

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vybrané metody optické profilometrie



Vypracoval:	Jakub Voženílek
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R054 Digitální a přístrojová optika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí bakalářské práce:	RNDr. František Petráš
Termín odevzdání práce:	leden 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Františka Petráše a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 2. ledna 2022

.....
Jakub Voženílek

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu RNDr. Františkovi Petrášovi za cenné rady, věcné připomínky a především za čas strávený v laboratoři a věnovaný konzultacím během zpracování této bakalářské práce.

Také bych rád poděkoval svému kamarádovi Bc. Jakubovi Dvořákovi, který mi dal mnoho cenných rad, jenž mi rovněž velice pomohly během psaní této práce.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Jakub Voženílek
Název práce	Vybrané metody optické profilometrie
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra optiky
Vedoucí práce	RNDr. František Petráš
Rok obhajoby práce	2022
Abstrakt	Tato práce se zabývá zpracováním a vysvětlením profilometrických metod. Jsou zde vysvětleny a porovnány vybrané metody optické profilometrie. Na základě těchto teoretických poznatků jsou sestaveny soustavy pro měření reálných předmětů. První soustava využívá k vytvoření projekční mřížky interferenčního jevu pomocí Michelsonova interferometru. Druhá soustava využívá k projekci periodické mřížky dataprojektor. Pomocí těchto soustav jsou naměřeny výškové profily malé kovové destičky a lidské ruky. Jsou zde také popsány kalibrační metody těchto soustav.
Klíčová slova	profilometrie, optická profilometrie, profilometrie fázového posuvu, Fourierovská profilometrie
Počet stran	34
Počet příloh	0
Jazyk	český

Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Jakub Voženílek
Title	Selected methods of optical profilometry
Type of thesis	Bachelor
Department	Department of Optics
Supervisor	RNDr. František Petráš
The year of presentation	2022
Abstract	This bachelor's thesis deals with the processing and explanation of profilometric methods. Selected methods of optical profilometry are explained and compared. Based on this theoretical knowledge, systems for measuring real objects are compiled. The first system uses a Michelson interferometer to create a projection grating. The second system uses a data projector to project the periodic grid. Using these systems, the height profiles of a small metal plate and a human hand are measured. Calibration methods of these systems are also described here.
Keywords	profilometry, optical profilometry, phase shift-profilometry, Fourier profilometry
Number of pages	34
Number of appendices	0
Language	czech

Obsah

Úvod	7
1 Teoretická část	8
1.1 Profilometrie	8
1.2 Kontaktní profilometrie	8
1.3 Optická profilometrie	9
1.3.1 Interferenční metody	10
1.3.2 Metody doby letu světelného pulsu	12
1.3.3 Metody strukturovaného světla	13
1.4 Nekoherentní metody optické profilometrie	17
1.4.1 Fourierovská profilometrie	17
1.4.2 Profilometrie fázového posunu	19
1.5 Koherentní metody optické profilometrie	20
1.5.1 Interferometrie v bílém světle	20
1.5.2 Fázová interferometrie	22
2 Experimentální část	23
2.1 Fourierovská profilometrie pomocí Michelsonova interferometru	23
2.1.1 Sestava	23
2.1.2 Projekční mřížka Michelsonova interferometru	24
2.1.3 Kalibrace a naměřené výsledky	25
2.2 Fourierovská profilometrie pomocí dataprojektoru	27
2.2.1 Sestava	27
2.2.2 Projekční mřížka dataprojektoru	27
2.2.3 Měření výškového profilu lidské ruky	29
Závěr	32
Literatura	33

Úvod

Profilometrie, někdy také 3D metrologie, se zabývá měřením profilů a výškových rozdílů objektů. V současné době mají profilometrické metody široké spektrum aplikací. Ve zdravotnickém průmyslu jsou tyto metody velmi často používány k vyhodnocování povrchů kloubních implantátů, ve výrobním průmyslu ke kontrolnímu měření kvality povrchu a rozměrů předmětu. Tyto metody nejsou však limitovány pouze na měření objektů malých rozměrů. S rychlým vývojem nových technologií se lze setkat s jejich aplikací například při odemykání telefonu pomocí obličeje, 3D skenování místností a předmětů nebo v aplikacích rozšířené reality. Oproti kontaktním metodám mají metody optické profilometrie hned několik výhod. Jednou z hlavních předností optických metod je absence mechanického dotyku měřeného předmětu. Mezi další výhody patří například rychlost zpracování měřených dat. Většina optických metod snímá plošný záznam měřeného předmětu a následně z něj vyhodnotí 3D výškový profil objektu [1][2][3].

V teoretické části této práce bude popsána klasifikace profilometrických metod na metody kontaktní a optické. Dále se tato práce bude zabývat popsáním jednotlivých fyzikálních principů metod optické profilometrie jako jsou interferenční metody, metody doby letu a metody strukturovaného světla. Následně budou popsány vybrané nekoherentní metody jako Fourierovská profilometrie a profilometrie fázového posunu a dále pak budou popsány vybrané koherentní metody jako interferometrie v bílém světle a fázová interferometrie.

V experimentální části bude provedeno měření výškových profilů metodou Fourierovské profilometrie dvěma odlišnými sestavami. V první části této kapitoly bude použit za účelem generace projektované mřížky Michelsonův interferometr. V druhé části bude k projekci použit běžný dataprojektor. Kapitola se také věnuje kalibraci jednotlivých soustav. Budou v ní uvedeny jednotlivé kroky s ukázkami postupů pro měření výškových profilů touto metodou. Na konci každé části budou pak ukázány získané výsledky měřených předmětů.

Kapitola 1

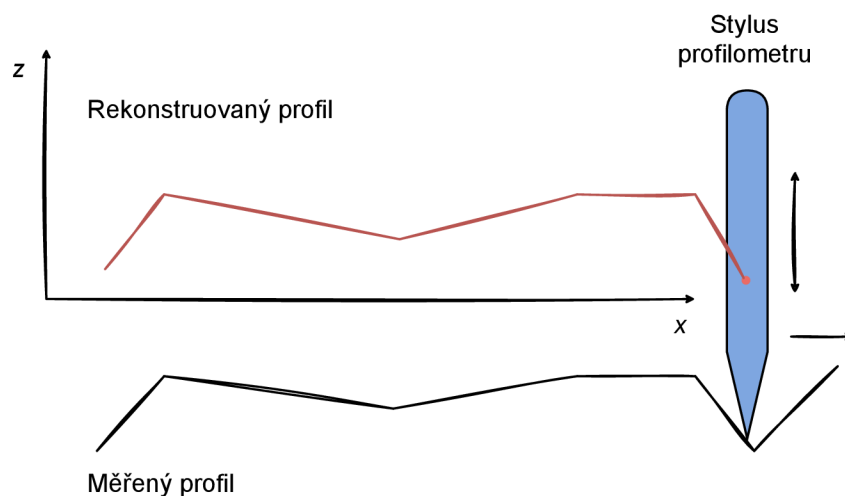
Teoretická část

1.1 Profilometrie

Profilometrie je měřicí metoda, při které je získávána informace o profilu měřeného předmětu. Cílem této metody je získat co nejpřesnější topografický soubor dat, který obsahuje informaci o tvaru a povrchu měřeného objektu. Zařízení sloužící k tomuto účelu se nazývá profilometr. Podle způsobu získání těchto dat lze profilometrické metody rozčlenit na kontaktní a bezkontaktní.

1.2 Kontaktní profilometrie

Kontaktní profilometrie je metoda založena na mechanickém dotyku povrchu měřeného předmětu. Obvykle se při kontaktní profilometrii využívá tzv. mechanický profilometr, jehož princip spočívá v posuvném pohybu sondou (stylusem) po povrchu měřeného tělesa (měřicí sondy mohou být z různých materiálů, obvykle se ale využívají diamantové hroty, zejména díky vhodným mechanickým vlastnostem) a pomocí zpětnovazební smyčky se zaznamenává síla působící na stylus, potřebná k překonání povrchových nerovností měřeného tělesa [4][5][6]. Schéma této metody je znázorněno na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Schéma kontaktní profilometrie

V dnešní době se kontaktní profilometrie využívá k velmi přesnému měření drsnosti povrchu předmětů, přičemž moderní kontaktní profilometry dosahují přesnosti v řádech desítek mikrometrů primárně v závislosti na rozměrech kontaktní sondy. Jedná se o bodové měření - v jeden moment je získána výšková informace pouze jednoho bodu měřeného povrchu. Sestavením jednotlivých bodových měření je následně získán výsledný 2D nebo 3D profil měřeného předmětu. Především díky této skutečnosti se jedná o časově náročnou metodu ve srovnání s plošnými metodami optické profilometrie. Kontaktní metody není vhodné využít k měření profilů předmětů, kterým by při pohybu sondy po povrchu měřeného předmětu hrozilo poškrábání či jiné nevratné poškození. Pokud jsou nerovnosti předmětu příliš velké, hrozí také poškození měřicí sondy. Toto jsou hlavní nevýhody kontaktních profilometrických metod [4][6].

1.3 Optická profilometrie

Do optické profilometrie lze začlenit bezkontaktní metody, které využívají elektromagnetického záření v oblasti viditelného, případně blízkého infračerveného spektra. Tyto soustavy jsou obvykle tvořeny světelným zdrojem, který vyzařuje světlo s požadovanými vlastnostmi, měřeným objektem a snímačem, který světlo zaznamenává. Významnou výhodou optické profilometrie je absence mechanických sil, které by mohli nevratně deformovat měřený objekt vlivem silového působení. Další výhodou je rychlost šíření světla, díky které je akvizice měřených dat mnohem rychlejší než při mechanickém kontaktu. Po získání dat následuje jejich zpracování a vyhodnocení v počítači pomocí vhodného programu.

Snímač

Jako detektory optického záření bývají použity plošné senzory CCD[7] nebo CMOS[8]. Díky jejich maticovému uspořádání může probíhat záznam dat plošně a vyhodnocení povrchu či profilu objektu je díky tomuto uspořádání rychlejší.

Objekt

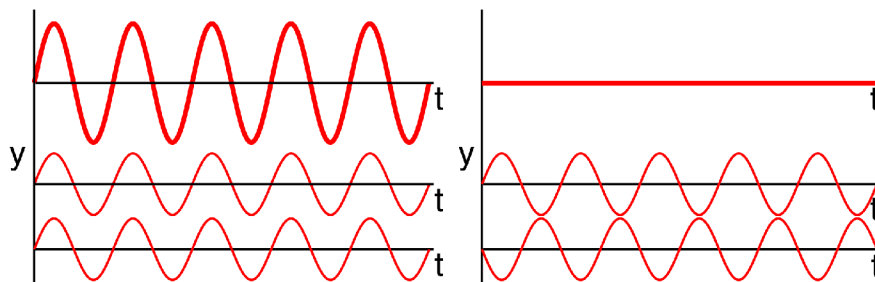
Volba správné optické metody se vždy odvíjí od vlastností měřeného objektu. Mezi hlavní vlastnosti patří jeho rozměry a materiál. Odlišné optické vlastnosti objektu si vyžadují použití jiných metod nebo speciální upravení měřicí soustavy. Například nelze měřit stejnou konfigurací soustavy předměty s lesklým povrchem, které většinu dopadajícího optického záření odrážejí a zároveň předměty průhledné, kterými většina optického záření prochází. Vždy je tedy potřeba volit měřicí metodu v závislosti na vlastnostech měřeného předmětu.

Světelný zdroj

V optických profilometrických metodách hraje světelný zdroj významnou roli. Interferenční metody kladou požadavky na koherenční vlastnosti světla, naopak nekoherentní metody optické profilometrie tyto vlastnosti nevyžadují a hlavním požadavkem je, aby světelný zdroj kvalitně projektoval plošnou strukturu na měřený předmět. Optická profilometrie využívá široké spektrum světelných zdrojů a jejich volba úzce souvisí s fyzikálním principem dané metody.

1.3.1 Interferenční metody

Tyto metody využívají interferenčního jevu, který je dán vlnovým charakterem elektromagnetického vlnění. Tento jev se projevuje skládáním dvou a více světelných vln. Výsledná intenzita těchto vln je pak dána jejich superpozicí. V některých případech výsledná intenzita nabývá větších hodnot než je intenzitní součet jednotlivých vln. V takovém případě dojde k zesílení a se jedná o tzv. konstruktivní interferenci. Naopak, dochází-li při superpozici vlnění k zeslabení, případně k jejich vzájemnému vyrušení, jedná se o tzv. destruktivní interferenci. Výsledná intenzita dvou vln závisí na jejich fázovém rozdílu. Setkají-li se vlny se stejnou fází, dochází ke konstruktivní interferenci, naopak v případě setkání vln s opačnou fází dochází k interferenci destruktivní.



Obrázek 1.2: Interference dvou vln. Konstruktivní interference (levá část) - dvě vlny jsou ve fázi a dochází k jejich zesílení. Destruktivní interference (pravá část) - dvě vlny mají opačnou fázi a vzájemně se vyruší [21]

Interferenční metody nacházejí uplatnění zejména v oblastech, ve kterých je potřeba změřit velmi malé výškové rozdíly objektu s velkou přesností. Jedná se například měření kvality povrchů, kontrolní měření předmětů s malými rozměry případně měření asférické optiky.

Interferometry

Interferometry jsou zařízení, která se využívají při velmi přesných měřeních. Tato zařízení umožňují provádět měření s přesností několika nanometrů. Existuje mnoho konfigurací interferometrů, které se liší podle jejich aplikace. Mezi základní typy patří: interferenční komparátory - měření délek, interferenční refraktometry - měření indexu lomu kapalin a plynů a interferenční spektroskopy - měření jemné struktury spektrálních čar. Interferenční metody optické profilometrie využívají nejčastěji měření délek pomocí interferenčních komparátorů, mezi které patří například Michelsonův interferometr [9], případně jeho modifikované verze jako je Mirau interferometr [10] nebo Linnikův interferometr [11].

Komplexní stupeň koherence

U interferenčních metod jsou hlavním parametrem při volbě vhodného zdroje jeho koherenční vlastnosti. Jedná se o vlastnosti, které slouží ke kvalitativnímu popisu světelných zdrojů. Za zcela koherentní jsou považovány takové zdroje, jejichž frekvence a fázový rozdíl jsou konstantní. Koherenci záření lze rozlišit na koherenci prostorovou a časovou. Časová koherence souvisí se spektrální šířkou zdroje. Obecně platí, že čím užší je spektrální šířka zdroje, tím je jeho časová koherence vyšší. Prostorová koherence souvisí s velikostí plochy zdroje ze které je světlo vyzařováno. Zde obecně

platí, že zcela prostorově koherentní světelné záření je takové, které vychází z ideálního bodového zdroje.

Komplexní stupeň koherence se používá kvalitativnímu popisu záření, který zahrnuje koherenci prostorovou i časovou. Při interferenci dvou rovinných elmag. vln s rovnoběžnou lineární polarizací je výsledná intenzita I v rovině detektoru dána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \Re(\gamma_{12}(\tau)), \quad (1.1)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity elmag. vln a $\Re(\gamma_{12}(\tau))$ je komplexní stupeň koherence, jehož absolutní hodnota nabývá hodnot mezi 0 a 1. Pro nekoherentní vlnění je $\Re(\gamma_{12}(\tau)) = 0$, naopak $\Re(\gamma_{12}(\tau)) = 1$ v případě plně koherentních vln.

Hodnotu komplexního stupně koherence $\Re(\gamma_{12}(\tau))$ lze určit pomocí vizibility V interferenčních proužků interferenčního obrazce, která je dána vztahem

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (1.2)$$

kde I_{min} a I_{max} je intenzitní minimum a intenzitní maximum interferenčního obrazce v rovině detektoru.

I_{min} a I_{max} lze přepsat do tvaru

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|, \quad (1.3)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|. \quad (1.4)$$

Pomocí (1.3) a (1.4) lze (1.2) přepsat na tvar

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|}{I_1 + I_2}, \quad (1.5)$$

ze kterého je komplexní stupeň koherence dán jako

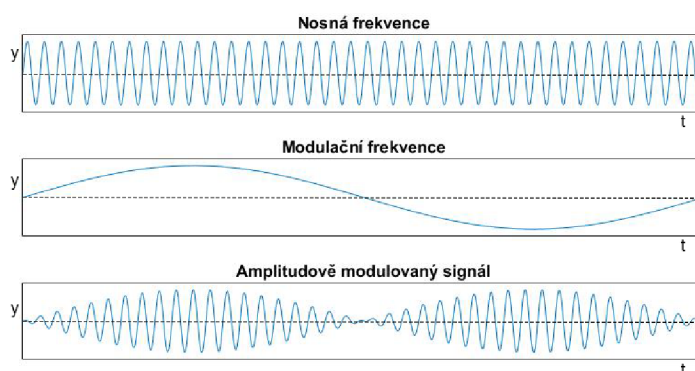
$$|\gamma_{12}(\tau)| = V \frac{I_1 + I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (1.6)$$

Příčemž pokud se $I_1 = I_2$ platí potom $|\gamma_{12}(\tau)| = V$.

V metodách interferenční profilometrie je koherenční délka jednou ze stěžejních vlastností zdroje. Lze ji vyhodnotit pomocí rozdělení původního svazku na dva svazky. Následně je optická dráha jednoho svazku prodloužena a svazky jsou opět sjednoceny. Koherenční délka je pak chápána jako největší vzdálenost prodloužení druhého svazku, při které lze na stínítku ještě pozorovat interferenční proužky.

1.3.2 Metody doby letu světelného pulsu

Metody doby letu světelného pulsu (z angl. time-of-flight) využívají k měření dobu, za kterou světlo urazí optickou dráhu. Světelný zdroj vyšle puls, který se odrazí od povrchu měřeného předmětu a následně vrací zpátky na snímač. Jedná se o bodové měření, při kterém se v jednom okamžiku do paměti zaznamenává poloha pouze jednoho bodu předmětu. Tyto metody nedosahují stejně vysokých přesností jako interferenční metody, ale přesto nacházejí širokou škálu uplatnění, především díky jejich dobré rychlosti malé výpočetní náročnosti. Lze se s nimi setkat v moderních telefonech nebo fotoaparátech, kde slouží například ke 3D skenování nebo digitálnímu rozostřování pozadí. Vhodné uplatnění také nacházejí v oblastech automatizace, například při autonomním řízení robotických ramen. K těmto měřením se využívají speciální kamery, jež jsou vybaveny vysokofrekvenčním optickým vysílačem, který vysílá amplitudově modulované pulsy. Po odražení od předmětu, dopadá signál zpět na senzor a jeho fáze je porovnána s referenční fází původního signálu [12][13].



Obrázek 1.3: Schéma amplitudové modulace pulsu

V případě amplitudové modulace funkcí sinus je intenzita odraženého pulsu I_r dána vztahem

$$I_r = \alpha_0 I_0 [1 + A \sin(2\pi f(t - \tau))], \quad (1.7)$$

kde α_0 je útlumový koeficient pro dané prostředí, I_0 je původní intenzita pulsu, f je frekvence modulovaného pulsu a τ je doba, za kterou se puls vrátí zpět na detektor.

Výsledná vzdálenost d je pak dána vztahem

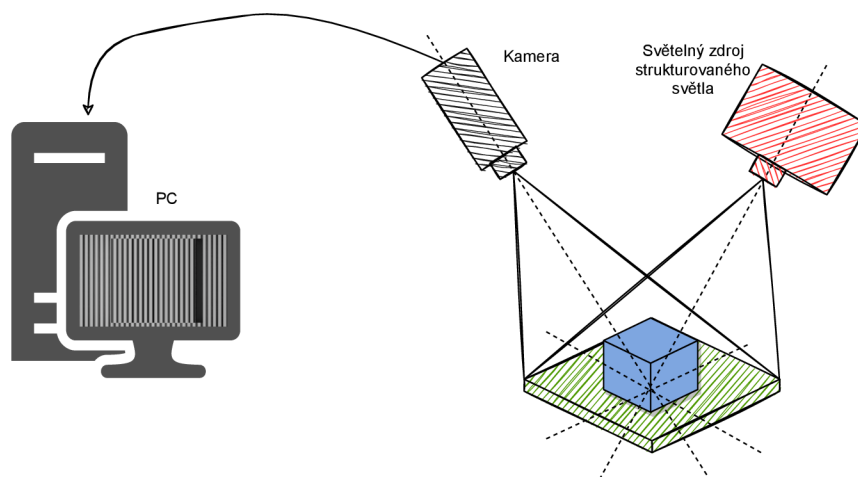
$$d = \frac{c}{2n} \tau, \quad (1.8)$$

kde c je rychlost světla, n je index lomu daného prostředí a τ je čas za který puls urazí dráhu od zdroje zpět na detektor.

Metody doby letu světelného pulsu jsou vhodné pro skenování v reálném čase, především díky velmi nízké odezvě a dobré výpočetní náročnosti. Pro představu, v prostředí s indexem lomu $n \approx 1$ a vzdáleností předmětu $d = 5$ m je odezva vyslaného a odraženého pulsu $\tau = 33,3$ ns. V případě amplitudové modulace bývá jako světelný zdroj použita speciální LED nebo LASER s požadavkem na co nejkratší šířku optického pulsu, obvykle v řádech nanosekund.

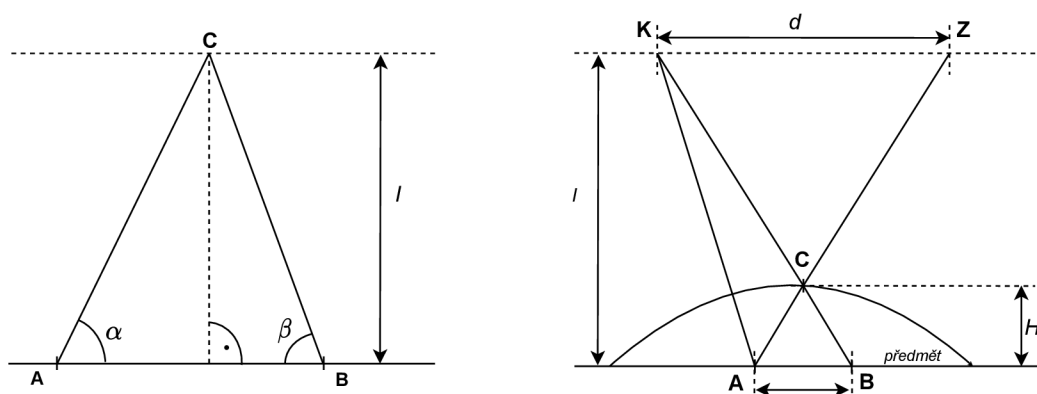
1.3.3 Metody strukturovaného světla

Metody strukturovaného světla patří mezi plošné metody využívající projekce zvolené světelné struktury na povrch měřeného předmětu. Oproti bodovým metodám je značnou výhodou plošný záznam měřeného povrchu, díky kterému jsou tyto metody časově úspornější. V jeden okamžik je tedy zaznamenána celá plocha měřeného předmětu. Vybraná struktura vychází ze světelného zdroje a dopadá na povrch předmětu. Od povrchu se odráží a odražené světlo dopadá na senzor snímače. Následuje pak zpracování pomocí počítače a rekonstrukce měřeného předmětu. Základní princip těchto metod je znázorněn na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Schéma bezkontaktní profilometrie

Tyto metody jsou založeny na aktivní triangulaci [14], jejíž principem je osvětlení měřeného předmětu světelným zdrojem strukturovaného světla a následně záznam odraženého světla na snímač. Soustava složená ze tří komponent, kamera-předmět-zdroj, tvoří tzv. triangulační trojúhelník a spojnice mezi kamerou a světelným zdrojem tvoří tzv. triangulační bázi. Schéma je zobrazeno na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Aktivní triangulace. Základní schéma triangulace (levá část), aplikace triangulační úlohy v profilometrii (pravá část)

Triangulační trojúhelník je tvořen body CKZ a je podobný trojúhelníku CAB. Vyjádřením této podobnosti je získán vztah

$$\frac{H(x,y)}{AB} = \frac{dH(x,y)}{l - H}, \quad (1.9)$$

ve kterém d je vzdálenost kamery od světelného zdroje a l je vzdálenost referenční roviny od roviny zdroje a kamery. Z této podobnosti vyplývá pro výšku v daném bodě měřeného povrchu $H(x,y)$ vztah

$$H(x,y) = \frac{d\overline{AB}}{l - \overline{AB}}, \quad (1.10)$$

Při metodách projekce strukturovaného světla je problematické měření v místech, kde je profil předmětu v důsledku osvětlení světelným zdrojem zastíněn. V takových místech nelze informaci o výšce předmětu obdržet a při rekonstrukci fáze dochází k chybnému výpočtu. V experimentální části této práce byla soustava nastavena tak, aby byl stín vržený předmětem minimální.

Následuje seznam jednotlivých kroků rekonstrukce profilu předmětu. Jejich podrobnější popis následuje v jednotlivých podkapitolách. Základní postup pro rekonstrukci výškového profilu se skládá z:

1. Projekce zvolené struktury (periodické mřížky) na měřený předmět
2. Záznam obrazu pomocí plošného snímače a uložení do počítače
3. Základní úprava dat a výpočet pro získání sbalené fáze
4. Algoritmus pro rozbalení sbalené fáze
5. Přiřazení reálných vzdáleností

Projekce světelné struktury

Existuje mnoho světelných struktur, které lze využít při jejich projekci. Může se jednat např. o barevné světelné struktury, černobílé binární struktury, bodové matice a mnoho dalších. Mezi základní projektované struktury ale patří periodická mřížka, jejíž hodnoty se opakují ve zvoleném směru funkcí sinus nebo cosinus. V této práci bude vždy jako promítaná struktura uvažována právě tato mřížka. V případě jednosnímkových metod je dopadající intenzita této mřížky na každém pixelu kamery definovaná vztahem

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) - \theta], \quad (1.11)$$

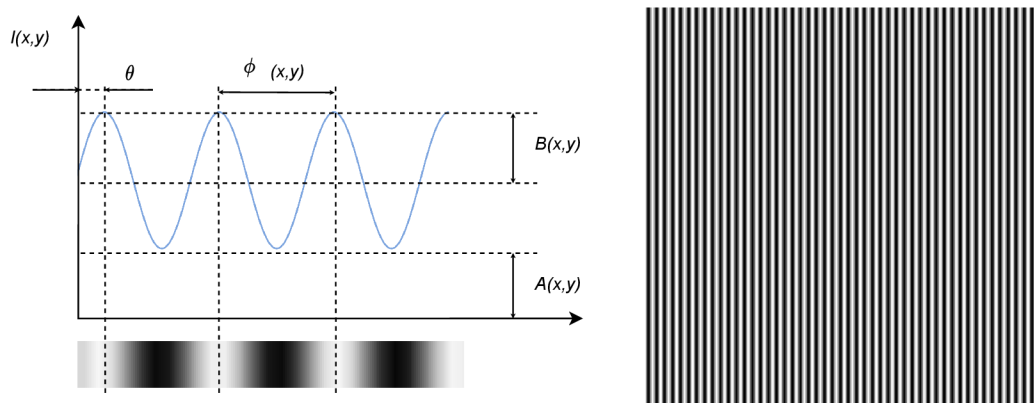
přičemž $I(x,y)$ je intenzita každého pixelu kamery, $A(x,y)$ intenzita okolního osvětlení, $B(x,y)$ je kontrast mřížky, $\phi(x,y)$ fáze mřížky pro daný bod a θ je fázový posun mřížky. Na obrázku 1.6 je zobrazený význam těchto parametrů. Na pravé straně obrázku 1.6 je zobrazený vzor mřížky generované v programu MATLAB.

V případě vícesnímkových metod je promítáno na měřený předmět několik fázově posunutých mřížek, vztah (1.11) přechází na tvar:

$$I(x,y)_n = A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) - \theta_n], n = 1,2,\dots,N, \quad (1.12)$$

přičemž $I(x,y)_n$ je hodnota vyčtená z každého pixelu kamery pro $n = 1,2,\dots,N$ pořizovaných snímků. θ_n je fázový posun jednotlivých mřížek, pro který obecně platí vztah $\theta_n = 2\pi(n - 1)/N$. Každému pořizovanému snímku tedy náleží právě jedna mřížka s fázovým posunem θ_n .

Obecně lze tedy rozčlenit metody strukturovaného světla na metody jednosnímkové vycházející ze vztahu (1.11) a vícesnímkové metody využívající fázového posunu



Obrázek 1.6: Graf intenzitního záznamu mřížky na kameru

vycházející ze vztahu (1.12). Nejběžnějším zdrojem pro promítnutí periodické mřížky je dataprojektor. Mřížka se vygeneruje zvoleným programem a pak je promítána na měřený předmět. Hloubka ostrosti projekčního objektivu by měla pokrýt měřený rozsah výškového profilu. Projekční vlastnosti dataprojektoru je většinou nutné korigovat pro obdržení přesných měření pomocí profilometrie strukturovaného světla. Jedná se především o korekci nelinearity intenzitního přenosu mezi kamerou a dataprojektorem [20]. Dále potřeba je zvolit geometrii projekční soustavy tak, aby prostorová frekvence projektované mřížky referenční roviny byla konstantní, případně zvolit takovou mřížku, aby její prostorová frekvence korigovala nárůst prostorové frekvence na referenční rovině.

Záznam na snímáč

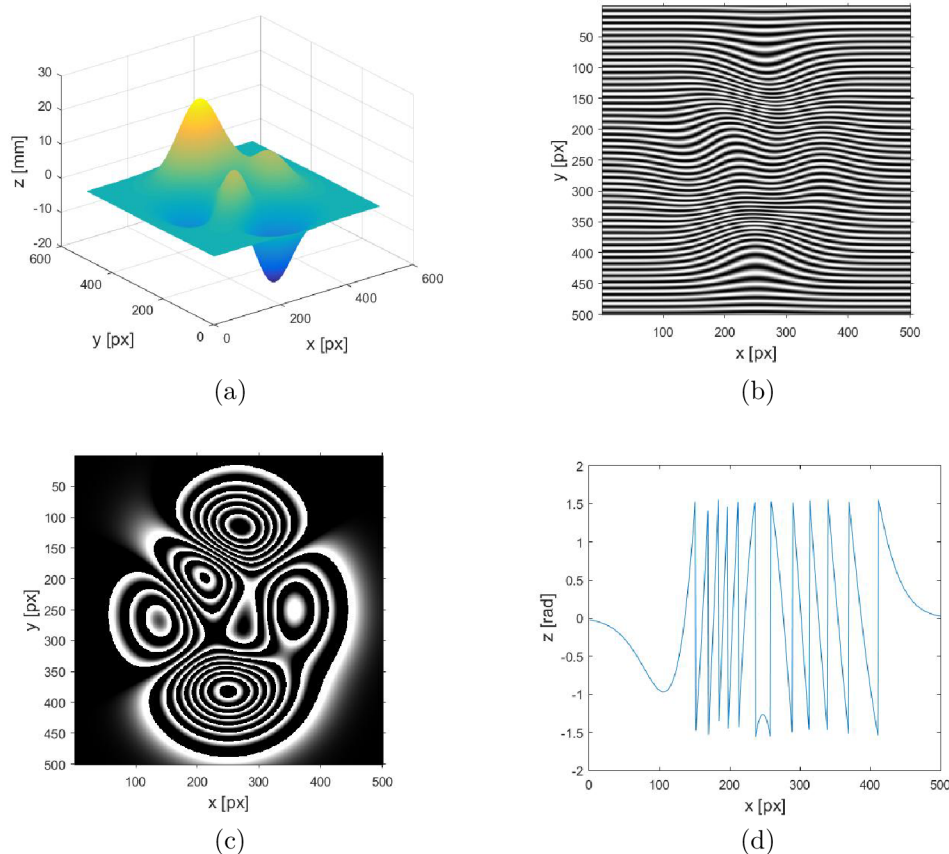
Pro záznam obrazu se běžně používá digitální fotoaparát nebo kamera se senzorem CCD nebo CMOS. Osy kamery a dataprojektoru (případně jiného světelného zdroje) by měly svírat takový úhel, aby byla zastíněná plocha předmětu byla co nejmenší. Na druhou stranu, při menších úhlech narůstá chybovost triangulační metody. Proto je nutné zvolit takový úhel, který optimalizuje obojí. Hodnota úhlu, která vyhovuje těmto podmínkám se může měnit v závislosti na velikosti a tvaru měřeného předmětu. Dále je nutné zvolit takový objektiv kamery, aby se na snímáč zobrazil celý předmět. Distorze objektivu kamery v použité soustavě by měla být korigována, případně ji lze po záznamu korigovat digitálně.

Sbalená fáze a její rozbalení

V závislosti na zvolené metodě projekce strukturovaného světla, následuje vypočítání tzv. mapy sbalené fáze. Sbalená mapa fáze $\Delta\phi(x,y)$ je soubor prostorových souřadnic, kterým je přiřazena hodnota, závisující na změně fáze promítané mřížky na předmět, oproti mřížce promítané na referenční rovinu. Právě sbalená mapa fáze nese informaci o výšce v daném bodě a je využita pro rekonstrukci profilu předmětu. Sbalená mapa fáze $\Delta\phi(x,y)$ je dána vtahem

$$\Delta\phi(x,y) = \phi - \phi_0 = 2\pi f_0 \overline{AB}, \quad (1.13)$$

kde f_0 je prostorová frekvence mřížky a \overline{AB} je vzdálenost v pravém schématu na obrázku 1.5. Obrázek 1.7 je zobrazuje simulaci jednolitých kroků až po získání mapy sbalené fáze $\Delta\phi(x,y)$.



Obrázek 1.7: Simulace získání sbalené fáze v prostředí MATLAB. (a) graf znázorňující profil předmětu vytvořeného pomocí simulace v MATLAB, (b) projekce mřížky na vytvořený předmět, (c) mapa sbalené fáze, (d) graf 350. řádku z (c)

Po získání sbalené mapy fáze následuje její rozbalení vhodným rozbalovacím algoritmem a obdržení tzv. rozbalené mapy fáze $\Phi(x,y)$. Sbalená mapa fáze $\phi(x,y)$ nabývá hodnot v intervalu $\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \rangle$ a v některých bodech se její hodnoty skokově mění. Rozbalovací algoritmus má za úkol tyto nespojitosti najít a přičtením nebo odečtením π je pospojovat. V případě 2D mapy sbalené fáze je tedy žádoucí, aby algoritmus rozeznal směr posuvu ve směrech osy x a y . Dále je nutné, aby algoritmus dokázal rozlišit, jestli se jedná o fázový skok způsobený šumem záznamu nebo změnou profilu předmětu. Obvykle lze šum rozeznat právě díky tomu, že v libovolném směru postrádá v okolních bodech spojitost.

Přiřazení reálných vzdáleností

Rozbalená fáze je v jednotkách radiánů, je nutné tedy přiřadit naměřeným hodnotám reálné vzdálenosti. Tento proces se také nazývá určení topografické výchytky. Pro výšku v daném bodě $H(x,y)$ platí vztah

$$H(x,y) = \frac{\Delta\Phi(x,y)l}{\Delta\Phi(x,y) + 2\pi f_0 d}, \quad (1.14)$$

kde $\Delta\Phi(x,y)$ je rozbalená mapa fáze, f_0 je prostorová frekvence mřížky, d vzdálenost kamery od projektoru a l je vzdálenost roviny kamery a projektoru od referenční roviny.

1.4 Nekoherentní metody optické profilometrie

Nekoherentními metodami, jsou myšleny takové metody, jenž nevyužívají interferenčního jevu, případně koherenčních vlastností světelného zdroje. Tyto metody lze realizovat pomocí poměrně lehce dostupného vybavení. Některé koherentní metody principů uvedených v této kapitole také využívají, ale díky jejich speciálních požadavcích na koherenční vlastnosti zdroje, jsou zařazeny do metod koherentních. Pro metody uvedené v této kapitole je tedy jako světelný zdroj periodické mřížky uvažován dataprojektor.

1.4.1 Fourierovská profilometrie

Fourierovská profilometrie [3][15] je optická měřící metoda, která využívá projekci periodické mřížky na povrch měřeného předmětu. Projektovaná mřížka se od povrchu odráží a je následně zaznamenána na snímač. Jedná se o jednosnímkovou profilometrickou metodu. Hlavní výhodou Fourierovské profilometrie je tedy rychlé zpracování a rekonstrukce profilu měřeného předmětu, právě díky její datové nenáročnosti. Intenzita v jednotlivých bodech záznamu s předmětem $g(x,y)$ a záznamu referenční roviny $g_0(x,y)$ je dána vztahy

$$g_0(x,y) = A_0(x,y) + B_0(x,y)\cos[2\pi f_0x + \phi_0(x,y)], \quad (1.15)$$

$$g(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[2\pi f_0x + \phi(x,y)], \quad (1.16)$$

kde f_0 je prostorová frekvence mřížky, $\phi(x,y)$, $\phi_0(x,y)$ jsou fáze v pole s předmětem a fáze pole referenční roviny, $A(x,y)$, $A_0(x,y)$ je intenzita okolního osvětlení předmětu a reference, $B(x,y)$, $B_0(x,y)$ je kontrast mřížky. Použitím Eulerových vztahů tyto výrazy lze přepsat na tvar

$$g(x,y) = A(x,y) + C(x,y)\exp(2\pi i f_0x) + C^*(x,y)\exp(-2\pi i f_0x), \quad (1.17)$$

kde

$$C(x,y) = \frac{1}{2}B(x,y)\exp(i\phi(x,y)). \quad (1.18)$$

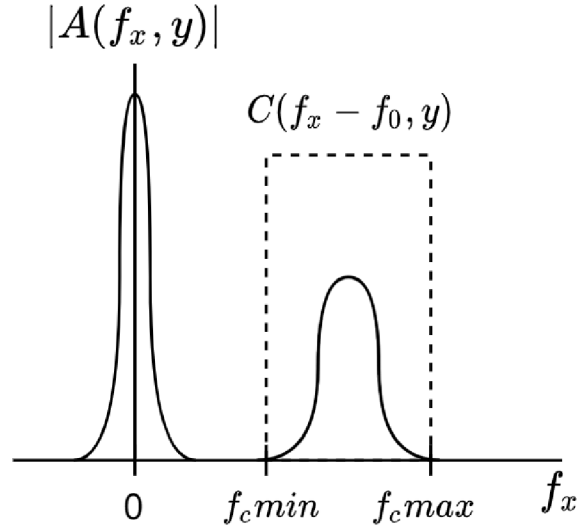
Následně jsou záznamy pro názornost pouze pomocí 1D Fourierovy transformace převedeny z prostorové do frekvenční domény. Získané Fourierovské spektrum je tvořené třemi základními frekvenčními složkami a je dáno vztahem

$$G(f_x,y) = A(f_x,y) + C(f_x - f_0,y) + C^*(f_x + f_0,y). \quad (1.19)$$

Po převedení záznamu z prostorové do frekvenční domény je dalším krokem filtrace parazitních frekvenčních složek a naopak ponechání frekvenční složky $C(f_x - f_0,y)$ obsahující f_0 , která je dána frekvencí promítané mřížky na předmět. Jedná se o filtr pásmové propusti, který je vymezen zvoleným frekvenčním rozsahem $[f_{cmin}, f_{cmax}]$. Filtrace ve frekvenční doméně je znázorněna na obrázku 1.8. Po zvolení vhodného frekvenčního rozsahu pásmové propusti je pro oba záznamy provedena zpětná Fourierova transformace a jsou obdrženy následující výrazy:

$$\hat{g}(x,y) = B(x,y)\exp[i(2\pi f_0x + \phi(x,y))], \quad (1.20)$$

$$\hat{g}_0(x,y) = B(x,y)\exp[i(2\pi f_0x + \phi_0(x,y))]. \quad (1.21)$$



Obrázek 1.8: Filtr pásmové propusti frekvenčního spektra $C(f_x - f_0, y)$

Jednotlivé sbalené mapy fáze $\phi(x, y)$ a $\phi_0(x, y)$ pro pole s předmětem a pro pole pouze s referenční rovinou jsou dány vztahy

$$\phi(x, y) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Im[\hat{g}(x, y)]}{\Re[\hat{g}(x, y)]} \right), \quad (1.22)$$

$$\phi_0(x, y) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Im[\hat{g}_0(x, y)]}{\Re[\hat{g}_0(x, y)]} \right), \quad (1.23)$$

a výsledná sbalená mapa fáze $\Delta\phi(x, y)$ je rovna rozdílu těchto fázových map

$$\Delta\phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y). \quad (1.24)$$

Po získání sbalené fázové mapy $\Phi(x, y)$ následuje její rozbalení zvoleným rozbalovacím algoritmem. Potom je získána rozbalená mapa fáze, která je proporcionálně stejná výškový profil měřeného předmětu. Jako posledním krokem je tedy převedení rozbalené fáze topografickou výškou $H(x, y)$

1.4.2 Profilometrie fázového posunu

Profilometrie fázového posunu [2][16] (z angl. phase-shift profilometry) je, stejně jako Fourierovská profilometrie, bezkontaktní měřicí metoda, která využívá projekci mřížky na měřený předmět k získání jeho výškového profilu. Na rozdíl od Fourierovské profilometrie se jedná o vícesnímkovou metodu a k rekonstrukci výškového profilu se používá několika obrazových záznamů s odpovídajícím fázovým posuvem periodické mřížky. V obvyklé konfiguraci se pro rekonstrukci používají čtyři obrazové záznamy. Díky této skutečnosti je profilometrie fázového posunu také výpočetně náročnější z důvodu většího objemu dat. Dále je tato metoda mnohem náchylnější na okolní vibrace, které vedou k chybám při měření profilu předmětu. Je tedy požadováno, aby jednotlivé snímky byly od sebe pořízeny v nejkratších možných intervalech a celá soustava byla izolována proti okolním vibracím. V opačném případě se geometrie soustavy v jednotlivých snímcích bude lišit a to povede k chybám při výpočtu fáze a chybné rekonstrukci profilu předmětu. Fázový posun mezi jednotlivými mřížkami je pro n mřížek obecně dán vztahem

$$\phi_n = 2\pi \frac{n-1}{n}, n = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1.25)$$

Pro výslednou intenzitu obrazových záznamů promítnutých mřížek $g_n(x, y)$ platí vztah

$$g_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) - \phi_n), \quad (1.26)$$

kde $A(x, y)$ je intenzita okolního osvětlení, $B(x, y)$ je kontrast mřížky, $\phi(x, y)$ fáze mřížky a ϕ_n je fázový posun. Sbalená mapa fáze pro pole s předmětem $\phi(x, y)$ je pro N promítnutých mřížek je pak dána vztahem

$$\phi(x, y) = tg^{-1} \left[\frac{\sum_{n=1}^N g_n(x, y) \sin(\phi_n)}{\sum_{n=1}^N g_n(x, y) \cos(\phi_n)} \right], \quad (1.27)$$

který se pro $N = 4$ pomocí goniometrických úprav zjednoduší na tvar

$$\phi(x, y) = tg^{-1} \left[\frac{g_1(x, y) - g_3(x, y)}{g_2(x, y) - g_4(x, y)} \right], \quad (1.28)$$

Stejné zjednodušení se provede i pro záznamy referenční roviny. Výsledná mapa fáze referenční roviny $\phi_0(x, y)$ má tvar

$$\phi_0(x, y) = tg^{-1} \left[\frac{g_{01}(x, y) - g_{03}(x, y)}{g_{02}(x, y) - g_{04}(x, y)} \right]. \quad (1.29)$$

Výsledná mapa sbalené fáze $\Delta\Phi(x, y)$ je opět rovna rozdílu fázové mapy pole s měřeným předmětem a fázové mapy referenční roviny

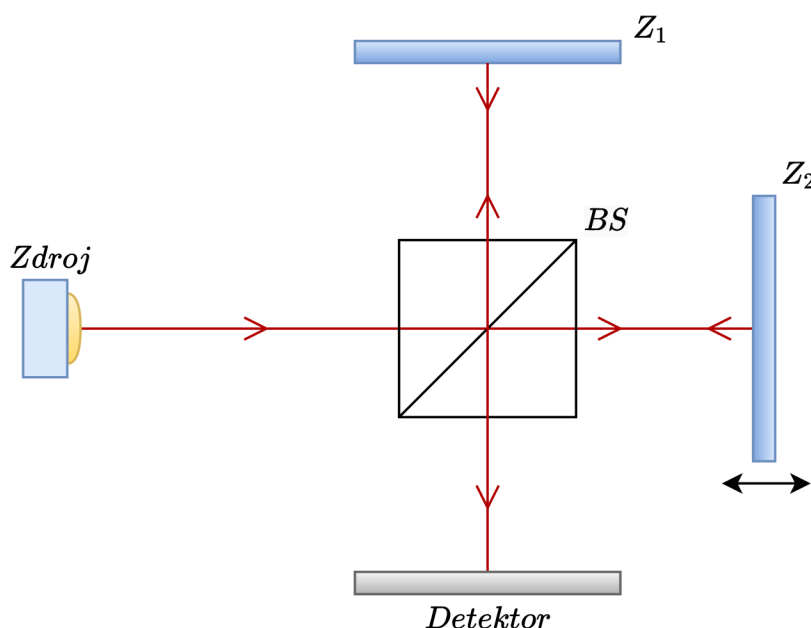
$$\Delta\phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y). \quad (1.30)$$

Po získání mapy sbalené fáze $\Delta\Phi(x, y)$ následuje opět její rozbalení vhodným rozbalovacím algoritmem a z rozbalené mapy fáze $\Delta\Phi(x, y)$, stejně jako u Fourierovské profilometrie, určení topografické výchyly $H(x, y)$.

1.5 Koherentní metody optické profilometrie

1.5.1 Interferometrie v bílém světle

Interferometrie v bílém světle [18] je přesná metoda měření povrchu objektů. Tato metoda obvykle využívá Michelsonův interferometr, který je tvořen světelným zdrojem, děličem svazku a dvěma zrcadly. Michelsonův interferometr je využíván k rozdělení světelného svazku z jednoho zdroje na dva svazky. Jedno zrcadlo je nepohyblivé a tvoří referenční větev interferometru. Druhé zrcadlo je umístěno na podélném posuvu a tvoří předmětové rameno interferometru. Podélným posuvem v předmětovém rameni dochází k dráhovému rozdílu a svazek je oproti ramenu referenčnímu fázově opožděn. Následně jsou rozdělené svazky znovu sloučeny a jejich superpozicí vytvoří výsledný interferenční obrazec. Schéma Michelsonova interferometru je zobrazeno na obrázku 1.9.



Obrázek 1.9: Schéma Michelsonova interferometru, Z_1 - zrcadlo, Z_2 - posuvné zrcadlo, BS - Dělič svazku

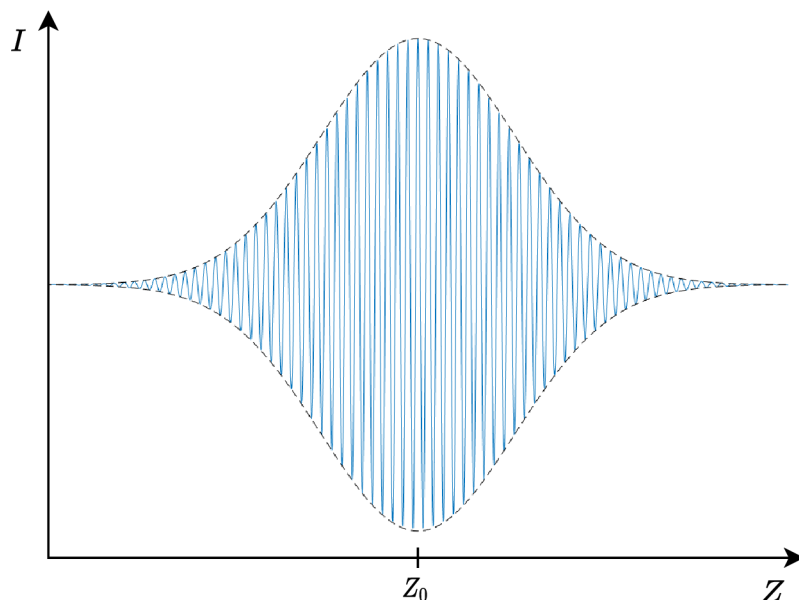
Jako světelný zdroj jsou využívány širokospektrální zdroje, běžně se jedná o zdroje LED vyzařující ve viditelné nebo blízké infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Tyto zdroje se vyznačují krátkou koherenční délkou.

Při měření profilu objektu je jedno ze zrcadel nahrazeno měřeným předmětem. Jako detektor se využívá matice snímače CCD nebo CMOS, na kterou je zaznamenána intenzita interferenčního obrazce. Zaznamenaná intenzita se mění v závislosti na změně polohy pomocí podélného posuvu v předmětovém rameni interferometru. Tuto závislost popisuje tzv. korelogram. Na obrázku 1.10 je zobrazena jeho simulace v programu MATLAB. Korelogram zdroje s gaussovským rozdělením vyzařovacího spektra je dán vztahem

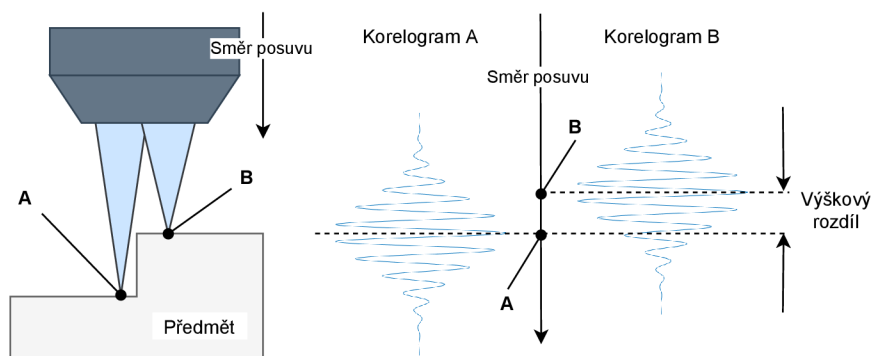
$$I = I_0 + I_k \left[1 + \exp \left[- \left(\frac{z - z_0}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) + \varphi \right], \quad (1.31)$$

kde I_0 a I_k je intenzita nekoherentních složek a intenzita koherentních složek, l_c je koherenční délka, φ je fázový posuv, z je poloha předmětového zrcadla a z_0 je hleda-

ná vzdálenost měřeného povrchu předmětu. Pro polohu $z = z_0$ je modulace intezity nejvyšší. Naopak na okrajích korelogramu je intenzitní modulace nejnižší. Šířka korelogramu závisí na spektrální šířce zroje. Čím větší je spektrální šířka, tím je větší šířka korelogramu. Korelogram je zaznamenáván v každém pixelu kamery, následně jsou data přenesena do počítače a jsou zpracovány a zvoleným programem. Pro výpočet předmětu stačí najít pro daný bod polohu intenzitního maxima Z_0 , znázorněnou na obrázku 1.10. Z této polohy lze pak dopočítat výškový profil měřeného předmětu. Schéma skenování předmětu se skokovým profilem je zobrazeno na obrázku 1.11.



Obrázek 1.10: Korelogram



Obrázek 1.11: Schéma měření předmětu se skokovým profilem

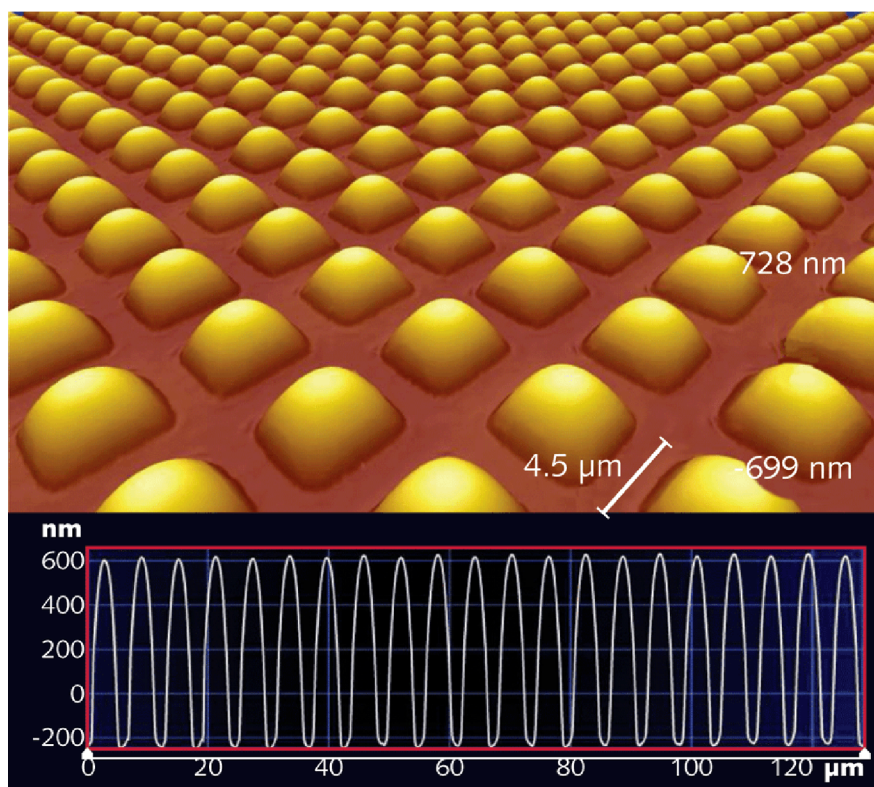
Vyhodnocením korelogramu pro každý pixel kamery je dán výsledný profil předmětu. Tato metoda je vhodná především pro předměty s hladkým povrchem a s vysokou odrazivostí. V opačném případě je dopadající světlo na povrchu předmětu rozptýleno a pro rekonstrukci je potřeba použít jiné metody.

1.5.2 Fázová interferometrie

Fázová interferometrie [13] (phase-shifting interferometry) patří mezi koherentní metody projekce strukturovaného světla. Jedná se o metodu založenou na stejném principu jako profilometrie fázového posuvu, která je popsána v této práci. Tato metoda využívá projekce několika fázově posunutých interferenčních proužků na měřený povrch předmětu. Následně jsou jednotlivé fázově posunuté interferenční záznamy zpracovány a měřený povrch je zrekonstruován stejným postupem jako v kapitole profilometrie fázového posuvu. Hlavním rozdílem je tedy využití interferenčního jevu při generaci periodické mřížky, díky němuž lze měřit výškové profily povrchů předmětů v řádech desítek nanometrů. Intenzita $I_k(x,y)$ pro k promítnutých mřížek s příslušným fázovým posuvem ϕ_k je dána vztahem

$$I_k(x,y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \phi_k) \quad (1.32)$$

Další patrné rozdíly jsou v celkové konfiguraci optické soustavy pro realizaci fázové interferometrie. Použity bývají mikroskopové objektivy s vysokým zvětšením a s velmi malou hloubkou ostrosti. Metody fázové interferometrie jsou velice náchylné na okolní vibrace a pro přesnou rekonstrukci profilu měřeného povrchu je nutné optickou soustavu před těmito vibracemi ochránit. Na rozdíl od interferometrie v bílém světle bývají použity zdroje s velkou koherenční délkou. Konstrukce těchto zařízení tedy představuje další velice komplexní úlohu, jejíž řešení není předmětem této práce. Na obrázku 1.12 je ukázka výsledného výškového profilu změřeného touto metodou.



Obrázek 1.12: Naměřený profil mikročoček senzoru CMOS metodou fázové interferometrie [17]

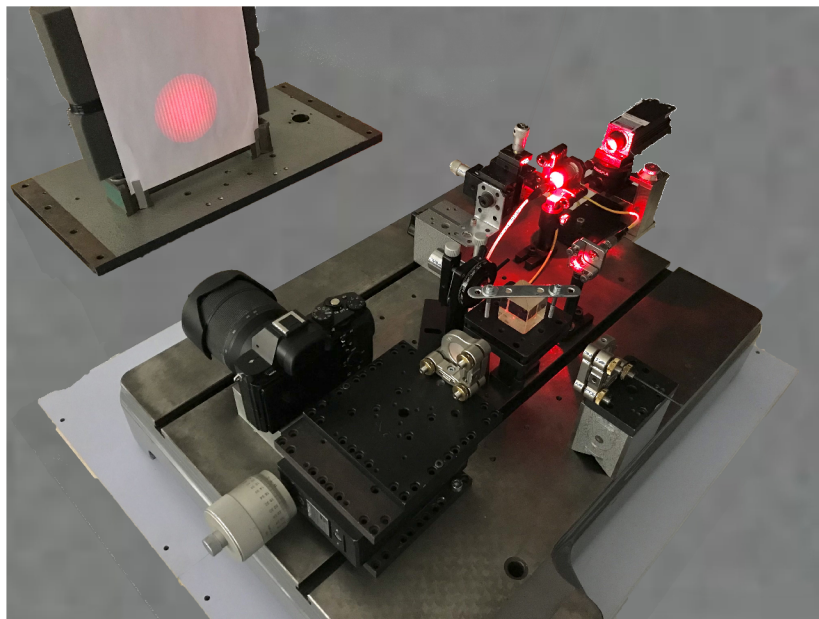
Kapitola 2

Experimentální část

2.1 Fourierovská profilometrie pomocí Michelsonova interferometru

2.1.1 Sestava

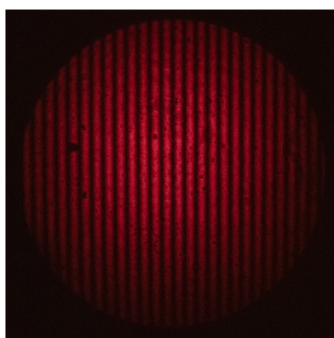
V sestavě byl pro generaci periodické mřížky sestaven Michelsonův interferometr. Jako světelný zdroj byl použit polovodičový laser o vlnové délce $\lambda = 635 \text{ nm}$. Pro homogenizaci byl vycházející svazek z laseru pomocí mikroskopového objektivu se zvětšením $10\times$ navázán do optického vlákna LP01 635nm. Kolimačním objektivem byl svazek vycházející z optického vlákna upraven na požadovanou rozbíhavost. Následně byl dělicí kostkou rozdělen na dvě části. Po rozdělení byl zaveden v předměťovém rameni interferometru požadovaný dráhový rozdíl a svazky byly opět sjednoceny. Pole vytvořené inteferometrem je zobrazováno na referenční rovinu pomocí objektivu Meopta FU 2,5 \times . Vzdálenost od objektivu k referenční rovině stínítka je 55 cm. Jako snímač byla použita kamera Sony A7 s CMOS senzorem s rozlišením 6000×4000 a s objektivem Sony f/3,5-5,6 28-70 mm. Osa objektivu Meopta FU 2,5 \times svírá s kamerou úhel 20° . Na obrázku 2.1 je fotografie této soustavy.



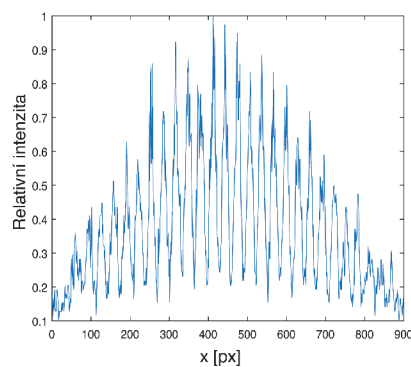
Obrázek 2.1: Fotografie sestavy

2.1.2 Projekční mřížka Michelsonova interferometru

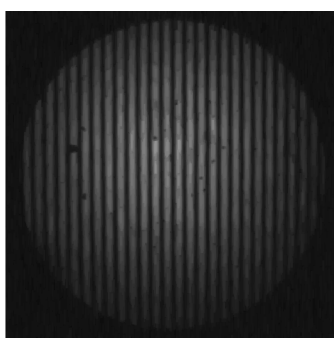
Za účelem generace projekční mřížky byla použita interference dvou lineárně polarizovaných vln v Michelsonově interferometru. Pomocí lehké rotace zrcadla kolem své osy v referenční větvi interferometru byly na stínítku vytvořeny požadované rovnoběžné proužky. Vytvořené pole na stínítku mělo kruhovou stopu o průměru 9,5 cm a pokrylo 1 440 000 pixelů snímače. Každý záznam byl převeden do barevného prostoru odstínů šedé a upraven tak, aby byl jeho šum redukován. Na obrázku 2.2 je původní a upravený záznam interferenčního obrazce projektovaného na referenční rovinu.



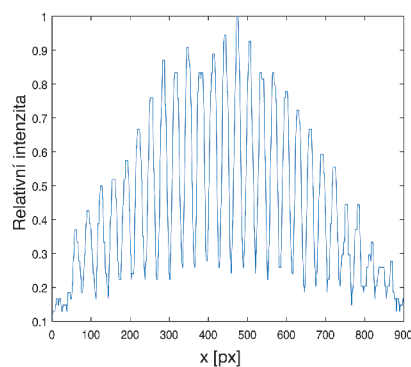
(a)



(b)



(c)

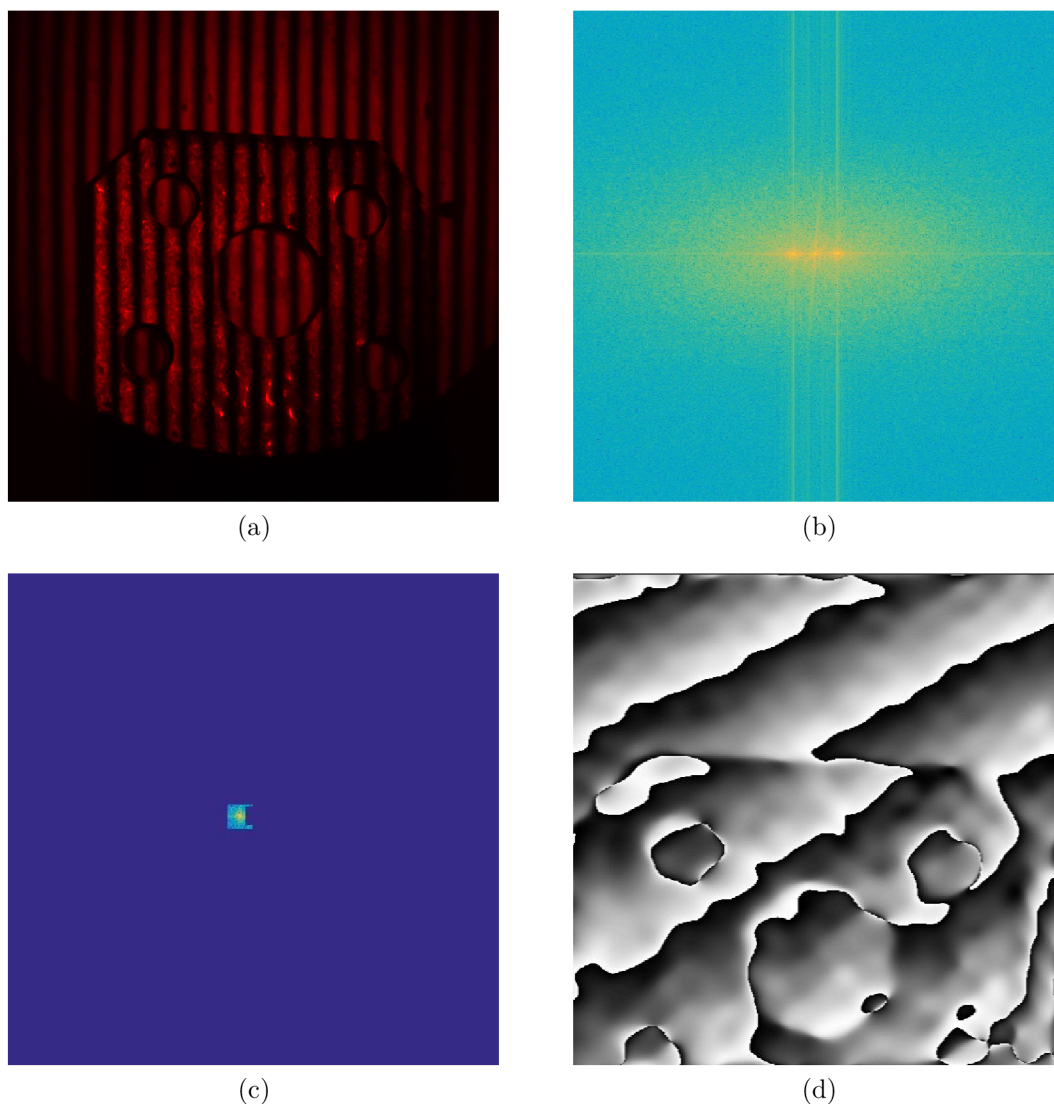


(d)

Obrázek 2.2: (a) Interferenční obrazec zaznamenaný na snímač, (b) intenzitní profil 450. řádku, (c) upravený interferenční obrazec převedený do barevného prostoru stupňů šedí s redukováným šumem, (d) intenzitní profil 450. řádku

2.1.3 Kalibrace a naměřené výsledky

Po otestování projekční sestavy byla před referenční rovinu umístěna plochá destička s výškovým profilem 2 mm. Na obrázku 2.3 jsou zobrazeny jednotlivé kroky zpracování pořízeného snímku. Nejprve byla upravena expozice snímku, následně byl snímek oříznut a zbaven šumu. Pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace bylo získáno jeho Fourierovo spektrum. Zvoleným filtrem pásmové frekvenční propusti byla ponechána pouze frekvenční složka promítané mřížky. Následně byla provedena inverzní rychlá Fourierova transformace. Sbalená mapa fáze je pro daný bod dána vztahem (1.28) jako argument komplexního čísla.



Obrázek 2.3: (a) Snímek měřené destičky, (b) původní Fourierovo spektrum měřené destičky, (c) ponechané frekvenční složky obsahující projektovanou mřížku, (d) získaná mapa sbalené fáze po převodu zpět do prostorové domény

Sbalená mapa fáze obsahuje informaci o tvaru předmětu. Na obrázku 2.3(d) pomyslné vrstevnice referenční roviny signalizují lineární nárůst výškové souřadnice ve směru x a y . Pro správné určení profilu bylo nutné získat kalibrační konstanty k_x a k_y pro příslušné směry. Jelikož snímek obsahuje předmět i referenční rovinu, lze pomocí dvou zvolených bodů na referenční rovině snímku tyto konstanty jednoduše vypočítat.

Zvolením dvou bodů x_1 a x_2 ve směru osy x a dvou bodů y_1 a y_2 ve směru osy y byly vypočítány přímky procházející těmito body. Pro rovnice zkosení ve směru osy x a ve směru osy y platí vztahy

$$z_{x1,x2} = k_x x_{1,2} + q_x, \quad (2.1)$$

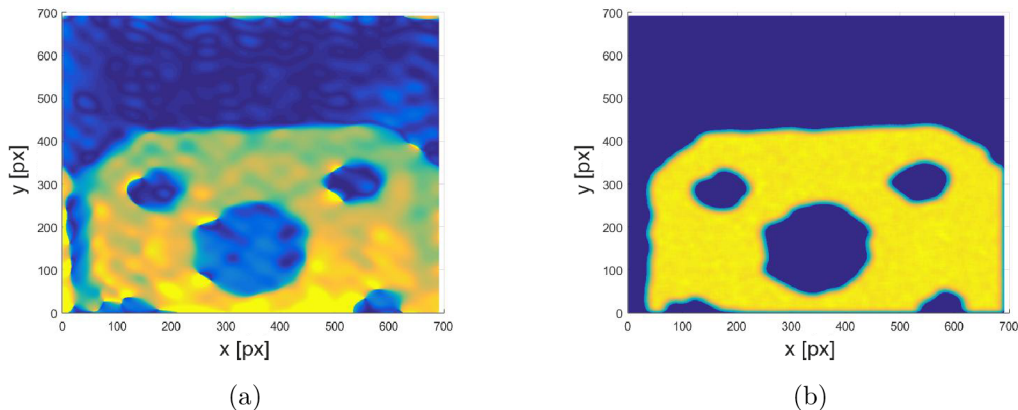
$$z_{y1,y2} = k_y y_{1,2} + q_y. \quad (2.2)$$

Rovnice přímek s opačným znaménkem jsou pak hledané kalibrační přímky. Pomocí těchto rovnic bylo zkosení roviny ve směrech x a y korigováno. Získané rovnice kalibračních přímek pro tento snímek byly:

$$z = 0,00995x - 2,82495 \quad (2.3)$$

$$z = 0,01716y - 12,2470 \quad (2.4)$$

Následně byl pro rozbalení sbalené mapy fáze použit rozbalovací algoritmus quality-guided flood fill [19]. Na obrázku 2.4 je ukázka před a po provedení úpravy matice. Kvůli chybovosti a fázovým skokům ve výsledném profilu při rozbalovacím algoritmu byly některé řádky matice zprůměrovány a referenční rovina byla od výsledné matice odečtena, aby nedocházelo k chybnému rozbalení fáze.

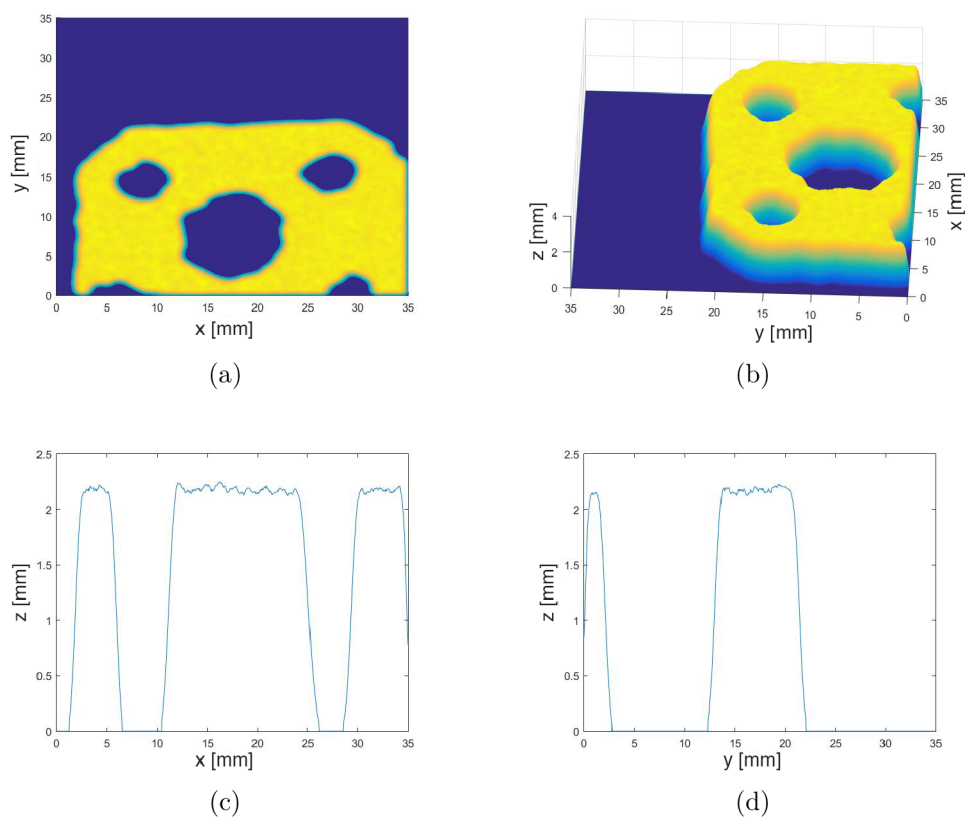


Obrázek 2.4: (a) Původní snímek, (b) zprůměrovaný a upravený snímek s odečtenou referenční rovinou.

Dále bylo potřeba přiřadit zrekonstruovanému profilu reálnou velikost. Celková velikost oříznutého snímku je $s = 35$ mm, prostorová frekvence mřížky je $f = 0,4688$ mm⁻¹ a úhel který svírá kamera s projekčním objektivem $\alpha = 20$ °. Jelikož je prostorová frekvence mřížky několikrát nižší než je vzdálenosti projekčního objektivu od kamery, lze vztah (1.14) přepsat na tvar

$$h(x,y) = -\frac{\Delta\Phi(x,y)}{2\pi f \tan(\alpha)}. \quad (2.5)$$

Dosažením do (2.5) byly přiřazeny reálné vzdálenosti a byla vypočítána výsledná rekonstruovaná matice. Na obrázku 2.5 je zobrazena výsledná matice a její vybrané výškové profily ve směru osy x a osy y .



Obrázek 2.5: (a) Výsledný rekonstruovaný profil destičky, (b) profil řádku matice ve směru osy x , (c) profil řádku matice ve směru osy y , (d) mapovaná textura původního snímku na rekonstruovaný profil

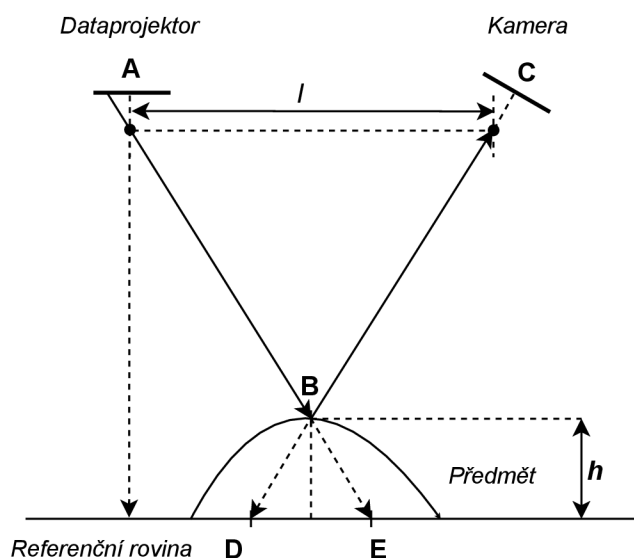
2.2 Fourierovská profilometrie pomocí dataprojektoru

2.2.1 Sestava

V této sestavě byl pro generaci periodické mřížky použit digitální projektor Samsung SP-A800B s rozlišením 1920×1080 a projekčním objektivem 35,7mm-46,6 mm $1,3 \times f/2,5-2,8$. Jako snímač byla použita kamera se stejným objektivem a parametry jako v kapitole 2.1.1. Kamera a projektor sestaveny podle schématu v obrázku 2.6. Kamera svírala s optickou osou dataprojektoru úhel 40° . Vzdálenost kamery od referenční roviny byla 54 cm a vzdálenost kamery od optické osy projektoru byla 45 cm.

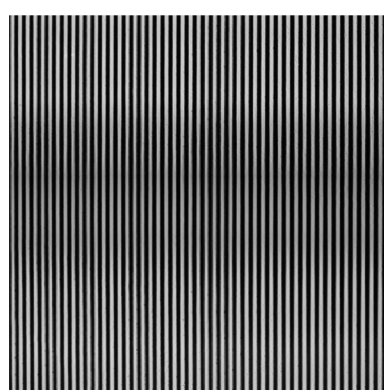
2.2.2 Projekční mřížka dataprojektoru

Požadovaná mřížka byla vygenerována pomocí programu MATLAB. Po generaci byly pořízeny snímky referenční roviny. V počítačovém programu pro editaci fotografií byla

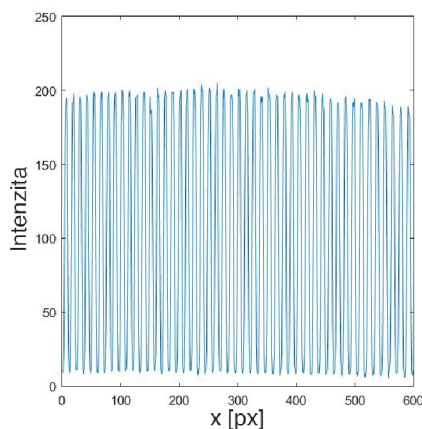


Obrázek 2.6: Schéma měřicí sestavy

korigována distorze a snímek byl oříznut a přeškálován na velikost 600×600 a vyhodnocen. Na obrázku 2.7 je zobrazen pořízený a upravený snímek s korigovanou distorzí a na pravé straně jeho jeho intenzitní profil.



(a)



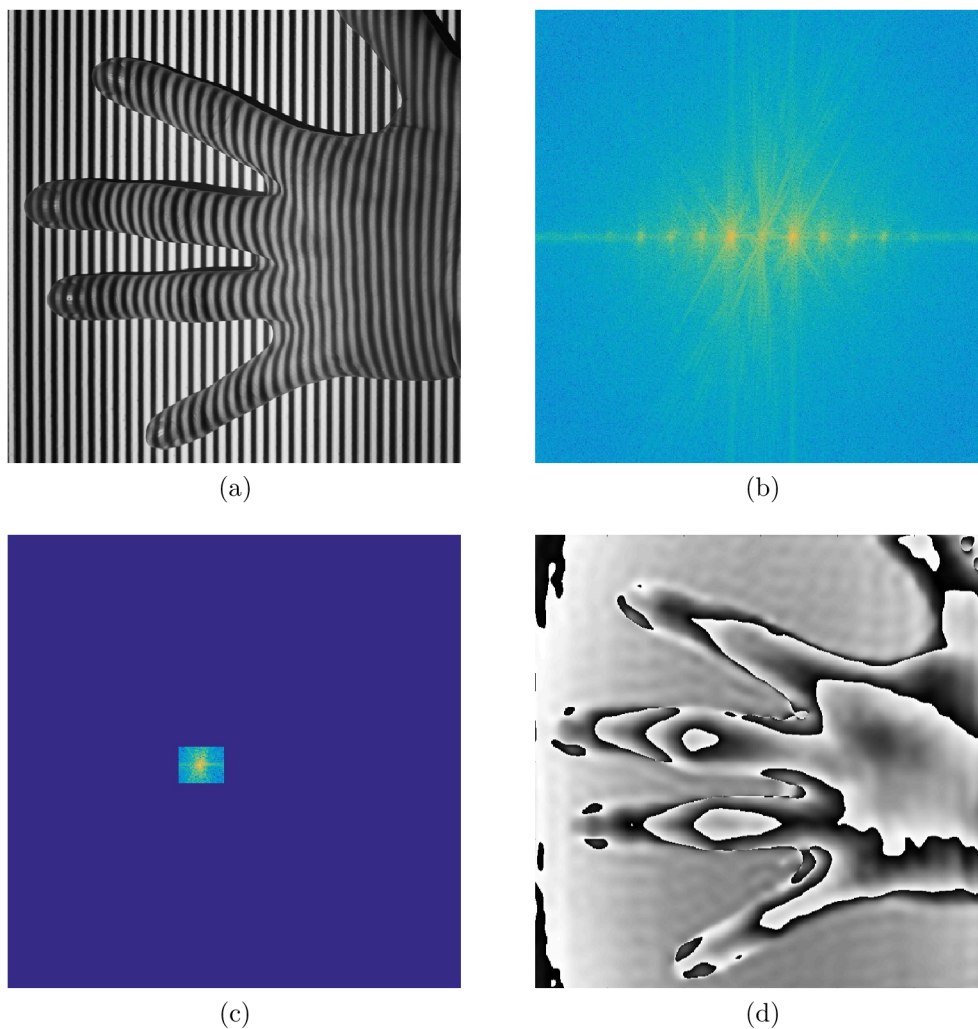
(b)

Obrázek 2.7: (a) Korigovaný snímek referenční roviny, (b) intenzitní profil 300. řádku referenční roviny

Intenzitní profil světelného pole projektoru je na rozdíl od intenzitního profilu mřížky generované pomocí Michelsonova interferometru v kapitole 2.1.2 téměř konstantní. Na okrajích vidět pouze mírný intenzitní pokles. Světelné pole dataprojektoru tedy nebylo nutné dále korigovat.

2.2.3 Měření výškového profilu lidské ruky

Po otestování projekce mřížky na referenční rovinu byl měřen profil lidské ruky. Po záznamu snímku byly provedeny stejné kroky jako v kapitole 2.1.3. Nejprve byl záznam převeden do Fourierova spektra, kde byly odfiltrovány parazitní prostorové frekvence a ponechána pouze frekvenční složka projektované mřížky. Byla provedena inverzní rychlá Fourierova transformace a následně byla vypočítána sbalená mapa fáze. Na obrázku 2.8 jsou zobrazeny jednotlivé provedené kroky.



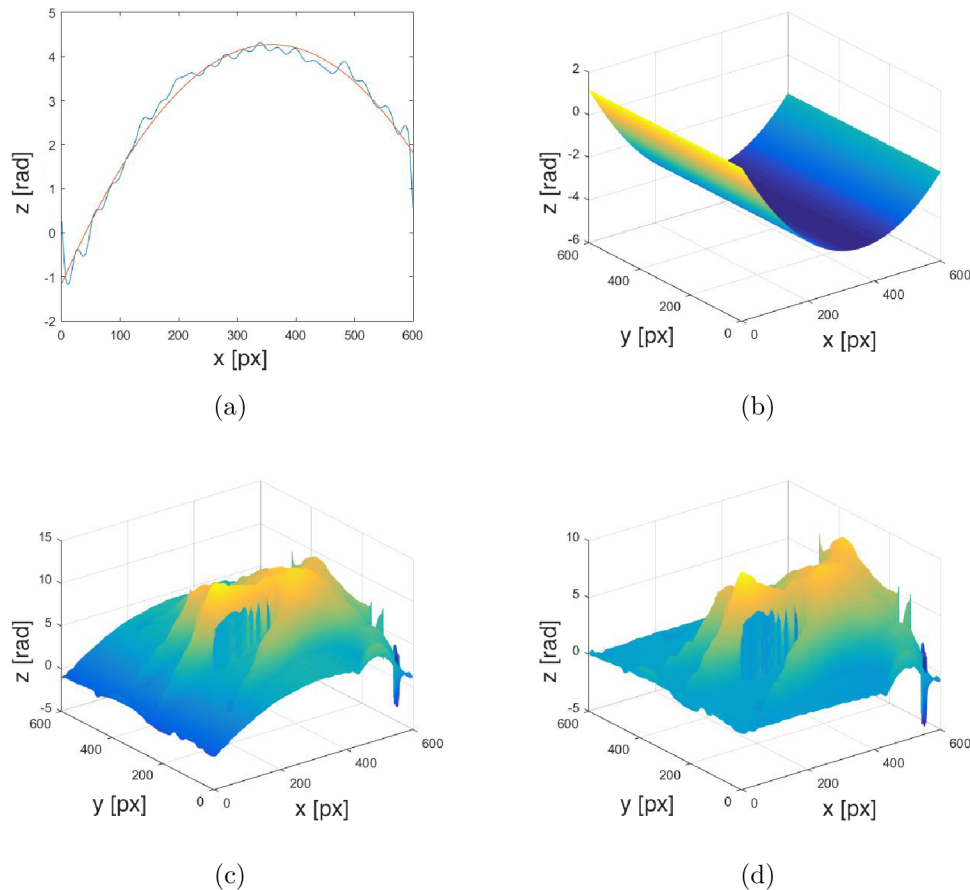
Obrázek 2.8: (a) Snímek měřené ruky, (b) původní Fourierovo spektrum, (c) ponechané frekvenční složky obsahující projektovanou mřížku, (d) získaná mapa sbalené fáze po převodu zpět do prostorové domény

Rozbalovacím algoritmem byla sbalená mapa fáze rozbalena a byl získán výškový profil měřené ruky v radiánech. Z obrázku 2.8 (d), zejména na referenční rovině, je patrný nárůst výškové souřadnice ve směru osy x . Nárůst je způsoben velkým úhlem mezi kamerou a osou dataprojektoru. Pro jeho korekci byla použita polynomiální regrese, která spočívá v aproximaci naměřených hodnot křivkou pomocí metody nejmenších čtverců. Z matice výškového profilu byl zvolen krajní řádek obsahující pouze referenční rovinu a proložení polynomem 2. stupně došlo k jeho aproximaci. Získaný polynom a jeho konstanty byly dány vztahy

$$z = p_1x^2 + p_2x + p_3, \quad (2.6)$$

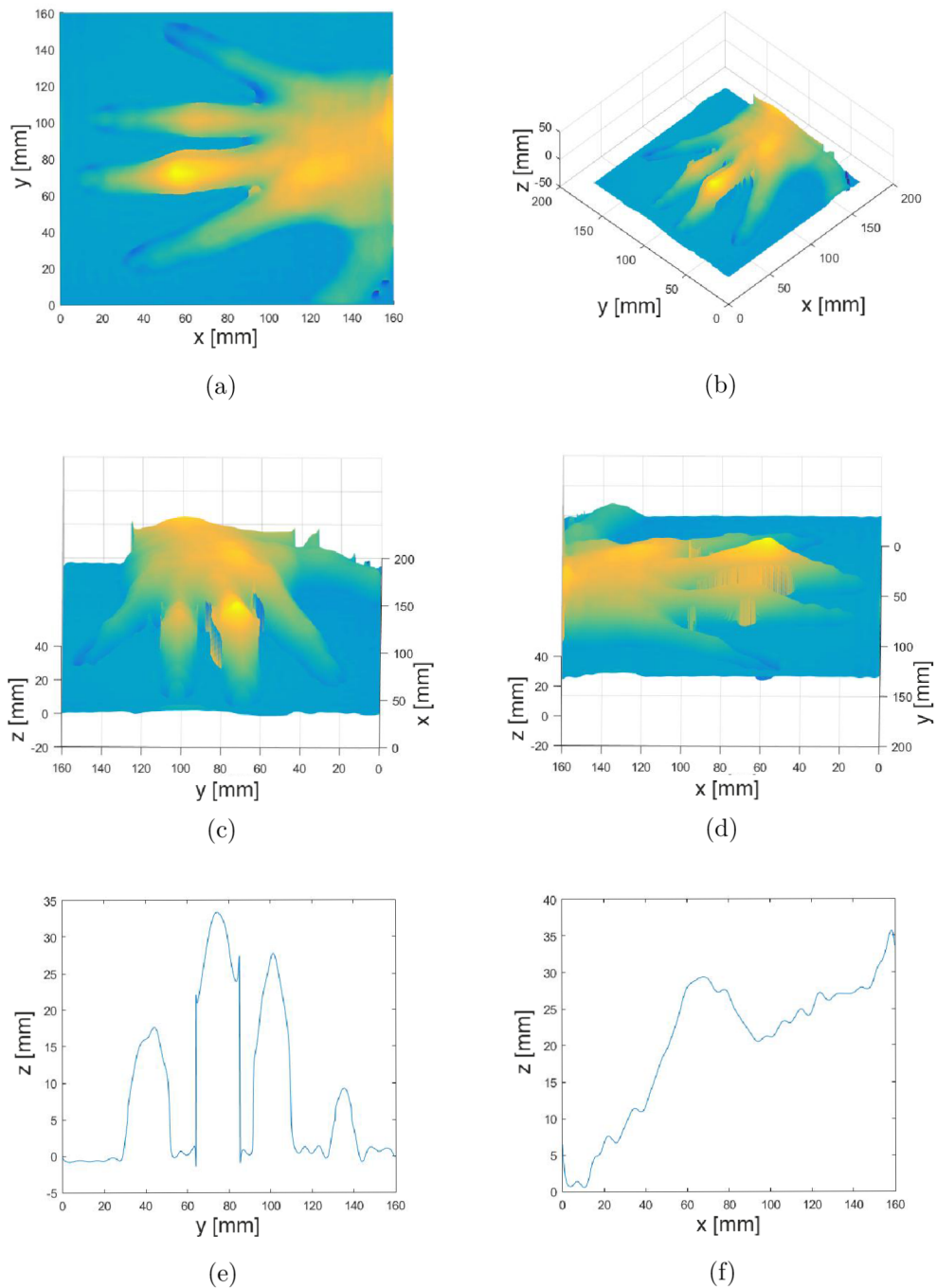
$$p_1 = -4.224 \cdot 10^{-5}, \quad p_2 = 0.03034, \quad p_3 = -1.17, \quad (2.7)$$

a jsou zobrazeny na obrázku 2.9. Pro korekci nelinearity výškové souřadnice byla vytvořena matice pomocí opakování polynomiální křivky ve směru osy y a její inverze byla přičtena k matici rozbalené fáze.



Obrázek 2.9: (a) Graf krajního řádku matice a jeho aproximace, (b) inverzní matice polynomu, (c) rozbalený profil bez korekce, (d) rozbalený profil s korekcí

Projektovaná mřížka měla prostorovou frekvenci $f = 0,2288 \text{ mm}^{-1}$ a úhel mezi optickou osou kamery a dataprojektoru byl 40° . Oříznuté pole mělo rozlišení 600×600 a jeho reálná velikost byla $160 \times 160 \text{ mm}$. Jeden pixel měřeného výřezu má velikost $0,2667 \text{ mm}$. Pomocí těchto informací byly pak osám x, y a z přiřazeny reálné velikosti. Výsledný výškový profil je na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: (a),(b),(c),(d) Graf výsledné matice s reálnými vzdálenostmi, (e), (f) výškové profily jednotlivých prstů získané pomocí řezu výsledné matice

Závěr

Cílem této práce bylo obeznámení se s principem moderních bezkontaktních profilometrických metod, které jsou v dnešní hojně používány nejen při kontrolních měřeních povrchů, ale také v oblastech automatizace nebo rozšířené reality. Jejich uplatnění se v posledních letech díky současným technologickým pokrokům, zejména v oblastech výpočetní techniky, značně rozšiřuje.

V teoretické části bakalářské práce byly popsány jednotlivé principy měření výškových profilů objektů. Byly popsány a odvozeny schémata a základní vzorce, které tyto metody využívají pro zpracování dat. Dále byl stručně popsán rozbalovací algoritmus, který je hojně používán v optických profilometrických metodách. Následně vysvětleny a popsány vybrané metody optické profilometrie.

V experimentální části byly teoretické poznatky aplikovány na měření reálnými sestavami pomocí jednosnímkové Fourierovské profilometrie. Byla zde popsána sestava k měření předmětů s menšími rozměry, která využívá interferenčního jevu k vytvoření periodické mřížky. Druhá sestava využívá k vytvoření periodické mřížky dataprojektor a slouží k měření předmětů větších rozměrů. Na těchto sestavách byly naměřeny výškové profily vybraných objektů a popsány jednotlivé kroky s názornými ukázkami. Na konci jednotlivých kapitol byly pak uvedeny naměřené výsledky těmito sestavami.

Jednoznačnou výhodou Fourierovské profilometrie je její široké spektrum uplatnění. Tato práce ukázala její využití pro měření objektů malých i větších rozměrů. Další výhodou oproti ostatním metodám optické profilometrie je, že k vypočtení výškového profilu předmětu je potřebný pouze jeden snímek, ze kterého lze provést kalibraci i výpočet výškového profilu. Zároveň jsou tímto způsobem okolní vibrace, které by mohly vést k chybnému měření, značně omezeny.

Nevýhodou je problematické určení výškového profilu v místech, které jsou zastíněny díky triangulačnímu principu, ze kterého tato metoda vychází. Možným řešením by mohlo být použití více světelných zdrojů a kamer a uspořádat je způsobem, aby bylo možné tato problematická místa zaznamenat a vyhodnotit.

Tato práce nabízí mnoho možností jejího dalšího rozšíření. Jedním z nich je například úprava použitých sestav na měření objektů s nízkou odrazivostí. Dalším možným vylepšením by mohla být zejména optimalizace procesu zpracování naměřených dat, za účelem lepšího rozlišení a rychlejšího vyhodnocení dat. Dále by bylo vhodné, pro budoucí měření těmito sestavami, vytvoření grafického rozhraní, které by sloužilo především k automatizaci kalibračních procesů těchto sestav.

Literatura

- [1] YU, Y., F. DA, Y. GUO a Z. ZHANG. High-Speed Phase-Shifting 3D Profilometry on Human Face Assisted by Statistical Model. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2020, 6, 1007-1016. ISSN 2333-9403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TCI.2020.2999830>
- [2] POCHMON, M. Topografie kloubní jamky kyčelního implantátu. Diplomová práce, PřF UP Olomouc, 2005
- [3] LIU, Xinran a Jonathan KOFMAN. Real-time 3D surface-shape measurement using background-modulated modified Fourier transform profilometry with geometry-constraint. *Optics and Lasers in Engineering*. , 217-224. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.014>
- [4] HAVELKOVÁ, Martina a Helena HIKLOVÁ. Mapování povrchu pevných těles se zaměřením na kontaktní profilometrii. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4043-9
- [5] GDI&T Basics [online]. 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.gdandtbasics.com/what-is-a-profilometer/>
- [6] MURTHY, N.S. 9 - Techniques for analyzing biomaterial surface structure, morphology and topography. Woodhead Publishing Series in Biomaterials. Woodhead Publishing, 2011, s. 232-255. ISBN 978-1-84569-640-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857090768.2.232>
- [7] Charge-coupled device. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-[cit. 2021-12-9]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [8] Active-pixel sensor. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-[cit. 2021-12-9]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor
- [9] MACHUCA-BAUTISTA, Yanely B., Marija STROJNIK, Jorge L. FLORES, David I. SERRANO-GARCÍA a Guillermo GARCÍA-TORALES. Michelson interferometer for phase shifting interferometry with a liquid crystal retarder. *Results in Optics*. 2021, 5, 100197. ISSN 2666-9501. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100197>
- [10] GE, Zongtao a Fumio KOBAYASHI. High-precision measurement of a fiber connector end face by use of a Mirau interferometer. *Applied Optics*. OSA, 2006/08/10, 45(23), 5832-5839. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/AO.45.005832>

- [11] DUBOIS, Arnaud, Laurent VABRE, Albert-Claude BOCCARA a Emmanuel BE-AUREPAIRE. High-resolution full-field optical coherence tomography with a Lin-nik microscope. *Applied Optics*. OSA, 2002/02/01, 41(4), 805-812. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/AO.41.000805>
- [12] VALLDORF, Jürgen a Wolfgang GESSNER. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2006*. 2006/01/01. ISBN 978-3-540-33409-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/3-540-33410-6>
- [13] *Handbook of Optics: Volume II - Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry: Volume II - Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2010. ISBN 9780071498906. Dostupné také z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071498906>
- [14] JANAKOVA, Ilona a Marek LISZTAN. *Active Triangulation Technique*. 2005-08-14, Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333776357_Active_Triangulation_Technique.
- [15] TAKEDA, Mitsuo a Kazuhiro MUTOH. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*. OSA, 1983/12/15, 22(24), 3977-3982. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/AO.22.003977>
- [16] ZUO, Chao, Shijie FENG, Lei HUANG, Tianyang TAO, Wei YIN a Qian CHEN. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018, 109, 23-59. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.04.019>
- [17] *Laser Focus World* [online]. 2010 [cit. 2021-11-24] Dostupné z: https://www.laserfocusworld.com/test_measurement/test_measurement/article/16552227/optical_surface_profiling_profilometer_advances_benefit_surface_analysis_filmthickness_measurement
- [18] BAUER, Wilfried, Mark WEBER a Sirichanok CHANBAI. *White Light Interferometry*. Boston, MA: Springer US, 2013, s. 4115-4127. ISBN 978-0-387-92897-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_320
- [19] QINGLIANG, Li, Chunyu BAO, Jiashi ZHAO a Zhengang JIANG. A New Fast Quality-Guided Flood-Fill Phase Unwrapping Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018/08/01, 1069, 012182. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1069/1/012182>
- [20] FENG, Shijie, Chao ZUO, Liang ZHANG, Tianyang TAO, Yan HU, Wei YIN, Jiaming QIAN a Qian CHEN. Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review: A comparative review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021, 143, 106622. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106622>
- [21] Originální verze: Haade, Vektorizace: Wjh31, Quibik. *Interference of two waves*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-[cit. 2021-11-19]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interference_of_two_waves.svg