

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kalibrace kamery pro použití ve skenovací
profilometrii



Vypracoval:	Michal Skřipský
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	R100422 Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí bakalářská práce:	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D
Termín odevzdání práce:	červen 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Tomáše Rösslera, Ph.D a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 2. června 2014

.....
Michal Skřipský

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Michal Skřipský
Název práce	Kalibrace kamery pro použití ve skenovací profilometrii
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D
Rok obhajoby práce	2014
Abstrakt	Práce se zabývá obrazovou distorzí, což je nekontaktní optická metoda k měření vady čočky nazývané zkreslení. V první části se pracuji s teoretickým rozbořem metod. Hlavní část práce tvoří vypracování postupu pro měření zkreslení a aplikaci postupu. V závěru jsem zhodnotil výsledky za pomoci již existujícího podprogramu Calib.gui pracujícího pod programem MatLab, kde byla určena distorze v milimetrech a graficky znázorněna.
Klíčová slova	distorze , kalibrace, ...
Počet stran	34
Počet příloh	0
Jazyk	český

Bibliographical identification

Author's first name and surname	Michal Skřipský
Title	Camera calibration for using in scanning profilometry
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D
The year of presentation	2014
Abstract	This work deals with image distortion, which is a non-contact optical method for measuring the distortion lens defect. The first part focuses on theoretical analysis methods. The main part consists of the development of the distortion measurement process and its application. In the end, I evaluated the results based on the existing sub Calib.gui working under Matlab but only on regular square network.
Keywords	distortion, calibration, ...
Number of pages	34
Number of appendices	0
Language	czech

Obsah

1	Úvod	6
2	Laserová triangulace	7
3	Komponenty používané v laserových metodách	9
3.1	Bodové a lineární projektory	9
3.2	CCD kamera	10
4	Aberace	12
4.1	Sférická aberace	12
4.2	Koma	13
4.3	Astigmatismus	14
4.4	Zkreslení	16
5	Metody korekce zkreslení objektivů	17
5.1	Model kamery pin hole	17
5.2	Podprogram calib v prostředí matlabu	21
6	Experimentální část	26
6.1	Korekce obrazu pomocí intrinsických koeficientů	26
6.2	Experimentální výsledky	30
7	Závěr	34
	Seznam použité literatury	35

Kapitola 1

Úvod

Cílem mé bakalářské práce je pokusit se o korekce optických aberací spolu se získáváním a následovným využitím intrinsických i extrinsických parametrů objektivu pomocí metody laserové triangulace. Tato metoda patří mezi optické nekoherentní topografické metody a díky mohutnému technologickému rozvoji v oblasti mikrotechniky a materiálové fyziky nyní nachází široké uplatnění v nových oblastech použití.

V dnešní době se 3D metrologie, která se zabývá využitím 2D a 3D topografií zkoumaného předmětu, aplikuje zejména v oblastech, kde je zapotřebí vysoké přesnosti měření. Jedná se o nejrůznější průmyslová odvětví či zdravotnictví, kdy se optické metody měření používají například při kvalitativní kontrole výrobků přesného strojírenství či experimentálně při zjišťování opotřebení kloubních náhrad.

První část mé bakalářské práce je teoretická a zaměřuje se na základy samotné metody skenovací profilometrie, podává popis součástí experimentální sestavy a přibližuje limity přesnosti měření spolu s návrhem řešení korekcí vad objektivu. Ve druhé části se zabývám kalibrací sestavy se znalostí rozměrů měřeného předmětu a provádím ověření algoritmu pro tento předmět. V prostředí programu Matlab popisuji nástroj, který slouží ke korekci libovolného objektivu. Rovněž bych chtěl demonstrovat funkčnost celého systému pro zvolenou laserovou stopu.

Kapitola 2

Laserová triangulace

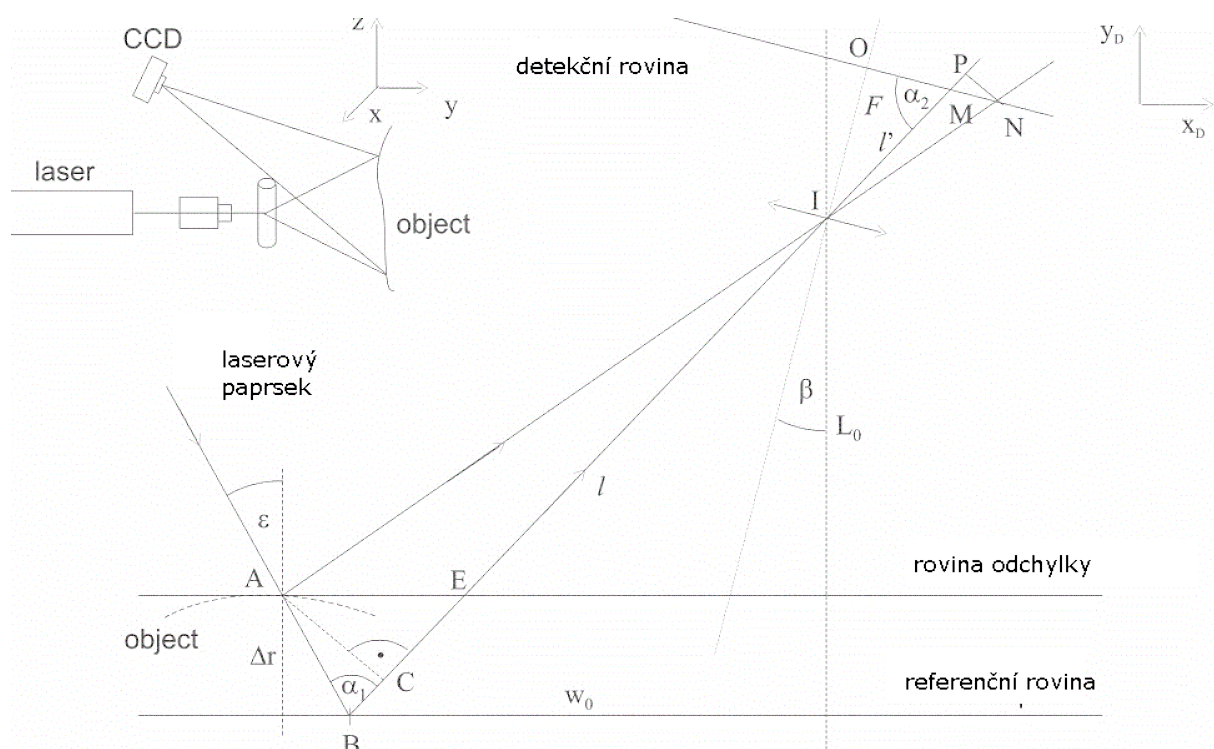
Nekoherentní optické metody jsou ty metody, u kterých se nevyužívá jevu interference. Použití koherentního světelného svazku paprsků jako je třeba laser, nemusí nutně znamenat, že se jedná o koherentní metodu.

Laserová triangulace je jednou z metod 3D profilometrie, častěji používaný název této metody je 3D skenovací profilometrie. Patří mezi tzv. nekoherentní optické metody. Soustava je tvořena projektorem a kamerou, kdy projektor bývá nejčastěji realizován pomocí laseru nebo laserové diody ve dvou možných módech pro stopu paprsku. Stopa paprsku může být buď bodová nebo lineární v závislosti na typu použitého laseru a požadavcích na výsledky měření (podrobněji viz. část 3.1). Pro další popis této metody použijí stopu lineární, neboť je pro zvolený experiment vhodnější z důvodů uvedených níže.

Princip této metody spočívá v tom, že projektor nanese danou lineární stopu na referenční rovinu, deformovaná stopa je dále zaznamenána pomocí kamery a následně převedena do počítače. Světelný zdroj, referenční rovina a kamera tvoří trojúhelník, jehož parametry, tzn. vzdálenost mezi kamerou a měřeným předmětem, stejně jako vzdálenost mezi měřeným předmětem a laserovou diodou a úhel mezi těmito dvěma úsečkami, jsou známy. Experimentální schéma sestavy je zobrazeno na následujícím obr. 2.1.

Různá schémata experimentálních sestav pro optické topografické metody se téměř neliší. V sestavě je vždy obsažen nějaký optický zdroj, detektor a měřený předmět. Pro kalibraci experimentální sestavy se využívá zdroj viditelného záření, tj. záření o vlnových délkách 380 nm-760 nm, a to z důvodu jednoduchého ovládání a možné vizuální kontroly. Jako detektor se nejčastěji používá CCD kamera nebo CMOS kamera a jako světelný zdroj slouží tzv. optická sonda, což je optická struktura dopadající na povrch měřeného objektu. Jednotlivé metody se od sebe liší typem této optické struktury a dále pak způsobem vyhodnocení její interakce s měřeným povrchem.

V našem případě bude světelným zdrojem červená laserová dioda s vlnovou délkou 635nm a výkonem 5 až 45 mW, detektorem bude monochromatická CCD kamera LU - 105 od firmy Lumenera. Tato kamera byla vybrána z důvodu dostačujících vlastností kamery a pro její okamžitou dostupnost, protože je součástí vybavení laboratoře.



Obr. 2.1: Schéma experimentální sestavy laserové triangulace.

Kapitola 3

Komponenty používané v laserových metodách

V posledním desetiletí se technické možnosti výzkumných a experimentálních center podstatně zlepšily díky významnému poklesu pořizovacích nákladů a možnostem materiálů u laserových diod, jež nahradily dříve používané laboratorní lasery. Nové diodové lasery třídy II jsou vysoce účinné, a proto nepotřebují speciální zdroj velkých rozměrů a umožňují snadnou manipulaci oproti svým předchůdcům.

V následující části jsou popsány základní typy možných optických struktur užívaných v optických 3D měřicích metodách.

3.1 Bodové a lineární projektory

Optické struktury aplikovatelné na zvolený experiment jsou pouze bodová a lineární. Obě metody jsou v naprosté většině realizovány laserem nebo laserovou diodou. Jednodušší z těchto dvou metod je první z nich, bodová. Užitím laserové diody při dostatečném výkonu a se znalostí průběhu intenzity paprsku dopadajícího na měřený předmět jsme schopni určit změnu intenzity při dopadu na referenční povrch. V ideálním případě se jedná o Gaussovský průběh, který umožňuje jednoduché určení středu souřadnic a následné vyhodnocování.

Nevýhodou této optické struktury je velice málo informací o daném povrchu a topografická výchylka pouze v jednom bodu námi zvoleného tělesa v daném bodě (x,y) . Z toho vyplývá nutnost opakování měření pro každý bod (x,y) pomocí posunutí optického zdroje nebo detektoru, abychom získali kompletní topografickou informaci (x,y,z) . Pro každý bod je to však nemožné. Proto se dělá pouze síť s dostatečnou hustotou nutnou pro aproximaci detekované plochy, aby byly splněny požadované podmínky měření.[3]

Poněkud složitější optickou strukturou, avšak stále velmi jednoduchou, je struktura lineární. Je tvořena světelnou stopou, která jednu ze souřadných os bere jako konstantu pro každý bod dané osy a druhá osa se spojitě mění. Výhoda této metody je nutnost posunutí pouze druhou osou. Lineární optická struktura je většinou realizována opět laserem či laserovou diodou s předřazenou cylindrickou čočkou. Oproti bodové struktuře nám dává topografickou výchylku v celé námi zvolené ose a proto ve stejném čase získáme daleko více informací. Následně budeme opakovat měření stejně jako v předcházejícím případě, aby námi změřené úseky vytvořily po aproximaci kompletní topografické souřadnice (x,y,z) .

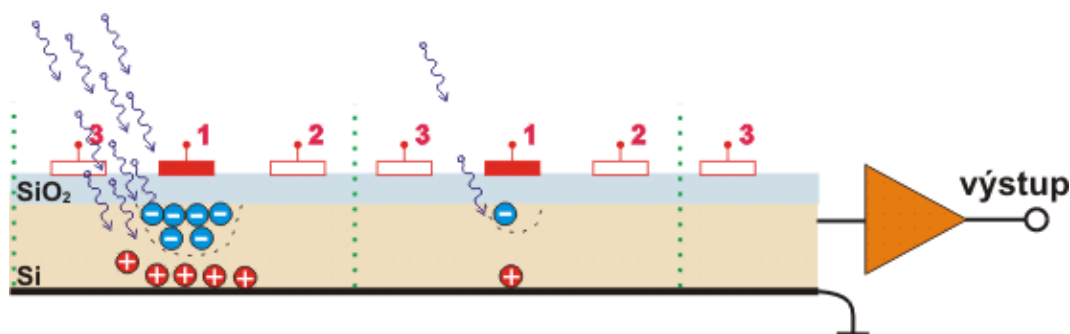
3.2 CCD kamera

Každá kamera se skládá ze zobrazovacího prvku, který je realizován pomocí objektivu a záznamového zařízení. U CCD kamer je toto záznamové zařízení tvořeno CCD čipem. O vlastnostech objektivů respektive o jejich vadách a nedokonalostech se podrobněji zmíníme v kap. 4.

Tzv. CCD čip (charge-coupled device) byl vynalezen Willardem Boylem a Georgem E. Smithem roku 1969. Hlavní myšlenkou v pozadí tohoto vynálezu bylo malou vrstvou magnetického materiálu udržet malé zpolarizované oblasti tzv. charge bubbles (nábojové bubliny), známé také jako domény, oddělené od sebe. Oddělené domény jsou používány pro posuvný registr k uchování informací. Největší rozvoj CCD čip zažil koncem 80. a počátkem 90. let zavedením do masové výroby pro videokamery.

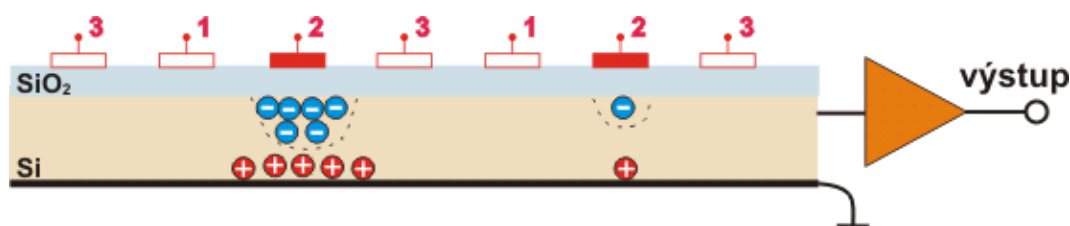
Plošný CCD čip je tvořen zápornou elektrodou, polovodičem, tenkou vrstvou oxidu křemičitého a sítí kladných elektrod. Při dopadu fotonů s dostatečnou energií na polovodič, který je tvořen tenkou vrstvou křemíku, nastane fotoefekt a začnou se tvořit páry díra - elektron.

Za pomoci elektrického pole tvořeného elektrodami a zemí, kde je kladný pól zdrojem připojen na elektrody a na zem je přiveden záporný pól zdroje, se kladný a záporný náboj od sebe vzdálí na kraje (viz. obr. 3.1). Počet takto odštěpených nosičů závisí na intenzitě světla, které dopadá na křemíkovou destičku.



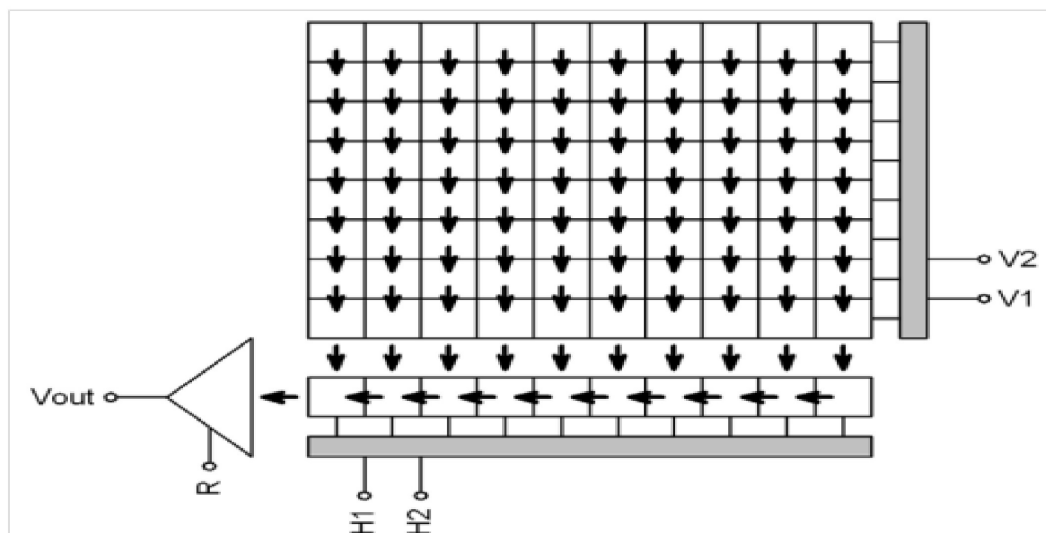
Obr. 3.1: CCD čip po expozici.

Přivedeme-li větší absolutní hodnotu napětí na druhou elektrodu, přesune se shluk částic na pozici elektrody č. 2. Napětí na elektrodách 1 a 2 se sníží o hodnotu první elektrody. Opakuje se postup, dokud se shluk nábojů nedostane na konec čipu, odkud je odveden výstupním vodičem. Mezi každým průchodem z třetí elektrody na první elektrodu se zaznamená do registru hodnota intenzity pixelu. Odpovídající velikost výstupního napětí je závislá na intenzitě světla dopadajícího na čip a počtu volných nosičů.



Obr. 3.2: CCD čip po posunutí náboje.

Proces, na jehož konci je zaznamenávání dat, začíná otevřením závěrky kamery, kdy světlo začne dopadat na křemíkovou destičku, kde se excitují elektrony v polovodiči. Počet vzniklých elektronů na jednu kladnou elektrodu je dán intenzitou světla na každý segment matice čipu. Ukončení zaznamenávání nastane uzavřením závěrky. V této chvíli přijde na řadu zpracování dat, tato data jsou přenášena z matice plošného CCD čipu na lineární CCD čip, kde lineární CCD čip zpracuje jednu řadu před tím, než je předána další řada.



Obr. 3.3: Plošný CCD čip

Kapitola 4

Aberace

Předchozí kapitola pojednávala o jednotlivých komponentech experimentální soustavy, jejíž nedílnou součástí je objektiv. Protože žádný objektiv není z hlediska optiky zcela dokonalý, existuje vždy nějaký rozdíl mezi předmětem a jeho obrazem. Tyto rozdíly se nazývají aberace a mají negativní vliv na přesnost měření. V odborné literatuře jsou někdy nazývány také optické vady.

Při zobrazení předmětu optickou soustavou obecně dochází ke zhoršení ostrosti a k deformaci tvaru výsledného obrazu. Zhoršení kvality obrazu je důsledkem aberací zobrazovací optické soustavy. Tyto aberace lze tedy chápat jako odchylky mezi zobrazením reálnou optickou soustavou a zobrazením soustavou ideální.

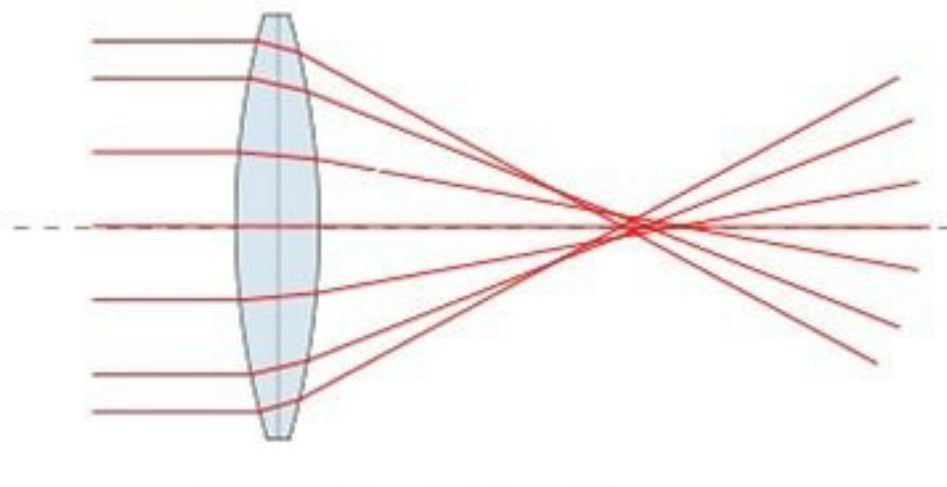
Aberace mohou být způsobovány například fyzikálními optickými jevy, jako jsou lom a odraz paprsků, difrakce světla na optické soustavě, disperze prostředí a podobně, nebo vadami materiálů použitých v optické soustavě, kde se může vyskytnout nehomogenita materiálu či jeho nepřesná geometrie.

Základní dělení aberací je na aberace chromatické, vznikající v důsledku jevů spojených se zobrazením polychromatickým zářením, a aberace monochromatické, jež nemají souvislost s polychromaticností použitého záření (jinými slovy byly by přítomny i při použití dokonale monochromatického záření). Mezi monochromatické aberace patří například sférická aberace, koma, astigmatismus či distorze. Pro výsledky našeho experimentu jsou podstatné pouze aberace monochromatické.

4.1 Sférická aberace

Tuto vadu můžeme v literatuře najít i pod jinými názvy, jako například kulová nebo otvorová vada. Sférická aberace nastává, pokud dopadající paprsek není paraxiální, to znamená, že paprsek v blízkosti optické osy svírá úhel větší než 2° . [1, 2]

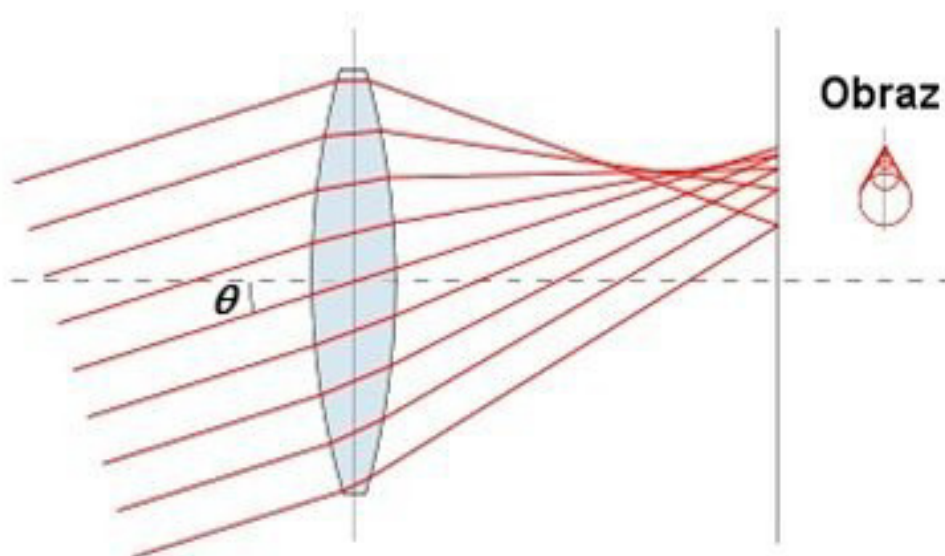
Tato aberace způsobuje, že bod se nezobrazuje jako bod, ale je rozmazaný a připomíná svým vzezřením skvrnu. Na neostřím obrazu lze korekce provést dvojím způsobem. V prvním případě se jedná o velmi náročný technologický postup, kdy zaměníme tvar čočky kulový za parabolický, zatímco druhý způsob spočívá v zúžení svazku pomocí kruhové clonky.



Obr. 4.1: Sférická vada.

4.2 Koma

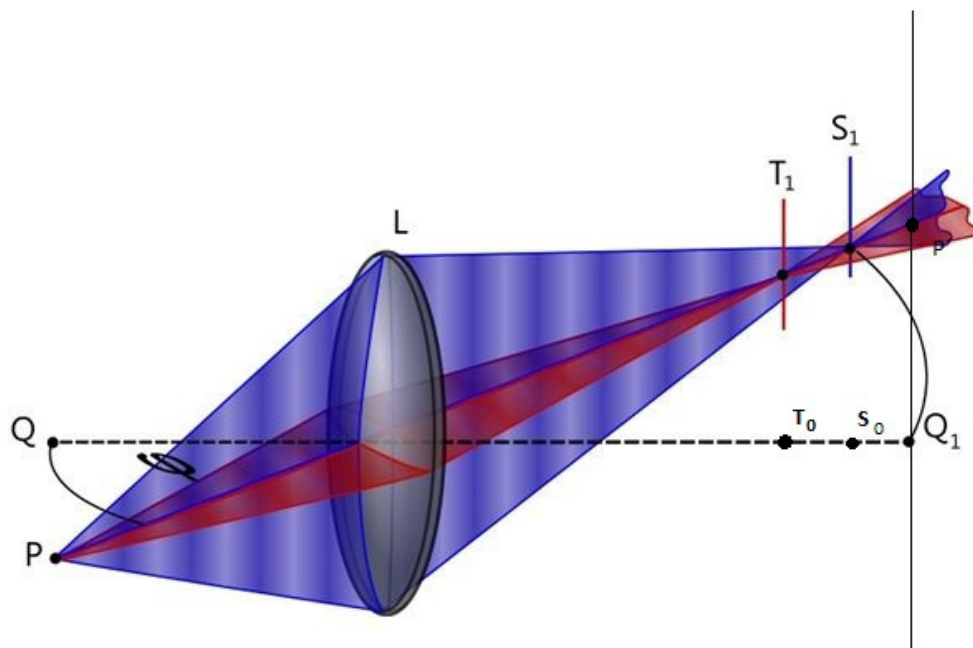
Koma, neboli asférická aberace, nastává, není-li dopadající svazek paprsků kolmý. Paprsky dopadající v blízkosti okrajů čočky se začnou přibližovat předmětovému obrazu pro kolmé paprsky. Obrazem bodu zde není bod, ale soustava zvětšujících se a rozostřujících se kružnic s nepravidelnou intenzitou. Tato vada je způsobena nedokonalým vycentrováním optické čočky, které se dá částečně odstranit jako v předchozím případě použitím kruhové clonky. V případě, že je provedena sférická i asférická korekce, danou soustavu nazýváme aplanatickou.



Obr. 4.2: Asférická vada neboli koma.

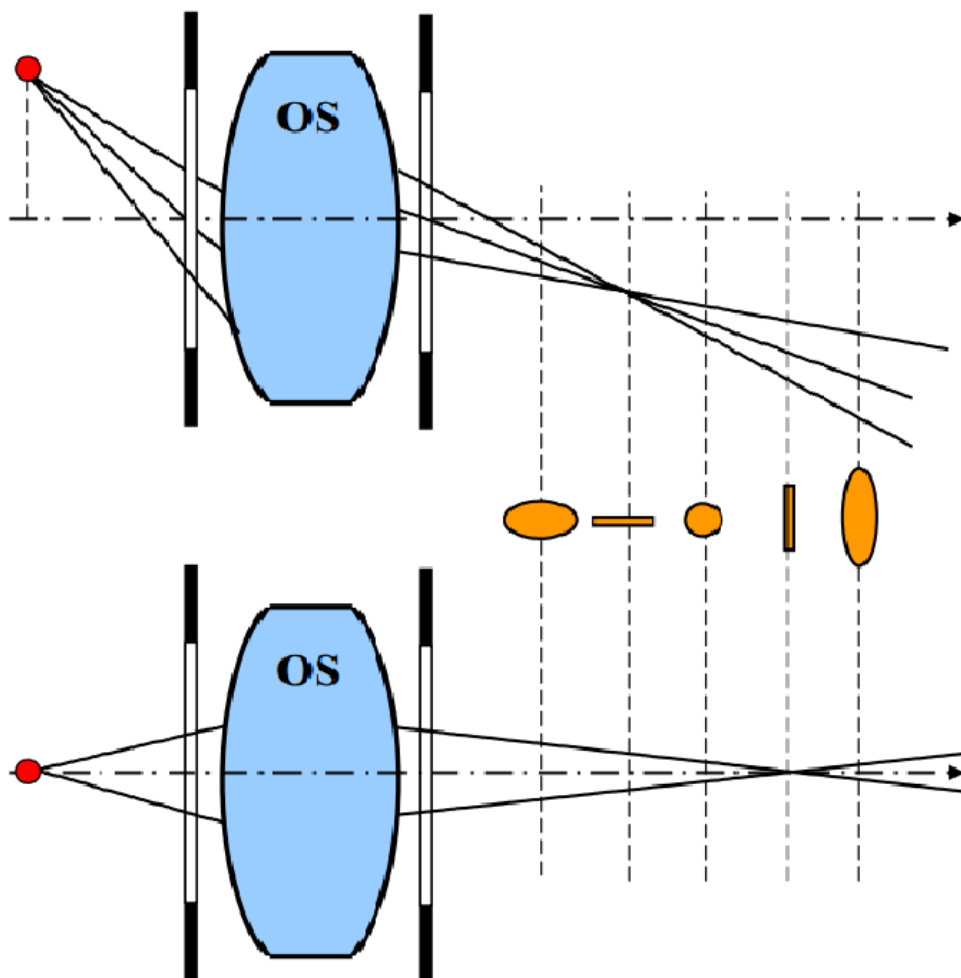
4.3 Astigmatismus

Astigmatismus a zklenutí jsou vady navzájem spolu souviející, tyto aberace tvořeny rozdílem meridionálního zklenutí a sagitálního zklenutí při mimoosém zobrazení bodu úzkým svazkem paprsků. Důsledkem astigmatismu je nemožnost určení přesné pozice jiného bodu než bodu v dotyku předmětové roviny a paraxiální obrazové roviny. Pro bližší představu lze astigmatismus demonstrovat schématem na obr. 4.3, kde mezi body Q a Q_1 je osa O kolmá k čočce, T_1 a S_1 jsou středy dvou úseček, ve kterých se sbíhají na sebe kolmé osy mimoběžného obrazu. Nyní známe všechny parametry potřebné k přesnému výpočtu velikosti astigmatismu.[6]



Obr. 4.3: Ukázka astigmatické vady.

Velikost astigmatické vady je definována jako rozdíl vzdálenosti kolmých průmětů T_1 a S_1 na osu O . Proto na obr. 4.4 ukážeme názorné chování zobrazení bodu. Oproti tomu zklenutí je zapříčiněno zobrazením předmětové roviny, která je kolmá k optické ose, jako zakřivenou plochu. Velikost zklenutí je definována zvláště pro meridionální a sagitální rovinu. Meridionální zklenutí odpovídá vzdálenosti mezi body $[T_0, Q_1]$ a sagitální zklenutí odpovídá vzdálenosti bodů $[S_0, Q_1]$ znázorněné na obr. 4.3. Rozdíl mezi zklenutím meridionálním a sagitálním zapříčiní rozostření v rozdílných vzdálenostech od středu Q_1 .

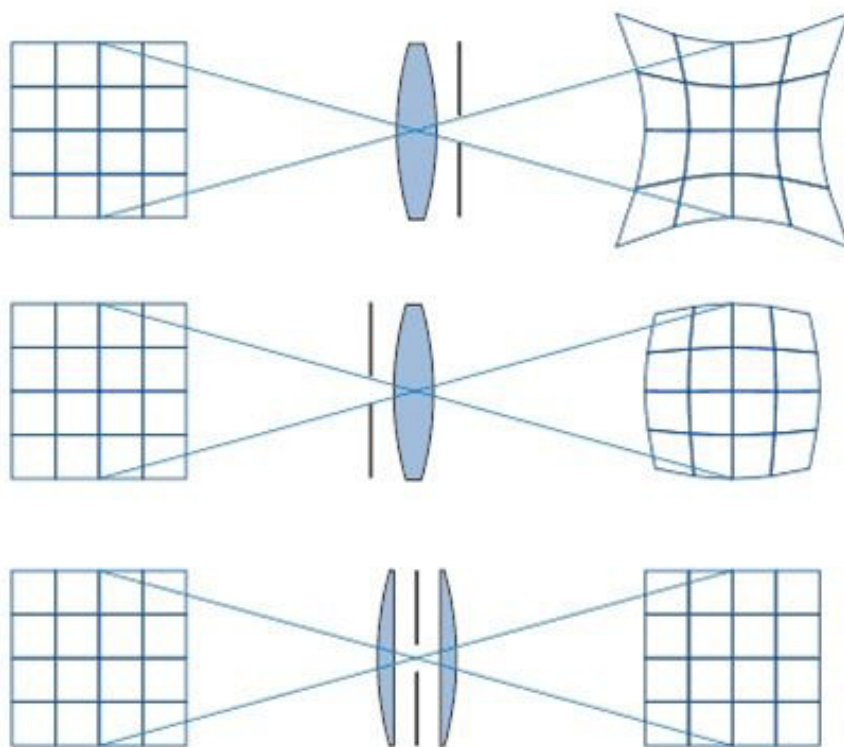


Obr. 4.4: Ukázka astigmatické vady pro zobrazení bodu.

4.4 Zkreslení

Při optické vadě zkreslení neboli distorzi dochází ke zobrazení bodu na bod, ale úsečky a přímky se zobrazují pomocí geometrického zobrazení (deformace) jako křivky. Tato aberace jako jediná, které se blíže věnuji, zachovává ostrost obrazu. Může nastat jeden ze tří případů: při pozitivní distorzi nastává poduškovité zkreslení, u negativní distorze nastává soudkovité zkreslení anebo může dojít ke zvlnění v případě kombinace obou předchozích distorzí současně. Tato vada je pro optické soustavy používané jako měřicí přístroje neodpuštělná a její korekci budeme provádět i na naší experimentální soustavě v kap. 5.

Tento výčet aberací samozřejmě není úplný, existují i další aberace jako jsou chro-



Obr. 4.5: Ukázky zkreslení při průchodu čočkou. První obrázek je poduškovité zkreslení. v druhém případě se jedná o soudkovité zkreslení a posledním případem se jedná o zvlnění.

matická vada, vinětace, reflexe atd., avšak téměř všechny ostatní aberace se týkají vad barevného spektra, které v našem případě nejsou relevantní z důvodu užití černobílé kamery.

Ke korekci aberací lze přistupovat dvěma způsoby. Jednou z možností je použití složitějších čoček, což je ale v praxi velice finančně nákladné, proto při svém experimentu používám druhý způsob, kterým je digitální korekce obrazu.

Kapitola 5

Metody korekce zkreslení objektivů

Pro zvolený experiment v oblasti profilometrie je nejvýznamnější aberací zkreslení, které má největší vliv na distorzi obrazu, neboli na změnu tvaru obrazu vůči měřenému předmětu.

Řešení tohoto problému spočívá v korekci obrazu pomocí tzv. pinhole modelu a intrinsických parametrů, které získáme pomocí programu MATLAB. Nejsnadnější způsob kalibrace soustavy je zaznamenat nějaký již známý předmět pomocí CCD kamery a následně provést porovnání zjišťující rozdíly mezi obrazem a měřeným předmětem, poté pomocí počítače upravíme obraz tak, aby přesně odpovídal předmětu.

5.1 Model kamery pin hole

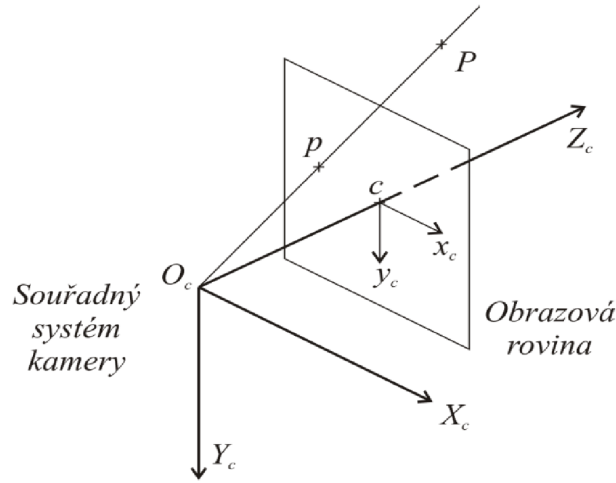
Pin hole model definuje geometrický vztah mezi 3D bodem v prostoru a jeho odpovídající 2D projekcí na obrazové rovině. Při použití pin hole modelu se geometrické zobrazení z 3D do 2D nazývá perspektivní promítání. Perspektivní promítání je vhodné pro definování vztahu mezi soustavou souřadnic objektu a jeho projekce do obrazové roviny.

Pinhole kamery jsou modely perspektivního promítání 3D bodů na obrazové rovině a lze je popsat následovně. Označíme střed perspektivní projekce O_c (bod, ve kterém se protínají všechny paprsky), jako optický střed, který je jinak nazýván také počátek souřadného systému kamery. Příмка kolmá k rovině obrazu procházející počátkem souřadného systému a bodem Z_c se nazývá optická osa (viz. obr. 5.1). Na optické ose a průsečíku obrazové roviny se nachází hlavní obrazový bod. Souřadnou soustavu obrazu definujeme jako (c, x_0, y_0) , kde c jsme již popsali a x_c a y_c tvoří rovinu rovnoběžnou s rovinou tvořenou X_c a Y_c .

Mějme obecný bod na P na měřeném tělese o souřadnicích $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ a jeho projekci p do obrazové roviny $\mathbf{x} = [x, y]^T$. Závislost mezi vektory B a b je definována vztahem:

$$x = [x, y] = \frac{1}{Z} [X, Y], \quad (5.1)$$

kde každý bod p má vlastní normalizovaný vektor, kterému odpovídají souřadnice $\mathbf{x} = [x, y, 1]^T$. Obraz v rovině je rozostřený a proto zadefinujeme ohniskovou vzdálenost f , kde ohnisková vzdálenost je vzdálenost mezi body O_C a c . Nejprve budeme muset



Obr. 5.1: Projekce na obrazovou rovinu dle pin hole modelu.

najít kalibrační matici kamery, která mapuje 3D $P = (X, Y, Z)$ na 2D $p = (x, y)$, neboli mezi body (x, y, f) a body (X, Y, Z) je trojúhelníková podobnost.

$$\frac{f}{Z} = \frac{x}{X} = \frac{y}{Y}, \quad (5.2)$$

Odtud nám vychází, že

$$x = \frac{fX}{Z} \quad y = \frac{fY}{Z},$$

avšak z preventivních důvodů zachování linearitu přeformujeme rovnici do matice.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Při běžném využití v dnešní době se pracuje s digitálním obrazem, tím pádem je obrazová rovina vyjádřena v matici $\mathbf{p} = [p_x, p_y]^T$, kde každý bod s danou hodnotou p_x a p_y se nazývá pixel. V této chvíli máme $\mathbf{p}$ a $\mathbf{x}$, avšak musíme stanovit závislost mezi nimi. První problém nastává, že máme počátek systému souřadnic ve středu c a při práci s obrazem je počátek v levém horním rohu, odkud se po jednotlivých pixelech pohybuje vodorovně až na konec řádku a to se opakuje s každým řádkem. Tento problém se vyřeší přepočtením pozice.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Pro větší přehlednost osamostatním rovnice z matice

$$p_x = f_x x + c_x,$$

$$p_y = f_y y + c_y.$$

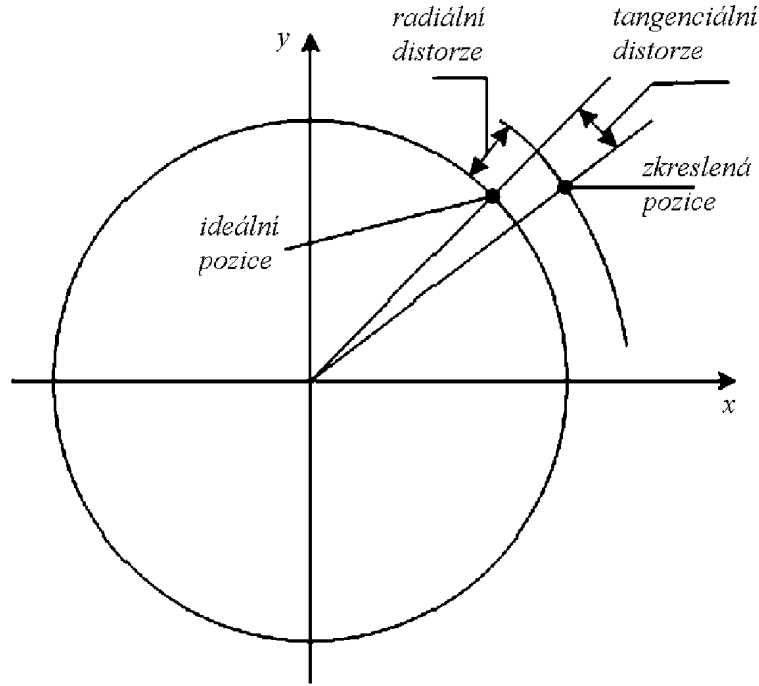
Tento vzorec není úplně obecný. Jedná se pouze o rozměry pixelů, u nichž bylo implicitně předpokládáno, že rozměry jsou 1:1. Proto odvodím obecnou rovnici i pro ty,

jež nejsou symetrické.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & \alpha f_x y & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (5.5)$$

kde α je skalární koeficient určující poměr velikostí stran vůči sobě, tzn. že jestli $\alpha = 0$ pak poměr stran je 1:1. [4]

Pinhole model je jen základní model, který dává do vztahu soustavu souřadnic objektu a projekci obrazové roviny. A proto se ještě rozšiřuje o korekce systematického zkreslení, které jsou zapříčiněny aberacemi popsány v kap. 4. Nejvýznamnější z těchto zkreslení je radiální zkreslení a tangenciální zkreslení, které jsou názorně ukázány na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Model distorze objektivu.

Radiální distorze se mohou projevit dvojnásobným způsobem, poduškovitým nebo soudkovitým. Obě tato zkreslení jsou symetrická a mění vzdálenost většiny bodů od původní polohy. Tím pádem mohou být aproximována pomocí Taylorova polynomu ve tvaru:

$$\delta x^{(r)} = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad \delta y^{(r)} = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots), \quad (5.6)$$

kde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ je vzdálenost od středu a k_1 a k_2 jsou koeficienty radiální distorze. Tangenciální distorze zachovává vzdálenost od středu, avšak posun bodů nastává o úhel β . Nejčastější tvar vzorce pro tangenciální distorzi je:

$$\delta x^{(t)} = 2t_1 xy + t_2(r^2 + 2x^2) \quad \delta y^{(t)} = t_1(r^2 + 2y^2) + 2t_2 xy, \quad (5.7)$$

kde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ je vzdálenost od středu a t_1 a t_2 jsou koeficienty tangenciální distorze.

Složením modelu pinhole rozšířeného o problematiku radiálních a tangenciálních distorzí dostáváme dostatečně přesný model pro tuto problematiku, odkud jsme schopni získat opravené souřadnice pro obrazovou rovinu:

$$x_d = \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + \delta x^{(r)} + \delta x^{(t)} \\ y + \delta y^{(r)} + \delta y^{(t)} \end{pmatrix}. \quad (5.8)$$

Přímá projekce je metoda, které postačí koeficienty $(f_x, f_y, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, t_1, t_2)$, neboli vnitřní parametry (intrinsické parametry) a znalost polohy bodu P, aby vypočetla přesnou polohu bodu v obrazové rovině.

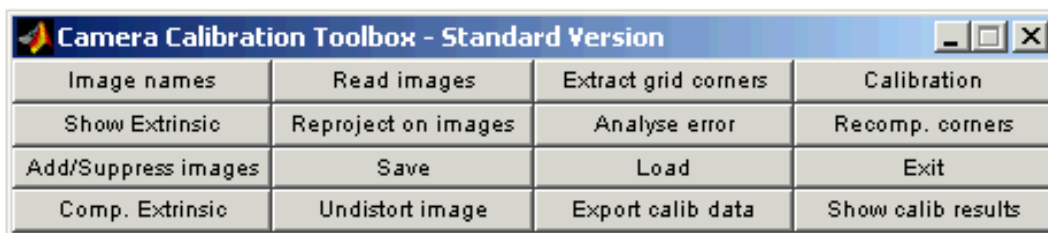
5.2 Podprogram calib v prostředí matlabu

Před prvním použitím kamery bylo potřeba nainstalovat příslušné ovladače. Pro prvotní ověření funkčnosti kamery byl použit program LuCamSoftware-v6.0.3. dodaný výrobcem. Uvedený program však neposkytuje matematické aplikace nutné pro zpracování obrazu v rámci bakalářské práce. Z tohoto důvodu byl program nahrazený za programovací prostředí MATLAB.

Následná příprava kamery pro další měření spočívala v zaostření obrazu kamery a úpravě intenzity světla pomocí clonky. Byly pořízeny testovací fotografie, kdy jako předmět sloužilo šachovnicové pole s dostatečnou kvalitou obrazu pro další zpracování. Pro usnadnění práce byl v prostředí MATLAB vytvořen jednoduchý for cyklus a uložen do M.file.

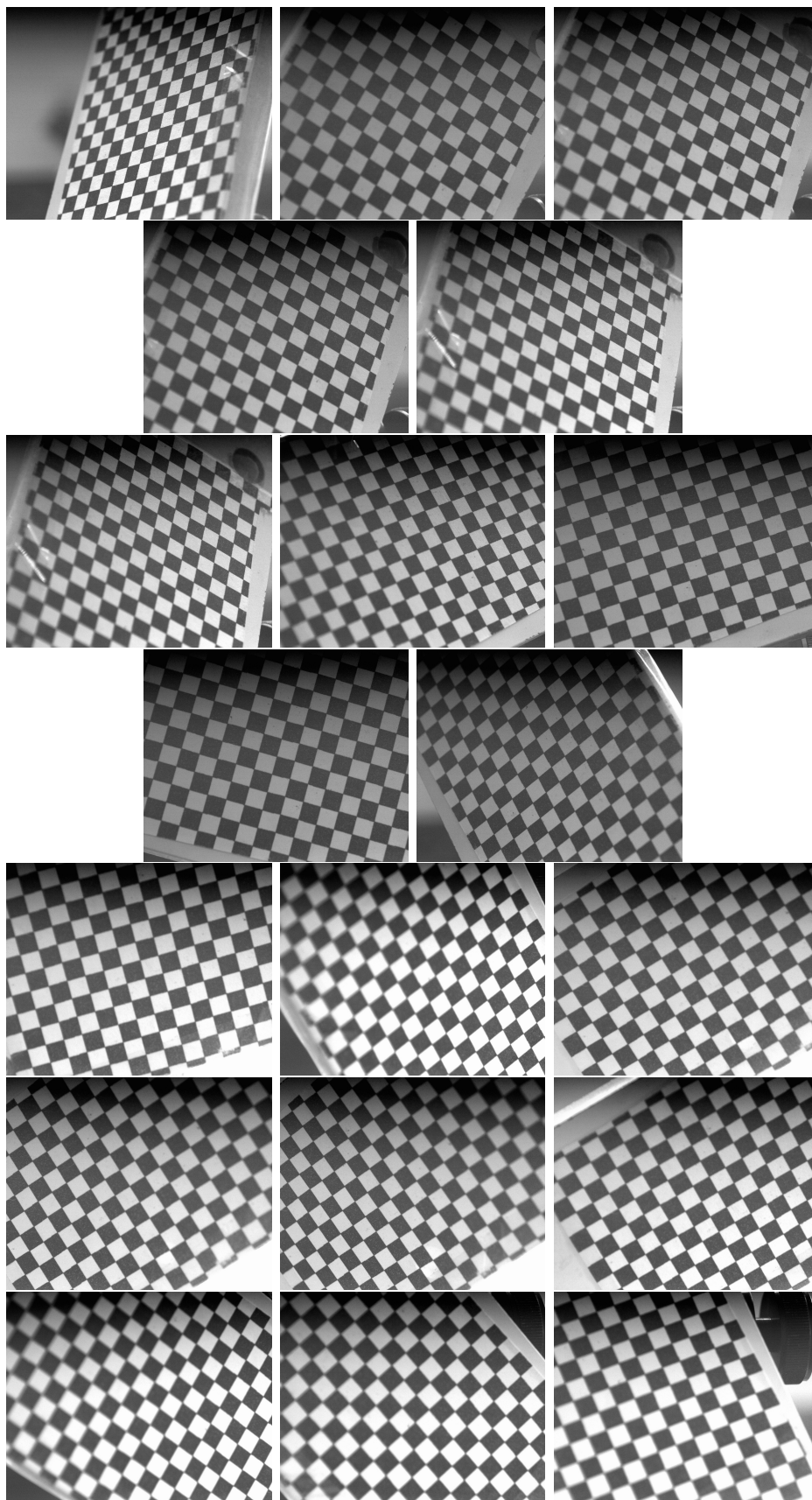
Ve chvíli, kdy bylo dosaženo dostatečné kvality, byla vyfocena sada fotek pro jednotnou ohniskovou vzdálenost při změně exentrických parametrů. Znázornění těchto parametrů je na obr. (5.7,5.8) a popis obrázků na str. 25.

Po zaznamenání snímků spustíme program calib, který byl stažený z internetové adresy http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/download/index.html. Na následujícím obrázku jde vidět grafické rozhraní programu calib, jehož užití si ukážeme v dalším textu.



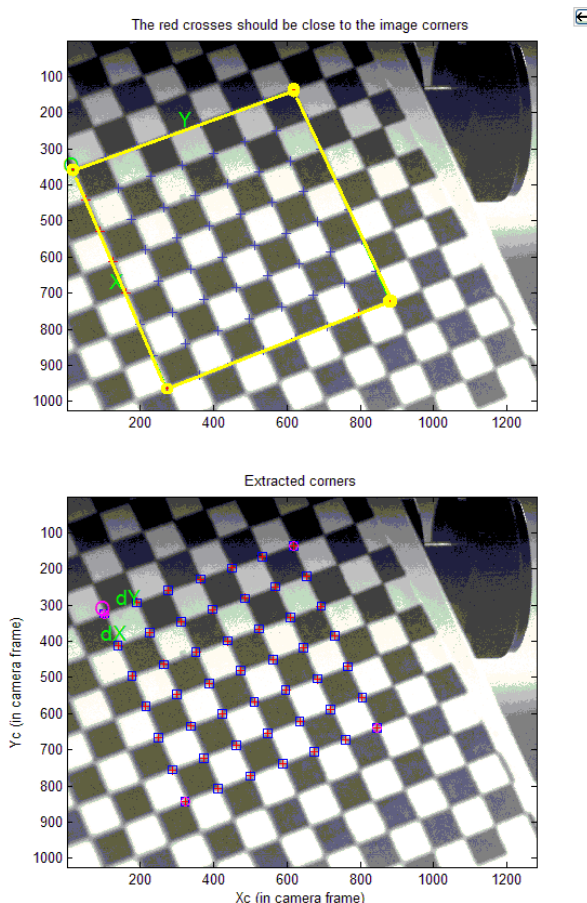
Obr. 5.3: Grafické rozhraní Toolbox calib.gui.

Tlačítkem "Read images" načteme vyfocené snímky do programu calib, který se nejprve zeptá na jméno snímku, následně pak na formát. Všechny nafocené snímky jsou uvedeny na obr. 5.3. Po vybrání snímků zmáčkneme tlačítko "Extract grind corners". V této chvíli se program zeptá na počet snímků pro zpracování. Tlačítko "Enter" nám dává možnost pro přednastavené volby měřených parametrů, které byly použity při vývoji calibu.



Obr. 5.4: Zaznamenané fotografie pro program calib.

Po vybrání obrázků program požádá o orientaci vyznačení vnějších rohů, a poté automaticky vyznačí všechny ostatní vnitřní rohy viz. obr 5.5. Poté je nutné přepnout do MATLAB okna, kde zadefinujeme velikost délky jednoho čtverečku, rozměry pixelové matice v síti a pixelevé okolí každého rohu, pro který vyhledá přesnou polohu přechodu rohů. Postup s vyznačením rohů na všech nafocených obrázcích zopakujeme pro každý snímek.

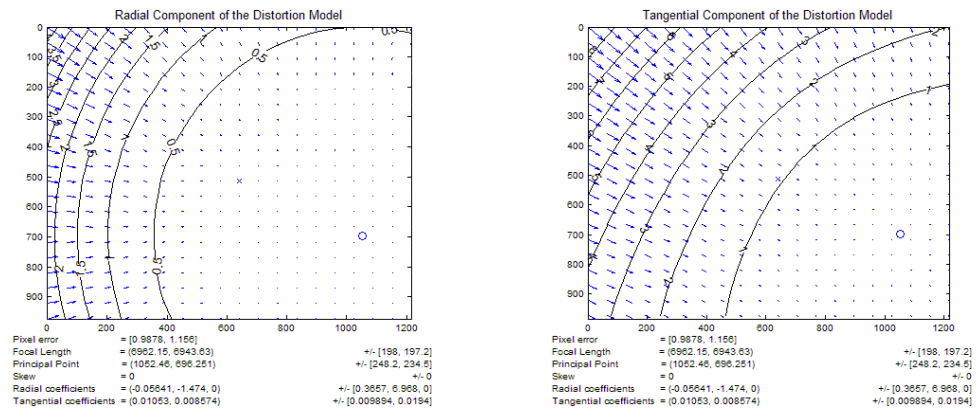


Obr. 5.5: a) První šachovnice se zpracováním dat z calib toolbox. b) Šachovnice s přesným zaměřením všech rohů.

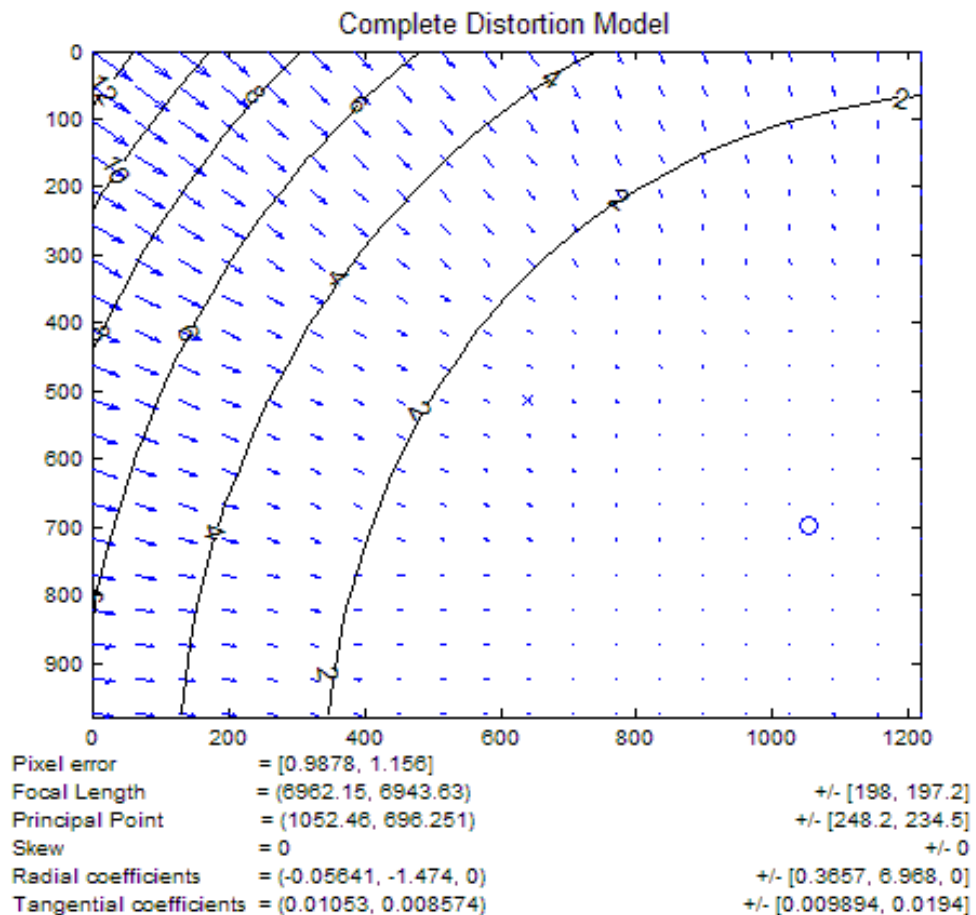
V předposlední části podprogramu calib použijeme tlačítko "Calibration" a následně "Save", kdy se vytvoří m.file s výsledky dané kalibrace. Pro další využití převodu M.file do formátu *.txt a zobrazíme výsledky.

- Focal length: $fc = [6062.047592521938000 ; 6134.143210360292000]$;
- Principal point: $cc = [843.579309887041060 ; 321.014628767247810]$;
- Skew coefficient: $\alpha_c = 0.0000000000000000$;
- Distortion coefficients: $kc = [-2.871235497719637 ; 173.029534724403130 ; 0.018796194566723 ; -0.031206697700230 ; 0.0000000000000000]$

Pomocí kompletních výsledků intrinsických parametrů příkazem *visualize_distortions* bylo možné vytvořit grafy tangenciálních, radiálních a celkových distorzí, kde radiální a tangenciální distorze jsou pouze orientační, zatímco kompletní distorze bude sloužit k porovnání s experimentálními daty.

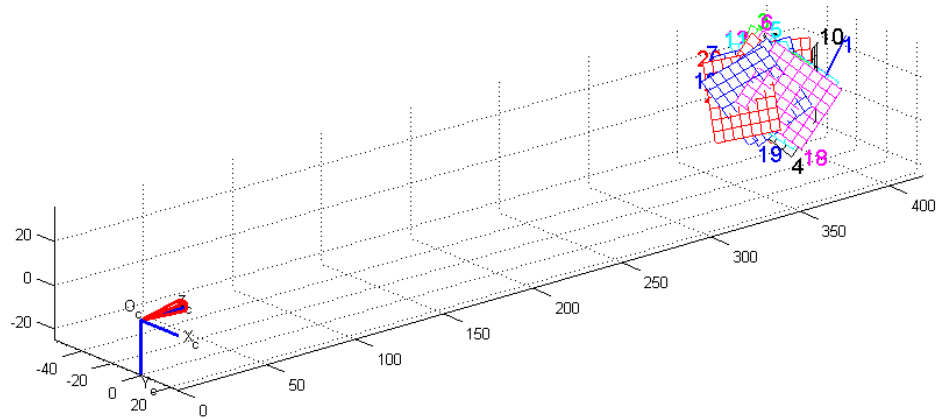


Obr. 5.6: Vlevo je radiální distorze a vpravo je tangenciální distorze obrazu.

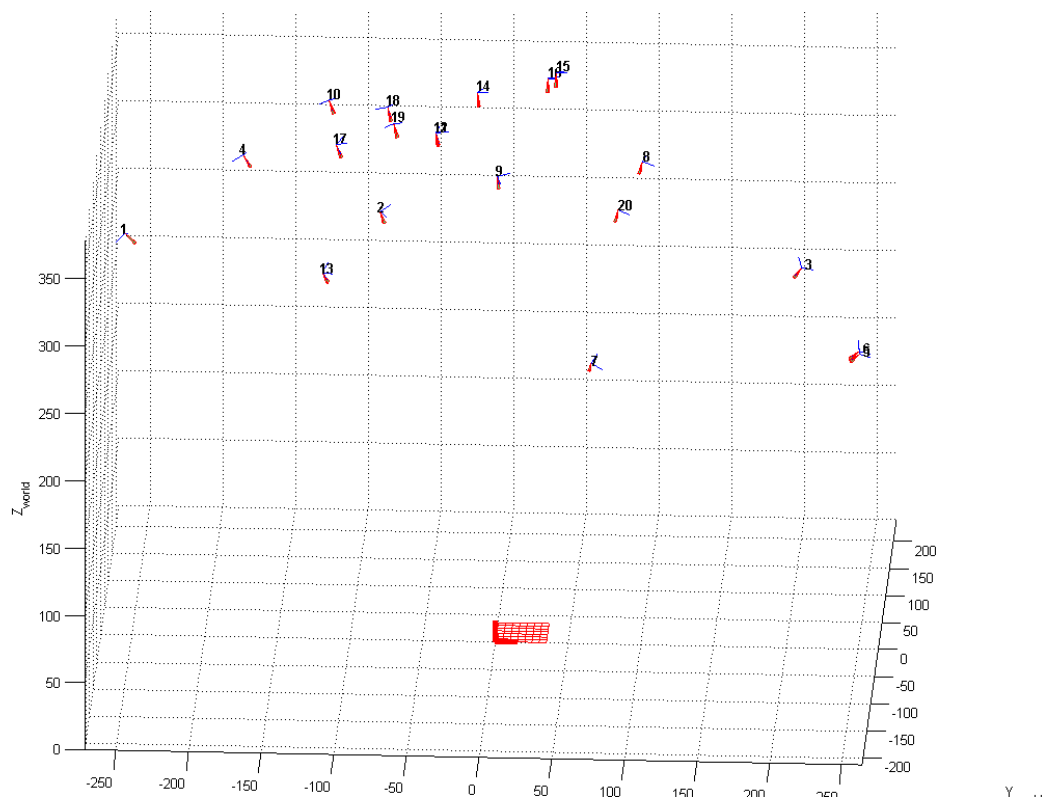


Obr. 5.7: Kompletí distorze obrazu.

Tlačítkem "Show extrinsic" jsme schopni získat extrinsické parametry, které nám udávají vzdálenost a natočení kamery vůči měřené šachovnici. K tomuto problému by šlo přistupovat dvojím způsobem. První způsob je znázorněn na obr. 5.9, kdy máme pevně ukotvenou kameru a měřenou rovinu na 3-osém kloubu, kterou je možné natočit do různých úhlů. Druhý způsob je zafixování měřené roviny a pohybování kamerou v prostoru. Tento je náročnější na realizaci, avšak lépe pochopitelný pro představivost o funkci extrinsických parametrů.



Obr. 5.8: Natočení snímané roviny, kde v bodě $[0,0]$ je náš detektor a v z-ové ose mezi hodnotami 350 až 400 mm jsou snímané roviny. Všechny vzdálenosti jsou v jednotkách mm.



Obr. 5.9: Rozmístění kamer pro zafixovanou rovinu, kde síť mřížky ležící v rovině xy je detekovaná deska a číselné body v prostoru jsou kamery směřující k detekované ploše. Všechny vzdálenosti jsou v jednotkách mm.

Kapitola 6

Experimentální část

6.1 Korekce obrazu pomocí intrinsických koeficientů

Před konkrétními detaily experimentu uvedu popis jednotlivých koeficientů a jejich vzájemnou návaznost mezi výstupními výsledky programu calib a teorií. Pro lepší přehlednost je vynesu v tab. 6.1:

Výstupní koeficienty	Koeficienty teorie	Popis koeficientů
$fc(1)$	$f(x)$	Ohnisková vzdálenost v ose x
$fc(2)$	$f(y)$	Ohnisková vzdálenost v ose y
$cc(1)$	$c(x)$	Přepočtené souřadnice počátku v pixelech pro osu x
$cc(2)$	$c(y)$	Přepočtené souřadnice počátku v pixelech pro osu y
$kc(1)$	k_1	Koeficient prvního řádu pro radiální distorze
$kc(2)$	k_2	Koeficient druhého řádu pro radiální distorze
$kc(3)$	t_2	Koeficient prvního řádu pro tangenciální distorze
$kc(3)$	t_1	Koeficient druhého řádu pro tangenciální distorze
$kc(5)$	α	Excintrický koeficient natočení

Tab. 6.1: Koeficienty a jejich popis.

$x, y, \dots$Původní normalizované souřadnice.

$x^D, y^D, \dots$Opravené souřadnice.

$p_x, p_y, \dots$Původní pixely snímků.

$p_x^D, p_y^D, \dots$Opravené pixely snímků.

Z digitálního obrazu zapsaného v třírozměrné matici $[p_x, p_y, I]$ můžeme pomocí vztahů 5.4, 5.5, 5.6 a 5.7 při znalosti pixelových souřadnic, ohniskové vzdálenosti a koeficientů distorze určit vztahy nezbytné pro dokončení experimentu.

$$p_x = f_x x + c_x$$

$$p_y = f_y y + c_y$$

Úpravou výše zmíněných rovnic získáme původní normalizované souřadnice.

$$x = \frac{(p_x - c_x)}{f_x}$$

$$y = \frac{(p_y - c_y)}{f_y}$$

Po získání původních normalizovaných souřadnic můžeme dosadit do rovnic pro vytvoření rozšířeného Pinhole modelu s tangenciální a radiální distorzí.

Posun způsobený radiální distorzí:

$$\delta x^{(r)} = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6)$$

$$\delta y^{(r)} = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6)$$

Posun způsobený tangenciální distorzí:

$$\delta x^{(t)} = 2k_3 xy + k_4(r^2 + 2x^2)$$

$$\delta y^{(t)} = k_3(r^2 + 2y^2) + 2k_4 xy$$

Aplikace parametrů pro získání opravených souřadnic:

$$x^D = x + \delta x^{(t)} + \delta x^{(r)}$$

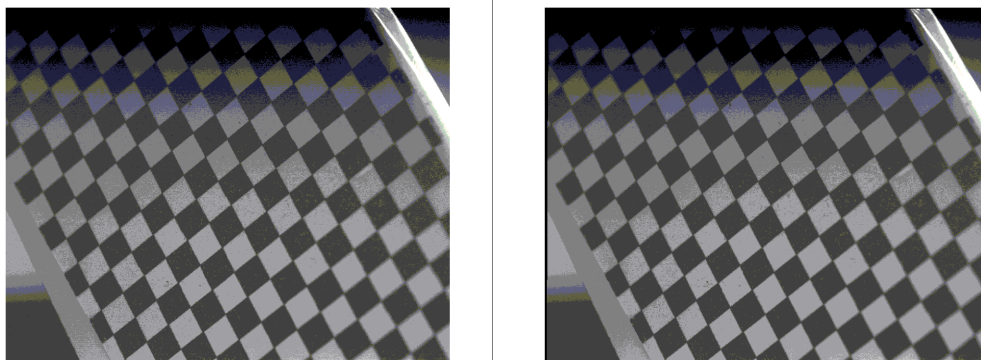
$$y^D = y + \delta y^{(t)} + \delta y^{(r)}$$

Výsledné opravené pixelové souřadnice:

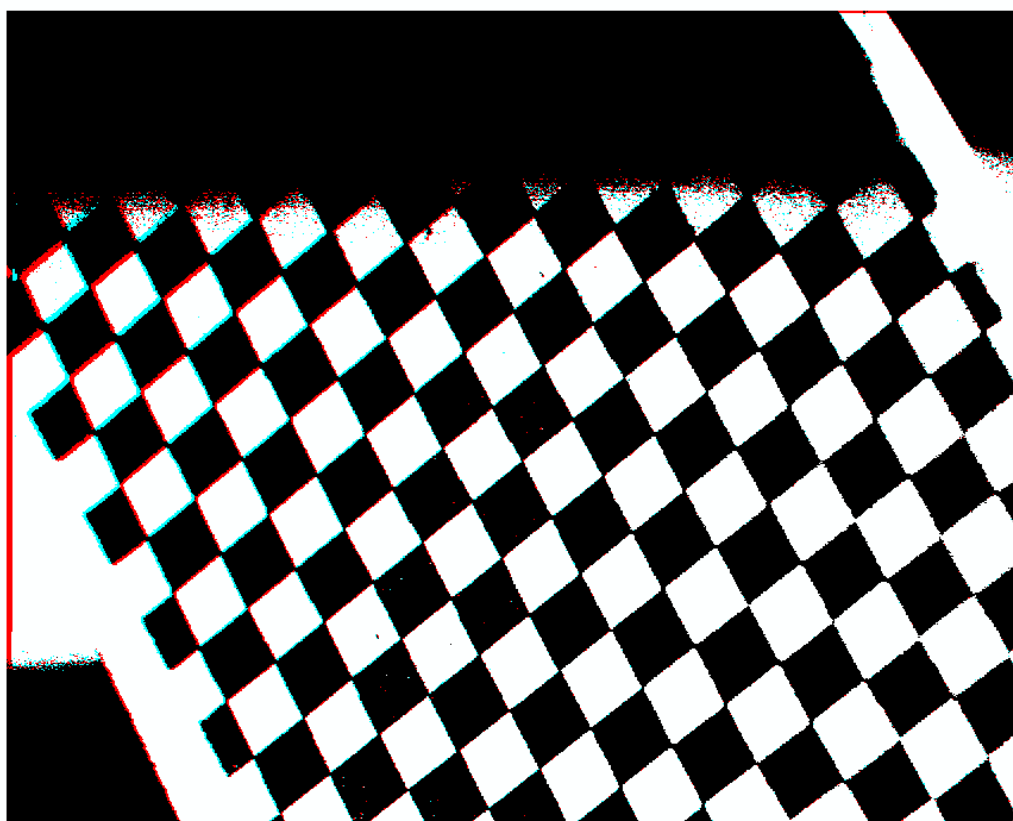
$$p_x^D = f_x x^D + c_x$$

$$p_y^D = f_y y^D + c_y$$

Po přepočtu jednotlivých souřadnic byl vytvořen M.file s vnořenými for cykly pro celou matici a byl zkorigován obraz. V následujících obr. 6.1 a 6.2 bylo uvedeno původní a korigovanou fotku.

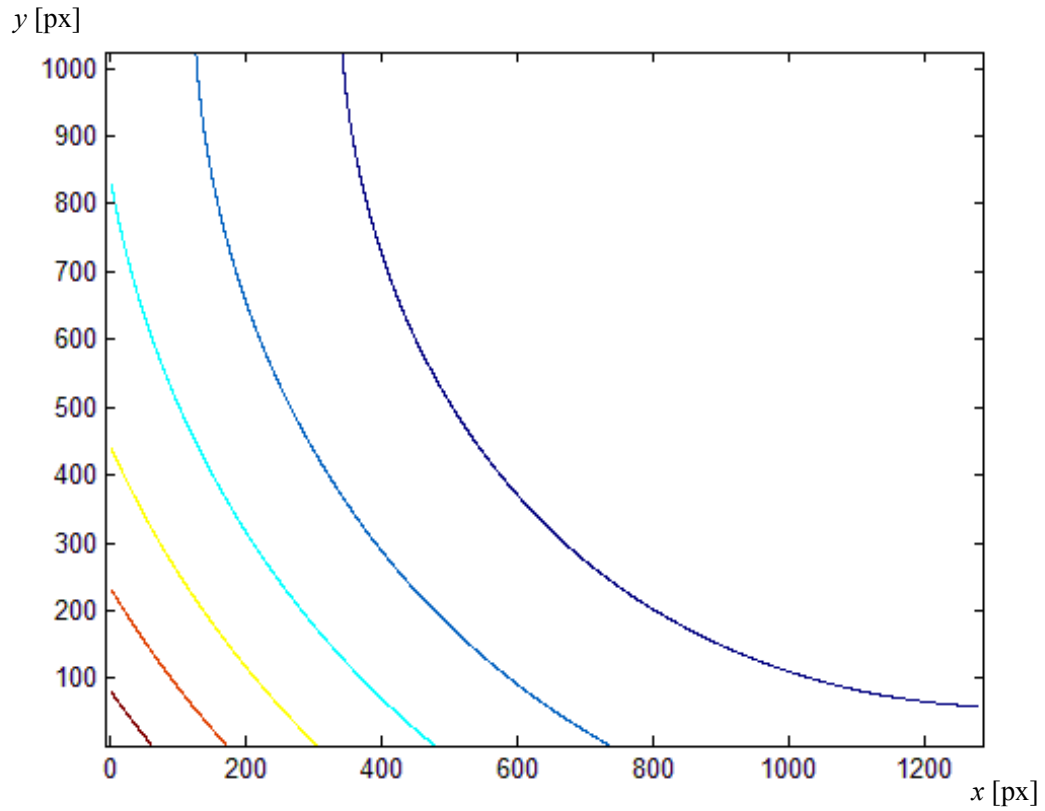


Obr. 6.1: Vpravo původní snímek před korekcí a v levo korigovaný snímek.



Obr. 6.2: Rozdíl původního snímku a snímku po korekci je naznačen červenou barvou vzniklou při manipulaci s vrstvami.

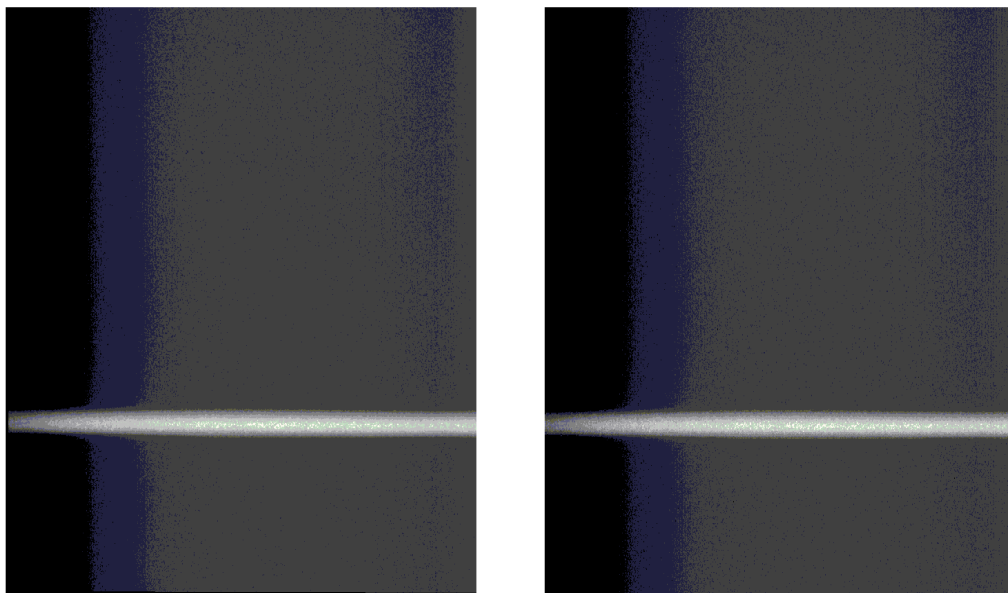
Se znalostí rozdílu mezi originálem a korigovanou fotografií je možné vytvořit graf distorze. Při porovnání grafů distorzí, kde první byl získán pomocí programu calib viz. obr. 5.7 a druhý byl vytvořen za účelem kontroly, můžeme usoudit správnost postupu, neboť grafy distorzí si téměř odpovídají, až na drobnost vzniklou otočením os a zadefinováním počátku.



Obr. 6.3: Celková distorze po ručním vypočítání.

6.2 Experimentální výsledky

Jak už bylo zmíněno v kap. 6.1, obraz je třírozměrnou maticí $[x,y,I]$, kde I je intenzita a maximální možná hodnota je 255 ve stupni šedi. Nyní chceme určit změnu obrazu jako přesnou vzdálenost mezi původním a opraveným obrazem. Pro tento účel použijeme lineární laserovou stopu svítící v horizontální poloze.

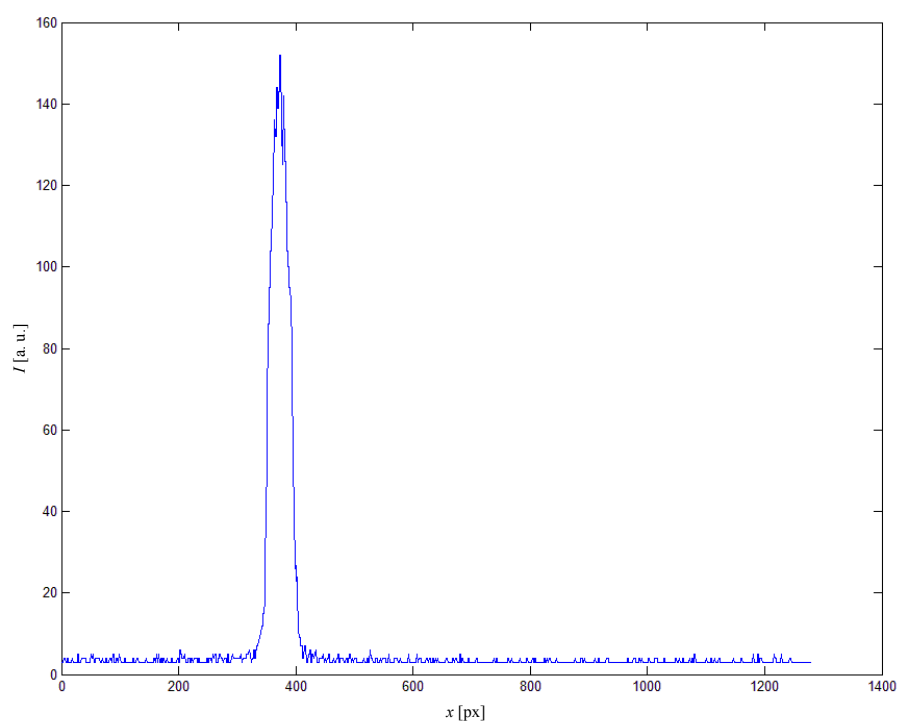


Obr. 6.4: a) Korigovaná stopa b) Nekorigovaná stopa

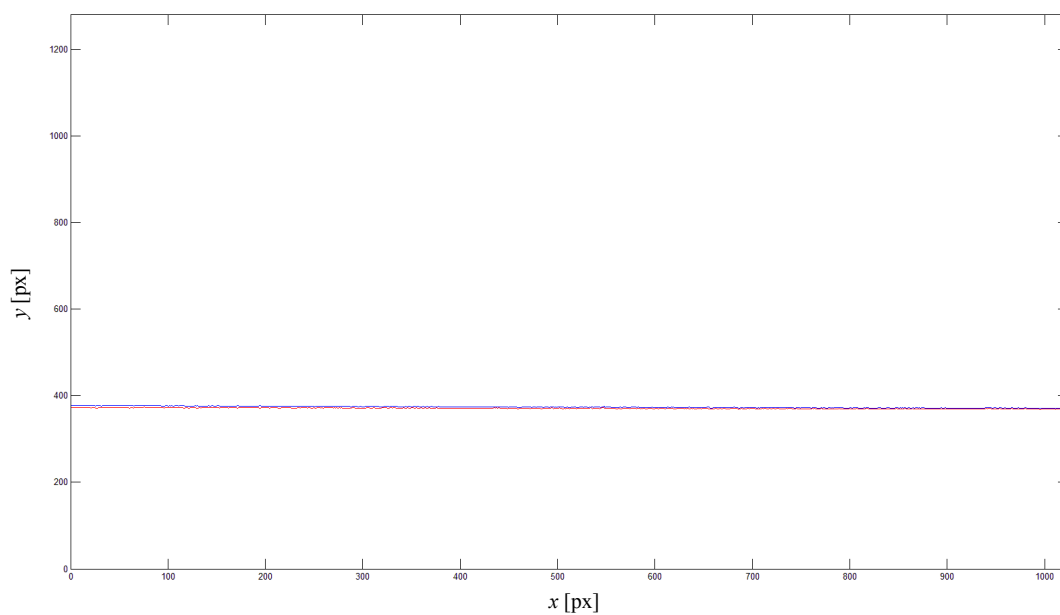
Při náhledu na dané stopy je problém s poznáním rozdílů z důvodu velikosti šířky stopy. Proto byly určeny středy těchto stop v závislosti na intenzitě. Na obr. 6.5 uvádím graf závislosti intenzity na poloze pro konkrétní horizontální řez.

Z grafu lze vypočítat střed stopy pro jednotlivý řádek některou z metod k tomu určených. Mezi tyto metody patří aritmetické průměrování, použití Fourierovy transformace a proložení Gaussovou křivkou.

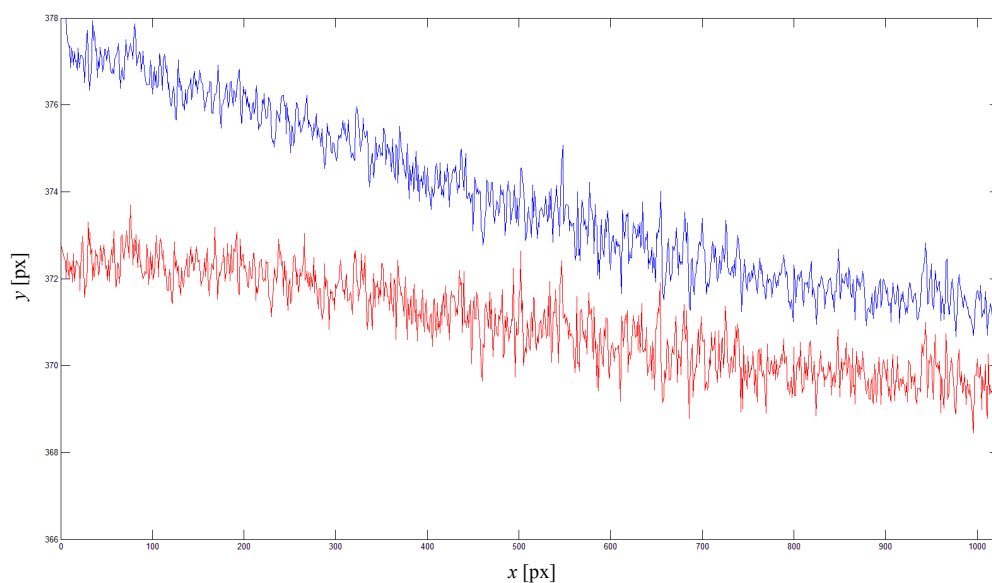
Nyní již výsledky opovídají datům pro zpracování, proto zjistíme středy pomocí Gaussova proložení pro obraz s korekcí, ale i bez korekce a v této chvíli lze vidět, že je rozdíl patrný.



Obr. 6.5: Průběh intenzity v horizontálním řezu v úrovni 100px pro obr. 6.3

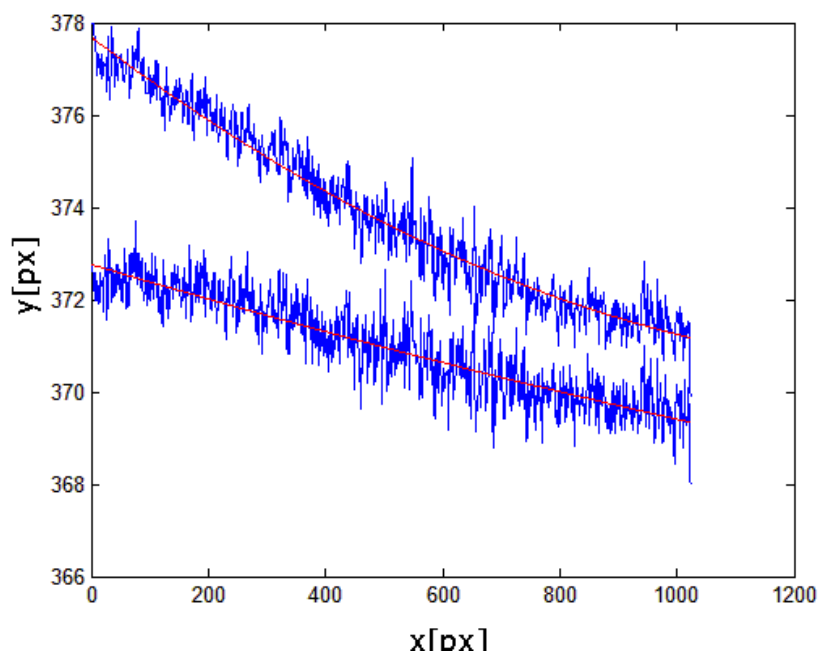


Obr. 6.6: Rozdíl mezi původní a korigovanou stopou. Červená stopa je korigovaná a modrá je původní.



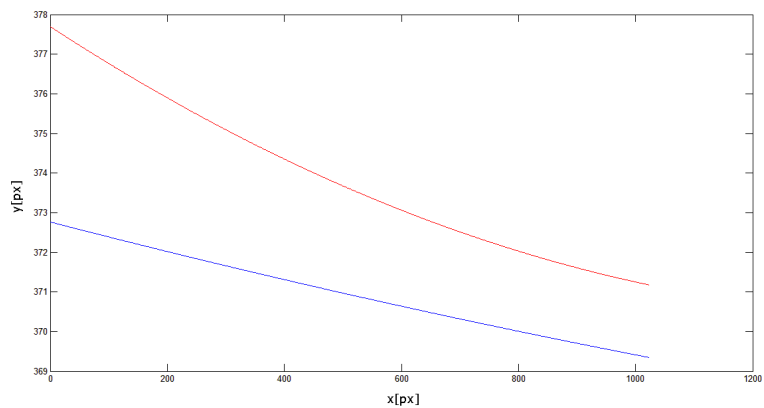
Obr. 6.7: Rozdíl mezi původní a korigovanou stopou přiblížení. Červená stopa je korigovaná a modrá je původní.

Na obr. 6.6 a 6.7 uvádím grafy závislosti středů stop na poloze pro původní a korigovaný obraz. Na posledním grafu je patrná odchylka od reálného svazku až 7 px. Pro další využití ke korekci proložíme dané výsledky polynomem druhého řádu (obr. 6.8).



Obr. 6.8: Rozdíl obrazu proložený polynomem druhého řádu.

Na obr. 6.9 uvádím příslušné polynomy druhého řádu pro korigovaný a nekorigovaný výsledek. Korekcí bylo dosaženo minimalizace této odchylky přibližně na 3 px, což je nejlepší možné přiblížení vzhledem k přítomnosti dalších nekorigovaných aberací.



Obr. 6.9: *Polynom druhého řádu pro původní a opravený odraz*

Kapitola 7

Závěr

Jak již bylo řečeno, optické metody měření v dnešní době zažívají velký rozmach, mimo jiné i díky prudkému rozvoji technologií v oblasti mikročipů. Díky podstatnému snížení pořizovacích nákladů jsou nyní tyto metody aplikovány do nových odvětví a nacházejí zde široké uplatnění. Jsou rovněž dostupné pro experimentální účely ve vysokoškolském vzdělávání, což je nezbytným předpokladem jejich dalšího budoucího rozšíření.

Teoretická část této bakalářské práce poskytla čtenáři úvod do problematiky 3D metrologie a skenovací profilometrie a popis metody laserové triangulace, která byla využita k dosažení vlastních cílů práce. Těmi byla korekce optických aberací ve zvolené experimentální soustavě. Tato část práce rovněž podává stručný přehled relevantních optických aberací, které měly vliv na výsledky experimentu.

V praktické části byl nejprve popsán obecně užívaný software Matlab pro korekci optických vad objektivů. Po detailním seznámení s principem jeho činnosti byl následně aplikován na konkrétní objektiv v dané optické skenovací sestavě. Tím byly určeny parametry tohoto objektivu, pomocí kterých je možné detekovanou vadu objektivu korigovat. Vliv korekce na výsledky měření pomocí sestavy skenovací profilometrie včetně ilustračních příkladů je hlavním a také vlastním přínosem práce. Tím byly naplněny stanovené cíle této bakalářské práce.

Literatura

- [1] HAVELKA, B. Geometrická optika I. Praha: Melantrich, 1955.
- [2] KUČERA, Dr. Geometrická optika. Praha: Melantrich, 1915.
- [3] POCHMON, Michal. Vybrané optické 3D metody v metrologii a jejich aplikace. Olomouc, 2012. disertační práce (Ph.D.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta
- [4] MANDÁT, Dušan. Optická topografie a její vybrané aplikace. Olomouc, 2012. disertační práce (Ph.D.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta
- [5] url[online] [cit. 2014-08-15]. Dostupné z:
<http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calibdoc/htmls/parameters.html>
- [6] url[online] [cit. 2014-08-15]. Dostupné z:
http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/aberrace_opt_soustav.pdf