

基于畸变规律的三维结构光测量系统标定

陈 会 密保秀 高志强

(南京邮电大学材料科学与工程学院信息材料与纳米技术研究院, 江苏 南京 210046)

摘要 标定是结构光三维立体视觉测量系统中的关键一步,标定的准确性对测量系统至关重要。基于镜头的畸变规律,提出了一种新型的系统标定方法,即以光轴为中心分隔同心圆环,形成多个子标定区域,通过反向投影标定法一一进行标定。此法充分考虑到了大视场和透镜光学单元畸变不一的影响,提高了局部和全局标定精度。实验结果表明,在扩大视场约为 $1050\text{ mm}\times 750\text{ mm}$ 时,分为两区域的投影仪标定精度提高了72.8%,系统测量精度达到 $28.9\text{ }\mu\text{m}$,展示了对畸变更好的处理效果。该方法不依赖任何特殊的标定设备,操作简单,准确易行,可同时满足大视场和高精度的测量要求,并增强了系统实时性。

关键词 机器视觉;三维立体视觉测量;结构光测量;系统标定;相机标定;投影仪标定

中图分类号 TB96; TB811 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1215002

Calibration of 3D Structured Light Measurement System Based on the Properties of Lens Distortion

Chen Hui Mi Baoxiu Gao Zhiqiang

(*Institute of Advanced Materials, College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China*)

Abstract Calibration is an important process in 3D vision measurement for the structured light system. The calibration results influence measurement accuracy. After studying the properties of lens distortion, a new calibration method is proposed in which the target region is divided into many sub-regions of concentric rings formed by treating the optical axis as a center point along with a given radius. Then, according to the reprojection method, calibrations are done one by one. Since this method takes the impact of large field of view as well as lens distortion into account, calibration accuracies of both local and global regions are improved dramatically. The experimental results show that to the field of about $1050\text{ mm}\times 750\text{ mm}$ divided into two regions, the accuracy for projector calibration increases by 72.8% and the system precision reaches $28.9\text{ }\mu\text{m}$, which indicate the advantage of this method on distortion processing. The method does not rely on any special calibration equipment, and operates easily and conveniently with good accuracy. It is proved that the proposed method can meet measurement requirements of large field, high precision, and be more compatible to real-time system.

Key words machine vision; 3D stereo vision measurement; structured light measurement; system calibration; camera calibration; projector calibration

OCIS codes 150.0155; 120.4820; 110.6880; 150.1488

1 引 言

在机器视觉领域,结构光测量法作为主要的三维立体视觉测量方法^[1-6],在工业检测、逆向工程、快速原型、模具、医学、文物保护等方面得到了广泛

的发展。怎样使用结构光测量法简便、快速、准确地对物体进行三维测量是许多科研工作者一直深入研究的重要课题。

结构光测量系统不仅结构简单、便于移动,而且

收稿日期: 2013-07-22; **收到修改稿日期**: 2013-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61076016, 61077021)、南京邮电大学基金(NY212076, NY212050)

作者简介: 陈 会(1988—),女,硕士研究生,主要从事结构光三维系统测量方面的研究。E-mail: 52163543@163.com

导师简介: 高志强(1967—),男,教授,主要从事三维及平板信息显示、有机电子材料及器件等方面的研究。

E-mail: iamzqgao@njupt.edu.cn(通信联系人)

操作方便、具有实时三维检测的潜力,商业应用前景广阔,受到格外重视。一个完整的结构光三维立体视觉测量系统通常分为图像获取、系统标定、特征提取、立体匹配、深度确定五部分。系统标定是非常关键的一步,它建立了三维空间的物像关系,搭建起系统测量平台,直接影响着后面进行三维测量的精度,因此,系统标定的可信性和准确性是目前研究的重点。系统标定包括相机标定和投影仪标定,具体来说,就是要确定相机和投影仪的内部几何参数、光学成像参数以及其相对于空间世界坐标系统的方向和位置参数,以使其在结构光三维测量系统中,由三维信息导出二维计算机图像坐标,从计算机图像坐标导出三维信息。

相机和投影仪标定参数的获得总是相对于某种几何成像模型,根据不同需要可建立不同的数学模型,一般有线性模型[针孔模型^[7]和直接线性变换模型(DLT)^[8-9]]和非线性模型(摄影测量法模型^[10]、Tsai 模型^[11-12]、Weng 模型^[13]和双平面模型^[14-16])。这些参数求解模型大都基于理想针孔模型和镜头畸变模型建立,但是,在运用中至少存在如下问题:1)线性求解采用理想针孔模型,忽略了镜头畸变,只适合视野较小的情况或光轴附近区域;2)径向排列约束两步标定法只考虑一阶径向畸变,忽略了其他非线性畸变因素,只适合于精度要求不高的测量;3)考虑各种畸变因素时,把整个视场的畸变看成是一致的,事实上随着被测视场的扩大,光学系统存在着较大的像差,因此,不适合大视场光学测量系统;4)对于投影仪标定,二次误差的严重影响(如反向投影法^[17-20]中相机标定误差、交比不变法^[21]和几何法^[22]中特征直线的检测精度、相位法^[23-26]中绝对相位的求解等)导致其标定精度较低。

本文在现有算法的基础上,提出了一种以光轴为中心进行同心圆环分隔的多区域系统标定方法,很好地解决了上述方法在畸变处理问题上的不足,尤其对投影仪标定精度的提高有很大的突破。此法适用于大视场、高精度的三维实时测量,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测量精度。

2 标定模型

相机的成像原理是小孔成像,其光学模型被认为是针孔模型。投影仪的光学结构与具有远心光学结构的相机相同,但光路相反,即:相机是三维场景对二维图像的映射,而投影仪是二维图像对三维空

间的映射。原理上投影仪的光学系统可以认为是一个具有相反光路的相机系统,Lathuiliere 等^[27]通过实验也证实了投影仪模型可用针孔模型来表示,因此,可以采用相同的模型来表示相机和投影仪。本文以投影仪为例来描述其数学模型。

2.1 理想针孔模型

理想针孔模型如图 1 所示,投影仪物平面(投影仪中空间光调制器平面,以下简称物平面)上一点的图像坐标 $q=[u \ v]^T$,投影到空间某点的三维坐标 $Q=[X \ Y \ Z]^T$ 。用齐次坐标表示为: $\bar{q}=[u \ v \ 1]^T, \bar{Q}=[X \ Y \ Z \ 1]^T$ 。

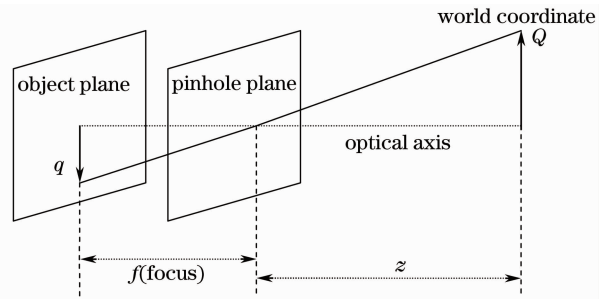


图 1 理想针孔模型

Fig. 1 Ideal pinhole model

空间点 \bar{Q} 到物平面上的图像坐标 \bar{q} 的投影映射基于透视投影模型可以表示为

$$s\bar{q} = H\bar{Q}, \quad (1)$$

式中参数 s 为尺度比例系数, H 是单应性矩阵,由两部分组成:1)外参数,即世界坐标系相对于投影仪坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 T 的影响之和,使用齐次坐标可以组合到一个单一矩阵中,表示为 $W=$

$$[R \ T]; 2) \text{内参数矩阵 } M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 其中}$$

(c_x, c_y) 为物平面的主点坐标, $f_x = f \times s_x, f_y = f \times s_y$ 为沿着物平面两个坐标轴的焦距, f 为投影镜头的焦距, s_x, s_y 表示物平面中两个坐标轴方向单位距离上的像素数。因此,投影仪理想数学模型表示为

$$s\bar{q} = M[R \ T]\bar{Q}. \quad (2)$$

2.2 平面标定模型

在进行相机和投影仪标定时,为了既不失一般性,又方便操作,选择张正友平面标定法^[28],如图 2 所示。

那么,标定平面上的点 Q_w 和其对应的投影仪物平面点 q 之间建立如下关系:

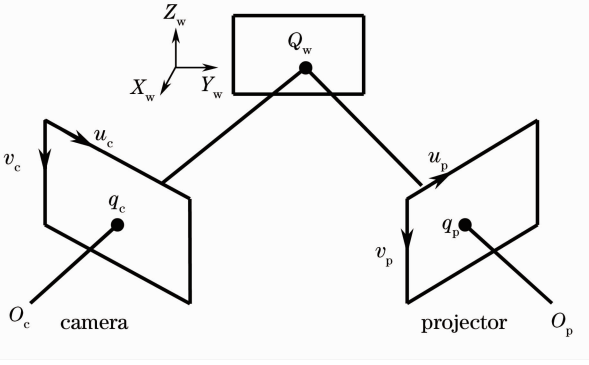


图 2 结构光系统标定结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structured light system calibration

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.3 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,当镜头畸变明显时,线性模型无法准确地描述相机和投影仪的成像过程,这时在标定过程中需要引入畸变因子进行校正。镜头畸变主要考虑两种:透镜形状的径向畸变和整个组装过程的切向畸变。当然,还有许多其他类型的畸变如薄棱镜畸变等,但都没有前两种畸变显著,一般情况下,不予考虑。

径向畸变模型可表示为

$$\begin{cases} x_r = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_r = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases}, \quad (4)$$

切向畸变模型可表示为

$$\begin{cases} x_d = u + [2p_1 v + p_2 (r^2 + 2u^2)] \\ y_d = v + [p_1 (r^2 + 2v^2) + 2p_2 u] \end{cases}, \quad (5)$$

式中 (x, y) 为矫正后的像素点坐标, (u, v) 是畸变点在物平面上的原始坐标, $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。由此,镜头畸变由径向畸变系数 $[k_1 \ k_2 \ k_3]$ 和切向畸变系数 $[p_1 \ p_2]$ 五个参数描述。

综上,在实际应用中的标定模型可表示为

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{M}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \tilde{\mathbf{Q}} + \boldsymbol{\delta}_r + \boldsymbol{\delta}_d, \quad (6)$$

式中 $\boldsymbol{\delta}_r = [x_r \ y_r]^T$ 表示径向畸变, $\boldsymbol{\delta}_d = [x_d \ y_d]^T$ 表示切向畸变。

具体的参数求解过程可采用 Tsai^[11-12] 提出的

两步法,首先使用线性技术计算参数的初值,再考虑畸变因素,利用非线性二乘法迭代优化,进一步提高标定精度,从而得到内参数矩阵和畸变系数矩阵。

3 标定方法

相机和投影仪的内部工作是基于光学系统的原理。由于光学系统是以光轴对称的,光轴即为系统的径向对称中心,那么相机系统和投影仪系统的特性函数只与距该对称中心的距离有关。因此,在光学中心处畸变量为零;以光学中心为圆心,半径相等的圆周上畸变量近似相同,不同半径圆周上畸变量不同;畸变会造成图像的变形,但从物空间到像空间,二者之间仍存在一一对应的映射关系,变形不会使图像变模糊,即不影响图像的清晰度。

为了进一步提高标定精度,本文基于镜头的畸变规律,提出了同心圆环分区域标定法:以半径 r 作为参数,对标定图案进行同心圆环分割(如图 3 所示),先标定相机,再基于反向投影法^[29] 标定投影仪

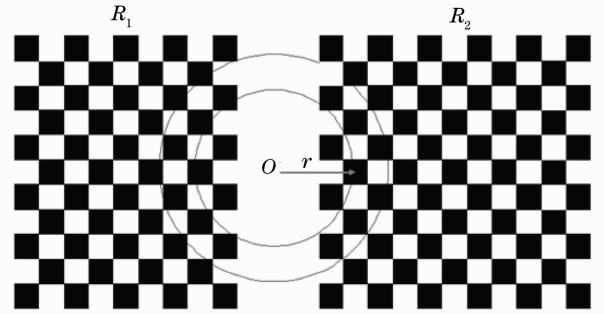


图 3 系统标定示意图

Fig. 3 Diagram of system calibration

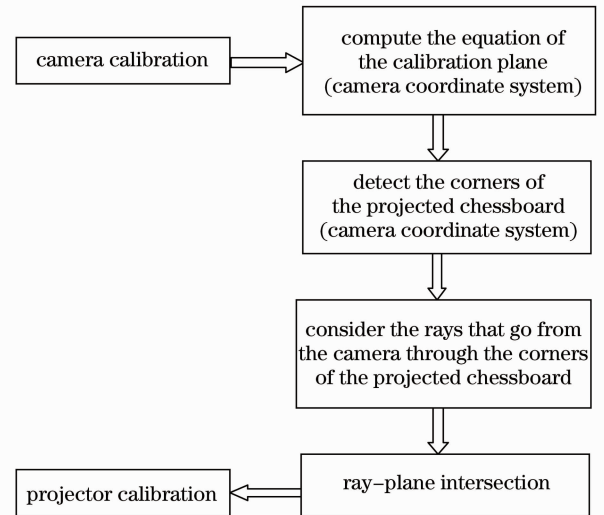


图 4 投影仪标定流程图

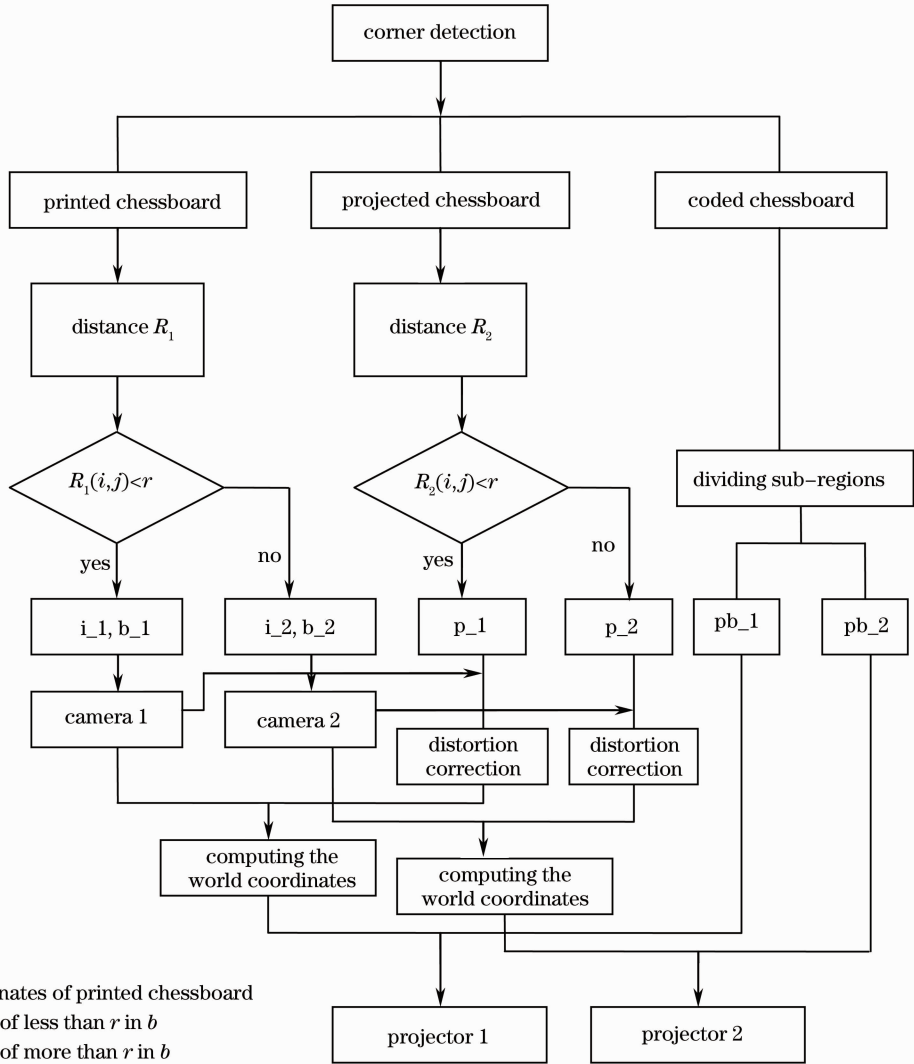
Fig. 4 Flowchart of projector calibration

(如图 4 所示),从而得到每个区域的参数值,以便于畸变校准、计算三维坐标、恢复三维形貌。具体步骤如下(图 5 为标定流程示意图):

- 1) 打印棋盘格图像,然后将其粘贴在平面板的左侧(或右侧),制成平面标定板;
- 2) 把平面标定板置入相机和投影仪组成的系统视场内,将数据处理电脑生成的左侧是白色右侧是棋盘格(或左侧是棋盘格右侧是白色)的编码图像

投射到平面标定板上,形成投影棋盘,且不要和粘贴棋盘重合;

- 3) 用 CCD 相机拍摄标定板,获得标定物图像;
- 4) 变换标定板的位置,重复步骤 3),得到多幅标定物图像,送入数据处理电脑进行处理;
- 5) 对每幅图像进行分区域操作,把标定基础数据划分在不同的圆环区域内:



b: world coordinates of printed chessboard
*b*₁: the region of less than *r* in *b*
*b*₂: the region of more than *r* in *b*
i: image coordinates of printed chessboard
*i*₁: the region of less than *r* in *i*
*i*₂: the region of more than *r* in *i*
p: image coordinates of projected chessboard in camera coordinate system
*p*₁: the region of less than *r* in *p*
*p*₂: the region of more than *r* in *p*
*p*_i: image coordinates of projected chessboard
*pb*₁: the region of less than *r* in *p*_i
*pb*₂: the region of more than *r* in *p*_i

图 5 以两区域为例的标定流程图

Fig. 5 Flowchart of calibration with two calibration regions

a) 利用 Harris 角点检测算法检测粘贴棋盘角点和投影棋盘角点；

b) 以标定物图像中心为圆点 O ，分别计算粘贴棋盘各角点到圆心的距离 R_1 和投影棋盘各角点到圆心的距离 R_2 ；

c) 根据实际需要，给定半径 r_1, r_2, r_3, \dots ，比较 R_1 和 R_2 中各元素值与半径 r_1, r_2, r_3, \dots 的大小关系，从而把 R_1 和 R_2 中各元素所对应的角点坐标划分在圆环区域 $area1, area2, area3, \dots$ 和圆环区域 $area1', area2', area3', \dots$ 中；根据投影图像和平面标定板上投影棋盘的对应关系，把投影图像划分为圆环区域 $area1'', area2'', area3'', \dots$ ；

6) 以各个圆环区域为单位，分区域进行系统标定：

a) 使用 $area1$ 中的粘贴棋盘角点数据标定相机，得到此区域的相机参数 $camera1$ ；

b) 利用标定结果 $camera1$ 对 $area1'$ 中的投影棋盘角点数据进行畸变校准；

c) 使用校准后的数据和 $area1''$ 的数据对投影仪进行标定，得到 $area1'$ 区域的投影仪参数 $projector1$ ；

d) 重复步骤 a)~c)，完成系统的分区域标定。

4 实验与结果讨论

结构光三维测量系统由一个相机、一台投影仪和一台数据处理电脑组成。实验中采用的是 CANNON 600D 照相机， $f = 18 \text{ mm}$ ，分辨率 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ；VIVITEK D508 数字投影仪，分辨率 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 。打印 9×11 的黑白棋盘格，方

格实际尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ；由电脑生成左边是白色右边是 11×11 的黑白棋盘图案作为投影图像；标定板分成左右两半；左边粘贴 9×11 的黑白棋盘格，右边是空白；选用 OpenCV 开源图像处理数据库^[30-31]作为开发平台。

4.1 标定结果

相机和投影仪的标定精度采用反投影误差来衡量，即实际从图像中检测到的二维角点坐标与按照模型参数求解得到的二维角点坐标的差值。

测量视场约为 $650 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ，采集 3 幅图像，分别划分为两个区域和三个区域进行标定，其标定误差和不分区域 (conventional method) 的标定误差如表 1 和表 2 所示。其中 e_{ave} 、 e_σ 分别为绝对值误差矩阵的平均值和绝对值误差矩阵的标准差，单位为像素。由表知，当分两个和三个区域时，相机的标定精度分别提高了 13.3% 和 21.5%，投影仪的标定精度分别提高了 56% 和 58.4%；比较表 1 和表 2，并依据镜头畸变规律可知，适当的增加圆环区域可以提高标定精度。相机和投影仪的反投影误差分布如图 6 所示。

实验结果表明，在采集较少的图像时，相机和投影仪的精度就高于现有技术，而且使测量系统的局部和全局标定精度分布均匀；投影仪的标定精度更为优越，这可能是由于分区域标定降低了相机标定误差对投影仪标定精度的严重影响；投影仪作为光源，使粘贴棋盘和投影棋盘处在同样的相对均匀的光照条件下，提高了角点检测的效率；相对于文献[32]，其光学信息被充分采集。

表 1 两区域时相机和投影仪的标定误差

Table 1 Calibration errors of camera and projector with two calibration regions

	Camera		Projector	
	e_{ave}/pixel	e_σ/pixel	e_{ave}/pixel	e_σ/pixel
$r < 350$	0.192492	0.158317	0.336712	0.236214
$r \geq 350$	0.297344	0.245375	0.335785	0.268279
Global	0.25584	0.221193	0.336264	0.252222
Conventional method	0.318405	0.255271	0.646395	0.574491

表 2 三区域时相机和投影仪的标定误差

Table 2 Calibration errors of camera and projector with three calibration regions

	Camera		Projector	
	e_{ave}/pixel	e_σ/pixel	e_{ave}/pixel	e_σ/pixel
$r < 350$	0.192492	0.158317	0.336712	0.236214
$350 \leq r < 450$	0.274879	0.209494	0.336424	0.223875
$r \geq 450$	0.275564	0.224536	0.223875	0.158588
Global	0.242482	0.200285	0.311062	0.239021
Conventional method	0.318405	0.255271	0.646395	0.574491

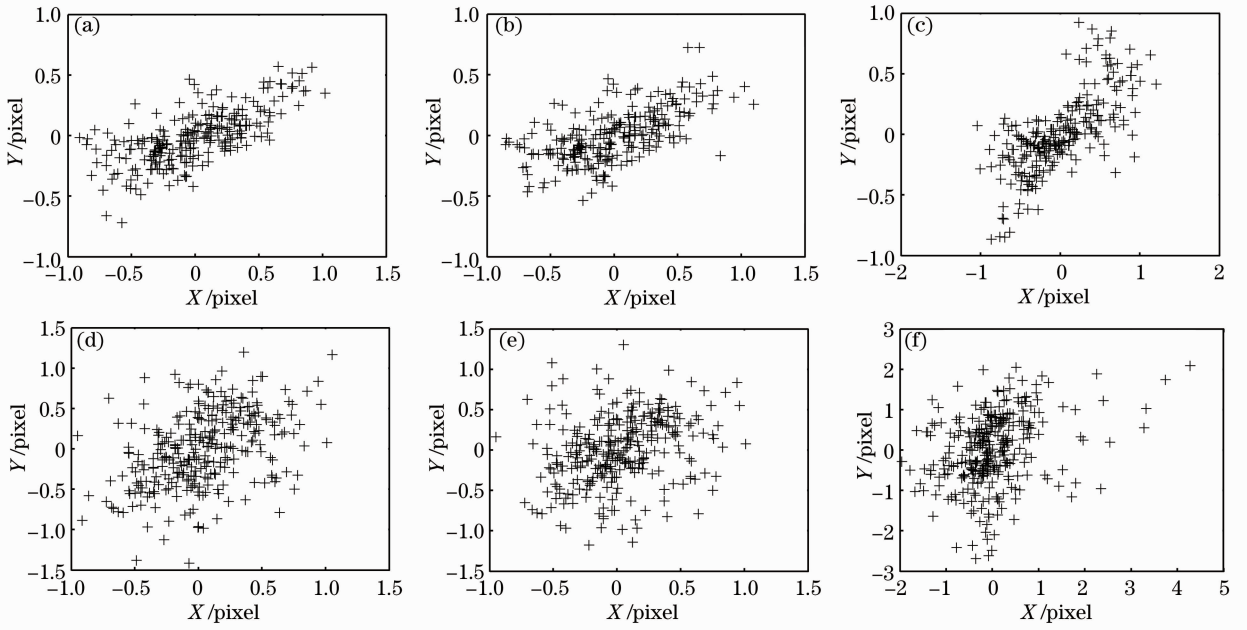


图 6 (a)两区域,(b)三区域及(c)不分区域时相机的反投影误差;(d)两区域,(e)三区域及(f)不分区域时投影仪的反投影误差

Fig. 6 Reprojection errors of camera with (a) two calibration regions, (b) three calibration regions and (c) no sub-region; reprojection errors of projector with (d) two calibration regions, (e) three calibration regions and (f) no sub-region

为了说明本方法对大视场测量的适用性和对畸变的处理效果,适当扩大被测视场范围约至 $1050\text{ mm} \times 750\text{ mm}$,打印 14×20 的黑白棋盘格作为粘贴棋盘,进行系统标定。采集了 20 幅图像进行实验,结果表明,12 幅图像就可以使相机和投影仪达到稳定的较高的标定精度,而一般的方法需要 20~30 幅左右。本方法不仅减少了工作量,加快了测量速度,而且也减少了使用太多图像的积累误差和解的非线性不稳定。投影仪的 e_o 随图像个数的变化情况如图 7 所示。12 幅图像分为两区域时的相机和投影仪标定结果如表 3 所示,可知相机的标定精度提高了 7.5%,投影仪的标定精度提高了

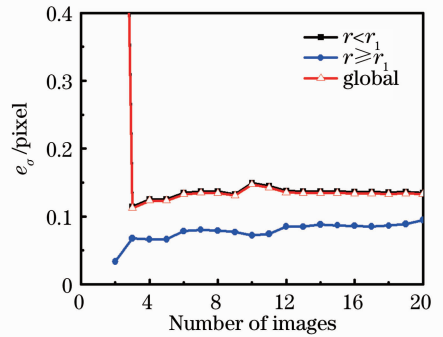


图 7 投影仪标定误差随图像幅数的变化情况 ($r_1 = 350$)

Fig. 7 Projector calibration errors versus the number of images ($r_1 = 350$)

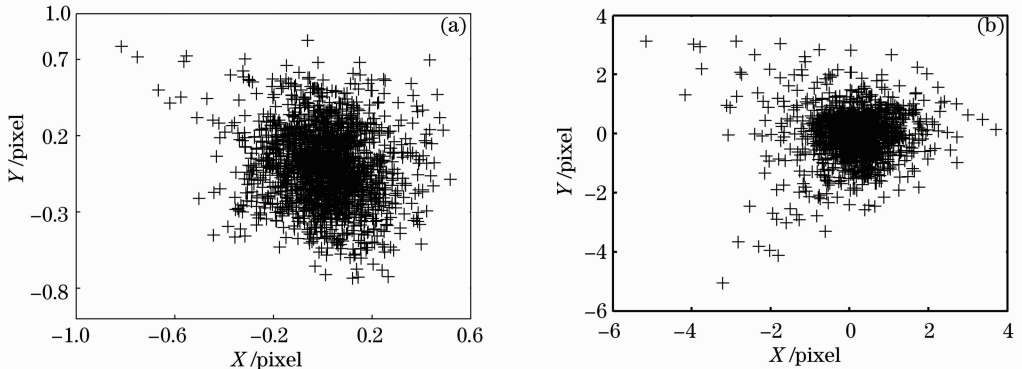


图 8 投影仪的反投影误差。(a)两区域;(b)不分区域

Fig. 8 Reprojection errors of projector. (a) Two calibration regions; (b) no sub-region

72.8%。投影仪的反投影误差分布如图 8 所示。

实验结果表明,在 $r \geq r_1$ 区域,投影仪的标定精度更高(如图 7 所示),并且(由表 1、表 2 和表 3 知)投影仪的全局标定精度的提高都大于 50%,说明本方法对畸变有更好的校正效果。比较表 1 和表 3 中相机的标定结果,扩大视场时标定精度的提高较小,这是由于一方面图像个数的增加使两种情况下的相

表 3 12 幅图像分为两区域的投影仪标定误差

Table 3 Projector calibration errors with two calibration regions for twelve images

	Camera		Projector	
	e_{ave}/pixel	e_{σ}/pixel	e_{ave}/pixel	e_{σ}/pixel
$r < 350$	0.126442	0.106999	0.166223	0.137643
$r \geq 350$	0.230434	0.202909	0.084704	0.0850329
Global	0.212541	0.193903	0.156916	0.135204
Conventional method	0.237014	0.209818	0.433984	0.496239

4.2 影响因素

采用本文所提出的方法进行系统标定时,半径的选择对标定结果有较大的影响,并且对投影仪的影响尤为显著,因此,以投影仪为例对其影响进行研究。投影仪标定误差随半径的变化情况如图 9 所示(两幅标定物图像分为两圆环区域),半径太小或太大都会使标定误差大于 1 pixel。半径大小对标定结果的影响,实质是每区域内角点个数对标定结果的影响。对于每幅图像,每个区域的角点个数必须大于 4,这是由单应性矩阵的求解要求的。由图 9 (a)可知,当 r_1 较小, $r < r_1$ 区域内角点个数小于某个值时,标定精度大于 1 pixel;当 r_1 增大到某个值

时,标定精度又大于 1 pixel,这是由于 $r \geq r_1$ 区域内角点个数小于某个值造成的。一般情况下,在满足每幅图像最少角点个数的情况下,多幅图像标定时很容易解决这个问题。由图 9(b)可知,随着半径的变化, $r < r_1$ 区域和 $r \geq r_1$ 区域的标定误差是互补的,为了使精度分布均匀,并保证较高的局部和全局误差,半径应该选择为整个区域半径的 $1/2 \sim 2/3$ 。由于在采集数据时,要不断改变标定板的位置,因此,可选择的半径个数是有限的,应根据视场的大小和标定棋盘角点个数的多少,选择合适的半径个数和大小。

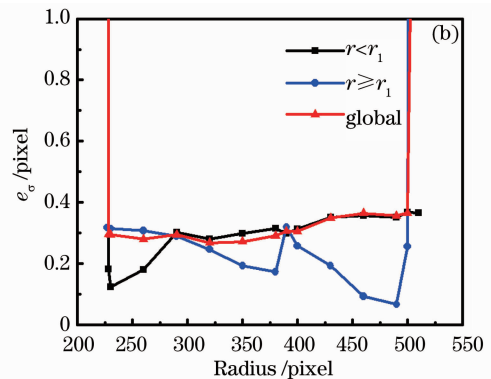
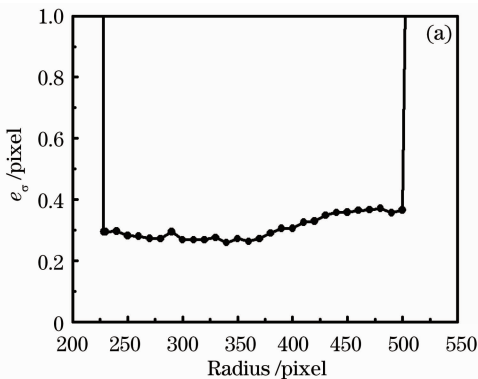


图 9 投影仪标定误差随半径 r_1 的变化情况。(a) 全局 e_{σ} ; (b) $r < r_1$ 部分、 $r \geq r_1$ 部分以及全局的 e_{σ}

Fig. 9 Projector calibration error variations with r_1 . (a) Global; (b) regions of $r < r_1$, $r \geq r_1$ and global

4.3 平面拟合误差

测量一具有均匀反射特性的白色平面板,测量点个数为 454 个,采用文献[33]的方法求解三维坐标,用最小二乘法拟合三维平面,结果如图 10 所示。计算每个数据点到平面的距离,最大距离误差为 $93.44 \mu\text{m}$,最小距离误差为 10.78 nm ,平均距离误

5 结 论

基于镜头畸变规律,提出了同心圆环分区域系统标定法。此法采用左侧是黑白棋盘右侧是空白的平面标定板和左侧是空白右侧是棋盘格的编码图

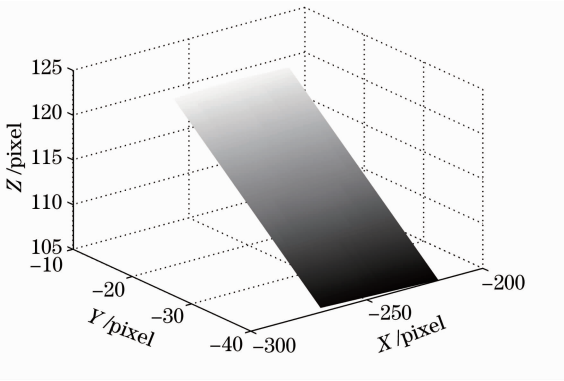


图 10 三维拟合平面
Fig. 10 3D fitting plane

像,使整个测量视场处于投影仪的“拍摄”范围之内。相比传统标定系统,此标定系统充分地含带了相机和投影仪的畸变信息,使结果更精确。由于扩大测量视场时,光束倾斜度较大,视场角大,导致光学畸变是直接影响测量系统精度的因素。此法采用同心圆环分割标定区域,相比传统标定方法,对畸变有更好的处理效果,系统测量精度达到 $28.9 \mu\text{m}$,大大提高了系统标定精度和系统测量精度。此法操作简单、系统成本低、测量速度快,适合实时应用和在线测量。

参 考 文 献

- 1 Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision [M]. Beijing: Science Press, 1998.
马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 2 F Blais. Review of 20 years of range sensor development [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 231–244.
- 3 R J Valkenburg, A M McIvor. Accurate 3D measurement using a structured light system [J]. Image and Vision Computing, 1998, 16(2): 99–110.
- 4 Nicola, D' Apuzzo. Overview of 3D surface digitization technologies in Europe [C]. SPIE, 2006, 6056: 42–54.
- 5 F Chen, G M Brown, M Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10–22.
- 6 W C Tai, M Chang. A machine vision technique for subpixel estimation of three-dimensional profilometry [J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28(10): 1571–1582.
- 7 C C Stama, C Theurer, S W Henriksen. Manual of Photogrammetry [M]. Virginia: American Society of Photogrammetry, 1980.
- 8 Y I Abdel-Aziz, H M Karara. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971, 1–18.
- 9 Y EL-Manadili, K Novak. Precision rectification of SPOT imagery using the direct linear transformation model [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(1): 67–72.
- 10 W Faig. Calibration of close-rang photogrammetric systems: mathematical formulation [J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 1975, 41(12): 1479–1486.
- 11 R Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323–344.
- 12 R Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, 364–374.
- 13 J Weng, P Cohen, M Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965–980.
- 14 H A Martins, J R Brik, R B Kelley. Camera models based on data from two calibration planes [J]. Computer Graphics and Imaging Processing, 1981, 17(2): 173–180.
- 15 G Q Wei, S D Ma. Two plane camera calibration: a unified model [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1991, 133–138.
- 16 G Q Wei, S D Ma. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(5): 469–480.
- 17 Wang Tao, Sun Changku, Shi Yongqiang, *et al.*. Novel grating projection system based on assistant line and its calibration method [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0115002.
王涛, 孙长库, 石永强, 等. 基于辅助参考线的光栅投影轮廓测量系统及标定方法[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0115002.
- 18 Wang Luyang, Da Feipeng. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612004.
王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612004.
- 19 Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong. Research on the calibration technique of projector in structured light 3D measurement system [J]. Optical Technique, 2009, 35(2): 256–260.
韦争亮, 钟约先, 袁朝龙. 结构光三维测量系统中投影仪标定技术研究[J]. 光学技术, 2009, 35(2): 256–260.
- 20 T T Li, H Y Zhang, J Geng. Geometric calibration of a camera-projector 3D imaging system [C]. Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Application in Industry, 2011: 187–194.
- 21 Zhang Yongbin, Lu Rongsheng, Fei Yetai. Multicolor pseudo-random array pattern projector and its calibration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(1): 59–62.
张勇斌, 卢荣胜, 费业泰. 机器视觉中彩色伪随机编码投影系统及标定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(1): 59–62.
- 22 Xu Zhenying, Xiao Kai, Wang Yun, *et al.*. A new method for calibration of intrinsic parameters of projector [J]. Tool Engineering, 2008, 42(12): 88–91.
许桢英, 肖凯, 王匀, 等. 投影仪内参数的标定新方法[J]. 工具技术, 2008, 42(12): 88–91.
- 23 S Zhang, P S Huang. Novel method for structured light system calibration [J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 1–8.
- 24 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Analysis of two-error in grating projection profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(3): 376–379.
郝煜栋, 赵洋, 李达成. 光栅投影式轮廓测量中两种误差的分析[J]. 光学学报, 2000, 20(3): 376–379.
- 25 Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong, *et al.*. Calibration of a 3D measurement system having one camera and one projector [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(2): 202–205.
韦争亮, 钟约先, 袁朝龙, 等. 单摄像机单投影仪三维测量系统标定技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 202–205.

- 26 Li Zhongwei, Shi Yusheng, Zhong Kai, *et al.*. Projector calibration algorithm for structured light measurement technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3061—3065.
李中伟, 史玉升, 钟 凯, 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3061—3065.
- 27 A Lathuiliere, F S Marzani, Y Voisin. Calibration of an LCD projector with pinhole model in active stereovision applications [C]. *SPIE*, 2004, 5265: 199—204.
- 28 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330—1334.
- 29 G Falcao, T Hurtos, J Massich. Plane-based calibration of a projector camera system [J]. *VIBOT Master*, 2008, 9(1): 1—12.
- 30 G Bradski, A Kaehler. *Learning OpenCV* [M]. Beijing: O'Reilly Media, 2008.
- 31 D C Brown. Close-range camera calibration [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1971, 37(8): 855—866.
- 32 J R Liao, L L Cai. A calibration method for uncoupling projector and camera of a structured light system [C]. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008. 770—774.
- 33 J Batlle, E Mouaddib, J Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey [J]. *Pattern Recognition*, 1998, 7(31): 963—982.

栏目编辑：李志兰