

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA OPTIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měření rovinných ploch
pomocí Shack - Hartmannova senzoru**

Vypracoval:

Bc. Martin Paúr

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. RNDr. Jan Podloucký

Studijní obor:

N1701 Navazující prezenční Optika a optoelektronika

Datum odevzdání:

31. 7. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma **Měření rovinných ploch pomocí Shack – Hartmannova senzoru** jsem vypracoval samostatně, pod vedením Ing. RNDr. Jana Podlouckého a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji **Ing. RNDr. Janu Podlouckému** za odborné vedení a všechnu poskytnutou pomoc při psaní této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval za podporu poskytnutou v rámci studentské grantové soutěže projektu **IGA Moderní optika** a její aplikace, **č. PŘF – 2013 – 019** a **č. IGA_PŘF – 2014014**.

Rovněž děkuji za podporu při pořizování materiálů a dílů sestavy poskytnutou v rámci **balíčku č. 5** projektu **Centra digitální optiky, č. TE01020229**.

Obsah

1	Úvod	1
2	Přehled problematiky.....	2
2.1	Měření rovinných ploch	2
2.1.1	Optické kalibry	2
2.1.2	Fizeaův interferometr	10
2.1.3	Hartmannův test.....	12
2.1.4	Shack – Hartmannův senzor	14
3	Cíle práce.....	22
4	Materiál a metody.....	23
4.1	Použité zařízení a pomůcky	23
5	Výsledky.....	24
5.1	Návrh optické sestavy	24
5.1.1	Simulace v prostředí programu OSLO.....	24
5.1.2	Návrh mechanických komponent experimentální sestavy	30
5.1.3	Sestavení Shack – Hartmannova senzoru	33
5.2	Komunikace kamery Basler s PC a tvorba výpočetních algoritmů	34
5.3	Kalibrace a testovací měření rovinného zrcadla	38
6	Závěr.....	43
7	Seznam literatury	44
8	Přílohy.....	46

1 Úvod

Tvar optické plochy je parametrem, který zásadně ovlivňuje výslednou funkci optického prvku. Proto se měření tvaru optických ploch považuje za jednu ze základních úloh kontroly optické výroby. Díky používaným měřícím metodám jsme schopni získat informaci o odchylkách měřených ploch od požadovaných tvarů zadaných výkresovou dokumentací. Tyto odchylky vznikají vlivem nedokonalosti výrobního procesu a jejich přípustná velikost je určena tolerančními parametry.

K měření optických ploch se využívá kontaktních a bezkontaktních metod. Mezi kontaktní metody řadíme různé typy souřadnicových měřících strojů s kontaktní sondou a měření pomocí optických kalibrů, kde se využívá interference mezi přesnou plochou kalibru a plochou měřeného kusu. Mezi bezkontaktní metody řadíme interferometrické, které jsou nejpřesnější, dále souřadnicové měřící stroje s bezkontaktní sondou a také různé typy zástinových testů. U interferometrických metod využíváme několik typů interferometrů především Fizeaův a Twyman – Greenův. Zde se vyhodnocuje interference referenčního svazku a svazku, který se od měřeného kusu odrazí.

Zástinových testů pro bezkontaktní měření je celá řada. Do užšího výběru nejpoužívanějších testů můžeme zahrnout např. Foucaltův, Ronchiův, Hartmannův a Shack-Hartmannův test. Základní myšlenka těchto testů je detekce deformované vlnoplochy za přispění mechanické či optické reference. Mechanickou referencí uvažujeme desku s otvory nebo rastr mikročoček. Výhoda spočívá v jednoduchosti měřící sestavy při zachování vyhovující přesnosti měření.

Tato diplomová práce je věnována rozboru funkce, návrhu, výrobě a sestavení experimentální aparatury využívající Shack - Hartmannova senzoru k měření rovinných optických ploch. Pozornost bude věnována simulaci chodu paprsků uvnitř optické sestavy, návrhu a realizaci mechanických komponent, jak pro celkovou sestavu, tak i pro vytvoření samotného Shack – Hartmannova senzoru.

2 Přehled problematiky

2.1 Měření rovinných ploch

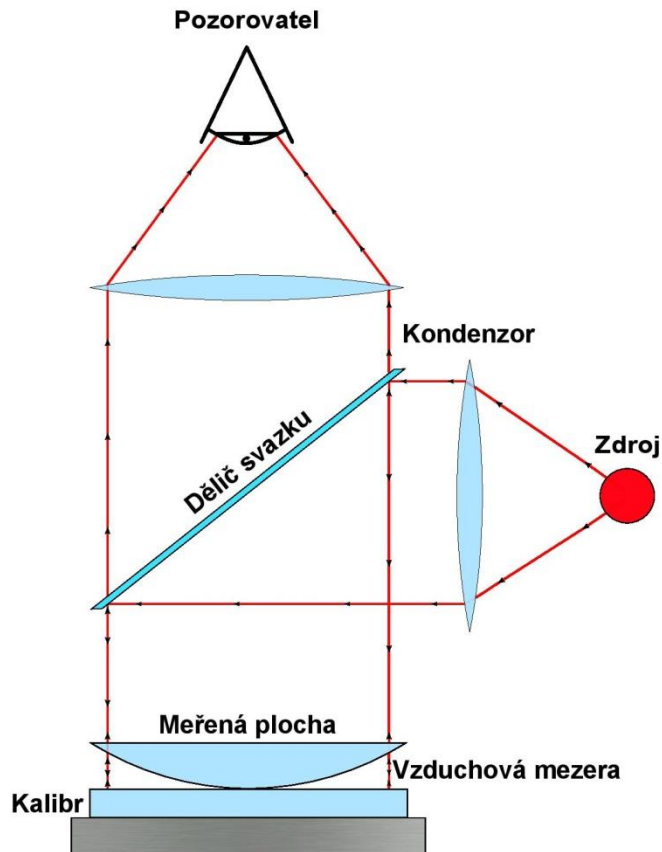
Optické prvky tvořené rovinnými plochami jsou v optických přístrojích jedny z nejrozšířenějších. Pro jejich kontrolu se využívá referenčních kalibrů, jejichž hlavní uplatnění spočívá v kontrole povrchů zrcadel, optických klínů, děličů svazku a jiných komponent. Pro měření optických ploch byla vyvinuta řada metod. Nejpřesnější interferometrické metody vytvořily podmínky pro vytvoření vysoce kvalitních optických prvků. Do popředí se dostávají i metody založené na přímém vyhodnocování tvaru vlnoplochy odražené od testované plochy, které nevyužívají interferenční prvky.

Ve výrobě a optické kontrole se tvar optických součástí posuzuje obvykle podle interferenčních proužků. Interferenční obrazec se pak ve výkresové dokumentaci charakterizuje kompaktní formou v souladu s ČSN ISO 10110 třemi čísly. První udává odchylku od jmenovitého poloměru křivosti, druhé rozdíl mezi maximální kladnou a zápornou odchylkou od optimální proložené sférické plochy (dřívější tzv. ovalita) a třetí rozdíl mezi maximální kladnou a zápornou odchylkou od optimální proložené asférické plochy. Jednotkou je polovina vlnové délky čáry e [1].

V této kapitole uvedeme základní informace o některých vybraných typech kontaktních a bezkontaktních měřících metod, jejich popis a způsob využití.

2.1.1 Optické kalibry

Tato technika měření optických ploch patří mezi zástupce kontaktních metod. Je to jedna z nejjednodušších technik, co se sestavení měřícího zařízení týče. Obecně za měření optickým kalibrem, někdy též označované jako Newtonova skla, lze považovat jakékoliv uspořádání 2 optických prvků v kontaktu, osvětlených monochromatickým nebo bílým světlem. Jako zdroj světla můžeme použít různé typy výbojek např. sodíkovou nebo rtuťovou, také můžeme využít laserového záření. Jedna z možných realizací měřící sestavy je vyobrazena na obr. č. 1. V závislosti na vzdálenosti oka pozorovatele je výhodné využít jednoduchou lupu pro lepší pozorování Newtonových kroužků [2].



Obr. č. 1: Sestava Newtonova interferometru. Studovaná sférická plocha se dotýká rovinného kalibru a je osvětlena monochromatickým zdrojem záření. Výsledný interferenční obrazec se vyhodnocuje vizuálně nebo pomocí kamery.

Při procesu optické kontroly se zkoumá tvar vyrobené plochy porovnáním s referenční plochou kalibru. Ke správné kontrole rovinnosti optických prvků je tedy potřeba optická referenční plocha známé kvality. Každá taková plocha musí splňovat příslušné normy a během používání je nutné ji pravidelně nechat kalibrovat. Tato nutnost vyplývá z nároků na přesnost měření tvarových odchylek kontrolovaných ploch. Standardně se požadovaná měřitelná odchylka (tj. citlivost měření) pohybuje okolo $\lambda/10 - \lambda/100$, kde λ je vlnová délka použitého světla. Proto musí kalibr zaručovat minimálně tuto hodnotu přesnosti. Jak jsme již zmiňovali, tak během používání kalibru dochází k jeho opotřebování, případně se může poškodit nebo podlehnout jiným změnám. Kvůli tomu se přesnost měření může zhoršit. Jednou z možností jak ověřit přesnost referenční plochy je porovnat ji s jiným kalibrem nebo provést jiný typ měření [3].

Dalším nezbytným vybavením je monochromatický zdroj záření. Použití bílého polychromatického světla je v některých případech také možné, ale za doprovodu nepříjemného efektu duhy. Tento efekt snižuje kontrast sousedních interferenčních proužků a ztěžuje jejich následné vyhodnocení. U výbojek je obvykle potřeba pomocí absorpčních nebo interferenčních filtrů vybrat světlo vyzařované na jedné spektrální čáře. Pro celkové zlepšení

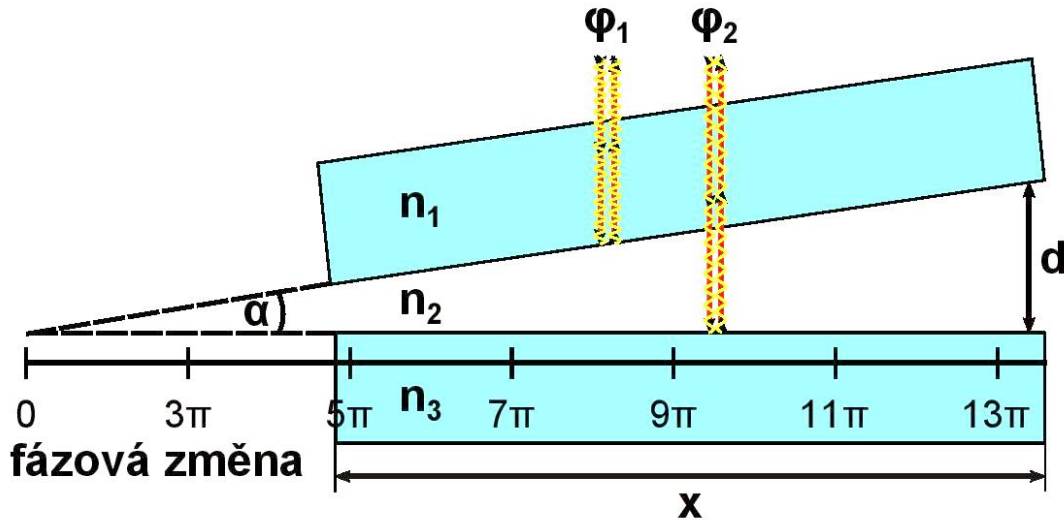
pozorovacích podmínek je důležité, jednak zajistit kolmý osvit měřicí části, jednak odstínit okolní světlo kvůli parazitním odrazům [3].

Před samotným měřením, resp. přiložením měřeného kusu ke kalibru, je zapotřebí odstranit z obou kusů jakýkoliv prach a jiné nečistoty. Jestliže by mezi skly zůstaly prachové částice, dojde ke snížení přesnosti měření a vytvoření lokálních interferenčních obrazců. Navíc může dojít k poškození optických ploch. K čištění se nejčastěji používají různé typy rozpouštědel. Mimo čistotu je důležité, aby jednotlivé prvky měly stejnou teplotu. Referenční plocha bývá často vyrobena z materiálu vykazujícího nízkou teplotní roztažnost např. pyrexu nebo taveného křemene. Na druhou stranu měřený kus může být vyroben z jakéhokoliv optického skla. U takového prvku poté teplotní změny silně ovlivňují výsledný interferenční obrazec [3].

Při měření se mezi plochami nachází tenká vzduchová vrstva. Její tloušťka dosahuje nanejvýš několik jednotek vlnové délky dopadajícího světla. Díky této vrstvě o jiném indexu lomu, než má optický materiál, jsme schopni vytvořit dva odražené svazky a z jejich vzájemné interference zjistit odchylky měřené plochy způsobené výrobním procesem.

Cílem takové kontroly je zjištění nerovnoměrností této vzduchové vrstvy pozorováním Newtonových kroužků. Tyto útvary vznikají následkem interference vlny odražené od měřené plochy a vlny odražené od plochy kalibru. V ideálním případě, kdy by vyrobená plocha byla dokonalá a oba kusy by na sebe dokonale doléhaly, tato vrstva vymizí a s ní i efekt interference. V opačném případě, např. opracování na sférický tvar s rozdílnou křivostí, dochází ke zvětšení vrstvy směrem k okrajům nebo ke středu měřeného prvku a tím i ke změně tvaru interferenčních obrazců [2].

Pro popis vzniku Interferenčních proužků se při měření rovinných ploch může uvažovat klínovitá vzduchová vrstva podobně, jak je vyobrazeno na obrázku č. 2. Oba povrchy svírají mezi sebou úhel α , který je velmi malý. Lineární změna velikosti vzduchové vrstvy způsobí změnu optické dráhy procházejícího svazku, který se následně odráží od povrchu kalibru a vrací se po stejné dráze zpět. Vlivem jiného indexu lomu skla a vzduchové vrstvy nastane při tomto odrazu změna fáze paprsku o π . Tato změna nastane vždy při odrazu na rozhraní dvou prostředí, kdy index lomu prvního prostředí je menší než index lomu prostředí druhého. Při následné interferenci těchto dvou svazků dochází ke skládání intenzit elektrického pole elektromagnetické vlny, která nese informaci o rozdílu optických drah v rámci měřeného kusu.



Obr. č. 2: Popis vzniku interferenčních proužků při měření rovinné plochy. Kde φ_1 a φ_2 odpovídají změně fáze 1. a 2. paprsku, n_1 , n_2 a n_3 jsou indexy lomu a d je tloušťka vzduchové vrstvy v závislosti na vzdálenosti x od hrany měřeného kusu. Indexy lomu uvažujeme v pořadí $n_3 > n_1 > n_2$. Fázová změna vytyčuje polohy tmavých interferenčních proužků.

Konstruktivní a destruktivní interference se projeví jako světlé a tmavé proužky, které jsou od sebe vzdáleny o konstantní hodnotu. Budeme uvažovat 2 svazky, z nichž jeden se odrazí od měřené plochy se změnou fáze $\varphi_1 = 0$ a druhý, který se po průchodu tenkou vzduchovou vrstvou odrazí od plochy kalibru se změnou fáze $\varphi_2 = (4\pi d n_2/\lambda) + \pi$. Rozdíl fáze těchto dvou paprsků můžeme zapsat jako:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2d n_2 + \pi, \quad 2.1-1$$

kde velikost vzduchové mezery d můžeme vyjádřit jako $d = x \tan(\alpha)$. Pro malé hodnoty úhlů můžeme provést aproximaci $\tan(\alpha) \approx \alpha$ a tedy:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\alpha x n_2 + \pi [2]. \quad 2.1-2$$

Poloha interferenčních proužků je dána právě tímto rozdílem fáze. Pro tmavé proužky odpovídá fázový posun π . To můžeme obecně zapsat pomocí koeficientu m jako $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$, kde platí, že $m \in \mathbb{N}$. Po dosazení do (2.1-2) získáme rovnici

$$m\lambda = 2\alpha x n_2. \quad 2.1-3$$

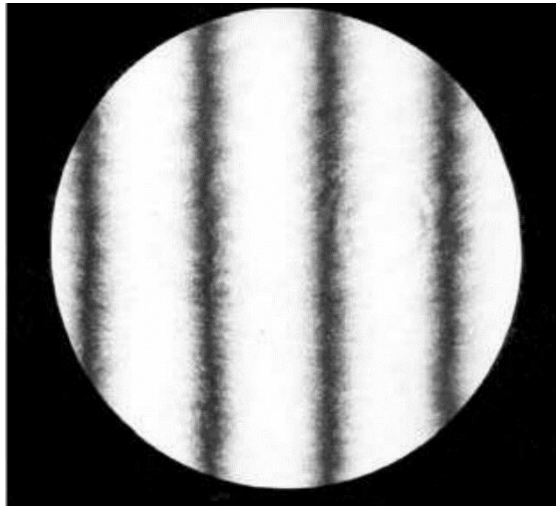
Pro světlé proužky je fázový posun roven nule. Obecný zápis za pomoci stejného koeficientu jako v předchozím případě bude $\Delta\varphi = 2m\pi$ a pokud opět dosadíme do vzorce (2.1-2) dostaneme

$$m\lambda = 2\alpha x n_2 + \frac{\lambda}{2} \quad 2.1-4$$

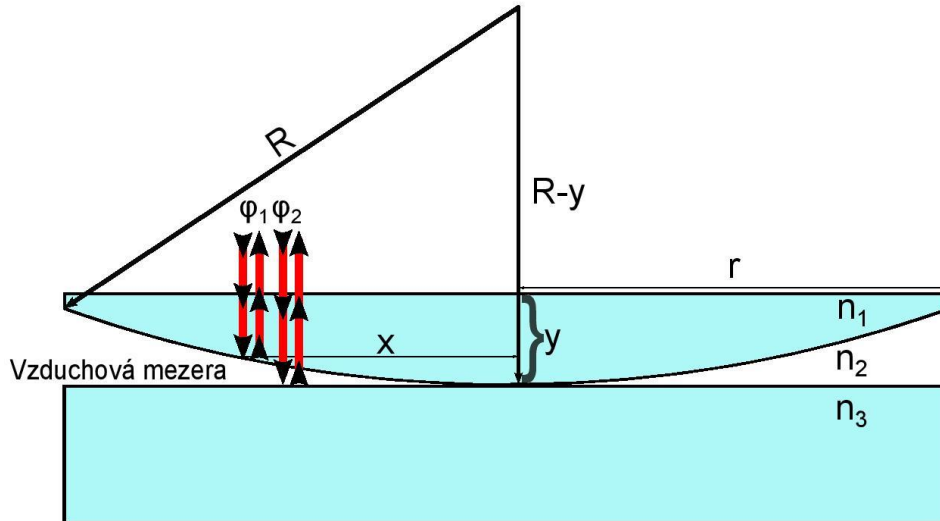
Z rovnic (2.1-3) a (2.1-4) můžeme také zjistit vzdálenost mezi jednotlivými proužky Δx , která činí:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha n_2} \quad 2.1-5$$

Jak takový interferenční obrazec vypadá, můžeme vidět na obr. č. 3. Tento interferenční obrazec odpovídá případu, kdy se rovinným kalibrem měří rovinná plocha. V běžné praxi se v průběhu procesu výroby požadovaná plocha pravidelně kontroluje. V průběhu výroby odpovídá tvar plochy sférické ploše s velkým poloměrem. Při diagnostice takové plochy za předpokladu, že bude sférická, zjistíme, že Newtonovy kroužky budou mít tvar soustředných kružnic. Takový interferenční obrazec je vyobrazen na obr. č. 5.



Obr. č. 3: Interferenční obrazec pro kvalitní rovinnou plochu. Jednotlivé proužky jsou od sebe ekvidistantně vzdáleny. Na obrázku jsou patrné lokální interferenční struktury způsobené prachovými částicemi. (Převzato z [2])



Obr. č. 4: Popis vzniku interferenčních proužků při měření sférické plochy. Kde φ_1 a φ_2 odpovídají změně fáze 1. a 2. paprsku, n_1 , n_2 a n_3 jsou indexy lomů, y je tloušťka vzduchové vrstvy v závislosti na vzdálenosti x od středu a poloměru R měřené plochy a r je poloměr měřeného kusu. Indexy lomu uvažujeme v pořadí $n_3 > n_1 > n_2$.

Stejně jako v případě rovinných ploch můžeme pro jednoduchost uvažovat 2 svazky, které spolu interferují. Možné uspořádání je zobrazeno na obr. č. 4. První zůstává po odrazu od kulové plochy bez změny fáze $\varphi_1 = 0$ a u druhého po průchodu tenkou vzduchovou vrstvou a odrazu od plochy kalibru nastane změna fáze $\varphi_2 = (4\pi y n_2 / \lambda) + \pi$. Rozdíl fáze těchto dvou svazků můžeme zapsat obdobně jako (2.1-1), jen s tím rozdílem, že parametr d , který zodpovídá tloušťce vzduchové vrstvy v daném bodě, nahradíme parametrem y , jak je naznačeno na obrázku č. 4. Velikost této vzduchové vrstvy můžeme zapsat pomocí trojúhelníku o stranách R ($R-y$) a x a využití předpokladu malé vrstvy:

$$y = R - R \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right)} \approx R - R \left(1 - \frac{x^2}{2R^2}\right) = \frac{x^2}{2R}. \quad 2.1-6$$

Výsledný rozdíl fází můžeme tedy zapsat:

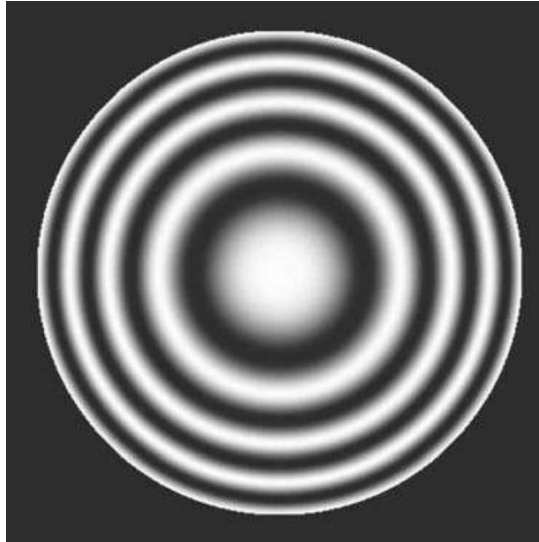
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2}{R} n_2 + \pi. \quad 2.1-7$$

Polohu tmavých interferenčních proužků určíme opět jako rozdíl fáze o lichý násobek π . V obecném tvaru za pomoci koeficientu $m \Delta\varphi = (2m + 1)\pi$, kde platí, že $m \in \mathbb{N}$. Po dosazení do (2.1-7) získáme rovnici

$$m\lambda = \frac{x^2}{R} n_2 \Rightarrow x = \sqrt{\frac{m\lambda R}{n_2}} \quad 2.1-8$$

Světlé interferenční proužky vznikají v místech, kde fázový rozdíl je roven nule. Všeobecný zápis odpovídá celistvému násobku 2π , tedy $\Delta\varphi = 2m\pi$. Rovnice polohy těchto proužků potom vypadá

$$m\lambda = \frac{x^2}{R}n_2 + \frac{\lambda}{2} \Rightarrow x = \sqrt{\frac{\lambda R}{n_2}(m - 1)}. \quad 2.1-9$$

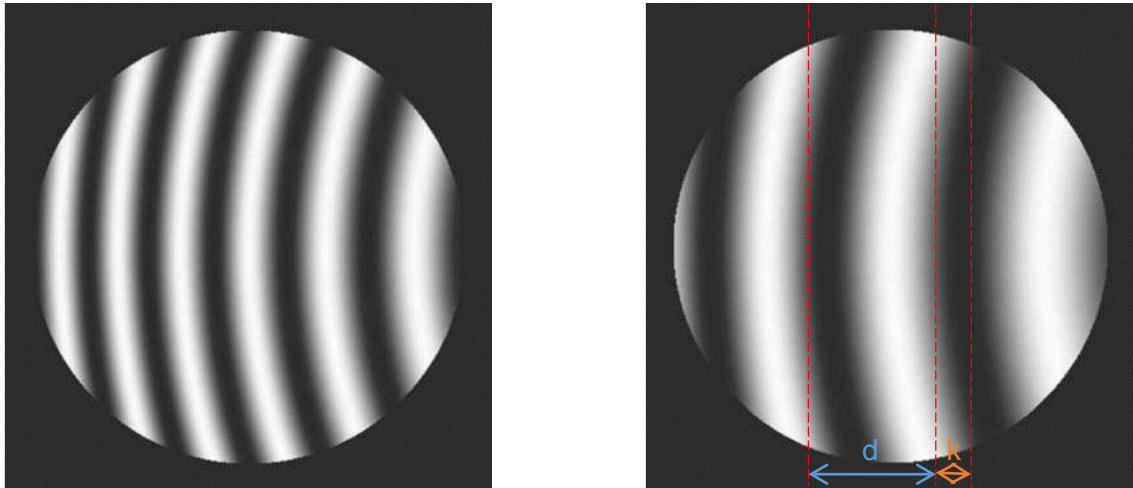


Obr. č. 5: Interferenční obrazec pro sférickou plochu. Jednotlivé proužky jsou od sebe různě vzdáleny. Maximální odchylna od roviny činí 2λ (Převzato z [2]).

Při studiu interferenčních proužků se snažíme určit odchylnu měřené plochy s co největší přesností. V případě, že obrazec obsahuje příliš malé nebo příliš velké množství proužků, ať už rovných v případě rovinné plochy nebo kruhových v případě sférické plochy, nezískáme uspokojivou informaci o tvaru měřené plochy. Zjistíme pouze velikost vzduchové vrstvy mezi kusy. Z rovnic (2.1-1) a (2.1-8) vyplývá, že detekcí pouze jednoho celého interferenčního kroužku získáme maximální odchylnu měřené plochy rovnu $\lambda/2$. Pro získání informace o chybě menší než $\lambda/2$ je potřeba posunout střed symetrie interferenčních proužků a zredukovat jejich počet na minimum pomocí tlakových bodů nacházejících se na měřeném kusu. Touto procedurou získáme části interferenčních proužků, jejichž počet závisí na přiloženém tlaku. Příklady dvou interferenčních vzorů pro dvě různé velikosti vzduchových mezer jsou zobrazeny na obrázku č. 6 [2].

Tímto postupem lze také jednoduše ověřit konvexnost a konkávnost měřeného kusu. V případě, že zatlačíme na okraji vrchního kusu a střed symetrie interferenčních proužků se začne posouvat ve směru stlačení, znamená to, že se jedná o konvexní plochu. V případě konkávní plochy se bude střed symetrie posouvat směrem od tlakového bodu. Proces určení typu měřeného povrchu lze také upravit na stlačení kusu okolo středu symetrie. Pokud je

měřená plocha konvexní, bude interferenční obrazec mít uprostřed tmavý proužek. Při stlačení se tmavé proužky začnou pohybovat směrem ke krajům. V případě konkávní plochy bude interferenční obrazec uprostřed světlý a při stlačení se budou tmavé proužky pohybovat směrem ke středu [2].



Obr. č. 6: Interferenční obrazce pro různě veliké vzduchové mezery. V obou případech byl proveden přitlak na pravé straně sférického kusu s dlouhým rádiusem. Velikost vzduchové mezery $\lambda/4$ (vlevo) a $\lambda/8$ (vpravo). Obrázek vpravo obsahuje parametry pro výpočet maximální deviace plochy od roviny (převzato z [2]).

V běžné optické výrobě se vyrábějí rovinné optické prvky v rozsahu odchylek od 2λ až do $\lambda/10$, špičkově pak $\lambda/100$. K určení odchylky testované plochy z interferenčních obrazců za použití Newtonova interferometru se používá řada způsobů. Obecně když odchylka neklesne pod hodnotu $\lambda/10$, jsme ji schopni vyhodnotit vizuálně. V případě menších odchylek je nutné provést fotografický snímek nebo použít CCD kameru. Náklon měřeného kusu se snažíme nastavit tak, aby interferenční obrazec obsahoval přiměřený počet interferenčních proužků. Z jejich vzdálenosti mezi sebou a jejich zakřivení jsme poté schopni zjistit příslušnou odchylku od ideální roviny. Za předpokladu, že vzdálenost dvou sousedních proužků je $\lambda/2$ a maximální deviace kroužku k/d , kde d odpovídá vzdálenosti dvou proužků a k je odchylka interferenčního proužku od ideálního proužku, lze výslednou odchylku zapsat následovně:

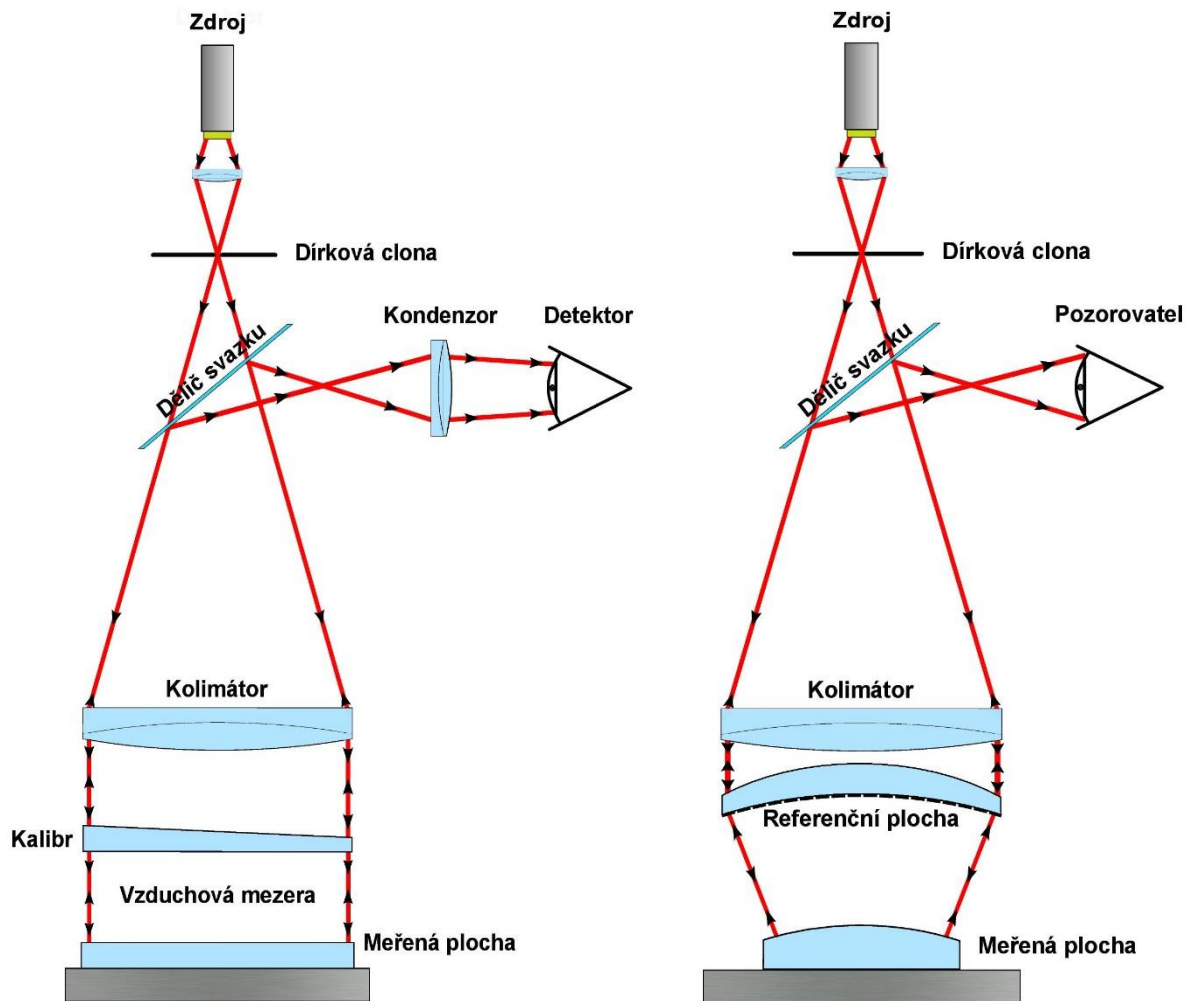
$$\Delta p = \frac{k}{d} \frac{\lambda}{2} [2]. \quad 2.1-10$$

2.1.2 Fizeaův interferometr

Dalším typem interferometru používaným pro měření tvaru optických ploch je Fizeaův interferometr. Tento typ interferometru se od Newtonova interferometru liší vzduchovou mezerou mezi kalibrem a měřenou plochou. Tato změna zmenší pravděpodobnost poškození nebo poškrábání, a také snižuje požadavek na čistotu jednotlivých kusů. Protože nedochází ke kontaktu obou kusů, řadíme tento interferometr mezi bezkontaktní měřicí metody. Díky těmto vylepšením se stal jedním z nejpoužívanějších konstrukcí vůbec [2].

Konfigurace pro měření rovin se skládá ze zdroje záření osvětlujícího dírkovou clonu. Tato dírková clona leží v ohniskové rovině kolimátoru. Kolimovaný svazek z kolimátoru prochází referenční rovinnou plochou, která bývá zpravidla přichycena pevně v konstrukci interferometru. Tato referenční plocha je nastavena tak, aby obraz dírkové clony vzniklý při odrazu od této plochy, se zobrazil opět na clonu. Zadní strana kalibru může být opatřena antireflexní vrstvou a místo rovinné destičky se používá klínu. Tímto způsobem se zbavíme nežádoucích odrazů od zadní strany kalibru. Svazek světla poté postupuje a odráží se od měřené plochy a v blízkosti dírkové clony je odveden pomocí děliče svazku do pozorovací větve. Stolek, na který se pokládá měřený kus, je vybaven stavěcími šrouby, pomocí nichž se upravuje velikost náklonu. Jestliže je náklon velký, v detekční rovině se zobrazí 2 odlišné obrazy. Úpravou náklonu měřeného kusu se nastaví mezera s malou klínovitostí, která zajistí překrytí těchto obrazů a vznik požadovaného interferenčního obrazce. Pro vyhodnocení tvaru ploch lze úpravou náklonů měnit počet a tvar zobrazovaných interferenčních proužků, jako tomu bylo u Newtonových skel. Schéma možného sestavení měřicí aparatury je zobrazeno na obrázku č. 7 (vlevo).

Pokud provádíme měření optických elementů vykazujících vysokou odrazivost a plocha kalibru není nijak ošetřena, obdržíme 2 interferenční svazky s rozdílnou intenzitou. To má za následek zhoršení kontrastu interferenčních proužků. Na druhou stranu, pokud je referenční plocha opatřena vysoce reflektivní vrstvou blížící se 100% odrazivosti, bude výsledný interferenční obrazec opět špatně pozorovatelný. Abychom tedy získali dobře viditelné interferenční proužky, je zapotřebí, aby rozdíl intenzity odražených svazků byl co možná nejmenší [2].



Obr. č. 7: Sestava Fizeauova interferometru pro rovinné plochy (vlevo) a pro sférické plochy (vpravo). Studovaná plocha se nedotýká kalibru a je osvětlena monochromatickým zdrojem záření. Výsledný interferenční obrazec se vyhodnocuje okometricky nebo pomocí kamery.

Pomocí Fizeauova interferometru můžeme také měřit sférické plochy. Existuje několik možných sestavení využívajících rovinných i sférických kalibrů. Při aplikaci referenčních zakřivených povrchů, se místo kolimovaného svazku používá svazek sbíhavý nebo rozbíhavý. Jedna z možných realizací je zobrazena na obrázku č. 7 (vpravo). Dírková clona se nachází v ohniskové rovině kolimátoru. Po průchodu kolimátorem svazek prochází měřícím objektivem, který má poslední plochu v kvalitě kalibru. Střed křivosti této plochy se musí shodovat se středem křivosti měřené plochy. Svazek se od této plochy částečně odráží a částečně prochází na měřenou plochu. Aby byl zajištěn kolmý odraz od měřené plochy, musí mít kuželový měřicí svazek vrchol ve středu křivosti měřené plochy [2].

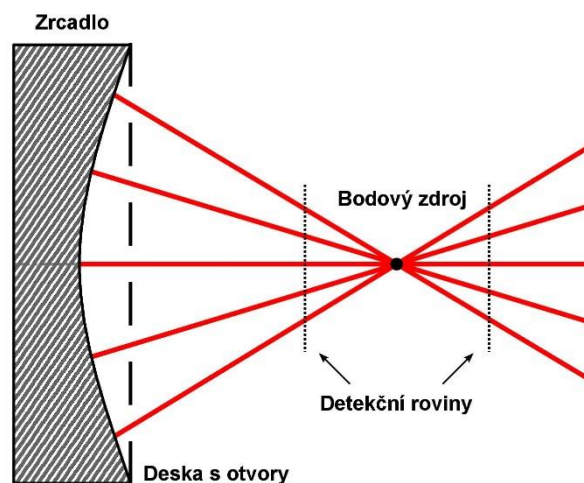
2.1.3 Hartmannův test

Hartmannův test je dalším zástupcem bezkontaktních měřících metod, někdy označovaných jako zástinové metody. Dalšími klasickými technikami používanými pro hodnocení tvaru optických prvků spadající do této kategorie jsou Foucaultův a Ronchiho test. V průběhu let prodělala většina technik inovaci a v dnešní době se využívají právě tyto modernizované verze. Ve srovnání s interferometrickými metodami mají tyto metody daleko jednodušší požadavky na realizaci, při přesnosti měření dosahující hodnoty až $\lambda/100$. Dalším kladem je jejich malá náchylnost na vibrace prostředí a vyšší dynamický rozsah měření.

Tento typ testu je jedním z nejsilnějších nástrojů k měření odchylek konkávních, sférických a asférických zrcadel s velkým průměrem. K získání informace o tvaru měřeného povrchu se nevyhodnocují rozdíly optických drah mezi světelnými svazky, jako tomu bylo v předchozích případech, ale měří se lokální náklony vlnoplochy na síti bodů v pupile. Výsledný tvar vlnoplochy obdržíme následným zpracováním pomocí vhodných numerických algoritmů [2].

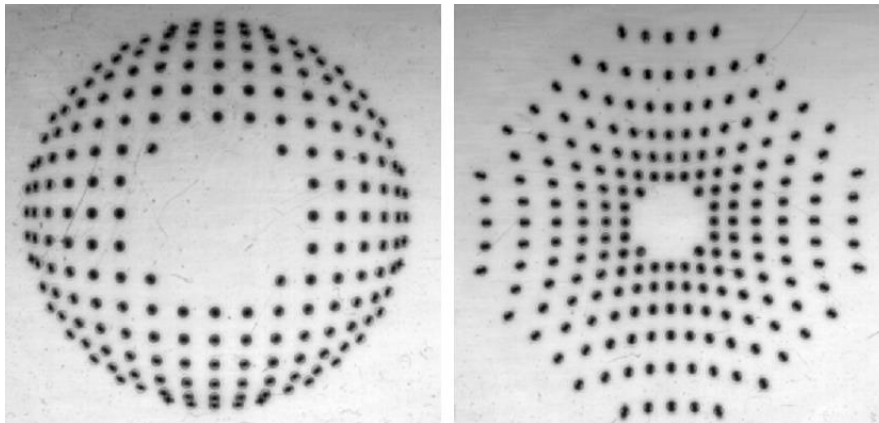
Základem této metody je rozdělení měřené plochy, a tedy i dopadající vlnoplochy na dílčí subapertury. Toto rozdělení se provádí pomocí desky s maticí otvorů. Nejčastější uspořádání otvorů odpovídá čtvercové nebo šestiúhelníkové síti s otvorem uprostřed nebo tvaru spirály. Deska se umísťuje do blízkosti vstupní nebo výstupní pupily měřeného optického systému a musí být vycentrována na střed apertury. Takto nastavená deska je poté osvětlena bodovým zdrojem, umístěným do blízkosti středu křivosti měřeného zrcadla, aby nedocházelo k projevům mimoosových aberací. Je důležité, aby mechanika bodového zdroje příliš neclonila svazku procházejícího okolo středu. Tato situace je znázorněna na obrázku č. 8 [2].

Při zkoumání mimoosových vad se zdroj světla umísťuje mimo osu zrcadla před střed křivosti. Toto uspořádání vytváří obraz za středem křivosti a dovoluje detekovat vlnoplochu bez centrálního clonění způsobeného objímkou bodového zdroje [2].



Obr. č. 8: Klasické uspořádání pro Hartmannův test. Při použití 2 detekčních rovin je třeba znát pouze vzdálenost mezi rovinami.

Při osvětlení zrcadla konvergentním svazkem dojde k odrazu světelných svazků vytvořených maticí otvorů a jejich následnou detekcí kamerou nebo fotografickou deskou. Záznam se provádí v jedné nebo ve dvou rovinách okolo světelné kaustiky. Pokud se záznam provádí jedním detektorem, je potřeba znát jak polohu jednotlivých děr v masce, tak vzdálenost detektoru od masky. Výsledné obrazy otvorů získané při testování parabolického zrcadla jsou zobrazeny na obrázku č. 9. První obraz byl měřen v oblasti před středem křivosti a druhý v blízké oblasti za ním [4].



Obr. č. 9: Exponované fotografické desky při studiu parabolického zrcadla. Výsledný obraz otvorů desky měřených v oblasti za středem křivosti (vlevo) a v oblasti před středem křivosti (vpravo) (převzato z [4]).

V případě, kdy je plocha zatížena aberacemi, dojde k deformaci vlnoplochy a tyto aberace způsobí dislokaci bodů z jejich základní polohy. Polohy těžišť těchto bodů poté souvisí s průměrnou hodnotou gradientu lokální části vlnoplochy dopadající na příslušný otvor na desce. Změna polohy bodů v detekční rovině poté odpovídá lineárním příčným aberacím TA_x a TA_y . Přejít mezi příčnými aberacemi a deformací vlnoplochy můžeme zapsat následovně:

$$TA_x(x, y) = -r \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}, \quad 2.1-11$$

$$TA_y(x, y) = -r \frac{\partial W(x, y)}{\partial y}, \quad 2.1-12$$

kde r určuje poloměr studované vlnoplochy a $W(x, y)$ je funkce charakterizující vlnoplochu [2].

Hlavním nedostatkem tohoto měření je fakt, že malé lokální nerovnosti, které se nachází mezi otvory v desce, nejsou detekovány. Informaci o tvaru vlnoplochy potom získáme za pomoci integrace

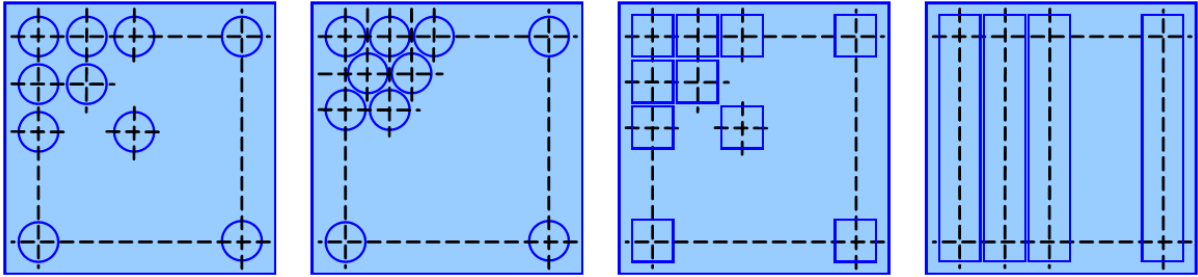
$$W(x, y) = -\frac{1}{r} \int_0^x TA_x(x, y) \quad 2.1-13$$

$$W(x, y) = -\frac{1}{r} \int_0^y TA_y(x, y). \quad 2.1-14$$

2.1.4 Shack – Hartmannův senzor

Shack – Hartmannův senzor je zařízení, které našlo hlavní uplatnění v adaptivní optice a postupem času se rozšířilo i do oblastí oftalmologie, optického testování, laserové optiky a mnoha dalších [5]. Jedná se o upravený Hartmannův test. Nejdůležitější změna nastala výměnou desky s otvory za rastr mikročoček. Každý takový rastr obsahuje matici čoček s malou aperturou. Tato mřížka navzorkuje dopadající vlnoplochu a každá mikročočka vytvoří v rovině detektoru světelnou stopu. Na rozdíl od klasického Hartmannova testu, kde se výsledný snímek získá detekcí sbíhavé vlnoplochy, zde na rastr dopadá kolimovaná vlnoplocha. Jestli se dopadající vlnoplocha silně liší od rovinné, musíme před senzor přidat kolimační objektiv. Tímto způsobem můžeme upravovat velikost studovaného svazku, tak aby odpovídal rozměrům matice mikročoček. Je však třeba zajistit, aby rastr byl umístěn co nejbližší obrazu pupily optické soustavy (mezizobrazení soustavou typu 4f). Výhodu této změny je plné využití výkonu záření dopadajícího svazku a soustředění výkonu na menší plochu detektoru, protože pole mikročoček pokrývá celou oblast studované vlnoplochy [6].

Jádrem tohoto senzoru je tedy rastr mikročoček a CCD nebo CMOS kamera. Matice mikročoček se nejčastěji vyrábí z křemenného skla. Tvar mikročoček odpovídá plankonvexním čočkám o ohniskové vzdálenosti f a jsou vyráběny standardními polovodičovými technologiemi, jako jsou fotolitografie, odporové nebo iontové leptání. Při výrobě je potřeba klást velký důraz na zachování shodného tvaru mikročoček a jejich ohniskové vzdálenosti. Standardní odchylka těchto parametrů se pohybuje okolo 1-2%. Jejich průměr se pohybuje v rozmezí od 10 μm až do 2 mm. Důležitým aspektem každého rastru je rozložení a forma jednotlivých mikročoček. Standardní tvary jsou kruhové, hexagonální, cylindrické a čtvercové. V závislosti na tvaru jsou mikročočky rozmístěny tak, aby pokrývaly co největší plochu základové destičky. Například v případě kruhové formy a čtvercovému rozložení se mikročočkami zpracuje jenom 75% dopadajícího záření. Zbytek buď projde jako parazitní světlo nebo se volné místo kryje nepropustnou např. chromovou vrstvou. Volba rastru mikročoček a CCD kamery závisí na typu prováděného experimentu. Základní charakteristiky senzoru, které můžeme ovlivňovat, jsou dynamický rozsah, přesnost měření a citlivost. Změna těchto charakteristik se provádí vhodnou volbou parametrů, jako jsou například velikost, tvar, ohnisková vzdálenost a počet mikročoček nebo velikost a počet pixelů v detektoru. Různé typy rozložení mikročoček jsou zobrazeny na obrázku č. 10 [7].



Obr. č. 10: Různé typy polí a mikročoček v rastru. (převzato z [7])

Při dopadu světelného pole na rastr mikročoček dojde k jeho rozdělení na menší sub-apertury vymezené tvarem mikročoček. Každá taková sub-oblast pole je poté fokusována do ohniskové roviny, v níž se nejčastěji nalézá plošný obrazový snímač. Pomocí tohoto detektoru registrujeme intenzitní stopy dopadajících světelných svazků z každé sub-apertury. Poloha středu každé stopy poté odpovídá průměrné hodnotě gradientu části vlnoplochy, která dopadá na příslušnou mikročočku. Plochu CCD detektoru si můžeme také virtuálně rozdělit na segmenty příslušící prostoru pod mikročočkami. Tyto segmenty nám posléze představují minimální dynamický rozsah samotného měření, protože je důležité, aby středy stop byly jednoznačně přiřazeny odpovídajícím mikročočkám [8]. Dynamický rozsah závisí na maximální měřitelné úhlové aberaci měřené vlnoplochy θ_{max} , kterou můžeme zapsat pomocí rovnice

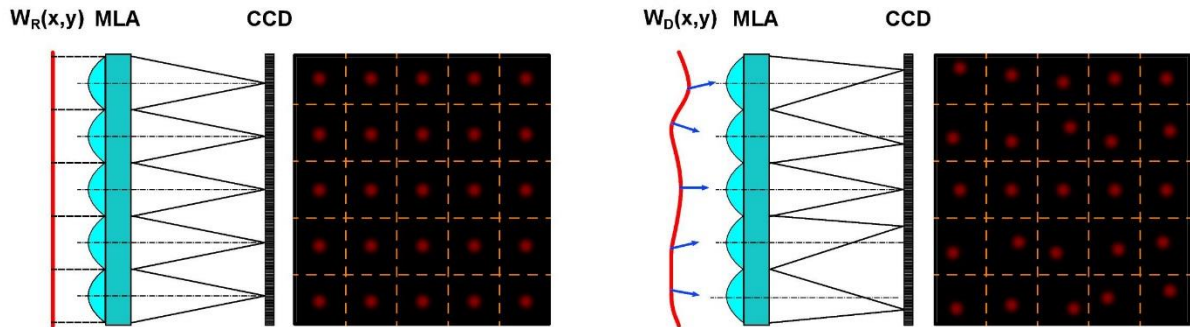
$$\theta_{max} = \frac{K - \rho}{2f}, \quad 2.1-15$$

kde f a K jsou ohnisková vzdálenost a rozteč mikročoček a ρ odpovídá velikosti fokusované stopy [2].

Je-li Shack-Hartmannův senzor osvětlen referenční rovinnou vlnou W_R , odpovídá rozložení středů paprskových svazků pravidelné síti bodů. Tuto síť bodů poté bereme za výchozí pozici, od které se počítá odchýlení bodů způsobené odchylkou deformované vlnoplochy W_D od vlnoplochy kalibrační. Tato počáteční kalibrace má tu výhodu, že vliv aberací a nepravidelností v umístění mikročoček a kolimační optiky se neprojeví ve výsledném měření. Schéma znázorňující odchýlení intenzitních stop je na obrázku č. 11. Velikost intenzitního bodu přibližně odpovídá průměru difrakčního obrazce ρ daného rovnicí

$$\rho = 2,44 \frac{\lambda f}{D}, \quad 2.1-16$$

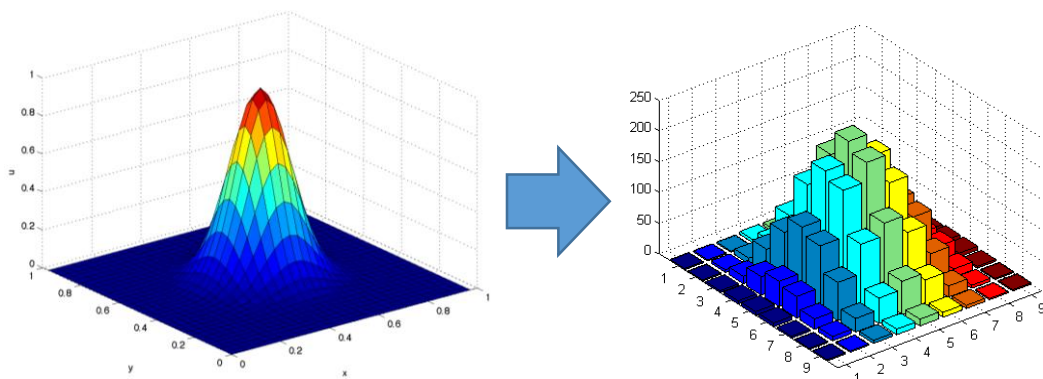
kde λ je vlnová délka použitého světla, f a D jsou ohnisková vzdálenost a průměr mikročoček [2].



Obr. č. 11: Schématické znázornění principu Shack-Hartmannova senzoru. Uspořádaná síť stop při dopadu rovinné referenční vlny W_R (vlevo) a při dopadu obecně deformované vlny W_D (vpravo).

Po provedení záznamu je potřeba přesně spočítat posuny spotů od referenčních poloh, které odpovídají příčným aberacím TA_x a TA_y . Vztah mezi příčnými aberacemi a tvarem vlnoplochy je dán vztahy (2.1-11) a (2.1-12), kde parametr r můžeme nahradit ohniskovou vzdáleností f v případě, kdy detektor leží v ohniskové rovině matice mikročoček. Dále je třeba určit hodnoty gradientu a na základě těchto hodnot provést následnou numerickou rekonstrukci spojitého rozdělení fáze vlnoplochy.

Každá stopa pokrývá několik pixelů použitého detektoru. Intenzitní rozdělení bodů $P(x,y)$ je tedy transformováno na matici pixelů s hodnotami intenzity $I_{i,j}$. Každý pixel o velikosti $W_p \times W_p$ je navíc zatížen fotonovým šumem a šumem samotného detektoru. Navíc k degradaci tvaru stopy v detekční rovině přispívá i difrakce světla a aberace optických prvků umístěných před detektorem. Přejít od spojitého signálu k navzorkovanému rozložení intenzity je ilustrován na obrázku č. 12 [9].



Obr. č. 12: Ukázka transformace spojitého intenzitního rozložení $P(x,y)$ (vlevo) na diskrétní hodnoty intenzit $I_{i,j}$ (vpravo).

Pro určení polohy středů stop fokusovaných svazků se využívají různé matematické metody. Abychom dosáhli co nejlepší vyhodnocení tvaru dopadající vlnoplochy, je nezbytné, určit polohu stop s co největší přesností v řádu tisícin velikosti jednoho pixelu. V praxi se jako základní metoda pro výpočet polohy těžiště symetrické stopy se používá metoda „Center of Gravity“ - CoG. Rovnice pro souřadnice těžiště jsou

$$\hat{x}_{CoG} = \frac{\sum \sum x(i,j)I(i,j)}{\sum \sum I(i,j)} \quad a \quad \hat{y}_{CoG} = \frac{\sum \sum y(i,j)I(i,j)}{\sum \sum I(i,j)}, \quad 2.1-17$$

kde $x(i, j)$ a $y(i, j)$ jsou souřadnice a $I(i, j)$ intenzita pixelu. Pro dosažení dostatečné přesnosti musí stopa pokrývat oblast nejméně 5 pixelů detektoru. Tato metoda je velmi citlivá na přítomný šum detektoru. Toto omezení můžeme odstranit úpravou výchozího algoritmu pomocí metody prahování. Pomocí prahování nastavíme minimální hladinu intenzity I_T pixelů, které se zahrnou do výpočtu souřadnic těžiště. Určit minimální hladinu intenzity můžeme například stanovením pevné hodnoty nebo zjistit maximální hodnotu intenzity pixelu I_{max} a parametrem stanovit T stanovit $I_T = T I_{max}$, kde T leží mezi nulou a jedničkou. Protože intenzita je vždy nezáporná, můžeme situace kdy $I < I_T$ uvažovat $I = 0$. Upravené rovnice poté vypadají

$$\hat{x}_{TCOG} = \frac{\sum \sum_{I > I_T} x(i,j)(I(i,j) - I_T)}{\sum \sum I(i,j) - I_T} \quad a \quad \hat{y}_{TCOG} = \frac{\sum \sum y(i,j)(I(i,j) - I_T)}{\sum \sum I(i,j) - I_T}. \quad 2.1-18$$

V praxi další používanou metodou je metoda jemného prahování. Tato metoda spočívá v určení váhové funkce $F_w(x,y)$ pro různé pixely v závislosti na jejich osvětlení. Příspěvky od zašuměných pixelů mimo jádro stopy, které jsou velmi intenzitně slabé, nejsou eliminovány, ale pouze atenuovány. Vztahy pro souřadnice těžiště jsou

$$\hat{x}_{wCoG} = \frac{\sum \sum x(i,j)I(i,j)F_w(x,y)}{\sum \sum I(i,j)F_w(x,y)} \quad a \quad \hat{y}_{wCoG} = \frac{\sum \sum y(i,j)I(i,j)F_w(x,y)}{\sum \sum I(i,j)F_w(x,y)} \quad [9]. \quad 2.1-19$$

Určení těžiště stopy je samozřejmě zatíženo chybou. Základní představu o velikosti této chyby dává parametr s názvem „Centroid estimation error“. Ten se počítá primárně pro zjištění opakovatelnosti měření systémem. Jeho hodnota je nenulová pro reálné detektory, které jsou zatíženy šumem. K dalším možným příspěvkům této chyby můžeme přiřadit fluktuace dopadajícího signálu. K vypočtení této chyby je potřeba větší počet snímků a potom v každém snímku vypočítat těžiště všech stop. Pro N měření a senzor s K mikročočkami můžeme zapsat chybu ve tvaru:

$$v^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - \bar{x}_k)^2 + (y_k - \bar{y}_k)^2 \right), \quad 2.1-20$$

což odpovídá standardní odchylce polohy stop. Předpokladem platnosti tohoto vztahu je, že polohy stop během sekvence měření jsou statisticky nezávislé. V praxi to ovšem není plně splněno z důvodu vzorkování spotů pixely detektoru [5].

2.1.4.1 Algoritmy pro rekonstrukci vlnoplochy ze záznamu S – H senzorem

Určení tvaru vlnoplochy z naměřených náklonů S – H senzorem je základním problémem v optice. Tímto dějem je myšlena transformace diskrétně naměřených fázových náklonů na rozdíl optické dráhy mezi ideální (referenční) a reálnou vlnoplochou nebo ekvivalentně na prostorové rozložení fáze vlnoplochy odpovídající optické dráze normované vlnovým číslem $k = 2\pi / \lambda$ [14].

První souhrn základních metod pro určení tvaru vlnoplochy byl publikován Southwellem [12]. Článek popisuje různé geometrie pro získání náklonů pro různé typy senzorů. Mezi základní techniky patří zonální a modální rekonstrukce, závisící na určení lokální fáze vlnoplochy nebo koeficientu aperturní funkce. Rozdíly mezi těmito metodami jsou v použití rozdílných modelů pro fitování tvaru vlnoplochy. Základním modelem pro zonální rekonstrukci, která předvídá tvar vlnoplochy bod po bodu, je metoda nejmenších čtverců, kde se pro větší matice využívá technika řešení matic iterativní metodou. Pro modální rekonstrukci se využívá dekompozice tvaru vlnoplochy pomocí Zernikeho nebo Legendových polynomů. Tento systém se opět řeší metodou nejmenších čtverců [12,13].

Vlnoplocha dopadající na S – H senzor, který je složen z rastru mikročoček, je vzorkována na části odpovídající velikosti apertury každé mikročočky. Základním předpokladem je, že každá část vlnoplochy uvnitř této apertury je rovinná vlna. Z tohoto předpokladu poté plyne, že v ohniskové rovině rastru mikročoček detekujeme průměrný náklon odpovídající rovnici

$$\nabla w_{j,k} = \frac{\partial w_{j,k}}{\partial x} i + \frac{\partial w_{j,k}}{\partial y} j = S_{j,k}^X i + S_{j,k}^Y j, \quad 2.1-21$$

kde $w_{j,k}$ označuje vlnoplochu příslušící mikročočce na souřadnicích j, k rastru mikročoček a $S_{j,k}^X, S_{j,k}^Y$ průměrnému gradientu vlnoplochy [13].

Vzhledem k naší optické sestavě a jejím využití, jsme se prozatím omezili na použití zonální rekonstrukce vlnoplochy. Tato metoda rekonstrukce má výhodu v přesnějším zobrazení tvaru studované vlnoplochy na rozdíl od metody modální. Modální rekonstrukce se častěji využívá při studiu aberací, kterými je vlnoplocha zatížena.

Pro zonální rekonstrukci existuje řada metod pro zjištění tvaru vlnoplochy. Například metoda bod po bodu reprezentuje ucelené řešení gradientní rovnice (2.1-21). Pro správný postup rekonstrukce je také důležitá geometrie záznamu náklonů. Pro Shack – Hartmannův senzor odpovídá geometrie, při které se měří obě souřadnice zároveň. Takto získaná síť

obsahuje N^2 fázových bodů a $2N^2$ naměřených dat. Hlavní problém je těmto datům přiřadit odpovídající funkci nebo model, který by co nejpřesněji charakterizoval fázi vlnoplochy v daných bodech prostoru. Pro obecnost předpokládejme, že fázová změna mezi naměřenými body v ortogonální reprezentaci je vyjádřena kvadratickým polynomem ve tvaru

$$w(x, 0) = c_0 + c_1x + \frac{1}{2}c_2x^2 \quad a \quad w(0, y) = c'_0 + c_3y + \frac{1}{2}c_4y^2. \quad 2.1-22$$

Protože hodnoty náklonů jsou mezi sousedními mikročočkami rozdílné, můžeme předpokládat, že se sklony mění lineárně. Náklony odpovídají derivacím předchozích polynomů a můžeme je zapsat jako

$$S^X(x, 0) = c_1 + c_2x \quad a \quad S^Y(0, y) = c_3 + c_4y. \quad 2.1-23$$

Koeficienty c_1 a c_3 můžeme vyjádřit jako hodnoty náklonů ve studovaném fázovém bodě

$$c_1 = S^X_{j,k} \quad a \quad c_3 = S^Y_{j,k}. \quad 2.1-24$$

koeficienty c_2 a c_4 jsou určeny ze vztahu mezi 2 sousedními body vzdálenými o h_x a h_y .

$$c_2 = \frac{S^X_{j\pm 1,k} - S^X_{j,k}}{h_x} \quad a \quad c_4 = \frac{S^Y_{j,k\pm 1} - S^Y_{j,k}}{h_y} \quad 2.1-25$$

Tímto způsobem můžeme vypočítat koeficienty kvadratického polynomu ze 4 směrů okolo studovaného bodu, což nám umožní zjistit tvar vlnoplochy jako predikci ze sousedních dat

$$w_{j,k} = w_{j-1,k} - \frac{h_x}{2}(S^X_{j-1,k} + S^X_{j,k}) \quad 2.1-26$$

$$w_{j,k} = w_{j+1,k} + \frac{h_x}{2}(S^X_{j+1,k} + S^X_{j,k}) \quad 2.1-27$$

$$w_{j,k} = w_{j,k-1} - \frac{h_y}{2}(S^Y_{j,k-1} + S^Y_{j,k}) \quad 2.1-28$$

$$w_{j,k} = w_{j,k+1} + \frac{h_y}{2}(S^Y_{j,k+1} + S^Y_{j,k}). \quad 2.1-29$$

Predikce tvaru vlnoplochy ze 4 směrů je aplikovatelná pouze pro vnitřní body. V rozích a okrajových částech je vlnoplocha predikována z menšího počtu bodů. Pro klasický S – H sensor s kruhovou pupilou, obsahuje výsledná síť velké množství okrajových bodů, které navíc mohou být intenzitně oslabeny a deformovány mechanikou pupily. [13]

Pokud máme k dispozici informace o náklonech v obou směrech, můžeme rovnice (2.1-25 až 2.1-29) vyřešit metodou nejmenších čtverců. Pro formulaci řešení můžeme tuto metodu převést na lineární problém, který je vhodný řešit v maticové reprezentaci ve tvaru

$$DS = AW, \quad 2.1-30$$

kde S je matice s počtem prvků N^2 obsahující všechny naměřené náklony, matice A je řídká matice s počtem prvků N^2 . D je také řídká matice vytvářející průměrování sousedních náklonů a matice W je vektor o délce N^2 obsahující všechny neznámé hodnoty fáze. Standardní řešení takové rovnice je vynásobením rovnice inverzní maticí $(A^T A)^{-1}$

$$W = (A^T A)^{-1} A^T D S \quad [11]. \quad 2.1-31$$

Pro větší matice můžeme k řešení (2.1-31) použít iterační metody, kde se využívá výhod řídké inverzní matice $(A^T A)$. Pokud zapíšeme nenulové prvky matice (2.1-31) dostaneme vztah

$$\begin{aligned} g_{j,k} w_{j,k} - [w_{j+1,k} + w_{j-1,k} + w_{j,k+1} + w_{j,k-1}] = \\ = \frac{h}{2} [S_{j,k+1}^Y - S_{j,k-1}^Y + S_{j+1,k}^X - S_{j-1,k}^X], \end{aligned} \quad 2.1-32$$

kde faktory $g_{j,k}$ jsou diagonální elementy matice $(A^T A)^{-1}$ značící body sítě, ve kterých je predikce fázové hodnoty určena pouze z 2, 3 nebo 4 sousedních bodů. To můžeme matematicky zapsat jako

$$g_{j,k} = \begin{cases} 2 & j = 1 \vee N; \quad k = 1 \vee N \\ 3 & \left\{ \begin{array}{l} j = 1 \vee N; \quad k \in \langle 2, N-1 \rangle \\ k = 1 \vee N; \quad j \in \langle 2, N-1 \rangle \end{array} \right. \\ 4 & \text{jinak} \end{cases} \quad 2.1-33$$

a pokud není síť bodů čtvercová a studujeme fázový bod, který má neexistující data náklonů, předpokládáme, že je i fáze nulová. Pokud si pravou část rovnice (2.1-32) označíme jako konstantu $b_{j,k}$

$$b_{j,k} = \frac{h}{2} [S_{j,k+1}^Y - S_{j,k-1}^Y + S_{j+1,k}^X - S_{j-1,k}^X], \quad 2.1-34$$

která závisí pouze na naměřených náklonech a vytvoříme konstantu $\overline{w}_{j,k}$ ve tvaru

$$\overline{w}_{j,k} = \frac{[w_{j+1,k} + w_{j-1,k} + w_{j,k+1} + w_{j,k-1}]}{g_{j,k}}, \quad 2.1-35$$

která odpovídá průměrné fázi okolních bodů, můžeme rovnici (2.1-32) přepsat do tvaru

$$w_{j,k}^{(m+1)} = \overline{w}_{j,k}^{(m)} + \frac{b_{j,k}}{g_{j,k}} \quad [12]. \quad 2.1-36$$

Tento tvar rovnice (2.1-36) může být chápán jako základní iterační formule. Pravá strana této formule je sestavována z aktuálních fázových bodů (mohou být na začátku nulové) a

naměřených náklonů. Výsledkem m - tého iterčního cyklu je zpřesňování hodnoty fáze ve studovaném bodu. V případě, že během iterace budou výsledky levé strany rovnice uchovávány v jiné matici, než jsou všechny body sítě vyhodnoceny, je tento postup označován jako Jacobiho metoda. Jestliže vypočtené fázové body aktualizujeme ihned po výpočtu, mohou být využity k výpočtům sousedních bodů. Tento druh výpočtu fáze vlnoplochy se nazývá Gauss – Seidelova metoda.

Třetí metoda se nazývá metoda postupných překmitů v anglickém originále “*successive over - relaxation method*” (SOR metoda). Tato metoda se od předešlých metod liší ve výpočtu fázových bodů. Během každé iterace se fázový bod počítá za přispění předchozí fázové hodnoty tohoto bodu. Tento způsob výpočtu můžeme zapsat

$$w_{j,k}^{(m+1)} = w_{j,k}^{(m)} + \omega \left[\frac{b_{j,k}}{g_{j,k}} - w_{j,k}^{(m)} \right], \quad 2.1-37$$

kde ω je relaxační parametr. Tento relaxační parametr je známý díky vlastnostem matice $(A^T A)$. Tvar tohoto parametru odpovídá rovnici:

$$\omega = \frac{2}{1 + \sin \left[\frac{\pi}{N+1} \right]}. \quad 2.1-38$$

Konvergence rovnice (2.1-37) je dosaženo v případě, kdy hodnota závorky na pravé straně rovnice bude malá. Hlavní výhodou této metody je rychlá konvergence řízená relaxačním parametrem, jehož vypočtená hodnota maximalizuje míru konvergence [12].

Jacobiho metoda potřebuje velké množství iterací k dosažení správného výsledku, ale výsledný tvar je zatížen malou reziduální chybou. Gauss – Seidelova metoda konverguje ke správnému výsledku přibližně po N^2 iteracích. SOR metoda potřebuje k dosažení výsledku pouze $2N$ iterací.

3 Cíle práce

Cíle práce vycházející ze zadání, obsahující 3 body:

- analyzovat možnosti tvaru rovinných ploch pomocí S-H senzoru,
- navrhnout a sestrojít zařízení pro měření tvaru rovinných ploch,
- navrhnout algoritmy vyhodnocení S-H senzoru pro určení tvaru rovinných ploch.

V první bodě se práce zabývá návrhem optické sestavy. V prostředí programu OSLO se provádí výpočty chodu širokého svazku optickou sestavou a studuje se jeho chování při průchodu optickou sestavou. Zajímá nás tvar svazku v rovině rastru mikročoček Shack - Hartmannova senzoru v závislosti na tvaru měřeného povrchu. K simulaci jsme si vybrali dva krajní případy deformací typu smetených a zdvižených okrajů.

V druhé části se přejde k samotnému návrhu mechanických částí v prostředí programu Autodesk Inventor. V návrhu se zaměříme na mechanické komponenty optické sestavy a mechaniku pro uchycení rastru mikročoček k CMOS kameře.

Posledním cílem bude vytvoření komunikace kamery s PC v prostředí programu Matlab a vytvoření algoritmů pro zpracování získaného signálu z kamery. Na závěr se poté provede kalibrační měření s rovinným zrcadlem a testovací měření s rovinným kusem.

4 Materiál a metody

4.1 Použité zařízení a pomůcky

Pro vytvoření osvětlovacího svazku byl použit lineárně polarizovaný laser FLEXPOINT (BLAU Optoelektronik GmbH, Německo) o vlnové délce 532 nm , výkonu 4 mW . Mezi další prvky osvětlovací části optické sestavy patřily mikroskopový objektiv o numerické apertuře $0,10$ a zvětšení $30\times$ (Meopta, Lambda Praha, Česká republika), prostorový filtr *KT310/M* obsahující dírkovou clonu *P50S* o velikosti $50\text{ }\mu\text{m}$ a bi-konvexní čočku *LBF254 - 40* o ohniskové vzdálenosti 40 mm (Thorlabs - Newton, New Jersey, USA). Dále byla použita polarizační dělicí kostka *CM1-PBS251* pracující v rozsahu vlnových délek $420 - 680\text{ nm}$ a $\lambda/4$ destička *WPQ10M-532* pro vlnovou délku 532 nm .

Pro rozšíření osvětlovacího svazku jsme využili 4f systému složeného z bi-konvexní čočky *LBF254 - 40* (Thorlabs - Newton, New Jersey, USA) a parabolického zrcadla (ATC – Astro, Přerov, Česká republika) s ohniskovou vzdáleností 800 mm a clonovým číslem 4 .

Jako Shack – Hartmannův detektor byla použita CMOS kamera od firmy Basler *acA2040 - 25gm* (Basler Inc., Exton, USA). Rozlišení čipu kamery je 4Mpix s roztečí pixelů $5,5 \times 5,5\text{ }\mu\text{m}$. Rastr mikročoček byl zvolen *MLA150-5C* (Thorlabs - Newton, New Jersey, USA). Rastr má rozměry $10 \times 10\text{ mm}$, velikost mikročoček $150\text{ }\mu\text{m}$ s ohniskovou vzdáleností $5,2\text{ mm}$ a je opatřen chromovou vrstvou.

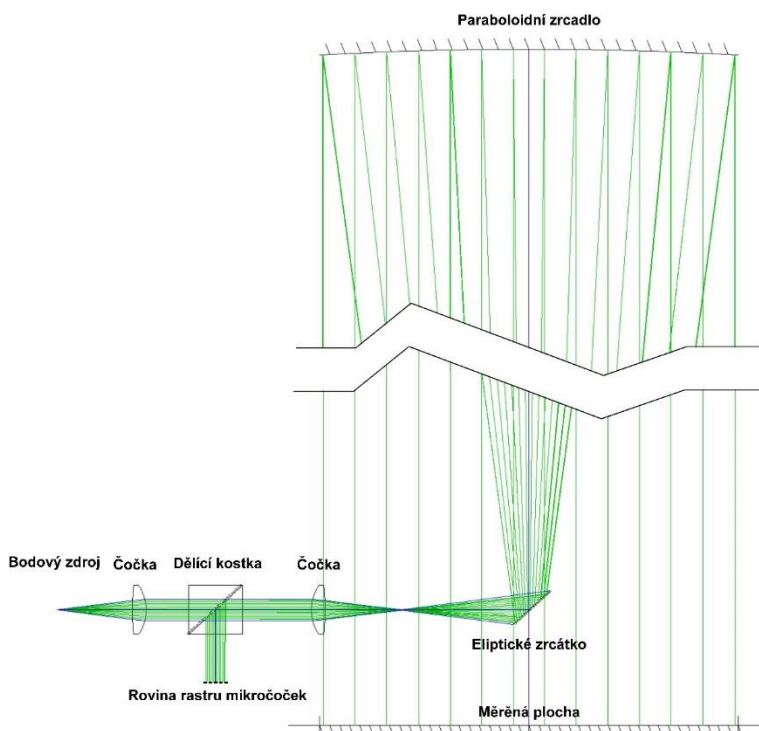
5 Výsledky

5.1 Návrh optické sestavy

5.1.1 Simulace v prostředí programu OSLO

Základní požadavky optické sestavy byly kompaktnost a jednoduchá konstrukce. Prvotní simulace našeho návrhu nás vedly k využití $4f$ systému. Tento druh systému nám umožnil vytvořit obousměrný zobrazovací systém, s jehož pomocí jsme mohli transformovat úzký svazek paprsků do širokého osvětlovacího svazku. V našem případě byl použit expandér typu Keplerova dalekohledu s využitím bi – konvexní čočky a parabolického zrcadla. Vzhledem k použitým komponentám popsaných výše byla simulace prováděna s osvětlovacím svazkem o průměru 10 mm, který byl expandérem zvětšen $20x$. Sestava byla navržena pro měření optických prvků až do průměru 200 mm .

Takto vytvořený osvětlovací svazek poté dopadá na měřenou plochu, od které se odráží zpět a je $4f$ systémem transformován na původní průměr. Svazek dále prochází dělicí kostkou, dopadá na rastr mikročoček a nakonec na samotný detektor. Detektor je umístěn v ohniskové rovině rastru mikročoček. Tato sestava je znázorněna na obrázku č. 13. Při této simulaci nás především zajímalo, jak se bude chovat svazek paprsků uvnitř takové optické sestavy. Přesněji jsme se zaměřili na rovinu rastru mikročoček, kterou jsme považovali za vstupní aperturu detektoru.



Obr. č. 13: Simulovaná optická sestava v prostředí programu OSLO. Simulace průchodu svazku paprsků při měření ideálně rovinného kusu.

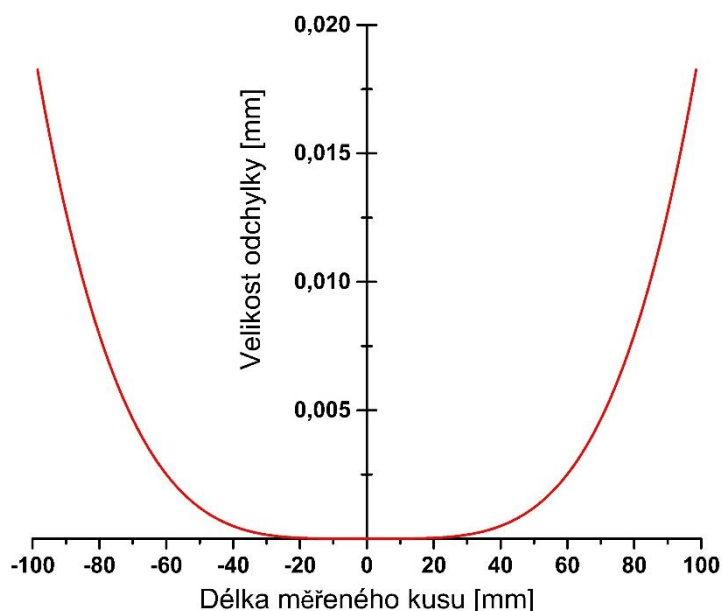
Simulaci jsme realizovali pro 2 druhy deformací měřené plochy a to deformaci typu zdvižených okrajů a deformaci typu smetených okrajů. Pro tvar měřené plochy jsme vycházeli z rovnice pro standardní asférickou plochu (5.1-1) ve tvaru:

$$z = \frac{x^2}{r \left(1 + \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2} (cc + 1)} \right)} + ad r^4 + ae r^6 + af r^8 \dots, \quad 5.1-1$$

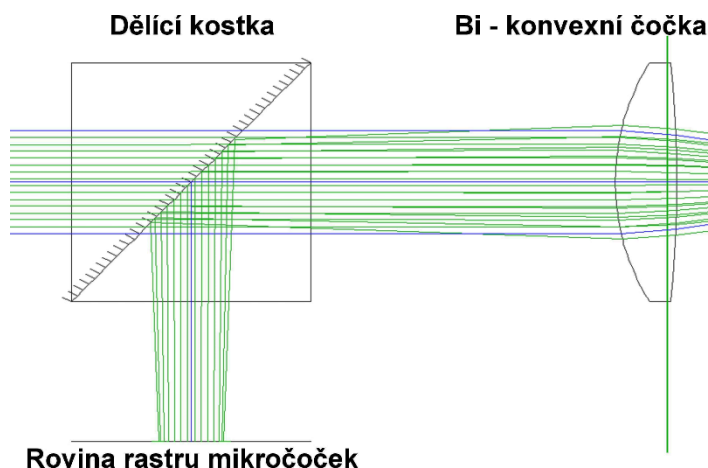
kde x značí rozměr plochy, r poloměr plochy, cc kónickou konstantu a parametry ad , ae a af odpovídají příslušným deformačním řádům. Pro naši simulaci jsme se omezili na první deformační řád.

5.1.1.1 Deformace typu zdvižené okraje

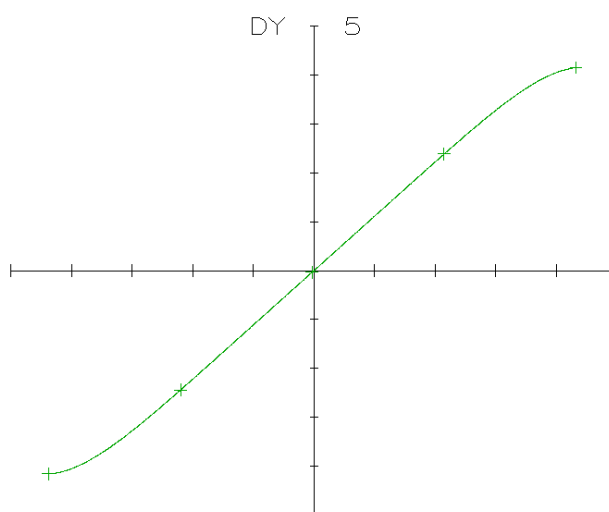
Při simulaci s touto deformací jsme zjistili maximální měřitelnou deformaci optické plochy $18 \mu m$. Tato hodnota přibližně odpovídá odchylce 75λ . Velikost a tvar deformace je naznačen na obrázku č. 14. Limitním případem, kdy jsme ještě schopni deformaci korektně změřit je, když nedojde k přehnutí okrajových části vlnoplochy v rovině rastru mikročoček. Situace v rovině rastru odpovídající limitnímu případu je znázorněna na obrázku č. 15. Nejlepším způsobem jak zjistit takovou situaci je studovat tvar křivky v závislosti odchylky paprsku na vstupní dopadové výšce. U tohoto typu deformace se budou okrajové části křivky zakřivovat zpět k horizontální ose.



Obr. č. 14: Model tvaru měřené plochy a velikost maximální měřitelné odchylky při deformaci typu zdvižených okrajů.

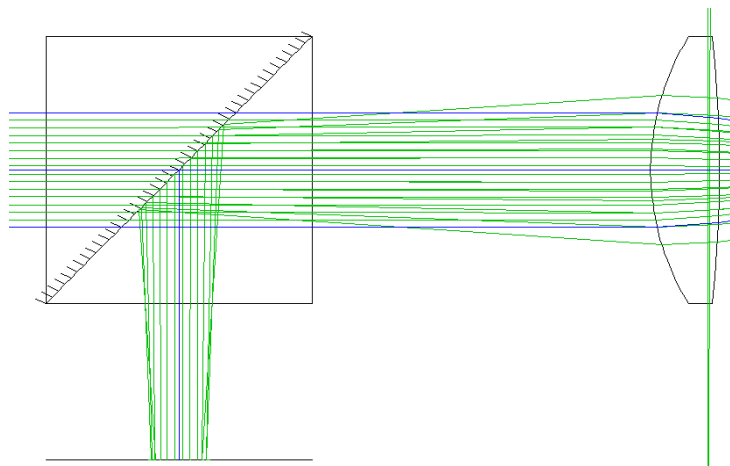


Obr. č. 15: Poloha okrajových paprsků v rovině rastru mikročoček při maximální měřitelné odchylce.

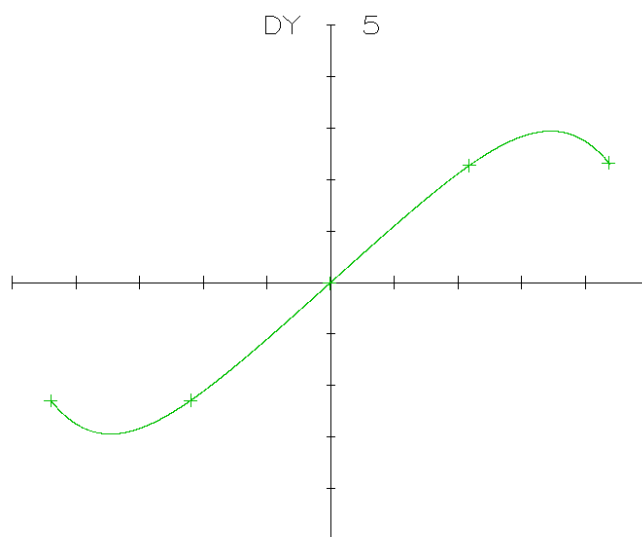


Obr. č. 16: Závislost vzdálenosti výstupních paprsků od osy na vstupní výšce pro deformaci typu zdvižené okraje. Z obrázku je patrné zakřívování okrajových částí křivky k horizontální ose.

Případ kdy dojde k přehrnutí okrajových paprsků do sousedních mikročoček, a tedy znemožnění správného vyhodnocení tvaru vlnoplochy, je znázorněno na obrázku č. 17 a příslušná závislost je na obrázku č. 18. Námi naměřená maximální odchylka není ovšem striktně daná. Její hodnota závisí na mnoha parametrech. Nejsilnějšími parametry jsou velikost měřeného kusu a poloha 3 optických prvků v sestavě: bi – konvexní čočka, dělicí kostka a rastr mikročoček. V ideálním případě, kdy by se všechny tři prvky dotýkaly, bychom získali maximální měřitelnou odchylku. V reálné situaci toho nelze dosáhnout z důvodu použití nezbytných mechanických částí a dalších prvků v sestavě.



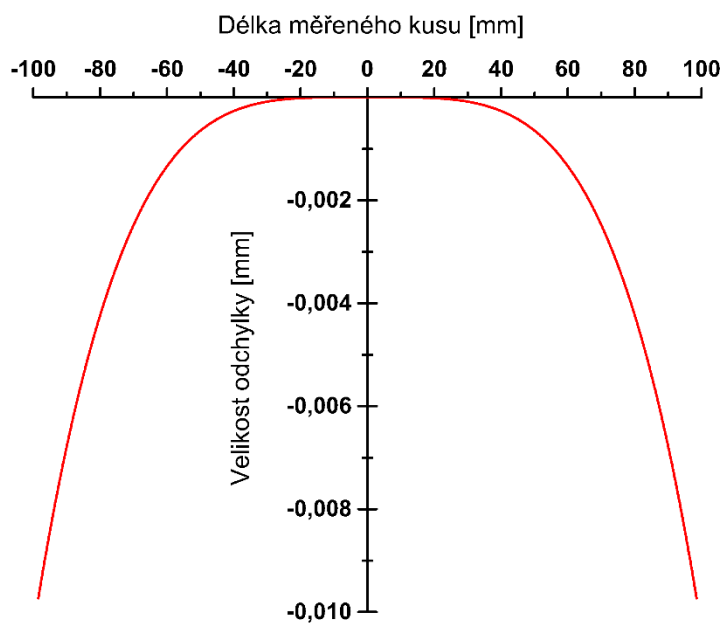
Obr. č. 17: Poloha přehnutých okrajových paprsků v rovině rastru mikročoček při neměřitelné odchylce.



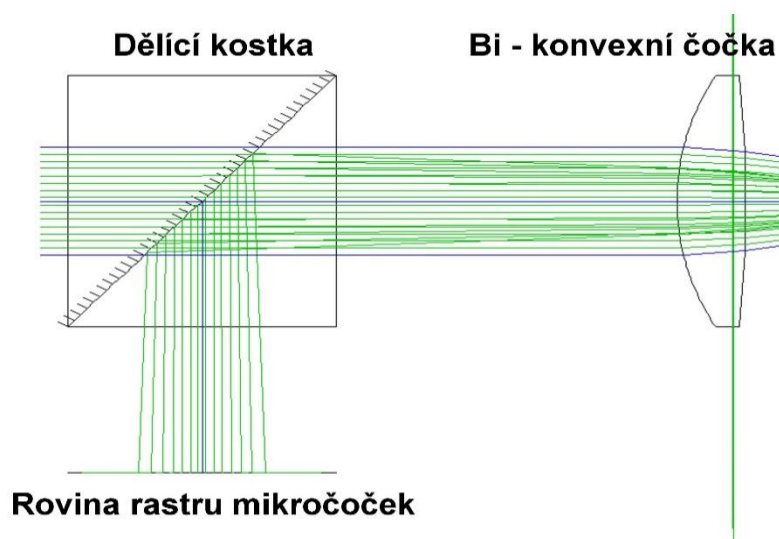
Obr. č. 18: Závislost vzdálenosti výstupních paprsků od osy na vstupní výšce pro deformaci typu zdvižené okraje. Z obrázku je patrné zakřivení okrajových částí křivky z důvodu přehnutí vlnoplochy v rovině rastru mikročoček.

5.1.1.2 Deformace typu smetených okrajů

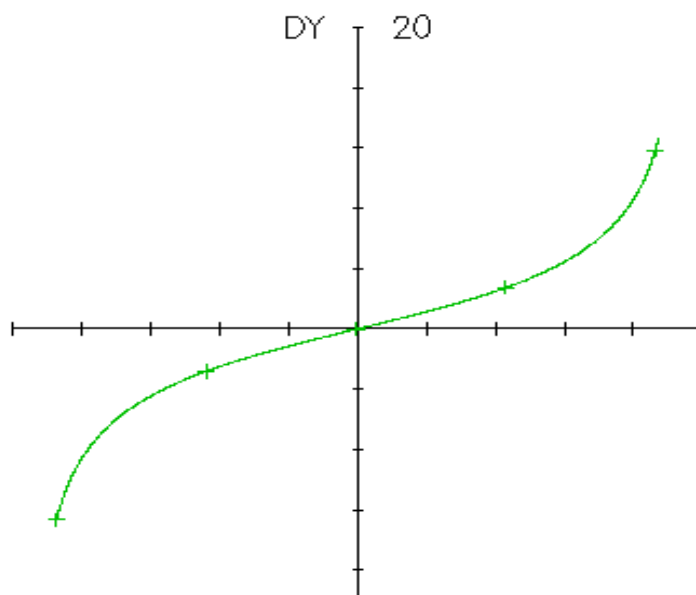
Při simulaci s touto deformací jsme zjistili maximální měřitelnou deformaci optické plochy $9 \mu\text{m}$. Tato hodnota přibližně odpovídá odchylce 35 vlnovým délkám. Velikost a tvar studované plochy je naznačen na obrázku č. 19. Limitou, kdy jsme ještě schopni deformaci korektně změřit, je situace, kdy nedojde k přílišnému rozptylu svazku paprsků v rovině rastru mikročoček. Situace v rovině rastru odpovídající limitnímu případu je znázorněna na obrázku č. 20. Možnost jak určit takovou situaci je nutné opět studovat závislosti polohy paprsků na dopadající výšce. U tohoto typu deformace se budou okrajové části křivky zakřivovat rovnoběžně se vvislou osou.



Obr. č. 19: Model tvaru měřené plochy a velikost maximální měřitelné odchyly při deformaci typu smetených okrajů.

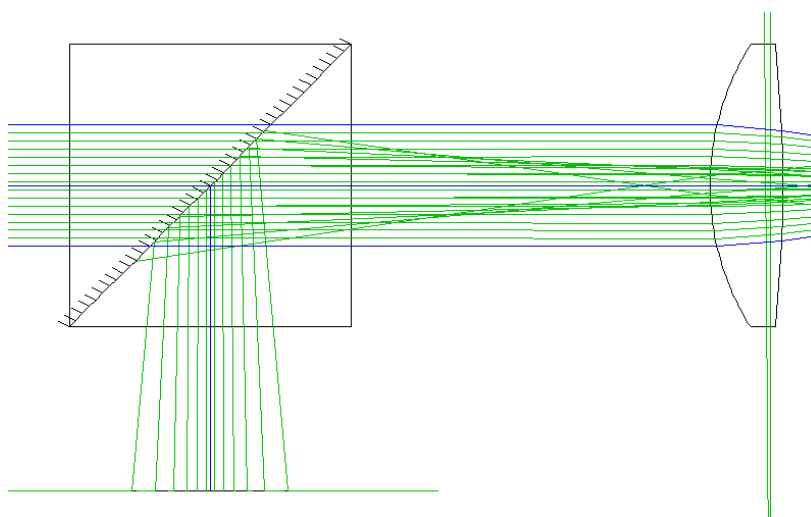


Obr. č. 20: Poloha okrajových paprsků v rovině rastru mikročoček při maximální měřitelné odchylce.

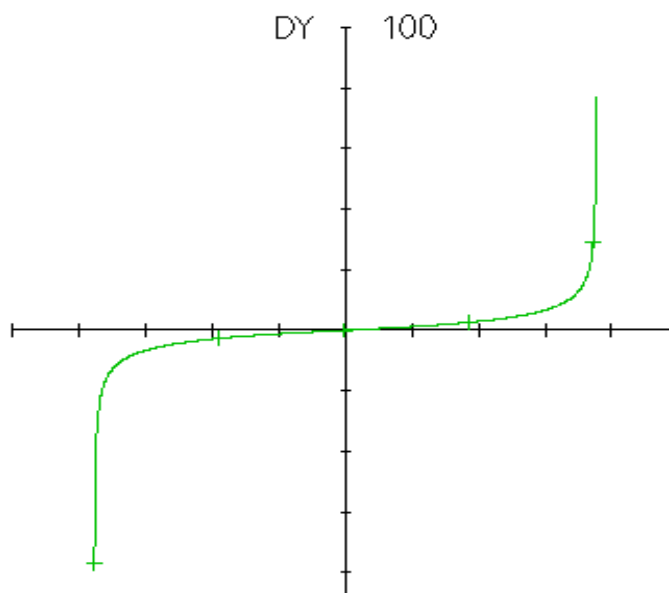


Obr. č. 21: Závislost vzdálenosti výstupních paprsků od osy na vstupní výšce pro deformaci typu smetené okraje. Z obrázku je patrné zakřívování okrajových částí křivky rovnoběžně se svislou osou.

Případ kdy dojde k rozptýlení okrajových paprsků mimo vstupní aperturu Shack - Hartmannova senzoru a tím se znemožní vyhodnocení okrajových částí měřeného povrchu, je znázorněno na obrázku č. 22. Tvar křivky ray - fan diagramu je zobrazena na obrázku č. 23. Maximální odchylka je stejně, jako v předchozím případě závislá od vzdáleností zmíněných optických komponent. Tato optická výrobní vada je navíc závislá i na poloze měřeného kusu v rámci apertury parabolického zrcadla.



Obr. č. 22: Rozptýlený svazek paprsků v rovině rastru mikročoček.



Obr. č. 23: Závislost vzdálenosti výstupních paprsků od osy na vstupní výšce pro deformaci typu smetené okraje. Z obrázku je patrné zakřivení ray – fan křivky z důvodu rozptylu okrajových paprsků mimo vstupní aperturu detektoru.

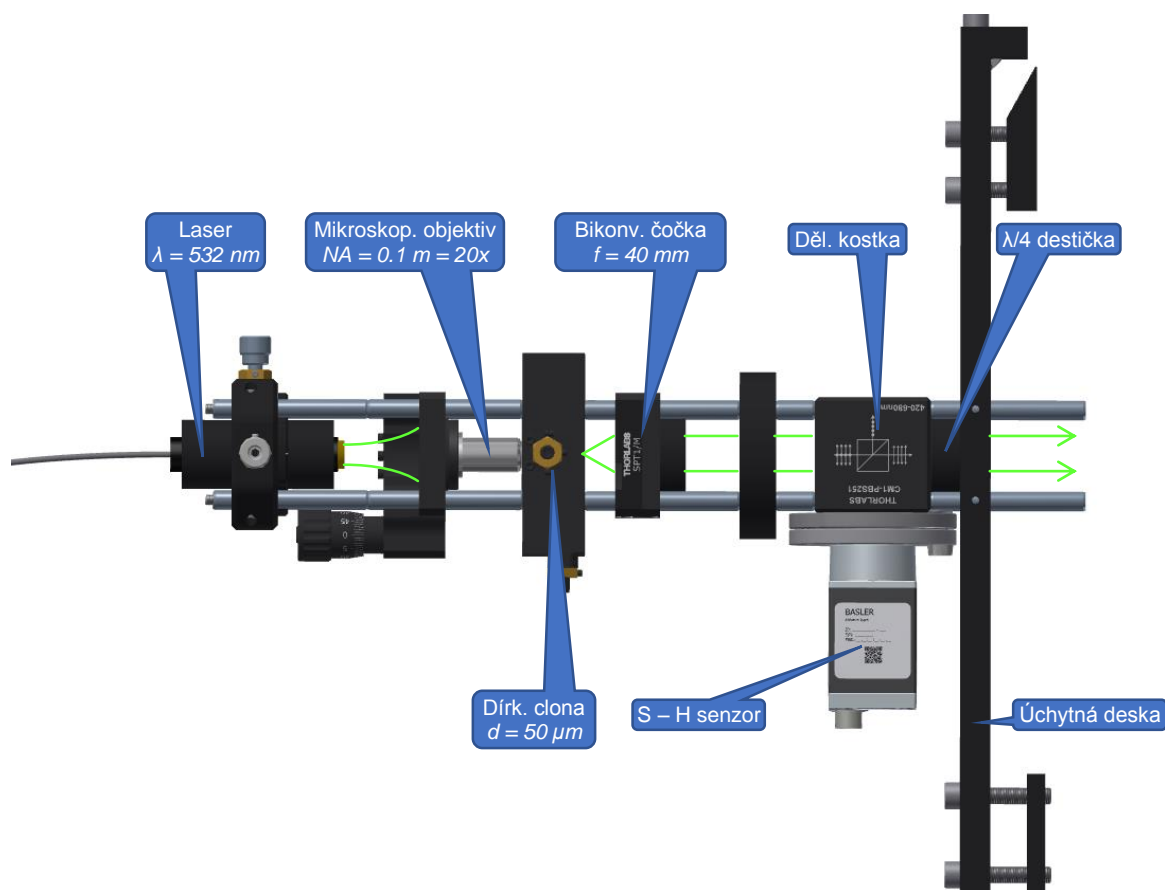
5.1.2 Návrh mechanických komponent experimentální sestavy

Všechny modely a výkresy byly vytvářeny v prostředí programu Autodesk Inventor (Professional 2013, Autodesk, Inc., San Rafael, CA, USA). Výkresová dokumentace se nalézá na příloženém CD ve složce “Výkresová dokumentace”.

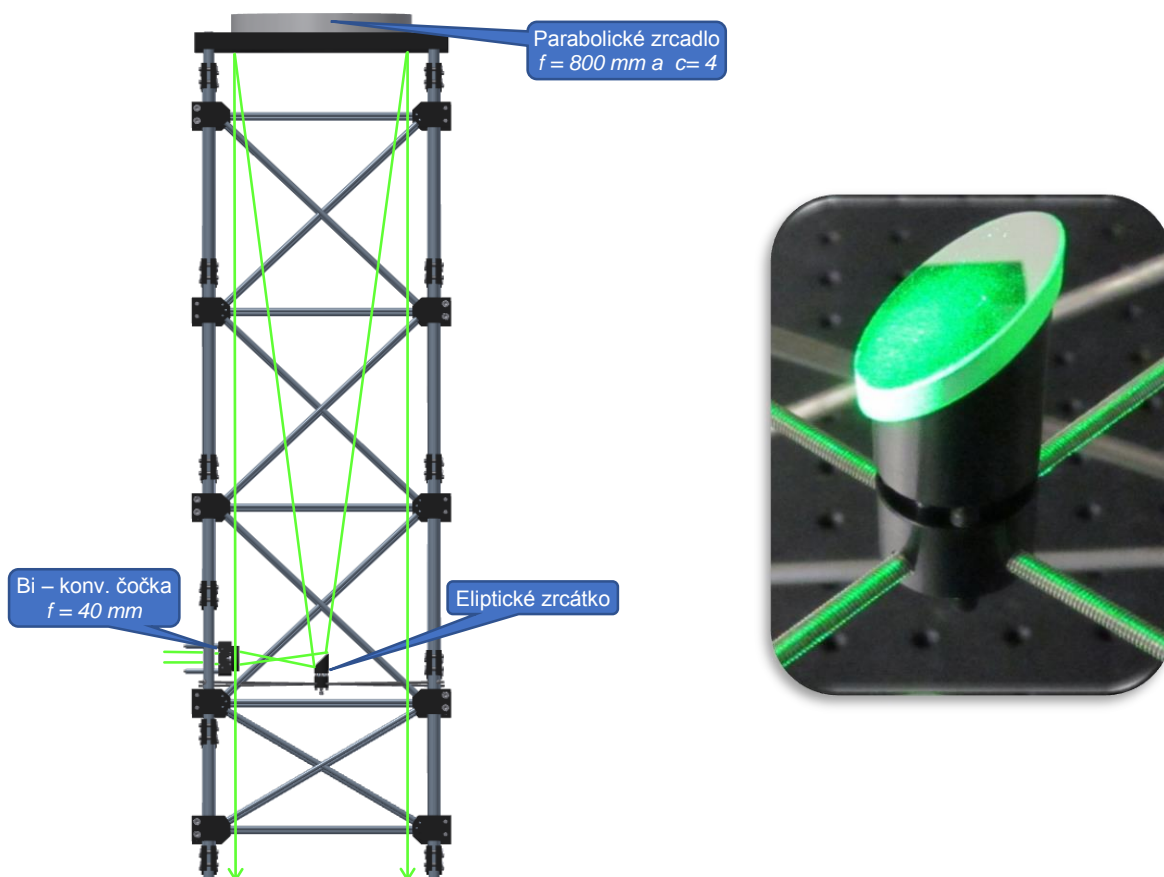
Mechanická část optické sestavy je složena z komponent od firmy Thorlabs a námi navržených prvků vytvořených pomocí programu Autodesk Inventor. Sestava byla navrhována s důrazem na jednoduchost, nízkou cenu a kompaktnost. Při návrhu bylo třeba dbát na zajištění dostatečné tuhosti sestavy, abychom minimalizovali přenos vibrací na optické součásti.

Sestavu můžeme rozdělit na 3 úseky. Prvním úsekem je osvětlovací část sestavy. Zde nejdříve vytvoříme kolimovaný laserový svazek o průměru 10 mm , který je lineárně polarizovaný. Tento svazek vytvoříme za přispění mikroskopového objektivu s numerickou aperturou $0,10$, prostorového filtru s dírkovou clonou o průměru $50\ \mu\text{m}$ a bikonvexní čočky o ohniskové vzdálenosti 40 mm . Dále svazek prochází polarizační dělicí kostkou a čtvrtvlnnou destičkou, která změní lineární polarizaci svazku na kruhovou. Na jedné straně dělicí kostky je také namontován Shack – Hartmannův senzor, který snímá odražený svazek od měřeného povrchu. Tato část je zobrazena na obrázku č. 24. Za druhý úsek jsme označili uchycení parabolického zrcadla do konstrukce věže, na kterou je osvětlovací část přichycena kovovou deskou. Věž je sestavena ze 4 tyčí spojených větším množstvím vzpěr. Tyto vzpěry jsou uchyceny do spojek pod úhlem 45° a 55° . Na vrchní straně je umístěna úložná deska pro parabolické zrcadlo.

4f systém začíná bikonvexní čočkou, která fokusuje kolimovaný svazek do ohniska parabolického zrcadla. Mechanika tohoto optického prvku nepatrně zasahuje do osvětlovacího svazku vytvořeného parabolickým zrcadlem. Dalším prvkem je eliptické zrcátko, které pod úhlem 45° odráží svazek vycházející z ohniska parabolického zrcadla. Zrcátko je přilepeno na hliníkovém podstavci, který je připojen šroubem k válcové základně. Základna je přichycena k věži pavoukem vytvořeným ze 4 závitových tyčí a pomocí čtyř stavěcích šroubů můžeme justovat náklon zrcátka. Tento způsob uchycení způsobuje centrální clonění, které můžeme využít k vycentrování odraženého svazku na střed CMOS detektoru. Parabolické zrcadlo, které je uloženo na vrcholu věže, vytváří osvětlovací svazek o průměru 200 mm . Tato část je potom zobrazena na obrázku č. 25. Poslední částí je naklápěcí stolek. Stolek se skládá z kovové desky, ke které jsou připevněny lišty. Pomocí šroubů s tlačnou kuličkou je stolek uložen na tři podložky s prizmatickým vybráním. Šrouby potom slouží k náklonu měřeného kusu. Návrh stolečku je zobrazen na obrázku č. 26.



Obr. č. 24: Osvětlovací část optické sestavy, kde se vytváří 10 mm kolimovaný laserový svazek. Tato část je připojena ke zbytku sestavy pomocí desky s přitlačným klínem a hranolkem. Zelenou barvou je označena transformace a dráha laserového svazku.



Obr. č. 25: Hlavní nosná konstrukce optické sestavy. Parabolické zrcadlo se nachází v úložné desce na vrcholu věže. Uprostřed se nachází eliptické zrcátko uchycené pomocí 4 závitových tyčí (vlevo). Detail mechaniky eliptického zrcátka (vpravo).

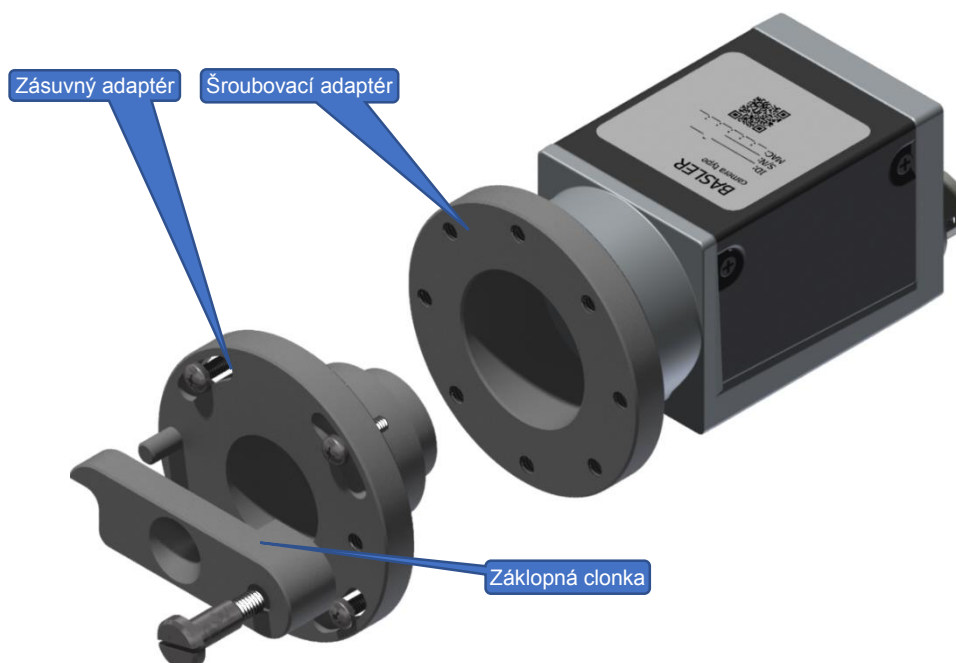


Obr. č. 26: Náklonný stoleček. Stoleček je podepřen dvěma ocelovými hranolky a stojí na třech opěrných bodech vytvořenými šrouby s tlačnou kuličkou. Šrouby se pohybují ve vybrání svírající úhel 17° .

5.1.3 Sestavení Shack – Hartmannova senzoru

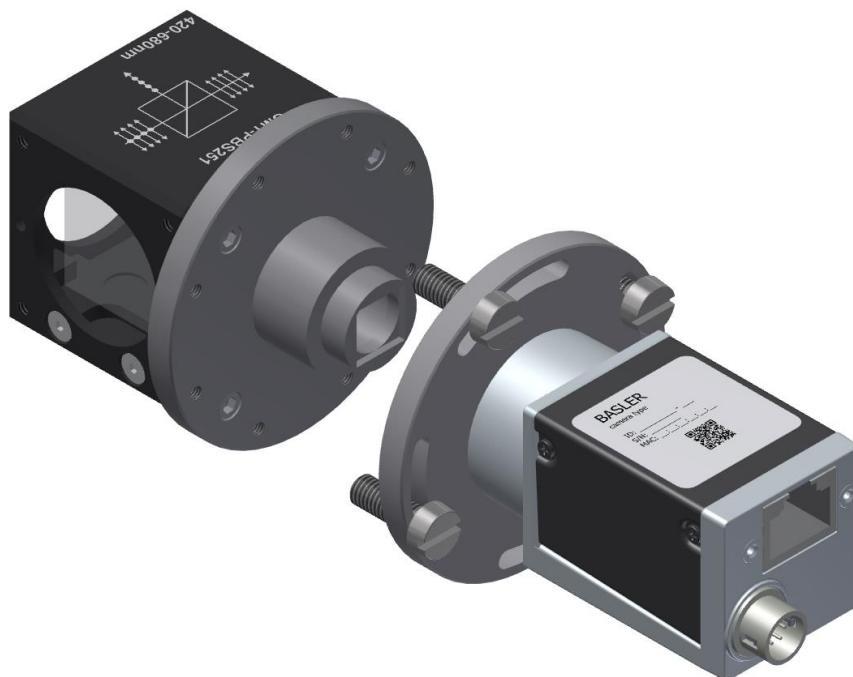
Pro sestavení Shack – Hartmannova senzoru jsme využili CMOS kameru od firmy Basler s typovým označením *acA2040 - 25gm*. Tato kamera je opatřena závitem typu C (o průměru *25,4 mm*). Pro vytvoření S – H senzoru bylo potřeba navrhnout mechanickou část pro uložení rastru mikročoček tak, aby se rovina čipu senzoru nacházela v blízkosti ohniskové roviny rastru. Rastr mikročoček jsme použili ve více variantách lišící se pouze velikostí ohniskové vzdálenosti. Námi použité rastry měly ohniskové vzdálenosti *18,6 mm*, *6,7 mm* a *5,2 mm*.

Pro naše experimenty jsme vytvořili dvě verze S – H senzoru. První verze je uzpůsobena pro využití jako samostatný snímač pro práci na optickém stole. Mechanika se skládá ze dvou dílů. První díl, který je použit jako redukce, se šroubuje přímo do závitu kamery a na konci je ukončen dosedací plochou opatřenou otvory pro šrouby. Redukce také vytváří vodící průměr pro druhý díl o velikosti *21 mm*. Druhý díl je poté opatřen úložným čtvercovým vybráním pro rastr mikročoček. Pro mikročočky s dlouhou ohniskovou vzdáleností je možné použít i přitlačný plochý kroužek, aby se rastr mikročoček nemusel lepit napevno k mechanice. Dosedací plocha obsahuje otvory pro uchycení záklopné clonky, dorazného kolíku a otvory pro uchycení tohoto dílu k prvnímu pomocí čtveřice šroubů. Záklopná clonka se používá k centraci dopadajícího svazku na střed čipu. Otvor ve clonce je navržen tak, aby propuštěný svazek osvětloval několik mikročoček. Tato verze mechaniky je zobrazena na obrázku č. 27.



Obr. č. 27: Mechanika pro uložení rastru mikročoček ke kameře. Mechanika se skládá ze šroubovací redukce, zásuvného kusu pro uložení rastru mikročoček a záklopné clonky pro centraci svazku na střed.

Druhá verze Shack – Hartmannova senzoru je přizpůsobena k upevnění do konstrukce naší experimentální sestavy. Mechanika byla navržena obdobně jako první verze. První díl, ve kterém je uložen rastr mikročoček, se šroubuje na tělo dělicí kostky. Druhý díl, který funguje znovu, jako redukce je našroubován do závitu kamery a jeho vodící průměr je opět 21 mm. Obě dosedací plochy jsou opatřeny závitovými otvory a obloukovými výřezy. Centraci svazku na střed čipu jsme v tomto případě vyřešili využitím stínu mechaniky eliptického zrcátka. Na obrázku č. 28 je vyobrazen návrh této mechaniky.



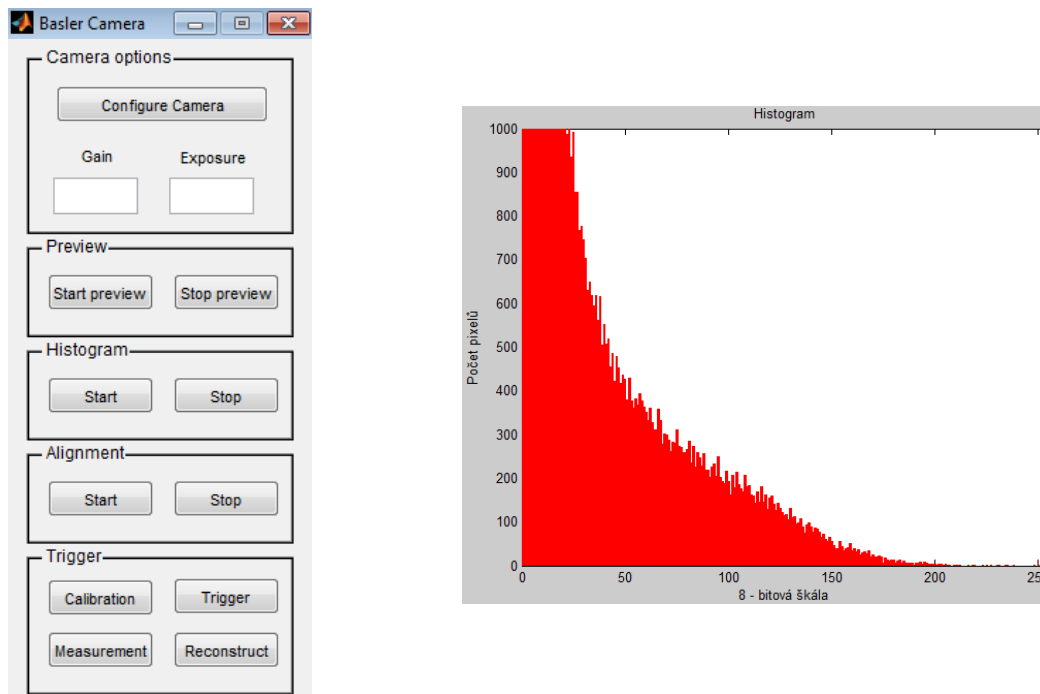
Obr. č. 28: Mechanika pro uložení rastru mikročoček ke kameře v experimentální sestavě. Mechanika se skládá ze šroubovací redukce a zásuvného kusu pro uložení rastru mikročoček.

5.2 Komunikace kamery Basler s PC a tvorba výpočetních algoritmů

Všechny výpočty byly prováděny v prostředí programu Matlab (MATLAB R2013b, Mathworks, Inc., Natick, MA, USA). Algoritmy jsou obsaženy na přiloženém CD jako příloha ve složce „Algoritmy Matlab“.

Komunikace kamery s počítačem probíhá přes rozhraní Gigabit Ethernet. Firma Basler dodává ke kameře zdarma vlastní software pod názvem „Basler Pylon“, který mimo jiné obsahuje knihovny C++ a další ovladače. Tento typ rozhraní a podpora řady ovladačů nám umožňuje k ovládní kamery použít i jiných programů jako je například program LabView nebo Matlab s jeho rozšířením „Image Acquisition Toolbox“. Tento toolbox obsahuje vlastní ovladače typu GigE Vision, které jsou s touto kamerou kompatibilní.

Skrze Grafické rozhraní Matlabu „Graphical user interface“, jsme vytvořili ovládací panel. Tento panel je zobrazen na obrázku č. 29 (vlevo). Panel obsahuje několik možností od nastavení základních parametrů kamery, přes přípravu a načtení signálu, až po různé výpočetní algoritmy.

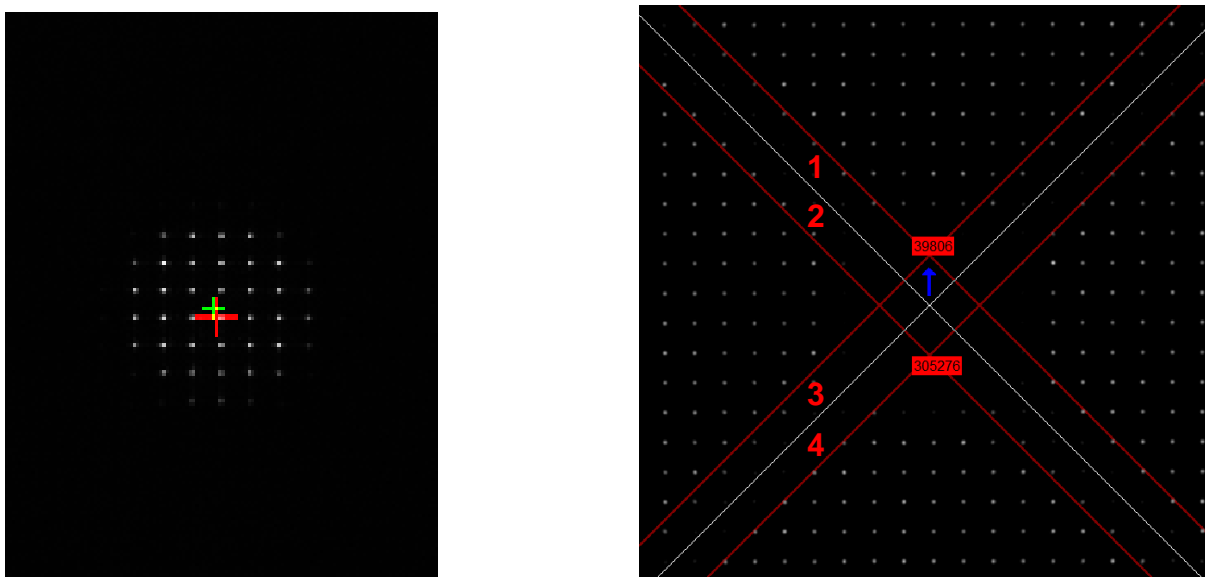


Obr. č. 29: Ovládací panel ke kameře Basler vytvořený v programu Matlab pomocí rozhraní GUI (vlevo). Ukázka funkce histogramu (vpravo).

První částí ovládacího panelu je okno “Camera options“. V tomto okně se nachází tlačítko “Configure camera“ s jehož pomocí si může uživatel načíst kameru podle typu připojení a vybrat si formát dat podle možností kamery. V našem případě se jedná o adaptér “GigE Vision“ spravující Ethernetovou komunikaci a formát dat typu “mono8“ odpovídající 8 - bitové škále. Pod tímto tlačítkem se nacházejí dvě editovací pole, která jsou označena názvy “Gain“ (zisk) a “Exposure“ (expozice). Po načtení kamery se v těchto polích objeví výchozí hodnoty daných parametrů, které můžeme měnit pouhým přepsáním. Kamera má i řadu dalších parametrů, které ale nejsou pro naši práci potřebné. Další částí je okno “Preview“ přes které si uživatel může otevřít okno zobrazující aktuální signál z kamery. Následující okno nese název “Histogram“. Kliknutím na tlačítko “Start“ se otevře další okno, ve kterém je zobrazen sloupový histogram odpovídající aktuálnímu signálu z kamery. Protože je signál 8 – bitový, pixely nabývají hodnot od 0 do 255. Prostřednictvím tohoto okna může uživatel kontrolovat saturaci signálu. Histogram odpovídající signálu z naší kamery je zobrazen na obrázku č. 29 (vpravo).

Předposlední prvkem našeho panelu je funkce nazvaná “Alignment“. Tato funkce slouží k centraci dopadajícího signálu na střed kamery. Pro S – H senzor ver.1 jsme pro centraci

svazku využili záklopné clonky. Tato záklopná clonka má otvor s průměrem 1 mm a na CMOS detektoru vytváří stopu o průměru odpovídajícímu 7 mikročočkám. Vycentrování svazku se poté provádí náklonem měřeného kusu pomocí stavěcích šroubů stolečku, tak aby se těžiště stopy clonky nacházelo v blízkosti středu čipu. Obrázek zobrazující proces centrace na této verzi senzoru je zobrazen na obrázku č. 30 (vlevo). Druhá verze senzoru z důvodu uchycení mechaniky k dělicí kostce neobsahuje žádnou clonku. Proto jsme k centraci dopadajícího signálu použili stínu centrálního clonění, způsobeného mechanikou eliptického zrcátka. Stín, který je ve tvaru X , si můžeme rozdělit na 4 stejné části, které jsou číselně označeny stejně jako na obrázku č. 30 (vpravo). Vycentrování svazku pak dosáhneme náklonem měřeného kusu tak, aby rozdíl součtu intenzit v první a třetí části se součtem v druhé a čtvrté části byl přibližně shodný s rozdílem součtu druhé a třetí části se součtem první a čtvrté části. Hodnoty obou rozdílů jsou vyobrazeny pod sebou v aktivním okně, kde jsou navíc zobrazeny modré navigační šipky, které ukazují směr kam je potřeba posunout obraz stínu na detektoru. Obrázek znázorňující tento způsob centrace je vyobrazen na obrázku č. 30 (vpravo).



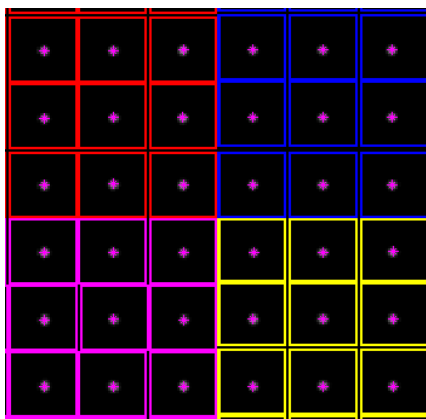
Obr. č. 30: Ukázka způsobu centrace dopadajícího signálu na střed senzoru. Způsob centrace svazku s použitím záklopné clonky (vlevo) a použití stínu centrálního clonění (vpravo).

Poslední částí je okno s názvem "Trigger". V tomto okně se nacházejí výpočetní algoritmy pro určení těžiště stop kalibru, měřeného kusu a algoritmus pro rekonstrukci měřené vlnoplochy. První tlačítko "Calibration" slouží k uložení matic obsahujících x a y souřadnice středů stop kalibru a matici intenzit příslušící subaperturám. Po stisknutí tohoto tlačítka se program zeptá, jestli uživatel provedl centraci pomocí dříve zmiňované funkce. Pokud ne, program skončí a je vyzván k jeho realizaci. V opačném případě funkce pokračuje dál a zeptá se, kolik si uživatel přeje načíst snímků kamery do paměti počítače pro následující výpočty. Po vybrání z nabídnutých možností a načtení matic do paměti, program vyzve uživatele k zakrytí referenčního kusu z důvodu získání informace o pozadí signálu, který je zatížen šumem a

reflexy od stěn dělicí kostky a zadní plochy $\lambda/4$ destičky. Z této informace se zjistí nejvyšší hodnota šumu, která se poté odečte. Nato se vytvoří okno se snímkem z kamery a uživatel je vyzván k vybrání prvního spotu kurzorem myši. Od tohoto prvního spotu se začnou počítat těžiště všech stop rozdělených do 4 kvadrantů. Těžiště se počítají pomocí vztahu (2.1-18). Subapertury zobrazující plochu, z které jsou počítány středy stop, jsou barevně odlišeny podle umístění k příslušejícímu kvadrantu.

Proces výpočtu těžišť a vyobrazení subapertur je znázorněno na obrázku č. 31. Na obrázku jsou zřetelná i prázdná místa mezi subaperturami, která jsou způsobena vzorkováním apertur mikročoček pixely detektoru. Pokud apertura odpovídá průměru $150 \mu\text{m}$ a velikost pixelu je $5,5 \mu\text{m}$, připadá na 1 subaperturu 27,27 pixelů. Z tohoto důvodu předpokládáme velikost výpočetní subapertury 26×26 pixelů. Toto omezení by nemělo nijak ovlivnit následný výpočet těžiště, protože při použití rastru mikročoček s ohniskovou vzdáleností $5,2 \text{ mm}$ je v detekční rovině vytvořena stopa o přibližném průměru $25,5 \mu\text{m}$, která pokrývá oblast 5-6 pixelů.

Po skončení výpočtů provede algoritmus uložení vypočtených matic a zeptá se uživatele, jestli si přeje tyto matice zobrazit na monitoru. Na závěr se program dotáže, jestli si uživatel přeje vypočítat odhad chyby určení polohy těžiště podle vzorce (2.1-20) a nebo směrodatnou odchylku určení těžiště v x a y souřadnici.



Obr. č. 31: Ukázka způsobu výpočtu těžišť stop a barevného vyobrazení kvadrantů. Z obrázku jsou patrná místa, která nejsou do výpočtu zahrnuta z důvodu vzorkování apertur mikročoček pixely detektoru.

Dalším tlačítkem označeným jako "Trigger" si uživatel může uložit aktuální signál dopadající na detektor pro pozdější výpočty. Předposlední tlačítko "Measurement" spustí algoritmus, pomocí něhož se opět vypočítají matice se souřadnicemi těžišť a intenzitní matice pro měřené rovinné zrcadlo. Začátek algoritmu je podobný jako v případě tlačítka "Calibration", kde jsou otázky na použití centrovacího algoritmu, na počet měření signálu a na zakrytí měřeného kusu pro zjištění informace o pozadí. Po prahování signálu se těžiště počítají v rámci polí o rozměru 26×26 pixelů definovaných při kalibraci a to na základě předpokladu měření rovinných ploch

málo se lišících od ideálního stavu. Po uložení matic s vypočtenými hodnotami si je může uživatel nechat zobrazit a vypočítat směrodatnou odchylku jako v předchozím případě.

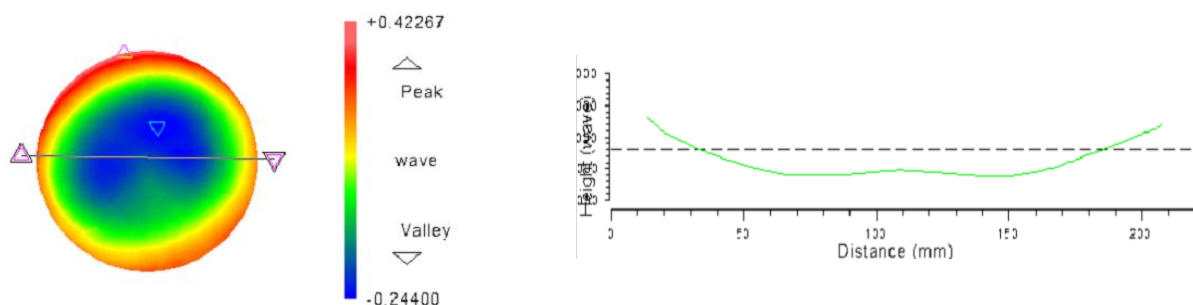
Poslední tlačítko našeho ovládacího panelu nese název "Reconstruct". Funkce tohoto tlačítka je vytvořit 3 - D rekonstrukci tvaru měřeného povrchu pomocí zonální rekonstrukce. Po stisknutí tlačítka dojde k načtení kalibrační matice a matice s náklony měřeného kusu. Tyto matice se od sebe odečtou a tím se získají dvě nové matice obsahující relativní hodnoty náklonů v x a y souřadnici. V další části se program zeptá, kterou ze tří metod má pro výpočet tvaru vlnoplochy použít. Metody jsou popsány v kapitole (2.1.4.1). Kromě toho se ještě zeptá, jestli si uživatel přeje vidět evoluci tvaru během iteračního cyklu. Po zodpovězení obou otázek program začne iterovat bod po bodu a po uplynutí definovaného počtu iterací vykreslí 2D i 3D tvar vlnoplochy.

5.3 Kalibrace a testovací měření rovinného zrcadla

Po sestavení experimentální sestavy a vytvoření potřebných algoritmů jsme se zaměřili na proces kalibrace sestavy pomocí rovinného zrcadla a ověření těchto algoritmů při měření testovacího kusu.

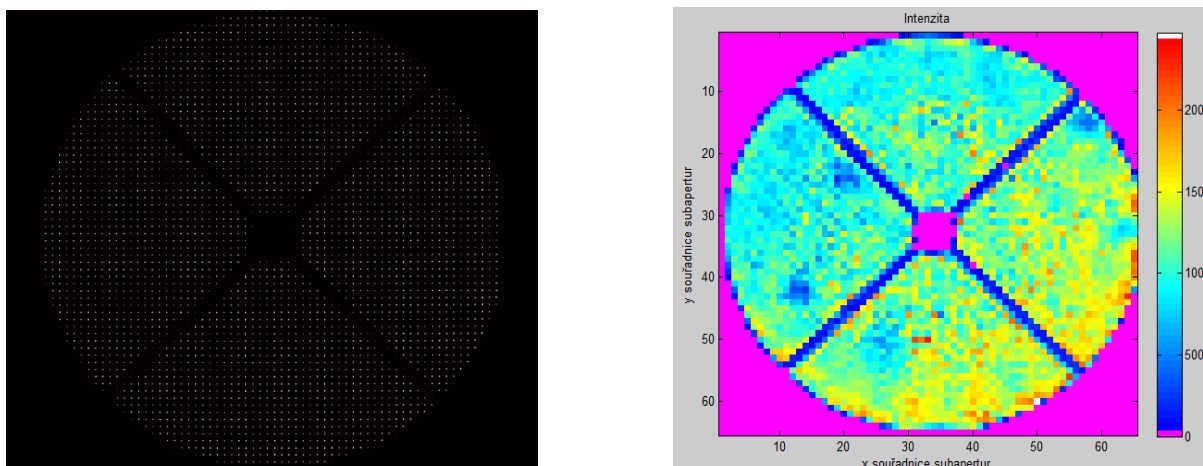
Kalibraci jsme nejprve zkoušeli provádět za pomoci olejové hladiny. Při použití tohoto typu reference bylo potřeba naklánět celou experimentální sestavou, abychom docílili uspokojivého vycentrování svazku na kameru. První problém, který se objevil, byla prachová zrna plovoucí na hladině. Povrchové napětí okolo prachových zrn způsobilo lokální deformace rovinné plochy, což se v rovině detektoru projevilo jako kruhové oblasti bez signálu. Další problém jsme pozorovali při měření optických prvků s malou odrazivostí, kdy intenzita pozadí daleko převyšovala studovaný signál. Kromě typického šumu kamery, byla přítomna i silná složka způsobená přední stranou $\lambda/4$ destičky. Při bližším prozkoumání a změření antireflexní vrstvy na spektrometru jsme zjistili, že minimum antireflexní vrstvy destičky je posunuto do oblasti vlnových délek 600 - 608 nm. Z těchto důvodů jsme upustili od využití tohoto typu reference a využili jsme rovinné zrcadlo o průměru cca 195 mm.

Rovinné zrcadlo musí být větší, než je průměr parabolického objektivu, aby se předešlo promítnutí okrajových vad desky. Informaci o tvaru povrchu jsme získali z měření na Stitch - interferometru ve firmě Meopta – Optika s.r.o., kde P – V hodnota odpovídala 0,66 vlnové délky. Tvar povrchu této desky je zobrazen na obrázku č. 32 vlevo a profil řezu vpravo.

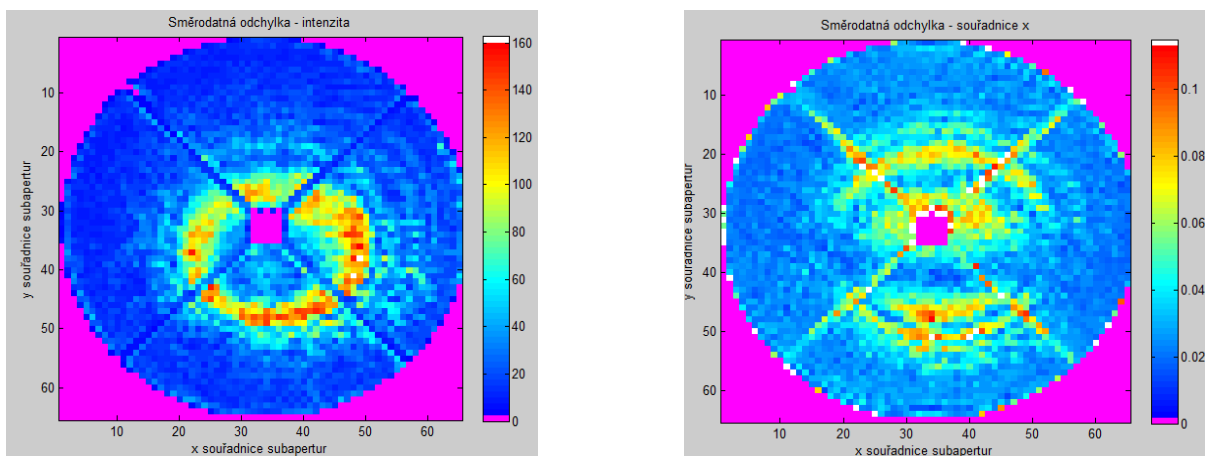


Obr. č. 32: Výstup při měření kalibrační desky z interferometrického měření. Obrázek vlevo zobrazuje tvar povrchu. Obrázek vpravo odpovídá profilu řezu.

Na dalším obrázku č. 33 vlevo je znázorněn signál z kalibračního měření a vpravo intenzita vzorkována na velikost subapertury. Referenční matice se skládá z 65 x 65 obrazových bodů. Na obrázku s intenzitami jsou vidět místa s velkým poklesem, které byly způsobeny prachovými částicemi uvnitř původně použitého mikroskopového objektivu. Po vypočítání směrodatné odchylky pro zaznamenanou intenzitu a souřadnice těžišť v rámci 200 měření jsme zjistili, že při dané konfiguraci jsou v centrální části vysoké. Tyto odchylky pro intenzitní rozložení a souřadnici x jsou zaznamenány na obrázcích č. 34 vlevo a vpravo. Po bližším přezkoumání použitých komponent jsme zjistili, že námi použitý laser má dlouhou koherenční délku. Tato koherenční délka s kombinací dlouhé optické dráhy a nežádoucích reflexů způsobuje časově proměnnou interferenci.

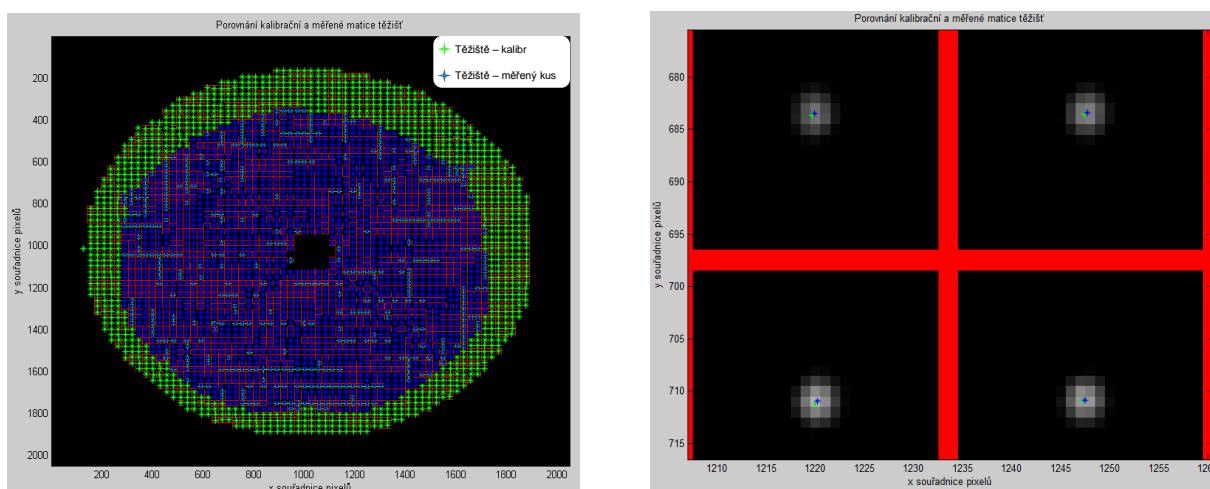


Obr. č. 33: Levý obrázek odpovídá naměřenému signálu při měření referenčního zrcadla. Z obrázku je dobře patrné centrální clonění, které se využívá pro centraci svazku na střed detektoru. Pravý obrázek popisuje rozložení intenzity dopadajícího signálu vzorkovaného aperturami mikročoček. V obrázku se nacházejí místa s výrazným poklesem intenzity způsobené prachovými částicemi uvnitř mikroskopového objektivu.



Obr. č. 34: Směrodatná odchylka intenzitního rozdělení pro 200 měření (vlevo) a pro hodnoty souřadnic x (vpravo).

Po zaznamenání kalibrační matice jsme provedli měření menšího rovinného zrcadla. Po vycentrování signálu pomocí funkce "Alignment" jsme opět spočítali matici těžišť a porovnali s maticí referenčního kalibru. Tato situace je znázorněna na obrázku č. 35 vlevo. Na obrázku č. 35 vpravo jsou ilustrovány odchylky těžišť měřeného kusu od kalibru. Z tohoto obrázku je zřetelné, že se těžiště měřeného kusu odchylují jen velmi málo od referenčního kusu. Matice měřeného kusu pokrývá oblast 53 x 53 obrazových bodů.



Obr. č. 35: Zobrazení plochy měřeného kusu vůči kalibru (vpravo). Znázornění odchylek těžišť měřeného kusu od referenčních poloh (vlevo).

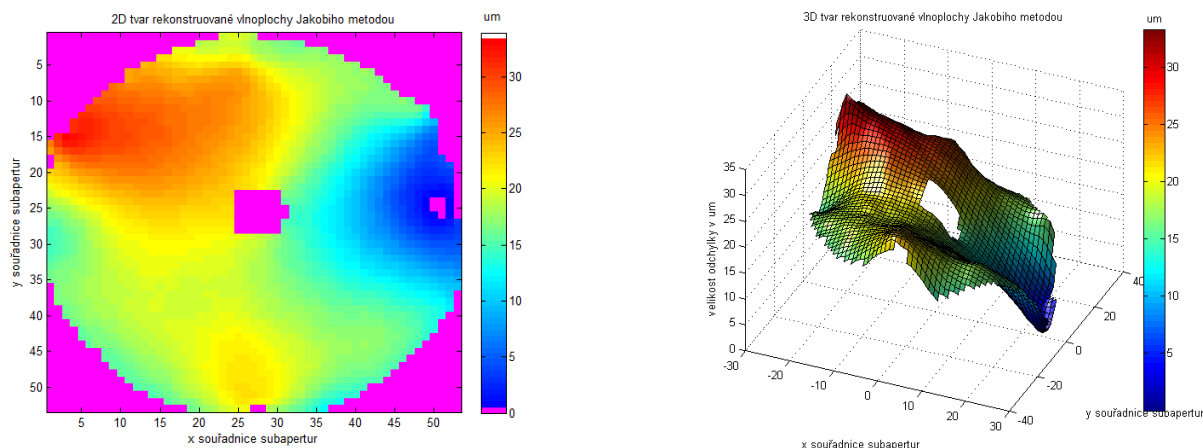
Na závěr jsme provedli rekonstrukci tvaru vlnoplochy pomocí všech tří rekonstrukčních metod popsanych v kapitole (2.1.4.1). Tyto metody konvergují s různým počtem iterací. Pro tvar vlnoplochy, odpovídající tvaru měřeného povrchu v jednotkách μm , je potřeba matice vynásobit faktorem c , který je vytvořen z parametrů rastru mikročoček a velikosti pixelu detektoru. Faktor c můžeme zapsat pomocí vztahu

$$c = \frac{1}{2} \frac{d_{pix} h_{\mu\check{c}}}{f_{\mu\check{c}}}, \quad 5.3-1$$

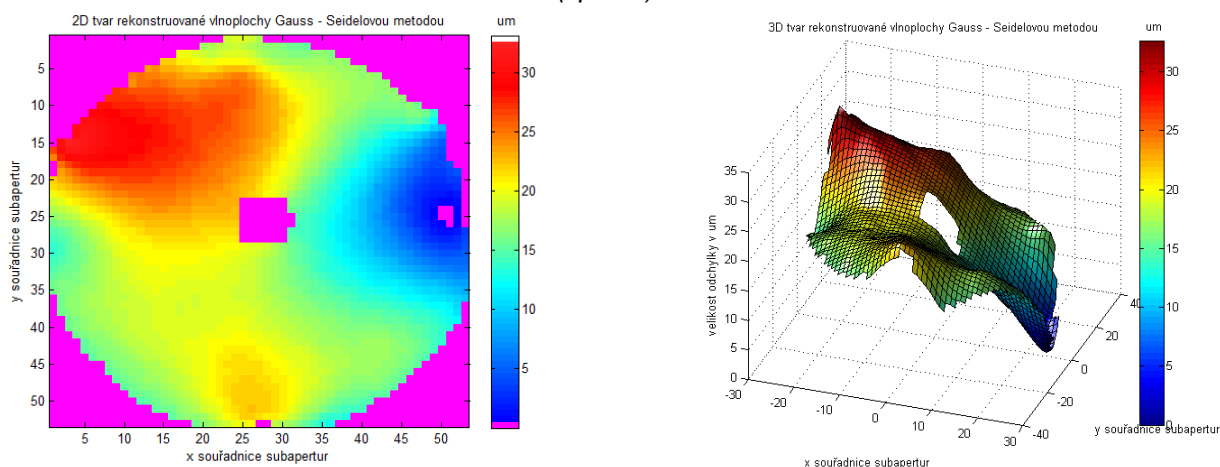
kde $h_{\mu\check{c}}$ odpovídá rozteči mikročoček, $f_{\mu\check{c}}$ ohniskové vzdálenosti mikročočky a d_{pix} je velikost pixelu detektoru. Pro naši konfiguraci senzoru můžeme předešlý vztah zapsat

$$c = \frac{1}{2} \frac{5,5 \times 150}{5200} = 0,07932 \mu m. \quad 5.3-2$$

První použitá metoda byla Jakobiho. Tato metoda potřebuje ke konvergenci tvaru vlnoplochy velké množství iterací a výsledný tvar bývá proto navíc zatížen malou reziduální chybou. Pro naše data bylo potřeba spočítat přibližně 8000 iterací. Tvar rekonstruované vlnoplochy je znázorněn ve 2D a 3D tvaru na obrázku č. 36 vlevo a vpravo. Druhá byla Gauss – Seidelova metoda, která se od první nepatrně liší způsobem predikce tvaru vlnoplochy. Tato metoda potřebovala přibližně 5000 iterací ke konvergentnímu tvaru. Stejně jako u předchozí metody byla i tato metoda zatížena malou reziduální chybou. Tvar získaný touto metodou je na obrázku č. 37.

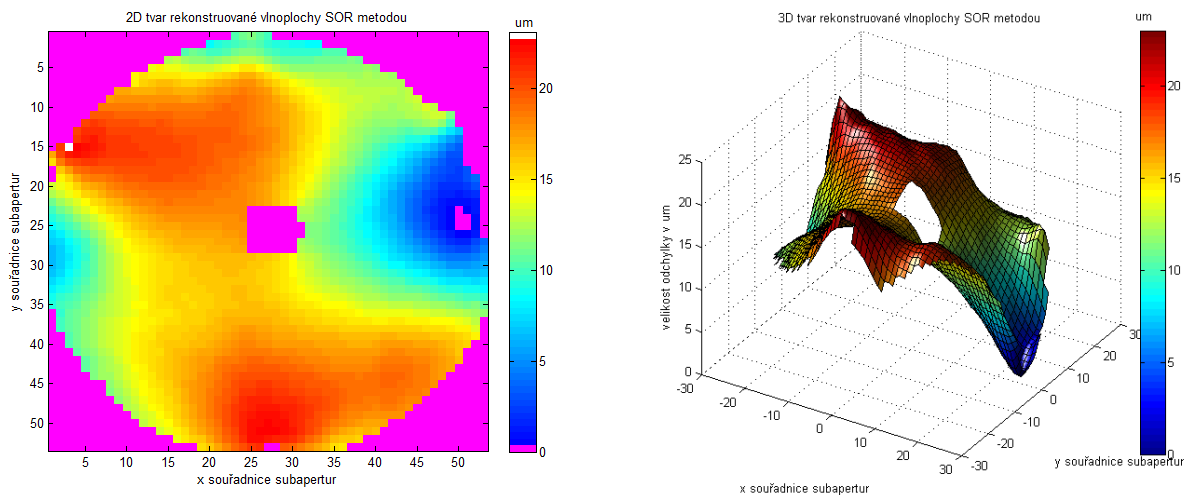


Obr. č. 36: Vyobrazení tvaru rekonstruované vlnoplochy Jakobiho metodou ve 2D (vlevo) a ve 3D (vpravo).



Obr. č. 37: Vyobrazení tvaru rekonstruované vlnoplochy Gauss – Seidelovou metodou ve 2D (vlevo) a ve 3D (vpravo).

Poslední metoda byla metoda postupných překmitů (SOR metoda). Tato metoda využívá k odhadu tvaru vlnoplochy předešlé iterační hodnoty. Díky tomu je potřeba velmi malé množství iterací. V našem případě bylo k odhadu tvaru potřeba pouze 200 iterací. Tvar získaný touto metodou je znázorněn na obrázku č. 38.



Obr. č. 38: Vyobrazení tvaru rekonstruované vlnoplochy metodou postupných překmitů ve 2D (vlevo) a ve 3D (vpravo).

6 Závěr

Tato práce si kladla za cíl vytvořit laboratorní vzorek optické sestavy pro měření rovinných ploch pomocí Shack – Hartmannova senzoru vlnoplochy. Počáteční návrh optické sestavy byl vytvořen v prostředí programu OSLO, kde se studoval chod paprsků uvnitř sestavy. Po těchto simulacích s různými druhy deformací měřeného povrchu byla navržena, jak definitivní optická sestava, tak i odpovídající konstrukce mechaniky. Dále byla navržena mechanika senzoru, která se skládá z úchytu rastru mikročoček pro CMOS kameru Basler. Posledním krokem bylo vytvoření programu komunikace kamery s počítačem a sepsání výpočetních algoritmů pro zpracování získaného signálu z kamery v prostředí Matlab.

Po zkonstruování optické sestavy jsme provedli kalibrační měření s rovinou deskou. Během tohoto měření jsme narazili na problémy s parazitními odrazy. Po přezkoumání optických prvků jsme zjistili, že kromě slabých parazitních odrazů od stěn dělící kostky a eliptického zrcátka se vytváří silný parazitní odraz, který vzniká od zadní plochy $\lambda/4$ destičky. Tato destička by měla být opatřena anti – reflexní vrstvou pro vlnovou délku 532 nm . Po změření na spektrometru jsme naměřili minimum odraženého světla na vlnové délce 608 nm . Dalším problémem, jenž jsme objevili, byla časově proměnná interference v rovině detektoru. Tato proměnná interference způsobovala výkyvy v intenzitním rozložení některých spotů, a tím i určení polohy jejich těžišť. Tento nežádoucí efekt jsme přisoudili velké optické dráze, kterou musí světlo urazit od měřeného kusu k senzoru, parazitním odrazům a v neposlední řadě velké koherenční délce použitého laseru.

Dalším krokem bylo testovací měření menšího rovinného zrcadla. Úkolem tohoto testovacího měření mělo být potvrzení funkčnosti námi navržených algoritmů. První z algoritmů, který jsme testovali, byla funkce využívající stínu centrálního clonění pro centraci signálu na střed detektoru. Další testované algoritmy byly pro záznam signálu a kalkulaci těžišť referenční plochy a měřeného kusu. Posledním byl rekonstrukční algoritmus, který z naměřených náklonů těžišť vytvoří 3D tvar vlnoplochy.

Tato diplomová práce byla řešena s využitím podpory projektu IGA “*Moderní optika a její aplikace*”, č. PŘF – 2013 – 019 a č. IGA_PŘF – 2014014 a balíčku č. 5 projektu TAČR “*Centrum digitální optiky*”, č. TE01020229. Výsledky budou částečně využity v dalším řešení tohoto projektu.

7 Seznam literatury

- [1] ČSN ISO 10110. *Optics and optical instruments: Preparation of optical drawings for optical elements and systems*. 2. vyd.
- [2] MALACARA, Daniel. *Optical shop testing*. 3rd edition. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007, 862 p. ISBN 04-714-8404-0.
- [3] EDMUND OPTICS INC. *Optical flat manual: Optical Techniques for Measuring Flatness* [online]. 2014, 22 s. [cit. 29. 3. 2014]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/technical-support/technical-library/marketing-literature/files/eo-optical-flat-manual.pdf>
- [4] WYANT, James C. *Optics 513: Non-Interferometric Testing* [online]. [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://www.visualopticslab.com/opti515/background/noninterferometric.pdf>
- [5] NEAL, Daniel R., James COPLAND, David A. NEAL, Angela DUPARR a Bhanwar SINGH. *Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy*. SPIE Proceedings, 2002, Vol. 4779, s. 148-160. DOI: 10.1117/12.450850. [cit. 12.4.2014]
- [6] MANSURIPUR, Masud. *Classical optics and its applications*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009, xii, 701 p. ISBN 978-052-1881-692.
- [7] SUSS MICROOPTICS SA. *SMO TechInfo Sheet 11: Shack Hartmann wavefront sensors*. leden 2008 v1.0, 4 s. [cit. 12.4.2014] Dostupné z: http://www.suss-microoptics.com/media/downloads/SMO_TechInfo_Sheet_11.pdf
- [8] PLATT BC, SHACK R. *History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing*, J Refract Surg, 2001; 17:s. 573-577.
- [9] THOMAS, S., T. FUSCO, A. TOKOVININ, M. NICOLLE, V. MICHAU a G. ROUSSET. *Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2006-09-01, vol. 371, issue 1, s. 323-336. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10661.x. Dostupné z: <http://mnras.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1111/j.1365-2966.2006.10661.x>
- [10] LAMBDA RESEARCH CORPORATION. *Optics Reference* [online]. 2001 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.sinopt.com/software1/downloads1/Optics_Reference.pdf
- [11] LAMBDA RESEARCH CORPORATION. *Program Reference* [online]. 2001 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ags.yuntech.edu.tw/dmdocuments/OSLOProgramRef6X.pdf>
- [12] SOUTHWELL, W.H. *Wave-front estimation from wave-front slope measurements*. Journal of the Optical Society of America, August 1980, Vol. 70, č. 8, s. 998-1006.

- [13] PANAGOPOULOU, Sophia I. a Daniel R. NEAL. *Zernike vs. Zonal Matrix Iterative Wavefront Reconstructor*, [cit. 2014-07-11]. s. 10. Dostupné z:
<http://www.lumetrics.com/documents/wavefront/Zernike%20vs%20Zonal.pdf>
- [14] ZOU, Weiyao a Jannick P. ROLLAND. *Iterative zonal wave-front estimation algorithm for optical testing with general-shaped pupils*. *Journal of the Optical Society of America A*. 2005, vol. 22, issue 5, s. 938-951. DOI: 10.1364/JOSAA.22.000938. Dostupné z:
<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=JOSAA-22-5-938>

8 Přílohy

Přílohy vložené na CD:

- Text práce – soubor s názvem..... ***DP_Paúr.pdf***
- Výpočetní algoritmy složka s názvem ***Algoritmy Matlab***
- Výkresová dokumentace – složka s názvem ***Výkresová dokumentace***
- Návrh sestavy v programu OSLO – složka s názvem ***Program OSLO***