

基于最优匹配区域的结构光系统的投影仪标定

王中任^{1,2}, 万仁全^{1,3}, 刘亚俊³

(1. 湖北文理学院机械与汽车工程学院, 湖北 襄阳 441053;

2. 汽车零部件制造装备数字化湖北省协同创新中心, 湖北 襄阳 441053;

3. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:针对现有的投影仪标定算法精度不高的问题,根据投影仪的非线性模型,提出一种基于最优匹配区域的新投影仪标定算法。首先通过试验得到最优匹配区域,然后在最优匹配区域内计算角点的局部单应性矩阵,最后采用相机标定的方法对投影仪进行亚像素级标定。实验结果表明,该方法标定过程简便,投影仪标定误差最大为 0.10617 pixel,算法的执行时间为 0.1907 s,系统三维重构的点云密度达 9.14 个/mm²。该方法只需要普通的平面标定板,操作简单,可满足高精度的三维测量系统要求。

关键词:结构光测量;三维重构;投影仪标定;局部单应性

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.03.018

Projector calibration of structured light system based on optimal matching area

WANG Zhong-ren^{1,2}, WAN Ren-quan^{1,3}, LIU Ya-jun³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hubei University of Arts & Science, Xiangyang 441053, China;

2. The Co-Innovation Center of Hubei Province of Auto Parts Manufacture Equipment Digitizing, Xiangyang 441053, China;

3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: As the precision of existing projector calibration algorithms is low, a new calibration method based on the optimal matching area is proposed according to projector nonlinear model. Firstly, the optimal matching area is obtained through the experiments. Then, local homographies of corners in the optimal matching area are computed. Finally, the camera calibration method is used to calibrate the projector which reach the sub-pixel precision. The experiment results show that the proposed projector calibration algorithm is easy to operate. The calibration precision can achieve 0.10617 pixel. The runtime costs 0.1907 s and point cloud density is 9.14 per mm², which meets the measurement requirements of high precision.

Key words: structured light measurement; 3D reconstruction; projector calibration; local homography

1 引言

由于其非接触、自动化程度高、速度快、高精度等优点,结构光三维测量在产品设计与制造、质量检测中获得了广泛应用^[1-3]。在结构光三维测量系统

中,投影仪标定技术是获得高精度的三维测量最基本和关键的环节^[4],它主要包括投影仪的内参标定,以及投影仪和摄像机坐标系之间变换矩阵的确定。文献[5]标定精度较低,难以实现高精度的测

基金项目:湖北省自然科学基金项目(No. 2014CFB637)资助。

作者简介:王中任(1974-),男,博士,副教授,主要从事智能制造与机器视觉方面的研究。E-mail: xfu-wangzhongren@126.com

收稿日期:2015-06-09; **修订日期:**2015-06-24

量。文献[6]要求标定过程中移动投影仪,限制了其应用场合。文献[7]标定过程复杂,且不易实现。文献[8]成本昂贵,难以在实际工程中应用。文献[9]在计算单应性矩阵时耗时很长,造成整个标定程序效率不高,而且算法对结构光解码精度要求很高,对解码误差的鲁棒性不强,因此很难适应工业现场的高实时性和高可靠性要求。

本文在现有的算法基础上,提出一种基于最优匹配区域的结构光系统中投影仪标定算法,先用最优匹配区域计算每个角点的局部单应性矩阵,然后由投影仪的线性针孔模型和非线性畸变模型标定出投影仪的内参矩阵,最后用传统的双目标定方法得到投影仪-摄像机的外参矩阵。实验表明本方法适用于大视场、高精度的三维实时测量,很好地解决了上述方法在实时性和可靠性方面的不足,不仅操作简单易行,而且大大提高了系统的标定精度和系统鲁棒性。

2 标定原理和算法流程

2.1 投影仪的理想针孔模型

按照前面所述,投影仪看作一个逆向的摄像机,所以投影仪模型可用与摄像机相同的理想针孔模型表示,基于单摄像机-单投影仪的结构光三维测量系统如图1所示。

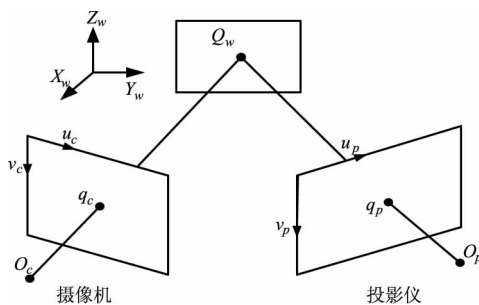


图1 结构光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structured light system

投影仪像平面上的一点图像 $q_p = [u_p \ v_p]^T$, 投射到世界坐标系下某点三维 $Q_w = [X \ Y \ Z]^T$, 其对应的齐次坐标分别为 $\tilde{q}_p$ 和 $\tilde{Q}_w$, 则两点基于理想针孔模型之间的关系可表示为:

$$s\tilde{q}_p = H\tilde{Q}_w \quad (1)$$

式中, 参数 s 为尺度系数; H 为单应性矩阵, 表示为世界坐标系与投影仪像平面坐标之间的映射关系, 由两部分组成: (1) 外参矩阵: 即投影仪坐标系同世界坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T , 表示为

$[R \ T]$; (2) 内参矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, (c_x, c_y) 为图像平面的主点坐标; f_x 和 f_y 为沿图像平面两个坐标轴的焦距, 其中 $f_x = f \times s_x$, $f_y = f \times s_y$, s_x 和 s_y 分别表示为图像平面中两个 x 和 y 方向单位距离上的像素数。因此, 投影仪的理想针孔数学模型表示为:

$$s\tilde{q}_p = M [R \ T] \tilde{Q}_w \quad (2)$$

2.2 投影仪的畸变模型

在设计、加工和组装光学镜片等过程中不可避免地会导致镜头非线性畸变, 从而导致实际的成像点与理想成像点存在误差, 这时在标定过程中需要引入畸变因子进行校正。这里主要考虑镜头的切向畸变和径向畸变^[10], 模型表示如下:

$$\begin{cases} u_i = u_d + [k_1 u_r^2 + k_2 u_r^2 + p_1 (3u_r^2 + v_r^2) + 2p_2 u_r v_r] \\ v_i = v_d + [k_1 v_r^2 + k_2 v_r^2 + p_2 (3v_r^2 + u_r^2) + 2p_1 u_r v_r] \end{cases} \quad (3)$$

式中, (u_i, v_i) 为理想图像坐标; (u_d, v_d) 为实际图像坐标。假设图像平面主点为 (u_0, v_0) , 则 $(u_r, v_r) = (u_d - u_0, v_d - v_0)$ 为相对图像坐标, $r^2 = u_r^2 + v_r^2$, k_1 和 k_2 为一、二阶径向畸变系数, p_1 和 p_2 为一、二阶切向畸变系数。

2.3 标定方法

尽管投影仪在参数标定部分可以采用与摄像机完全一样的数学模型, 但却无法直接得到平面棋盘标定板上每个角点的投影仪像平面下的像素坐标。因此, 投影仪标定的首要难题是如何确定在投影仪投影平面上由像素点对应的空间三维坐标。如图2所示, 本文先把平面棋盘标定板以某姿态放置在空间世界坐标系中, 将水平和竖直的格雷码条纹按不断细分的次序投射到标定板上, 相机捕获到图片后, 先利用由文献[11]的方法计算出的直接光分量和间接光分量来进行光条纹阈值分割, 然后由格雷码解码算法得到投影仪像平面每个点的像素坐标。利用不同匹配区域, 使得摄像机像平面与投影仪像平面之间的单应性矩阵泛函数取得最小值来获得最优化单应性矩阵, 得到标定板每个角点的投影仪像平面下的像素坐标。

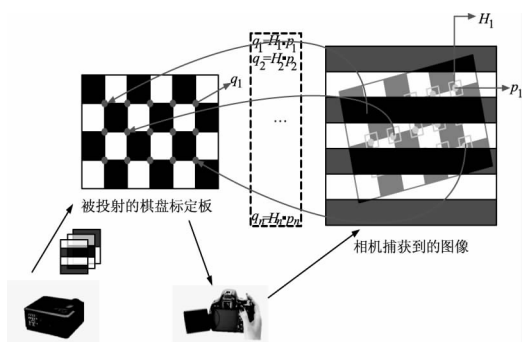


图2 结构光系统标定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structured light system calibration

标定投影的具体流程如下:

(1) 平面棋盘标定板以某姿态放置在空间世界坐标系中,投影仪投射出 42 幅格雷码结构光图案到平面棋盘标定板,投射的次序是 1 幅全白、1 幅全黑、20 幅水平方向、20 幅竖直方向格雷码结构光图案,并且依次被相机所捕获。

(2) 使用第一张标定板图像,提取棋盘标定板角点的亚像素级的坐标 (x_c, y_c) 。

(3) 设 $S = \{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ 为输入的格雷码结构光条纹图像序列, p 为图形上的某个像素点,点 p 的直接光分量和间接光分量分别为 $L_d(p)$ 和 $L_g(p)$,则有:

$$L_p^+ = \max_{0 < i \leq k} I_i(p), L_p^- = \min_{0 < i \leq k} I_i(p) \quad (4)$$

$$L_d(p) = \frac{L_p^+ - L_p^-}{1 - b}, L_g(p) = 2 \frac{L_p^- - bL_p^+}{1 - b^2} \quad (5)$$

其中, $b \in [0, 1)$, 是由投影仪投射的暗条纹灰度值决定的。利用图像每个像素点的 $L_d(p)$ 和 $L_g(p)$, 对图像中的格雷码条纹进行亚像素级阈值分割, 然后用格雷编码的逆过程对阈值分割后的图像进行解码, 得出每个投影仪图像上的每个像素点坐标。

(4) 设点 a 为相机图像上的某一个像素点, b 点为 a 对应投影仪图像平面上的像素点, a 和 b 在各自像平面的齐次像素坐标为:

$$a = [x_c, y_c, 1]^T, b = [x_p, y_p, 1]^T \quad (6)$$

定义点 a 和 b 的单应性矩阵为 $\hat{H}$, 使式(7)最小:

$$\hat{H} = \operatorname{argmin}_H \sum_a \|a - Hb\|^2 \quad (7)$$

其中, $\forall a \in H$, H 称为匹配区域, 由公式(7)可知, 若匹配区域 H 过大, 使得该式收敛速度很慢, 算法效率低下; 而匹配区域 H 过小, 又会对标定的精度有不利的影响。故本文通过实验定量地研究了匹配区域的大小同投影仪标定算法的精度和效率之间的关

系。在第二步得到的每个相机图像坐标系下的角点 $\bar{a}$, 应用式(8)可以得出该角点对应在投影仪图像坐标系下的 $\bar{b}$:

$$\bar{b} = \hat{H} \cdot \bar{a} \quad (8)$$

这样, 可以求出每个在相机图像坐标系下的角点亚像素坐标 (x_c, y_c) 对应投影仪图像坐标系下的亚像素坐标 (x_p, y_p) 。

(5) 在相机和投影仪的视野范围内, 尽量较大程度改变标定板的姿态, 重复以上步骤, 得到至少 3 组不同标定板姿态图片。由于本标定方法使用的是每个标定板角点坐标, 而并非是整个棋盘标定板平面, 因此适用于 2.2 节非线性投影仪模型。最后利用张正友的相机标定方法来对投影仪的内外参数进行标定。

3 标定实验及结果分析

3.1 标定实验

使用图 3 所示的三维测量系统对本文所述的投影仪标定算法进行测试验证, 该系统由一个 DLP 投影仪(型号为 BenQ ML6277, 所选分辨率为 1024×768)和单反相机(型号为 Canon EOS650D, 所选分辨率为 5184×3456)组成; 标定的软件环境为 opencv-2.4.3 和 VS2010。标定过程中, 按照上述步骤从 6 个不同棋盘标定板姿态来采集图像, 其中图 4 为实验中三组标定板不同空间姿态下的水平和竖直格雷码解码结果, 图 5 为由对应姿态下投影仪反投影生成的虚拟图像。

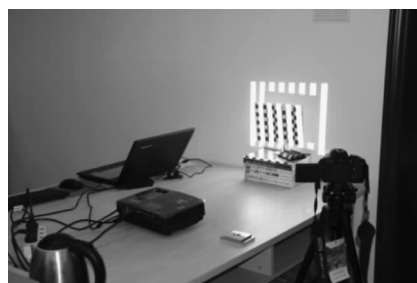
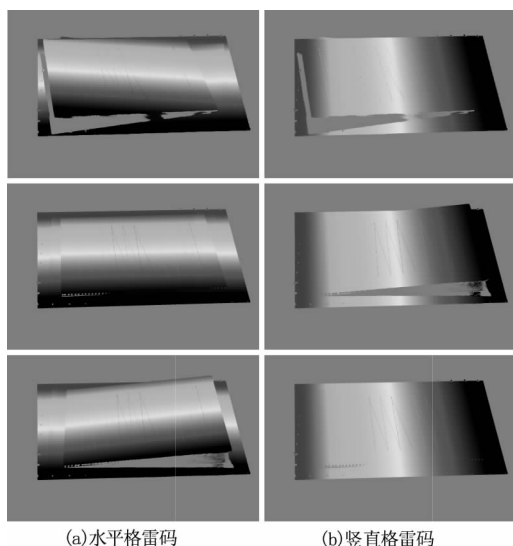


图3 结构光测量系统

Fig. 3 Structured light system



(a)水平格雷码 (b)竖直格雷码

图4 水平和竖直格雷码解码结果

Fig. 4 Decoded Gray pattern of column and row

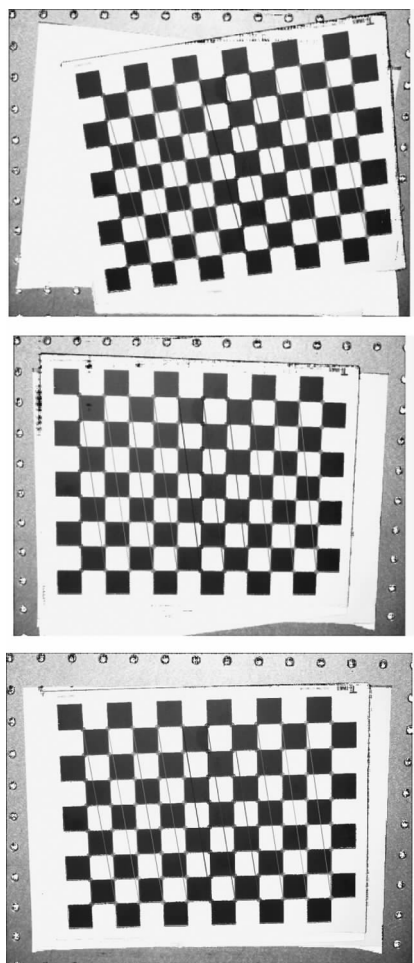


图5 投影仪反投影生成的虚拟图像

Fig. 5 Reprojected virtual image of projector

设定不同的匹配区域,用反投影误差来衡量投影仪的标定精度;用标定算子执行的时间来衡量投影仪的标定效率,反投影误差和执行时间结果如图

6所示。

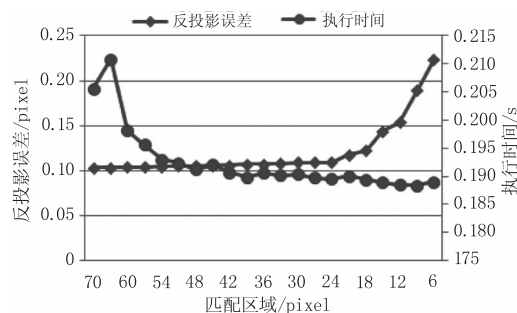


图6 标定算法的效率和精度

Fig. 6 The efficiency and precision of calibration algorithm

3.2 实验结果分析

由实验结果可知,匹配区域由 70 pixel 降到 24 pixel 时,投影仪标定算子的反投影误差升高了 0.005584 pixel,最大反投影误差为 0.109089 pixel (匹配区域为 24 pixel 时),相比最小反投影误差 0.103505 pixel (匹配区域为 65 pixel 时)增大了 5.395%,因此可知,出在此区间内,匹配区域的增大并没有显著降低投影仪标定的精度。但是当匹配区域由 24 pixel 降到 6 pixel 时,投影仪标定算子的反投影误差升高了 0.114192 pixel,最大反投影误差为 0.223281 pixel (匹配区域为 6 pixel 时),相比最小反投影误差 0.109089 pixel (匹配区域为 24 pixel 时)增大了 104.678%。由此分析可知,投影仪标定算法有个最优匹配区域的取值范围,若是小于该范围,会造成标定精度的大幅度降低。

在算子执行时间方面,匹配区域由 70 pixel 降到 42 pixel 时,投影仪标定算子的执行时间降低了 0.0201s,最长执行时间为 0.2108s (匹配区域为 65 pixel 时),相比最短执行时间 0.1907s (匹配区域为 42 pixel 时)要长 10.540%;但是当匹配区域由 42 pixel 降到 6 pixel 时,投影仪标定算子的执行时间只降低了 0.0023 s,最长执行时间为 0.1907 s (匹配区域为 42 pixel 时),相比最短执行时间 0.1884 s (匹配区域为 9 pixel 时)要长 1.221%。

由理论原理和实验结果分析可知,计算单应性矩阵时的匹配区域对投影仪标定的效率和精度有很大的影响,在本实验硬件条件下,匹配区域选择 24 pixel 至 48 pixel 时,保证了标定的精度同时兼顾标定效率,是理想的匹配区域范围。因此,选取匹配区域为 42 pixel 作为最佳匹配区域,反投影误差 $e_p = 0.10617$,标定得到的投影仪外参和内参如表 1 所示,图 7 为使用该标定结果来进行的三维重构实验结果。

表1 投影仪标定结果
Tab.1 Projector calibration result

Projector intrinsic parameters			
$f_u / (\text{mm} \cdot \text{pixel})$	1879.34	u_0 / pixel	474.67
$f_v / (\text{mm} \cdot \text{pixel})$	1988.14	v_0 / pixel	384.28
k_1	-0.055	p_1	0.012
k_2	0.141	p_2	-0.001
Projector extrinsic parameters			
R	$\begin{bmatrix} -0.995 & 0.045 & -0.087 \\ -0.095 & -0.676 & 0.731 \\ -0.026 & 0.735 & 0.677 \end{bmatrix}$		
T	[139.34 -844.67 -157.51]		

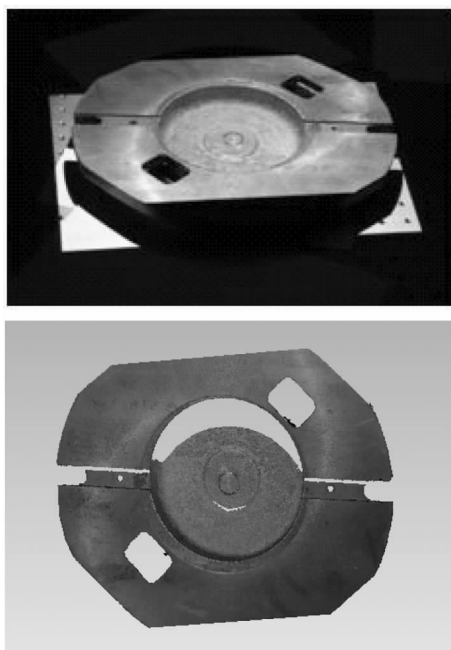


图7 三维重构结果

Fig. 7 3D reconstruction result

4 结 论

在由摄像机-投影仪组成的结构光三维测量系统中,相机的标定和投影仪的标定是获得高精度测量结果的关键。本文将投影仪当作一个逆向的相机,建立了投影仪模型,由于使用的是未标定的摄像机,故投影仪的标定精度不受摄像机标定误差的影响。标定算法中的投影仪像素与摄像机像素之间的匹配区域对标定的效率和精度有很大的影响,本文通过实验定量地研究了匹配区域与精度和效率之间的关系,并分析得出了在本实验硬件条件下的最佳匹配区域。实验表明,在最佳匹配区域下,投影仪的

标定精度达到 0.10617 pixel,效率为 0.1907 s。在对三维测量系统进行摄像机和投影仪标定后,对一个尺寸为 20 mm × 20 mm × 20 mm 的标准块进行三维重构,得到的三维点云密度为 9.14 个/mm²,拟合可得标准块的边长为最终重构 20.072 mm,测量绝对精度为 0.072 mm。

参考文献:

- [1] Song Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, (48): 149-158.
- [2] WEI Yongchao, DU Dong. Analysis of phase error caused by the fill factor in digital projection [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 93-97. (in Chinese)
魏永超, 杜冬. 数字投影中填充因子对相位测量影响分析 [J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 93-97.
- [3] WANG Weihua, SUN Junhua, LIU Zhen, et al. Stripe center extraction algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 87-90. (in Chinese)
王伟华, 孙军华, 刘震, 等. 钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法 [J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 87-90.
- [4] S Zhang, P S Huang. Novel method for structured light system calibration [J]. Opt. Eng., 2006, (45): 083601.
- [5] M Kimura, M Mochimaru, T Kanade. Projector calibration using arbitrary planes and calibrated camera [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1-2.
- [6] H Anwar, I Din, K Park. Projector calibration for 3D scanning using virtual target images [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing., 2012, 13: 125-131.
- [7] S-Y Park, G G Park. Active calibration of camera projector systems based on planar homography [C]. International Conference on Pattern Recognition, 2010: 320-323.
- [8] X Chen, J Xi, Y Jin, et al. Accurate calibration for a camera projector measurement system based on structured light projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(34): 310-319.
- [9] Daniel Moreno, Gabriel Taubin. Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration [C]. 3DIMPVT, 2012: 464-471.
- [10] WENG J, COHEN P, HENRIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell., 1992, 14(10): 965-980.
- [11] S K Nayar, G Krishnan, M D Grossberg, et al. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination [J]. SIGGRAPH, 2006: 935-944.