



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Optimalizace holografické metody pro měření topografie povrchu

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P 3901 – Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor: 3901V055 – Aplikované vědy v inženýrství

Autor práce: **František Kaván**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Psota, Ph.D.





Obsah

1	Úvod.....	5
2	Holografie.....	8
2.1	Rekonstrukce hologramu.....	8
3	Měření tvaru pomocí digitální holografie.....	9
3.1	Měření ve Fourierovském schématu.....	9
3.2	Měření tvaru pomocí diskrétních vlnových délek.....	12
3.3	Měření pomocí kontinuálního přeladění vlnové délky.....	14
4	Analýza chyb digitální holografické metody.....	15
4.1	Schéma experimentů k nalezení zdrojů chyb.....	15
4.2	Výsledky experimentů k nalezení zdrojů chyb.....	16
4.2.1	Závislost chyby měření na intenzitě.....	16
4.2.2	Závislost chyby měření na sklonu vlnoploch.....	17
4.2.3	Vliv mikrodrsnosti povrchu na chybu měření.....	19
5	Stanovení maximální přesnosti DH.....	20
5.1	Výsledky měření.....	21
6	Optimalizace sestavy.....	22
6.1	Sestava pro měření freeform objektů.....	23
6.2	Porovnání měření s Fourierovským schématem.....	24
6.3	Měření PMMA objektu.....	25
6.4	Měření freeform objektu tworadii.....	27
7	Shrnutí výsledků a výhled.....	29
8	Seznam použité literatury.....	Chyba! Záložka není definována.

Cíle práce

- Teoretický rozbor metody a nalezení zdrojů chyb
- Na základě nalezených zdrojů chyb navrhnout postupy vedoucí k odstranění problematických aspektů metody
- Multikriteriální optimalizace holografického uspořádání s využitím zjištěných poznatků
- Optimalizace a automatizace sběru a vyhodnocení dat s využitím moderních kamer a přeladitelných laserů
- Ověření funkčnosti metody na jinak obtížně měřitelných objektech především s volnou (freeform) geometrií povrchu

Shrnutí obsahu disertační práce

Úvodní kapitoly se zabývají teoretickým úvodem do fyzikálního popisu světla a jeho zdrojů využívaných v holografii. Dále jsou rozebrány základní principy chování světla, které se využívají v holografických měřeních [1-16]. V dalších kapitolách se pak nachází úvod do optických povrchů a popisu jejich tvaru [17-21]. Dále jsou rozebírány principy interference, difrakce a základní popis holografie [22-28]. Poslední kapitoly jsou pak již věnovány samotnému měření, jeho optimalizaci provedení experimentů k nalezení zdrojů chyb a měření na optimalizované sestavě [29-43].

1 Úvod

Zrychlující se tempo vývoje přesných optických elementů s obecnými (tzv. freeform) povrchy s sebou nese také zvýšenou poptávku po jejich přesném měření. V současnosti existuje mnoho způsobů, jak měřit topografii povrchu. Specifické potřeby měření zmíněných optických povrchů ať už ve stádiu broušení či po jejich vyleštění však možnosti využití většiny měřicích technik znemožňují. Zásadní nároky na měření těchto elementů jsou především vysoká přesnost (stovky nanometrů) v rámci vysokých měřených rozsahů (až desítky milimetrů), vysoké rozlišení (alespoň 500×500 bodů na měřenou plochu) či bezkontaktnost

Možnosti měření topografie povrchů užívané na optické plochy jsou např. kontaktní metody odvozené od souřadnicového jednobodového měření (CMM) s přesností v řádu mikrometrů. CMM měření je poměrně robustní, má však také mnoho nevýhod. Jednou z nich je složité nastavení u komplexních objektů, nízká prostorové rozlišení a rychlost, jelikož měření probíhá bod po bodu či kontakt sondy s povrchem. Další jednobodová (rastrovací) metoda pro měření topografie je mikroskopie atomárních sil (AFM). Ta sice poskytuje sub-nanometrovou přesnost a vysoké prostorové rozlišení měření, avšak v rámci velmi malého měřicího rozsahu a měřené plochy (běžně cca 100×100 μm) a je tak spíše vhodná pouze pro určení tzv. mikrodrsnosti optických ploch než k měření jejich topografie. Bezkontaktní optické metody jako např. standardní interferometrie či digitální holografická interferometrie jsou z pohledu přesnosti i rozlišení vhodné, jejich použití pro broušené povrchy s volnou geometrií povrchu je však

velmi limitované, jak bude dále vysvětleno. Ostatní optické metody jako např. projekce proužků či Moiré techniky nedosahují dostatečné přesnosti (v řádu desítek mikrometrů).

Tradiční interferometrické metody jsou založené na porovnávání měřeného povrchu vůči referenční vlně, která má velmi podobný tvar. Pak lze za splnění několika podmínek pozorovat interferenční obrazec, který nám dává informaci o odchylce povrchu od reference. Tyto metody jsou velmi přesné (řádově jednotky nanometrů). Zásadní podmínkou pro aplikaci klasické interferometrie je nutnost referenční vlny tvarově velmi podobné s objektem a také nutnost leštěného povrchu vzorku. To je však v případě broušených povrchů či povrchů s obecným tvarem nedosažitelné. Dalším omezením je měřicí rozsah, který je závislý na použité vlnové délce a také spojitosti objektu. Pokud se na objektu nachází nespojitosti, skoky větší než vlnová délka, nelze je jednoznačně měřit.

Limit rozsahu této metody obchází metoda zvaná dvouvlánná interferometrie, která využívá dvou různých vlnových délek a je schopna výrazně rozšířit měřicí rozsah v závislosti na zvolené vlnové délce (viz Kapitola 3.2 – Syntetická vlnová délka), ovšem za cenu zhoršení přesnosti. Stále však platí omezení na leštěné povrchy. V případě broušených povrchů lze využít principů digitální holografické interferometrie (DHI). Ta využívá interferometrie pro záznam fáze vlny pocházející z objektu. Rekonstrukce vlnoplochy v místě objektu pak probíhá numericky. Existuje několik technik v rámci DHI, které umožňují měření topografie objektů.

První z nich vychází z techniky Wavelength Scanning Interferometry (WSI), která je vhodná pro měření objektů s malou komplexností povrchů a

dosahuje pro optické povrchy nedostatečné přesnosti vzhledem k malému přeladění vlnové délky. V rámci disertační práce byla vyvinuta DHI metoda s plynulým přeladěním vlnové délky (Frequency Sweeping Digital Holography – FSDH), která má velký rozsah měření a díky unikátní kombinaci měření z několika laserových zdrojů je schopna absolutního měření s vysokou přesností (stovky nm).

Druhá technika je měření pomocí diskrétních, vhodně zvolených hodnot vlnových délek, které je vlastně zjednodušením a zrychlením FSDH. Standardní vícevlenná DHI (MDHI), zvyšuje jinak omezený dynamický rozsah měření dvouvlenné metody, kde je možné měřit i objekty s velkými výškovými skoky v jednotkách milimetrů, ale přesnost pak dosahuje pouze 50 μm . Dalším vývojem a optimalizací vícevlenné techniky bylo dosaženo požadované přesnosti (stovky nanometrů) a tudíž ji je možné použít pro měření optických ploch.

Vyvinutá metoda (ať již s využitím FSDH či MDHI) umožňuje měření broušených i leštěných povrchů s velkým rozsahem měření až v jednotkách centimetrů, zároveň ale dosahuje submikrometrové přesnosti, jelikož nejkratší možná syntetická vlnová délka se pohybuje okolo 8 μm . Je tedy velmi univerzálním nástrojem k měření jinak obtížně měřitelných objektů a čoček bez nutnosti jejich leštění před měřením.

2 Holografie

Slovo holografie vzniklo z latinského **holos** – celý a **graphein** – zapsat. Při klasické fotografii se zaznamenává pouze světlo odražené od objektu. Toto světlo pochází z nekoherentních zdrojů – slunce, blesku fotoaparátu nebo třeba žárovky. Takto můžeme zaznamenávat pouze intenzitu světla, nikoliv jeho komplexní podstatu. Holografie tento fakt obchází použitím koherentního světla (laseru) a přidáním dalšího zdroje světla – referenční vlny, která pochází ze stejného zdroje jako vlna odražená od objektu, tzv. objektová vlna. Hologram pak vznikne na základě interference referenční a objektové vlny. Opět zaznamenáváme intenzitu záření, která je rovna kvadrátu součtu pole referenční a objektové vlny, jak je možno vidět ve vztahu (1).

$$\begin{aligned}
 h &= |E_s + E_r|^2 = |E_s|^2 + |E_r|^2 + E_s^* E_r + E_s E_r^* \\
 &= I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(\phi_r - \phi_s)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2.1 Rekonstrukce hologramu

Pro rekonstrukci hologramu lze využít mnoho algoritmů, odpovídajících různým geometriím měření. Nejjednodušší pro rekonstrukci je použití tzv. Fourierovského schématu. To je výhodné, jelikož rekonstrukci hologramu lze provést pouhým aplikováním Fourierovy transformace na zaznamenaná data.

Při měření pomocí Fourierovského schématu se ukázalo, že není vhodné na všechny typy objektů, pro měření některých náročnějších objektů je nutné použít složitější schéma, což vede k použití složitějších rekonstrukčních algoritmů.

3 Měření tvaru pomocí digitální holografie

Pro měření pomocí digitální holografie jsou nutné dvě vlny, které spolu interferují – signální a referenční. Signální větev osvětluje objekt a od něj se odráží světlo do kamery. Světlo z referenční větve pak putuje z vlákna přímo do kamery. Zde dojde k interferenci a kamerou je zaznamenán interferenční obrazec – hologram. Ten je pak rekonstruován. Výsledkem je pole komplexních čísel, ze kterého získáme fázi ϕ jako úhel v komplexní rovině.

Fáze v hologramu je přímo úměrná rozdílu optických drah referenční a signální vlny, který závisí na poloze bodů na povrchu. Obecná závislost fázového rozdílu je následující:

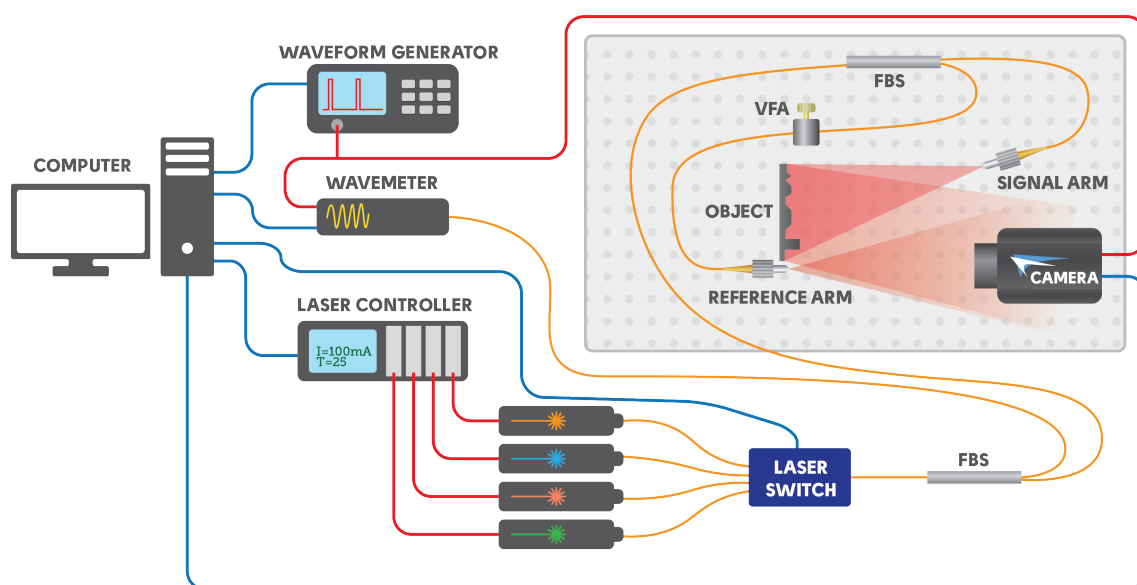
$$\phi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(P) = k\delta(P) \quad (2)$$

Proměnná k vyjadřuje vlnové číslo, λ pak vlnovou délku použitého záření a $\delta(P)$ rozdíl optických drah (Optical Path Difference – OPD) v bodě objektu P . Vztah mezi tvarem objektu a rozdílem optických drah je obecně netriviální. Závisí na směru dopadu a pozorování. Rozdíl optických drah je pak roven $\delta(P) = \vec{s}(P) - \vec{b}(P)$, kde \vec{s} a \vec{b} jsou jednotkové vektory. Pro kolmý dopad pak platí $\delta(P) = 2h_z(P)$.

3.1 Měření ve Fourierovském schématu

Na Obr. 3.1 je možné vidět schéma měřicí aparatury pro tzv. Fourierovské schéma. To využívá stejné vzdálenosti objektu a referenční vlny od kamery. Poloměry křivosti sférické vlny z referenčního vlákna a dílčích sférických vln

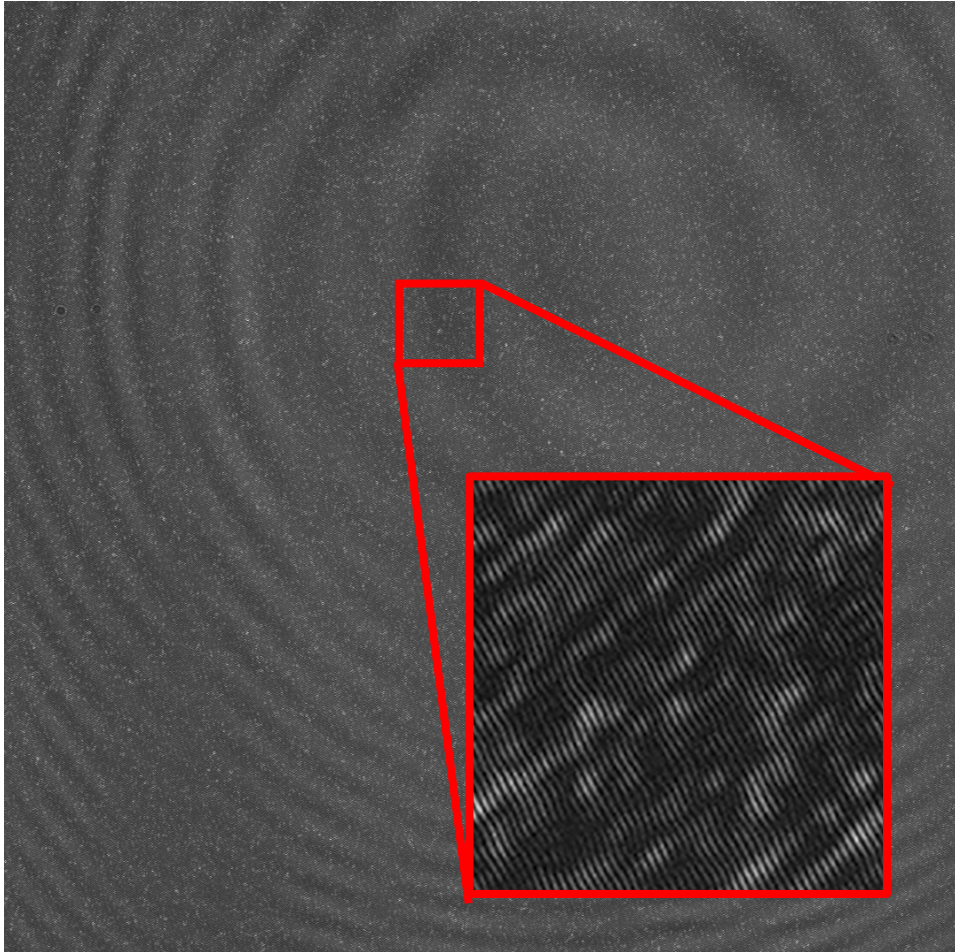
odražených od objektu jsou tak téměř stejné. Díky tomu šíření vlnění a také interferenční obrazec odpovídá Fraunhoferově aproximaci šíření ve vzdáleném poli. Vzhledem k tomu lze pak hologram rekonstruovat pomocí paraxiální Fraunhoferovy aproximace.



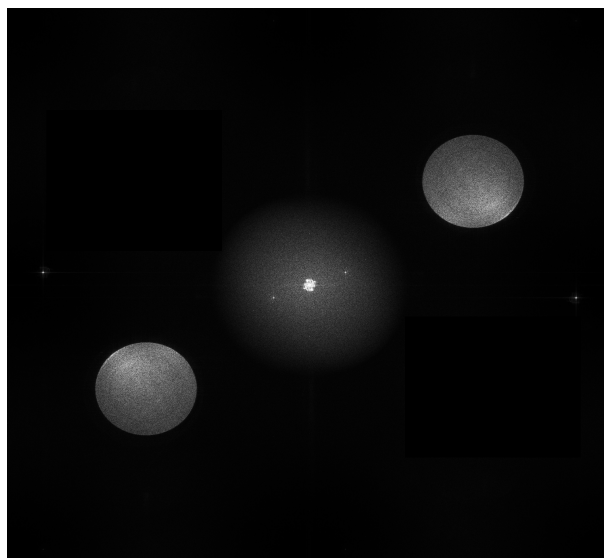
Obr. 3.1: Schéma měřicí aparatury ve Fourierovském schématu

Na Obr. 3.2 je možné vidět digitální hologram. Při rekonstrukci pak vzniknou dva různé, středově symetrické obrazy objektu (tzv. reálný a imaginární řád) a tzv. nultý řád (Obr. 3.3).

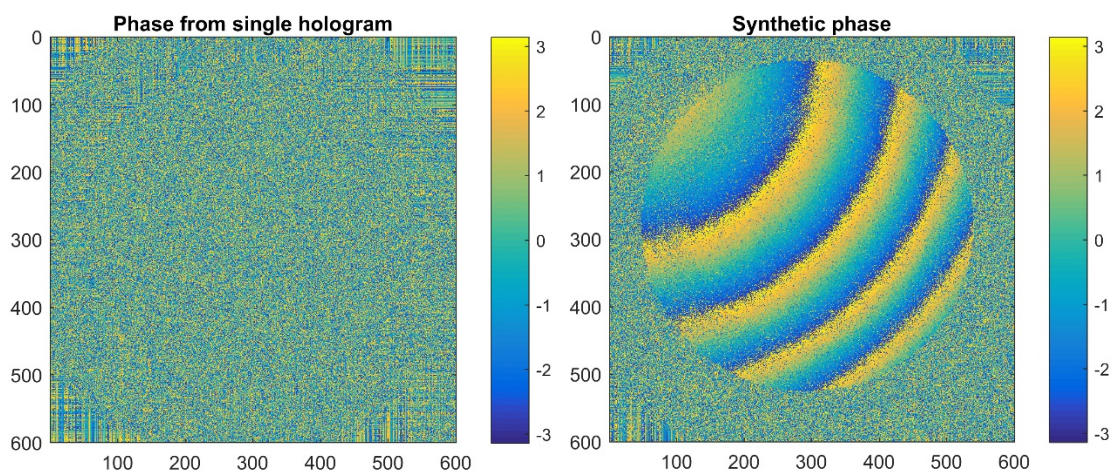
Pokud vykreslíme fázi z jednoho hologramu, z jedné vlnové délky - Obr. 3.4 vlevo, je vidět, že z něj nelze získat o tvaru objektu žádnou informaci. To je způsobeno hlavně vlivem koherenčního zrnění (speckles). Pokud budeme zkoumat fázový rozdíl mezi dvěma hologramy o odlišných vlnových délkách (780 nm a 781 nm), pak jsme již schopni ze zdánlivě náhodného rozložení fáze získat informaci o tvaru objektu - Obr. 3.4 vpravo.



Obr. 3.2: Hologram



Obr. 3.3: Rekonstruovaný hologram – intenzita



Obr. 3.4: Fáze v hologramu

Fáze jednoho hologramu, vlnová délka 780nm (vlevo), syntetická fáze ze dvou hologramů, syntetická vlnová délka 100 μm (vpravo)

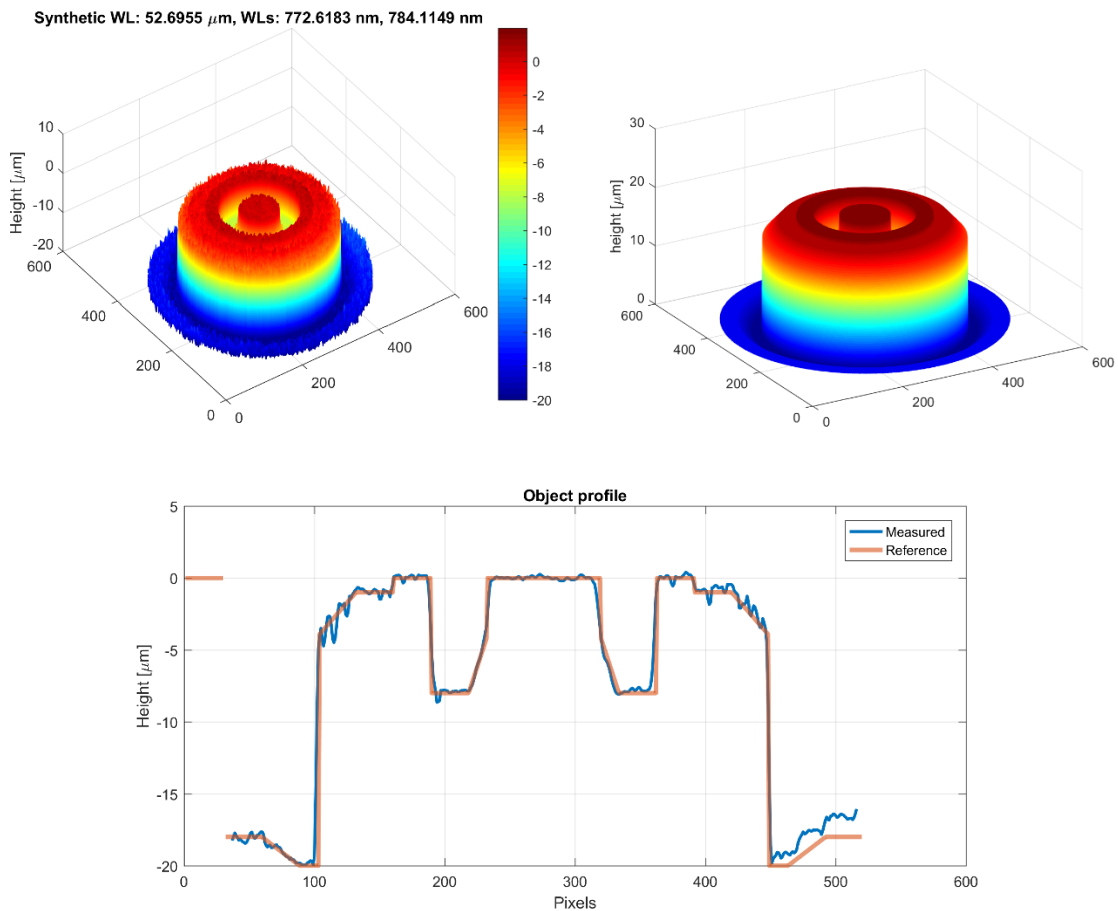
3.2 Měření tvaru pomocí diskrétních vlnových délek

Měření využívá jako základ dvouvlínnou holografickou metodu, kde výsledná fáze je určena jako rozdíl fází ze dvou vlnových délek. Měřítkem těchto dat je pak tzv. syntetická vlnová délka Λ . Vztah (11) popisuje její závislost na použitých vlnových délkách.

$$K = k_2 - k_1$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \rightarrow \Lambda = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3)$$

Při měření pomocí standardní dvouvlínné metody (DWDH) jsme omezeni použitím buďto dlouhé syntetické vlnové délky, kde je vyšší rozsah měření ale nižší přesnost nebo naopak krátké syntetické vlnové délky, kde je nižší rozsah měření, ale vyšší přesnost.



Obr. 3.5: Výsledky měření pomocí diskrétních vlnových délek

vlevo – měření schodovitého objektu, vpravo – předpis objektu (vpravo), dole – porovnání profilů

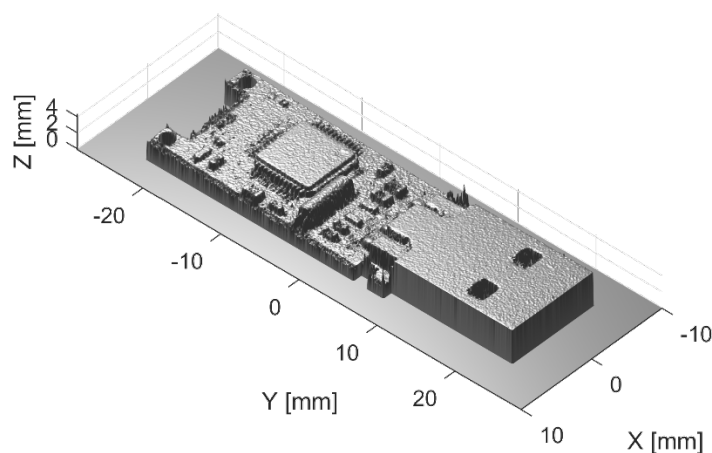
Na následujícím obrázku (Obr. 3.5) je možné vidět měření schodovitého objektu pomocí sekvence vlnových délek cca 784, 781 a 772 nm. Nejprve byl proveden odhad pomocí kombinace 784 a 781 nm. Tento odhad byl použit k rozbalení fáze z kombinace 784 a 772 nm. Vychází tedy sekvence syntetických vlnových délek cca 200 μm a 50 μm .

Z měření vychází směrodatná odchylka zhruba 2 μm , při hrubé aproximaci vztahu rozdílu optických drah a tvaru (viz dále) a tedy v současné době lze tvrdit, že metoda dosahuje přesnosti zhruba $\Lambda/25$.

3.3 Měření pomocí kontinuálního přeladění vlnové délky

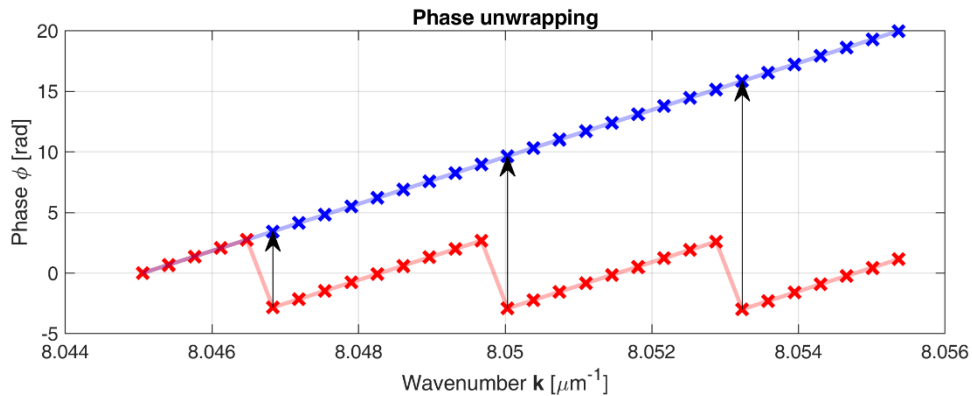
Pokud známe vývoj fázového rozdílu (dále nazývaným pro jednoduchost jen fáze) v určitém intervalu vlnových délek, lze dle vztahu (2) určit rozdíl drah referenční a objektové větve v daném bodě P.

Fázi lze z rekonstruovaného hologramu určit jako úhel v komplexní rovině, neboť rekonstruovaný hologram je komplexní pole. Z vlastností komplexních čísel však vyplývá, že fázi nelze takto určit jednoznačně, neboť máme k dispozici pouze úhel v intervalu $(-\pi; \pi)$. Skutečná hodnota fáze je složena ze dvou částí $\phi = \phi_m + N2\pi$, kde $\phi_m \in (-\pi; \pi)$, což je informace, kterou jsme schopni zjistit a N je celočíselný násobek 2π , který neznáme.



Obr. 3.6: Měření povrchu USB flash disku

Pokud ale máme dostatečně vzorkovaný vývoj fáze v závislosti na vlnové délce, můžeme použít tzv. phase unwrapping – rozbalení fáze, který v momentě kdy dojde ke skokové změně fáze přičte či odečte 2π , tak aby byl průběh fáze hladký tak jako na Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Phase unwrapping

Po phase unwrappingu lze proložit průběh fáze přímkou a zjistit rozdíl optických drah dle vztahu (2). Získáme pak informace o tvaru objektu například jako na Obr. 3.6.

4 Analýza chyb digitální holografické metody

Pro zvýšení přesnosti holografické metody je nutné identifikovat a analyzovat zdroje chyb měření. Na základě této znalosti je možné se pokusit zdroje chyb měření odstranit či alespoň minimalizovat. Na počátku byly zanalyzovány zdroje chyb a následně navrženy experimenty pro zjištění jejich vlivu.

4.1 Schéma experimentů k nalezení zdrojů chyb

Pro zkoumání vlivu intenzity osvětlení a náklonu vlnoploch bylo vybrán broušený vzorek z hliníku RSA 6061 o průměru 32 mm s konvexní sférickou plochou o poloměru křivosti 70 mm a mikrodrsnosti RMS 0,8 μm . Pro měření vlivu mikrodrsnosti byla vyrobena sada vzorků ve tvaru disku z 5 mm silného floatového skla, které se vyznačuje vysokou rovinností

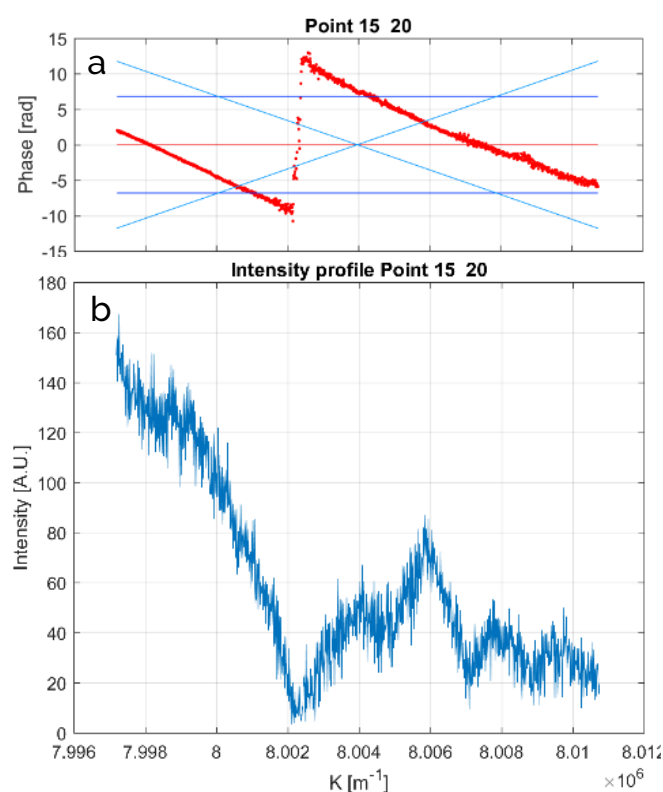
povrchu. Tyto vzorky byly následně broušeny pomocí volného brusiva hrubosti P400, P600, P800, P1000 a P1200 a pokoveny vrstvou stříbra.

4.2 Výsledky experimentů k nalezení zdrojů chyb

Po měření byla data vyhodnocena, aby bylo možné zjistit zdroje chyb a jejich závažnost pro měřicí metodu.

4.2.1 Závislost chyby měření na intenzitě

Kvůli přítomnosti koherenčního zrnění (speckles) se intenzita v rekonstruovaném hologramu v průběhu přeladění vlnové délky výrazně mění. Ze vztahu (2) je zřejmé, že fáze v každém bodě by se měly vyvíjet lineárně v závislosti na vlnovém čísle $k = 2\pi/\lambda$. Vlivem různých nepřesností měření není tato závislost ideální přímka.



Obr. 4.1: Naměřená data z bodu s vysokou chybou s odečtenou lineární závislostí; fáze (a); intenzita (b)

Měření prokázalo, že pokud intenzita klesne pod určitou úroveň netvoří již vývoj fáze přímku, ale dochází k chybě. Toto chování je možné vidět ještě detailněji na Obr. 4.1. Při dosažení hodnoty vlnového čísla $k = 8.002 \mu\text{m}^{-1}$ výrazně klesne intenzita a šum fáze vzroste tak, že je mnohem vyšší než lineární trend a rozbalení fáze přestane být stabilní. To vede k regresi, která neodpovídá reálnému trendu, jak je vidět na Obr. 4.1a. Tento bod je odlehlou hodnotou, kterou je třeba z měření vyřadit. Pro detekci těchto odlehlých hodnot je třeba určit spolehlivou metodu. Je také možné vidět menší šum v levé části grafu kde je intenzita větší a větší šum v levé části grafu kde je intenzita menší. Korelace mezi intenzitou a šumem fáze tedy nepochybně existuje.

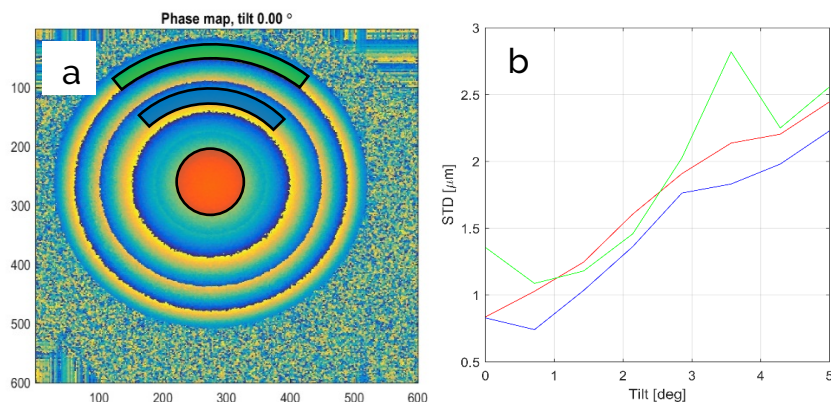
Dalším z měření bylo zjištění, zda celková intenzita ovlivňuje chybu měření, tedy jestli silně podexponované hologram bude mít větší chybu než správně exponovaný. Bylo zjištěno, že i o řád nižší intenzita poskytne zhruba stejnou hodnotu RSE pouze s rozdílem, v počtu odlehlých hodnot. Toto zjištění je velmi zajímavé a říká nám, že chyba měření sice závisí na intenzitě, ale ne na její celkové hodnotě, nýbrž spíše na poměru intenzit mezi světlými a tmavými body. Celková intenzita osvětlení tedy ovlivňuje hlavně počet odlehlých hodnot.

4.2.2 Závislost chyby měření na sklonu vlnoploch

Při změně vlnové délky se mění i speckles, konkrétně se pohybují a mění jejich intenzita. Čím je větší změna vlnové délky, tím výraznější je i změna speckles – se změnou vlnové délky tedy dochází k dekorelaci hologramů, což negativně ovlivňuje přesnost měření a zvyšuje šum. Bylo zjištěno, že

dekorelace je větší, čím větší je sklon vlnoploch. Chyba měření se sklonem vlnoploch zvětšuje téměř lineárně.

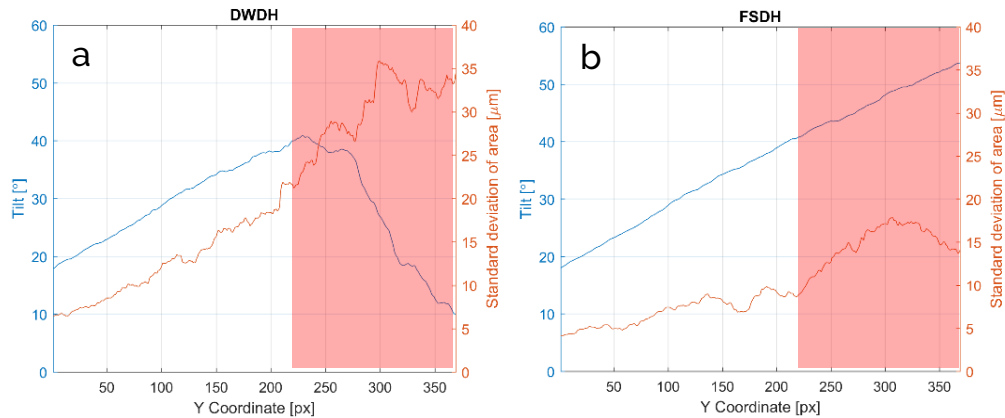
Sklon vlnoploch výrazně ovlivňuje přesnost měření. Teoreticky mají metody FSDH a DWDH stejnou přesnost definovanou rozsahem přeladění vlnové délky. Při měření metodou FSDH ale obecně vzniká více odlehlých hodnot, neboť je zde požadavek, že intenzita v daném bodě nesmí klesnout pod určitou hodnotu ve všech snímcích. Pro DWDH je tato podmínka mírnější, neboť je vyhodnocováno jen ze dvou snímků.



Obr. 4.2: Závislost směrodatné odchytky ploch na sklonu vlnoploch pro tři různé plochy

Grafy v Obr. 4.3 ukazují závislost sklonu vlnoplochy a chyby měření. Je možné vidět, že pro malé sklony dosahuje DWDH lepší přesnosti, ale pro vyšší sklony je přesnější FSDH. To platí obzvláště pro oblasti, kde dojde k překročení Nyquistova teorému, kde DWDH vůbec není možno použít, kvůli nemožnosti rozbalení fáze. FSDH je absolutní metodou vyhodnocovanou nezávisle v každém bodě, a tedy nepotřebuje prostorové rozbalení fáze, z tohoto důvodu je metoda FSDH měřit i vysoké náklony. Toto chování je velmi dobře vidět na Obr. 4.3a, kde DWDH není schopna změřit sklon vyšší než zhruba 40 stupňů, kde dojde k porušení Nyquistova

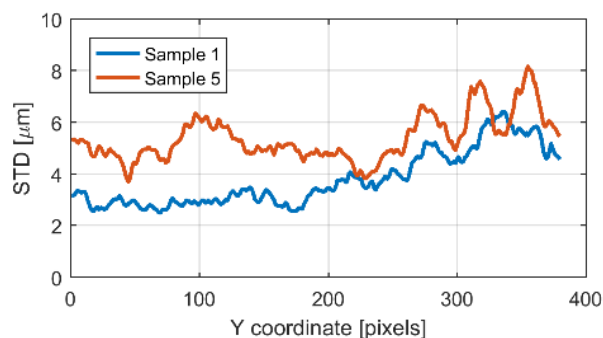
teorému. Na Obr. 4.3b je vidět, že FSDH není Nyquistovým teorémem nijak limitována.



Obr. 4.3: Závislost směrodatné odchytky na sklonu vlnoplochy pro DWDH (a) a FSDH (b); Červené oblasti značí překročení Nyquistova teorému

4.2.3 Vliv mikrodrsnosti povrchu na chybu měření

Pro experimenty bylo připraveno 5 vzorků z floatového skla s různými konečnými mikrodrsnostmi. Tyto vzorky byly broušeny brusivy P400, P600, P800, P1000 a P1200. Všechny vzorky byly měřeny za stejných podmínek a na základě předchozích zjištění s co nejnižším sklonem vlnoplochy, aby se minimalizoval jeho vliv. Bylo zjištěno, že mikrodrsnost povrchu má na výslednou chybu měření zanedbatelný vliv, jak je vidět na Obr. 4.4. Pro měření pomocí digitální holografie tedy není nutné výrazně zvažovat vliv mikrodrsnosti na výslednou přesnost měření.



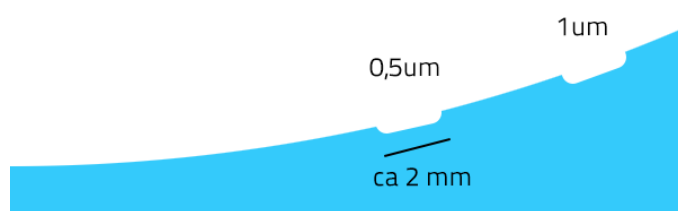
Obr. 4.4: Výsledky měření objektů z různou mikrodrsnosti

5 Stanovení maximální přesnosti DH

Pro stanovení maximální možné přesnosti holografické metody pro měření broušených povrchů bylo vyrobeno několik objektů s konkávním poloměrem zakřivení 500 mm. Vzhledem ke vzdálenosti objektu 500 mm od zdroje záření tento objekt přesně odpovídá tvaru dopadající vlnoplochy ve Fourierovském schématu, a tedy bude dosaženo maximální přesnosti. Všechny objekty měly průměr 30 mm.

Měřené objekty byly asférické plochy s různou mírou asféricity. V případě prvního byla odchylka od ideální sféry desetkrát větší. Do obou byly udělány dva vrypy 3 μm a 1 μm pro referencování měření.

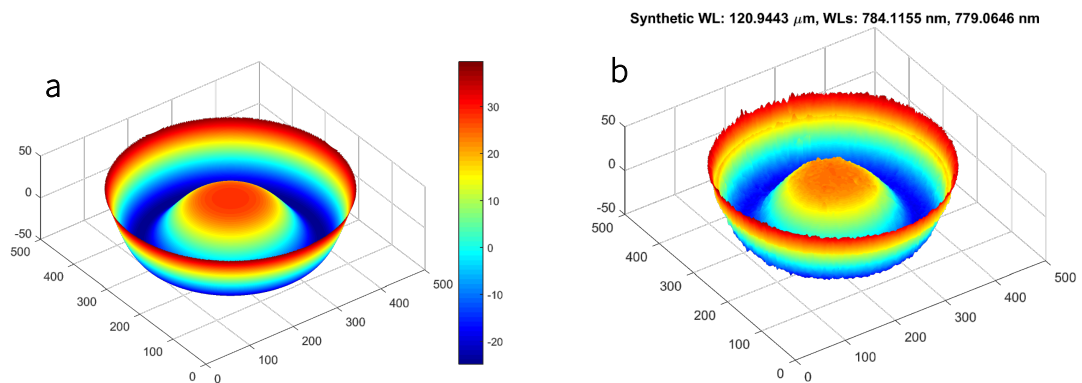
Třetím měřeným objektem byla sférická plocha s $R = -500$ a dvěma vrypy širokými cca 2 mm a hlubokými 1 a 0.5 μm (viz Obr. 5.1). Všechny tři objekty byly vyrobeny z hliníku RSA-6061 T6 na SPDT přístroji Moore Nanotech® 350FG a ručně broušeny volným brusivem o hrubosti P800, což zaručilo jemné zdrsnění povrchu a zvýšení difuzního odrazu, ale zároveň minimální změnu tvaru.



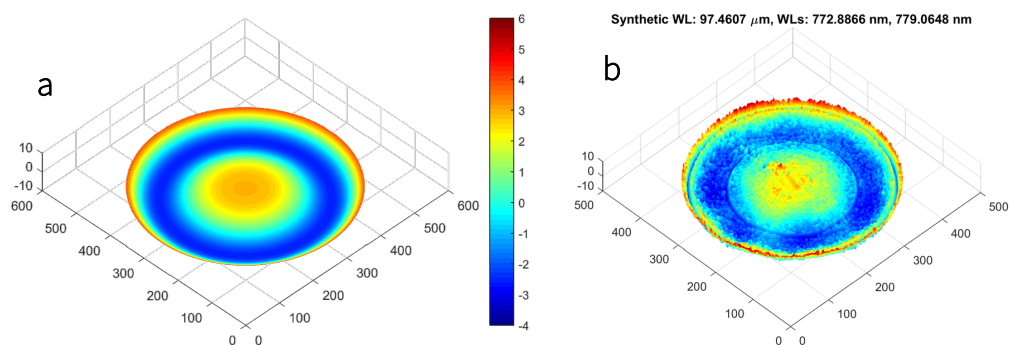
Obr. 5.1: Předpis sférického objektu pro zkoumání maximální přesnosti DH

5.1 Výsledky měření

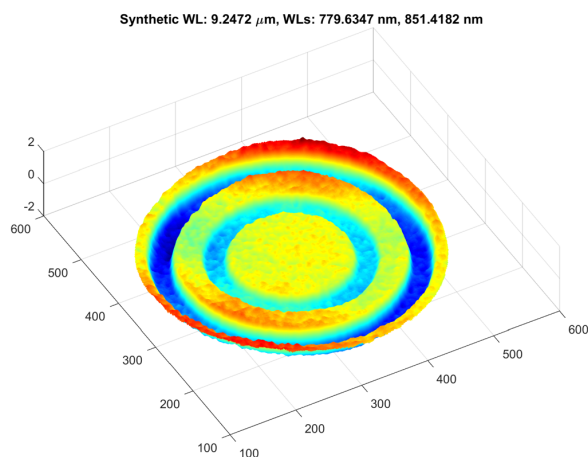
Měření proběhlo pomocí Fourierovského schématu (viz Obr. 3.1) a na 4 vlnových délkách. Pro všechna měření byla odečtena best-fit sférická plocha a měření vyhodnocena.



Obr. 5.2: Měření první asférické plochy; (a) simulace, (b) měření



Obr. 5.3: Měření druhé asférické plochy; (a) simulace, (b) měření



Obr. 5.4: Měření sférické plochy s vrypy

Měření vykazují velice dobrou shodu s očekávanými hodnotami, které se liší o méně než jeden mikron jak je možné vidět na Obr. 5.2 a Obr. 5.3. Na Obr. 5.3b je možné vidět i vrypy o velikosti 3 a 1 μm . Rozlišení metody je také velmi dobré, jelikož širší vryp o velikosti 0,5 μm na Obr. 5.4 je taktéž velmi dobře viditelný. RMS naměřených ploch se pohybuje okolo 0,15 μm .

Pro měření byly použity různé syntetické vlnové délky, aby byla zaručena maximální přesnost a zároveň nebylo třeba provádět rozbalení fáze.

Je vidět, že delší syntetická vlnová délka způsobuje větší šum, zatímco kratší má šum výrazně nižší. Delší syntetickou vlnovou délku lze ovšem použít pouze pro objekty velice podobné osvětlovací vlně.

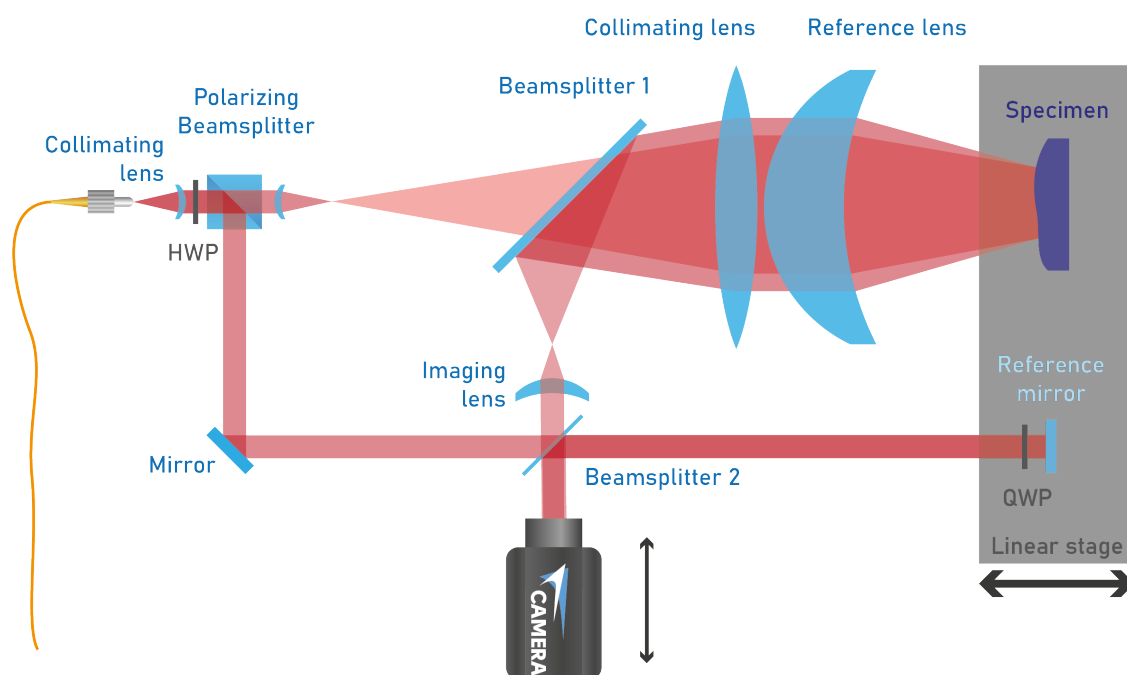
6 Optimalizace sestavy

Měření pro zjištění zdrojů chyb jen potvrdilo empirické pozorování, že Fourierovské schéma má mnoho výhod, jako jednoduchost a minimum aberací, ovšem lze jej využít pouze k měření konkávních povrchů. To je dáno velkým sklonem vlnoplochy při měření konvexních objektů, který, jak bylo

ukázáno v kapitole 4.2.2, má velký vliv na chybu měření. Při měření „strmých“ (malý poloměr křivosti) konvexních objektů, již byl sklon vlnoplochy mnohdy tak velký, že měření ani nebylo možné provést.

6.1 Sestava pro měření freeform objektů

Pro toto uspořádání není možné použít Fourierovské schéma využívané dříve. Byla tedy navržena sestava, která využívá tzv. image plane holography, tedy techniku, kdy je vlna odražená od objektu přezobrazena přes optickou soustavu na čip kamery kde interferuje s referenční a je zaznamenána. Jelikož se jedná pouze o intenzitní obraz, je nutné použít phase shifting. Na Obr. 6.1 je možné vidět schéma sestavy.



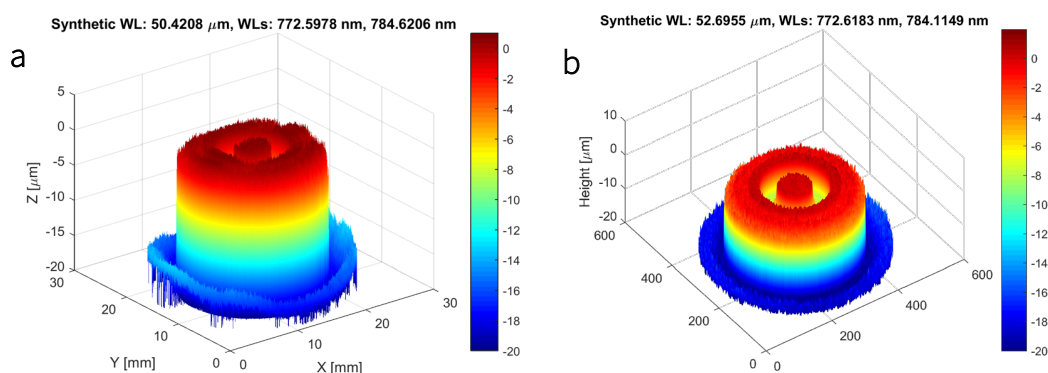
Obr. 6.1: Schéma měřicí aparatury optimalizované pro více druhů objektů

Objekt je v tomto uspořádání umístěn do bodu, kde je poloměr křivosti vlnoplochy rovný střednímu poloměru křivosti měřeného objektu. Pokud by se jednalo o dokonalou sféru, byl by tento tvar přezobrazena na čip kamery jako dokonalá rovina. Při měření objektu tedy měříme kolmou odchylku od

nejbližší sféry. Výhodou tohoto uspořádání, je možnost měřit jak difuzní, tak lesklé objekty.

6.2 Porovnání měření s Fourierovským schématem

Vlivem větší složitosti sestavy a přítomnosti aberací je vhodné provést před měřením kalibraci pomocí známého objektu, v ideálním případě co nejpodobnějšímu měřenému předmětu. Pro ověření funkčnosti sestavy byly nejdříve použity jednoduché planární objekty – leštěná rovinná plocha z N-BK7 a objekt „schody“, který byl měřen i na předchozím Fourierovském uspořádání. Rovina byla použita ke kalibraci a poté byl změřen objekt „schody“.

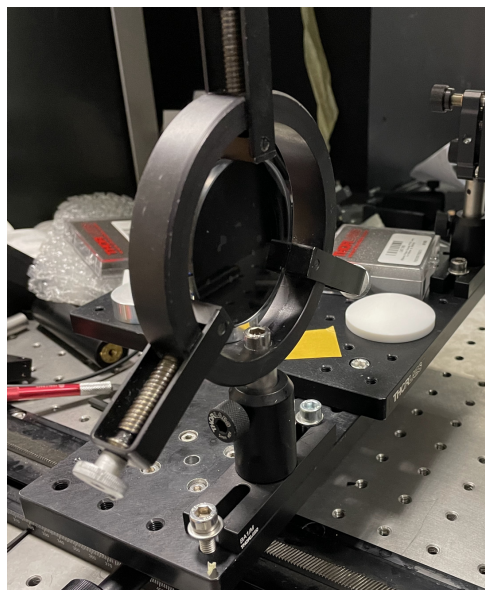


Obr. 6.2: Porovnání měření pomocí nové (a) a Fourierovské (b) sestavy

Jak je možné vidět na Obr. 6.2, měření pomocí nové sestavy opravdu vneslo do dat aberace. Ty jsou způsobeny vyšší složitostí měřicí sestavy. Pro měření konvexních objektů ale není jiná možnost a aberace jsou tedy jistou daní za možnost tyto objekty měřit. Pro zvýšení přesnosti metody je nutné provést kalibraci na známém, podobném objektu a poté je možné přesnost zvýšit.

6.3 Měření PMMA objektu

Po změření již dříve měřeného objektu „schody“ byla měřena také PMMA fázová destička vyrobená pomocí SPDT. Tato destička má také „schodovitý“ profil a reflektivní zadní stranu (Obr. 6.3). Měření je tedy komplikovanější kvůli interferenci mezi přední a zadní stranou.

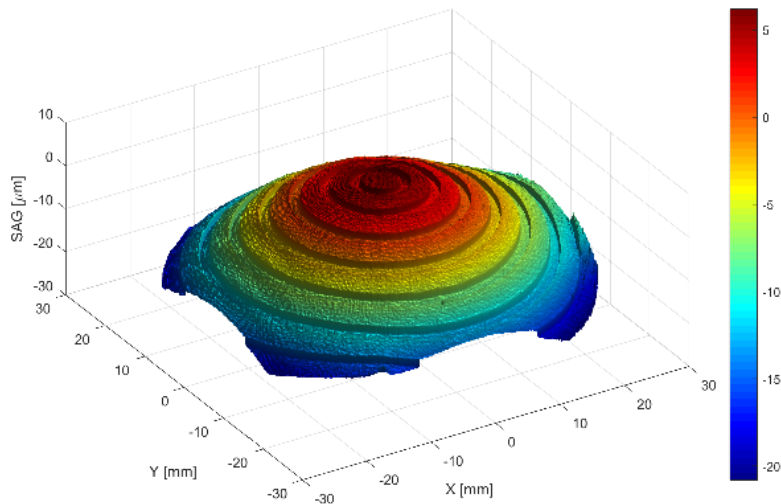


Obr. 6.3: PMMA fázová destička s materiálem Black Acktar na zadní straně

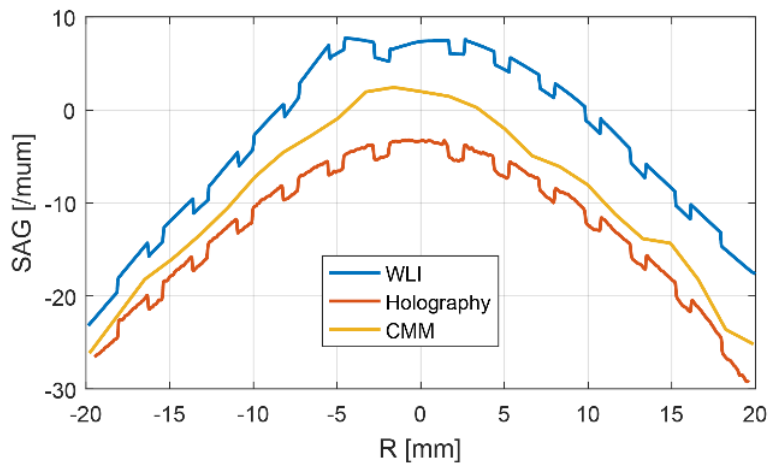
Destička byla měřena bez transmisního elementu, jelikož z přístroje vychází planární vlna. Bylo třeba použít imerzní kapaliny pro potlačení reflexí ze zadní strany. Destička byla změřena pomocí dvou vlnových délek 780 a 852 nm a výsledek měření vyhodnocen pomocí iterativního algoritmu pro phase shifting (ILSQPS – iterative least squares phase shifting). Výsledek měření je možné vidět na Obr. 6.4.

Tyto výsledky pak byly porovnány s konvenčními metodami WLI a CMM. Porovnání je možno vidět na Obr. 6.5. Na něm je možné vidět, že CMM má velmi malé rozlišení, zde jen 27 měřených bodů, a tedy kompletně zmizí drobné detaily vzorku. Z měření je dále patrné, že je v případě takových

vzorků vysoce náchylné, jestli se trefíme do údolí nebo vrcholu a vzhledem k rozlišení to nejsme schopni určit. Tato metoda se tedy hodí pouze na hrubý odhad tvaru objektu.



Obr. 6.4: Výsledek holografického měření PMMA destičky



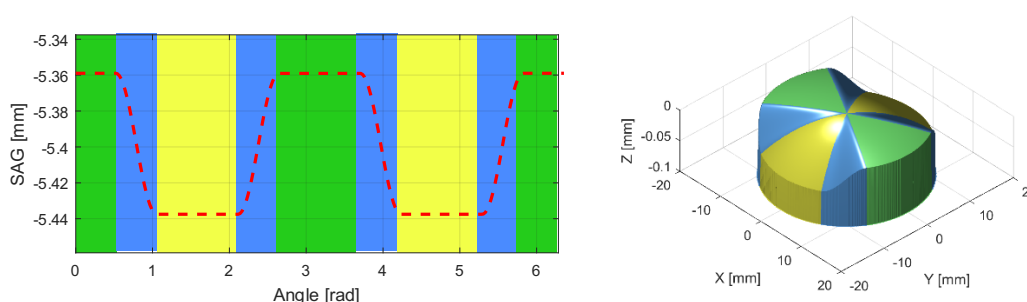
Obr. 6.5: Porovnání metod měření PMMA destička

WLI má vysoké laterální rozlišení odpovídající mikroskopu. Na grafu (Obr. 6.5) je ale vidět že v oblasti $R = -5$ dochází k chybě stitching, která způsobí špatné vyhodnocení a nesprávný výsledný tvar objektu. Holografické měření

oproti tomu zachovává dostatečnou míru detailu – 2048 x 2048 pixelů, což sice není dostatečné k vyhodnocení například mikrodrsnosti, ale stačí k odhalení drobných detailů a povrchových vad. Měření pomocí holografie je také nejpřesnější, co se týče tvarové přesnosti, neboť díky kalibraci měříme pouze malé odchylky od rovinné plochy a měření nám poskytne vysokou přesnost.

6.4 Měření freeform objektu tworadii

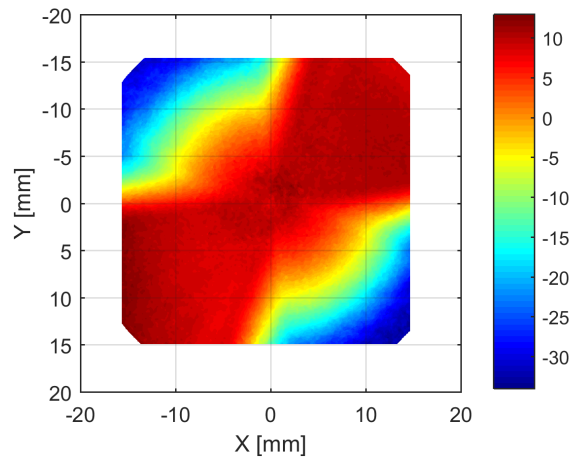
Dalším objektem, který byl vybrán pro testy byl objekt zvaný „tworadii“ neboli dva poloměry. Tento objekt je složen z celkem osmi ploch, z nichž dvě mají poloměr křivosti 39.5 mm a další dvě 40 mm, mezi těmito plochami je tzv. kosinový přechod. Předpis objektu je možné vidět na Obr. 6.6.



Obr. 6.6: Schéma objektu tworadii

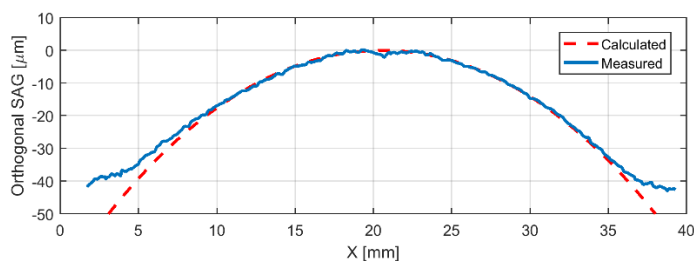
Tento objekt není měřitelný pomocí klasické interferometrie, neboť nulové polohy lze dosáhnout pouze pro jeden poloměr křivosti, tj. buďto „zelené“ nebo „žluté“ plochy a ve zbylých místech bude hustota proužků natolik vysoká, že znemožní měření. Tento objekt také kvůli malému poloměru křivosti, tedy velké konvexnosti, nebylo možné měřit pomocí Fourierovského schématu. V novém uspořádání je možné použít transmisní element (TE) k vytvoření sbíhavé vlny, pro měření konvexních objektů. Pro

měření byl použit čtyřpalcový interferometrický transmisní element Mahr F/0.75, který sestává ze 3 čoček a má vysokou kvalitu vlnoplochy.



Obr. 6.7: Měření tvoradii pomocí interferometrického TE Mahr

Při jeho použití sice došlo k ořezu zorného pole měření je jinak velmi přesné (Obr. 6.7). Měření bylo v obou případech prováděno s použitím dvouvlonné metody s vlnovými délkami 780 a 852 nm.



Obr. 6.8: Profil objektu – simulace vs. měření

Na Obr. 6.8 je možné vidět, že pro centrální části objektu je měření v dobré shodě s očekávanými hodnotami. U krajů již dochází k větším odchýlkám. To je způsobeno hlavně vyšším sklonem vlnoploch, který vede k dekorelaci fázových polí.

7 Shrnutí výsledků a výhled

V rámci této práce byla vyvinuta a optimalizována holografická metoda pro měření tvarů optických ploch. Vzhledem k požadované vysoké přesnosti optické výroby bylo nutné dosáhnout teoretických limitů měření z pohledu experimentálního uspořádání i zpracování dat. Byly zkoumány různé vícevlánné holografické metody pro měření tvaru objektu. Kromě diskrétních přístupů, tj. dvouvlánná a vícevlánná holografie s použitím několika diskrétních vlnových délek laserového záření, byla vyvinuta metoda s kontinuálním přeladěním vlnové délky nazvaná Frequency Sweeping Digital Holography – FSDH.

Přístup pomocí dvouvlánné metody se v případech, kdy bylo potřeba dosahovat maximálních přesností, ukázal jako nedostatečný a bylo tedy třeba použít jedné ze sofistikovanějších metod.

Výstupem je kompletní experimentální uspořádání s možností využití FSDH pro měření objektů s velmi komplexními tvary i vícevlánné holografie. Toto uspořádání je vysoce automatizované a s běžnými měřicími postupy umožňuje poměrně rychlé měření, v rámci několika minut, kde samotné měření pomocí skenu trvá okolo 2 minut, pomocí diskrétních délek pak asi 30 sekund. Vyhodnocení měření je pak také záležitostí několika minut v závislosti na složitosti objektu a množství měřených dat.

Přesnost měření závisí na mnoha parametrech. Byla provedena rešerše možných vlivů na přesnost a na základě ní odhadnuty parametry, které bylo třeba ověřit. Těmito parametry byl náklon vlnoplochy a s ním související podobnost tvaru měřicí vlnoplochy a tvaru měřeného objektu. Dále byl

zkoumán vliv intenzity, a to jak celkové intenzity, tak poměru maximální a minimální možné měřitelné intenzity a s tím související míra reflektivity objektu. Posledním zkoumaným parametrem byla mikrodrsnost povrchu.

Bylo zjištěno, že pokud je celková intenzita dostatečná tzn., neklesá výrazně pod zhruba desetinásobek maximální hodnoty, nemá to na kvalitu naměřených dat výrazný vliv. Stejně tak pokud je celková intenzita menší, dat tím také výrazně neutrpí. V tomto případě je ale lepší zvýšit expozici (prodloužit expoziční čas, zvýšit zisk kamery či zvýšit intenzitu osvětlení) neboť dochází k omezení výskytu odlehlých hodnot měření.

Nejvýznamnějším parametrem, který má vliv na chybu měření je náklon vlnoplochy vůči povrchu měřeného objektu vlivem výskytu speklí a mapping erroru. Tato chyba roste téměř lineárně a pokud je již náklon vlnoploch velký, nelze naměřená data považovat za přesná. V případě dvouvlonné nebo diskretní metody ještě může dojít k překročení Nyquistova teorému a měření pak nejen že je nepřesné, ale nemusí se vůbec podařit vyhodnotit. U FSDH není překročení Nyquistova teorému problém, avšak nepřesnost měření se zde s náklonem taktéž zvyšuje.

Vliv samotné mikrodrsnosti povrchu měřeného objektu je téměř zanedbatelný a spíše nepřímý, neboť může velice měnit odraženou intenzitu světla, která má na přesnost měření podstatně větší vliv. Pokud je objekt velmi hladký, může velice málo rozptylovat světlo a intenzita bude pak malá. V experimentech ale bylo použito uspořádání, které vliv intenzity velice omezuje, a tak byl měřen pouze vliv mikrodrsnosti povrchu. Tyto experimenty neprokázaly přímý vliv mikrodrsnosti povrchu na přesnost měření.

Na základě zjištění byla zkonstruována sestava, která umožňuje přesněji tvarovat měřicí vlnoplochu a také přesně kontrolovat poměr intenzity v referenční a signální větvi. To umožnilo zvýšit přesnost měření jinak obtížně měřitelných objektů. Měření na nové, mnohem komplikovanější sestavě bylo porovnáno s měřením na Fourierovském schématu a ukázalo se, že na téměř plochých objektech se měření poměrně dobře shoduje. U konvexních objektů nebylo možné toto porovnání provést, neboť tyto nebylo možné na Fourierovském schématu měřit.

Vyvinutá holografická metoda byla zoptimalizována do té míry, že je i u komplikovaných objektů schopna dosahovat tvarové přesnosti v rámci jednotek mikrometrů, u méně komplexních objektů se přesnost pohybuje ještě o řád níže. Metoda má potenciál být vhodným kandidátem pro měření komplikovaných freeform objektů s vysokou přesností a také měrou automatizace a mohla by tak v budoucnu být používána v běžné optické výrobě, jejíž součástí se freeform objekty a jejich měření nepochybně brzy stane.

8 Seznam použité literatury

- [1] POST, Daniel a Bongtae HAN. Moiré Interferometry. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* [online]. Boston, MA: Springer US, 2008, 627-654 [cit. 2022-10-19]. Springer Handbooks. ISBN 978-0-387-26883-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-30877-7_22
- [2] IFJU, P.G. a B. HAN. Recent Applications of Moiré Interferometry. *Experimental Mechanics* [online]. 2010, **50**(8), 1129-1147 [cit. 2022-10-19]. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-010-9404-9
- [3] WENZEL, K. Measurement of Distortion Using the Moire Interferometry. *Optics* [online]. 2015, **4**(3) [cit. 2022-10-19]. ISSN 2328-7780. Dostupné z: doi:10.11648/j.optics.s.2015040301.14
- [4] HU, Yan, Qian CHEN, Shijie FENG a Chao ZUO. Microscopic fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2020, **135** [cit. 2022-10-19]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106192
- [5] HARIHARAN, P. *Basics of interferometry*. 2nd ed. Boston: Elsevier Academic Press, 2007. ISBN 978-012-3735-898.
- [6] POLHEMUS, C. Two-Wavelength Interferometry. *Applied Optics* [online]. 1973, **12**(9) [cit. 2020-07-21]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.12.002071
- [7] HOUAIRI, Kamel a Frédéric CASSAING. Two-wavelength interferometry: extended range and accurate optical path difference analytical estimator.

- Journal of the Optical Society of America A* [online]. 2009, **26**(12) [cit. 2020-07-21]. ISSN 1084-7529. Dostupné z: doi:10.1364/JOSAA.26.002503
- [8] YAMAGUCHI, Ichirou. Surface topography by wavelength scanning interferometry. *Optical Engineering* [online]. 2000, **39**(1) [cit. 2020-07-16]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.602333
- [9] YAMAGUCHI, Ichirou, Wolfgang OSTEN, Jun-ichi KATO a Hirokazu MATSUZAKI. *Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography* [online]. 251- [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: doi:10.1117/12.473542
- [10] LÉDL, Vít, Pavel PSOTA, František KAVÁN, Ondřej MATOUŠEK a Pavel MOKRÝ. Surface topography measurement by frequency sweeping digital holography. *Applied Optics* [online]. 2017, **56**(28), 7808- [cit. 2018-01-07]. ISSN 1559-128x. Dostupné z: doi:10.1364/AO.56.007808
- [11] WAGNER, Christophe, Wolfgang OSTEN a Soenke SEEBACHER. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multiwavelength contouring. *Opt. Eng. 0001*. 2000, (391, 79-85.
- [12] CARL, Daniel, Markus FRATZ, Marcel PFEIFER, Dominik M. GIEL a Heinrich HÖFLER. Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths. *Applied Optics* [online]. 2009, **48**(34) [cit. 2020-07-16]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.48.0000H1
- [13] ŠIŇOR, Milan. Historie optiky. In: *VEGA FJFI ČVUT* [online]. 1998 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node4.html>

- [14] KAVÁN, František. *Optimalizace digitální holografické metody pro měření tvarů optických ploch*. Liberec, 2017. Diplomová. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Pavel Psota.
- [15] DFB – Distributed Feedback Diodes. In: *Toptica Photonics AG* [online]. [cit. 2022-08-19]. Dostupné z: <https://www.toptica.com/products/laser-diodes/dfbdb>
- [16] SPENCER, John E. a Preston YOUNG. Difference Between DBR and DFB Lasers. In: *Difference Between DBR and DFB Lasers* [online]. [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <http://www.photodigm.com/difference-between-dbr-and-dfb-lasers>
- [17] PRUSS, Christof, Eugenio GARBUSI a Wolfgang OSTEN. Testing Aspheres. *Optics and Photonics News* [online]. 2008, **19**(4) [cit. 2022-06-09]. ISSN 1047-6938. Dostupné z: doi:10.1364/OPN.19.4.000024
- [18] *Aspheric lens* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aspheric_lens
- [19] PRUSS, Christof, Goran Bastian BAER, Johannes SCHINDLER a Wolfgang OSTEN. Measuring aspheres quickly: tilted wave interferometry. *Optical Engineering* [online]. 2017, **56**(11) [cit. 2022-05-05]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.OE.56.11.111713
- [20] ASFOUR, Jean-Michel a Alexander G. POLESHCHUK. Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 2006, **23**(1) [cit. 2022-01-27]. ISSN 1084-7529. Dostupné z: doi:10.1364/JOSAA.23.000172

- [21] FÄHNLE, Oliver W., Ray WILLIAMSON, Dae Wook KIM, Todd BLALOCK, Kate MEDICUS a Jessica DEGROOTE NELSON. *Fabrication of freeform optics* [online]. 95750- [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2188523
- [22] KREIS, Thomas. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. Weinheim: WILEY-VCH, 2005. ISBN 35-274-0546-1.
- [23] LÉDL, Vít, Pavel PSOTA, Petr VOJTÍŠEK a Roman DOLEČEK. *Digitální holografická interferometrie*. Liberec, 2015.
- [24] PASCHOTTA, Rüdiger. *Encyclopedia of laser physics and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-40828-3.
- [25] SCHNARS, Ulf. a Werner. JUEPTNER. *Digital holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*. Berlin: Springer, 2005. ISBN 978-3540219347.
- [26] VERRIER, Nicolas a Michael ATLAN. Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations. *Applied Optics* [online]. 2011, **50**(34), 136- [cit. 2017-04-13]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.50.00H136
- [27] APOSTOL, Dan, Adrian SIMA, Petre C. LOGOFĂTU, Florin GAROI, Victor DAMIAN, Victor NASCOV, Iuliana IORDACHE a Valentin I. VLAD. *Fourier transform digital holography* [online]. 678522-678522-6 [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: doi:10.1117/12.756836
- [28] KONG, In-Bok. General algorithm of phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting. *Optical Engineering* [online]. 1995, **34**(1) [cit. 2021-02-26]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/12.184088

- [29] SRINIVASAN, V., H. C. LIU a M. HALIOUA. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Applied Optics* [online]. 1984, **23**(18) [cit. 2021-01-28]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.23.003105
- [30] GEORGES, Marc P., Jean-François VANDENRIJT, Cédric THIZY, Yvan STOCKMAN, Patrick QUEECKERS, Frank DUBOIS a Dominic DOYLE. Digital holographic interferometry with CO₂ lasers and diffuse illumination applied to large space reflector metrology [Invited]. *Applied Optics* [online]. 2013, **52**(1) [cit. 2021-01-28]. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.52.00A102
- [31] DI, Jianglei, Jiwei ZHANG, Teli XI, Chaojie MA a Jianlin ZHAO. Improvement of measurement accuracy in digital holographic microscopy by using dual-wavelength technique. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* [online]. 2015, **14**(4) [cit. 2021-01-06]. ISSN 1932-5150. Dostupné z: doi:10.1117/1.JMM.14.4.041313
- [32] PSOTA, Pavel, Vít LÉDL, Petr VOJTÍŠEK a Tomáš VÍT. *Multi-wavelength digital holography for shape measurement of grinded surfaces with ultimate accuracy* [online]. 101510- [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2256665
- [33] YAMAGUCHI, Ichirou, Takashi IDA, Masayuki YOKOTA a Kouji YAMASHITA. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift. *Applied Optics* [online]. 2006, **45**(29) [cit. 2021-02-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.45.007610
- [34] PARSHALL, Daniel a Myung K. KIM. Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping. *Applied Optics* [online]. 2006, **45**(3) [cit. 2020-11-16]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.45.000451

- [35] CHENG, Yeou-Yen a James C. WYANT. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry. *Applied Optics* [online]. 1985, **24**(6) [cit. 2021-01-28]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.24.000804
- [36] DIRKSEN, Dieter, H. DROSTE, B. KEMPER, H. DELERÉ, M. DEIWICK, H.H. SCHELD a G. VON BALLY. Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2001, **36**(3), 241-249 [cit. 2021-01-06]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/S0143-8166(01)00053-7
- [37] TAKEDA, Mitsuo a Hirokazu YAMAMOTO. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces. *Applied Optics* [online]. 1994, **33**(34) [cit. 2021-01-28]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.33.007829
- [38] FU, Yu, Giancarlo PEDRINI, Bryan M. HENNELLY, Roger M. GROVES a Wolfgang OSTEN. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2009, **47**(5), 552-557 [cit. 2022-01-27]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2008.10.002
- [39] JUAREZ-SALAZAR, Rigoberto, Carlos ROBLEDO-SÁNCHEZ, Cruz MENESES-FABIAN, Fermin GUERRERO-SÁNCHEZ a L.M. ARÉVALO AGUILAR. Generalized phase-shifting interferometry by parameter estimation with the least squares method. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2013, **51**(5), 626-632 [cit. 2022-01-27]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2012.12.020
- [40] NOVÁK, Jiří, Pavel NOVÁK a Antonín MIKŠ. Multi-step phase-shifting algorithms insensitive to linear phase shift errors. *Optics Communications*

[online]. 2008, **281**(21), 5302-5309 [cit. 2022-01-27]. ISSN 00304018. Dostupné z: doi:10.1016/j.optcom.2008.07.060

[41] KAVÁN, František a Pavel PSOTA. Frequency Sweeping Digital Holography in Fourier Arrangement for Topography Measurement of Complex Surfaces. In: *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019*. Bordeaux France, 2019. ISBN 978-1-943580-59-0. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1364/DH.2019.Th3A.34

[42] KAVÁN, František, Pavel PSOTA, Marek MACH, Marek STAŠÍK a Vít LÉDL. Parameter optimization of frequency sweeping digital holography for the measurement of ground optical surfaces. *Applied Optics* [online]. 2021, **60**(27) [cit. 2021-12-30]. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.428163

[43] KAVÁN, František, Pavel PSOTA, Vít LÉDL a Ondřej MATOUŠEK. Multiple wavelength digital holography for freeform shape measurement and lens alignment. *Applied Optics* [online]. [cit. 2022-10-19]. ISSN 1559-128X. Dostupné z: N/A