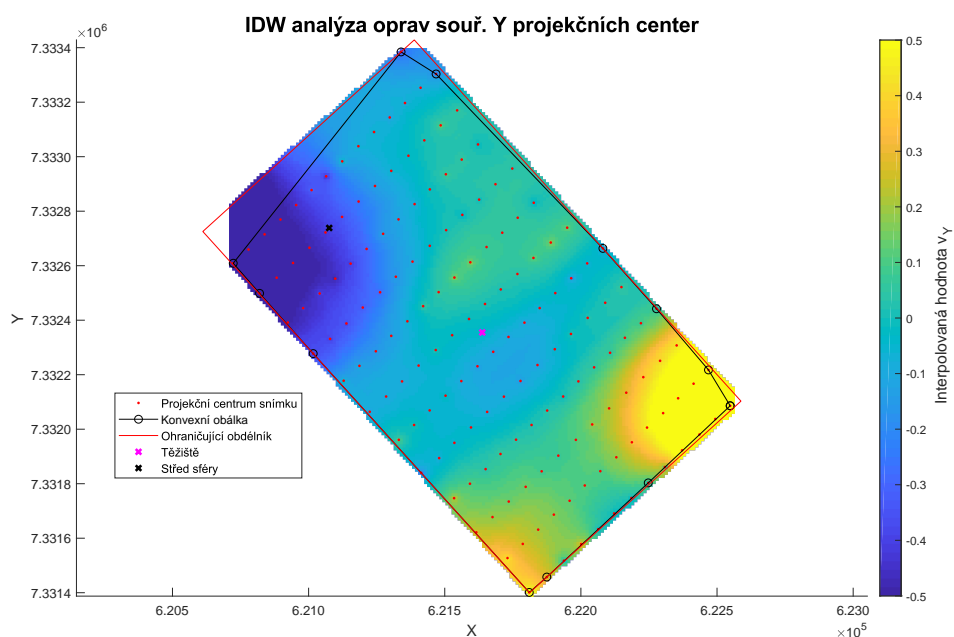
Obrázek 34: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.



Obrázek 35: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro mapování čela ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.

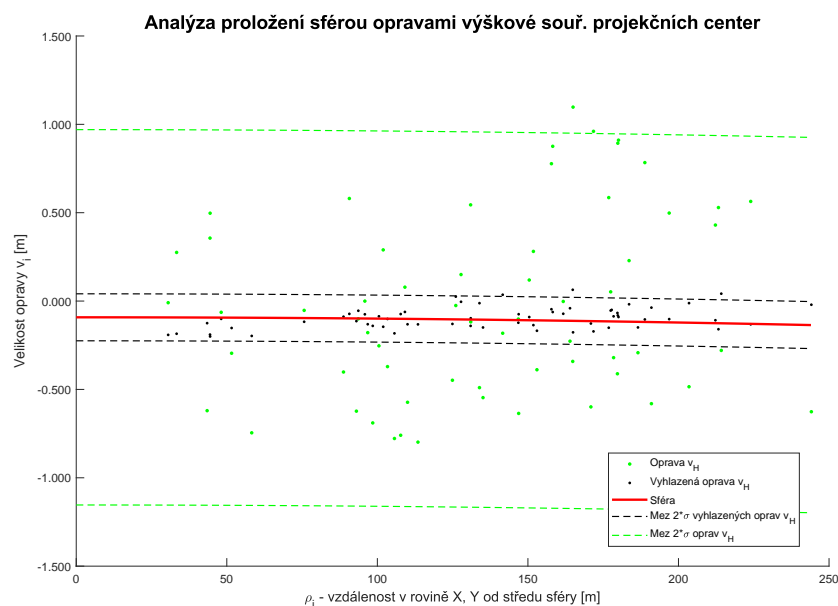


Obrázek 36: IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro čelo ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.

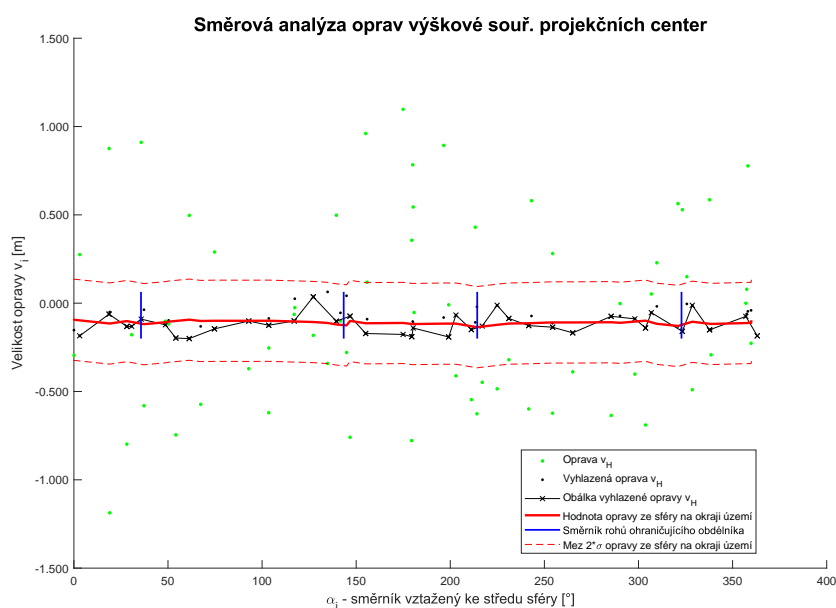


Obrázek 37: IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro čelo ledovce Knud Rasmussen v Grónsku.

7.2.2 Výstupy algoritmu DEAn pro archeologickou lokalitu Ctiněves



Obrázek 38: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves.



Obrázek 39: Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves.

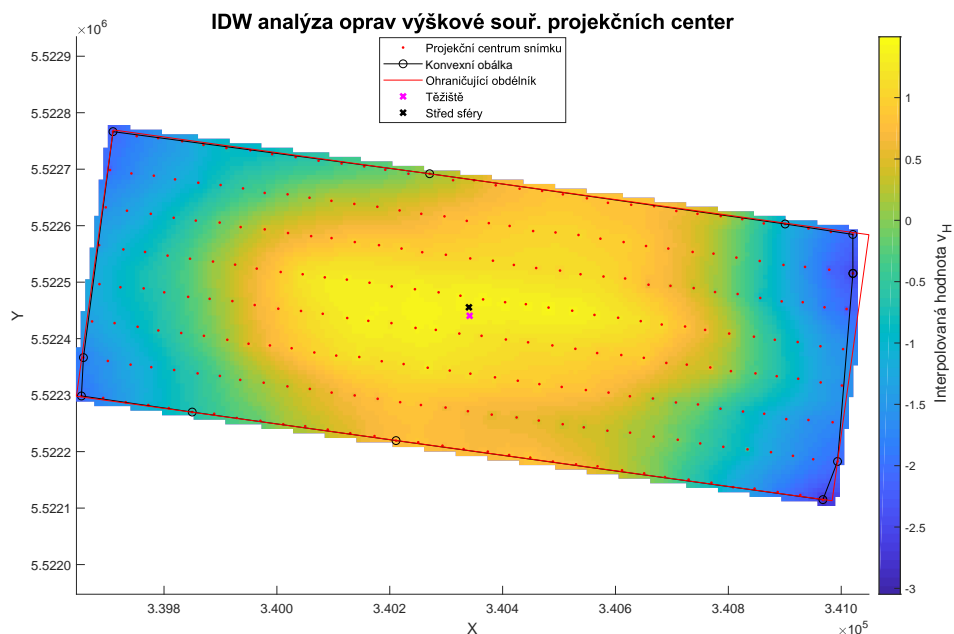
Informace o lokalitě jsou uvedeny v příloze A.7. Proložení sférou (obrázek 38) i směrová analýza oprav (obrázek 39) v tomto případě nevykazují viditelné zatížení systematickou chybou. Se stejným výsledkem dopadly IDW analýzy oprav výšek i souřadnic X a Y. Vyhodnocení je provedeno pro kameru Canon S110 NIR.

7.3 Výstupy algoritmu DEAn pro multispektrální kamery

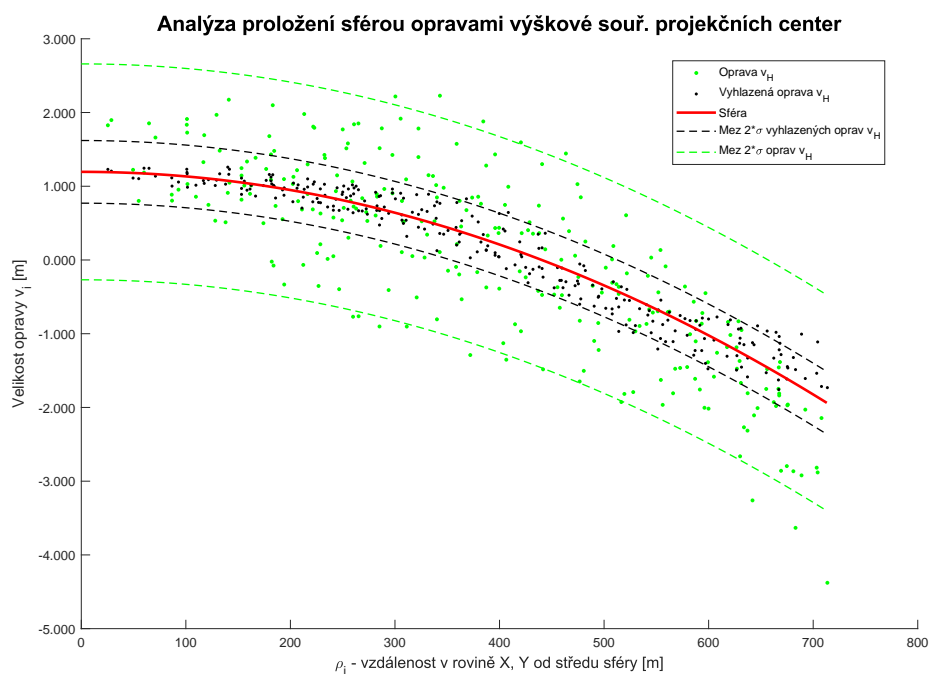
7.3.1 Výstupy algoritmu DEAn pro opevnění z Třicetileté války u obce Sedliště, multispektrální snímkování

Popis lokality je uveden v příloze A.8. IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center je uvedena na obrázku 40. Vyobrazení středově symetrické části systematické chyby je zde velmi dobře znázorněné. Analýza proložení sférou vyhlazených oprav výškových souřadnic projekčních center je na obrázku 41. Průhyb dosahuje ve středu sféry hodnoty okolo 1.2 m. Směrová analýza je uvedena na obrázku 42. Ve směrové analýze je poměrně malá odchylka dat od ideální hodnoty opravy ze sféry, tedy další vlivy zde

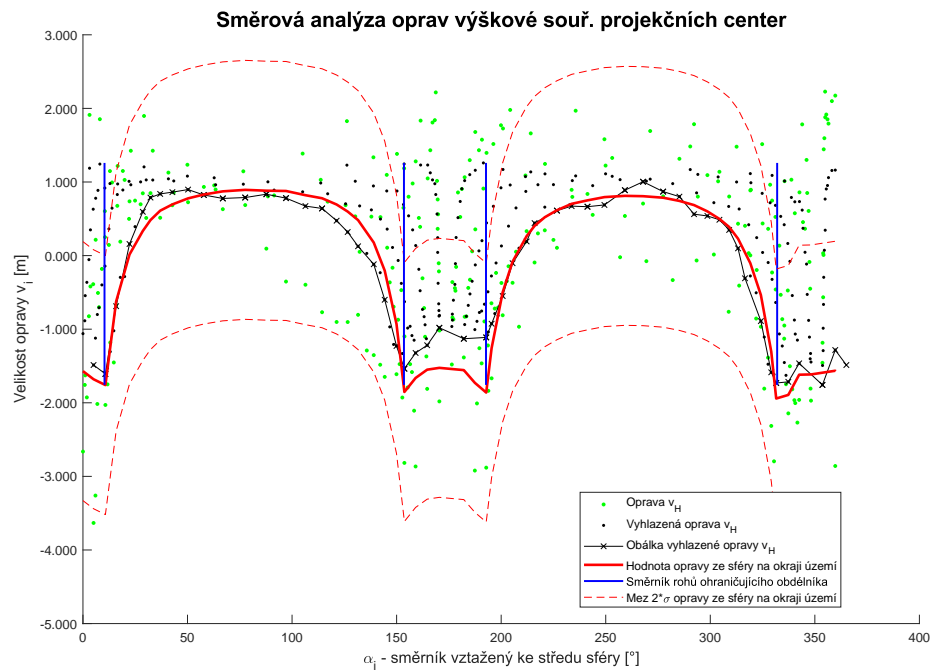
působily jen minimálně. Ke snímkování byla použita multispektrální kamera multiSPEC 4C.



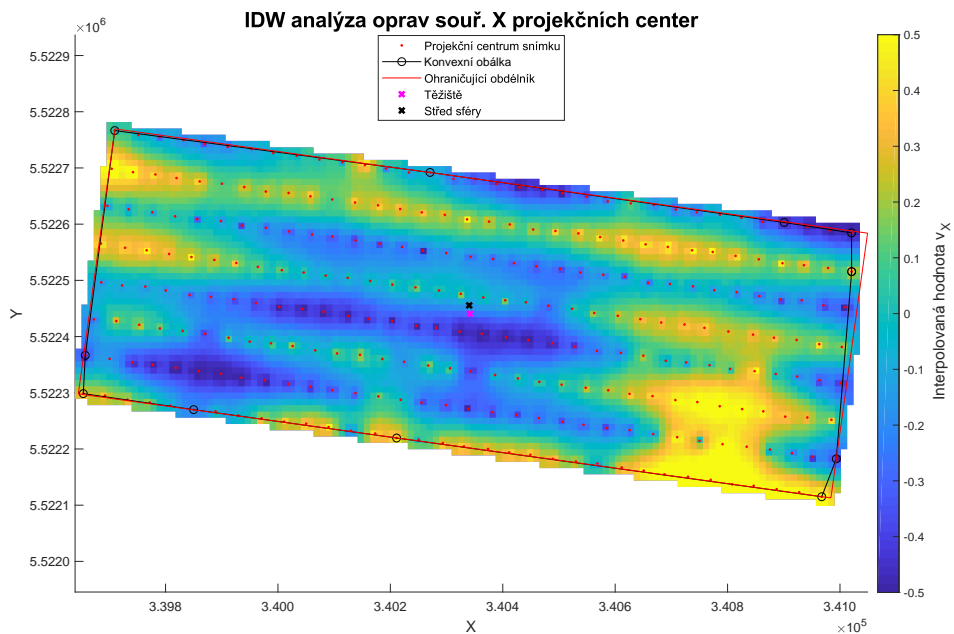
Obrázek 40: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.



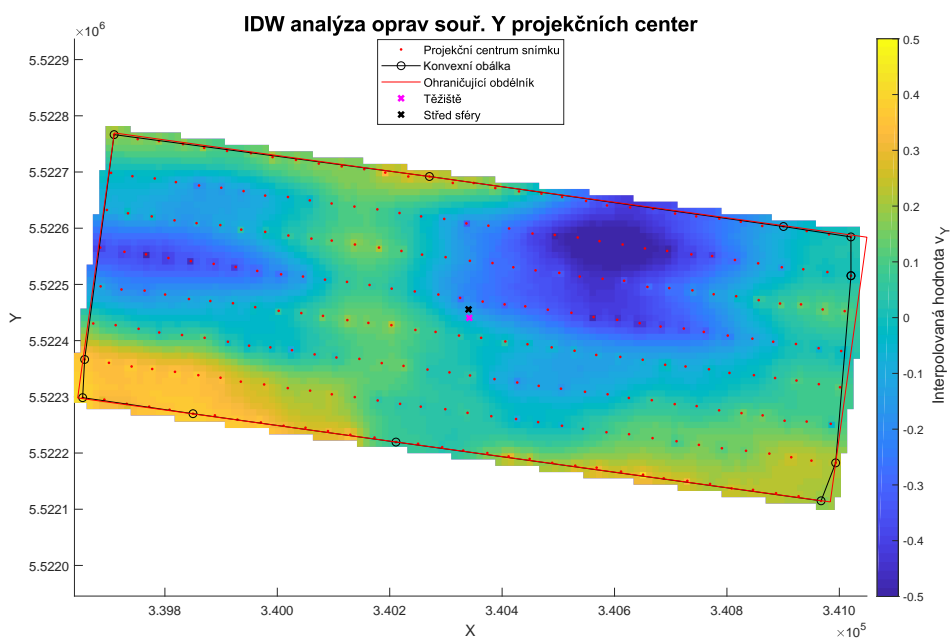
Obrázek 41: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.



Obrázek 42: Směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.

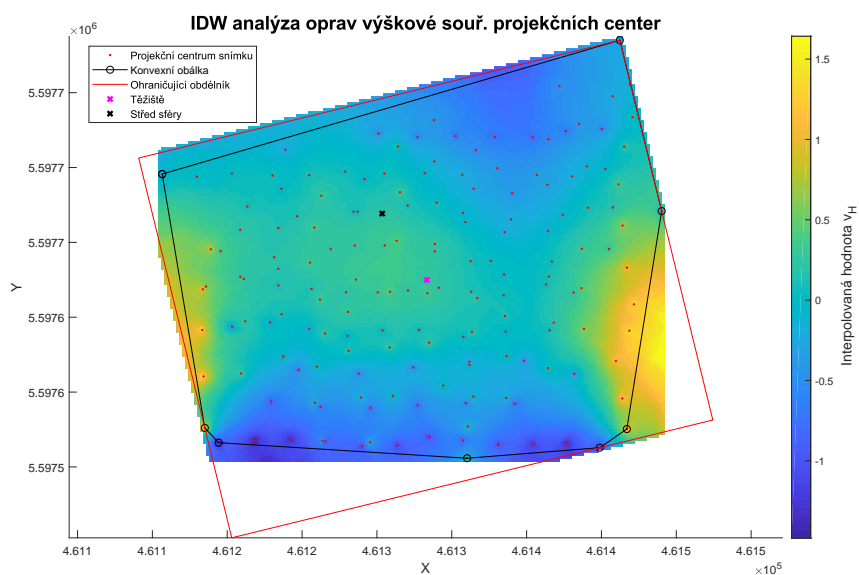


Obrázek 43: IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.

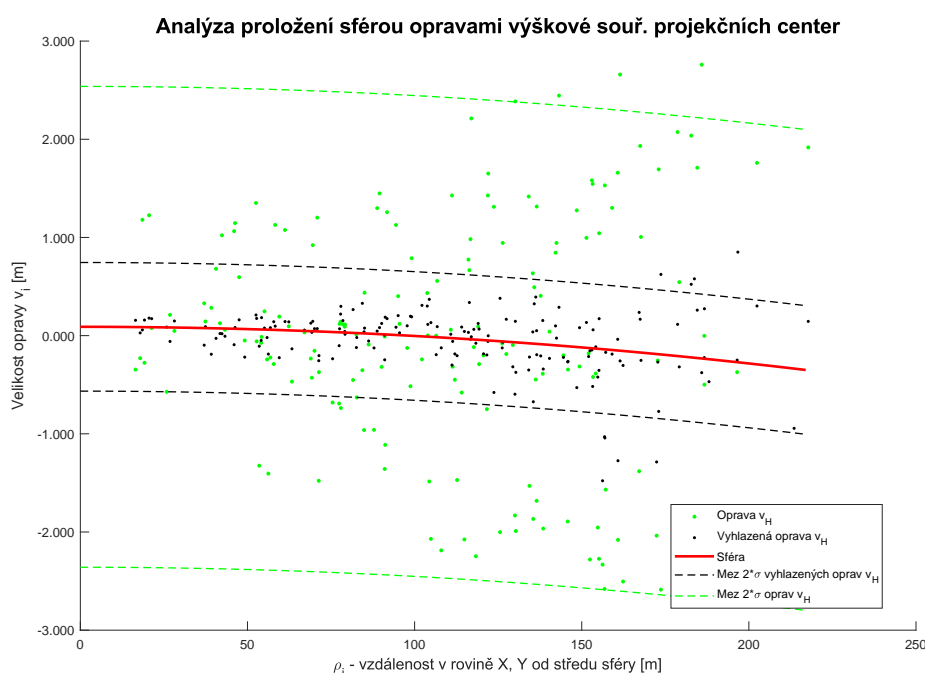


Obrázek 44: IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, multispektrální snímkování.

7.3.2 Výstupy algoritmu DEAn pro lokalitu u obce Tuhaň, multispektrální snímkování



Obrázek 45: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro lokalitu u obce Tuhaň.



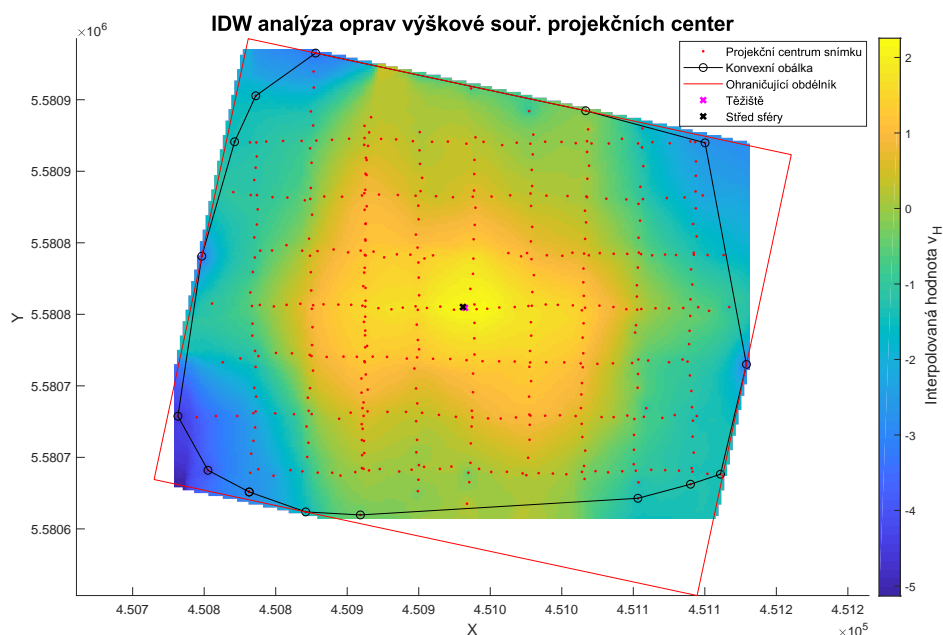
Obrázek 46: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro lokalitu u obce Tuhaň.

Podrobný popis lokality je uveden v příloze A.9. Na obrázku 45 jsou viditelné deformace na okrajích území. Na severní a jižní straně nabývá deformace záporného znaménka a na východní a západní straně nabývá deformace kladné hodnoty. To na obrázku 46 odpovídá vyššímu rozptylu vyhlazených oprav v pravé části grafu proložení sférou. Snímkování proběhlo multispektrální kamerou Sequoia.

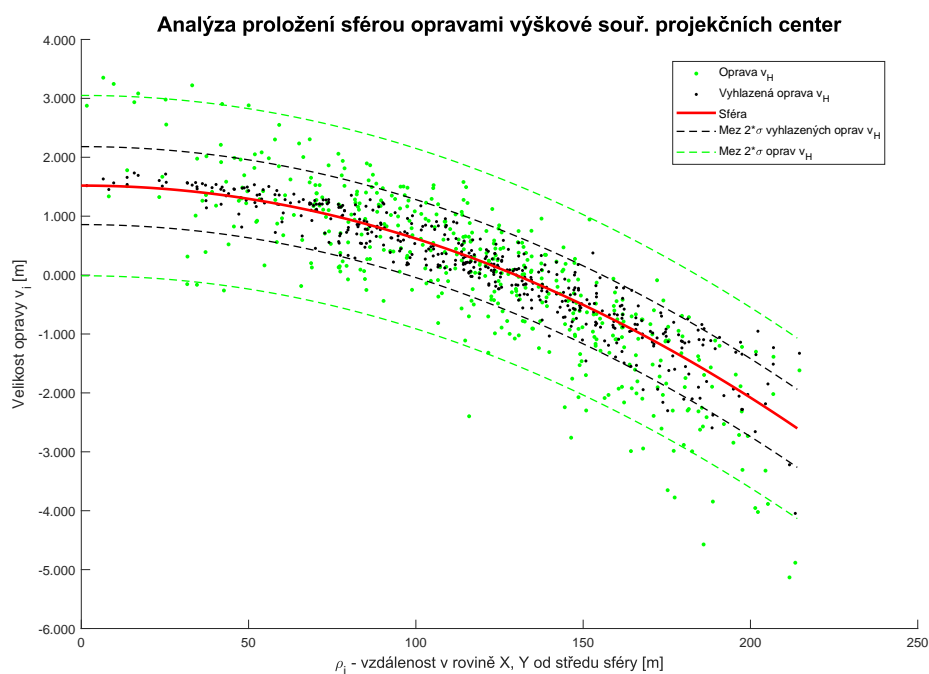
7.4 Výstupy algoritmu DEAn pro termální kameru

7.4.1 Výstupy algoritmu DEAn pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování

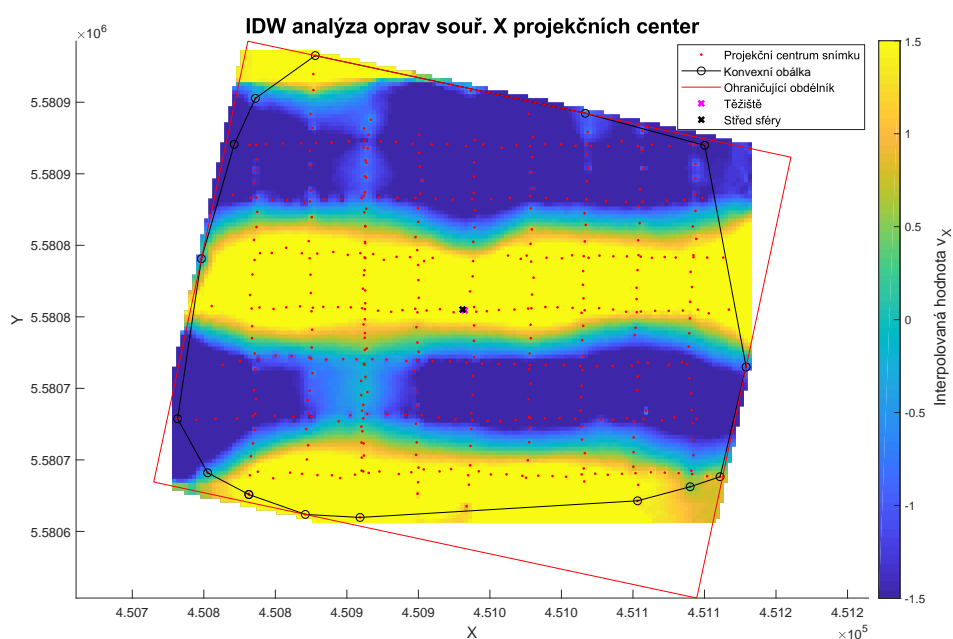
Informace o lokalitě jsou uvedeny v příloze A.7. Na obrázku 47 je systematická chyba zobrazena poměrně dobře středově symetricky. Obrázek 48 znázorňuje poměrně dobré proložení sférou vyhlazenými opravami. Ale IDW analýza pro opravy souřadnice X a Y projekčních center na obrázku 49 a 50 ukazuje vysoké odchylky oproti ostatním hodnoceným lokalitám a kamerám. Použitá termální kamera je thermoMAP.



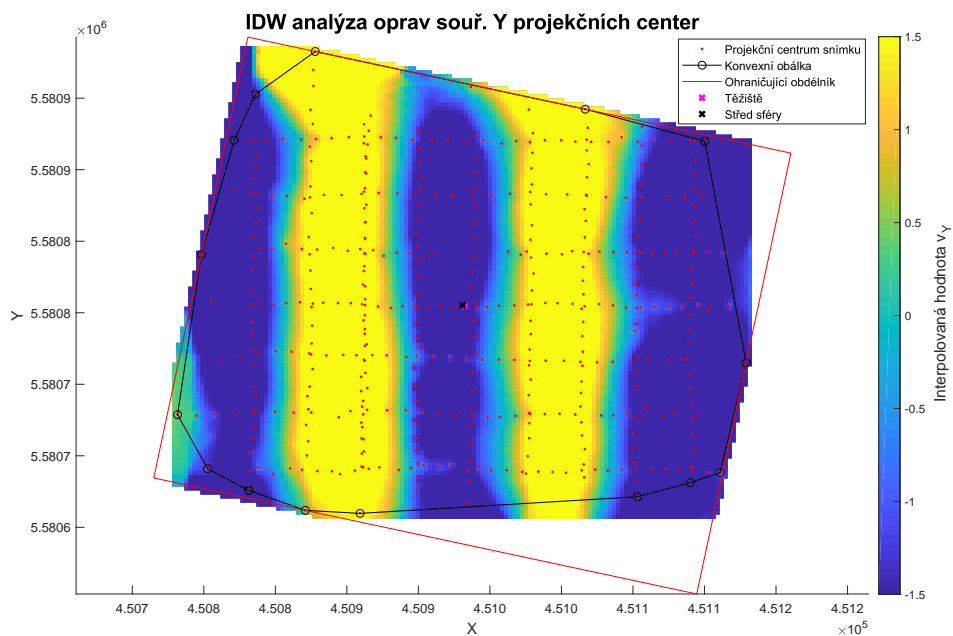
Obrázek 47: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování.



Obrázek 48: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování.



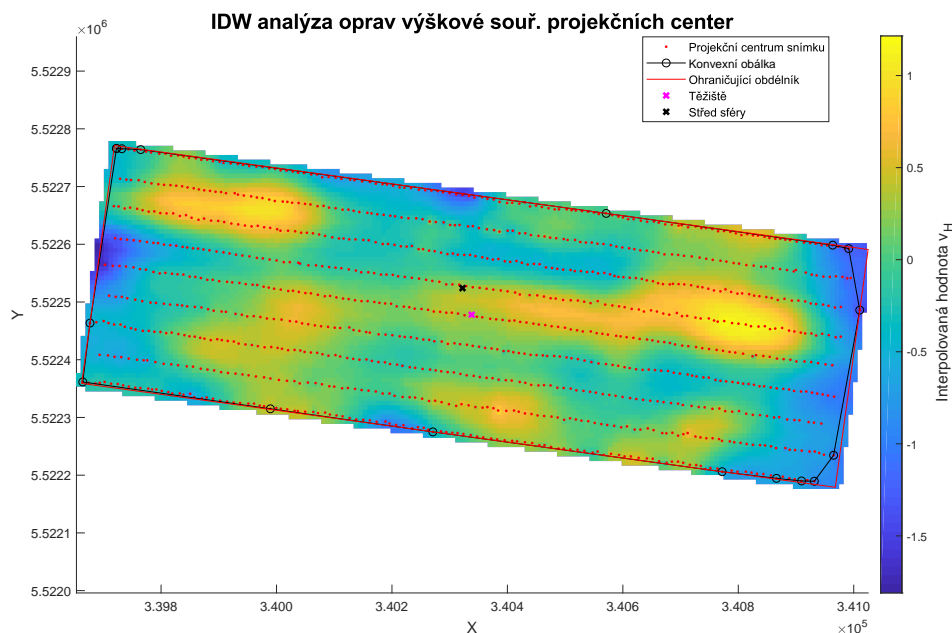
Obrázek 49: IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování.



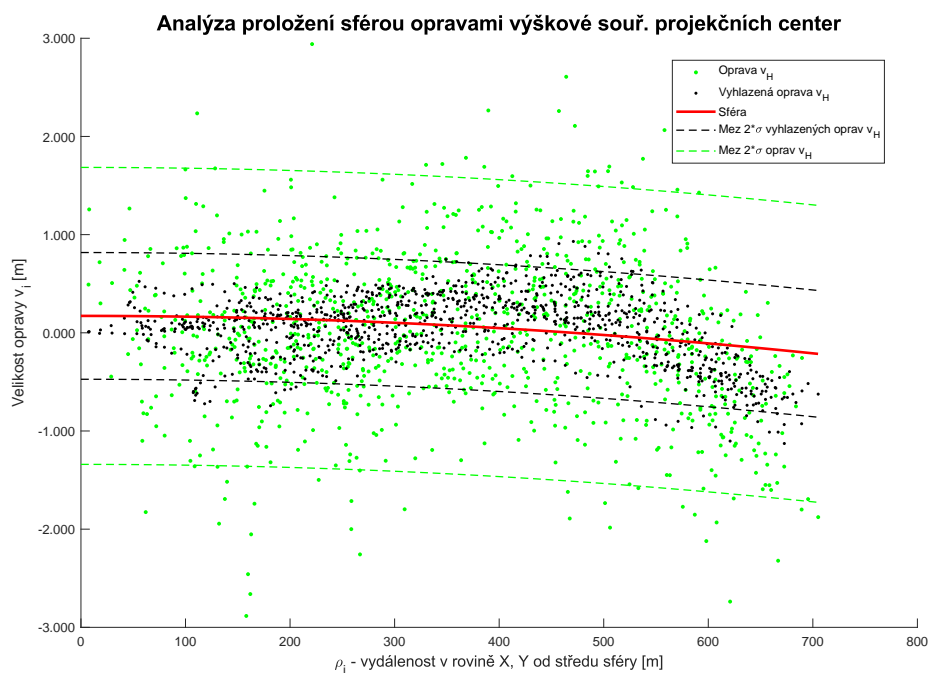
Obrázek 50: IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro archeologickou lokalitu Ctiněves, termální snímkování.

7.4.2 Výstupy algoritmu DEAn pro opevnění z Třicetileté války u obce Sedliště, termální snímkování

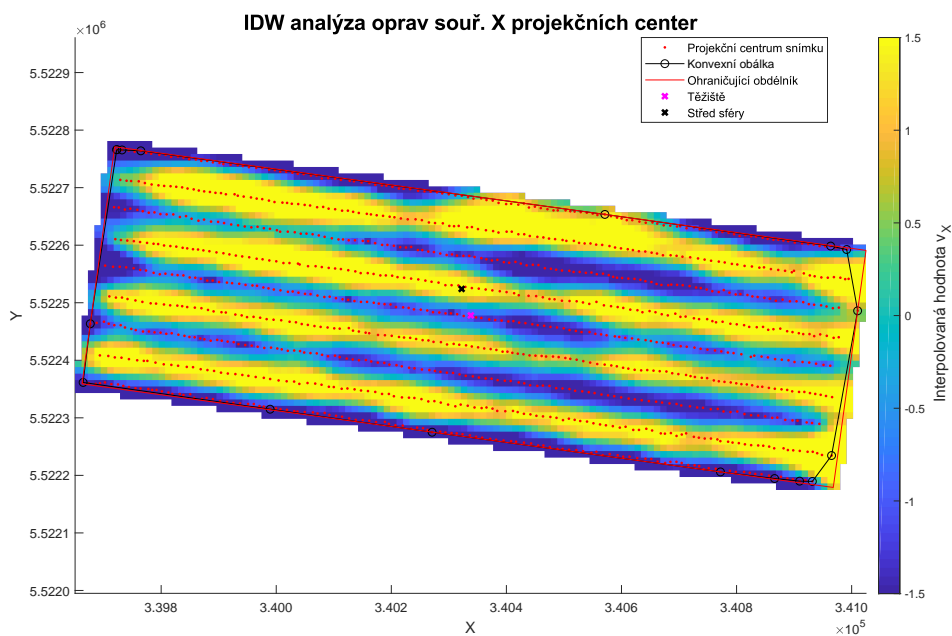
Popis lokality je uveden v příloze A.8. IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center je uvedena na obrázku 51. Analýza v tomto případě vykazuje nepravidelné rozložení chyb. Na snímku 52 proložení sférou neodpovídá vhodné křivce pro proložení vyhlazenými opravami. Vhodnější křivka by byla podobná typu funkce *sinus*. Stejně jako v předchozím případě, vykazuje IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center neobvykle vysoké odchylky oproti ostatním lokalitám, obrázek 53. Naproti tomu IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center tyto nezvykle vysoké odchylky nevykazuje, jak je patrné na obrázku 54. Snímkování oblasti proběhlo termální kamerou thermoMAP.



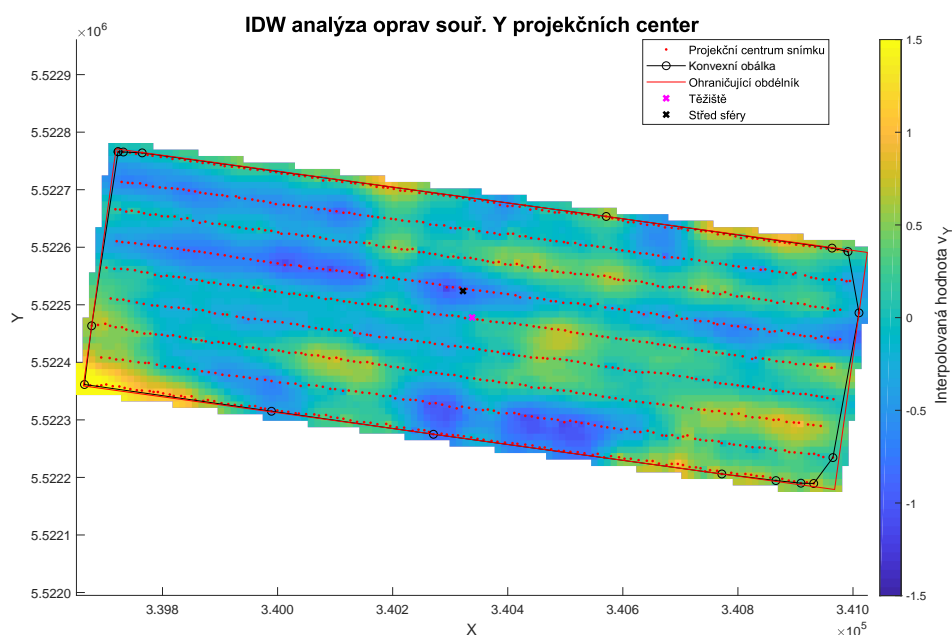
Obrázek 51: IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování.



Obrázek 52: Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování.



Obrázek 53: IDW analýza oprav souřadnice X projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování.



Obrázek 54: IDW analýza oprav souřadnice Y projekčních center pro opevnění z Třicetileté války, termální snímkování.

7.5 Shrnutí výsledků aplikace algoritmu DEAn na vybraných lokalitách

Algoritmus *DEAn* byl aplikován na různá území, která byla snímkována různými kamerami. Ke snímkování byly použity kamery snímkové ve viditelném spektru (VIS) Canon IXUS 127 HS a S.O.D.A, v blízkém infračerveném spektru (NIR) Canon PowerShot ELPH 110 HS a Canon S110 NIR, multispektrální kamery (MultiSPEC 4C a Sequoia) a termální kamera (ThermoMAP).

Ukázkovým příkladem analýzy oprav souřadnic projekčních center je projekt multispektrálního snímkování opevnění z Třicetileté války u obce Sedliště uvedený v kapitole 7.3.1. IDW analýza oprav výškové souřadnice projekčních center na obrázku 40 vykazuje rotačně symetrickou systematickou chybu. Analýza proložení sférou vyhlazenými opravami výškové souřadnice projekčních center, obrázek 41, a směrová analýza oprav výškové souřadnice projekčních center, obrázek 42, popisují systematickou chybu modelu poměrně věrně. IDW analýzy oprav souřadnic X a Y projekčních center nevykazují výrazné systematické rozložení chyb, jak je ukázáno na obrázcích 43 a 44.

Kapitola 8

Hodnocení výsledků algoritmu Korata

Pro otestování dosažené přesnosti aplikace algoritmu *Korata* byly vybrané projekty rozděleny do dvou hlavních kategorií na základě počtu vlíčovacích bodů. Pokud bylo ve sledovaném území rozmístěno alespoň 8 vlíčovacích bodů, pak byla dosažená přesnost hodnocena odchylkami obdržnými na vlíčovacích bodech. Vlícovací body byly použity pouze k prostorové transformaci fotogrammetrického modelu. Pokud byl počet vlíčovacích bodů menší, dosažená přesnost fotogrammetrického modelu byla hodnocena na základě porovnání rastrových digitálních modelů.

8.1 Hodnocení dosažené přesnosti na vlíčovacích bodech

Aby bylo možné zvolit toto kritérium hodnocení přesnosti fotogrammetrického modelu po aplikaci algoritmu *Korata*, byl vyžadovaný počet vlíčovacích bodů zvolen na hodnotu 8. Hodnota byla zvolena na základě analýzy vybraných území, a aby výsledky byly statisticky vypovídající. Při zpracování byly vytvořeny dva fotogrammetrické modely. Ve výchozím modelu byla provedena orientace snímků a svazkové vyrovnání s filtrací spojovacích bodů. Do prvního fotogrammetrického modelu byly nahrány souřadnice vlíčovacích bodů. Vlícovací body byly označeny na snímcích a vstupovaly do následného svazkového vyrovnání. Druhý fotogrammetrický model vznikl aplikací algoritmu *Korata* na výchozí model. Následně byly do modelu nahrány souřadnice vlíčovacích bodů a vlícovací body byly označeny na snímcích. Byla prove-

dena prostorová transformace na všechny dostupné vlčovací body. Důvod volby všech vlčovacích bodů pro transformaci byl, že v aplikaci Metsahape je do prostorové transformace implementována další dílčí transformace bez možnosti uživatelského zásahu, jak je ukázáno na obrázku 55. V horní části obrázku je ukázána odchylka ve výšce -1.121 m dosažená na vlčovacím bodě č. 122. Vlčovací bod byl použit pro prostorovou transformaci. Ve středu obrázku byl bod 122 pouze odznačen. Hodnota opravy výšky se změnila na -1.252 m . Ve spodní části obrázku je hodnota opravy výšky na bodě 122 po aplikaci prostorové transformace. Hodnota opravy výšky se změnila na -1.974 m . Bod 122 je okrajovým bodem modelu, to způsobuje kumulaci velikosti opravy při odznačení bodu a následné transformaci modelu. Význam další dílčí transformace (střed obrázku 55) je neobjasněn.

<input checked="" type="checkbox"/>		122	0.420375	-0.198520	-1.120879	1.213464
Total Error						
		Control points	0.185599	0.150274	0.736062	0.773832
		Check points				
<input type="checkbox"/>		122	0.422823	-0.204590	-1.252411	1.337599
Total Error						
		Control points	0.146674	0.145094	0.690526	0.720688
		Check points	0.422823	0.204590	1.252411	1.337599
<input type="checkbox"/>		122	0.567804	-0.264592	-1.974274	2.071272
Total Error						
		Control points	0.120680	0.153097	0.664657	0.692655
		Check points	0.567804	0.264592	1.974274	2.071272

Obrázek 55: Dosažené odchylky na vlčovacím bodě po aplikaci prostorové transformace.

Testování bylo provedeno na třech lokalitách – Skoránov (příloha A.4), Nová Ves (příloha A.5), Litoměřice (příloha A.2) a Chlumeč (příloha A.10). Všechna území byla snímkována systémem eBee. V prvních dvou lokalitách byla použita kamera S.O.D.A. a v posledních lokalitách byla použita kamera Canon IXUS 127 HS. Všechny snímkové lety byly provedeny za větrného počasí. Pro území Skoránov dosahoval vítr v nárazech až cca 8 m/s počasí bylo poměrně slunečné. Povětrnostní podmínky při snímkovém letu v Nové Vsi byly příznivé, vítr dosahoval rychlosti cca $3\text{--}5\text{ m/s}$, bylo slunečné počasí. Pro území Chlumeč byly nárazový vítr okolo 10 m/s , bylo zamračeno. V lokalitě u Litoměřic dosahoval vítr přibližně 7 m/s a zamračeno. Výsledky testu shrnuje tabulka 27. Z tabulky je patrné, že algoritmus *Korata* byl výrazně horší u snímkové lokality Chlumeč. V ostatních případech je přesnost stejná, nebo o trochu lepší, než při svazkovém vyrovnání bez vlčovacích bodů. Pro lokality Litoměřice, Nová Ves a Skoránov je přesnost vyhovující podmínkám katastru nemovitostí.

	Počet a typ bodů	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_H [m]
Litoměřice	25 TB	0.016	0.019	0.235
	25 VB	0.009	0.014	0.028
	Korata + 25 TB	0.059	0.114	0.056
Chlumec	12 TB	0.375	0.240	0.369
	12 VB	0.077	0.079	0.060
	Korata + 12 TB	0.186	0.150	0.736
Skoranov	12 TB	0.090	0.105	0.210
	12 VB	0.077	0.089	0.170
	Korata + 12 TB	0.088	0.100	0.204
Nová Ves	8 TB	0.009	0.009	0.015
	8 VB	0.009	0.009	0.016
	Korata + 8 TB	0.012	0.007	0.031

Tabulka 27: Hodnocení aplikace algoritmu Korata na vlíčovacích bodech

Označení VB je pro vlíčovací bod vstupující do svazkového vyrovnání a TB pro vlíčovací bod určený pro prostorovou transformaci modelu.

Předmětem dalšího zkoumání v této oblasti by mělo být zaměření se na vliv povětrnostních podmínek a typ použité kamery. Vyhodnocení území Skoranova uvedené v tabulce 27 naznačuje, že povětrnostní vlivy by mohly mít významnou roli při působení na přesnost výstupů z RPAS.

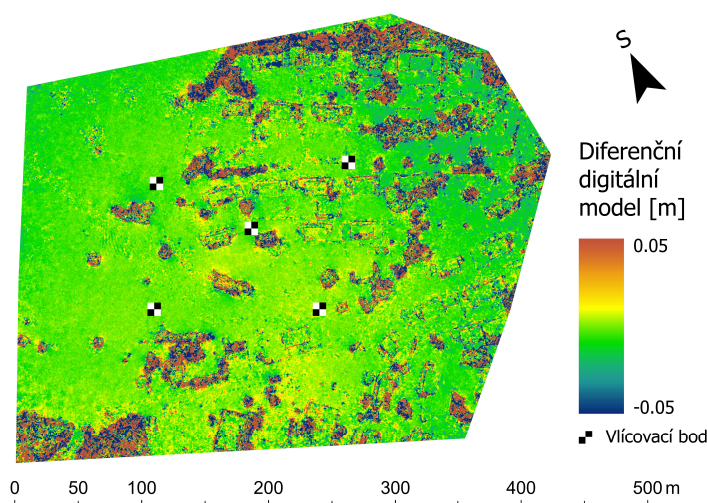
8.2 Porovnání rastrových digitálních modelů

Pro každé porovnání byly vytvořeny tři modely území. Ve výchozím modelu byla provedena orientace snímků a svazkové vyrovnání s filtrací spojovacích bodů. První model vznikl nahráním vlíčovacích bodů do modelu a označením vlíčovacích bodů na snímcích. Následně byla provedena prostorová transformace na všechny vlíčovací body. Druhý model vznikl z prvního, kdy bylo aplikováno svazkové vyrovnání spolu s vlíčovacími body. Poslední model vznikl z výchozího modelu, na který byl aplikován algoritmus *Korata*. Poté byly nahrány souřadnice vlíčovacích bodů do projektu a označeny na snímcích. Byla provedena prostorová transformace modelu na vlíčovací body. V každém projektu bylo vytvořeno husté mračno s nastavením úrovně tvorby hustého mračna na medium. Následně byla vygenerována polygonová síť, tak aby hustota sítě odpovídala denzitě hustého mračna. Nakonec byl vygenerován georeferencovaný rastrový digitální model s rozlišením $10\text{ cm}/\text{pix}$. Byly vytvořeny dva diferenční rastrové digitální modely, pro rastrový model vzniklý po aplikaci algoritmu *Korata* a druhý vzniklý transformací vyrovnaného modelu na vlíčovací body. Úkolem diferenčních digitálních modelů je zjistit velikost zbytkové systematické chyby fotogrammetrického modelu. Diferenční

modely byly vztaženy k modelu, který byl vyrovnán spolu s vlíčovými body. Vyhodnocení bylo aplikováno na lokality Mariánská, Mšené-lázně a Počáply.

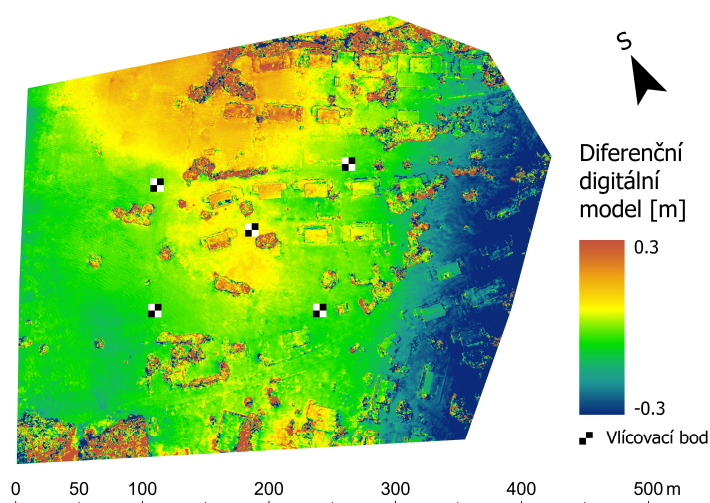
■ Chatová osada Mariánská u Jáchymova

Podrobnosti o lokalitě Mariánská jsou uvedeny v příloze A.11. Na obrázku 56 je zobrazen diferenční (rastrový) digitální model oblasti. Tento model vznikl jako rozdíl dvou DMP (digitální model povrchu). Fixní DMP byl model, do jehož svazkového vyrovnání vstupovaly vlíčovací body. Porovnávaným modelem byl DMP vzniklý svazkovým vyrovnáním modelu bez vlíčovacích bodů a použitím vlíčovacích bodů pouze k prostorové transformaci.



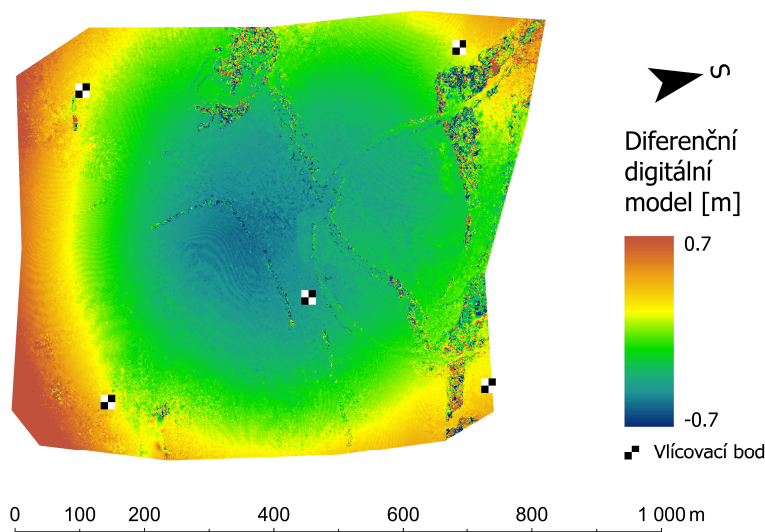
Obrázek 56: Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlíčovacích bodů.

Obrázek 57 je diferenční DMP, kde fixní model je stejný jako v předchozím případě. Porovnávaný DMP vznikl aplikací algoritmu Korata a aplikací prostorové transformace na vlíčovací body. V obrázku 56 je rozdíl prakticky nulový. V obrázku 57 lze pozorovat mírné zhoršení ve středu zájmové oblasti vymezené vlíčovacími body. Dále lze pozorovat chyby v modelu v jeho severní a východní části. Tyto výraznější chyby jsou mimo vyhodnocovanou oblast (oblast vymezená vlíčovacími body) a na samotném okraji snímkaného území.



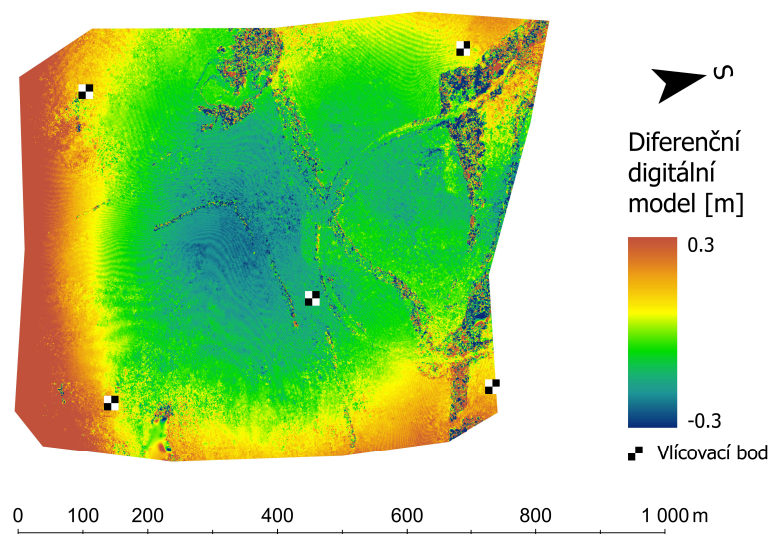
Obrázek 57: Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu *Korata*.

■ Území u Mšených-lázní



Obrázek 58: Diferenční DMP trati u Mšených-lázní vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlčovacích bodů.

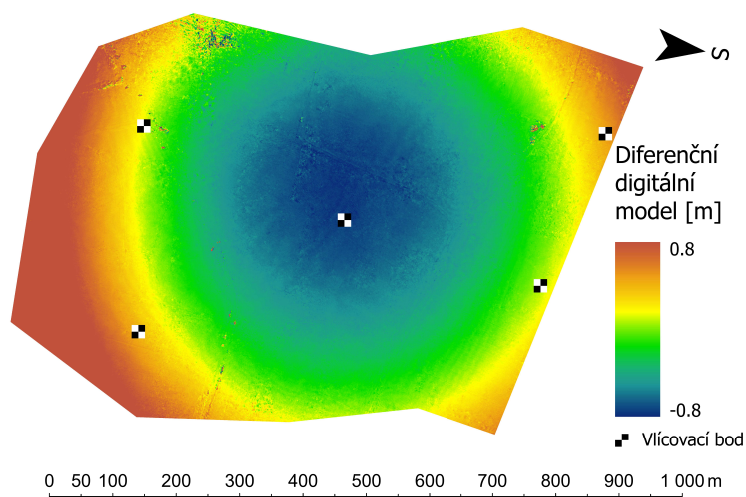
Informace o snímkaném území Mšených-lázní jsou uvedeny v příloze A.12. Na obrázku 58 je vyobrazen diferenciální DMP, vzniklý jako rozdíl modelu, kde do svazkového vyrovnání vstupují vlčovací body a modelu, kde jsou vlčovací body použity pouze pro prostorovou transformaci. Na obrázku 59 je diferenciální DMP vzniklý z modelu, kde vlčovací body vstupují do svazkového vyrovnání a modelu, kde po aplikaci algoritmu *Korata*.



Obrázek 59: Diferenční DMP lokality Mariánská vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu *Korata*.

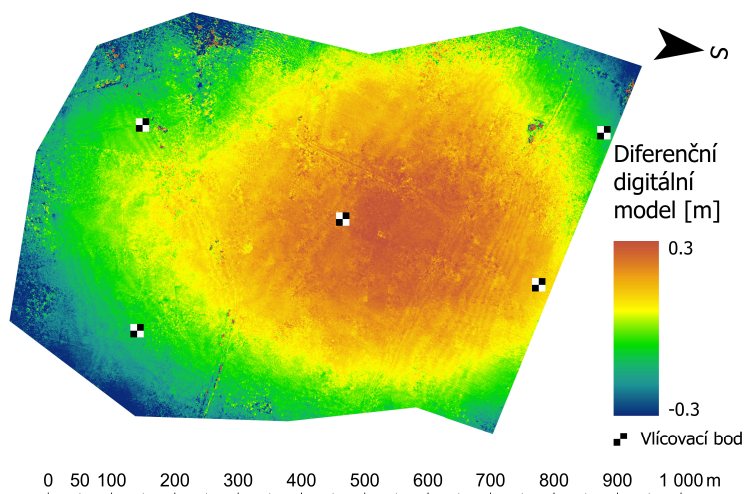
Průhyb modelu na obrázku 58 dosahuje hodnoty cca -50 cm ve středu modelu. Průhyb v modelu uvedeném na obrázku 59 dosahuje přibližně -25 cm. Algoritmus *Korata* zlepšil průběh DMP ve středu území o 50%.

■ Oblast u obce Počáply



Obrázek 60: Diferenční DMP u obce Počáply vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP vyrovnaného bez vlíčovacích bodů.

Data o lokalitě Počáply jsou uvedena v příloze A.13. Obrázek 60 představuje diferenční DMP, vzniklý z fixního modelu a modelu ze svazkového vyrovnání bez vlíčovacích bodů. Obrázek 61 představuje diferenční DMP vzniklý z fixního modelu a modelu vzniklého po aplikaci algoritmu *Korata*.



Obrázek 61: Diferenční DMP u obce Počáply vzniklý z rozdílu fixního DMP a DMP po aplikaci algoritmu *Korata*.

Z obrázku 60 je možné odečíst průhyb ve středu modelu o velikosti cca -70 cm. Aplikace algoritmu *Korata* změnila průhyb modelu na cca +25 cm a tím zlepšila přesnost o cca 65%, jak je vidět na obrázku 61.

8.3 Shrnutí výsledků aplikace algoritmu Korata

Aplikace algoritmu *Korata* výrazně zhoršila přesnost fotogrammetrického modelu na lokalitě Chlumec. Zhoršení modelu může být způsobeno meteorologickými podmínkami při snímkovém letu a použitou kamerou ke snímkování. Na ostatních hodnocených lokalitách byla přesnost přibližně stejná nebo lepší. *Korata* v porovnání diferenčních modelů si vedla obdobně v jednom případě, k výraznějšímu zpřesnění došlo ve zbylých dvou hodnocených případech a to o 50% a 65%. Zbytkový průhyb fotogrammetrického modelu zůstává. Příčinou této zbytkové chyby modelu může být i to, že algoritmus *Korata* minimalizuje prostorovou střední chybu. Zbytková chyba modelu může zůstat v důsledku dalších vlivů působících na přesnost určení souřadnice X a Y GNSS metodou.



Závěr

V práci jsou představeny a probrány jednotlivé vlivy působící na přesnost výstupů z RPAS z pohledu aktuálního řešení ve světě. Probírána je kalibrace kamery a její význam v optimalizaci svazkového vyrovnání, korelace prvků vnitřní a vnější orientace, volba překrytu snímků pro snímkový let a další vlivy jako návrh sítě projekčních center a vliv GNSS RTK měření na přesnost výstupů a minimalizaci práce v terénu.

Byl navržen algoritmus *DEAn*, který analyzuje souřadnicové opravy projekčních center. Na základě analýzy detekuje systematické chyby, pokud působí ve fotogrammetrickém modelu. Tato systematická chyba nabývá významných hodnot při aplikaci svazkového vyrovnání bez použití vlíčovacích bodů a bez zavedení dalších opatření. Takovými opatřeními jsou například vhodný návrh sítě projekčních center a zařazení šikmých snímků do snímkového letu.

Byl vytvořen algoritmus *Korata*, který iteračně optimalizuje prvky vnitřní orientace tím, že minimalizuje střední chyby souřadnicových oprav projekčních center. Algoritmus je navržen pro lokality, kde při snímkovém letu nebyly použity vlíčovací body. Dosažené zpřesnění modelu bylo cca 50%. V jednom případě byla přesnost modelu zhoršena, jednalo se o snímkový let, který byl proveden za špatných světelných podmínek a za větrného počasí. Algoritmus aktuálně není aplikovatelný na multispektrální kamery. Porovnání očekávaných poklesů středních chyb oprav výškových souřadnic projekčních center algoritmu *DEAn* a *Korata* jsou uvedeny v tabulce 28. Z tabulky je zřejmé, že indikovaný možný pokles středních chyb ve výšce z algoritmu *DEAn* je algoritmem *Korata* dodržen. Výjimku tvoří lokalita Vysokého Sedliště, kde je chyba v orientace snímků, více je uvedeno v kapitole 7.5.

Lokalita	<i>DEAn</i>		<i>Korata</i>	
	σ_H [m]	σ_H sf. [m]	σ_H [m]	σ_H <i>Korata</i> [m]
Makhmur al-Quadima	1.284	1.008	1.245	0.948
Litoměřice	1.012	0.987	1.009	0.937
Ledovec Knud Rasmussen	0.955	0.964	0.951	0.950
Ctiněves MSS S110	0.530	0.532	0.385	0.380
Vysoké Sedliště (termální)	0.767	0.755	1.077	1.189
Mšeno	0.557	0.501	0.531	0.485
Počáply	1.124	0.931	1.037	0.870
Chlumec	0.924	0.917	0.908	0.904
Skoranov	0.744	0.742	0.743	0.743
Nová Ves	0.576	0.580	0.575	0.576

Tabulka 28: Porovnání očekávaného poklesu středních chyb ve výšce z algoritmu *DEAn* a vypočtených středních chyb po aplikaci algoritmu *Korata*

σ_H je střední chyba souřadnicových oprav ve výšce, σ_H sf. je střední chyba ve výšce vztažená ke sféře a σ_H *Korata* je střední chyba ve výšce po aplikaci algoritmu *Korata*.

Porovnáním výsledků RPAS vybaveného GNSS RTK měřením a RPAS vybaveného kódovým měřením bylo dospěno k závěru, že hlavním přínosem GNSS RTK měření je možnost použití jednoho vlíčovacího bodu umístěného ve středu snímkováného území. Pokud byly v území použity vlíčovací body ve vhodné konfiguraci a hustotě, pak je rozdíl v dosažených přesnostech výstupů mezi GNSS RTK měřením a GNSS kódovým měřením minimální.

Byla zjištěna závislost přesnosti výstupů z RPAS na meteorologických podmínkách snímkového letu. Pokud jsou špatné světelné podmínky při snímkovém letu, nebo zhoršené větrné podmínky, dochází ke smazu snímků a tím je přesnost vytvořeného modelu narušena. Smaz snímků na některých vlíčovacích bodech dosahoval více jak deseti násobku GSD. Smaz dosahoval takto vysokých hodnot, protože k pořízení snímku byl použit RPAS typu křídlo, který není vybaven gimbaelem. Tento problém je částečně eliminován při použití multikoptér. V porovnání s profesionální leteckou fotogrammetrií, kde jsou kamery upevněny do závěsů a stabilita samotného letadla je nesrovnatelně lepší, jsou na tom RPAS se svou kvalitou výstupů o poznání hůře. RPAS tuto nevýhodu kompenzují svým nasazením v malých lokalitách, kde cena profesionálního fotogrammetrického letadla vysoce převyšuje systém RPAS. Přesnost výstupů z RPAS postačuje pro většinu běžných geodetických aplikací a časová náročnost měření v porovnání s klasickým geodetickým zaměřením je podstatně kratší.

Seznam zkratek

RPA	dálkově řízené letadlo (anglicky: Remotely Piloted Aircraft)
RPAS	systém zdálkově řízeného letadla (anglicky: Remotely Piloted Aircraft System)
UAV	totéž jako RPA (anglicky: Unmanned Aerial Vehicle)
UAS	totéž jako RPAS (anglicky: Unmanned Aircraft System)
GNSS	globální navigační družicový systém, (anglicky: Global Navigation Satellite System)
RTK	kinematické měření prováděné v reálném čase (anglicky: Real-time Kinematic)
PPK	kinematické měření prováděné následným zpracováním (anglicky: Post Processing Kinematic)
GSD	pozemní vzdálenost vzorků (anglicky: Ground Sampling Distance)
VIS	viditelné spektrum (anglicky: Visible Spectrum)
NIR	blízké infračervené (blízká infračervená oblast spektra) (anglicky: Near-infrared)
IDW	vážené inverzní vzdálenosti (anglicky: Inverse Distance Weighting)
Po	podélný překryt snímků
Př	příčný překryt snímků
XML	rozšiřitelný značkovací jazyk (anglicky: Extensible Markup Language)
MNČ	metoda nejmenších čtverců
W	šířka senzoru (pix/mm)
H	výška senzoru (pix/mm)
ISO	fotocitlivost fotografického filmu/senzoru zkratka převzata z normy ISO 5800:2001 a odkazuje na organizaci ISO (anglicky: International Organization for Standardization)
ϕ	průměr
σ	střední chyba
STD	varianta označení střední chyby (anglicky: Standard Deviation)
DMP	(digitální model povrchu)



Literatura

- [1] Pavel Hánek. Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí [online]. VÚGTK, c2005-2019, [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>.
- [2] P.G. Martin, O.D. Payton, J.S. Fardoulis, D.A. Richards, and T.B. Scott. The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines. *Journal of Environmental Radioactivity*, 143:135–140, may 2015.
- [3] Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle, and Jan Boehm. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter, jan 2020.
- [4] John F Kenefick, Maurice S Gyer, and Bill F Harp. Analytical self-calibration. *Photogrammetric Engineering*, 38(11):1117–1126, 1972.
- [5] L. Barazzetti, L. Mussio, F. Remondino, and M. Scaioni. TARGETLESS CAMERA CALIBRATION. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W16:335–342, sep 2012.
- [6] Petr Gabrlík, Anders la Cour-Harbo, Petra Kalvodová, Ludek Zalud, and Premysl Janata. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16):4931–4959, feb 2018.
- [7] P. C. Lim, J. Seo, J. Son, and T. Kim. ANALYSIS OF ORIENTATION ACCURACY OF AN UAV IMAGE ACCORDING TO CAMERA CALIBRATION. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13:437–442, jun 2019.

- [8] M. V. Y. Garcia and H. C. Oliveira. THE INFLUENCE OF GROUND CONTROL POINTS CONFIGURATION AND CAMERA CALIBRATION FOR DTM AND ORTHOMOSAIC GENERATION USING IMAGERY OBTAINED FROM a LOW-COST UAV. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-1-2020:239–244, aug 2020.
- [9] Steve Harwin, Arko Lucieer, and Jon Osborn. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*, 7(9):11933–11953, sep 2015.
- [10] M. Santise, M. Fornari, G. Forlani, and R. Roncella. Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5:529–536, jun 2014.
- [11] C. Strecha, W. von Hansen, L. Van Gool, P. Fua, and U. Thoennessen. On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery. In *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, jun 2008.
- [12] D. Brown. Decentering distortion of lenses. 1966.
- [13] J. C. Fryer and D. Brown. Lens distortion for close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:51–58, 1986.
- [14] Luigi Barazzetti, Marco Scaioni, and Fabio Remondino. Orientation and 3d modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132):356–381, dec 2010.
- [15] Salvatore Barba, Maurizio Barbarella, Alessandro Di Benedetto, Margherita Fiani, Lucas Gujski, and Marco Limongiello. Accuracy assessment of 3d photogrammetric models from an unmanned aerial vehicle. *Drones*, 3(4):79, oct 2019.
- [16] D. Skarlatos, E. Procopiou, G. Stavrou, and M. Gregoriou. Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing. In Diofantos G. Hadjimitsis, Kyriacos Themistocleous, Silas Michaelides, and George Papadavid, editors, *First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2013)*. SPIE, aug 2013.
- [17] Linfu Xie, Han Hu, Jingxue Wang, Qing Zhu, and Min Chen. An asymmetric re-weighting method for the precision combined bundle adjustment of aerial oblique images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117:92–107, jul 2016.

- [18] Yilin Zhou, Ewelina Rupnik, Paul-Henri Faure, and Marc Pierrot-Deseilligny. GNSS-assisted integrated sensor orientation with sensor pre-calibration for accurate corridor mapping. *Sensors*, 18(9):2783, aug 2018.
- [19] Francesco Benassi, Elisa Dall’Asta, Fabrizio Diotri, Gianfranco Forlani, Umberto Morra di Cella, Riccardo Roncella, and Marina Santise. Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with GNSS-supported aerial triangulation. *Remote Sensing*, 9(2):172, feb 2017.
- [20] G. Caroti, I. Martínez-Espejo Zaragoza, and A. Piemonte. ACCURACY ASSESSMENT IN STRUCTURE FROM MOTION 3d RECONSTRUCTION FROM UAV-BORN IMAGES: THE INFLUENCE OF THE DATA PROCESSING METHODS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W4:103–109, aug 2015.
- [21] Jim H. Chandler, John G. Fryer, and Amanda Jack. Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record*, 20(109):12–26, mar 2005.
- [22] Markus Gerke and Heinz-Jürgen Przybilla. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2016(1):17–30, mar 2016.
- [23] P. Wiącek and K. Pyka. THE TEST FIELD FOR UAV ACCURACY ASSESSMENTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-1/W2:67–73, sep 2019.
- [24] Ayman Habib and Michel Morgan. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6):733–741, jun 2005.
- [25] Rene Wackrow, Jim H. Chandler, and Paul Bryan. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. *The Photogrammetric Record*, 22(118):121–134, jun 2007.
- [26] Enoc Sanz-Ablanedo, José Ramón Rodríguez-Pérez, Julia Armesto, and María Flor Álvarez Taboada. Geometric stability and lens decentering in compact digital cameras. *Sensors*, 10(3):1553–1572, mar 2010.
- [27] M. R. Shortis, S. Robson, and H. A. Beyer. Principal point behaviour and calibration parameter models for kodak DCS cameras. *The Photogrammetric Record*, 16(92):165–186, oct 1998.
- [28] C. S. Fraser, S. Cronk, and C. Stamatopoulos. IMPLEMENTATION OF ZOOM-DEPENDENT CAMERA CALIBRATION IN CLOSE-RANGE

- PHOTOGRAMMETRY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5:15–19, jul 2012.
- [29] Clive S Fraser and Mark R Shortis. A correction model for variation of distortion within the photographic field. In *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision*, volume 1395, page 13950W. International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [30] Derek Lichti, Jan Skaloud, and Philipp Schaer. On the calibration strategy of medium format cameras for direct georeferencing. In *International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW*, number POST_TALK, 2008.
- [31] Peng Sun, Naiguang Lu, and Mingli Dong. Modelling and calibration of depth-dependent distortion for large depth visual measurement cameras. *Optics Express*, 25(9):9834, apr 2017.
- [32] E Mitishita, J Cortes, J Centeno, and AML MACHADO. Small-format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation. In *MMT09 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*. Citeseer, 2009.
- [33] H. Hastedt, T. Ekkel, and T. Luhmann. EVALUATION OF THE QUALITY OF ACTION CAMERAS WITH WIDE-ANGLE LENSES IN UAV PHOTOGRAMMETRY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1:851–859, jun 2016.
- [34] V. Tournadre, M. Pierrot-Deseilligny, and P. H. Faure. UAV PHOTOGRAMMETRY TO MONITOR DYKES – CALIBRATION AND COMPARISON TO TERRESTRIAL LIDAR. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1:143–148, mar 2014.
- [35] Yonglu Li, Yinghao Cai, Dayong Wen, and Yiping Yang. Optimization of radial distortion self-calibration for structure from motion from uncalibrated UAV images. In *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. IEEE, dec 2016.
- [36] Dean C. Merchant. Calibration of the air photo system. *Photogramm Eng*, 40(5):605–617, 1974.
- [37] E. Mitishita, J. Côrtes, J. Centeno, A. Machado, and M. Martins. Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration. volume 38, 2010. cited By 5.
- [38] Enoc Sanz-Ablanedo, Jim Chandler, José Rodríguez-Pérez, and Celestino Ordóñez. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM

- photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10):1606, oct 2018.
- [39] Mirko Saponaro, Alessandra Capolupo, Eufemia Tarantino, and Umberto Fratino. Comparative analysis of different UAV-based photogrammetric processes to improve product accuracies. In *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2019*, pages 225–238. Springer International Publishing, 2019.
- [40] D. Brown. Decentering distortion of lenses. 1966.
- [41] Mike R. James and Stuart Robson. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10):1413–1420, jun 2014.
- [42] L. Magri and R. Toldo. BENDING THE DOMING EFFECT IN STRUCTURE FROM MOTION RECONSTRUCTIONS THROUGH BUNDLE ADJUSTMENT. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6:235–241, aug 2017.
- [43] H.-J. Przybilla, M. Bäumer, T. Luhmann, H. Hastedt, and M. Eilers. INTERACTION BETWEEN DIRECT GEOREFERENCING, CONTROL POINT CONFIGURATION AND CAMERA SELF-CALIBRATION FOR RTK-BASED UAV PHOTOGRAMMETRY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020:485–492, aug 2020.
- [44] Enoc Sanz-Ablanedo, Jim H. Chandler, Pablo Ballesteros-Pérez, and José Ramón Rodríguez-Pérez. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(9):2134–2147, may 2020.
- [45] Toby Tonkin and Nicholas Midgley. Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(9):786, sep 2016.
- [46] Huseyin Yurtseven. Comparison of GNSS-, TLS- and different altitude UAV-generated datasets on the basis of spatial differences. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4):175, apr 2019.
- [47] M. Bolognesi, A. Furini, V. Russo, A. Pellegrinelli, and P. Russo. Accuracy of cultural heritage 3d models by RPAS and terrestrial photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5:113–119, jun 2014.
- [48] Markus Rumpler, Alexander Tscharf, Christian Mostegel, Shreyansh Daftry, Christof Hoppe, Rudolf Prettenthaler, Friedrich Fraundorfer, Gerhard Mayer, and Horst Bischof. Evaluations on multi-scale camera

networks for precise and geo-accurate reconstructions from aerial and terrestrial images with user guidance. *Computer Vision and Image Understanding*, 157:255–273, apr 2017.

- [49] Takeyuki Suzuki, Ina (Pix4D), Muhammed Emin Peker, and Beta (Pix4D). What is the relative and absolute accuracy of drone mapping. What is the relative and absolute accuracy of drone mapping [online]. Pix4D Support, [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558889-What-is-the-relative-and-absolute-accuracy-of-drone-mapping>.
- [50] Gianfranco Forlani, Elisa Dall’Asta, Fabrizio Diotri, Umberto Morra di Cella, Riccardo Roncella, and Marina Santise. Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing*, 10(2):311, feb 2018.
- [51] O. Mian, J. Lutes, G. Lipa, J. J. Hutton, E. Gavelle, and S. Borghini. DIRECT GEOREFERENCING ON SMALL UNMANNED AERIAL PLATFORMS FOR IMPROVED RELIABILITY AND ACCURACY OF MAPPING WITHOUT THE NEED FOR GROUND CONTROL POINTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W4:397–402, aug 2015.
- [52] Martin Štroner, Rudolf Urban, Tomáš Reindl, Jan Seidl, and Josef Brouček. Evaluation of the georeferencing accuracy of a photogrammetric model using a quadcopter with onboard GNSS RTK. *Sensors*, 20(8):2318, apr 2020.
- [53] Charles Jekel. Least Squares Sphere Fit [online]. jekel.me, [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://jekel.me/2015/Least-Squares-Sphere-Fit/>.
- [54] Donald Shepard. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. page 517–524, 1968.
- [55] Mapy.cz [online]. Mapy.cz, [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>.
- [56] J. Šedina, K. Pavelka, and E. Housarová. ARCHAEOLOGICAL DOCUMENTATION OF a DEFUNCT IRAQI TOWN. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1:1031–1035, jun 2016.
- [57] E. Housarová, K. Pavelka, and J. Šedina. RPAS ACCURACY TESTING FOR USING IT IN THE CADASTRE OF REAL ESTATES OF THE CZECH REPUBLIC. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1:861–866, jun 2016.

- [58] Martin Hulín. Využití rps s rtk pro tvorbu podkladů pro silniční obchvat kardašovy Řečice. *Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.*, 2020.
- [59] Karel Pavelka, Jaroslav Šedina, and Karel Pavelka. Knud rasmussen glacier status analysis based on historical data and moving detection using RPAS. *Applied Sciences*, 11(2):754, jan 2021.
- [60] Jaroslav Šedina, Eliška Housarová, and Eva Matoušková. Documentation of urn graves of knovíz culture by RPAS. *Geoinformatics FCE CTU*, 15(2):71–82, dec 2016.
- [61] Jaroslav Šedina, Eliška Housarová, and Paulina Raeva. Using RPAS for the detection of archaeological objects using multispectral and thermal imaging. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup1):182–191, dec 2018.

Příloha A

Přehled testovacích území

A.1 Archeologická lokalita Makhmur al-Qadima (severní Irák)



Obrázek 62: Archeologické naleziště Makhmur al-Quadima, zdroj [55].

Je archeologické naleziště nacházející se v severním Iráku. Makhmur al-Quadima je zaniklé město z předislámského až raně islámského období. Snímkování území proběhlo 12.11.2013. Ke snímkování bylo použito eBee s kamerami Canon IXUS 127 HS (VIS) a Canon PowerShot ELPH 110 HS (NIR). Celkem bylo pořízeno 548 snímků NIR kamerou, 536 VIS kamerou s rozlišovací schopností v území okolo 5 cm. Byl proveden jeden snímkový let s VIS

kamerou s nastavenou rozlišovací schopností na cca 3 cm. Cílem mise bylo podrobně zmapovat oblast archeologického naleziště [56]. Snímkovaná oblast je uvedena na obrázku 62. Střed území je nachází na souřadnicích 35.775060N, 43.596041E v systému WGS84.

A.2 Testovací pole u Litoměřic

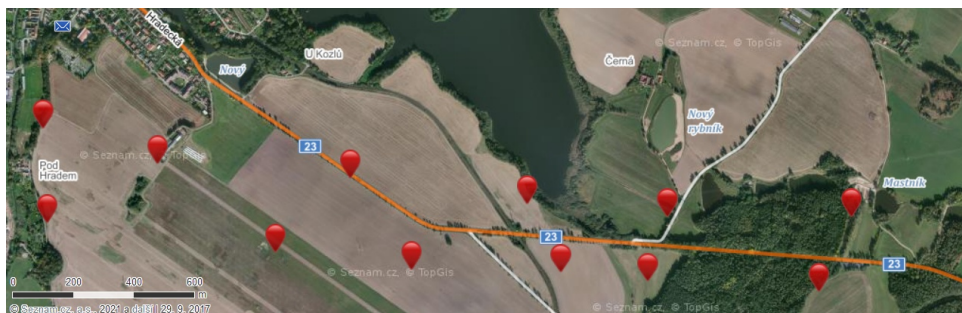
Pro potřeby testování přesnosti technologie RPAS pro katastrální účely bylo vybudováno testovací pole nacházející se poblíž města Litoměřice [57]. Testovací pole se skládalo ze 42 vlčovacích bodů zaměřených GNSS RTK metodou a terestricky. Bylo provedeno několik snímkových letů VIS kamerou Canon IXUS 127 HS a NIR kamerou Canon PowerShot ELPH 110 HS. Snímkové lety byly provedeny RPAS eBee s GSD odpovídající 3, 3.5 a 6 cm. Standardně byly provedeny snímkové lety s kolmými liniemi, kromě GSD 3 cm, kde byl proveden jednoduchý snímkový let. Pro VIS kameru bylo pořízeno 184 snímků s GSD 3 cm, 139 a 115 s GSD 3.5 cm a 58 a 58 s GSD 6 cm. Pro NIR kameru bylo pořízeno 168 snímků s GSD 3 cm, 151 a 142 s GSD 3.5 cm a 58 a 63 s GSD 6 cm. Pro testování algoritmu *Korata* bylo vybráno 25 rovnoměrně rozmístěných vlčovacích bodů v území zaměřených GNSS RTK metodou. Snímkovaná oblast je uvedena na obrázku 63, její střed se nachází na souřadnicích 50.534755N, 14.180365E v systému WGS84. Snímkování proběhlo dne 2.2.2016.



Obrázek 63: Testovací pole u Litoměřic, zdroj [55].

A.3 Mapování obchvatu u Kardašovy Řečice

Území poblíž obce Kardašova Řečice (okres Jindřichův Hradec) bylo snímkováno pro diplomovou práci Ing. Hulína [58]. Cílem diplomové práce bylo ověřit přesnost a možnosti nasazení prostředků RPAS v přípravě podkladů ve výstavbě. V tomto případě byly zkoumány možnosti prostředků RPAS pro výstavbu obchvatu Kardašovy Řečice. Pro účely ověření konfigurace vličovacích bodů byla použita přibližně polovina snímkaného území, ta je uvedena na obrázku 64. Celkem bylo v území zaměřeno 19 vličovacích bodů metodou GNSS RTK. Pro účely testování konfigurace vličovacích bodů bylo použito 12 vličovacích bodů. Snímkaná oblast je vymezena vličovacími body. Střed území se nachází na souřadnicích $14.8714278E$, $49.1756561N$ v systému WGS84. Snímkování bylo provedeno kamerou S.O.D.A. a systémem eBee Plus s GNSS RTK měřením dne 21.1.2020. Více informací o použitém vybavení je uvedeno v kapitole 2.



Obrázek 64: Snímkané území u obce Kardašova Řečice, zdroj [55].

A.4 Katastrální mapování obce Skoránov

Obec Skoránov (okres Chrudim) byla snímkována pro účely testování přesnosti prostředků RPAS pro katastrální mapování. V obci probíhala obnova katastrálního operátu novým mapováním. Cílem studie bylo nově vzniklou katastrální mapu porovnat s vektorovou kresbou obdrženu z ortofota. Snímkaná oblast je uvedena na obrázku 65. Snímkaná oblast je vymezena vličovacími body a střed oblasti se nachází na souřadnicích $15.6209739E$, $49.8804033N$ v systému WGS84. Snímkování území bylo provedeno kamerou S.O.D.A. a ke snímkování byl využit jak systém eBee, tak systém eBee Plus s GNSS RTK měřením. Druhotným cílem bylo otestovat, zda je v použití GNSS RTK měření souřadnic projekčních center výraznější přínos v přesnosti výstupů z RPAS. Snímkování území proběhlo dne 4.10.2019.



Obrázek 65: Snímkované území obec Skoránov, zdroj [55].

A.5 Katastrální mapování obce Nová Ves



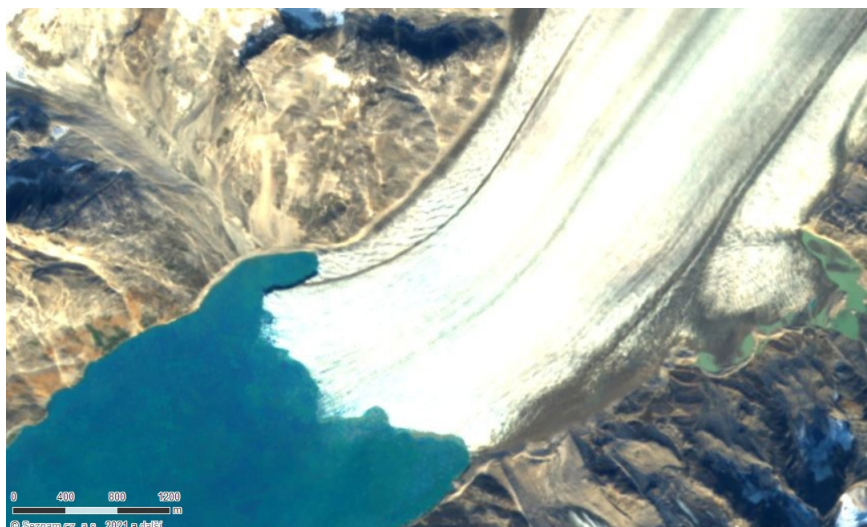
Obrázek 66: Snímkované území obec Nová Ves, zdroj [55].

Snímkování Nové Vsi (okres Chrudim) bylo provedeno za účelem možnosti nasazení prostředků RPAS pro katastrální účely. V obci byla prováděna obnova operátu novým mapováním, cílem bylo porovnat novou katastrální mapu s vektorovou kresbou z ortofota. Snímkovaná oblast je uvedena na obrázku 66. Ve snímkovaném území bylo rozmístěno 12 vřícovacích bodů, které byly zaměřeny GNSS RTK metodou. Střed území je nachází na souřadnicích $15.8211981E$, $49.8269428N$ v systému WGS84. Vřícovací body tvoří vymezení pro oblast snímkování. Snímkování území proběhlo kamerou S.O.D.A. a

ke snímkování byl využit systém eBee a eBee Plus s GNSS RTK měřením. Druhotným cílem bylo otestovat, zda je v použití GNSS RTK měření souřadnic projekčních center výraznější přínos v přesnosti výstupů z RPAS. Území bylo snímkováno dne 10.10.2019.

A.6 Mapování pohybu ledovce Knud Rasmussen v Grónsku

Mapování pohybu čela ledovce Knud Rasmussen bylo provedeno v létě 2019. Cílem mise bylo otestovat možnosti a vhodnost prostředku RPAS pro detekci pohybu ledovce [59]. Snímkování proběhlo RPAS eBee a ke snímkování byla použita NIR kamera Canon PowerShot ELPH 110 HS. Během mise byly pořízeny dva snímkové lety nad čelem ledovce. Během prvního snímkového letu bylo pořízeno 162 snímků a během druhého snímkového letu 170 snímků. K testování algoritmů byl vybrán první let. Střed snímkové oblasti se nachází na souřadnicích 66.088688N, -36.311010E v systému WGS84. Snímkováná oblast je uvedena na obrázku 67.



Obrázek 67: Čelo ledovce Knud Rasmussen (Grónsko), zdroj [55].

A.7 Archeologická lokalita Ctiněves

Ctiněves je obec nacházející se nedaleko hory Říp. Říp a jeho okolí je známou oblastí díky vysokému výskytu archeologických lokalit. Cílem bylo zmapování

pravděpodobných poloh popelnicových hrobů a mohyly nacházející se v této oblasti [60]. Snímkování archeologické lokality proběhlo RPAS eBee. Ke snímkování byla použita VIS kamera Canon IXUS 127 HS, NIR kamera Canon PowerShot ELPH 110 HS, NIR kamera Canon S110 NIR, multispektrální kamera multiSPEC 4C a termální kamera thermoMAP. Snímkování oblasti proběhlo dne 13.6.2016. Střed snímkové oblasti se nachází na souřadnicích 50.3765878N, 14.3101686E v systému WGS84. Oblast je ukázána na obrázku 68. Oblast byla snímkována v roce 2018 termální kamerou thermoMAP před, během a po východu Slunce. Cílem práce bylo zjistit možnosti detekce archeologických objektů nacházejících se v této lokalitě mimo vegetační období [61].



Obrázek 68: Archeologické naleziště Ctiněves, zdroj [55].

A.8 Detekce opevnění z Třicetileté války nacházející se u obce Vysoké Sedliště

Cílem této mise bylo pokusit se detekovat průběh opevnění z Třicetileté války. Ke snímkování byl použit RPAS eBee s multispektrální kamerou multiSPEC 4C a termální kamerou thermoMAP. GSD snímkování odpovídalo cca 10 až 15 cm. Mapovaná oblast je uvedena na obrázku 69, jedná se o poměrně úzký pruh táhnoucí se z východu na západ ve středu zobrazené lokality. Střed oblasti se nachází na souřadnicích 49.833436N, 12.779546E v systému WGS84. Snímkování oblasti proběhlo 18.5.2016.



Obrázek 69: Lokalita opevnění z Třicetileté války, zdroj [55].

A.9 Porovnání metod sběru dat pro vegetační index u obce Tuhaň



Obrázek 70: Snímkovaná louka u obce Tuhaň na Českolipsku, zdroj [55].

Snímkování louky u obce Tuhaň bylo provedeno za účelem porovnání vegetačního indexu obdrženého z RPAS vybaveného multispektrální kamerou a z pozemního senzoru. Dále byla testována stabilita vegetačních indexů v průběhu denní doby. Ke snímkování byl použit RPAS eBee a eBee Plus spolu s multispektrálními kamerami multiSPEC 4C, Sequoia a termální kamerou thermoMAP. GSD snímkování se pohybovalo v rozmezí 10 až 15 cm dle typu použité kamery. Snímkování proběhlo dne 29.7.2020. V oblasti bylo rozmístěno 5 vlčovacíh bodů zaměřených GNSS RTK metodou. Snímkovaná oblast je ukázána na obrázku 70, střed oblasti se nachází na souřadnicích 50.5291564N, 14.4536753E v systému WGS84.

A.10 Mapování terénu pro křížení rychlodráhy u Chlumce

Mapování terénu u obce Chlumec sloužilo jako podklad pro další studie nového křížení rychlodráhy. Ke snímkování byl použit RPAS eBee vybavený VIS kamerou Canon IXUS 127 HS. Bylo pořízeno 473 snímků za poměrně silného větru. GSD snímkování se pohybovalo okolo 5 cm. V oblasti bylo rozmístěno 12 vlíčovacích bodů zaměřených GNSS RTK metodou. Snímkování proběhlo 27.12.2018. Snímkovaná oblast je ukázána na obrázku 71. Střed snímkované oblasti se nachází na souřadnicích 50.672446N, 13.906223E v systému WGS84.



Obrázek 71: Lokalita křížení rychlodráhy u Chlumce, zdroj [55].

A.11 Snímkování osady Mariánská

Snímkování osady Mariánská proběhlo v rámci ukázky nasazení prostředků RPAS studentům bakalářského programu geodézie a kartografie na výuce v terénu z geodetických přístrojů. Snímkování lokality bylo provedeno RPAS eBee vybaveného VIS kamerou Canon IXUS 127 HS. Dne 16.5.2017 bylo pořízeno 136 snímků a v oblasti bylo rozmístěno 5 vlíčovacích bodů zaměřených GNSS RTK metodou. Oblast je znázorněna na obrázku 72, se středem v souřadnicích 50.3568044N, 12.8933258E v systému WGS84.



Obrázek 72: Osada Mariánská u Jáchymova, zdroj [55].

A.12 Mapování železničního oblouku u obce Mšené-lázně

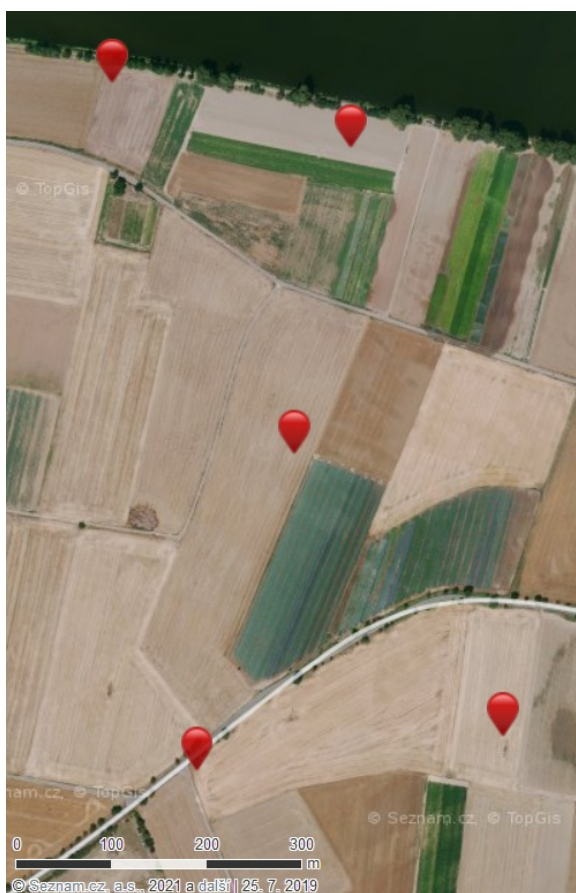
Mapování terénu a železničního oblouku u Mšených lázní. Snímkování bylo provedeno RPAS eBee vybaveného VIS kamerou Canon IXUS 127 HS. Celkem bylo pořízeno 194 snímků s GSD odpovídajícím 5 cm. V oblasti bylo rozmístěno 5 vřícovacích bodů zaměřených GNSS RTK metodou. Snímkování oblasti proběhlo 28.12.2018. Snímkovaná oblast je ukázána na obrázku 73. Střed snímkované oblasti leží na souřadnicích 50.3522200N, 14.1337475E v systému WGS 84.



Obrázek 73: Železniční oblouk nacházející se u obce Mšené-lázně, zdroj [55].

A.13 Průzkum napojení koridoru rychlodráhy u obce Počáply

Mapování terénu u obce Počáply je spojeno se zamýšleným vybudováním rychlodráhy a s variantou přemostění řeky Labe. Ke snímkování byl použit RPAS eBee vybavený VIS kamerou Canon IXUS 127 HS. Bylo pořízeno 146 snímků a v oblasti bylo rozmístěno 5 vlíčovacích bodů, které byly zaměřeny GNSS RTK metodou. Snímkování lokality proběhlo dne 27.12.2018. Snímkovaná oblast je ukázána na obrázku 74. Střed lokality se nachází na souřadnicích 50.520944N, 14.189907E v systému WGS84.



Obrázek 74: Varianta napojení koridoru rychlodráhy a přemostění řeky Labe u obce Počáply, zdroj [55].

Příloha B

Generování dat pro testování parametrů metody

Algoritmus generuje data náletu pro dané území. Vypočítá souřadnice projekčních center snímků v místní souřadnicové soustavě. Následně vyhodnotí, kolik je snímků ve filtrační masce ve středu pole, na hraně pole a v rohu pole (v oblasti dostatečného naplnění filtrační masky). Vstupními parametry algoritmu jsou:

- rozměr stran pole X a Y ,
- podélný překryt snímků Po a příčný překryt snímků $Př$
- poměr stran senzoru - šířka W a výška H ,
- počet snímků ve filtrační masce k ,
- procentní část území očištěná o neúplná data - oblast dostatečného naplnění filtrační masky n ,
- má-li se počítat snímkový let s kolmými letovými liniemi,
- aplikace volených omezení na výpočet (minimální počet snímků v centrální části území, omezení maximální velikosti poloměru masky).

Algoritmem jsou vygenerovány tabulky pro různé kombinace výše zmíněných parametrů. Rovnice 14 je výchozí rovnicí pro výpočet dat.

$$\begin{aligned} [X - 2 \times r + 2 \times S_x \times (1 - P_o)] \times [Y - 2 \times r + 2 \times S_y \times (1 - P_{\check{r}})] &= \\ &= X \times Y \times n \quad (14) \\ [X - 2 \times r + 2 \times C_x] \times [Y - 2 \times r + 2 \times C_y] &= X \times Y \times n \end{aligned}$$

Kde X , Y jsou rozměry stran území, r je poloměr filtrační masky, S_x a S_y je rozměr výšky a šířky snímku zobrazeného na úroveň terénu a P_o a $P_{\check{r}}$ je podélný a příčný překryt snímků, C_x a C_y je krok snímků v ose letu a v kolmém směru na osu letu.

Z rovnice 14 je odvozen vzorec 15 pro výpočet přibližného poloměru masky r . Výpočet probíhá iteračně, v prvním kroku je hodnota r vypočtena dle vzorce 16.

$$r = \frac{X \times Y (1 - n)}{2 \times (X + Y)} \quad (15)$$

$$r = \frac{X \times Y (1 - n) + 2 \times C_x \times Y + 2 \times C_y \times X + 4 \times C_x \times C_y}{2 \times (X + Y - 2 \times r + 2 \times C_x + 2 \times C_y)} \quad (16)$$

■ Rovnice pro určení parametrů náletu

Výchozí rovnicí pro určení parametrů náletu je rovnice 17. Rovnice uvažuje i kolmý let. Pro jednoduchý let se neuvažuje druhá část pravé strany rovnice za znaménkem +.

$$N = \frac{X}{S_x \times (1 - P_o)} \times \frac{Y}{S_y \times (1 - P_{\check{r}})} + \frac{X}{S_y \times (1 - P_{\check{r}})} \times \frac{Y}{S_x \times (1 - P_o)} \quad (17)$$

Do rovnice 17 je dosazen za výraz Sx z rovnice 18 a výsledkem je rovnice pro výpočet počtu snímků ve snímkováném území 19.

$$\frac{Sx}{Sy} = \frac{H}{W} \rightarrow Sx = \frac{H}{W} \times Sy \quad (18)$$

Kde H , W je poměr výšky a šířky senzoru/snímku.

$$N = \frac{2 \times X \times Y}{\frac{H}{W} \times S_y^2 \times (1 - Po) \times (1 - P\check{r})} \quad (19)$$

■ Určení parametrů náletu

Pro výpočet parametrů náletu je odhadnuta hodnota počtu snímků v celém území dle rovnice 20. Rovnice vychází z počtu snímků v masce N , poloměru filtrační masky r a velikosti stran území X a Y .

$$N = \frac{k \times X \times Y}{\pi \times r^2} \quad (20)$$

Následně je vypočtena hodnota šířky snímku zobrazeného na úroveň terénu S_y dle rovnice 21. Pro jednoduchý let platí spodní výraz.

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \times X \times Y}{N \times \frac{H}{W} \times (1 - Po) \times (1 - P\check{r})}} \quad (21)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{X \times Y}{N \times \frac{H}{W} \times (1 - Po) \times (1 - P\check{r})}}$$

Pro proměnné parametry:

- výpočet jednoduchého snímkového letu/snímkového letu s kolmými liniemi

- procentní část území očištěná o neúplná data - oblast dostatečného naplnění filtrační masky n v rozmezí od 0.3 po 0.7,
- podélný překryt snímků Po a příčný překryt snímků Pr nabývající hodnot 0.6 a 0.8,
- poměr stran senzoru 3:2 a 4:3,
- počet snímků v masce pro hodnoty 30, 50, 100,
- rozměr stran území X a Y pro hodnoty 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000.

Algoritmem získané řešení je testováno, zda vyhovuje zadaným omezením. Volenými omezeními jsou počet snímků ve statisticky vyhodnocované části (musí být větší než 100) a omezení maximálního poloměru filtrační masky. Pro každou kombinaci parametrů je vygenerována tabulka obsahující pro rozměr území X a Y hodnoty v řádcích:

- volený parametr počtu snímků ve filtrační masce k_i ,
- počet snímků ve filtrační masce ve středu upraveného území,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/2$ strany X ,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/3$ strany X ,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/4$ strany X ,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/2$ strany Y ,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/3$ strany Y ,
- počet snímků ve filtrační masce v $1/4$ strany Y ,
- počet snímků ve filtrační masce v rohu území,
- poloměr filtrační masky r ,
- počet snímků v území N ,
- počet snímků v ose X jednoduchého snímkového letu N_{VX} ,
- počet snímků v ose Y jednoduchého snímkového letu N_{VY} ,
- počet snímků v ose X snímkového letu s kolmými liniemi N_{KX} ,
- počet snímků v ose Y snímkového letu s kolmými liniemi N_{KY} ,
- průmět výšky snímku na terén S_X ,
- průmět šířky snímku na terén S_Y ,
- omezení výpočtu.

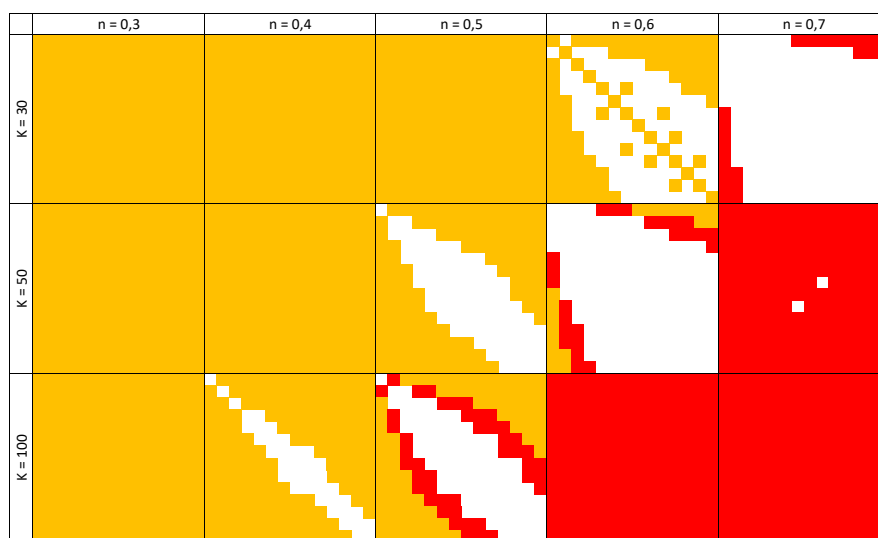
Příloha C

Analýza generovaných dat pro optimalizaci parametrů n a k

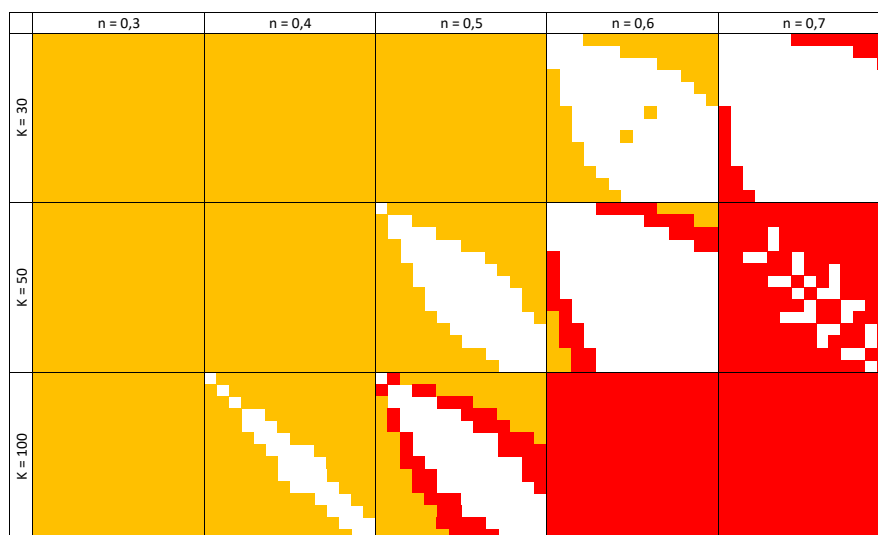
C.1 Grafická analýza dat

Popis grafické analýzy dat je uveden v kapitole 4.1.1. V této části budou uvedena vyhodnocovaná data. Obrázky 75, 76, 77 a 78 jsou případy pro let s kolmým náletem a obrázky 79, 80, 81 a 82 jsou případy jednoduchého letu. Dále se obrázky liší v poměru stran senzoru (3:2 a 4:3) a v podélném překrytu snímků, který byl volen 60% a 80%, příčný překryt byl zvolen 60%. Červená barva značí, že let byl proveden s více jak 1000 snímků. Oranžová barva říká, že při generování parametrů letu byla aplikována omezení.

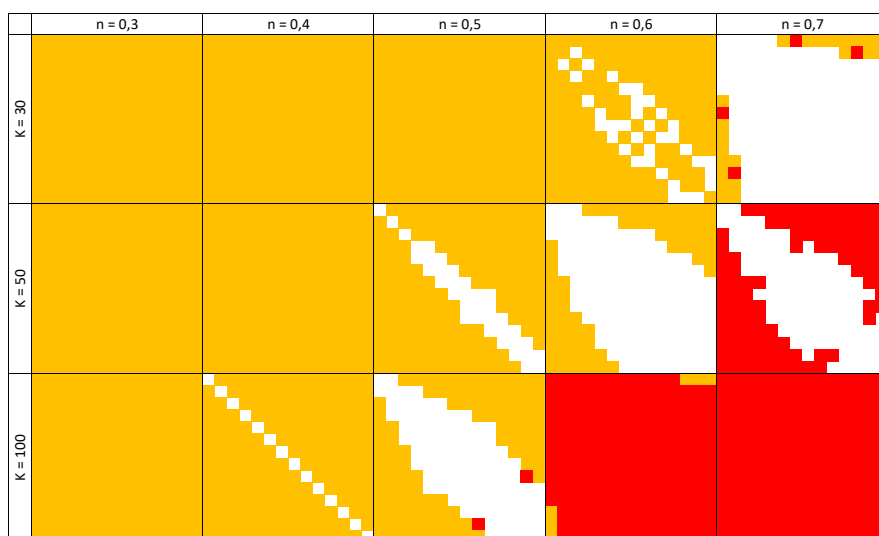
Jak je uvedeno v kapitole 4.1.1, oblast detailního zkoumání byla zúžena na interval $\langle 0.5, 0.7 \rangle$ pro parametr n a na interval $\langle 30, 50 \rangle$ pro parametr k .



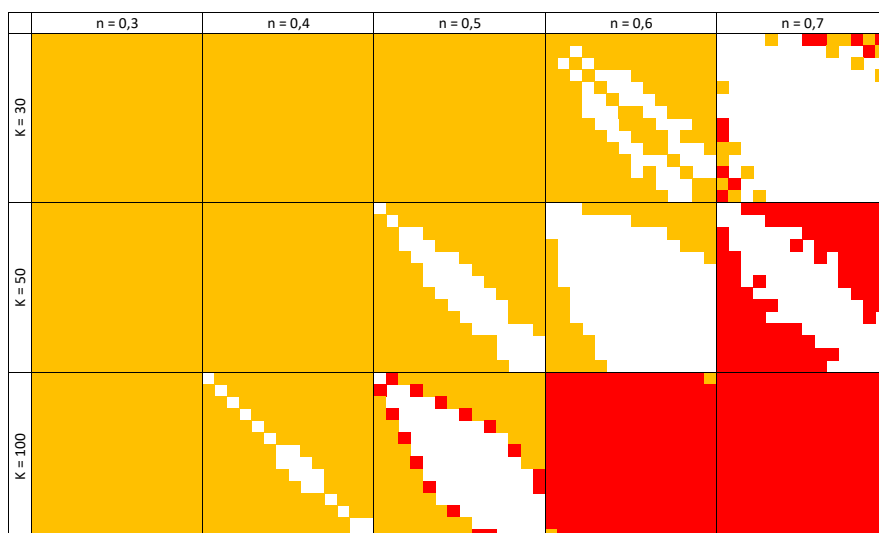
Obrázek 75: Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 %.



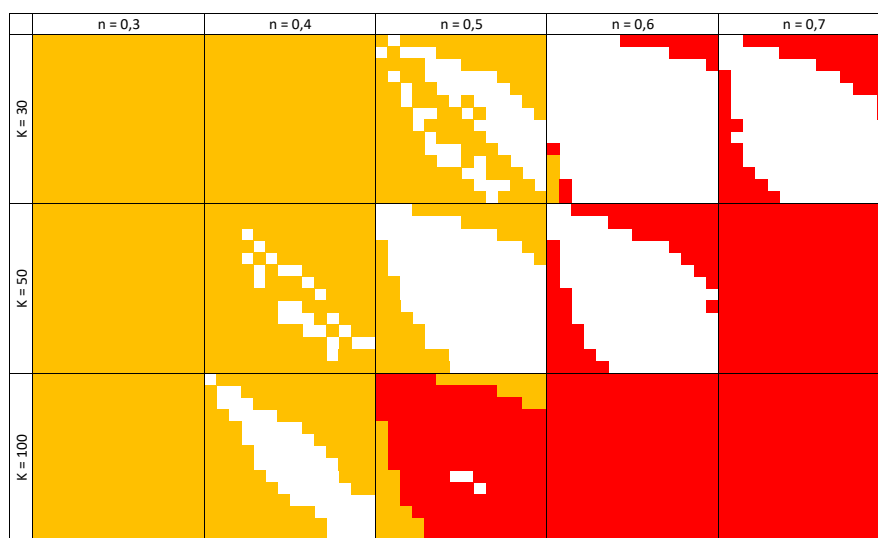
Obrázek 76: Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 %.



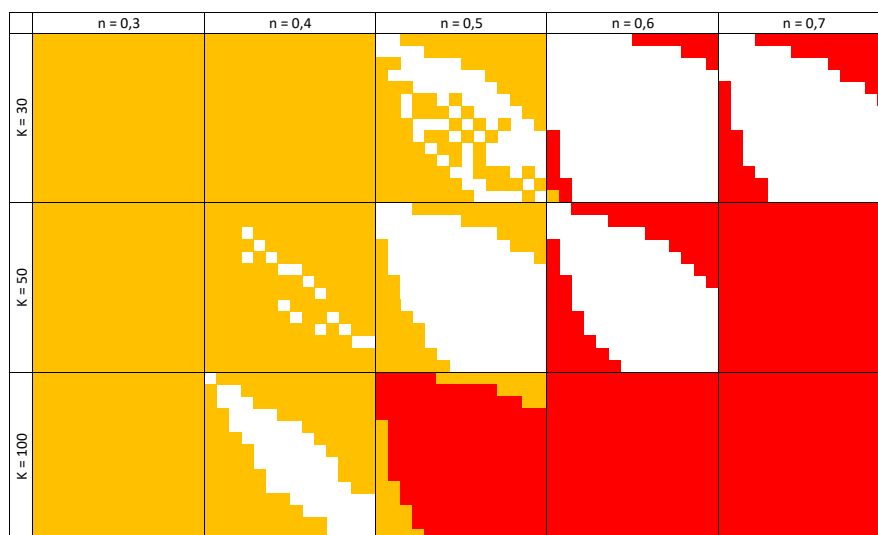
Obrázek 77: Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 3:2, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %.



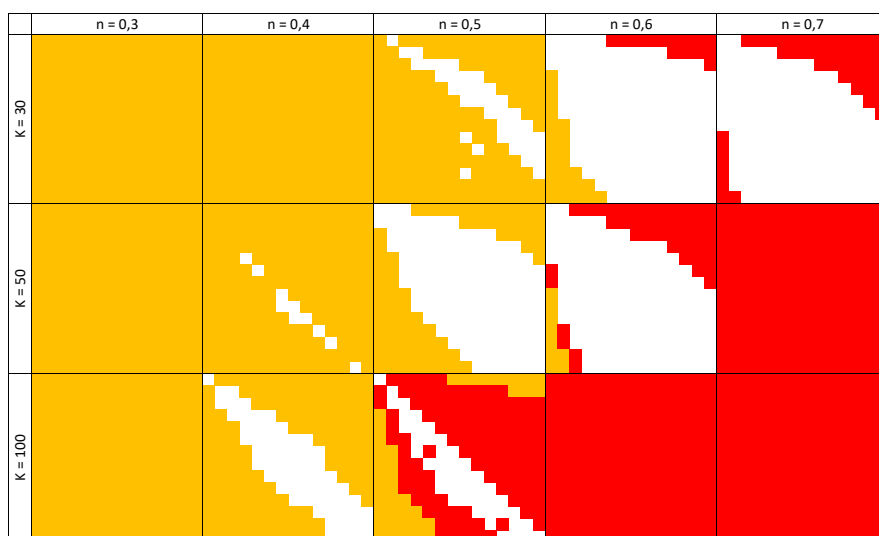
Obrázek 78: Grafické vyhodnocení letu s kolmým náletem, poměr stran senzoru 4:3, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %.



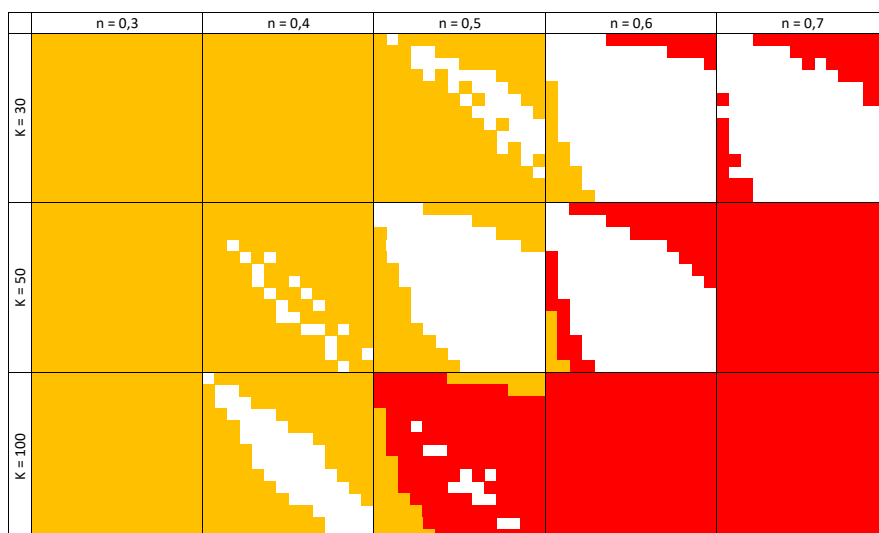
Obrázek 79: Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 3:2, podélný a příčný překryt 60 %.



Obrázek 80: Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný a příčný překryt 60 %.



Obrázek 81: Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 3:2, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %.



Obrázek 82: Grafické vyhodnocení jednoduchého letu, poměr stran senzoru 4:3, podélný překryt 60 % a příčný překryt 80 %.

C.2 Optimální počet snímků pro let

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1250	1500	1750	2000
100	227	317	417	569	683	873	981	1080	1084	1346	1737	2009	2257	2767
200	317	227	255	317	371	417	484	569	616	683	878	1050	1222	1346
300	417	255	227	250	318	317	381	383	417	494	633	683	765	904
400	569	317	250	227	300	255	323	317	375	371	434	553	600	683
500	683	371	318	300	227	229	269	277	250	317	371	417	484	569
600	873	417	317	255	229	227	246	250	255	318	302	371	425	494
700	981	484	381	323	269	246	227	280	266	270	249	326	371	445
800	1080	569	383	317	277	250	280	227	279	300	294	253	328	371
900	1084	616	417	375	250	255	266	279	227	279	269	318	314	373
1000	1346	683	494	371	317	318	270	300	279	227	300	255	323	317
1250	1737	878	633	434	371	302	249	294	269	300	227	229	269	277
1500	2009	1050	683	553	417	371	326	253	318	255	229	227	246	250
1750	2257	1222	765	600	484	425	371	328	314	323	269	246	227	280
2000	2767	1346	904	683	569	494	445	371	373	317	277	250	280	227
100	324	350	380	500	597	712	994	1210	1273	1175	1524	2109	2044	2805
200	350	324	265	350	317	380	440	500	539	597	771	1028	1114	1175
300	380	265	324	259	291	350	373	350	380	533	560	597	693	948
400	500	350	259	324	274	265	295	350	367	317	486	543	545	597
500	597	317	291	274	324	273	261	269	298	350	317	380	440	500
600	712	380	350	265	273	324	255	259	265	291	356	317	468	533
700	994	440	373	295	261	255	324	254	275	299	297	360	317	437
800	1210	500	350	350	269	259	254	324	254	274	267	302	363	317
900	1273	539	380	367	298	265	275	254	324	254	261	291	306	365
1000	1175	597	533	317	350	291	299	274	254	324	274	265	295	350
1250	1524	771	560	486	317	356	297	267	261	274	324	273	261	269
1500	2109	1028	597	543	380	317	360	302	291	265	273	324	255	259
1750	2044	1114	693	545	440	468	317	363	306	295	261	255	324	254
2000	2805	1175	948	597	500	533	437	317	365	350	269	259	254	324

Tabulka 29: Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, let s kolmými liniemi, poměr stran čipu 4:3.

	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1250	1500	1750	2000
100	500	578	766	1047	1259	1471	1754	1741	1937	2134	2626	3256	3771	4466
200	443	500	564	578	703	766	862	1047	1153	1259	1524	1643	1888	2134
300	431	376	500	509	544	578	702	736	766	869	1037	1259	1376	1613
400	513	443	470	500	542	564	533	578	685	703	827	910	1079	1259
500	649	410	373	430	500	463	472	532	596	578	703	766	862	1047
600	767	431	443	376	412	500	458	509	564	544	652	703	750	869
700	899	455	528	395	489	414	500	454	477	477	620	634	703	774
800	989	513	416	443	395	470	395	500	451	542	551	583	642	703
900	785	478	431	379	417	376	363	396	500	449	471	544	568	679
1000	871	649	447	410	443	373	466	430	398	500	542	564	533	578
1250	1405	745	555	410	410	469	417	396	490	430	500	463	472	532
1500	1304	655	649	498	431	410	495	418	373	376	412	500	458	509
1750	1521	763	712	439	455	401	410	448	351	395	489	414	500	454
2000	2059	871	778	649	513	447	424	410	378	443	395	470	395	500
100	443	636	869	947	1241	1387	1655	1863	1814	1997	2455	2914	3529	4367
200	396	443	519	636	701	869	853	947	1041	1241	1436	1759	1768	1997
300	409	459	443	444	496	636	731	666	869	784	1024	1241	1353	1653
400	460	396	418	443	479	519	562	636	623	701	746	900	1065	1241
500	629	489	391	400	443	495	552	614	626	636	701	869	853	947
600	705	409	396	459	381	443	513	444	519	496	594	701	710	784
700	831	433	481	369	438	383	443	509	484	532	623	663	701	699
800	916	460	394	396	391	418	385	443	437	479	530	530	642	701
900	702	523	409	452	392	459	398	386	443	435	452	496	625	648
1000	1023	629	425	489	396	391	438	400	477	443	479	519	562	636
1250	1462	724	502	415	489	445	392	369	439	400	443	495	552	614
1500	1532	873	629	539	409	489	448	370	391	459	381	443	513	444
1750	1714	980	692	583	433	570	489	449	394	369	438	383	443	509
2000	2205	1023	757	629	460	425	428	489	451	396	391	418	385	443

Tabulka 30: Počet snímků pro území o rozměrech $X \times Y$, jednoduchý let, poměr stran čipu 4:3.



Příloha D

Obsah CD

DP_2021_SEDINA_Jaroslav.pdf

DP_2021_SEDINA_Jaroslav_TEZE.pdf

DEAn

mfile

DEAn.m, corr_alfa.m, fit_sphere.m, fit_sphere_K.m,
get_alpha.m, get_area.m, get_box.m, get_val_int.m,
IDW_sqrt.m, mean_std_v.m, vyhlazeni_mean.m,
vyhlazeni_stat.m

data

Data_Ctineves_S110.m, Data_Gronsko_NIR.m,
Data_LTM_VIS.m, Data_Makhmur_VIS.m,
Data_Sedliste_MSS.m, Data_Sedliste_Therm.m
Data_Tuhan_Sequoia.m, Data_Tuhan_therm.m

vyhodnoceni

Data_Ctineves_S110_out, Data_Gronsko_NIR_out,
Data_LTM_VIS_out, Data_Makhmur_VIS_out,
Data_Sedliste_MSS_out, Data_Sedliste_Therm_out,
Data_Tuhan_Sequoia_out, Data_Tuhan_therm_out

Korata

Korata.py
Adjust.py
Analytical.py
Functions.py