

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky



Bakalářská práce

Název práce:

**Nastavení a kalibrace experimentální sestavy pro
optickou phase-shifting profilometrii**

Autor:
Studijní program:
Studijní obor:
Forma studia:
Vedoucí práce:
Datum zadání práce:
Datum odevzdání práce:

Radek Baránek
Fyzika
Aplikovaná fyzika
Prezenční
Mgr. Michal Pochmon
září 2008
květen 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval sám pod vedením Mgr. Michala Pochmona za použití materiálů uvedených na konci práce.

Podpis autora:

Poděkování

Mockrát děkuji mému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Michalu Pochmonovi za četné rady, připomínky a za nespočetně hodin se mnou strávených v laboratoři.

Bibliografická identifikace

Autor:	Radek Baránek
Název práce:	Nastavení a kalibrace experimentální sestavy pro optickou phase-shifting profilometrii
Typ práce:	Bakalářská práce
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	Mgr. Michal Pochmon
Rok obhajoby práce:	2009
Počet stran:	37
Počet příloh:	0
Jazyk:	Čeština

Abstrakt

V práci je zkoumána phase-shifting profilometrie, což je optická nekoherentní metoda využívající se pro měření 3D profilu objektů. V první části práce je tato metoda rozebírána z teoretického hlediska, zde jsou také uvedeny a odvozeny některé vzorce nutné pro práci s touto metodou. Hlavní část práce tvoří popis nastavení a kalibrace experimentální sestavy pro phase-shifting profilometrii. Je zde vyšetřován vliv parametrů sestavy (např. vzájemná poloha kamery a dataprojektoru) na vlastnosti měření. Jsou zde také uvedeny některé nutné korekce prvků měřicí sestavy. Dále je řešen problém kalibrace měřicí sestavy, speciálně pak kalibrace pomocí prostorového etalonu. Poslední část práce je věnována výsledkům z reálného experimentu, jehož cílem je ověřit a ilustrovat použití předešlých postupů.

Klíčová slova: phase-shifting profilometrie, kalibrace, 3D metrologie, prostorový etalon

Bibliographical identification:

Author:	Radek Baránek
Title:	Adjusting and calibration of experimental setup for optical phase-shifting profilometry
Type of thesis:	Bachelor
Department:	Department of experimental physics
Supervisor:	Mgr. Michal Pochmon
The year of presentation:	2009
Number of pages:	37
Number of appendices:	0
Language:	Czech

Abstract

In this thesis, the 3D shape measuring method called phase-shifting profilometry is investigated. The first part of this work is about theory of phase-shifting profilometry. The needful formulas are derived or mentioned here. The main part deals with description of adjusting and calibration of experimental setup for phase-shifting profilometry. Firstly, the influence of the parameters of experimental setup to measuring results is examined. Some required correction of setup's elements are also shown. After that, the problem of calibration is solved, especially the calibration with spatial standard. The last part is dedicated to results of real experiment. The aim of experiment is to illustrate and verify previous procedures.

Keywords: phase-shifting profilometry, calibration, 3D metrology, spatial standard

Obsah

1	Úvod	7
	1.1 Cíle bakalářské práce	8
2	Profilometrie	9
3	Phase-shifting profilometrie	10
	3.1 Sinusová mřížka a posun fáze	11
	3.2 Způsoby rozpoznávání fáze	13
	3.3 Unwrapping	16
4	Nastavení a kalibrace měřící sestavy	18
	4.1 Korekce intenzitního přenosu dataprojektoru	18
	4.2 Parametry sestavy pro phase-shifting profilometrii	20
	4.2.1 Vlnová délka sinusové mřížky	22
	4.2.2 Poloha kamery a dataprojektoru	24
	4.3 Kalibrace měřící sestavy	24
5	Experimentální část	29
	5.1 Nastavení měřící sestavy	29
	5.2 Korekce intenzitního přenosu dataprojektoru	30
	5.3 Kalibrace měřící sestavy pomocí prostorového etalonu	33
	5.4 Měření pomocí nakalibrované sestavy	34
6	Závěr	36
	Seznam použité literatury	37

1 Úvod

V dnešní době nalézá 3D metrologie čím dál větší uplatnění např. ve zdravotnictví, v průmyslu, atd. Pojmem 3D metrologie rozumíme různé způsoby měření profilu či výškového rozložení prostorových objektů. Měření profilu objektů se v různých formách využívá pro kontrolu kvality vyrobeného zboží. Například se může jednat o kontrolu kvality různých optických prvků aj. Ve zdravotnictví se 3D metrologie využívá pro identifikaci a sledování vývoje nejrůznějších onemocnění souvisejících se změnou profilu či objemu studované oblasti na lidském těle. Tato metoda se mimo jiné používá pro zjišťování opotřebení kloubních implantátů.

S rozvojem moderní techniky lze dnes efektivně používat měřicí metody, které byly dříve těžko realizovatelné pomocí dostupných technických prostředků či zpracování naměřených dat bylo příliš zdlouhavé. Konkrétně phase-shifting profilometrie, což je optická nekoherentní metoda pro měření 3D profilu objektů, je typickým příkladem předešlého tvrzení. Právě touto 3D profilometrickou metodou se bude zabývat tato bakalářská práce. Mimo jiné by práce měla přispět k pochopení principů, na kterých je tato metoda založena. Následně by měla poskytnout dostatečné informace týkající se nastavení a kalibrace experimentální sestavy pro tuto metodu. Přesný popis cílů této práce bude uveden v následující podkapitole.

1.1 Cíle bakalářské práce

Hlavním cílem této práce je ucelit dosavadní znalosti o phase-shifting profilometrii, případně je doplnit o nové zkušenosti získané při experimentech s touto metodou. Především se bude jednat o problémy nastavení a kalibrace sestavy, tzn. zjistit, jak volitelné parametry sestavy (např. vlnová délka sinusové mřížky) ovlivní výsledné měření.

V první části, po obecném popisu profilometrických měření, bude nastíněna teorie stojící za touto metodou. Zde také budou uvedeny případně i odvozeny základní vztahy nutné pro práci s phase-shifting profilometrií. Stručně zde bude popsán problém rozbalování fáze za současného zmínění několika používaných algoritmů.

Další problém, kterému se práce bude věnovat, je nastavení a kalibrace sestavy tzn. například zjistit, který ze způsobů kalibrace je nejvýhodnější. Bude se také zkoumat nejvhodnější nastavení volitelných parametrů sestavy pro daný typ měřeného objektu. Tedy jak volit parametry, když je objekt rozměrný s velkými výškovými gradienty atd.

Dále bude následovat modelový experiment, který bude ilustrovat použití zmíněných postupů. Úkolem bude optimálně nastavit sestavu podle výsledků v předešlých částech práce, nakalibrovat ji a provést měření. Budou zde také podrobně komentovány jednotlivé kroky nastavení a kalibrace s odkazy k předešlým částem práce.

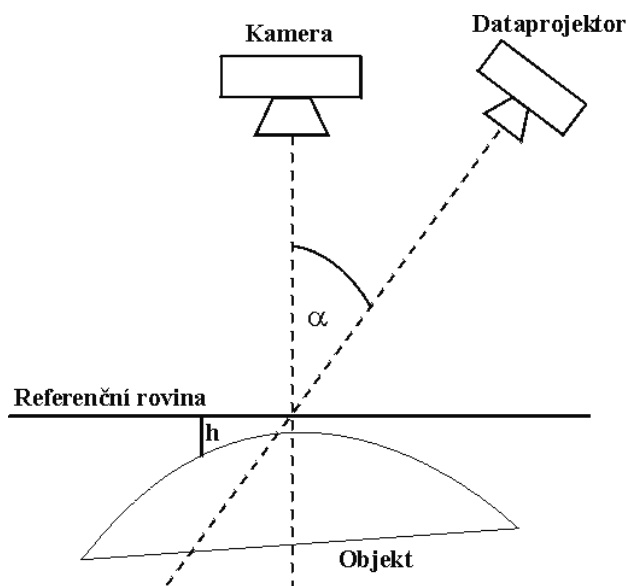
2. Profilometrie

Měření profilu neboli výškového rozložení troj-dimenzionálního objektu nazýváme profilometrie. Je mnoho způsobů, jak výškové rozložení objektů měřit, kdy se různé způsoby mohou z hlediska principu velice lišit. Tyto metody se dělí např. na kontaktní a nekontaktní. Při kontaktním měření profilu dochází k mechanické interakci měřeného objektu s měřicí aparaturou, což může přinášet značné nevýhody, jako třeba možné znehodnocení měřeného objektu poškrábáním. Může také dojít k pružné deformaci předmětu vlivem síly od měřicí aparatury vedoucí k chybnému měření. Další nevýhodou většiny kontaktních metod je sekvenční měření. V daném okamžiku probíhá měření pouze jednoho bodu předmětu, což vede k dlouhým měřicím časům.

Většinu těchto problémů lze eliminovat použitím optických profilometrických metod, které patří do skupiny nekontaktních měření. Koherentní optické metody využívají jevu interference. Při použití viditelného světla je zřejmé, že těmito metodami lze rozlišit výškové rozdíly v řádu mikrometrů i méně. Nelze je však použít na velké či členité objekty. Nekoherentní profilometrické metody jsou většinou založeny na promítání nějaké optické struktury na měřený předmět a následném vyhodnocení deformací této struktury způsobené profilem předmětu vedoucí ke zjištění výškové distribuce. Strukturou promítající se na předmět může být např. sinusová mřížka, což je struktura, jejíž intenzita vykazuje v jednom směru sinusový průběh. V tomto případě způsobí členitost předmětu posun fáze sinusové mřížky vůči fázi mřížky na referenční rovině a tento rozdíl fází je úměrný výškovému rozdílu. Na tomto principu je založena např. Fourierovská profilometrie [1] (Fourier transform profilometry - FTP), či phase-shifting profilometrie [2] (phase-shifting profilometry - PSP). Tato práce se věnuje phase-shifting profilometrii, ale některé výsledky a závěry lze použít i u jiných metod podobného principu.

3 Phase-shifting profilometrie

Phase-shifting profilometrie je nekoherentní nekontaktní optická metoda pro měření profilu prostorových objektů. Metoda je založená na deformaci sinusové mřížky způsobené nerovným profilem měřeného předmětu. Schéma typické měřicí sestavy je na obr. 3.1 [1,3] kde kamera snímá měřený předmět (resp. referenční rovinu), na který je projektorem pod úhlem α promítnuta sinusová mřížka. Referenční rovina udává nulovou hladinu výšky, tzn. naměřená výšková výchylka udává vzdálenost bodu předmětu od referenční roviny.



Obr. 3.1 Schéma měřicí aparatury

Měřicí proces spočívá v postupném promítání sinusových mřížek na předmět (resp. referenční rovinu) a následném zachycení obrazu kamerou. Uložené obrazy se pak algoritmicky zpracují na počítači a výsledkem je matice výškové distribuce měřeného předmětu. Jelikož je předmět snímán digitální kamerou, má tato matice konečný počet prvků odpovídající počtu pixelů kamery. Každý prvek matice tak odpovídá jednomu bodu předmětu a hodnota matice v tomto bodě udává vzdálenost tohoto bodu od referenční roviny. V této kapitole budou vysvětleny základní principy této metody. Budou zde také odvozeny základní vztahy užívané při zpracování měření.

3.1 Sinusová mřížka a posun fáze

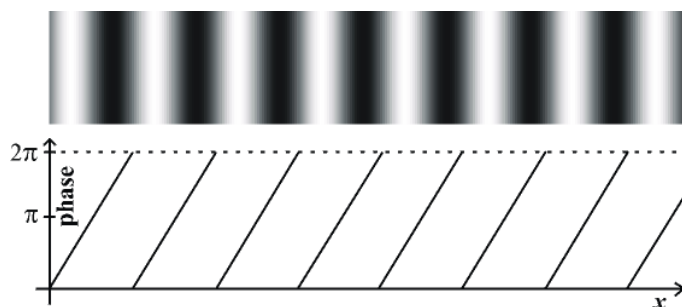
Stěžejní princip phase-shifting profilometrie je posun fáze sinusové mřížky způsobený nerovnostmi předmětu. Pro názornost je účelné uvést tento jev na jednoduchém příkladu. Nejprve je nutné přesně definovat sinusovou mřížku. Sinusová mřížka je dvoj-dimenzionální intenzitní světelná struktura. Intenzita této mřížky vykazuje v jednom ze směrů sinusový průběh. Na druhém směru tato intenzita není závislá. Závislost intenzity mřížky na plošných souřadnicích vyjadřuje rovnice 3.1:

$$I(x, y) = I_{\max} [1 + \sin(kx)], \quad (3.1)$$

kde I_{\max} je maximální intenzita a k je vlnové číslo splňující vztah $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, (λ je vlnová délka sinusové mřížky). Každému bodu sinusové mřížky lze přiřadit fázi $\Phi \in \langle 0, 2\pi \rangle$ tak, aby splňovala rovnici 3.2:

$$I(x, y) = I_{\max} \{1 + \sin[\Phi(x, y)]\} \quad (3.2)$$

Ukázka sinusové mřížky a její fáze je na obr. 3.2. Proces zpětného zjišťování fáze zdeformované sinusové mřížky ze znalosti intenzitního rozložení, které lze měřit, není nijak jednoduchý. Jedné hodnotě intenzity totiž obecně odpovídá více hodnot fáze a co je horší, jednotlivé body předmětu mohou vykazovat jinou odrazivost světla. Tedy dva různé body sinusové mřížky s různou hodnotou intenzity mohou mít v tomto případě stejnou fázi.

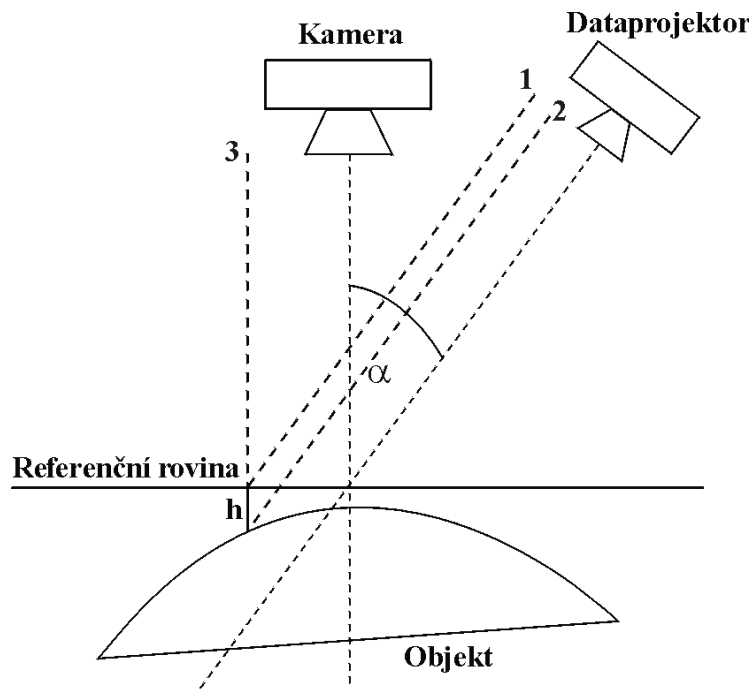


Obr. 3.2 Sinusová mřížka a její fáze

Nyní bude na jednoduchém příkladu ukázáno, jak dojde k posuvu fáze sinusové mřížky promítnuté na nerovný předmět vzhledem k fázi mřížky na referenční rovině. Pro

jednoduchost budeme předpokládat, že kamera i projektor jsou v nekonečnu (tzn. můžeme používat rovnoběžné paprsky) a jejich osy svírají úhel α . Uvažujme situaci na obr. 3.3, kde paprsek č.1 reprezentuje promítající se bod sinusové mřížky s fází $\Phi = 0$ a paprsek č.2 bod s fází $\Phi = \frac{\pi}{2}$. Čára č.3 označuje odražený paprsek směřující do jednoho pixelu kamery.

Půjde-li tedy o obraz předmětu, bude v tomto bodě fáze mřížky $\Phi = \frac{\pi}{2}$, jelikož je fáze určena paprskem č.2. U obrazu referenční roviny však bude v tomto bodě fáze mřížky $\Phi = 0$, protože je fáze určena paprskem č.1. Za tuto skutečnost očividně může rozdílná výška předmětu a referenční roviny v tomto bodě. Pokud bychom tedy byli schopni zjistit v každém bodě obrazu fázi, pak jsme z rozdílu fáze předmětu a referenční roviny schopni určit v každém bodě relativní výšku předmětu vzhledem k referenční rovině.



Obr.3.3 Demonstrace posunu fáze sinusové mřížky

Snahou je tedy nalézt způsob, jak z obrazů scény dostat informaci o absolutní fázi jednotlivých bodů scény. Následným odečtením fáze předmětu a fáze referenční roviny již máme veličinu, která určitým způsobem odpovídá vzdálenosti bodu od referenční roviny. Získávání fáze je však velmi obtížné nelze totiž jednoznačně přiřadit jedné hodnotě intenzity jednu hodnotu fáze, navíc může tato intenzita záviset i na odrazivosti daného bodu předmětu. Fáze je tedy především určena změnou intenzity a ne její absolutní hodnotou. Různými

způsoby rozpoznávání fáze z intenzitních obrazů předmětu se bude zabývat následující kapitola.

3.2 Způsoby rozpoznávání fáze

Rozpoznávání fáze lze obecně rozdělit na dva způsoby. Jeden ze způsobů bere při určování fáze v bodě do úvahy i okolní body obrazu předmětu. Ten druhý využívá pouze hodnotu intenzity v daném bodě, ale je jasné, že pouze z této jedné hodnoty fázi určit nelze. Při tomto způsobu je třeba více obrazů předmětu, kdy je mezi jednotlivými snímky posunuta promítající se periodická optická struktura o přesně definovanou hodnotu. Z jednotlivých intenzit v tomto bodě již fázi určit lze.

Prvního způsobu pro zjištění fáze využívá tzv. Fourierovská profilometrie. Jak již název napovídá, metoda využívá pro zjištění fáze Fourierovy transformace (konkrétně její diskrétní podoby). Jednotlivé řádky jsou podrobeny tzv. rychlé Fourierově transformaci (FFT). Poté je ve Fourierově spektru provedena filtrace tak, aby byla zachována pouze první harmonická složka. Následně je provedena zpětná FFT. I přesto, že na vstupu byly čistě reálné hodnoty, zpětná FFT nám již obecně vrací řádek komplexních čísel. Fáze v daném bodě pak odpovídá argumentu komplexního čísla reprezentujícího daný bod. Tento způsob má však řadu nevýhod. Získaná data bývají často zatíženy nezanedbatelným šumem, který způsobí, že spektrální oblast odpovídající první harmonické je téměř neidentifikovatelná. Nespornou výhodou této metody je ovšem možnost provádění měření v reálném čase. Pokud bude snímací kamera i promítací projektor nehybný, je možno zachytit referenční rovinu jenom jednou a poté již snímat pouze měnící se předmět. Při výkonnosti dnešních počítačů, kdy vyhodnocení obrazů scény trvá zlomky sekundy, se již dá mluvit o měření v reálném čase.

Phase-shifting profilometrie [4] používá pro zjištění fáze druhého způsobu. Obecně se zachytí N obrazů předmětu pro $N \geq 3$. Mezi jednotlivými obrazy je sinusová mřížka vždy posunuta o $\frac{1}{N}$ vlnové délky mřížky. Odvození vzorce pro výpočet fáze obecně pro N obrazů je velmi složitý. Pokud ale volíme speciálně $N = 4$, odvození se značně zjednoduší a také vzorec pro výpočet fáze nabývá jednoduchého tvaru. Proto je ve většině případů voleno právě $N = 4$. I odvození v dalším odstavci je kvůli jednoduchosti ukázáno pro $N = 4$ obrazů.

Mějme tedy celkem 4 intenzitní obrazy předmětu. Mezi snímáním jednotlivých obrazů je vždy fáze sinusové mřížky posunuta o $\Phi = \frac{\pi}{2}$. Intenzitu obrazů v závislosti na plošných souřadnicích lze tedy obecně vyjádřit rovnicí 3.3:

$$I_k(x, y) = I_0(x, y) + I_C(x, y) \left[\sin \left(\Phi(x, y) + \frac{(k-1)\pi}{2} \right) \right] \text{ pro } k = 1, 2, 3, 4, \quad (3.3)$$

kde $I_0(x, y)$ je intenzita pozadí, $I_C(x, y)$ je kontrast sinusové mřížky a $\Phi(x, y)$ je neznámá fáze. Navíc předpokládáme, že $I_0(x, y) \geq I_C(x, y), \forall x, y$, jelikož intenzita nemůže nabývat záporných hodnot. Rozepsáním této obecné rovnice pro jednotlivé hodnoty indexu k a za použití součtových vzorců pro funkci sinus dostaneme:

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) + I_C(x, y) \sin(\Phi(x, y)) \quad (3.4a)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) + I_C(x, y) \cos(\Phi(x, y)) \quad (3.4b)$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) - I_C(x, y) \sin(\Phi(x, y)) \quad (3.4c)$$

$$I_4(x, y) = I_0(x, y) - I_C(x, y) \cos(\Phi(x, y)) \quad (3.4d)$$

Máme tedy čtyři rovnice o třech neznámých. Nás ovšem zajímá pouze fáze $\Phi(x, y)$. Pro její vyjádření provedme následující operace: od první rovnice odečteme rovnici třetí a od druhé rovnice odečteme čtvrtou. Dostaneme:

$$I_1(x, y) - I_3(x, y) = 2I_C \sin(\Phi(x, y)) \quad (3.5a)$$

$$I_2(x, y) - I_4(x, y) = 2I_C \cos(\Phi(x, y)) \quad (3.5b)$$

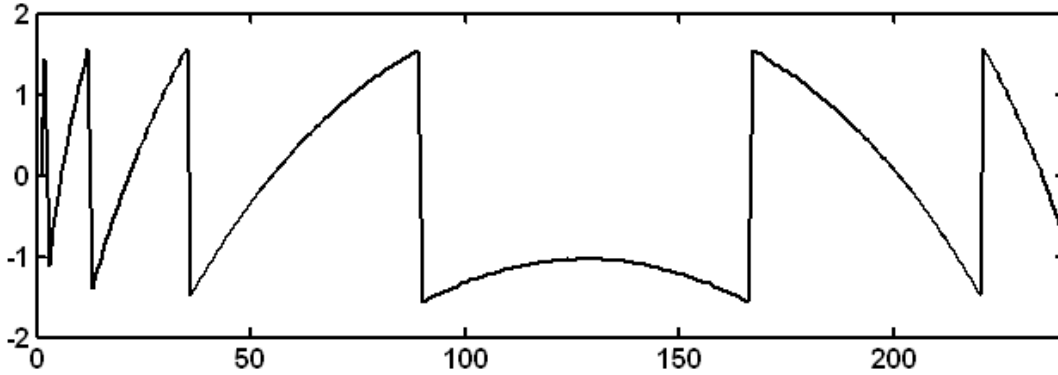
Vydělením rovnice (3.5a) rovnicí (3.5b) vychází:

$$\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)} = \frac{2I_C \sin(\Phi(x, y))}{2I_C \cos(\Phi(x, y))} = \tan(\Phi(x, y)) \quad (3.6)$$

A konečně aplikací funkce arcustangens pro fázi vychází [5] :

$$\Phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)}\right) \quad (3.7)$$

Ze vzorce 3.7 je patrné, že fáze může nabývat pouze hodnot z intervalu $\left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$, jelikož takový je obor hodnot funkce arcustangens. Matice fáze se skládá s několika oblastí, kde v každé jednotlivé oblasti je průběh fáze spojitý. Tyto oblasti jsou však od sebe odděleny nespojitostmi, kdy při přechodu s jedné oblasti do druhé se fáze mění skokem o hodnotu π nebo $-\pi$. Tomuto jevu se obecně říká zabalování fáze nebo wrapping. Naproti tomu proces, který tyto nespojitosti odstraňuje, se nazývá rozbalování fáze neboli unwrapping. Ukázka jednoho řádku zabalené matice fáze je na obr. 3.4.



Obr.3.4 Ukázka zabalené fáze

Pro určení profilu předmětu pomocí fáze je zapotřebí rozdíl fáze referenční roviny a fáze předmětu a to v nezabalené podobě. Jednou z možností je rozbalit fázi referenční roviny a fázi předmětu zvlášť a poté tyto fáze odečíst. V tomto případě aplikujeme unwrap algoritmus dvakrát, a jelikož je rozbalovací algoritmus často složitý a pomalý, je vhodné použít druhého způsobu, kdy se nejdříve odečtou zabalené fáze a potom se již rozbaluje pouze tento rozdíl. Označme tedy $\Phi_m(x, y)$ fázi předmětu a $\Phi_r(x, y)$ fázi referenční roviny. Rozdílem těchto fází dostaneme:

$$\Phi_m(x, y) - \Phi_r(x, y) = \arctan\left(\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)}\right) - \arctan\left(\frac{R_1(x, y) - R_3(x, y)}{R_2(x, y) - R_4(x, y)}\right), \quad (3.8)$$

kde I_k značí intenzitní obrazy předmětu a R_k značí intenzitní obrazy referenční roviny. Zavedme označení: $a_m = (I_1 - I_3)$, $b_m = (I_2 - I_4)$, $a_r = (R_1 - R_3)$, $b_r = (R_2 - R_4)$ [2]. Aplikací vzorce pro rozdíl funkcí arcustangens na rovnici 3.8 dostaneme pro rozdíl fázi [2] :

$$\Phi_m(x, y) - \Phi_r(x, y) = \arctan\left(\frac{a_m b_r - a_r b_m}{a_m a_r + b_m b_r}\right) \quad (3.9)$$

Rovnice 3.9 ukazuje finální podobu vzorce pro výpočet zabalené fáze z intenzitních obrazů předmětu a referenční roviny při phase-shifting profilometrii.

3.3 Unwrapping

Unwrapping, neboli rozbalování fáze, je proces sloužící k odstranění nespojitostí vznikajících při výpočtu fáze z intenzitních obrazů. Na tento algoritmus jsou kladeny vysoké nároky, jelikož nedokonalé rozbalování fáze by mohlo být zdrojem sekundárních chyb vznikajících při zpracování měření. Příčinou těchto chyb bývají např. stíny v intenzitních obrazech. Pro tyto body je totiž vypočtená fáze čistě náhodná a obecně neodpovídá topografii předmětu.

Nejjednodušší rozbalovací algoritmus by fungoval asi tak, že by matice fáze byla rozbalována po jednotlivých řádcích. Tzn. v každém řádku bychom např. zleva postupně zkoumali sousední body a pokud by rozdíl jejich hodnot byl přibližně π , pak bychom k celému zbytku řádku včetně pravého z těchto dvou bodů přičetli (resp. odečetli) hodnotu π . Skutečně tento jednoduchý rozbalovací algoritmus bývá součástí některých počítačových matematických prostředí (např. MATLAB). Lze však najít takové fázové matice, které budou obsahovat nespojitosti pouze při pohledu na sloupce. Při pohledu na jednotlivé řádky se nám bude ovšem tato matice jevit jako nezabalená. To ukazuje na nepoužitelnost tohoto algoritmu na obecné fázové matice.

Je tedy třeba kvalitnějších algoritmů, jež by odstranily problémy uvedené výše a navíc by byly do jisté míry odolné vůči šumu, který je bohužel v menší či větší míře součástí každého reálného měření. Podrobné zkoumání problému rozbalování fáze přesahuje rámec této práce. Proto zde budou stručně uvedeny jen dva příklady užívaných algoritmů.

Prvním z nich je tzv. Flood-fill algoritmus [6] . Jeho princip spočívá v postupném „zaplavování“ fázové matice od určitého bodu (většinou to bývá přibližně střed matice) do stran, dokud nevyplní oblast bez fázových skoků a pak celou tuto oblast posune tak, aby navazovala na okolí. Tento proces pak pokračuje, dokud nedojde k „zaplavení“ celé fázové matice a tím k eliminaci všech fázových skoků. Druhý z nich, tzv. Minimal-norm, je založen na hledání nejbližší hladké funkce podobající se zabalené fázové matici. Tento algoritmus již doprovází složitá matematická teorie a vytváření takového algoritmu vyžaduje znalost těchto oblastí matematiky. Hlavní výhodou Minimal-norm algoritmu je jeho relativně velká rychlost.

4 Nastavení a kalibrace měřící sestavy

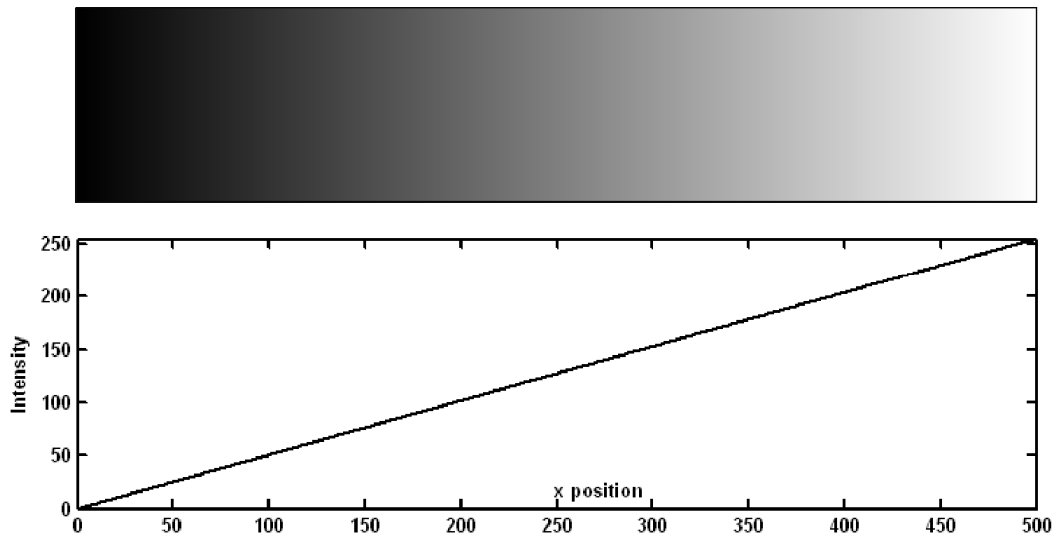
Tato kapitola je věnována popisu nastavení a kalibrace sestavy pro phase-shifting profilometrii. Nastavením se rozumí optimální volba parametrů sestavy (např. vlnová délka sinusové mřížky). Kalibrací se pak rozumí určení vztahu mezi naměřenou fází a hledanou výškou a také určení vztahu mezi vzdáleností v bodech (pixelech) snímacího prvku a skutečnými vzdálenostmi. V určitých případech je také nutné provést korekce některých prvků měřící sestavy. Například další podkapitola se věnuje korekci intenzitního přenosu prvku promítajícího sinusové mřížky na měřený předmět.

4.1 Korekce intenzitního přenosu dataprojektoru

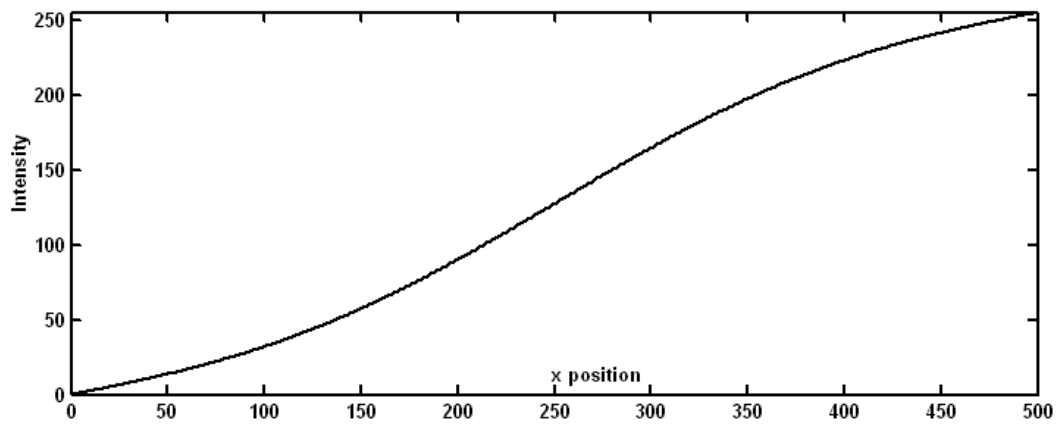
V reálných experimentálních sestavách pro phase-shifting profilometrii je prvek promítající na předmět sinusové mřížky často realizován pomocí dataprojektoru připojeného na výstup grafické karty počítače. Velkou výhodou dataprojektoru je snadná a přesná změna promítající se optické struktury. Jednotlivé sinusové mřížky jsou v počítači uloženy jako černobíle bitmapy s 256 stupni šedi a v rozlišení odpovídající rozlišení dataprojektoru. Tyto obrazy jsou pak postupně promítány pomocí dataprojektoru na měřený předmět a snímány kamerou.

Tyto projektory však obvykle nejsou uzpůsobeny pro měření, a proto je také často nutné provést změny nebo korekce pro některé jeho parametry [7]. Jedním z parametrů, který je třeba korigovat, je např. intenzitní přenos dataprojektoru. Pokud totiž dataprojektorem promítáme na nějakou rovinu obraz, jehož intenzita v horizontálním směru lineárně roste a tento obraz snímáme kamerou, tak obdržený intenzitní snímek již obecně lineární závislost v horizontálním směru nevykazuje. Ukázka obrazu s lineárním růstem intenzity je na obr. 4.1. Ukázka možného průběhu intenzity kamerou zachyceného snímku je na obr. 4.2, kde je patrná nelinearita intenzitního přenosu.

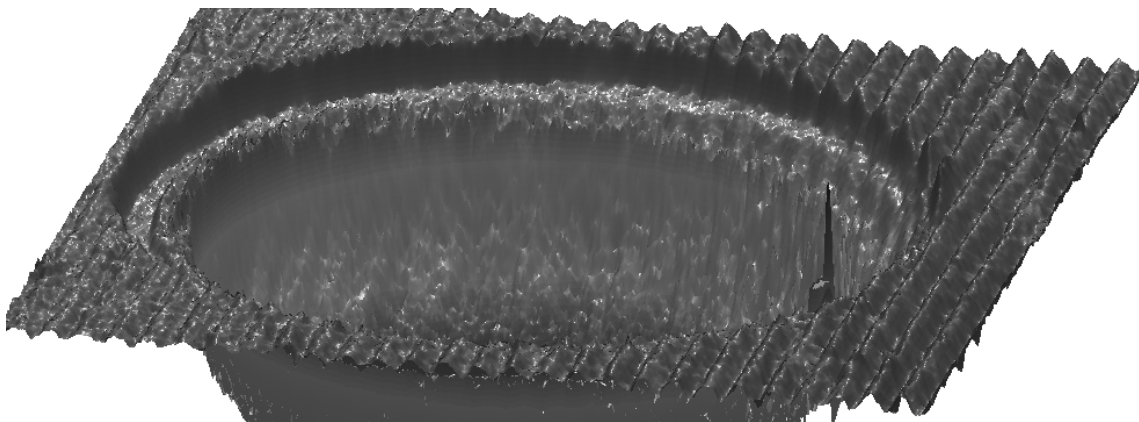
Tato nelinearita přenosu způsobí, že promítané sinusové mřížky budou zkreslené a to se ve výsledku projeví mírným zvlněním profilu v horizontálním směru. Toto vlnění má přibližně čtyřikrát větší frekvenci než je frekvence sinusové mřížky. Výsledek měření, který je zatížen touto chybou, je na obr. 4.3. Cílem je tedy určit převodní křivku, podle které intenzity jednotlivých bodů původní vygenerované sinusové mřížky cíleně pozměníme tak, aby po promítnutí a zachycení byly již tyto sinusové mřížky nezkreslené.



Obr.4.1 Obraz s lineárně narůstající intenzitou

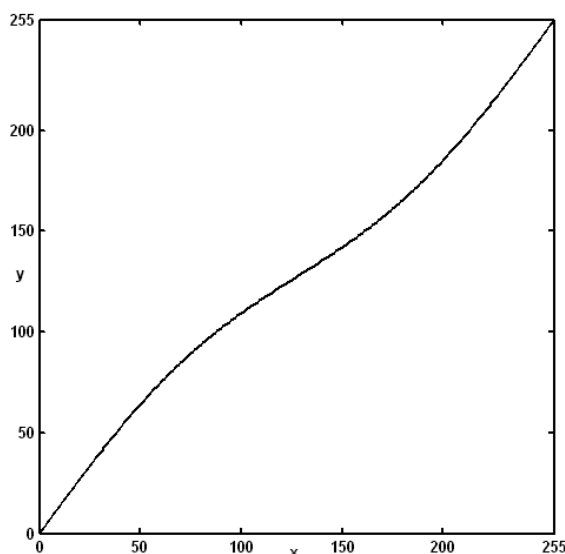


Obr.4.2 Možný průběh intenzity snímku promítnutého testovacího obrazu



Obr.4.3 Vliv nelineárnosti intenzitního přenosu projektoru na výsledek měření(mírné zvlnění)

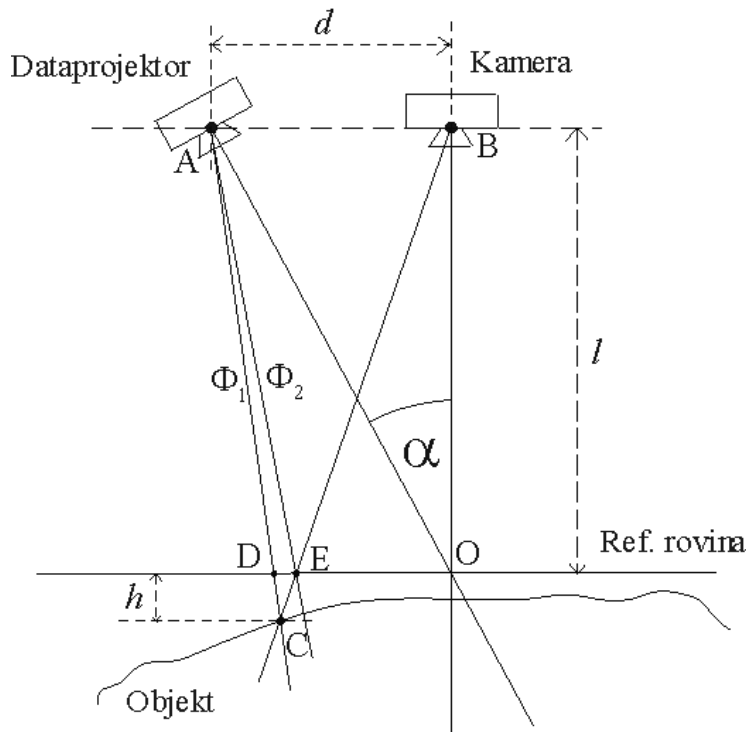
Korekce intenzitního přenosu dataprojektoru se provádí tím způsobem, že promítneme dataprojektorem obraz, jehož intenzita v horizontálním směru lineárně roste. Tento promítnutý obraz snímáme kamerou. Původní lineární průběh intenzity se po promítnutí obecně změní na libovolný průběh odpovídající intenzitnímu přenosu dataprojektoru. Tento průběh jsme za určitých podmínek schopni aproximovat prostou funkcí. Určením inverzní funkce a lineární změnou měřítek obou os pak získáme převodní vztah pro přepočtení intenzit bodů původních obrazů. Možný průběh korekční křivky je na obr. 4.4, kde na ose x je hodnota intenzity původního bodu a na ose y hodnota intenzity bodu po korekci. Podrobný postup korekce intenzitního přenosu konkrétního dataprojektoru bude uveden v experimentální části této práce.



Obr.4.4 Možný průběh korekční křivky

4.2 Parametry sestavy pro phase-shifting profilometrii

Experimentální sestava pro phase-shifting profilometrii se obecně skládá z prvku promítajícího sinusové mřížky, z referenční roviny, z měřeného objektu a také z kamery, pomocí které získáváme intenzitní snímky jednotlivých sinusových mřížek promítnutých na předmět (resp. referenční rovinu). Obecné schéma experimentální sestavy je na obr. 4.5 [1,3]. Zde již uvažujeme projekční prvek i snímací kameru v konečných vzdálenostech od referenční roviny.



Obr.4.5 Obecné schéma experimentální sestavy

Volitelnými parametry sestavy jsou dle obr. 4.5 vzdálenost kamery a projektoru od referenční roviny l , vzdálenost projektoru od kamery d . Těmito vzdálenostmi je také definován úhel α . Platí, že $\tan \alpha = \frac{d}{l}$. Dalším volitelným parametrem je vlnová délka sinusové mřížky. Vlnovou délkou v tomto případě rozumíme vzdálenost odpovídající jedné vlně sinusové mřížky při promítnutí na referenční rovinu. Pro určení vztahu mezi naměřenou fází a výškovým rozdílem předmětu a referenční roviny si vyjádříme vzdálenost mezi body D a E pomocí rozdílu fází $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ (viz obr. 4.5). Jistě platí:

$$\overline{DE} = \frac{\Delta\Phi}{2\pi} p, \quad (4.1)$$

kde p je vlnová délka sinusové mřížky. Uvažujeme-li výškové výchylky směřující před referenční rovinu jako kladné a výchylky směřující za referenční rovinu jako záporné, pak s podobností trojúhelníků ABC a DEC (viz obr. 4.5) plyne:

$$\frac{-h}{l-h} = \frac{\overline{DE}}{d}, \quad (4.2)$$

kde h je vzdálenost bodu C předmětu od referenční roviny za užití znaménkové konvence uvedené výše. Vyjádříme-li z rovnice 4.2 proměnou h a dosadíme za \overline{DE} z rovnice 4.1, obdržíme:

$$h = \frac{p \cdot \Delta\Phi \cdot l}{p \cdot \Delta\Phi - 2\pi d} \quad (4.3)$$

Rovnice 4.3 udává vztah mezi naměřenou fází a výškovým rozdílem předmětu a referenční roviny. Úpravou vztahu 4.3 a dosazením za d ze vztahu $\tan \alpha = \frac{d}{l}$ vychází [1] :

$$h = \frac{\Delta\Phi}{\frac{\Delta\Phi}{l} - \frac{2\pi \tan \alpha}{p}} \quad (4.4)$$

Pokud uvažujeme vzdálenosti kamery a projektoru od referenční roviny několikanásobně větší než je vlnová délka sinusové mřížky, pak lze první člen ve jmenovateli zanedbat a dostaneme zjednodušený tvar rovnice pro výpočet výškového rozdílu z rozdílu fáze:

$$h = -\frac{\Delta\Phi \cdot p}{2\pi \cdot \tan \alpha} \quad (4.5)$$

Zlomek je při kladných hodnotách rozdílu fáze záporný, aby byla splněna znaménková konvence uvedená v předchozím odstavci. Hlavní výhodou vztahu 4.5 oproti vztahu 4.4 je lineární závislost výškového rozdílu vzhledem k rozdílu fáze.

4.2.1 Vlnová délka sinusové mřížky

Z hlediska referenční roviny je vlnová délka sinusové mřížky definována jako vzdálenost jedné vlny mřížky na této rovině. Definujeme-li citlivost měřicí aparatury jako absolutní hodnotu podílu přírůstku reprezentující veličiny (fázový rozdíl) a přírůstku měřené veličiny (výškový rozdíl):

$$S = \left| \frac{d(\Delta\Phi)}{dh} \right| = \frac{2\pi \tan \alpha}{p}, \quad (4.6)$$

pak zvětšováním hodnoty vlnové délky p evidentně klesá citlivost aparatury. Naopak zmenšování této hodnoty způsobí nárůst citlivosti. Tento fakt je nutné brát do úvahy při optimalizaci sestavy pro daný typ měření. Pokud bychom totiž chtěli měřit velmi malé výškové odchylky a zároveň zvolili velkou hodnotu vlnové délky, nízká citlivost měřicí aparatury by způsobila nemožnost měření těchto malých změn v důsledku šumu. Naproti tomu při volbě velmi malých hodnot vlnové délky rapidně roste počet fázových skoků, což klade velké nároky na rozbalovací algoritmus.

Jelikož v reálných sestavách pro phase-shifting profilometrii jsou často sinusové mřížky promítány pomocí dataprojektoru, což je v podstatě dvou-rozměrná konečná matice diskrétních bodů (pixelů), u kterých jsme schopni definovat intenzitu, je vhodná analýza i z tohoto pohledu. Výsledná optická struktura je tedy pouhou diskrétní aproximací ideální sinusové mřížky. Bez újmy na obecnosti uvažujme pouze jeden řádek této matice. Intenzita jednotlivých bodů jednoho řádku sinusové mřížky je vzhledem k rovnici 3.1 dána předpisem:

$$I(n) = \frac{I_{\max}}{2} \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi \cdot n}{p_{pix}} \right) \right], \quad (4.7)$$

kde n je číslo bodu (pixelu) pro $n = 1, 2, 3, \dots, N$ (N je horizontální rozlišení dataprojektoru) a p_{pix} je vlnová délka sinusové mřížky, ovšem v jednotkách bodů (pixelů). Je zřejmé, že hodnota p_{pix} odpovídá počtu bodů, kterými je aproximována jedna vlna sinusového průběhu. Z toho důvodu by tato hodnota určitě neměla být menší jak 10 bodů (pixelů). Při nižších hodnotách je již průběh značně zkreslený.

Pokud je znám vyzařovací úhel β a rozlišení dataprojektoru N v horizontální rovině, dále pak vzdálenost dataprojektoru od referenční roviny l_d a konečně úhel α , který svírá osa dataprojektoru s osou kamery, pak je možno ze známé hodnoty vlnové délky p_{pix} určit hodnotu vlnové délky p , která odpovídá vzdálenosti jedné vlny na referenční rovině. Pokud uvažujeme vyzařovací úhel malý a vzdálenost dataprojektoru velkou, pak má převodní vztah tvar:

$$p = \frac{p_{pix} \cdot l_d \tan \frac{\beta}{2}}{N \cos \alpha} \quad (4.8)$$

4.2.2 Poloha kamery a dataprojektoru

Umístění kamery a dataprojektoru v experimentální sestavě pro phase-shifting profilometrii je patrné z obr. 4.5. Optické osy obou zařízení by se měly protínat v referenční rovině a osa kamery by měla být kolmá na tuto rovinu. Pokud je pro výpočet výškového rozložení ze známého rozložení fázových rozdílů použito vzorce 4.3, je také nutné, aby vzdálenost kamery i dataprojektoru od referenční roviny byla stejná. Tohoto faktu je totiž použito při odvozování zmiňovaného vzorce.

Jako výhodné se ukazuje volit vzdálenost kamery a dataprojektoru od referenční roviny několikanásobně větší než jsou rozměry měřeného objektu či referenční roviny. Potom je totiž možné pro určení výškového rozložení ze známého rozložení fáze použít lineárního vztahu 4.5. Při těchto velkých vzdálenostech je již poloha kamery a dataprojektoru charakterizována úhlem α , který svírají optické osy obou zařízení.

Ze vzorce 4.6 pro citlivost měřicí aparatury, je patrné že zvětšováním tohoto úhlu roste také citlivost. Ovšem volba zmiňovaného parametru má svá omezení. Při velkých hodnotách parametru α se již v nemalé míře objevují oblasti na předmětu, které jsou v geometrickém stínu dataprojektoru. Sinusová mřížka do těchto míst tedy není promítnuta a kamera v těchto místech zachytí pouze náhodnou intenzitu pozadí. Pro tato místa je pak určená fáze čistě náhodná a neodpovídá výškovému rozložení předmětu.

4.3 Kalibrace sestavy

Pro určení vztahu mezi naměřenou fází a hledaným výškovým rozložením měřeného předmětu je třeba měřicí sestavu nakalibrovat. V případě užití vzorce 4.3 se kalibrace redukuje na určení neznámých parametrů v tomto vzorci, tedy na určení vlnové délky sinusové mřížky p , vzdálenosti kamery od referenční roviny l a vzdálenosti kamery od dataprojektoru d .

Dále je nutné určit vztah mezi vzdálenostmi v bodech (pixelech) snímacího prvku a skutečnými vzdálenostmi na referenční rovině. Předpokládá se, že tento vztah bude shodný jak pro horizontální tak pro vertikální směr. Stačí tedy např. v horizontálním směru na

referenční rovinu umístit měřítko, pomocí kterého bude možno ve snímcích referenční roviny identifikovat předem známý rozměr tohoto měřítka. Pak již stačí zjistit počet bodů (pixelů), který odpovídá tomuto rozměru. Pokud označíme rozměr měřítka m a počet bodů odpovídající tomuto rozměru n , pak pro převod mezi vzdálenostmi platí vztah:

$$L = \frac{m}{n} s, \quad (4.9)$$

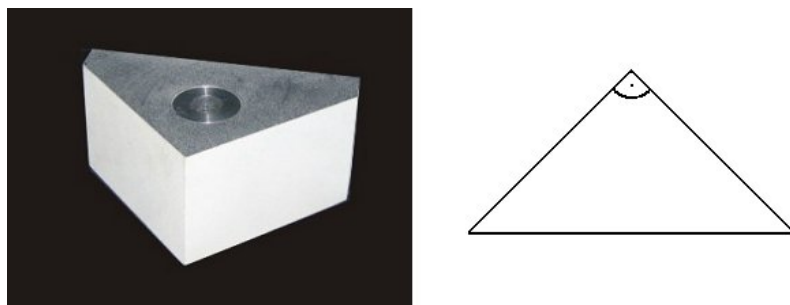
kde s je odpovídající vzdálenost v bodech a L skutečná vzdálenost v jednotkách délky.

Při umístění kamery a dataprojektoru do velkých vzdáleností od referenční roviny lze využít alternativní způsob kalibrace pomocí tzv. prostorového etalonu [8], což je objekt, jehož rozměry jsou předem známé. To je možné díky tomu, že vztah mezi naměřenou fází a hledaným výškovým rozložením přechází na tvar 4.5, který lze navíc přepsat do jednoduššího tvaru:

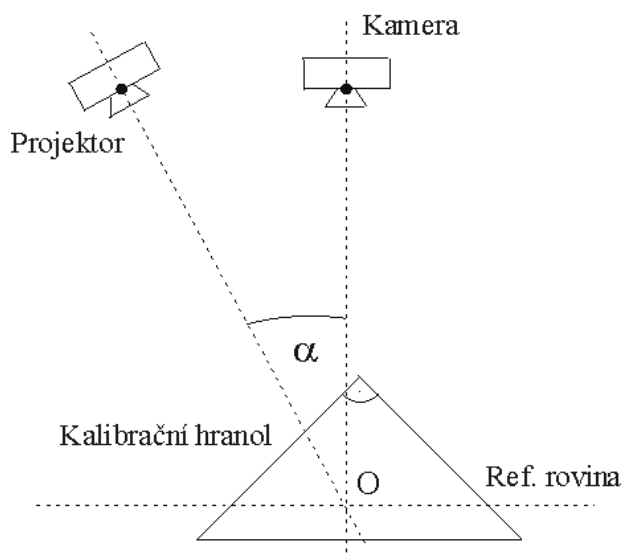
$$h = K \cdot \Delta\Phi \quad (4.10)$$

Tedy kalibrace se redukuje pouze na určení jedné konstanty. Výška předmětu v daném bodě je pak určena součinem fáze v tomto bodě a určené kalibrační konstanty. Kalibrace pomocí prostorového etalonu je mnohem efektivnější než kalibrace popsaná v prvním odstavci této kapitoly.

Vhodným kalibračním etalonem je hranol, jehož podstavou je kolmý rovnoramenný trojúhelník. Podstava a typická realizace takového hranolu je na obr. 4.6. Tento hranol se pak umístí tak, aby vrchol s pravým úhlem směřoval ke snímací kameře. Pro jednoduchost zpracování je také vhodné, aby podstava hranolu byla kolmá na referenční rovinu a také rovnoběžná s horizontálním směrem kamery. Horizontální řez sestavou při vhodném umístění kalibračního hranolu je na obr. 4.7.

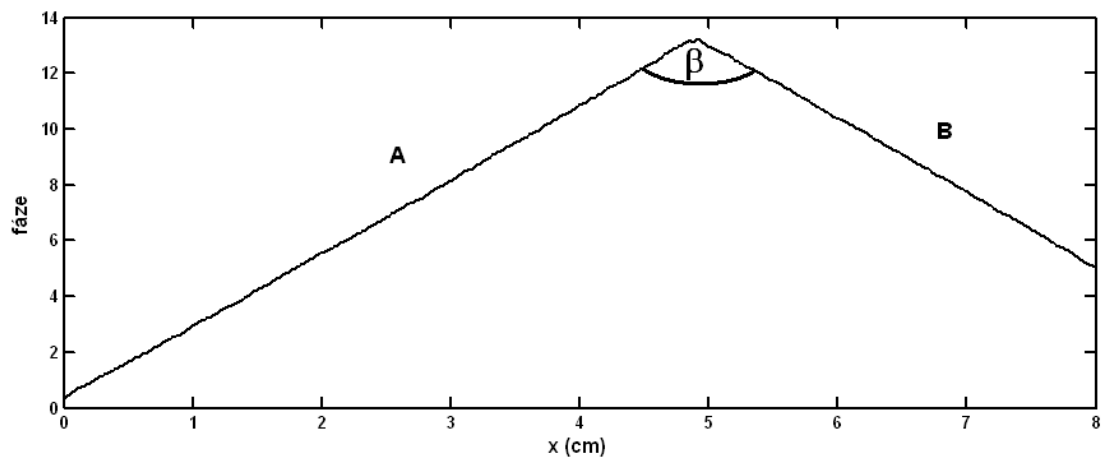


Obr. 4.6 Podstava a realizace kalibračního hranolu



Obr. 4.7 Horizontální řez sestavou při vhodném umístění kalibračního hranolu

Měřením profilu prostorového etalonu se získá matice fáze, která až na násobení konstantou odpovídá výškovému rozložení předmětu. Cílem kalibrace je tedy určit tuto konstantu. Pokud je prostorovým etalonem již zmíněný hranol s podstavou pravoúhlého trojúhelníka, je právě tento pravý úhel vodítkem pro určení kalibrační konstanty. Při správném umístění hranolu dle předešlých pokynů, se stačí zaměřit pouze na jeden vhodně zvolený řádek fázové matice či několik vybraných řádků zprůměrovat. Po správné kalibraci příčných vzdáleností (tzn. vzdáleností v rovině referenční roviny) popsané v druhém odstavci této kapitoly, lze obdržet průběh fáze jednoho řádku fázové matice podobný průběhu na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Možný průběh jednoho řádku fázové matice kalibračního hranolu

V průběhu na obr. 4.8 je možné identifikovat části dvou přímek (A a B), které svírají úhel β . Po vhodném aproximačním procesu lze obdržet analytické vyjádření těchto dvou přímek ve tvaru:

$$p_1 : \Delta\Phi = A_1x + B_1 \quad (4.11)$$

$$p_2 : \Delta\Phi = A_2x + B_2 \quad (4.12)$$

Po vynásobení tohoto analytického vyjádření přímek hledanou konstantou K vyjde:

$$\bar{p}_1 : K\Delta\Phi = KA_1x + KB_1 \quad (4.13)$$

$$\bar{p}_2 : K\Delta\Phi = KA_2x + KB_2 \quad (4.14)$$

Pro určení konstanty K se využije faktu, že úhel, který svírají tyto dvě přímky po vynásobení hledanou konstantou, má být kolmý. Tedy skalární součin směrových vektorů těchto dvou přímek má být roven nule. Pro směrové vektory přímek jistě platí:

$$\vec{s}_1 = (1, KA_1) \quad (4.15)$$

$$\vec{s}_2 = (1, KA_2) \quad (4.16)$$

Podmínka kolmosti směrových vektorů, tedy i přímek, bude splněna pokud:

$$\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2 = 1 + K^2 A_1 A_2 = 0 \quad (4.17)$$

Vyjádřením konstanty K z rovnice 4.17 vychází [8]:

$$K = \sqrt{\frac{-1}{A_1 A_2}} \quad (4.18)$$

Dle rovnice 4.18 lze tedy kalibrační konstantu určit ze znalosti konstant A_1 , A_2 . Tyto konstanty se určí vhodnou lineární regresní analýzou částí A a B jednoho řádku fázové matice (viz obr. 4.8).

Kalibrace pomocí prostorového etalonu je jednodušší a navíc i kvalitnější než kalibrace pomocí měření neznámých parametrů ve vzorci 4.3. Měření těchto neznámých

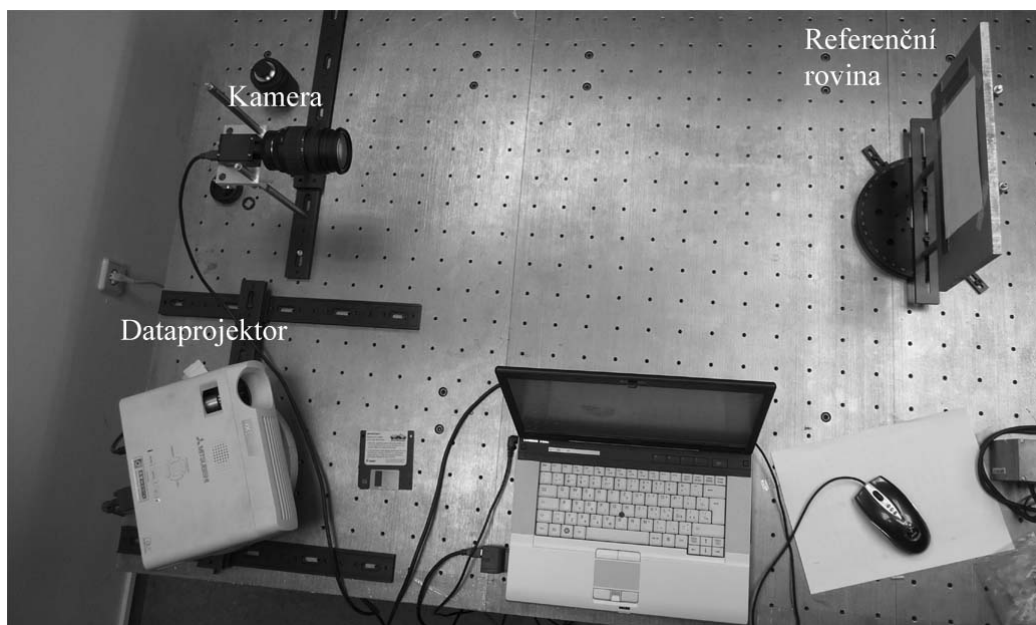
parametrů je totiž často těžko realizovatelné. Každý parametr je také měřen s určitou nejistotou, kdy se tyto jednotlivé nejistoty ve výsledku sčítají. To pak vede k velké výsledné nejistotě určené výškové distribuce. Kalibrace pomocí prostorového etalonu se ukazuje jako výhodnější.

5 Experimentální část

V této kapitole budou uvedeny výsledky některých postupů nastavení a kalibrace experimentální sestavy. Tyto postupy budou také stručnou formou komentovány. Především se bude jednat o korekci intenzitního přenosu dataprojektoru a kalibraci měřicí sestavy. Na závěr budou uvedeny výsledky měření pomocí nastavené a nakalibrované sestavy.

5.1 Nastavení měřicí sestavy

Prvek promítající sinusové mřížky byl v této konkrétní experimentální sestavě realizován DLP dataprojektorem od firmy Mitsubishi s upraveným objektivem a rozlišením 1024x768 bodů. Snímací prvek je realizován černobílou CMOS kamerou MARLIN F-131B od firmy Allied Vision Technologies s rozlišením 1280x1024. Rozmístění jednotlivých prvků měřicí sestavy na optickém stole je patrné z obrázku 5.1.

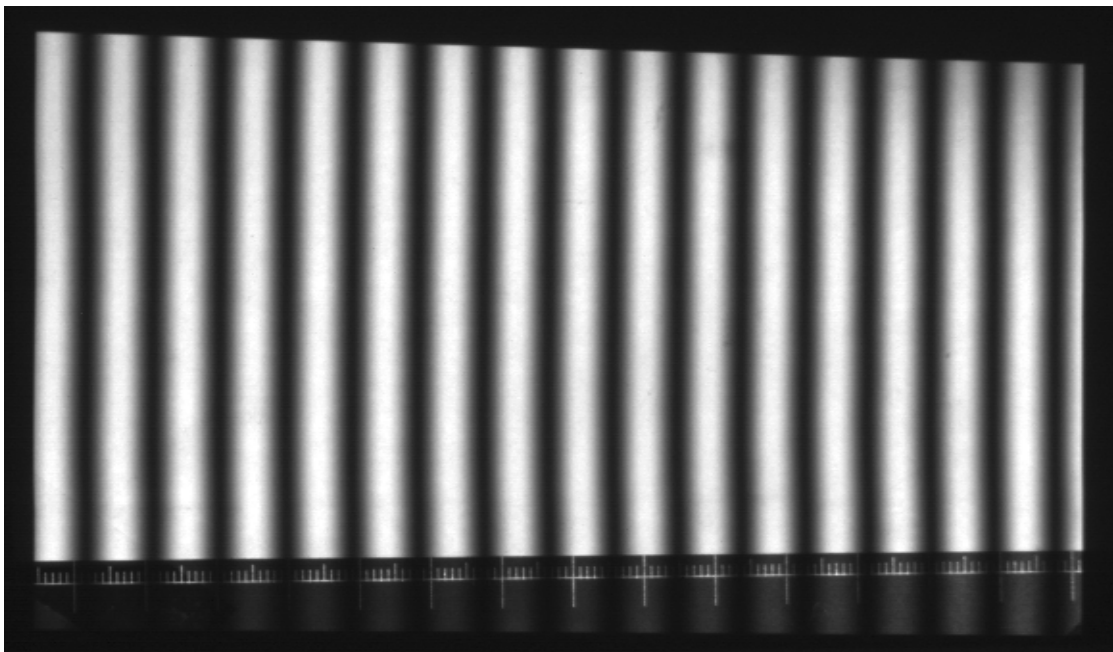


Obr. 5.1 Rozmístění prvků měřicí sestavy na optickém stole

Jelikož upravený objektiv dataprojektoru nebyl nastavitelný, byla vzdálenost středu referenční roviny od dataprojektoru dána vzdáleností, ve které byl promítaný obraz ostrý. Tato vzdálenost byla asi 1,1 m. Úhel mezi osou dataprojektoru a osou kamery byl přibližně 24°. Tento úhel se ukázal jako vhodný pro obecný tvar předmětu. Citlivost sestavy

je při tomto úhlu dostatečná, případně se dá ovlivnit vhodnou volbou vlnové délky sinusové mřížky. Stín se při této volbě úhlu objevoval jen při velkých výškových gradientech. Vzdálenost kamery od referenční roviny byla asi 1 m. Protože při kalibraci pomocí prostorového etalonu není nutné znát ani jednu s těchto hodnot, jsou uváděné rozměry pouze přibližné.

Sinusové mřížky byly generovány jako obrázky formátu bmp s 256 stupni šedi. Rozlišení obrázků odpovídalo rozlišení použitého dataprojektoru, tedy 1024x768 bodů. Vlnová délka byla zvolena na hodnotu $\lambda = 20\pi \cdot pix$, což při horizontálním rozlišení 1024 bodů dává 16,2 vln na obrázek. S upraveným objektivem vytvoří dataprojektor na vzdálenost 1,1 m stopu o výšce 103 mm a o šířce 146 mm. Vlnová délka vzhledem k referenční rovině je tedy $\lambda = \frac{146}{16,2} = 9,1 \text{ mm}$. Snímek referenční roviny po promítnutí této sinusové mřížky je na obr. 5.2.

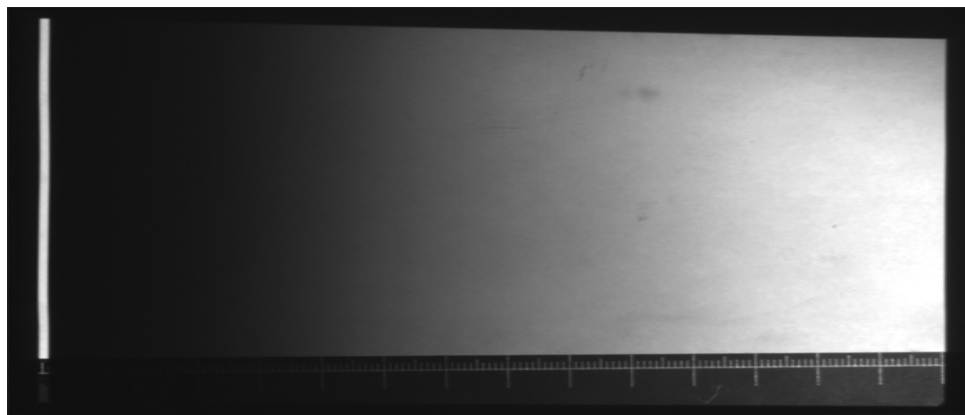


Obr. 5.2 Snímek sinusové mřížky promítnuté na referenční rovinu

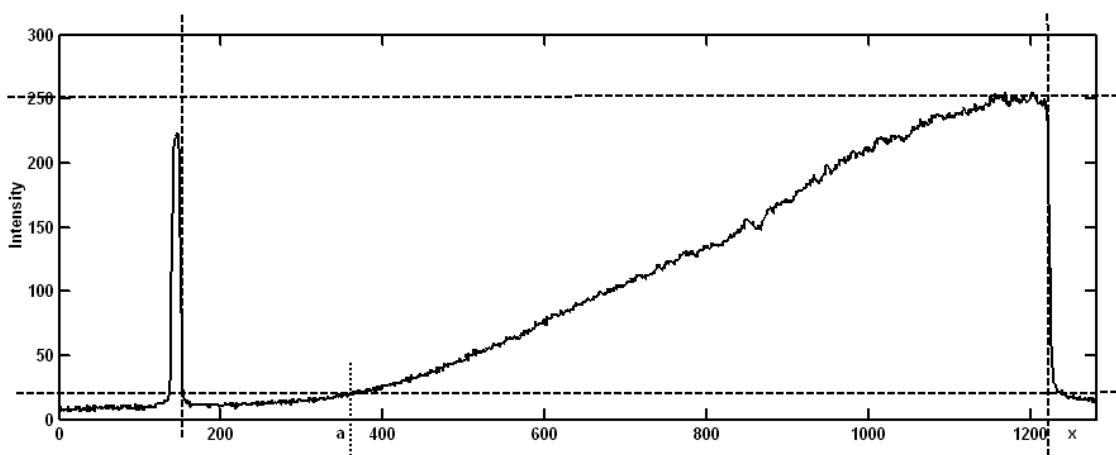
5.2 Korekce intenzitního přenosu dataprojektoru

Pro zjištění a následné odstranění nelineárního intenzitního přenosu dataprojektoru byl tímto dataprojektorem na referenční rovinu promítnut obraz, jehož intenzita v horizontálním

směru lineárně rostla. Aby bylo snadno rozlišitelné, kde na zachyceném snímku začíná oblast lineárního růstu, byl na levou stranu generovaného testovacího obrazu přidán vertikální pruh maximální intenzity. Bez tohoto pruhu by levá hrana obrazu splývala s temným okolím referenční roviny. Snímek referenční roviny, na kterou je promítnut testovací obraz, je na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Snímek referenční roviny při promítání testovacího obrazu

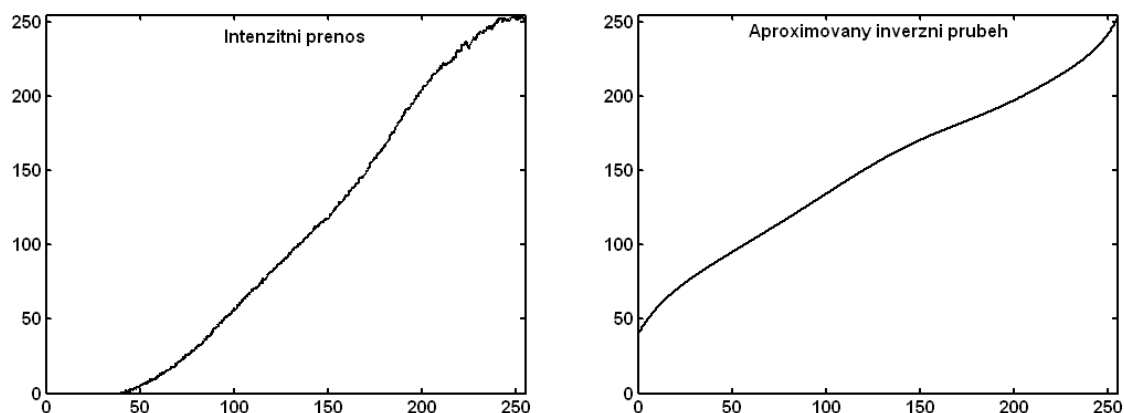


Obr.5.4 Průběh intenzity jednoho řádku snímku testovacího obrazu

Průběh intenzity jednoho řádku, který vznikl zprůměrováním deseti náhodných řádků snímku testovacího obrazu je na obr. 5.4. Za použití svislého pruhu maximální intenzity je původně lineární průběh snadno identifikovatelný (na obr. 5.4 vymezen dvěma svislými přerušovanými čarami). Nejprve je třeba lineárně změnit měřítko osy x tak, aby levé svislé čáře odpovídala hodnota 0 a pravé svislé čáře hodnota 255. Na začátku průběhu na obr. 5.4 je patrné, že pro několik prvních hodnot intenzit původního testovacího obrazu je intenzita po promítnutí téměř stejná. Tyto hodnoty tedy nelze pro generování mřížek použít, jelikož by byly promítnuté sinusové mřížky značně zkreslené a této skutečnosti má právě korekce

zabránit. Je nutné určit prahovou hodnotu a (viz obr. 5.4), což je hodnota intenzity původního testovacího obrazu, od které je již průběh dostatečně strmý. Potom se tento průběh zobrazí pouze mezi těmito hodnotami a až 255. Po této změně měřítka a odstranění okolních částí průběhu již máme na ose x původní hodnotu intenzity a na ose y hodnotu intenzity po promítnutí. Dále je třeba změnit měřítko osy y tak, aby intenzita odpovídající původní prahové intenzitě a byla nulová a maximální intenzita odpovídala hodnotě 255 (vodorovné přerušované čáry viz obr. 5.4).

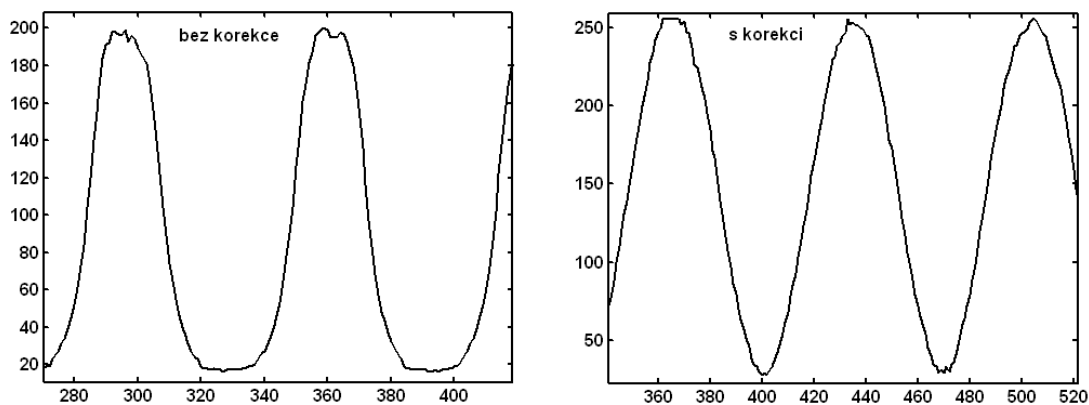
Nyní je možné postoupit k aproximaci tohoto průběhu funkcí. Je ovšem nutné aproximovat průběh inverzní, tzn. hodnoty na ose y brát jako vstupní a hodnoty na ose x jako výstupní. Pro aproximaci tohoto průběhu byl použit Curve Fitting Toolbox matematického prostředí MATLAB. Výsledkem aproximace je potom funkce, která hodnotu každého pixelu změní tak, aby průběh vytvořený z těchto pixelů měl po promítnutí požadovaný tvar. Průběh intenzitního přenosu po změnách měřítek obou os a aproximace inverzního průběhu je na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Průběh intenzitního přenosu a aproximace inverzního průběhu

Funkce, jejíž průběh je na obr. 5.5 vlevo, slouží k přepočtu hodnot intenzity jednotlivých pixelů vygenerovaných bitmap sinusových mřížek. Jelikož je tento průběh inverzní k průběhu intenzitního přenosu dataprojektoru, po promítnutí se toto cílené zkreslení vyruší a dostáváme opět nezkreslený průběh. Význam korekce nelinearity intenzitního přenosu dataprojektoru je patrný z následujícího obrázku. Na obr. 5.6 je vlevo část průběhu intenzity jednoho řádku snímku referenční roviny, na kterou je promítnuta sinusová mřížka, jejíž hodnoty nebyly přepočítány pomocí korekční funkce. Na obr. 5.6 vpravo je potom opět průběh části řádku snímku referenční roviny, ovšem hodnoty intenzity promítané sinusové

mřížky již jsou přepočítány přes korekční funkci. Průběh po korekci je určitě přesnější a více odpovídá ideálnímu sinusovému průběhu.



Obr. 5.6 Průběh intenzity snímku referenční roviny (vlevo bez korekce, vpravo s korekcí)

5.3 Kalibrace měřicí sestavy pomocí prostorového etalonu

Pro určení vztahu mezi neměřenou fází a hledaným výškovým rozložením byl zvolen způsob kalibrace pomocí prostorového etalonu. Přesnost a jednoduchost byly důvodem pro volbu tohoto způsobu kalibrace. Prostorovým etalonem byl hranol s podstavou pravoúhlého trojúhelníka (viz obr. 4.6). Postup kalibrace byl shodný s postupem uvedeným v předešlé kapitole.

Nejdříve bylo nutné provést kalibraci příčných os. Z tohoto důvodu bylo na referenční rovinu umístěno milimetrové pravítko. Toto pravítko je vidět na obr.5.2 a obr. 5.3 na dolní části referenční roviny. Pro určení vztahu mezi vzdálenostmi v bodech snímací kamery a skutečných vzdálenostech na referenční rovině bylo zjištěno kolika bodům snímacího prvku odpovídá vzdálenost $m = 140 \text{ mm}$ na referenční rovině. Naměřené hodnoty byly $n = 1040 \text{ pix}$. Pro převod vzdáleností v bodech (pixelech) na vzdálenosti v jednotkách délky stačí vzdálenost v bodech vynásobit konstantou, pro kterou platí (viz. vztah 4.9):

$$k_p = \frac{m}{n} = \frac{140}{1040} = 0,135 \text{ mm} \cdot \text{pix}^{-1} \quad (5.1)$$

Po měření profilu správně umístěného hranolu metodou phase-shifting profilometrie byla obdržena fázová matice. Kvůli eliminaci vlivu šumu na kalibraci bylo několik řádků

fázové matice zprůměrováno. Dále byly v průběhu tohoto zprůměrovaného řádku identifikovány části přímek a byla provedena jejich lineární regresní analýza s cílem určit konstanty A_1 , A_2 . Tato regresní analýza byla prováděna vzhledem k ose x , jejíž hodnoty reprezentovali vzdálenost v milimetrech namísto vzdálenosti v bodech. Lineární regresní analýza byla opět prováděna v matematickém prostředí MATLAB pomocí Curve Fitting Toolboxu. Získané hodnoty směrnic přímek A_1 , A_2 byly:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,2639 \\ A_2 &= -0,2659 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Pro kalibrační konstantu pak podle vzorce 4.18 vyšlo:

$$K = 3,775 \text{ mm} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (5.3)$$

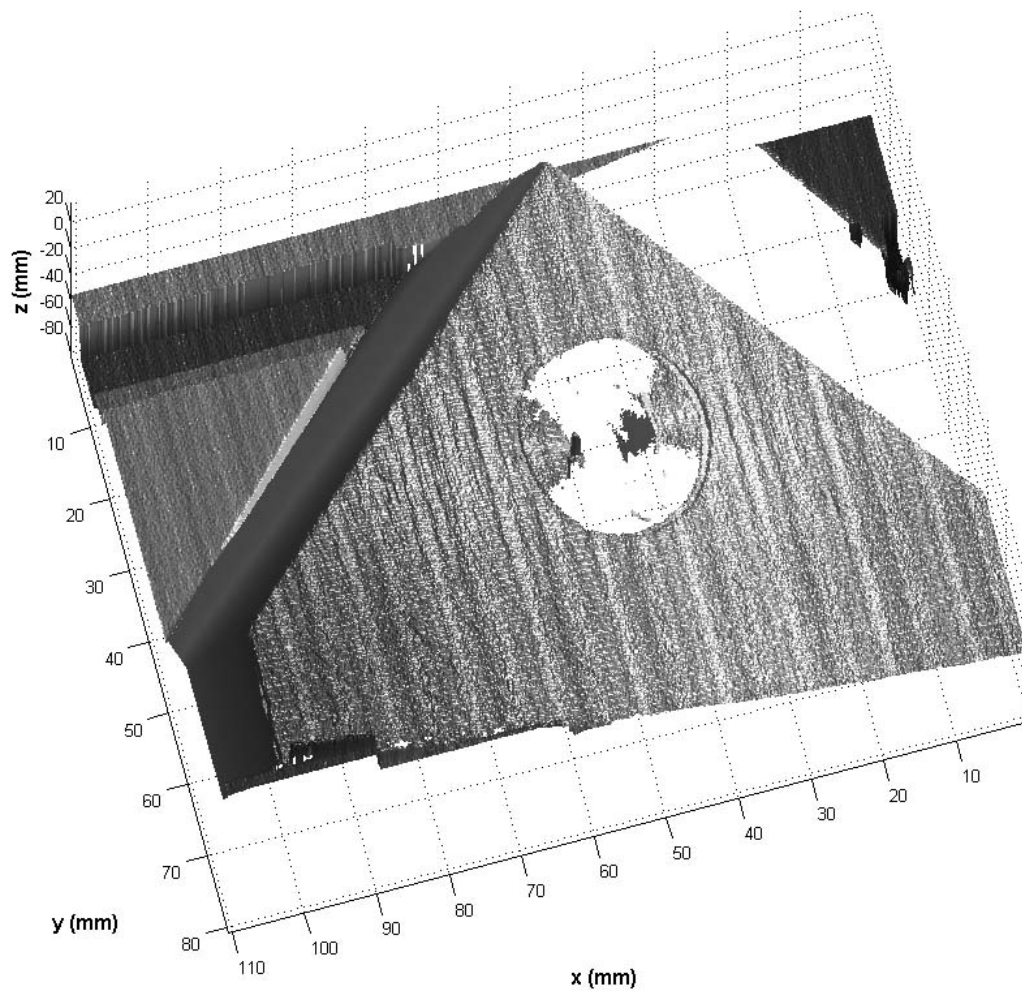
5.4 Měření pomocí nakalibrované sestavy

Pro otestování nakalibrované měřicí sestavy byl měřen profil povrchu kalibračního hranolu v obecné poloze. Poloha hranolu je patrná z obr. 5.7, kde je snímek hranolu, na který je dataprojektorem promítnuta sinusová mřížka.



Obr. 5.7 Snímek hranolu

Výsledkem byla matice, kde poloha prvku matice odpovídala poloze bodu na předmětu a hodnota prvku matice v tomto bodě udávala vzdálenost tohoto bodu od referenční roviny. Grafická podoba této matice je na obr. 5.8. Jednotlivé osy mají měřítko v milimetrech.



Obr. 5.8 Grafické znázornění výsledné matice

6 Závěr

V bakalářské práci je řešena phase-shifting profilometrie, což je metoda pro měření profilu 3D objektů. V první části byly uvedeny základní principy, kterých metoda využívá. Byly zde také odvozeny základní vztahy využívající se při zpracování naměřených dat. Stručně byl také zmíněn problém zabalování a rozbalování fázové matice, kdy fázová matice je primárním produktem jednoduchého zpracování naměřených dat, nesoucí informaci o výškovém rozložení měřeného objektu.

V dalších částech práce byla tato měřicí metoda zkoumána z hlediska nastavení a kalibrace měřicí sestavy. Byl zde zkoumán vliv parametrů sestavy na citlivost a také jak volba těchto parametrů ovlivní zatěžování rozbalovacího algoritmu. Jako nutné se ukázalo provést korekci intenzitního přenosu dataprojektoru. Proto zde také byl uveden postup pro odstranění vlivu nelinearity intenzitního přenosu dataprojektoru na výsledek měření. Poté byl v práci řešen problém kalibrace měřicí sestavy, kdy se jako nejvhodnější ukázala kalibrace pomocí prostorového etalonu. Tomuto typu kalibrace byl také věnován podrobný popis zahrnující i odvození základních rovnic.

Poslední část práce byla věnována konkrétnímu použití předchozích postupů na reálnou experimentální sestavu. Především byly uvedeny postupy a výsledky korekce intenzitního přenosu dataprojektoru v konkrétní měřicí sestavě a dále také výsledky kalibrace měřicí sestavy pomocí prostorového etalonu.

Tato bakalářská práce by měla sloužit potencionálnímu uživateli této měřicí metody jako zdroj informací týkajících se jak teorie stojící za touto metodou, tak informací z hlediska nastavení a kalibrace měřicí sestavy. Na tuto bakalářskou práci by měla navazovat práce diplomová zabývající se stavbou komerčního 3D senzoru pro měření profilu archeologických vykopávek pracujícím na principu phase-shifting profilometrie. Proto bude také tato práce primárním zdrojem informací pro stavbu tohoto senzoru.

Seznam použité literatury:

- [1] Takeda, M., Mutoh, K.: *Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shape*. Applied optics, Vol. 22, 3977-3982 (1983).
- [2] Su, H.-J., Li, J.-L., Su, X.-Y.: *Phase algorithm without the influence of carrier frequency*. Optical Engineering, Vol. 36, 1799-1804 (1997).
- [3] Dursun, A., Ecevit, N., Özder, S.: *Application of wavelet and Fourier transforms for the determination of phase and three-dimensional profile*. Proc. of Int. Conf. on Signal Processing, Vol. 1, 168-172 (2003).
- [4] Srinivasan, V., Liu, H. C., Halioua, M.: *Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects*. Applied optics, Vol. 23, 3105-3108 (1984).
- [5] Malacara, D.: *Optical shop testing, Second edition*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1992).
- [6] Asundi, A., Wensen, Z.: *Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray scale mask and flood fill*. Applied optics, Vol. 37, 5416-5420 (1998).
- [7] Pravdová, L.: *Konstrukční úpravy dataprojektoru pro 3D optická měření*. Bakalářská práce, PřF UP Olomouc (2008).
- [8] Matušová, J.: *Kalibrace optických 3D metod měřením prostorového etalonu*. Diplomová práce, PřF UP Olomouc (2007).