

数字散斑相关技术最优光照条件研究

于之靖 陶洪伟*

中国民航大学航空地面特种设备科研基地, 天津 300300

摘要 研究了光照条件对数字散斑相关技术(DSCM)测量精度的影响,获得了数字散斑相关计算最优的取值参数及光照条件。通过分析 DSCM 测量理论模型,获得误差与空间频率和平均灰度梯度的关系式,通过计算机模拟数字散斑图像,确定了最优散斑尺寸、最佳拟合窗口和计算窗口。实物实验中引入 GSI 编码技术,精确地标定了刚体位移,并对不同光照条件下的 DSCM 测量结果进行了误差分析,结果表明散斑图像的空间频率和平均灰度梯度与光照条件成规律性变化,并与理论分析结果一致。研究结果表明,DSCM 测量的最优光照强度为 8000 lx,此时图像平均灰度梯度高,DSCM 测量精度高。

关键词 测量;数字散斑相关法;光照条件;平均灰度梯度;误差分析

中图分类号 O348.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101201

Investigation of the Optimal Light Condition on Digital Image Correlation Method

Yu Zhijing Tao Hongwei

Ground Special Equipment Research and Develop Base, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract The effect of lighting conditions on digital speckle correlation method (DSCM) measurement accuracy is researched, and the optimal parameters and light condition for digital speckle correlation calculation are obtained. Through theoretical analysis of the model of DSCM, the relational expression of error about the frequency and average gray gradient is obtained. The optimal digital speckles size, fitting window size and calculation window size are got with computer simulation of digital speckle image. Leading into the technology of GSI in physical experiment, the accurate displacement is got and the error of different light conditions is analyzed, finding the connection about light with the frequency and average gray gradient through studying the digital speckle images. Experiments show that 8000 lx is the optimal light condition in DSCM, when average gray gradient is high and DSCM measurement is precision.

Key words measurement; digital speckle correlation method; lighting conditions; mean intensity gradient; error analysis

OCIS codes 120.6150; 100.2000; 330.4595; 070.4790

1 引言

数字散斑相关法(DSCM)是视觉测量诸多方法中的一种,是根据平面物体表面随机散斑灰度场的相关性来确定物体表面位移及其导数的一种非接触测量手段^[1]。由此可见,采集的散斑图像灰度场的质量对 DSCM 测量的稳定性和精度具有至关重要的作用。根据经验可知,在被测物体表面人工喷涂黑白漆是获得散斑图像的主要手段,而 CCD 测量系统稳定性和环境光照条件是采集高质量散斑图像的重要条件。

近年来,国内外研究人员针对提高 DSCM 测量精度进行了大量的研究并取得了诸多成果^[2],针对不同测量环境和目标,视觉测量位移精度已基本能达到 0.01 pixel^[1]。其中随机噪声、镜头畸变和 CCD 暗电流等是引入随机误差的主要因素^[3-4];测量环境、亚像素插值方法、散斑尺寸和计算窗口是引入系统误差的主要因素^[5]。

收稿日期: 2014-04-23; 收到修改稿日期: 2014-05-16; 网络出版日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1333105)、中央高校基本科研业务费(3122013D019)

作者简介: 于之靖(1963—),男,博士,教授,主要从事自动化测试技术、光纤传感技术和计算机视觉测量等方面的研究。

E-mail: hit_yu@126.com

*通信联系人。E-mail: thwnuc@163.com

但人们一直忽视环境光照条件对 DSCM 测量精度的影响。不同的光照强度和曝光时长^[4]等对 DSCM 测量系统采集的被测物体表面的灰度分布有重要的影响,这直接导致图像空间频率、平均灰度梯度的变化,同时也对亚像素定位时相关系数矩阵产生影响^[6]。

为了提高 DSCM 测量精度,降低测量误差,本文从理论分析入手,结合数值模拟实验和实物实验,详细分析了光照条件与空间频率和平均灰度梯度之间的关系,并给出 DSCM 测量最优拟合窗口和计算窗口。同时,通过对比实验论证了存在最优 DSCM 测量光照条件,并给出了最优光照条件范围。

2 理论模型

2.1 数字散斑相关

为精确获得变形试件的实际位移以便对比分析 DSCM 测量精度^[7],本实验将 GSI 编码点技术与数字散斑相关技术相结合,为 DSCM 测量误差分析提供了有效的论证依据。在相关计算过程中,根据 GSI 编码和点位信息可以准确地标定出被测物面实际位移^[8]。图 1 为引入 GSI 编码点的 DSCM 测量示意图和一幅采集的散斑图像,其被测散斑平面采用人工制斑方法获得,并在其上张贴 GSI 编码点。

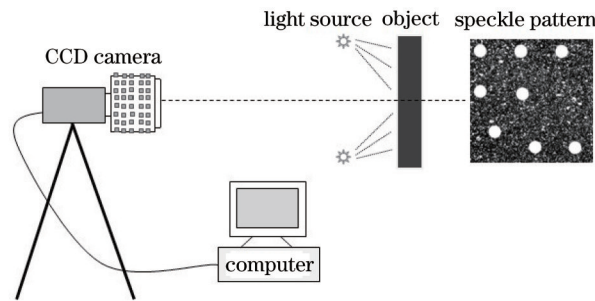


图 1 DSCM 测量示意图及引入 GSI 编码点的散斑图

Fig.1 Measurement system of DSCM and a speckle pattern with GSI

根据 DSCM 测量散斑分布的随机性和相关计算原理,对于基准散斑图像上某点的变形测量,可以通过研究以该点为中心的子区灰度场和目标散斑图像上以该点为中心的灰度场的相关性来实现^[9]。其相关计算原理为

$$C = C[f(x, y), g(x + u, y + v)], \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 分别为变形前后散斑图像的灰度函数,此刻通过相关计算找到使 C 取极值的面元,即可求得该点位移 (u, v) 。

2.2 光照误差分析

在 DSCM 测量过程中,为提高测量精度,引入了亚像素位移定位算法,从而使 DSCM 测量的精度达到了亚像素级别。本实验采用基于相关系数的曲面拟合法,在 DSCM 测量获得整像素位移后,以像素点对应的相关系数为中心取其周围相关系数矩阵,对该矩阵进行曲面拟合,求其极值点即为所求亚像素位移,如图 2 所示。

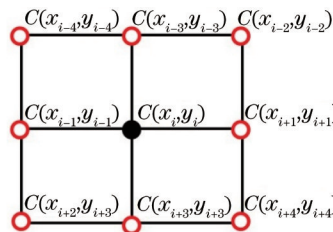


图 2 整像素定位及其周围像素点

Fig.2 Integer pixel registration and its neighbours

当整像素搜索到 5 位置时,其对应的相关系数矩阵通过拟合获得,二元二次拟合函数为:

$$C(x_i, y_j) = w_0 + w_1 x_i + w_2 y_j + w_3 x_i^2 + w_4 x_i y_j + w_5 y_j^2, \quad (2)$$

式中 $w_0, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$ 为测量系数, 对于 3×3 的拟合窗口, (2) 式有 9 种情况, 采用最小二乘法求待定系数, 并且拟合曲面的极值点位于导数为零的位置, 故可求得极值点位置为:

$$\begin{cases} x = \frac{2w_1w_5 - w_2w_4}{w_4^2 - 4w_3w_5} \\ y = \frac{2w_2w_3 - w_1w_4}{w_4^2 - 4w_3w_5} \end{cases} \quad (3)$$

Schreier 等^[10] 对此进行了理论、实验分析, 给出了由于亚像素定位而引入的系统误差的表达式为:

$$E_{\text{sys}} = \frac{1}{\pi k} \cdot \arctan \frac{\left(\frac{9}{4}\delta - \delta^3\right)\sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) - \left(\frac{\delta}{12} - \frac{\delta^3}{3}\right)\sin\frac{3\pi k}{2}}{\left(-\frac{\delta^2}{2} + \frac{9}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi k}{2}\right) + \left(\frac{\delta^2}{2} - \frac{1}{8}\right)\cos\left(\frac{3\pi k}{2}\right)} - \delta, \quad (4)$$

式中 k 和 δ 分别为空间频率和亚像素位移。由此可知, 对于相同的亚像素位移, 图像信号空间频率越高系统误差越大; 对于同一波数信号, 当亚像素位移为 ± 0.25 pixel 时系统误差最大。

此处假设采集的散斑图像每个散斑理论上的灰度形貌如图 3 所示, 采用 8 unit 灰度图像, 其中散斑图灰度呈线性关系变化且每个周期 T 为一个散斑的近似灰度变化, 频率与周期的关系可表示为 $k = 2/T$, 设第二周期内平均灰度梯度为 σ 。

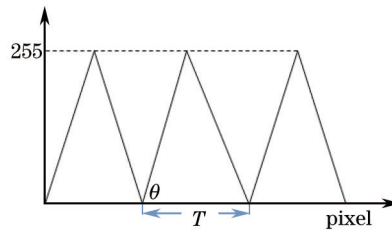


图 3 理论散斑形貌示意图

Fig.3 Theory schematic illustration of speckle

故

$$255 = \frac{T}{2} \cdot \sin \theta. \quad (5)$$

通过对关系式进行推导, 可得系统误差方程与平均灰度梯度的关系为:

$$E_{\text{sys}} = \frac{510\sigma}{\pi \tan \theta} \cdot \arctan \frac{\left(\frac{9}{4}\delta - \delta^3\right)\sin\left(\frac{\pi \tan \theta}{1020\sigma}\right) - \left(\frac{\delta}{12} - \frac{\delta^3}{3}\right)\sin\frac{\pi \tan \theta}{340\sigma}}{\left(-\frac{\delta^2}{2} + \frac{9}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi \tan \theta}{1020\sigma}\right) + \left(\frac{\delta^2}{2} - \frac{1}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi \tan \theta}{340\sigma}\right)} - \delta. \quad (6)$$

一方面, CCD 摄像机在不同光照条件下采集的同一幅散斑图像在同一像素点的灰度值有所不同, 从而导致整幅散斑图像的灰度分布发生变化。相关系数是通过变形前后两幅散斑图的灰度信息进行计算获得的, 因此光照条件的不同势必会获得不同的相关系数矩阵, 相关系数矩阵直接影响亚像素的定位精度, 同时引入亚像素定位误差。另一方面, 由于光照使得采集散斑图片的灰度信息发生变化, 进而使得散斑图像空间频率(波数)发生改变。与此同时, 前后采集的两幅散斑图像在同一散斑周围的灰度梯度随之改变, 此时灰度分布峰值也会发生改变, 但各峰值所对应的像素位置不变。

综上所述, 光照条件的不同势必会导致 DSCM 测量精度的变化, 同时也会影响 DSCM 测量的误差。

3 数值模拟实验

3.1 模拟散斑

为了探究在 DSCM 测量中各因素对其测量精度的影响, 此处采用计算机模拟的散斑图进行数值模拟实验。采用计算机生成的模拟散斑图, 可以有效避免由于实际采集图片而引入的噪声的影响, 同时可以精确地控制模拟散斑图的位移和图像参数。因此, 用计算机模拟散斑图像进行 DSCM 测量精度的影响因素和误差等分析已被广泛认可。本文采用周鹏等^[11] 提出的方法生成模拟散斑图, 其公式为:

$$I_A(x,y) = \sum_{n=1}^s I \exp\left\{\frac{-[(x-x_n)^2 - (y-y_n)^2]}{R^2}\right\}, \quad (7)$$

$$I_B(x,y) = \sum_{n=1}^s I \exp\left\{\frac{-[(x-x_n - u_0 - u_x x - u_y y)^2 - (y-y_n - v_0 - v_x x - v_y y)^2]}{R^2}\right\},$$

式中 s 为散斑总个数, R 是散斑的半径, I 为随机光强, (x_n, y_n) 为各个模拟散斑点的随机位置, $(u_0 v_0)$ 初始点位移, $(u_x v_x)$ 为各个模拟散斑点的位移。现模拟散斑图大小为 128 pixel×128 pixel, 随机散斑数目为 300 个, 散斑大小为 3 pixel, 图 4 为模拟生成的变形前后散斑图。

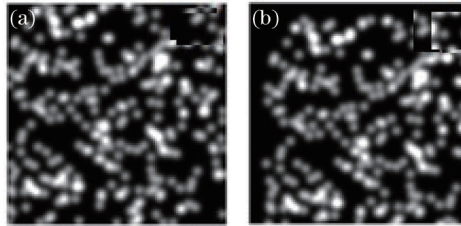


图 4 计算机模拟散斑图.(a)初始图像;(b)变形图像

Fig.4 Computer-generated speckle image. (a) Initial image; (b) deformed image

3.2 最佳计算参数确定

散斑尺寸、拟合窗口大小和计算窗口大小是 DSCM 测量的一个关键参数, 影响 DSCM 测量的精度和速度。现用计算机分别模拟生成 5 幅散斑尺寸不同的散斑图像, 并分别对其移动 $n \times 0.1$ pixel 的位移 ($n=1 \sim 10$), 对每组散斑图像的计算点数为 $12 \times 12 = 144$ 点。采用曲面拟合法对其进行亚像素定位, 随着散斑尺寸的变化其定位误差与亚像素位移如图 5 所示。由试验数据分析可知, 散斑半径尺寸从 2 pixel 变化到 4 pixel 的过程中, 其定位误差随位移成正弦曲线规律变化, 散斑半径尺寸在 3 pixel 左右时其定位误差最小, 这与理论推导相符合。

计算窗口大小和亚像素定位拟合窗口的选取不仅影响 DSCM 的测量精度, 同时影响其速度。用计算机生成散斑半径为 3 pixel 的模拟散斑图。选取计算窗口大小 11 pixel×11 pixel 到 81 pixel×81 pixel, 拟合窗口为 3×3 、 4×4 和 5×5 。实验结果如图 6 所示。由实验数据可以看出, 计算窗口从 11 pixel 到 81 pixel 内位移的计算误差是递减的, 并在 41 pixel 以前急剧下降, 其计算结果与真实位移趋于收敛。与此同时, 随着拟合窗口的增大其误差逐步增大。一方面, 当计算窗口较小时, 其灰度信息不足, 同时噪声影响尤为突出, 从而无法获得整像素定位和理想相关系数矩阵, 其计算结果不可靠。另一方面, 随着计算窗口的增大, 其灰度信息更为充足, 可以有效地削弱由于噪声等对测量精度的影响, 但是随着计算窗口的继续增大, 其参与计算的数据过于庞大, 这将大大降低计算速度和效率。故 41 pixel×41 pixel 为其最佳计算窗口, 3 pixel×3 pixel 为其最佳亚像素定位拟合窗口。

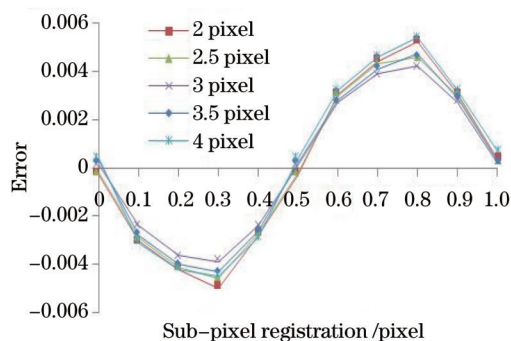


图 5 不同散斑尺寸下亚像素位移与误差的关系
Fig.5 Relation between error and sub-pixel registration with different speckle sizes

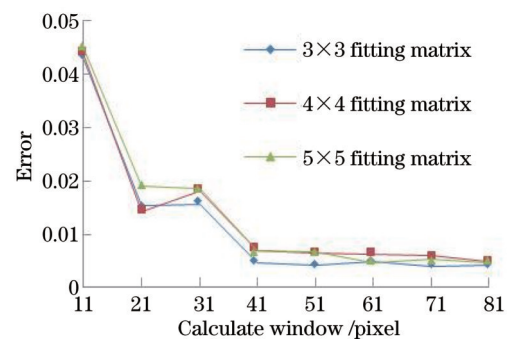


图 6 不同拟合窗口下计算窗口与误差的关系
Fig.6 Relation between error and calculate window with different fitting windows

4 实物实验验证

为了验证试件在各光照条件下的 DSCM 测量精度,采用 3 节获得的相关计算参数,进行如下实验。试件表面人工喷涂黑白漆制作出符合标准的散斑平面,同时将 GSI 编码点贴于散斑表面,并将其刚性位置固定在三维平移台上。其在平移台上刚性移动速度为 1 mm/min, CCD 摄像机的采集图像频率为 2 frame/s,其放大率为 51 pixel/mm,故在此情况下每采集到的两幅图像间隔为 0.425 pixel。再根据 GSI 编码点位信息,可以实时精确地解算出两幅散斑图像的实际间隔。最后,根据刚体平移速度、图像采集频率及 GSI 编码阈值等综合条件确定出合适的曝光时间,进而对 CCD 摄像机进行曝光参数设定,从而采集高质量散斑图。

首先,在不同光照强度下采集 5 幅初始散斑图像,其空间频率域幅度值呈先增加后减小的变化趋势,并在光照强度为 8000 lx 时其幅度值最大。同时,对采集的散斑图像进行平均灰度梯度计算,获得平均灰度梯度随光照强度变化的曲线,如图 7 所示。

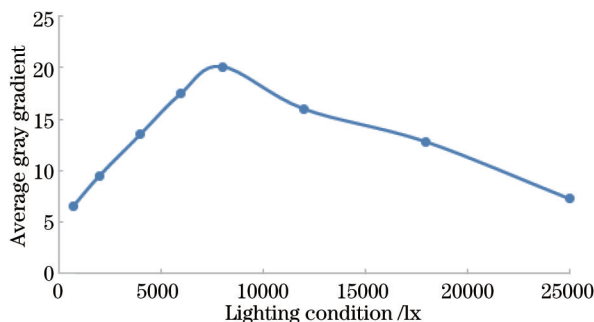


图 7 平均灰度梯度与光照强度的关系

Fig.7 Relation between average gray gradient with lighting condition

由实验分析可知,在光照强度为 8000 lx 左右的条件下,采集到的散斑图像的平均灰度梯度最大。根据 2.2 节理论分析可知,此光照条件下的 DSCM 测量误差较小。根据实验结果可知,光照条件的改变能够引起采集图像频率和平均灰度梯度的改变,从而影响 DSCM 测量的精度。

为进一步验证理论分析的正确性,进行如下实验。分别在各光照强度下使平移台刚性平移 1 min,取其中时间间隔为 10 s 的图像,根据 GSI 编码点的信息解算获得刚性平移的 GSI 位移。分别对每组变形前后散斑图进行相关解算,获得数据如表 1 所示。

表 1 不同光照条件下位移实验结果

Table 1 Measuring result of different light conditions

| Light /lx | Project | 1/pixel | 2/pixel | 3/pixel | 4/pixel | 5/pixel | 6/pixel |
|-----------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1500 | GSI | 4.262 | 8.515 | 12.767 | 17.021 | 21.271 | 25.523 |
| | Correlation | 4.297 | 8.553 | 12.805 | 17.064 | 21.318 | 25.572 |
| | Error | 0.035 | 0.038 | 0.038 | 0.043 | 0.047 | 0.049 |
| 3500 | GSI | 4.261 | 8.513 | 12.765 | 17.018 | 21.269 | 25.521 |
| | Correlation | 4.282 | 8.537 | 12.791 | 17.049 | 21.304 | 25.589 |
| | Error | 0.021 | 0.024 | 0.026 | 0.031 | 0.035 | 0.038 |
| 8000 | GSI | 4.258 | 8.507 | 12.760 | 17.013 | 21.267 | 25.519 |
| | Correlation | 4.273 | 8.524 | 12.776 | 17.032 | 21.289 | 25.543 |
| | Error | 0.015 | 0.017 | 0.016 | 0.019 | 0.022 | 0.024 |
| 15000 | GSI | 4.260 | 8.511 | 12.763 | 17.012 | 21.265 | 25.518 |
| | Correlation | 4.277 | 8.530 | 12.781 | 17.034 | 21.291 | 25.546 |
| | Error | 0.017 | 0.019 | 0.018 | 0.022 | 0.026 | 0.028 |
| 30000 | GSI | 4.260 | 8.513 | 12.766 | 17.018 | 21.269 | 25.520 |
| | Correlation | 4.288 | 8.543 | 12.797 | 17.054 | 21.319 | 25.564 |
| | Error | 0.028 | 0.030 | 0.031 | 0.036 | 0.040 | 0.044 |

对实验数据进一步分析,获得在给定曝光时间条件下 DSCM 测量相对误差与光照强度的关系,如图 8 所示。

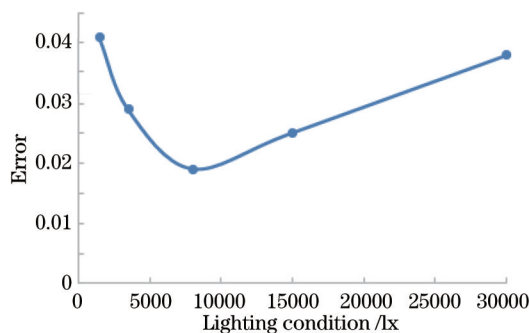


图8 误差与光照强度的关系

Fig.8 Relation between error with lighting conditon

根据实验结果可知,随着光照强度的增加,其相对误差逐渐减小,当光照超过8000 lx后,其相对误差开始升高。故当光照条件为8000 lx时,图像的空间频率最高并且平均灰度梯度趋于最大。此时DSCM测量精度最高,实验结果与理论分析一致。

5 结 论

从理论分析入手,结合数值模拟实验和实物实验比较,系统研究了光照条件对DSCM测量精度的影响。在数值模拟实验中,散斑尺寸为3 pixel、计算窗口大小为41 pixel×41 pixel和亚像素定位拟合尺寸为3 pixel×3 pixel时,模拟DSCM计算精度最高。基于此分析结果,可对DSCM测量相关算法本身的误差分析、相关系数选取和算法优劣程度进行高质量评价,有效排除了噪声等一系列因素的影响。实物实验中,对实际采集的散斑图像进行频率分析和平均灰度梯度计算。结果表明,在给定曝光条件下其与光照条件成规律性相关,频率和平均灰度梯度越高,其测量误差越小,故同一散斑图像存在最佳的DSCM测量光照条件。当光照强度为8000 lx时DSCM测量的精度最高,有效地保证了DSCM高精度测量的要求。

参 考 文 献

- 1 Chu T C, Ranson W F, Sutton M A, *et al.*. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. *Exp Mech*, 1985, 25(3): 232-244.
- 2 Duan Yiting, Li Guangyu, Gao Zhan. Review of laser biospeckle measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020003.
段怡婷, 李光宇, 高 瞻. 生物散斑测量技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020003.
- 3 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.
潘 兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412004.
- 4 Cheng Shubo, Zhang Huige, Liu Hao, *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204001.
程书博, 张惠鸽, 刘 浩, 等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0204001.
- 5 Chen Tao, Liu Jianhua, Zhang Tian. Error analysis of the bending tube residual stress measurement system based on digital speckle correlation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 111201.
陈 涛, 刘检华, 张 天. 基于数字散斑的弯管残余应力测量系统的误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 111201.
- 6 Pan Bing, Xie Huimin, Xu Boqin, *et al.*. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Meas Sci Technol*, 2006, 17(6): 1615-1621.
- 7 Meng Libo, Jin Guanchang, Yao Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2006, 46(11): 1930-1932.
孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(11): 1930-1932.
- 8 Yu Zhijing, Chen Gang, Liu Changying, *et al.*. Single camera 3D coordinate on-line measuring system[C]. *Proceedings of Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2002. 307-313.

- 9 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan, Lin Baoping. Application of micro digital speckle correlation technique to study mechanical property of advanced thin film material[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1104–1108.
陈凡秀, 何小元, 林保平. 显微数字散斑相关测量新型薄膜的力学性能[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1104–1108.
- 10 Schreier H W, Braasch J R, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation caused intensity interpolation[J]. Opt Engng, 2000, 39(11): 2915–2921.
- 11 Zhou P, Goodson K E. Sub-pixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. Opt Engng, 2001, 40(8): 1613–1620.