

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

Diplomová práce

Stabilita prvků vnitřní orientace
digitálního fotoaparátu

Originál zadání práce je vložen do tištěné podoby diplomové práce.

Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a následné obhajobě diplomovou práci vypracovanou na závěr magisterského studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce a výhradně s využitím uvedené literatury a dalších informačních zdrojů.

V Plzni dne 15. května 2016

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Radku Fialovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a ochotu, se kterou se mi věnoval při konzultacích. Rovněž děkuji studentům fotogrammetrie za pomoc se zaměřením vlíčovacích bodů na budově Fakulty aplikovaných věd. A v neposlední řadě patří poděkování моým rodičům a příteli za jejich podporu po celé mé studium.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je otestovat stabilitu prvků vnitřní orientace fotoaparátu Canon EOS 6d s objektivem Canon EF 24mm f/2.8 IS USM. V práci je popsán základní matematický model fotoaparátu, význam prvků vnitřní a vnější orientace, nejvyužívanější modely distorze objektivu a moderní postupy kalibrace fotoaparátu. Dále je uvedena rešerše literatury zabývající se ověřováním stálosti parametrů a také je představeno několik již uskutečněných experimentů. Výpočet prvků vnitřní orientace fotoaparátu je proveden metodou auto-kalibrace v programu Agisoft PhotoScan. S pomocí výsledných hodnot jsou zrekonstruovány jednotlivé svazky paprsků a porovnány výsledky. A na závěr je provedeno zhodnocení stability přístroje.

Klíčová slova

prvky vnitřní orientace, kalibrace fotoaparátu, distorze objektivu, Agisoft PhotoScan, testování stability fotoaparátu

Abstract

The aim of this diploma thesis is to analyse the stability of the interior orientation parameters of the digital camera Canon EOS 6d with Canon EF 24mm f/2.8 IS USM lens. The basic camera model, the importance of interior and exterior parameters, most widely used distortion models and modern digital camera calibration procedures are described in the thesis. The research of the literature dealing with parameters stability verification is presented and also several already realized experiments are introduced. The camera calibration is carried out in the Agisoft PhotoScan software using self-calibration. Particular ray bundles are reconstructed using the final values and results are compared. In conclusion the camera stability evaluation is performed.

Keywords

interior orientation parameters, camera calibration, lens distortion, Agisoft PhotoScan, camera stability analysis

Obsah

1. Úvod	10
2. Význam prvků vnitřní orientace a související matematické modely.....	12
2.1 Prvky vnitřní (interní) orientace.....	12
2.2 Prvky vnější (externí) orientace	14
2.3 Modely distorze objektivu	15
3. Výpočet prvků vnitřní orientace.....	17
3.1 Základní pojmy.....	17
3.1.1 Dírková komora.....	17
3.1.2 Absolutní kuželosečka.....	18
3.2 Metody výpočtu prvků vnitřní orientace	18
3.2.1 Kalibrace využívající 3D objekt.....	19
3.2.2 Kalibrace využívající 2D rovinu	21
3.2.3 Kalibrace využívající 1D linii	24
3.2.4 Auto-kalibrace.....	26
4. Rešerše literatury zabývající se testováním stability prvků vnitřní orientace	29
4.1 Metody ZROT, ROT a SPR.....	29
4.2 Změna kalibračních podmínek a nastavení fotoaparátu	32
4.3 Závislost prvků vnitřní orientace na změně teploty	36
4.4 Pozemní a letecká kalibrace.....	36
4.5 Shrnutí výsledků.....	37
5. Určení prvků vnitřní orientace	38
5.1 Pořízení kalibračních snímků	38
5.1.1 Snímkování v lokalitě letiště Praha - Kbely	39
5.1.2 Snímkování v lokalitě u obce Neplachov	41
5.1.3 Snímkování kalibračního pole na budově Fakulty aplikovaných věd	43

5.2	Výpočet prvků vnitřní orientace	46
5.2.1	Výpočet parametrů v programu Agisoft PhotoScan.....	46
5.2.2	Přepoččet parametrů fotoaparátu	50
6.	Rozbor stability prvků vnitřní orientace	53
6.1	Rekonstrukce polohy bodů snímku	53
6.2	Zhodnocení výsledků	54
6.2.1	Porovnání hodnot konstanty komory.....	54
6.2.2	Provnání výsledků snímkování kalibračního pole na budově Fakulty aplikovaných věd	55
6.2.3	Porovnání výsledků leteckého snímkování.....	56
6.2.4	Vzájemné porovnání výsledků snímkování kalibračního pole a leteckého snímkování	57
7.	Závěr.....	60
	Seznam použité literatury.....	63
	Příloha A.....	70
	Obsah přiloženého CD	81

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Znázornění prvků vnitřní a vnější orientace	14
Obrázek 4.1: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou ZROT [29]	30
Obrázek 4.2: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou ROT [29]	31
Obrázek 4.3: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou SPR [29]	31
Obrázek 5.1: Multikoptéra typu CUBE Y-6.....	39
Obrázek 5.2: Ukázka snímku pořízeného při letu 14. 1.	40
Obrázek 5.3: Ukázka snímků s různou expozicí pořízených během prvního letu 9. 2....	41
Obrázek 5.4: Ukázka snímku pořízeného během druhého letu 9. 2.	42
Obrázek 5.5: Ukázka snímku pořízeného během prvního letu 10. 3.....	42
Obrázek 5.6: Ukázka snímku pořízeného během druhého letu 10. 3.	43
Obrázek 5.7: Ukázka snímku pořízeného během prvního snímkování 18. 3.....	44
Obrázek 5.8: Ukázka snímku pořízeného během druhého snímkování 18. 3.	44
Obrázek 5.9: Ukázka snímku pořízeného během prvního snímkování 19. 4.....	45
Obrázek 5.10: Ukázka snímku pořízeného během druhého snímkování 19. 4.	45
Obrázek 5.11: Model scény (kalibrační pole FAV) s vlíčovacími body a stanovisky snímků vytvořený v programu Agisoft PhotoScan	48
Obrázek 5.12: Ukázka označení vlíčovacích a kontrolních bodů a maskování části snímku v programu Agisoft PhotoScan	49
Obrázek 6.1: Zobrazení bodů pravidelné mřížky do vzdálenosti Z.....	54

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Parametry fotoaparátu	39
Tabulka 5.2: Výsledky kalibrace snímkovacích letů v lokalitě letiště Kbely.....	49
Tabulka 5.3: Výsledky kalibrace snímkovacích letů v lokalitě Neplachov	50
Tabulka 5.4: Výsledky kalibrace snímkování kalibračního pole FAV	50
Tabulka 5.5: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (Kbely)	51
Tabulka 5.6: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (Neplachov)	52
Tabulka 5.7: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (kalibrační pole FAV)	52

Seznam grafů

Graf 6.1: Znázornění radiální distorze objektivu (kalibrační pole FAV)	55
Graf 6.2: Přiblížení hodnot distorze v rozích snímků (kalibrační pole FAV)	56
Graf 6.3: Znázornění radiální distorze objektivu (Kbely, Neplachov)	57
Graf 6.4: Přiblížení hodnot distorze v rozích snímků (Kbely, Neplachov)	58
Graf 6.5: Znázornění rozdílu radiální distorze objektivu (Neplachov a FAV).....	59

1. Úvod

S rozvojem digitálních technologií přestalo být nutné konstruovat pro potřeby fotogrammetrie speciální měřické komory. Digitální fotoaparáty díky své dostupnosti, ceně a snadnému použití ve velké míře nahradily klasické analogové fotoaparáty. Ovšem digitální fotoaparáty nejsou zpravidla konstruovány pro využití ve fotogrammetrických aplikacích, a proto je otázkou, pro jaké účely je jejich použití ještě vhodné a pro které již nikoliv.

Aby bylo možné použít fotoaparát pro řešení úkolů fotogrammetrie, je nutné znát jeho prvky vnitřní orientace. K jejich zjištění slouží postup, který se nazývá kalibrace fotoaparátu. Kalibrace je proces, při kterém dochází k určení geometrických a optických charakteristik fotoaparátu (prvků vnitřní orientace) a zároveň také ke zjištění pozice a orientace fotoaparátu v prostoru (prvky vnější orientace). Snímky, u kterých známe prvky vnitřní orientace fotoaparátu, označujeme jako měřické.

Při rekonstrukci scény z měřických snímků požadujeme, aby byla poloha bodů určena co nejkvalitněji a nejpresněji, a proto je nutné mít parametry fotoaparátu stabilní. Stálost prvků vnitřní orientace byla jednou z výhod klasických analogových komor, ale u digitálních přístrojů navržených pro komerční využití si nemůžeme být jejich neměnností jisti. Vnitřní geometrie těchto zařízení je často nestabilní a při manipulaci s přístrojem se může měnit. Také použití technologií jako zoom, automatické ostření nebo stabilizace obrazu mění některé charakteristiky, například ohniskovou vzdálenost. Z toho vyplývá, že pokud chceme přístroj použít pro přesná měření, je vhodné nejprve ověřit jeho stabilitu.

V první části této práce bude popsán základní matematický model fotoaparátu, význam prvků vnitřní a vnější orientace, vliv distorze objektivu a nejčastěji využívané modely zkreslení. Dále budou představeny základní metody kalibrace digitálních fotoaparátů a detailněji popsány jejich postupy. Následuje rešerše literatury, která se zabývá testováním stálosti prvků vnitřní orientace. Rešerše blíže představuje některé již provedené experimenty a jejich výsledky. Druhá polovina práce se věnuje pořízení kalibračních snímků fotoaparátem Canon EOS 6d s objektivem Canon EF 24mm f/2.8 IS

USM, výpočtu prvků vnitřní orientace v programu Agisoft PhotoScan a nakonec analýze jejich stability.

2. Význam prvků vnitřní orientace a související matematické modely

Vychází-li se z předpokladu fyzikálně idealizovaného objektivu („tenká“ čočka), je fotografický snímek přesným středovým průmětem (centrální projekcí) fotografovaného objektu. Každému bodu fotografované scény odpovídá bod ve snímkové rovině. Paprsky, vedené mezi odpovídajícími si body (bod a jeho obraz), se protínají v jediném bodě – středu promítání C (projekční centrum, optické centrum). Reálné provedení objektivů se ale od fyzikální idealizace podstatně liší, čímž vznikají problémy při řešení praktických úkolů fotogrammetrie. Text této kapitoly byl převzat z [1] a upraven.

2.1 Prvky vnitřní (interní) orientace

Pro kvalitní vyhodnocení fotogrammetrických snímků je nutné znát a obnovit prvky vnitřní orientace měřické komory v okamžiku pořízení snímku. Mezi prvky vnitřní orientace patří konstanta komory, poloha hlavního bodu a eventuálně i průběh radiální distorze. Vzdálenost zobrazovaných předmětů je obvykle natolik velká, že jejich obrazy vznikají na zadní ohniskové rovině objektivu a obrazová vzdálenost se tak prakticky rovná ohniskové vzdálenosti objektivu. Z tohoto důvodu jsou klasické fotogrammetrické komory trvale zaostřeny na nekonečno, což přináší jednodušší konstrukci komor a zachování vnitřní orientace komory. Pokud jsou komory vybaveny možností přeastřování, je tak učiněno po určitých přesně daných krocích, ke kterým je znám přírůstek konstanty komory. Nevhodné jsou objektivy typu „zoom“, kde nelze definovat přesně a předem konstantu komory (s možnou výjimkou krajních poloh).

Vstupní nebo výstupní pupilou objektivu je obraz clonky objektivu, vytvořený předmětovou nebo obrazovou částí objektivu; prakticky leží vždy uvnitř objektivu. Projekční centrum (předmětový střed promítání) není jediný bod. Praktické definování projekčního centra je ale mírně odlišné – projekční centra jsou matematickou abstrakcí. Vzhledem k tomu, že ve fotogrammetrii se jedná o vztah mezi snímkovými souřadnicemi a předmětovými paprsky, je třeba definovat projekční centra na základě tohoto vztahu. Tento požadavek splňují projekční centra definovaná jako středy vstupní a výstupní

pupily, s ohledem na distorzi objektivu případně matematické projekční centrum. Osa záběru je kolmice k obrazové rovině procházející předmětovým projekčním centrem. Souřadnice hlavního snímkového bodu a konstanta komory se nazývají prvky vnitřní (interní) orientace měřické komory a definují geometrii paprsků uvnitř komory. K prvkům vnitřní orientace se často přidává též znalost průběhu radiální distorze.

Hlavní snímkový bod

Hlavní snímkový bod je definován jako průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím v předmětovém prostoru středem promítání, který je kolmý na rovinu snímku.

Konstanta komory

Konstanta komory je vzdálenost od hlavního snímkového bodu ke středu promítání v obrazovém prostoru (střed výstupní pupily).

Distorze objektivu

Vady, které působí na geometrii zobrazení a které mají tedy rozhodující vliv na přesnost měření, označujeme jako distorze objektivu. Distorzi lze rozdělit na dvě složky: radiální a tangenciální. Distorze (zkreslení) objektivu je způsobena souhrnem geometrických nepřesností při výrobě objektivu a vlastnostmi reálných čoček. Současné objektivy jsou nesymetrické, skládají se z prvků, které nelze urovnat naprosto přesně do ideální optické osy. Z tohoto důvodu není úhel vstupujícího paprsku naprosto stejný jako u vystupujícího paprsku a poloha zobrazeného bodu se mírně liší od správné polohy. Pro přesné práce a u objektivů s velkými hodnotami distorze je třeba tyto vady odstranit. Určení distorze provádí buď přímo výrobce (zpravidla měřením v osmi radiálních směrech) nebo ji lze zjistit analytickými metodami (využitím přesně určeného bodového pole).

Radiální distorze

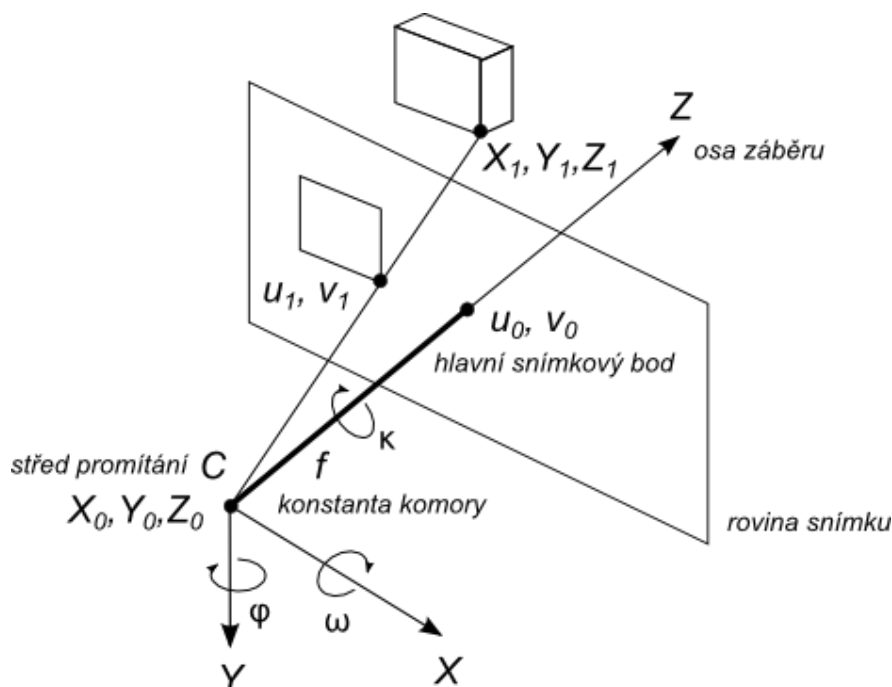
Posun bodu o radiální vzdálenosti r' na snímku o hodnotu $\Delta r'$ označujeme jako radiální distorzi (zkreslení). Její průběh obvykle není naprosto přesně rotačně symetrický, ale při její kompenzaci tuto symetrii předpokládáme. Distorze bývá zpravidla vyjádřena charakteristickou křivkou pro každý oktant nebo se konstruuje křivky stejné distorze – izolinie.

Tangenciální distorze

Druhým typem distorze objektivu je zkreslení tangenciální, které je vyvoláno nepřesnou centrací jednotlivých čoček. Působí kolmo na směr radiální a způsobuje nepravidelné špatně definovatelné lokální posuny. Toto zkreslení prakticky nelze jednoduše kompenzovat a běžně se neuvažuje. U kvalitních moderních objektivů se předpokládá, že vliv tangenciální distorze je zanedbatelný.

2.2 Prvky vnější (externí) orientace

Prvky vnější orientace nám definují polohu a pootočení fotoaparátu v objektovém souřadnicovém systému. Poloha projekčního centra je určena souřadnicemi středu vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0 a směr osy záběru popisují sklony ω, φ, κ . Parametr ω je úhel pootočení kolem osy x , φ je úhel pootočení kolem osy y a κ je úhel pootočení kolem osy z . Vnější orientaci stanovujeme pro každý snímek zvlášť a lze ji řešit buď jako relativní orientaci (vzájemná poloha dvou či více snímků), anebo jako absolutní orientaci (umístění modelu do referenčního geodetického souřadnicového systému). Prvky vnitřní i vnější orientace jsou zobrazeny na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Znázornění prvků vnitřní a vnější orientace

2.3 Modely distorze objektivu

K výpočtu radiální distorze objektivu se nejčastěji využívá tzv. *polynomický model*. Pro zkreslené souřadnice obrazu (x_d, y_d) platí

$$\begin{aligned}x_d &= x + \delta_x \\y_d &= y + \delta_y ,\end{aligned}$$

kde (δ_x, δ_y) je distorze aplikovaná na nezskreslené souřadnice (x, y) , $x = f \frac{X}{Z}$ a $y = f \frac{Y}{Z}$ (f je konstanta komory a $[X, Y, Z]$ jsou 3D souřadnice reálného bodu). Distorzi můžeme vyjádřit jako mocninou řadu v radiální vzdálenosti $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Rovnice zkreslení budou ve tvaru

$$\begin{aligned}\delta_x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \delta_y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) ,\end{aligned}$$

kde k_i jsou koeficienty radiální distorze. V těchto vzorcích jsou dominantní hlavně první dva výrazy, ostatní je možné zanedbat. Polynomický model je vhodný spíše pro objektivy s menší distorzí (u objektivů s větší distorzí je potřeba zahrnout vyšší počet koeficientů), která je symetrická kolem hlavního bodu. [22][23][24]

Brownův model (někdy se označuje také jako Brown-Conradyho model) je běžně využívaný kalibračními programy, jelikož zahrnuje jak radiální tak tangenciální zkreslení. V rovnicích jsou oproti předchozímu modelu navíc koeficienty tangenciální distorze p_j :

$$\begin{aligned}\delta_x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy](1 + p_3 r^2 + \dots) \\ \delta_y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2)](1 + p_3 r^2 + \dots)\end{aligned}$$

[21][3]

Dalším modelem pro výpočet radiální distorze je tzv. *racionální model*. Pro zkreslené souřadnice obrazu (x_d, y_d) platí

$$\begin{aligned}x_d &= x f(r) \\y_d &= y f(r) ,\end{aligned}$$

kde $f(r)$ může být například jedna z následujících funkcí:

$$f(r) = \frac{1}{1 + k_1 r} , \quad f(r) = \frac{1}{1 + k_1 r^2} , \quad f(r) = \frac{1 + k_1 r}{1 + k_2 r^2} ,$$

$$f(r) = \frac{1}{1 + k_1 r + k_2 r^2}, \quad f(r) = \frac{1 + k_1 r}{1 + k_2 r + k_3 r^2}, \quad f(r) = \frac{1 + k_1 r^2}{1 + k_2 r + k_3 r^2}.$$

Aby mohla funkce $f(r)$ modelovat radiální zkreslení, musí splňovat několik požadavků: musí být symetrická kolem hlavního bodu, musí být spojitá, její derivace nesmí být nulová (pokud je r nenulové) a x_d musí být lichou funkcí parametru x . [22][23]

V některé literatuře se můžeme setkat také s tzv. *sekčním (division) modelem*, který vyjadřují rovnice

$$x = x_d \frac{1}{1 + \lambda r^2}$$

$$y = y_d \frac{1}{1 + \lambda r^2},$$

kde $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ a λ je koeficient radiální distorze. Tento model je podobný jednomu z výše uvedených racionálních modelů, ale má prohozené zkreslené a nezkreslené souřadnice. [25]

Pro širokouhlé objektivy, tzv. rybí oka, u kterých distorze nabývá vysokých hodnot, se používají modely *PFET (Polynomial Fish-Eye Transform)*, *FET (Fish-Eye Transform)* a *FOV (Field-of-View)*. Model PFET je vyjádřený funkcí s lichými i sudými mocninami, která obsahuje navíc oproti předešlým modelům člen nultého řádu:

$$f(r) = k_0 + k_1 r + k_2 r^2 + \dots + k_n r^n + \dots.$$

Model FET vychází z pozorování, že zkreslený snímek má vyšší rozlišení v foveální (jamkovité) části a nižší na okrajích:

$$f(r) = s \ln(1 + \lambda r),$$

kde s je skalár a koeficient λ určuje míru zkreslení na snímku. Model FOV, založený na jednoduchém optickém modelu rybího oka, je vyjádřený funkcí

$$f(r) = \frac{1}{\omega} \arctan\left(2r \tan \frac{1}{\omega}\right),$$

kde ω je zorný úhel ideálního rybího oka. [24][26][27]

3. Výpočet prvků vnitřní orientace

3.1 Základní pojmy

V literatuře je často možné se setkat s matematickým modelem středového promítání, který používá tzv. homogenní souřadnice. Protože model bude využit také v této práci, jsou dále uvedeny některé základní pojmy. Detailní popis je možné nalézt v [2].

3.1.1 Dírková komora

Centrální projekce je základním modelem tvorby obrazu ve fotoaparátu. Geometricky je v souladu s tímto modelem zobrazení pomocí dírkové komory a reálné objektivy fotoaparátů se centrální projekci obvykle snaží co nejvíce přiblížit. Centrální projekce je v literatuře běžně popisována následujícím matematickým modelem.

Nechť je $\mathbf{m} = [u, v]^T$ 2D bod a $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$ 3D bod. Přidáním prvku 1 dostaneme body o homogenních souřadnicích $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ a $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$. Obraz \mathbf{m} 3D bodu \mathbf{M} se vytvoří v místě, kde paprsek procházející bodem \mathbf{M} a optickým centrem C protne rovinu obrazu. Body \mathbf{M} , \mathbf{m} a C jsou kolineární. Vztah mezi bodem \mathbf{M} a jeho obrazem \mathbf{m} je dán

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}} \equiv \mathbf{P}\tilde{\mathbf{M}}, \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ a } \mathbf{P} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \mathbf{t}],$$

kde s je libovolné měřítko, \mathbf{A} je matice prvků vnitřní orientace, $(\mathbf{R} \mathbf{t})$ jsou prvky vnější orientace a jedná se o rotaci a translaci mezi souřadnicovým systémem, který používáme v předmětovém prostoru a souřadnicovým systémem fotoaparátu. Prvky u_0, v_0 jsou souřadnice hlavního snímkového bodu, α a β (reprezentují konstantu komory) jsou měřítka os u, v (počítá se s tím, že výsledné snímky obecně nemusí mít čtvercové pixely) a γ je parametr popisující zkosení těchto dvou os. Matice \mathbf{P} se nazývá projekční matice a obsahuje jak prvky vnitřní, tak vnější orientace. Úkolem kalibrace je určit prvky vnitřní orientace - $\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0$ a prvky vnější orientace (orientaci a umístění fotoaparátu) - \mathbf{R}, \mathbf{t} . Máme tedy celkem 11 parametrů – rotační matice obsahuje 3 parametry (přestože se skládá z 9 prvků, obsahuje pouze 3 stupně volnosti), translační matice také 3 a matice

prvků vnitřní orientace 5 parametrů. (V dalším textu bude použito označení A^{-T} pro $(A^{-1})^T$ nebo $(A^T)^{-1}$.) [3]

3.1.2 Absolutní kuželosečka

3D bod x má homogenní souřadnice $\tilde{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$. Pro rovnici roviny Π_∞ v nekonečnu bude platit $x_4 = 0$. Absolutní kuželosečka Ω je definována množinou bodů, které splňují rovnice

$$\begin{aligned}x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 &= 0 \\x_4 &= 0.\end{aligned}$$

Je-li bod $x_\infty = [x_1, x_2, x_3]^T$ bod na absolutní kuželosečce, pak podle definice platí, že $x_\infty^T x_\infty = 0$. Dále platí $\tilde{x}_\infty = [x_1, x_2, x_3, 0]^T$ a $\tilde{x}_\infty^T \tilde{x}_\infty = 0$. Dostaneme tedy kuželosečku z imaginárních bodů v rovině Π_∞ . Pokud bude bod $x = x_1/x_3$ a $y = x_2/x_3$ bod na kuželosečce, potom dostaneme $x^2 + y^2 = -1$, tedy imaginární kruh o poloměru $\sqrt{-1}$. Důležitou vlastností absolutní kuželosečky je její invariance pro jakoukoliv pevnou transformaci (transformace, při které se nemění tvar a velikost objektu). Mějme transformaci $H = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. Bod x_∞ bude bod na Ω , jehož homogenní souřadnice jsou $\tilde{x}_\infty = \begin{bmatrix} x_\infty \\ 0 \end{bmatrix}$ s $x_\infty^T x_\infty = 0$. Po pevné transformaci bod označíme $\tilde{x}'_\infty = H\tilde{x}_\infty = \begin{bmatrix} R x_\infty \\ 0 \end{bmatrix}$. Bod x'_∞ leží také na kuželosečce v nekonečnu, dokonce na té samé, protože platí $x'^T_\infty x'_\infty = (R x_\infty)^T (R x_\infty) = x^T_\infty (R^T R) x_\infty = 0$. Obraz absolutní kuželosečky ω je také imaginární kuželosečka a je určena pouze prvky vnější orientace. Označme m_∞ projekci bodu x_∞ na Ω . Potom dostaneme $\tilde{m}_\infty = sA[R \ t] \begin{bmatrix} x_\infty \\ 0 \end{bmatrix} = sARx_\infty$ a následně $\tilde{m}_\infty^T A^{-T} A^{-1} \tilde{m}_\infty = s^2 x^T_\infty R^T R x_\infty = s^2 x^T_\infty x_\infty = 0$. Proto je tedy obraz absolutní kuželosečky imaginární kuželosečka a je definován $A^{-T} A^{-1}$. Kuželosečka nezávisí na prvcích vnější orientace. Pokud je určen obraz absolutní kuželosečky, potom lze vypočítat prvky vnitřní orientace a kalibrace je hotova. [3]

3.2 Metody výpočtu prvků vnitřní orientace

V odborné literatuře je publikováno velké množství různých metod pro výpočet prvků vnitřní orientace. Tyto metody je podle [3] možné rozdělit s ohledem na dimenzi kalibračního objektu do následujících čtyř kategorií.

Kalibrace využívající 3D objekt – Kalibrace je založená na snímkování 3D objektu, jehož poloha v prostoru je známá. Většinou se využívají kalibrační objekty, které se skládají z dvou nebo tří na sebe kolmých rovin. Tato metoda poskytuje nejpřesnější výsledky, ale zpravidla vyžaduje drahé vybavení a náročnou práci v laboratoři.

Kalibrace využívající 2D rovinu – Kalibračním objektem je rovina, která se snímkuje z různých pozic tak, že se pohybuje buď s rovinou, nebo s fotoaparátem. Pro výpočet ale není nutné parametry tohoto pohybu znát. Tento postup je snadný a velice efektivní, jelikož si každý může vhodnou rovinu sám vyrobit.

Kalibrace využívající 1D linii – Tato relativně nová technika využívá kalibrační objekt složený z několika kolineárních bodů. Fotoaparát může být kalibrován například snímkováním linie pohybující se kolem pevného bodu.

Auto-kalibrace – Tato technika nevyužívá žádný kalibrační objekt, proto je možné říci, že se jedná o 0D kalibraci. Kalibrace je založena na snímkování statické scény. Jelikož počet odhadovaných parametrů je podstatně větší než v předešlých případech, je tato technika matematicky složitější.

3.2.1 Kalibrace využívající 3D objekt

V této podkapitole bude představena jedna ze standardních metod pro kalibraci pomocí 3D objektu, text vychází zejména z [3] a [4]. Další možné techniky a postupy lze nalézt například v [10] nebo [11].

Tato metoda tradičně využívá aparaturu skládající se ze dvou nebo tří kolmých rovin, na kterých je vytištěn vzorek. Souřadnice jednotlivých rohů jsou určeny v místním souřadnicovém systému.

Kalibrace se skládá ze čtyř kroků:

1. Detekce rohů objektu na každém snímku.
2. Určení projekční matice \mathbf{P} použitím metody nejmenších čtverců.
3. Získání vnitřních a vnějších parametrů \mathbf{A} , \mathbf{R} a \mathbf{t} z matice \mathbf{P} .
4. Vylepšení výsledků nelineární optimalizací.

K detekci rohů je možné použít detektor (např. Harrisův rohový detektor) nebo odhadnout strany čtverce a určit body protínáním linií.

Díky korespondenci mezi 2D a 3D body ($\mathbf{m}_i = (u_i, v_i) \leftrightarrow \mathbf{M}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$) je možné psát dvě rovnice založené na (1)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_i X_i & u_i Y_i & u_i Z_i & u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & v_i X_i & v_i Y_i & v_i Z_i & v_i \end{bmatrix}}_{G_i} \mathbf{p} = \mathbf{0},$$

kde $\mathbf{p} = [p_{11}, p_{12}, \dots, p_{34}]^T$ a $\mathbf{0} = [0, 0]^T$. Pro n odpovídajících si bodů je možné spojit obě rovnice dohromady $\mathbf{G}\mathbf{p} = \mathbf{0}$, kde $\mathbf{G} = [G_1^T, \dots, G_n^T]^T$. \mathbf{G} je $2n \times 12$ rozměrná matice. Nyní je možné získat projekční matici pomocí $\min_{\mathbf{p}} \|\mathbf{G}\mathbf{p}\|^2$ za podmínky $\|\mathbf{p}\| = 1$. Řešením je vlastní vektor $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$, který patří k nejmenšímu vlastnímu číslu. Abychom se vyhnuli triviálnímu řešení $\mathbf{p} = 0$ a při zvažování faktu, že vektor \mathbf{p} je definován až na měřítko, jsme položili $\|\mathbf{p}\| = 1$ (je možné použít i jiné normalizace). Tato lineární technika minimalizuje algebraickou vzdálenost.

Pokud je známá projekční matice \mathbf{P} , je možné určit prvky vnitřní a vnější orientace. Nechť je první submatice 3×3 projekční matice \mathbf{P} označena jako \mathbf{B} a poslední sloupec \mathbf{P} jako \mathbf{b} , tedy $\mathbf{P} \equiv [\mathbf{B} \ \mathbf{b}]$. Jelikož platí, že $\mathbf{P} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ t]$ bude

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{A}\mathbf{R} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{A}\mathbf{t} \end{aligned} \tag{2}$$

a odtud

$$\mathbf{K} \equiv \mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{A}\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \underbrace{\alpha^2 + \gamma^2 + u_0^2}_{k_u} & \underbrace{u_0 v_0 + c\beta}_{k_c} & u_0 \\ \underbrace{u_0 v_0 + c\alpha}_{k_c} & \underbrace{\alpha^2 + v_0^2}_{k_v} & v_0 \\ u_0 & v_0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Jelikož matice \mathbf{P} je definována až na měřítko, poslední prvek $\mathbf{K} \equiv \mathbf{B}\mathbf{B}^T$ se obvykle nerovná 1, proto je nutné matici normalizovat, tak aby $\mathbf{K}_{33} = 1$. Poté dostaneme

$$\begin{aligned} u_0 &= \mathbf{K}_{13} \\ v_0 &= \mathbf{K}_{23} \\ \beta &= \sqrt{k_v - v_0^2} \\ \gamma &= \frac{k_c - u_0 v_0}{\beta} \\ \alpha &= \sqrt{k_u - u_0^2 - \gamma^2}. \end{aligned}$$

Řešení je jednoznačné protože $\alpha > 0$ a $\beta > 0$. Když jsou známy vnitřní parametry, je možné vypočítat vnější parametry z (2)

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}.$$

Výše uvedené výsledky jsme získali minimalizací algebraické vzdálenosti, která ale nemá fyzikální význam. Řešení je možné vylepšit pomocí metody maximální věrohodnosti.

3.2.2 Kalibrace využívající 2D rovinu

V této podkapitole bude představena jedna ze standardních metod pro kalibraci pomocí 2D roviny, text vychází zejména z [3], [5] a [6]. Další možné techniky a postupy lze nalézt například v [12] nebo [14].

Tato technika vyžaduje pořízení snímků kalibrační roviny z různých pozic. Pro výpočet stačí dva snímky, ale pro lepší kvalitu určovaných parametrů je vhodné pořídit čtyři nebo pět snímků. Při snímkování můžeme pohybovat jak kalibrační rovinou, tak samotným fotoaparát. Pozice fotoaparátu nemusí být známá, ale měli bychom se vyhnout pozici, při které bude rovina snímku rovnoběžná s kalibrační rovinou.

Tato kalibrační procedura seskládá ze šesti kroků:

1. Vytisknutí vzorku a jeho umístění na rovný povrch.
2. Pořízení několika snímků kalibrační roviny z různých pozic.
3. Detekce bodů na snímcích.
4. Určení pěti prvků vnitřní orientace a všech prvků vnější orientace pomocí analytického řešení.
5. Určení koeficientů radiální distorze pomocí metody nejmenších čtverců.
6. Vylepšení určení všech parametrů minimalizací.

Bez ztráty obecnosti můžeme předpokládat, že naše rovina bude umístěna v $Z = 0$ předmětového souřadnicového systému. Označíme i -tý sloupec rotační matice \mathbf{R} jako \mathbf{r}_i a dostaneme

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Bod na kalibrační rovině označíme \mathbf{M} , jelikož Z se vždy rovná nule, jeho souřadnice jsou $\mathbf{M} = [X, Y]^T$. Tedy $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, 1]^T$. Bod \mathbf{M} a jeho obraz \mathbf{m} jsou vzájemně spojeny homografií (jiný název pro projektivní transformaci) \mathbf{H} :

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{M}},$$

$$\text{kde } \mathbf{H} = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}],$$

3×3 matice \mathbf{H} je definovaná až na měřítko.

Matici \mathbf{H} označíme jako $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3]$. Odtud dostaneme $[\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]$, kde λ je libovolný skalár. Jelikož víme, že \mathbf{r}_1 a \mathbf{r}_2 jsou ortonormální, platí

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 &= 0 \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 &= \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Nyní spojíme tyto dva vztahy s absolutní kuželosečkou. Kalibrační rovina je

popsána v souřadnicovém systému fotoaparátu následující rovnicí $\begin{bmatrix} \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{r}_3^T \mathbf{t} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = 0$, kde

$w = 0$ pro body v nekonečnu a $w = 1$ pro ostatní body. Tato rovina protíná rovinu

v nekonečnu v přímce a můžeme vidět, že body $\begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ a $\begin{bmatrix} \mathbf{r}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$ na této přímce leží. Jakýkoliv

další bod přímky je jejich lineární kombinací $\mathbf{x}_\infty = a \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} \mathbf{r}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\mathbf{r}_1 + b\mathbf{r}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$. Nyní

budeme hledat průsečíky absolutní kuželosečky s přímkou. Podle definice bod \mathbf{x}_∞

(circular point) splňuje vztah $\mathbf{x}_\infty^T \mathbf{x}_\infty = 0$, tedy $(a\mathbf{r}_1 + b\mathbf{r}_2)^T (a\mathbf{r}_1 + b\mathbf{r}_2) = 0$ nebo

$a^2 + b^2 = 0$. Řešením je $b = \pm ai$, kde $i^2 = -1$. Průsečíky jsou tedy $\mathbf{x}_\infty = a \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \pm i\mathbf{r}_2 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Tyto body jsou invariantní Euklidovské transformaci (pevné transformaci). Jejich projekci

na rovinu obrazu (až na měřítko) můžeme zapsat jako $\tilde{\mathbf{m}}_\infty = \mathbf{A}(\mathbf{r}_1 \pm i\mathbf{r}_2) = \mathbf{h}_1 \pm i\mathbf{h}_2$.

Bod $\tilde{\mathbf{m}}_\infty$ leží na obraze absolutní kuželosečky, popsané výrazem $\mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$. To nám dává

$$(\mathbf{h}_1 \pm i\mathbf{h}_2)^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{h}_1 \pm i\mathbf{h}_2) = 0.$$

Nyní budeme řešit vlastní kalibraci. Tedy

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}.$$

Matice \mathbf{B} je symetrická, definovaná 6D vektorem $\mathbf{b} = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T$. Označíme i -tý sloupcový vektor matice \mathbf{H} jako $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]$ a dostaneme $\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b}$, kde $\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]$.

Dva základní vztahy (3) můžeme přepsat jako dvě homogenní rovnice $\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = \mathbf{0}$. Pokud budeme mít n bodů na kalibrační rovině, můžeme tuto rovnici zapsat jako $\mathbf{V} \mathbf{b} = \mathbf{0}$, kde \mathbf{V} je matice $2n \times 6$. Pokud bude $n \geq 3$, potom dostaneme jediné řešení pro \mathbf{b} (až na měřítko). Pokud bude $n = 2$ potom můžeme zavést $\gamma = 0$ a dostaneme další rovnici $[0, 1, 0, 0, 0, 0] \mathbf{b} = 0$. Když bude $n = 1$ můžeme vyřešit pouze α a β . Řešením rovnice bude vlastní vektor $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$, který patří k nejmenšímu vlastnímu číslu. Jakmile známe \mathbf{b} , můžeme vypočítat všechny prvky vnitřní orientace z matice $\mathbf{B} = \gamma \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}$ s libovolným měřítkem γ .

$$v_0 = \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}$$

$$\lambda = B_{33} - \frac{[B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]}{B_{11}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}}$$

$$\gamma = -\frac{B_{12}\alpha^2\beta}{\lambda}$$

$$u_0 = \frac{\gamma v_0}{\alpha} - \frac{B_{13}\alpha^2}{\lambda}.$$

Když známe matici \mathbf{A} , prvky vnější orientace lehce vypočteme jako $\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1$, $\mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2$, $\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2$, $\mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3$, kde $\lambda = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\| = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\|$.

Výše uvedené výsledky jsme získali minimalizací algebraické vzdálenosti, která ale nemá fyzikální význam. Řešení můžeme vylepšit pomocí metody maximální věrohodnosti.

3.2.3 Kalibrace využívající 1D linii

Text této podkapitoly vychází z [7].

Uvedená metoda je založená na pořizování snímků 1D objektu skládajícího se minimálně ze tří kolineárních bodů. Aby bylo možné provést výpočet, musí mít alespoň jeden z bodů pevně danou polohu.

Budeme předpokládat, že bod A je pevně fixovaný a linie AB se kolem tohoto pevného bodu pohybuje. Délku linie AB označíme L , $\|B - A\| = L$. Polohu bodu C je možné zapsat pomocí bodů A a B , tedy $C = \lambda_A A + \lambda_B B$. Bod C je ve středu linie, mezi body A a B , tedy $\lambda_A = \lambda_B = 0.5$. Body \mathbf{a} , \mathbf{b} a \mathbf{c} jsou projekce bodů A , B a C do roviny obrazu. Bez ztráty obecnosti si můžeme definovat místní systém objektu, tedy $\mathbf{R} = \mathbf{I}$ a $\mathbf{t} = \mathbf{0}$. Označme si neznámou hloubku bodů jako z_A , z_B a z_C . Podle (1) můžeme psát

$$A = z_A \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}$$

$$B = z_B \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{b}}$$

$$C = z_C \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{c}}.$$

Rovnice dosadíme do $C = \lambda_A A + \lambda_B B$ a dostaneme $z_C \tilde{\mathbf{c}} = z_A \lambda_A \tilde{\mathbf{a}} + z_B \lambda_B \tilde{\mathbf{b}}$. Zavedením vektorového násobení na obou stranách rovnice získáme

$$z_A \lambda_A (\tilde{\mathbf{a}} \times \tilde{\mathbf{c}}) + z_B \lambda_B (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}}) = \mathbf{0}.$$

Vyjádříme z_B

$$z_B = -z_A \frac{\lambda_A (\tilde{\mathbf{a}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})}{\lambda_B (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})}.$$

Z $\|B - A\| = L$ máme $\|\mathbf{A}^{-1}(z_B \tilde{\mathbf{b}} - z_A \tilde{\mathbf{a}})\| = L$. Pokud dosadíme za z_B dostaneme

$$z_A \left\| \mathbf{A}^{-1} \left(\tilde{\mathbf{a}} + \frac{\lambda_A (\tilde{\mathbf{a}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})}{\lambda_B (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})} \tilde{\mathbf{b}} \right) \right\| = L.$$

Což je ekvivalentní vztahu $z_A^2 \mathbf{h}^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h} = L^2$, kde $\mathbf{h} = \tilde{\mathbf{a}} + \frac{\lambda_A(\tilde{\mathbf{a}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})}{\lambda_B(\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}}) \cdot (\tilde{\mathbf{b}} \times \tilde{\mathbf{c}})} \tilde{\mathbf{b}}$. Rovnice obsahuje matici zatím neznámých prvků vnitřní orientace \mathbf{A} a neznámou hloubku z_A fixovaného bodu A . Vektor \mathbf{h} je možné spočítat z bodů na snímku a známých hodnot λ_A a λ_B . Celkový počet neznámých je šest a pro kalibraci je tedy potřeba nejméně šest různých snímků.

Nechť

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}.$$

Matice \mathbf{B} je symetrická, definovaná 6D vektorem $\mathbf{b} = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T$. Pokud $\mathbf{h} = [h_1, h_2, h_3]^T$ a $\mathbf{x} = z_A^2 \mathbf{b}$, potom z předchozí rovnice $z_A^2 \mathbf{h}^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h} = L^2$ dostaneme $\mathbf{v}^T \mathbf{x} = L^2$ kde $\mathbf{v} = [h_1^2, 2h_1 h_2, h_2^2, 2h_1 h_3, 2h_2 h_3, h_3^2]^T$. Pro N snímků 1D objektu dostaneme složením n rovnic jednu rovnici ve tvaru $\mathbf{V} \mathbf{x} = L^2 \mathbf{1}$, kde $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N]^T$ a $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$. Řešení pomocí metody nejmenších čtverců má potom tvar $\mathbf{x} = L^2 (\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{1}$. Jakmile známe \mathbf{x} , můžeme spočítat všechny parametry založené na $\mathbf{x} = z_A^2 \mathbf{b}$. Nechť $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T$. Nyní můžeme vyjádřit všechny prvky vnitřní orientace a hloubku z_A

$$v_0 = \frac{x_2 x_4 - x_1 x_5}{x_1 x_3 - x_2^2}$$

$$z_A = \sqrt{x_6 - \frac{[x_4^2 - v_0(x_2 x_4 - x_1 x_5)]}{x_1}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{z_A}{x_1}}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{z_A x_1}{x_1 x_3 - x_2^2}}$$

$$\gamma = -\frac{x_2 \alpha^2 \beta}{z_A}$$

$$u_0 = \frac{\gamma v_0}{\alpha} - \frac{x_4 \alpha^2}{z_A}.$$

Výše uvedené výsledky jsme získali minimalizací algebraické vzdálenosti, která ale nemá fyzikální význam. Řešení můžeme vylepšit pomocí metody maximální věrohodnosti.

3.2.4 Auto-kalibrace

Tato metoda se vyhýbá kalibraci pomocí speciálních kalibračních objektů. Vyžaduje se pouze znalost odpovídající si bodů na sérii snímků statické scény. Stejně jako v předchozích případech není potřeba znát pohyb fotoaparátu. Tato metoda je vhodná zejména, pokud dochází ke změně prvků vnitřní orientace, např. kvůli zaostřování nebo zoomování fotoaparátu.

Základem pro tuto metodu je pevný pohyb kamery, který fixuje absolutní kuželosečku. Pokud je možné určit ze snímků absolutní kuželosečku, může být nalezen i její obraz a tedy i prvky vnitřní orientace. Jedno z možných řešení tohoto problému je využití Krupových rovnic.

V následujícím textu bude nastíněn princip techniky využívající Krupovy rovnice, text vychází zejména z [8] a [9]. Podrobnější popis je možné nalézt v [9]. Další možné techniky a postupy lze nalézt například v [2], [13], [15], [16], [17], [18], [19] nebo [20].

Krupovy rovnice spojují epipóly¹ pohybu fotoaparátu s absolutní kuželosečkou, a tedy i s maticí prvků vnitřní orientace \mathbf{A} . Předpokládejme, že máme vyfocené dva snímky pevné scény z dvou různých pozic fotoaparátu. S těmito pozicemi se pojí dva epipóly \mathbf{e} a \mathbf{e}' . Obraz absolutní kuželosečky ω se se změnou pozice nezmění, proto dvě tečny \mathbf{k} ω z \mathbf{e} korespondují na základě epipolární transformace² s dvěma tečnami \mathbf{k} ω z \mathbf{e}' . Podmínky pro tyto dvě tečny spojují epipóly s absolutní kuželosečkou. Matematicky mohou být tyto podmínky zapsány jako $(\mathbf{e} \times \mathbf{y})^T \mathbf{D} (\mathbf{e} \times \mathbf{y}) = 0$, kde \mathbf{y} je bod na prvním snímku. Pokud zapíšeme \mathbf{D} jako

¹ Epipóly jsou průsečíky přímky procházející středy promítání s rovinou snímku.

² Jedná se o transformaci obecně skloněných snímků na snímky s rovnoběžnou osou záběru.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\delta_{23} & \delta_3 & \delta_2 \\ \delta_3 & -\delta_{13} & \delta_1 \\ \delta_2 & \delta_1 & -\delta_{12} \end{bmatrix},$$

předchozí rovnici můžeme napsat jako $A_{11}y_1^2 + 2A_{12}y_1y_2 + A_{22}y_2^2 = 0$, kde

$$\begin{aligned} A_{11} &= -\delta_{13}e_3^2 - \delta_{12}e_2^2 - 2\delta_1e_2e_3 \\ A_{12} &= \delta_{12}e_1e_2 - \delta_3e_3^2 + \delta_2e_2e_3 + \delta_1e_1e_3 \\ A_{22} &= -\delta_{23}e_3^2 - \delta_{12}e_1^2 - 2\delta_2e_1e_3. \end{aligned}$$

Stejně rovnice existují pro e' . Je zapotřebí provést ještě jednu operaci - bilineární transformaci. Jestliže bilineární transformace bude

$$\tau' = \frac{a\tau + b}{c\tau + d},$$

získáme nakonec Kruppy rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned} A_{12}(A'_{22}a^2 + A'_{11}c^2 + 2A'_{12}ac) - (A'_{12}c + A'_{22}a + A'_{11}bc + A'_{12}ab)A_{11} &= 0 \\ A_{22}(A'_{22}a^2 + A'_{11}c^2 + 2A'_{12}ac) - (2A'_{12}b + A'_{22} + A'_{11}b^2)A_{11} &= 0. \end{aligned}$$

Z každého snímku dostaneme dvě rovnice. Matice prvků vnitřní orientace má pět neznámých, jsou tedy potřeba nejméně tři snímky, aby bylo možné jednoznačně určit všechny parametry. Jelikož tři snímky dávají šest rovnic pro pět neznámých, problém je přeurečený. Numerické metody obvykle při řešení takového problému selhávají, proto se jedna z rovnic vypouští. K výpočtu parametrů se použije zbývajících pět rovnic. Šestá rovnice slouží k vyloučení nesprávných řešení.

Prvky vnitřní orientace mohou být vypočteny z ω . Rovnice pro ω je $\mathbf{y}^T \mathbf{A}^{-1T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y} = 0$. Z toho plyne, že $\mathbf{D} = \mathbf{A} \mathbf{A}^T$. Prvky matice \mathbf{D} souvisejí až na měřítko s prvky vnitřní orientace

$$\begin{aligned} \delta_1 &= v_0, \\ \delta_2 &= u_0 \\ \delta_3 &= u_0 v_0 + \beta \gamma \\ \delta_{12} &= -1 \\ \delta_{23} &= -u_0^2 - \alpha^2 - \gamma^2 \\ \delta_{13} &= -v_0^2 - \beta^2. \end{aligned}$$

Z těchto vztahů je vidět, že prvky vnitřní orientace se dají jednoznačně vypočítat z Kruppych koeficientů, pokud budou dodrženy následující podmínky:

$$\delta_{13}\delta_{12} > 0, \quad \delta_{23}\delta_{12} > 0, \quad \delta_{13}\delta_{12} - \delta_1^2 > 0, \quad \delta_{23}\delta_{12} - \delta_2^2 > 0,$$

$$\frac{(\delta_3\delta_{12} + \delta_1\delta_2)^2}{(\delta_{13}\delta_{12} - \delta_1^2)(\delta_{23}\delta_{12} - \delta_2^2)} \leq 1.$$

4. Rešerše literatury zabývající se testováním stability prvků vnitřní orientace

V odborné literatuře již bylo publikováno mnoho článků zabývajících se zkoumáním stability prvků vnitřní orientace (dále PVniO). Autoři testují například chování parametrů při manipulaci s fotoaparátem (zapínání a vypínání, změna nastavení a zoomu apod.), jejich stabilitu v čase, vliv orientace snímku, ale i závislost parametrů na vnějších podmínkách. Ke svým experimentům využívají převážně digitální fotoaparáty nižších cenových kategorií a ověřují tak jejich vhodnost k fotogrammetrickým účelům. V této kapitole budou představeny některé metody, postupy a výsledky již provedených pokusů.

4.1 Metody ZROT, ROT a SPR

Hlavním úkolem testování bývá zjistit, zdali jsou si dvě sady parametrů fotoaparátu vzájemně podobné. V [28] a [29] představují tři metody pro ověření podobnosti parametrů, a to Zero Rotation Method (ZROT), Rotation Method (ROT) a Single Photo Restriction Method (SPR).

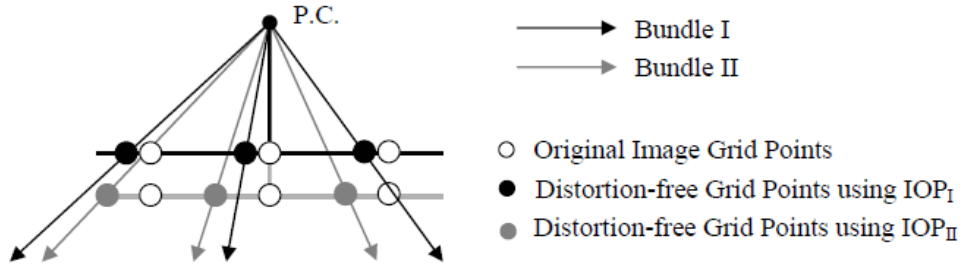
Zero Rotation Method - Pro každou sadu PVniO je definován svazek paprsků. Předpokládáme, že tyto svazky procházejí stejným středem promítání a mají rovnoběžný souřadnicový systém roviny snímku (viz obrázek 4.1). Dále je vytvořena pravidelná mřížka v 2D rovině snímku. V uzlech této mřížky odstraníme s použitím setů PVniO distorzi. V každém uzlu tedy dostaneme dva body nezátížené distorzí. Tyto body ale nemusí ležet v jedné rovině, a proto je nutné body jedné sady PVniO promítnout do roviny snímku druhé sady PVniO. K tomuto účelu se použijí rovnice

$$x'_2 = x_2 \frac{c_1}{c_2}$$

$$y'_2 = y_2 \frac{c_1}{c_2},$$

kde (x_2, y_2) jsou souřadnice bodů druhé sady PVniO nezátížené distorzí, (x'_2, y'_2) jsou ty samé souřadnice promítnuté do roviny snímku první sady PVniO a c_1, c_2 jsou konstanty komory první a druhé sady PVniO. Leží-li body obou sad ve stejné rovině, je možné

vypočítat rozdíl jejich x-ových a y-ových souřadnic. Stupeň podobnosti obou setů nám udává střední kvadratická chyba těchto rozdílů. Pokud je střední kvadratická chyba v rozmezí daném směrodatnou odchylkou, považujeme tyto sady PVniO za totožné.



Obrázek 4.1: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou ZROT [29]

Rotation Method – Tato metoda je podobná metodě ZROT, ale tentokrát navíc uvažujeme vzájemné natočení souřadnicových systémů rovin snímků (viz obrázek 4.2). Potřebujeme tedy zjistit, jestli existují takové rotační úhly ω, φ, κ , které natočí jeden svazek do polohy druhého. Tuto shodu je možné vyjádřit pomocí rovnice

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c_1 \end{bmatrix} = \lambda R^T(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c_2 \end{bmatrix},$$

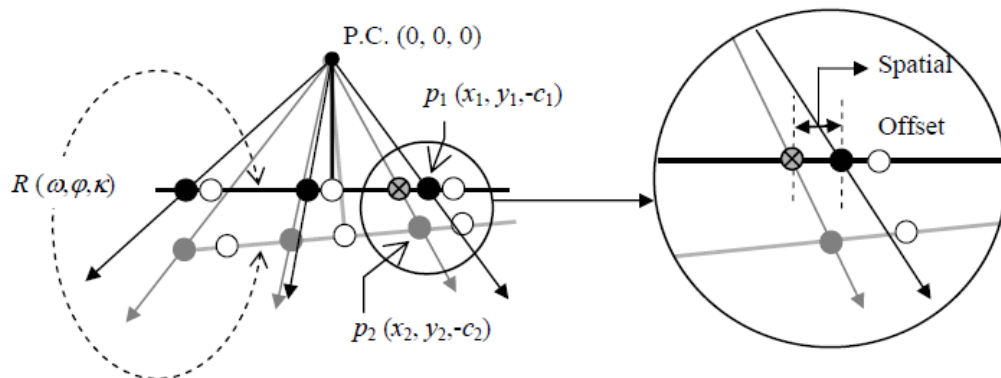
kde (x_1, y_1) a (x_2, y_2) jsou souřadnice bodů prvního a druhého svazku (z bodů byla odstraněna distorze stejně jako v metodě ZROT) a c_1, c_2 jsou konstanty komory první a druhé sady PVniO. Abychom eliminovali měřítkový faktor λ , vydělíme první dvě rovnice třetí a dostaneme

$$x_1 = -c_1 \frac{r_{11}x_2 + r_{21}y_2 - r_{31}c_2}{r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c_2}$$

$$y_1 = -c_1 \frac{r_{12}x_2 + r_{22}y_2 - r_{32}c_2}{r_{13}x_2 + r_{23}y_2 - r_{33}c_2}.$$

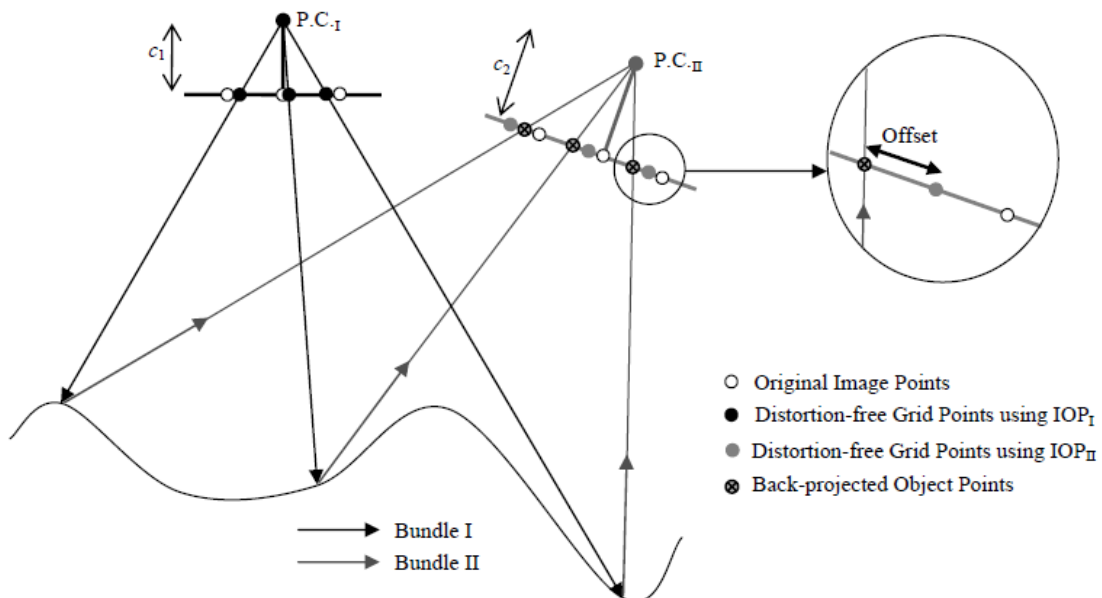
Máme-li n odpovídajících si bodů, dostaneme $2n$ rovnic, ze kterých můžeme určit neznámé rotační úhly pomocí metody nejmenších čtverců. Výsledkem této procedury bude hodnota rozptylu σ_0^2 , která určuje míru shodnosti mezi svazky. Pokud je vypočtený rozptyl v intervalu definovaném očekávaným rozptylem, jsou tyto dva sady PVniO považovány za shodné. Metoda ROT poskytuje mnohem smysluplnější a méně

konzervativní výsledky než metoda ZROT, ale není vyloučeno, že PVniO a souřadnice středu promítání jsou korelované.



Obrázek 4.2: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou ROT [29]

Single Photo Restriction Method – Tato metoda je podobná metodě ROT, ale zde předpokládáme, že svazky paprsků definované prvním a druhým setem PVniO mají různé středy promítání (viz obrázek 4.3). Prvním krokem je opět vytvoření pravidelné mřížky a odstranění distorze z jejích uzlů. Dále definujeme svazek paprsků první sady PVniO s použitím příslušného středu promítání a bodů nezatížených distorzí. Průnik tohoto svazku s objekty v prostoru nám dává množinu bodů. Pokud použijeme tyto body, jsme schopni rekonstruovat pozici svazku paprsků druhé sady PVniO. Rozptyl



Obrázek 4.3: Poloha dvou svazků paprsků definovaná metodou SPR [29]

rozdílů mezi body nezatíženými distorzí druhé sady PVniO a body, které vznikly touto zpětnou projekcí, nám udává míru podobnosti mezi sety PVniO. Tato metoda dává lepší odhad podobnosti PVniO než ROT, jelikož zabraňuje možné korelaci mezi PVniO a prvky vnější orientace (dále PVO). Na druhou stranu v rovinatém terénu dává tato metoda uspokojivé výsledky, i když jsou sety výrazně rozdílné.

V [28] analyzovali stabilitu pěti fotoaparátů (2x Canon EOS 1D, Nikon 4500, Rollei d7 metric, Sony DSC-F707) v průběhu třinácti měsíců. Ke kalibraci fotoaparátů používali kalibrační pole skládajícího se z rovných linií (tmavé provazy napnuté na zdi mezi hřebíky) a několika bodů. Každou sadu PVniO určili pomocí osmi překrývajících se snímků, které byly pořízeny ve vzdálenosti čtyř až pěti metrů od kalibračního pole. Vlastní kalibrace snímků vycházela z postupu popsaneho v [30]. Stálost fotoaparátů byla testována pomocí výše uvedených metod. Z výsledků vyplynulo, že podle ZROT metody nejsou fotoaparáty stabilní, ale podle metod ROT a SPR stabilní jsou. Tento výsledek je pochopitelný, jelikož v metodě ZROT neuvažujeme posunutí a natočení svazků paprsků. Jedinou výjimkou byl fotoaparát Nikon 4500, který nevykazoval shodnost setů PVniO ani při metodě ROT. Proto byly jeho PVniO označeny za nestabilní v delším časovém intervalu a dále byla jejich stabilita testována v kratším časovém intervalu (během jednoho dne). Ale ani při tomto testu neprošel fotoaparát metodou ZROT a ROT a byl tedy označen za nestabilní. Podobné hodnocení fotoaparátů můžete najít v [31] a [32].

V [29] byl proveden obdobný test jako v [28], ale tentokrát analyzovali deset fotoaparátů (2x Canon EOS 1D, 5x Nikon 4500, Rollei d7 metric, Sony DSC-F707, Sony DSC-P9) a každý set PVniO byl vypočten z osmnácti snímků, přičemž kalibrační pole pokrývalo přibližně 65-85% snímku. Test dopadl stejně jako v předchozím případě. S výjimkou fotoaparátu Nikon 4500 mohou být všechny fotoaparáty považovány stabilní dle metod ROT a SPR a za nestabilní podle ZROT. Nikon 4500 nemá dle metody ZROT ani ROT shodné PVniO a je tedy považován za nestabilní.

4.2 Změna kalibračních podmínek a nastavení fotoaparátu

V článku [29] představeném v předchozí kapitole autoři dále zkoumali stálost PVniO při změně nastavení fotoaparátu (manuální/automatické ostření, manipulace s čočkou a filtrem), změně velikosti testovacího pole a změně počtu určovaných

parametrů. Všechny tyto změny byly testovány pomocí metody ROT (viz kapitola 4.1). Experiment se sejmutím a nasazením objektivu a filtru byl proveden u fotoaparátů Canon EOS 1D a Sony DSC-F707. U žádného nedocházelo k významnější změně PVniO a fotoaparáty mohou být považovány za stabilní při manipulaci s čočkou a filtrem. Fotoaparátem Sony DSC-F707 byly pořízeny dvě sady snímků, jednou při použití manuálního ostření a jednou při použití automatického ostření. Ani zde se geometrie fotoaparátu nezměnila a je možné říci, že výběr ostření nehraje roli. Snímky menší části kalibračního pole byly pořízeny fotoaparáty Rollei d7 metric a Sony DSC-F707. V tomto případě kalibrační pole pokrývalo větší část snímku než v případě fotografování celého kalibračního pole. Tento pokus ukázal, že čím větší část snímku je pokryta kalibračním polem, tím jsou PVniO lépe určeny, ale velikost kalibračního pole nemá vliv na jejich stabilitu. Poslední test zahrnoval kalibraci při změně počtu určovaných parametrů distorze. Nejprve byl odhadován pouze parametr radiálního zkreslení K_1 , poté dva parametry radiálního zkreslení K_1 a K_2 a jeden parametr tangenciálního zkreslení P_1 a nakonec byly určovány všechny parametry zkreslení, tedy K_1 , K_2 , P_1 , P_2 a dva parametry afinní deformace A_1 a A_2 . Z experimentu vyplynulo, že jednotlivé sety PVniO mohou být považovány za shodné a tedy pro popis distorze plně dostačuje parametr K_1 a není nutné odhadovat žádné jiné parametry. Jedinou výjimkou byl fotoaparát Sony DSC-P9, u kterého K_1 nepopisuje zkreslení dostatečně a bylo by potřeba určit ještě další parametry.

V [33] analyzovali šest teoreticky identických fotoaparátů Pentax Optio A40. Každý fotoaparát byl kalibrován celkem 62krát a pro každou kalibraci bylo použito dvanáct snímků rovinného bodového pole pořízených ze čtyř stanovišť. Z těchto dvanácti snímků byly čtyři pořízeny s fotoaparátem natočeným o 90° a čtyři fotoaparátem natočeným o -90° . Z dvašedesáti sad snímků bylo prvních dvacet pořízeno bez vypínání a manipulace s fotoaparátem, mezi každou z dalších dvaceti sad byl fotoaparát vypnut a zapnut a mezi zbylými snímky docházelo k manipulaci s optickým zoomem. PVniO byly vypočteny v programu Photomodeler 6.0. Hodnota konstanty komory u pěti fotoaparátů se při jejich použití bez vypínání a při vypnutí/zapnutí jevila jako stálá. U šestého fotoaparátu byla její směrodatná odchylka až pětkrát větší než u ostatních a je tedy pravděpodobné, že přístroj má mechanickou

závadu, která ho činí nevodným pro fotogrammetrické využití. Manipulace se zoomem způsobila významné zmenšení konstanty komory u tří ze šesti fotoaparátů. Testování stability hlavního bodu ukazuje, že čím více manipulujeme s fotoaparátem, tím větší je rozptyl polohy hlavního bodu (bez vypínání je rozptyl 3-5 px, po vypnutí/zapnutí 3-14 px a po manipulaci se zoomem 3-21 px). Jeden z přístrojů opět vykazuje značnou geometrickou nestabilitu způsobenou pravděpodobně mechanickými problémy. Z výsledků porovnání PVniO celé sady snímků a tří podmnožin obsahujících převážně natočené snímky je vidět, že při rotaci fotoaparátu dochází ke změně vnitřní geometrie vlivem gravitace. Standardní odchylky ukazují, že nejpřesnější parametry dostaneme, pokud použijeme celé sety, tedy symetrické rozložení snímků. A nakonec z vypočtených parametrů radiální a tangenciální distorze vyplývá, že méně fotogrammetricky přesné jsou přístroje, které mají vyšší stupeň zkreslení a poskytují tedy méně kvalitní snímky.

V [34] ověřovali krátkodobou spolehlivost digitálního fotoaparátu Kodak DC265. Během jednoho dne bylo pořízeno šest sad po šestnácti snímcích kalibračního pole složeného ze 160 terčů. Snímky byly pořízeny v osmi polohách fotoaparátu a vždy dva snímky sady byly stočené o 90°, -90 nebo 180°. První tři sety byly nasnímány za stejných podmínek, při kterých nebylo s fotoaparátem nijak manipulováno, při čtvrtém bylo s fotoaparátem třeseno (simulace hrubého zacházení), při pátém byl opakovaně vypínán a zapínán a při šestém bylo zlehka otáčeno tubusem objektivu. U každé z šesti sad snímků byly určeny blokově a snímkově invariantní PVniO. V případě blokově invariantních PVniO byly všechny PVniO společné pro celý set. Naopak pro snímkově invariantní PVniO je poloha hlavního bodu určována zvlášť pro každý snímek, ostatní parametry jsou opět společné. Porovnání středních kvadratických reziduí snímků u všech blokově nebo snímkově invariantních sítí ukazuje, že i při špatném zacházení má fotoaparát celkem konzistentní přesnost. Naopak rozdíl mezi blokovým a snímkovým přístupem je značný, snímkový přístup dává lepší přesnost. Kodak DC262 tedy vykazuje dobrou krátkodobou stabilitu, která by při běžném zacházení neměla být výrazněji ovlivněna.

Článek [35] se zabývá analýzou geometrické stability deseti fotoaparátů – 1x Logitech Quick Cam Zoom, 2x Terratec 2move 1.3, 3x HP Photosmart 435, 3x Sony DSC V1 a 1x Kodak DSC 460. K vlastní kalibraci využívají nástroj TCC, který se skládá z 3D

kalibračního pole (svislá černá deska, na níž jsou nepravidelně rozmístěné bílé body) a auto-kalibračního softwaru. Třikrát až sedmkrát v průběhu čtyř měsíců bylo všemi fotoaparáty pořízeno čtyřicet různých orientovaných snímků, přičemž nastavení přístrojů jako např. zoom nebo ostření se v průběhu jednoho snímání neměnilo. Při každé kalibraci bylo vytvořeno pět setů obsahujících různé parametry. V prvním setu byla určována pouze konstanta komory a poloha hlavního bodu, v druhém setu byl navíc jeden parametr radiální distorze, ve třetím byly navíc oproti předchozímu ještě dva parametry tangenciální distorze, ve čtvrtém parametr afinního zkreslení a v pátém byla distorze namodelována pomocí Čebyševových polynomů³ nejvýše třetího stupně. Rozsah hodnoty konstanty komory byl vypočten vzhledem k šířce snímku jako: $(c_{max} - c_{min})/w$, kde c_{max} a c_{min} jsou mezní hodnoty konstanty komory a w je šířka snímku. Nejvyšší stabilitu v hodnotě konstanty komory vykazovaly přístroje s pevným objektivem nebo ty, které měly nastaven zoom v limitní poloze. Stabilita nebyla závislá na způsobu vyjádření zkreslení s výjimkou případu, kdy nebylo zkreslení namodelováno vůbec. Změny v poloze hlavního bodu byly opět vyjádřeny vzhledem k šířce snímku jako: $\max_{ij} \sqrt{(x_{H_i} - x_{H_j})^2 + (y_{H_i} - y_{H_j})^2} / w$, kde x_{H_i} , y_{H_i} a x_{H_j} a y_{H_j} jsou souřadnice hlavního bodu dvou různých kalibračních sad a w je šířka snímku. Fotoaparát Kodak DSC 460 vykazoval menší stabilitu hlavního bodu při manipulaci s čočkou během snímání. Fotoaparát Sony DSC V1 byl stabilnější spíše při použití zoomu než při plném rozlišení. Variace hodnot polohy byla vyšší při použití setu bez parametrů distorze, jelikož tento model správně nereflektuje skutečné vlastnosti přístroje. Výjimkou byl fotoaparát HP Photosmart 435, který má velmi malé zkreslení objektivu. Změna velikosti parametrů distorze opět vzhledem k šířce snímku byla nejvyšší u přístroje Terratec 2move 1.3 a to díky jeho vyššímu kompresnímu poměru. Třetí parametr radiální distorze zhoršoval výsledky u všech přístrojů, a proto může být považován za nestabilní. Nakonec bylo zkoumáno chování PVniO při změně rozlišení, zoomu a ostření. Ukázalo se, že není možná žádná interpolace parametrů a při každé změně nastavení je nutná recalibrace zařízení.

³ Čebyševovy polynomy jsou řada ortogonálních polynomů, které hrají důležitou roli v teorii aproximace.

4.3 Závislost prvků vnitřní orientace na změně teploty

V [36] zkoumali, zdali mají na stabilitu PVniO vliv změny teplot prostředí. Pro dosažení teploty blízko 0°C byl digitální fotoaparát Sony DSC-828 zabalen do silikagelu a uložen přibližně na dvanáct hodin v mrazicím boxu. Fotoaparátem bylo pořízeno celkem šest sad po dvanácti snímcích v rozmezí pěti měsíců. Zmražený fotoaparát nasnímal dvě sady 2D kalibračního pole (svislá stěna pokrytá kalibračními terči) při teplotě přibližně 3°C. Další dvě sady 2D kalibračního pole byly nafotografovány při normální teplotě kolem 25°C a jedna sada při 15°C. Sada snímků 3D kalibračního pole (podpurná zeď s umístěnými terči) byla získána při teplotě 25°C. Směrodatné odchytky PVniO vypočtených auto-kalibrací ukazují, že přístroj je nestabilní, ale není možné říci, jestli je to díky vlivu teploty. Experiment tedy nedokazuje, že mají nižší teploty nějaký signifikantní vliv na výsledek kalibrace.

4.4 Pozemní a letecká kalibrace

Článek [37] analyzoval spotřebitelský přístroj používaný díky jeho nízké váze při UAV (unmanned aerial vehicle) fotogrametrii neboli pořizování snímků pomocí bezpilotních letadel, tzv. dronů. Fotoaparátem Olympus Pen E-PM2 byly pořízeny bloky snímků z různých stran 3D kalibračního pole a silný (fotografováno zepředu i ze stran) a slabý (fotografováno pouze zepředu) blok snímků rovinné šachovnice. K vlastní kalibraci byl použit software pro vyrovnání svazku AXIOS Ax.Ori pro snímky 3D pole a program Agisoft Lens a OpenCV pro snímky 2D šachovnice. Z výsledných hodnot PVniO je možné soudit, že silný blok snímků rovinné šachovnice poskytuje spolehlivý odhad parametrů. Dále je tu patrná korelace mezi souřadnicemi hlavního bodu a parametry tangenciální distorze. Parametry tangenciální distorze ovšem není možné vynechat, jelikož by to vedlo k podurčení systému a chybným výsledkům. Dále byla provedena simulace pořizování snímků zvlněné krajiny (převýšení 10 m a 30 m) během letu ve výšce 50 m, a to ve třech scénářích. V prvním scénáři byly snímky pořizovány se stejnou relativní orientací, v druhém scénáři byly přidány snímky středu oblasti pořízené při otáčení dronu o úhel 90° a ve třetím byly navíc přidány snímky pořízené při naklápění dronu o úhel 25° a -25°. Auto-kalibrací byly vypočteny parametry přístroje a jejich směrodatné odchytky. Simulace ukázala, že pro přesnější a stabilnější výsledky je

potřeba zahrnout do kalibrace i narotované a nakloпенé snímky, dále, že více zvlněná krajina nám dává spolehlivější PVniO, ale vyšší prostorovou přesnost poskytuje méně zvlněná krajina (stejný efekt může být vytvořen snímkováním z větší výšky). Bohužel je také patrné, že využívání spotřebitelských méně stabilních fotoaparátů způsobuje nejméně 200% ztrátu přesnosti.

Článek [38] zkoumal PVniO získané jak pozemním tak leteckým snímkováním. Prvním kalibračním polem byl svislá stěna pokrytá pětáctyřiceti terči o známé poloze. Druhé kalibrační pole pokrývalo oblast o rozloze 4km², ve které se nacházelo sedmdesát kontrolních bodů. Použitým fotoaparátem byl Kodak pro DCS-14n. Při pozemní kalibraci bylo nafotografováno dvanáct snímků z tří různých pozic fotoaparátu a se čtyřmi různými úhly náklonu (0°, -90°, +90° a 180°). Při letecké kalibraci byl pořízen blok třiadvaceti snímků ve dvou pásech, výška letu byla okolo 1000 m a překryt snímků 60% a 40%. PVniO byly v obou případech vypočteny auto-kalibrací. Výsledky pozemní a letecké kalibrace byly velmi podobné, přestože byly získány dvěma rozdílnými metodami. V obou případech byla nalezena korelace mezi PVniO a PVO, kterou není možné úplně eliminovat. Z parametrů distorze byly určeny pouze ty signifikantní, a to dva parametry radiální distorze. Mezi těmito parametry byla také nalezena značná korelace, která ukazuje, že distorzi je možné modelovat pouze pomocí jednoho parametru. Při letecké kalibraci byla navíc objevena korelace mezi konstantou komory a prvky distorze, která ukazuje závislost velikosti distorze na hodnotě konstanty komory.

4.5 Shrnutí výsledků

Výsledky různých testování ukazují, že stabilita závisí na konkrétním fotoaparátu, jeho nastavení, způsobu pořizování snímků a metodě kalibrace. Před využitím fotoaparátu pro fotogrammetrické účely je tedy vhodné nejprve provést vlastní ověření stability pro daný projekt a následně přizpůsobit podmínky kalibrace tak, aby bylo dosaženo co nejkvalitnějších výsledků. Více podrobností o jednotlivých experimentech a jejich výsledcích se dočtete přímo v jednotlivých článcích a o dalších analýzách se můžete dočíst například v [39], [40], [41] a [42].

5. Určení prvků vnitřní orientace

5.1 Pořízení kalibračních snímků

Pro účely testování stability prvků vnitřní orientace byly využity výsledky leteckého snímkování firmy CCE Praha, s. r. o. První tři snímkovací lety proběhly v lokalitě letiště Praha-Kbely. Letiště Praha-Kbely je armádním letištěm, které se nachází v severovýchodní části Prahy. Při čtvrtém a pátém letu byly pořízeny záznamy lokality v okolí obce Neplachov, ve které bude probíhat stavba nového úseku dálnice D3. Bohužel v obou případech se jedná o rovinatou oblast, která není příliš vhodná pro kalibraci. Proto byly dále opatřeny snímky budovy Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, které by měly díky členitosti stavby poskytovat přesnější kalibrační hodnoty.

Obrazové záznamy byly pořízeny 20,2megapixelovou digitální jednookou zrcadlovkou Canon EOS 6D s objektivem Canon EF 24mm f/2.8 IS USM s pevnou ohniskovou vzdáleností (viz tabulka 5.1). Pro letecké snímkování byl fotoaparát pomocí soustavy suchých zipů upevněn na multikoptěře (dronu) typu CUBE Y-6, která má 6 rotorů umístěných na rameni ve tvaru písmene Y (obrázek 5.1). Toto rozložení a počet rotorů udržuje zařízení stabilní. Letoun je prostředek kategorie VTOL, tedy má vertikální vzlet a přistání, a proto je vhodný pro účely snímkování. Multikoptéra byla vyrobena a je provozována Vojenským technickým ústavem.

Specifikace	Canon EOS 6d s objektivem Canon EF 24mm f/2.8 IS USM
Typ snímače	CMOS
Velikost snímače	35.8 × 23.9 mm (855.62 mm ²)
Počet efektivních pixelů	Přibližně 20.2 megapixelu
Celkový počet pixelů	Přibližně 20.6 megapixelu
Rozlišení snímače	5505 x 3670
Maximální rozlišení snímku	5472 x 3648
Minimální rozlišení snímku	720 x 480
Poměr stran snímku	3:2
Typ obrazového procesoru	DIGIC 5+
Typ zaostřování	TTL-CT-SIR s vyhrazeným snímačem CMOS
Citlivost ISO	Automatická nebo ručně nastavená 100 až 25 600 (v krocích po 1/3 EV nebo 1 EV), Rozsah citlivosti ISO lze rozšířit na L: 50, H1: 51 200, H2: 102 400
Typ závěrky	Elektronicky řízená šterbinová závěrka

Rychlost závěrky	30–1/4000 s (kroky po 1/2 EV nebo 1/3 EV)
Konstrukce objektivu (členy/skupiny)	11/9
Zorný úhel (horizontální, vertikální, diagonální)	74°, 53°, 84°
Světelnost objektivu	f/2,8
Maximální clona	22
Ohnisková vzdálenost	24 mm
Stabilizátor obrazu	s kompenzací až 4 EV
Typ snímku	JPEG: jemné, normální (kompatibilní s Exif 2.21 [Exif Print]) / Standard DCF (Design rule for Camera File system) (2.0), RAW: RAW, M-RAW, S-RAW (14 bitů, Canon original RAW 2. vydání), Kompatibilní s formátem DPOF [Digital Print Order Format] verze 1.1

Tabulka 5.1: Parametry fotoaparátu



Obrázek 5.1: Multikoptéra typu CUBE Y-6

5.1.1 Snímkování v lokalitě letiště Praha - Kbely

Nálety byly prováděny ve třech letových řadách o délce 360 m z výšky 120 m nad terénem. Plánovaný příčný překryt snímků činil 60% a plánovaný podélný překryt 80%, proto byla vzdálenost řad 48 m a vzdálenost snímků 36 m. Kvůli přesnějšímu určení výšek byla delší strana snímku rovnoběžná se směrem letu. Dále bylo v lokalitě letiště signalizováno a geodeticky zaměřeno 16 bodů, které je možné použít jako vlíčovací nebo

kontrolní. Díky zvolené výšce letu vymezuje jeden pixel na snímku v terénu území o straně délky 33 mm.

První snímkový let se konal dne 14. 1. 2016. U fotoaparátu byla ručně nastavena velikost clony $f/4$, citlivost ISO 800 a doba expozice $1/1600$ s. Ostření bylo zvoleno automatické a výsledný snímek měl nejvyšší možné rozlišení 5472×3648 px. Celkem bylo takto pořízeno 28 snímků (obrázek 5.2).



Obrázek 5.2: Ukázka snímku pořízeného při letu 14. 1.

Druhé a třetí snímkování se konalo 9. 2. 2016. Při prvním letu v tento den byla expozice opět nastavena manuálně, a to velikost clony na $f/5.6$, citlivost na ISO 640 a doba expozice $1/1600$ s. Před letem byl přístroj automaticky zaostřen na vzdálenost 100 m, a poté bylo automatické ostření vypnuto. Dále byl proveden pokus s expozičním bracketingem. Jedná se o pořízení téhož záběru s různě nastavenými expozičními hodnotami. V tomto případě měly být pořízeny tři snímky s různou dobou expozice ($1/1000$, $1/6000$ a $1/2500$ s). Bohužel, pokus se nezdařil, jelikož fotoaparát sice měnil dobu expozice v průběhu snímání, ale pořizoval na každém místě pouze jeden záznam (obrázek 5.3). Výsledná fotografie měla opět nejvyšší možné rozlišení 5472×3648 px. Během tohoto letu bylo pořízeno celkem 27 snímků.



Obrázek 5.3: Ukázka snímků s různou expozicí pořízených během prvního letu 9. 2.

Pro druhý let bylo nastavení změněno na velikost clony $f/4$, citlivost ISO 500 a dobu expozice $1/500$. Přístroj ostřil automaticky a výsledný snímek měl stejnou velikost jako v předchozím případě. Ukázalo se, že kvalita kresby objektivu s takto malou clonou není dostatečná, což se projevilo rozmazáním obrazu v rozích snímku. Tentokrát bylo nasnímáno přes tisíc záznamů s rozlišením 5472×3648 px (obrázek 5.4).

5.1.2 Snímkování v lokalitě u obce Neplachov

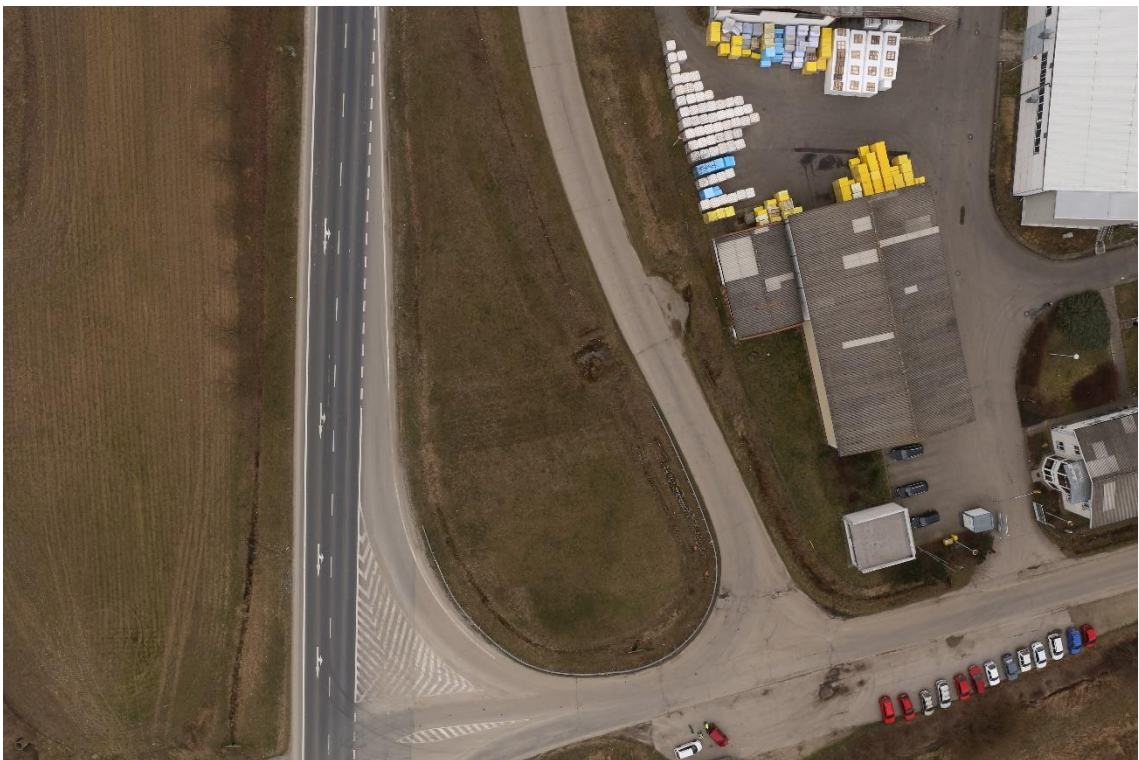
V tomto případě multikoptéra nalétávala pouze ve dvou letových řadách o délce 1200 m a výšce 120 m nad terénem. Plánovaný příčný překryt snímků činil opět 60% a plánovaný podélný překryt 90%. Vzdálenost mezi letovými řadami vyšla na 72 m a vzdálenost snímků na 12 m. Delší strana snímku byla kolmá na směr letu. V této lokalitě bylo signalizováno a geodeticky zaměřeno 11 vlíčovacích a kontrolních bodů.

Oba dva snímkové lety se konaly 10. 3. 2016. Fotoaparát byl nastaven opět manuálně. Při prvním letu byla velikost clony $f/6.3$, citlivost ISO 640 a doba expozice $1/1600$ s. Před druhým letem se obloha projasnila, a proto bylo nastavení změněno na velikost clony $f/8$, citlivost ISO 640 a dobu expozice $1/2000$ s. Před oběma lety byl

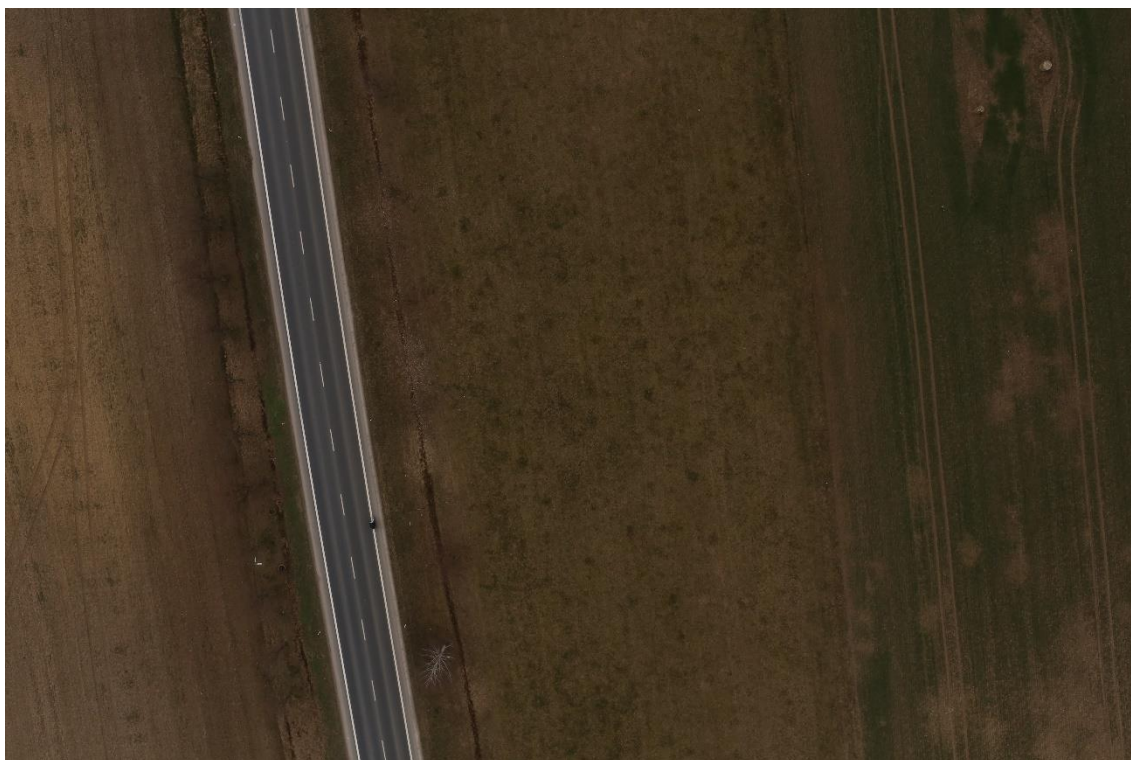
přístroj zaostřen na vzdálenost 120 m. Při prvním i druhém letu bylo pořízeno 198 snímků s nejvyšším možným rozlišením 5472 x 3648 px (obrázek 5.5 a 5.6).



Obrázek 5.4: Ukázka snímku pořízeného během druhého letu 9. 2.



Obrázek 5.5: Ukázka snímku pořízeného během prvního letu 10. 3.



Obrázek 5.4: Ukázka snímku pořízeného během druhého letu 10. 3.

5.1.3 Snímkování kalibračního pole na budově Fakulty aplikovaných věd

Budova Fakulty aplikovaných věd (FAV) byla zvolena jako kalibrační pole z důvodu její prostorové členitosti, která poskytuje přesnější odhad parametrů fotoaparátu. Členitost lze simulovat pořizováním snímků scény (např. rovinné šachovnice) pod různými úhly, avšak toto kalibrační pole má důležitou výhodu. Budovu je možné snímkovat při stejném zaostření, jako v případě snímků pořízených ze vzduchu. Vzhledem k nehybnosti scény je možné použít velkého zaclonění, a tedy i velké hloubky ostrosti. Kalibrační pole je tedy možné využít pro snímkování se zaostřením na vzdálenost od desítek metrů až k nekonečnu.

Pozemní obrazové záznamy budovy byly pořízeny ve dnech 18. 3. 2016 a 19. 4. 2016. Dne 18. 2. 2016 byly pořízeny dvě sady snímků. V obou případech byl fotoaparát nastaven stejně - clona $f/16$, citlivost ISO 400 a doba expozice $1/250$ s. Před prvním snímkováním byl přístroj automaticky zaostřen na vzdálenost přibližně 120 m, a poté bylo automatické ostření vypnuto. Před druhým snímkováním bylo zaostřeno na poloviční vzdálenost cca 60 m. Snímky jedné strany budovy byly pořizovány z různých stanovišť ve vzdálenosti okolo 100 m. První sada čítá 123 snímků a druhá 183 snímků

v rozlišení 5472 x 3648 px (obrázek 5.7 a 5.8). Záznamy byly pořízené jak fotoaparátem umístěným v klasické horizontální poloze, tak natočeným o $+90^\circ$, -90° nebo 180° . Dne 19. 4. 2016 byly pořízeny také dvě sady snímků, stejným způsobem jako 18. 3. Pouze doba expozice se kvůli osvětlení změnila na $1/400$ s. První sada obsahuje celkem 145 snímků a druhá 171 snímků (obrázek 5.9 a 5.10). Na fasádě budovy bylo totální stanicí zaměřeno 44 vlíčovacích a kontrolních bodů.



Obrázek 5.5: Ukázka snímku pořízeného během prvního snímkování 18. 3.



Obrázek 5.6: Ukázka snímku pořízeného během druhého snímkování 18. 3.



Obrázek 5.7: Ukázka snímku pořízeného během prvního snímkování 19. 4.



Obrázek 5.8: Ukázka snímku pořízeného během druhého snímkování 19. 4.

5.2 Výpočet prvků vnitřní orientace

5.2.1 Výpočet parametrů v programu Agisoft PhotoScan

Vlastní kalibrace fotoaparátu byla realizována v programu Agisoft PhotoScan Professional Edition, verze 1.1.5 build 2034 (64 bit) a verze 1.2.4 build 2399 (64 bit). Agisoft PhotoScan je fotogrammetrický software pro automatické zpracování digitálních snímků a následnou tvorbu texturovaných 3D modelů scény, který má využití v mnoha oblastech. Produkt byl vyvinut společností Agisoft LLC, která sídlí v ruském Petrohradu.

Jednou ze součástí programu je i auto-kalibrační nástroj, který dovede odhadnout prvky vnitřní i vnější orientace ze série snímků. Odhadovanými prvky vnější orientace mohou být: f_x, f_y - konstanta komory ve směru osy x a y ⁴, c_x, c_y – souřadnice hlavního bodu snímku, $skew$ – zkosení os snímku (verze 1.1.5) nebo B_1, B_2 – koeficienty zkosení (verze 1.2.4), K_1, K_2, K_3, K_4 – koeficienty radiální distorze, P_1, P_2 – koeficienty tangenciální distorze (ve verzi 1.2.4 i koeficienty P_3, P_4).

V závislosti na typu fotoaparátu využívá program několik modelů zkreslení objektivu. Všechny modely předpokládají, že zařízení funguje na principu středového promítání. Nelineární distorze je vyjádřena pomocí Brownova modelu. Místní souřadnicový systém fotoaparátu má počátek v jeho projekčním centru. Osa Z míří do směru pozorování, osa X směřuje vpravo a osa Y dolů. Souřadnicový systém snímku má počátek v levém horním rohu snímku. Osa X míří opět vpravo a osa Y dolů. Hodnoty snímkových souřadnic jsou udávány v pixelech. Pro zobrazení bodu scény do roviny snímku u klasických fotoaparátů slouží ve verzi 1.1.5 následující rovnice:

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{Z}, y = \frac{Y}{Z} \\r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\x' &= x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy) \\y' &= y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy) \\u &= c_x + x'f_x + y'skew \\v &= c_y + y'f_y,\end{aligned}$$

⁴ Hodnoty konstanty komory jsou vyjádřeny v pixelech, a proto se budou lišit v případě, že pixel nebude čtvercový.

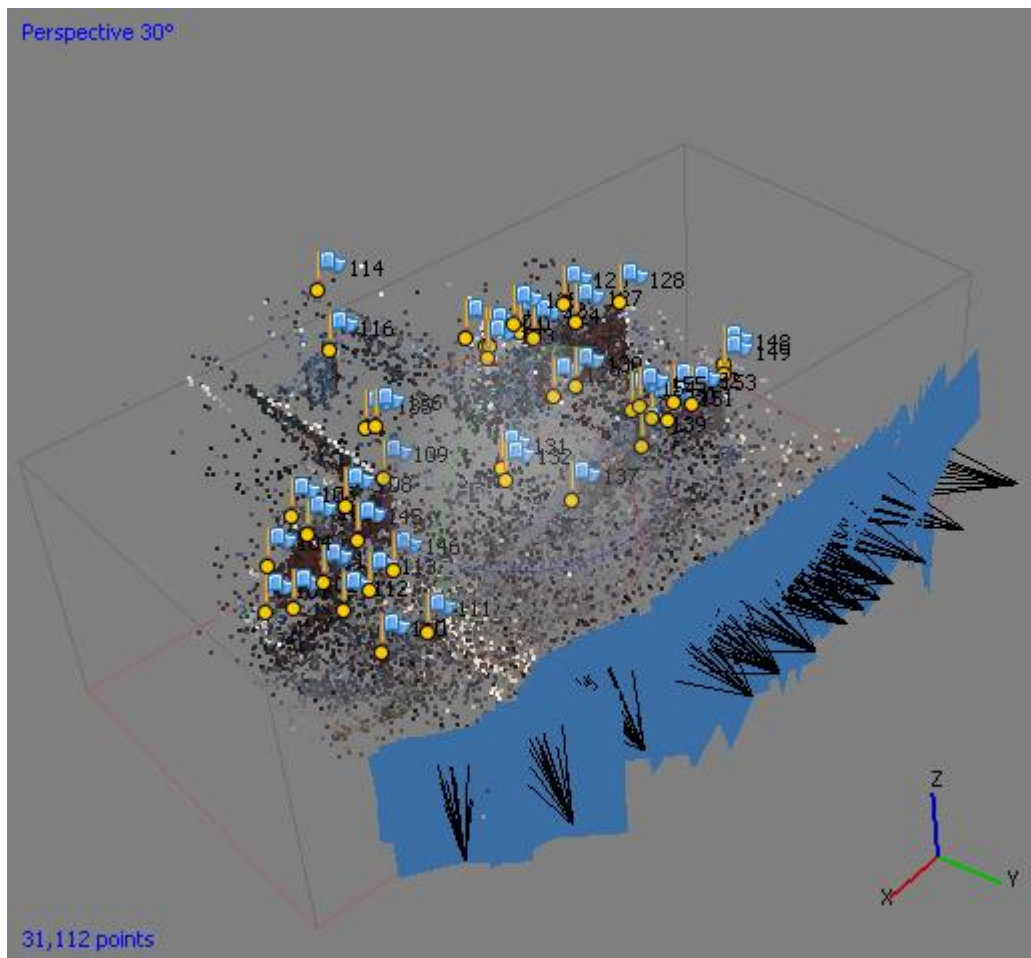
kde X, Y, Z jsou souřadnice bodu v místním souřadnicovém systému, x, y jsou nezkreslené normalizované souřadnice bodu, x', y' jsou zkreslené normalizované souřadnice bodu a u, v jsou snímkové souřadnice promítnutého bodu. Ve verzi 1.2.4 mají poslední dvě rovnice tvar:

$$u = \frac{w}{2} + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2$$
$$v = \frac{h}{2} + c_y + y'f,$$

kde w a h jsou šířka a výška snímku v pixelech. V tomto případě mají souřadnice hlavního bodu počátek ve středu snímku a v rovnicích se vyskytuje pouze jedna konstanta komory, jelikož nepravidelnost pixelu je zahrnuta v koeficientech zkreslení.

Výpočet prvků vnitřní orientace zahrnuje několik kroků:

1. Nejprve je do programu nahrána vybraná série snímků.
2. Operace vyrovnání snímků provede základní odhad vnitřní i vnější orientace fotoaparátu. Dojde k automatické detekci korespondencí na sousedních snímcích a označení spojovacích bodů. Program vypočte, v jaké poloze se fotoaparát nacházel při pořízení každého snímku a snímky vzájemně vyrovná. Nakonec vytvoří řídké mračno bodů, jedná se o 3D reprezentaci snímané scény (obrázek 5.11).
3. Pro zlepšení kvality výsledku je možné opravit polohu některých snímků, případně chybně umístěné snímky odstranit. Dále je potřeba smazat body v řídkém mračnu, které byly očividně chybně vytvořené. Na snímcích je možné vytvořit masku a omezit tak oblast, ve které budou hledány spojovací body. Také můžeme přidat vlíčovací nebo kontrolní body (obrázek 5.12) a nastavit souřadnicový systém.
4. Nakonec je provedena optimalizace parametrů, která zpřesní všechny hodnoty a poskytne konečné výsledky. Pokud známe finální parametry, je možné vytvořit husté mračno bodů, které zrekonstruuje snímanou scénu.



Obrázek 5.9: Model scény (kalibrační pole FAV) s vlíčovacími body a stanovisky snímkům vytvořený v programu Agisoft PhotoScan

Při výpočtu prvků vnitřní orientace pro každou ze sad kalibračních snímků uvažujeme kolmé osy snímkových souřadnic. Proto jsou parametry zkreslení *skew* nebo B_1, B_2 rovny nule. Dále předpokládáme, že se snímek skládá z čtvercových pixelů, proto se konstanta komory f_x a f_y rovnají. Koeficient radiálního zkreslení K_4 a koeficienty tangenciálního zkreslení P_3, P_4 nebudou počítány, jelikož jejich určení není spolehlivé. Mezi odhadované parametry tedy patří: konstanta komory f , souřadnice hlavního bodu c_x, c_y a koeficienty radiální a tangenciální distorze K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 .

Na snímcích z lokality Kbely bylo identifikováno a označeno 13 vlíčovacích bodů. Z letu dne 14. 1. 2016 a prvního letu dne 9. 2. 2016 byly pro kalibraci použity všechny pořízené snímky. Při kalibraci se záznamy z druhého letu dne 9. 2. 2016 bylo využito



Obrázek 5.10: Ukázka označení vlíčovacích a kontrolních bodů a maskování části snímku v programu Agisoft PhotoScan

57 snímků (v každé řadě 19). Vybrány byly snímky s 90% podélným překrytem. Výsledky všech tří kalibrací jsou uvedeny v tabulce 5.2.

	Snímkování 14. 1. 2016 (letišť Kbely)	První snímkování 9. 2. 2016 (letišť Kbely)	Druhé snímkování 9. 2. 2016 (letišť Kbely)
f [px]	3 764,43	3 914,62	3 766,50
c_x [px]	2 739,17	2 740,85	2 728,82
c_y [px]	1 814,41	1 795,02	1 812,13
K_1 [px ⁻²]	-0,093 9	-0,103 4	-0,092 6
K_2 [px ⁻⁴]	0,089 6	0,107 9	0,087 0
K_3 [px ⁻⁶]	-0,023 7	-0,030 8	-0,021 2
P_1 [px ⁻¹]	-0,000 183	0,000 145	-0,000 235
P_2 [px ⁻¹]	0,000 605	-0,000 352	-0,000 045

Tabulka 5.2: Výsledky kalibrace snímkovacích letů v lokalitě letišť Kbely

Při kalibraci snímků z lokality u obce Neplachov bylo zvoleno 26 vlíčovacích bodů a v případě obou letů se použily všechny pořízené snímky. Výsledky těchto dvou kalibrací jsou uvedeny v tabulce 5.3.

	První snímkování 10. 3. 2016 (obec Neplachov)	Druhé snímkování 10. 3. 2016 (obec Neplachov)
f [px]	3 853,87	3 792,76
c_x [px]	2 738,81	2 729,46
c_y [px]	1 814,56	1 808,68
K_1 [px ⁻²]	-0,099 5	-0,096 9
K_2 [px ⁻⁴]	0,098 7	0,094 7
K_3 [px ⁻⁶]	-0,025 0	-0,024 6
P_1 [px ⁻¹]	-0,000 318	-0,000 219
P_2 [px ⁻¹]	-0,000 023	-0,000 113

Tabulka 5.3: Výsledky kalibrace snímkových letů v lokalitě Neplachov

Na budově FAV bylo zaměřeno celkem 44 vlíčovacích bodů. Pro kalibraci byly využity pouze ty, které bylo možné na snímcích jednoznačně identifikovat. Zbytek bodů sloužil jako body kontrolní. Pro výpočet parametrů byly použity všechny pořízené snímky. Výsledky těchto čtyř kalibrací jsou uvedeny v tabulce 5.4.

	První snímkování 18. 3. 2016 (budova FAV)	Druhé snímkování 18. 3. 2016 (budova FAV)	První snímkování 19. 4. 2016 (budova FAV)	Druhé snímkování 19. 4. 2016 (budova FAV)
f [px]	3 755,76	3 755,52	3 757,91	3 755,61
c_x [px]	2 736,73	2 736,91	2 734,92	2 734,29
c_y [px]	1 807,46	1 807,22	1 806,55	1 806,30
K_1 [px ⁻²]	-0,097 8	-0,097 8	-0,096 6	-0,096 5
K_2 [px ⁻⁴]	0,098 6	0,099 5	0,096 0	0,095 3
K_3 [px ⁻⁶]	-0,028 7	-0,030 1	-0,026 4	-0,026 3
P_1 [px ⁻¹]	-0,000 195	-0,000 223	-0,000 271	-0,000 307
P_2 [px ⁻¹]	0,000 118	0,000 117	0,000 029	-0,000 028

Tabulka 5.4: Výsledky kalibrace snímkování kalibračního pole FAV

5.2.2 Přepočet parametrů fotoaparátu

Program Agisoft PhotoScan udává výsledné hodnoty parametrů fotoaparátu v pixelech. Pro usnadnění pochopení výsledků je možné všechny hodnoty převést na milimetry s využitím standardního modelu fotoaparátu. Pro přepočet je nutné znát velikost pixelu, v tomto případě $p = 6,661 \mu\text{m}$.

Pro parametr konstanty komory platí:

$$f[\text{mm}] = f[\text{px}] \cdot p.$$

Snímkové souřadnice budou mít počátek ve středu snímku, kladná osa x bude horizontální a bude mířit vpravo a k ní kolmá osa y bude vertikální a půjde dolů. Rozměry snímku jsou 5472 x 3648 pixelů, tedy $s = 5472$ px a $v = 3648$ px. Program Agisoft PhotoScan a má počátek snímkového souřadnicového systému v levém horním rohu snímku, a proto pro přepočítání souřadnic hlavního bodu použijeme následující rovnice:

$$c_x[\text{mm}] = \left(c_x[\text{px}] - \frac{s}{2}\right) \cdot p$$

$$c_y[\text{mm}] = \left(c_y[\text{px}] - \frac{v}{2}\right) \cdot p.$$

Pro vyjádření koeficientů distorze budeme vycházet z rovnic Brownova modelu:

$$x_d = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + [2P_1xy + P_2(r^2 + 2x^2)]$$

$$y_d = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + [2P_2xy + P_1(r^2 + 2y^2)].$$

Jelikož parametry zkreslení jsou vyjádřeny v jednotkách konstanty komory, pro jejich převod je nutné použít vztahy:

$$K_1[\text{mm}^{-2}] = \frac{K_1[\text{px}^{-2}]}{f^2[\text{mm}^2]}, K_2[\text{mm}^{-4}] = \frac{K_2[\text{px}^{-4}]}{f^4[\text{mm}^4]}, K_3[\text{mm}^{-6}] = \frac{K_3[\text{px}^{-6}]}{f^6[\text{mm}^6]}$$

$$P_1[\text{mm}^{-1}] = \frac{P_1[\text{px}^{-1}]}{f[\text{mm}]}, P_2[\text{mm}^{-1}] = \frac{P_2[\text{px}^{-1}]}{f[\text{mm}]}.$$

Přepočtené parametry jsou uvedeny v tabulce 5.5, 5.6 a 5.7.

	Snímkování 14. 1. 2016 (letišť Kbely)	První snímkování 9. 2. 2016 (letišť Kbely)	Druhé snímkování 9. 2. 2016 (letišť Kbely)
f [mm]	25,075	26,075	25,089
c_x [mm]	0,021	0,032	-0,048
c_y [mm]	-0,064	-0,193	-0,079
K_1 [mm ⁻²]	-0,000 149 30	-0,000 152 08	-0,000 147 13
K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 23	0,000 000 23	0,000 000 22
K_3 [mm ⁻⁶]	0,000 000 00	0,000 000 00	0,000 000 00
P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 007 29	0,000 005 58	-0,000 009 37
P_2 [mm ⁻¹]	0,000 024 14	-0,000 013 49	-0,000 001 79

Tabulka 5.5: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (Kbely)

	První snímkování 10. 3. 2016 (obec Neplachov)	Druhé snímkování 10. 3. 2016 (obec Neplachov)
f [mm]	25,671	25,264
c_x [mm]	0,019	-0,044
c_y [mm]	-0,063	-0,102
K_1 [mm ⁻²]	-0,000 151 06	-0,000 151 86
K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 23	0,000 000 23
K_3 [mm ⁻⁶]	0,000 000 00	0,000 000 00
P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 012 39	-0,000 008 66
P_2 [mm ⁻¹]	-0,000 000 91	-0,000 004 49

Tabulka 5.6: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (Neplachov)

	První snímkování 18. 3. 2016 (budova FAV ZČU)	Druhé snímkování 18. 3. 2016 (budova FAV ZČU)	První snímkování 19. 4. 2016 (budova FAV ZČU)	Druhé snímkování 19. 4. 2016 (budova FAV ZČU)
f [mm]	25,017	25,016	25,031	25,016
c_x [mm]	0,005	0,006	-0,007	-0,011
c_y [mm]	-0,110	-0,112	-0,116	-0,118
K_1 [mm ⁻²]	-0,000 156 24	-0,000 156 23	-0,000 154 22	-0,000 154 19
K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 25	0,000 000 25	0,000 000 24	0,000 000 24
K_3 [mm ⁻⁶]	0,000 000 00	0,000 000 00	0,000 000 00	0,000 000 00
P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 007 79	-0,000 008 93	-0,000 010 81	-0,000 012 27
P_2 [mm ⁻¹]	0,000 004 70	0,000 004 67	0,000 001 18	-0,000 001 11

Tabulka 5.7: Výsledky kalibrace přepočtené na milimetry (kalibrační pole FAV)

6. Rozbor stability prvků vnitřní orientace

6.1 Rekonstrukce polohy bodů snímku

Protože jsou prvky vnitřní orientace popsány poměrně velkým množstvím parametrů, jejichž vliv na výsledné snímkové souřadnice se navíc u většiny z nich mění v závislosti na poloze na snímku, a protože odhady hodnot jednotlivých parametrů jsou vzájemně závislé, lze jen obtížně hodnotit stabilitu vnitřní orientace snímků pouze srovnáním číselných hodnot parametrů. K otestování podobnosti všech získaných sad prvků vnitřní orientace byla proto využita metoda rekonstrukce polohy bodů na snímku, která vychází z metody ZROT popsané v kapitole 4.1. S využitím získaných parametrů byla vypočtena skutečná poloha bodů snímku v prostoru před fotoaparátem ve zvolené vzdálenosti od jeho středu promítání. Takto získané souřadnice bodů lze porovnat a na základě jejich rozdílů rozhodnout zda je stabilita přístroje dostatečná pro daný účel.

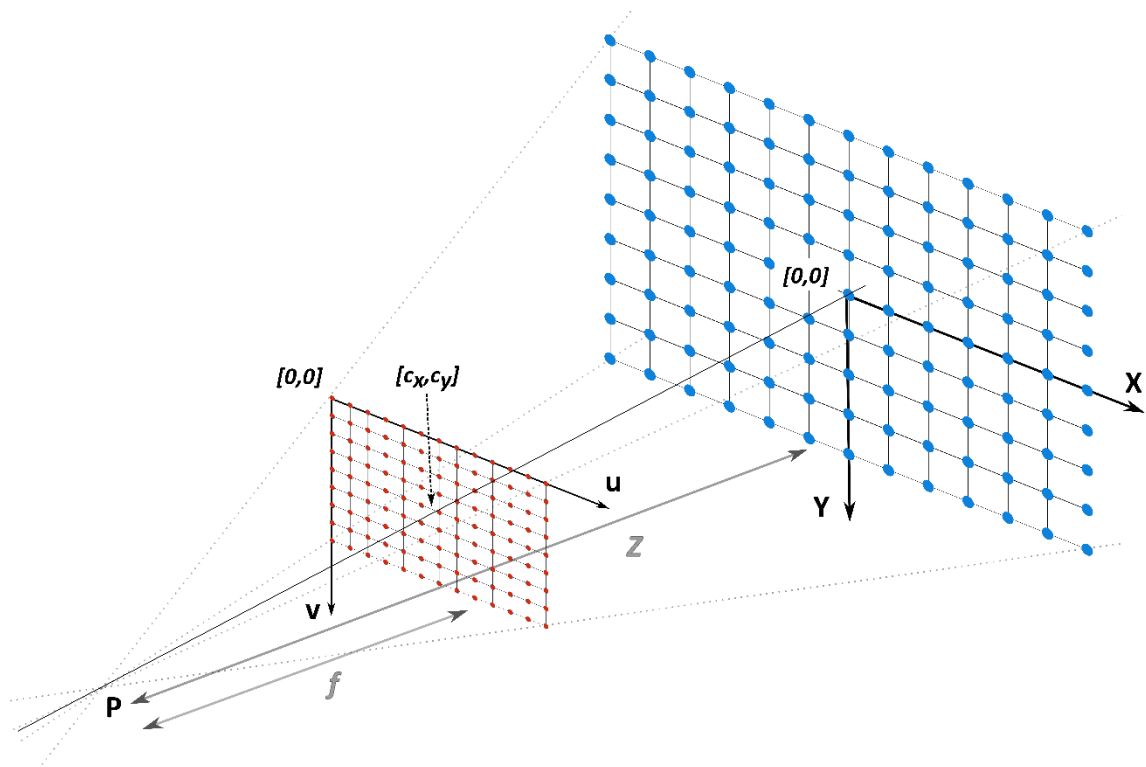
Nejprve byla vytvořena v rovině snímku pravidelná mřížka. Rozměry mřížky korespondují s rozměry snímku, tedy šířka je 5472 px a výška 3648 px. Mřížka se skládá celkem z 925 bodů, které jsou rozmístěny v pravidelných intervalech po 152 px (ve směru osy x a y).

Následně byla z těchto uměle vytvořených bodů odstraněna distorze, a poté byly zpětně zobrazeny do roviny ve vzdálenosti $Z = 100 \text{ m}$ (obrázek 6.1) od středu promítání s využitím rovnic:

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{Z}, y = \frac{Y}{Z} \\r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\x' &= x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + (P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy) \\y' &= y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + (P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy) \\u &= c_x + x'f \\v &= c_y + y'f,\end{aligned}$$

Tímto způsobem byla rekonstruována skutečná poloha bodů zachycených na snímku v prostoru ve vzdálenosti 100 m (odpovídá velikosti pixelu 27,8 mm). Soustava rovnic má tři řešení, a proto je nutné vybrat to, které koresponduje s reálnou situací. Takto byla postupně vypočtena bodová pole pro výsledky jednotlivých kalibrací v programu Agisoft

PhotoScan. Vzájemné polohy bodů byly zobrazeny do grafu. Při porovnávání poloh bodů je nutné si uvědomit, že s rostoucí vzdáleností bodu od fotoaparátu roste úměrně i vzájemná vzdálenost bodů. Tedy pokud se poloha dvou bodů liší o 1 mm ve vzdálenosti 1 m, bude se ve vzdálenosti 100 m lišit o 100 mm.



Obrázek 6.1: Zobrazení bodů pravidelné mřížky do vzdálenosti Z

6.2 Zhodnocení výsledků

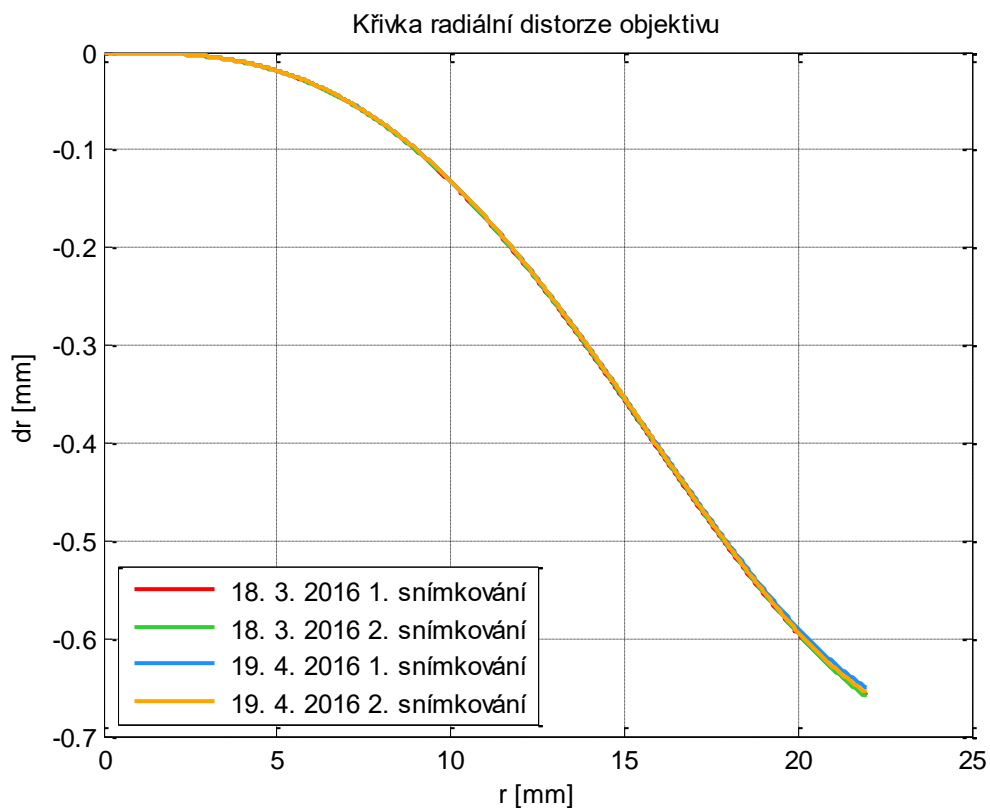
6.2.1 Porovnání hodnot konstanty komory

Již při pouhém pohledu na hodnoty konstanty komory přepočtené na milimetry lze konstatovat, že vypočtená hodnota je přibližně o milimetr vyšší než hodnota udaná výrobcem. Hodnoty zjištěné z leteckých snímků jsou dokonce ve více jak polovině případů ještě o několik desetin milimetru nad hranicí 25 mm a jedna přesahuje i hranici 26 mm. Tyto odchylky jsou způsobeny právě malou členitostí terénu, která poskytuje programu větší volnost při výpočtu, a tím dochází k nepřesnému odhadu hodnot.

6.2.2 Provnání výsledků snímkování kalibračního pole na budově Fakulty aplikovaných věd

Všechny vytvořené grafy zobrazující vzájemné polohy bodů je možné nalézt v příloze A. Při pohledu na graf A.1 je vidět, že vzájemná poloha bodů první a druhé sady parametrů z 18. 3. se liší maximálně o 30 mm u okraje snímku. U první a druhé sady z 19. 4. je rozdíl vyšší a dosahuje 120 mm (graf A.2). Při porovnání poloh mezi jednotlivými dny se maximální rozdíl pohybuje mezi 120 a 190 mm (pro ilustraci graf A.3, A.4). Je tedy možné soudit, že změna ostření a nastavení fotoaparátu a následná manipulace mírně ovlivnily geometrii přístroje. Také měsíční časový odstup měl vliv na prvky vnitřní orientace. Pro aplikace vyžadující vyšší přesnost by nebyla stabilita přístroje dostatečná.

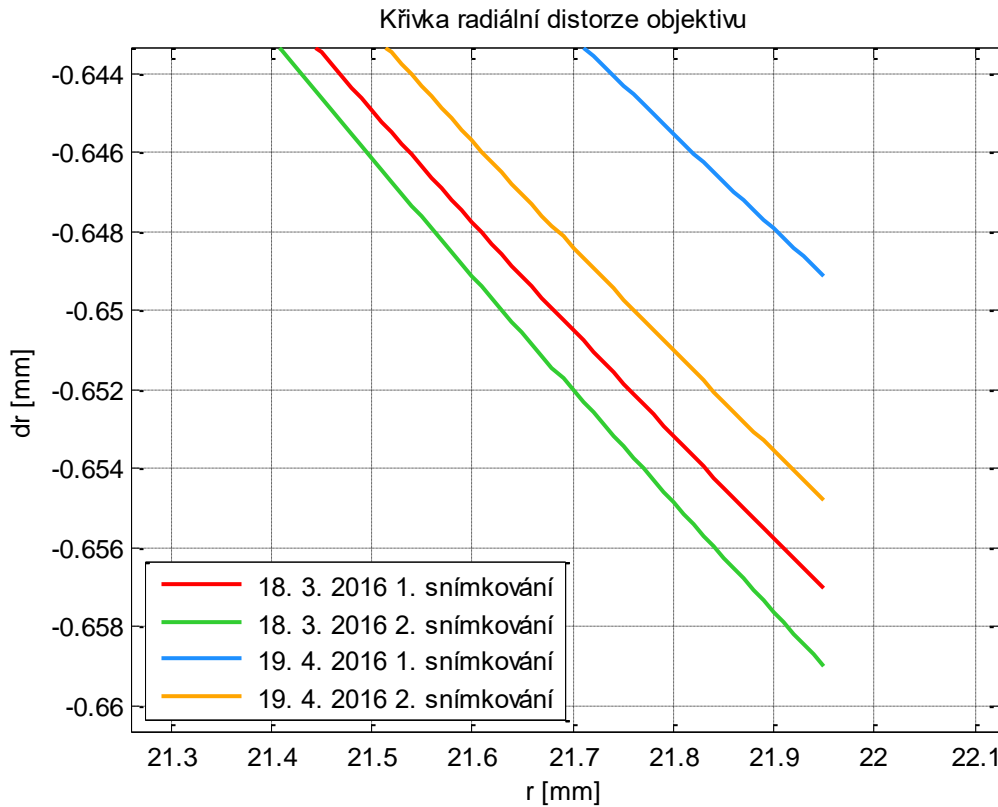
V grafu 6.1 jsou zobrazeny křivky radiální distorze těchto sad. Křivky jsou si velmi podobné a v grafu téměř splývají. Maximální odchylku vyšší než 1 px (0,00661 mm) dosahují křivky až od radiální vzdálenosti 20,9 mm. V grafu 6.2 je pro lepší představu přiblížený konec křivek, tedy hodnoty, které nabývá distorze v rozích snímku. Tento graf



Graf 6.1: Znárodnění radiální distorze objektivu (kalibrační pole FAV)

ukazuje, že v rohu snímku dosahuje rozdíl distorze jednotlivých sad maximálně 0,01 mm (1,5 px).

Dále je z hodnot prvků vnitřní orientace uvedených v tabulce 5.7 možné vyčíst, že ostření nemělo zásadní vliv na změnu parametrů. Odlišnost hodnot způsobil spíše časový odstup jednotlivých snímkování.



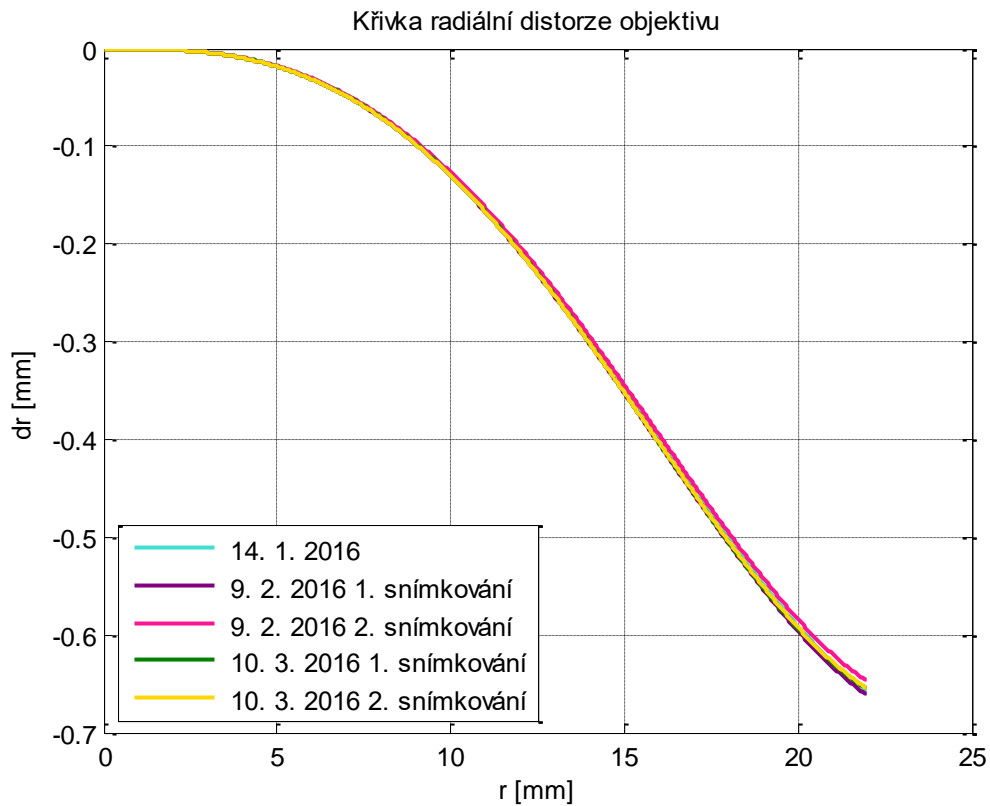
Graf 6.2: Přiblížení hodnot distorze v rozích snímků (kalibrační pole FAV)

6.2.3 Porovnání výsledků leteckého snímkování

Porovnání sad z leteckých snímkování na letišti Kbely (14. 1., 9. 2.) mezi sebou vykazuje až několikametrové rozdíly u okrajů snímků (graf A.5, A.6, A.7). Pokud porovnáme sady z lokality Neplachov (10. 3.) dostaneme opět rozdíl v řádech metrů (graf A.8). Toto potvrzuje, že kalibrace v oblastech s nízkou prostorovou členitostí neposkytuje správné hodnoty prvků vnitřní orientace. Tyto záznamy jsou tedy nevhodné pro použití k účelu kalibrace fotoaparátu.

V grafu 6.3 a 6.4 jsou zobrazeny všechny křivky radiální distorze sad leteckého snímkování. V tomto případě převyšuje maximální odchylka křivek 1 px (0,00661 mm) již

od radiální vzdálenosti 13,1 mm. Rozptyl hodnot zkreslení v rozích snímku je 0,014 mm (2,1 px).



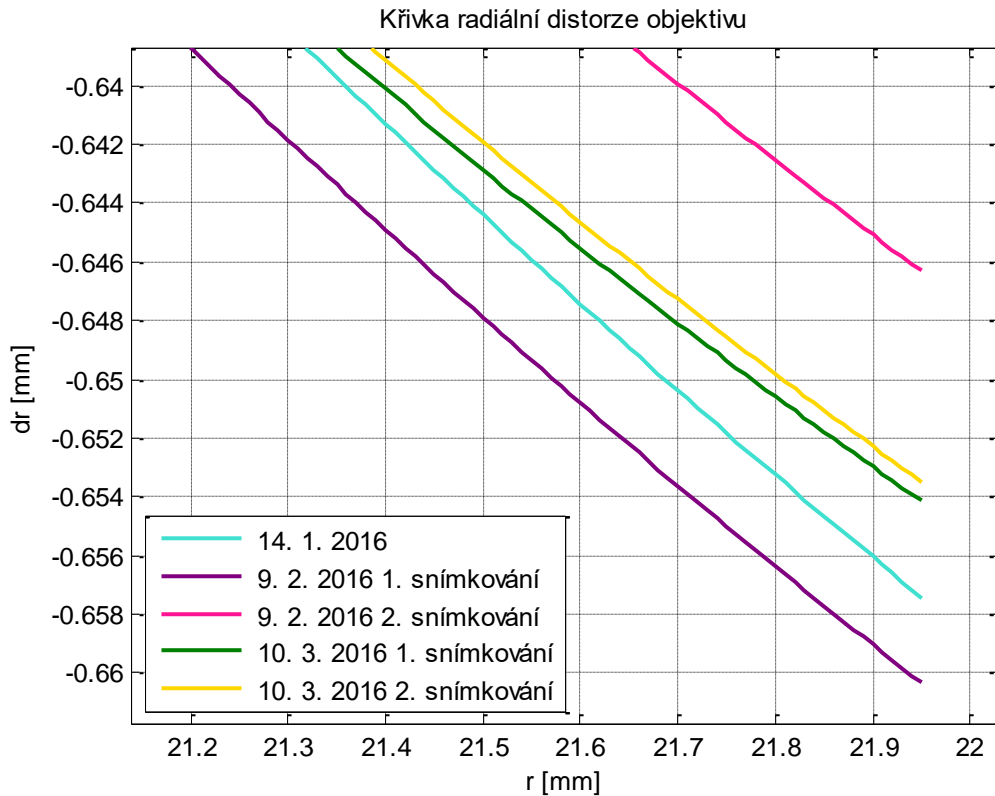
Graf 6.3: Znárodnění radiální distorze objektivu (Kbely, Neplachov)

Pohledem do tabulky 5.5 a 5.6 zjistíme, že vypočtené hodnoty konstanty komory a polohy hlavního bodu u leteckých snímků se výrazně liší. Hlavním důvodem je samozřejmě nesprávný odhad parametrů kvůli rovinatému terénu, ale mohou zde být i další důvody např. vibrace dronu nebo vliv vzletu a přistání. Účinek těchto faktorů může být námětem dalšího výzkumu.

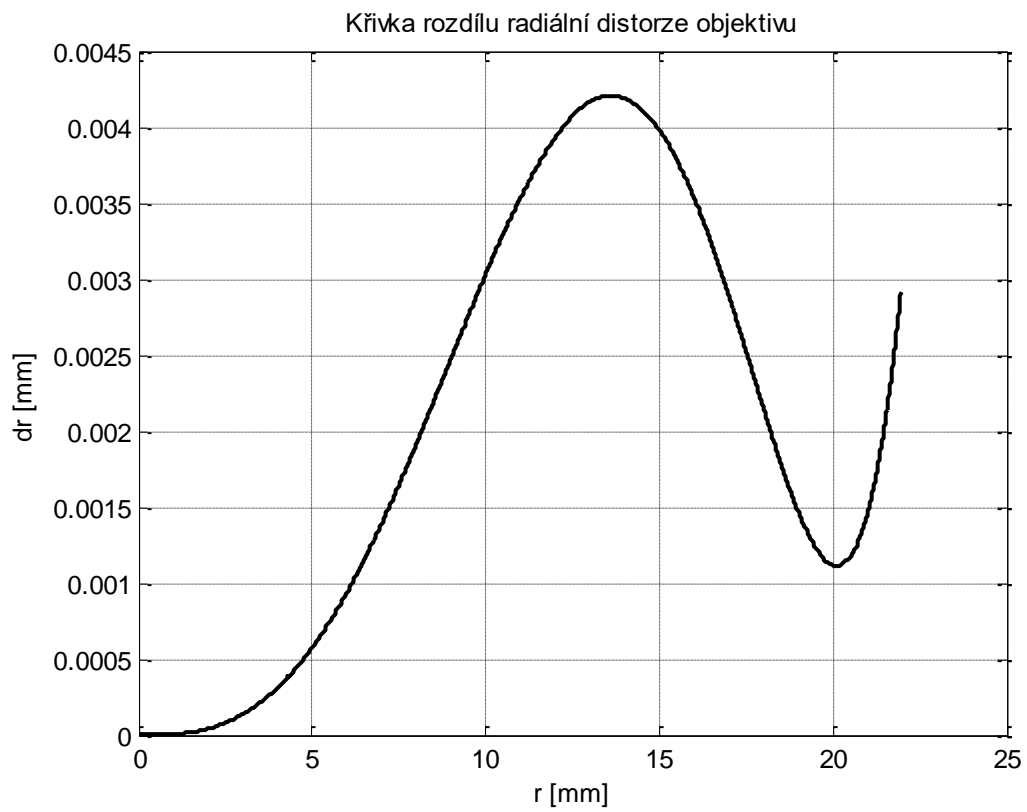
6.2.4 Vzájemné porovnání výsledků snímkování kalibračního pole a leteckého snímkování

Pokud porovnáme sady ze snímkování kalibračního pole se sadami z leteckého snímkování dostaneme opět vyšší rozdíly (pro ilustraci graf A.9, A.10, A.11), které se pohybují v řádech metrů u okrajů snímků. Znovu se tedy potvrzuje nevhodnost leteckých snímků rovinatého území pro kalibraci.

V grafu 6.5 je zobrazen rozdíl distorze pro dvě vybrané sady hodnot, přičemž jedna sada je zástupce snímkování kalibračního pole (první snímkování 18. 3.) a druhá leteckého snímkování (první snímkování 10. 3.). V tomto případě odchyka nedosahuje ani hodnoty 1 px (0,00661 mm), maximum je 0,0042 mm (0,6 px). Jak naznačují i výše uvedené grafy odhadnutý průběh distorze pro sady kalibračního pole a leteckého snímkování je podobný.



Graf 6.4: Přiblížení hodnot distorze v rozích snímků (Kbely, Neplachov)



Graf 6.5: Znáznornění rozdílu radiální distorze objektivu (Neplachov a FAV)

7. Závěr

Účelem této práce je seznámit čtenáře s testováním stability prvků vnitřní orientace digitálních fotoaparátů. V teoretické části práce byl popsán význam všech vnitřních (konstanta komory, poloha hlavního snímkového bodu, distorze objektivu) i vnějších (souřadnice středu vstupní pupily, úhly sklonu) parametrů fotoaparátu. Také byly představeny základní modely pro výpočet distorze a to jak pro objektivy s malým zkreslením tak pro objektivy s velkým zkreslením tzv. rybí oka. V praxi je nejčastěji využíván Brownův model, jelikož obsahuje radiální i tangenciální složku.

Další kapitoly se zabývají nejrozšířenějšími metodami kalibrace fotoaparátu. Tyto metody dělíme na kalibraci využívající 3D objekt, kalibraci využívající 2D rovinu, kalibraci využívající 1D linii a auto-kalibraci. V současnosti je nejrozšířenější metoda auto-kalibrace, na jejímž základě pracuje většina moderních kalibračních softwarů. Jednodušší kalibrační programy bývají založeny na principu snímkování 2D roviny, kterou je zpravidla šachovnice.

Součástí práce je také rešerše již publikované literatury, která se zabývá analýzou stability prvků vnitřní orientace. Jsou zde uvedeny metody ZROT, ROT a SPR, které někteří autoři využívají k porovnávání sad parametrů fotoaparátu. Dále je popsáno několik provedených experimentů. Z této kapitoly vyplynulo, že je vhodné stálost přístroje před jeho použitím k fotogrammetrickým účelům otestovat, abychom věděli, k jakým změnám vnitřní geometrie přístroje při jeho používání dochází. Přístroj se skládá z mnoha součástí, jejichž poloha se při manipulaci a změně nastavení (ostření, optický zoom apod.) mění. Tímto způsobem se vyhneme použití přístrojů, které mají mechanickou závadu a jsou proto pro fotogrammetrické aplikace zcela nevhodné. Také je lepší využívat pro kalibraci sady snímků, které obsahují i natočené snímky. Takto eliminujeme vliv gravitace na vnitřní geometrii. Přesnější hodnoty prvků vnitřní orientace poskytují snímky více zvláště krajiny nebo členitého objektu (je možné nahradit naklápěním přístroje při snímkování). A samozřejmě kvalitnější výsledky nám dávají přístroje s nižším stupněm zkreslení. Naopak vliv teploty není zcela jasný a zasloužil by další zkoumání.

Praktická část práce obsahuje vlastní pořízení kalibračních snímků, výpočet prvků vnitřní orientace a zkoumání jejich stability. Testovaným přístrojem byla jednooká zrcadlovka Canon EOS 6D s objektivem Canon EF 24mm f/2.8 IS USM. Prvních pět kalibračních sad tvoří výsledky leteckého snímkování firmy CCE Praha s. r. o. na letišti Kbely a v okolí obce Neplachov. Tyto snímky byly pořízeny fotoaparátem upevněným na multikoptéře. Snímkování probíhalo ve dnech 14. 1. 2016, 9. 2. 2016 a 10. 3. 2016. Bohužel obě lokality jsou málo výškově členité, a proto, jak bylo nastíněno v předchozím odstavci, nejsou zcela vhodné pro kalibraci. Z tohoto důvodu byly nasnímány další čtyři sady záznamů, které zachycují budovu Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Snímky byly pořízeny s měsíčním odstupem ve dnech 18. 3. 2016 a 19. 4. 2016. Parametry přístroje byly vypočteny v programu Agisoft PhotoScan zvlášť pro každou sadu snímků. Tento software slouží k automatickému vyrovnání pořízených snímků, umožňuje vkládat vlíčovací a kontrolní body nebo vytvořit masku na části snímku, kterou nechceme do kalibrace zahrnout. Odhad prvků je založen na metodě auto-kalibrace.

Pro analýzu stálosti byla navržena a použita metoda rekonstrukce bodů snímku v rovině v prostoru. Vybraná množina bodů na snímku byla zobrazena do roviny ve vzdálenosti 100 m od středu promítání s pomocí vypočtených prvků vnitřní orientace. Bodová pole, vytvořená pro každou sadu parametrů fotoaparátu, byla následně mezi sebou porovnána. Rozdíl v poloze bodů sad snímků z 18. 3. a 19. 4. (snímky budovy) se pohybuje v řádech desítek až stovek milimetrů. U zbylých sad (letecké snímky) dosahuje rozdíl až jednotek metrů. Z toho tedy vyplývá, že málo členité lokality skutečně nejsou vhodné pro kalibraci a tyto parametry nemůžeme považovat za relevantní. Naopak budova je pro kalibraci vhodná, avšak opět nebylo dosaženo očekávané přesnosti. Dále bylo zjištěno, že konstanta komory přístroje je o 1 mm vyšší než deklaruje výrobce.

Jak řešerše literatury, tak vlastní experiment potvrzuje domněnku, že před použitím komerčních fotoaparátů pro fotogrammetrické aplikace, je vhodné otestovat chování jejich prvků vnitřní orientace. Také je při pořizování kalibračních snímků dobré dodržovat některé postupy, například pořizovat narotované snímky nebo se vyhnout málo členitým scénám. Nezapomeňme ale, že i když se nám přístroj jeví jako stabilní, jeho geometrie se přesto mění. Proto pokud chceme použít fotoaparát po delší časové prodlevě, je lepší provést znovu jeho kalibraci. Samozřejmostí je správné zacházení

s přístrojem a minimalizace mechanického poškození. Při výběru přístroje je potřeba volit takový, který má dostatečnou přesnost pro daný účel. Dodržování těchto zásad nám zaručí, že při použití přístroje bude dosaženo optimálních výsledků.

Seznam použité literatury

- [1] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 247 s. ISBN 80-7082-972-9.
- [2] HARTLEY, Richard a Andrew ZISSERMAN. *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 655 s. ISBN 978-0-521-54051-3.
- [3] ZHANG, Zhengyou. Camera Calibration. MEDIONI, Gerard a Kang SING BING. *Emerging Topics in Computer Vision*. 1st ed. Upper Saddle River (New Jersey): Prentice Hall, 2004, p. 4-43. ISBN 0131013661.
- [4] HEIKKILÄ, Janne a Olli SILVÉN. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 1997, p. 1106-1112. ISBN 0-8186-7822-4
- [5] ZHANG, Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2000, **22**(11) [cit. 2014-02-14]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=34>
- [6] STURM, Peter a Stephen MAYBANK. On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 1999, p. 432-437. ISBN 0-7695-0149-4
- [7] ZHANG, Zhengyou. Camera calibration with one-dimensional objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2004, **26**(7) [cit. 2014-02-14]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=34>

[8] AZIZI, Navid. Camera Self-Calibration. In: *CiteSeer*⁸ [online]. 2003 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://citeseer.ist.psu.edu/index>

[9] FAUGERAS, Oliver, Tuan LUONG a Stephen MAYBANK. Camera self-calibration: Theory and experiments. In SANDINI, Giulio. *Computer Vision — ECCV'92: Second European Conference on Computer Vision Santa Margherita Ligure, Italy, May 19–22, 1992, Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992, p. 321-334. ISBN 978-3-540-55426-4

[10] TSAI, Roger. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation* [online]. 1987, 3(4) [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=56>

[11] WEI, Guo-Qing a Song MA. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1994, 16(5) [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=34>

[12] BROWN, Duane. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*. 1971, 37(8)

[13] HARTLEY, Richard. An algorithm for self calibration from several views. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 1994, p. 908-912. ISBN 0-8186-5825-8

[14] YANG, Changjiang, Fengmei SUN a Zhanyi HU. Planar conic based camera calibration. In *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 2000, p. 555-558. ISBN 0-7695-0750-6

- [15] TRIGGS, Bill. Autocalibration and the absolute quadric. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 1997, p. 609-614. ISBN 0-8186-7822-4
- [16] CIPPOLA, Roberto a Paulo MANDONCA. A simple technique for self-calibration. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 1999, p. 500-505. ISBN 0-7695-0149-4
- [17] ARMSTRONG, Martin, Andrew ZISSERMAN a Richard HARTLEY. Self-calibration from image triplets. In *Computer Vision — ECCV'96: 4th European Conference on Computer Vision Cambridge, UK, April 15–18, 1996 Proceedings Volume I*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, p. 3-16. ISBN 978-3-540-61122-6
- [18] HARTLEY, Richard. Self-calibration from multiple views with a rotating camera. In *Computer Vision — ECCV'94: Third European Conference on Computer Vision Stockholm, Sweden, May 2–6, 1994 Proceedings, Volume I*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994, p. 471-478. ISBN 978-3-540-57956-4
- [19] POLLEFEYS, Marc a Luc van GOOL. Self-calibration from the absolute conic on the plane at infinity. In *Computer Analysis of Images and Patterns: 7th International Conference, CAIP '97 Kiel, Germany, September 10–12, 1997 Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997, p. 175-182. ISBN 978-3-540-63460-7
- [20] TRIGGS, Bill. Autocalibration from planar scenes. In *Computer Vision — ECCV'98: 5th European Conference on Computer Vision Freiburg, Germany, June, 2–6, 1998 Proceedings, Volume I*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998, p. 89-105. ISBN 978-3-540-64569-6
- [21] BROWN, Duane. Decentering Distortion of Lenses. *Photogrammetric Engineering*. 1966, **32**(3): 444-462.

- [22] MA, Lili, Yangquan CHEN a Kevin MOORE. Rational Radial Distortion Models of Camera Lenses with Analytical Solution for Distortion Correction. *International Journal of Information Acquisition*. 2004, **1**(2): 135-147. DOI: 10.1142/S0219878904000173
- [23] MA, Lili, Yangquan CHEN a Kevin MOORE. Rational Radial Distortion Models with Analytical Undistortion Formulae. In *Computing Research Repository* [online]. 2003 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://arxiv.org/abs/cs/0307047v1>
- [24] DEVERNAY, Frédéric a Olivier FAUGERAS. Straight lines have to be straight. *Machine Vision and Applications*. 2001, **13**(1): 14-24. ISSN 0932-8092.
- [25] FITZGIBBON, Andrew. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos (California): IEEE Computer Society, 2001, p. I-125 - I-132. ISBN 0-7695-1272-0.
- [26] HUGHES, Ciarán, Patrick DENNY, Edward JONES a Martin GLAVIN. Accuracy of fish-eye lens models. *Applied Optics*. 2010, **49**(17): 3338–3347. ISSN 1559-128X.
- [27] HUGHES, Ciarán, Martin GLAVIN, Edward JONES a Patrick DENNY. Review of geometric distortion compensation in fish-eye cameras. In *Proceedings of the IET Irish Signals and Systems Conference*. London: Institution of Engineering and Technology, 2008, p. 162 - 167. ISBN 978-0-86341-931-7.
- [28] HABIB, Ayman, Anoop PULLIVELLI a Chang-Hahk HAHM. Standardized Measures for the Stability Analysis of Low-Cost Digital Cameras and Potential Applications. In: *Proceedings of the FIG Working Week 2005 and GSDI-8*. Cairo, Egypt, 2005.
- [29] PULLIVELLI, Anoop Manohar. *Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis, and Applications*. Calgary, Alberta, 2005. A Thesis. University of Calgary. Vedoucí práce Ayman Habib.

[30] HABIB, Ayman F., Michel MORGAN a Young–Ran LEE. Bundle Adjustment with Self–Calibration Using Straight Lines. *The Photogrammetric Record*. 2002, **17**(100): 635–650. DOI: 10.1111/0031-868X.00211. ISSN 1477-9730.

[31] HABIB, Ayman, Anoop PULLIVELLI a M. MORGAN. Quantitative Measures for The Evaluation of Camera Stability. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*. Istanbul, Turkey: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, p. 63-69. XXXV Part B1. ISSN 1682-1750.

[32] HABIB, Ayman a Michel MORGAN. Stability Analysis and Geometric Calibration of Off-the-Shelf Digital Cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2005, **71**(6): 733-741. DOI: 10.14358/PERS.71.6.733.

[33] SANZ-ABLANEDO, Enoc, José Ramón RODRÍGUEZ-PÉREZ, Julia ARMESTO a María Flor TABOADA. Geometric stability and lens decentering in compact digital cameras. *Sensors* [online]. Basel, Switzerland, 2010, **10**(3): 1553–1572 [cit. 2015-11-28]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3264438/>

[34] SHORTIS, Mark R., Clifford L. OGLEBY, Stuart ROBSON, Elias M. KARALIS a Horst A. BEYER. Calibration modeling and stability testing for the Kodak DC200 series digital still camera. In: *Proc. SPIE 4309*. San Jose (California), 2001, p. 148-153 [cit. 2015-11-29]. DOI: 10.1117/12.410870. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=904510>

[35] LÄBE, Thomas a Wolfgang FÖRSTNER. Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*. Istanbul, Turkey: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, p. 528-535. ISSN 1682-1750.

[36] MITISHITA, Edson, João CÔRTEZ, Jorge CENTENO a Álvaro MACHADO. Small-format Digital Camera: A Study into Stability Analysis of the Interior Orientation Parameters through Temperature Variation. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*. São Paulo, Brazil, 2009.

[37] HASTEDT, Heidi a Thomas LUHMANN. Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Toronto, Canada: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, p. 321-328. XL-1/W4. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015.

[38] MITISHITA, Edson, João CORTES, Jorge CENTENO, Alvaro MACHADO a M. MARTINS. Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration. In: *Proceedings of the The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics – Shaping Canada's Competitive Landscape*. Calgary, Canada, 2010.

[39] SHORTIS, M. R., C. J. BELLMAN, S. ROBSON, G. J. JOHNSTON a G. W. JOHNSON. Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. In: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*. Dresden, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, p. 285-290.

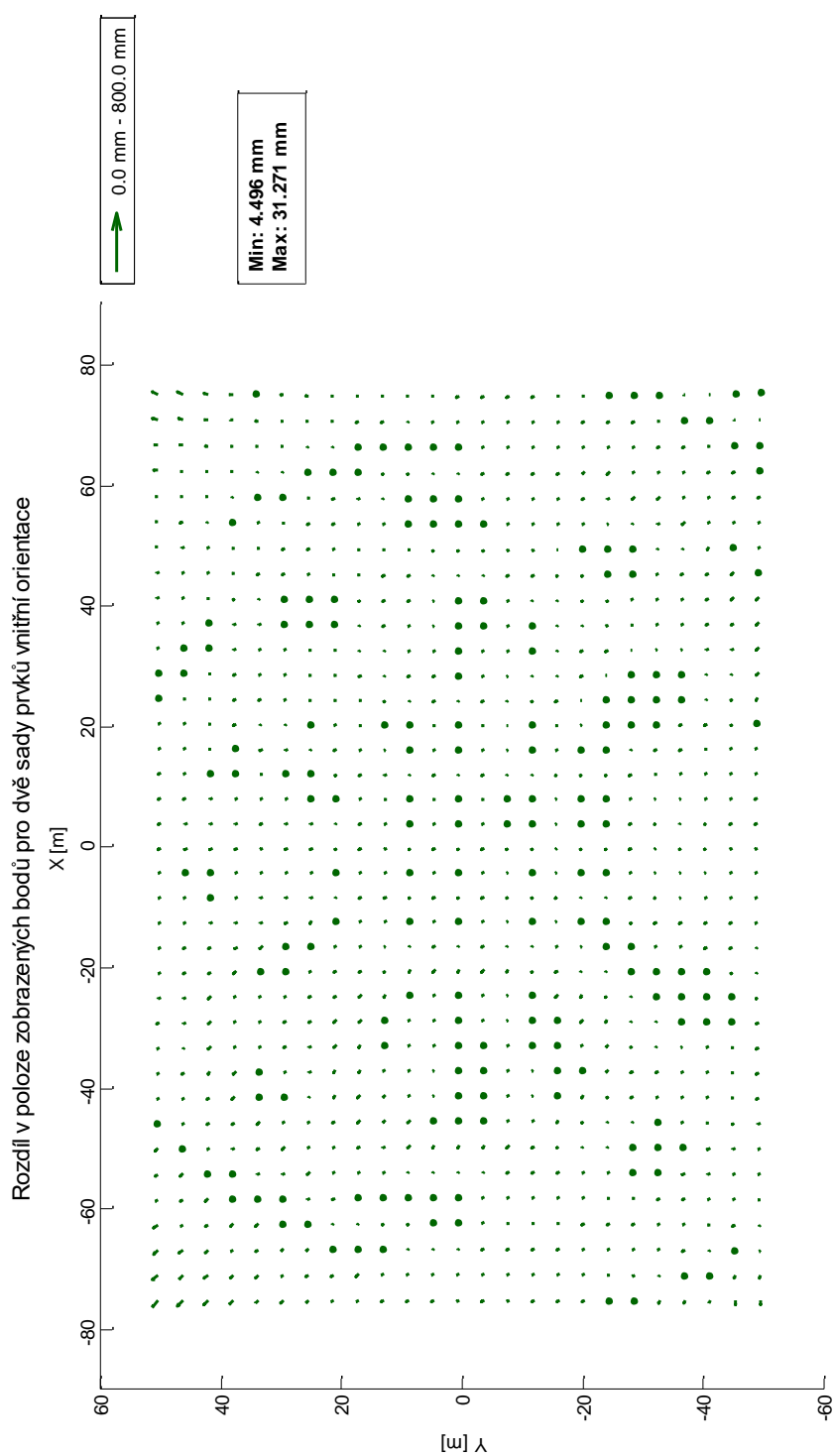
[40] HASTEDT, Heidi, Thomas LUHMANN a Werner TECKLENBURG. Image-variant interior orientation and sensor modelling of high-quality digital cameras. In: *Proceedings of the ISPRS Symposium Comm. V*. Korfu: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002.

[41] HABIB, Ayman, Ivan DETCHEV a Eunju KWAK. Stability Analysis for a Multi-Camera Photogrammetric System. *Sensors* [online]. 2014, **14**(8): 15084-15112 [cit. 2015-11-29]. DOI: 10.3390/s140815084. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/8/15084>

[42] LICHTI, Derek D., Ayman HABIB a Ivan DETCHEV. An Object-space Simulation Method for Low-cost Digital Camera Stability Testing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009, **75**(12): 1407-1414.

Příloha A

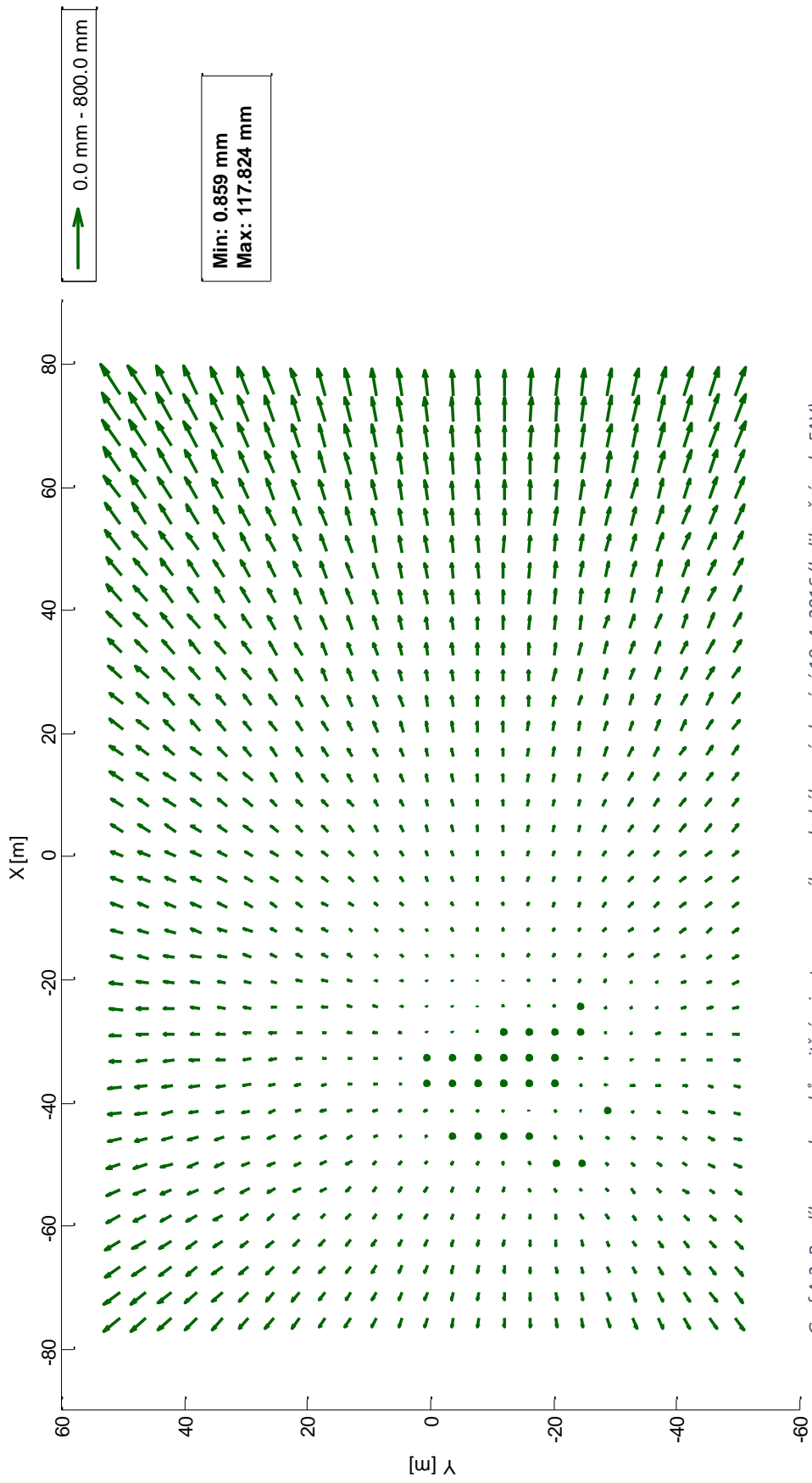
Grafy rozdílů v poloze bodů zobrazených do prostoru pomocí dvou různých sad prvků vnitřní orientace. Pro tvorbu grafů byly použity výsledky kalibrace snímků kalibračního pole na budově FAV (18. 3. a 19. 4.) a leteckých snímků z lokality letiště Praha-Kbely (14. 1. a 9. 2.) a lokality v okolí obce Neplachov (10. 3.).



Graf A.1.: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního a druhého snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV).

Velikost šipek je zvětšena padesátkrát.

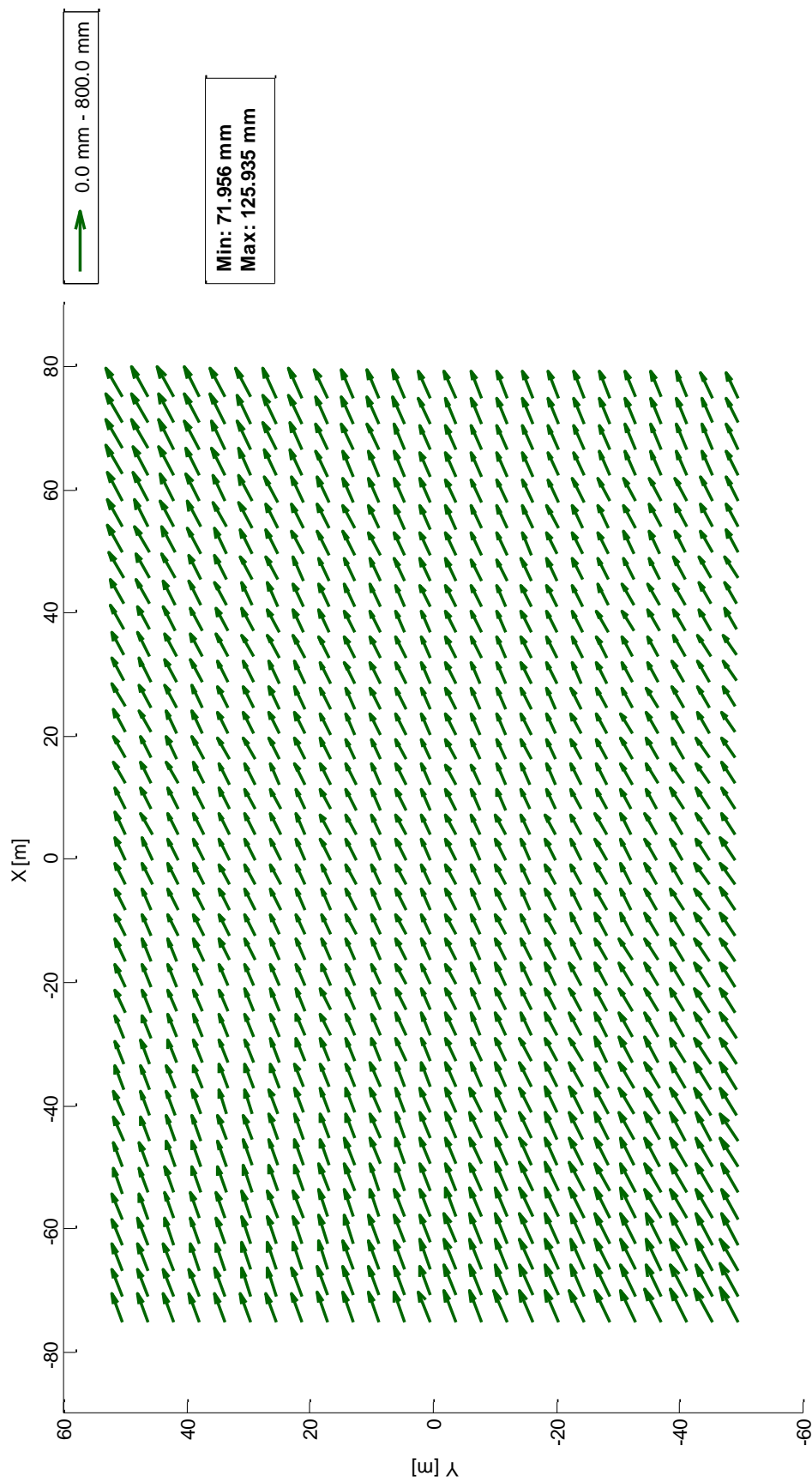
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.2: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního a druhého snímkování 19. 4. 2016 (kalibrační pole FAV).

Velikost šipek je zvětšena padesátkrát.

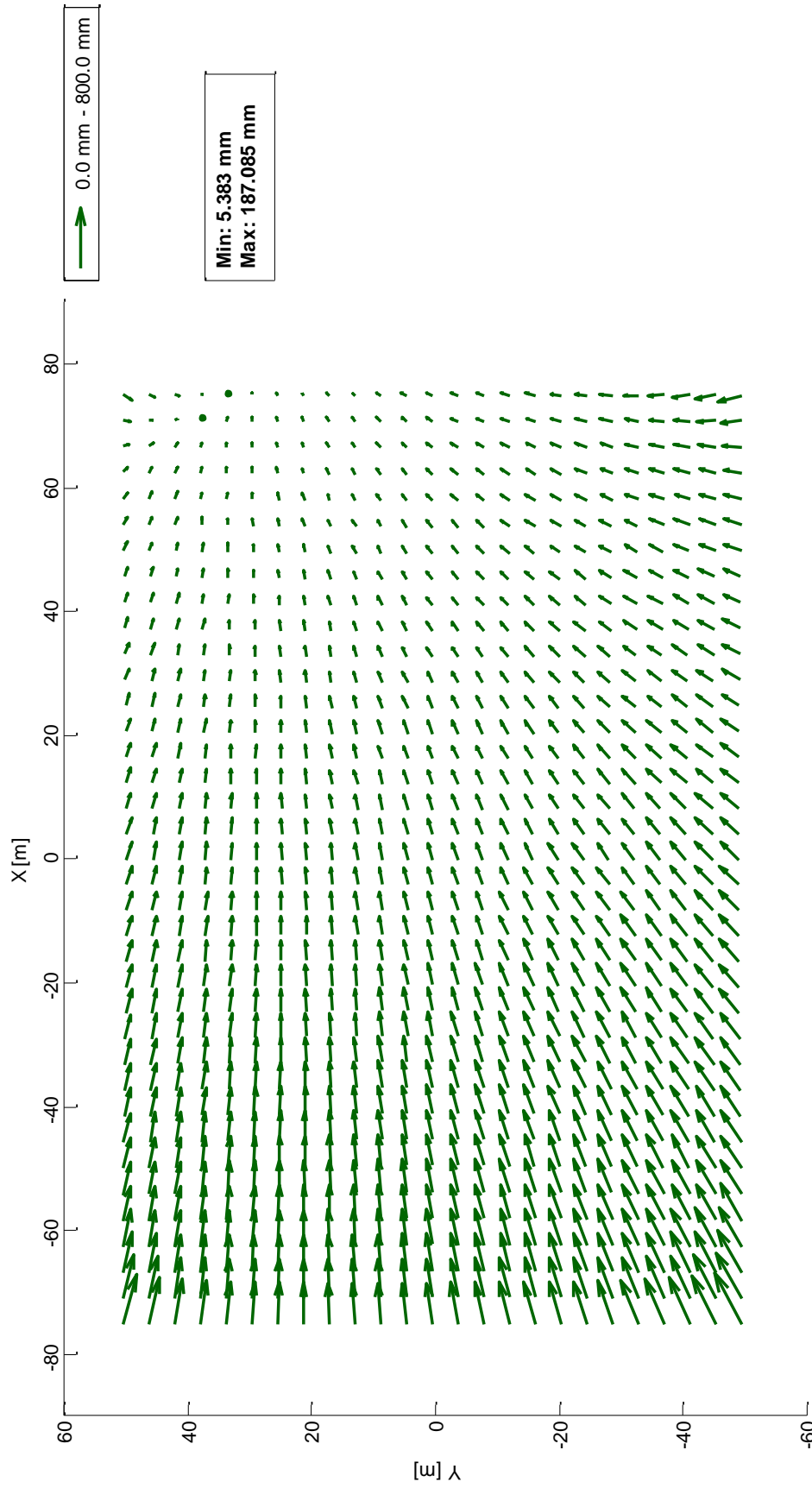
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.3: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV) a druhého snímkování 19. 4. 2016 (kalibrační pole FAV).

Velikost šipek je zvětšena padesátkrát.

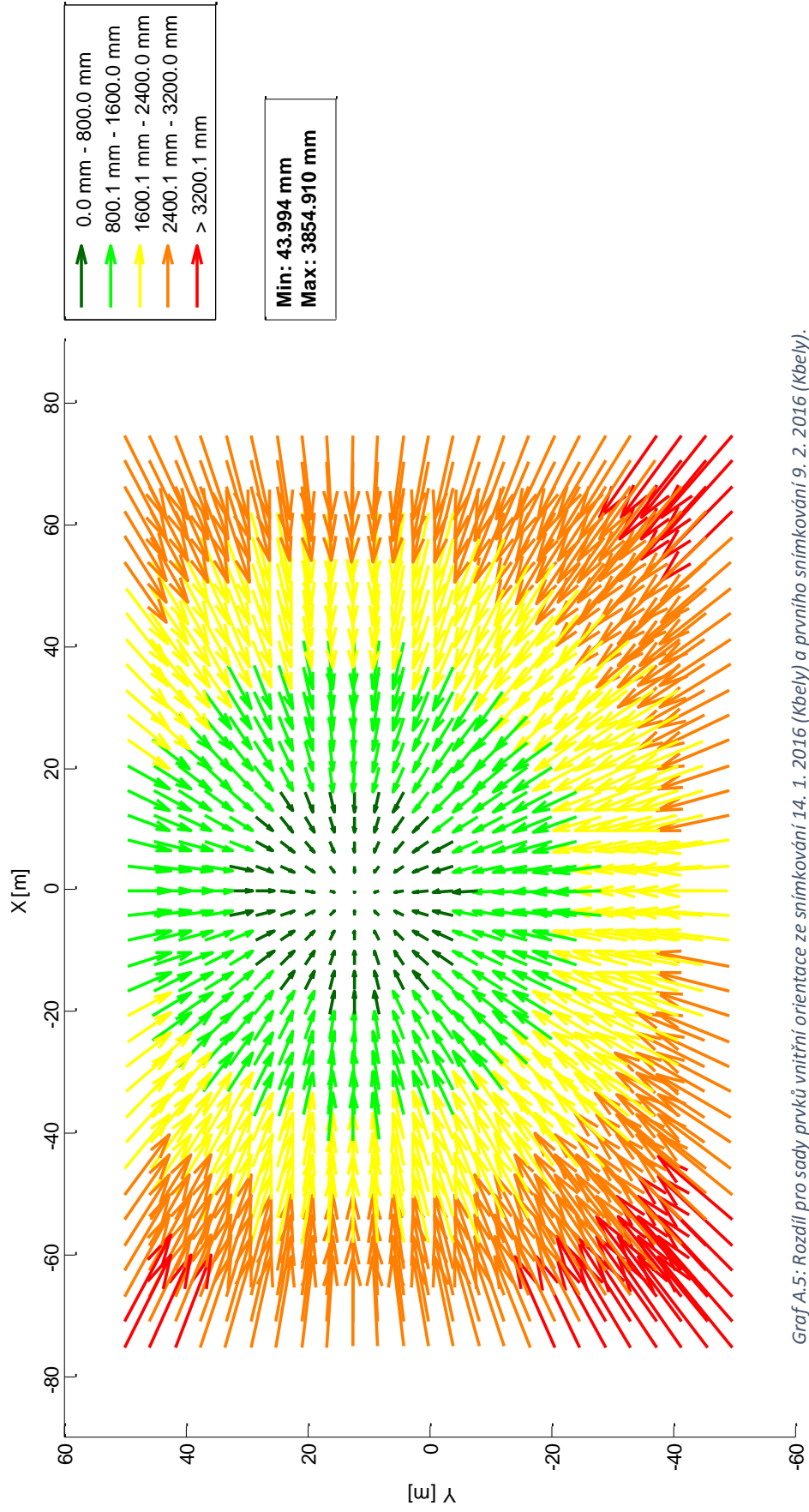
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.4: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z druhého snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV) a prvního snímkování 19. 4. 2016 (kalibrační pole FAV).

Velikost šipek je zvětšena padesátkrát.

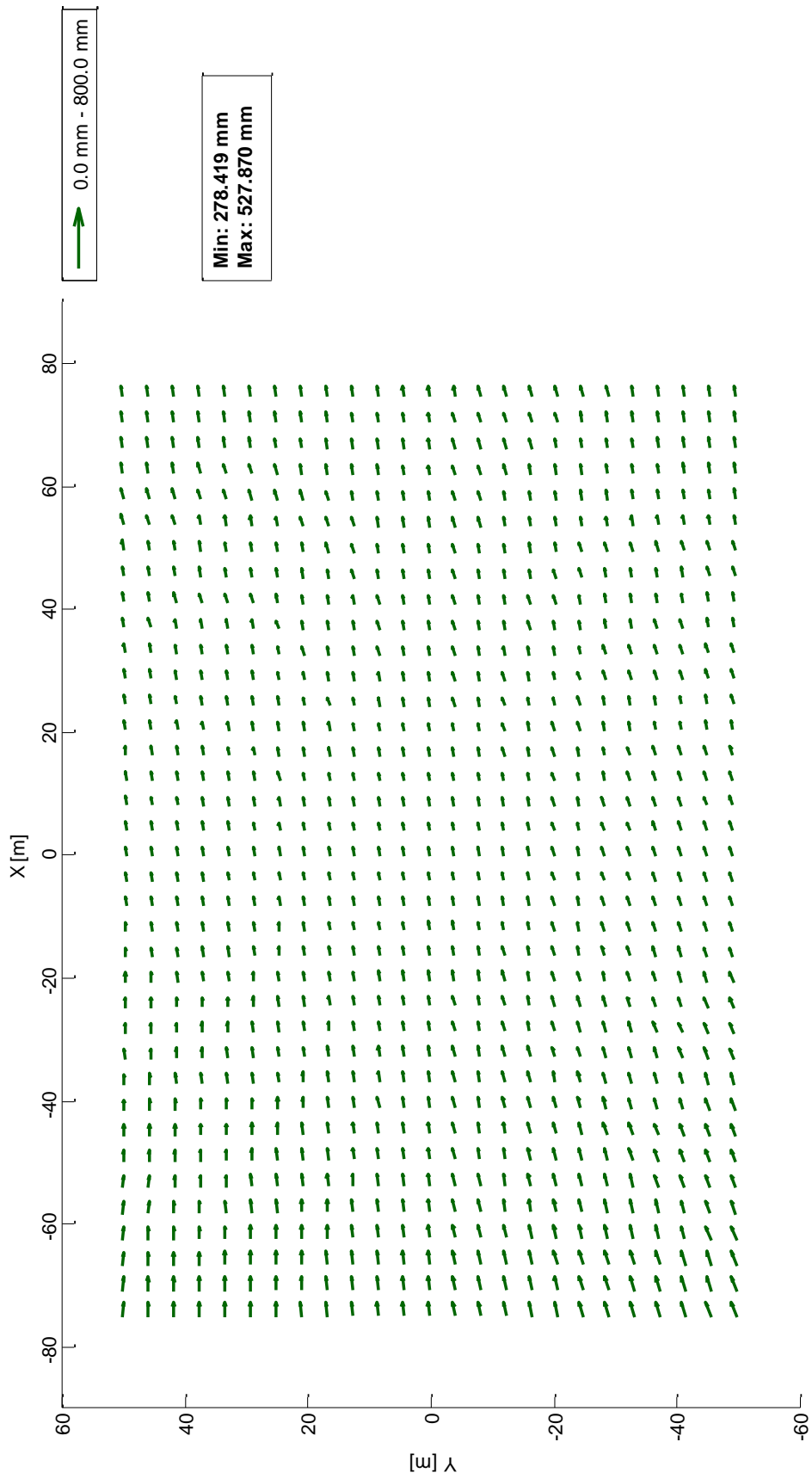
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.5: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace ze snímkování 14. 1. 2016 (Kbely) a prvního snímkování 9. 2. 2016 (Kbely).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

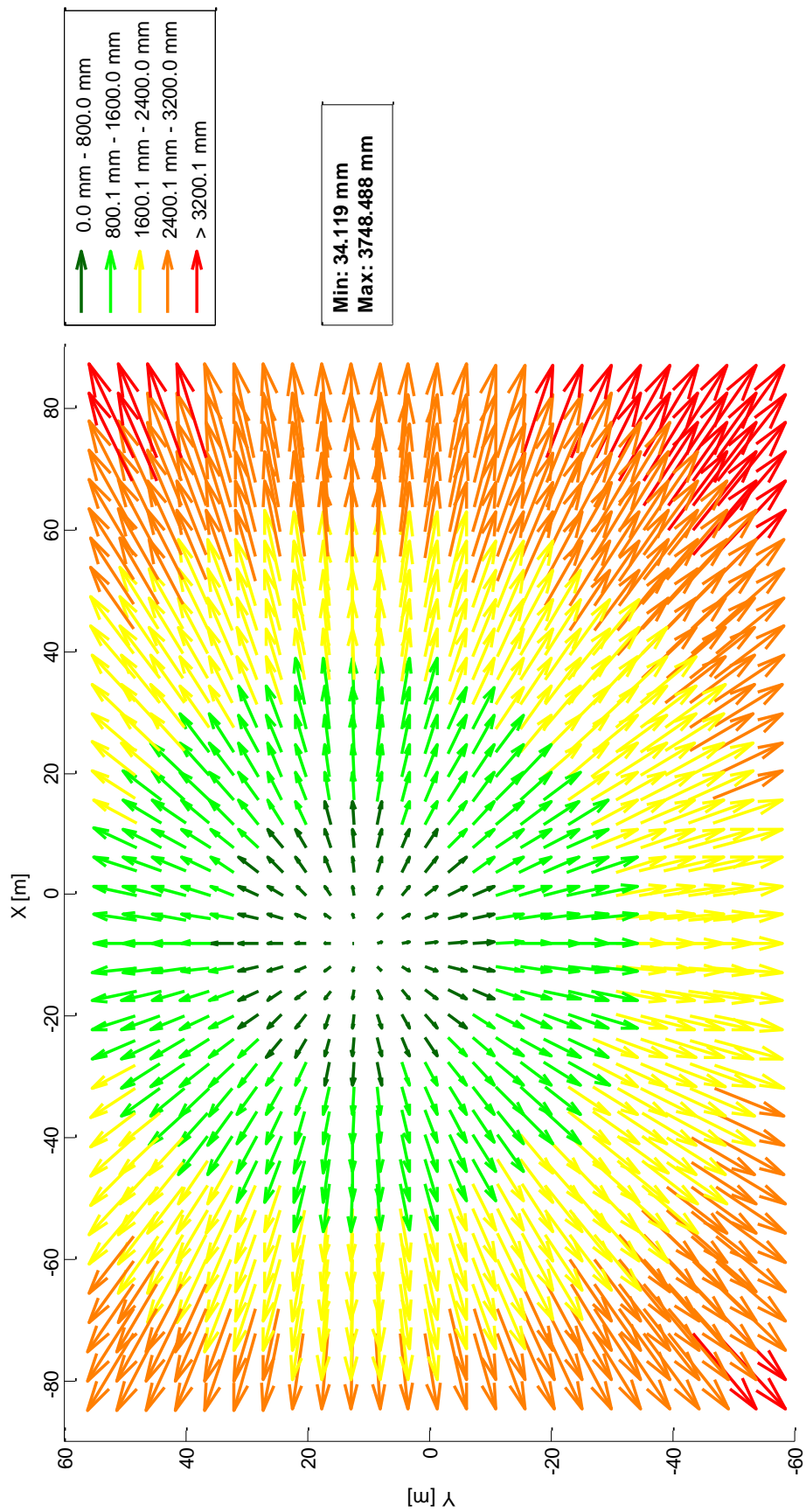
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.6: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace ze snímkování 14. 1. 2016 (Kbely) a druhého snímkování 9. 2. 2016 (Kbely).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

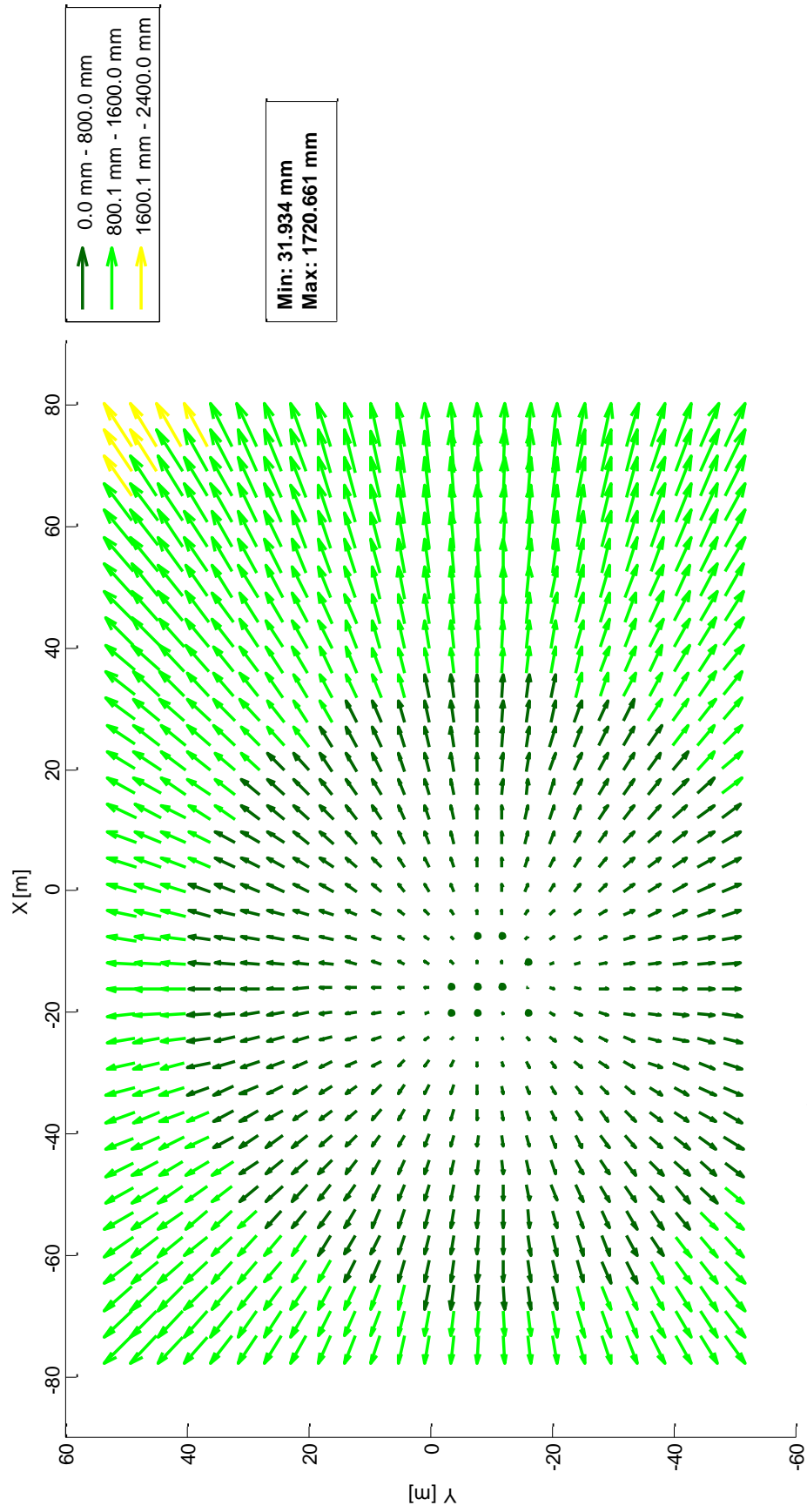
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.7: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního a druhého snímkování 9. 2. 2016 (Kbely).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

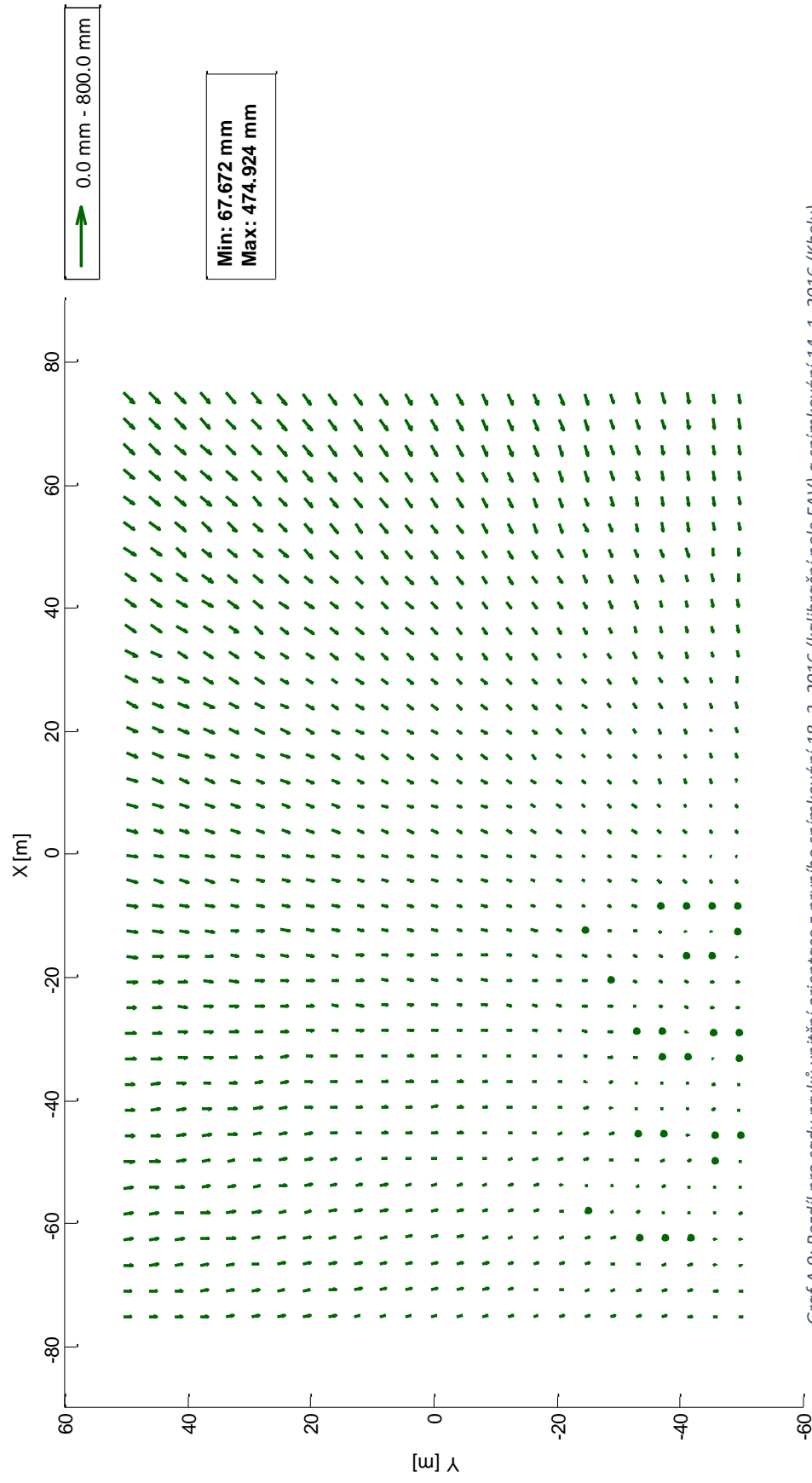
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.8: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního a druhého snímkování 10. 3. 2016 (Neplachov).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

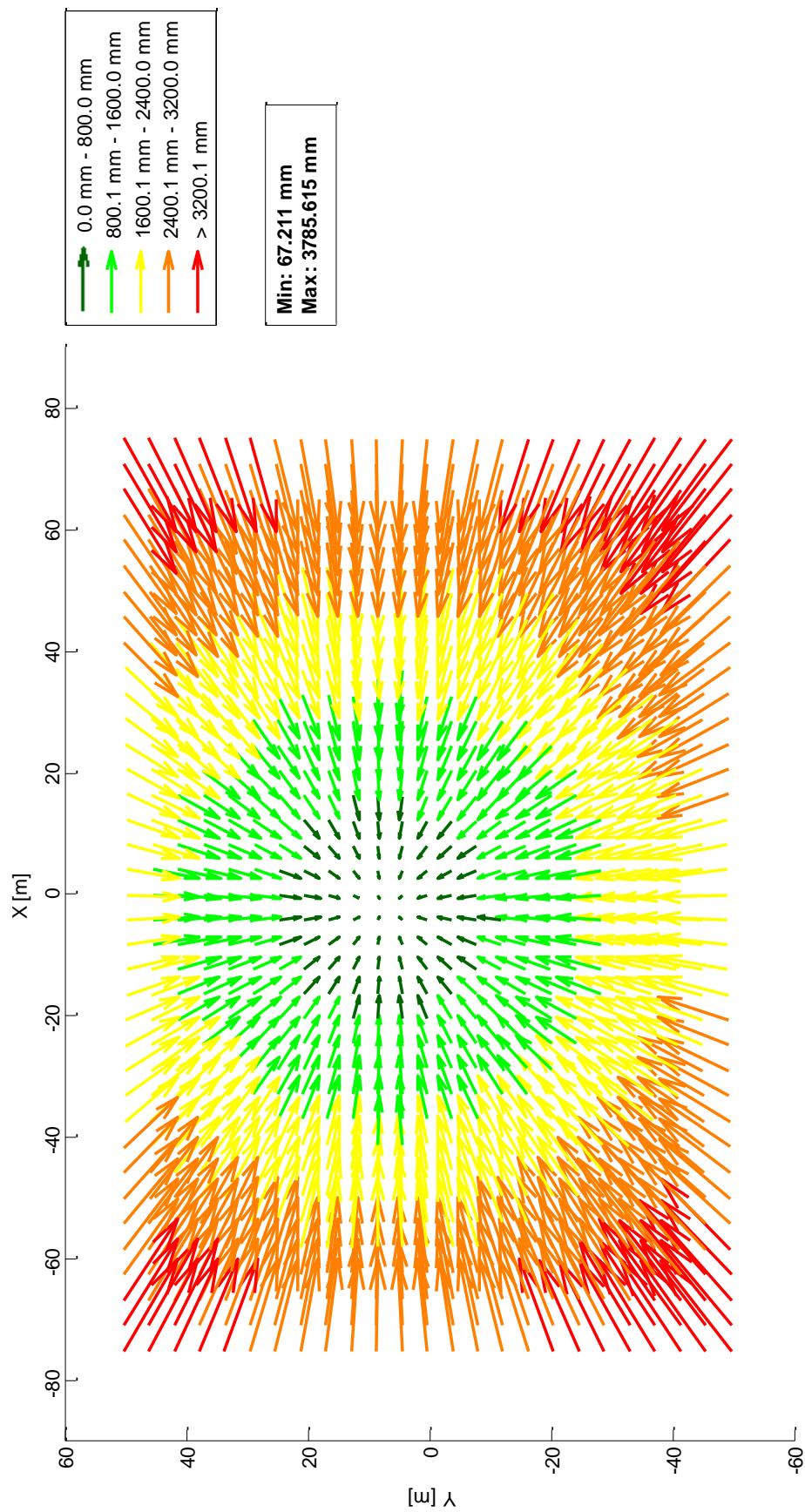
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.9: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV) a snímkování 14. 1. 2016 (Kbely).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

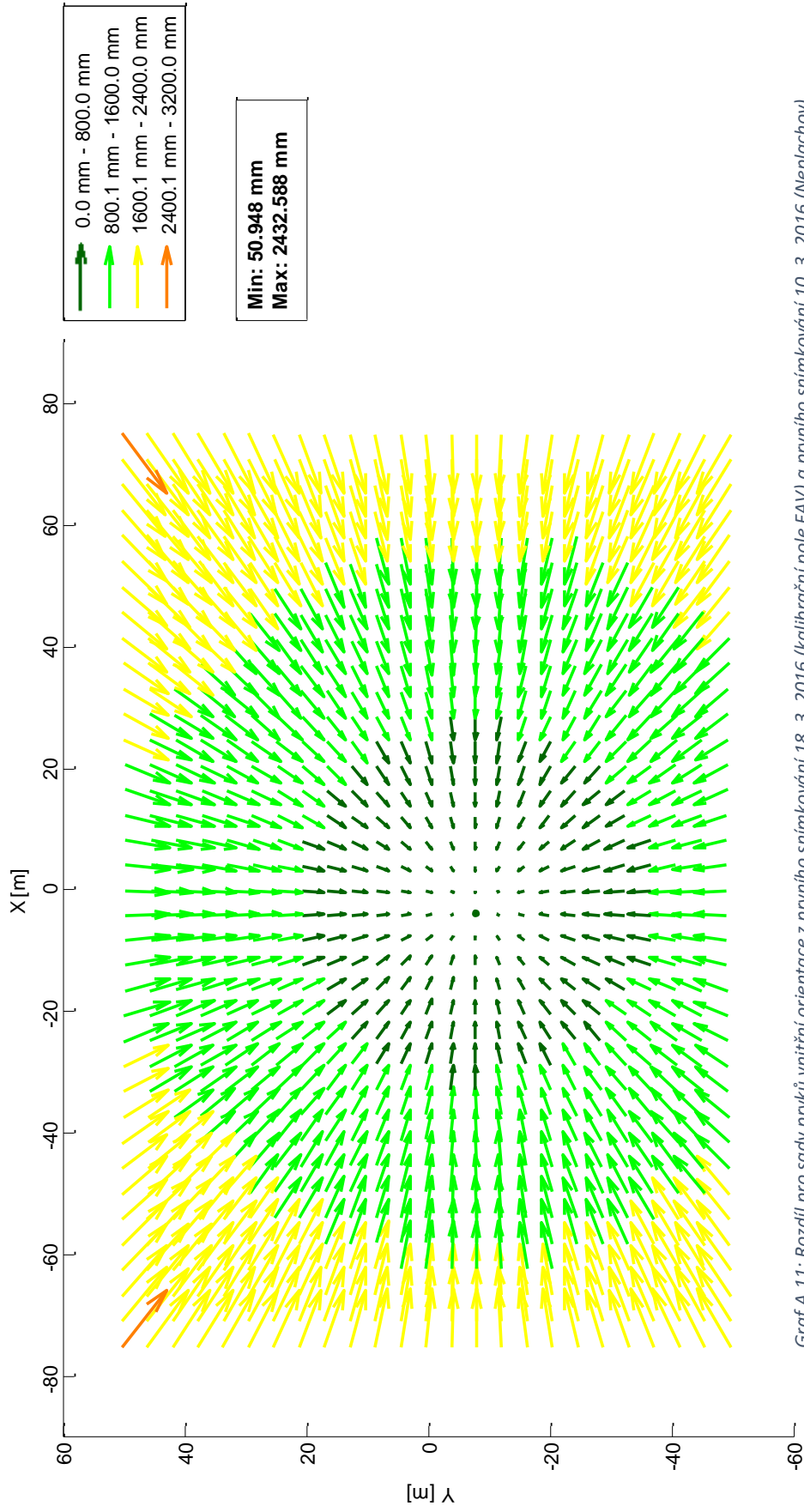
Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.10: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV) a prvního snímkování 9. 2. 2016 (Kbely).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

Rozdíl v poloze zobrazených bodů pro dvě sady prvků vnitřní orientace



Graf A.11: Rozdíl pro sady prvků vnitřní orientace z prvního snímkování 18. 3. 2016 (kalibrační pole FAV) a prvního snímkování 10. 3. 2016 (Neplachov).

Velikost šipek je zvětšena pětkrát.

Obsah přiloženého CD

DP_Hofmanova.pdf – vlastní práce

Kalibrace – složka obsahující výsledky kalibrací v programu Agisoft PhotoScan Professional Edition

- Kalibrace_FAV – složka obsahující souřadnice vlíčovacích bodů, hodnoty vypočtených prvků vnitřní orientace a reporty z jednotlivých kalibrací, při kterých byly použity snímky budovy Fakulty aplikovaných věd
- Kalibrace_Kbely – složka obsahující hodnoty vypočtených prvků vnitřní orientace a reporty z jednotlivých kalibrací, při kterých byly použity letecké snímky z lokality Praha-Kbely
- Kalibrace_Neplachov – složka obsahující hodnoty vypočtených prvků vnitřní orientace a reporty z jednotlivých kalibrací, při kterých byly použity letecké snímky z lokality u obce Neplachov
- photoscan-pro_1_1_en.pdf – manuál k programu Agisoft PhotoScan Professional Edition verze 1.1
- photoscan-pro_1_2_en – manuál k programu Agisoft PhotoScan Professional Edition verze 1.2

Snímky – složka obsahující kalibrační snímky

- snímky_09_02_1_Kbely – složka obsahující letecké snímky lokality letiště Praha-Kbely pořízené při prvním snímkování dne 9. 2. 2016
- snímky_09_02_2_Kbely – složka obsahující letecké snímky lokality letiště Praha-Kbely pořízené při druhém snímkování dne 9. 2. 2016
- snímky_10_03_1_Neplachov – složka obsahující letecké snímky lokality u obce Neplachov pořízené při prvním snímkování dne 10. 3. 2016
- snímky_10_03_2_Neplachov – složka obsahující letecké snímky lokality u obce Neplachov pořízené při druhém snímkování dne 10. 3. 2016
- snímky_14_01_Kbely – složka obsahující letecké snímky lokality letiště Praha-Kbely pořízené při snímkování dne 14. 1. 2016
- snímky_18_03_1_FAV – složka obsahující snímky budovy Fakulty aplikovaných věd pořízené při prvním snímkování dne 18. 3. 2016

- snímky_18_03_2_FAV – složka obsahující snímky budovy Fakulty aplikovaných věd pořízené při druhém snímkování dne 18. 3. 2016
- snímky_19_04_1_FAV – složka obsahující snímky budovy Fakulty aplikovaných věd pořízené při prvním snímkování dne 19. 4. 2016
- snímky_19_04_2_FAV – složka obsahující snímky budovy Fakulty aplikovaných věd pořízené při druhém snímkování dne 19. 4. 2016

Matlab – složka obsahující kódy napsané v programu Matlab, které slouží pro zpracování a vizualizaci výsledků