

3-D OPTICAL SCANNING TOPOGRAPHY

3D OPTICKÁ SKENOVACÍ TOPOGRAFIE

Libor Nožka, Dušan Mandát¹, Miroslav Hrabovský²

This paper refers to the theory of new optical noncontact topographic measurement method of objects with diffuse surface. It uses laser strip made by cylinder lens to illuminate object in question. The image of the strip on the object is then captured on CCD camera and analyzed later on in computer. This method is capable of speedy and accurate measurement without determination of any geometric parameter.

Keywords

topography, moire, image analysis, trigonometric algorithm, digital imaging
topografie, moiré, obrazová analýza, trigonometrický algoritmus, digitální zobrazení

Úvod

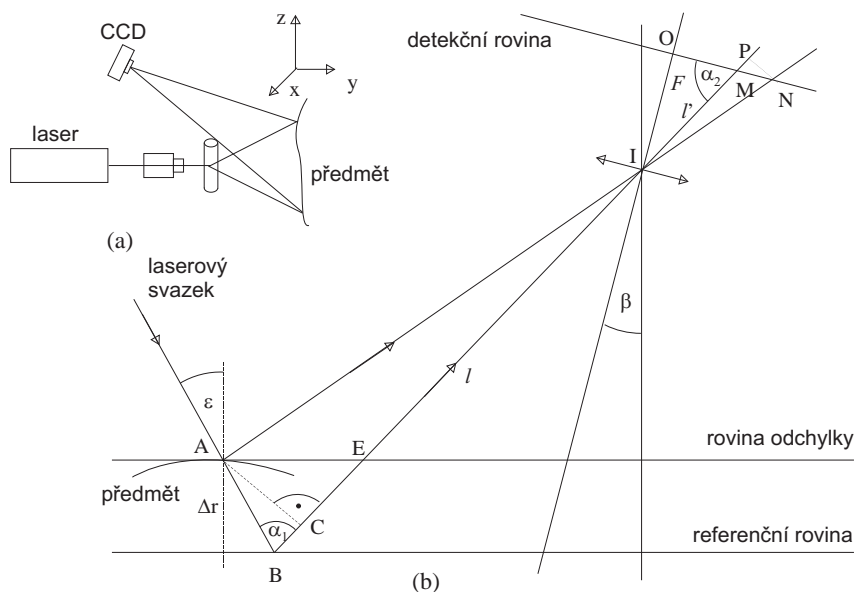
V posledním desetiletí, s rozvojem výpočetní techniky, zaznamenaly bezkontaktní optické metody v topografii velký rozvoj. Velký důraz je přitom kladen na rychlé a automatické zpracování dat. V současnosti nejpřesnější měření poskytují holografické a interferenční metody [1]. Jejich výhodou je velká přesnost a plošné měření. Nevýhodou jsou velká citlivost na otřesy (obzvláště v holografii) a náročné, v mnoha případech téměř nemožné, automatické zpracování. Další používanou metodou je moiré interferometrie [2, 3, 4]. Její citlivost je menší než u předchozích metod, ale uspořádání je jednodušší a méně citlivé na mechanické vibrace. Metoda skenovací topografie [5] má k moiré metodám nejbližší, moiré interferogram lze vytvořit v paměti počítače [6] a analyzovat jej metodami obvyklými v moiré interferometrii (metoda fázového posuvu [7], filtrace Fourierového spektra [8] apod.). Tato analýza by však byla v mnoha případech algoritmicky a výpočetně náročná. Výhodou skenovací topografie je právě možnost rychlého a automatického vyhodnocení s použitím trigonometrických algoritmů. Proces měření tak lze jednoduše automatizovat. Nevýhodou je menší přesnost měření.

Geometrie experimentu

Geometrické uspořádání měření je na obr. 1a. Svazek světla vycházející z laserového zdroje prochází optickou soustavou tvořenou mikroskopovým objektivem a válcovou čočkou, která jej

¹Mgr. Libor Nožka, Mgr. Dušan Mandát, Společná laboratoř optiky UP a FzÚ AV ČR, Olomouc, tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: +420585631573, e-mail: nozka@sloup.upol.cz, nozka@optnw.upol.cz, mandat@sloup.upol.cz, mandat@optnw.upol.cz

²doc. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc., Společná laboratoř optiky UP a FzÚ AV ČR, Olomouc, tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: +420585631501, e-mail: hrabovsky@sloup.upol.cz, hrabovsky@optnw.upol.cz



obr. 1: Geometrické uspořádání měřicí metody

upraví na proužek (ve směru osy z) fokusovaný v tangenciální rovině blízko referenční roviny, od které se počítá profil měřeného povrchu. Světelná stopa (proužek) dopadá na členitý povrch předmětu a ve směru pozorování (optická osa CCD kamery) se tento proužek jeví jako deformovaný. Z polohy proužku v detekčním poli kamery potom můžeme zpětně určit profil povrchu předmětu. Pro výpočet přepočtového algoritmu využijeme obr. 1b (převzato z [5]). Laserový svazek dopadá pod úhlem ϵ na referenční rovinu do bodu B . V detekčním poli kamery, jejíž optická osa je vzhledem k normále referenční roviny nakloněna o úhel β , je bod B zobrazen v bodě M . Při měření povrchu předmětu dopadá světelný svazek do bodu A v rovině odchyšky. V detekčním poli kamery se bod A zobrazí do bodu N . Z rozdílu $\Delta u = \overline{NM}$ vypočítáme vzdálenost Δr . Z podobnosti trojúhelníků $\triangle AIC$ a $\triangle NIP$ plyne rovnost

$$\frac{\overline{IC}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{IP}}{\overline{NP}} \Leftrightarrow \frac{l - \Delta r \cos \alpha_1 / \cos \epsilon}{\Delta r \sin \alpha_1 / \cos \epsilon} = \frac{l' + \Delta u \cos \alpha_2}{\Delta u \sin \alpha_2} . \quad (1)$$

Zavedeme-li parametry $a(z)$ a $b(z)$ vztahy

$$a(z) = \frac{\sin \alpha_1 (\cot \alpha_1 + \cot \alpha_2)}{l \cos \epsilon} [mm^{-1}] , \quad (2)$$

$$b(z) = \frac{l' \sin \alpha_1}{l \cos \epsilon \sin \alpha_2} [pix] , \quad (3)$$

můžeme psát

$$\frac{1}{\Delta r} = a(z) + \frac{b(z)}{\Delta u} . \quad (4)$$

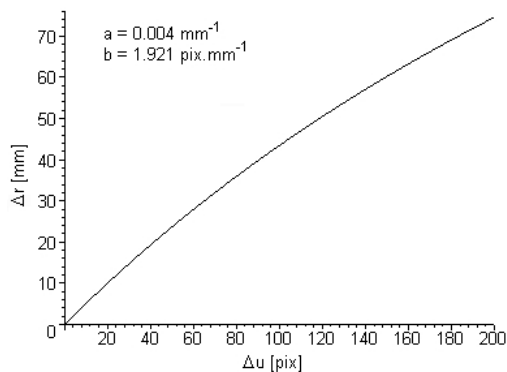
Parametry a , b jsou určeny parametry ϵ , α_1 , α_2 , l , l' vztahujícími se k referenční rovině, lze je tedy plně určit kalibrací. Závislost parametrů a , b na souřadnici z se projevuje při stočení detekční roviny CCD prvku vzhledem k ose z a při měření velkých objektů vlivem optických vad objektivu kamery. Vztah (4) lze přepsat do tvaru

$$\Delta r = \frac{\Delta u}{b + a\Delta u} . \quad (5)$$

McLaurenův rozvoj posledního vztahu je

$$\Delta r \approx \frac{1}{b} \Delta u - \frac{a}{b} (\Delta u)^2 = \frac{\Delta u}{b} (1 - a \Delta u) . \quad (6)$$

Odtud můžeme přibližně určit oblast linearity mapovacího algoritmu. S ohledem na citlivost metody položíme $a \Delta u_{\text{lin}} \approx 0,1$. Odtud $\Delta u_{\text{lin}} \approx 1/(10a)$. Na obrázku 2 je průběh závislosti Δr na Δu podle rovnice (5) pro $a = 0.004 \text{ mm}^{-1}$ a $b = 1.191 \text{ pix} \cdot \text{mm}^{-1}$. Průběh lze považovat za přibližně lineární pro $\Delta u_{\text{lin}} \approx 25 \text{ pix}$. Ze vztahu (5) můžeme určit citlivost měřicí sestavy, tedy



obr. 2: Průběh Δr v závislosti na Δu

jakou minimální změnu c výchylky měřeného předmětu je třeba provést, aby se obraz proužku na CCD prvku posunul o jeden pixel neboli o rozměr PS jednoho obrazového bodu. Dosadíme-li $\Delta r = c$ a $\Delta u = PS$ dostáváme s ohledem na vztahy (2) a (3) po úpravě vztah

$$c = \frac{l \cos \epsilon \sin \alpha PS}{l' \sin \alpha_1 + \sin (\alpha_1 + \alpha_2) PS} . \quad (7)$$

Pro účely kalibrace je vhodné uvádět parametr b v jednotkách [pix/mm]. Tímto pro citlivost měřicí sestavy dostaneme jednoduchý vztah

$$c = \frac{1}{a + b} . \quad (8)$$

Z rovnice (7) můžeme usuzovat, že na zvýšení citlivosti má příznivý vliv zvětšení úhlu ϵ promítání světelného proužku na referenční rovinu, zmenšení vzdálenosti kamery od referenční roviny (parametry l , α_2) nebo použití objektivu s menší ohniskovou vzdáleností (skrze parametr l') a CCD prvku s menšími rozměry PS obrazového bodu.

Analýza nejistoty měření

K analýze chyb měření diferencujeme vztah (5). Po jednoduchých úpravách dostaneme

$$\delta(\Delta r) = \left(\frac{b}{(b + a \Delta u)^2} \right) \delta(\Delta u) + (\Delta r)^2 \left(\delta a + \frac{1}{\Delta u} \delta b \right) . \quad (9)$$

Nejistoty určení parametrů a , b vyplývají z kalibrace. Přepíšme rovnici (4) do tvaru

$$y = a + bx , \quad (10)$$

kde $y = 1/\Delta v$, $x = 1/\Delta p$, Δv je vzdálenost mezi referenčními rovinami při kalibraci a Δp odpovídající rozdíl poloh proužků v detekčním poli kamery. Diferenciací rovnice (10) dostaneme

$$\delta y = \delta a + x\delta b + b\delta x \wedge \delta y = -\left(\frac{1}{\Delta v}\right)^2 \delta(\Delta v), \delta x = -\left(\frac{1}{\Delta p}\right)^2 \delta(\Delta p) . \quad (11)$$

Odtud

$$\delta a + \frac{1}{\Delta p}\delta b = -\left(\frac{1}{\Delta v}\right)^2 \delta(\Delta v) + b\left(\frac{1}{\Delta p}\right)^2 \delta(\Delta p) . \quad (12)$$

Tento vztah dosadíme do rovnice (9) (položíme $\Delta p = \Delta u$ a $\delta(\Delta p) = \delta(\Delta u)$). Po úpravách dostaneme

$$\delta(\Delta r) = \left|\frac{2b}{(b+a\Delta u)^2}\right| \delta(\Delta p) + \left(\frac{\Delta r}{\Delta v}\right)^2 \delta(\Delta v) \approx \left|\frac{2b}{(b+a\Delta u)^2}\right| \delta(\Delta p) + \delta(\Delta v) . \quad (13)$$

Pokud se omezíme na lineární oblast měření ($\Delta u < \Delta u_{lin}$), můžeme výsledek dále zjednodušit na tvar

$$\delta(\Delta r) = \left|\frac{2}{b}\right| \delta(\Delta p) + \delta(\Delta v) . \quad (14)$$

Odtud plyne, že pro přesnost měření má kritický vliv nejistota určení polohy proužku $\delta(\Delta p)$. Poloha proužku musí být určena s přesností pod rozměr jednoho pixelu.

Kalibrace soustavy

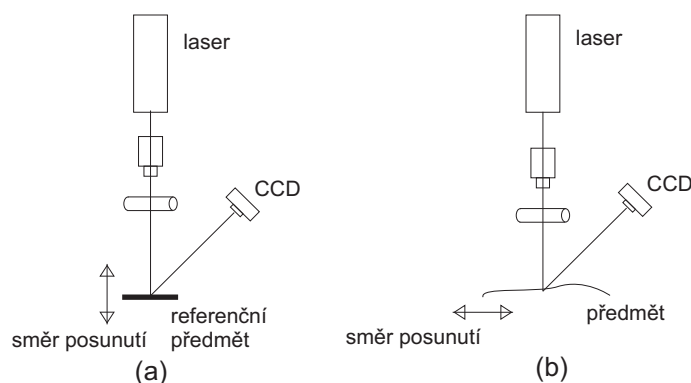
Před měřením je třeba zjistit parametry a a b . To zajistíme kalibrací měřicí soustavy. Vhodný způsob kalibrace je naznačen na obrázku 3a. Posuvný stolek s vhodným referenčním předmětem (nejlépe ve tvaru kvádrů) je nastaven tak, abychom jím realizovali posun ve směru promítání laserového svazku (optická osa zobrazovací soustavy). Definovanou změnou polohy Δv referenčního předmětu a příslušným odečtením změny polohy Δp obrazu proužku v kameře můžeme určit parametry a a b . Označme y_i i-tou změnu polohy Δv_i předmětu vzhledem k libovolné ze známých poloh předmětu a x_i příslušnou změnu polohy obrazu proužku v kameře. Pak, podobně jako v rovnici (10), můžeme rovnici (4) přepsat na tvar

$$y_i = a(z) + b(z)x_i . \quad (15)$$

Odtud určíme parametry a a b regresní analýzou aproximací polynomem prvního stupně. Každá aproximace se přitom vztahuje k jedné z definovaných poloh referenčního předmětu. Při vlastní topografii testovaného povrchu (naznačeno na obrázku 3b) vztáhneme naměřené výchylky Δr k vybrané poloze referenčního předmětu (poloha referenční roviny).

Experiment

Měřicí sestava byla upravena z He-Ne laserové trubice ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), mikroskopového objektivu a válcové čočky. V této sestavě byl proužek fokusován ve vzdálenosti 525 mm od válcové čočky. V této vzdálenosti byl umístěn posuvný stolek s pravoúhlým referenčním předmětem. Optická osa kamery s CMOS chipem (systém EPIX, ohnisková vzdálenost objektivu 16 mm, rozlišení CMOS prvku 1288×1024 , velikost pixelu $7,5 \mu\text{m}$, nastavené rozlišení 8 bitů) svírala s optickou osou zobrazovací části úhel $\beta = 50^\circ$, kamera byla vzdálena 235 mm od optické osy zobrazovací soustavy a 500 mm od roviny fokusace světelného proužku.



obr. 3: Směr posunu při (a) kalibraci, (b) měření

Kalibrace

Při snímání obrazu CCD kamery bylo využito programu XCAP dodávaným spolu se systémem EPIX. Při kalibraci bylo nasnímáno a uloženo celkem 20 definovaných poloh referenčního předmětu. Poté byla softwarově provedena nezbytná analýza poloh proužků a výpočet parametrů a a b . Proužky byly naprahovány hodnotou 230 (při osmibitovém rozlišení). Poté metodou váženého průměrování byla v každém řádku proužku stanovena střední hodnota polohy proužku. Z těchto hodnot byl poté regresní analýzou proužek aproximován polynomem 1. stupně. Z těchto aproximací a známých poloh referenčního předmětu pak následoval výpočet parametrů a a b .

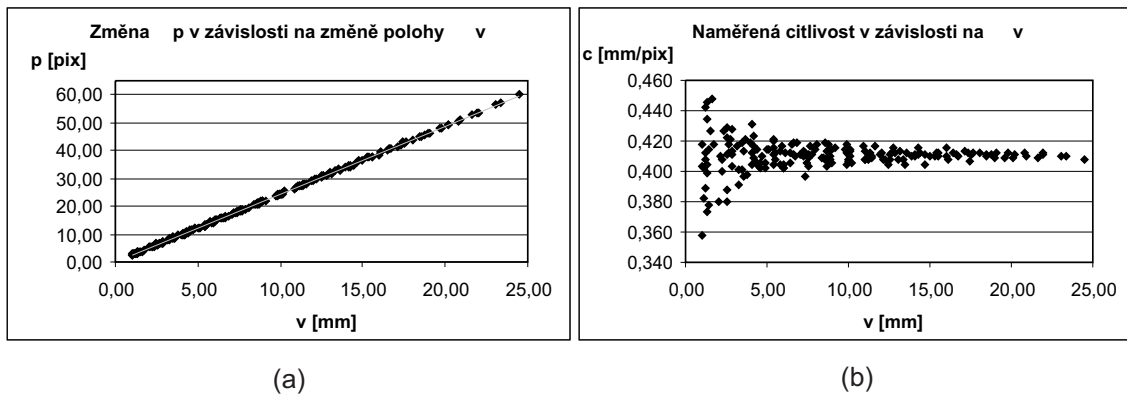
Na obrázku 4a je průběh posunutí obrazu proužku v kameře v závislosti na posunutí referenčního hranolu. Sklon spojnice trendu je 2,435 pix/mm. Na obrázku 4b jsou odpovídající hodnoty citlivosti měřící sestavy. Citlivost vypočtená mezi blízkými proužky ($\Delta v < 5$ mm) vykazuje určitou disperzi vlivem kvantizačního šumu způsobeného konečným rozměrem obrazového bodu CCD prvku; střední hodnota citlivosti je pro dané geometrické uspořádání 0,41 pix/mm a odpovídá sklonu spojnice trendu na obrázku 4a. Na obrázku 5 jsou znázorněny hodnoty kalibračních parametrů a a b pro některé z kalibračních proužků. V tabulce 1 jsou uvedeny aproximace některých proužků v závislosti na vertikální poloze proužku y v detekční rovině. Z tabulky plyne, že parametry a , b jsou prakticky konstantní ve svislé ose y detekční roviny.

proužek	v [mm]	aprox. [pix]	y_{min} [pix]	y_{max} [pix]	approx a [1/mm]	approx b [pix/mm]
01	11,17	$0,006y + 159,740$	75	258	$-0.00014 + 0.0000015y$	$2.46149 - 0.000219y$
05	16,70	$0,003y + 173,574$	73	258	$-0.00007 + 0.0000018y$	$2.41329 - 0.000009y$
10	23,20	$0,007y + 188,758$	72	258	$+0.00090 - 0.0000029y$	$2.43124 + 0.000019y$
15	29,60	$0,004y + 204,799$	70	258	$-0.00006 + 0.0000018y$	$2.44013 + 0.000089y$

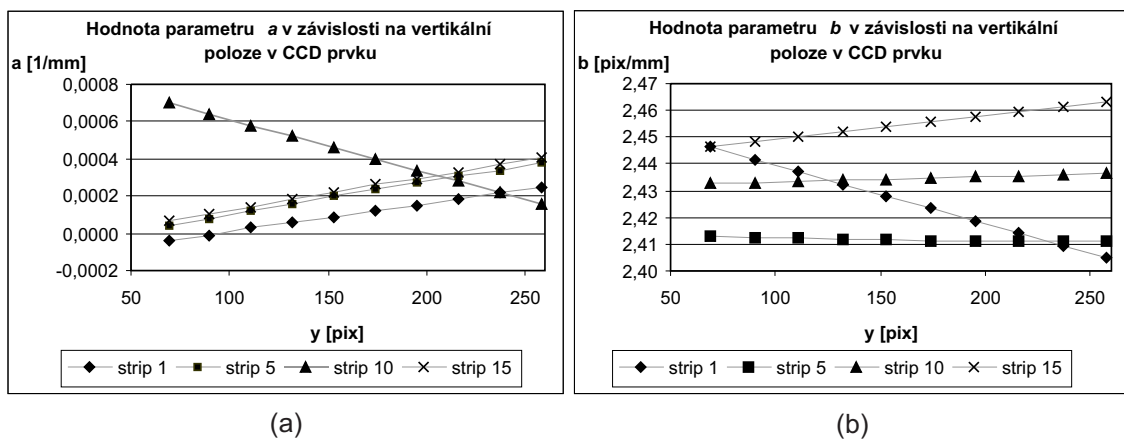
Tab. 1: Aproximace obrazu proužků a parametrů a , b

Měření

Po kalibraci bylo provedeno ověření naměřených kalibračních parametrů a a b . Referenční hranol byl nastaven do dvou definovaných poloh vzájemně posunutých o 8,60 mm a nasnímány příslušné obrazy proužků. Z jejich vzájemného posunutí bylo vypočítáno vzájemné posunutí obou poloh. V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené polohy obou proužků vzhledem k prvnímu referenčnímu proužku a graficky jsou znázorněny na obrázku 6. Maximální odchylka měření je 0,23 mm. Pro dosažení větší přesnosti měření bude v budoucnu použito dvoukamerového



obr. 4: Výsledky kalibrace



obr. 5: Hodnoty kalibračních parametrů

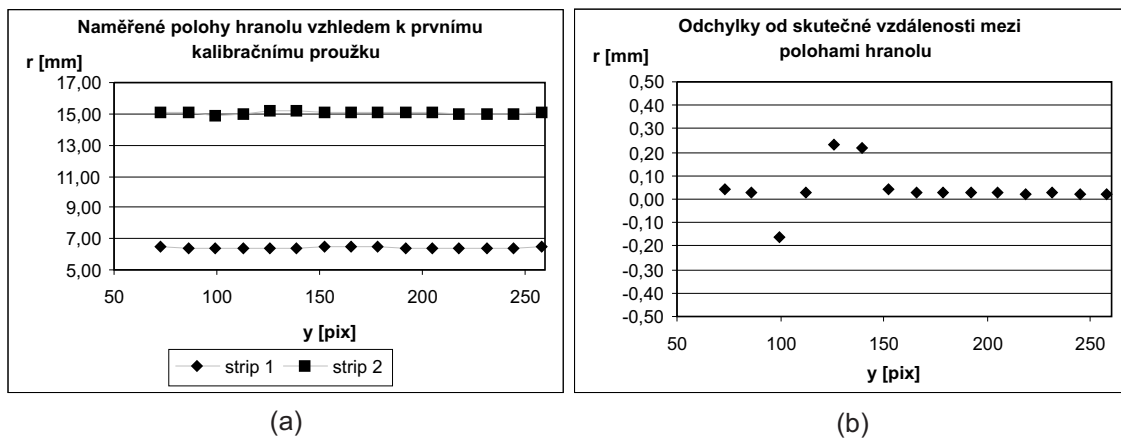
snímání obrazu a vylepšené metody analýzy obrazu. Výhoda počítačového zpracování se projevuje v následném zpracování naměřených dat. Aplikací standardizovaných formátů používaných v počítačové grafice lze naměřená data snadno zobrazit. Na obrázku 7 je příklad zobrazení topografie lopatky oběžného kola čerpadla ve formátu VRML.

Závěr

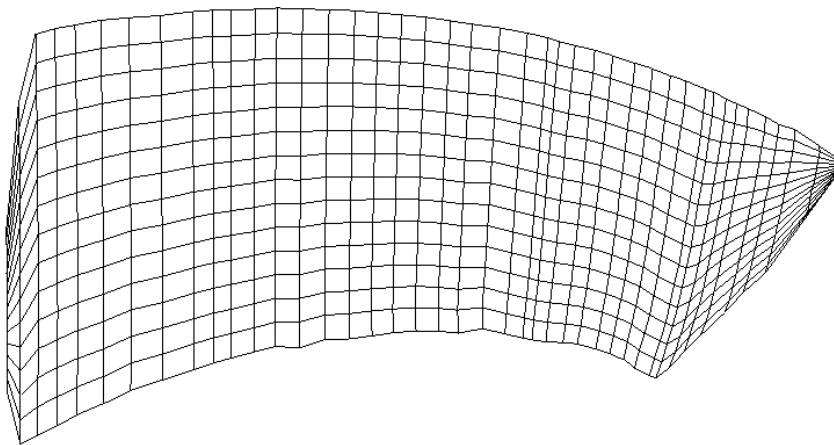
V článku byl představen mapovací algoritmus pro 3D topografii povrchu předmětů. Výpočet je založen na vhodné kalibraci bez nutnosti znalosti geometrických parametrů měřicí sestavy. Výhodou uvedené metody je možnost rychlého a automatizovaného měření, nevýhodou je menší přesnost měření než u holografických a interferenčních metod. K dosažení lepších výsledků se v dalším počítá s použitím dvoukamerového snímání obrazu, dále pak se zpřesněním aproximace polohy naměřených proužků.

y [pix]	r_1 [mm]	r_2 [mm]	Δr [mm]	δr [mm]	y [pix]	r_1 [mm]	r_2 [mm]	Δr [mm]	δr [mm]
73	6,45	15,09	8,64	0,04	179	6,46	15,09	8,63	0,03
86	6,43	15,06	8,63	0,03	192	6,43	15,06	8,63	0,03
99	6,40	14,84	8,44	-0,16	205	6,41	15,04	8,63	0,03
113	6,38	15,01	8,63	0,03	218	6,39	15,01	8,62	0,02
126	6,35	15,18	8,83	0,23	232	6,36	14,99	8,63	0,03
139	6,33	15,15	8,82	0,22	245	6,34	14,96	8,62	0,02
152	6,50	15,14	8,64	0,04	258	6,51	15,13	8,62	0,02
166	6,48	15,11	8,63	0,03					

Tab. 2: Naměřené posunutí Δr při testování algoritmu



obr. 6: Ověření mapovacího algoritmu



obr. 7: Mapa měřené čerpadlové lopatky

Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního příspěví Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje LN00A015.

Literatura

- [1] POST D., HAN B., IFJU P.: Hight sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials. New York, Springer-Verlag, 1994.
- [2] TAKASAKI, H.: Moiré topography. *Applied Optics*, June 1970, vol. 9, no. 6, p. 1467-1472.
- [3] HRABOVSKÝ, M., KEPRT J., BARTOŇEK L.: Testing of a form of a pump blade by optical moiré topography. *SPIE Proc.*, 1999, vol. 3820, p. 161-168.
- [4] KEPRT J., VYHNÁNKOVÁ R., BARTOŇEK L.: Shadow moiré topography. Theory and application. *Acta UP Ol. Fac. Rer. Nat., Physica*, 1998, vol. 37, p. 137-159.
- [5] ASUNDI A., ZHOU W.: Mapping algorithm for 360-deg profilometry with time delayed integration imaging. *Optical Engineering*, Feb. 1999, vol. 38, no. 2, p. 339-343.
- [6] ASUNDI A., SAJAN M.R.: Digital moiré applications in automated inspection. *SPIE Proc.*, 1994, vol. 2347, p. 270-275.
- [7] SRINIVASAN V., LIU H.C., HALIOUA M.: Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Applied Optics*, Sept. 1984, vol. 23, no. 18, p. 3105-3108.
- [8] TAKEDA M., MUTOH K.: Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, Dec. 1983, vol. 22, no. 24, p. 3977-3983.