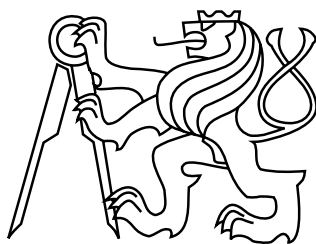


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ ODSTRANĚNÍ ZKRESLENÍ
FOTOGRAFICKÝCH SNÍMKŮ

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka
Katedra geomatiky

červen 2018

Tomáš KLEMSA



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

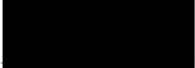

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Klemsa	Jméno: Tomáš	Osobní číslo: 439229
Zadávající katedra: katedra geomatiky		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Softwarové řešení odstranění zkreslení fotografických snímků	
Název bakalářské práce anglicky: Software solution of distortion removing from photographic images	
Pokyny pro vypracování: Vypracujte stručnou rešerši používaných metod pro odstranění zkreslení z fotografických snímků. Navrhněte moderní vzhled grafického rozhraní a vytvořte přepracované řešení problému. Pro zejména neměřické a širokoúhlé objektivy (např. endoskopické kamery) vypracujte případovou studii využití vytvořeného programového řešení. Na závěr proveďte diskusi o výsledcích a možnostech dalšího rozvoje programového vybavení.	
Seznam doporučené literatury: Pavelka, K.; Štroner, M. Jednoduché potlačení vlivu vad objektivu neměřických komor. Stavební obzor. 2005, 14 (1), 26-30. ISSN 1210-4027	
Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka	
Datum zadání bakalářské práce: 19.2.2018	Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018
	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

26.2.2018	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Ve fotogrammetrii jsou stále častěji využívány neměřické fotografické komory. V dnešní době se může jednat například o digitální fotoaparáty, endoskopy, mobilní telefony a tak dále. Aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti při dalším zpracování snímků, je nutno provést geometrickou kalibraci těchto optických systémů. Bakalářská práce se zabývá matematickým popisem těchto geometrických vad a jejich odstranění ze snímku. Dále je v této práci popsána tvorba softwaru pro odstranění geometrického zkreslení v jazyce C++ a s použitím knihoven Qt, na základě znalosti prvků vnitřní orientace matematicky vyjádřené podle rovnic Duane C. Browna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotogrammetrie, Kalibrace kamery, Distorze objektivu

ABSTRACT

Non-metric photographic cameras are increasingly used in photogrammetry. Nowadays it could be, for example, digital cameras, endoscopes, mobile phones and so on. To achieve the highest accuracy in further processing of images, geometric calibration of these optical systems is required. This bachelor thesis deals with the mathematical description of these geometrical imperfection and how to remove them from the image. This thesis also describes the proces of creating software for the removal of geometric distortion in C++ language and with the utilization of Qt libraries based on knowledge of internal orientation elements mathematically expressed according to the equations of Duan C. Brown.

KEYWORDS

Photogrammetry, Camera calibration, Lens distortion

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Softwarové řešení odstranění zkreslení fotografických snímků“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Prof. Dr. Ing. Pavelkovi za připomínky a pomoc při zpracování této práce.

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Cíle práce	9
2	Rešerše	10
3	Prvky vnitřní orientace	11
3.1	Konstanta komory	11
3.2	Hlavní snímkový bod	12
3.3	Distorze	12
3.3.1	Radiální distorze	13
3.3.2	Tangenciální distorze	13
4	Kalibrace kamery	15
4.1	Matematické modely distorze	15
4.1.1	Brownův distorzní model	15
4.1.2	PanoTools distorzní model	16
4.2	Způsoby kalibrace	16
4.2.1	Kalibrace pomocí testovacího pole	17
4.2.2	Laboratorní kalibrace	17
4.2.3	Simultánní kalibrace	17
5	Tvorba softwaru	18
5.1	Aplikační rámec Qt	18
5.2	Tvorba GUI	18
5.3	Třída distortionremover	19
5.4	Třída picturetransformation	19
5.4.1	Postup opravy snímků	20
5.5	Sestavení spustitelného programu	21
6	Logika a práce s programem	22
6.1	Spuštění programu	22
6.2	Vstup a výstup	24
6.3	Práce s parametry kamery	24

6.4	Oprava snímků	25
6.5	Použití softwaru na reálných datech	25
6.5.1	Použitá kamera	26
6.5.2	Prvky vnitřní orientace kamery	26
6.5.3	Oprava snímků	27
6.5.4	Další možnosti zpracování	28
7	Závěr	31
	Literatura	33
A	Elektornické přílohy	I
A.1	CD disk	I

1 Úvod

Fotogrammetrie je obor zabývající se geometrickými vztahy mezi objekty zachycenými na fotografickém snímku. Tento způsob se často využívá u dokumentace historických objektů, tvorby map z leteckých snímků, při dokumentaci dopravních nehod atd. Fotogrammetrii můžeme rozdělit do více kategorií.

Jednosnímková fotogrammetrie

Nejjednodušší metoda je tzv. jednosnímková fotogrammetrie. Jak název napovídá, je zpracováván pouze jeden snímek. Metoda je hojně využívána u dokumentace fasád budov. Omezení při tomto postupu je, že ze snímku získáme pouze dvojrozměrnou informaci, proto jakákoliv hloubková členění budou oproti zvolené rovině zkreslená.

Stereofotogrammetrie

Metoda využívající stereoskopického vjemu, na jehož základě získáme z dvou překrývajících se snímků s rovnoběžnou osou záběru prostorové informace. Tato metoda je hojně využívána v letecké fotogrammetrii.

Průřezová fotogrammetrie

Průřezová fotogrammetrie využívá více snímků s nerovnoběžnou osou záběru, na kterých jsou vyhledány identické body, ze kterých jsou získané prostorové souřadnice těchto bodů.

Obrazová korelace

Obrazová korelace, hojně nazývána také jako IBMR (*Image Based Modeling and Rendering*) je metoda využívající obrazovou korelaci pro vyhledávání identických bodů. Funguje v podstatě na principu průřezové fotogrammetrie s tím rozdílem, že je potřeba velké množství snímků a algoritmus SIFT (*Scale Invariant Feature Transformation*), který vyhledává identické body, proto je vhodná pro objekty negeometrického tvaru.

Všechny tyto metody využívají obrazová data, u kterých je předpoklad středového promítání. To ovšem u fotoaparátů s běžným objektivem neplatí. Fotografie jsou zatíženy geometrickým zkreslením, které by se projevilo na kvalitě výstupu. Proto je nutné toto zkreslení redukovat.

Tato bakalářská práce je zaměřena na tvorbu jednoduchého a uživatelsky přívětivého softwaru pro odstranění geometrického zkreslení fotografických snímků na

základě znalosti prvků vnitřní orientace včetně průběhu radiální a tangenciální distorze. Průběh distorze může být vyjádřen různými způsoby. Pro tvořený program byl však zvolen model podle Duane C. Browna, který je často využívaným modelem ve fotogrammetrických softwarech.

Existuje mnoho programů, které umí nežádoucí zkreslení ze snímků odstranit. Proč tedy vyvíjet nástroj nový?

Jako první bych zmínil grafické editory. Jedná se o nástroje, které většinou umí odstranit zkreslení na základě subjektivního vnímání uživatele. Například tak, že posuvníkem uživatel nastavuje velikost zkreslení, až stěny budovy nejsou prohnuté. Tyto nástroje jsou ovšem vhodné pouze pro fotografie, které nebudou fotogrammetricky zpracovávány. Nepracují totiž s tangenciální distorzí, souřadnicemi hlavního snímkového bodu a nastavení průběhu radiální distorze je často velmi omezené.

Do druhé skupiny bych zařadil programy fotogrammetrické. Často profesionální a velmi obsáhlý software, který je ovšem v mnohých případech finančně nákladný. V některých případech tyto programy mají funkci na poloautomatický výpočet prvků vnitřní orientace, což je značná úspora času.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce je tedy vytvořit program, který bude volně šiřitelný, aby kdokoliv měl možnost upravovat, šířit a dále využívat zdrojový kód a bude psán v rozšířeném multiplatformním objektově orientovaném programovacím jazyce, tak aby byla snadná jeho další úprava. Program byl tedy vytvořen v jazyce *C++* na platformě *Qt*.

2 Rešerše

Pro pochopení problematiky geometrického zkreslení fotografických komor, bylo nutné dohledat odborné publikace zabývající se kalibrací fotografických komor a odstraněním zkreslení.

Tvorba kvalitních fotoplánů v mezních případech, [9] Tato diplomová práce se zabývá tématem tvorby digitálních fotoaparátů, ke které neodmyslitelně patří i redukce geometrického zkreslení. Pro čtenáře vytváří stručný souhrn možností odstranění geometrického zkreslení a možnosti kalibrace fotografických komor bez laboratorního vybavení. Celý postup je zde názorně předveden na příkladu, právě zmíněné tvorby fotoplánu.

Close-range camera calibration, [6] Jednou ze zmíněných metod v titulu *Tvorba kvalitních fotoplánů v mezních případech* je popis geometrického zkreslení pomocí rovnic *Duane C. Browna*. Tento odborný článek se zabývá kalibrací komor v pozemní fotogrammetrii.

Lens correction model - PanoTools Wiki, [4] Odlišným matematickým popisem geometrického zkreslení se zabývá tento web, který je v této práci jen stručně popsán.

Jednoduché potlačení vlivu vad objektivu neměřických komor, [8] Tento článek z časopisu *Stavebí obzor* se zabývá tvorbou softwaru pro redukci distorze.

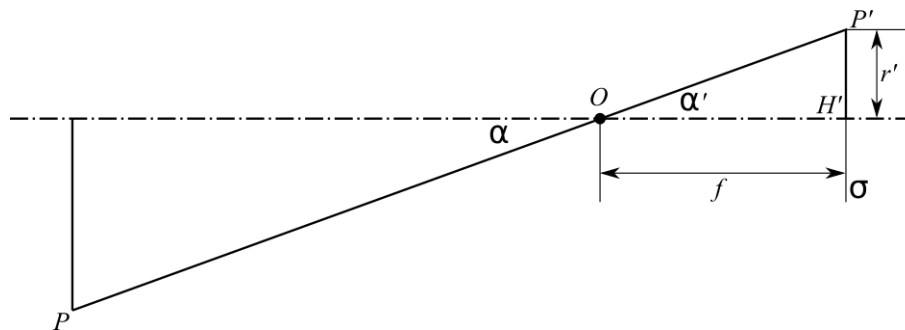
Method for measuring lens distortion, [13] Tato disertační práce pojednává o metodě měření distorze objektivu, která je založena na principu, že kalibrační pole je vyfoceno komorou s dírkovým objektivem, který vytváří obraz teoreticky bez zkreslení a následně komorou s objektivem určeným ke kalibraci.

A flexible new technique for camera calibration, [10] Publikace zabývající se jednoduchou kalibrací fotografických komor pomocí dvojrozměrného kalibračního pole.

Kalibrace digitálních fotoaparátů, [11] Tato publikace se zabývá přehledem kalibračních technik a následnou kalibrací v softwaru *PhotoModeler*.

3 Prvky vnitřní orientace

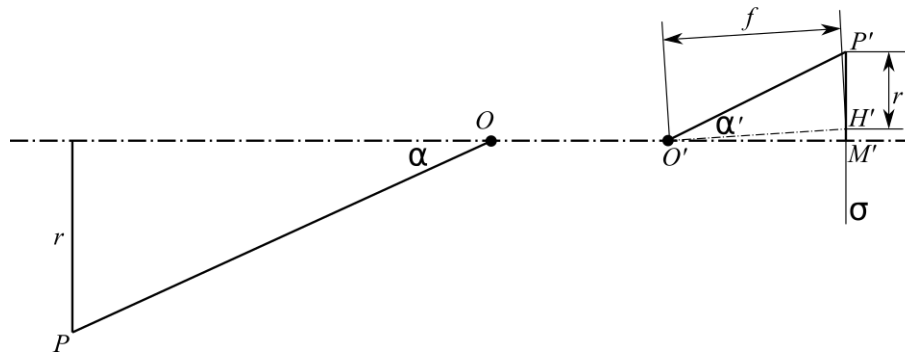
Pro použití fotografických snímků ve fotogrametrii musí být známy geometrické vztahy zobrazení tzv. prvky vnitřní orientace. Jelikož současné fotoaparáty využívají pro zobrazení objektivu se soustavou čoček či zrcadel, nejedná se o ideální středové promítání a v obrazu dochází k výrazným zkreslením, která ovlivňují přesnost výstupu. Za předpokladu, že by fotoaparát vytvářel obraz ideálním středovým promítáním, to znamená, že předmětový a obrazový úhel je si roven, tedy $\alpha = \alpha'$, stačilo by nám znát pouze konstantu komory f pro matematický popis zobrazení. Jelikož ale ideálního středového promítání u fotoaparátů nedosáhneme, snad s výjimkou použití dírkového objektivu, a to pouze za předpokladu dostatečně malého otvoru a zanedbání ohybu světla. Dírkový objektiv je ovšem v praxi téměř nepoužitelný kvůli velmi malé světelnosti oproti běžně používaným objektivům. Z tohoto důvodu nám pro vyjádření geometrického vztahu mezi obrazem a originálem nestačí znát pouze konstantu komory f , musíme znát všechny prvky vnitřní orientace fotografické komory, ke kterým se ještě řadí poloha hlavního snímkového bodu H' a znalost průběhu distorze. [7]



Obrázek 3.1: ideální středové promítání [vlastní tvorba]

3.1 Konstanta komory

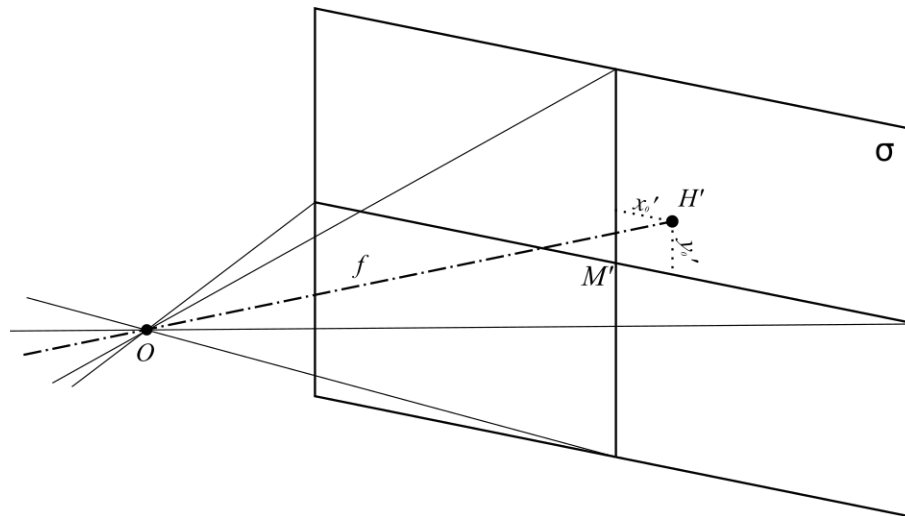
Konstanta komory f , je vzdálenost středu výstupní pupily O' od hlavního snímkového bodu H' . Často je tato hodnota zaměňována za ohniskovou vzdálenost, jelikož tyto dvě hodnoty jsou si velmi blízké. Střed vstupní pupily O a střed výstupní pupily O' jsou definovány jako projekční centra předmětových paprsků. [7]



Obrázek 3.2: promítání skutečným objektivem [vlastní tvorba]

3.2 Hlavní snímkový bod

Hlavní snímkový bod leží v obraze tam, kde se protíná obrazová rovina s přímkou procházející objektivem skrze vstupní a výstupní pupilu. Jelikož konstrukce, zvláště pak neměřických komor, není přesná, hlavní snímkový bod H' se odchyluje od středu snímku M' . Poloha hlavního snímkového bodu se udává souřadnicemi od středu snímku M' . Souřadnice se nejčastěji označují jako $[x'_0, y'_0]$. [7]



Obrázek 3.3: posun hlavního snímkového bodu [vlastní tvorba]

3.3 Distorze

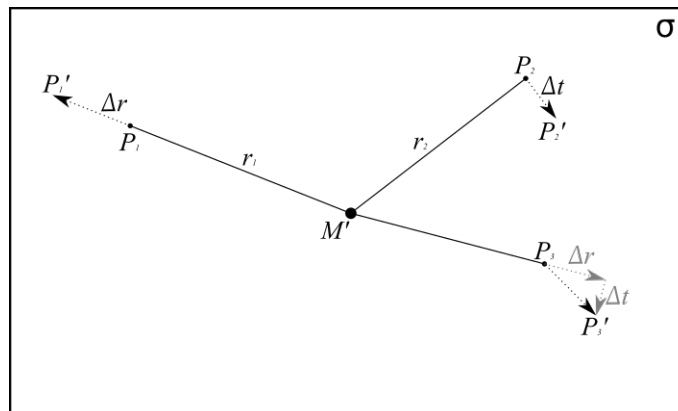
Vliv distorze je velmi významný zvláště u použití širokoúhlých kamer, takovéto snímky by byly nevyhovující svou přesností pro fotogrammetrické zpracování, proto je nutné ji eliminovat. Distorze se rozděluje do dvou základních složek a těmi jsou radiální a tangenciální distorze. [12] [2]

3.3.1 Radiální distorze

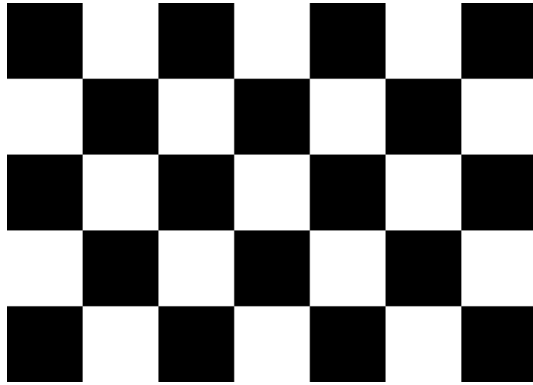
Zpravidla nejvýznamnější složkou geometrického zkreslení bývá právě radiální distorze. Jedná se o posun bodu se vzdáleností r od středu snímku, tzv. radiální vzdáleností, o hodnotu Δr . Její průběh nebývá rotačně symetrický, přesto pro výpočty symetričnost předpokládáme. Hodnota Δr může nabývat v průběhu celého snímku záporných, nebo kladných hodnot. Podle průběhu radiální distorze se může jednat o zkreslení soudkové, poduškové, nebo snímek může být tvořen kombinací těchto dvou zkreslení. [7]

3.3.2 Tangenciální distorze

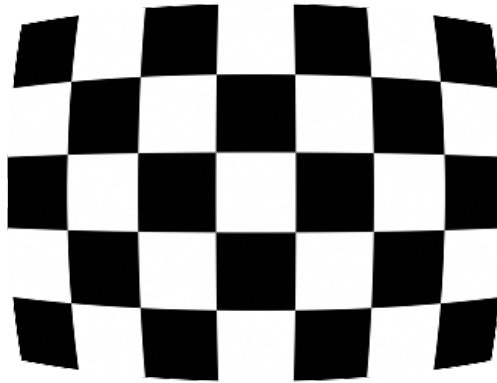
Druhým typem distorze je tangenciální distorze, která působí kolmo na směr radiální distorze. Je způsobena nepřesným usazením čoček v objektivu a zpravidla nabývá velmi malých hodnot oproti radiální distorzi. [7]



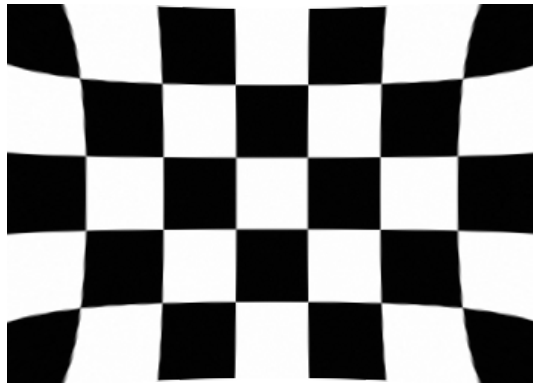
Obrázek 3.4: radiální a tangenciální distorze na snímku [vlastní tvorba]



Obrázek 3.5: rastr - bez zkreslení [vlastní tvorba]



Obrázek 3.6: rastr - soudkové zkreslení [vlastní tvorba]



Obrázek 3.7: rastr - poduškové zkreslení [vlastní tvorba]

4 Kalibrace kamery

Aby bylo možné opravit snímky o geometrické zkreslení, je nejprve nutné zjistit pro opravovanou kameru jaký má průběh distorze, souřadnice hlavního snímkového bodu a rozměry čipu. Tyto parametry získáme kalibrací, kterou lze provést více způsoby. V této kapitole si tedy přiblížíme jaké jsou možnosti

4.1 Matematické modely distorze

Jelikož v dnešní době se fotogrammetrické snímky zpracovávají převážně na počítači, je nutné průběh distorze analyticky popsat. V praxi se většinou postupuje tak, že máme kalibrační pole, které obsahuje snadno identifikovatelné body o známých souřadnicích. V domácích podmínkách bývá toto pole většinou dvojrozměrné, buďto vytisknuté na papíru nebo zobrazené na displeji počítače, v laboratořích se používají pole trojrozměrná, což je náročnější na konstrukci a údržbu, zato přinášejí lepší výsledky kalibrace.

Po nasnímání kalibračního pole získáme dvojí souřadnice, souřadnice kalibračního pole, které jsou dány konstrukcí kalibračního pole a souřadnice snímkové. Transformací těchto souřadnic, jsou zjištěny odchylky, které jsou přisouzeny právě vlivu distorze. Množinou odchylek proložíme funkci, která je nejlépe popisuje. Pro tento účel se nejčastěji používají polynomické funkce.

4.1.1 Brownův distorzní model

Jako první je uveden distorzní model podle Duane C. Browna. Jedná se o jeden z nejnámějších a nejpoužívanějších distorzních modelů ve fotogrammetrických softwarech [9]. Například je použit ve volně dostupném softwaru *Lens* od společnosti *Agisoft*, nebo v softwaru *PhotoModeler*. Tento distorzní model popisuje korekci distorze rovnicemi:

$$x' = x + r_x \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) + \left[p_1 \left(r^2 + 2r_x^2 \right) + 2p_2 r_x r_y \right] \cdot \left[1 + p_3 r^2 + \dots \right] \quad (4.1)$$

$$y' = y + r_y \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) + \left[p_1 \left(r^2 + 2r_y^2 \right) + 2p_2 r_x r_y \right] \cdot \left[1 + p_3 r^2 + \dots \right] \quad (4.2)$$

kde

$$r = \left[\left(x - x_c \right)^2 + \left(y - y_c \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$r_x = x - x_c \quad (4.4)$$

$$r_y = y - y_c \quad (4.5)$$

Hodnoty (x', y') jsou opravené snímkové souřadnice, hodnoty (x, y) jsou souřadnice ovlivněné zkreslením. Radiální vzdálenost hlavního snímkového bodu je vyjádřena hodnotou r , která má dvě složky (x_c, y_c) , což jsou souřadnice hlavního snímkového bodu od středu snímku.

Pro tento model se nejčastěji využívají tři koeficienty pro radiální distorzi, tedy (k_1, k_2, k_3) , které jsou v některých případech číslovány od nuly, tedy (k_0, k_1, k_2) . Pro tangenciální distorzi se nejčastěji využívají dva koeficienty (p_1, p_2) , také mohou být s indexy od nuly (p_0, p_1) . Celkem tedy nejčastější podoba tohoto modelu obsahuje sedm neznámých $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, x_c, y_c)$. [6] [8] [9]

4.1.2 PanoTools distorzní model

Též velmi často používaný model, který ve většině případů využívají programy určené pro zpracování fotografií pro nefotogrammetrické účely. Velkou výhodou tohoto modelu je existence obsáhlé databáze parametrů pro konkrétní objektivy. Tedy pokud fotografie nemáme v plánu využívat pro fotogrammetrické účely, přináší tento model jednoduchou cestu k redukci distorze. Parametry pro jednotlivé objektivy lze najít v online databázích, jako je například *Lensfun* [3]. Průběh distorze je vyjádřen tímto vztahem.

$$R_U = a \cdot R_D^4 + b \cdot R_D^3 + c \cdot R_D^2 + (1 - a - b - c) \cdot R_D \quad (4.6)$$

V této rovnici R_U vyjadřuje vzdálenost daného bodu od středu kalibrovaného snímku, R_D vyjadřuje vzdálenost od středu snímků se zkreslením, koeficienty distorze jsou označeny jako (a, b, c) . [4] [9]

4.2 Způsoby kalibrace

Abychom mohli aplikovat distorzní modely na konkrétní snímky, musíme nejprve vypočítat prvky vnitřní orientace pro danou komoru. Máme více možností jak zjistit prvky vnitřní orientace, od jednoduchých, které můžeme provést v domácím prostředí až po způsoby, ke kterým je zapotřebí speciálního laboratorního vybavení.

4.2.1 Kalibrace pomocí testovacího pole

Způsob spočívá v tom, že kalibrační pole, ať už dvojrozměrné či trojrozměrné, je snímáno z více stanovisek a jsou známy buďto souřadnice signalizovaných bodů testovacího pole nebo jsou známy vzdálenosti mezi několika body testovacího pole. Testovací pole může být zhotoveno různými způsoby. Například zobrazené na monitoru počítače, vytištěné na papíře či testovací pole může tvořit fasáda budovy. Tento způsob kalibrace komory můžeme bez obtíží provést v domácích podmínkách v softwarech jako je například *Agisoft Lens* či *Photomodeler*. [11] [10]

4.2.2 Laboratorní kalibrace

Jak název napovídá, tento způsob kalibrace je velmi náročný na vybavení, zato přináší značně lepší výsledky oproti kalibraci za pomoci testovacího pole. Tento postup má ovšem smysl provádět pouze u měřických komor. Prvky vnitřní orientace jsou určovány za pomoci goniometru nebo kolimátoru, jimiž je zjišťován směr nebo úhel paprsků procházející objektivem komory. [11]

4.2.3 Simultánní kalibrace

Tento způsob spočívá ve snímání požadovaného objektu zároveň s kalibračním polem. Výhodou této metody je, že provádíme kalibraci v čase snímání objektu. Nemůže tedy dojít ke změně prvků vnitřní orientace přeastřením nebo mechanickými změnami kamery. [11]

5 Tvorba softwaru

Tato kapitola se zabývá postupem jak byl software *DistortionRemover* vytvořen. Program byl napsán v jazyce C++ za pomoci programu QT Creator, kterého je součástí i QT designer, a jeho knihoven, které velmi usnadnily a urychlily postup.

5.1 Aplikační rámec Qt



Obrázek 5.1: Logo *Qt Development Frameworks* [www.qt.io]

Qt je široce využívaný framework pro tvorbu softwaru s grafickým uživatelským rozhraním, který je určen pro různé softwarové a hardwarové platformy. Framework obsahuje velké množství knihoven, především pro jazyk C++, ale existuje i pro mnoho jiných jazyků jako je Java, C#, Python atd. *Qt* toolkit byl vytvořen firmou *Trolltech* v roce 1999, v roce 2008 firmu koupila *Nokia*, která následně přejmenovala firmu *Trolltech* na *Qt Software*. V současné době nese společnost jméno *Qt Development Frameworks*.

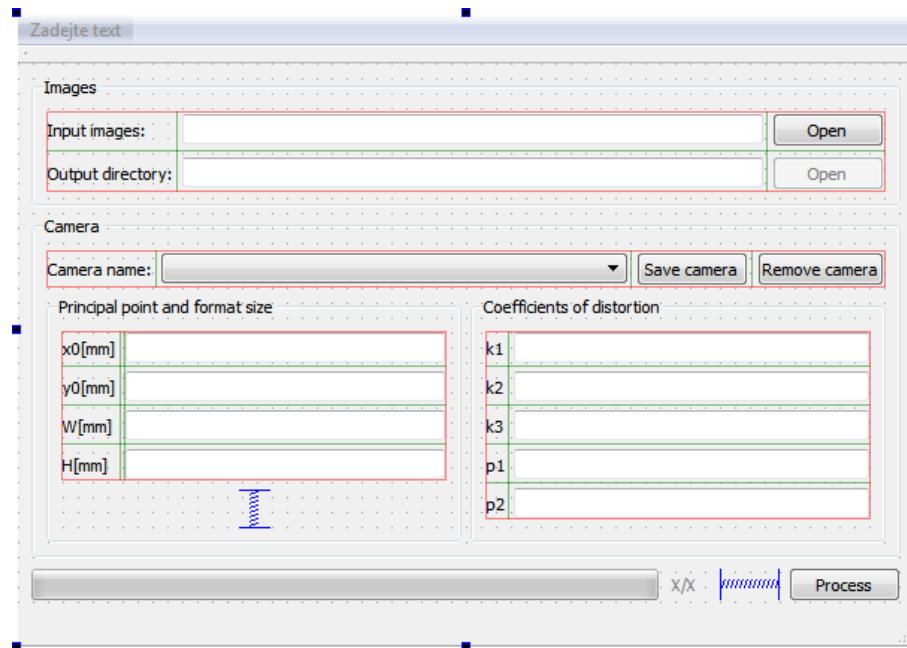
5.2 Tvorba GUI

Grafické uživatelské rozhraní, anglickou zkratkou nazývané jako *GUI* (*Graphical User Interface*), bylo navrženo v softwaru *Qt Creator* nástrojem *UI Designer*. *UI Designer* umožňuje velice snadnou práci při tvorbě grafického uživatelského rozhraní.

Okno aplikace bylo rozděleno do dvou hlavních částí. První část s názvem *Images* seskupuje prvky pro výběr vstupních souborů a výstupní složky. Druhá část s názvem *Camera* obsahuje prvky pro správu kamery a jejích parametrů. Pod těmito

dvěma celky se ještě nachází indikátor průběhu výpočtu *progress bar*, který je uživateli zobrazen pouze když je prováděna oprava snímků a tlačítko *Process*, které zahájí opravu snímků. [1]

Celé uživatelské grafické rozhraní bylo navrhováno tak, aby bylo uživatelsky přívětivé a neobsahovalo zbytečně moc ovládacích prvků.



Obrázek 5.2: GUI v UI Designer [vlastní tvorba]

5.3 Třída *distortionremover*

Třída *distortionremover* je hlavní třídou, která se stará o správný chod grafického uživatelského rozhraní.

5.4 Třída *picturetransformation*

Tato třída obsahuje výpočetní algoritmus pro opravu snímků a funkce, které pracují se souborem, kde jsou uloženy parametry kamer. Pro práci s obrazovými daty je použita třída z knihovny *Qt QImage* a třída *QImageReader*.

Oprava obrázku probíhá tak, že pro každý pixel opraveného snímku jsou vypočteny souřadnice pixelu ve snímku zatíženém zkreslením a je zjištěna jeho barevná hodnota. Základem pro opravu snímků je Brownův distorzní model.

5.4.1 Postup opravy snímků

Oprava obrázku probíhá tak, že pro každý pixel opraveného snímku jsou vypočteny souřadnice pixelu ve snímku zatíženém zkreslením a je zjištěna jeho barevná hodnota. Základem pro opravu snímků jsou rovnice Brownova distorzního modelu.

Máme tedy pixel v opraveném snímku o souřadnicích (x', y') a hledáme k němu příslušný pixel ze zkresleného snímku o souřadnicích (x, y) . Nejprve je nutné vypočítat radiální vzdálenost r pixelu ve snímku dle následující rovnice:

$$r = \left(r_x^2 + r_y^2 \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

$$r_x = x - x_0 \quad (5.2)$$

$$r_y = y - y_0 \quad (5.3)$$

Hodnoty r_x a r_y jsou složky radiální distorze, x_0 a y_0 jsou souřadnice hlavního snímkového bodu, které získáme při kalibraci. Stejně jako parametry (k_1, k_2, k_3) a (p_1, p_2) . Pro opravu distorze se často pro zpřehlednění používá rozčlenění oprav na opravu vlivem radiální a opravu vlivem tangenciální distorze. Tedy:

$$x = x' - \Delta r_x - \Delta t_x \quad (5.4)$$

$$y = y' - \Delta r_y - \Delta t_y \quad (5.5)$$

Kde Δr_x a Δr_y jsou opravy z radiální distorze, Δt_x a Δt_y opravy z tangenciální distorze.

Oprava z radiální distorze je vyjádřena:

$$\Delta r_x = r_x \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \quad (5.6)$$

$$\Delta r_y = r_y \left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \quad (5.7)$$

Oprava z tangenciální distorze je vyjádřena:

$$\Delta t_x = p_1 \left(r^2 + 2r_x^2 \right) + 2p_2 r_x r_y \quad (5.8)$$

$$\Delta t_y = p_2 \left(r^2 + 2r_y^2 \right) + 2p_1 r_x r_y \quad (5.9)$$

Jelikož do výpočtu hodnoty r_x a r_y vstupují neznámé souřadnice x a y , je nutné při výpočtu postupovat iterativně. V počátku při výpočtu hodnot r_x a r_y nahradíme hodnoty x a y hodnotami x' a y' , vypočteme souřadnice x a y , které opět použijeme pro výpočet r_x a r_y . Takto postupujeme dokud se po sobě vypočtené souřadnice od sebe liší o větší hodnotu, než je námi požadovaná tolerance. Typicky lze zvolit hodnotu tolerance 0,05 pixelu. Tuto hodnotu ovšem musíme podle velikosti čipu přepočítat na milimetry. [6] [8] [10]

5.5 Sestavení spustitelného programu

Program byl sestaven kompilátorem *MinGW* jako 32 bitová aplikace s příponou **.exe*. Aplikace využívá různé dynamické knihovny, které je nutné aplikaci poskytnout. Nejjednodušší cesta jak tyto knihovny získat je přes nástroj *textitwindeployqt.exe*, který je součástí instalace **Qt Creator**. Ve složce s *DistortionRemover.exe* spustíme tento nástroj s parametry (*-quick .*) a knihovny nám budou přidány do složky. [1]

```

Qt 5.8 for Desktop (MinGW 5.3.0 32 bit)
Setting up environment for Qt usage...
C:\Qt\Qt5.8.0\5.8\mingw53_32> D:
D:\> cd D:\Dokumenty\CUUT\Bakalarka\program\build-DistortionRemover-Desktop_Qt_5_8_0_MinGW_32bit-Uydání\release
D:\Dokumenty\CUUT\Bakalarka\program\build-DistortionRemover-Desktop_Qt_5_8_0_MinGW_32bit-Uydání\release>windeployqt.exe --quick .
    
```

Obrázek 5.3: Přidání dynamických knihoven *Qt* [vlastní tvorba]

6 Logika a práce s programem



Obrázek 6.1: Ikona programu *DistortionRemover* [vlastní tvorba]

Tato kapitola popisuje práci s programem v prostředí *Windows* a měla by uživateli osvětlit, jak program ve skutečnosti funguje.

6.1 Spuštění programu

Program se spouští spustitelným souborem s názvem *Distortionremover.exe*. Ke správnému chodu je nutné, aby v počítači byly potřebné knihovny. Tyto knihovny nejsou součástí přílohy, jelikož jejich velikost je okolo 1GB a lze je jednoduše vygenerovat nástrojem *windployqt.exe*, jak je popsáno v předchozí kapitole. Po spuštění *DistortionRemover.exe* program prohledá složku, ve které se nachází spustitelný soubor, zda se v ní nachází soubor *cameras_parameters.ini*. Soubory s příponou **.ini* jsou využívány pro ukládání nastavení programů, v tomto případě byl soubor využit pro ukládání parametrů kamery. Jedná se o textový soubor s jednoduchou strukturou, který je popřípadě možné editovat v jakémkoliv textovém editoru. Pokud se soubor s parametry kamer ve složce nachází, program načte uložené parametry kamery. Pokud tomu tak není, program vytvoří nový prázdný soubor *cameras_parameters.ini*.

Název	Přípona	Velikost
[..]	<DIR>	
[iconengines]	<DIR>	
[imageformats]	<DIR>	
[platforminputcontexts]	<DIR>	
[platforms]	<DIR>	
[qmltooling]	<DIR>	
[translations]	<DIR>	
Qt5Widgets	dll	6 350 848
Qt5Svg	dll	349 696
Qt5Quick	dll	4 039 168
Qt5Qml	dll	4 058 112
Qt5Network	dll	1 749 504
Qt5Gui	dll	5 307 392
Qt5Core	dll	5 421 056
opengl32sw	dll	15 995 904
libwinpthread-1	dll	79 360
libstdc++-6	dll	1 540 622
libGLSV2	dll	2 801 664
libgcc_s_dw2-1	dll	120 334
libEGL	dll	22 016
DistortionRemover	exe	175 104
D3Dcompiler_47	dll	3 550 208
cameras_parametres	ini	205

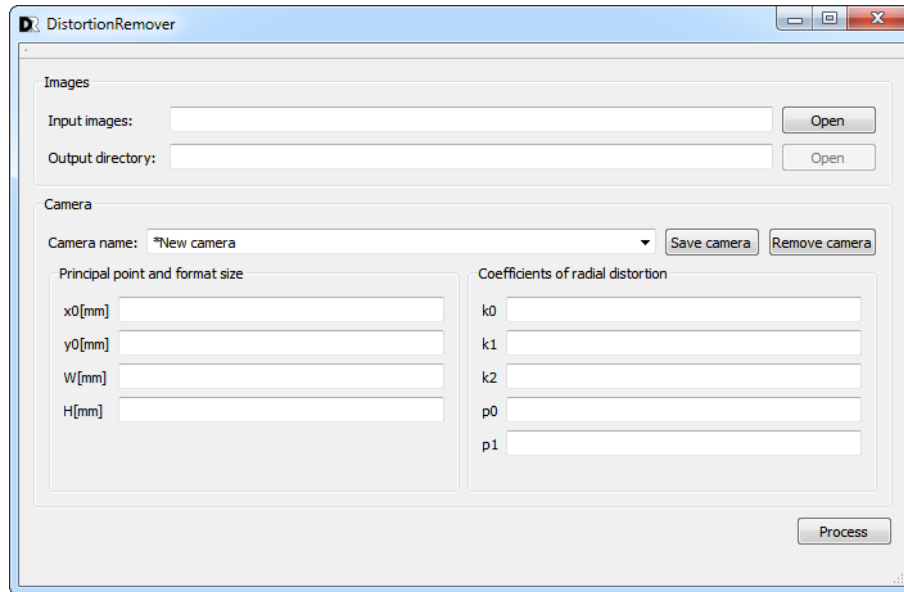
Obrázek 6.2: Obsah složky se spustitelným souborem [vlastní tvorba]

```

cameras_parametres.ini - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení nápověda
[Nikon%20D90%20%2B%20Sigma%2010-20mm%20f%7C3.5%20Ex%20DC%20HSM%20%5B10mm%5D]
x0=-0.263
y0=-0.142
W=23.790516
H=15.8
k0=0.0001162
k1=-2.584e-6
k2=0
p0=-2.377e-5
p1=2.962e-6

[Panasonic%20DMC%20-%20LX100%20]
x0=-0.001
y0=0.104
W=16.3532
H=10.9306
k0=0.0002395
k1=-1.306e-6
k2=0
p0=2.933e-5
p1=-0.0001635
    
```

Obrázek 6.3: *cameras_parametres.ini* v poznámkovém bloku [vlastní tvorba]



Obrázek 6.4: *DistortionRemover* po spuštění [vlastní tvorba]

6.2 Vstup a výstup

Po spuštění programu můžeme vybrat vstupní soubory. Práci se soubory zajišťují ovládací prvky ve vrchní části okna, které jsou seskupeny pod názvem *Images*. Dialogové okno pro výběr vstupních souborů zobrazíme kliknutím na tlačítko *Open* v řádku *Input images*, ve kterém vybereme vstupní soubory s příponami **.bmp*, **.jpg*, **.jpeg* nebo **.png*. Pokud úspěšně vybereme vstupní obrázky, tlačítko *Open* v řádku *Output directory* se stane aktivním a můžeme vybrat složku, do které chceme opravené soubory uložit. Ve vybrané složce se vždy vytvoří podsložka *DistortionRemover*, do které se uloží opravené snímky pod stejným názvem. Pokud výstupní složku nebudeme vybírat, soubory se uloží do podsložky *DistortionRemover*. Jestliže tato složka již existuje a obsahuje soubory se stejným jménem, program soubory bez varování přepíše.

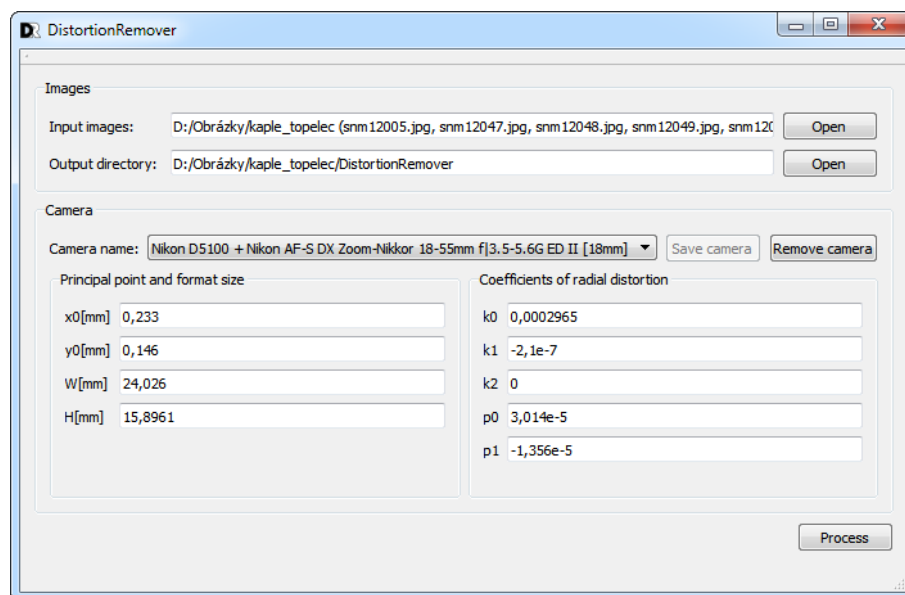
6.3 Práce s parametry kamery

V dolní části *GUI* se nachází oblast s názvem *Camera*. Obsahuje rozbalovací seznam pro výběr kamery, dvě tlačítka pro uložení a odstranění kamery a dvě oblasti s parametry. Po kliknutí na rozbalovací seznam se nám zobrazí názvy kamer, které jsou uloženy v souboru *cameras_parametres.ini*. Po vybrání kamery se nám zobrazí příslušné parametry vybrané kamery, které můžeme editovat a tlačítkem *Save*

camera uložit zpět do souboru s parametry kamer nebo kameru odstranit tlačítkem *Remove camera*. Pro přidání nové kamery v rozbalovacím menu vybereme položku **New camera*, která je přepisovatelná. Vyplníme názvem kamery, který nesmí obsahovat znaky "/" a "*". Poté vyplníme příslušné parametry kamery a kameru tlačítkem *Save camera* uložíme.

6.4 Oprava snímků

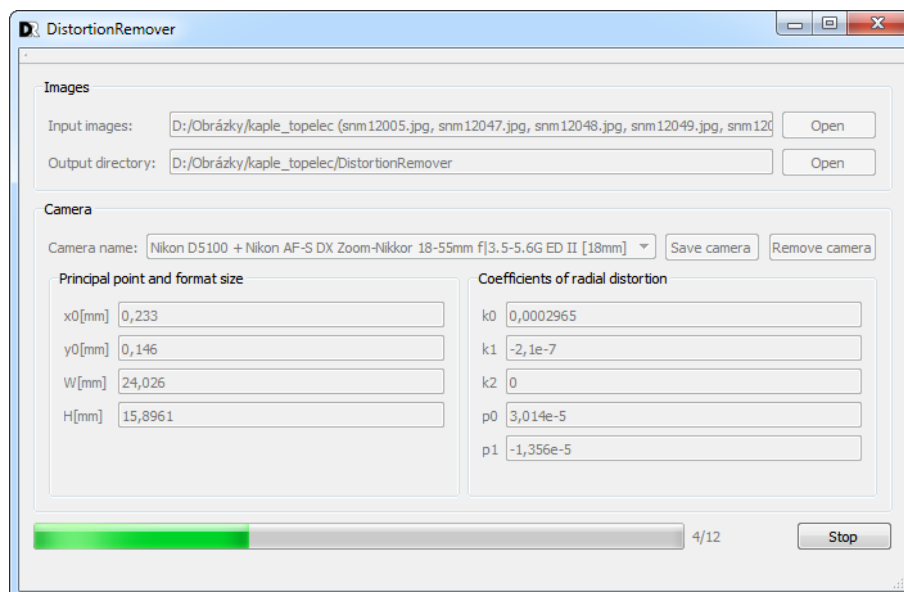
Pokud máme vybrány vstupní soubory, výstupní složku a kameru s parametry můžeme zahájit opravu snímků, kterou spustíme kliknutím na tlačítko *Process*. Po zahájení opravy snímků se v dolní části *GUI* zobrazí ukazatel průběhu, který zobrazuje kolik snímků bylo již opraveno z celkového počtu. Uživatel má možnost výpočet přerušit kliknutím na tlačítko *Stop*, které v průběhu opravy nahrazuje tlačítko *Process*.



Obrázek 6.5: *DistortionRemover* připraven k opravě snímků [vlastní tvorba]

6.5 Použití softwaru na reálných datech

Pro testování programu na reálných datech byla využita databáze památek ČR *PhotoPa*, která obsahuje fotodokumentaci památkových objektů. Projekt vznikl na fakultě stavební ČVUT v Praze a v současné době obsahuje přes 900 zdokumentovaných objektů. Do databáze přispívají především studenti ČVUT v Praze v rámci semestrálních prací, do databáze mohou však přispět i jiní uživatelé. Pro testování



Obrázek 6.6: *DistortionRemover* v průběhu opravy [vlastní tvorba]

byl vybrán objekt s názvem *Kaplička v Topělci* v Píseckém okrese, s ID objektu: *P-1181*. Jedná se o kapličku v barokním slohu vystavěnou roku 1904 a zasvěcenou sv. Janovi Nepomuckému a sv. Andělům Strážným. Pro testování byla zvolena tato databáze, jelikož u převážné části objektů obsahuje krom fotodokumentace také kalibrační protokoly použitých kamer. [5]

6.5.1 Použitá kamera

Vybraný objekt byl dokumentován fotoaparátem *Nikon D5100* s objektivem *Nikon AF-S DX Zoom-NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G ED II*. Jelikož objektiv má proměnlivou ohniskovou vzdálenost, pro dokumentaci byla použita dorazová poloha objektivu, která má udávanou ohniskovou vzdálenost 18mm. V dnešní době se cena tohoto kompletu pohybuje okolo 15 tisíc korun českých. [5]

6.5.2 Prvky vnitřní orientace kamery

Z kalibračního protokolu, který je dostupný u dokumentace tohoto objektu, byly vybrány potřebné parametry. Jedná se o hodnoty *posun hlavního bodu* v milimetrech, tedy $x_0 = 0,233$, $y_0 = 0,146$, rozměry čipu, tedy šířka $W = 24,0260$ a výška $H = 15,8961$ a koeficienty průběhu radiální a tangenciální distorze, u těchto parametrů si musíme dát pozor, jelikož kalibrační protokol z programu *PhotoModeler* uvádí koeficienty K_1 , K_2 , P_1 a P_2 . Program *DistortionRemover* ovšem má



Obrázek 6.7: Objektiv *Nikon AF-S DX Zoom-NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G ED II* [www.bhphotovideo.com]



Obrázek 6.8: Tělo fotoaparátu *Nikon D5100* [www.shoptul.com]

tyto koeficienty pojmenované posunutě oproti protokolu, tedy k_0 z programu *DistortionRemover* odpovídá v kalibračním protokolu hodnotě v políčku K_1 , stejně tak pro parametry tangenciální distorze. Protokol obsahuje pouze 2 parametry průběhu radiální distorze, proto necháme pole k_2 v *DistortionRemover* na hodnotě 0. Tedy $k_0 = 0,00029650$, $k_1 = -0,00000021$, $k_2 = 0$, $p_0 = -0,00003014$, $p_1 = -0,00001356$. [5]

6.5.3 Oprava snímků

Podle, v této kapitole, popsaného postupu pro opravu snímků, můžeme opravit snímky kaple. Pro ukázkou byl zvolen snímek průčelí kaple. Obdobně by se postupovalo u všech snímků. Na neopraveném snímku v okrajových částech kaple si můžeme

všimnout prohnutí zdí, které je způsobeno vlivem radiální distorze. Na opraveném snímku již toto prohnutí není. Jelikož je zeď prohnutá ven můžeme odhadnout, že se jedná o komoru se soudkovým zkreslením.

6.5.4 Další možnosti zpracování

Takto opravené snímky můžeme dále používat pro fotogrammetrické zpracování v různých softwarech. Ze snímků je poté možné vytvořit 3D model průsekovu fotogrammetrií, nebo například můžeme průčelí kaple kolineárně transformovat podle minimálně 4 vlíčovacích bodů a vytvořit tak fotoplán. [7]

P1. Protokol o kalibraci digitální kamery									
kamera - typ		Nikon D5100							
objektiv - typ		Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G ED II							
konstanta komory (mm)		18							
kalibrační pole		PhotoModeler rovinné - 144 bodů, formát A1							
konfigurace		PhotoModeler - 12 snímků							
pozn.:									
kalibrační provedli dne		Ladislav Ritschel, Jan Myslivec 6. prosince 2017							
PhotoModeler - výsledky									
f /mm/	18,7239	velikost čipu /palce/	APS-C						
W /mm/	24,0260	Crop faktor	1,50						
H /mm/	15,8961	f ekvivaletní KF /mm/	28,1						
pp x /mm/	12,2463	posun hlavního bod	0,233	47,9					
pp y /mm/	7,8018		0,146	30,0					
K1	0,00029650	úhel záběru	/mm/	/pixely/					
K2	-0,00000021	horizontální /stupně/	65	v uhlopříčce /stupně/	75				
K3	0,00000000	vertikální /stupně/	46						
P1	-0,00003014			W /pixely/	4928	poměr čipu (W : H)			
P2	-0,00001356	velikost pixelu /mm/	0,00488	H /pixely/	3264	1,51	1,51		
						z pixelů	z vyrovnání		
r max /mm/	14,404								
r /mm/	dr /μm/	drb /μm/	drb max	756	155,1				
0	0,00	0,0							
0,5	0,07	0,0							
1	0,30	0,3							
1,5	0,67	1,0							
2	1,18	2,4							
2,5	1,84	4,6							
3	2,65	8,0							
3,5	3,60	12,6							
4	4,69	18,8							
4,5	5,92	26,6							
5	7,28	36,4							
5,5	8,78	48,3							
6	10,40	62,4							
6,5	12,15	79,0							
7	14,03	98,2							
7,5	16,01	120,1							
8	18,12	144,9							
9	22,64	203,8							
10	27,55	275,5							
11	32,81	360,9							
12	38,35	460,2							
13	44,12	573,6							
14	50,06	700,8							
14,404	52,49	756,1							

Graf - průběh radiální distorze objektivu v diagonále

r (mm)	drb (μm)
0	0
0.5	0.07
1	0.30
1.5	0.67
2	1.18
2.5	1.84
3	2.65
3.5	3.60
4	4.69
4.5	5.92
5	7.28
5.5	8.78
6	10.40
6.5	12.15
7	14.03
7.5	16.01
8	18.12
9	22.64
10	27.55
11	32.81
12	38.35
13	44.12
14	50.06
14.404	52.49

str. 1

Obrázek 6.9: Kalibrační protokol ze softwaru *PhotoModeler* [5]



Obrázek 6.10: Porovnání původního snímku (*vlevo*) [5] a opraveného (*vpravo*) [vlastní tvorba]

7 Závěr

V této práci byla zpracována stručná rešerše literatury, zabývající se metodami odstranění zkreslení z fotografických snímků. Vybrané metody odstranění zkreslení jsou dále v práci popsány. Jako nejvhodnější způsob se jevilo odstranění zkreslení za pomoci *Brownova* distorzního modelu, který je v obdobných softwarech často používán.

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit softwarové řešení tohoto problému, které bude mít moderní grafické rozhraní. Pro tvorbu softwaru byl zvolen programovací jazyk *C++* s využitím knihoven *Qt*. Tento nástroj usnadnil tvorbu grafického rozhraní, které je zkoncipováno tak, aby mohl uživatel intuitivně program ovládat a nebylo zapotřebí podrobnější znalosti softwaru. Program byl sestaven pro platformu *Windows*, jelikož je však jazyk *C++* s knihovnamí *Qt* určen pro různé platformy, nic nebrání tento program sestavit i pro *Linux* či *macOS*, což tento software dělá použitelnější pro větší okruh lidí. Dalším vylepšením vytvořeného programu *DistortionRemover* by do budoucna mohlo být obohacení o výpočet parametrů prvků vnitřní orientace kamery, které v současné době musí uživatel získat z jiného softwaru, či jiného zdroje. Velkým zlepšením by mohlo také být práce s obrazovými daty typu RAW, zamezilo by se tak velkým ztrátám kvality při opravě snímku. Samozřejmostí je opravení chyb, v programu, které budou odhaleny rozsáhlejším používáním.

Ve finální části, je předvedena práce s programem na příkladu historického stavebního objektu z databáze PhotoPa a jsou nastíněny další možné postupy zpracování.

Seznam obrázků

3.1	ideální středové promítání [vlastní tvorba]	11
3.2	promítání skutečným objektivem [vlastní tvorba]	12
3.3	posun hlavního snímkového bodu [vlastní tvorba]	12
3.4	radiální a tangenciální distorze na snímku [vlastní tvorba]	13
3.5	rastr - bez zkreslení [vlastní tvorba]	14
3.6	rastr - soudkové zkreslení [vlastní tvorba]	14
3.7	rastr - poduškové zkreslení [vlastní tvorba]	14
5.1	Logo <i>Qt Development Frameworks</i> [www.qt.io]	18
5.2	GUI v UI Designer [vlastní tvorba]	19
5.3	Přidání dynamických knihoven <i>Qt</i> [vlastní tvorba]	21
6.1	Ikona programu <i>DistortionRemover</i> [vlastní tvorba]	22
6.2	Obsah složky se spustitelným souborem [vlastní tvorba]	23
6.3	<i>cameras_params.ini</i> v poznámkovém bloku [vlastní tvorba]	23
6.4	<i>DistortionRemover</i> po spuštění [vlastní tvorba]	24
6.5	<i>DistortionRemover</i> připraven k opravě snímků [vlastní tvorba]	25
6.6	<i>DistortionRemover</i> v průběhu opravy [vlastní tvorba]	26
6.7	Objektiv <i>Nikon AF-S DX Zoom-NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G ED II</i> [www.bhphotovideo.com]	27
6.8	Tělo fotoaparátu <i>Nikon D5100</i> [www.shoptul.com]	27
6.9	Kalibrační protokolze softwaru <i>PhotoModeler</i> [5]	29
6.10	Porovnání původního snímku (<i>vlevo</i>) [5] a opraveného (<i>vpravo</i>) [vlastní tvorba]	30

Literatura

- [1] Qt Documentation. Dostupné z: <http://doc.qt.io>.
- [2] Lens distortion correction on post-processing. Dostupné z: <http://cameratico.com/articles/lens-distortion-correction-on-post-processing/>.
- [3] Lensfun. Dostupné z: <http://lensfun.sourceforge.net>.
- [4] Lens correction model - PanoTools Wiki. Dostupné z: https://wiki.panotools.org/Lens_correction_model.
- [5] PhotoPa. Dostupné z: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/photopa/>.
- [6] BROWN, Duane C. Close-range camera calibration. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*. 1971, 37, č. 8, s. 855–866.
- [7] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01863-6.
- [8] PAVELKA, Karel a ŠTRONER, Martin. Jednoduché potlačení vlivu vad objektivu neměřických komor. *Stavební obzor*. 2005, 14, č. 1, s. 26 – 30. ISSN 1210-4027.
- [9] TRÖSTL, Martin. *Tvorba kvalitních fotoplánů v mezních případech*. Praha: Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2014.
- [10] ZHANG, Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2000, 22, č. 11, s. 1330–1334.
- [11] *Kalibrace digitálních fotoaparátů* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/download/m_PhotoModeler_kalibrace.pdf.
- [12] *Vady optických zobrazovacích prvků* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/03_vady_optickych_zobrazovacich_prvku.pdf.

- [13] ŘEZNÍČEK, Jan. *Method for measuring lens distortion*. Praha: Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2013.

A Elektornické přílohy

A.1 CD disk

`BP-DistortionRemover.pdf`

text bakalářské práce ve formátu *.pdf,

`DistortionRemover/`

adresář s programem,

`DistortionRemover.exe`

Spustitelný soubor aplikace,

`License.txt`

textový soubor s popisem licence,

`Source/`

adresář obsahující zdrojové kódy,

`DistortionRemover.pro`

projektový soubor,

`main.cpp`

zdrojový kód funkce main,

`distortionremover.h`

hlavičkový soubor distortionremover,

`distortionremover.cpp`

zdrojový soubor distortionremover obsahující funkce pro chod programu,

`ui_distortionremover.h`

hlavičkový soubor grafického rozhraní,

`distortionremover.ui`

soubor obsahující grafické prostředí v XML,

`picturetransformation.h`

hlavičkový soubor picturetransformation,

`picturetransformation.cpp`

zdrojový soubor picturetransformation obsahující výpočetní funkce,

`resource.qrc`

soubor pro uložení binárních souborů do aplikace který obsahuje ikonu,

DR.ico

ikona programu.