

SIMPLE LASER SPECKLE STRAIN GAUGE**JEDNODUCHÝ OPTICKÝ TENZOMETR****Hrabovský M.**

The paper submits teoretical substantiation and methodical procedure at utilization of simple optical strain gauge, based on principle of correlation analysis of speckle field on surface of investigated subject.

1. ÚVOD

Historie holografie a zejména holografické interferometrie je poznamenána snahou "vynechat" z rize praktických důvodů tzv. mokrý proces záznamu na fotografickou emulsi. Popis jevu koherenční zrnitosti a jeho aplikace na problémy analýzy posuvu a deformací těles přidal ke klasické holografické interferometrii další možnosti, avšak uvedený problém nebyl uspokojivě řešen. V polovině sedmdesátých let se objevují snahy tento problém řešit, například metodou ESPI (electronic speckle pattern interferometry), kdy informace o deformaci povrchu tělesa je získána ze superpozice polí koherenční zrnitosti pomocí TV techniky.

Jedním z novějších směrů je metoda založená na korelační analýze intenzitních polí koherenční zrnitosti před a po deformaci studovaného povrchu. Princip vychází ze skutečnosti, že pole objektivní koherenční zrnitosti povrchu tělesa se pohybuje společně s tímto povrchem, přičemž míra posuvu pole koherenční zrnitosti je závislá na geometrii uspořádání experimentu (uspořádání osvětlení povrchu tělesa a snímání intenzitního

pole koherenční zrnitosti) a charakteru posuvu studovaného povrchu. Obecně lze touto metodou stanovit tensor deformace elementu povrchu studovaného předmětu. Obecně lze také k tomuto problému z hlediska optického přistoupit principiálně popisem pole koherenční zrnitosti v difrakčním nebo obrazovém poli. Jde tedy o problematiku teoreticky i prakticky rozsáhlou přesahující rámec tohoto referátu. Lze konstatovat, že po popisu analýzy tenzoru deformace elementu povrchu předmětu pomocí klasické holografické interferometrie [1,2,3] jde o nový kvalitativní krok v experimentální analýze napětí. Jako nejjednodušší z hlediska následného praktického využití se jeví postup založený na korelaci intenzit koherenční zrnitosti před a po deformaci elementu povrchu předmětu v tzv. volném difrakčním poli (free-space geometry). Zjednodušíme-li dále tento přístup na studium jevu v jedné ose kartézského souřadnicového systému, dostáváme jakousi "náhradu či konkurenci" klasického jednoduchého např. odporového tenzometru, tzv. jednoduchý optický tenzometr na principu koherenční zrnitosti (laser speckle strain gauge).

2. KORELACE INTENZIT POLÍ KOHERENČNÍ ZRNITOSTI VE VOLNÉM DIFRAKČNÍM POLI

Problematiku malých deformací předmětu ve volném difrakčním poli systematicky teoreticky popsal I. Yamaguchi [4], přičemž vycházel z řady prací zabývajících se problematikou aplikace holografické a speckle interferometrie v oblasti analýzy deformace a napětí.

Posuv elementu povrchu předmětu $a_1(a_x, a_y)$ v tečné rovině (x, y) podle obr. 1 lze popsat normalizovanou funkcí vzájemné korelace průběhů intenzity $I_1(X, Y)$ a $I_2(X+\bar{X}; Y+\bar{Y})$ koherenční zrnitosti před a po deformaci výrazem

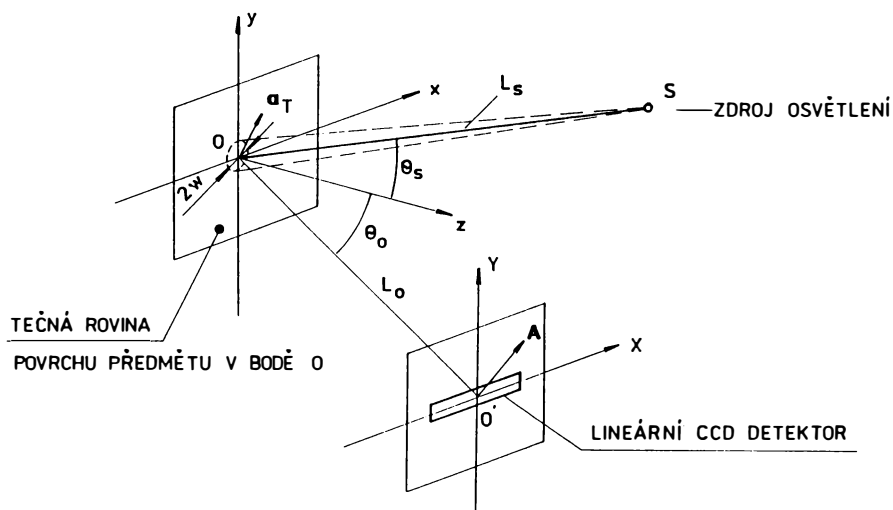
$$\begin{aligned} & \langle I_1(X, Y, L_0) \quad I_2(X+\bar{X}, Y+\bar{Y}, L_0) \rangle = \\ & = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left| \iint \left[I_0(x, y) \quad I_0(x+a_x, y+a_y) \right]^{1/2} \times \right. \\ & \times \exp \left\{ i k \left[x(\bar{X}-\bar{X}_x) \cos \theta_0 + y(\bar{Y}-\bar{Y}_y) \right] / L_0 \right\} dx dy \Big|^2 \times \\ & \times \left(\iint I_0(x, y) dx dy \right)^{-2}, \end{aligned} \quad (1)$$

kde $I_0(x, y)$ je intenzita záření dopadající na element povrchu předmětu v místě 0 s lokálním souřadnicovým systémem $O(x, y)$. Jestliže změna polohy bodu 0 v rovině (x, y) po deformaci odpovídá vektor $a_1(a_x, a_y)$, pak vektor

$A(A_x, A_y)$ v rovnici (1) odpovídá posuvu koherenční zrnitosti v rovině lineárního detektoru $O'(X, Y)$ - obr. 1 - a jeho složky mají podle [5] velikost

$$A_x = a_x \left[(L_o \cos^2 \theta_s / L_s \cos \theta_o) + \cos \theta_o \right], \quad (2)$$

$$A_y = a_y \left[(L_o / L_s) + 1 \right]. \quad (3)$$



Obr. 1 K principu stanovení posunutí ve směru osy x.

Jestliže osvětlovací svazek jako Gaussovský s malým úhlem dopadu θ_s , pak jeho intenzita $I_o(x, y)$ má tvar

$$I_o(x, y) = I_o(0) \exp \left[-(2/w^2) (x^2 \cos^2 \theta_s + y^2) \right], \quad (4)$$

kde poloměr w svazku na předmětu odpovídá $1/e^2$ maximu intenzity. Pak rovnice (1) má tvar

$$\begin{aligned} & \langle I_1(X, Y, L_o) I_2(X+\bar{X}, Y+\bar{Y}, L_o) \rangle = \\ & = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp \left[-(1/w^2) (a_x^2 \cos^2 \theta_s + a_y^2) - (\bar{X}-A_x)^2 / \delta X^2 - (\bar{Y}-A_y)^2 / \delta Y^2 \right], \end{aligned} \quad (5)$$

kde

$$\delta X = \lambda L_o \cos \theta_s / \pi w \cos \theta_o \quad (6)$$

$$\delta Y = \lambda L_o / \pi w. \quad (7)$$

Jestliže detektor na obr. 1 je lineární a je orientován ve směru osy X, pak výraz

$$\begin{aligned} & \langle I_1(X, Y, L_o) I_2(X + \bar{X}, Y + \bar{Y}, L_o) \rangle = \\ & = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp \left[-(1/w^2)(a_x^2 \cos^2 \theta_s + a_y^2) - (\bar{X} - A_x)^2 / \delta X^2 - A_y^2 / \delta Y^2 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Vektor $A(A_x, A_y)$ je definován jako posuv pole koherenční zrnitosti, protože funkce vzájemné korelace má své maximum platí-li $\bar{X} = A_x$, $\bar{Y} = A_y$. Jejich velikost podle [4] je

$$\begin{aligned} A_x = a_x \left(\frac{L_o \cos^2 \theta_s}{L_s \cos \theta_o} + \cos \theta_o \right) - a_z \left(\frac{L_o \cos \theta_s \sin \theta_s}{L_s \cos \theta_o} + \sin \theta_o \right) - \\ - L_o \left[\epsilon_{xx} \left(\frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_o} + \operatorname{tg} \theta_o \right) - \Omega_y \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_o} + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_y = a_y \left(\frac{L_o}{L_s} + 1 \right) - L_o \left[\epsilon_{xy} (\sin \theta_s + \sin \theta_o) - \Omega_x (\cos \theta_s + \cos \theta_o) - \right. \\ \left. - \Omega_z (\sin \theta_s + \sin \theta_o) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

kde (a_x, a_y, a_z) je posuv a $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ je rotace elementu jako tuhého tělesa a $(\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy})$ jsou komponenty poměrné deformace elementu jako pružného tělesa.

Jestliže posuv $a_T(a_x, a_y) \ll 2w$ a jestliže posuv koherenční zrnitosti A_y je menší než střední velikost koherenčního zrna (speckle), pak funkce vzájemné korelace má maximum pro $\bar{X} = A_x$. Rozdíl mezi registrovanými posuvy od dvou symetricky položených lineárních detektorů (obr. 2) je

$$\Delta A_x = A_x(\theta_s, \theta_o) - A_x(\theta_s, -\theta_o) = -2\epsilon_{xx} L_o (\operatorname{tg} \theta_o + \frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_o}) - 2a_z \sin \theta_o. \quad (11)$$

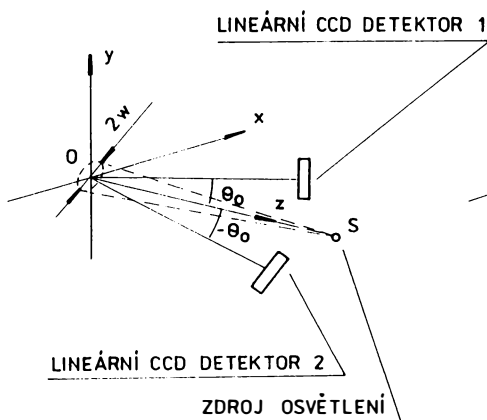
V případě obvyklého uspořádání, tj. osvětlení je ve směru normály elementu plochy je $\sin \theta_s = 0$.

Tento rozdíl je závislý, kromě geometrického uspořádání experimentu, pouze na poměrném prodloužení ϵ_{xx} a posuvu a_z ve směru osy z. Posuv a_z může být zanedbán v případě, že $|a_z| \ll |\epsilon_{xx}| L_o / \cos \theta_o$, pak poměrné

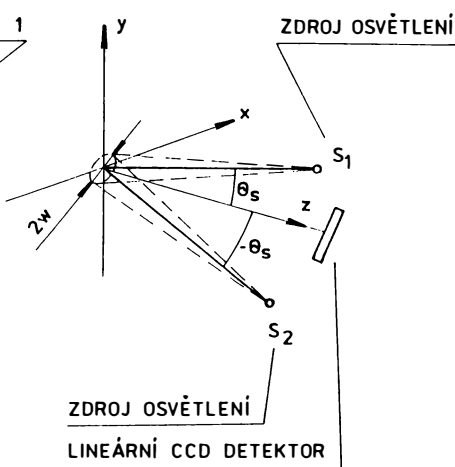
prodloužení

$$\epsilon_{xx} \doteq - \Delta A_x / 2L_o \operatorname{tg} \theta_o \quad (12)$$

závisí pouze na poloze detektorů (úhel θ_o a vzdálenost L_o).



Obr. 2 K principu stanovení deformace ve směru osy x.



Obr. 3 K principu stanovení deformace ve směru osy x.

V případě geometrického uspořádání se dvěma osvětlujícími svazky a jedním detektorem (obráz. 3) můžeme odvodit podobný závěr

$$\Delta A_x = A_x(\theta_s, \theta_o) - A_x(-\theta_s, \theta_o) = -2\epsilon_{xx} \frac{L_o \sin \theta_s}{\cos \theta_o} - 2a_z \frac{L_o \cos \theta_s \sin \theta_s}{L_s \cos \theta_o}, \quad (13)$$

kde při $L_o \ll |L_s|$ (kolimovaný osvětlovací svazek)

$$\Delta A_x = -2\epsilon_{xx} L_o \frac{\sin \theta_s}{\cos \theta_o}, \quad (14)$$

respektive v případě umístění detektoru kolmo k normále elementu plochy (obvyklý případ)

$$\Delta A_x = -2\epsilon_{xx} L_o \sin \theta_s. \quad (15)$$

3. ZÁVĚR

Uvedený teoretický rozbor ukazuje na vhodnost využití tzv. jednoduchého optického tenzometru pracujícího na bázi korelační analýzy intenzit polí koherenční zrnitosti před a po deformaci předmětu. Tento optický tenzometr může být experimentálně sestaven ve dvou variantách; první sestává ze dvou lineárních CCD kvadratických detektorů a jednoho kolimovaného zdroje osvětlení, druhá sestává ze dvou kolimovaných zdrojů osvětlení a jednoho CCD detektoru, vždy ve vhodném uspořádání tak, aby byly potlačeny vlivy jiných prvků matice tenzoru deformace. Zpracování signálu spočívá ve výpočtu polohy maxima funkce vzájemné korelace, přičemž rozdíl poloh těchto maxim je úměrný poměrné deformaci ϵ_{xx} .

LITERATURA

- [1] Schumann, W. - Dubas, M.: Holographic interferometry.
Springer - Verlag, Berlin, 1979.
- [2] Dubas, M. - Schumann, W.: On direct measurements of strain and rotation in holographic interferometry using the line of complete localization.
Optica Acta 22, 1975, p. 807.
- [3] Hrabovský, M.: Některé možnosti využití holografické interferometrie v experimentálním výzkumu funkčních částí čerpací techniky.
Kandidátská disertační práce, UP Olomouc, 1978.
- [4] Yamaguchi, I.: Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation.
Optica Acta, 1981, Vol. 28, No. 10, pp. 1359-1376.
- [5] Yamaguchi, I.: A laser-speckle strain gauge.
Optical Engineering, 1982, Vol. 21, No. 3, pp. 436-440.
- [6] Yamaguchi, I. - Fuzukava, T. - Ueda, T. - Ogita, E.: Accelerated laser speckle strain gauge.
Optical Engineering, 1986, Vol. 25, No. 5, pp. 671-676.

Miroslav Hrabovský, Doc., RNDr., DrSc.

Společná laboratoř optiky UP a FzÚ AV ČR, tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc
tel.: 0042-68-5223936, fax: 0042-68-5224047, e-Mail: hrabov@risc.upol.cz