

激光振镜扫描系统中多重反射的高效抑制研究*

崔书洋¹⁾ 吴雨祥²⁾ 蔡玉栋¹⁾³⁾ 李轩^{1)3)†} 邵晓鹏⁴⁾

1) (西安电子科技大学杭州研究院, 杭州 311200)

2) (易思维(杭州)科技股份有限公司, 杭州 315200)

3) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

4) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2025年6月3日收到; 2025年7月8日收到修改稿)

目前基于激光振镜的结构光三维测量技术已经在焊装车间机器人抓取、搬运、上下料等工业场景中得到广泛应用。然而,在实际测量场景中存在凹陷、重叠、遮挡等复杂测量结构,光在微面间易形成多重反射现象,造成微面区域内的强度信息混叠,最终导致该测量区域点云缺失。为解决复杂结构区域测量过程中的点云缺失问题,本文提出一种以激光振镜作为关键投射模组的双目点云传感器,在不增加硬件的条件下实现两种不同模式的图像投射,其中本文所提出的抗多重反射投图模式,通过调控关键器件之间的时序配合关系,完成了复杂结构位置的测量,解决了多重反射干扰下的测量点云缺失问题。最后,在实际场景下进行多组实验,验证所提策略的可行性。结果表明,在存在多重反射干扰的测量场景下,本文所提出的抗多重反射投图模式测量黑件点云的完整性达到98.03%,较常规测量模式提升18.98%,有效解决了存在多重反射干扰场景内测量点云的缺失问题。

关键词: 结构光测量, 激光振镜, 多重反射干扰, 点云重建**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** 10.7498/aps.74.20250716**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250716

1 引言

通过以激光振镜作为投射模组的点云传感器投射编码图案完成场景测量的技术已在机器人视觉引导工业场景中得到广泛应用^[1]。在机器人抓取的应用场景下,测量料箱上固定承载物的点云完整性是3D引导的基础,能够确保机器人准确定位抓、放零件的位置。然而由于待测物形貌特征、摆放角度和场景内非感兴趣区域存在多重反射干扰源等隐患,会导致获取待测特征点云完整性差的问题,无法满足机器人利用3D点云信息进行抓取的精度要求。

目前针对复杂光场环境中由多重反射干扰引起的测量点云完整性差问题,国内外学者提出如下几种解决方案:1980年,Woodham^[2]提出了光度立体法,利用待测物体表面反射率的变化分离基础表面形状,即通过分析不同光照条件下图像中像素点的亮度变化来计算像素点表面的法向量,利用法向量信息完成物体的三维重建。该方法虽在一定程度上能对多重反射现象引起的点云缺失问题进行有效抑制,但对应用的环境条件有严苛要求,存在适用范围窄的弊端;1996年Li等^[3]提出根据图像和照明条件来估计场景中光场与任意照明场之间传输矩阵的方法。传输矩阵包含光线在物体表面反射、折射和多次反射的信息,理论上通过估算传输矩

* 浙江省自然科学基金杭州区域创新发展联合基金(批准号:LHZSZ25F010002)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: lixuan@xidian.edu.cn

阵能够量化多重反射现象对图像端灰度值的影响, 从而在计算端进行规避. 虽然该方法一定程度上能够处理多重反射问题, 但在遇到复杂几何形状和反射特性的物体时会引入较大计算误差; 2005年, Gao等^[4]提出基于物体表面双向分布反射函数分解直接光照和全局光照, 即通过描述物体表面在不同光照条件下的反射特性分离直接光照和全局光照, 虽然该方法对平滑物体表面、纹理较多物体表面能够实现比较精准的光照条件预测, 但对于反射特性强的物体表面和受多重反射影响显著物体表面的光照强度预测会存在较大误差; 2014年 Carsten等^[5]提出自适应型面分割的区域投射法、能够根据物体表面的反射特性和光照条件动态调整投射编码图案的光强度, 达到优化测量的效果. 虽然该方法能够确保在复杂表面和多次反射条件下仍能够获取清晰的条纹图像, 但存在光强度的自适应调整响应不及时的问题, 导致测量误差的增加; 2006年, Nayer等^[6]提出基于高频照明的直接光照和全局光照的分离方法, 通过捕获高频图像, 将全局光分量从原始图像中进行分离来减少多重反射现象的干扰, 但并不能完全消除多重反射干扰且光源照明模式与光源分布均匀性均会对分离结果的准确性产生影响; 2016年, O'Toole和 Mather^[7]提出利用数字微镜器件 (digital micromirror devices, DMD) 增加光传输过程中的直接光分量, 并结合极线约束完成测量场景的三维重构, 在光传输过程中通过调整微镜的翻转角度, 增加受多重反射干扰位置的直接光分量的比例, 提高成像质量, 但对于一些复杂的场景, 会影响微镜对直接光分量的控制; 2023年, 赵慧洁等^[8]提出了一种基于局部区域延拓的并行单像素成像方法, 实现了多重反光干扰下的测量场景三维重构, 通过向场景投射特定的条纹模式, 确保每个像素仅对各自所见区域进行成像, 从而减少多重反射问题的干扰, 但对于大视场、复杂测量的环境, 该方法存在同时处理像素信息数量受限的问题, 导致整个测量节拍过长, 影响整体测量效率.

本文创新性地构建了一种基于激光振镜投射单元的双目点云测量系统, 通过精确调控图像传感器、激光发射器与扫描振镜的时空同步机制, 实现了常规测量模式与抗多重反射干扰模式的双模态投影架构. 在常规模式下, 系统采用格雷码编码结合动态边缘位移图案的复合编码策略; 而在抗干扰模式下, 则切换为线结构光投影方案. 通过格雷码

编解码算法实现空间位置解析, 结合边缘特征点提取与光条中心线亚像素级定位技术, 建立多约束条件下的特征点匹配准则, 最终通过双目视差原理完成三维点云重构. 针对复杂工业场景中多目标相互遮挡及表面间多重反射的光干扰问题, 系统可自适应选择抗多重反射工作模式, 通过优化投影图案的空间频率特性与能量分布, 有效抑制非目标表面其他反射光对测量有效性的影响, 显著提升复杂场景下的点云重建完整性.

2 原理部分

2.1 激光振镜系统原理

本文提出搭建以激光振镜作为投射模组的双目点云传感器, 通过控制关键器件激光器、振镜和相机三者之间的时序关系完成测量场景内编码结构光图案的投射和采集. 其中振镜最早是用于激光加工领域的矢量扫描器件, 具有小惯量、高速扫描、精准定位和闭环反馈控制等特点^[9]; 其由光学扫描头、电子驱动放大器和光学反射镜组成. 其中控制光学反射镜片转动的电机是一种特殊的摆动电机, 只能进行偏转运动, 且偏转角度和控制电流成正比, 带动反射镜片进行激光束的定位, 兼顾扫描速度的同时保证重复定位精度. 整个激光振镜投射模组如图1所示.

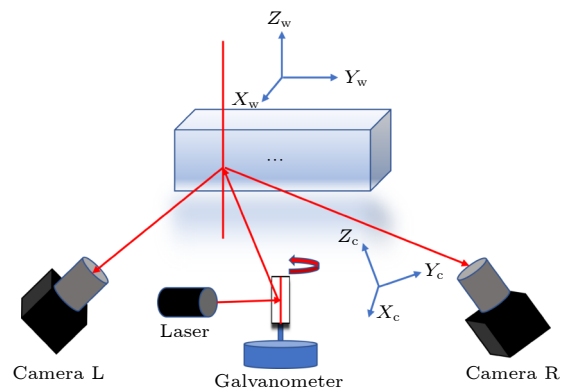


图1 激光振镜投射模组

Fig. 1. Laser galvanometer projection module.

图2展示了激光振镜传感器在投图、采图过程中激光器、相机和振镜三者之间的时序调控关系. 在完整的投图过程中, 振镜本身始终保持一定时间的周期运动, 主要通过调整相机和激光器之间的时序配合关系来完成不同形状编码图案的投射, 同时触发相机完成采集.

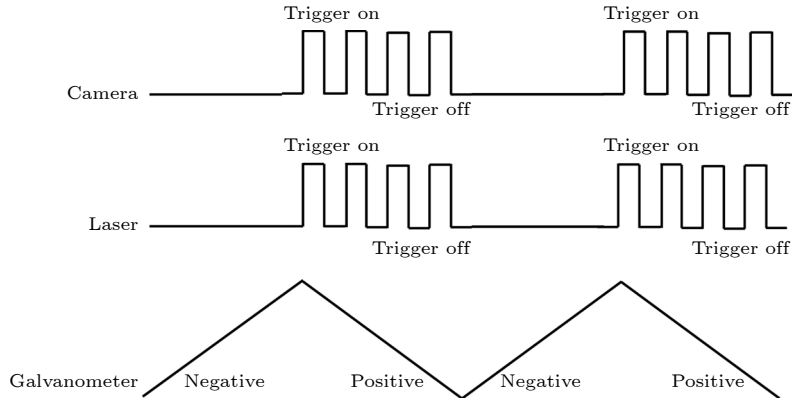


图 2 激光器、振镜、相机三者时序调控图

Fig. 2. Timing control diagram of laser, galvanometer and camera.

2.2 多重反射干扰环境下常规投影模式误差生成机制

在焊装车间实际测量场景中, 复杂几何形面的光学测量问题尤为突出^[10]. 时常发生光波在待测零件之间多重反射现象, 存在多重反射现象干扰的区域面临测量点云完整性差的问题, 无法满足根据 3D 点云信息完成引导定位的使用需求. 如图 3 所示, 激光器发出的单线激光经振镜镜面发生反射并随振镜的周期运动在测量场景中形成面结构光, 同时相机同步触发完成图像采集, 最后将数据传输至 PC 端进行处理, 完成点云重建. 测量过程中的光学干扰主要源于待测零件的多重反射特性, 由于待测件形状、摆放角度等因素影响, 振镜镜面反射出去的直接光源在待测件表面发生反射, 部分反射光源受限于出射角度无法第一时间被 CMOS 靶面接收, 反而在多个待测件之间形成多次反射现象, 影响相机接收其他位置直接反射光源的准确性, 导致获取二维图像对应位置的灰度信息错误, 影响后续点云重建的准确性.

图 3 中红色光线表示直接光照, 由激光器出射通过振镜镜面反射到待测物体表面, 经物体反射后的光线直接被相机捕获到; 黑色光线表示多重反射光, 是光照射到物体表面后反射到被测物其他位置处形成的干扰光源, 经过多重反射后被相机捕获. 故当光线发出后, 可能经历直接反射后被相机捕获, 也可能经历多重反射后再被相机捕获. 假设激光器通过振镜镜面反射后发出的光线能量为 $E(x)$, 相机像面某点接收到的光能量为 $I(x)$, 此时可定义光传输系数 $h(x)$:

$$h(x) = I(x)/E(x). \quad (1)$$

同时考虑到环境光因素的影响, 相机每点的响应可表示为

$$I(x) = O(x) + \int_{\Omega} h(x) \cdot E(x) dx, \quad (2)$$

其中 $O(x)$ 表示环境光能量, Ω 表示振镜转动带动光线覆盖的实际测量空间体积大小. (2) 式表明, 相机接收到的光强度取决于整个测量空间体积反射光强度积分的结果.

当采用常规投图模式, 通过投射格雷码与边缘移动编码条纹图案的投影光栅组合来完成测量^[11]. 相机感光靶面某一位置接收到的光强度 $P(x)$ 为

$$P(x) = A(x) + B(x) + O(x), \quad (3)$$

其中 $A(x)$ 表示相机接收到的直接反射光强, $B(x)$ 表示多次反射光强, $O(x)$ 表示测量场景中的环境光强.

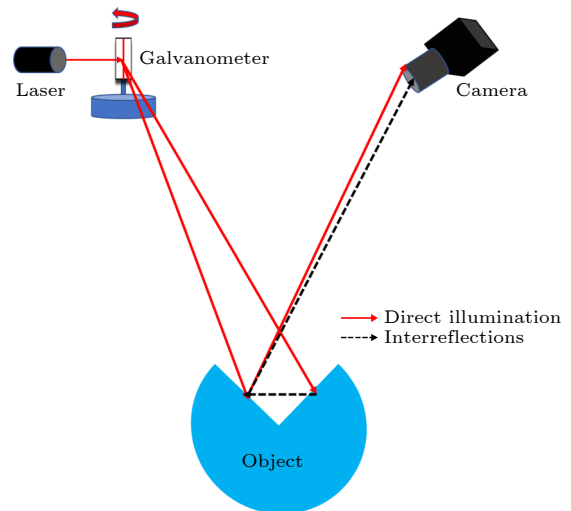


图 3 多重反射现象

Fig. 3. Phenomenon of multiple reflections.

经拍摄的格雷码图像首先需要完成二值化的过程, 方法包括: 1) 通过测量环境内采集到的暗、亮图完成阈值图像的输出, 各张格雷码图像与阈值图逐像素进行灰度比较, 完成二值化过程; 2) 通过投射互补格雷码图像, 对应互补图像之间逐像素完成灰度值比较. 方法 1) 中需要逐像素点确认每个像素点的阈值:

$$T(x) = \frac{A(x) + O(x)}{2}. \quad (4)$$

当存在多重反射光干扰时, 每个像素点的阈值变化为

$$T'(x) = \frac{O(x) + A(x) + B(x)}{2}. \quad (5)$$

受多重反射光干扰引起的阈值变化现象, 会使格雷码图像中受干扰位置像素点二值化的结果出错, 影响后续的解码结果, 正常解码公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^N GC_i(x, y) \times 2^{N-i}. \quad (6)$$

当存在多重反射光干扰时, 解码公式如下:

$$V' = \sum_{i=1}^N [GC_i(x, y) + \varepsilon] \times 2^{N-i}, \quad (7)$$

其中, V 表示解得格雷码值, V' 表示引入误差后解得的格雷码值, i 表示第 i 张格雷码图像, N 表示格雷码图像总数, GC_i 表示第 i 张格雷码对应某个像素点的二值化结果, ε 表示由于多次反射干扰引入的格雷码解码误差.

此外多重反射光的干扰也会给图像亚像素边缘特征点的提取结果引入误差, 经正反边缘图像像素逐列完成灰度作差得到差分图像后, 根据逐列像素间差分结果的互异性, 由一维线性插值公式完成亚像素边缘点坐标的确认, 其中 i 表示第 i 列像素点, diff 表示获取到的差分图像:

$$\text{diff}[i] \cdot \text{diff}[i+1] < 0. \quad (8)$$

当存在多重反射干扰时, 会出现互异性判断错误, 导致该对应两列像素之间存在的边缘特征点丢失, 影响后续同名点搜索和点云重建的完整性:

$$\text{diff}[i] \cdot \text{diff}[i+1] > 0. \quad (9)$$

通过以上分析可得, 在存在多重反射干扰场景下使用常规投图策略进行测量会对其中二值化、编解码过程引入误差, 影响后续同名点搜索的准确性和最终重建点云的完整性、精度.

2.3 抗多重反射干扰投影模式机理

常规投图策略面临多重反射问题的干扰, 当存在多重反射光干扰时, 势必面临受反射光干扰位置重建点云的缺失问题. 通过对整个测量场景的观察, 便可对多重反射光产生的源头进行追溯. 此时需要对测量模式进行切换, 选择抗多重反射模式完成对整个场景的测量, 确保获取高质量的点云数据. 为克服多次反射问题的干扰, 从光源检测的原理出发, 相机接收外界光线的过程可等效为直接反射光源的检测过程. 在直接光源的检测过程中, 线光源的特性使其本身对直接反射光源的敏感程度更高, 电子光束在测量区域内沿选定直线方向进行扫描, 通过相机采集光源在待测物表面的分布信息. 这种沿一条直线方向进行扫描的方式, 更容易捕捉到直接反射光源的具体变化. 基于此特性提出抗多重反射投图策略, 在不增加硬件设备的前提下通过更改振镜、激光器和相机三者之间的时序配合关系来实现对测量场景的扫描. 过程中通过设定振镜转动能够响应的最小角分辨率、激光器点亮的时长和相机采集图像的曝光等参数设置实现投图模式的更改, 其中对激光器本身点亮时长的控制能够保证对形貌特征复杂、受多次反射干扰严重表面的测量结果, 利用线光源本身直接反射特性高的优势, 能够确保相机本身感光单元接收光强度的准确性, 有效减弱对其他反射光源的敏感程度, 提高直接反射光源的检测程度:

$$N_m = \frac{\theta_e - \theta_s}{R_{\min}}, \quad (10)$$

其中, N_m 表示在整个测量场景中振镜带动激光线条的移动次数, θ_s 和 θ_e 分别表示开始测量的起始转角位置和终止转角位置, R_{\min} 表示振镜本身能够响应的最小转动角分辨率.

将相机上每个像素点当成一个独立的探测单元, 则其强度响应 $S(x)$ 为

$$S(x) = O(x) + \int_{\Omega} A(x) \cdot R dx, \quad (11)$$

其中 $O(x)$ 表示环境光强度, $A(x)$ 表示经振镜镜面反射后的反射光强度, R 为待测物表面反射率. 由此可见, 通过改变投图策略提升直接反射光源的检测程度后, 确保相机上每个像素点对应响应不受多次反射光强度的干扰, 每个像素点响应更能准确地反映测量场景中实际光源强度的分布情况. 然而对

于面光源在多重反射干扰场景下的检测效果来说,其会受到强度损耗、角度匹配、检测范围的限制,导致相机端光强度接收少,影响最终的测量效果.

2.4 关键算法原理

本节对抗多重反射投图策略涉及的关键技术原理进行分析介绍. 首先介绍大视场下激光振镜点云传感器的标定原理, 其次介绍由 2D 图像生成 3D 点云过程中涉及的图像预处理、同名点搜索和三维重建相关算法原理.

2.4.1 大视场下激光振镜传感器标定

本文搭建激光振镜点云传感器的标定过程分为以下两个步骤: 左右单目相机内参标定和双目相机之间位置关系外参标定. 其中左右单目相机内参标定采用张氏标定法^[12], 通过制作标定板并且在测量空间体积范围内以不同位姿、在不同工作距下完成标定板图像采集, 求取相机标定结果的闭式解. 在获取相机标定结果闭式解的基础之上, 考虑镜头畸变程度的影响, 求解相机标定结果在物理意义上的最优解, 整个标定流程如图 4 所示. 求解畸变参数, 包括径向畸变参数: k_1, k_2, k_3 和切向畸变参数 p_1, p_2 , 在此基础上建立畸变模型和非线性优化目标函数. 参与迭代的变量包括相机内参外参和畸变系数, 迭代初值选取代数意义上的闭式解, 畸变系数取 0. 将世界坐标系中标定板圆心的世界坐标投影回图像坐标系, 最小化其与提取圆心坐标之间的差异.

非线性优化的目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2. \quad (12)$$

在完成左右相机各自标定后, 以标定板为中间桥梁进行双目立体标定, 获得左右相机之间的相对位置关系: 对于某个位姿下的标定板, 先通过左相机的单目标定, 获取世界坐标系 (认为标定板与世

界坐标系重合) 相对于左相机的位姿变换矩阵 $T_1 = [R_1 | T_1]_{4 \times 4}$, 同理可获得右相机的位姿变换矩阵 $T_2 = [R_2 | T_2]_{4 \times 4}$.

假设空间中有一点 P , 其在世界坐标系下的描述为 P_w , 在左、右相机坐标系下分别描述为 Q_{c1} , Q_{c2} , 有如下关系:

$$\begin{aligned} Q_{c1} &= R_1 P_w + T_1, \\ Q_{c2} &= R_2 P_w + T_2, \end{aligned} \quad (13)$$

消去 P_w , 可得左右相机之间的相对位置关系为

$$T_{LR} = \begin{bmatrix} R_1 R_2^{-1} & T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中 R_1, T_1, R_2, T_2 分别表示左右相机各自坐标系到世界坐标系之间关系转换的旋转矩阵和平移矩阵.

2.4.2 同名点搜索和点云重建

采用抗多重反射模式时, 采集到的光条图像会受到来自外界环境光、相机设备噪声、激光器本身出射杂散光等因素的干扰, 影响后续光条中心提取结果的准确性. 考虑到传感器在实际应用过程中可能面临到的测量场景多样性以及待测件特征多样性, 需要对不同测量场景内不同待测件采集的图像选取适合的图像预处理方法进行去噪等操作. 本文选取均值滤波方法完成光条图像的预处理, 最后利用 Steger 原理^[13] 完成光条中心的提取, 图 5 展示了原图、滤波结果、前景图和光条中心提取结果.

采用抗多重反射干扰策略, 在完成左右相机光条中心提取后, 需依据相机标定结果完成特征点的畸变校正, 去除畸变后进行同名点的搜索. 图 6 所示为以左相机为主相机, 左相机图像上提取特征点可通过相机标定结果得到的基础矩阵计算出每个特征点对应的极线方程, 通过在右相机像面上搜索距离每个极线最近的两个特征点, 完成直线方程

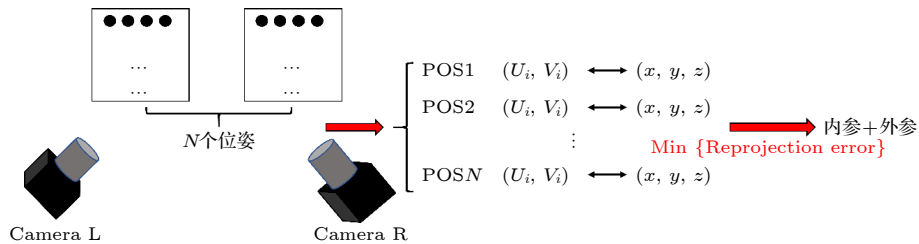


图 4 标定流程

Fig. 4. Calibration process.

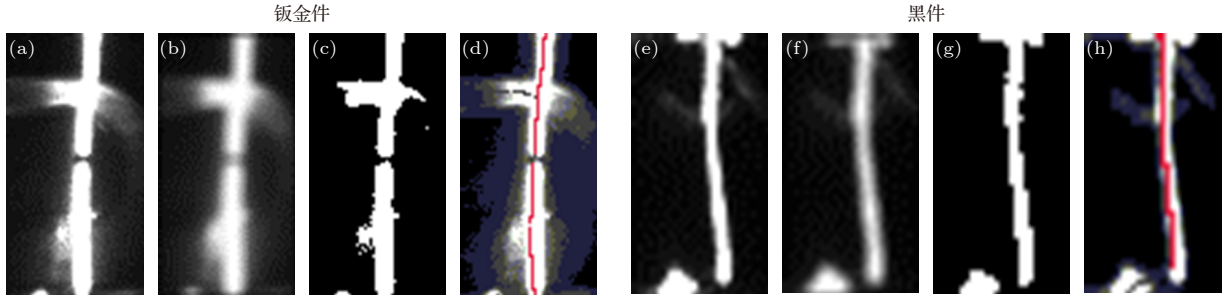


图 5 钣金件、黑件表面处理结果 (a)–(d) 钣金件表面光条处理、前景图和光条中心提取结果; (e)–(h) 黑件表面光条处理、前景图和光条中心提取结果

Fig. 5. Surface treatment results of sheet metal parts and black parts: (a)–(d) Surface stripe treatment, foreground image and stripe center extraction results of sheet metal parts; (e)–(h) surface stripe treatment, foreground image and stripe center extraction results of black parts.

的计算, 最后通过联立极线方程和直线方程完成右相机像面上同名点的确认过程, 如 (15) 式所示. 确认完同名点后根据公垂线法完成双目点云的重建^[14].

$$\begin{aligned} \text{Polarline: } & A_1x + B_1y + C_1 = 0, \\ \text{Line: } & A_2x + B_2y + C_2 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Polarline 代表极线方程、Line 代表计算的直线方程. 其中 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ 分别表示方程的待求解系数.

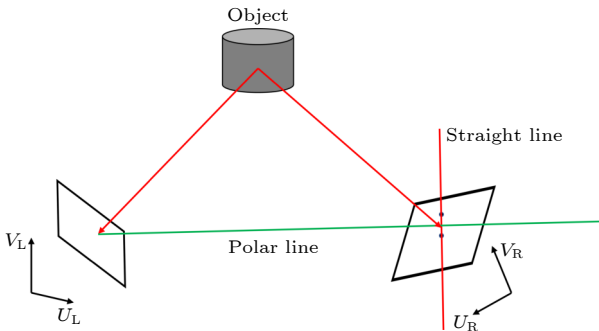


图 6 同名点搜索原理

Fig. 6. Principle of homonymous point search.

3 实验部分

实验搭建的激光振镜点云传感器如图 7 所示, 首先通过在测量视场深范围内多个工作距、视场位置下以平行、左右倾斜、前后倾斜位姿形态移动摆放标定板, 同时控制激光振镜传感器向视场内投射全亮图案完成标定板图像采集, 采集结果用于双目相机的标定, 标定过程如图 8 所示, 相机标定结果如表 1 所示. 其次通过摆放标准球对搭建激光振镜传感器的绝对测量精度水平进行考量, 最后在存在多重反射干扰和不存在多重反射干扰两种实验

场景下对提出抗多重反射投图策略的测量效果进行验证. 本实验使用分辨率为 2048×1536 的相机、工作功率为 1 W 的激光器, 使用振镜的最小转动角分辨率为 0.006° , 偏转范围为 $\pm 20^\circ$.

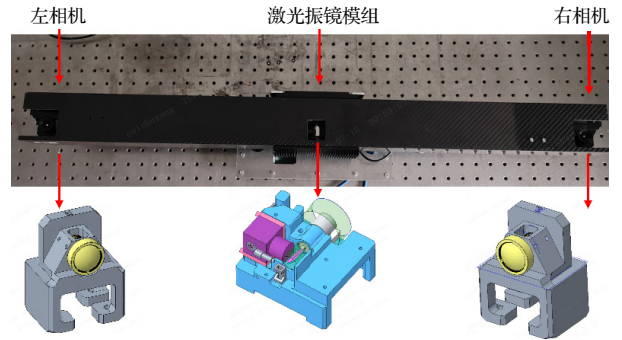


图 7 激光振镜传感器

Fig. 7. Laser galvanometer sensor.

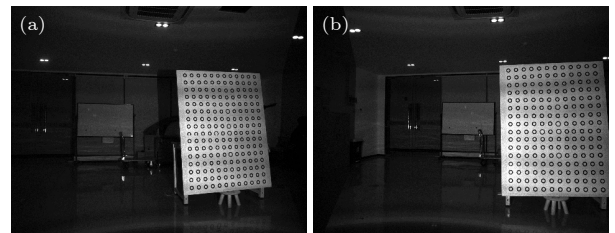


图 8 激光振镜传感器标定采图

Fig. 8. Calibration image acquisition for laser galvanometer sensor.

3.1 双模态投影策略绝对测量精度水平验证

本文搭建激光振镜点云传感器, 对于存在多重反射干扰的测量场景提出抗多重反射干扰投图策略, 这里使用标准标定球^[15–17], 在 3.0 m 工作距下对该投图策略的绝对测量精度水平进行验证比较, 同时增加市面成熟点云传感器作为参照. 图 9 为整个测量环境示意图.

表 1 标定结果
Table 1. Calibration results.

	左相机	右相机
相机内参	$\begin{pmatrix} 1685.17 & 0 & 1022.08 \\ 0 & 1684.51 & 764.886 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1689.73 & 0 & 1036.15 \\ 0 & 1689.53 & 763.744 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
平均重投影误差	0.03 pixel	0.02 pixel
立体标定结果	$\begin{pmatrix} 0.93517 & 0.00656701 & 0.354139 & -832.458 \\ -0.00290955 & 0.999937 & -0.0108592 & 2.80458 \\ -0.354188 & 0.0912484 & 0.93513 & 155.423 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	

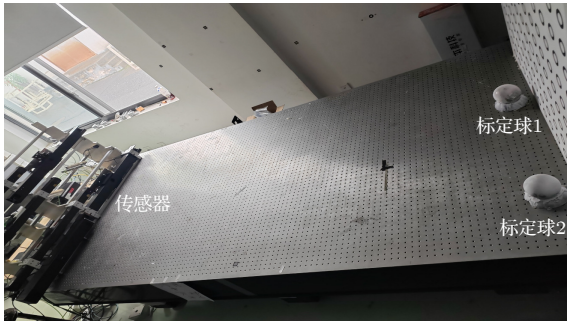


图 9 测量环境
Fig. 9. Measurement environment.

由表 1 可见, 左右相机标定各自的总体平均反投影误差水平为 0.03 pixel 和 0.02 pixel, 对于大视场测量来说, 整个测量视场内的测量误差水平要求不超过 1 mm, 结合使用相机的分辨率综合考虑, 当前左右相机标定的总体平均反投影误差水平能够满足应用需求. 由表 2 可见, 本文所提抗多重反射投图策略的绝对测量精度水平与市面成熟点云传感器水平相当, 三者之间测量球心距^[18]最大偏差为 0.24 mm, 能够满足在大视场下测量使用.

表 2 绝对测量精度水平
Table 2. Level of absolute measurement accuracy.

传感器	测量方式	球心距/mm	左球直径/mm	右球直径/mm
市面成熟传感器	—	909.53	101.71	101.66
本文搭建传感器	常规策略	909.70	101.44	101.70
本文搭建传感器	抗多重反射策略	909.46	101.84	100.96

3.2 多重反射干扰下所提投影策略点云重构效能

在验证完绝对测量精度水平^[19,20]的基础上, 需进一步证明该投影策略的点云测量能力. 通过

搭建存在多重反射干扰的测量场景并选取实际应用场景下的待测件进行仿真实验, 图 10 中的待测件是来自卡槽式料箱的黑色卡槽块, 同时通过在其前方呈一定倾斜角度位置处摆放反光玻璃板来产生多重反射光的干扰. 黑色卡槽块表面在测量过程中存在来自玻璃板产生的多重反射光源干扰, 对后续提取条纹图像边缘特征点的数量、位置稳定性以及基于格雷码图像进行逐像素编码结果的正确性造成影响, 从而影响最终重建三维点云的完整性.

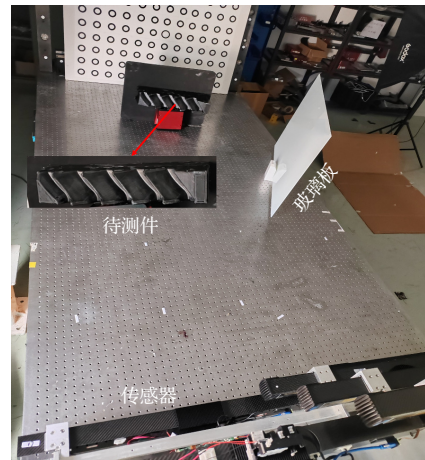


图 10 测量环境搭建情况
Fig. 10. Measurement environment setup situation.

图 11 展示了受多重反射光干扰, 图像端特征点提取出现缺失和排列紊乱的问题. 由于测量场景中存在多重反射光的干扰, 影响待测件表面光强分布的正确性, 导致提取边缘点出现数量减少和排列不整齐等问题, 影响了左右相机寻找同名点的准确性和最终重建点云的完整性. 如图 12 所示, 在提取边缘点缺失和排列不整齐的区域均出现了点云缺失的现象.

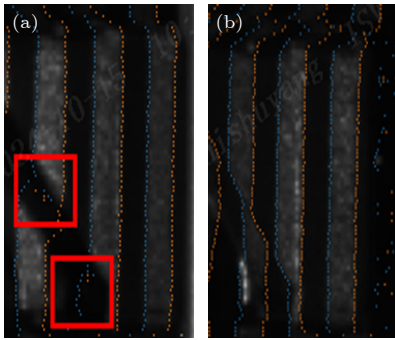


图 11 边缘点提取异常情况 (a) 左相机提取结果; (b) 右相机提取结果

Fig. 11. Edge point extraction abnormal conditions: (a) Extraction result of the left camera; (b) extraction result of the right camera.

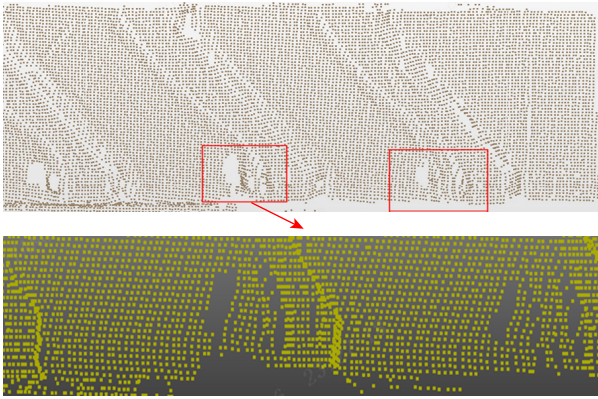


图 12 受多重反射光干扰造成的点云缺失现象

Fig. 12. Phenomenon of point cloud loss caused by interference from multiple reflected lights.

此时采用抗多重反射投图策略进行测量, 得到的相同位置处特征表面测量点云结果如图 13 所示, 缺失位置点云的完整性得到了改善, 所提策略能够有效对多重反射光干扰问题进行抑制。

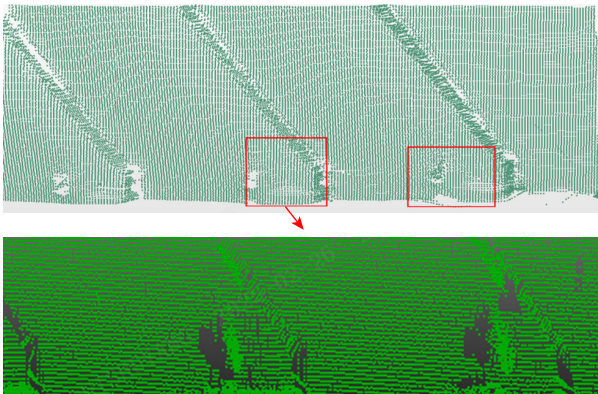


图 13 点云完整性改善效果

Fig. 13. Effect of improving the integrity of point clouds.

3.3 实际应用场景下所提投影策略点云重构效能

本节在存在多重反射光干扰的实际使用场景下对所提策略重建点云的效果进行验证. 首先利用一个刚性好的料箱, 在其上固定各种待测特征物来源于实际机器人抓、放件场景中的卡槽式料箱、悬挂式料箱等. 依据 3D 点云信息引导机器人顺利完成抓件、放件整个过程的前提条件是保证测量这些特征点云的完整性。

图 14 展示了实际应用下的测量场景, 传感器安置在距离料箱表面 3 m 的位置, 料箱上摆放上述各种待测特征. 整个测量环境中存在料箱表面竖立金属壁引发的多重反光干扰以及外部机器人机身反光干扰风险, 均会对重建特征表面点云的完整性带来影响。

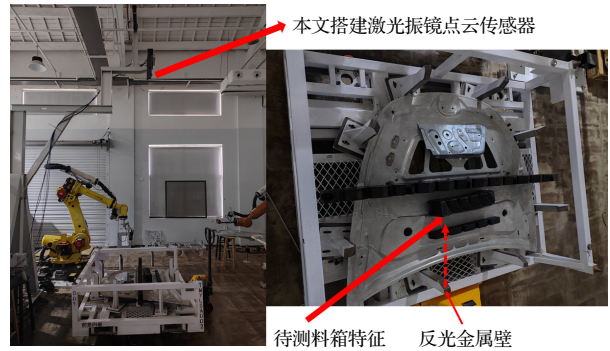


图 14 真实测量场景及待测件摆放情况

Fig. 14. Actual measurement scene and the placement of the object to be measured.

过激光振镜传感器分别采用常规和抗多重反射策略完成对上述场景的测量, 测量结果如图 15 所示, 由于外部多重反射光干扰现象造成的点云缺

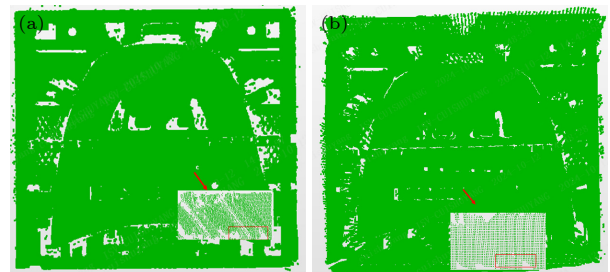


图 15 两种策略重建特征点云效果对比 (a) 常规策略; (b) 抗多重反射策略

Fig. 15. Comparison of the effects of two strategies for reconstructing feature point clouds: (a) Conventional strategy; (b) anti-multiple reflection strategy.

失问题在采用抗多重反射投图策略后得到了改善,且在相同测量环境、测量条件下测量点云密度得到了提升,克服了由于多重反射干扰现象造成的点云缺失问题.同时对黑件表面特征点云进行统计对点云完整性提升进行量化结果列于表 3.以市面成熟点云传感器在相同测量环境、测量场景下的重建点云结果作为对照组,统计关注特征表面的点云数量作为评价完整性的真值,以此来评价所提抗多重反射投图模式对多重反射光干扰现象的抑制效果.

表 3 重建特征表面点云数量和完整性情况

Table 3. The quantity and integrity of the point cloud of the reconstructed feature surface.

实验组数	常规策略重建点云数量	完整性/%	抗多重反射策略重建点云数量	完整性/%
1	2815	79.05	3491	98.03
2	2833	79.56	3516	98.74
3	2798	78.57	3482	97.78

4 结 论

本文对存在多重反射干扰场景下的物体进行三维面形测量,提出一种基于激光振镜传感器实现的抗多重反射投图策略,通过调控元器件激光器、振镜和相机三者之间的时序配合关系进行结构光编码模式调整,显著增强多重反射干扰位置处直接光源的检测程度,完成对复杂结构的点云重建.通过在模拟场景和真实场景下开展测量研究,证实所提方法的可行性.结果表明,本文所提方法可有效完成多重反射干扰场景下特征物体三维面形的测量,不需要附加或改动任何硬件设备,解决在多重反射光干扰下常规投图策略测量点云完整性差的问题,在多重反射干扰下将重建黑件特征表面点云的完整性由 79.05% 提升到 98.03%,适用于多次反

射干扰下的三维面形测量.同时,在视觉测量层面,点云完整性的提升能够基于 3D 信息提供给机器人更加准确的空间定位信息,更有利于机器人对后续的路径规划进行决策,提升机器人引导抓件的正确率.

参考文献

- [1] Ramadan M, Youssef A, Ayyad A 2024 *Sci. Rep.* **14** 30742
- [2] Woodham R 1980 *Opt. Eng.* **19** 191139
- [3] Li B Y, Ren W Q, Fu D P, Tao D C, Feng D, Zeng W J, Wang Z Y 2018 *IEEE Trans. Image Process.* **28** 492
- [4] Gao F, Schaaf B C, Strahler H A, Roesch A, Lucht W, Dickinson R 2005 *J. Geophys. Res. Atmos.* **110** 312
- [5] Carsten S, Adrian S, Frank W 2009 *VDI Ber.* **206** 89
- [6] Nayar K S, Krishnan G, Grossberg D M 2006 *ACM Trans. Graph.* **25** 935
- [7] O'Toole M, Mather J 2016 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **38** 298
- [8] Zhao H J, Li Y X, Jiang H Z, Li X D 2023 *Laser Optoelectron. Prog.* **60** 081108 (in Chinese) [赵慧洁, 李宇曦, 姜宏志, 李旭东 2023 激光与光电子学进展 **60** 081108]
- [9] Zhang T, Lei P, Huang Y, Rong Y M 2025 *Measurement* **244** 116508
- [10] Seo Y B, Joo K N, Ghim Y S, Rhee H G 2021 *Meas. Sci. Technol.* **32** 045201
- [11] Zhang Q C, Wu Z J 2020 *Infrared Laser Eng.* **49** 0303004 (in Chinese) [张启灿, 吴周杰 2020 红外与激光工程 **49** 0303004]
- [12] Tianyu L, Fajie D, Changwen L 2024 *Opt. Express* **32** 457
- [13] Li J, Wang L, Wan Y 2024 *Opt. Lasers Eng.* **18** 108436
- [14] Zhang Z X, Cheng J K, Wu X J 2017 *Microcomput. Appl.* **36** 80 (in Chinese) [张芝贤, 程继坤, 武旭娟 2017 微型机与应用 **36** 80]
- [15] Pattnayak C B, Mohapatra S 2025 *Desalination* **604** 118703
- [16] Jia J X, Xie F, Bao S T 2025 *Opt. Fiber Technol.* **90** 104115
- [17] Shi J W, Li C Y, Cao K, Wang Y C, Zhang X, Zhou J Y, Zhao F P, Yang F, Chen W B 2024 *Opt. Express* **32** 41004
- [18] Liu S, Chen J, Sun M, Zhao L L, Wei X 2020 *IEEE Access* **8** 11754
- [19] Qian J, Dang S P, Zhou X, Dan D, Wang Z J, Zhao T Y, Liang Y S, Yao B L, Lei M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 128701 (in Chinese) [千佳, 党诗沛, 周兴, 但旦, 汪召军, 赵天宇, 梁言生, 姚保利, 雷铭 2020 物理学报 **69** 128701]
- [20] Abdel-Rehim O A, Davidson J L, Marsh L A, O'Toole M D, Peyton A J 2016 *IEEE Sens. J.* **16** 3775

Efficient suppression of multiple reflections in laser galvanometer scanning systems*

CUI Shuyang¹⁾ WU Yuxiang²⁾ CAI Yudong¹⁾³⁾
 LI Xuan^{1)3)†} SHAO Xiaopeng⁴⁾

1) (*Hangzhou Institute of Technology, Xidian University, Hangzhou 311200, China*)

2) (*Isvision (Hangzhou) Technology Co., Ltd., Hangzhou 315200, China*)

3) (*School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

4) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(Received 3 June 2025; revised manuscript received 8 July 2025)

Abstract

The structured light 3D measurement technology based on laser galvanometer has been widely used in industrial scenarios such as robot grasping, handling, and loading/unloading in welding and assembly workshops. However, in actual measurement scenarios, there are complex measurement structures such as depressions, overlaps, and occlusions. Light is prone to multiple reflections between micro-faces, causing intensity information to be mixed within the micro-face area and ultimately resulting in point cloud loss in this measurement area. To address the issue of point cloud loss in complex structure areas in the measurement process and ensure the accuracy of the measurement information provided by vision, a binocular point cloud sensor with a laser galvanometer as the key projection module is proposed in this work. Without adding hardware, it realizes two different image projection modes to deal with complex measurement situations within the scene. Among them, the anti-multiple reflection projection mode proposed in this work, by regulating the timing coordination relationship between key components, completes the measurement of complex structure positions and solves the problem of point cloud loss caused by multiple reflection interference. Finally, multiple experiments are conducted in actual scenarios to verify the feasibility of the proposed strategy. The experimental results show that in measurement scenarios with multiple reflection interference, the integrity of the black part point cloud measured by the anti-multiple reflection projection mode proposed in this work reaches 98.03%, which is 18.98% higher than the traditional measurement mode. It effectively solves the problem of point cloud loss in measurement scenarios with multiple reflection interference. Visual measurements ensure the accuracy and completeness of the information obtained. The six-axis compensation values determined by the robot for each part's pose state during teaching become more precise. This ensures that the previously taught robot trajectory can be accurately reused for subsequent poses, thereby reducing the time needed for manual robot debugging and enhancing production efficiency.

Keywords: structured light measurement, laser galvanometer, multiple reflection interference, point cloud reconstruction

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: [10.7498/aps.74.20250716](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250716)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250716](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250716)

* Project supported by the Hangzhou Regional Innovation and Development Joint Fund of Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LHZSZ25F010002).

† Corresponding author. E-mail: lixuan@xidian.edu.cn

激光振镜扫描系统中多重反射的高效抑制研究

崔书洋 吴雨祥 蔡玉栋 李轩 邵晓鹏

Efficient suppression of multiple reflections in laser galvanometer scanning systems

CUI Shuyang WU Yuxiang CAI Yudong LI Xuan SHAO Xiaopeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 190202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250716

CSTR: 32037.14.aps.74.20250716

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250716>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于声学扫描振镜的超声/光声双模态成像技术

Ultrasound/photoacoustic dual-modality imaging based on acoustic scanning galvanometer

物理学报. 2022, 71(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211394>

基于激光双边带抑制的冷原子干涉相移优化与控制

Optimization and control of cold atom interference phase shift based on laser double-sideband suppression

物理学报. 2023, 72(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221711>

基于Z扫描技术的超快脉冲激光焦深测量方法

A method of measuring depth of focus in ultrafast pulsed laser systems based on Z-scanning technology

物理学报. 2025, 74(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241658>

收发望远镜参数对光纤激光测振仪测量分辨力的影响

Influence of transmitting and receiving telescope parameters on measurement resolution of fiber laser doppler vibrometer

物理学报. 2025, 74(1): 014206 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240682>

基于目标反射回光对高功率光纤激光器影响的理论模型和数值研究

Theoretical model and numerical study of effect of target reflected light on high-power fiber laser

物理学报. 2023, 72(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222464>

量子点-双腔磁光机械系统中的磁振子双稳态

Magneton bistability in quantum dot-double cavity optomechanical coupling system

物理学报. 2025, 74(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250172>