

激光与光电子学进展

一种基于局部单应性的投影仪精确标定方法

孙丽君^{1,2,3}, 张丹丹^{1,2,3}, 陈天飞^{1,2,3*}, 黄志远^{1,2,3}, 李石^{1,2,3}

¹河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南 郑州 450001;

²河南工业大学郑州市机器感知与智能系统重点实验室, 河南 郑州 450001;

³河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 在条纹投影轮廓术中, 投影仪标定作为系统标定的重要组成部分, 其标定精度是保证系统测量精度的关键。但投影仪不能直接捕捉图像, 无法直接建立目标点与对应投影仪像素点之间的关系, 标定过程复杂且精度不高。针对这一问题, 分析了投影仪标定的影响因素, 提出了一种基于局部单应性矩阵的投影仪标定新方法。首先, 通过实验确定局部区域的最佳尺寸; 然后, 计算圆心所在区域的局部单应性矩阵, 完成投影仪坐标的映射; 最后, 采用相机标定方法完成投影仪的标定。实验结果表明, 该方法减小了圆心偏差和相位误差对投影仪标定精度的影响, 并基于局部线性化的思想, 建立了相机图像坐标到投影仪图像坐标的亚像素级映射, 提高了投影仪标定的精度。

关键词 测量; 条纹投影轮廓术; 投影仪标定; 局部单应性; 圆心偏差; 双四步相移

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1312003

Accurate Local Homography-Based Projector Calibration Method

Sun Lijun^{1,2,3}, Zhang Dandan^{1,2,3}, Chen Tianfei^{1,2,3*}, Huang Zhiyuan^{1,2,3}, Li Shi^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Grain Information Processing and Control of Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;

²Zhengzhou Key Laboratory of Machine Perception and Intelligent System, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;

³College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract In fringe projection profilometry, projector calibration is an important part of system calibration. Accurate projector calibration is key to ensuring the accuracy of three-dimensional shape measurements. The profilometry projector cannot capture the image directly. Thus, obtaining the correspondence between pixels and object points is difficult, which makes projector calibration complex with low precision. To address this problem, we analyzed the factors that influence projector calibration and presented a new projector calibration method based on local homography matrix. First, we conducted experiments to determine the optimum size of the local area. Then, we calculated the local homography matrix of the area where the center of the circle is located and completed the mapping of the projector's coordinates. Finally, we used the camera calibration method to calibrate the projector. Experimental results show that this method reduces the influence of center deviation and phase error on the calibration accuracy of the projector. Based on the idea of local linearization, the subpixel mapping of camera image coordinates to projector image coordinates is established, and the accuracy of projector calibration is improved.

Key words measurement; fringe projection profilometry; projector calibration; local homography; center deviation; double four-step phase shift

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(62173127, 61973104)、中原科技创新领军人才资助项目(224200510008)、河南省优秀青年科学基金(212300410036)、河南省高校科技创新人才支持计划(21HASTIT029)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS089)

通信作者: *chen_tianfei@163.com

1 引言

随着高性能光源和成像设备的发展,基于光学的三维测量技术在机械工程、生物医学、工业检测和逆向工程等领域得到了广泛的研究和应用^[1-4]。在众多的光学三维测量方法中,采用相位编码的条纹投影轮廓术(FPP)因具有点密度高、测量精度高、速度快、成本低等优点,成为了结构光投影法中最具代表性的方法,许多学者对该方法进行了深入的研究^[5-7]。

目前的FPP主要采用数字光栅投影技术,该系统主要部件包括相机、DLP投影仪和计算机。测量过程中,由数字光处理(DLP)投影仪将计算机生成的编码图案投影至被测物体表面,并由相机同步采集。利用采集的图像计算出物体表面的相位信息,即可根据预先标定获得的相机和投影仪的系统参数恢复出物体的三维信息。由系统测量原理可知,系统标定,即投影仪和相机参数的获得,是整个测量系统的关键,投影仪标定作为系统标定的重要组成部分,其标定精度将直接影响系统测量的精度。与双目立体视觉不同^[8],投影仪不能像相机一样直接捕捉图像,无法直接建立目标物体在投影仪图像和对应空间位置之间的关系,使其标定难度和复杂度增加。

目前的投影仪标定技术可大致分为两类:第一类方法需借助相机有关参数完成投影仪的标定。Falcao等^[9]和Lu等^[10]使用棋盘格图案作为标靶,并根据相机标定结果完成投影仪的标定。Anwar^[11]保持相机固定不动,求得相机和标靶平面的单应性矩阵后,利用投影仪向参考平面投影的棋盘格图案,计算棋盘格角点的世界坐标,完成投影仪的标定。棋盘格角点坐标的提取精度较低,并且拍摄角度对角点提取的影响很大^[12]。因此,Yang等^[13]将参考平面投影标记点定位精度更高的圆形图案作为标靶,并增加一个相机,使用双目立体视觉获得圆心的世界坐标,提高投影仪标定的精度。该类方法对相机的依赖性较强,在投影仪标定过程中均会产生误差的扩散,使得投影仪标定精度不高。

另一类方法不依赖相机标定的参数,仅需借助相机采集的图像,利用标记点处的相位信息计算对应的投影仪图像坐标,完成投影仪参数的标定。Zhang等^[14]提出了投影仪“拍摄”照片的理念,通过相位信息计算标记点对应的投影仪图像坐标,生成了虚拟的投影仪图像。李中伟等^[15]、冀红彬等^[16]进一步利用不同的相位误差补偿方法,对标定过程中光栅非正弦化引起的相位误差进行了补偿,提高了投影仪标定精度。

上述方法在计算投影仪坐标时,提取的标记点相机坐标为亚像素级,但计算其对应的投影仪坐标时,利用的相位信息为亚像素标记点所在整数像素对应的绝对相位值,因此,上述方法是基于像素到像素(P2P)的映射,限制了投影仪标定的精度。针对此问题,Xing等^[17]使用有理函数模型拟合整个标靶平面的绝对相位

图,将标记点的亚像素级相机坐标代入有理函数模型中,获得该点的拟合相位,完成投影仪坐标的亚像素级映射。但该方法无法避免镜头畸变引起的相位误差,需对镜头畸变进行校正,过程复杂。Huang等^[18]提出了一种基于相位辅助的亚像素级映射方法,首先提取标靶图像的圆形边缘像素,将其映射至投影仪图像中,然后使用最小二乘拟合法计算标记点的亚像素级投影仪坐标,提高了投影仪的标定精度。但圆形目标的投影存在偏心误差^[19],因此该方法存在理论上的缺陷。Zhang等^[20]根据射影变换中的交比不变性,利用距圆心最近的4个整数像素,完成了投影仪坐标的亚像素级映射。但是,利用4个整数像素点建立的映射关系,由于点数过少而不一定准确,影响投影仪标定精度。

本文利用同心圆靶标,提出了一种基于局部单应性矩阵的投影仪标定方法。首先,利用交比不变性对圆形标靶存在的偏心误差进行了校正,并利用双四步相移法对光栅图像非正弦化引起的相位误差进行了补偿;然后,基于局部线性化的思想,计算局部区域之间的单应性矩阵,完成圆心的亚像素级映射。为了确定本实验系统局部区域的最佳尺寸,研究了局部区域大小对投影仪标定精度的影响。本文方法操作简单,所需投影图像少,并且不依赖于相机标定结果,避免了误差的扩散,可完成投影仪的精确标定。

2 标定原理

2.1 投影仪标定模型

投影仪的光学结构和相机的光学结构相似,可以看作是逆向的相机,因此投影仪模型也可以用针孔模型以及镜头畸变模型来表示。理想情况下FPP的系统模型如图1所示。若设标靶的标记点坐标为 $M_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$,该点在相机图像上的对应坐标为 $m_c =$

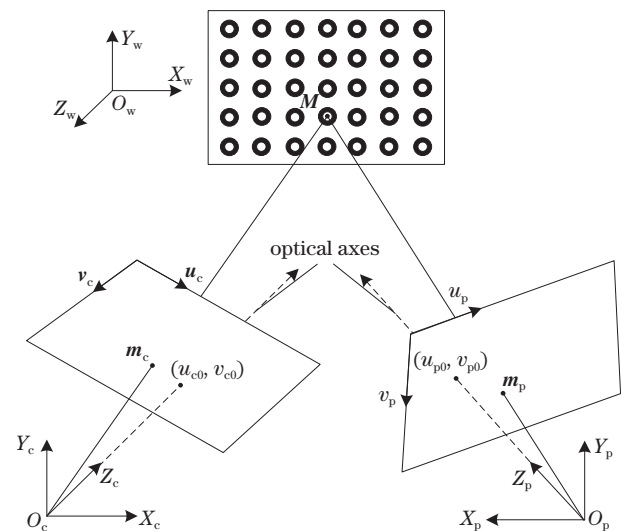


图1 理想针孔模型

Fig. 1 Ideal pinhole model

$[u_c, v_c]^T$, 在投影仪图像上的对应坐标为 $\mathbf{m}_p = [u_p, v_p]^T$, 用齐次坐标分别表示为 $\tilde{\mathbf{M}}_w = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{m}}_c = [u_c, v_c, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{m}}_p = [u_p, v_p, 1]^T$, 则投影仪图像像素点 $\tilde{\mathbf{m}}_p$ 和空间点三维坐标 $\tilde{\mathbf{M}}_w$ 的映射关系可以表示为

$$s\tilde{\mathbf{m}}_p = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_{p0} \\ 0 & f_v & v_{p0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \tilde{\mathbf{M}}_w, \quad (1)$$

式中: s 为任意比例因子; f_u 和 f_v 分别为以投影仪像素的宽度和高度为单位测量的焦距; (u_{p0}, v_{p0}) 表示投影仪主点坐标; \mathbf{R} 为投影仪坐标系到世界坐标系的正交旋转矩阵; \mathbf{T} 为平移向量。

式(1)是在不考虑外界影响理想情况下的针孔模型的数学表达式, 但实际情况中, 相机和投影仪镜头存在畸变。本文主要考虑镜头的径向和切向畸变, 理想的投影仪坐标 $\mathbf{m}_p = [u_p, v_p]^T$ 和畸变的投影仪坐标 $\mathbf{m}'_p = [u'_p, v'_p]^T$ 的关系可表示为

$$\begin{cases} x' = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)x + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $x = (u_p - u_{p0})/f_u$, $y = (v_p - v_{p0})/f_v$ 和 $x' = (u'_p - u_{p0})/f_u$, $y' = (v'_p - v_{p0})/f_v$ 分别为理想情况下和实际情况下以物理单位度量(mm)的投影仪成像平面坐标系的坐标; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为像素点到光心的径向距离; k_1, k_2 和 p_1, p_2 分别为投影仪镜头的径向和切向畸变系数。因此, 投影仪的标定模型可用式(1)、(2)表示。

2.2 P2P 映射方法

P2P 映射方法中, 一般利用标记点所在整数像素单元对应的绝对相位值, 直接完成标记点投影仪坐标的映射。利用四步相移算法计算投影条纹图像的相位分布时, 所生成的投影条纹图像的灰度分布可表示为 $I_i(u_c, v_c) = I'(u_c, v_c) + I''(u_c, v_c) \cos[\varphi(u_c, v_c) + \delta_i]$, (3) 式中: $I'(u_c, v_c)$ 为图像的平均灰度; $I''(u_c, v_c)$ 为调制强度; $\varphi(u_c, v_c)$ 为其相位主值; $\delta_i = \pi(i-1)/2$ 为移相量。使用四步相移时 $i = 1, 2, 3, 4$, 其相位主值可表示为

$$\varphi(u_c, v_c) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^4 I_i(u_c, v_c) \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^4 I_i(u_c, v_c) \cos \delta_i}. \quad (4)$$

但因相机和投影仪的非线性响应、目标物体表面调制等影响, 实际采集到的光栅条纹 $I_i(u_c, v_c)$ 非正弦化, 计算出的相位主值存在误差, 实际相位主值应为 $\varphi'(u_c, v_c)$ 。标记点在投影仪图像上的坐标可由下式求出,

$$u_p = \frac{\Phi_v}{2\pi} T_u, v_p = \frac{\Phi_u}{2\pi} T_v, \quad (5)$$

式中: Φ_u 和 Φ_v 分别为标记点在水平绝对相位图和垂直绝对相位图中的相位值; T_u 和 T_v 分别为所投影条纹图像中两个方向上的单个条纹宽度(以像素为单位)。

2.3 投影仪标定误差因素分析

基于 P2P 映射方法标定投影仪时, 首先利用拍摄的图像, 计算标记点相机坐标和标靶平面的绝对相位图, 然后利用标记点所在整数像素单元的相位值由式(5)直接计算对应的投影仪坐标, 最后根据相机标定方法完成对投影仪的标定。由投影仪标定过程可知, 标记点定位的精确度和相位计算的准确度, 是保证投影仪标定精度的基础, 而投影仪坐标的映射精度和标定算法将直接影响投影仪标定的精度。

1) 圆心偏差的影响

相比于棋盘格, 圆形标靶的标记点的定位精度更高, 并且在提取圆心相位信息时, 不受黑色区域的影响, 相位解算准确, 在高精度测量中应用广泛^[19]。但圆形经过投影变换后所成椭圆的中心, 并非空间圆圆心在图像中的真实投影点, 即存在一定的圆心偏差, 降低了圆心的定位精度。若直接利用椭圆中心计算投影仪坐标, 则会使误差进一步累积, 影响投影仪标定的精度。

2) 相位误差的影响

在系统测量的过程中, 相机和投影仪的非线性响应是系统相位计算误差的主要来源。而相位信息是投影仪坐标计算的基础, 相位误差的存在, 使得依据相位计算的投影仪坐标存在偏差, 影响投影仪标定的精度。

3) 坐标映射算法的影响

P2P 映射方法在计算投影仪坐标时, 直接利用标记点所在整数像素单元对应的绝对相位值计算标记点对应的投影仪坐标, 其映射过程为像素级的映射。因此, 所提取相位信息与实际标记点处的相位值存在偏差, 使得投影仪坐标不能准确获得。若能建立相机坐标和投影仪坐标之间的亚像素级映射, 则可使投影仪标定精度大大提高。因此, 坐标映射算法也是影响投影仪标定的关键因素之一。

根据以上分析可知, 影响投影仪标定精度的因素主要有: 圆心偏差、相位误差和坐标映射算法, 本文在 P2P 映射方法的基础上, 对这些影响因素分别进行了研究。当采用计算出的投影仪坐标标定投影仪时, 一般使用相机标定算法对投影仪进行标定。目前相机标定算法已很成熟, Matlab 集成工具箱的标定算法完全能够满足系统测量精度的要求, 因此本文也不再对此部分进行研究。

3 标定方法

3.1 圆心偏差校正

圆形目标的几何特征明显, 容易识别, 且定位精度高, 在光学三维测量中应用广泛。但空间中的圆形目标经投影变换后, 在相机成像平面的投影一般为椭圆,

如图 2 所示,其中 π_1 为圆形所在空间物体平面,其圆心为 P , π_2 为相机成像平面,圆形经投影变换后在该平面上为一椭圆,该椭圆拟合的中心点为 P'' ,而圆心 P 在相机成像平面的投影点实际为 P' ,因此圆心的投影点与投影椭圆拟合的中心点并不重合,即存在偏心误差。

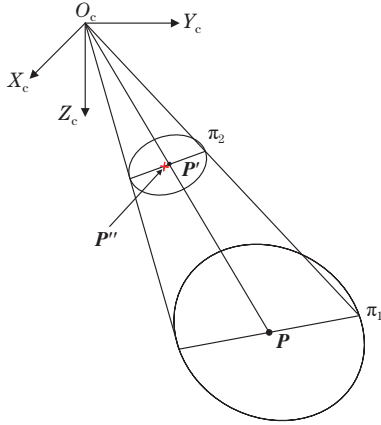


图 2 透视投影变换

Fig. 2 Perspective projection transformation

空间中的同心圆经投影变换后,在相机图像中所成的外椭圆中心与内椭圆中心位于同一条直线上,且该直线经过空间中同心圆在相机图像中的真实投影点^[21]。因此,根据由一个大圆和一个小圆组成的同心圆,基于射影变换中直线的交比不变性,可有效校正圆形目标存在的圆心偏差。设空间有一同心圆,外圆半径为 R_b ,内圆半径为 R_s ,其在相机成像平面所成椭圆如图 3 所示,其中 O 为同心圆圆心的实际投影点, O_1 为外椭圆拟合中心, O_2 为内椭圆拟合中心,将两个圆心连成一条直线,该直线经过点 O ,计算直线 O_1O_2 与两个椭圆的四个交点 A, B, C, D 的坐标,根据交比不变,即:

$$CR(O, C; A, B) = CR(C, D; B, O) = \frac{R_b}{R_s} \cdot \frac{R_b + R_s}{2 \times R_s} \quad (6)$$

求得 O 点坐标,即完成了圆心偏差的校正,并将其

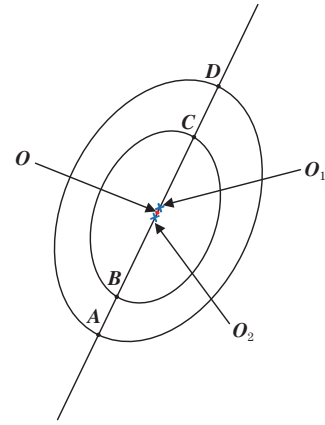


图 3 相机成像平面的同心圆

Fig. 3 Concentric circles in the camera image plane

作为空间同心圆圆心的真实投影点,用于后续实验。

3.2 双四步相移补偿相位误差

由 2.2 节可知,实际相位值与理想相位值之间存在误差,标准四步相移算法所产生的相位误差可近似表示为

$$\Delta\varphi_1(u_c, v_c) \approx -c \sin[4\varphi(u_c, v_c)], \quad (7)$$

式中 c 为一常量。由式(7)可知,四步相移法的相位误差近似于一个正弦函数,有一定的规律性。若每幅光栅图像的相移量均增加 $\pi/4$,即使用初始相位 $\partial = \pi/4$ 的四步相移算法,则其理想相位为 $[\varphi(u_c, v_c) + \pi/4]$,相位误差为

$$\Delta\varphi_2(u_c, v_c) \approx -c \sin\left[4\varphi(u_c, v_c) + 4 \times \frac{\pi}{4}\right] = c \sin[4\varphi(u_c, v_c)]. \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知,若在使用一组初始相位为 0 的四步相移图像的基础上,增加一组初始相位为 $\pi/4$ 的四步相移图像,则对相位主值进行叠加可使相位误差相互抵消。设两组相移图像的实际相位主值分别为 $\varphi'_1(u_c, v_c)$ 和 $\varphi'_2(u_c, v_c)$,叠加公式可表示为

$$\varphi(u_c, v_c) = \begin{cases} [\varphi'_2(u_c, v_c) + \varphi'_1(u_c, v_c) - \partial]/2, & \varphi'_2(u_c, v_c) > \varphi'_1(u_c, v_c) \\ [\varphi'_2(u_c, v_c) + \varphi'_1(u_c, v_c) + 2\pi - \partial]/2, & \varphi'_2(u_c, v_c) < \varphi'_1(u_c, v_c) \end{cases} \quad (9)$$

利用双四步相移法对相位误差进行补偿时,采用先叠加后展开的方法。由式(4)计算的相位主值折叠在 $[0, 2\pi]$ 内,需要对其进行解包裹运算,以得到连续的绝对相位值,利用双四步相移法求取绝对相位值的流程图如图 4 所示。研究发现,单周期条纹在保证投影仪标定精度的同时,大大减少了所需投影图像的数量,简化了相位解算过程,缩短了图像处理的时间^[16],因此本文使用单周期双四步条纹图像进行标定实验。

3.3 基于局部单应性矩阵的映射算法

为了建立圆心相机图像坐标和投影仪图像坐标之间精确的映射关系,提高投影仪标定的精度,本文提出了一种基于局部单应性矩阵完成投影仪坐标的亚像素级映射的方法。

由 FPP 的系统模型和投影仪图像的成像过程可知,如果忽略相机和投影仪的镜头畸变,投影仪图像和相机图像可看作同一标靶的射影变换,那么可以建立标靶上圆心对应的相机图像坐标 \vec{m}_c 与投影仪图像坐

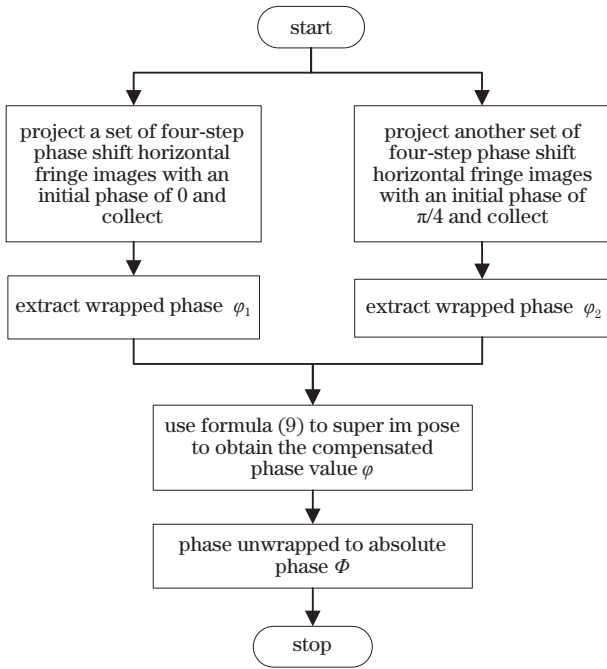


图 4 双四步相移法流程图

Fig. 4 Flow chart of double four step phase shift

标 \tilde{m}_p 之间的映射关系为

$$\tilde{m}_p = \mathbf{H}\tilde{m}_c = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \tilde{m}_c, \quad (10)$$

式中: \mathbf{H} 即为点 \tilde{m}_c 和 \tilde{m}_p 之间的单应性矩阵且 $h_{33} = 1$, 每组对应点可得到关于 \mathbf{H} 的两个方程, 因此计算 \mathbf{H} 至少需要相机图像和投影仪图像之间的 4 组对应点。仅使用 4 组点计算的单应性矩阵, 并不一定能准确反映标记点相机图像与投影仪图像之间的映射关系, 理论上对应点对数越多, 所求单应性矩阵越准确。

实际情况中, 相机和投影仪镜头畸变的存在, 使得摄像机图像与投影仪图像之间不满足简单的线性关系。但是, 如果区域足够小, 相机和投影仪的镜头畸变可被局部忽略。因此, 可认为标记点所在相机图像的局部区域是投影仪图像中对应局部区域的投影变换, 从而计算出两个局部区域之间的单应性矩阵, 利用该矩阵完成标记点由相机图像坐标到投影仪图像坐标的亚像素级映射。

本文通过最小化配准误差, 利用 quasi-newton 算法计算每个圆心所在局部区域的单应性矩阵。以 \tilde{m}_c 为中心提取其附近的 $N \times N$ 个整数像素, 记为 $p_i, i = 1, 2, \dots, N \times N$, 其中 N 为求取单应性矩阵时所利用局部区域的尺寸。利用式 (5) 计算该点集内像素点对应的投影仪坐标, 记为 $q_i, i = 1, 2, \dots, N \times N$ 。通过使以下目标函数有局部最小值得到最终的单应性矩阵:

$$\mathbf{H} = \arg \min_H \sum_{p_i} \|q_i - \hat{\mathbf{H}}p_i\|^2. \quad (11)$$

最后, 根据 \mathbf{H} 和式 (10) 直接求得 \tilde{m}_p , 即完成了圆心相机图像坐标到投影仪图像坐标的亚像素级映射。

以某一圆心且 $N=11$ 时为例, 投影仪坐标的整个映射过程如图 5 所示。最左侧为圆心及以圆心为中心的 11×11 个整数像素单元在相机图像中的示意图; 中间图像为圆心所在局部区域的放大, 其中“+”处为标靶圆心的相机图像坐标, 整数像素集 $p_i, i = 1, 2, \dots, N \times N$, 由图中“·”组成, 经式 (5) 求得像素集 p_i 在投影仪图像中的坐标 $q_i, i = 1, 2, \dots, N \times N$, 如最右侧图像中“·”所示, 利用 p_i 和 q_i 计算 $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ 区域内的局部单应性矩阵 \mathbf{H} 后, 即可完成 \tilde{m}_c 到投影仪坐标 \tilde{m}_p 的亚像素级映射, 如最右侧图像“+”处所示。重复该方法, 直到将所有的圆心都映射至投影仪图像中。

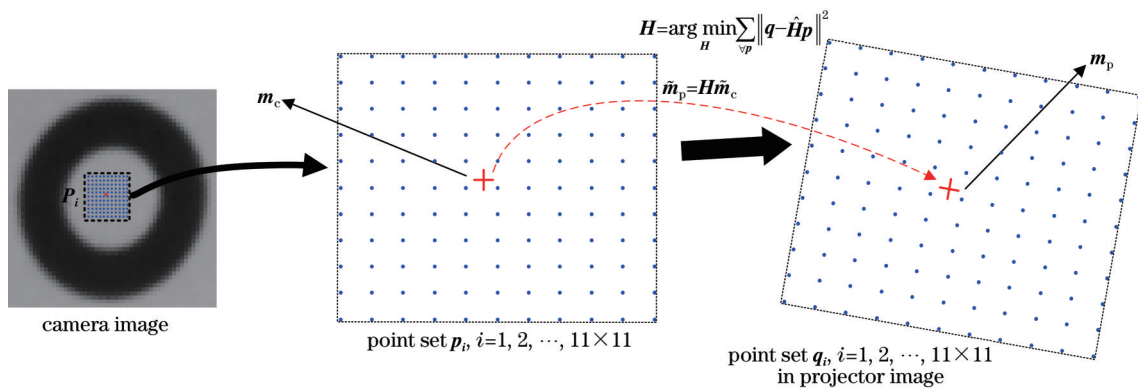


图 5 投影仪坐标映射过程

Fig. 5 Projector coordinate mapping process

相比于使用一个全局单应性矩阵将所有圆心映射至投影仪图像中, 本文所提方法基于局部线性化的思想, 利用每个圆心所在局部区域的单应性矩阵, 完成每个圆心投影仪坐标的亚像素级映射, 可将相机和投影仪的镜头畸变局部忽略, 更加符合成像规律。已知圆

心在投影仪图像中的坐标后, 即可利用相机标定方法完成对投影仪的标定。

3.4 投影仪标定步骤

本文方法投影仪坐标计算过程如图 6 所示。首先, 将标靶固定在相机和投影仪的共同视场内, 放置标

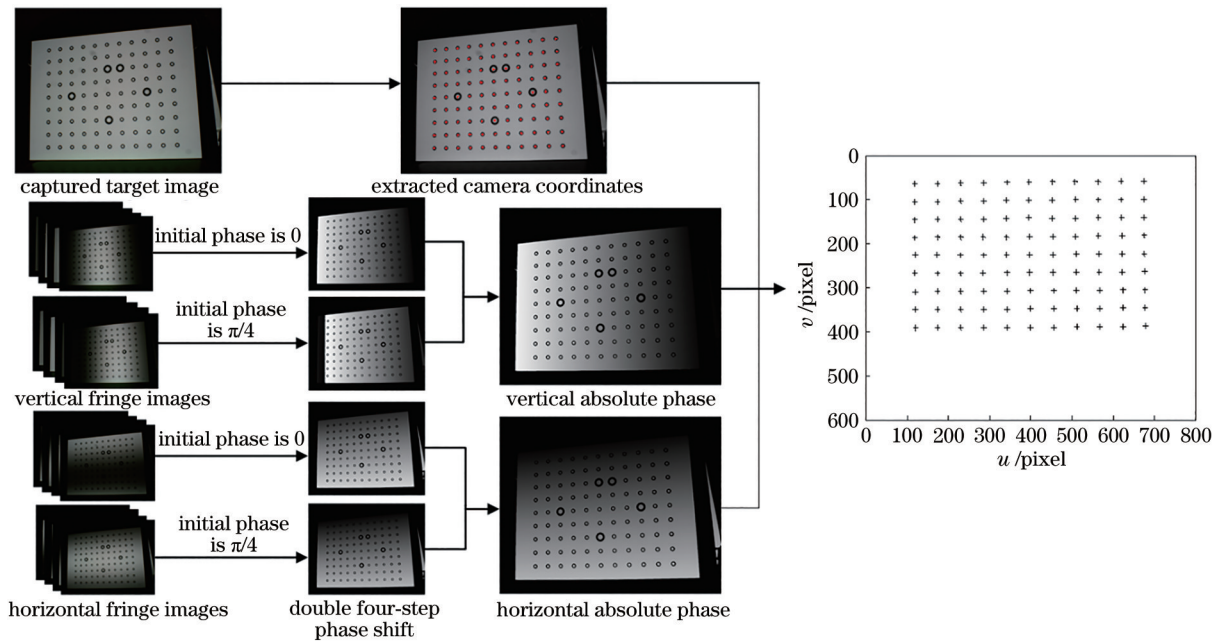


图 6 投影仪坐标计算过程

Fig. 6 Projector coordinates calculation process

靶时,需保证投影仪的投影图像能完全覆盖标靶,并保证相机能采集到完整的标靶图像;然后,采集标靶图像和对应的双四步条纹图像,并根据所提算法计算当前位姿下标记点的相机图像坐标和其对应的绝对相位值;最后,基于局部单应性完成投影仪坐标的亚像素级映射,获得用于标定的投影仪虚拟图像。将标靶放在不同的位置和方向,重复上述步骤,至少获取三个不同位姿下的投影仪虚拟图像,即可完成投影仪的标定。

4 实验结果与分析

为验证本文所提算法在投影仪标定过程中的实际效果,在实验室搭建如图 7(a)所示的投影仪标定系统,标定系统主要由分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 的 DLP 投影仪 (EPSON CH-TW610),分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的相机 (GUPPY PRO GPF 201C IPC) 和一块 9×11 的同心圆标靶 [图 7(b)] 组成。

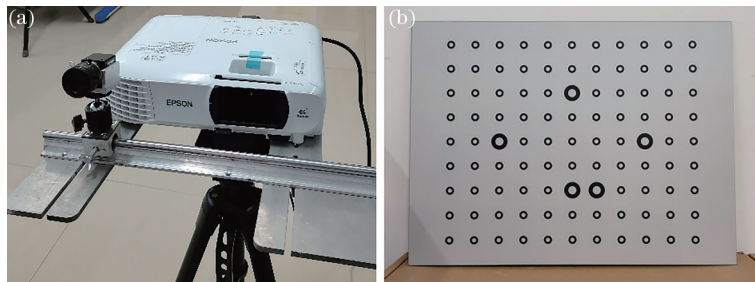


图 7 实验装置图。(a)投影仪标定系统;(b)标定板

Fig. 7 Experimental setup. (a) Projector calibration system; (b) calibration target

本文使用单周期双四步条纹图像进行标定实验。标定过程中,将标靶变换 10 个不同的位置和方向,使用单周期双四步条纹图像进行实验时,每个位姿仅需拍摄一张标靶图像和 16 张条纹图像 (8 张垂直条纹图案和 8 张水平条纹图案),共需采集 170 张图像,与使用多周期条纹的标定方法相比,每个位姿减少了 8 张投影图像,并且对相位误差进行了补偿。根据拍摄的标靶图像和条纹图像,按照 3.4 节所述流程分别获得每个姿态下的投影仪虚拟图像,用于投影仪的标定。

4.1 局部区域最佳尺寸的确定

利用本文所提基于局部单应性的投影仪标定算法完成投影仪标定时,需首先确定所用局部区域大小即 N 的值。本节通过实验研究了不同的局部区域大小对投影仪标定结果的影响,以重投影误差为衡量标准,以 $N=2, 12, 13, 21, 34, 48$ 为例,其重投影误差分布分别如图 8(a)~(f) 所示,当 N 取不同值时,投影仪标定精度变化的趋势图如图 8(g) 所示。

由实验结果可知,当使用四个整数像素单元 ($N=2$) 计算单应性矩阵时,重投影误差较大 [图 8(a)],充分说明了当使用点数较少时,局部单应性矩阵的计算结

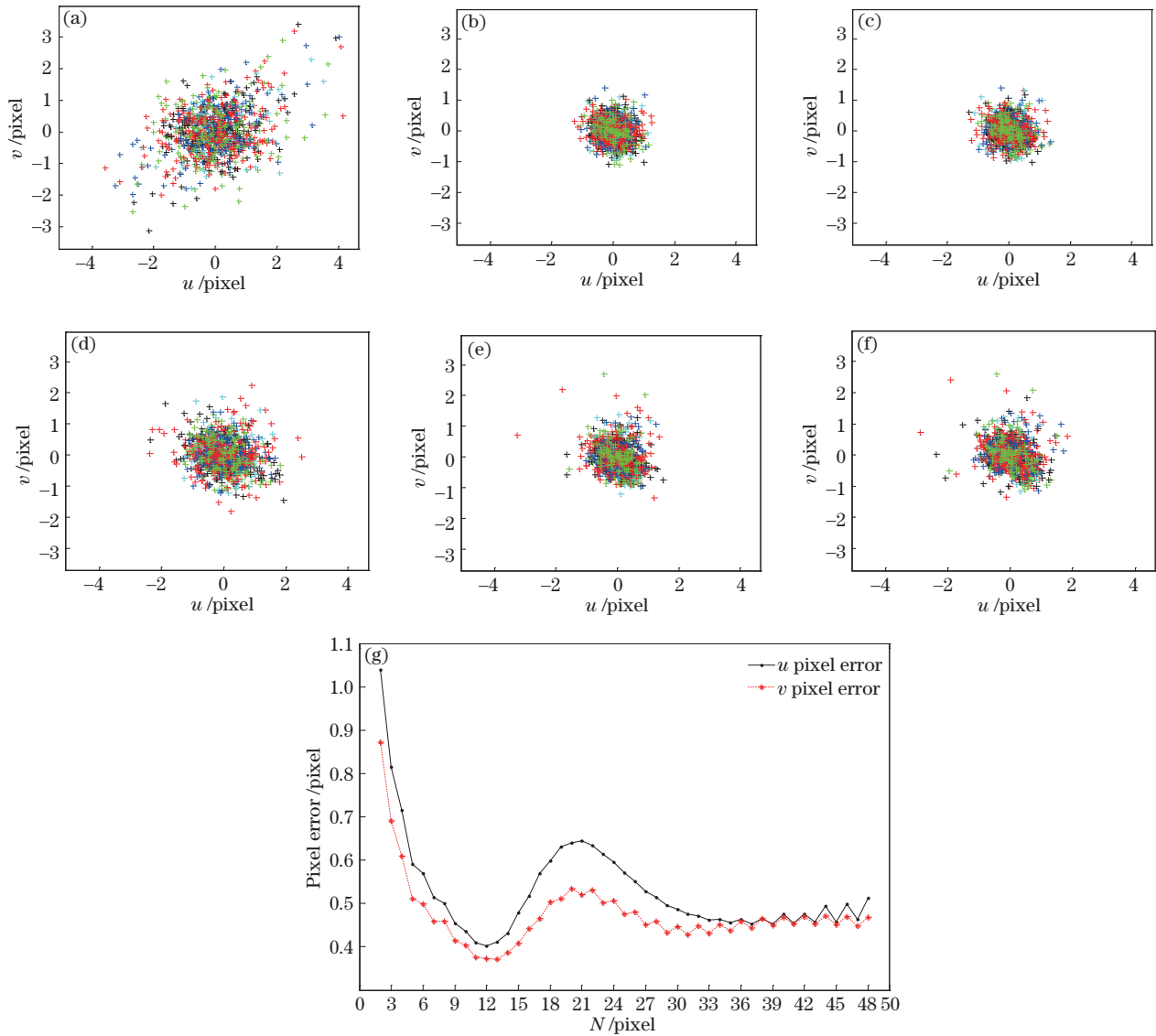


图 8 不同 N 值时的投影仪标定精度。(a) $N=2$; (b) $N=12$; (c) $N=13$; (d) $N=21$; (e) $N=34$; (f) $N=48$; (g) 标定精度变化趋势图
 Fig. 8 Projector calibration accuracy at different N values. (a) $N=2$; (b) $N=12$; (c) $N=13$; (d) $N=21$; (e) $N=34$; (f) $N=48$;
 (g) calibration accuracy trend chart

果很不稳定,严重影响投影仪标定的精度。随着局部区域尺寸的变大,重投影误差明显减小, u 方向和 v 方向分别在 $N=12$ 和 $N=13$ 时达到最小值,由图 8(b)、(c)可知, $N=12$ 时误差分布更为集中。 N 取 14~21 时,重投影误差逐渐增大,由 $N=21$ 的重投影误差分布[图 8(d)]可知,其误差较大的点数明显增多,主要原因是使用此范围的局部区域大小时,黑色圆环处的像素点也被用于计算单应性矩阵,而黑色区域的相位解算存在误差,影响了投影仪标定的精度。当 $N>21$ 时,重投影误差先逐渐减小又缓慢上升。主要原因是局部区域的扩大使像素点数增多,黑色区域处相位解算不准确,对投影仪标定的影响逐渐缩小,但当所用局部区域过大时,由于镜头畸变的存在,使得相机图像和投影仪图像中对应局部区域内的像素点不能简单地使用式(10)来表示,导致标定误差增大。由图 8(e)、(f)可知, $N=34$ 和 $N=48$ 时的重投影误差分布大都集中在

1 pixel 以内,但偏离(0, 0)的点数较多,且 $N=48$ 时偏离(0, 0)的点数明显增加,这也证明了当局部区域大小时,镜头畸变不容忽视,使得像素点不能准确地映射至投影仪图像中,标定误差增大。

根据以上分析可知,计算局部单应性矩阵时,局部区域大小的选取对投影仪标定精度有很大的影响,并且所用 N 值过大、像素点过多时,会延长算法的执行时间,降低算法的执行效率。综合来看, $N=12$ 为本实验平台投影仪标定时所用局部区域尺寸的最佳取值,本文后续实验均采用该值。

4.2 投影仪标定影响因素的实验与分析

为了验证本文针对 P2P 映射方法影响因素而提出的各个改进算法的有效性,基于本文所搭建的系统,在保证整个实验过程中其他步骤、算法完全一致的前提下,分别利用本文提出的圆心偏差校正算法、相位误差补偿算法和基于局部单应性的坐标亚像素映射算法进

行投影仪标定实验。投影仪标定中,通常使用重投影误差来测量标定数据与标定参数之间的匹配度,对其重投影误差进一步处理得到其标准偏差 E_{std} 。P2P 映

射方法、圆心偏差校正后、相位误差补偿后和本文提出的亚像素级映射方法的标准偏差 $E_{std u}$ 和 $E_{std v}$ 分别如表 1 所示。

表 1 投影仪标定的标准偏差
Table 1 The standard deviation of projector calibration

Method	$E_{std u}$	$E_{std v}$
P2P mapping method	1.33078	0.99727
After center deviation correction	1.22937	0.89716
After phase error compensation	0.84813	0.70704
Proposed mapping method	0.71985	0.53907

由表 1 可知,对 P2P 映射方法中的圆心偏差校正后,可将投影仪标定精度在垂直方向上提高 10.03%,与 P2P 映射方法相差较小,主要原因是利用同心圆靶完成投影仪标定时,圆环本身较小,所含像素点数较少,因此圆心偏差对投影仪标定的精度影响较小,但高精度三维测量时,圆心偏差将不容忽略。利用双四步相移法对 P2P 映射方法中的相位误差补偿后, u 方向的重投影误差标准差由 1.33078 降至 0.84813, v 方向的重投影误差标准差由 0.99727 降至 0.70704,可使投影仪 u 方向的标定精度提高 36.27%。利用 P2P 映射方法中的像素级映射方法计算投影仪坐标时,其标准偏差较大,而利用本文算法建立的相机图像和投影仪图像之间的亚像素级映射关系,两个方向

上的标定误差均明显降低,将两个方向的标定精度分别提高了 45.91% 和 45.95%。实验结果表明,坐标映射方法和相位误差对投影仪标定精度的有很大影响,圆心偏差对标定精度的影响较小,而本文针对各个影响因素提出的算法均能有效提高投影仪标定精度。

4.3 不同方法标定结果

为了进一步验证本文算法的有效性,分别利用 P2P 映射方法、文献[16]、文献[20]和本文算法对投影仪进行标定,投影仪标定结果如表 2 所示,由此可以计算投影仪的重投影误差,进一步处理得到投影仪在水平方向和垂直方向的最大误差 $E_{max u}$ 、 $E_{max v}$,平均误差 $E_{mean u}$ 、 $E_{mean v}$,标准偏差 $E_{std u}$ 、 $E_{std v}$ (如表 3 所示)。

表 2 不同方法的标定结果
Table 2 Calibration results of different methods

Method	f_u	f_v	u_{p0}	v_{p0}	k_1	k_2	p_1	p_2
P2P mapping method	1416.50	1037.57	388.54	429.12	-0.4286	1.2574	-0.0377	-0.0031
Method in Ref. [16]	1375.47	1010.02	390.98	425.89	-0.3185	0.9048	-0.0295	-0.0024
Method in Ref. [20]	1356.29	995.08	393.75	427.27	-0.2962	0.7666	-0.0304	-0.0025
Proposed method	1351.08	991.03	398.31	424.24	-0.3077	0.7914	-0.0301	-0.0020

表 3 不同方法的标定误差
Table 3 Calibration error of different methods

Method	$E_{max u}$	$E_{max v}$	$E_{mean u}$	$E_{mean v}$	$E_{std u}$	$E_{std v}$
P2P mapping method	4.58491	3.32272	1.05036	0.79167	1.33078	0.99727
Method in Ref. [16]	2.94480	2.20079	0.68068	0.55934	0.84813	0.70704
Method in Ref. [20]	1.80248	1.89124	0.44593	0.40378	0.56140	0.50607
Proposed method	1.25629	1.39891	0.32177	0.29491	0.40192	0.37253

由表 3 可知,本文方法的各个误差均小于文献[16]和文献[20]方法,为了更直观地体现本文方法的优越性,对其重投影误差分布状况进行展示,如图 9 所示。相比于 P2P 映射方法,文献[16]方法因对相位误差进行了补偿,重投影误差明显减小,但投影仪坐标的映射过程仍为像素级,限制了投影仪标定的精度。文献[20]方法基于交比不变性,完成了投影仪坐标的亚像素级映射,但该方法仅利用标记点

附近的四个整数像素,建立相机图像和投影仪图像之间的局部映射,所用像素数过少,建立的映射关系并不一定准确。本文方法首先确定了局部区域的最佳尺寸,然后计算该局部区域的单应性矩阵,完成了投影仪坐标的亚像素级映射,进一步提高了投影仪标定的精度。相比于 P2P 映射方法,本文方法将 u 方向的标定精度提高了 69.8%,可完成投影仪的精确标定。

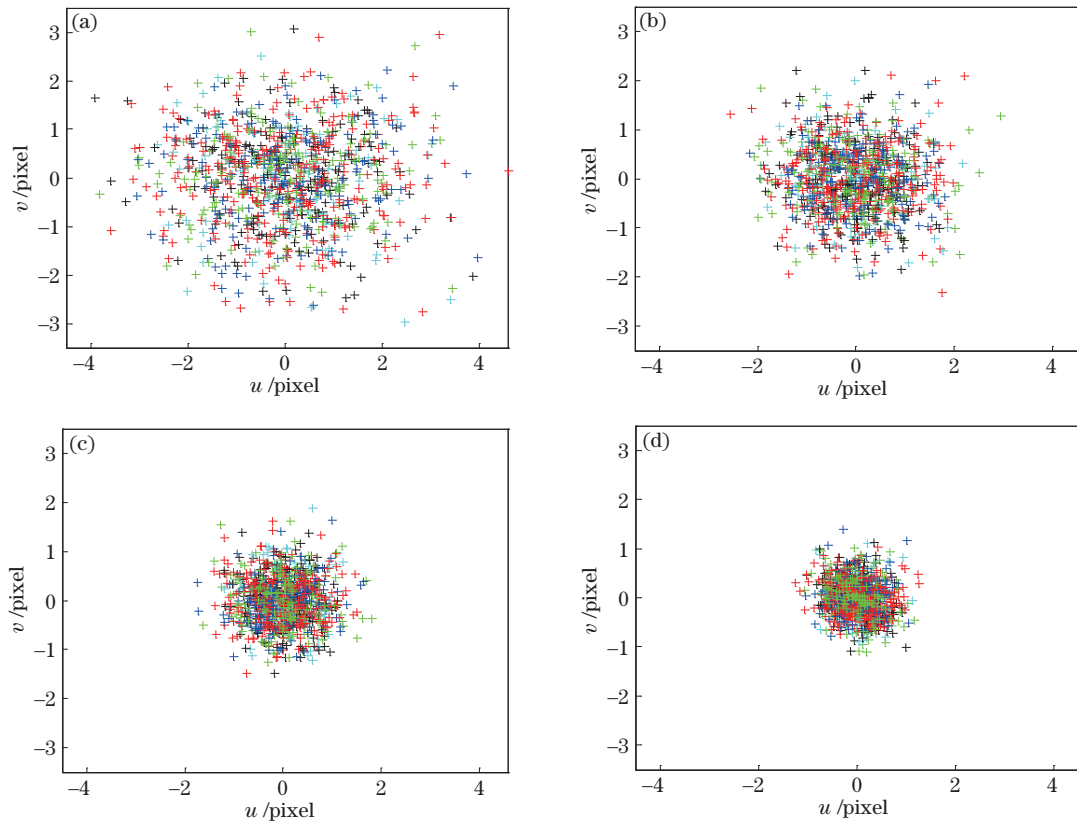


图9 不同标定方法的重投影误差。(a) P2P映射方法;(b)文献[16]方法;(c)文献[20]方法;(d)本文方法

Fig. 9 Re-projection error of different calibration methods. (a) P2P mapping method; (b) method in Ref. [16]; (c) method in Ref. [20]; (d) proposed method

5 结 论

本文提出了一种基于局部单应性矩阵的投影仪标定新方法。首先,使用同心圆标靶,利用投影变换中的交比不变性,对圆形目标投影变换中存在的圆心偏差进行了校正,并利用双四步相移法对条纹图像非正弦化导致的相位误差进行了补偿;然后,利用圆心所在局部区域的单应性矩阵,将标记点映射至投影仪图像中,完成投影仪的标定。该方法消除了圆心偏差和相位误差对投影仪标定的影响,利用基于局部单应性的投影仪坐标映射算法,建立了相机图像与投影仪图像的亚像素级映射。研究了不同局部区域大小下的投影仪标定精度,证明了局部区域的大小对投影仪标定精度有很大的影响,确定了在本实验系统下的局部区域的最佳尺寸。本文方法基于局部线性化的思想,利用每个标记点所在局部区域的单应性矩阵,完成了标记点投影仪坐标的亚像素级映射,更加符合成像规律。实验结果表明,本文方法提高了投影仪标定的精度,可完成投影仪的精确标定。

参 考 文 献

[1] Inanç A, Kösoğlu G, Yüksel H, et al. 3-D optical profilometry at micron scale with multi-frequency fringe projection using modified fibre optic Lloyd's mirror

technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 105: 14-26.

- [2] Heist S, Zhang C, Reichwald K, et al. 5D hyperspectral imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23366-23379.
- [3] Das A J, Valdez T A, Vargas J A, et al. Volume estimation of tonsil phantoms using an oral camera with 3D imaging[J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(4): 1445-1457.
- [4] 李朋超, 王金涛, 宋吉来, 等. 基于线结构光扫描的复杂曲面焊缝检测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0312005.
Li P C, Wang J T, Song J L, et al. Weld recognition of complex curved surface based on linear structured light scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0312005.
- [5] Juarez-Salazar R, Martinez-Laguna J, Diaz-Ramirez V H. Multi-demodulation phase-shifting and intensity pattern projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106085.
- [6] 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512001.
Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on gray code and phase-shifting algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512001.
- [7] 王潇, 刘育梁, 李丽艳. 光栅结构光系统测量误差与拟

- 合精度研究[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604004.
- Wang X, Liu Y L, Li L Y. Measurement error and fitting accuracy of fringe structured light system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604004.
- [8] Wang F Y. An efficient coordinate frame calibration method for 3-D measurement by multiple camera systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2005, 35(4): 453-464.
- [9] Falcão G, Hurtós N, Massich J. Plane-based calibration of a projector-camera system[R]. New York: VIBOT Master, 2008.
- [10] Lu J, Mo R, Sun H B, et al. Flexible calibration of phase-to-height conversion in fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6381-6388.
- [11] Anwar H. Calibrating projector flexibly for a real-time active 3D scanning system[J]. Optik, 2018, 158: 1088-1094.
- [12] Zhu Z M, Wang X Y, Liu Q X, et al. Camera calibration method based on optimal polarization angle[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 128-135.
- [13] Yang S R, Liu M, Song J H, et al. Projector calibration method based on stereo vision system[J]. Optical Review, 2017, 24(6): 727-733.
- [14] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- [15] 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.
- Li Z W, Shi Y S, Zhong K, et al. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3061-3065.
- [16] 冀红彬, 张慧博, 范京京, 等. 单周期条纹双四步相移投影仪的标定方法[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 0105003.
- Ji H B, Zhang H B, Fan J J, et al. Projector calibration method with single period fringe and double four-step phase shifting[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(1): 0105003.
- [17] Xing S, Guo H W. Iterative calibration method for measurement system having lens distortions in fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1177-1196.
- [18] Huang Z R, Xi J T, Yu Y G, et al. Accurate projector calibration based on a new point-to-point mapping relationship between the camera and projector images[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 347-356.
- [19] He D, Liu X L, Peng X, et al. Eccentricity error identification and compensation for high-accuracy 3D optical measurement[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(7): 075402.
- [20] Zhang W, Li W S, Yu L D, et al. Sub-pixel projector calibration method for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 19158-19169.
- [21] 邢德奎, 达飞鹏, 张虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2593-2598.
- Xing D K, Da F P, Zhang H. Research and application of locating of circular target with high accuracy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12): 2593-2598.