

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta

# **Optické bezkontaktní topografické metody**

Dušan Mandát

Olomouc 2012

Oponent: Mgr. Libor Nožka, Ph.D.

Publikace byla připravena v rámci projektu Investice do rozvoje vzdělávání

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky

1. vydání

© Dušan Mandát, 2012

© Univerzita Palackého v Olomouci, 2012

Neoprávněné užití tohoto díla je porušením autorských práv a může zakládat  
občanskoprávní, správněprávní, popř. trestněprávní odpovědnost.

**ISBN 978-80-244-3075-1**

NEPRODEJNÉ

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| Optické bezkontaktní topografické metody .....                               | 5  |
| 1 Vidění 3D prostoru .....   | 5  |
| 2 Rozdělení topografických metod .....                                       | 7  |
| 3 Bezkontaktní topografické metody .....                                     | 9  |
| 3.1 Bodová měření .....  | 9  |
| 3.1.1 Laserové dálkoměry .....   | 9  |
| 3.1.2 Senzory využívající měření času průchodu<br>záření prostředím .....    | 10 |
| 3.1.3 Laserové radary .....  | 10 |
| 3.1.4 Triangulační dálkoměry .....   | 10 |
| 3.1.5 Konoskopická metoda .....  | 10 |
| 3.1.6 Metoda založená na analýze intenzity světla                            | 15 |
| 3.1.7 Metoda měření kontrastu .....  | 17 |
| 3.2 Profilovací měření .....   | 18 |
| 3.3 Plošná měření .....  | 20 |
| 3.3.1 Stereoskopická metoda .....  | 22 |
| 3.3.2 Metoda měření tvaru pomocí stínů .....                                 | 22 |
| 3.3.3 Metoda měření tvaru pomocí textur .....                                | 23 |
| 3.3.4 Fourierovská profilometrie .....                                       | 23 |
| 3.3.5 A) Princip metody .....  | 24 |
| 3.3.6 B) Vyhodnocení experimentu .....                                       | 26 |
| 3.3.7 Metoda měření tvaru předmětu pomocí<br>ostření/rozostření obrazu ..... | 27 |
| 3.3.8 Moiré metody .....   | 29 |
| 4 Závěr .....  | 34 |
| Reference .....  | 35 |





evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Vzdělávání výzkumných pracovníků v Regionálním centru pokročilých  
technologií a materiálů. CZ.1.07/2.3.00/09.0042 <sup>1</sup>**

# Optické bezkontaktní topografické metody

Dušan Mandát

**Abstrakt.** Tento text popisuje vybrané bezkontaktní topografické měřicí metody využívané při zkoumání tvaru povrchu difúzně odrazných objektů. V úvodu je popsáno vidění lidského. Poté následuje základní rozdělení a popis kontaktních a bezkontaktních metod. V dalším textu jsou rozebrány bezkontaktní 2D a 3D optické měřicí metody.

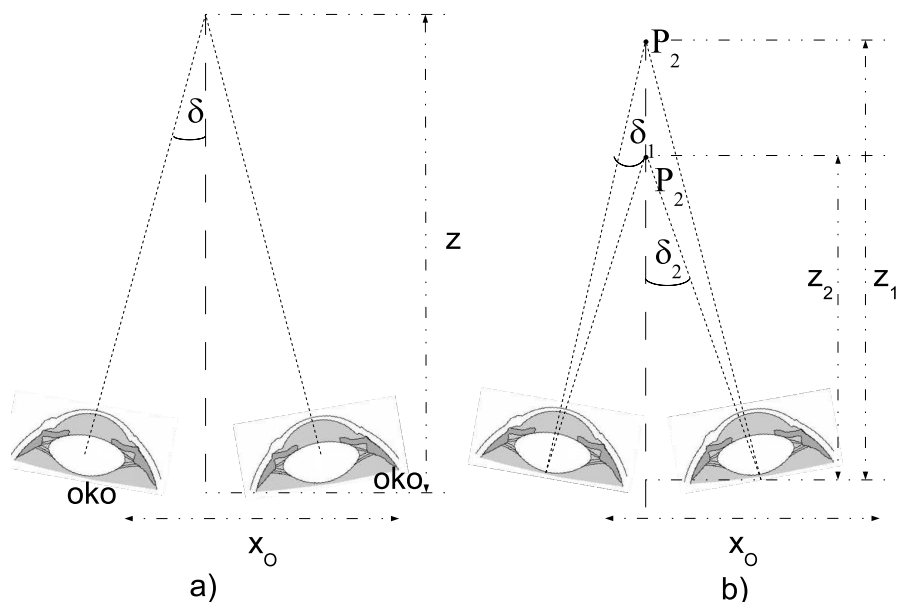
## 1 Vidění 3D prostoru

Kapitola vidění 3D prostoru popisuje jakým způsobem vnímá pozorovatel prostor kolem sebe, princip subjektivního hodnocení objektů a vzdáleností.

Z hlediska lidského vnímání se okolní svět jeví třírozměrně. V kartézském systému souřadnic je určen souřadnicemi  $x, y, z$ . Lidský zrak vnímá prostor pomocí dvojice senzorů - očí. Základní princip definice objektů v prostoru je založen na stereoskopii. Velkou roli hraje i zkušenost a učení vnímání prostoru. Lidský mozek je schopen i z jednoho obrazu (pomocí vidění jedním okem) odhadnout vzdálenosti ve všech osách 3D prostoru. Při monokulárním vidění využívá mozek několika základních poznatků z prostorového vidění. Vzdálenější předměty stejné velikosti se jeví menší než bližší, paralelní linie se

<sup>1</sup>Projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

sblíhají ve velké vzdálenosti, mění se intenzita předmětů v prostoru s rostoucí vzdáleností (vzhledem k propustnosti atmosféry). Stereo vidění je založeno na stereoskopii. Lidské oko může pracovat ve dvou módech. V prvním módu jsou optické osy obou očí rovnoběžné a vzdálenost mozek odhaduje na principu stereoskopie. V druhém módu se obě oči zaměří na zkoumaný objekt a vyhodnocuje se velikost stereoskopické paralaxy (viz obrázek 1 (a)). Pro odhad vzdálenosti  $z$  a výpočet



Obrázek 1: (a) Odhad vzdálenosti pomocí zjištění velikosti paralaxy. (b) Porovnání vzdáleností dvou předmětů v různých vzdálenostech porovnáním stereoskopických paralax.

paralaxy  $\delta$  platí vztah  $tg\delta = x_0/z$ , kde  $x_0$  je vzdálenost očí. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi malé úhly, je možné  $tg\delta$  nahradit  $\delta$ . Princip odhadu vzdálenosti dvou předmětů je patrný z obrázku 1 (b). Pro porovnání obou bodů platí  $\delta_1 < \delta_2 \Rightarrow z_1 > z_2$ , mezní hodnota rozlišení vzdálenosti  $z$  udává poloměr stereoskopického vidění  $z_0$  a je dána vztahem

$$z_0 = \frac{x_0}{\delta_0}, \quad (1)$$

kde  $\delta_0$  jsou mezní úhly natočení oka  $\langle 10'' \div 30'' \rangle$ . Maximální vzdálenost

rozlišitelných bodů je cca 650 *m*. Vychází se ze statistických měření anatomie člověka, kdy vzdálenost očí je v intervalu  $\langle 56 \div 70 \rangle$  *mm*. Rozlišení v ose *z* závisí právě na vzdálenosti  $x_0$ . Maximum pro stereoskopickou paralaxu je 30°, což odpovídá vzdálenosti cca 60 *mm*. Člověk je schopen rozpoznat vzdálenost i z průběhu intenzity pozorované scény (shape from shading), ze změny tvaru textury (shape from texture) atd. Tyto metody jsou využívány při měření povrchu předmětů v praxi s využitím "strojového vidění".

## 2 Rozdělení topografických metod

V této kapitole rozebereme několik topografických metod, rozčleníme je dle několika kritérií a zmíníme nejvýznamnější metody využívané v praxi. Podrobněji budou v práci popsány metody které byly použity při experimentech.

Topografické metody popisující kvalitativně a kvantitativně povrch zkoumaného předmětu lze dělit dle dvou základních kritérií. Prvním kritériem je kvantitativní míra popisu zkoumaného předmětu. Jedno-rozměrné měření (délkové) lze vyloučit z topografických metod, jelikož se jedná o pouhé měření jednoho rozměru, nepopisuje žádným způsobem tvar tohoto objektu. Druhým kritériem je dělení podle principu měření.

Dle prvního kritéria dělení rozlišujeme topografické metody popisující tvar a rozměr předmětů na plošná a prostorová měření:

- 2D měření - výsledkem je mapa  $n$  bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi:  $x_n, y_n$ , popisuje tvar i rozměr zkoumaného předmětu v ploše.
- 3D měření - výsledkem je mapa  $n$  bodů povrchu s kartézskými souřadnicemi:  $x_n, y_n, z_n$ , v tomto případě dostáváme množinu bodů nesoucí oproti 2D navíc informaci o topografické výchylce předmětu  $z_n$ .

Druhým způsobem dělení topografických metod je jejich členění dle principu metody.

Tyto metody lze vyčlenit do dvou podskupin v závislosti na interakci přístrojového vybavení měřicí metody se zkoumaným objektem.

Dělení je následující:

- Kontaktní metody - dochází k přímému kontaktu přístrojového vybavení s měřeným objektem.
- Bezkontaktní metody - dochází ke zprostředkovanému kontaktu s měřeným objektem.

Zástupcem kontaktních metod je například kontaktní profilometr. Zařízení skenuje povrch pomocí kontaktního hrotu v předem definovaných bodech. Nevýhodou této metody je možné narušení povrchu stykem měřeného hrotu s povrchem předmětu. Nejčastěji jsou využívány tyto profilometry v průmyslu. Výhodou těchto zařízení je vysoká citlivost do  $0.1\text{ mm}$ . Nevýhodou je dlouhá doba měření a případné poškození povrchu, které eliminuje použití těchto zařízení na úzkou skupinu aplikací. Dalším zástupcem v této skupině je např. profilometrický mikroskop.

Bezkontaktní metody lze dále dělit podle způsobu zprostředkované interakce měřicího zařízení s měřeným objektem:

- Bezkontaktní měření využívající obecně vlnění.
- Ostatní.

Mezi ostatní metody patří např. AFM nebo elektronový mikroskop (pokud uvažujeme elektron jako hmotnou částici).

AFM (Atomic Force Microscope) využívá měření vzájemné silové interakce atomů povrchu měřeného povrchu a hrotu měřicího zařízení. Interakce v tomto případě je zprostředkovaná silovým působením.

Elektronový mikroskop využívá k měření a popisu tvaru svazku elektronů odrazených od měřeného povrchu.

Metody využívající vlnění lze ještě dále dělit podle charakteru tohoto vlnění a vlnové délky použitého záření:

- Rentgenovská měření.
- Magnetická resonance.
- Využití elektromagnetického záření ve viditelném spektru.
- Radiové vlny.



- Mechanické vlnění prostředí - např. ultrazvuk.

Tyto metody jsou 2D a 3D. Například měření pomocí rentgenu je v praxi nejčastěji využíváno v medicíně, podobně jako magnetická resonance a ultrazvuk. Radiové vlny jsou nejčastěji používány v radiolokátorech (letectví, metrologie atd.). Nejvyužívanější topografické jsou bezkontaktní 2D-3D metody založené na detekci elektromagnetického záření v oblasti viditelného spektra cca  $\lambda = 400 - 750nm$ .

### 3 Bezkontaktní topografické metody

V této kapitole se budeme věnovat bezkontaktním topografickým metodám využívajícím koherentní i nekoherentní optické záření v rozsahu viditelných vlnových délek. Metody jsou řazeny od nejjednodušších po nejsložitější, ve smyslu přístrojového vybavení a způsobu vyhodnocení. Některé tyto metody doznaly širokého využití v praxi, zejména dálkoměry využívající laserové záření (viz např. [1], [2], [3]).

#### 3.1 Bodová měření

Pod pojmem bodová měření lze chápat měřicí metody založené na technice postupného měření zkoumaného povrchu pomocí skenování v definovaných bodech. Na proměření celého zkoumaného povrchu (popř. jeho části) pak potřebujeme  $n(t + t_t)$  času, kde  $n$  je počet měřených bodů,  $t$  je čas potřebný na jedno měření a  $t_t$  je doba na změnu pozice pro měření dalšího bodu.

##### 3.1.1 Laserové dálkoměry

Jsou poměrně jednoduchá jednobodová zařízení, která slouží k měření vzdálenosti zkoumaného povrchu předmětu od referenční roviny. Využívají většinou koherentní záření, které se projektuje na měřený povrch. Měřicí systémy tohoto typu využívají tři principy vyhodnocení vzdálenosti: měřicí zařízení  $\rightarrow$  povrch předmětu [4].

### 3.1.2 Senzory využívající principu měření času průchodu záření prostředím

Zařízení založená na principu měření vzdálenosti pomocí času, který potřebuje světlo, aby urazilo vzdálenost ke zkoumanému předmětu a zpět k detektoru, jsou v praxi velice často využívána. Zdrojem je laserová dioda, která vysílá krátké světelné pulzy směrem ke zkoumanému předmětu. Dráha se vypočítá ze znalosti rychlosti šíření světla v měřeném prostředí a času průchodu světla od měřicího zařízení k předmětu a nazpět (viz obrázek 2). Tedy platí  $l = vt/2$ , kde  $l$  je měřená vzdálenost,  $v$  je rychlost šíření světla v měřeném prostředí a  $t$  je zmiňovaný čas. Zařízení tohoto typu pracují nejčastěji ve statistickém módu, kdy měří sérii několika světelných pulzů, a výsledek je zpracován pomocí statistických metod. Přesnost těchto zařízení je v intervalu  $\langle 5 - 10 \rangle$  mm na 1m délky.

### 3.1.3 Laserové radary

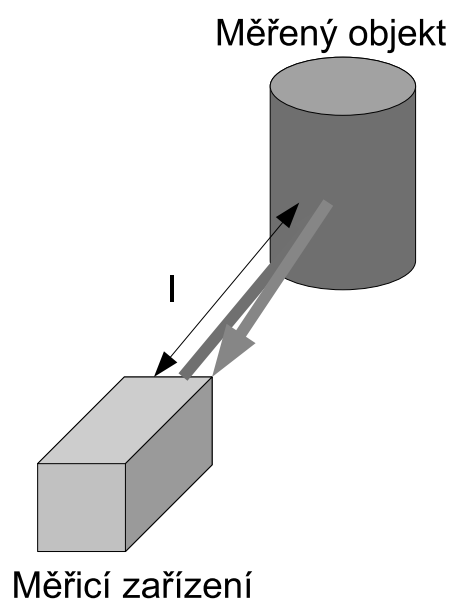
V principu jsou velmi podobné předchozím zařízením. Využívají detekci modulovaného světelného záření. Detekuje se fázový rozdíl odraženého záření od předmětu a vlny pilotní - osvětlující povrch (viz obrázek 3). Výsledná délka se vypočítá pomocí vztahu  $l = kn + \Delta\varphi$ , kde  $k$  je celé číslo,  $n$  je modulovaná délka záření a  $\Delta\varphi$  je fázový posun odraženého vlny oproti pilotní.

### 3.1.4 Triangulační dálkoměry

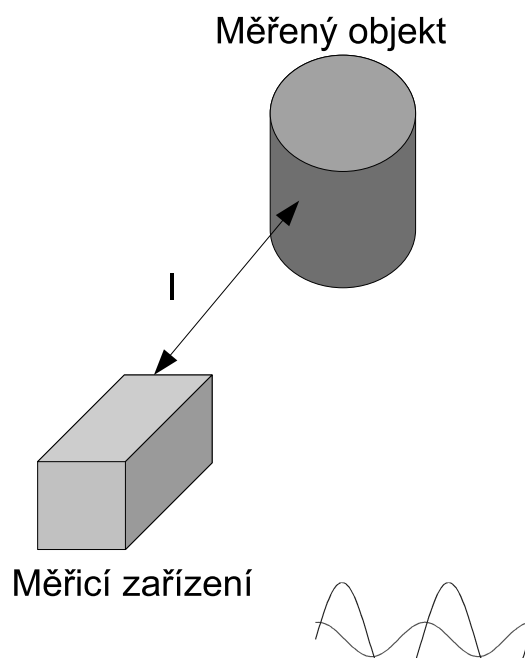
Zařízení tohoto typu využívají princip triangulace pro stanovení vzdálenosti měřeného bodu povrchu od referenční roviny (viz obrázek 4). Vzdálenost bodu povrchu k referenční rovině je závislá na parametrech měřicí sestavy:  $dl = g(f, L, \theta)$ , kde  $f$  je ohnisková vzdálenost objektivu kamery,  $L$  je vzdálenost zdroje světla od referenční roviny a  $\theta$  je úhel, který svírá osa objektivu s pilotním svazkem.

### 3.1.5 Konoskopická metoda

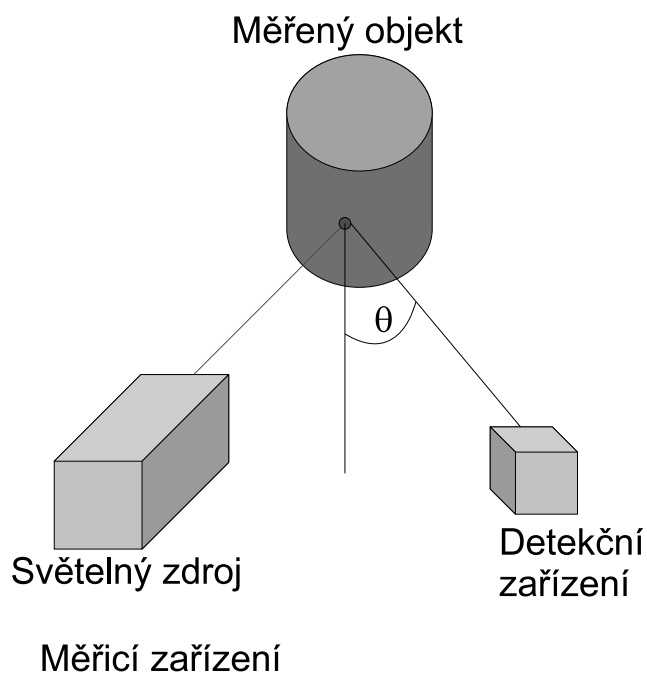
Konoskopická metoda (z anglického Conoscopy) patří do bodových měření, je jednoduchá na přístrojové vybavení. Vyhodnocení této metody je komplikovanější než u předešlých. Tato metoda je založená



Obrázek 2: Měření vzdálenosti pomocí stanovení doby průchodu záření měřeným prostředím.

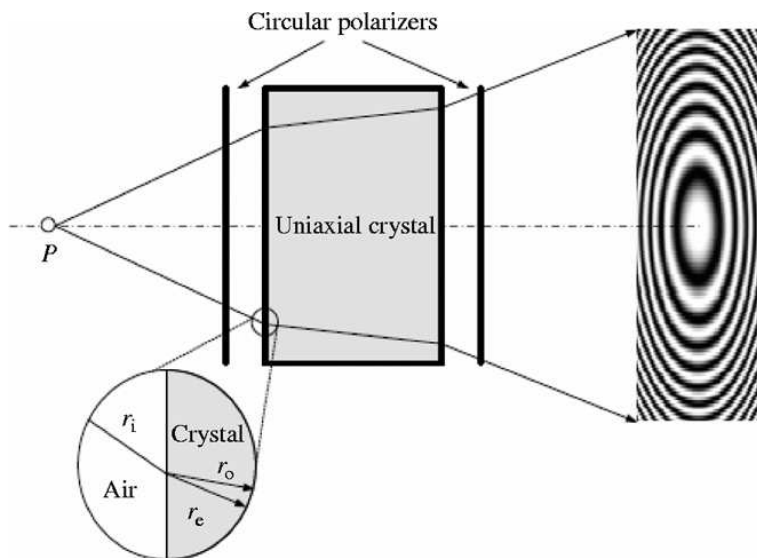


Obrázek 3: Měření vzdálenosti pomocí analýzy fázového posunu odraženého laserového záření od povrchu měřeného předmětu.



Obrázek 4: Dálkoměr založený na triangulační metodě.  $\theta$  je tzv. triangulační úhel.

na interferenci dvou vln, jejichž zdrojem je světelný bod na povrchu měřeného předmětu. Sestava se skládá [5] ze zkřížených polarizátorů, dvojlomného krystalu, optiky a detekčního zařízení (viz obrázek 5). Světelná vlnoplocha od bodu na povrchu dopadá na polarizátor. V



**Notes:** ( $r_i$  = incident ray;  $r_o$  = ordinary ray;  $r_e$  = extraordinary ray)

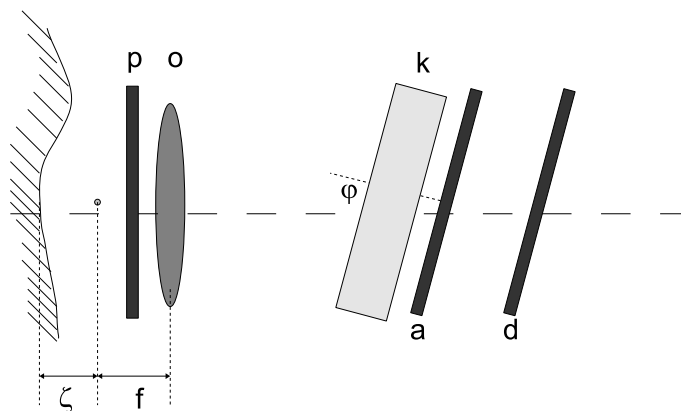
Obrázek 5: Konoskopie - měření vzdálenosti pomocí dvojlomného krystalu. Vlny  $r_o$  a  $r_e$  jsou řádné a mimořádné vlny, které poté interferují na CCD snímači [5].

krystalu se dělí na řádnou  $r_o$  a mimořádnou  $r_e$  vlnu, které se šíří rozdílnou rychlostí  $v_o$  a  $v_e$ . Fázový rozdíl obou vln je dán použitým typem krystalu a jeho tloušťkou. Na výstupu krystalu je analyzátor a detekční zařízení. Obě vlny spolu interferují a vytvoří interferenční obrazec. V reálné sestavě se umístí před krystal optika, poté za nelineární krystal analyzátor a detektor, který se nakloní vůči optické ose o úhel  $\varphi$ . Při posunutí světelného zdroje o vzdálenost  $\zeta$  dojde ke změně interferenčního obrazce. Vzdálenost  $\zeta$  se pak vypočítá jako [6]

$$\zeta = \frac{\lambda f^2}{2\Delta x LC(\varphi)}, \quad (2)$$

kde  $\Delta x$  je rozdíl interferenčních proužků,  $L$  je tloušťka krystalu,  $f$  ohnisková vzdálenost optické soustavy,  $\lambda$  vlnová délka použitého světla,

$C(\varphi)$  je funkce popisující fázový rozdíl obou vln vzhledem k úhlu otočení ( $\varphi$ ). Popis experimentu je znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 6: Konoskopie - Princip měření.  $\zeta$  je měřená vzdálenost,  $f$  parametr použité optiky,  $a$  - analyzátor,  $p$  - polarizátor,  $o$  - optika,  $k$  - krystal,  $d$  - detektor.

Zmiňované měřicí metody dávají v daném okamžiku měření informaci (vzdálenost, topografickou výchylku) pouze o jednom bodu (malé oblasti) měřeného povrchu. Pokud chceme použít tyto metody k měření topografie celého objektu, je nutné postupně proměřit (proskenovat) celý povrch v definovaných bodech. Je možné buď pohybovat měřicím systémem, nebo měřeným předmětem. Tento přístup je však náročný na čas i přístrojové vybavení a vnáší další nejistoty měření do systému, kde bylo původní měření zatíženo pouze chybou v měřeném směru např. osy  $z$ . Při skenování zanášíme do systému chyby lokalizace měřených bodů ve zbylých osách  $x, y$ .

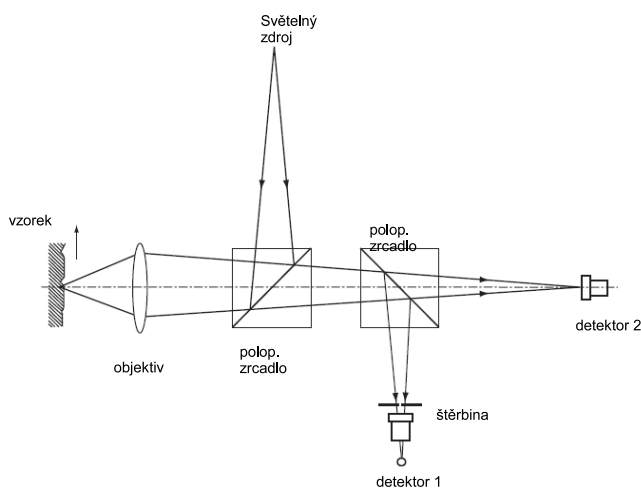
### 3.1.6 Metoda založená na analýze intenzity světla

Tato metoda zkoumá intenzitu projektovaného světelného bodu na povrchu zkoumaného předmětu a porovnává ho s bodem v referenční

vzdálenosti  $z_d$ . Systém je tvořen světelným zdrojem, který je přes polopropustné zrcátko promítán pomocí optiky na povrch měřeného předmětu. Tento bod je zobrazen na dva detektory. Detektor 1 je velký plošný, který měří celkovou intenzitu bodu, a detektor 2 je opatřen clonkou, která propustí pouze osové svazky. Pokud se bude měnit vzdálenost předmětu od objektivu  $k$ , bude se měnit intenzita na obou detektorech. Detektor 2 měří reflektivitu povrchu v daném bodě. Pokud budeme s předmětem posouvat, změní se pozice obrazu bodu na detektoru 1 dle vztahu [7]

$$I_1 = \frac{s\Delta I_2 M^2 z}{2\pi r_0 d} + I_2(0), \quad (3)$$

kde  $\delta I_2$  je rozdíl intenzit v referenční  $d$  a měřené vzdálenosti,  $r_0$  je apertura objektivu a  $z$  je velikost štěrbin. Princip metody je zobrazen na obrázku 7.



Obrázek 7: Měření vzdálenosti pomocí detekce změny intenzity světla měřeného bodu [7].

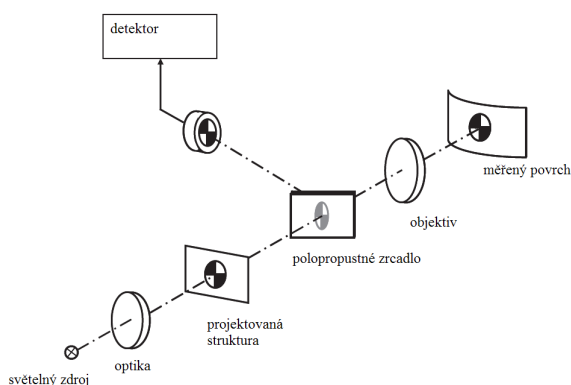


### 3.1.7 Metoda měření kontrastu

Tato metoda je zaměřená na zjišťování kontrastu projektované struktury na povrch měřeného předmětu. Jedná se o bodové měření povrchu předmětu. Na zkoumaný povrch je zobrazen specifický vzor, který je následně snímán detekčním zařízením a je vyhodnocován kontrast snímku. Na obrázku 8 je znázorněn princip měřicí metody. Pokud je povrch měřeného předmětu v obrazové rovině použité optické soustavy, má obraz projektovaného vzoru na detektoru maximální kontrast [8]. V ostatních případech se mění kontrast struktury. Kontrast struktury lze stanovit pomocí vztahu

$$S = \frac{(I_1 + I_3) - (I_2 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (4)$$

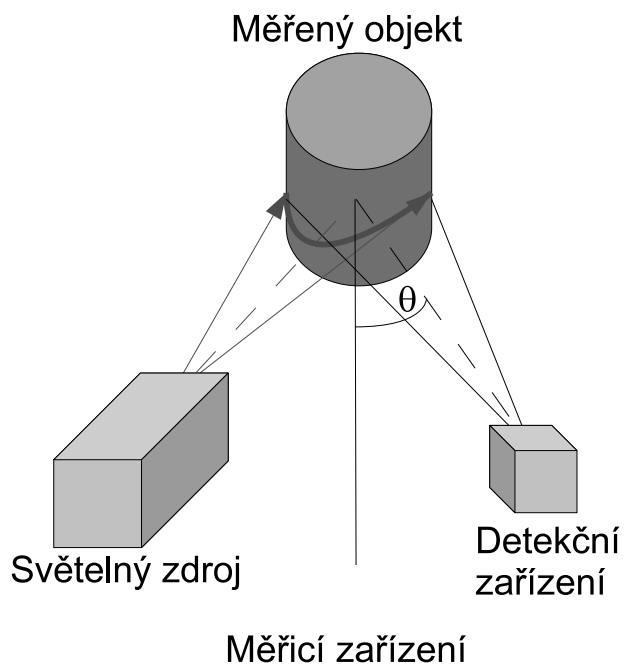
kde  $I_1$ ,  $I_3$  jsou intenzity světlých oblastí a  $I_2$  a  $I_4$  jsou intenzity tmavých oblastí. Citlivost této metody je do  $1\mu\text{m}$  v měřicím rozsahu  $150\text{mm}$ .



Obrázek 8: Měření vzdálenosti pomocí detekce kontrastu projektované struktury na povrch předmětu.

## 3.2 Profilovací měření

Tyto měřicí metody jsou založeny na principu měření jednotlivých profilů (řezů) zkoumaných předmětů v jednom okamžiku (viz obrázek 9). Předpokládejme, že zkoumaný povrch předmětu leží v rovině  $x, y$  a hledaná topografická výchylka je totožná s osou  $z$ . Oproti předchozím metodám mají tu výhodu, že se neměří bod po bodu, ale soubor  $n$  bodů je detekován v jeden okamžik. Je důležité, že počet  $n$  měřených bodů je závislý na rozlišení detekčního zařízení a je rovnoběžný např. s osou  $x$ . V dalším kroku je měřen další profil předmětu v předem definované vzdálenosti  $\Delta y$ . Dostáváme tedy matici bodů  $3 \times m \times n$  s hodnotami souřadnic  $x, y, z$ , ze kterých je možné zrekonstruovat povrch měřeného předmětu v diskrétních bodech. Rozlišení v ose  $y$  je dáno krokem posunu předmětu v ose  $y$ , popř. rozlišením měřicího zařízení. Rozlišení v ose  $z$  je dáno citlivostí měřicí metody. Typickým reprezentantem profilovacího měření je metoda 3D skenovací profilometrie.



Obrázek 9: Princip profilovacího měření. V jednom časovém okamžiku se měří sada bodů v jednom profilu.

### 3.3 Plošná měření

Plošná měření využívají obecně optické záření, které může být koherentní i nekoherentní. Kapitola popisuje vybrané optické topografické metody dnes hojně využívané v praxi. Samozřejmě, že existuje obrovské množství alternativních, většinou modifikovaných metod, které zde nejsou popisovány a závisí na konkrétní aplikaci.

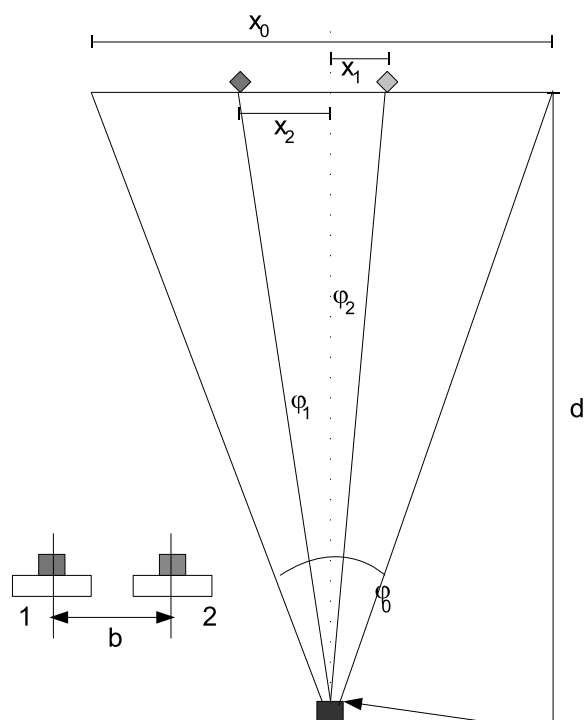
#### 3.3.1 Stereoskopická metoda

Tato metoda je velice stará. Již cca. 300 let p. n. l. Euklides popsal lidské vidění a použil principy stereoskopie, první zmínky a matematický popis jsou datovány do 19. století, poprvé použil stereoskopické zobrazení Sir Ch. Wheatstone v roce 1833 [9]. Princip metody se využíval a využívá k projekci 3D obrázků a snímků. Jedná se o vytváření iluze prostoru na 2D snímku pomocí rozposunutí dvou totožných snímků v jedné ose. Na totožném principu fungují dnešní 3D televizory a kina.

Měřicí metoda využívá záznamu pozorovaného předmětu nebo scény pomocí dvou totožných záznamových zařízení nebo posunutí jednoho zařízení o definovaný úsek [10]. Dnes je stereoskopie hojně používána pro zmapování topografie zemského povrchu. V tomto případě je aplikováno pouze jedno záznamové zařízení, které se pohybuje nad terénem (pomocí letadla, nebo družice). Tato metoda je též používána pro topografické měření malých předmětů (řádově velikosti  $cm$  až několik desítek  $cm$ ).

Mějme dva snímky téhož objektu (bodu), kde při tvorbě druhého snímku posuneme definovaně kamerou v směru jedné osy o daný úsek  $d$ . Na obrázku 10 je popsána geometrie obou snímků vzhledem ke kameře a jejímu posunutí. Na snímku lze vidět rozposunutí obou bodů o vzdálenosti  $x_1, x_2$  vůči středu snímku, který má celkově  $x_0$  pixelů. Vzdálenost od záznamového zařízení je  $d$  a úhly, pod kterými jsou oba body pozorovány, jsou  $\varphi_1$ , resp  $\varphi_2$ . Zorný úhel záznamového zařízení  $\varphi_0$  je daný konstrukcí objektivu. Při výpočtu vzdálenosti  $d$  vycházíme z trigonometrie a můžeme použít vztahy

$$\frac{x_1}{x_0/2} = \frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_0/2}, \quad (5)$$



Obrázek 10: Popis principu stereoskopické metody.

$$\frac{-x_2}{x_0/2} = \frac{tg\varphi_2}{tg\varphi_0/2}, \quad (6)$$

a vzdálenost  $d$  poté lze vyjádřit jako

$$d = \frac{b \cdot x_0}{2tg(\varphi_0/2)(x_{1h} - x_{2h})}, \quad (7)$$

kde  $(x_{1h} - x_{2h})$  je rozdíl obou bodů v horizontální rovině, což odpovídá posunu těchto bodů o vzdálenosti  $x_1$  a  $x_2$ , tedy rozdíl v  $n$  pixelech na kameře. Pro výpočet chyby měření je nutné vzít v potaz chybu určení úhlu odpovídající změně pozice o jeden pixel na kameře  $\Delta\varphi = \frac{\varphi_0}{x_0}$ . Výsledná chyba je pak daná vztahem

$$\Delta d = \frac{d^2}{b} tg(\Delta\varphi). \quad (8)$$

Samotné měření topografie předmětu spočívá v rozpoznání shodných bodů na povrchu předmětu a dosazením rozdílů pozice těchto bodů do rovnice (7). Tento postup je však náročný na výpočet korelace jednotlivých bodů obrazu. V praxi (tam kde je to možné) se využívá značkování povrchu předmětu pomocí rozpoznatelných bodů. Separace jednotlivých bodů lze dosáhnout buď barevným odlišením, nebo časovým odlišením (vytváří se jednotlivé snímky s jednou značkou). Citlivost této metody je dána rozlišením záznamového zařízení a vzdáleností, ze které zkoumaný předmět pozorujeme.

Dalším přístupem vyhodnocení této metody je kalibrační postup. V tomto případě nevyužijeme vztahu (7), ale provedeme kalibraci měřicí sestavy pomocí referenčních rovin s referenčními body. Nevýhodou tohoto postupu je pracná a časově náročná prvotní kalibrace. Avšak výhodou je prakticky nulová závislost výsledku měření na vadách objektu. Díky prvotní kalibraci je také zahrnut vliv optických vad objektu do měření.

### 3.3.2 Metoda měření tvaru pomocí stínů

Již podle názvu (Shape from shading) se jedná o metodu, která k rekonstrukci tvaru povrchu používá analýzy intenzitního průběhu snímaného objektu. Přístrojové vybavení experimentu je velice jednoduché, tvoří

ho pouze světelný zdroj a záznamové zařízení. Při analýze dat předpokládáme (a tím je také metoda omezena na určité povrchy), že povrch předmětu je Lambertovský [11].

Lambertovský (ideálně matný, ideálně difuzní) povrch je takový povrch, který odráží světlo do všech směrů stejně. Pokud tedy máme povrch, který odráží lambertovsky, známe směr osvitu a normálu k osvětlovanému povrchu, můžeme spočítat intenzitu odraženého světla pomocí vztahu

$$I_r = L \cdot N I_l, \quad (9)$$

$$L \cdot N = |L| |N| \cos\alpha, \quad (10)$$

kde  $L$  je směr osvitu,  $N$  je normála k povrchu a  $\alpha$  je úhel který svírají  $N$  a  $L$ . Největší hodnoty tedy intenzita dosáhne, pokud jsou oba směry totožné.

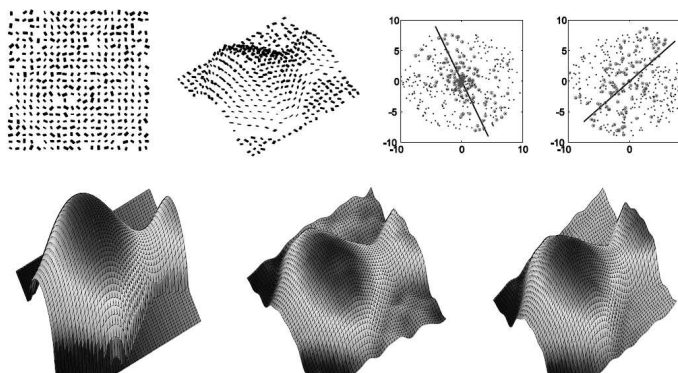
Princip vyhodnocení normály povrchu v daném bodě poté spočívá v analýze intenzity tohoto bodu.

### 3.3.3 Metoda měření tvaru pomocí textur

Princip metody (z anglického Shape from texture) je založen na analýze deformace obecné struktury nanesené na povrch zkoumaného předmětu [12]. Jestliže bude povrch rovinný a textura periodická, bude se obraz této struktury měnit pouze vlivem zobrazení (aberace, zvětšení). Pokud však bude povrch předmětu s texturou deformován, dojde k deformaci této textury a výsledný obraz bude oproti původnímu stavu změněn (viz obrázek 11). Existuje několik přístupů pro vyhodnocení textury na povrchu zkoumaného předmětu. Jednotlivé body struktury jsou označovány jako texely (texture picture). Přístup popsany Gibsonem [14] zkoumá relativní velikost a polohu jednotlivých texelů v obraze. Využívá se diskrétní Fourierovy transformace.

### 3.3.4 Fourierovská profilometrie

Fourierovská profilometrie je někdy též nazývaná F. topografie (v anglické literatuře též Fourier Transform Profilometry). Tato metoda byla poprvé publikovaná v roce 1982 [15]. Je založená (podobně jako metoda Moiré) na měření fázového rozdílu periodické struktury promítané



Obrázek 11: Změna textury v závislosti na podkladu, dochází k deformaci struktury. Analýzou deformace původní struktury je možné zrekonstruovat původní povrch [13].

na zkoumaný objekt a referenční rovinu. Rozdíl fází těchto struktur v měřených bodech charakterizuje jejich výškové rozložení. Ve srovnání s Moiré topografií [16] nebo 3D skenovací topografií je tato metoda jednoduchá z pohledu experimentálního vybavení a rychlejší v provedení měření. Nevýhodou je naopak složitější algoritmus výpočtu. Na rozdíl od 3D skenovací profilometrie je potřeba použít pouze jeden snímek (3D skenovací profilometrie jich potřebuje řádově desítky), Moiré topografie obvykle vystačí se dvěma snímky, avšak její nevýhodou je fakt, že lze počítat s body, jejichž rozdíl topografických výchylek je konstantní (jistého zlepšení lze dosáhnout metodou fringe shifting).

### 3.3.5 A) Princip metody

Metoda je založená na snímání periodické struktury projektované na povrch měřeného objektu a porovnání s tvarem téže struktury zaznamenané na referenčním objektu. Pokud tuto strukturu (uvažujme mřížku se sinusovým průběhem intenzity dopadajícího světla) promítneme na rovinu rovnoběžnou s rovinou projektoru, dostaneme na kameře opět periodický průběh intenzity (sinusový průběh obvykle zatížený šumem). Jestliže ale stejnou strukturu promítneme na předmět, jehož

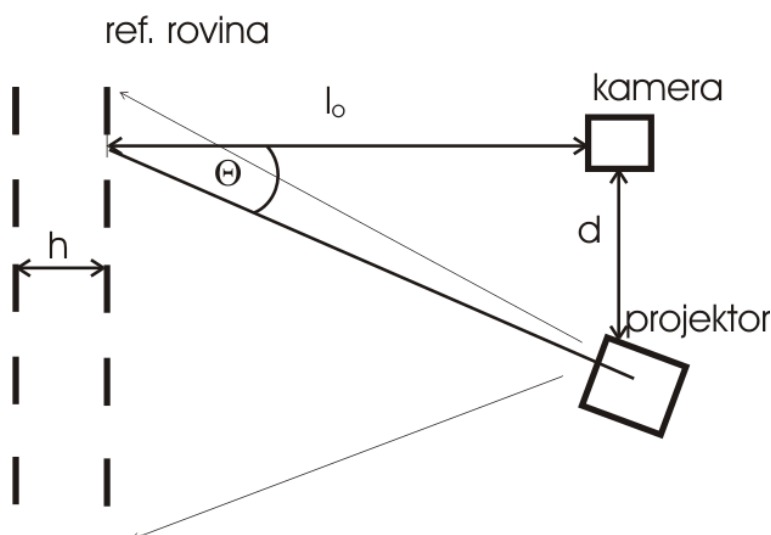


povrch nebude rovinný, dojde k deformaci této struktury (zahuštění, nebo zřídnutí projektované struktury v závislosti na výškovém profilu předmětu). Rozložení intenzity v rovině snímacího prvku  $g(x, y)$  této struktury lze popsat takto [17]

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos [\Phi(x, y) + 2f_0\pi x], \quad (11)$$

$$g_0(x, y) = a_0(x, y) + b_0(x, y)\cos [\Phi_0(x, y) + 2f_0\pi x], \quad (12)$$

kde  $g(x, y)$ , resp.  $g_0(x, y)$  je intenzita struktury na rovině, resp. na měřeném předmětu. Dojde ke změně fáze v některých bodech. Tato změna pak nese informaci o topografické výchylce v těchto bodech. Geometrické uspořádání experimentu je patrné z obrázku 12. Kamera



Obrázek 12: Geometrie Fourierovské profilometrie založené na detekci změny fáze periodické struktury.

je pro jednoduchost umístěna ve stejné vzdálenosti od referenční roviny jako projektor. Nejprve se nasnímá struktura na referenční rovině ve vzdálenosti  $l_0$  od kamery. Poté se vloží do zorného pole kamery měřený objekt a vyfotografuje se struktura na jeho povrchu. Důležitá pro tento typ experimentu je kvalita povrchu objektu. Ideální jsou difúzně odrazné povrchy. V ostatních případech je nutné povrch upravovat nebo provádět složité morfologické operace se snímky. Důležitá je také volba

periodické struktury a projektoru. Jako optimální se jeví mřížka se sinusovým průběhem intenzity (kvůli pozdější filtraci). Je rovněž vhodné nastavit vysokou hodnotu kontrastu pro filtraci šumu a morfologické operace. S ohledem na tvar povrchu a typ aplikace je důležitá volba periody mřížky.

### 3.3.6 B) Vyhodnocení experimentu

Pro samotné vyhodnocení experimentu je nutné nejprve kalibrovat sestavu (nasnímání periodické struktury na kalibračním předmětu). Tuto kalibraci je nutné provést pouze jednou a následně jen v případě změn v sestavě experimentu. Při měření se vloží na místo kalibračního předmětu měřený objekt a nasnímá se struktura na jeho povrchu. Následuje zpracování snímku v počítači. Rozložení intenzity se řídí vztahem (11) resp. (12). V rozložení intenzity lze najít jednak vlastní frekvenci mřížky, frekvence, které vzniknou deformací mřížky, jednak další frekvence, jež nenesou relevantní informace (šum). Tyto frekvence je nutno odfiltrovat ze signálu. Proveďte se tedy Fourierova transformace a filtrace. Snímky můžeme zpracovávat jednak po řádcích, nebo po sloupcích. Tedy v osách  $x$  a  $y$ . Jednotlivé signály se upraví pomocí Fourierovy transformace (zde pro osu  $x$ )

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-2\pi i f x} dx, \quad (13)$$

$$G_0(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x, y) e^{-2\pi i f x} dx. \quad (14)$$

Po filtraci (odfiltrují se vysoké a parazitní frekvence) se provede zpětná Fourierova transformace a z těchto hodnot se vypočítají fáze referenčního a měřeného signálu v jednotlivých bodech pomocí vztahů

$$\Phi(x, y) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\operatorname{Im} [\hat{g}(x, y)]}{\operatorname{Re} [\hat{g}(x, y)]} \right], \quad (15)$$

$$\Phi_0(x, y) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\operatorname{Im} [\hat{g}_0(x, y)]}{\operatorname{Re} [\hat{g}_0(x, y)]} \right]. \quad (16)$$

Můžeme tedy jednoduše vypočítat rozdíl fází obou signálů v každém bodě obrázku. Při výpočtu je nutné přepočítávat fázi. Jelikož podle tohoto výrazu by fáze byla v intervalu  $0 \div 2\pi$ , je nutné ji přepočítat. K tomuto slouží operace unwrapping.

Po této úpravě můžeme převést změnu fáze  $\Delta\Phi(x, y)$  na topografickou výchytku pomocí vztahu

$$h(x, y) = \left[ \frac{l_0 p_0 \left[ \frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right]}{\left\{ p_0 \left[ \frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right] - d \right\}} \right], \quad (17)$$

kde  $d$  je vzdálenost mezi kamerou a projektorem,  $p_0$  je perioda mřížky dělená výrazem  $\cos\theta$ ,  $l_0$  je vzdálenost referenční roviny od roviny pozorování.  $\Delta\Phi(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_0(x, y)$  je rozdíl fází referenčního snímku a snímku měřeného předmětu v daném bodě  $(x, y)$ .

### 3.3.7 Metoda měření tvaru předmětu pomocí ostření/rozostření obrazu

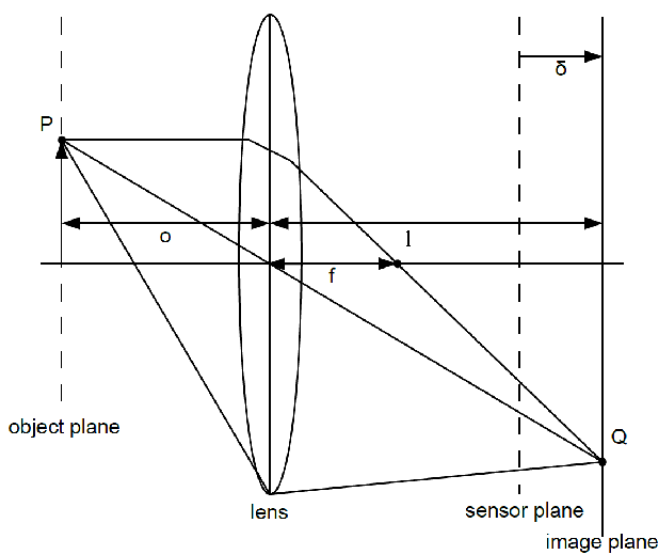
Povrch předmětu lze také měřit pomocí analýzy ostrosti snímané scény (metoda je anglicky označována jako Shape from focus/defocus). Princip je podobný jako při měření pomocí konfokálního mikroskopu. Rozdíl je však v rozsahu a citlivosti metody. U konfokálního mikroskopu se pohybuje rozlišení v řádech  $nm$ , u použití metody shape from focus je rozlišení v řádech  $\mu m$ . Principiálně se tedy jedná o analýzu ostrosti snímané scény v jednotlivých bodech snímku. Zobrazení bodu optickou sestavou je vysvětleno na obrázku 13. Vzdálenost  $o$  bodu lze vypočítat s pomocí parametrů čočky  $f$  a vzdálenosti  $l$  jako [18]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{l}, \quad (18)$$

v tomto případě nebude zobrazený bod fokusovaný do *bodu* na detektoru, ale bude odpovídat plošce, jejíž obsah se bude měnit se vzdáleností  $l$ . V okamžiku, kdy  $\delta = 0$ , bude mít tento bod minimální plochu na detektoru. V tomto případě přisoudíme této vzdálenosti topografickou hloubku  $o$ . Principiálně se tedy hledají v obraze kontrastní body a ty se dále analyzují. Měření může probíhat dvojím způsobem:

- Pohybujeme s detekčním zařízením ve směru normály k povrchu.
- Pohybujeme s předmětem ve stejném směru.

Vyhodnocení probíhá tak, že v okolí zkoumaného bodu vyhodnotíme matici bodů o velikosti  $m \times m$  a zjišťujeme minimum plochy



Obrázek 13: Zobrazení bodu jednoduchou čočkou, vysvětlení měření pomocí metody vyhodnocující ostrost scény [18].

daného bodu ve vztahu k jeho intenzitě. Využijeme Laplaceův filtr pro intenzitu v okolí měřeného bodu v rovině detektoru  $x, y$ . Vzhledem k možnosti záporné druhé derivace se používá absolutní hodnota derivací

$$\Delta_{ML}^2 I = \left| \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right| \quad (19)$$

Sleduje se průběh intenzity v měřeném bodě, vzhledem k měnící se vzdálenosti povrchu  $o$ , který by měl mít gaussovský průběh se změnou vzdálenosti ve směru normály. Maximum odpovídá optimální fokusaci a topografické výchylce  $o$ .

Postup při defokusačním měření je principiálně podobný [19]. Měníme ohniskovou vzdálenost zobrazovací sestavy a opět vyhodnocujeme naměřená data ve zvolených bodech. Místa s nejlepší fokusací odpovídají určité ohniskové vzdálenosti objektivu, kterou lze přepočítat na topografickou výchylku  $o$ , popř. lze celý systém nakalibrovat.

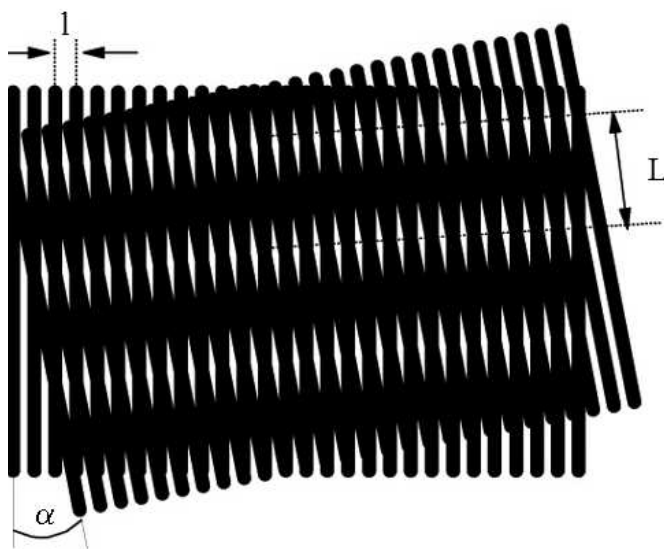
### 3.3.8 Moiré metody

Moiré metody jsou založeny na principu projekce dvou pravidelných struktur na měřený povrch. Pravidelnou strukturou mohou být lineární mřížky, radiální mřížky, matice bodů apod. Obecně koincidence těchto dvou struktur vyvolá vznik třetí struktury pozorovatelné na povrchu měřeného předmětu [20]. Jedná se o superpozici dvou mřížek s mřížkovou konstantou  $l$ . Pokud jsou projektovány paralelně na sebe, nedochází ke vzniku další struktury. Pokud však natočíme jednu nebo obě mřížky vůči sobě o úhel  $\alpha$ , vznikne další struktura s periodou  $L$  (viz. obrázek 14)

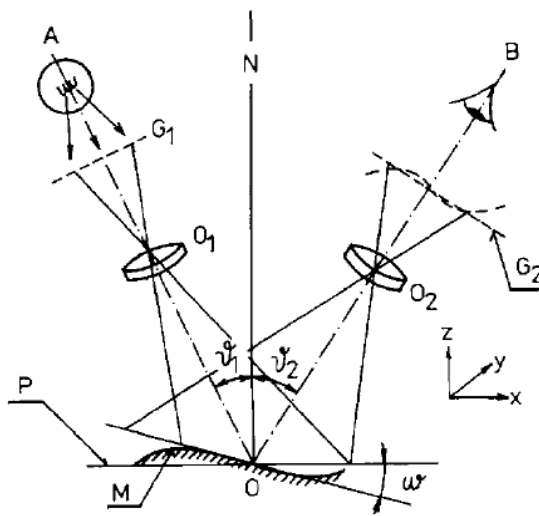
$$L = \frac{l}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (20)$$

Pro malé úhly  $\alpha$  je  $L = l/\alpha$ . Pokud promítneme jednu z mřížek na zkoumaný povrch, dojde vlivem tvaru povrchu k deformaci této mřížky. Po superpozici s druhou mřížkou, která bude nedeformovaná - referenční, dojde ke generaci moiré proužků. Pro výpočet topografické výchylky  $z$  použijeme obrázek 15. Platí vztah

$$\Delta z = k \frac{L_{def}}{L}, \quad (21)$$



Obrázek 14: Vznik moiré proužků.  $l$ ,  $L$  jsou periody mřížek,  $\alpha$  je úhel natočení jedné z mřížek.



Obrázek 15: Výpočet parametru  $z$  v bodě měření  $O$  pomocí parametrů  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$ ,  $w$  [20].

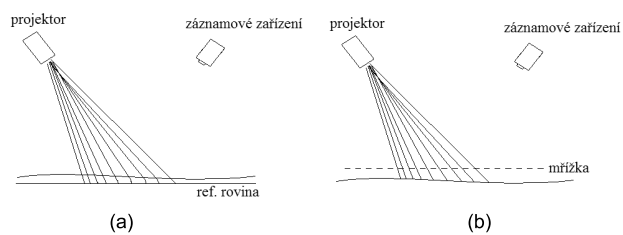
$$k = m \cdot l \frac{1 + tg\varpi tg\vartheta_2 \cos \varphi}{tg\vartheta_2 + tg\vartheta_1}, \quad (22)$$

kde  $k$  je odklonění moiré proužků,  $m$  je zvětšení optické soustavy,  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  jsou úhly projekce a pozorování,  $\varpi$  je úhel, který svírá zkoumaná rovina  $M$  s rovinou projekce  $P$  a úhel  $\varphi$  je úhel, který svírá normála  $NO$  s rovinou  $AOB$ ,  $L_{def}$  je velikost deformace proužku. V praxi většinou volíme  $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta_1/2$ ,  $\varpi$  a  $\varphi$  velice malé, potom se vztah (21) zjednoduší na

$$\Delta z = \frac{L \cdot m \cdot L_{def}}{l^2 tg\vartheta/2}. \quad (23)$$

Citlivost měření Moiré metody se dá zvětšit pomocí "phase shifting" metody, kdy se posouvá fáze projektované mřížky, a také hustotou mřížky. Metoda je náročná na zpracování. Je nutné extrahovat z výsledného snímku Moiré proužky, jejichž detekce je velice obtížná. Jistou výhodou je počítačové zpracování, kdy se nejprve nasnímá referenční mřížka, vypočítá se její frekvence a fáze v obraze. Poté se nasnímá obraz projektované mřížky, zpracuje se obdobně a výsledek se sečte v paměti počítače. Tato metoda se nazývá "projekční moiré". Obdobně se postupuje při použití modifikace této metody tzv. "dvouprojektorová (double projection) moiré". Struktury se projektují ze dvou směrů, popř. dvou projektorů. Dalším přístupem je umístění mřížky před zkoumaný povrch. Světlo procházející touto mřížkou je projektováno na povrch předmětu. Ten je snímán pomocí záznamového zařízení přes tutéž mřížku. Tato metoda je nazývána "stínová (shadow) moiré". Rozdíl obou metod je demonstrován na obrázku 16.





Obrázek 16: Srovnání projekční moiré (a) a stínové moiré(b).

## **4 Závěr**

V textu jsou popsány bezkontaktní 1D, 2D a 3D optické topografické metody. Dnešní praxe "oprašuje" některé dříve odvozené nebo používané metody a uvádí je do průmyslu. Díky moderním technologiím je možné posouvat limity těchto topografických metod k lepšímu rozlišení a minimalizovat jejich chyby. Velký důraz je také kladen také na automatizaci měřících metod. Tak je možné některé vyloženě "laboratorní" měřící metody uplatnit v praxi.

## Reference

- [1] <http://ptd.leica-geosystems.com/en/LeicaDISTO-DXT-81339.htm>.
- [2] [http://assets.fluke.com/manuals/411d\\_\\_\\_\\_umeng0000.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/411d____umeng0000.pdf).
- [3] <http://www.extech.com/instruments/resources/datasheets/-DT300data.pdf>.
- [4] G. Bradshaw, Non-contact surface geometry measurement technique, Image Synthesis Group, Trinity college, Dublin, 1999.
- [5] R. Bogue, Three-dimensional measurements: a review of technologies and applications, *Sensor Review*, Vol. 30 Iss: 2, pp.102 - 106, 2010.
- [6] L. M. Mugnier, Conoscopic holography: toward three-dimensional reconstructions of opaque objects, *Appl. Opt.* 34, 1363-1371 (1995).
- [7] T. Sawatari, R. B. Zipin, Optical profile transducer, *Optical Engineering*, 18, 222, 1979.
- [8] T. Yoshizawa, A. Tochigi, Displacement measurement utilizing contrast variation of a projected pattern, *Optical Engineering*, 31, 1992, 1726.
- [9] R. Ferragallo, On Stereoscopic Painting, *Leonardo*, Vol. 7, No. 2 (Spring, 1974), pp. 97-104, ISSN 0024-094X.
- [10] K. Kraus, *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*, de Gruyter, 2007, ISBN 978-3-11-019007-6.
- [11] V. N. Mahajan, *Optical imaging and aberrations*, SPIE Press, 1998, ISBN 9780819425157.
- [12] Y. Liu, R. Vogels, G. A. Orban, Convergence of Depth from Texture and Depth from Disparity in Macaque Inferior Temporal Cortex, *The Journal of Neuroscience*, April 14, 2004, 24(15):3795–3800, 3795.

- [13] A. Ecker, A. D. Jepson, K. N. Kutulakos, Semidefinite Programming Heuristics for Surface Reconstruction Ambiguities, Benchmarking Image Segmentation Algorithms, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 85, No. 2, 2009, pp.167-181.
- [14] R. Bajcsy, L. Lieberman, Texture gradient as a depth cue, *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 5, pp. 52-67, 1976.
- [15] Mitsuo Takeda and Kazuhiro Mutoh, Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-d Object Shapes, *Applied Optics*, Vol. 22, No. 24, Dec 1983.
- [16] Rössler T., Hrabovský M., Pluháček F.: Digital double-projector moiré topography. *Experimentální analýza napětí 2004*, 243-246, ISBN 80-239-2964-X.
- [17] D. Mandát, T. Rössler, M. Hrabovský, Phase analysis using Fourier transform profilometry, *Experimental Stress Analysis 2005*, 61-62, ISBN 80-214-2941-0.
- [18] S. K. Nayar, Y. Nakagawa, Shape from focus: an effective approach for rough surfaces, *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, 13-18 May 1990, 218 - 225 vol.2, Cincinnati, OH , USA, ISBN: 0-8186-9061-5.
- [19] M. Subbarao, G. Surya, Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach, *International Journal of Computer Vision*, 13, 3, 271-294 (1994).
- [20] J. Bartl, R. Fira, M. Hain, Inspection of surface by the Moiré method, *Measurement Science Review*, Volume 1, Number 1, 2001, ISSN 1335 - 8871.

**Mgr. Dušan Mandát, Ph.D.**

## **Optické bezkontaktní topografické metody**

Výkonný redaktor: prof. RNDr. Tomáš Opatrný, Dr.  
Odpovědná redaktorka: Vendula Drozdová  
Návrh a grafické zpracování obálky: Jiří K. Jurečka

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci  
Křížkovského 8, 771 47 Olomouc  
[www.upol.cz/vup](http://www.upol.cz/vup)

Olomouc 2012

1. vydání

**ISBN 978-80-244-3075-1**

Neprodejné