



Univerzita Palackého v Olomouci

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra Optiky

Lucie Nádvorníková

Metody měření zkreslení obrazu

Bakalářská práce

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Vedoucí práce: Mgr. Lucie Čelechovská, Ph.D.

Konzultant: Mgr. Radek Čelechovský, Ph.D.

2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Metody měření zkreslení obrazu vypracovala samostatně pod odborným vedením Mgr. Lucie Čelechovské a v seznamu literatury uvedla všechny použité informační zdroje.

V Olomouci dne 25. Července 2016

.....

Poděkování

Děkuji paní Mgr. Lucii Čelechovské, Ph.D. za odborné vedení mé práce, věcné připomínky, dobré rady a především trpělivost při konzultacích a měřeních. Mé poděkování patří rovněž panu Mgr. Radkovi Čelechovskému, Ph.D. za konzultace.

Anotace

Míra zkreslení obrazu u běžných optických soustav se standardně pohybuje v řádu desetin procenta. U produktů polovodičového průmyslu je zkreslení kritickým parametrem a jeho hodnoty mohou dosahovat až jednotek tisícín procenta. To klade velké nároky na schopnost jeho měření. Pro vyhodnocení již nelze využít běžně používané postupy a je třeba hledat vhodné měřicí metody, které kombinují pokročilé optické a numerické metody pro vyhodnocení obrazu.

Cílem bakalářské práce bude vytvořit rešerši dostupných metod měření zkreslení se zaměřením na systémy navržené pro zobrazení z konečna do konečna. Úkolem praktické části bude vybrat vhodnou metodu s potenciálem pro měření zkreslení pod 0,01 % a experimentálně ověřit možnosti jejího použití v praxi.

Klíčová slova: Zkreslení, přesnost, optický systém

Abstract

The value of distortion in conventional optical systems is normally in the order of tenths of a percent. For the products of the semiconductor industry is distortion critical parameter and its value can reach units thousandths percent. This places great demands on the ability of its measurement. Commonly used methods are no longer suitable. It is necessary to look for suitable measurement methods that combine advanced optical and digital methods for image evaluation.

The aim of the thesis is to create a search of available methods of distortion measurement, focusing on systems designed for mapping from the finite to the final. The task of the practical part will choose the suitable method with the potential for distortion measurements below 0.01 % and experimentally verify the possibility of its use in practice.

Keywords: Distortion, precision, optical system

Obsah

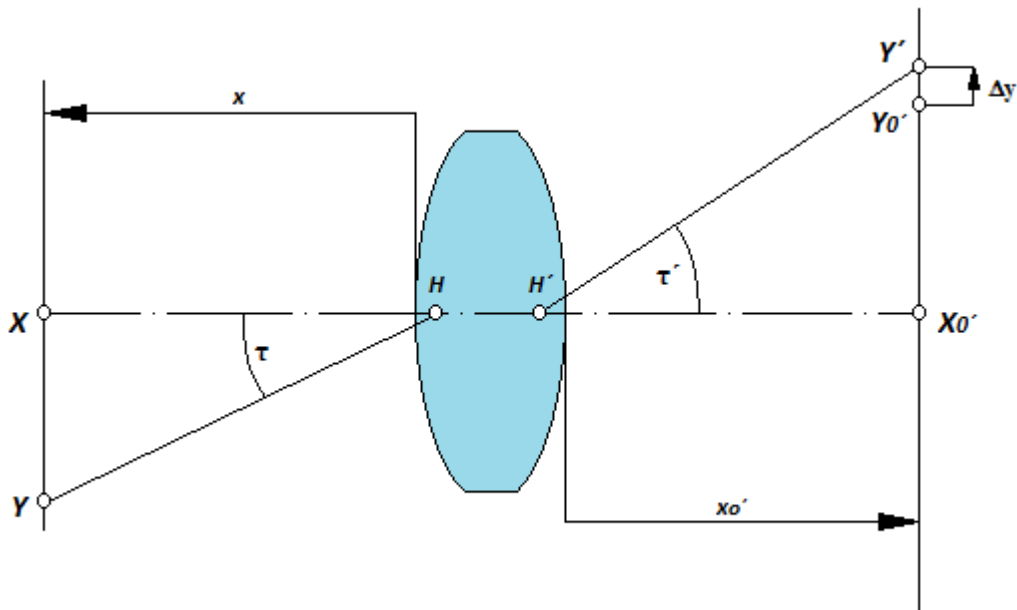
ÚVOD.....	7
1. Zkreslení.....	8
1.1. Vznik a průběh zkreslení.....	8
1.2. Numerický popis zkreslení.....	9
1.3. Kladné a záporné zkreslení.....	9
2. Měření zkreslení.....	11
2.1. Základní způsob měření.....	11
2.2. Korelační metoda s využitím periodické struktury.....	11
3. Algoritmus pro vyhodnocení.....	12
3.1. Carré algoritmus.....	12
4. Experimentální ověření.....	13
4.1. Sestava experimentu.....	13
4.2. Justáž.....	14
4.3. Podmínky měření.....	15
4.4. Provedená měření.....	15
4.5. Zpracování výsledků.....	16
5. Vyhodnocení.....	18
5.1. Výsledky měření.....	18
5.2. Porovnání výsledků při použití různých sestav.....	18
5.3. Další zdroje nepřesností.....	21
5.4. Zhodnocení.....	21
Závěr.....	22
Použité zdroje a literatura.....	23

Úvod

Posuzování kvality vždy závisí na zadaných kritériích. U běžných optických soustav se zkreslení obrazu standardně pohybuje v řádu desetin procent. Jak se ale posouvají technologie výroby, posouvají se i nároky na kvalitu a při výrobě integrovaných obvodů za pomoci fotolitografie hrají roli zkreslení v řádech tisícín procent. Je tedy nutné najít vhodnou metodu pro měření takto malých zkreslení. Metody, běžně používané jsou pro tuto aplikaci nedostatečné a je třeba najít metodu, která kombinuje metody optické s numerickými.

1. Zkreslení

Jedná se o monochromatickou vadu lineárního zobrazení, která vzniká při zobrazení mimoosových bodů předmětu úzkými svazky paprsků. Zkreslení způsobuje, že se bod zobrazí jako bod, ale přímka už nikoli jako přímka, ale jako křivka. Dochází k němu vlivem různě velkého zvětšení obrazu ve středu a na okraji zobrazovací roviny. Zkreslení, nebo-li zhroucení kresby je tedy patrné směrem ke krajům obrazu.



Obr. 1: zkreslení vyjádřené geometrickou optikou

YH.....hlavní paprsek

X,Y.....předmětové body

Y_0'ideální obrazový bod

Y'bod, do něhož se uchýlí paprsek po průchodu čočkou

$\Delta y' = Y_0'Y'$odchylka

τ, τ'úhel určující vzdálenost předmětového bodu od optické osy (dopadový úhel)

1.1. Vznik a průběh zkreslení

Hlavní paprsek YH světelného svazku protne po průchodu optickou soustavou paraxiální obrazovou rovinu v bodě Y_0' . Tento bod není totožný s ideálním obrazovým bodem Y_0' . Mezi ideálním obrazem a obrazem, který se skutečně vytvoří je odchylka $\Delta y'$. Čím dále od optické osy leží předmětový bod Y, tím větší je odchylka. Zkreslení je tedy vytvořeno působením

výsledné odchylky. Příčinou zkreslení je rozdílná velikost příčného zvětšení v celém obrazovém poli. Tedy vnější části předmětu jsou zvětšeny více nebo méně než vnitřní.

1.2. Numerický popis zkreslení

Zkreslení obecně není symetrické v tangenciální a sagitální rovině, takže se pro jeho popis používá vzorec Brownova modelu zkreslení, díky kterému je také možné zkreslení korigovat v obou rovinách.

$$X' = X_0(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_2(r_2 + 2 X_0^2) + 2P_1 X_0 Y_0)(1 + P_3 r_2 + P_4 r^4 + \dots) \quad (1.1)$$

$$Y' = Y_0(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r_2 + 2 Y_0^2) + 2P_2 X_0 Y_0)(1 + P_3 r_2 + P_4 r^4 + \dots) \quad (1.2)$$

kde:

(X', Y') = zkreslený obraz bodu, který je promítán na obrazové rovině pomocí zvoleného objektivu,

(X_0, Y_0) = nezkreslený obraz bodu zobrazený ideální dírkovou komorou ,

(X_c, Y_c) = předpokládaný hlavní bod,

$K_n = n^{\text{th}}$ radiální koeficient zkreslení,

$P_n = n^{\text{th}}$ tangenciální koeficient zkreslení,

$$r = \sqrt{(X_0 - X_c)^2 + (Y_0 - Y_c)^2} \quad [1]$$

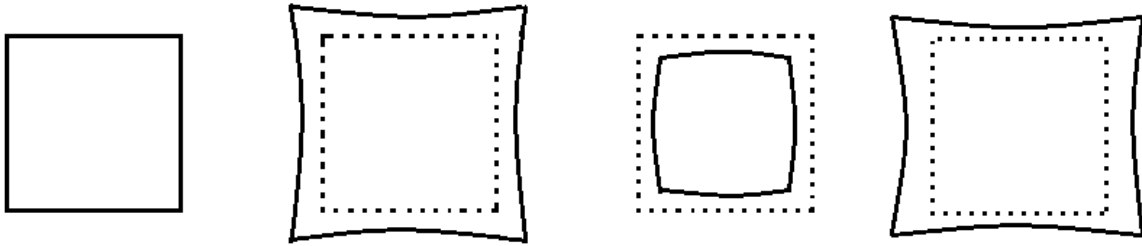
1.3. Kladné a záporné zkreslení

Zkreslení optických systémů popsané pouze pomocí vztahů

$$X' = X_0(1 + K_1 r^2), \quad Y' = Y_0(1 + K_1 r^2) \quad (1.3)$$

bez vyšších řádů označujeme jako jednoduché zkreslení a popisujeme ho jako kladné nebo záporné zkreslení.

Pokud odchylka zvětšení Δy roste se vzdáleností od osy, pak přímka předmětové roviny neprotne optickou osu a zobrazí se jako křivka obrácená konvexní stranou k optické ose. V tomto případě se jedná o *kladné* neboli *poduškové* zkreslení. Zmenšuje-li se tato odchylka, dochází ke zkreslení zápornému a křivka je obrácená konkávní stranou k ose – *záporné* neboli *soudkovité* zkreslení. U spojky je za určitých podmínek zkreslení poduškové a u rozptylek soudkové. Liší-li se zvětšení ve dvou kolmo k sobě stojících meridiánech, např. v horizontálním je o stálou hodnotu větší než ve vertikálním, mluvíme o *anamorfotickém* zobrazení. Grafické znázornění těchto typů zkreslení je uvedeno v Obr.2.



Obr. 2: Zleva doprava – původní předmět, poduškové zkreslení, soudkovité zkreslení, anamorfotické zobrazení

Zkreslení z můžeme vyjádřit také jako rozdíl skutečného zvětšení m a paraxiálního zvětšení m_0 , vztazeným ke zvětšení m_0 .

$$z = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \% = \frac{y' - y_0'}{y_0'} \cdot 100 \% = \frac{\Delta y'}{y_0'} \cdot 100 \% \quad (1.3)$$

Kde:

$$m = \frac{y'}{y} \quad \text{a} \quad m_0 = \frac{y_0'}{y}$$

yvelikost předmětu

y'skutečná velikost obrazu

y_0'velikost obrazu určeného vztahy pro paraxiální prostor [2]

2. Měření zkreslení

2.1. Základní způsob měření

Obecně se pro hodnocení zkreslení optických systémů zařazuje jako zobrazovaný předmět známá struktura. Tento předmět může mít podobu rovnoběžných čar, mřížky a nebo rastru bodů. Je potřeba zmínit, že lineární struktury orientované v jednom směru mohou být použity pouze pro rotačně symetrické systémy. Pro rotačně nesymetrická zkreslení je nutné použít jako zobrazovaný předmět lineární struktury navzájem kolmé a nebo rastr bodů.



Obr. 3: Lineární mřížka Edmund Optics [3]

V měřicí sestavě senzor (například CCD kamera) zaznamenává obraz přímo v zobrazovací rovině. Pokud toto nelze, musí být do sestavy začleněný dodatečný systém tak, aby zobrazovaný předmět vyplnil plochu senzoru. Člen ale musí být pečlivě kalibrován, kvůli kompenzaci vlastních zbytkových chyb z důvodu zkreslení. [4]

V našem případě, kdy měřená optická soustava zobrazuje z konečna do konečna nebyl takový člen potřebný.

Přímou detekcí zkresleného obrazu prostřednictvím CCD detektoru je možné určit zkreslení v řádech 0,1%. Podle zdroje [5], je možné při použití subpixelových algoritmů, detekovat 0,01% - 0,0005% zkreslení. Jako možné způsoby těchto řešení, jsou zde uvedeny moiré a korelační metody.

2.2. Korelační metoda s využitím periodické struktury

V našem měření jsme se zaměřili na měření se sinusovou (později i čtvercovou) maskou. Masky se sinusovou strukturou hrají enormní roli v korelačních technikách, protože při jejich promítání je snadné určit relativní fázový posun pro každý pixel, zatímco v obecném případě lze určit pouze korelační maxima. [6]

Pro vyhodnocení získaných obrazů periodických testů se dají použít algoritmy, které se běžně používají v interferometrii. V našem případě jsme zvolili Carrého algoritmus, který je popsán v následující kapitole.

3. Algoritmus pro vyhodnocení

Pro vyhodnocení jsme zvolili numerický algoritmus, kterým se vyhodnocuje obraz předmětu vytvořený sestavou. Popsaný algoritmus se běžně používá v interferometrii, ale díky zvolenému zobrazovanému předmětu je použitelný i pro tuto aplikaci.

3.1. Carré algoritmus

Zvolili jsme Carrého algoritmus (Carré, 1966). Tento algoritmus je čtyřkrokový, ale namísto přesné hodnoty fázového posunutí, která je podmínkou pro řadu vyhodnocovacích algoritmů, se referenční fázový posun mezi měřeními uvažuje jako neznámý a je řešen v analýze. Tato metoda rozposunutí obrazu je výhodná právě z toho důvodu, že přesnost posunutí je omezená velikostí pixelů.

Mezi jednotlivými kroky je předpokládán fázový posun 2α , takže hodnoty referenčních fází jsou [7]:

$$\delta i = -3\alpha, -\alpha, \alpha, 3\alpha; \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.1)$$

Tyto čtyři hodnoty jsou zvoleny tak, aby vznikl co nejjednodušší výraz. Čtyři naměřené intenzitní obrazce jsou pak popsány pomocí rovnic:

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\Phi(x, y) - 3\alpha] \quad (3.2)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\Phi(x, y) - \alpha] \quad (3.3)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\Phi(x, y) + \alpha] \quad (3.4)$$

a

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\Phi(x, y) + 3\alpha] \quad (3.5)$$

Tato soustava čtyř rovnic obsahuje čtyři neznámé. Řešení pro posun referenční fáze lze zjistit rozšířením těchto čtyř rovnic a použitím trigonometrické identity pro funkce sinus nebo cosinus 3α :

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Tato rovnice může být řešena v každém bodě měření, takže i referenční fázový posun $2\alpha(x, y)$ může být určen v každém bodě.

Pak řešení fáze v každém bodě je:

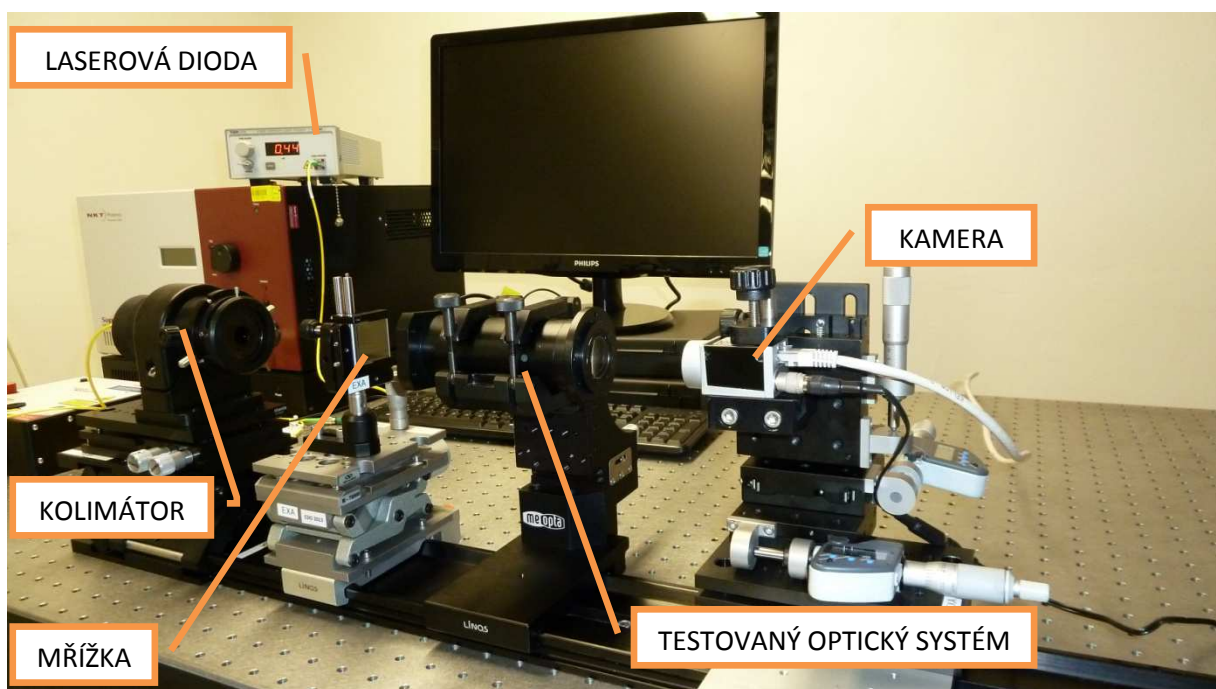
$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \tan[\alpha(x, y)] \frac{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\} \quad (3.7)$$

4. Experimentální ověření

Pro experimentální ověření jsme se zaměřili na optické systémy, zobrazující z konečné vzdálenosti, opět do konečné vzdálenosti.

4.1. Sestava experimentu

Pro měření jsme použili vícero uspořádání sestavy, pro ověření vlivu jednotlivých součástí, na přesnost měření. Prvním proměnným členem v sestavě byl samotný zdroj záření. Pro experiment jsme měli k dispozici laserovou diodu Thorlabs o vlnové délce 633 nm. Dalším členem sestavy byl kolimátor a jako alternativu jsem použila integrační kouli. Pro měření s kolimátorem jsme použili navíc difuzér, který jsme zařadili před zobrazovaný předmět pro ověření vlivu koherence a směrovosti záření. Jako zobrazovaný předmět jsme použili dvě amplitudové mřížky s rozdílnou přesností. Jako první méně přesný test amplitudové sinusové mřížky Applied Image o frekvenci 20 čar/mm a chybou uváděnou výrobcem $\pm 1 \mu\text{m}$ a jako přesnější alternativu amplitudovou čtvercovou mřížku od firmy Pyser SGI o frekvenci 10 čar/mm a udávanou chybou $\pm 0,25 \mu\text{m}$, což byl nejpřesnější test, jaký se podařilo na trhu objevit. Jako další byl v sestavě zařazený testovaný optický systém, který je výrobkem Meopty. Posledním potřebným prvkem sestavy je detektor. V mém případě CMOS kamera Basler s velikostí pixelu $1,67 \mu\text{m}$.



Obr. 4: Fotografie uspořádání sestavy s laserovou diodou, kolimátorem a čtvercovou mřížkou



Obr. 5: Integrační koule



Obr. 6: Difuzér[8]



Obr. 7: Kamera Basler acA3800-10gm GigE se senzorem CMOS[9]

4.2. Justáž

Sestavu jsme umístili na posuvnou lavici pro lepší možnost justáže a změnu předmětové vzdálenosti.

Při kompletaci sestavy bylo jako první nutné dostat do osy kolimátor s lavicí. Nápomocná nám byla irisová clonka kolimátoru, kterou jsme používali k přesnější justáži záření na střed

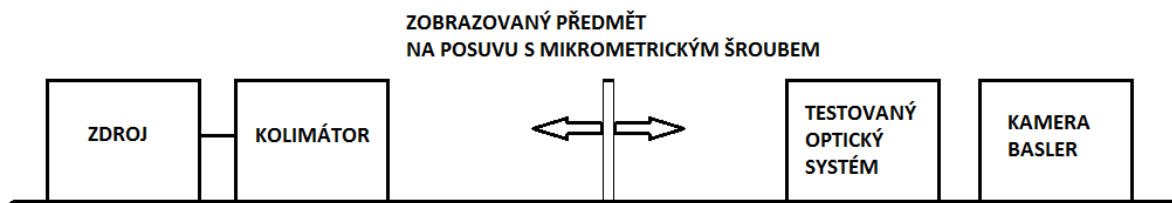
detektoru, pro rovnoměrnější prosvícení při měření. Jakmile byly tyto prvky v ose, zařadili jsme měřený objektiv. Bylo potřeba papírkem kontrolovat, zda záření vstupuje do objektivu středem vstupní pupily a následně vystupuje středem výstupní pupily a podle toho postupovat při justáži, dokud nebyly všechny prvky přiměřeně v ose. Jako další člen jsme zařadili zobrazovaný předmět. V našem případě amplitudovou čtvercovou mřížku. Tu bylo potřeba ukolmit ke kolimátoru. Nakonec jsme při vypnuté kameře zvýšili intenzitu zdroje a ověřili ukolmení senzoru k měřenému objektivu.

4.3. Podmínky měření

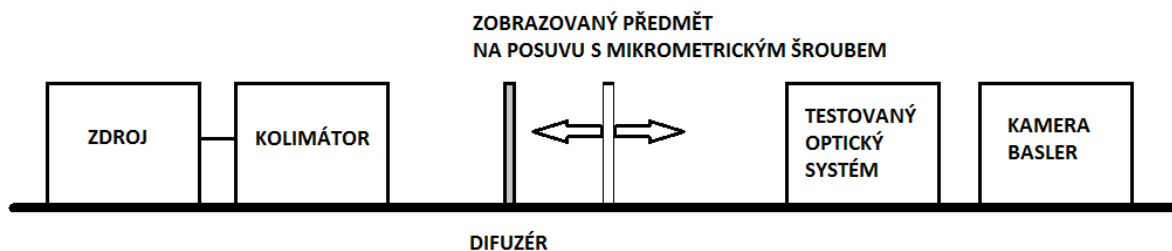
Tato experimentální sestava byla umístěna na pasivním optickém stole. Měření jsme prováděli za minimálního osvětlení kvůli eliminaci parazitního světla z okolí. Intenzitu zdroje jsme nastavovali podle dat z detektoru na optimální hodnotu tak, aby vznikl jasný obraz předmětu, ale aby zároveň nehrozilo přesvícení detektoru a jeho poškození. K ovládání expozičního času detektoru a k zobrazení a ukládání snímků sloužil software BeamAnalyzer, vyvinutý v Meoptě. K doostření kamery sloužil posuv s mikrometrickým šroubem.

4.4. Provedená měření

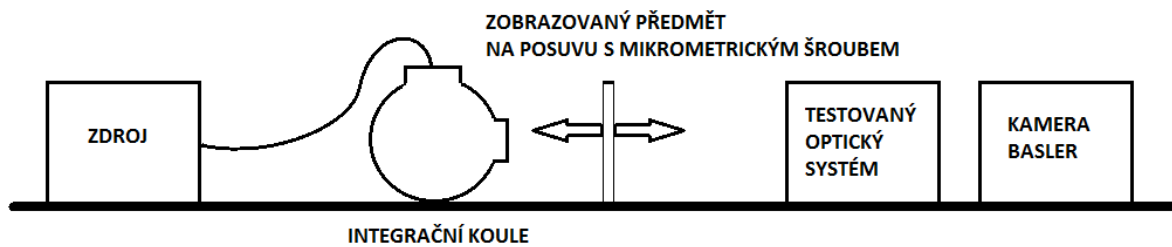
Po zkušebních měřeních jsme pro další vyhodnocování zvolili laserovou diodu a provedli měření v předmětových rovinách 70, 80, 90 a 95 mm pro sestavy:



Obr. 8: Sestava s kolimátorem



Obr. 9: Sestava s kolimátorem a difuzérem



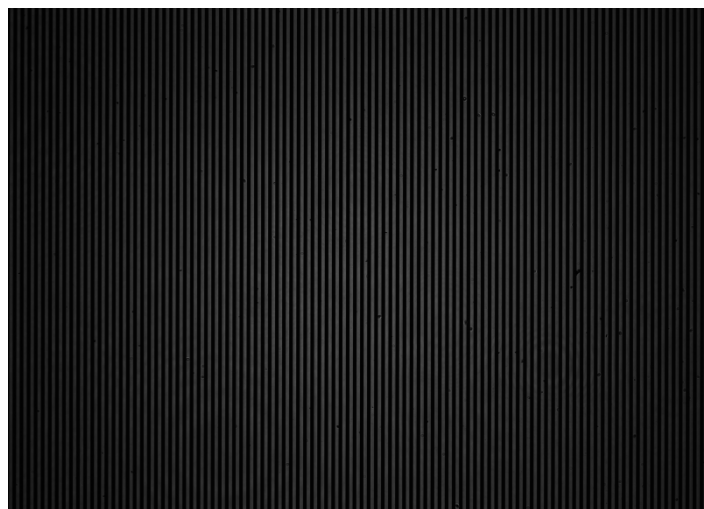
Obr. 10: Sestava s integrační koulí

4.5. Zpracování výsledků

Snímky získané měřením jsme dále zpracovali numericky pomocí Carrého algoritmu (software Mathematica).

Vyhodnocení snímků proběhlo v následujících krocích:

- 1) Načtení snímku ve formátu .bmp.



Obr. 11: Snímek získaný sestavou s kolimátorem pro zobrazovací rovinu 70 mm.

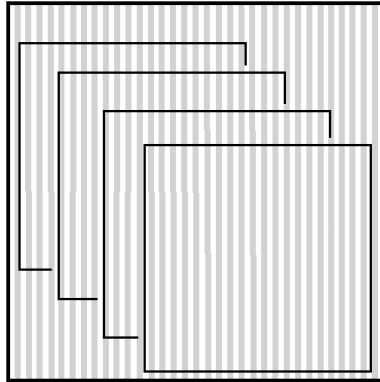
- 2) Filtrování vysokofrekvenčního šumu ve fourierovském spektru. Proveďte se Fourierova transformace snímku, následuje vyříznutí prvního maxima od středu pomocí dostatečně velké gaussovské masky, poté se provede zpětná Fourierova transformace.



Obr. 12: Fourierovská transformace získaného snímku a vyříznutí pomocí gaussovské masky.

- 3) Fitování středové části prostředního řádku funkcí sinus.

4) Rozposunutí obrázku na čtyři kopie posunuté přibližně o čtvrtinu periody (původně se posun dělal fyzicky mikrometrickým posunem kamery v obrazové rovině ale výsledky byly stejné).



Obr. 13: Schématické rozposunutí obrazu.

5) Další vyhodnocení zatím jen po řádcích.

6) Výpočet fáze pomocí Carrého algoritmu (získám fázi v rozmezí $0-2\pi$).

7) Navázání fáze (Phase Unwrapping).

8) Inverze souřadnic – x-osa: vypočtená data, y-osa: data daná kamerou – pořadí pixelu *velikost pixelu.

9) Fitování dat funkcí odpovídající předpokládanému zkreslení, které je v našem případě dané (1.3). Tangenciální koeficienty zkreslení (P_n) jsou vyloučené justáží, zůstává tedy jen k_1 , dané optickým designem.

5. Vyhodnocení

5.1. Výsledky měření

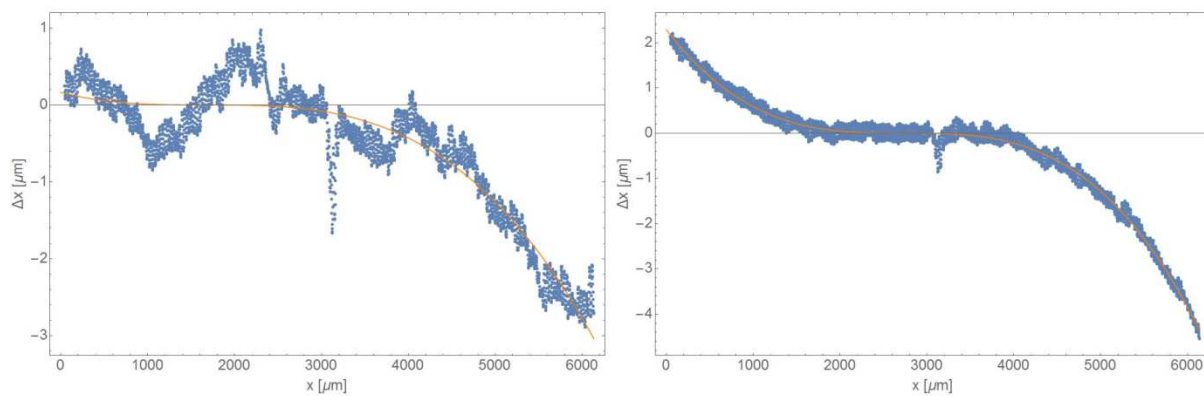
Hodnoty uvedené v Tab.1 porovnávají hodnoty koeficientu k_1 dané designem sestavy a reálně naměřené hodnoty na měřící sestavě kolimátoru s difuzérem a sestavě s integrační koulí. Jako další jsou zde uvedeny směrodatná odchylka a relativní zkreslení.

Předmětová vzdálenost [mm]		70	80	90	95
Z optického designu	Koeficient k_1 [10^{-4} mm^{-2}]	-1,088	-0,73	-0,389	-0,219
Difuzér	Koeficient k_1 [10^{-4} mm^{-2}]	-1,12	-0,72	-0,6	-0,33
	Směrodatná odchylka [10^{-4} mm^{-2}]	0,011	0,027	0,013	0,016
	Relativní zkreslení [%]	-0,1	-0,07	-0,06	-0,03
Integrační koule	Koeficient k_1 [10^{-4} mm^{-2}]	-1	-0,94	-0,45	-0,31
	Směrodatná odchylka [10^{-4} mm^{-2}]	0,013	0,04	0,011	0,017
	Relativní zkreslení [%]	-0,09	-0,087	-0,04	-0,03

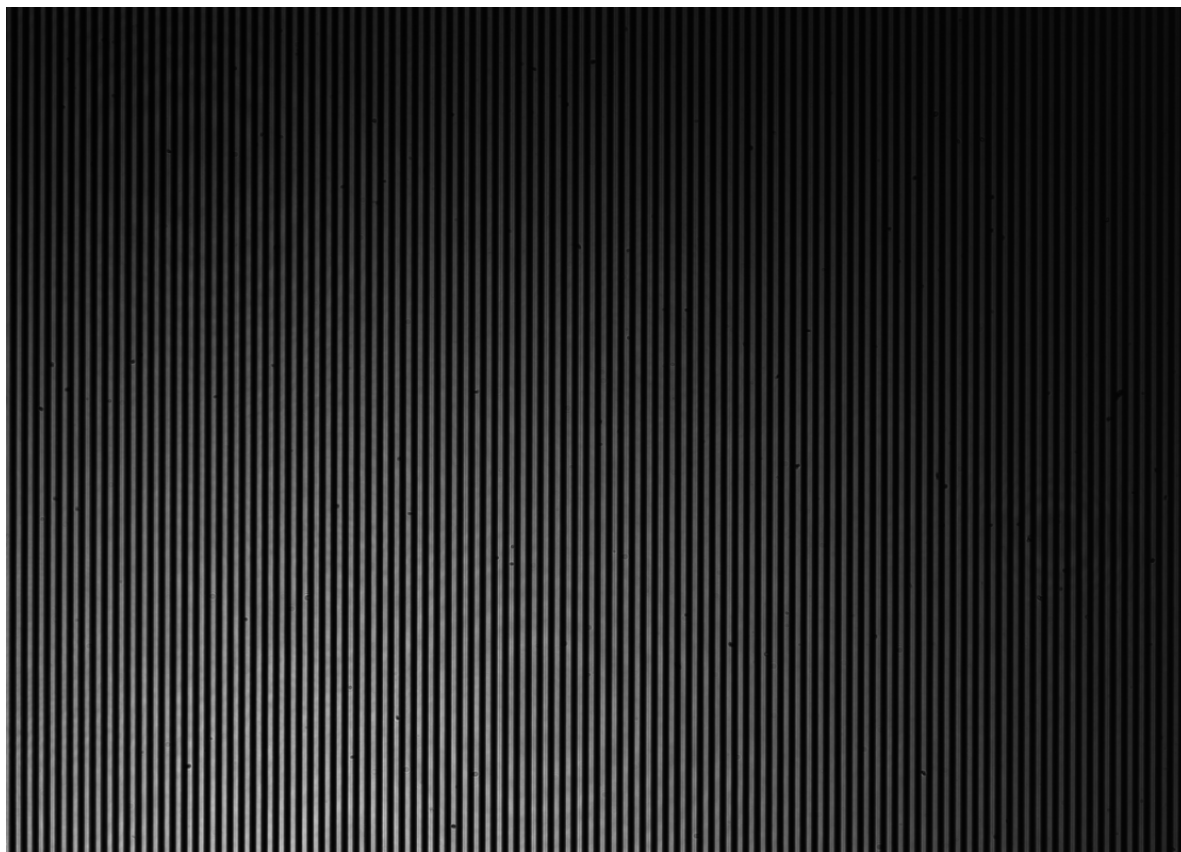
Tab. 1: Výsledky pro dvě sestavy

5.2. Porovnání výsledků při použití různých sestav

Po sadě měření výsledky pro sestavu pouze s kolimátorem pro velmi nepřesné výsledky do vyhodnocení nezahrnuji. Jak je vidět na Graf 1, chyby měření jsou pro sestavu kolimátoru s difuzérem (vpravo) mnohem menší, než pro sestavu pouze s kolimátorem (vlevo). Důvodem nepřesností byla pravděpodobně částečná koherence světla, která do výsledného obrazu zaváděla parazitní interferenci. Do obrazu navíc zasahovaly i rozostřené nečistoty, které byly přítomny na členech kolimátoru. Domnívám se tak, protože po zařazení difuzéru do měřící sestavy s kolimátorem byly tyto nepřesnosti ve výsledku odstraněny, stejně tak jako difrakční obrazce viditelné na Obr. 14. Další možnou příčinou nepřesností v této sestavě mohl být nekalibrovaný kolimátor, nebo špatně dotažený konektor optického vlákna. Některé snímky i přes poměrně přesnou justáž nebyly totiž rovnoměrně prosvícené (viz. Obr. 14). Kvůli gaussovskému profilu svazku však docházelo k nerovnoměrnému prosvícení i při přesné justáži. Vzniklé chyby pak zkreslovaly výsledky. Částečnou koherenci světla stejně tak efektivně narušila i integrační koule. Jak je vidět v Tab. 1 uvedené výše, hodnoty pro koeficient k_1 v rámci možností odpovídají teoretickým hodnotám vycházejícím z optického designu sestavy a pro hodnoty relativního zkreslení jsme dosáhli přesnosti v řádech setin procent.

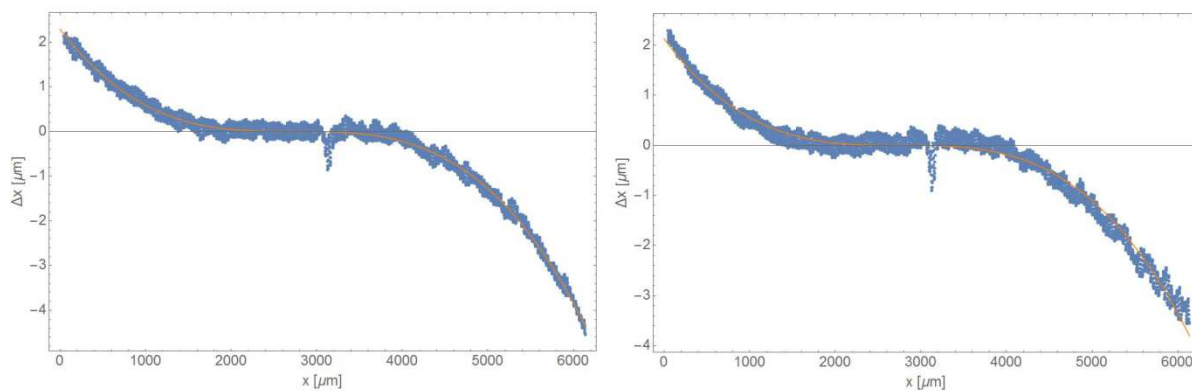


Graf 1: Porovnání zbytkového šumu pro sestavu s kolimátorem a sestavu kolimátoru s difuzérem.

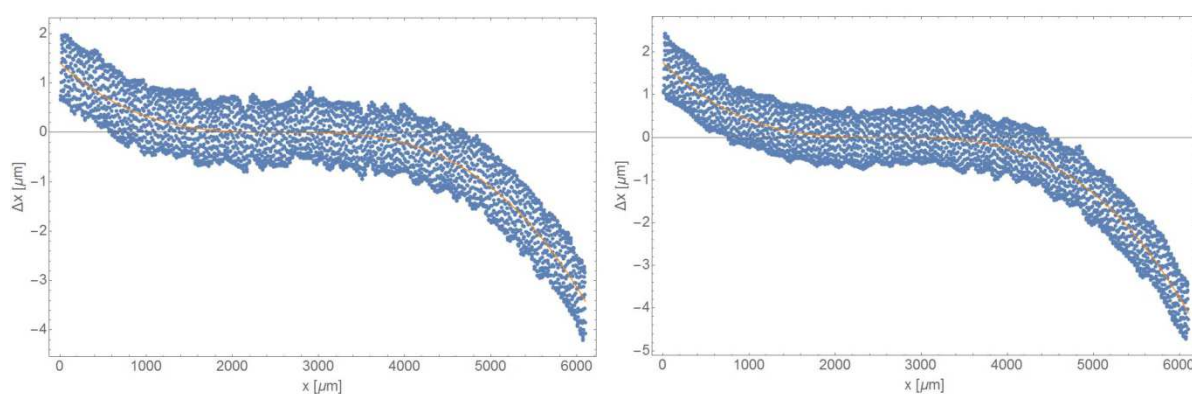


Obr. 14: Ukázka nerovnoměrného prosvětlení testu a difrakčních obrazců v sestavě s kolimátorem.

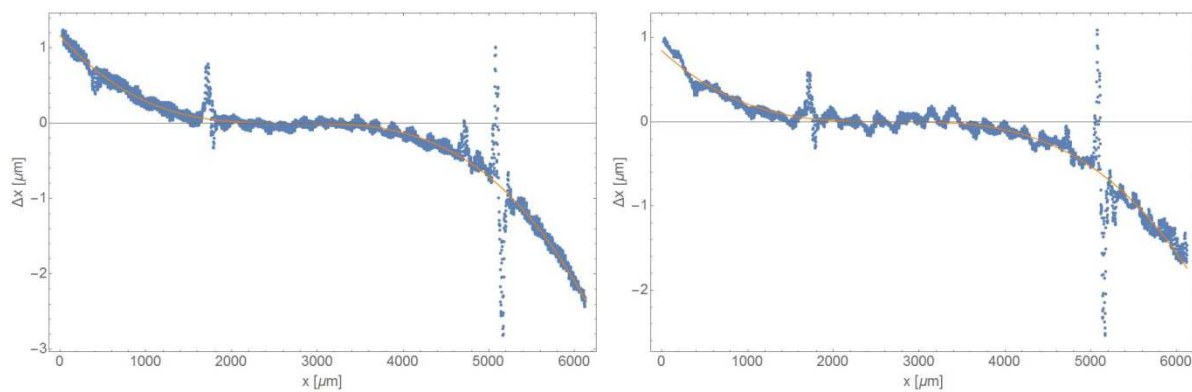
Ze zvolených sestav nemůžu pro zvolené roviny vybrat vhodnější metodu, obě se ukázaly jako velmi vhodné s poměrně shodnými výsledky. K porovnání přikládám i grafy s udávaným Δx (μm) pro zvolené roviny a sestavy kolimátoru s difuzérem a sestavy s integrační koulí.



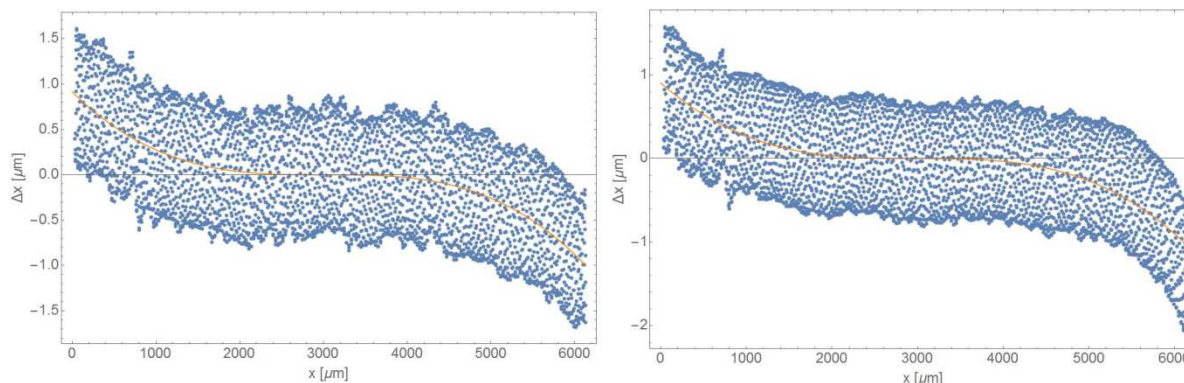
Graf 2: Porovnání pro předmětovou rovinu 70 mm.



Graf 3: Porovnání pro předmětovou rovinu 80 mm.



Graf 4: Porovnání pro předmětovou rovinu 90 mm.



Graf 5: Porovnání pro předmětovou rovinu 95 mm.

5.3. Další zdroje nepřesností

Dalším zdrojem nepřesností byl přítomný lidský faktor. Jak je vidět v Tab. 2, hodnoty zvětšení pro předmětové vzdálenosti 70, 80 a 90 mm, na rozdíl od hodnoty pro předmětovou vzdálenost 95 mm, neodpovídají hodnotám teoretickým. Měření pro předmětovou vzdálenost 95 mm bylo provedeno po nové justáži sestavy. Jak je ale vidět, rozdíl ve zvětšení mezi rovinami je konstantní, takže posun předmětu na mikrometrickém šroubu byl správný, špatné bylo odměření první předmětové vzdálenosti.

Zvětšení			
Předm.vz.	Z optického designu (ZEMAX)	Difuzér	Int. Koule
[mm]			
70	0,637	0,646	0,646
80	0,614	0,625	0,625
90	0,593	0,603	0,602
95	0,584	0,583	0,583

Tab. 2: Zvětšení měřeného optického systému.

5.4. Zhodnocení

S dostupnými metodami se nám podařilo změřit zkreslení s vyšší přesností, než na běžnou 0,1 %. Dosavadní vývoj měření ukázal, že je možnost měření dále zpřesňovat. Jednou z možností by byl lepší proces justáže, dále pak předmět s menší chybou, než použitá amplitudová mřížka a kolimátor bez nečistot na plochách optických členů. Přesnost výsledků také ovlivňovala uniformita prosvícení testu, takže zařazení integrační koule s větším průměrem by také mělo přinést zlepšení. Tuto úvahu jsem bohužel neměla možnost s dostupnými prostředky ověřit.

Závěr

Cílem této práce bylo vybrat metodu měření zkreslení a hledat způsoby zmenšení nepřesností vzniklých při měření a vyhodnocení. Jako nevhodnější metodu jsme pro další ověřování zvolili korelační metodu s použitím sinusové masky. Získané výsledky splnily naše očekávání, protože jsme se dostali s přesností měření pod 0,1 % a zároveň se během měření ukázalo, že je možné tyto metody dále zlepšovat a dosáhnout ještě vyšších přesností.

Během praktické části jsem se seznámila se způsoby experimentálního měření a způsoby využití různých komponent pro zpřesňování měření a následným zpracováním naměřených dat jsem si rozšířila znalosti práce v programu Wolfram Mathematica. Při této práci jsem si ověřila vliv lidského faktoru na přesnost měření, stejně tak jako vliv zvolených komponent.

Bakalářská práce byla motivovaná momentální prací na oddělení vývoje měřících metod ve firmě Meopta - optika, s.r.o.

Použité zdroje a literatura

[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(optics))

[2] IVO VYŠÍN, JAN ŘÍHA, Paprsková a vlnová optika, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Olomouc 2012

[3] <http://www.edmundoptics.com/test-targets/distortion-test-targets/line-grid-target/62536/>

[4] BERND DÖRBAND, HENRIETTE MÜLLER, AND HERBERT GROSS, Handbook of Optical Systems, Volume 5: Metrology of Optical Components and Systems

[5] BERND DÖRBAND, HENRIETTE MÜLLER, AND HERBERT GROSS, Handbook of Optical Systems, Volume 5: Metrology of Optical Components and Systems

[6] BERND DÖRBAND, HENRIETTE MÜLLER, AND HERBERT GROSS, Handbook of Optical Systems, Volume 5: Metrology of Optical Components and Systems

[7] DANIEL MALACARA, Optical Shop Testing, 3rd Edition

[8] <https://www.newport.com/p/10DIFF-VIS>

[9] <http://www.imrnasia.com/basler/ace.html>