

# **E**xperimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

## **PHASE ANALYSIS USING FOURIER TRANSFORM PROFILOMETRY** **VYUŽITÍ URČENÍ FÁZE PRO 3D MĚŘENÍ TVARU DIFUZNĚ ODRAZNÝCH PŘEDMĚTŮ**

Dušan Mandát<sup>1</sup>, Tomáš Rössler<sup>2</sup>, Miroslav Hrabovský<sup>3</sup>

*The Profilometry method used here is the Fourier-Transform Profilometry Method that was originally published by Takeda [1] in 1982. The geometry of the experiment is very similar that used in Moiré Topography, but the advantage of this method is that only one image of the projected grating is necessary to produce the resulting object's fringes. Only frequencies with higher modulation are used to reconstruct a shape. The result is a set of surface's points with their 3D coordinates*

### **Keywords**

Profilometry, Fourier transformation, grating, frequency, modulation, 3D topography, unwrapping

### **Úvod**

Optické měřicí metody teoreticky již dříve odvoz doznávají v dnešní době velké renesance. Tento fakt je dán díky neustále rostoucímu výkonu výpočetní techniky, dokonalému programovému vybavení a vybavení laboratoří kvalitní digitální snímací technikou. Díky těmto podmínkám je možné realizovat některé metody a uvést jejich aplikace v praxi. Jednou z takovýchto metod je Fourierovská profilometrie, někdy též nazývaná F. topografie (v anglické literatuře též Fourier Transform Profilometry). Tato metoda byla poprvé publikovaná v roce 1982 [1]. Je založená (podobně jako Moiré) na měření fázového rozdílu periodické struktury promítané na zkoumaný objekt a referenční roviny. Rozdíl fází těchto struktur v měřených bodech charakterizuje jejich výškové rozložení. Oproti Moiré topografii[2] nebo 3D profilometrii[3] je tato metoda

---

<sup>1</sup> Mgr. Dušan Mandát: Společná laboratoř optiky a FZÚ AV ČR, třída 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc.tel.: +420-585631573, e-mail: [mandat@optnw.upol.cz](mailto:mandat@optnw.upol.cz)

<sup>2</sup> RNDr. Tomáš Rössler Ph.D: Katedra Experimentální fyziky UP Olomouc, Tř. 17 listopadu 50, Olomouc 77205 tel.: +420585634302; e-mail: [rossler@optnw.upol.cz](mailto:rossler@optnw.upol.cz)

<sup>3</sup> prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc. : Společná laboratoř optiky a FZÚ AV ČR, třída 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc.tel.: +420-585631501, e-mail: [hrabovsky@optnw.upol.cz](mailto:hrabovsky@optnw.upol.cz)

jednoduchá z pohledu experimentálního vybavení, rychlejší v provedení měření. Nevýhodou je složitější algoritmus výpočtu. Oproti 3D topografii je potřeba pouze jeden snímek (3D několik, obvykle desítky), Moiré topografie obvykle vystačí se dvěma snímky, její nevýhodou je fakt že lze počítat s body jejichž rozdíl topografických výchylek je konstantní (jistého zlepšení lze dosáhnout metodou fringe shifting).

## Fourierovská topografie

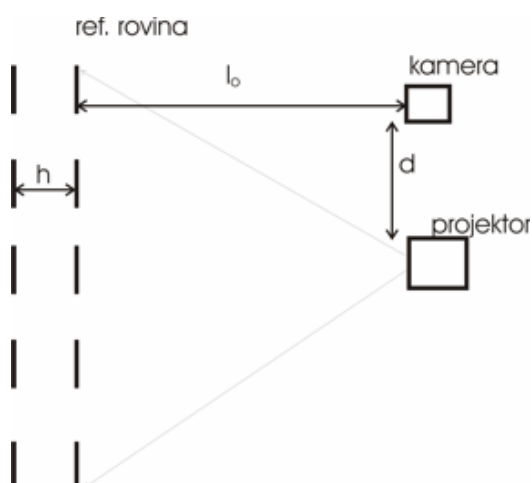
Metoda je založená na snímání periodické struktury projektované na povrch měřeného objektu a porovnáním s tvarem téže struktury zaznamenané na referenčním objektu. Pokud tuto strukturu (uvažujme mřížku se sinusovým průběhem intenzity) promítneme na rovinu rovnoběžnou s rovinou projektoru, dostaneme na kameře opět periodický průběh intenzity (sinusový průběh zatížený šumem). Pokud stejnou strukturu promítneme na předmět jehož povrch nebude rovinný, dojde k deformaci této struktury (zahuštění, nebo zřídnutí proužků v závislosti na výškovém profilu předmětu). Rozložení intenzity této struktury lze popsat takto:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Phi(x, y) + 2f_0\pi x], \quad (1.)$$

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

Kde  $g(x,y)$  resp.  $g_0(x,y)$  je intenzita struktury na rovině, resp. na předmětu.

Dojde tedy ke změně fáze v některých bodech. Tato změna tedy nese informaci o topografické výchylce v těchto bodech. Geometrické uspořádání experimentu je patrné z obrázku 1.



Obr. č. 1 – geometrické rozložení metody

Kamera je 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 vyfotí se struktura na jeho povrchu. Důležitá pro tento typ experimentu je kvalita povrchu objektu. Ideální jsou difusně 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 vhodná se jeví mřížka se sinusovým průběhem intenzity (kvůli pozdější filtraci). Je vhodné nastavit vysokou hodnotu kontrastu pro filtraci šumu a morfologické operace.

S ohledem na tvar povrchu a typ aplikace je důležitá volba periody mřížky.

## Vyhodnocení experimentu

Pro samotné vyhodnocení je nutné nejprve provést kalibraci sestavy (vyfocení struktury na kalibračním předmětu). Tuto kalibraci je nutné provést pouze jednou a následně jen v případě změn v sestavě experimentu. Poté se vloží na místo kalibračního předmětu měřený objekt a vyfotí se struktura na jeho povrchu. Následuje zpracování snímku v počítači. Rozložení intenzity se řídí vzorcem č.1 resp. č.2. V rozložení intenzity lze najít jednak vlastní frekvenci mřížky, frekvence jež vzniknou deformací mřížky a potom další frekvence jež nenesou relevantní informace. Tyto

frekvence je nutno vyfiltrovat ze signálu. Proveďte se tedy Fourierova transformace a filtrace. Snímky můžeme zpracovávat jednak po řádkách, nebo po sloupcích. Tedy v osách  $x$  a  $y$ . Jednotlivé signály se upraví pomocí Fourierovy transformace (zde pro osu  $x$ ):

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp(-2\pi ifx) dx, \text{ resp. } G_0(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x, y) \exp(-2\pi ifx) dx \quad (3.)$$

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

$$\Phi(x, y) = \arctg \left[ \frac{\text{Im}[\hat{g}(x, y)]}{\text{Re}[\hat{g}(x, y)]} \right], \text{ resp. } \Phi_0(x, y) = \arctg \left[ \frac{\text{Im}[\hat{g}_0(x, y)]}{\text{Re}[\hat{g}_0(x, y)]} \right] \quad (4.)$$

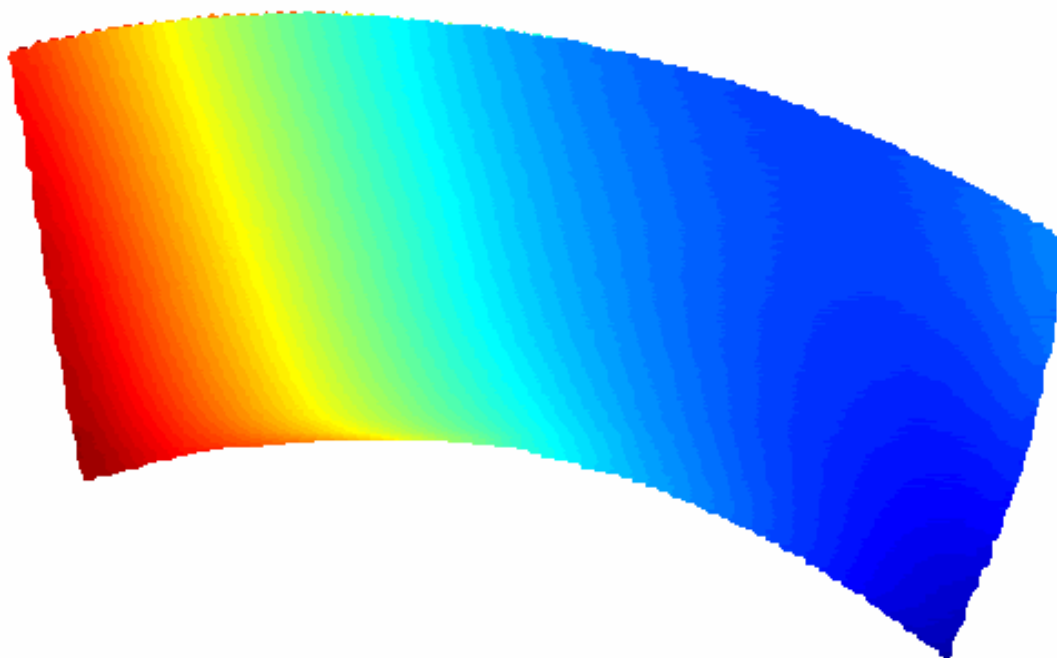
Můžeme tedy jednoduše vypočítat rozdíl fází obou signálů v každém bodě obrázku. Při výpočtu je nutné přepočítávat fázi. Jelikož podle tohoto výrazu by fáze byla v intervalu  $\langle 0, \pi \rangle$  je nutné ji přepočítat. K tomuto slouží operace unwrapping. Po této úpravě můžeme převést změnu fáze na topografickou výchylku pomocí vztahu:

$$h(x, y) = \left[ \frac{l_0 p_0 \left[ \frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right]}{\left\{ p_0 \left[ \frac{\Delta\Phi(x, y)}{2\pi} \right] - d \right\}} \right] \quad (5.)$$

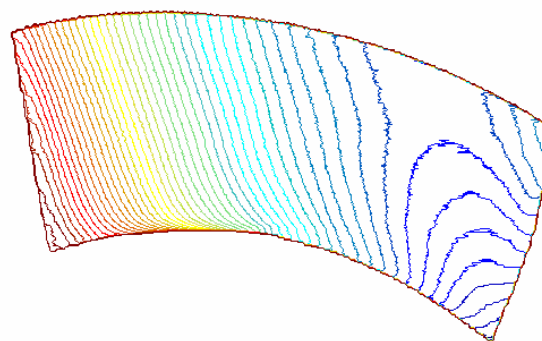
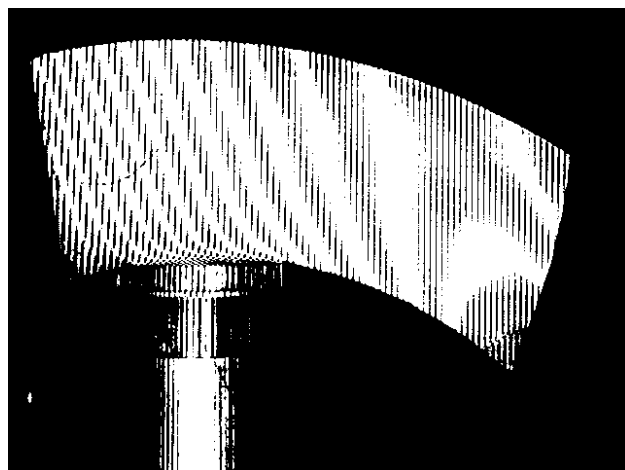
kde  $d$  je vzdálenost mezi kamerou a projektorem,  $p_0$  je perioda mřížky dělená výrazem  $\cos\theta$ ,  $l_0$  je vzdálenost referenční roviny od roviny pozorování.

## Experiment

Jako modelový objekt jsme použili lopatku oběhového kola čerpadla. Na obr. č.2 je lopatka jejíž topografie byla provedena touto metodou a na následujícím obrázku je srovnání výsledku Fourierovské topografie a Moiré topografie. Z obrázku je patrné že moiré proužky, které spojují body se stejnou topografickou výchylkou, kopírují data naměřená pomocí Fourierovské topografie. Dále je patrné, že F. topografie je citlivější než Moiré. Topografická výchylka není v tomto případě vynesena v absolutním měřítku. Nebyla dosud provedena kalibrace metody. Cílem toho experimentu bylo odzkoušení této metody na reálném předmětu.



Obr. č. 2 – Lopatka oběhového kola čerpadla. Velikost topografických výchylek v jednotlivých bodech je zobrazena paletou barev



Obr. č. 3 – srovnání výsledků Moiré topografie (levý obrázek) a Fourierovské profilometrie.

## Závěr

Dle dílčích výsledků kalibrace lze říci, že závislost změny fáze na topografické výchylce je přibližně lineární. Což umožňuje použití kalibrace místo složitějšího výpočtového postupu. Tento předpoklad platí pro topografické výchylky v řádu mm. Citlivost závisí na rozložení experimentální sestavy. Lze říci podle současných zkušeností, že tato metoda je schopna detekovat změny do 10 nm.

## Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumného záměru MSM 6198959213.

## Literatura

[1] 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.

[2] Rössler T., Hrabovský M., Pluháček F.: *Digital double-projector moiré topography*. Sborník z 42. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2004“, 1.- 3.6.2004, Kašperské hory, (2004), 243-246, ISBN 80-239-2964-X.

[3] Mandát D., Nožka L., Hrabovský M.: *Analýza úbytku hmoty kloubních jamek kyčelních kloubů*. Sborník z 42. mezinárodní konference „Experimentální analýza napětí 2004“, 1.- 3.6.2004, Kašperské hory, (2004), 159-162, ISBN 80-239-2964-X