

采用对数极坐标变换的散斑相关角位移测量法

马凯¹, 于之靖², 王志军², 吴军^{1*}

¹中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

²中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 将传统散斑相关法应用于结构试件变形测量中存在一定的角位移范围限制, 针对这一问题, 提出了一种采用对数极坐标变换的散斑相关角位移测量法。首先, 该方法采用对数极坐标变换, 将结构试件散斑图像在直角坐标系下的角位移转换为对数极坐标下的平移; 然后, 利用散斑相关法结合九点二次曲面拟合法实现散斑图像的角位移测量; 最后, 通过模拟实验与实物实验验证了方法的有效性。实验结果表明, 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的角位移变化范围内, 本方法角位移测量的均值误差控制在 0.06° 内, 标准差控制在 0.02° 内, 有效提高了现有散斑相关法的角位移测量范围与测量精度。

关键词 测量; 散斑相关法; 角位移测量; 对数极坐标变换; 九点二次曲面拟合

中图分类号 TN29; TB922

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031201

Speckle Correlation Method for Angular Displacement Measurement by Using Log-Polar Transformation

Ma Kai¹, Yu Zhijing², Wang Zhijun², Wu Jun¹

¹College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract The traditional speckle correlation method has a range limit in the angular displacement measurement of structural members. Aiming at this problem, a speckle correlation method for the angular displacement measurement by using log-polar transformation is presented. Firstly, the log-polar coordinate transformation method is used to convert the angular displacement measurement of the speckle image in the cartesian coordinate system to the displacement measurement under the log-polar coordinates. Secondly, the angular displacement measurement of speckle image is realized by using speckle correlation method and nine-point quadratic surface fitting method. Finally, the effectiveness of the method is verified by simulation experiment and physical experiment. The experimental results show that the mean error of the angular displacement measurement is controlled within 0.06° and the standard deviation is within 0.02° with the angular displacement range of $[0^\circ, 90^\circ]$. This method effectively improves the range and accuracy of the angle displacement measurement of existing speckle correlation method.

Key words measurement; speckle correlation method; angular displacement measurement; log-polar transformation; nine-point quadratic surface fitting

OCIS codes 120.6165; 120.6150; 120.6650

1 引言

随着光电技术及计算机图形处理技术的迅猛发展, 光测法在位移和变形测量中的应用日益广

泛^[1-3]。传统的光测法主要有: 摩尔云纹法、全息法、光扫描法等, 但这些方法一般都要求以激光作为光源, 光路复杂, 测量结果易受到外界环境影响。而散斑相关法作为一种从物体表面散斑场中直接提取变

收稿日期: 2017-07-31; 收到修改稿日期: 2017-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(U1533111)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(31220170033, Y17-08)

作者简介: 马凯(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学测量、图像处理方面的研究。E-mail: 571142053@qq.com

导师简介: 于之靖(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测、视觉测量方面的研究。E-mail: 13001303328@163.com

* 通信联系人。E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

形信息的光测方法,具有全场、非接触测量、光路简单、对测量环境要求低等特点,逐渐成为现代光测领域的一种重要测试方法^[4-6]。

然而,散斑相关法应用于结构试件角位移测量中存在一定困难^[7-8],如试件表面发生较大的刚体转动时,如果直接采用散斑相关法计算试件表面的旋转,在进行相关搜索时会因为目标图像子区出现较大转动而失效,研究表明,当被测试件表面转动角度大于 7° 时,传统的散斑相关法就会失效^[9-10]。对于试件的角位移测量,王静^[11]提出利用圆形图像子区和图像灰度不变矩特性相结合的方法进行搜索,但这种方法对图像噪声比较敏感,测量误差较大。Quan等^[12]提出一种使用全局坐标和局部坐标表示形函数的方法来应对试件角位移过大的测量,但这种方法计算复杂度过高。潘兵等^[13]提出一种基于差分进化的角位移测量法,这种方法在计算过程中会收敛到局部极值处,因

此计算结果不稳定。

针对散斑相关法测量试件角位移时存在的测量范围小、测量精度低的问题,本文提出了一种采用对数极坐标变换的散斑相关角位移测量法。该方法采用对数极坐标变换,将试件在直角坐标系中的角位移转换为对数极坐标下的平移,并利用散斑相关法结合九点二次曲面拟合法,实现了试件的角位移测量。本方法提高了现有散斑相关法的角位移测量范围与测量精度。

2 散斑相关角位移测量法

2.1 对数极坐标变换

对数极坐标变换的思想^[14-15]是:通过极坐标变换将图像从笛卡尔坐标系转换至极坐标系,然后再取对数变换至对数极坐标系,变换过程如图1所示,图中左侧圆环线与轮辐线映射为右侧对数极坐标平面的横线与纵线。

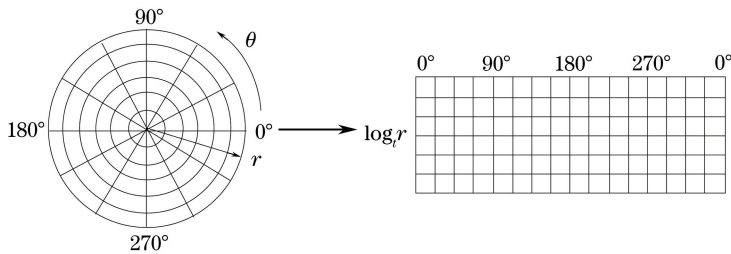


图1 对数极坐标变换示意图

Fig. 1 Schematic of log-polar transformation

对数极坐标可看作是极坐标系的扩展,对极坐标系上的点 $P_p(r, \theta)$ 的径向距离 r 取以 t 为底的对数 $\log_t r$ 作为纵坐标,同时以径向角 θ 作为横坐标就可将 $P_p(r, \theta)$ 变换成对数极坐标系上的点 $P_l(\log_t r, \theta)$,再根据笛卡尔坐标系上的点 $P_c(x, y)$ 与 $P_p(r, \theta)$ 的关系,可得到变换关系:

$$\begin{cases} \log_t r = \frac{1}{2} \log_t(x^2 + y^2) \\ \theta = \tan^{-1}(y/x) \end{cases} \quad (1)$$

要将在直角坐标系上的一幅半径为 r_c 的圆形图块 W_c 变换为在对数极坐标系下的一幅 $m \times n$ 的矩形图块 W_l ,需要在径向以对数的底 t 以及在角向以角间隔 $\Delta\theta$ 分别对 W_c 进行采样。由(1)式可知,在 W_c 上的采样是非均匀的,即离开圆心越远,采样点越疏松。因此,为了使原图块 W_c 上的信息在变换后无任何丢失,就必须调整采样间隔 t 与 $\Delta\theta$,使得采样时不遗漏 W_c 的外缘处的任何像素点。对数极坐标转化算法依据如下两个准则来确定无信息丢

失的采样间隔 t 与 $\Delta\theta$ 以及变换后的对数极坐标图块 W_l 的尺寸 m 与 n 。

1) 在 W_c 外缘处的两个径向相邻像素($r_c - 1$ 与 r_c),变换后对应于在 W_l 径向末端处的两个相邻的像素($m - 1$ 与 m),即 $\log_t r_c - \log_t(r_c - 1) = m - (m - 1) = 1$,由此可以确定 t 和 m 的取值,即:

$$\begin{cases} t = r_c / (r_c - 1) \\ m = \log_t r_c \end{cases} \quad (2)$$

2) 在 W_c 外缘处的两个角向相邻像素,变换后对应于在 W_l 角向的两个相邻的像素,即:

$$\begin{cases} \Delta\theta = 2\arcsin(1/2r_c) \\ n = 360/\Delta\theta \end{cases} \quad (3)$$

对(2)式和(3)式计算出的 m 和 n 进行取整后可得到其实际值,在采样过程中,对数极坐标转化将根据(1)式计算出对应坐标,并采用双线性插值算法^[16]计算出对数极坐标系下 W_l 中相应像素点的灰度值。

2.2 散斑相关法

在对数极坐标转化后得到散斑图像的基础上,

可以借鉴散斑相关方法实现散斑图像角位移的测量^[17],其方法原理如图2所示。在数字散斑场中,由于散斑点具有随机性,每点周围区域的散斑分布规律各不相同,因此可以在参考图像(变形前图像)中选择

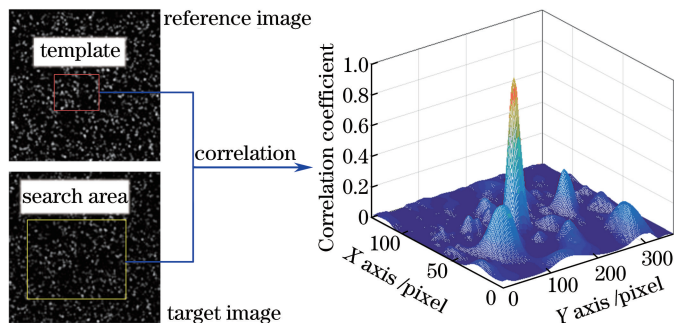


图2 散斑相关法原理示意图

Fig. 2 Schematic of speckle correlation method

相关系数函数为归一化协方差互相关函数,相较于其他相关系数函数,归一化协方差互相关函数具有明显的单峰分布,且峰值更尖锐^[18],函数计算公式为:

$$C =$$

$$\frac{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \mathbf{f}] \times [g(x'_i, y'_i) - \mathbf{g}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \mathbf{f}]^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \mathbf{g}]^2} \quad (4)$$

式中 $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x'_i, y'_i)$ 为参考图像和目标图

以 P_0 为中心、窗口尺寸大小为 $(2k+1) \times (2k+1)$ 的模板。通过相关系数函数,在目标图像(变形后图像)中搜索相似度最大的子区,得到与 P_0 对应的中心点 P_1 ,进而得到散斑场的变形信息。

像子区的灰度值, \mathbf{f} 和 \mathbf{g} 分别为参考图像和目标图像子区的平均灰度值。

2.3 亚像素测量

经过上述散斑相关法,可以得到散斑角位移变换后的整像素位移,而亚像素级位移是计算精度的关键,直接影响计算效率、计算精度和稳定性。为了进一步提高测量精度,需要对整像素位移结果进行亚像素处理。本研究中的亚像素处理方法为九点二次曲面拟合法,该方法的优点是精度高、计算时间少、抗噪声能力强^[9]。亚像素测量示意图如图3所示。

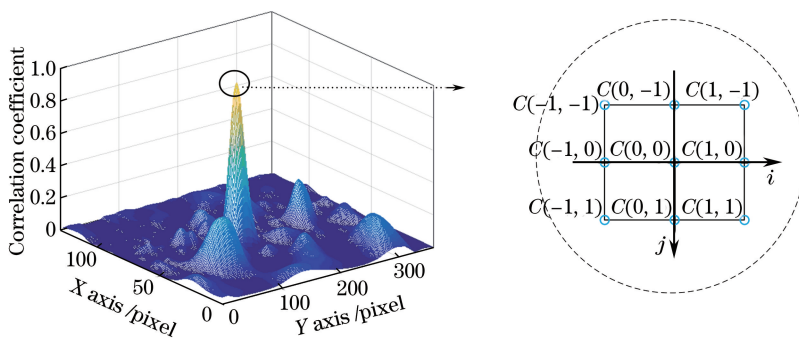


图3 亚像素测量示意图

Fig. 3 Schematic of sub-pixel measurement

九点二次曲面函数表达式为:

$$C(x, y) = \sum_{k=0}^2 \sum_{j=0}^k a_{kj} x^j y^{k-j} \quad (5)$$

设误差函数为:

$$\phi(a_{00}, a_{10}, \dots, a_{22}) = \sum_{i=1}^n (C_i - \sum_{k=0}^2 \sum_{j=0}^k a_{kj} x^j y^{k-j})^2 \quad (6)$$

由最小二乘原理可以求解九点二次曲面的待定

系数 $a_{00}, a_{10}, \dots, a_{22}$, 误差函数在拟合曲面的极值点应满足以下方程:

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = a_{11} + 2a_{22}x + a_{21}y = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial y} = a_{10} + 2a_{20}y + a_{21}x = 0, \quad (8)$$

根据(7)、(8)式就可求出拟合曲面的极值点位置:

$$x' = \frac{2a_{11}a_{20} - a_{10}a_{21}}{a_{21}^2 - 4a_{22}a_{20}}, y' = \frac{2a_{10}a_{22} - a_{11}a_{21}}{a_{21}^2 - 4a_{22}a_{20}}. \quad (9)$$

与初始散斑参考图像子区中心 (x, y) 进行比较,即可得到散斑图像极坐标系下的亚像素位移,进而求得散斑图像直角坐标系下的角位移:

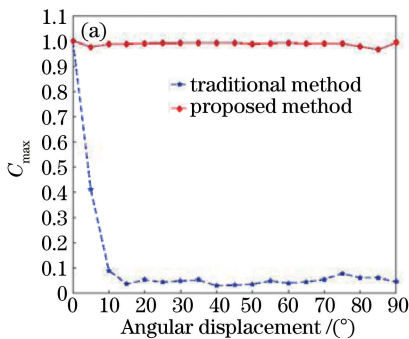
$$\theta = (x' - x)\Delta\theta, \quad (10)$$

式中 $\Delta\theta$ 为像素角向描述符,其值由(3)式确定。

3 模拟实验

用计算机进行模拟实验能够严格控制散斑的尺寸及其角位移,并能避免实际拍摄图像时的噪声干扰、设备系统误差以及操作随机误差等。采用文献[19]所示方法随机生成 10 张参考散斑图,图像尺寸为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,散斑颗粒数量为 300 个,散斑颗粒半径大小为 3.5 pixel。散斑图像如图 4(a)所示,其经对数极坐标变换后的图像(图像尺寸经计算为 $265 \text{ pixel} \times 403 \text{ pixel}$)如图 4(b)所示。

在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的角位移区间内分别对上述 10 张散斑参考图像进行旋转,旋转间隔为 5° 。对散斑图像进行对数极坐标变换后采用散斑相关法进行处



理,并与传统散斑相关法进行对比,以验证本方法的有效性。

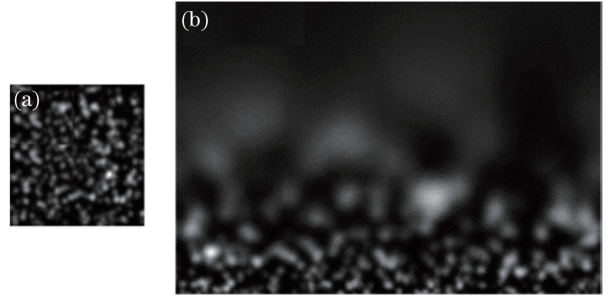


图 4 (a) 散斑图像;(b)对数极坐标变换后散斑图像

Fig. 4 (a) Speckle image; (b) speckle image after log-polar transformation

3.1 对数极坐标变换有效性验证

为了更充分地验证对数极坐标变换的有效性,引入两个相关系数评价指标:1)相关系数主峰值 C_{\max} ,即相关系数最大值,用以评价旋转前后散斑图像子区的相似程度;2)相关系数主峰值与次峰值之间的差值 C_{dif} ,用以评价相关函数是否具备明显单峰。取相同角位移下,散斑图像相关系数的平均值作为评价价值,所得结果如图 5 所示。

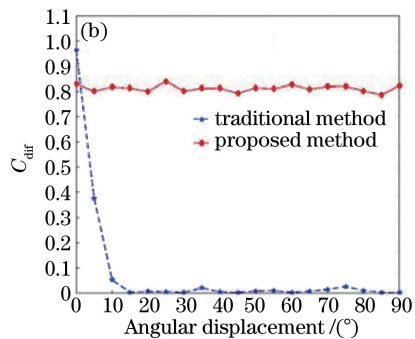


图 5 模拟实验相关系数。(a) C_{\max} ; (b) C_{dif}

Fig. 5 Correlation coefficient of simulation experiments. (a) C_{\max} ; (b) C_{dif}

由图 5 可知,当散斑图像的角位移大于 5° 时,直接应用散斑相关法得到的相关系数主峰值 C_{\max} 急剧降低,其值小于 0.4,且主峰值与次峰值之间的差值 C_{dif} 进一步缩小,并维持在 0.05 附近,意味着散斑相关法失效。而经对数极坐标变换后应用散斑相关法,其相关系数主峰值 C_{\max} 维持在 0.95 以上,且主峰值与次峰值的差值 C_{dif} 维持在 0.8 附近,意味着散斑相关法有效,进而保证了后续散斑测量的准确性。为了进一步说明对数极坐标变换的有效性,选取角位移为 20° 时的散斑图像处理结果,如图 6 所示。

3.2 散斑相关角位移测量

亚像素测量采用九点二次曲面拟合法,同时引

入高斯曲面拟合法进行对比,并从均值误差和标准差^[20]两个方面对两种拟合方法进行考察,实验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,九点二次曲面拟合法的均值误差、标准差均小于高斯曲面拟合的均值误差、标准差。具体来讲,在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的角位移范围内,采用九点二次曲面拟合法所得测量结果的均值误差绝对值最大为 0.042° ,最大标准差为 0.0127° ,而采用高斯曲面拟合法所得测量结果的均值误差绝对值最大为 0.63° ,最大标准差为 0.015° 。

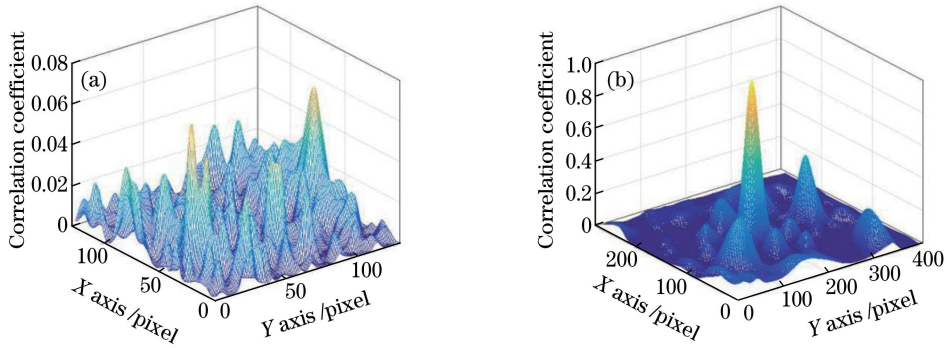


图 6 角位移为 20° 时所得处理结果。(a)传统散斑法;(b)所提方法

Fig. 6 Results with angular displacement of 20° . (a) Traditional speckle method; (b) proposed method

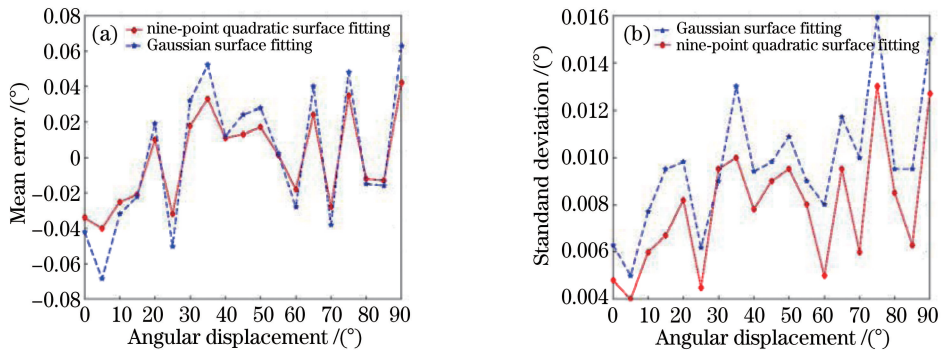


图 7 模拟实验测量结果。(a)均值误差;(b)标准差

Fig. 7 Results of simulation experiments. (a) Mean error; (b) standard deviation

4 实物实验

为了验证对数极坐标变换对散斑图像角位移测量的实际影响,进行如下实验。实验试件采用人工喷涂黑白漆方式制作出符合实验标准的散斑平面。然后将其固定在光学精密旋转平台上。采用 CCD 相机进行散斑图像采集,相机型号为 IMPERX 4M,分辨率为 $2060 \text{ pixel} \times 2056 \text{ pixel}$ 。实验装置如图 8 所示,实验之前采用垂线法对相机主光轴及散斑试件平面进行位姿校准^[21]。

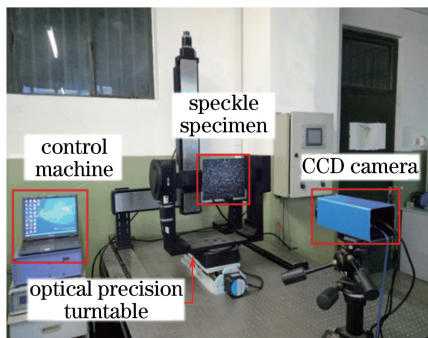


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental setup

4.1 对数极坐标有效性验证

实物实验中测得的相关系数平均值 C_{\max} 、 C_{dif} 如图 9 所示。

由图 9 可知,当角位移大于 5° 时,采用传统散斑相关法所得的相关系数主峰值 C_{\max} 低于 0.2,即评价方法失效。而经对数极坐标变换后应用散斑相关法,其相关系数主峰值 C_{\max} 保持在 0.9 附近,主峰值与次峰值差值 C_{dif} 保持在 0.7 以上,即评价方法有效,结论与模拟实验相同。不同的是,实物实验结果受随机噪声及相机畸变等因素影响,相关系数的主峰值 C_{\max} 及主峰值与次峰值差值 C_{dif} 分别下降了 0.1 左右。

4.2 散斑相关角位移测量

九点二次曲面拟合法及高斯曲面拟合法所得散斑角位移亚像素测量结果如图 10 所示。

由图 10 可知,在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的角位移范围内,采用九点二次曲面拟合法所得测量结果的最大均值误差绝对值为 0.054° ,最大标准差为 0.0176° ;采用高斯曲面拟合法所得测量结果的最大均值误差绝对值为 0.077° ,最大标准差为 0.0217° ,与模拟实验结论一致。

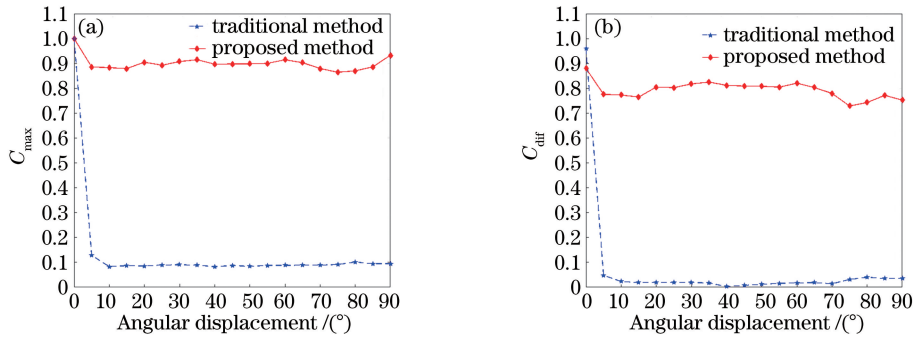
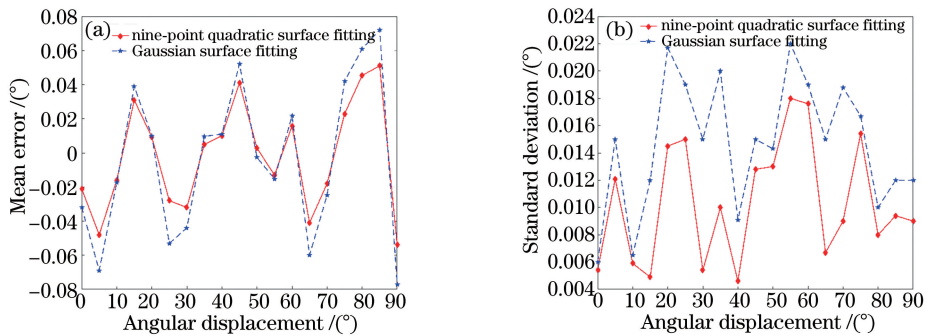
图9 实物实验相关系数。(a) C_{max} ; (b) C_{dif} Fig. 9 Correlation coefficient of physical experiments. (a) C_{max} ; (b) C_{dif} 

图10 实物实验测量结果。(a)均值误差;(b)标准差

Fig. 10 Results of physical experiments. (a) Mean error; (b) standard deviation

5 结 论

针对传统散斑相关法应用于结构试件角位移测量中时存在测量范围小、测量精度低等问题,提出了一种采用对数极坐标变换的散斑相关角位移测量法。该方法的优势为:采用对数极坐标变换将散斑的角位移转换成平移,在此基础上,结合散斑相关法及九点二次曲面拟合法实现了散斑角位移的准确测量。模拟实验与实物实验结果表明:在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的散斑角位移范围内,本方法所得测量结果的均值误差控制在 0.06° 以内,标准差控制在 0.02° 以内,在保证散斑相关角位移测量准确性的同时扩展了角位移测量范围。

参 考 文 献

- [1] Jin G C. Computer-assisted optical measurement [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [2] Norgia M, Donati S, D' Alessandro D. Interferometric measurements of displacement on a diffusing target by a speckle tracking technique[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(6):

800-806.

- [3] Oulamara A, Tribillon G, Duvernoy J. Subpixel speckle displacement measurement using a digital processing technique[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 35(7): 1201-1211.
- [4] He J Y, Liu X L, Peng X, *et al.* Integer pixel correlation searching for three-dimensional digital speckle based on gray constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404003.
何进英, 刘晓利, 彭翔, 等. 基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404003.
- [5] Sun M Y, Cai K, Yang D Y, *et al.* Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPIR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 111201.
孙明勇, 蔡康, 杨德宇, 等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 111201.
- [6] Geng S, Zhao S F, Wang Y, *et al.* Research on principle of soft dynamic torque measurement based on digital industrial photogrammetry technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0208002.
耿帅, 赵妹帆, 王迎, 等. 数字工业摄影技术用于转轴动态扭矩测量原理的研究[J]. 中国激光, 2015,

- 42(2): 0208002.
- [7] Song J, Jiang H, Liu Z J, *et al.* Buckling of a stiff thin film on a compliant substrate in large deformation[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2008, 45(10): 3107-3121.
- [8] Nunes L C S, Dias F W R, Mattos H S D C. Mechanical behavior of polytetrafluoroethylene in tensile loading under different strain rates [J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(7): 791-796.
- [9] Pan B, Qian K, Xie H, *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(6): 152-154.
- [10] Wang Q. The research on measurement techniques for rotating objects based on digital image correlation [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013.
王强. 基于数字图像相关的旋转物体测量技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2013.
- [11] Wang J, Li H Q, Liu M H, *et al.* A new digital image correlation method combining circular window and moment character [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(4): 500-506.
王静, 李鸿琦, 刘美华, 等. 一种圆形窗口与矩特征相结合的新型高效数字图像相关方法 [J]. *实验力学*, 2004, 19(4): 500-506.
- [12] Quan C, Tay C J, Sun W, *et al.* Global and local coordinates in digital image correlation [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(7): 1050-1056.
- [13] Pan B, Xie H M. Digital image correlation method with differential evolution [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, 18(1): 100-103.
潘兵, 谢惠民. 基于差分进化的数字图像相关方法 [J]. *光电子 • 激光*, 2007, 18(1): 100-103.
- [14] Tao T, Zhang Y. Detection and description of scale-invariant keypoints in log-polar space [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(12): 1639-1651.
陶涛, 张云. 对数极坐标系下尺度不变特征点的检测与描述 [J]. *中国图像图形学报*, 2015, 20(12): 1639-1651.
- [15] Liu C Y, Du Y R. Rotated image registration using adaptive polar transform [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, 14(1): 65-69.
刘彩云, 杜宇人. 一种自适应极坐标变换的旋转图像配准方法 [J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2011, 14(1): 65-69.
- [16] Chen B P, Zhao J L, Yin Z L. A fast approach to realize bilinear interpolation algorithm [J]. *Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute*, 2004, 12(4): 21-23.
陈宝平, 赵俊岚, 尹志凌. 双线性插值算法的一种快速实现方式 [J]. *北京电子科技学院学报*, 2004, 12(4): 21-23.
- [17] Zhang H Y, Yu Z J. Initial displacement estimation method for speckle image based on marker matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0303001.
张红颖, 于之靖. 基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0303001.
- [18] Liang Y. Research of sub-pixel displacement measurement methods and experiment in digital speckle correlation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
梁园. 数字散斑相关亚像素位移测量方法研究与实验 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [19] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [20] Wu W P. Sub-pixel displacement algorithm based on image correlation method and experiment study [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
伍卫平. 图像相关技术的亚像素位移算法与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [21] Yu Z J, Pan X. Based on precision translational and rotary table inside the camera parameter calibration device: CN201220257942.4 [P]. 2013-01-02.
于之靖, 潘晓. 基于精密平移及转台的摄像机内参数校准装置: CN201220257942.4 [P]. 2013-01-02.