

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508714

交叉结构光自动同步标定的工业三维测量系统*

孙江宏^{1,2} 杨箫^{1,2} 孙英杰^{1,2} 孙雨彤^{1,2} 李嘉宝^{1,2}

(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 102206; 2. 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘要:针对非接触式三维重建中相机与光平面标定存在的人工干预频繁、分步标定累积误差大及自动化程度低等问题,提出一种基于交叉结构光的自动同步标定方法。该方法利用双激光束交点的几何不变性构建了交叉结构光空间几何模型,推导单组图像下相机内参、外参及光平面参数的求解算法。该流程摒弃传统标定方法中对靶标多次重定位的依赖,直接通过特征点云的几何变换实现参数统一,实现标定与测量的一体化集成。通过对标准氧化铝板与非标准铝合金零件的扫描实验,验证该方法在不同材质与几何特征下的有效性。结果表明,在标准工业条件下,该系统的尺寸测量误差控制在 ± 0.5 mm以内,平均三维重建精度达 ± 0.25 mm,峰值误差率低于2.67%。该方法有效克服传统方法对人工辅助的依赖,在保证高精度的同时显著降低操作复杂性并提升检测效率,为工业测量、逆向工程及表面形貌分析提供一种高效、低成本且全自动的解决方案。

关键词: 三维重建;交叉结构光;自动同步标定;工业测量;逆向工程

中图分类号: TH166;TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Industrial 3D measurement system with automatic simultaneous calibration using cross-structured light

Sun Jianghong^{1,2} Yang Xiao^{1,2} Sun Yingjie^{1,2} Sun Yutong^{1,2} Li Jiabao^{1,2}(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China;
2. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China)

Abstract: To address the limitations of traditional calibration methods in non-contact 3D reconstruction—specifically the frequent need for manual intervention, significant error accumulation caused by multi-step calibration, and low levels of automation—this paper proposes an automatic synchronous calibration method based on cross-structured light. By utilizing the geometric invariance of the intersection points of dual laser beams, a spatial geometric model of the cross-structured light is constructed. An algorithm is then derived to synchronously solve the camera intrinsic parameters, extrinsic parameters, and light plane parameters using a single set of images. This process eliminates the reliance on repeated target repositioning required by traditional methods and achieves parameter unification directly through the geometric transformation of feature point clouds, realizing the integration of calibration and measurement. Validated through scanning experiments on standard aluminum oxide plates and non-standard aluminum alloy components, the results demonstrate that under standard industrial conditions, the system's dimensional measurement error is controlled within ± 0.5 mm, the average 3D reconstruction accuracy reaches ± 0.25 mm, and the peak error rate is below 2.67%. The proposed method effectively overcomes the reliance on manual assistance, significantly reducing operational complexity and improving inspection efficiency while ensuring high precision. It provides an efficient, low-cost, and fully automated solution for industrial measurement, reverse engineering, and surface morphology analysis.

Keywords: 3D reconstruction; cross-structured light; automatic synchronous calibration; industrial measurement; reverse engineering

0 引言

线结构光测量为一种非接触、高精度的三维重建技术,以其灵活性高、数据采集快、成本效益佳等优势^[1],广泛应用于精密检测^[1-4]、生物医学成像^[5-6]及数字工程建设^[7]等领域。例如,在航空发动机叶片检测中可实现 ± 0.05 mm 测量精度^[8];在文物表面重建中表面完整度可达 99.9%^[9];医学微型化显微成像系统精度可达 0.1 mm^[10]。随着工业检测对精度与自动化要求的提升,现有系统在标定效率、鲁棒性及流程集成方面的局限性日益凸显^[11-13]。

传统方法通常将相机标定与光平面标定分为独立两步,且需多次人工移动标定靶标。该流程不仅增加操作复杂性,还会引入累积误差(一般为 0.1~0.3 mm)。且未能联合优化相机参数与光平面参数,制约整体测量精度的提升。尽管以张正友法^[14]为代表的相机标定因可靠性与高精度已趋成熟,但光平面标定仍是研究热点,其自动化与适应性日益受到重视^[15]。

例如,Yu 等^[16]提出基于机器人引导的标记靶光平面标定方法,虽可实现大范围测量,但依赖线性运动平台导致灵活性受限;吴庆华等^[17]提出单圆平面靶标线结构光视觉传感器机器人标定方法,提升精度且无需昂贵靶标,但依赖激光线与定位辅助线精准对准,操作要求高;Li 等^[18]提出相移投影标定方法精度虽高,但需全场条纹覆盖及多姿态靶标,降低自动化效率;Xing 等^[19]提出基于立体视觉实现在线标定,虽提升手眼标定精度,但在低纹理或高噪环境中性能下降;Li 等^[20]采用多相机系统解决尺度不确定性问题,但需大面积铝靶和复杂流程,导致实时性不足;Li 等^[21]提出基于多重约束的几何标定框架可降低重建误差,但仍需反复重定位靶标,难以实现全自动化;Wang 等^[22]结合事件相机与投影仪的混合标定法增强动态环境鲁棒性,却依赖复杂硬件同步;范鹏翔等^[23]提出基于姿态筛选的单目结构光标定方法,设定旋转向量夹角阈值筛选图像提升标定精度,但需人工或自动调整靶标获取多姿态图像,且阈值设定依赖经验;关玮童等^[24]提出基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法,通过多相机联合标定与最优视场决策扩大测量范围并实现高精度定位,但系统搭建复杂且依赖多硬件同步,在光照条件不佳时需额外补光。

但现有系统仍普遍遵循“人工干预—逐步标定”传统流程,相机与光平面参数分开求解,频繁的靶标重标定需求阻碍了全自动化实现,增加累积误差风险,并制约了高精度工业检测的适用性。针对上述问题,本文提出基于交叉结构光的自动同步标定方法,利用交叉激光交点的空间几何不变性,通过单组图像同步求解相机内参、外

参与光平面参数。该方法集成标定过程,免去人工干预。本文构建交叉结构光空间几何模型及同步求解相机与光平面参数的数学模型,结合双曝光融合与机械臂运动规划,提高系统对高反射率工件测量的鲁棒性,并扩展有效测量范围,通过对非标准工业零件的实验,验证所提方法在复杂测量环境下有高精度与高稳定性三维重建能力。

1 系统结构与理论基础

1.1 结构光硬件设计

系统由工业相机、激光发射器与位移平台构成,标定过程采用直射式结构光设计,如图 1 所示。两束激光垂直投射至被测平面,相交形成具有几何约束的特征交点。利用交叉激光条纹的空间分布特性优化标定参数求解过程,降低传统方法对人工干预的依赖。

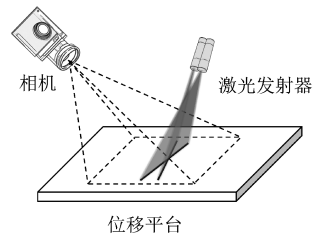


图 1 标定模块系统结构示意图

Fig. 1 System architecture of the calibration module

1.2 相机成像模型

相机标定利用已知特征点求解成像模型的内参、外参及畸变系数。三维世界坐标系中任意一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 到二维图像平面投影点 $p(u, v)$ 的映射关系可由小孔成像模型描述,如图 2 所示,该模型涉及 4 个基本坐标系:世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$;相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$,原点位于相机光心;图像坐标系 $o-xy$,原点为光轴与物理成像平面交点;像素坐标系 o_1-uv ,原点位于图像左上角, (u_0, v_0) 为主点坐标。

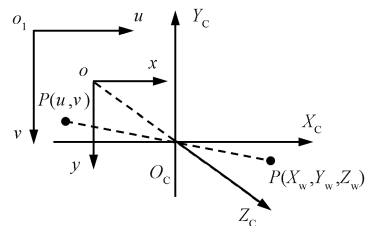


图 2 相机模型与各坐标系关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the camera model and the relationship between coordinate systems

根据刚体变换与相似三角形原理,三维点 P 与像点 p 的映射关系为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:相机内参矩阵 \mathbf{M}_1 由像素物理尺寸 d_x, d_y 与焦距 f 构成;外参矩阵由旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移向量 \mathbf{t} 组成。

Z_c 表示点在相机坐标系中的深度,同时作为 2D/3D 坐标转换的比例因子。已知变换矩阵时,可实现空间点与像点的匹配;若丢失深度信息 Z_c ,则需通过视觉测量技术恢复实际应用中,与理想针孔模型的偏差及光学缺陷会引入非线性镜头畸变(主要为径向畸变与切向畸变)。设理想坐标为 (x, y) ,畸变坐标为 (x', y') ,其关系为:

$$\begin{cases} x' = x + \Delta x \\ y' = y + \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \Delta x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 xy + p_2(3x^2 + y^2) \\ \Delta y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \end{cases} \quad (3)$$

式中:参数 k_1, k_2 为径向畸变系数; p_1, p_2 为切向畸变系数。为保证标定稳定性,实际仅补偿径向畸变。

本文采用张正友标定方法^[14]估计相机参数,并将相机标定与光平面估计集成处理。该方法摒弃传统分步标定流程,实现相机参数与光平面参数的同步求解,无需重调标定靶、相机及激光器的相对位姿,从而建立统一高效的系统标定工作流程。

1.3 光平面标定的几何约束模型

基于交叉条纹的几何约束,本文提出标定模型:

1) 坐标系定义

如图 3 所示,两个激光发射器以固定夹角 α 发射激光条纹,在目标表面相交形成特征几何结构。由激光发射点(O_l)、激光发射角度的角平分线方向(X_l 轴)和垂直于 X_l 轴且平行于标定板平面(Z_l 轴)组成光平面坐标系 $O_l-X_l Y_l Z_l$,形成三角形交点结构。

2) 相交线约束条件

如图 4 所示,两个垂直排列的激光投射器在同一高度将平行条纹投射于水平面,形成 xy 平面。条纹间距对应平移距离 t ;旋转其中一个发射器至两条条纹相交,测得旋转角 ε ,得到一个光平面上的点 (X_l, Y_l, Z_l) 与另一

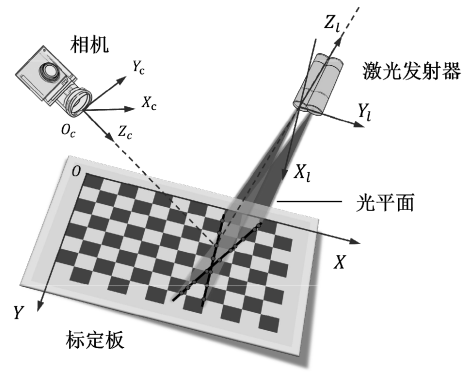


图 3 光平面自动标定原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the automatic light plane calibration principle

个光平面上的点 (x_l, y_l, z_l) 的转换关系。

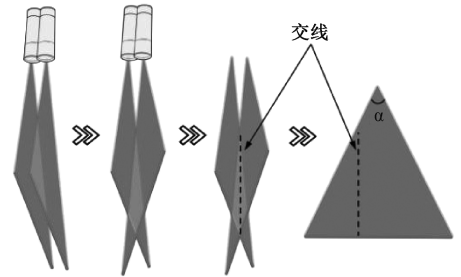


图 4 激光条纹旋转形成的交线

Fig. 4 Intersection line formed by laser stripe rotation

在三维空间中,激光条纹在 xy 平面上的交点位于两光平面交线 L 下端。交线 L 在 $X_l O_l Z_l$ 平面的方程为:

$$X_l = -\frac{t}{\tan \varepsilon} \quad (4)$$

平行于未旋转光平面的发射角边界定义为:

$$Z_l = \pm \frac{X_l}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

投影位置不变,在与 xy 平面平行的交线 L 高度范围内存在第三约束平面,该平面内激光条纹交点必位于交线 L 上。在不改变长度的情况下,所有条纹点被约束在单个激光发射器定义的平面三角形内,如图 5 所示,两条激光条纹的 4 个端点位于该三角形两侧。

4 个条纹端点和 1 个交叉点未知,需至少 5 个方程求解。利用平面距离公式及已知点间距 l_k , 确定参数。

$$(X_{li} - X_{lj})^2 + (Z_{li} - Z_{lj})^2 = l_k^2 \quad (6)$$

式中: $i, j, k = 1, 2, \dots, 5, i \neq j$; (X_{li}, Z_{li}) 与 (X_{lj}, Z_{lj}) 为端点和交点坐标。

所有条纹点位于第三约束平面内。基于条纹斜率与距离公式可推导其他点坐标,将点云转换至各自光平面

坐标系,获得激光条纹空间分布点云。

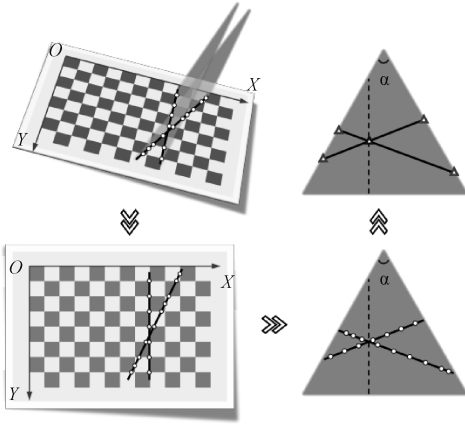


图 5 激光条纹长度约束示意图

Fig. 5 Schematic of laser stripe length constraint

3) 特征点提取

为精确获取激光条纹点云分布,将棋盘格标定板置于测量空间作为“第三平面”捕获激光条纹图像。通过单应性矩阵与相机内参,计算标定板相对于相机坐标系的外参。提取条纹中心像素坐标并转换至相机坐标系,基于光路反投影计算激光线与标定板的交点,获得条纹点云三维坐标及实际长度。该方法通过集成几何约束、坐标变换与特征提取,实现无人工干预的光平面标定,显著提升标定效率。

4) 参数求解

据距离公式与空间变换关系,求得激光条纹点云在光平面坐标系 $O_l-X_lY_lZ_l$ 与相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 中的点云坐标,建立刚体变换矩阵 M_3 。

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_3 \mathbf{B} \quad (7)$$

式中: \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 分别为两坐标系下的点云坐标矩阵。

为提高矩阵求解精度,先计算点集中心点^[25]保证 M_3 准确性。

$$\boldsymbol{\mu}_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_A^i, \boldsymbol{\mu}_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_B^i \quad (8)$$

式中: N 为坐标点数; \mathbf{P}_j^i 为坐标值。

三维协方差矩阵 \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^N (\mathbf{P}_A^i - \boldsymbol{\mu}_A) (\mathbf{P}_B^i - \boldsymbol{\mu}_B)^T \quad (9)$$

对 \mathbf{H} 进行奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 得到 3 个正交矩阵 \mathbf{U} 、 \mathbf{S} 与 \mathbf{V} , 旋转矩阵 \mathbf{R}_l 和平移向量 \mathbf{t}_l 关系如下:

$$\begin{cases} [\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}] = \text{SVD}(\mathbf{H}) \\ \mathbf{R}_l = \mathbf{V}\mathbf{U}^T \\ \mathbf{t}_l = -\mathbf{R}_l \cdot \boldsymbol{\mu}_A + \boldsymbol{\mu}_B \end{cases} \quad (10)$$

根据转换矩阵 M_3 可得光平面坐标系中 $X_lO_lZ_l$ 面在

相机坐标系的表达式如下:

$$\begin{cases} A_1x_{c1} + B_1y_{c1} + C_1z_{c1} + D_1 = 0 \\ A_2x_{c2} + B_2y_{c2} + C_2z_{c2} + D_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

转换至相机坐标系中。光平面即为 $X_lO_lZ_l$ 面,通过确定相机坐标系下该平面的方程参数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 , 完成光平面的标定。

为确保条纹中心逆光投影准确,标定过程采用最大似然估计 (maximum likelihood estimation, MLE) 求解畸变参数并优化相机模型。假设采集 n 张棋盘格目标图像,每张图像包含 m 个点,采用 MLE 最小化重投影误差。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|x_{ij} - x'_{ij}(M, k_1, k_2, R_i, t_i, X_j)\| \quad (12)$$

式中: x_{ij} 是第 i 张图像中第 j 个点的观测像素坐标; x'_{ij} 是投影得到的像素坐标三维特征点在像素坐标; k_1 与 k_2 为径向畸变系数。列文伯格-马夸尔特 (Levenberg-Marquardt, LM) 算法迭代, k_1 与 k_2 初值设定为 0, 收敛得稳定近似值。

至此,相机外参与光平面标定集成,所有参数通过单组图像获取,实现自动同步标定。另外,增加交叉条纹数量可进一步提升精度。

完成标定系统可基于交叉结构光实现测量与三维重建。测量时光平面随机机械臂运动扫掠物体,工业相机连续采集表面条纹图像。经畸变校正后提取条纹中心像素并转换至相机坐标系,基于光路反投影计算激光线与光平面交点生成的三维点云。将其点云转换至世界坐标系,结合物体位移与曝光间隔重建完整三维点云,实现产品检测与全尺寸三维测量。

2 标定与三维重建算法

2.1 特征点提取与多曝光融合

为扩展测量动态范围^[26]并为后续激光条纹处理提供高质量输入,本文采用双曝光策略,分别设置曝光时间 1 000 和 10 000 μs ,建立对应的图像质量评价指标,并通过多曝光融合算法^[27]进行处理。

先将采集的 RGB 条纹图像转换为单通道灰度图像。为抑制噪声同时保留边缘细节,采用侧窗滤波 (side-window filtering, SWF)^[28]滤波方法消除条纹信号中的虚假极值。利用基于最大类间方差的自适应阈值分割方法实现图像二值化,提取具有清晰形态轮廓、均匀强度分布和最小背景干扰的激光条纹。

本文改进基于主成分分析 (principal component analysis, PCA) 的中心提取方法,快速提取激光条纹的亚像素级中心点,显著降低处理时间,保持鲁棒性,图 6 验证该方法的有效性。

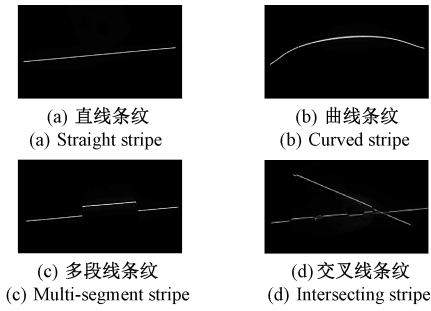


图 6 算法提取效果

Fig. 6 Extraction results using the proposed algorithm

2.2 机械臂协同控制策略

本文选用遨博(AUBO)公司 AUBO-i7 型号六自由度机械臂作为位移模块(重复定位精度为 ± 0.03 mm),构建机械臂辅助线结构光测量系统。系统需配备驱动环境与控制软件,通过上位机与机械臂控制器的通信执行运动控制与数据采集。软件数据传输流程如图 7 所示。

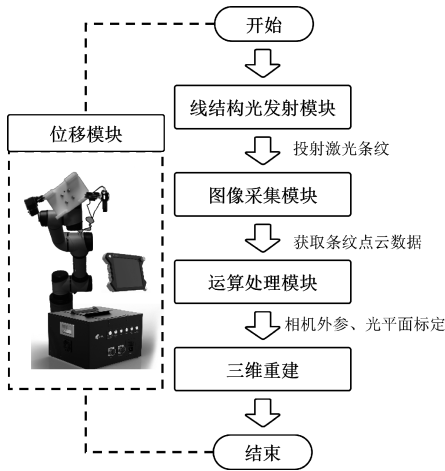


图 7 系统模块操作流程与功能

Fig. 7 The operation sequence and functions

如图 8 所示,系统控制与数据处理单元运行主机完成,执行图像采集、系统标定和三维重建任务。运动控制由机械臂交互软件平台实现;CloudCompare 用于点云可视化。该软硬件协同配置支持实时控制与自动化标定及三维重建。

测量系统由测量单元和控制单元组成。完成系统标定实验后,可进行三维重建与数据分析。系统标定是重建的关键环节,其内参和外参精度直接决定测量精度。正式测试前需先完成相机内参标定,再进行机械臂安装与运动学标定。

2.3 相机与光平面同步标定策略

该标定方法预处理包括相机内参标定和交叉激光角度测量,确保结果准确性。

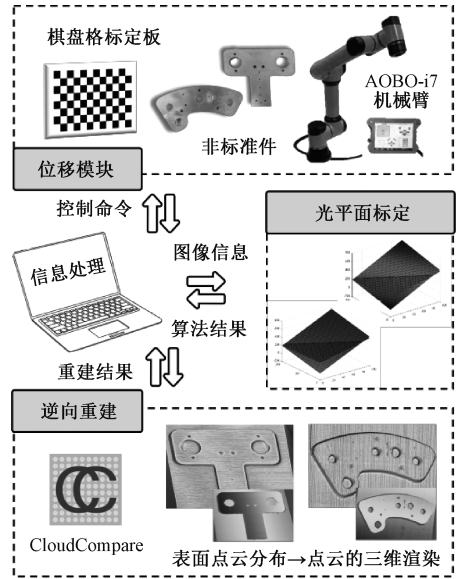


图 8 软件数据传输流程

Fig. 8 Software data transmission workflow

如图 9 所示,标定实验先采集任意姿态的棋盘格图像。前 15 幅用于相机内参标定,后 5 幅(由机械臂搭载相机采集)及对应激光条纹图像用于联合标定。

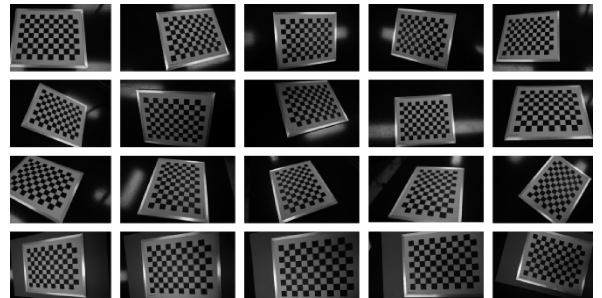


图 9 图像采集

Fig. 9 Image acquisition setup

经 15 张棋盘格图像标定,相机标 M_1 定使用张正友方法,重投影误差为 0.18 pixel。通过机械臂搭载相机采集多组位姿图像,实现相机与机械臂坐标系的手眼标定。标定参数包括相机内参矩阵、相机-机械臂坐标系转换矩阵 M_4 及径向畸变参数 k_1 与 k_2 。

$$M_1 = \begin{bmatrix} 2100.332 & 0 & 814.82 \\ 0 & 2101.863 & 618.26 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0.917 & 0.151 & -0.368 & 70.432 \\ 0.082 & 0.835 & 0.545 & -23.353 \\ 0.389 & -0.530 & 0.754 & 19.367 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$k_1 = -0.0263, k_2 = 0.0886 \quad (15)$$

激光发射器孔径先进行共轴调整,随后调节双投影角度使激光条纹垂直入射水平面。形成的条纹夹角等同于光平面间二面角,可直接测量。本实验设置交叉角度为 $28^\circ \pm 0.5^\circ$ 。固定激光发射器与工业相机相对位置后,系统即可进行扫描测量。

3 实验与分析

3.1 不同材质标定精度对比

为验证所提标定方法在不同环境条件下的可行性,选取氧化铝与纸质两种材质标定板进行对比实验。

第1组实验将氧化铝标定板置于激光条纹投影区(图10(a)),图像采集与标定执行后,得结果如图10(c)所示。两个光平面方程为:

$$\begin{cases} 2.606X_{c1} - 0.1977Y_{c1} - Z_{c1} + 340.8 = 0 \\ 5.623X_{c2} + 2.3251Y_{c2} - Z_{c2} + 353.6 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

测得光平面夹角 28.29° ,与参考值 28° 高度一致 ($\delta = 0.29^\circ$),证实标准氧化铝标定板的高标定精度。

第2组实验改用纸质材料标定板(图10(b)),流程同上,结果如图10(d)所示,两个光平面方程为:

$$\begin{cases} 2.579X_{c3} - 0.2109Y_{c3} - Z_{c3} + 341.2 = 0 \\ 5.683X_{c4} + 2.3533Y_{c4} - Z_{c4} + 353.2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

测得两光平面二面角为 28.72° ,与参考值存在一定偏差 ($\delta = 0.72^\circ$),虽精度较氧化铝板有所降低,但仍可满足低精度应用需求。

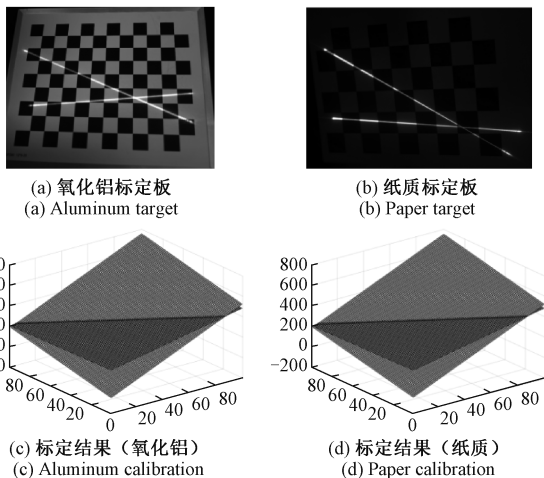


图10 实验标定图像与结果

Fig. 10 Calibration results

性能下降源于纸质标定板材料局限性:边缘反射率低与基底过薄导致亚表面散射,产生条纹伪影。多曝光融合虽消除大部分噪声,残余伪影仍影响精度。可通过

延长曝光时间或选用低透光率厚纸基材料提升精度。实验结果验证所提标定方法在多材质环境下的稳定性与有效性,同时表明通过优化成像参数或改进标定板材质,可进一步提升标定精度。

3.2 非标件逆向工程精度评估

系统标定完成并达到足够精度,可直接用于目标工件的三维重建与尺寸测量。本文针对两种非标准铝合金零件(图11)开展逆向工程实验,评估系统性能。

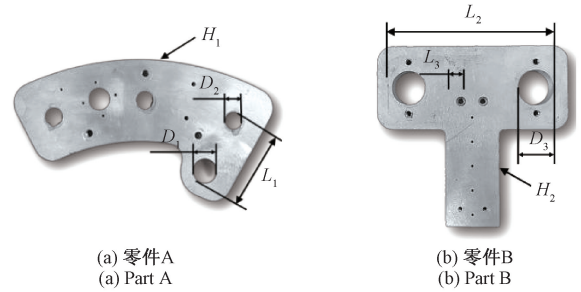


图11 非标准铝合金测试件

Fig. 11 Non-standard aluminum test components

基于系统标定结果,机械臂控制激光条纹沿被测零件边缘位置扫掠,工业相机聚焦感兴趣区域,启动自动三维重建程序:

- 1) 设定总扫描循环次数为 n ;
- 2) 每周期分别采集两组激光条纹图像,曝光时间分别为 $1\ 000$ 和 $10\ 000\ \mu\text{s}$;
- 3) 控制机械臂水平方向平移 $1\ \text{mm}$;
- 4) 每个循环结束后执行终止指令;
- 5) 重复步骤2)~4),直到完成 n 个周期。

交叉结构光系统分别扫描两零件。图像经融合预处理后,依次进行灰度化、噪声滤除、分割及亚像素中心线提取,以重建零件表面点云。

每个零件进行10次重复试验,从两条激光扫描所得点云中提取关键位置几何特征。使用精密仪器手动测量参考尺寸,精密仪器包括针式千分尺(精度 $\pm 0.001\ \text{mm}$)、平面度测量仪(精度 $\pm 0.001\ \text{mm}$)、同轴度测量仪(精度 $\pm 0.001\ \text{mm}$),参考尺寸包括孔径 D_1 、 D_2 和 D_3 ,孔间距 L_1 、 L_2 和 L_3 及厚度 H_1 和 H_2 。重建尺寸与参考值比对获得最大偏差 ($|\text{测量尺寸} - \text{参考尺寸}|_{\max}$) 及误差率,逆向工程结果分别如图12和13所示,展示重复测量的原始结果与变化趋势。

为验证测量精度,将每个零件的重建尺寸与参考尺寸进行逐点比对,统计平均误差、标准差和最大绝对误差,如表1所示。实验平均尺寸误差低于 $0.25\ \text{mm}$,最大偏差不超过 $0.5\ \text{mm}$,峰值误差率低于 2.67% 。

系统具备较高的动态范围,可同时捕获高反射表面与边缘特征而避免过曝。铝合金表面测量中,系统有效

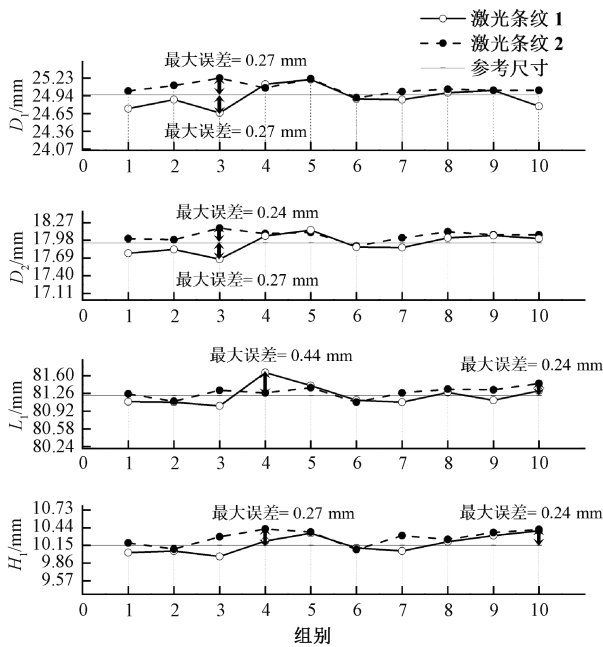


图 12 零件 A 的逆向重建结果

Fig. 12 Reverse reconstruction of part A

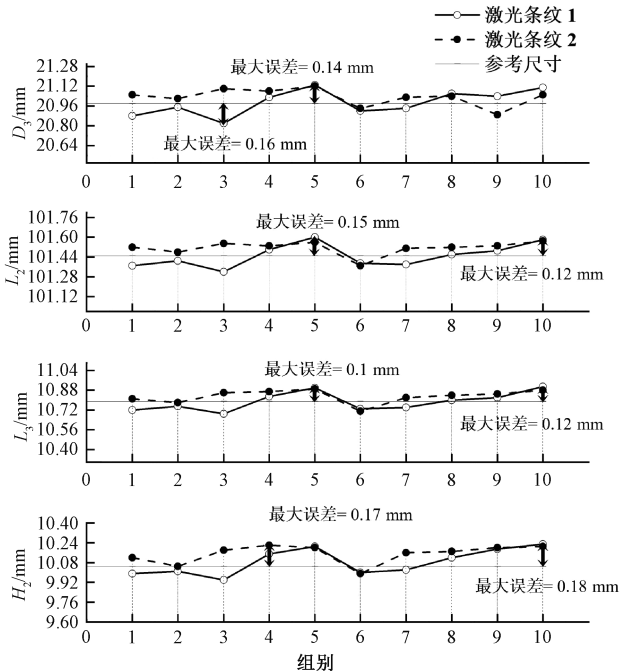


图 13 零件 B 的逆向重建结果

Fig. 13 Reverse reconstruction of part B

抑制高反光畸变并提升条纹清晰度。点云可视化结果(图 14(a)、(b))及三维渲染模型(图 14(c)、(d))均显示重建几何形貌与实物高度一致。

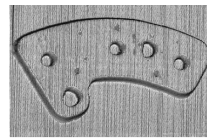
实验结果在尺寸精度与形貌细节上与实测高度吻合,验证该系统在逆向工程中实现高精度、高动态范围三

维测量能力。

表 1 关键指标统计

Table 1 Key indicators statistics

基础规格	参考尺寸/ mm	平均尺寸/ 误差/mm	标准差/ mm	方差/ mm ²	最大偏 差/mm	峰值误差 率/%
D_1	24.96	0.04	0.14	0.019 6	0.3	1.2
D_2	17.94	0.06	0.15	0.022 5	0.27	1.5
D_3	20.98	0.07	0.11	0.012 1	0.15	0.72
L_1	81.22	0.21	0.21	0.044 1	0.44	0.54
L_2	101.45	0.09	0.11	0.012 1	0.15	0.15
L_3	10.79	0.06	0.07	0.004 9	0.12	1.11
H_1	10.15	0.09	0.12	0.014 4	0.27	2.66
H_2	10.05	0.08	0.09	0.008 1	0.18	1.79



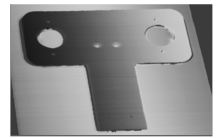
(a) 表面点云分布 (零件 A)
(a) Point cloud (Part A)



(b) 表面点云分布 (零件 B)
(b) Point cloud (Part B)



(c) 点云的三维渲染 (零件 A)
(c) 3D rendering (Part A)



(d) 点云的三维渲染 (零件 B)
(d) 3D rendering (Part B)

图 14 点云可视化与三维渲染模型

Fig. 14 Point cloud visualization and 3D rendering model

3.3 对比分析

相同硬件系统条件下,以传统交比不变结构光测量系统为例,传统结构光标定流程依赖靶标重定位,每组标定需采集多幅棋盘格图像,人工辅助改变靶标姿态至少 20 次以完成光平面标定,多次人工干预引入较大的不确定性与误差累积。相较下,本文方法仅通过单组图像实现相机与光平面参数同步求解,无需依赖靶标重定位与多姿态标定。

基于传统结构光标定方法典型性能指标^[29-31],从误差、流程复杂度与适应性 3 个维度进行对比分析,结果如表 2 所示。

表 2 性能指标对比

Table 2 Comparison of performance indicators

对比指标	本文方法	传统方法
标定流程	无人工干预	需多次调整靶标
光平面标定误差/mm	0.011 (氧化铝板)	0.013~0.145
三维重建平均误差/mm	<0.25	0.1~0.5
对非理想标定板的适应性	纸质板仍可用	对靶标要求苛刻

传统方法的误差范围本身包含多次成像与机械移动产生的误差累积效应,本文提出方法避免靶标重定位过

程,降低系统误差来源,提高测量系统的稳定性与适应性。

4 结 论

本文提出的标定方法通过单组图像实现相机与光平面参数同步求解,有效克服传统方法效率低、误差累积的局限。实验表明,尺寸误差控制在 ± 0.5 mm以内,平均三维重建精度达 ± 0.25 mm,峰值误差率低于2.67%,具备良好的抗干扰能力和动态范围。该系统在工业检测、逆向工程等领域具有应用潜力,后续可通过深度学习、动态补偿和边缘计算进一步提升算法鲁棒性、降低硬件依赖并优化实时性能,为非接触三维测量提供更高效率的自动化解决方案。

参考文献

- [1] 郑小钰,董祉序,杨赫然,等. 基于结构光测量技术的DMD自适应掩膜生成[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 148-155.
ZHENG X Y, DONG ZH X, YANG H R, et al. DMD adaptive mask generation based on structured light measurement technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (7): 148-155.
- [2] 李天宇,刘昌文,段发阶,等. 线结构光三维形貌测量系统精度影响因素分析[J]. 光学学报, 2024, 44(21): 132-144.
LI T Y, LIU CH W, DUAN F J, et al. Analysis of factors influencing accuracy in line-structured light three-dimensional surface measurement systems [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44 (21): 132-144.
- [3] YANG G W, WANG Y Z. Three-dimensional measurement of precise shaft parts based on line structured light and deep learning [J]. Measurement, 2022, 191: 110837.
- [4] 李双,王中宇. 一种面结构光三维测量系统的不确定度分析评定[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 58-66.
LI SH, WANG ZH Y. Uncertainty analysis and evaluation of a surface structured light 3D measurement system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 58-66.
- [5] 孔文,高峰,樊金字,等. 线扫描共聚焦成像技术在生物医学成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 18-26.
KONG W, GAO F, FAN J Y, et al. Application of confocal line scanning imaging technique in biomedical imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 18-26.
- [6] 严飞,吴迪,文杰,等. 基于二值离焦的双目结构光三维测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(18): 108-113.
YAN F, WU D, WEN J, et al. Binocular structured light 3D measurement method based on binary defocus [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46 (18): 108-113.
- [7] ZHANG Z R, YANG M R, QU A J, et al. Metasurface-driven adaptive structured light: Achieving integrated real-time 3D reconstruction and forward ranging in multi-scene[J]. Advanced Science, 2025, 12(39): e07339.
- [8] 姚美如. 航空发动机叶片面型三维视觉测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
YAO M R. Research on 3D vision measurement technology for aeroengine blade surface profile [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [9] SONG L M, LI X Y, YANG Y G, et al. Structured-light based 3D reconstruction system for cultural relic packaging[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2981.
- [10] 苏德尔,高伟达,王新伟,等. 微型化生物医学光学成像系统[J]. 光电工程, 2024, 51(12): 3-29.
SU D ER, GAO W D, WANG X W, et al. Miniaturized biomedical optical imaging systems [J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(12): 3-29.
- [11] CUI B, TAO W, ZHAO H. High-precision 3D reconstruction for small-to-medium-sized objects utilizing line-structured light scanning: A review [J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4457.
- [12] LIU Z, SU Z H, WANG M, et al. Computerized characterization of spinal structures on MRI and clinical significance of 3D reconstruction of lumbosacral intervertebral foramen [J]. Pain Physician, 2022, 25(1): E27-E35.
- [13] 王兴政,刘杰豪,韦国耀,等. 面向工业检测的光场相机快速标定研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(5): 1530-1538.
WANG X ZH, LIU J H, WEI G Y, et al. Fast light field camera calibration for industrial inspection [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(5): 1530-1538.
- [14] ZHANG Z Y. A Flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [15] 喻立川,谢彦辉,石静. 基于智能制造的自动化标定系统的研究与实现 [J]. 仪器仪表标准化与计量,

- 2021, (6): 1-4.
- YU L CH, XIE Y H, SHI J. Research and implementation of automatic calibration system based on intelligent manufacturing [J]. *Instrument Standardization & Metrology*, 2021, (6): 1-4.
- [16] YU H T, HUANG Y, ZHENG D L, et al. Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot[J]. *Optik*, 2020, 202: 163656.
- [17] 吴庆华, 邱捷锋, 黎志昂, 等. 基于平面靶标的线结构光视觉传感器机器人手眼标定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(10): 342-349.
- WU Q H, QIU J F, LI ZH ANG, et al. Hand-eye calibration method of line structured light vision sensor robot based on planar target[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(10): 342-349.
- [18] LI W G, ZHONG Y P, LIU T, et al. Efficient and accurate projector calibration method based on phase-shifting method with sinusoidal structured light [J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e15067.
- [19] XING C, HUANG J H, WANG Z, et al. A high-accuracy online calibration method for structured light 3D measurement[J]. *Measurement*, 2023, 210: 112488.
- [20] LI T Y, DUAN F J, FU X, et al. A novel method for 3D reconstruction in tight and restricted space based on improved line-structured light[J]. *Measurement*, 2023, 216: 112930.
- [21] LI C F, XU X P, REN Z, et al. Research on calibration method of line-structured light based on multiple geometric constraints [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10): 5998.
- [22] WANG Y P, HE S Y, FEI Y F, et al. Motion-error-free calibration of event camera systems using a flashing target[J]. *Optics Express*, 2024, 32(15): 26833-26845.
- [23] 范鹏翔, 陈天飞, 孙丽君, 等. 基于姿态筛选的单目结构光标定方法 [J]. *现代制造工程*, 2024, (10): 123-129, 145.
- FAN P X, CHEN T F, SUN L J, et al. Pose-based monocular structured light calibration method [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2024, 529 (10): 123-129, 145.
- [24] 关玮童, 罗哉, 江文松, 等. 基于多目视觉的立体靶标位姿测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46 (4): 218-227.
- GUAN W T, LUO Z, JIANG W S, et al. A stereoscopic target position measurement method based on multi-camera vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46 (4): 218-227.
- [25] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-d point sets [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987(5): 698-700.
- [26] ZHANG S, YAU S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48 (3): 033604-033604.
- [27] RAO L, DA F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.
- [28] GONG Y, LIU B Z, HOU X X, et al. Sub-window box filter[C]. 2018 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP). IEEE, 2018: 1-4.
- [29] 许丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 306-313.
- XU L, ZHANG ZH J. Error transmission analysis of structured light measurement systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 306-313.
- [30] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 7-17.
- ZHANG X, ZHANG J. Review of line structured light calibration methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 7-17.
- [31] 冯创, 罗明灵, 邓高旭, 等. 基于参考标准件的多结构光三维测量方法 [J]. *中国激光*, 2024, 51 (17): 174-183.
- FENG CH, LUO M L, DENG G X, et al. Multi-structured light 3D measurement method based on reference standard components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(17): 174-183.

作者简介



孙江宏(通信作者), 博士, 北京信息科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为机械设计、机器人测量及机器视觉技术。

E-mail: 278796059@qq.com

Sun Jianghong (Corresponding author), Ph. D. . Now he is a professor and M. Sc. supervisor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include mechanical design, robot measurement and machine vision technology.