

引用格式: ZHAO Zuyang, CUI Haihua, DU Kunpeng, et al. Calibration Method of 3D Laser Projection Based on Homography Matrix[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1112001

赵祖阳, 崔海华, 杜坤鹏, 等. 基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法[J]. 光子学报, 2022, 51(11):1112001

基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法

赵祖阳¹, 崔海华¹, 杜坤鹏², 曲一鸣¹, 权冬², 穆志国²

(1 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

(2 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

摘 要: 针对现有三维激光投影系统标定中存在的操作复杂、效率低下的问题, 提出一种基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法。首先引入单目视觉作为辅助手段, 建立三维激光投影系统的模型; 其次在单目视觉的辅助下, 利用图像二维单应性解算被投影目标的位姿以及标定振镜与相机之间的转换关系; 最后从重投影误差、不同距离下标定的稳定性和标定中的误差分布三个角度分析所提方法的性能, 验证基于单应型矩阵的三维激光投影标定方法的可靠性。通过自主搭建基于视觉辅助的三维激光投影系统, 以标准件为被投影部件进行试验, 证明了所提方法可以解决上述问题。实验结果表明, 被投影部件与振镜的距离在 3 m 范围内时, 标定时间小于 5 min, 投影精度可达 0.3 mm。

关键词: 机器视觉; 单应性矩阵; 位姿估计; 特征提取; 三维激光投影

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225111.1112001

0 引言

作为增强现实技术^[1]的一个分支, 三维激光投影定位技术能够将产品的数字化三维模型轮廓信息以及部分制造信息准确地呈现在产品装配现场所需要的地方。这种非接触式的可视化定位技术在数字化设计与制造之间起到了良好的桥梁作用。

二维振镜系统是一个能够精准控制激光束光路的光学反射系统, 它已经成为三维激光投影系统不可缺少的一部分, 二维振镜的标定技术是实现高精度的三维激光投影的核心关键技术。随着二维扫描振镜的应用从二维平面扫描扩展到三维空间扫描, 振镜系统标定难度也在加大, 振镜系统应用的不断拓展促进了振镜系统标定技术地发展。国外激光投影技术研究较早, 技术较为娴熟, FU Y C^[2]发明了一种激光投影显示系统, 成功地将轮廓投影到目标上; HAYES M W 等^[3]通过结合激光投影系统和光敏感材料, 实现了复杂部件的精密装配。在国外, 激光三维投影定位系统已经实现商业化, 如 EXTEND3D 公司的 Werklicht Pro 设备投影空间精度高达 0.1 mm/m。而在国内, 激光投影技术在近十年才迅速发展, 刘逸等^[4-6]分别利用近似模型法和查表法标定二维振镜的内外参数, 实现了高精度的激光三维标示, 但其整个投影系统的实现过程需要使用复合平面靶标和激光跟踪仪, 使得该系统整体的成本较高, 操作比较复杂; 郭丽丽等^[7-8]构建了智能 3D 投影系统, 建立了 iGPS (Indoor GPS) 测量网络不确定度模型, 提高了标定的精度, 然而, 整个投影系统由于需要搭配 iGPS 这样的高精度定位设备, 使得该系统实现的门槛较高且标定过程需要花费大量的时间, 效率低下; TU Junchao 等^[9-10]提出一种新的非理想状态的振镜模型参数标定方法, 进一步提高了标定精度, 但是该系统采集标定数据过程较为复杂, 采集基础数据耗时耗力。即现有的激光投影技术的标定过程存在过程操作复杂^[11-12]、效率低和需要使用激光跟踪仪等高成本设备的问题, 导致了三维激光投影无法在装配制造

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2019YFB1707501), 航空科学基金 (No.2020Z050052002)

第一作者: 赵祖阳 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为三维激光投影技术。Email: zhaozuyang@nuaa.edu.cn

导师 (通讯作者): 崔海华 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为视觉测量、数字化精密三维测量、计算光学成像、机器视觉与增强现实。Email: cuihh@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-06-10

<http://www.photon.ac.cn>

视场广泛应用。而视觉测量技术是典型的非接触式辅助测量技术之一,测量精度较高。其不仅可以为振镜的标定采集大量高精度的数据,还能作为基础坐标系实现被投影对象坐标系与振镜坐标系的对齐^[13-14]。除此以外,视觉测量具备发展成熟、对硬件要求低等优势。研究基于视觉辅助的三维激光投影系统,能够降低该技术的实现门槛,促进三维激光投影的推广与应用。

针对上述问题,本文基于二维图像间存在的单应性变换,提出了一种三维激光投影方法。建立了基于单目视觉的三维激光投影模型,利用相机图像与投影图像之间的单应性矩阵,推导出针对于平面的快捷标定方法。并在搭建的平台上进行了标定和投影实验,验证了所提方法的有效性,解决了现有技术中存在的操作复杂、实现门槛较高等问题。

1 三维激光投影模型

单目视觉系统在机器人、工业测量、人工智能等方面有着广泛的应用。结合单目视觉系统,搭建了一种针对于平面的三维激光投影系统,图1为激光投影系统的原理图。在已知被投影目标的数模和目标轮廓的情况下,利用计算机控制激光器和振镜,实现目标轮廓从数模到实物的1:1投影。三维激光投影系统包括相机、激光器、二维振镜、计算机、被投影目标。从数模坐标系到实物的1:1轮廓投影具体的实现方式如图2。图2所示的三维激光投影系统模型定义了4个坐标系:相机坐标系 $O^c - X^c Y^c Z^c$,被投影目标坐标系 $O^w - X^w Y^w Z^w$,数模坐标系和振镜坐标系 $O^z - X^z Y^z Z^z$ 。

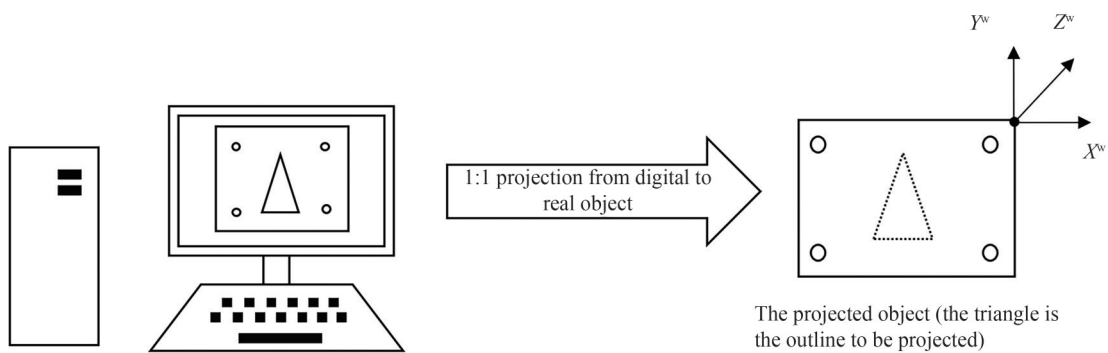


图1 目标轮廓(三角形)从数模到实物的1:1投影
Fig.1 1:1 projection of target contour (triangle) from digital analog to real object

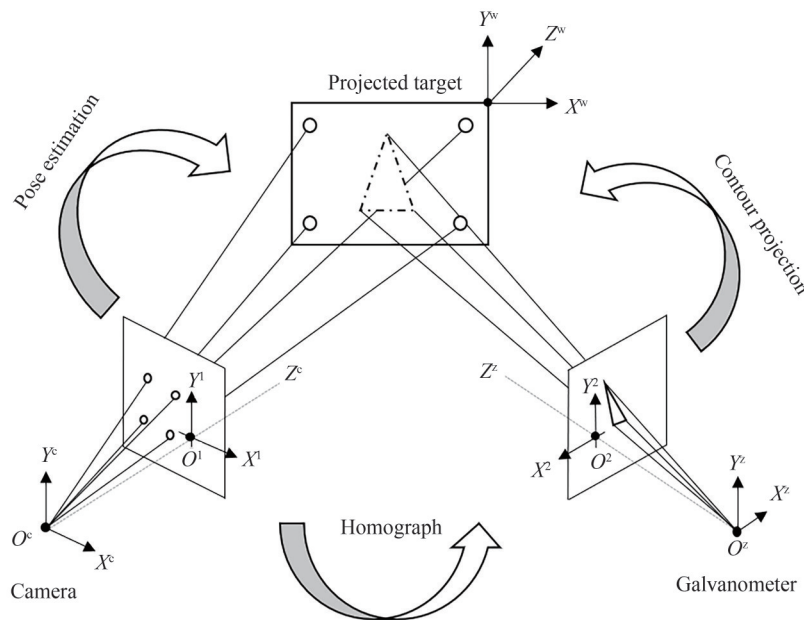


图2 三维激光投影定位系统模型
Fig.2 3D laser projection positioning system mode

2 基于单应性矩阵的三维激光投影标定

2.1 单应性矩阵估计

单应性矩阵是投影几何中一个术语,本质上是一个数学概念。其表达的是图像之间的相互关系,即一幅图像中的某一点,可以在另一幅图像上找到唯一的一个对应点。假设记一张图像上存在点 A ,另一张图像上的对应点记为 A' ,两点的齐次坐标为 $A=(x,y,1)$, $A'=(x',y',1)$ 。则从点 A 到点 A' 间一定存在一个单应性矩阵 $H(H \in \mathbb{R}^{3 \times 3})$,使得 $A=HA'$,单应性矩阵 H 可以表示图像成像角度变化的平移旋转等变换。

$$H = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0^T \\ h_1^T \\ h_2^T \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过单应性矩阵 H 以及点 $A=(x,y,1)^T$ 和点 $A'=(x',y',1)^T$ 可得

$$\begin{cases} x' = \frac{h_{00}x + h_{01}y + h_{02}}{h_{20}x + h_{21}y + h_{22}} \\ y' = \frac{h_{10}x + h_{11}y + h_{12}}{h_{20}x + h_{21}y + h_{22}} \end{cases} \quad (2)$$

同理图像之间所有的对应点都能得到一组方程。已知单应性矩阵有9个未知数,由于使用的是齐次坐标,可以通过单应性矩阵 H 的9个未知数都除以 h_{23} 将其进行归一化处理。因而整个单应性矩阵只剩下8个未知数,只要图像间有4个及以上的对对应点,就可以求解出单应性矩阵 H 。

2.2 三维激光投影标定

将单目相机与振镜关联成一个整体,组成三维激光投影系统。利用振镜模型与摄像机模型的相似性,将振镜模型等效成一个相机模型^[15]。对于单目相机系统,所获得的二维图像是使用镜头对真实物体的映射,而对于振镜系统,目标图像的每一个点都是由振镜伺服旋转所标记的图像的映射。通过在计算机中创建一个虚拟的主点,相当于单目相机系统的光心,构建出振镜系统的图像坐标系。利用单目相机系统的图像坐标系与振镜系统的图像坐标系的二维图之间存在的单应性矩阵,解算单目相机系统像素坐标系与振镜系统二维图像坐标系的转换关系,完成三维激光投影系统的标定。

针对被投影目标,控制激光器向被投影平面投影已知坐标的点阵,记录点阵的坐标 P_{ty}^k 。同时控制相机拍摄,记录相机获得的图像,进行滤波去除噪声后检测轮廓,并对轮廓进行椭圆拟合,获得所有光斑的圆心坐标,记录在相机图像坐标系中的点阵坐标为 P_t^k 。利用图像二维单应性矩阵进行相机与振镜的标定。即 P_{ty}^k 与 P_t^k 之间存在单应性矩阵 $H_t(H \in \mathbb{R}^{3 \times 3})$ 满足: $P_{ty} = H_t P_t$ 。利用基于Levenberg-Marquardt优化的迭代算法可以求解出图像坐标系与投影坐标系之间较优的单应性矩阵:

$$H_t = \arg \min \sum_{k=1}^n \| P_{ty}^k - H_t P_t^k \|^2 \quad (3)$$

在获得图像坐标系的轮廓齐次坐标 $p_t^i(x_t^i, y_t^i, 1)$ 后,可以利用求得的单应性矩阵 H_t ,根据式(4)求得待投影轮廓在振镜的投影坐标系下的齐次坐标 $p_{ty}^i(x_{ty}^i, y_{ty}^i, 1)$ 。

$$\begin{bmatrix} x_{ty}^i \\ y_{ty}^i \\ 1 \end{bmatrix} = H_t \begin{bmatrix} x_t^i \\ y_t^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在已知被投影目标数模的情况下,为了获取被投影目标与单目相机的相对位置关系,需要对被投影目标进行位姿估计^[16-17]。计算被投影目标中关键点与图像中像素点的对应关系,实现目标位姿解算。在数模与被投影目标比例为1:1的情况下,将数模坐标系与世界坐标系重合,通过相机拍摄被投影目标的图像,进行滤波去除噪声后检测轮廓,为了保证位姿解算的正确性,提取的特征尽量均匀的分布占据整个被投影平面。在采得图像中利用特征提取算法提取特征点,记录特征点集坐标 P_t^k ,对应的在被投影目标的数模中获取对应的特征,记录特征点集坐标 $P_w^k(k=1,2,\dots,n)$ 。由于被投影目标是一个平面,因此可以利用单应性矩阵进行位姿估计。存在单应性矩阵 $H_w(H \in \mathbb{R}^{3 \times 3})$,使得 $P_t = H_w P_w$,可以求得世界坐标系与图像坐标系之间较优的单应性矩阵:

$$H_w = \arg \min \sum_{k=1}^n \|P_t^k - H_w P_w^k\| \quad (5)$$

可知,在已知世界坐标系的轮廓齐次坐标 $p_w^i(x_w^i, y_w^i, 1)$ 的前提下,可以利用求得的单应性矩阵 H_w ,根据式(6)求得待投影轮廓在相机的图像坐标系下的其次坐标 $p_t^i(x_t^i, y_t^i, 1)$ 。

$$\begin{bmatrix} x_t^i \\ y_t^i \\ 1 \end{bmatrix} = H_w \begin{bmatrix} x_w^i \\ y_w^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在图2三维激光投影定位模型中,存在两类单应性矩阵:1)被投影平面与相机图像之间的单应性矩阵;2)相机内的图像与振镜的二维图像单应性矩阵。图中,将相机与振镜调整至合适的视场位置,被投影平面与相机图像之间的单应性矩阵为 $H_{w \rightarrow t}$,相机图像与振镜图像之间的单应性矩阵为 $H_{t \rightarrow y}$,根据单应性矩阵的传递性可以得到整个激光投影标定的转化过程:

$$\begin{bmatrix} x_s^i \\ y_s^i \\ 1 \end{bmatrix} = H_{t \rightarrow y} H_{w \rightarrow t} P_w = H_{t \rightarrow y} H_{w \rightarrow t} P_s = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_{00} & h'_{01} & h'_{02} \\ h'_{10} & h'_{11} & h'_{12} \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 标定性能分析

为了分析提出的标定方法的性能,接下来从重投影精度、稳定性、标定误差分布三个角度进行讨论。

3.1 重投影精度

为了量化误差,计算位姿估计的目标点 p_1 与实际点 p_2 的二范数作为重投影误差 e_1 ,计算相机图像的目标点 p_3 与实际投影的圆环的中心点 p_4 的二范数作为重投影误差 e_2 ,可表示为

$$\begin{cases} e_1 = \|p_1 - p_2\|_2^2 \\ e_2 = \|p_3 - p_4\|_2^2 \end{cases} \quad (8)$$

在0.5~3 m的常用投影距离内,每隔0.5 m做一次标定,标定结果与重投影误差如表1。

表1 0.5~3 m单应性矩阵 H_1, H_2 对应的重投影误差
Table 1 0.5~3 m homography matrix H_1, H_2 and the corresponding reprojection error

Distance/m	H_1			e_1 /pixel	H_2			e_2 /pixel
0.5	2.30	0.03	715.22	0.050	0.04	0.00	-32.73	0.296
	0.14	-2.11	516.78		0.00	-0.03	19.03	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	
1.0	0.00	-2.09	735.76	0.040	0.04	0.00	-30.98	0.302
	-1.99	-0.06	527.94		0.00	-0.04	31.78	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	
1.5	1.87	-0.09	580.96	0.050	0.05	0.00	-22.50	0.432
	0.07	-1.88	576.60		0.00	-0.04	25.35	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	
2.0	-1.96	-0.07	504.46	0.050	0.04	0.00	-22.98	0.450
	-0.08	1.91	429.27		0.00	-0.05	22.47	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	
2.5	-1.95	-0.11	808.60	0.050	0.04	0.00	-37.39	0.532
	-0.09	1.90	390.61		0.00	-0.04	19.56	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	
3.0	0.03	-2.25	675.84	0.060	0.04	0.00	-30.04	0.542
	-2.23	0.07	494.67		0.00	-0.04	26.85	
	0.00	0.00	1.00		0.00	0.00	1.00	

分析可得,第一段重投影像素误差保持在0.05 pixel左右,第二段重投影像素误差随着距离的增加而增大,但是在3 m范围内均小于1 pixel,在短距离的时候接近于0,标定精度较高符合实际应用需求。

3.2 稳定性

在0.5~3 m的距离内,每隔0.5 m做10次重复性标定,取平均值作为当前距离的重投影误差,整合成从0.5~3 m的变化曲线,如图3。

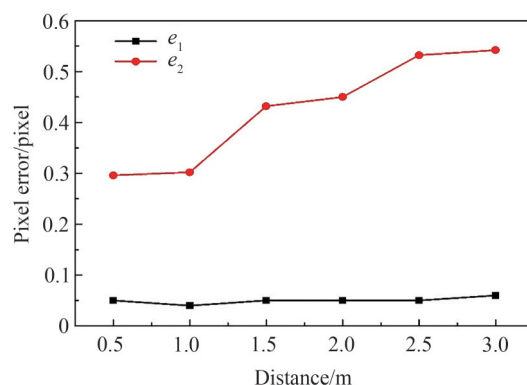


图3 标定稳定性分析

Fig.3 Calibration stability analysis

从图3可知,第一段单应性估计的误差几乎不随距离的增加而变化,稳定性较高;而第二段单应性估计的误差,随着距离的增加,重投影像素误差也相对的每米增加0.1个像素。总体上看,在短距离范围内,整体的误差波动在0.6个像素以内,波动性较小,稳定性较高。

3.3 误差来源与分布

将前后的重投影误差绘制成图4,通过对比分析可以发现,相机与振镜之间的单应性误差几乎占据整个误差的90%,数值上第二段单应性估计的误差比第一段单应性估计的误差几乎高一个数量级,是本标定算法的主要误差来源。产生此误差的原因是振镜每次的最小偏转是一定的,相应形成的二维图像的分辨率不高。本文采用的相机分辨率为 1280×960 ,而振镜图像的分辨率为 500×500 。振镜的二维图像分辨率远远低于相机的二维图像分辨率,因而产生了误差,这个误差是不可避免的。

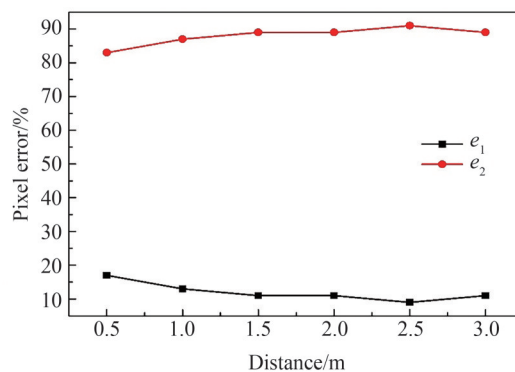


图4 两次标定误差分布

Fig.4 Error distribution of two calibrations

4 实验

4.1 实验步骤

为了方便试验数据分析,选取了圆盘标定板作为被投影部件,模拟三维激光投影实现,假设标定板上的四个大圆(如图5(a)已用颜色标出)需要进行投影定位。利用本文的标定方法标定三维激光投影系统,完成投影。为了尽可能地减少误差,在实验时应选取光斑较为规则的激光器;在对图像进行处理时,对

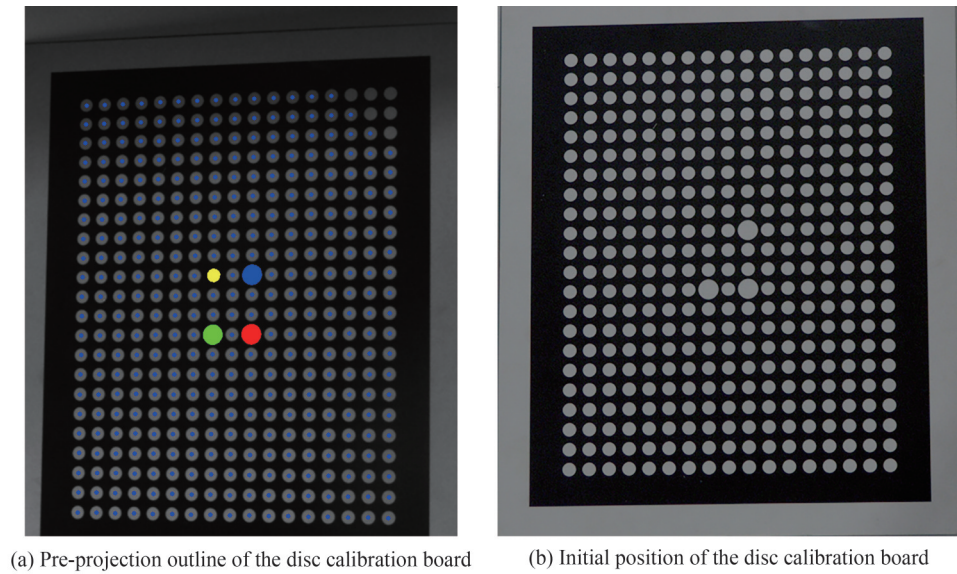


图5 实验圆盘标定板

Fig.5 Experimental disc calibration plate

提取的圆环中心进行编号,与投影坐标系进行一一对应,避免误匹配给试验带来的误差;在解算相机与振镜的关系时,投影的激光圆环应尽可能均匀地覆盖被投影平面,再利用优化方法对求解出的单应性矩阵进行优化。

综上所述,结合单目视觉的三维激光投影标定与投影的实现,步骤如下:

1) 图像采集。固定相机与振镜的位置,拍摄圆盘标定板,采集图像图5(b)。再记录预投影每个圆环在投影坐标系下的二维坐标,通过板卡控制振镜向被投影平面均匀投射多个激光圆环。在投影激光圆环的同时,控制相机采集图像。

2) 被投影目标位姿估计。提取图5(b)中的特征点,与标定板数模的特征进行匹配,提取特征的像素坐标。再根据已知的标定板平面的特征的世界坐标,通过单应性估计,完成世界坐标系到图像坐标系的标定。

3) 相机与振镜关系解算。提取投影了圆环点阵的图中的圆环特征,拟合出圆环的圆心与振镜投影坐标系的圆环特征点作匹配。求解单应性变换矩阵,完成图像坐标系与投影坐标系的标定。

4) 三维激光投影实现。在数模中得到四个目标圆的轮廓坐标,利用已经标定的变换将轮廓转换到投影坐标系,实现投影。

5) 在0.5~3 m之间重复试验。

4.2 投影结果及分析

记录投影的4个圆环,提取对应的坐标。整个三维激光投影系统的标定会存在误差,圆环与标定板上的目标圆不可能完全重合。由于相机标定的误差在0.05个像素左右,远小于误差值可以忽略不计。为了更方便地进行数据分析,可以把通过相机拍摄标定板提取的四个圆的圆心像素坐标作为真值,把相机拍摄的激光投影的圆环的圆心作为实验值进行分析。图6为在1.5 m处所得的4个圆环数据,其中point1为拍摄的标定板圆的圆心坐标,point2为投影的圆环的圆心坐标。

用投影圆环的圆心 $p_1(x_1, y_2)$ 和标定板目标圆的圆心 $p_2(x_2, y_2)$ 的圆心距来表示投影的误差,即 $S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 。通过计算得到投影圆环与标定板目标圆圆心的像素误差,利用已知的像素当量,将像素误差转换为实际距离误差。具体数据如表2。

利用相似的方法,分析整个试验中0.5~3 m的实验数据,如表3所示。分析可知,随着距离的增加,投影精度虽然有所下降,但是波动较小。同时由于本文方法仅需要解算投影平面、相机图像平面和振镜投影平面之间的关系,进而标定过程较为简单,标定时间仅需要5 min,有效地提高了标定的效率。

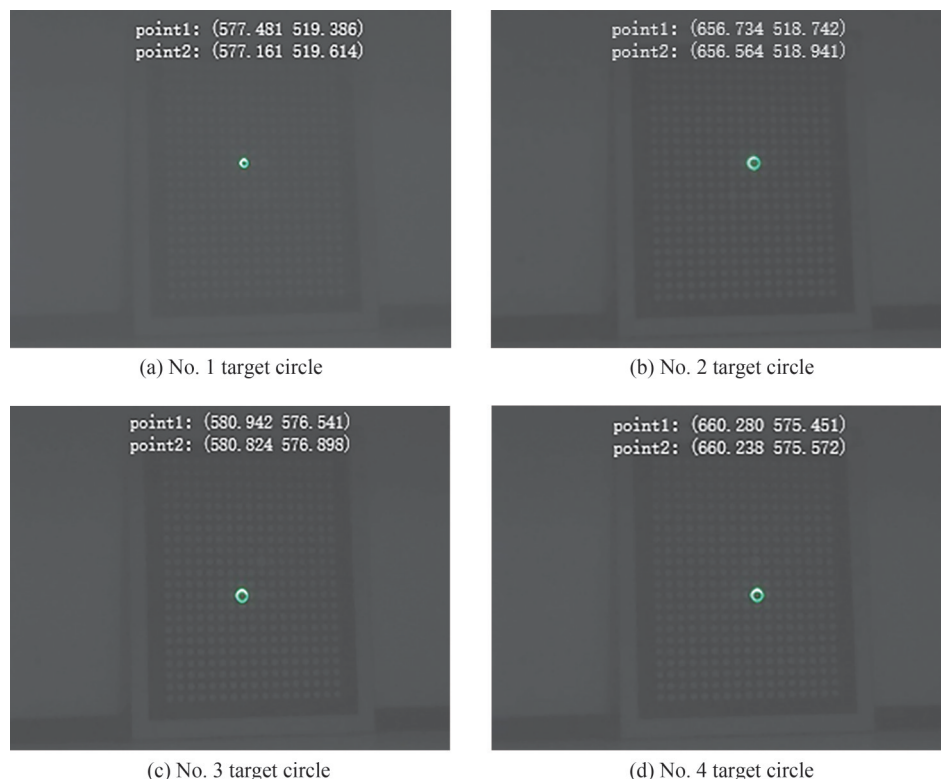


图6 目标圆投影
Fig.6 Target circle projection

表2 投影距离为1.5 m的精度分析

Table 2 Accuracy analysis with a projection distance of 1.5 m

	Circle1	Circle2	Circle3	Circle4
Target circle center of calibration board	580.942	577.481	660.280	656.734
	576.541	519.386	575.451	518.742
Projected torus center	580.824	577.161	660.238	656.564
	576.898	519.614	575.572	518.941
Pixel error/pixel	0.375	0.392	0.128	0.261
Actual distance/mm	0.20	0.21	0.16	0.14
Average error/mm	0.18			

表3 投影距离为0.5~3 m的实验数据分析

Table 3 Analysis of experimental data with a projection distance of 0.5~3 m

Distance/m	Homographic transformation method error/mm				Average error/mm	Calibration time/min
	Circle1	Circle2	Circle3	Circle4		
0.5	0.050	0.167	0.147	0.110	0.118	5
1.0	0.105	0.175	0.140	0.175	0.148	5
1.5	0.202	0.211	0.169	0.140	0.181	5
2.0	0.250	0.132	0.275	0.243	0.225	5
2.5	0.186	0.244	0.342	0.270	0.266	5
3.0	0.280	0.138	0.176	0.391	0.271	5

对比现有方法及商业设备的精度,如表4。表中对比了投影距离为1 m和3 m时,国内常用的方法、设备 WerklichtPro 以及本文所提方法所能达到的定位投影的精度以及本文方法相比其他方法精度的提升。通过对比分析可以发现,在投影定位精度上,本文提出的基于单应性矩阵的投影方法的精度优于国内常用的方

表4 精度对比
Table 4 Accuracy comparison

Method	Distance of projection/m	Error of projection/mm	Accuracy improvement effect
Approximate model method/look-up table method ^[4]	1	0.500	/
Smart laser 3D projection method ^[7]	3	0.400	/
Werklicht Pro	1	0.100	/
Werklicht Pro	3	0.300	/
Calibration method in this article	1	0.148	60%
Calibration method in this article	3	0.271	32%

法。在标定的精度上,优于国内基于视觉的常用方法;在标定的效率上,本文提出的方法不需要进行复杂的手动标定过程,整个标定过程在5 min左右,而WerklichtPro需要10 min左右的设置时间^[20],有效地提高了标定效率。

5 结论

提出了一种三维激光投影模型与基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法,实现了三维激光投影。在实际操作时,首先完成被投影部件坐标系与相机图像坐标系的单应性估计,再进行相机图像坐标系与投影坐标系的单应性估计,进而完成整个三维激光投影定位系统的标定。单应矩阵的标定方法受限于平面物体,适用于被投影部件为平面的情况。相比于国内常规的标定方法,本文方法避免了复杂的前期标定过程,提高了标定的效率,投影定位精度在常规投影距离3 m范围内精度可达0.3 mm,避免了使用激光跟踪仪与IGPS这样的定位设备,降低了成本,解决了目前整个三维激光投影系统操作过程效率低的问题。

参考文献

- [1] SHI Xiaogang, XUE Zhenghui, LI Huihui, et al. Review of augmented reality display technology[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5):1146-1161.
史晓刚,薛正辉,李会会,等.增强现实显示技术综述[J].中国光学,2021,14(5):1146-1161.
- [2] FU Y C. Laser projection display and illumination device with MEMS scanning mirror for indoor and outdoor applications: US, US7252394B1[P]. 2007-08-07.
- [3] HAYES M W, BAER D M. Method of assembling an article using laser light projection and a photoreactive material: U.S. Patent 6,828,525[P]. 2004-12-7.
- [4] LIU Miao. Research on key technique and application of the precise 3D optical projecting indication system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
刘邈.高精度光学三维标示关键技术及应用研究[D].天津:天津大学,2016.
- [5] LIU Miao, SUN Changku, HUANG Shujun, et al. An accurate projector calibration method based on polynomial distortion representation[J]. Sensors, 2015, 15(10):26567-26582.
- [6] LIU Miao, YANG Shourui, WANG Zhangying, et al. Generic precise augmented reality guiding system and its calibration method based on 3D virtual model[J]. Optics Express, 2016, 24(11):12026.
- [7] GUO Lili. Research on intelligent laser 3D projection system and calibration technique for spatial positioning accuracy [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
郭丽丽.智能激光3D投影系统及空间定位精度标定技术研究[D].长春:长春理工大学,2018.
- [8] GUO Lili, LI Lijuan, HOU Maosheng, et al. Spatial positioning accuracy analysis of intelligent laser 3D projection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8):131-139.
郭丽丽,李丽娟,侯茂盛,等.智能激光3D投影空间定位精度分析[J].红外与激光工程,2018,47(8):131-139.
- [9] TU Junchao, ZHANG Liyan. Rapid on-site recalibration for binocular vision galvanometric laser scanning system [J]. Optics Express, 2018, 26(25):32608-32623.
- [10] TU Junchao, ZHANG Liyan. Effective data-driven calibration for a galvanometric laser scanning system using binocular stereo vision[J]. Sensors, 2018, 18(2):197-212.
- [11] QU Song. Research on galvanometrical scanning laser 3D projection system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
曲松.振镜扫描式激光三维投影系统研究[D].长春:长春理工大学,2018.
- [12] QU Song, LI Lijuan, HOU Maosheng, et al. Methods to improve accuracy of laser scanning projection system [J].

- Laser&Optoelectronics Progress, 2018,55(2):147-151.
曲松,李雨娟,侯茂盛,郭丽丽.提高激光扫描投影系统精度的方法研究[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):147-151.
- [13] HOU Maosheng, YANG Fan, SUN Mingli, et al. Research on dynamic focusing system of laser scanning projection instrument[J].Journal of Applied Optics, 2018,39(5):605-612.
侯茂盛,杨帆,孙明利,等.应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究[J].应用光学,2018,39(5):605-612.
- [14] HOU Maosheng, CHEN Yuqing, SHI Zhengxue, et al. Self-calibration method of laser scanning projection system combined with monocular vision.[J].Acta Photonica Sinica, 2021,50(2):0212002.
侯茂盛,陈雨情,史铮雪,等.融合单目视觉的激光扫描投影系统自标定方法[J].光子学报,2021,50(2):0212002.
- [15] CUI Suochao, ZHU Xiao, WANG Wei, et al. Calibration of a laser galvanometric scanning system by adapting a camera model.[J]. Applied Optics, 2009,48(14):2632-2637.
- [16] JIANG Yongyuan. Research and application of image depth and pose estimation for monocular camera [D].Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2019.
江永远.单目相机图像深度和位姿估计的研究与应用[D].武汉:武汉工程大学,2019.
- [17] ZHANG Xiongfang, LIU Haibo, SHANG Yang. Robust orthogonal iteration algorithm for single camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2019,39(9):262-267.
张雄锋,刘海波,尚洋.单目相机位姿估计的稳健正交迭代方法[J].光学学报,2019,39(9):262-267.

Calibration Method of 3D Laser Projection Based on Homography Matrix

ZHAO Zuyang¹, CUI Haihua¹, DU Kunpeng², QU Yiming¹, QUAN Dong², MU Zhiguo²

(1 College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2 AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company, Ltd, Xi'an 710089, China)

Abstract: As a branch of augmented reality technology, 3D laser projection positioning technology can accurately present the contour information of the digital 3D model of the product and part of the manufacturing information at the required place on the product assembly site. The 2D galvanometer system is an optical reflection system that can precisely control the optical path of the laser beam. The calibration technology of the 2D galvanometer is the key to achieving high-precision 3D laser projection. As the application of two-dimensional scanning galvanometers expands from two-dimensional plane scanning to three-dimensional space scanning, the difficulty of galvanometer system calibration is also increasing, and the continuous expansion of galvanometer system applications promotes the development of galvanometer system calibration technology. However, the calibration process of the existing laser projection technology has the problems of complicated process operation, low efficiency and the need to use high-cost equipment such as laser trackers, resulting in the inability of 3D laser projection to be widely used in the field of view of assembly manufacturing. Vision measurement technology is a typical non-contact auxiliary measurement technologies with high measurement accuracy. It can not only collect a large amount of high-precision data for the calibration of the galvanometer, but also can be used as a basic coordinate system to realize the alignment of the coordinate system of the projected object and the galvanometer coordinate system. In addition, visual measurement has the advantages of mature development and low hardware requirements. The study of the 3D laser projection system based on visual assistance can lower the threshold for the realization of this technology and promote the promotion and application of 3D laser projection. Aiming at the problems of complicated operation and low efficiency in the existing 3D laser projection system calibration, a 3D laser projection calibration method based on a homography matrix is proposed. Firstly, the monocular vision was introduced as an auxiliary means to establish a model of the 3D laser projection system; secondly, the pose of the projected target was solved by using the 2D homography of the image, and the conversion relationship between the galvanometer and the camera was calibrated. The performance of the proposed calibration method is analyzed from three angles of error, stability and error distribution, and the reliability of the 3D laser projection calibration method based on the homography matrix is verified. By independently building a 3D laser projection system based on visual aids, and conducting specific

experiments with standard parts as the projected parts, it is proved that the proposed calibration method can solve the above problems. The experimental results show that when the distance between the projected part and the galvanometer is within 3 m, the calibration time is less than 5 min, and the projection accuracy can reach 0.3 mm. The calibration method of the homography matrix is limited to the plane object, and it is suitable for the case where the projected part is a plane. Compared with the domestic conventional calibration method, the method in this paper avoids the complicated pre-calibration process and improves the calibration efficiency. Such a positioning device reduces the cost and solves the problem of low operation efficiency of the entire 3D laser projection system at present.

Key words: Machine vision; Homography matrix; Pose estimation; Feature extraction; Three-dimensional laser projection

OCIS Codes: 120.4640; 140.7300; 150.0155; 150.1135