

NON-CONTACT 3D TOPOGRAPHY MEASUREMENT OF MECHANICAL ENGINEERING SURFACES

O. Šamánek*, P. Šperka*

Summary: *The article presents application of Phase shifting interferometry (PSI) in 3D optical profiler for in-situ studying of real tribological problems. The article consists of methodology description, used algorithms, experimental apparatus and developed software. Results for measurement accuracy verification, using SHS 880 QC VLSI standard, are presented in this study. Application of this method on real rough surfaces is also presented. Finally, possibilities of extension and innovation of 3D profiler are contained in conclusion section of this article.*

1. Úvod

Měření a vyhodnocování topografie povrchů pomocí 3D optických metod přináší velmi cenné a prakticky využitelné informace o jejich geometrických a funkčních vlastnostech. Tyto vlastnosti jsou rozhodující pro funkci součásti během jejího života (tření, opotřebení, únavu apod.).

Interferometrie s řízenou změnou fáze (Phase shifting interferometry – PSI) je bezkontaktní optická metoda poskytující vysoce přesná a rychlá měření topografie povrchu.

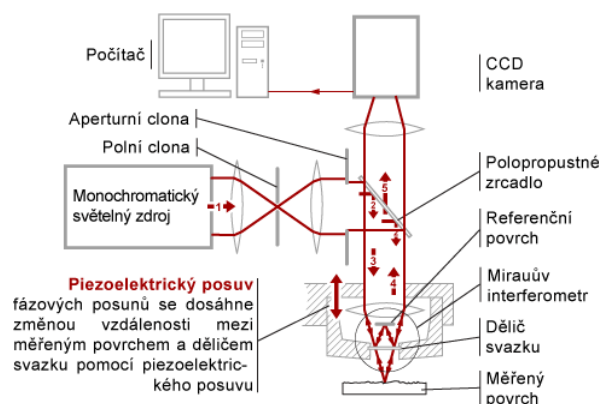
Ačkoli se teoretické základy metody PSI datují do poloviny 60. let 20. století (Carré, 1966; Crane, 1969), její postupné praktické využití nastává přibližně až v posledních 20 letech, kdy se objevily moderní CCD čipy a výkonné osobní počítače (Wyant, 1986; Perry, 1985). To vedlo k významnému rozšíření možností a zvýšení přesnosti této metody (Schwider, 1983; Kinnstaetter, 1988). V současnosti se jedná o rozšířený nástroj jak získat 3D topografii povrchu s přesností až na úrovni angstrému (0,1 nm). Velkým vývojem v posledních deseti letech prošel také software, který dále a dále posouvá hranice náročnosti zpracování měřených dat. Poskytuje pokrokové zobrazení, ovládání a plně automatickou kalibraci i měření.

2. Interferometrie s řízenou změnou fáze

K měření se využívá monochromatický svazek světla, který prochází soustavou čoček a clon, odráží se od polopropustného zrcadla k děliči svazku. Zde se paprsek rozděluje, jedna jeho část je nasměrována k referenčnímu povrchu a druhá k měřenému povrchu. Odražené paprsky

* Ing. Otakar Šamánek, Ing. Petr Šperka: Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2896/2; 616 69 Brno; tel.: +420 541 143 230, fax: +420 541 143 231; e-mail: yspk00@stud.fme.vutbr.cz

putují zpět do interferenčního objektivu, kde spolu interferují. Výsledný interferogram je snímán digitální CCD kamerou a zpracováván počítačem.



Obr. 1 Princip metody PSI

Rozdíl optických drah (OPD) mezi dvěma rameny interferometru kopíruje povrch měřené topografie; do obrazce je zakódován v podobě intenzity. Jeden interferogram nenese dostatečnou informaci pro určení topografie povrchu (Carré, 1966). Proto je potřeba více obrazců, které se od sebe liší o stanovený fázový posun. Minimální počet nutných obrazců je 3. V praxi však využíváme metody více-snímkové, které jsou méně citlivé na nepřesnosti nastavení fázových posunů a další chyby (Wyant, 1998). Běžné jsou tři až sedmi-snímkové algoritmy.

Ke zpracování interferogramů byla zvolena pokročilá Schwider-Hariharanova pěti-snímková metoda (Schwider, 1983; Hariharan, 1987). Pro tuto metodu je charakteristická malá citlivost na chyby způsobené nesprávným fázovým posunem a dalšími vlivy. Jednotlivé hodnoty fázových posunů jsou: $\{0\pi, 1/2\pi, \pi, 3/2\pi, 2\pi\}$.

Výslednou fázi ze zdrojových interferogramů vypočteme dle vztahu:

$$\varphi(x, y) = \arctg \frac{2 [I_4(x, y) - I_2(x, y)]}{I_1(x, y) - 2 I_3(x, y) + I_5(x, y)} \quad (1)$$

kde:

$I_i(x, y)$ [1] - intenzita i -tého interferogramu v bodě (x, y) ;

$\varphi(x, y)$ [rad] - výsledná fáze v bodě (x, y) .

Topografie povrchu je dána vztahem:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(x, y), \quad (2)$$

kde:

λ [nm] - vlnová délka světla;

$h(x, y)$ [nm] - výška povrchové nerovnosti v bodě (x, y) .

2.1. Phase unwrapping

Měříme-li povrch s výškovým rozsahem povrchových nerovností větším než vlnová délka užitého světla (Obr. 2), například vrchlík kulové plochy, dochází k efektu nazývanému „phase wrapping“ (tj. výsledný povrch je „zabaleno“ do jedné vlnové délky). Proto je u této metody nutné analyzovat tyto místa a korigovat je, tedy provést „phase unwrapping“. Základní algoritmus je jednoduchý, vychází z podmínky pro libovolné dva sousední body q_1, q_2 .

Pokud

$$\begin{aligned} \varphi(q_1) - \varphi(q_2) &> \pi, \\ \text{pak korigujeme } \varphi(q_2) &= \varphi(q_2) + 2\pi, \end{aligned} \quad (3)$$

nebo pokud

$$\begin{aligned} \varphi(q_1) - \varphi(q_2) &< -\pi, \\ \text{pak korigujeme } \varphi(q_2) &= \varphi(q_2) - 2\pi. \end{aligned} \quad (4)$$

$\varphi(q_1), \varphi(q_2)$ [rad] - fáze v sousedních bodech q_1, q_2 .

Tento algoritmus však selhává v mnoha praktických případech, kdy je přítomen šum a další vlivy. Proto se v praxi používají pokročilejší algoritmy, které můžeme rozdělit do čtyř skupin (Ghiglia, 1998):

- metody sledující cestu (path following methods),
- metody residuální,
- metody globální minimalizace (global least square integration methods),
- metody ostatní.

Hlavním omezením metody PSI je maximální velikost výškového skoku mezi dvěma sousedními body. Platí podmínka: Aby topografie povrchu byla jednoznačně změřena, výškový rozdíl dvou libovolných sousedních bodů musí být maximálně čtvrtina vlnové délky použitého světla. Jinak se dopouštíme chyb.

Z toho důvodu se metoda PSI uplatňuje zejména při měření hladkých povrchů (nerovnosti do 150nm).

2.2. Zdroje chyb měření

U této metody se obvykle uvažuje těchto sedm zdrojů chyb (Wyant, 1998):

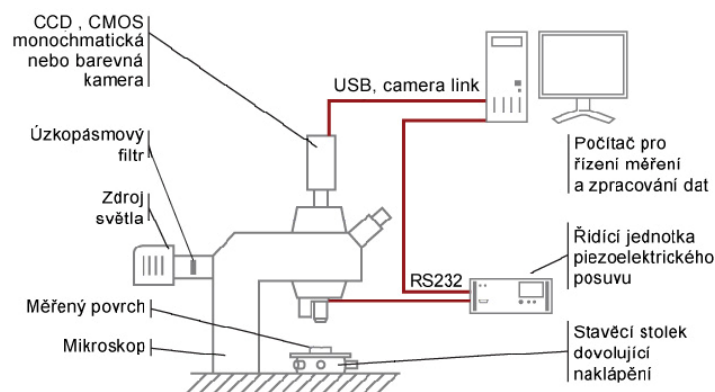
1. Nesprávná změna fáze mezi jednotlivými snímky
2. Vliv vibrací
3. Nelinearita CCD senzoru
4. Bludné odrazy
5. Kvantizační chyba
6. Frekvenční stabilita světelného zdroje
7. Fluktuace měřené intenzity

V praktických podmínkách mají podstatný vliv chyby 1., 2. a 3. Chyba 1. je nejčastěji způsobena nesprávnou kalibrací piezoelektrického posuvu (PZT). Vliv vibrací je chyba nahodilá a

není lehce odstranitelná. Obvykle ji eliminujeme použitím pokročilých, méně citlivých algoritmů PSI v kombinaci s kvalitním pneumatickým tlumením okolních vlivů. Přesnost metody PSI je obecně limitována prostředím. Nelinearita CCD senzoru se řeší různými metodami kalibrace kamery.

3. Měřicí aparatura

Měřicí aparatura (Obr. 2) se skládá z mikroskopu Nikon Eclipse LV150, na který je upevněn Miraův interferenční objektiv s desetinásobným zvětšením a piezoelektrický posuv (PZT). Ten je ovládán řídicí jednotkou piezoelektrického posuvu. Jako zdroj monochromatického světla se využívá halogenové žárovky a úzkopásmového filtru (propustný v zelené oblasti světla, vlnová délka 547nm). Interferogramy jsou snímány digitální CMOS kamerou s vysokou rozlišitelností. Data získaná z kamery, jsou zpracovávána v PC. K ustavení měřeného povrchu se používá speciálního naklápěcího stolku, opatřeného mikrometrickými šrouby. Tento stolec umožňuje ustavení vzorku do roviny. Celá měřicí sestava je upevněna na stole s pneumatickým tlumením.



Obr. 2 Konfigurace měřicí aparatury

Digitální monochromatická CMOS kamera s efektivním rozlišením 1024x1024 pixelů, snímkovou frekvencí až 40 snímků/s a bitovou hloubkou 10bitů. K datovému spojení a řízení je kamera opatřena USB rozhraním. Počítač komunikuje s řídicí jednotkou PZT přes RS232 pomocí protokolu specifikovaným výrobcem. Softwarové rozhraní tvoří poskytovaná DLL knihovna, která pokrývá kompletní funkčnost řídicí jednotky.

3.1. Software

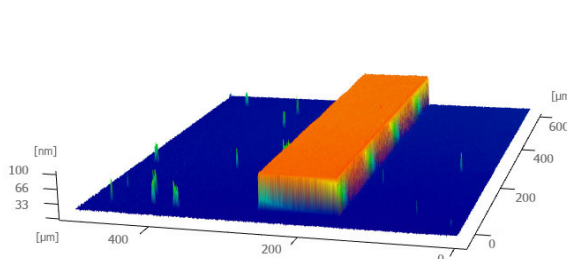
Aplikace je implementována v jazyce C++ pro operační systém MS Windows. Řídí měření a sběr dat z kamery. Pro výpočet topografie využívá Schwider-Hariharanovu (Schwider, J. C. 1983) pěti-snímkovou metodu, pro řešení phase unwrappingu rychlý Goldsteinův algoritmus (Ghiglia D. C. 1998), mezi další možnosti aplikace patří: selekce podstatné části (obdélník, elipsa); odečtení referenční plochy od povrchu (získaných proložením metodou nejmenších čtverců); analýza řezů; export hodnot nebo geometrie profilu řezů; výpočet parametrů profilu řezů (Ra, Rq, Rz atd.).

4. Výsledky měření a diskuze

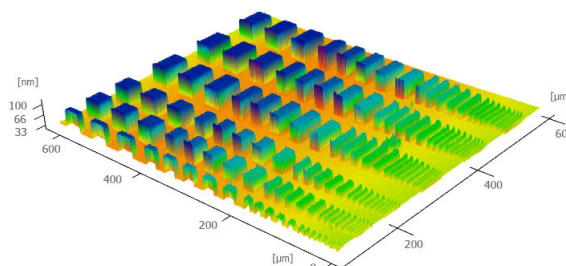
K ověření přesnosti měření byl použit standard SHS 880 QC společnosti VLSI (VLSI - Thin step height standard 2007). Jedná se o křemíkový blok se skupinou struktur v podobě výstupků a nanosenou tenkou vrstvou chrómu. Součástí standardu je kalibrovaný práh (Obr. 3), jehož výška je uvedena v kalibračním certifikátu (VLSI Standards Incorporated 2002).

Výrobní číslo standardu je 5904-46-1. Výška kalibrovaného prahu $86,7 \pm 1,2$ nm (VLSI Standards Incorporated 2002), šířka je $100 \mu\text{m}$ a délka $750 \mu\text{m}$. Výška je garantována v oblasti $400 \times 400 \mu\text{m}$ přibližně uprostřed jeho délky.

Naměřená průměrná výška prahu určená ze čtyř řezů činí $84,6$ nm. Odchylka od deklarované střední hodnoty je $2,1$ nm ($2,45\%$) a odchylka od spodní tolerance $0,9$ nm ($1,09\%$). Naměřená šířka je použita k přesnému určení horizontální rozlišitelnosti, která činí $1,047 \mu\text{m}$. Druhým měřeným místem byla struktura výstupků (Obr. 4), jejichž délka se zvětšuje od $4 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$. Výška výstupků sice není garantována, ale jejich hodnota by se neměla příliš lišit od výšky kalibrovaného prahu.

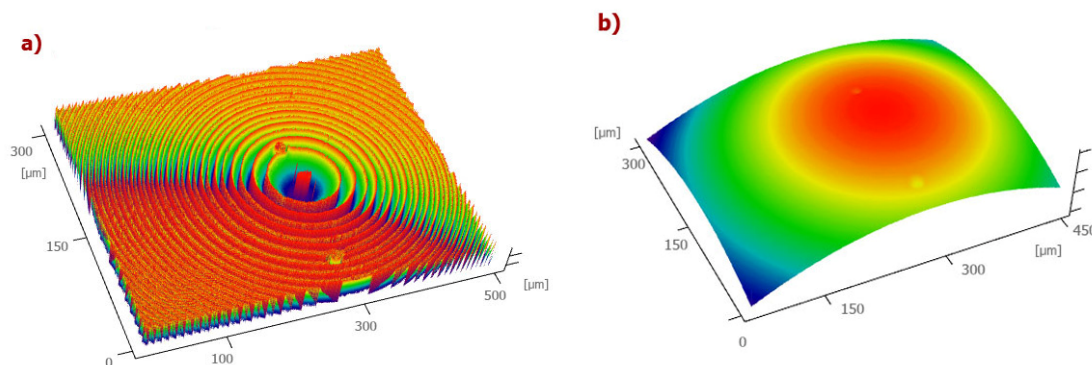


Obr. 3 Změřený kalibrovaný práh



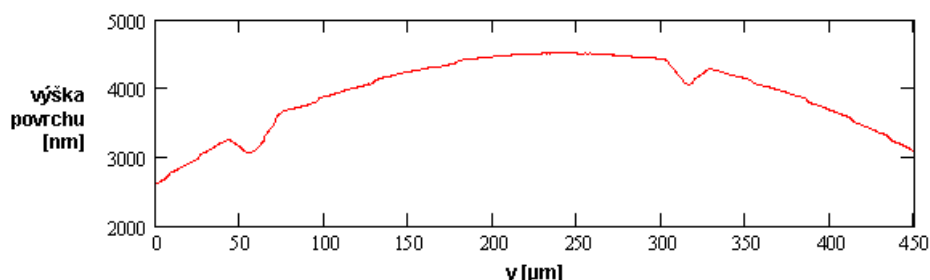
Obr. 4 Změřená struktura výstupků

Průměrná výška výstupků určená z pěti řezů je $85,3$ nm. Odchylka od střední hodnoty výšky prahu činí $1,4$ nm ($1,69\%$). Naměřené výsledky lze hodnotit jako dobré. Aplikací metody na reálný povrch bylo změření povrchu kuličky se dvěma vtisky (Obr. 5). Jedná se v tribologických aplikacích o častý typ měřené plochy a prezentuje klasický případ, kdy je nutně zapotřebí phase unwrapping.



Obr. 5 Změřený povrch kuličky s dvěma vtisky, (a) před phase unwrappingem, (b) po phase unwrappingu

3D vizualizace získaného povrchu je prezentována na Obr. 5. Řez rovinou protínající vtisky na Obr. 6.



Obr. 6 Řez kuličkou v místě vtisků

5. Závěr

Výsledkem práce je sestavení aparatury využívající metody interferometrie s řízenou změnou fáze a vyvinutého softwaru, následné potvrzení přesnosti na kontrolním vzorku a aplikace metody na reálných površích.

Vyvinutý software poskytuje nezbytné funkce pro provedení měření, zpracování, vizualizaci, kvalitativní a kvantitativní zhodnocení topografie povrchu. Naměřená hodnota výšky kalibrovaného prahu je 84,6 nm a průměrné výšky struktury výstupků činí 85,3 nm. Odchyly od uvedené střední hodnoty se pohybují v rozmezí 1,4-2,1 nm (1,69-2,45%). Celkově lze zjištěnou přesnost hodnotit jako vyhovující. Metoda byla aplikována při měření povrchu kuličky, byla potvrzena vhodná volba algoritmu phase unwrappingu.

Možnost dalšího rozšíření je v implemetaci metody využívající bílé světlo (White light interferometry WLI), která doplní hlavní nevýhodu současné metody PSI, tj. poskytne větší dynamický rozsah (řádově 10μm optroti 150nm u PSI).

Poděkování

Výsledky byly získány za podpory grantu FRVŠ 2440.

6. Reference

- Carré, P. (1966) Installation et Utilisation du Compateur Photoelectrique et interferentiel du Bureau International des Poids de Mesures, *Metrologia* 2, pp.13.
- Crane, R. (1969) Interference Phase Measurement, *Appl. Opt.*, 8, pp. 538.
- Ghiglia D. C., Pritt M. D. (1998) Two-Dimensional Phase unwrapping: Theory, Algorithms, and Software, *A Wiley-Interscience publication*, ISBN 0-471-24935-1.
- Hariharan P., B. F. Oreb A T. Eiju, (1987) Digital Phase-Shifting Interferometry: A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm, *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 2504.
- Kinnstaetter, K., Lohmann, A. W., Schwider, J., A Streibl, N. (1988) Accuracy of phase shifting interferometry, *Appl. Opt.* vol. 27, no. 24.

- Perry D. M., Moran P. J. & Robinson G. M. (1985) Three-dimensional surface metrology of magnetic recording materials through direct-phase-detecting microscopic interferometry, *Journal of the institution of electronic and radio engineers*, vol. 55, no.4, pp.145-150.
- Schwider, J. C., Burow, R., Elssner, K.-E., Grzanna, J., Spolaczyk, Merkel K., (1983) Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources, *Applied Optics*, vol. 22, pp. 3421-3432.
- VLSI - Thin step height standard [on-line]. [cit. 2007-05-13] URL: <www.vlsistandards.com/appNotes_pdf/shsthinappnoterev3.pdf>.
- VLSI Standards Incorporated, (2002) Certificate of calibration, SHS 880 QC, SN: 5904-46-1.
- Wyant J. C., Koliopoulos C. L., Bhushan B. & Basila D. (1986) Development of a three-dimensional noncontact digital optical profiler, *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, vol. 108.
- Wyant, J. C., (1998) Phase-Shifting Interferometry, [on-line]. [cit. 2006-06-20] URL: <<http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Optics513/ChapterNotes/Chapter05/PrintedVersionPhaseShiftingInterferometry.pdf>>.