

单目激光散斑投影系统的外参数标定方法

蒋卓灿^{1,2}, 张跃强^{1,2*}, 胡彪^{1,2}, 刘肖琳^{1,2}, 于起峰^{1,2}¹深圳大学智能光测研究院, 广东 深圳 518000;²深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518000

摘要 由于缺少可参考的散斑图案,单目激光散斑投影系统需要借助精密的测距仪器,提前拍摄不同标准距离处的散斑图像,测量效率较低,且无法在线校正系统的光轴偏移。针对上述问题,提出一种基于单目激光散斑投影系统的外参数标定方法,可将单目激光散斑投影系统等效于带有散斑图像的双目立体视觉系统。通过调整标定板的位姿,计算同名散斑点的空间三维坐标,解算红外相机与激光散斑投射器之间的位姿关系,并对其进行迭代优化,生成投射器的虚拟散斑图像。实验结果表明,所提方法的位移测量误差低于 0.16 mm,标准球的半径测量误差低于 0.13 mm,且在一定的深度范围内,深度重建结果明显优于 Astra-Pro 的探测结果。所提方法可有效提高单目激光散斑投影系统的标定效率和深度重建精度。

关键词 机器视觉; 单目激光散斑投影系统; 外参数标定; 迭代优化

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221451

1 引言

随着图像处理技术的快速发展和传感器精度的不断提高,深度测量技术已被广泛应用于各个领域,如三维重建^[1]、工业检测^[2]、人机交互^[3]和医学成像^[4]等。目前,主流的深度测量技术主要基于飞行时间(ToF)、双目立体视觉和结构光三类方法实现。ToF方法通过计算调制光的ToF或相位变化来获得目标的深度信息^[5]。与ToF方法不同,双目立体视觉方法通过匹配两个不同空间位置处拍摄得到的图像对来获得待测目标的视差图^[6]。然而,在缺乏纹理信息或环境亮暗变换明显的场景中,双目立体视觉方法容易出现特征匹配失败的情况^[7]。针对双目立体视觉方法的匹配难题,结构光方法利用投影仪主动投影编码或伪随机图案,为无纹理区域赋予了丰富的特征信息,极大提高了特征匹配精度和深度测量精度^[8]。传统的结构光系统仍然具有一些难以避免的缺陷,例如:正弦条纹结构光需要投影序列图案,无法动态测量^[9-10];灰度条纹或彩色编码结构光对环境光以及目标表面颜色敏感^[11-13]等。

为了克服上述传统结构光系统的缺陷,研究者们发明了激光散斑投影系统^[14-16]。该系统主要由激光散斑投射器和红外相机组成。激光散斑投射器利用衍射光学元件(DOE)来生成随机散斑图案,可提供更大的

景深和亮度控制范围,并易于实现硬件小型化^[17]。采用红外相机拍摄目标散斑图像,很大程度上降低了环境光的影响。同时,基于散斑图案的高度随机性,激光散斑投影系统的测量时间理论上可缩短至单次曝光时间^[18]。然而,大多数现有的激光散斑投影系统的测量误差均大于 1 mm,这是因为这些系统无法在图像中准确定位散斑点,且较难实现散斑图像间的像素级对应精度^[14]。

目前激光散斑投影系统已受到广泛关注,主要分为双目散斑系统和单目散斑系统。双目散斑系统可以等效于带有散斑图案的双目立体视觉系统^[19]。随机散斑图案能够赋予无纹理区域丰富的特征信息,这弥补了双目立体视觉系统的传统缺陷^[20-21],极大提高了其适用性,但双目散斑系统的设备成本较高,系统标定流程较为复杂。单目散斑系统仅包含一个红外相机,设备成本较低,便携性强,易于小型化^[22]。目前,市面上已有许多基于单目激光散斑投影系统的消费级深度相机,例如微软 Kinect V1、英特尔 RealSense R200、奥比中光 Astra-Pro 和 iPhone-X 等^[14,23-24]。由于激光散斑投射器缺少可参考的散斑图像,而且随着投射器与待测目标之间距离的增加,散斑图案会发生不同程度的变形^[25]。因此,单目激光散斑系统通常需要借助高精度的测距仪器,提前拍摄不同标准距离处的散斑图像^[26],以便与目标散斑图像进行匹配,这使得单目激光散斑

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-08-29; 网络首发日期: 2022-09-09

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511102)、国家自然科学基金(12002215)、中国博士后科学基金(2022T150437)

通信作者: *yueqiang.zhang@szu.edu.cn

投影系统的标定效率低,且深度测量误差较大。

基于单目激光散斑投影系统,本文提出一种外参数标定方法。首先,通过变换标定板的位姿状态,拟合激光散斑投射器的光心和光轴位置,并构建合适的投射器坐标系。然后,解算单目激光散斑投影系统的位姿关系,并对其进行迭代优化,从而得到相机图像和投射器虚拟图像之间的平面单应关系,生成激光散斑投射器的虚拟散斑图像。在所提方法中,单目激光散斑投影系统可等效于带有散斑图案的双目立体视觉系统,通过匹配投射器虚拟图像和相机散斑图像,即可解算得到目标的深度信息。在此基础上,解算同名散斑点集的反投影误差,设计平板位移实验和标准

球三维重建实验,并与奥比中光的 Astra-Pro 深度传感器探测结果进行对比,以验证所提方法的可行性和测量精度。

2 单目激光散斑投影系统标定

若要生成激光散斑投射器的虚拟散斑图像,需要标定红外相机和激光散斑投射器之间的位姿关系,即旋转矩阵 R 和平移向量 T ,并构建相机图像和投射器虚拟图像之间的平面单应关系。所提出的单目激光散斑投影系统标定流程如图 1 所示:首先,拟合激光散斑投射器的光心和光轴位置;然后,解算单目激光散斑投影系统的初始位姿关系;最后,进行迭代优化。

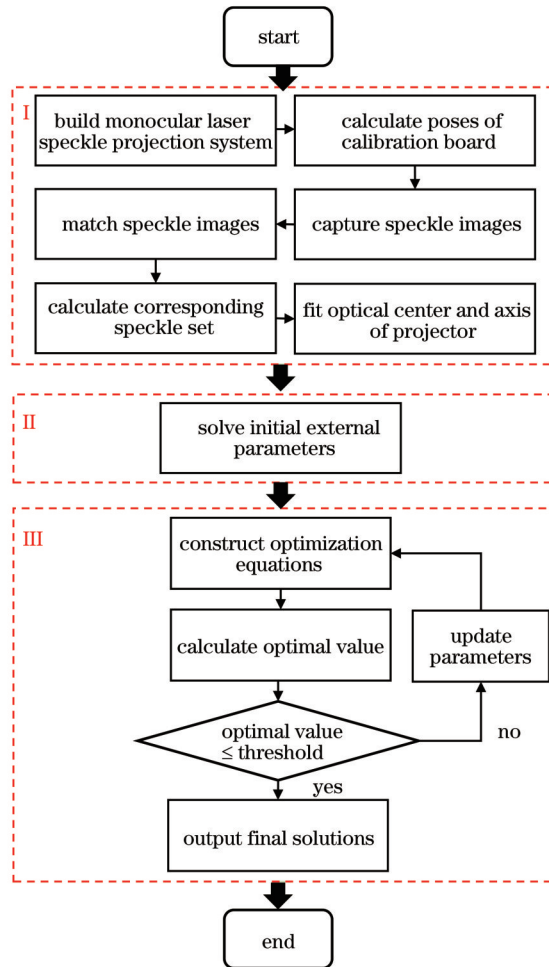


图 1 所提方法的标定流程图

Fig. 1 Flow chart of calibration for proposed method

2.1 激光散斑投射器标定

2.1.1 标定板位姿标定

在拟合激光散斑投射器的光心和光轴前,需要解算同名散斑点的三维坐标,而前提是求解标定板的空间平面方程。为实现上述目的,设计了一种带有对角标志的标定板。如图 2 所示,在标定板的 4 个角落上,各布置一个大小合适的对角标志,由它们中心点连线构成的图形严格满足矩阵特征。同时,它们仅占用标

定板边缘的部分区域,为散斑图案留出了充足的投影空间。

接下来,在标定板上建立世界坐标系,以左上方的对角标志为坐标系原点, X 轴竖直向下经过左下方的对角标志, Y 轴水平向右经过右上方的对角标志, Z 轴垂直标定板向外。由于对角标志之间的绝对物理距离已知,对角标志在世界坐标系中的三维坐标已知。根据 Harris 等^[27]提出的角点检测算法,提取标定板图像

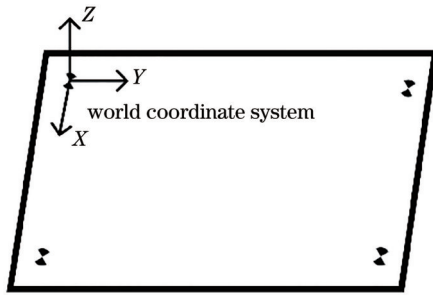


图 2 标定板示意图

Fig. 2 Schematic of calibration board

中对角标志的亚像素坐标。设对角标志在世界坐标系中的三维坐标为 $(X_w, Y_w, 0)$, 图像像点坐标为 (u, v) , 两者的关系可表示为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K_c [R_{3 \times 2}, T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: K_c 为相机 C 的内参数矩阵; s 为深度比例因子。旋转矩阵 R 和平移向量 T 描述了世界坐标系和相机坐标系之间的位姿关系。由于标定板与世界坐标系 $Z=0$ 平面重合, 对角标志的 Z_w 值始终为 0, 因此 $R_{3 \times 2}$ 仅包含旋转矩阵 R 中的前两列。由式(1)可知, 外参数矩阵的自由度为 8, 而每个对角标志可以列出两个方程, 利用 PnP 算法可解算出 R 和 T 。

基于上述解算结果, 计算对角标志在相机坐标系中的空间三维坐标, 并利用最小二乘法拟合标定板的平面方程。

2.1.2 同名散斑点集解算

根据标定板的平面方程, 可解算同名散斑点的空间三维坐标。首先, 不断调整标定板的位姿状态, 同步控制激光散斑投射器 P 将散斑图案投影至标定板表面, 并利用红外相机拍摄相应的散斑图像。然后, 采用数字图像相关法 (DIC)^[28-30] 匹配散斑图像, 得到同名散斑像点集。最后, 将散斑像点反投影至对应位姿的标定板上, 解算散斑像点的三维投影坐标。设散斑像点的坐标为 (u, v) , 在相机坐标系中的三维坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) 。根据相机成像模型, 两者的关系可以描述为

$$\begin{cases} X_c = (u - a_x) d_x \\ Y_c = (v - a_y) d_y \\ Z_c = f \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (a_x, a_y) 为图像主点坐标; d_x 和 d_y 分别为图像像元的横、纵向尺寸; f 为相机焦距。上述参数已在相机标定流程中得到, 在此不作赘述。

在无失真的中心透视投影模型中, 进入相机的光线会通过相机光心。在对散斑图像去畸变后, 相机成像模型可以等效为理想针孔模型。此时, 散斑像点对应的入射光线 l 在相机坐标系中的线性方程为

$$\frac{X_l}{(u - a_x) d_x} = \frac{Y_l}{(v - a_y) d_y} = \frac{Z_l}{f}. \quad (3)$$

将式(3)代入标定板的平面方程中, 可得到入射光线与标定板的交点坐标。需要说明的是, 该交点不仅是相机散斑像点的反投影点, 也是激光散斑投射器在标定板上的散斑投影点。遵循上述流程, 即可得到不同位姿标定板上的同名散斑点集。

2.1.3 投射器光心和光轴拟合

在标准的激光散斑投射器中, 激光器光轴严格垂直于衍射光栅, 并通过衍射光栅的中心或其他固定位置。通常来说, 越靠近激光器的光轴位置, 激光光束的光强越强, 通过衍射光栅形成的散斑越亮。如图 3 所示, 在投影的散斑图案中存在一个面积较大、亮度较强的圆形散斑 (圆圈内), 即激光器光心沿光轴方向的投影点。为确定投射器的光轴方向, 任意选择一张散斑图像, 提取该散斑投影点, 并将其反投影至标定板上。根据同名散斑点集, 获得投射器光心在不同位姿标定板上的同名三维坐标集。由于该同名点集位于投射器光轴上, 采用最小二乘法进行直线拟合, 即可得到投射器光轴在相机坐标系中的直线参数。

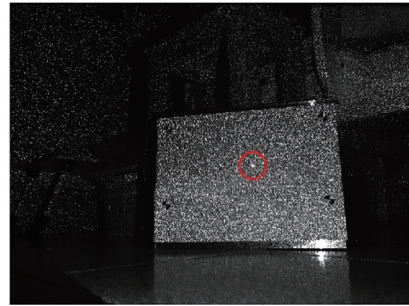


图 3 标定板散斑图像

Fig. 3 Speckle image of calibration board

在理想情况下, 由每一组同名散斑点集拟合得到的直线都对对应着一条从激光散斑投射器出射的光线, 且相交于激光散斑投射器的光心, 如图 4 所示。受到相机标定误差、散斑匹配误差、平面拟合误差等因素影响, 拟合直线可能不会直接通过投射器光心, 而是分布在其附近区域。

设激光散斑投射器光心 O_p 在相机坐标系中的三维坐标为 $(X_{O_p}, Y_{O_p}, Z_{O_p})$, 由同名散斑点集拟合而成的直线为 L 。由于拟合直线集分布在散斑投射器的光心附近, 计算距离拟合直线集最近的空间点作为投射器光心, 即

$$\{X_{O_p}, Y_{O_p}, Z_{O_p}\} = \min \sum_{i=1}^n d(O_p, L_i), \quad (4)$$

式中: $d(O_p, L_i)$ 为光心 O_p 到第 i 条拟合直线的垂直距离; n 为拟合直线总数。

2.2 初始位姿解算

根据 2.1 节拟合得到的激光散斑投射器的光心和

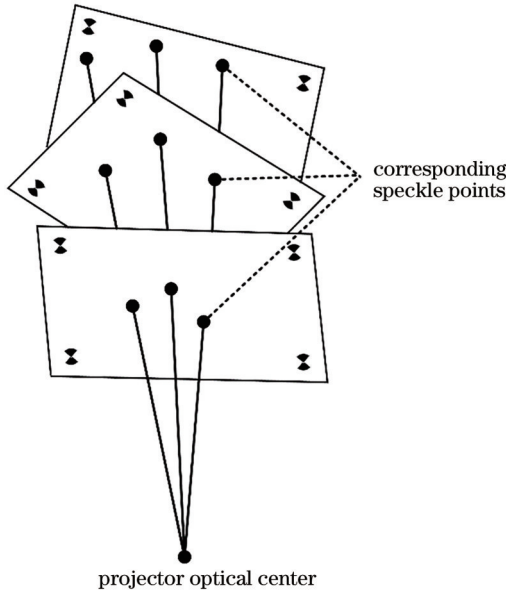


图 4 投射器光心拟合

Fig. 4 Fitting of the projector's optical center

光轴参数,构建投射器坐标系,并标定相机坐标系和投

射器坐标系之间的位姿关系,即旋转矩阵 R 和平移向量 T 。当红外相机和激光散斑投射器的相对位置固定,且存在固定位姿的标定板作为约束条件时,由同名散斑像点集解算得到的投射器散斑直线集的空间物理位置固定不变。因此,当投射器坐标系的原点固定时,由不同坐标轴方向决定的虚拟像面是相互等效的,不影响深度信息重建。为了使散斑图案尽可能地分布在激光散斑投射器的有限虚拟图像中,投射器坐标系以投射器光心为原点, z 轴与激光器光轴重合,并将指向待测目标方向作为 z 轴的正方向。

设投射器光轴在相机坐标系中的归一化方向向量为 $V_c = [v_x, v_y, v_z]^T$,在投射器坐标系中则为 $V_p = [0, 0, 1]^T$,两者的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = R(A_x, A_y, A_z) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: A_x 、 A_y 和 A_z 为旋转矩阵的欧拉角。

为简化计算,将式(5)转换为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = R_z(A_z) R_y(A_y) R_x(A_x) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_x & \sin A_x \\ 0 & -\sin A_x & \cos A_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_y & 0 & -\sin A_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_y & 0 & \cos A_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_z & \sin A_z & 0 \\ -\sin A_z & \cos A_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\sin A_y \\ \sin A_x \cos A_y \\ \cos A_x \cos A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

需要说明的是,上述欧拉角采用的是 $x \rightarrow y \rightarrow z$ 的旋转顺序,但其他旋转顺序也可以被采用,不影响旋转矩阵 R 的求解。

根据式(6),可解算出 A_x 和 A_y ,即

$$\begin{cases} A_x = \arctan \frac{v_y}{v_z} \\ A_y = \arctan \left(-\frac{v_x \sin A_x}{2v_z} - \frac{v_x \cos A_x}{2v_z} \right) \end{cases} \quad (7)$$

欧拉角 A_z 决定了投射器坐标系的 x 和 y 轴方向,这将影响散斑点在投射器虚拟图像上的像素坐标。因此,需要选择一个合适的 A_z 值,让散斑图案能够分布在虚拟图像的中心区域,便于后续目标散斑图像与虚拟图像的散斑匹配。根据解算得到的欧拉角,即可得到旋转矩阵 R 。

设投射器光心在相机坐标系中的坐标为 $T_c = [x_c, y_c, z_c]^T$,在投射器坐标系中则为 $T_p = [0, 0, 0]^T$,两者的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + T, \quad (8)$$

式中:旋转矩阵 R 和平移向量 T 描述了相机坐标系到投射器坐标系的位姿转换关系。

根据式(8),可计算出平移向量 T ,即

$$T = -R \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = -RT_c. \quad (9)$$

2.3 迭代优化

受到相机标定误差、散斑匹配误差、平面拟合误差等因素影响,解算得到的单目激光散斑投影系统的外参数(旋转矩阵 R 和平移向量 T)和虚拟散斑像点坐标存在一定误差,这无疑将影响后续虚拟图像的重建精度以及深度测量精度。因此,需要对单目激光散斑投影系统的上述参数进行优化。

设散斑点在相机坐标系中的坐标为 $P^{(1)}$,在投射器坐标系中则为 $P^{(2)}$,两者的关系可以表示为

$$P^{(2)} = RP^{(1)} + T. \quad (10)$$

由于激光散斑投射器将散斑图案投影至标定板上,且标定板的平面方程已知, $P^{(1)}$ 满足

$$n^T P^{(1)} = d, \quad (11)$$

式中: n 为标定板的归一化法向量; d 为相机坐标系原点到标定板的垂直距离。

将式(11)代入式(10),可得:

$$(Rn)^T P^{(2)} = d + n^T R^T T. \quad (12)$$

令 $n' = Rn$, $d' = d + n^T R^T T$, 式(12)可转化为

$$n'^T P^{(2)} = d'. \quad (13)$$

结合式(10)和(13),可以得到投射器虚拟图像与相机图像的变换关系,即

$$\bar{p}^{(1)} = \lambda \left(R' + T' n'^T \right) \bar{p}^{(2)}, \quad (14)$$

式中: $R' = R^T$, $T' = -R^T T$, $n' = Rn = R'^T n$, $d' = d + n^T R^T T = d - n^T T'$, $\bar{p}^{(1)} = K_C^{-1} P^{(1)}$, $\bar{p}^{(2)} = K_P^{-1} P^{(2)}$; K_C 和 K_P 分别为相机与激光散斑投射器的内参数矩阵,且 $K_P = K_C$ 。

根据式(14),构建如下优化方程

$$\left\{ R', T', \left\{ \bar{p}_i^{(2)} \right\}_{i=1}^N \right\} =$$

$$\operatorname{argmin} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N e(i, j) \left\| \lambda_{i,j} \left(R' + T' n'^T \right) \bar{p}_i^{(2)} - \bar{p}_i^{(1)} \right\|^2, \quad (15)$$

式中: M 、 N 分别为标定板的位姿总数和虚拟图像的散斑点数;参数 i 为散斑点序号;参数 j 为标定板的位姿序号。当标定板处于第 j 种位姿时,如果第 i 个散斑点能够被相机捕获,则 $e(i, j)$ 等于 1, 否则为 0。式(15)总共包含 $(2N + 6)$ 个待优化变量,分别为旋转矩阵 R' 的 3 个欧拉角、平移向量 T' 的 3 个平移向量因子,以及 N 个虚拟图像散斑像点坐标 $\left\{ \bar{p}_i^{(2)} \right\}_{i=1}^N$ 。

$$\text{令 } s_{i,j} = e(i, j) \left[\lambda_{i,j} \left(R' + T' n'^T \right) \bar{p}_i^{(2)} - \bar{p}_i^{(1)} \right], \quad \text{式}$$

(15)可转化为

$$\left\{ R', T', \left\{ \bar{p}_i^{(2)} \right\}_{i=1}^N \right\} = \operatorname{argmin} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \| s_{i,j} \|^2. \quad (16)$$

针对第 j 种位姿的标定板,以及投射器虚拟图像的第 i 个散斑像点,可得

$$\frac{dM_j}{dT'} = \frac{dM_j}{dT'_1} + \frac{dM_j}{dT'_2} = \frac{dM_j}{dT'_1} + \frac{dM_j}{d\bar{n}'_j} \frac{d\bar{n}'_j}{dT'_2} = \begin{bmatrix} \bar{n}'_j & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & \bar{n}'_j & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & \bar{n}'_j \end{bmatrix} + \frac{1}{d'} \begin{bmatrix} T'_x \bar{n}'_j n_j^T \\ T'_y \bar{n}'_j n_j^T \\ T'_z \bar{n}'_j n_j^T \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\frac{d\bar{p}_{i,j}}{d\bar{p}_i^{(2)}} = M_j. \quad (27)$$

$$J_{i,j}^{(T_r)} = \frac{ds_{i,j}}{dT_r} = \left[\left(\frac{ds_{i,j}}{dr} \right)^T, \left(\frac{ds_{i,j}}{dT'} \right)^T \right]^T, \quad (17)$$

$$J_{i,j}^{(p_i)} = \frac{ds_{i,j}}{d\bar{p}_i^{(2)}}, \quad (18)$$

式中: $J_{i,j}^{(T_r)}$ 和 $J_{i,j}^{(p_i)}$ 分别表示优化 T_r 和散斑像点坐标的雅可比矩阵; T_r 包含了待优化的旋转矩阵 R' 和 平移向量 T' ; r 为旋转矩阵 R' 对应的欧拉角向量。

$$\text{令 } p_{i,j} = \left(R' + T' n'^T \right) \bar{p}_i^{(2)} = M_j \bar{p}_i^{(2)} = \begin{bmatrix} p_{i,j}^{(x)} \\ p_{i,j}^{(y)} \\ p_{i,j}^{(z)} \end{bmatrix}, M_j =$$

$\left(R' + T' n'^T \right)$, 式(17)和(18)可转化为

$$\frac{ds_{i,j}}{dr} = \frac{ds_{i,j}}{dp_{i,j}} \frac{dp_{i,j}}{dM_j} \frac{dM_j}{dR'} \frac{dR'}{dr}, \quad (19)$$

$$\frac{ds_{i,j}}{dT'} = \frac{ds_{i,j}}{dp_{i,j}} \frac{dp_{i,j}}{dM_j} \frac{dM_j}{dT'}, \quad (20)$$

$$\frac{ds_{i,j}}{d\bar{p}_i^{(2)}} = \frac{ds_{i,j}}{dp_{i,j}} \frac{dp_{i,j}}{d\bar{p}_i^{(2)}}. \quad (21)$$

分别对上述公式进行推导,可得

$$\frac{ds_{i,j}}{dp_{i,j}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{p_{i,j}^{(x)}}{(p_{i,j}^{(z)})^2} \\ \frac{p_{i,j}^{(z)}}{(p_{i,j}^{(z)})^2} & 1 & -\frac{p_{i,j}^{(y)}}{(p_{i,j}^{(z)})^2} \\ 0 & \frac{p_{i,j}^{(z)}}{(p_{i,j}^{(z)})^2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\frac{dp_{i,j}}{dM_j} = \begin{bmatrix} \left(\bar{p}_i^{(2)} \right)^T & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{1 \times 3} & \left(\bar{p}_i^{(2)} \right)^T & 0_{1 \times 3} \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & \left(\bar{p}_i^{(2)} \right)^T \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\frac{dM_j}{dR'} = I_{9 \times 9} + \frac{dM_j}{d\bar{n}'_j} \frac{d\bar{n}'_j}{dR'}, \quad (24)$$

式中: I 为单位矩阵。令 $m = n/d'$, 式(24)可以转换为

$$\frac{dM_j}{dR'} = I_{9 \times 9} + \begin{bmatrix} T'_x I_{3 \times 3} \\ T'_y I_{3 \times 3} \\ T'_z I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x I_{3 \times 3} & m_y I_{3 \times 3} & m_z I_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

矩阵,即

$$J = \begin{bmatrix} J_{1,1}^{(T_r)} & J_{1,1}^{(p_1)} & \cdots & 0_{2 \times 2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{N,1}^{(T_r)} & 0_{2 \times 2} & \cdots & J_{N,1}^{(p_N)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{1,M}^{(T_r)} & J_{1,M}^{(p_1)} & \cdots & 0_{2 \times 2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{N,M}^{(T_r)} & 0_{2 \times 2} & \cdots & J_{N,M}^{(p_N)} \end{bmatrix}_{(2 \times M \times N) \times (6 + 2 \times N)} \quad (28)$$

根据式(28),可构建如下迭代优化方程,即

$$Jx = b, \quad (29)$$

式中: $b = \begin{bmatrix} s_{0,0} \\ \vdots \\ s_{N,M} \end{bmatrix}$, $x = \begin{bmatrix} \Delta T_r \\ \Delta p_1^{(-2)} \\ \vdots \\ \Delta p_N^{(-2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{T_r} \\ x_p \end{bmatrix}$ 。需要说明的是,

x 是由待优化参数 $\left\{ R', T', \left\{ p_i^{(-2)} \right\}_{i=1}^N \right\}$ 的优化差值所组成的向量。

根据前两节得到的初始参数值构建初始优化方程组,求解初始优化差值 x_{T_r} 和 x_p ,对 R' 、 T' 和 $\left\{ p_i^{(-2)} \right\}_{i=1}^N$ 进行第一次修正,得到初始优化解。不断重复上述流程,对待优化参数进行迭代优化,直至解算出的优化差值小于限定值,迭代收敛为止。

3 实验与精度验证

为验证所提方法的可行性和测量精度,构建了单目散斑投影系统。如图 5 所示,该系统包含一台 ANHUA DLP4710 散斑投射器(分辨率为 1980 pixel×1080 pixel)和一台 MindVision MV-SUA134GM 相机(分辨率为 1280 pixel×1024 pixel)。

在实验过程中,控制投射器将具有高度随机性的散斑图案投影至不同位姿的标定板上,利用相机同步采集散斑图像。遵循图 1 所示的标定流程,解算单目散斑投影系统的位姿关系,即旋转矩阵 R 和平移向量 T ,并对其进行迭代优化。根据单目散斑投影系统的外参数以及标定板的平面方程,构建相机图像与投射器虚拟图像的平面单应关系,从而将相机散斑图像转换为投射器的虚拟散斑图像。

在标定过程中,可以得到不同位姿标定板上的同名散斑点集。根据旋转矩阵 R 和平移向量 T ,将其反投影至投射器的虚拟像面上,计算各组同名像点集的平均偏移误差。实验结果表明:平均偏移误差在 0.10~0.18 pixel 范围内,这说明同名散斑点与投射器虚拟像面上的反投影点基本重合,初步验证了旋转矩阵 R 和平移向量 T 的标定精度。

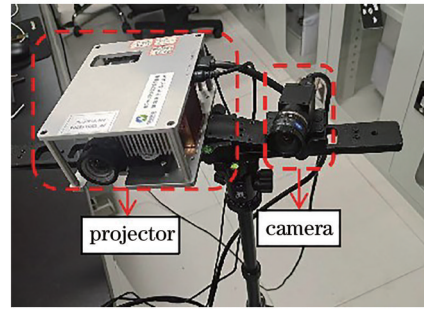


图 5 实验装置

Fig. 5 Experiment system

3.1 平板位移实验

由于所提方法能够重建出投射器的虚拟散斑图像,因此不需要借助精准的测距仪器提前拍摄不同距离处的散斑图像,而是通过匹配目标散斑图像和投射器虚拟图像,获取待测目标的深度信息。首先,使用单目散斑投影系统对平板进行深度信息重建。如图 6 所示,平板的深度重建模型表面光滑,且深度分布平滑。然后,将平板固定于二维精密位移台上,手动控制平板位移,对比解算出的实际位移量和位移真值。为了避免偶然性,共进行 14 组位移实验,位移分布在 2~9 mm 范围内。如图 7 所示,位移实测曲线与真值曲线基本重合,绝对位移误差分布在 0.01~0.16 mm 范围内,均方根(RMS)误差为 0.10 mm。

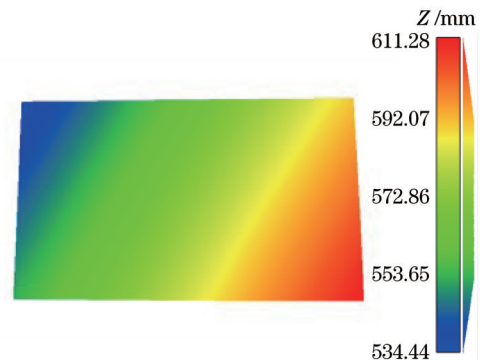


图 6 平板深度重建图

Fig. 6 Depth map of the planar board

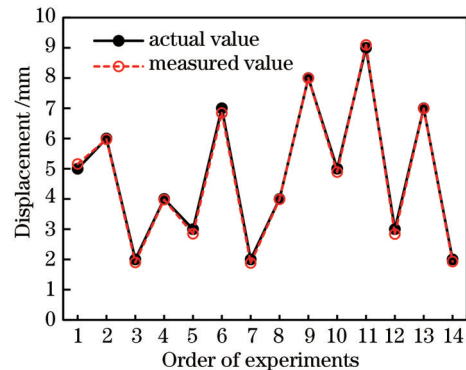


图 7 平板位移测量结果

Fig. 7 Displacement measurement results of the planar board

3.2 标准球三维重建实验

接下来,对形状参数已知的标准球进行三维重建。图 8 展示了两个相互固连的标准球的相机散斑图像。通过匹配投射器的虚拟散斑图像与标准球散斑图像,解算得到标准球的三维点云信息,并构建其三维模型。图 9 所示为图 8 右边标准球的三维模型。如表 1 所示,两个标准球的半径测量误差分别为 0.0916 mm 和 0.1274 mm, RMS 误差分别为 0.1182 mm 和 0.1346 mm。以上两组实验说明:所提方法能够有效准确地标定单目散斑投影系统的位姿关系,深度测量精度能够达到 0.1 mm 量级。



图 8 标准球散斑图像
Fig. 8 Speckle image of standard spheres

3.3 Astra-Pro 深度重建对比实验

为进一步验证所提方法的测量精度,采用奥比中光的 Astra-Pro 深度传感器进行测试。该系统由激光散斑投射器与红外相机组成,其中红外相机分辨率为 640 pixel × 480 pixel。在出厂前, Astra-Pro 利用精密的测距仪器提前采集了不同标准距离处的散斑图像。在实际测量中,通过匹配存储的散斑图像集与待测目

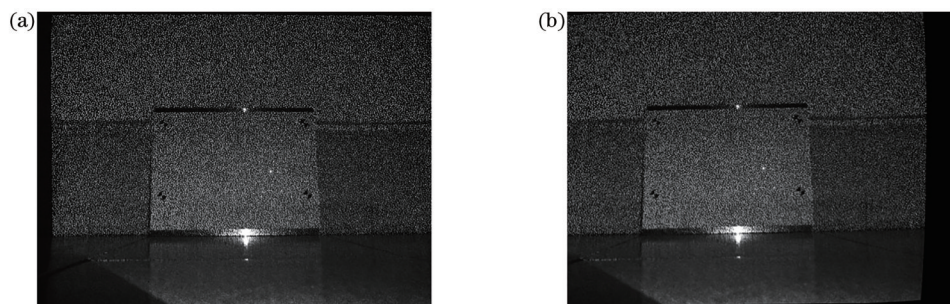


图 10 第 5 组实验图像。(a) 相机散斑图像;(b) 投射器虚拟散斑图像
Fig. 10 Experimental images of the fifth group. (a) Speckle image of camera; (b) virtual speckle image of projector

标,对由规则物体组合而成的目标进行三维重建,并与 Astra-Pro 的重建模型比较,重建结果如图 11 (c)、(d)所示。需要说明的是,色度条右侧为深度方向上的点云密度分布情况。从彩色深度图可以看出,相比于 Astra-Pro 探测结果呈现出的不规则波纹状变化,所提方法重建出的目标模型深度变化平滑,与测量目标的平面形状更加贴合。另外,从点云密度分布情况可以看出,所提方法重建的点云密度更大,且深度分布

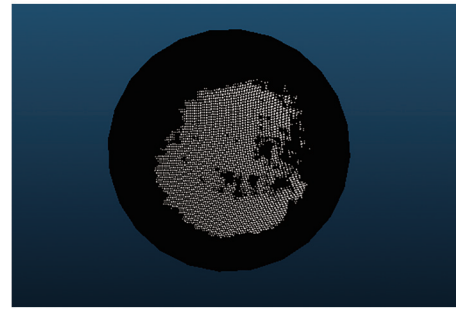


图 9 图 8 中右边球体的三维模型
Fig. 9 3D model of the right sphere in Fig. 8

表 1 图 8 中标准球半径测量数据及误差
Table 1 Radius measurement data and error of standard spheres in Fig. 8

Standard sphere	Actual radius / mm	Measured radius / mm	Absolute error / mm	RMS / mm
Right sphere	28.5625	28.6541	0.0916	0.1182
Left sphere	28.5625	28.6899	0.1274	0.1346

标的散斑图像,获得待测目标的深度信息。所提方法通过标定 Astra-Pro 的外参数,即旋转矩阵 R 和平移向量 T ,重建出激光散斑投射器的虚拟散斑图像,不需要利用上述标准距离处的散斑图像集。首先,进行 6 组平板拟合实验,测量范围为 495~650 mm。图 10 展示了第 5 组实验图像,分别是红外相机拍摄的散斑图像和重建的投射器虚拟散斑图像。如表 2 所示,在两种方法的拟合平面基本重合的情况下,不管是平均偏离误差,还是深度分布范围,所提方法的深度重建结果均明显优于 Astra-Pro 的探测结果。

更加均匀平滑。综上所述,所提方法的深度重建效果明显优于 Astra-Pro 的探测效果。

4 结 论

提出一种简便高效的单目激光散斑投影系统外参数标定方法。通过调整标定板的位姿,计算同名散斑点的三维坐标,解算红外相机与激光散斑投射器的位姿关系,并对其进行迭代优化,从而生成投射器的虚拟

表 2 Astro-Pro 与所提方法的对比
Table 2 Comparison between Astra-Pro and proposed method

Order of experiments	Astra-Pro		Proposed method		Measured error of fitting planes /mm
	Average error / mm	Depth distribution range /mm	Average error /mm	Depth distribution range /mm	
1	0.7170	4.7911	0.0242	0.2339	0.171
2	0.1545	5.0302	0.0265	0.2530	0.053
3	0.7090	4.9108	0.0297	0.2860	0.126
4	0.5955	4.6101	0.0333	0.3166	0.165
5	0.5433	4.3169	0.0379	0.3648	0.230
6	0.6156	5.2444	0.0415	0.4035	0.215

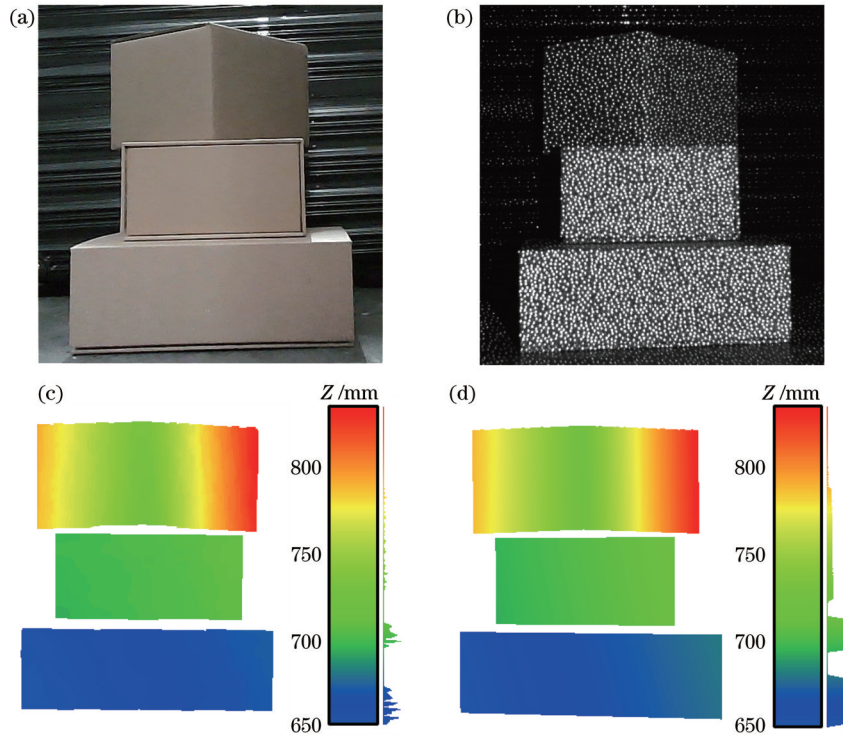


图 11 待测物体及其三维重建结果。(a)彩色图像;(b)散斑图像;(c) Astra-Pro 的重建结果;(d)所提方法的重建结果
Fig. 11 Test object and its 3D reconstruction results. (a) Color image; (b) speckle image; (c) reconstruction result of Astra-Pro; (d) reconstruction result of proposed method

散斑图像。所提方法通过变换标定板的位姿状态,即可完成单目激光散斑投影系统的标定,显著提高了标定效率,并降低了标定成本。通过重建出投射器的虚拟散斑图像,单目激光散斑投影系统可等效于带有散斑图像的双目立体视觉系统,有效提高了测量精度。如果设备长时间使用导致测量精度下降,用户可重新对该单目激光散斑系统进行外参数的快速标定,无需返厂标定。实验结果表明,平板位移测量误差分布在 0.01~0.16 mm 范围内,标准球的半径测量误差小于 0.13 mm,且在一定深度范围内,深度测量结果明显优于 Astra-Pro 的探测结果。可见,所提方法能够高效准确地标定单目激光散斑投影系统的外参数,并生成投射器的虚拟散斑图像,具有标定成本低、标定效率高、深度重建精度较高等优势,应用前景良好。

参 考 文 献

- [1] Izadi S, Kim D, Hilliges O, et al. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera[C]// UIST '11: Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, October 16-19, 2011, Santa Barbara, CA, USA. New York: ACM Press, 2011: 559-568.
- [2] Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(6): 558-569.
- [3] Shotton J, Fitzgibbon A, Cook M, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images[C]//CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1297-1304.
- [4] Ackerman J D, Keller K, Fuchs H. Surface reconstruction of abdominal organs using laparoscopic structured light for augmented reality[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4661: 39-46.
- [5] Foix S, Alenya G, Torras C. Lock-in time-of-flight (ToF)

- cameras: a survey[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1917-1926.
- [6] Murray D, Jennings C. Stereo vision based mapping and navigation for mobile robots[C]//*Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, April 25, 1997, Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE Press, 1997: 1694-1699.
- [7] Kanade T, Yoshida A, Oda K, et al. A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications[C]//*Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 18-20, 1996, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 1996: 196-202.
- [8] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 18-31.
- [9] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 123601.
- [10] 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.
- [11] 杨帆, 丁晓剑, 曹杰. 基于彩色结构光的自由曲面三维重建方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212001.
- Yang F, Ding X J, Cao J. 3D reconstruction of free-form surface based on color structured light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212001.
- [12] Liu J B, Yu X G, Yang K, et al. Automatic calibration method for the full parameter of a camera-projector system[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(8): 084105.
- [13] Huang B Y, Tang Y, Ozdemir S, et al. A fast and flexible projector-camera calibration system[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, 18(3): 1049-1063.
- [14] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [15] Schaffer M, Grosse M, Harendt B, et al. High-speed three-dimensional shape measurements of objects with laser speckles and acousto-optical deflection[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3097-3099.
- [16] Stark A, Wong E, Weigel D, et al. Repeatable speckle projector for single-camera three-dimensional measurement[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(12): 120501.
- [17] Etchepareborda P, Moulet M H, Melon M. Random laser speckle pattern projection for non-contact vibration measurements using a single high-speed camera[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 158: 107719.
- [18] Dekiff M, Berssenbrügge P, Kemper B, et al. Three-dimensional data acquisition by digital correlation of projected speckle patterns[J]. *Applied Physics B*, 2010, 99(3): 449-456.
- [19] 周佩, 朱江平, 孔令寅, 等. 基于旋转散斑结构光投影的三维人脸采集[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0415019.
- Zhou P, Zhu J P, Kong L Y, et al. Three-dimension face acquisition with rotating speckle structured light projection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0415019.
- [20] Yao H M, Ge C Y, Xue J R, et al. A high spatial resolution depth sensing method based on binocular structured light[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 805.
- [21] Schaffer M, Grosse M, Kowarschik R. High-speed pattern projection for three-dimensional shape measurement using laser speckles[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(18): 3622-3629.
- [22] 古家威, 谢小鹏, 曹一波, 等. 基于激光散斑的半稠密深度图获取算法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304004.
- Gu J W, Xie X P, Cao Y B, et al. A semi-dense depth map acquisition algorithm based on laser speckle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304004.
- [23] Fabian J, Young T, Jones J C P, et al. Integrating the microsoft Kinect with simulink: real-time object tracking example[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 249-257.
- [24] Pathirana P N, Li S Y, Trinh H M, et al. Robust real-time bio-kinematic movement tracking using multiple Kinects for tele-rehabilitation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(3): 1822-1833.
- [25] Landau M J, Choo B Y, Beling P A. Simulating Kinect infrared and depth images[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(12): 3018-3031.
- [26] Yao H M, Ge C Y, Hua G, et al. The VLSI implementation of a high-resolution depth-sensing SoC based on active structured light[J]. *Machine Vision and Applications*, 2015, 26(4): 533-548.
- [27] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C]//*Proceedings of the Alvey Vision Conference*, January 1, 1988, Manchester, UK. Amsterdam: Alvey Vision Club, 1988: 147-151.
- [28] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [29] Ackermann F. Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry[J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 11(64): 429-439.
- [30] Pan B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(8): 1535-1542.

A Calibration Method for Extrinsic Parameters of Monocular Laser Speckle Projection System

Jiang Zhuocan^{1,2}, Zhang Yueqiang^{1,2*}, Hu Biao^{1,2}, Liu Xiaolin^{1,2}, Yu Qifeng^{1,2}

¹*Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

²*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China*

Abstract

Objective Laser speckle projection systems have been widely used in various fields, including but not limited to three-dimensional (3D) reconstruction, industrial detection, and gesture recognition. According to the number of infrared cameras, laser speckle projection systems are generally divided into two categories: the binocular mode and the monocular mode. A binocular laser speckle projection system consists of a laser speckle projector and two infrared cameras. The feature information provided by random speckle patterns is sufficient to match images in textureless areas, which significantly improves the accuracy and stability of binocular stereo vision systems. Moreover, speckle patterns in the infrared spectrum minimize the impact of the ambient light. However, the cost of binocular laser speckle projection systems is typically high, and the calibration process is complex. Compared with their binocular counterparts, monocular laser speckle projection systems are more compact and cost-effective. Due to the lack of reference speckle patterns, monocular laser speckle projection systems generally use a precise range finder to capture speckle images at different standard distances in advance. The measurement process is complex, and the deviation of the optical axis cannot be corrected online. To solve the aforementioned problems, this paper proposes a calibration method for the extrinsic parameters of monocular laser speckle projection systems. The virtual speckle image of the projector is generated by calculating the pose relationship between the infrared camera and the laser speckle projector. Only a calibration board with corner features is required in the proposed calibration process, rather than the precise range finder. With this method, a monocular laser speckle projection system becomes equivalent to a binocular stereo vision system with speckle images.

Methods First, a simple calibration board with corner features is designed. These features only occupy a small part of the calibration board, which leaves sufficient area for the speckle pattern. The plane equation of the calibration board in the camera coordinate system is calculated by extracting the coordinates of corner features in the image. Then, the laser speckle projector projects a random speckle pattern to the calibration board in different poses, and the infrared camera captures speckle images. Next, the digital image correlation (DIC) method is utilized to determine the corresponding speckle points in different speckle images. According to the plane equations of the calibration board, those speckle points are projected to corresponding planes, whose 3D coordinates can be obtained in the camera coordinate system. The straight lines fitted by corresponding speckle points pass through the center of the laser transmitter in the projector, which is regarded as the optical center of the projector. Therefore, the optical center and axis of the projector in the camera coordinate system are estimated by fitting corresponding lines. Finally, the pose relationship between the camera and the projector is solved and optimized. The virtual speckle image of the projector is generated by constructing the equation of planar homography. Through the aforementioned process, a monocular laser speckle projection system can be equivalent to a binocular stereo vision system with speckle images.

Results and Discussions To verify the feasibility and accuracy of the proposed method, this paper establishes a monocular laser speckle projection system (Fig. 5). Firstly, the extrinsic parameters of the monocular laser speckle projection system are calibrated according to the aforementioned process. Then, the corresponding speckle points in the camera images are projected to the virtual imaging plane of the projector, and the offset error of corresponding points is calculated. The average offset errors mainly vary from 0.10 pixel to 0.18 pixel. The projection points of corresponding speckle points on the virtual imaging plane tend to be one point. The result shows that the calibration accuracy of the rotation matrix and the translation vector is high. Next, fourteen displacement experiments are further conducted in the range of 2–9 mm. The measured curve is basically consistent with the ideal curve (Fig. 7). The measurement errors of displacement are less than 0.16 mm. Furthermore, we conduct the 3D reconstruction experiment of standard spheres with known geometric parameters. The radius measurement errors of the two standard spheres are 0.0916 mm and 0.1274 mm, respectively. Their root-mean-square (RMS) errors are less than 0.1346 mm (Table 1). Finally, the ORBBEC's Astra-Pro is selected to demonstrate the depth measurement accuracy of the proposed method. Regardless of the average offset error or the depth distribution range, the plane reconstruction results of the proposed method are

significantly better than those of Astra-Pro (Table 2). Simultaneously, the depth variation of the target model reconstructed by the method is smoother, and its density of point cloud is larger (Fig. 11). Hence, it can be easily concluded that the proposed method is able to calibrate the monocular laser speckle projection system effectively and achieve high-precision depth measurement.

Conclusions In this paper, a simple and efficient calibration method for the extrinsic parameters of monocular laser speckle projection systems is proposed. The 3D coordinates of the corresponding speckle points are calculated by adjusting the pose of the calibration board. Then, the relationship between the infrared camera and the laser speckle projector is solved and optimized to generate the virtual speckle image of the projector. The pose relationship of the monocular laser speckle projection system can be easily calibrated with the help of a calibration board with corner features, which improves calibration efficiency and reduces calibration costs. Generating the virtual speckle images of the projector enables the monocular laser speckle projection system to be equivalent to a binocular stereo vision system with speckle images, which significantly improves depth measurement accuracy. Simultaneously, the deviation of the optical axis can be corrected online. The experimental results show that the measurement errors of displacement and sphere radii are less than 0.16 mm and 0.13 mm, respectively. Within a certain depth range, the reconstruction results of the proposed method are significantly better than those of Astra-Pro. The proposed method can well improve the calibration efficiency and depth measurement accuracy of monocular laser speckle projection systems.

Key words machine vision; monocular laser speckle projection system; extrinsic parameters calibration; iterative optimization