

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta

Optické měřicí 3D metody

Michal Pochmon

Olomouc 2012

Oponent: RNDr. Tomáš Rössler, 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

© Michal Pochmon, 2012

© Univerzita Palackého v Olomouci, 2012

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

ISBN 978-80-244-3072-0

NEPRODEJNÉ



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

Optické měřicí 3D metody

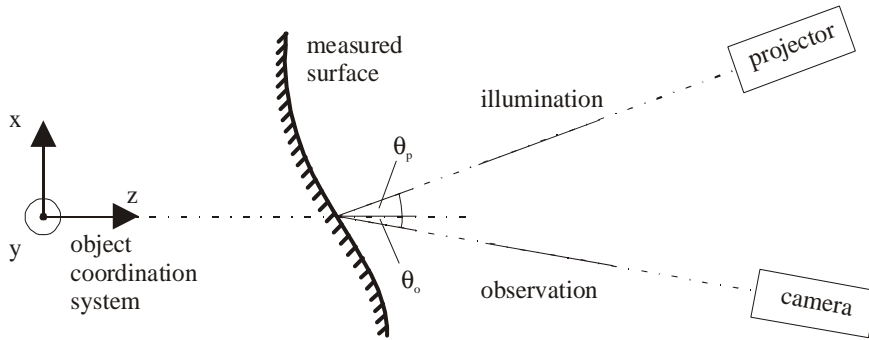
Michal Pochmon

Abstrakt. Principiálně lze měření prostorového tvaru předmětu provést opticky či neopticky. Hlavní výhodou optické cesty je možnost bezkontaktního měření, s možností celoplošného měření a měření v reálném čase. Optické metody lze dále dělit na koherentní a nekoherentní. Do první skupiny patří interferometrické a holografické metody. Tyto metody jsou velice přesné, avšak jejich technická realizace bývá značně složitá. Rozvoj výpočetní techniky a mikroelektroniky posouvá hranice nekoherentních metod směrem k možnostem koherentních při zachování jejich jednoduchosti.

Optická 3D měření

Účelem 3D měření je určení prostorového tvaru povrchu předmětu. V síti bodů povrchu (x,y) se určuje tzv. topografická hloubka (výchluka, výška), značená $z(x,y)$, která určuje vzdálenost libovolného bodu (x,y) od topografické roviny. Soubor těchto souřadnic (x,y,z) je výsledkem třírozměrného měření.

Optická měření jsou ta, která se provádí bezkontaktně, sondou je světelný svazek (bodový, lineární, plošný). Obecným principem koherentních metod je interference. Naopak nekoherentní metody jsou založeny na triangulaci [1], vždy se v měřicí soustavě vyskytuje projektor, měřený povrch a detektor. Základní měřicí soustava je zobrazena na obr.1.



Obr.1 Triangulační měřicí soustava.

Princip těchto metod je založen na vyhodnocení deformace optické stopy promítnuté na měřený povrch. Stopa je snímána detektorem a vyhodnocována. V závislosti na typu měření je optickou stopou bod, tenká čára nebo mřížka (periodická či náhodná).

Optické metody se obecně dělí na topografické a profilometrické. Topografické metody dávají ve výsledku dvojrozměrný obraz, který je složen z intenzitních proužků, které po úpravě odpovídají vrstevnicové mapě povrchu předmětu. Profilometrické dávají ve výsledku soubor 3D souřadnic, které odpovídají určité síti bodů. Tvar předmětu je poté určen metodami počítačové grafiky a zobrazovacích metod 3D předmětů ve 2D prostoru. Jednotlivé metody jsou rozeznávány dle toho, jakým způsobem je získána informace o trojrozměrném tvaru předmětu.

V následujících kapitolách je uvedeno několik optických metod, které se používají k měření tvaru povrchu předmětů. Ty se od sebe liší způsobem osvětlení předmětu nebo různým výpočtem topografické hloubky (profilu). Jsou mezi nimi metody koherentní i nekoherentní, topografické i profilometrické.

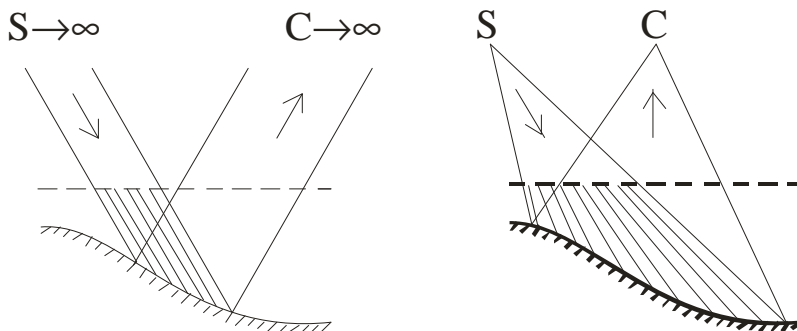
Moiré metody

Jde o nekoherentní topografické měřicí metody využívající tzv. moiré jevu, což je obrazec ze světlých a tmavých pásů, který vzniká při přeložení dvou totožných periodických struktur (mřížek) v prostoru přes sebe. Tomuto obrazci se říká moiré proužky. Mřížky jsou buď vůči sobě o malý úhel pootočený, nebo nepatrně deformovány, apod. Zřetelnost moiré jevu závisí na rozdílnosti mřížek, čím jsou shodnější, tím je jev výraznější. Středem každého moiré proužku lze proložit křivku. Soustava těchto křivek se pak nazývá moiré mřížka. Moiré mřížka tvoří vrstevnicovou mapu povrchu předmětu. Tuto mřížku lze pak zaznamenat do PC, zpracovat a vyhodnotit. Dle řádu moiré proužků se pak určuje topografická výchylka.

Stínová moiré. V této metodě se používá rastr, který je umístěn nad povrchem měřeného objektu, a který zároveň definuje topografickou rovinu. Jeho propustnost je definována vztahem

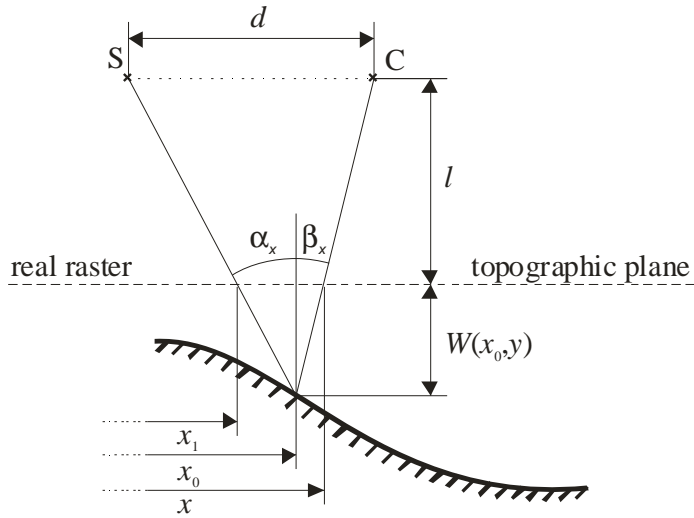
$$T(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{sgn} \left[\exp \left(j 2 \pi \frac{x}{p} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

Jeho osvětlením vznikne na objektu stínová mřížka (předmětová), která je deformována tvarem povrchu objektu. Tato stínová předmětová mřížka se pozoruje přes tentýž rastr, který má též tedy funkci referenčního rastru. Vzniklý moiré obrazec se zaznamená a vyhodnocuje. V praxi se používají dva způsoby této metody (viz. obr.2), a to s projektořem a kamerou v nekonečnu (kolimované osvětlení a pozorování) nebo v konečné vzdálenosti (bodové osvětlení a pozorování).



Obr.2 Kolimované a bodové osvětlení.

Bez újmy na obecnosti se určuje osa y rovnoběžná s proužky rastru, osa x tedy kolmá. Dále se předpokládá rovinný lineární rastr. Lze zavést souřadnicové transformace ve směru osy x , pro jejich odvození použijeme obr.3.



Obr.3 Geometrie stínové moiré.

Souřadnice lze tedy psát ve tvaru

$$x_0 = x_1 + W(x_0, y) \operatorname{tg} \alpha_x \quad (2)$$

$$x = x_0 + W(x_0, y) \operatorname{tg} \beta_x = x_1 + W(x_0, y) (\operatorname{tg} \alpha_x + \operatorname{tg} \beta_x). \quad (3)$$

Předmětová mřížka je pozorována přes rastr pod úhlem β . Tato mřížka v rovině rastru je popsána vztahem

$$I_2(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{sgn} \left[\exp \left(j2\pi \frac{x - W(x_0, y) (\operatorname{tg} \alpha_x + \operatorname{tg} \beta_x)}{p} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

kde je použita transformace pro souřadnici x .

Intenzitu vzniklé moiré mřížky $I(x, y)$ lze získat spojením rovnic, jak vyjadřuje vztah

$$I(x, y) = T(x, y) I_2(x, y). \quad (5)$$

Po dosazení (4) a (1) do (5) je výsledný vztah pro intenzitu

$$I(x, y) = \frac{I_0}{4} \left(1 + \operatorname{sgn} \left[\exp \left\{ j2\pi \frac{x}{p} \right\} \right] + \operatorname{sgn} \left[\exp \left\{ j2\pi \frac{x_1}{p} \right\} \right] + \operatorname{sgn} \left[\exp \left\{ -j2\pi \frac{W(x_0, y)(\operatorname{tg}\alpha_x + \operatorname{tg}\beta_x)}{p} \right\} \right] \right), \quad (6)$$

kde druhý a třetí člen v závorce jsou původní periodické struktury a třetí člen je výsledný moiré obrazec. Po vyjádření fáze tohoto třetího členu se získá vztah pro topografickou výchylku

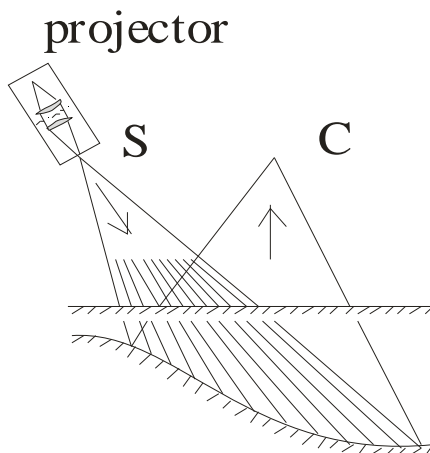
$$W(x_0, y) = \frac{N(x, y)p}{\operatorname{tg}\alpha_x + \operatorname{tg}\beta_x}, \quad (7)$$

kde $N(x, y)$ je řád moiré proužků. Je tedy vidět, že topografická výchylka je dána řádem moiré proužků. Tento vztah je výchozí pro různé modifikace této metody.

Projekční moiré topografie. V této metodě vzniká moiré obrazec překryvem dvou světelných mřížek, nepoužívá se tedy reálný rastr. Tento překryv se uskutečňuje buď v počítači (jednoprojektorová moiré) nebo přímo na povrchu tělesa (dvouprojektorová moiré).

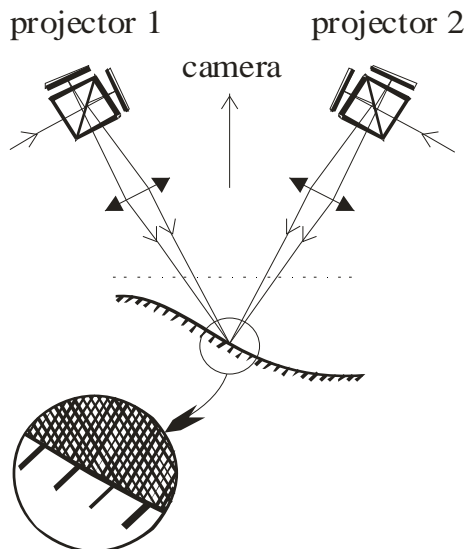
U metody jednoho projektoru dále rozeznáváme měření deformací a topografické měření. Při měření deformace je povrch tělesa osvětlen světelnou mřížkou nejprve před deformací a pak po ní. Tyto dva záznamy jsou uloženy do počítače, kde dojde k jejich součtu. Ve výsledné dvojexpozici lze pozorovat moiré proužky, ze kterých se vyhodnotí velikost deformace.

Při měření topografické výchylky je předmětová mřížka pozorována přes rastr, který vytvoří referenční mřížku. Opět je možno ve výsledku pozorovat moiré obrazec. Odvození vztahu pro topografickou výchylku je obdobné analogické, s odvozením pro stínovou moiré v předchozí kapitole, výsledné vztahy si formálně odpovídají. Princip metody jednoho projektoru je zobrazen na obr.4.



Obr.4 Měřicí soustava při jednoprojektorové moiré.

U metody dvou projektorů je možno pozorovat moiré obrazec přímo na předmětu. Na povrch jsou totiž promítány dvě předmětové mřížky, které jsou promítány pod odlišným úhlem, jak je zobrazeno na obr.5. Velkou výhodou této metody je to, že tvar mřížky nezávisí na úhlu pozorování. Můžeme ji tedy pozorovat pod libovolným úhlem, nejlépe takovým, který bude vzhledem k technické realizaci a tvaru předmětu nejvhodnější.



Obr.5 Měřicí soustava při dvouprojektorové moiré.

Fourierovská profilometrie

Tato nekoherentní profilometrická metoda je založena na digitálním snímání měřeného objektu, na kterém je promítnuta periodická optická struktura, do počítače, kde snímek následně projde Fourierovou transformací. Ta dává informaci o fázi světla odraženého od předmětu a tudíž o profilu předmětu.

Na předmět je promítnuta sinusová nebo Ronchiho mřížka. Ta se profilem předmětu deformuje, což se projeví na fázi odražené mřížky, která je detekována a uložena do počítače. Zde se provádí Fourierova transformace, která slouží k získání informace o hledané fázi. Z této fáze a geometrického uspořádání experimentu lze pak získat profil předmětu. Získaný obraz lze popsat funkcí

$$g(x, y) = I_0(x, y) + [1 + V(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \Phi(x, y))], \quad (8)$$

kde I_0 je intenzita pozadí, V je viditelnost proužků, f_0 je frekvence ve směru x a Φ je fáze. Obdobně je popsána mřížka na referenční rovině a to vztahem

$$g_0(x, y) = I_0(x, y) + [1 + V(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y))]. \quad (9)$$

Pokud provádíme jednorozměrnou Fourierovu transformaci těchto funkcí ve směru x , budou Fourierova spektra vypadat následovně

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp(-2\pi i f x) dx, \quad (10)$$

$$G_0(f, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x, y) \exp(-2\pi i f x) dx. \quad (11)$$

Fourierovo spektrum odpovídající frekvenci f_0 je zachováno, ostatní se odfiltrují. Poté provedeme zpětnou Fourierovu transformaci

$$\hat{g}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \Phi(x, y)]\} \quad (12)$$

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y)]\}, \quad (13)$$

kde A_1 je konstantní, r je amplitudová variace.

Fáze těchto komplexních signálů je dána vztahy

$$\Phi(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}[\hat{g}(x, y)]}{\operatorname{Re}[\hat{g}(x, y)]} \right] \quad (14)$$

$$\Phi_0(x, y) = \operatorname{arctg} \left[\frac{\operatorname{Im}[\hat{g}_0(x, y)]}{\operatorname{Re}[\hat{g}_0(x, y)]} \right]. \quad (15)$$

Pro získání informací o fázi ve dvou rozměrech se použije stejný postup, jen pro souřadnici y . Pro změnu fáze platí vztah

$$\Delta\Phi(x, y) = \Delta\Phi_u(x, y) - \Delta\Phi_{0u}(x, y). \quad (16)$$

Topografická výchylka je pak dána vztahem

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

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

3-D skenovací profilometrie

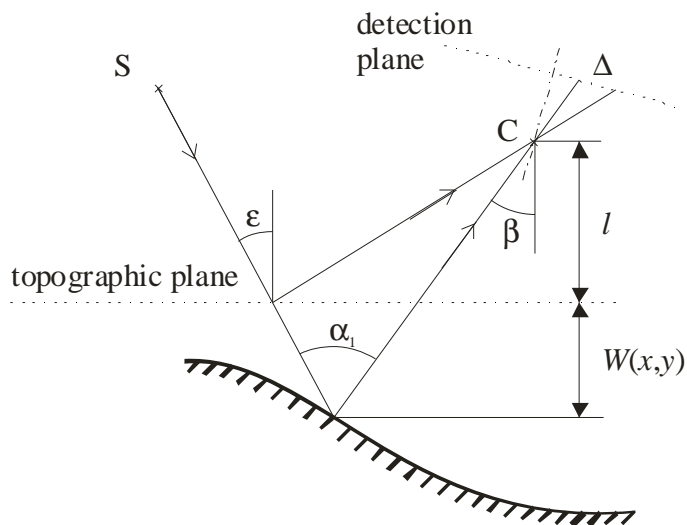
Tato nekoherentní profilometrická metoda spočívá v projekci lineární stopy na měřený povrch. Stopa, která je na povrchu objektu deformována, se snímá a z velikosti a tvaru deformace a geometrického uspořádání měřicí soustavy se vypočítá topografická výchylka Δr . Tato výchylka je popsána vztahem

$$\Delta r = \frac{\Delta u}{b + a\Delta u}, \quad (18)$$

kde a , b jsou parametry mapovacího algoritmu, popřípadě vztahem

$$\Delta r = c_1 \Delta u - c_2 (\Delta u)^2, \quad (19)$$

kde c_1 a c_2 jsou parametry citlivosti. Princip této metody je zobrazen na obr.6.



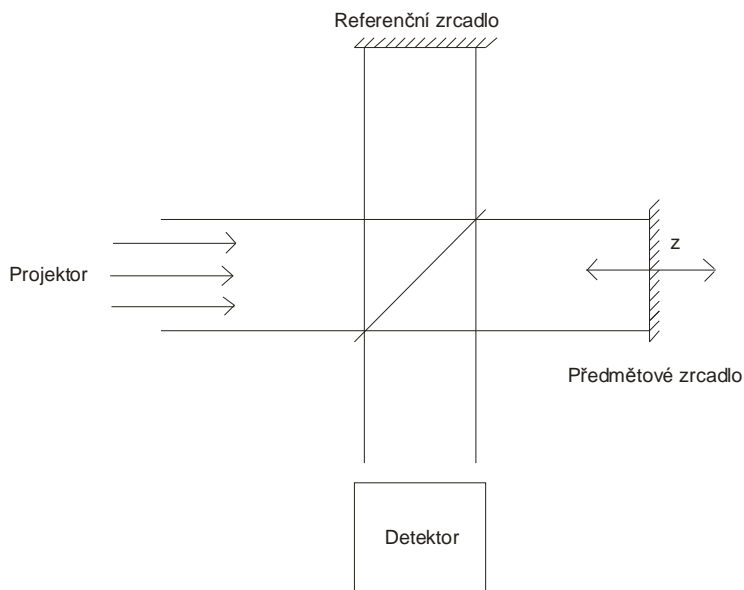
Obr.6 Geometrie 3D skenovací topografie.

Vypočtená hledaná odchylka Δr je vlastně odchylka povrchu předmětu v daném místě od referenční roviny, na kterou se zařízení před vlastním měřením kalibruje. Do této roviny se umístí měřený předmět a provede se měření. Promítanou stopou může kupříkladu být laserový svazek, který se průchodem čočkou v jednom směru roztáhne a vytvoří proužek. Detekcí a výpočtem se vlastně stanoví výchylka ve všech bodech tohoto proužku. Dle velikosti a tvaru objektu se vhodně stanoví vzdálenosti, o které se stopa mezi jednotlivým skenováním posune. Stopa je obvykle nasnímána do počítače, ve kterém lze obraz vhodně upravit, a vypočte se odchylka od referenční roviny. Posledním krokem bývá vizualizace měřeného objektu. V počítači se vytvoří trojrozměrný virtuální obraz měřeného předmětu. Tento virtuální obraz lze také proložit etalonem daného předmětu a porovnat přímo rozdíly.

Interferometrie v bílém světle

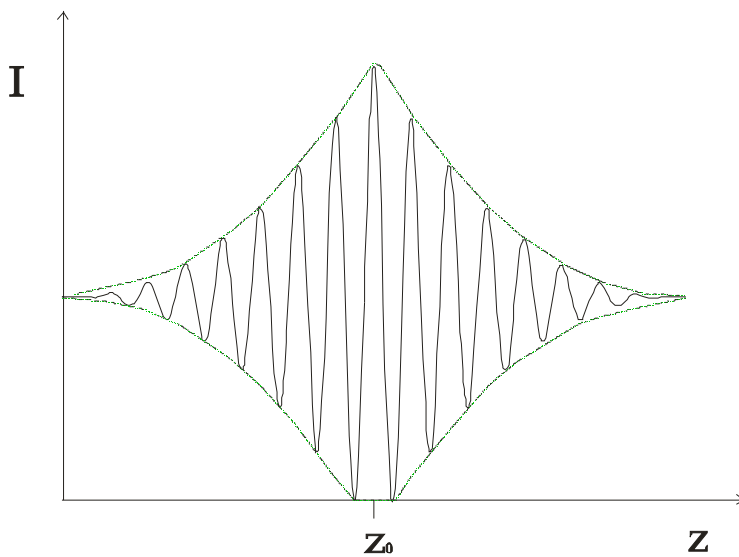
Tato koherentní profilometrická metoda využívá na rozdíl od předchozích metod interference v bílém světle světlo s velkou spektrální šířkou (proto název „bílé“ světlo). Jako zdroj se používá žárovka, častěji svítící dioda. Výhodou této metody je, že ji lze použít i k měření povrchů drsných předmětů a k měření zářezů a hlubokých děr, neboť u této metody nevznikají stíny.

Pro jednoduchost se u této metody používá Michelsonova interferometru, který je zobrazen na obr.7.



Obr.7 Michelsonův interferometr.

Pokud se předmětové zrcadlo pohybuje ve směru osy z , bude se měnit intenzita světla na detektoru. Závislost této intenzity na poloze objektového zrcadla se nazývá interferogram a je zobrazena na obr.8.



Obr.8 Interferogram.

Je vidět, že v okolí jistého bodu z_0 je tato modulace intenzity nejvýraznější. Je to bod, ve kterém je vzdálenost předmětového a referenčního zrcadla stejná. Rozsah poloh předmětového zrcadla, pro které je modulace intenzity patrná, se nazývá šířka interefogramu. Ta je přímo úměrná koherentní délce světla a nepřímo úměrná jeho spektrální šířce. Závislost intenzity I je popsána vztahem

$$I = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[- \left(\frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \right\}, \quad (20)$$

kde l_c je koherentní délka gaussovského světla, λ_0 je střední vlnová délka a I_0 je intenzita zdroje.

Při experimentálním uspořádání je v jednom ramenu referenční zrcadlo, v druhém měřený objekt. Světlo je kolimováno čočkou a rozděleno v optickém děliči. Jedna část dopadá na měřený objekt, druhá na referenční zrcadlo. Jejich superpozice se snímá detektorem pro další vyhodnocení.

Při osvětlení drsného povrchu na něm vznikají tzv. speckly, což je jemná zrnitá struktura, která vzniká v důsledku odrazu koherentního světla od rozptýlujícího povrchu. Tyto speckly jsou CCD kamerou zaznamenávány. Měřený objekt je umístěn na mikroposuvu, kterým je posouván tak, aby procházel referenční rovinou. Každý spekl má přitom vlastní modulaci intenzity. Pokud je tato maximální, nachází se spekl na povrchu předmětu právě v referenční rovině interferometru a je odečtena hodnota na mikroposuvu. Takto jsou vyhodnoceny všechny pixely na CCD kameře (ideální je, pokud jeden spekl odpovídá jednomu pixelu kamery). Tímto postupem se získá celý geometrický profil měřeného předmětu.

Mgr. Michal Pochmon

Optické měřicí 3D 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

Olomouc 2012

1. vydání

ISBN 978-80-244-3072-0

Neprodejné