

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

Bakalářská práce

Určení prvků vnitřní orientace
digitálního fotoaparátu

Originál zadání práce je vložen do tištěné podoby bakalářské práce.

Prohlášení

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

V Plzni dne 27. května 2014

.....

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 doc. Ing. Vlastimilu Hanzlovi, CSc., který mi poskytl cenné rady při stáži na Vysokém učení technickém v Brně. A v neposlední řadě patří poděkování mým rodičům za jejich podporu po celé mé studium.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je určit prvky vnitřní orientace u digitálního fotoaparátu Nikon D3100 s objektivem AF-S DX Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G VR. V práci je popsán význam prvků vnitřní orientace a uvedeny nejpoužívanější modely distorze. Dále poskytuje přehled moderních technik a postupů využívaných pro kalibraci digitálních fotoaparátů. Vlastní kalibrace je provedena v programech Agisoft Lens, Matlab a PhotoModeler. Agisoft Lens a Matlab využívají jako kalibrační objekt rovinnou šachovnici a PhotoModeler prostorové kalibrační pole složené z vřícovacích a spojovacích bodů. Na závěr je uvedeno srovnání výsledků z jednotlivých programů a zhodnocení jejich přesnosti.

Klíčová slova

prvky vnitřní orientace, kalibrace fotoaparátu, distorze objektivu, Agisoft Lens, PhotoModeler, Kalibrační toolbox pro Matlab

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to determine the intrinsic parameters of the digital camera Nikon D3100 with AF-S DX Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G VR lens. The importance of intrinsic parameters is described and the most widely used distortion models are introduced in the thesis. It provides an overview of modern techniques and procedures that are used for digital camera calibration. The camera calibration is carried out in the Agisoft Lens, Toolbox for Matlab and PhotoModeler. Agisoft Lens and Matlab use the planar chessboard as a calibration object and PhotoModeler uses spatial point field consisting of control and check points. In conclusion the results from all programs are compared and the accuracy is evaluated.

Keywords

intrinsic parameters, camera calibration, lens distortion, Agisoft Lens, PhotoModeler, Camera Calibration Toolbox for Matlab

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Význam prvků vnitřní orientace a související matematické modely.....	9
2.1 Prvky vnitřní (interní) orientace.....	9
2.2 Modely distorze objektivu	11
3. Výpočet prvků vnitřní orientace.....	13
3.1 Základní pojmy	13
3.1.1 Dírková komora	13
3.1.2 Absolutní kuželosečka	14
3.2 Metody výpočtu prvků vnitřní orientace	14
3.2.1 Kalibrace využívající 3D objekt.....	15
3.2.2 Kalibrace využívající 2D rovinu.....	17
3.2.3 Kalibrace využívající 1D linii.....	20
3.2.4 Auto-kalibrace	22
4. Dostupný software pro určení prvků vnitřní orientace.....	24
5. Určení prvků vnitřní orientace	26
5.1 Kalibrace v programu Agisoft Lens.....	27
5.2 Kalibrace s toolboxem pro Matlab.....	29
5.3 Kalibrace v programu PhotoModeler Pro 5	32
5.4 Přepoččet parametrů fotoaparátu	35
5.5 Porovnání výsledků kalibrace a rozbor přesnosti	36
6. Témata dalšího výzkumu	40
7. Závěr	41
Seznam použité literatury	43
Obsah přiloženého CD.....	47

Seznam obrázků

Obrázek 5.1: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu Agisoft Lens.....	28
Obrázek 5.2: Nastavení kalibrace v programu Agisoft Lens	28
Obrázek 5.3: Detekované body na snímku v programu Agisoft Lens.....	29
Obrázek 5.4: Kalibrační menu v programu Matlab.....	30
Obrázek 5.5: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu Matlab.....	31
Obrázek 5.6: Extrakce rohů šachovnice v programu Matlab.....	32
Obrázek 5.7: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu PhotoModeler	33
Obrázek 5.8: Označené body na snímku v programu PhotoModeler	34
Obrázek 5.9: Velikost snímače ve vztahu k shodné radiální distorzi (čtyřikrát zvětšeno)	39

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Výsledky kalibrace v programu Agisoft Lens.....	29
Tabulka 5.2: Výsledky kalibrace v programu Matlab.....	32
Tabulka 5.3: Výsledky kalibrace s 24 snímky v programu PhotoModeler	34
Tabulka 5.4: Výsledky kalibrace s 20 snímky v programu PhotoModeler.....	35
Tabulka 5.5: Porovnání výsledků kalibrace v programech Agisoft Lens, Matlab a PhotoModeler.....	36

Seznam grafů

Graf 5.1: Vypočtené hodnoty konstanty komory s vyznačením odhadované přesnosti	37
Graf 5.2: Vypočtené hodnoty souřadnice x hlavního bodu s vyznačením odhadované přesnosti	37
Graf 5.3: Vypočtené hodnoty souřadnice y hlavního bodu s vyznačením odhadované přesnosti	38
Graf 5.4: Znázornění radiální distorze objektivu vypočtené v programech Agisoft Lens, Matlab a PhotoModeler pomocí křivek.....	38
Graf 5.5: Znázornění rozdílu distorze vypočtené v programech Matlab a PhotoModeler	39

1. Úvod

Fotogrammetrie je obor, zabývající se zjišťováním geometrických vlastností a polohy objektů a jejich změn z fotografických měřických snímků a obrazových záznamů [29]. S rozvojem moderních digitálních technologií se začaly ve fotogrammetrii využívat digitální obrazové záznamy. Snímky se začaly pořizovat digitálními fotoaparáty, které mají oproti analogovým měřickým komorám mnoho výhod. Pořízení snímku je snadné i pro nezkušeného uživatele, fotografie je k dispozici ihned po pořízení, snímky se snadno uchovávají a nedochází ke snížení jejich kvality s postupem času. V současné době je možné dosáhnout dobrých výsledků i s běžnými neměřickými digitálními fotoaparáty. Aby ale bylo možné použít fotoaparát pro řešení úkolů fotogrammetrie, je nutné znát parametry komory, tedy 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. Takové snímky je možné použít pro zpracování standardními fotogrammetrickými metodami například pro modelování a rekonstrukci scény, tvorbu digitálního modelu terénu nebo počítačové vidění.

Cílem této práce je určení prvků vnitřní orientace digitálního fotoaparátu. V teoretické části bude detailněji popsán význam prvků vnitřní orientace a běžně používané matematické modely fotoaparátu zahrnující také distorzi objektivu. Dále budou uvedeny různé techniky a postupy při kalibraci fotoaparátu a představeny některé programy pro výpočet prvků vnitřní orientace. Nakonec bude provedena vlastní kalibrace digitální zrcadlovky Nikon D3100 s objektivem AF-S DX Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G VR s použitím tří různých softwarových nástrojů.

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 přidává často 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 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 nezkreslené 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

$$x_d = xf(r)$$

$$y_d = yf(r),$$

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

$$f(r) = \frac{1}{1+k_1r}, \quad f(r) = \frac{1}{1+k_1r^2}, \quad f(r) = \frac{1+k_1r}{1+k_2r^2},$$

$$f(r) = \frac{1}{1+k_1r+k_2r^2}, \quad f(r) = \frac{1+k_1r}{1+k_2r+k_3r^2}, \quad f(r) = \frac{1+k_1r^2}{1+k_2r+k_3r^2}.$$

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 nezkraslené 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:

$$f(r) = k_0 + k_1r + k_2r^2 + \dots + k_nr^n + \dots.$$

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, $(\mathbf{R} \mathbf{t})$ se nazývají 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 \mathbf{A}^{-T} pro $(\mathbf{A}^{-1})^T$ nebo $(\mathbf{A}^T)^{-1}$.) [3]

3.1.2 Absolutní kuželosečka

3D bod \mathbf{x} má homogenní souřadnice $\tilde{\mathbf{x}} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$. 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 $\mathbf{x}_\infty = [x_1, x_2, x_3]^T$ bod na absolutní kuželosečce, pak podle definice platí, že $\mathbf{x}_\infty^T \mathbf{x}_\infty = 0$. Dále platí $\tilde{\mathbf{x}}_\infty = [x_1, x_2, x_3, 0]^T$ a $\tilde{\mathbf{x}}_\infty^T \tilde{\mathbf{x}}_\infty = 0$. 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 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$. Bod \mathbf{x}_∞ bude bod na Ω , jehož homogenní souřadnice jsou $\tilde{\mathbf{x}}_\infty = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\infty \\ 0 \end{bmatrix}$ s $\mathbf{x}_\infty^T \mathbf{x}_\infty = 0$. Po pevné transformaci bod označíme $\tilde{\mathbf{x}}'_\infty = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}_\infty = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{x}_\infty \\ 0 \end{bmatrix}$. Bod \mathbf{x}'_∞ leží také na kuželosečce v nekonečnu, dokonce na té samé, protože platí $\mathbf{x}'_\infty{}^T \mathbf{x}'_\infty = (\mathbf{R} \mathbf{x}_\infty)^T (\mathbf{R} \mathbf{x}_\infty) = \mathbf{x}_\infty^T (\mathbf{R}^T \mathbf{R}) \mathbf{x}_\infty = 0$. Obraz absolutní kuželosečky ω je také imaginární kuželosečka a je určena pouze prvky vnější orientace. Označme \mathbf{m}_∞ projekci bodu \mathbf{x}_∞ na Ω . Potom dostaneme $\tilde{\mathbf{m}}_\infty = s \mathbf{A} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\infty \\ 0 \end{bmatrix} = s \mathbf{A} \mathbf{R} \mathbf{x}_\infty$ a následně $\tilde{\mathbf{m}}_\infty^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_\infty = s^2 \mathbf{x}_\infty^T \mathbf{R}^T \mathbf{R} \mathbf{x}_\infty = s^2 \mathbf{x}_\infty^T \mathbf{x}_\infty = 0$. Proto je tedy obraz absolutní kuželosečky imaginární kuželosečka a je definován $\mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$. 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 vzhledem k 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 $\mathbf{P} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ 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 pořídít čtyři nebo pět snímků. Při snímkování můžeme pohybovat jak kalibrační rovinou, tak samotným fotoaparátem. Pozice fotoaparátu nemusí být známá, ale měli bychom se vyhýbat pozici, při které bude rovina snímku rovnoběžná s kalibrační rovinou.

Tato kalibrační procedura seskládá ze šesti kroků:

1. Vytištění 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].

Tato 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

$$\begin{aligned} A &= z_A \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{a}} \\ B &= z_B \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{b}} \\ C &= z_C \mathbf{A}^{-1} \tilde{\mathbf{c}}. \end{aligned}$$

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

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

Vyjádríme 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 epipóly 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 k ω z \mathbf{e} korespondují na základě epipolární transformace s dvěma tečnami 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

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

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 Kruppovy rovnice 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 přeurčený. 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

$$\begin{aligned} \delta_1 &= v_0, \\ \delta_2 &= u_0 \\ \delta_3 &= u_0v_0 + \beta\gamma \\ \delta_{12} &= -1 \\ \delta_{23} &= -u_0^2 - \alpha^2 - \gamma^2 \\ \delta_{13} &= -v_0^2 - \beta^2. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \delta_{13}\delta_{12} > 0, \quad \delta_{23}\delta_{12} > 0, \quad \delta_{13}\delta_{12} - \delta_1^2 > 0, \quad \delta_{23}\delta_{12} - \delta_2^2 > 0, \\ \frac{(\delta_3\delta_{12} + \delta_1\delta_2)^2}{(\delta_{13}\delta_{12} - \delta_1^2)(\delta_{23}\delta_{12} - \delta_2^2)} \leq 1. \end{aligned}$$

4. Dostupný software pro určení prvků vnitřní orientace

V této kapitole budou představeny některé z kalibračních softwarů. Těchto programů existuje velké množství, většinou bývají založené na podobném principu a některé z nich jsou dostupné na internetu.

PhotoModeler

PhotoModeler je software, který extrahuje 3D modely objektů a parametry měření z fotografií. Jednou z mnoha jeho funkcí je i nástroj pro kalibraci fotoaparátů. Prvky vnitřní orientace je možné určit pomocí několika metod. Dvě metody využívají pro kalibraci rovinný vzorek. Příslušná rovina se vzorkem je dodávána v souboru s programem a uživatel si jí může jednoduše vytisknout. Další metodou je tzv. polní kalibrace, která využívá ke kalibraci bodové pole. Software byl vyvinut společností Eos Systems Inc. a další informace je možné nalézt na

<http://www.photomodeler.com/index.html>

EasyCamCalib v1.1

EasyCamCalib je matlabovský software, který využívá k určení prvků vnitřní orientace jeden nebo více snímků rovinné šachovnice. Program je určen pro kalibraci fotoaparátů se střední až vysokou radiální distorzí. Více informací o kalibračním algoritmu je možné nalézt na <http://arthronav.isr.uc.pt/easycamcalib/#>.

Softwarový balíček pro přesnou kalibraci fotoaparátu

Tento matlabovský software provádí kalibraci pomocí kruhových kontrolních bodů. Jedná se o kalibraci pomocí roviny, na které je vytištěný vzorek skládající se z kruhových bodů. Balíček vytvořili Mirai Higuchi, Ankur Datta a Takeo Kanade z Robotického institutu na Carnegie Mellon University v Pittsburghu v Pensylvánii. Více informací o softwaru je možné nalézt na

https://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=617&menu_id=261.

FAUCCAL (Fully Automatic Camera Calibration)

FAUCCAL je další matlabovský software, který provádí kalibraci pomocí rovinné šachovnice. Program byl vyvinut v Laboratoři fotogrammetrie na Národní technické

univerzitě v Athénách. Více informací o softwaru je možné nalézt na http://photogram.tg.teiath.gr/?page_id=56.

Agisoft Lens

Agisoft Lens je automatický kalibrační software, založený na principu kalibrace pomocí roviny. K určení prvků vnitřní orientace je doporučováno pořízení snímků LCD displeje s promítnutou šachovnicí. Program byl vyvinut společností AgiSoft LLC a více informací je možné nalézt na <http://agisoft.ru/>.

Kalibrační toolbox pro Matlab

Pomocí toolboxu je možné provést kalibraci fotoaparátu v prostředí Matlab. Kalibračním objektem je rovinná šachovnice. Z tohoto programu vychází mnoho dalších kalibračních toolboxů. Software byl vytvořen Jean-Yvesem Bouguetem z Kalifornského technologického institutu v Pasadeně. Více informací je možné nalézt na http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

3DF Lapyx

3DF Lapyx je automatický kalibrační software, který k určení parametrů fotoaparátu využívá rovinnou šachovnici. Program byl vyvinut společností 3Dflow a více informací je možné nalézt na <http://www.3dflow.net/products/3df-lapyx-camera-calibration-made-simple/>.

tclcalib

Tclcalib slouží ke kalibraci fotoaparátu pomocí roviny s kruhovým vzorkem. Software byl vyvinut Jamesem Davisem z Kalifornské univerzity v Santa Cruz. Více informací je možné nalézt na <http://users.soe.ucsc.edu/~davis/projects/tclcalib/>.

Camera Calibration Tools

Tento software je určený ke kalibraci fotoaparátu připojeného k počítači. Program umožňuje pořídit několik snímků rovinné šachovnice a následně z nich vypočítat parametry fotoaparátu. Kalibrační software byl vytvořený Danailem Stoyanovem, výzkumným pracovníkem katedře informatiky na University College London. Více informací je možné nalézt na <http://www0.cs.ucl.ac.uk/staff/Dan.Stoyanov/calib/main.html>.

5. Určení prvků vnitřní orientace

Pro výpočet prvků vnitřní orientace byly zvoleny programy Agisoft Lens, Kalibrační toolbox pro Matlab a PhotoModeler Pro 5. První dva vybrané programy jsou veřejně přístupné a oba programy využívají jako kalibrační objekt rovinnou šachovnici, kterou si může každý uživatel snadno vyrobit. PhotoModeler byl vybrán, protože umí určit prvky vnitřní orientace plní kalibraci s využitím prostorového kalibračního pole a poskytuje tedy přesnější výsledky než předchozí programy.

Kalibrační šachovnice s rozměry jednoho pole 7,55 cm x 7,55 cm byla vytištěna na desku Kapa line 1000 × 1400 mm, o tloušťce 5 mm, která je tvořena pěněným polyuretanovým jádrem krytým z obou stran vrstvou bílé pigmentové lepenky. Deska byla umístěna na podlahu a zatížena plexisklem, aby se zajistila její rovnost a nedocházelo k deformacím kartonu. Kalibrační pole pro kalibraci s pomocí softwaru PhotoModeler se skládalo z 19 vlíčovacích bodů a dalších spojovacích bodů rozmístěných různě v prostoru.

Snímky byly pořízeny fotoaparátem Nikon D3100 s objektivem AF-S DX Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G VR. Jedná se o digitální jednookou zrcadlovku s 23,1 × 15,4 mm snímačem CMOS o velikosti pixelu 4,94 μm [28], citlivost přístroje je ISO 100 až 3200 v krocích po 1 EV; lze nastavit rovněž na cca 2 EV nad ISO 3200 (ekvivalent ISO 12 800). Při pořizování snímků byl fotoaparát zaostřen na nekonečno, aby se neměnila velikost konstanty komory ($f = 18 \text{ mm}$) v průběhu snímkování. Jelikož fotoaparát byl zaostřen na nekonečno, ale objekty byly fotografovány zblízka, bylo nutné minimalizovat rozmazání výsledného snímku. Toho bylo docíleno použitím největší clony (f/22), která zvýšila hloubku ostrosti fotografie. Nastavení maximální clony zvýšilo dobu expozice snímku na hodnoty, které vyžadují použití stativu. Její zkrácení bylo dosaženo zvýšením citlivosti snímače. To vedlo k většímu zašumění fotografií, které ale nebude znemožňovat vlastní kalibraci. Při fotografování šachovnice byla doba expozice snímku 1/15 s a citlivost se měnila automaticky. Při snímkování kalibračního pole byla nastavena citlivost na 1600 ISO a v závislosti na osvětlení se měnila doba expozice.

5.1 Kalibrace v programu Agisoft Lens

Software Agisoft Lens využívá při kalibraci fotoaparátu model dírkové komory. Souřadnicový systém fotoaparátu má počátek v projekčním centru, osa Z míří ve směru pozorování, kladná osa X je horizontální a míří doprava a Y je vertikální a míří dolů. Snímkový souřadnicový systém má počátek v levém horním rohu snímku, kladná osa x vede vpravo a k ní kolmá osa y dolů. Mezi odhadované parametry patří velikost horizontální a vertikální konstanty komory f_x a f_y , souřadnice (v souřadnicovém systému snímku) hlavního bodu c_x a c_y , koeficienty radiální a tangenciální distorze $K_1, K_2, K_3, K_4, P_1, P_2$ (k výpočtu distorze je použit Brownův model) a hodnota zkosení snímkových souřadnicových os $skew$. Pro výpočet parametrů slouží následující rovnice:

$$x = \frac{X}{Z}, y = \frac{Y}{Z}$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1 xy$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2 xy$$

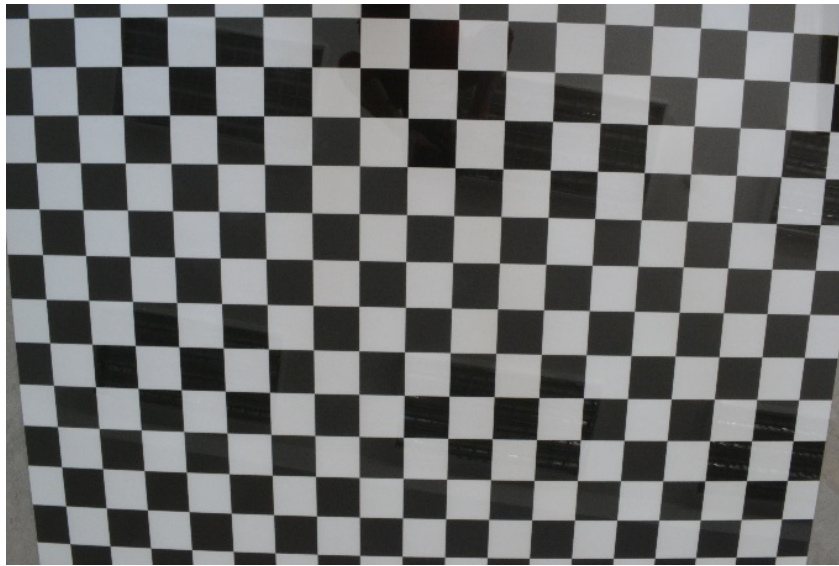
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$u = c_x + x' f_x + y' skew$$

$$v = c_y + y' f_y,$$

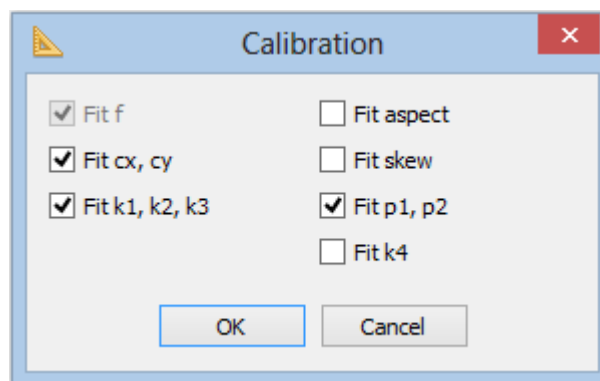
kde X, Y, Z jsou souřadnice bodu v souřadnicovém systému fotoaparátu, x, y jsou nezkreslené normalizované souřadnice bodu, x', y' jsou zkreslené normalizované souřadnice bodu a u, v jsou snímkové souřadnice promítnutého bodu.

Pro výpočet prvků vnitřní orientace byla do programu nahrána sada 40 snímků šachovnicové roviny (viz Obrázek 5.1).



Obrázek 5.1: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu Agisoft Lens

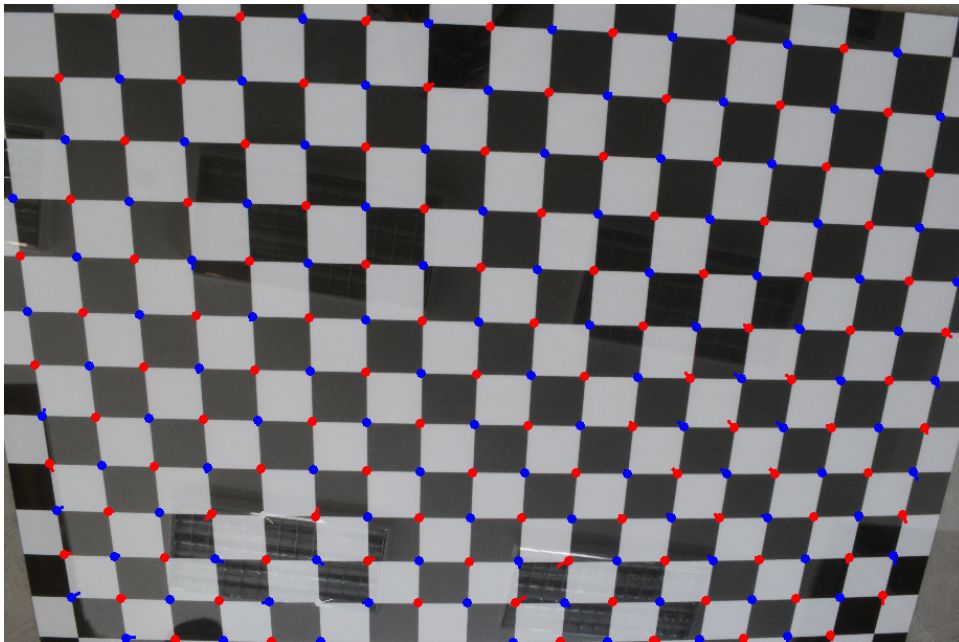
Po spuštění kalibrace je v nastavení možné zvolit, které parametry budou vypočteny (viz Obrázek 5.2). V našem případě se jednalo o konstantu komory (počítá se vždy), polohu hlavního bodu a koeficienty distorze K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 (pokud by nebyly parametry zvoleny, platí, že hlavní bod je umístěn do středu snímku a koeficienty distorze jsou nulové). Naopak nebyl zvolen poměr stran pixelu, jelikož náš snímek se skládá ze čtvercových pixelů. Pokud bude program při výpočtu uvažovat čtvercové pixely, horizontální a vertikální konstanta komory si budou rovný. Dále uvažujeme kolmé snímkové osy, tedy v nastavení nebyl zvolen výpočet zkosení.



Obrázek 5.2: Nastavení kalibrace v programu Agisoft Lens

Po provedení kalibrace s 40 snímky, program na každém snímku zobrazil detekované rohy šachovnice a rozdíl mezi polohou detekovaného bodu a bodu promítnutého na základě výsledků kalibrace (dvacetkrát zvětšený, viz Obrázek 5.3).

Snímky, na kterých došlo k neúplné nebo chybné detekci rohů, byly smazány a kalibrace byla znovu spuštěna s 18 snímky.



Obrázek 5.3: Detekované body na snímku v programu Agisoft Lens

V Tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledky, které jsme dostali po provedení kalibrace.

	vypočtená hodnota	směrodatná odchylka
f [px]	3 717,77	0,93
c_x [px]	2 316,04	0,64
c_y [px]	1 526,61	0,50
K_1 [px ⁻²]	-0,086 0	0,001 2
K_2 [px ⁻⁴]	0,002 7	0,005 1
K_3 [px ⁻⁶]	0,014 1	0,006 5
P_1 [px ⁻¹]	-0,000 040	0,000 034
P_2 [px ⁻¹]	0,000 392	0,000 045

Tabulka 5.1: Výsledky kalibrace v programu Agisoft Lens

5.2 Kalibrace s toolboxem pro Matlab

Interní model fotoaparátu je podobný tomu, který používá Heikkilä a Silvén [4]. Mezi odhadované parametry patří konstanta komory fc (obsahuje horizontální a vertikální složku), souřadnice hlavního bodu cc (ve snímkovém souřadnicovém systému), koeficient zkosení $alpha_c$, který definuje úhel mezi horizontální a vertikální

osou a koeficienty distorze kc (distorze se počítá pomocí Brownova modelu), $kc(1), kc(2), kc(5)$ jsou koeficienty radiální složky a $kc(3), kc(4)$ koeficienty tangenciální složky. K výpočtu parametrů slouží následující rovnice:

$$\mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^4)\mathbf{x}_n + \mathbf{dx}$$

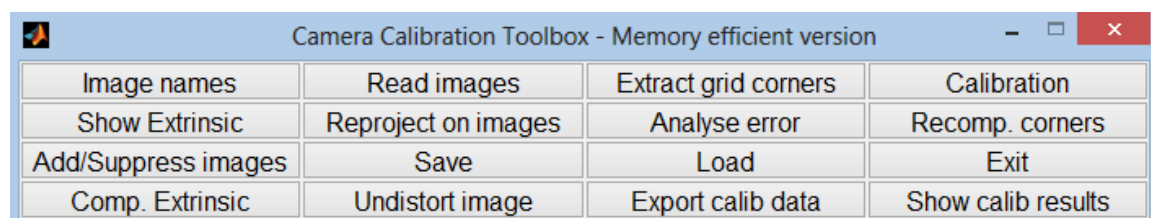
$$\mathbf{dx} = \begin{bmatrix} 2kc(3)xy + kc(4)(r^2 + 2x^2) \\ kc(3)(r^2 + 2y^2) + 2kc(4)xy \end{bmatrix}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x_p = fc(1)(x_d(1) + alpha_c \cdot x_d(2)) + cc(1)$$

$$y_p = fc(2)x_d(2) + cc(2),$$

kde X_c, Y_c, Z_c jsou souřadnice bodu v souřadnicovém systému fotoaparátu, \mathbf{x}_n jsou normalizované nezkreslené souřadnice bodu, \mathbf{x}_d jsou normalizované zkreslené souřadnice bodu a x_p, y_p jsou snímkové souřadnice promítnutého bodu. Počátek snímkového souřadnicového systému se nachází ve středu levého horního pixelu, osa x je horizontální a míří doprava a y je vertikální a míří dolů.



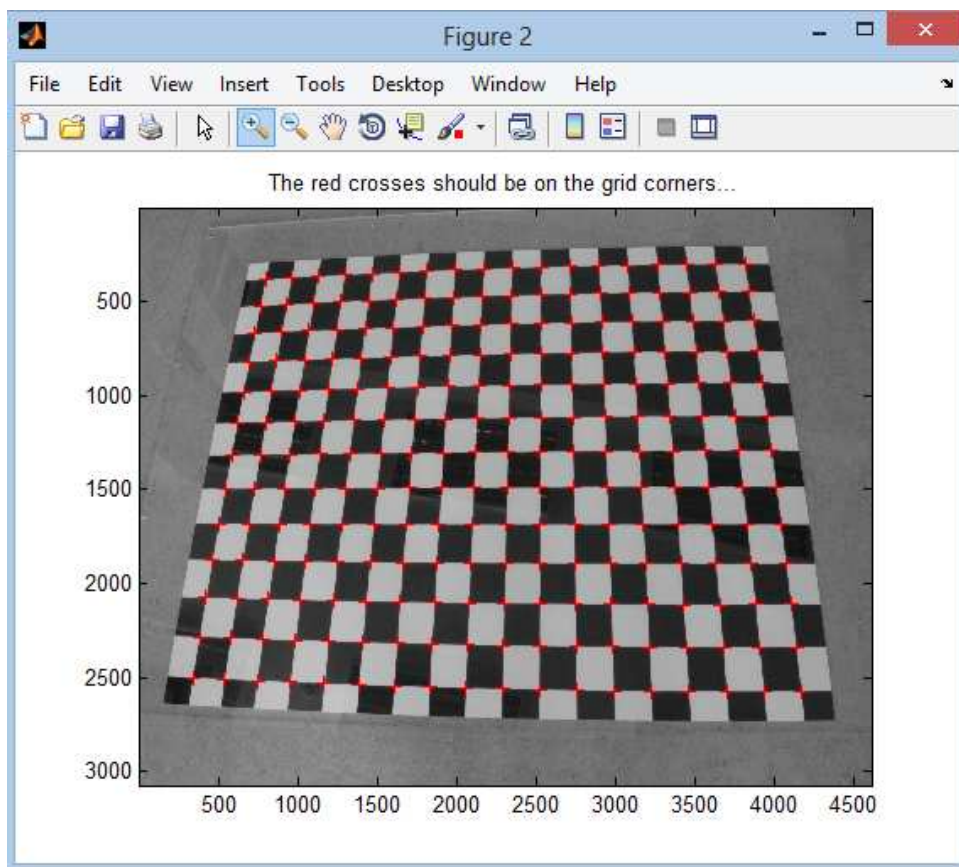
Obrázek 5.4: Kalibrační menu v programu Matlab

Na Obrázku 5.4 je znázorněno kalibrační menu, které se uživateli zobrazí po spuštění kalibračního programu. Pro výpočet prvků vnitřní orientace byla do programu nahrána sada 35 snímků šachovnicové roviny (viz Obrázek 5.5).



Obrázek 5.5: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu Matlab

U každého snímku byla provedena extrakce rohů. Tedy byly manuálně zvoleny čtyři krajní body obdélníku, ve kterém program následně křížkem označil detekované rohy (viz Obrázek 5.6). Detekci rohů šachovnice je možné zlepšit zadáním přibližného odhadu zkreslení. Když byla extrakce hotová u všech snímků, příkazem `est_dist=[1;1;1;1]`; byl v programu nastaven počet odhadovaných parametrů distorze a příkazem `est_aspect_ratio=0`; bylo nastaveno, aby program při výpočtu uvažoval čtvercové pixely (tedy horizontální a vertikální konstanta komory si budou rovny). Zkosení snímkových os se při výpočtu neuvažuje (pokud není nastaveno jinak příkazem `est_alpha=1`). Po provedení vlastní kalibrace je možné zpřesnit výsledek přepočtem rohů nebo pomocí analýzy chyb zjistit, na kterém snímku je potřeba znovu detekovat rohy nebo který je potřeba z výpočtu vynechat. V našem případě nebyl vypuštěn žádný snímek.



Obrázek 5.6: Extrakce rohů šachovnice v programu Matlab

V Tabulce 5.2 jsou uvedeny výsledky, které jsme dostali po provedení kalibrace.

	vypočtená hodnota	směrodatná odchylka
$fc(1) = fc(2)$ [px]	3712,14	0,77
$cc(1)$ [px]	2315,27	1,08
$cc(2)$ [px]	1529,60	0,80
$kc(1)$ [px ⁻²]	-0,084 0	0,001 6
$kc(2)$ [px ⁻⁴]	-0,014 9	0,009 3
$kc(5)$ [px ⁻⁶]	0,045 6	0,015 3
$kc(3)$ [px ⁻¹]	0,000 069	0,000 059
$kc(4)$ [px ⁻¹]	0,000 478	0,000 076

Tabulka 5.2: Výsledky kalibrace v programu Matlab

5.3 Kalibrace v programu PhotoModeler Pro 5

Odhadovanými parametry při kalibraci v programu PhotoModeler jsou konstanta komory f , souřadnice hlavního bodu x_p, y_p (souřadnice mají počátek v levém horním rohu snímku) a koeficienty K_1, K_2, K_3, P_1 a P_2 radiální a tangenciální distorze.

PhotoModeler automaticky uvažuje čtvercové pixely a kolmé snímkové souřadnicové osy. Pro výpočtu koeficientů distorze používá program Brownův model daný rovnicemi:

$$\begin{aligned}x_c &= x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\y_c &= y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy \\r &= \sqrt{x^2 + y^2},\end{aligned}$$

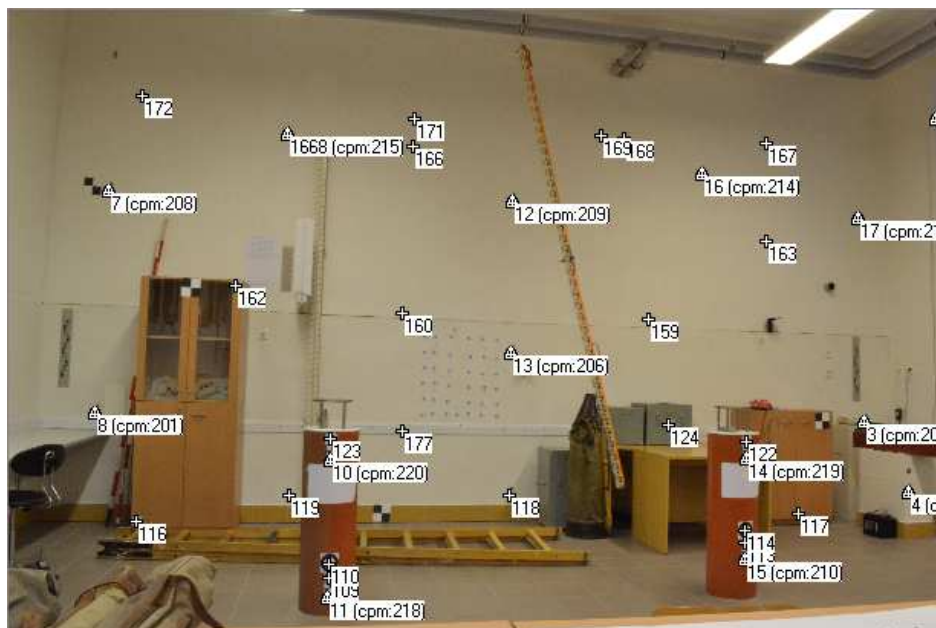
kde x_c, y_c jsou nezkreslené souřadnice bodu a x, y jsou zkreslené souřadnice bodu. Oproti předchozím modelům distorze má tento prohozené zkreslené a nezkreslené souřadnice a koeficienty tangenciální distorze. Model fotoaparátu použitý při výpočtu parametrů není v manuálu uveden.

Do programu bylo nahráno 24 snímků bodového pole (viz Obrázek 5.7).



Obrázek 5.7: Ukázka snímku použitého při kalibraci v programu

Před spuštěním vlastní kalibrace bylo nutné manuálně nebo automaticky označit vřícovací a spojovací body na snímcích (viz. Obrázek 5.8) a body referencovat. Poté již bylo možné provést polní kalibraci. Na základě výsledných reziduí pro jednotlivé body na snímcích je možné dohledat ty, které byly chybně detekovány nebo referencovány, a následně opravit jejich číslo nebo polohu, případně je z měření vyloučit.



Obrázek 5.8: Označené body na snímku v programu PhotoModeler

V Tabulce 5.3 jsou uvedené výsledky kalibrace s 24 snímky, z čehož 4 snímky byly pořízené fotoaparátem otočeným o 90°:

	vypočtená hodnota	směrodatná odchylka
f [mm]	18,629	0,005
x_p [mm]	11,465	0,009
y_p [mm]	7,549	0,006
K_1 [mm ⁻²]	0,000 191	0,000 007
K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 94	0,000 000 10
K_3 [mm ⁻⁶]	-0,000 000 004 1	0,000 000 000 4
P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 022	0,000 008
P_2 [mm ⁻¹]	-0,000 088	0,000 005

Tabulka 5.3: Výsledky kalibrace s 24 snímky v programu PhotoModeler

Jelikož body na otočených snímcích měly podstatně větší rezidua než body na ostatních snímcích a zhoršovaly tak kvalitu výsledku kalibrace, byly následně z výpočtu vyloučeny. V Tabulce 5.4 jsou uvedeny výsledky kalibrace pouze s 20 snímky.

	vypočtená hodnota	směrodatná odchylka
f [mm]	18,638	0,003
x_p [mm]	11,451	0,006
y_p [mm]	7,555	0,004
K_1 [mm ⁻²]	0,000 206	0,000 005
K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 74	0,000 000 06
K_3 [mm ⁻⁶]	-0,000 000 003 2	0,000 000 000 3
P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 007	0,000 005
P_2 [mm ⁻¹]	-0,000 008	0,000 003

Tabulka 5.4: Výsledky kalibrace s 20 snímky v programu PhotoModeler

5.4 Přepočet parametrů fotoaparátu

Aby bylo možné parametry fotoaparátu vzájemně porovnat, je potřeba vyjádřit je ve stejných jednotkách a použít pro jejich výpočet stejné modely fotoaparátu. Při přepočtu hodnot z pixelů na milimetry byla uvažována velikost pixelu $p = 4,94 \mu\text{m}$.

Konstanta komory je v programech Agisoft Lens a PhotoModeler vyjádřena v pixelech a pro její přepočet na milimetry platí:

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

Souřadnice hlavního bodu 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 4608×3072 pixelů, tedy $s = 4608 \text{ px}$ a $v = 3072 \text{ px}$. Programy Agisoft Lens a PhotoModeler mají počátek snímkového souřadnicového systému v levém horním rohu snímku, a proto pro přepočet výsledků použijeme následující rovnice:

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

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

Snímkový souřadnicový systém v kalibračním toolboxu pro Matlab má počátek ve středu levého horního pixelu, je tedy ještě nutné připočítat k souřadnicím hlavního bodu $0,5 \text{ px}$:

$$c_x[\text{mm}] = \left(c_x[\text{px}] + 0,5 - \frac{s}{2} \right) \cdot p$$

$$c_y[\text{mm}] = \left(c_y[\text{px}] + 0,5 - \frac{v}{2} \right) \cdot p.$$

Při porovnávání koeficientů distorze budeme vycházet z rovnic Brownova modelu:

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

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

Jelikož koeficienty distorze v programu Agisoft Lens a Toolboxu pro Matlab jsou vyjádřeny v jednotkách konstanty komory, pro jejich převod je nutné použít vztahy:

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

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

Zároveň také platí, že model distorze použitý v programu PhotoModeler má prohozené zkreslené a nezkraslené souřadnice, proto je nutné obrátit znaménka u koeficientů distorze. Tento model distorze má ještě navíc prohozené i koeficienty tangenciální distorze, takže místo P_1 se bude psát P_2 a naopak.

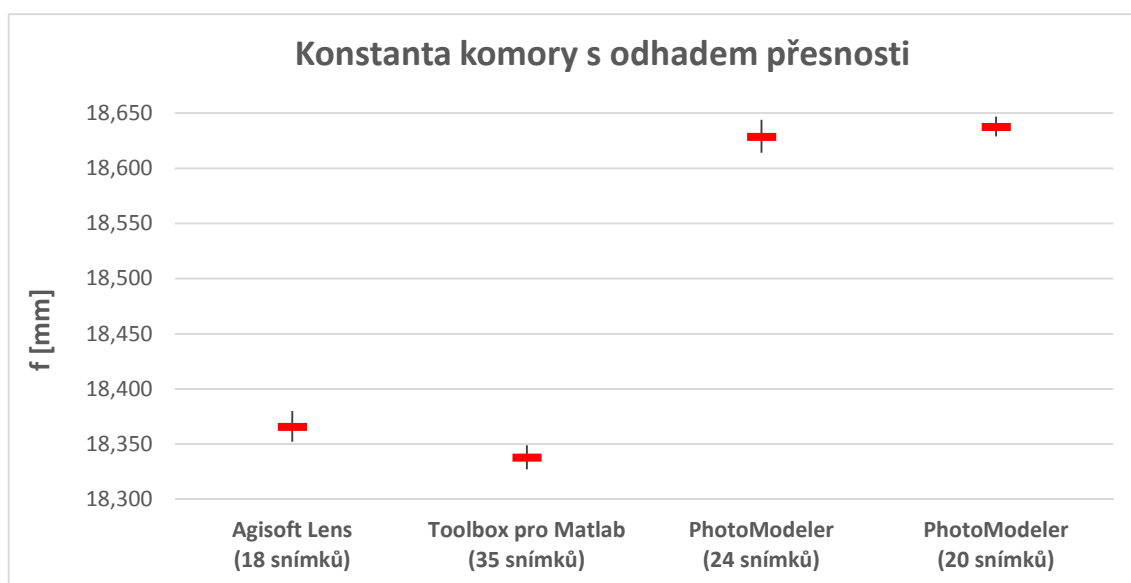
5.5 Porovnání výsledků kalibrace a rozbor přesnosti

V Tabulce 5.5 je zobrazeno srovnání výsledných přepočtených parametrů ze všech použitých programů.

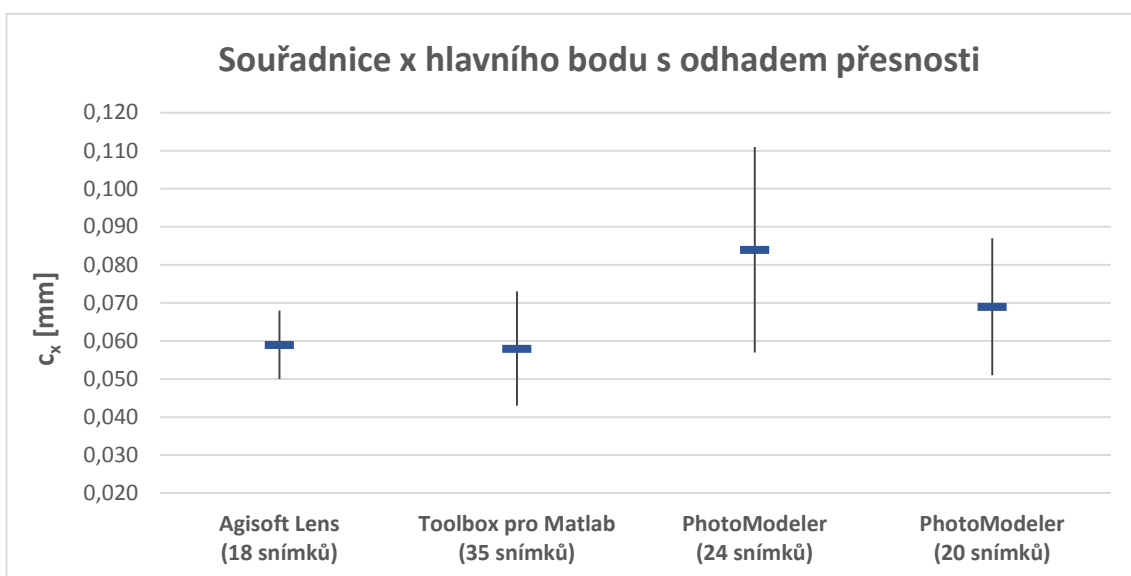
		Agisoft Lens	Toolbox pro Matlab	PhotoModeler	PhotoModeler
		(18 snímků)	(35 snímků)	(24 snímků)	(20 snímků)
konstanta komory	f [mm]	18,366	18,338	18,629	18,638
souřadnice hlavního bodu	c_x [mm]	0,059	0,058	0,084	0,069
	c_y [mm]	-0,046	-0,029	-0,039	-0,033
koeficienty radiální distorze	K_1 [mm ⁻²]	-0,000 254 94	-0,000 249 11	-0,000 191 40	-0,000 205 90
	K_2 [mm ⁻⁴]	0,000 000 02	-0,000 000 13	-0,000 000 94	-0,000 000 74
	K_3 [mm ⁻⁶]	0,000 000 00	0,000 000 00	0,000 000 00	0,000 000 00
koeficienty tangenciální distorze	P_1 [mm ⁻¹]	-0,000 002 16	0,000 003 77	0,000 088 46	0,000 008 10
	P_2 [mm ⁻¹]	0,000 021 33	0,000 026 05	0,000 022 34	0,000 007 34

Tabulka 5.5: Porovnání výsledků kalibrace v programech Agisoft Lens, Matlab a PhotoModeler

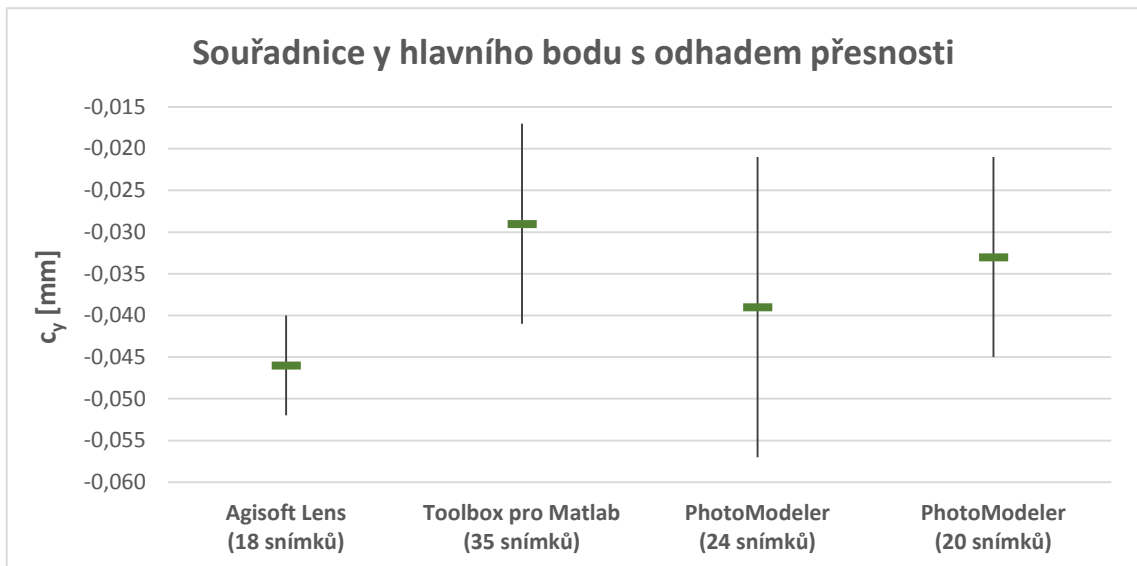
Z tabulky je vidět, že konstanta komory vypočtená v programu PhotoModeler se liší od zbylých dvou o přibližně 0,3 mm. Jedná se o celkem podstatný rozdíl. Jelikož ve všech případech byl fotoaparát stejně nastaven, muselo dojít ke změně polohy součástí uvnitř objektivu. Tyto součástky mají vůli, a proto při každém zapnutí fotoaparátu nemusí být konstanta komory úplně stejná. Souřadnice hlavního bodu vyšly překvapivě podobně, liší se pouze v řádech setiny milimetru. V Grafu 5.1, 5.2 a 5.3 jsou uvedeny výsledné hodnoty konstanty komory a souřadnic hlavního bodu a jejich směrodatné odchylky. Barevná vodorovná čára značí vypočtenou hodnotu parametru a svislou čárou je vyznačen interval hodnota parametru \pm trojnásobek odhadu směrodatné odchylky.



Graf 5.1: Vypočtené hodnoty konstanty komory s vyznačením odhadované přesnosti

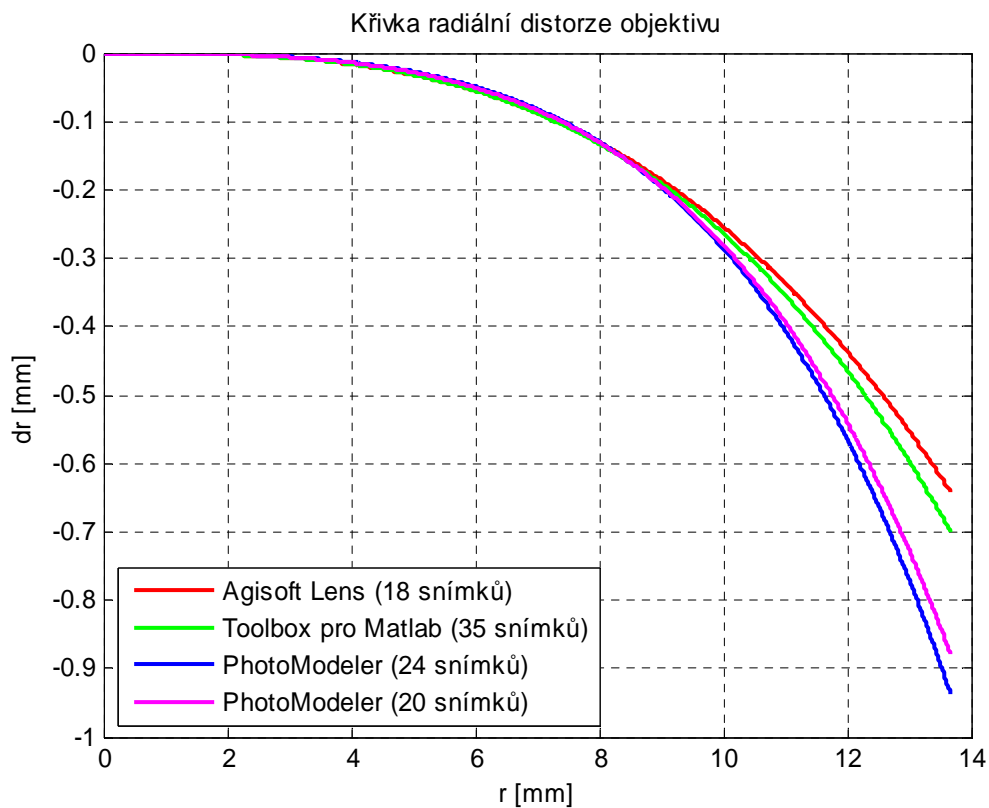


Graf 5.2: Vypočtené hodnoty souřadnice x hlavního bodu s vyznačením odhadované přesnosti



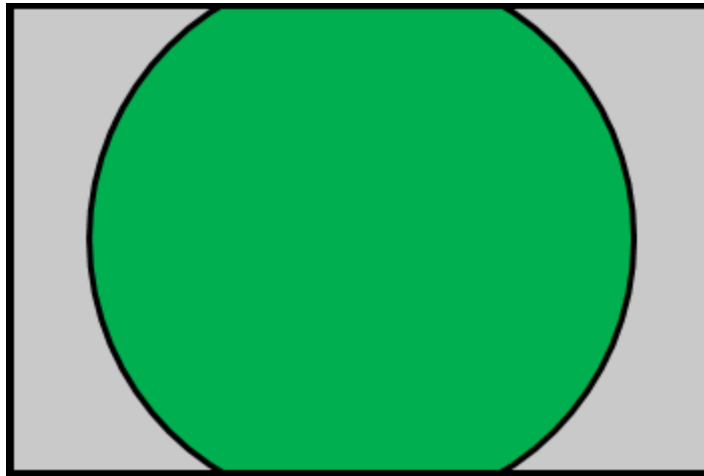
Graf 5.3: Vypočtené hodnoty souřadnice y hlavního bodu s vyznačením odhadované přesnosti

Křivky radiální distorze vypočtené v jednotlivých programech se až do radiální vzdálenosti přibližně 9 mm neliší o více než 3 px, tedy 0,015 mm (viz Graf 5.4). Následné odchýlení křivek může být způsobeno tím, že do kalibrace nevstoupoval dostatečný počet bodů na okrajích snímků, a proto nebyla distorze na krajích správně odhadnuta.



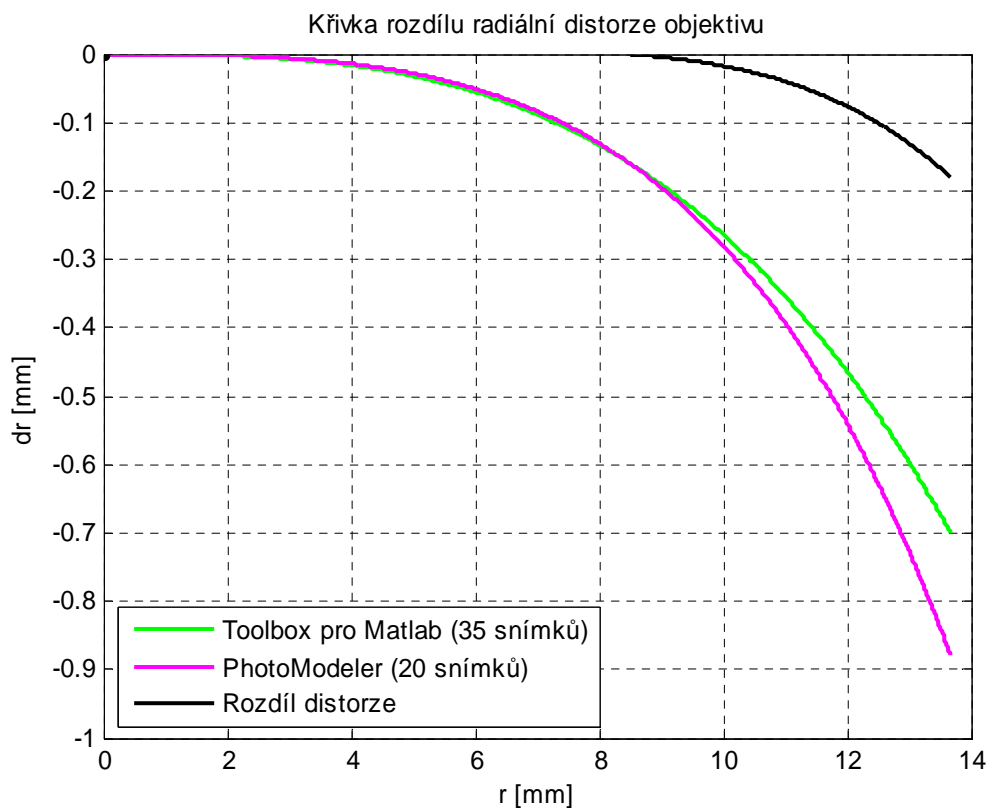
Graf 5.4: Znáznornění radiální distorze objektivu vypočtené v programech Agisoft Lens, Matlab a PhotoModeler pomocí křivek

Snímač má velikost $23,1 \times 15,4$ mm, maximální radiální vzdálenost od středu je tedy 13,88 mm. Na Obrázku 5.9 je zeleně zakresleno do jaké vzdálenosti se křivky distorze neliší o více jak 3 px (0,015 mm) vzhledem k rozměrům snímače.



Obrázek 5.9: Velikost snímače ve vztahu k shodné radiální distorzi (čtyřikrát zvětšeno)

V Grafu 5.5 je vidět rozdíl mezi spočtenou distorzí v programu Matlab a PhotoModeler. Do radiální vzdálenosti přibližně 9,5 mm je rozdíl téměř nulový (< 3 px), a poté začíná růst, až dosahuje téměř hodnoty 0,2 mm v rohu snímku.



Graf 5.5: Znárodnění rozdílu distorze vypočtené v programech Matlab a PhotoModeler

6. Témata dalšího výzkumu

Práce přináší několik témat, která si zasluhují další zkoumání. Mezi nejdůležitější patří stanovení příčin nezanedbatelného rozdílu hodnot konstanty komory stanovených s využitím snímků šachovnice a snímků kalibračního bodového pole. S tím souvisí také přesnější určení distorze na okrajích snímků. Obě tato témata budou vyžadovat pořízení dalších snímků a provedení další kalibrace pro vyloučení či potvrzení časové nestálosti parametrů.

Jiným směrem, kterým by se práce mohla ubírat je testování dalšího software. Nabídka kalibračních programů je poměrně široká a mnoho z nich se dá získat zadarmo. Pro kontrolu výsledků kalibrace by bylo vhodné použití programů založených na jiném principu. Například by se mohlo jednat o použití kruhové mřížky místo čtvercové, protože podle některých výzkumů dává kruhový vzorek přesnější výsledky než čtvercový.

Vhodným doplněním práce by dále mohlo být ověření vypočtených parametrů na vhodném fotogrammetrickém projektu a stanovení dosažitelné přesnosti.

7. Závěr

Účelem této práce bylo seznámit čtenáře s problematikou určování prvků vnitřní orientace u digitálních fotoaparátů. Základem teoretické části práce byla rešerše literatury, která se zabývá významem prvků vnitřní orientace a jejich výpočtem. Byl zde popsán význam všech parametrů fotoaparátu – konstanty komory, polohy hlavního bodu i distorze objektivu. Déle byly uvedeny dva typy distorze – radiální a tangenciální a představeny nejrozšířenější modely pro výpočet koeficientů distorze. Při vlastní implementaci se nejčastěji využívá Brownův model, který zahrnuje jak koeficienty radiální, tak tangenciální distorze. V navazujících kapitolách byly podrobně popsány metody kalibrace fotoaparátu. Nejrozšířenější je metoda kalibrace pomocí 3D objektu a 2D roviny. Jednou z novějších a zatím málo využívaných metod je kalibrace pomocí 1D roviny. Auto-kalibrace je jednoduchá, co se týče pořizování snímků, ale k výpočtu využívá velmi složitý matematický aparát.

Dále byla provedena rešerše dostupného software. Bylo vybráno a představeno několik programů, které jsou snadno dostupné na internetu. Některé z nich jsou poskytovány zdarma, jiné je nutné zakoupit. Většina programů je založena na podobném principu a provádí kalibraci pomocí rovinné šachovnice. Pro vlastní kalibraci byly nakonec zvoleny programy Agisoft Lens, Toolbox pro Matlab a PhotoModeler. Agisoft Lens a Matlab mají jednoduché prostředí a využívají ke kalibraci rovinnou šachovnici. Tato šachovnice byla vytištěna na plastovou desku a poté byly pořízeny kalibrační snímky. Programy automaticky dohledávají rohy šachovnice a počítají zvolené parametry. V programu PhotoModeler je možné provést polní kalibraci pomocí 3D bodového pole složeného z vlíčovacích a spojovacích bodů. Snímky kalibračního bodového pole byly pořízeny v laboratoři stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně a zde byl také proveden výpočet parametrů. Při všech kalibracích byly uvažovány čtvercové pixely a kolmé snímkové souřadnicové osy.

Výsledkem vlastní kalibrace fotoaparátu Nikon D3100 s objektivem AF-S DX Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G VR byla hodnota konstanty komory, souřadnice hlavního bodu snímku, tři koeficienty radiální distorze a dva koeficienty tangenciální distorze fotoaparátu. Jelikož každý program používal při výpočtu trochu jiný model distorze, jiné

jednotky a vztahoval souřadnice hlavního bodu k jinému počátku, musely být výsledné parametry přepočteny, tak aby bylo možné je vzájemně porovnat. Kalibrace byla provedena s použitím všech tří zvolených softwarových nástrojů a přinesla velmi podobné výsledky. Výjimkou je hodnota konstanty komory, která se liší o přibližně 0,3 mm. Ověření příčin tohoto rozdílu je námětem pro další zkoumání. Opakovanou kalibrací by bylo možné zjistit příčiny tohoto problému a parametry zpřesnit. Další možností je provedení výpočtu prvků vnitřní orientace v software využívajících jiné metody kalibrace a porovnání výsledků. Jelikož již známe koeficienty distorze, je možné dále provádět opravu zkreslení na snímcích. Zjištěné prvky vnitřní orientace budou použitelné v dalších aplikacích, které vyžadují použití měřických snímků.

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, vol., no. 22 [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, vol. 26, no. 7 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=34>

[8] AZIZI, Navid. Camera Self-Calibration. In: *CiteSeer*[®] [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, vol. 3, no. 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, vol. 16, no. 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, vol. 37, no. 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, s. 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, vol. 32, no. 3, p. 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, vol. 1, no. 2, p. 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, vol. 13, no. 1, p. 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, vol. 49, no. 17, p. 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] Nikon D3100. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nikon_d3100

[29] *Slovník VÚGTK* [online]. 2005 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www.vugtk.cz/slovník/3867_fotogrammetrie

Obsah přiloženého CD

BP_Hofmanova.pdf – vlastní práce

Agisoft_Lens – složka s daty a podklady pro kalibraci v programu Agisoft Lens

- Agisoft_Lens_kalibracni_snimky – složka obsahující snímky použité při kalibraci
- Agisoft_Lens_manual.pdf – manuál k programu Agisoft Lens
- lens_0_4_1_x64.exe – instalační balíček pro Windows (64 bit)

Kalibracni_toolbox_pro_Matlab – složka s daty a podklady pro kalibraci v programu Matlab

- Matlab_kalibracni_snimky – složka obsahující snímky použité při kalibraci
- TOOLBOX_calib – složka obsahující kalibrační toolbox
- Matlab_kalibracni_protokol.txt – kalibrační protokol

PhotoModeler – složka s daty a podklady pro kalibraci v programu PhotoModeler Pro 5

- PhotoModeler_kalibracni_snimky – složka obsahující snímky použité při kalibraci
- PhotoModeler_postup_kalibrace.pdf – postup kalibrace v programu PhotoModeler Pro 5
- Rozmisteni_vlicovacich_bodu.jpeg – obrázek ukazující rozmístění vlíčovacích bodů kalibračního bodového pole
- Souradnice_vlicovacich_bodu.txt – soubor obsahující souřadnice vlíčovacích bodů kalibračního bodového pole
- PhotoModeler_kalibracni_protokol_20_snimku.txt – protokol o kalibraci s 20 snímky
- PhotoModeler_kalibracni_protokol_24_snimku.txt – protokol o kalibraci s 24 snímky