

文章编号: 0253-2239(2006)08-1162-5

# 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法\*

李勇<sup>1,2</sup> 苏显渝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系, 成都 610065  
<sup>2</sup> 浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

**摘要:** 在进行大视场相位测量轮廓术系统参量标定时需要大的标定平面和精密移动台, 由于携带不方便, 不易进行现场标定。提出了一种用于相位测量轮廓术系统参量的高精度、现场标定方法, 采用一块较小的平面标定靶在有效测量体积内不同位置多次摆放, 以获取密集的数据点。先标定出摄像机的内参量和外参量, 再指定一个全局参考平面和若干辅助参考平面, 然后在图像平面上分区计算出每个位置标定靶上每点相对辅助参考平面的高度差和相位差, 最后应用极大似然估计法估计出相位-高度映射参量。实验中平面高度测量的标准偏差达到 0.0433 mm。这种方法只需要较小的平面标定靶, 标定过程方便、精度高, 完全适合大视场三维测量相位测量轮廓术系统现场标定要求。

**关键词:** 信息光学; 三维重构; 光栅投影; 相位-高度映射; 现场标定

中图分类号: TN206 文献标识码: A

## New Method for System Calibration in Phase Measurement Profilometry with Large View Field

Li Yong<sup>1,2</sup> Su Xianyu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610065  
<sup>2</sup> Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

**Abstract:** A standard plane with large area and a precision moving stage are required to calibrate the parameters for the phase measurement profilometry (PMP) system in large view field. It does not suite on-line calibration because of the discommodity to tote the required plane and stage. A new method for on-line calibrating the parameters of PMP system accurately is introduced to solve this problem. An undersize calibrating plane is placed at several positions in available measurement volume randomly to acquire dense data points. The inner and external parameters of camera are estimated with the method used in photogrammetry. A global reference plane and several assistant planes are appointed. And then, the differences of height and phase in every tested position between the plane and their corresponding reference plane are calculated in division. Finally, the parameters of phase-height mapping are estimated with maximum likelihood estimate. In experiment the standard deviation of plane height measurement reaches 0.0433 mm. This method is suitable for calibrating the PMP system with large view field because only a small standard plane is required, the calibrating procedure is convenient and the result is highly accurate.

**Key words:** information optics; three-dimensional reconstruction; fringe projection; phase-height mapping; on-line calibration

## 1 引 言

基于结构照明的光学三维传感技术在工业检测、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域有广泛的应用<sup>[1]</sup>。其中相位测量轮廓术具有可以实现全场同时测量、精度高、测量速度快等优点, 是研究的

热点之一<sup>[2~6]</sup>。相位测量轮廓术由一套相移条纹投影系统和光电图像传感器组成。由投影系统投射相移正弦光栅到漫反射被测物体表面, 再用光电图像传感器拍摄被物体面形调制的变形光栅, 用相移法求解光栅相位, 然后通过相位-高度映射关系得到物体表

\* 国家自然科学基金(10376018)资助课题。

作者简介: 李勇(1972~), 男, 浙江台州人, 浙江师范大学信息光学研究所高级工程师, 四川大学博士研究生, 主要从事光学三维传感、三维显示技术的研究。E-mail: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2005-11-21; 收到修改稿日期: 2006-02-22

面高度、面内映射关系得到横向坐标。相位-高度映射关系及面内映射关系通过标定过程来建立。通常需要三维标定装置<sup>[7,8]</sup>,如采用精密平移台带动标准平面在测量体积内移动若干位置进行标定。这种方法对设备的要求比较高,特别是标定大视场测量系统时需要大的标定平面,不适合做现场标定。Legarda-Sáenz等提出在数字光栅投影结构光系统中把投影仪当摄像机看待,采用双目视觉原理进行结构光系统标定<sup>[9]</sup>,这种方法需要投两套正交的光栅,不适合非数字投影结构光系统的标定。

本文提出一种采用较小平面靶的相位测量轮廓术系统标定方法,通过在有效测量体积内摆放一系列不同位置、朝向的平面标定靶,首先标定出摄像机的参量,然后图像平面上分区域计算每个标定靶上每一点在规定的世界坐标中的位置,再结合相位-高度映射关系进行标定。在这种方法中只需要一套光栅,标定靶的尺寸不需要太大,摆放位置比较自由,可以得到比较密集的空间数据点,具有较高的标定精度,并且在标定纵向坐标的同时标定了系统的横向坐标。这种方法大大降低了对标定靶的要求,适合高精度的现场标定,并且对数字和非数字投影系统都适用。

## 2 相位测量轮廓术系统数学模型

### 2.1 摄像机模型

图1为摄像机数学模型示意图。 $X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, $uv$ 为图像坐标系。世界坐标中的一点 $p(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像机坐标系中的坐标 $(X_c, Y_c, Z_c)$ 可以表示为

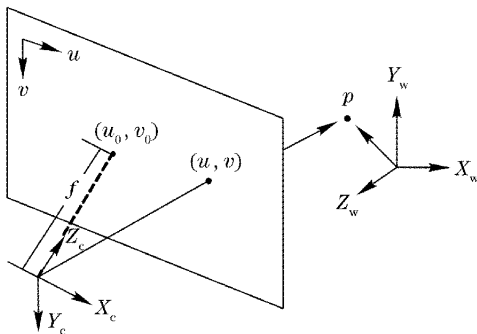


图1 摄像机模型

Fig.1 Model of video camera

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{R}$ 为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为平移向量。

由于实际的摄像机镜头存在畸变,成像不是理想的针孔模型,标定中需要考虑摄像机畸变。通常摄像机畸变包括径向畸变和切向畸变,令 $x = X_c/Z_c, y = Y_c/Z_c$ ,则摄像机的径向畸变 $\delta_{xr}, \delta_{yr}$ 可以表示为

$$\begin{cases} \delta_{xr}(x, y) = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \\ \delta_{yr}(x, y) = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \end{cases} \quad (2)$$

其中 $r^2 = x^2 + y^2, k_1, k_2, \dots$ 为径向畸变参量。

切向畸变 $\delta_{xt}, \delta_{yt}$ 可以表示为

$$\begin{cases} \delta_{xt}(x, y) = 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2), \\ \delta_{yt}(x, y) = p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $p_1, p_2$ 为切向畸变参量。在考虑摄像机畸变后, $p$ 点在摄像机坐标系中的实际坐标 $(x_d, y_d)$ 可以表示为

$$\begin{cases} x_d = x + \delta_{xr}(x, y) + \delta_{xt}(x, y), \\ y_d = y + \delta_{yr}(x, y) + \delta_{yt}(x, y), \end{cases} \quad (4)$$

再由透视变换可以得到 $p$ 点在图像坐标系中的坐标:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $f_u, f_v$ 分别为 $u, v$ 两个方向的有效焦距, $s$ 为坐标轴的倾斜因子, $u_0, v_0$ 分别为主点的图像坐标。

上述摄像机参量可以通过在测量体积内摆放若干平面靶实现<sup>[10]</sup>,这种方法的基本思想是:假设摄像机内参量是常数,对每个标定平面估计出它到摄像机图像坐标的变换矩阵(内参量和外参量的混合矩阵),然后利用旋转矩阵的正交性,通过超过两个不同位置标定平面的变换矩阵构造求解内外参量的线性方程组,解出摄像机的内外参量。对于相位测量轮廓术系统来说,是由 $uv$ 坐标求 $X_w Y_w Z_w$ 坐标,是一个后向投影问题,由于畸变模型(2)式、(3)式为非线性方程,一般无法求出 $x, y$ 。因此需要其他方法,常用的有迭代法、多项式近似等方法,Heikkila采用了下式计算<sup>[11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} x_d(1 + a_1 r_d^2 + a_2 r_d^4) + 2a_3 x_d y_d + a_4(r_d^2 + 2x_d^2) \\ y_d(1 + a_1 r_d^2 + a_2 r_d^4) + a_3(x_d^2 + 2y_d^2) + 2a_4 x_d y_d \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中  $G = (a_5 r_d^2 + a_5 x_d + a_7 y_d + a_8) r_d^2 + 1$ ,  $r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_8$  为后向投影畸变参量。

## 2.2 相位-高度映射关系

相位-高度的映射关系可表示为<sup>[7]</sup>

$$\frac{1}{\Delta h(u, v)} = a(u, v) + \frac{b(u, v)}{\Delta \phi(u, v)} + \frac{c(u, v)}{\Delta \phi^2(u, v)}, \quad (7)$$

其中  $\Delta h(u, v)$ 、 $\Delta \phi(u, v)$  分别是  $(u, v)$  点对应的标定平面相对于参考面的高度差和相位差,  $a(u, v)$ ,  $b(u, v)$ ,  $c(u, v)$  为相位-高度映射参量。

由(7)式可知,对于每个图像点  $(u, v)$  至少需要相对于参考面的 3 个高度差和相位差才能解出所需参量。只要指定参考平面,就可以获得相位差。下面讨论相对于全局参考平面的高度数据获取。

图 2 是相位测量轮廓术系统的标定示意图。由摄像机标定方法可知,标定靶在测量体积中的摆放几乎是任意的。可以指定其中一个位置的标定靶为全局参考平面,或规定一个全局参考平面,则由  $(u, v)$  点根据(5)式、(6)式计算出  $(x, y)$  代入(1)式得

$$\begin{bmatrix} xZ_c \\ yZ_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (8)$$

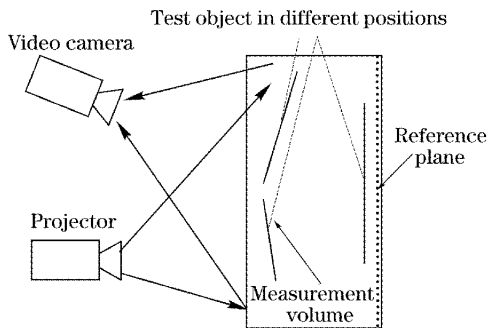


图 2 相位测量轮廓术系统标定示意图

Fig. 2 Sketch of calibration of phase measurement profilometry

由于局部坐标系中  $Z_w = 0$ , 将上式整理后可得

$$\begin{bmatrix} Z_c \\ X_w \\ Y_w \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{T}, \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x & -R_{11} & -R_{12} \\ y & -R_{21} & -R_{22} \\ 1 & -R_{31} & -R_{32} \end{bmatrix}.$$

在求出  $(u, v)$  对应的局部坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  后,由(1)式可得

$$\mathbf{R}_r \begin{bmatrix} X_{wr} \\ Y_{wr} \\ Z_{wr} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_r = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (10)$$

将(10)式整理得  $(u, v)$  点对应的标定靶上点在全局坐标系中的坐标:

$$\begin{bmatrix} X_{wr} \\ Y_{wr} \\ Z_{wr} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_r^{-1} (\mathbf{T} - \mathbf{T}_r), \quad (11)$$

其中  $\mathbf{R}_r^{-1}$ ,  $\mathbf{T}_r$  分别是全局参考面坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵的逆和平移向量。(11)式的  $Z_{wr}$  就是标定靶上的点相对于全局参考平面的高度。在测量体积内密集摆放标定靶,则可以得到在测量体积内密集的数据点,采用极大似然估计,可以得到比较精确的参量。

对于大视场测量系统,一个参考标定靶面积不足以覆盖测量体积远端区域(全局参考平面),此时需要指定若干位置标定靶作为辅助参考平面,分区域分别标定,使总的参考平面面积覆盖测量体积远端区域。在图像平面上每个区域内首先计算出对应的辅助参考平面上每点相对全局参考平面的高度,制作一张修正表作为测量时的修正值,然后计算其他标定平面到辅助参考平面的高度差和相位差,构造相位-高度映射参量标定数据集。在测量时,实际高度应该是测量值加修正值。

## 3 实验及结果分析

采用 Proxima UltraLight LX2 型 LCD 投影仪和 Jai A50 型摄像机,12 mm 镜头构建了相位测量轮廓术系统。用激光打印机在白纸上打印十字叉做为标记点,每个标记点的间隔为 20 mm,贴在平板上作为标定靶。考虑白纸周围可能存在的变形,处理时取白纸中间部分作为有效标定靶。这样,标定靶面积为 200 mm × 120 mm。测量体积的底部面积为 250 mm × 200 mm,深度为 200 mm。标定时将标定靶在测量平面内摆放 17 个位置,每个位置分别采集 5 帧相移条纹和 1 帧背景图(即标定靶图像),图 3 是其中一个位置的一帧变形条纹图和标定靶图像。

在获取所需图像后,先进行摄像机标定。在摄像机畸变模型中,由于高阶径向畸变参量很小,而且太多的畸变参量反而会导致标定结果的不稳定,这里只取了  $k_1, k_2$  这两个径向畸变参量及切向畸变参量。在标定出摄像机参量后,按下列步骤进行相位-高度映射参量的标定:

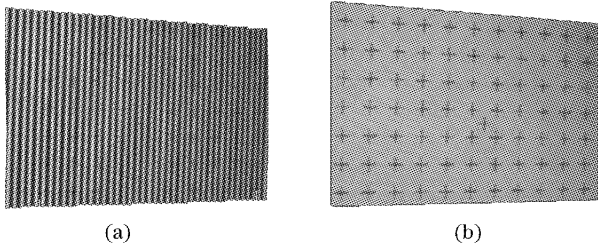


图 3 用于标定的图像。(a)变形条纹图,(b)标定靶图像  
Fig. 3 Image used in calibration. (a) Deformed fringe, (b) image of calibrated targets

- 1) 指定全局参考平面;
- 2) 指定辅助参考平面,并在图像平面上划分对应区域,每个区域对应不同的辅助参考平面;
- 3) 在图像平面上每个区域中通过(11)式计算其所对应的辅助参考平面每点在全局参考坐标系中的高度,构造测量值修正表;
- 4) 在图像平面上每个区域中计算其他标定平面到辅助参考平面的相位差和高度差,构造相位-高度参量标定数据集;
- 5) 根据构造的数据集,采用极大似然估计法估计出参量。

测量系统的标定误差与采用的摄像机模型、标记点的提取精度、相位测量精度及摄像机的分辨率有关。其中相位测量精度和标记点的提取精度对标定结果有较大的影响,实验中采用了 5 帧相移法测量相位和亚像素标记点提取方法。标定摄像机参量

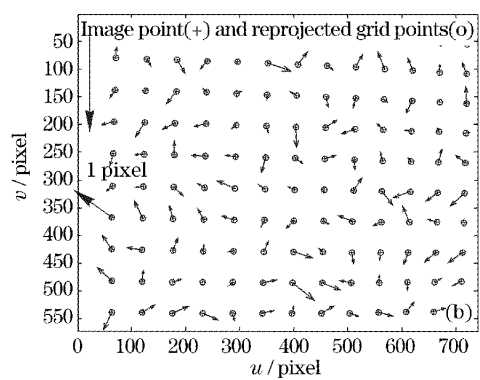
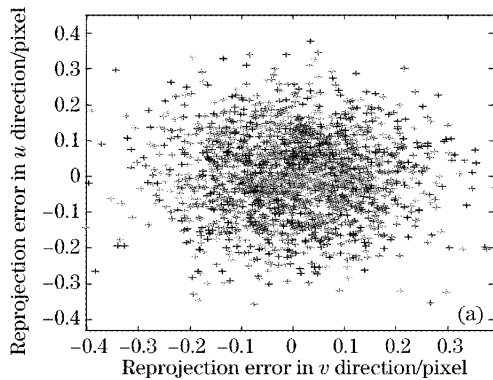


图 5 标定误差。(a)重投影误差分布,(b)典型误差

Fig. 5 Calibration error. (a) Error distribution of reprojection, (b) typical error

用标定后的系统测量了一个相对全局参考面高度为 80 mm 的平面。测量结果如下,平均值为 80.0088 mm,标准偏差为 0.0433 mm。在实验中未发现辅助参考平面引入的误差对测量精度有明显影响。作为对比,同时用 4 个平行平面方法<sup>[12]</sup>估计(7)式的参量,测量结果如下,平均值为 79.9300 mm,

至少需要 3 个位置的标定靶信息<sup>[10]</sup>,而标定测量系统的参量需要的标定靶位置数跟测量体积和标定靶大小有关,这里采用了 17 个标定靶位置。摄像机标定的结果为: $f_u=1487.67, f_v=1506.52, u_0=384.52, v_0=302.00, s=1.282 \times 10^{-3}, k_1=-0.2955, k_2=0.1107, p_1=6.412 \times 10^{-4}, p_2=2.840 \times 10^{-3}$ ,重投影像素的标准偏差  $u$  方向为 0.0464 pixel,  $v$  方向为 0.0418 pixel。图 4 是摄像机坐标系中标定平面的位置示意图,图 5(a)为摄像机标定后重投影的误差分布,不同灰度的“+”表示不同标定靶上标记点的误差,一个“+”代表一个标记点;图 5(b)是其中一个标定靶的误差情况,图中箭头长度表示误差大小,方向由检测出的标记点位置指向重投影的标记点位置。

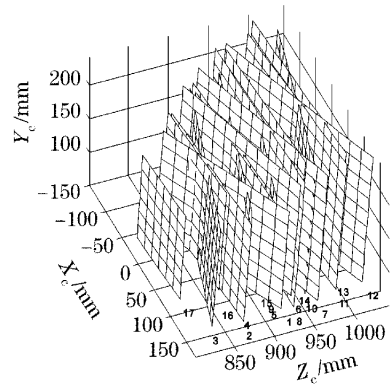


图 4 标定平面位置

Fig. 4 Positions of calibrating plane

标准偏差为 0.0940 mm。图 6(a)是平面测量结果,图 6(b)是用两种方法标定后测量的平面上同一条直线的测量结果比较,浅色点为用本文方法标定后的测量结果,深色点为用 4 个平行平面标定后的测量结果。最后我们还用标定好的系统测量了人头模型,图 7 是用三角形网格表示的测量结果。

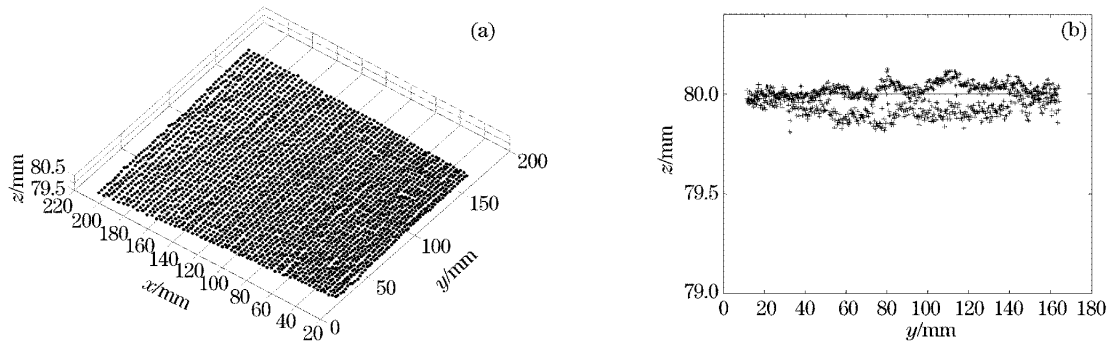


图 6 平面测量结果。(a)重建的平面,(b)平面上的一条线

Fig. 6 Measurement result of plane. (a) Reconstructed plane, (b) a line on plane

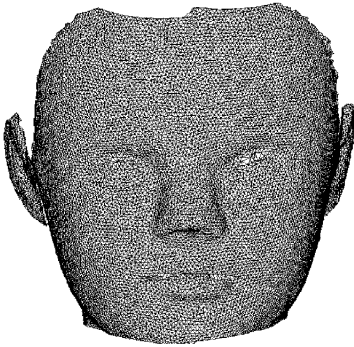


图 7 人头模型测量结果

Fig. 7 Measured result of human head model

## 4 结 论

针对目前相位测量轮廓术测量系统用于大视场测量时参量标定方法中存在的不足,提出了一种新的系统参量标定方法。采用较小的平面标定靶获取测量体积内密集的数据点。由于这种方法可以得到测量体积内密集的数据点,标定的参量具有较高的精度。而且对标定靶的尺寸要求不高,完全适合现场标定的需要。

## 参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 3 Xianyu Su, G. V. Bally, D. Vukicevic. Phase stepping grating profilometry; Utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141~150
- 4 S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Fujigaki *et al.*. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **40**: 153~161
- 5 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518~1522 (in Chinese)  
郝煜栋,赵洋,李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1518~1522
- 6 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yusha. A novel phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 898~901 (in Chinese)  
赵宏,陈文艺,谭玉山. 一种新的相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 898~901
- 7 W. S. Zhou, X. Y. Su. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(1): 89~94
- 8 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277 (in Chinese)  
宋万忠,苏显渝,曹益平等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 272~277
- 9 Ricardo Legarda-Sáenz, Thorsten Bothe, Werner P. Jüptner. Accurate procedure for the calibration of a structured light system [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 464~471
- 10 Zhengou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 11 Janne Heikkilä, Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997. 1106~1112
- 12 Wansong Li, Xianyu Su, Zhongbao Liu. Large-scale three-dimensional object measurement; a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(20): 3326~3333