

文章编号: 0253-2239(2009)11-3061-05

结构光测量技术中的投影仪标定算法

李中伟 史玉升 钟 凯 王从军

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 详细介绍了投影机模型, 并提出一种简单、高精度的投影仪参数标定算法, 该算法将投影仪当作一个逆向的相机, 使用一块带有圆形标志点的平面标定板对投影仪进行标定。标定过程中, 使用两组不同方向的光栅图像建立投影仪图像和相机图像的对应关系, 从而得到投影仪标定所需的图像数据, 将投影仪标定转化为成熟的相机标定, 然后使用相机标定算法对投影仪进行高精度标定。实验结果表明, 所提议的投影仪标定算法操作过程简单, 标定精度可达 0.312 pixel。

关键词 结构光测量; 投影仪标定; 三维测量; 相位移

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3061

Projector Calibration Algorithm for the Structured Light Measurement Technique

Li Zhongwei Shi Yusheng Zhong Kai Wang Congjun

(State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A projector model is described in details, and a simple and accurate projector calibration method is proposed. In this method, the projector can be viewed as an inverse camera, and a plane calibration board with circle marks is used to calibrate the projector. During the calibration processing, two series fringe patterns with different directions are projected onto the calibration board to establish accurate projector image and camera image correspondence. Thereby, the projector calibration dataset can be generated. Then the projector can be calibrated using a well established camera calibration algorithm. The experiment results show that the projector calibration algorithm proposed in this work is easy to operate and precise. The calibration precision can achieve 0.312 pixel.

Key words structural light measurement; projector calibration; 3D measurement; phase-shift

1 引 言

结构光测量技术具有非接触、精度高、速度快等优点, 已在工业检测、机器视觉、娱乐、医学等领域得到大量运用^[1~6]。在现有的结构光测量系统中, 由单相机-单投影仪组成的结构光三维测量系统, 由于具有结构简单、点云重建效率高等优点而被广泛使用^[3]。传统的单相机结构光三维测量方法采用相位测量轮廓术^[4], 测量过程中由投影装置把光栅图

像投影到被测物体表面, 同时使用相机拍摄下经被测物体表面调制而发生变形的的光栅图像, 然后通过对变形的的光栅图像进行处理, 计算出代表物体高度的相位信息, 最后根据相位信息和已标定出的系统参数对被测物体表面进行三维点云重建。该方法存在约束过强、标定精度不高、可操作性差等问题, 影响了该技术的实用化。^[7]

为了解决上述问题, 文献[7, 8]提出了一种新的

收稿日期: 2008-12-16; 收到修改稿日期: 2009-01-16

基金项目: 2007 年粤港关键领域重点突破项目(2007498212)资助课题。

作者简介: 李中伟(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光学测量、机器视觉和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: lizhongwei226@gmail.com

导师简介: 史玉升(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维光学测量和先进成形技术等方面的研究。

E-mail: shiyusheng@263.net

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

投影仪参数标定算法, 该算法将投影仪当作一个逆向的相机, 通过建立投影仪图像和相机图像的对应关系, 将投影仪标定转化为成熟的相机标定, 从而将单相机结构光三维测量系统转换为经典的双目视觉系统。该算法新颖、简单、标定精度比传统的相位测量轮廓术更高。但是文献[7, 8]在建立标定投影仪所需的投影仪图像时, 均没有考虑光栅图像非正弦化引起的相位误差^[9], 而这种相位误差会影响建立的投影仪图像的精度, 进而影响投影仪的标定精度和系统的测量精度。本文在上述算法的基础上, 详细介绍了投影仪的数学模型和投影仪图像采集方法, 在投影仪图像采集过程中通过对相位误差进行补偿, 提高投影仪图像的精度, 进而提高投影仪的标定精度, 最后通过标定实验和测量实验对本文算法进行了验证, 实验结果

表明, 本文所提议的投影仪标定算法操作过程简单精确, 标定精度可达 0.312 pixel。

2 原 理

单相机结构光三维测量系统的结构简图如图 1 所示, 该系统由一个 CCD 摄像机和一个数字光处理器(DLP) 投影仪组成, 测量时使用 DLP 投影仪投射一组光强呈正弦分布的光栅图像, 如图 2 所示, 由 3 种不同频率的四步相移图像组成, 使用 CCD 摄像机同时拍摄图像, 利用所得图像, 根据四步相移法计算相位主值, 并根据外差原理进行相位展开^[10, 12], 最后利用已标定的系统参数和相位灰度图重建被测物体表面的三维点云数据^[8, 13]。

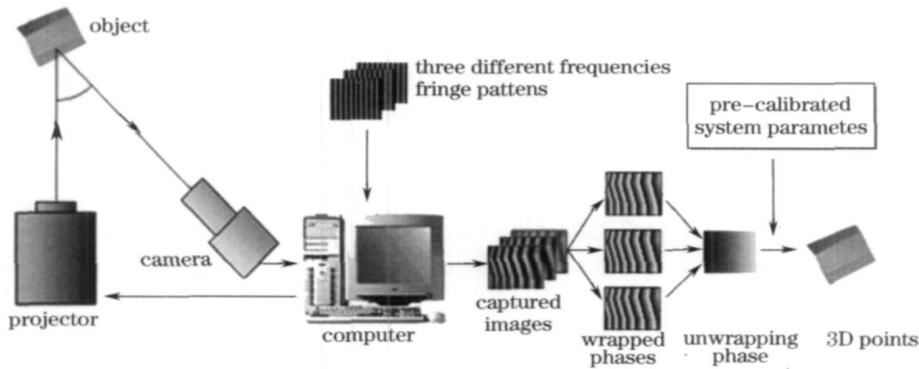


图 1 结构光测量系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of structural light measurement system

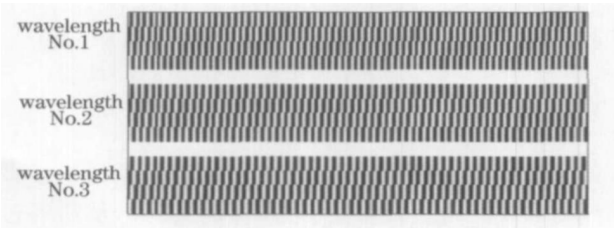


图 2 结构光测量系统所用的光栅图像

Fig. 2 Fringe patterns used in the structured light system

2.1 投影仪模型

从投影仪的投射原理可知, 投影仪投射的过程与相机拍摄的过程正好相反, 可以将投影仪看作一个逆向的相机, 因此可以为投影仪建立一个与相机类似的数学模型。不考虑镜头畸变时, 采用小孔成像模型作为相机的数学模型, 可表示为^[14]

$$\frac{u}{f} = \frac{r - u_0}{f_u} = \frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3}, \quad (1)$$
$$\frac{v}{f} = \frac{c - v_0}{f_v} = \frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3},$$

式中 (u, v) 为空间点的坐标, (r, c) 为对应的图像坐标, $R = (r_{ij})$ 是一个 3×3 的从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转正交矩阵, $T = (t_1, t_2, t_3)$ 是一个 3×1 的平移向量, (u_0, v_0) 为计算机帧存图像中心的坐标, f 为摄像机的焦距, $f_u = f \cdot s_u$, $f_v = f \cdot s_v$, s_u, s_v 分别为图像平面中 u 和 v 方向单位距离上的像素数。

由于摄像机光学系统存在装配误差和加工误差, 使得物体点在摄像机成像面上实际所成的像与理想成像之间存在有光学畸变误差。镜头畸变影响了被测点在图像坐标系下的坐标值, 其修正公式为

$$u' = u + \delta_u(u, v), \quad v' = v + \delta_v(u, v), \quad (2)$$

式中 $\delta_u(u, v)$, $\delta_v(u, v)$ 为镜头畸变引起的误差, 本文仅考虑镜头的一阶径向畸变, 此时 u 轴和 v 轴的畸变可表示为^[14]

$$\delta_u(u, v) = k_1 u(u^2 + v^2),$$
$$\delta_v(u, v) = k_1 v(u^2 + v^2). \quad (3)$$

2.2 投影仪图像采集方法

本文使用带有 99 个圆形标志点的平面标定板

建立投影仪图像和相机图像的对应关系,从而间接的为投影仪采集标定所需的图像。标定过程中使用投影仪向平面标定板投射两种不同方向的光栅图像,每组包括3种不同频率的4幅相差为 $\pi/2$ 的光栅图像(与测量时使用的光栅图像相同)。投影仪图像生成的具体步骤如下:

- 1) 拍摄一张标定板图像,向标定板分别投射一组水平和垂直光栅图像并拍摄;
- 2) 使用标定板图像,提取圆形特征点的亚像素级圆心坐标 $(X_{c_i}, Y_{c_i})^{[9]}$;
- 3) 使用光栅图像,利用四步相移法和外差原理分别计算出水平和垂直光栅图像的绝对相位值^[15],在使用四步相移法计算光栅图像的相位主值时,需要对相位误差进行补偿^[16];
- 4) 利用线性插值得到每个圆心坐标在 X 方向和 Y 方向所对应的绝对相位值,然后利用绝对相位值计算出对应的数字微反射镜(DMD)图像的 X, Y 坐标,从而得到每个圆心对应的投影仪图像坐标;
- 5) 重复上述步骤,得到至少三组不同方向的投影仪图像坐标,用于对投影仪进行标定。

上述过程的流程图如图3所示。为了验证投影仪图像坐标的准确性,可以将生产的投影仪图像投射到标定板上,如果投射的圆心与标定板上圆形标志点的圆心重合,则说明建立的投影仪图像坐标是大致正确的。一旦得到标定投影仪所需的投影仪图像坐标,即可以使用相机标定方法对投影仪进行标定。

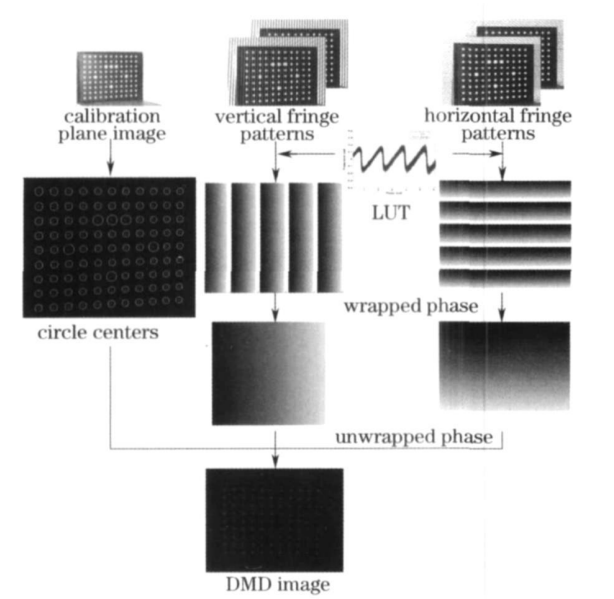


图3 投影仪图像坐标计算流程图

Fig.3 Projector data set generation flow chart

3 标定实验

本文使用图4所示的结构光测量系统对本文所提的投影仪标定算法进行验证,该系统由一个DLP投影仪(InFocus LP70+,支持的最高分辨率为 1280×1024)和CCD相机(大恒SV1410FM,支持的最高分辨率为 1392×1040)组成,系统的基线长度为400 mm,测量距离为1500 mm。标定过程中,按照上述步骤从6个不同方向采集数据,得到用于投影仪标定的六幅图像,如图5所示,然后使用Bouguet提供的MATLAB相机标定工具箱对投影仪进行标定^[17],标定结果见表1。

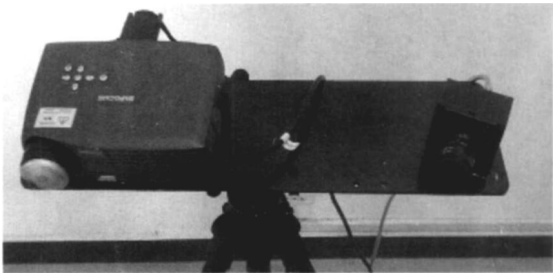


图4 结构光测量系统

Fig.4 Structrued light system

表1 投影仪标定结果

Table 1 Projector calibration result

Intrinsic parameters			
f_u	2608. 12		
f_v	2864. 88		
u_0	698. 64		
v_0	1083. 43		
k_1	- 0. 10		
Extrinsic parameters			
	0. 991 75,	- 0. 009 395 6,	0. 1 27 86;
R	- 0. 005 782 9,	- 0. 999 57,	- 0. 028 59 8;
	0. 1 28 07,	0. 027 62 2,	- 0. 991 38
T	- 52. 37,	- 50. 32,	984. 06

为了分析投影仪标定的精度,本文计算了标定中所有标志点的反向投影误差,误差分布如图6所示,均方根误差在 X, Y 两个方向分别为0.312 pixel和0.269 pixel。此外,在对上述结构光测量系统中的相机和投影仪进行标定之后,对一个直径为50 mm的标准球进行了测量,使用测量得到的点云数据拟合得到的球直径为49.87 mm,测量绝对精度达到0.13 mm。

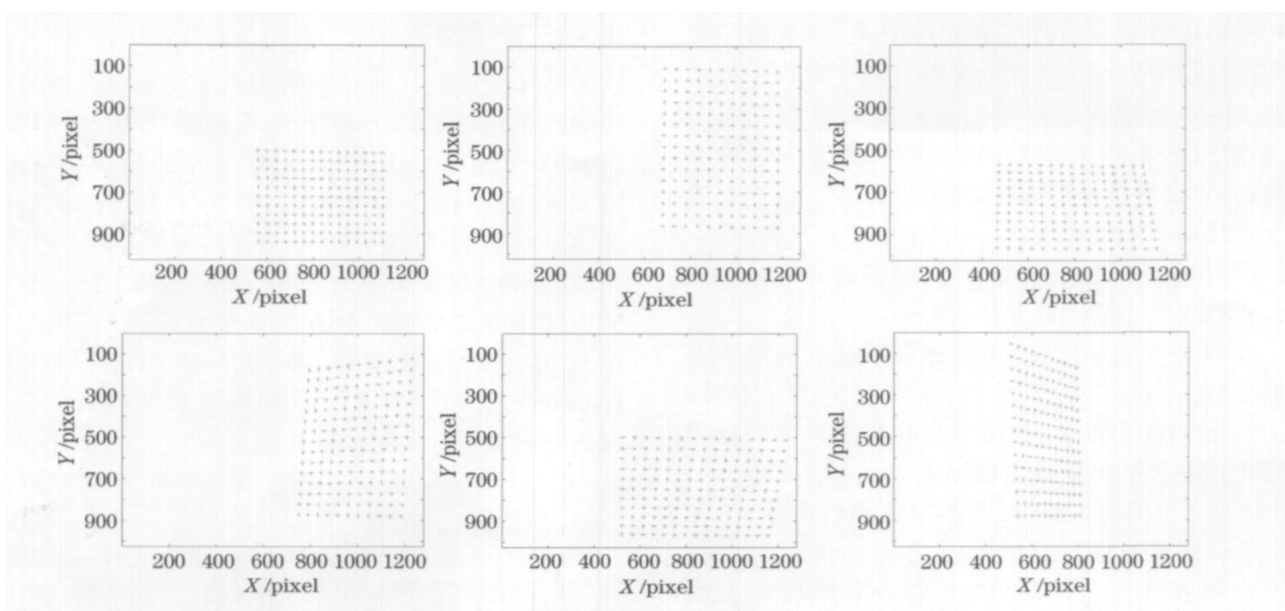


图 5 投影仪图像

Fig. 5 Projector Images

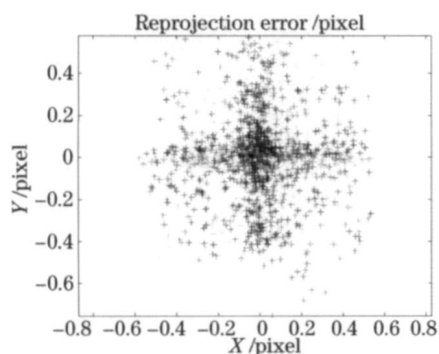


图 6 反向投影误差

Fig. 6 Reprojection errors

4 结 论

在由单相机-单投影仪组成的结构光三维测量系统中投影仪的标定是系统参数标定的关键。本文将投影仪当作一个逆向的相机,建立了投影仪模型,并使用带有圆形标志点的平面标定板和两组不同方向的光栅图像,得到标定投影仪所需的图像,从而使用相机标定算法对投影仪进行标定。实验表明,本文所提的投影仪标定算法操作过程简单,投影仪标定的精度达到 0.312 pixel,结构光测量系统的测量精度达到 0.13 mm。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. W. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(10): 10~22

- 2 S. Zhang, S.-T. Yau. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase shifting method[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2644~2649
- 3 Q. Hu, P. S. Huang, Q. Fu *et al.*. Calibration of a 3-d shape measurement system[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(2): 487~493
- 4 Li Yong, Su Xianyu, Wu Qingyang. New phase height mapping algorithm in PMP system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(2): 79~83
- 李 勇, 苏显渝, 吴庆阳. PMP 系统中一种新的相位-高度映射算法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(2): 79~83
- 5 Tang Xian, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- 唐 燕, 陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- 6 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264
- 吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 7 Dai Xiaolin, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong *et al.*. Research on projector calibration in one-camera 3-D measurement systems[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2008, **8**: 194~196
- 戴小林, 钟约先, 袁朝龙等. 单摄像头结构光扫描系统中投影仪标定技术[J]. *机械设计与制造*, 2008, **8**: 194~196
- 8 S. Zhang, P. S. Huang. Novel method for structured light system calibration[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 83601~83608
- 9 J. N. Ouellet, P. Hébert. A simple operator for very precise estimation of ellipses[C]. *Computer and Robot Vision*, 2007 (CRV'07), 2007. 21~28
- 10 C. Reich, R. Ritter, J. Thiesing. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 224~231
- 11 C. E. Towers, D. P. Towers, J. Jones. Generalized frequency selection in multifrequency interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1348~1350
- 12 Z. W. Li, Y. S. Shi, C. J. Wang *et al.*. A prototype system for high precision 3-D measurement based on grating method[C].

SPIE, 2007, **6292**: 683442

13 Z. W. Li, Y. S. Shi, C. J. Wang *et al.*. Accurate calibration method for a structured light system [J]. *Opt. Eng.*, 2008, **47**(5): 053604

14 J. Heikkila. Geometric camera calibration using circular control points [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(10): 1066~ 1077

15 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software[M]. New York: John Wiley and Sons, 1998

16 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yushen *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1527~ 1532

李中伟, 王从军, 史玉升 等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1527~ 1532

17 http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc