

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514575

基于高精度转台的双目结构光点云 多视角配准路径规划方法*

朱君益, 蔡万源, 毛义梅, 陶 卫

(上海交通大学自动化与感知学院 上海 200240)

摘 要:针对工业现场固定工件的批量三维重建中的效率问题,提出了一种融合双目条纹结构光与高精度转台的配准优化方法以及扫描路径的规划策略,以解决传统扫描方法中配准效率低下、扫描次数冗余及重叠率不足导致的精度下降问题。该方法通过预设工件固定位置消除初始位姿差异对配准结果的影响,依托高精度转台实现多视角点云的高效粗配准,再结合迭代最近点(ICP)算法完成精配准。首先构建被测工件三维点云模型和双目条纹结构光扫描仪的三视锥模型,完成系统参数标定,为配准精度与路径规划提供基础;再建立转台旋转角度与扫描视场的映射关系,采用射线投射法模拟真实光线投射到目标点云表面精准计算可视点云,明确不同角度位姿下的有效扫描区域;最终基于该映射关系,求解得到保证重叠率下完成工件完整三维重建所需的最少扫描次数及对应最优旋转角度,实现扫描路径优化。相比传统均匀旋转点云扫描方法,该方法对工件 1 的多视角平均配准时间缩短至 24.2 s,效率提升约 43%,扫描次数减少 3 次;对工件 2 的平均配准时间降至 58.2 s,效率提升约 40.5%,扫描次数减少 7 次。配准精度上,两工件的平均误差分别达到 0.011 4 和 0.008 2 mm,较传统方法精度提升幅度分别为 64.64% 和 81.62%。该方法在保证精度的同时提升了扫描效率,适用于工业现场固定位置工件批量快速检测。

关键词: 双目结构光;多视角点云配准;路径规划;高精度转台

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Scanning path planning method for multi-view registration based on binocular structured light and high-precision turntable

Zhu Junyi, Cai Wanyuan, Mao Yimei, Tao Wei

(School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the efficiency problem in batch 3D reconstruction of fixed workpieces in industrial sites, a registration optimization method integrating binocular fringe structured light, a high-precision turntable and a scanning path planning strategy is proposed to solve the problems of low efficiency, redundant scanning time and precision degradation caused by the insufficient overlap rate of traditional scanning methods. The method eliminates the interference of initial pose differences on registration results by presetting the fixed position of the workpieces, which achieves the efficient coarse registration of multi-view point clouds with the high-precision turntable and completes the fine registration by iterative closest point (ICP) algorithm. Firstly, a 3D point cloud model of measured workpieces and tri-pyramid model of binocular fringe structured light scanner are constructed, and the system parameter calibration is completed to improve the registration accuracy and path planning. Then, the mapping relationship between the turntable rotation angle and the scanning field of view is established. The ray casting method is used to simulate the projection of real light onto the surface of target point cloud, accurately calculate the visible point cloud, and compute the effective scanning area under different angular poses. Finally, based on this mapping relationship, the minimum number of scans required to complete the full 3D reconstruction of workpieces with guaranteed overlap rate and the corresponding optimal rotation angle are solved to realize scanning path optimization. Compared with the traditional uniform rotation point cloud scanning method, this method shortens the average multi-view registration time of workpiece1 to 24.2 s, improves the efficiency by about 43%, reduces the number of scans by 3, and achieves an average error of 0.011 4 mm with a precision

收稿日期:2025-10-13 Received Date: 2025-10-13

* 基金项目:国家自然科学基金(52475562)项目资助

improvement of 64.64%. For workpiece 2, the average registration time is reduced to 58.2 s, efficiency is improved by about 40.5%, the number of scans is reduced by 7, the average error is 0.008 2 mm, and precision is improved by 81.62%, respectively. In conclusion, this method improves the scanning efficiency while ensuring the high precision, which is suitable for the batch rapid detection of fixed-position workpieces in industrial sites.

Keywords: binocular structured light; multi-view point cloud registration; path planning; high-precision turntable

0 引言

在当前的制造业生产中,随着对产品品质要求的持续提升,对流水线生产零部件的质量检测需求日益增长。传统的接触式检测方法已经难以适应现代制造业对高效、高精度检测的规模化需求。基于结构光的测量方法凭借其非接触性^[1]、响应快速、测量精度高等优势^[2-3],在工件表面缺陷检测^[4-5]、文物数字化记录^[6]及逆向工程^[7]等领域得到了非常广泛的应用^[8-10]。其中,基于相移多频条纹的双目结构光检测技术,因具备高精度、检测速度快且覆盖全面等特点,被应用于多种高精度测量场景。

然而,单次测量只能获取物体表面的局部信息。为重建完整的360°点云模型,需通过变换被测物位姿,从多个视角采集不同区域的点云数据,经配准融合后,形成完整三维模型,以供后续质量检测、尺寸测量等任务。

点云的多视角配准通常分为粗配准和精配准两个核心步骤。典型的粗配准方法主要包含3类:1) 基于标志点的配准策略。该方法通过在转台或物体表面布置特定大小与排列的标志点,并依据其空间几何关系进行匹配,从而得到不同视角间工件姿态变换的旋转平移矩阵^[11]。该方法在小角度条件下可以实现快速、准确匹配,但是在旋转角度过大的情况下存在标志点的误匹配;王洪伟团队^[12]采用编码圆环标志点可以通过将格雷码和标志点融合,实现标志点之间的准确配对,但是在航空叶片的测量中,要求测量精度达到0.01 mm,但标志点厚度通常>0.05 mm,此时标志点所带来的测量误差将不能满足零件的测量要求^[13]。同时,标志点黏贴在物体表面可能导致该处的物体表面点云信息丢失(如复杂物体表面的特征被标志点遮盖)。2) 基于点云特征因子的粗配准算法,如快速点特征直方图(fast point feature histograms, FPFH)^[14]和基于一致性四点集(4-point congruent sets, 4PCS)^[15]。这些点云粗配准方法在表面信息比较复杂时会存在计算时间过长的问题,因此在进行大批量的点云配准时,基于特征的方法的配准时间相比其他方法会比较冗长。龚国强等^[16]先通过内在形状签名算法(intrinsic shape signature, ISS)提取特征再通过 FPFH 构建特征直方图寻找匹配点对以节省特征配准时间。但是该方法存在设置标记点过近导致的误匹配现象。3) 将结构光扫描仪安装在机械臂终端,通过机械臂让其沿设定路径扫描

物体全貌。该方法通常应用于大型工件测量场景。Dibari 等^[17]通过自动引导车(automated guided vehicle, AGV)结合机械臂配合3D传感器的联合标定提供良好的点云配准初始位姿。在点云多视角配准过程中,下一视角的选择通常是一个复杂问题^[18]。对于不规则工件,在虚拟环境中规划机械臂路径时,需更避免碰撞与考虑视角盲区,导致计算复杂度显著增加。此外,迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法作为常使用的点云精配准算法^[19],存在初始位姿敏感、容易陷入局部最优的问题^[20]。因此,ICP 精配准前的粗配准点云,不仅需要确保粗配准的精度,还需要保证两片相邻点云之间的重叠率不低于阈值,否则会影响最终配准精度^[21]。

针对点云多视角配准的效率和精度提升的需求,提出了基于高精度转台^[22]的点云多视角配准路径规划方法。首先,通过将工件固定在高精度转台的预设位置,保证初始位姿稳定和旋转路径的可重复性。利用标定板完成双目相机与投影仪的联合标定,构建三视锥(Tri-pyramid)模型以计算目标点云的可视区域;同时,通过标定板确立转台转轴在相机坐标系下的映射关系。在此基础上,依据转台转轴在相机坐标系下的直线方程,计算旋转角度及各个视角点云预测的变换矩阵,结合目标点云经旋转变换后的可视区域,规划出相邻视角满足重叠率约束的多视角配准路径,以提升配准效率。最后,基于规划的最少采集视角路径获取点云和计算粗配准变换矩阵,并通过改进的 ICP 精配准算法实现点云的全貌配准。该方法通过对点云配准精度及效率的测量实验,验证了所提方法在提升点云多视配准效率与精度方面的有效性。

1 无标志点快速点云配准系统

1.1 双目条纹结构光工作原理

双目条纹结构光测量系统由投影仪和双目相机构成,如图1所示。

1.2 双目相机标定

双目相机标定确定左右相机的内外参,内参包含相机的光心、焦距以及镜头的畸变参数,外参为右相机坐标系相对于左相机(主相机)坐标系的位姿变换矩阵,包含旋转与平移部分。

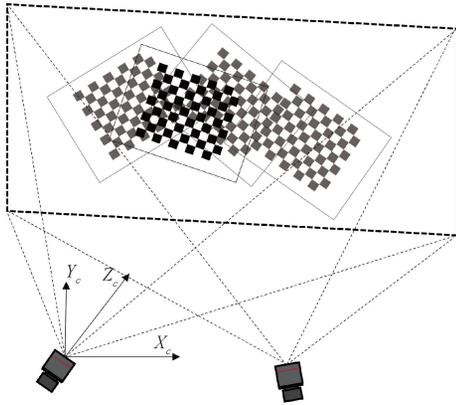


图1 相机标定
Fig. 1 Camera calibration

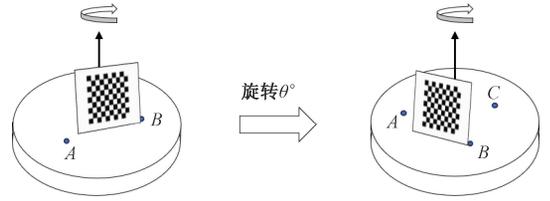


图3 转台标定
Fig. 3 Turntable calibration

1.3 投影仪标定

在双目条纹结构光完成被测物表面三维点云重建的过程中,无需调用投影仪位姿展开辅助定位。但该方法所提基于高精度转台的三维点云多视角配准路径规划方法中,需依托三视锥模型预测并还原三维空间可视点云,而该模型建立需要联合构建双目相机与投影仪组合的三视锥,因此需要对投影仪在左相机坐标系下的变换矩阵进行标定。

该方法采用的投影仪标定方法为逆向相机法,如图2所示。投影仪的模型可以看作是相机的逆向模型,因此通过类相机标定方法对投影仪进行标定^[23]。

通过将标定板固定在转台上,使用双目相机获取不同旋转位姿下的标定板特征点在左相机坐标系下的三维坐标;基于同一特征点在旋转变换中产生的同名点集合 $P = \{P_1^1, P_1^2, \dots, P_1^m, P_2^1, P_2^2, \dots, P_2^m, \dots, P_n^m\}$ (n 为标定板特征点数, m 为标定板的空间位姿数), 和标定板相对转台的旋转不变性,拟合出同名点的空间圆轨迹并计算出转轴的三维空间直线方程。具体计算步骤为:

- 1) 同名点拟合空间圆,拟合圆心 $C_i (i \leq n)$, 以及空间圆的平面方程。
- 2) 采用随机抽样一致性算法 (random sample consensus, RANSAC) 进行迭代优化,剔除超出阈值的异常圆心,同时剔除法向量和拟合直线夹角误差超出阈值的异常平面及其对应圆心,最终输出转轴直线方程,转台标定结果如图4所示(直线为拟合直线,圆点为圆心坐标)。

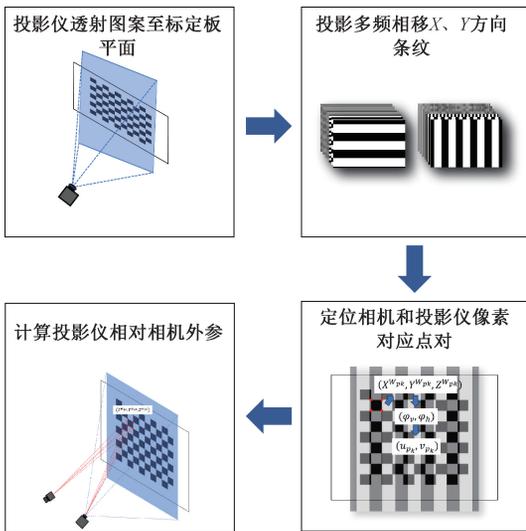


图2 投影仪标定流程
Fig. 2 Projector calibration

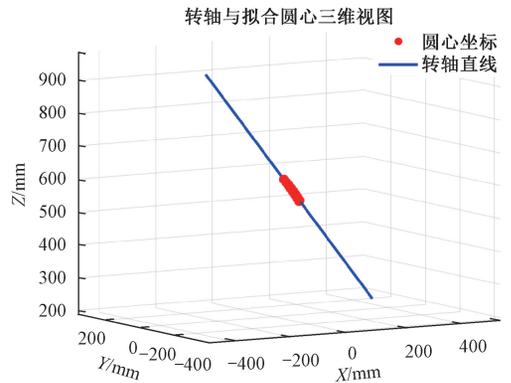


图4 拟合圆心和拟合转轴结果
Fig. 4 The fitted circle center and rotation axis

$$L(t) = t \cdot \mathbf{V}_{axis} + O, \quad t \in \mathbf{R} \quad (1)$$

式中: O 为旋转参考点。

1.5 点云旋转粗配准原理

该方法采用高精度转台实现点云粗配准,被测工件在双目相机坐标系下采集的点云变换与转台在该坐标系下的变换一致。

转台的粗配准方法将转台的初始位姿采集的第1个视角的点云作为参照基准,对其余视角的点云进行绕转

1.4 基于标定板的高精度转台转轴标定

该方法采用基于标定板旋转不变性的转台 Z 轴标定方法^[24],具体标定流程如图3所示。

轴的反向旋转平移变换,将采集的点云变换到设定的初始位姿,得到多视角点云配准的粗配准位姿。点云的旋转变换关系如图5所示, ΔABC 经过旋转至 $\Delta A'B'C'$ 处。

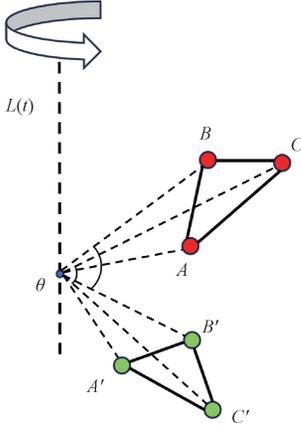


图5 点云旋转变换示意图

Fig. 5 The transformation of point cloud coordinate

已知在左相机坐标系 O_c 中有:

$$\Delta ABC \cong \Delta A'B'C' \quad (2)$$

且已知点云是绕轴 $L(t)$ 旋转,旋转角度为 θ° 。根据罗德里格斯公式,即:

1) 归一化方向向量,即:

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{V}_{axis}}{\|\mathbf{V}_{axis}\|} \quad (3)$$

2) 辅助变量,即:

$$\begin{cases} c = \cos \theta \\ s = \sin \theta \\ v = 1 - \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

3) 罗德里格斯公式旋转矩阵 \mathbf{R} ,即:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + s \cdot \mathbf{K} + v \cdot \mathbf{K}^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}^2 = \begin{bmatrix} k_x^2 - 1 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_x k_y & k_y^2 - 1 & k_y k_z \\ k_x k_z & k_y k_z & k_z^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} k_x^2 v + c & k_x k_y v - k_z s & k_x k_z v + k_y s \\ k_x k_y v + k_z s & k_y^2 + c & k_y k_z v - k_x s \\ k_x k_z v - k_y s & k_y k_z v + k_x s & k_z^2 v + c \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 罗德里格斯公式平移矩阵 \mathbf{t} ,即:

$$\mathbf{t} = (\mathbf{I} - \mathbf{R}) \mathbf{O} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

5) 齐次变换矩阵 \mathbf{M} ,即:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_x^2 v + c & k_x k_y v - k_z s & k_x k_z v + k_y s & t_x \\ k_x k_y v + k_z s & k_y^2 + c & k_y k_z v - k_x s & t_y \\ k_x k_z v - k_y s & k_y k_z v + k_x s & k_z^2 v + c & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2 点云路径规划方法

2.1 目标点云获取

本文选用的点云采集装置为搭建的双目条纹结构光检测系统。核心设备型和参数为:海康威视相机 CH120-10UM,像元尺寸大小 $2.5 \mu\text{m}$,分辨率 4096×3000 ,配套镜头焦距 12 mm ,工作距离 500 mm ;投影仪芯片型号为 DLP4710,分辨率 1920×1080 ,微镜尺寸 $5.4 \mu\text{m}$ 。

标定完成后获取双目条纹结构光检测设备的各项参数。再基于标定所得参数,求解高精度转台的旋转中轴在以左相机为坐标原点的双目条纹结构光世界坐标系下的直线方程。通过旋转轴的直线方程可以快速计算得到点云的粗配准变换矩阵,最后经由 ICP 精配准算法实现点云的三维形貌重建。

2.2 点云多视角配准路径规划

多视角配准路径规划系统的核心模块分为3个部分:双目条纹结构光扫描仪和高精度转台的转轴的联合标定、目标待测点云采集和生成、基于重叠率约束的配准路径规划。具体的流程如图6所示。点云多视角配准方法通常采用旋转12次,单次旋转角度 30° 的均匀旋转策略^[25]。

本方法通过图7的多视角配准方法,完整获得工件三维全貌的点云。结合投影仪和相机标定内外参结果,构建双目结构光扫描设备的三维视锥模型。点云和转台转轴的空间表达式都是基于左相机光心作为坐标原点获得。

2.3 三视锥模型建立

图8为基于高精度转台的点云三维重建扫描仪的工作示意图。该方案通过构建三维结构光扫描被测工件的三维全貌的物理模型,向预先采集的被测工件三维点云投射射线,以模拟真实采集场景,并计算出当前工件的位姿下的可视三维点云部分。通过模拟高精度转台的三维点云全貌扫描过程,实现相邻视角可视部分扫描点云重叠率高于阈值。

2.4 点云重叠率计算

基于转轴标定得到的左相机坐标系三维转轴直线方程,根据罗德里格斯公式设置固定步长,计算得

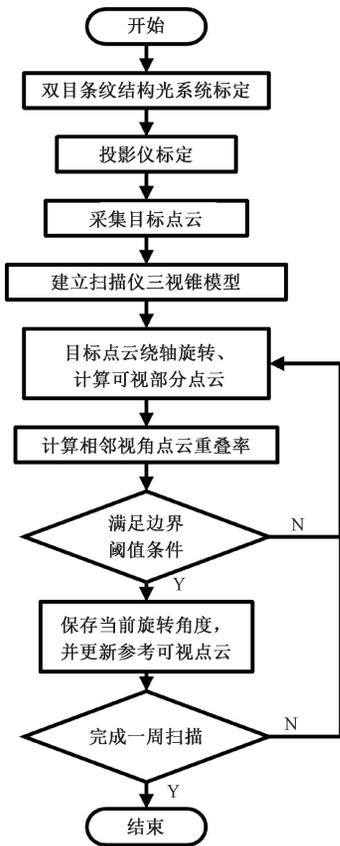


图6 点云路径规划流程

Fig. 6 The process of scanning path planning method

到点云的下一变换的旋转和平移矩阵,并与上一视角的点云进行重叠率计算。基于三视锥模型和空间坐标系的不变,计算出临界阈值的采集旋转角度,记为基于高精度转台的点云全貌采集的路径。计算得到的路径作为实际工件旋转采集的相邻视角点云重叠率保证的依据。

基于体素网格的重叠率计算:

将点云划分为均匀的体素网格,计算两片点云在相同体素中的点数占总体素数的比例,作为重叠率的估计。体素格的长宽高均设置为 $1\text{ mm}^{[18]}$ 。

体素网格计算重叠率步骤为:

1) 在配准后的两片点云下构建统一的体素网格划分,根据两片点云的联合边界按照固定尺寸切分网格。

2) 根据当前网格内的点云的包含情况进行网格的种类标记,可以分为“占据的 (occupied)”和“空闲的 (free)”两种体素网格。其中“占据的”体素网格又可分为 V_A (点云 A 占据着的网格) 和 V_B (点云 B 占据着的网格)。

3) 计算重叠率

重叠的体素为:

$$|V_A \cap V_B| \quad (11)$$

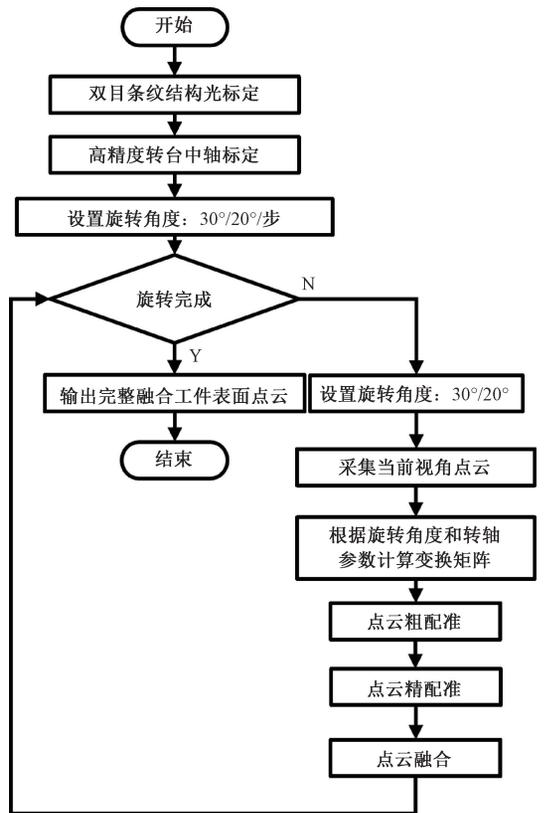


图7 点云多视角配准流程

Fig. 7 The process of the multi-view point cloud registration

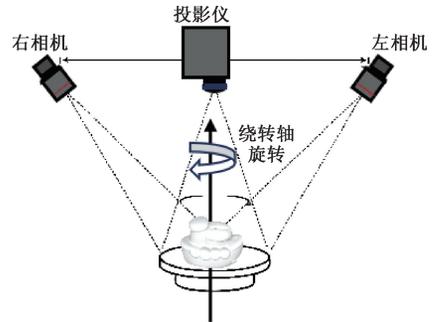


图8 双目条纹结构光三视锥模型

Fig. 8 Tri-pyramid simulated scanner model

体素数目为:

$$|V_A \cup V_B| \quad (12)$$

重叠率计算为:

$$\frac{|V_A \cap V_B|}{|V_A \cup V_B|} \quad (13)$$

在实际双目条纹结构光的工作过程当中,通过投影仪投影多频相移正弦条纹图案,基于双目标定以及极线矫正后的双目相机图像,先通过逐行搜索完成同名点辅助定位,再依托三角测量模型计算点云三维坐标。基于左相机原点测量坐标系建立三视锥模型,通过模拟现实

中的光照情况,向目标点云投射密集射线,使其与目标点云表面的体素格进行碰撞。不同位姿的点云可以得到目标点云 n 个不同的扫描区域 $\{P_w^1, P_w^2, P_w^3, \dots, P_w^n\}$ 。需要说明的是,基于 ICP 的点云配准通常需要待配准点云的重叠率不低于 50%^[26]。为了保证工件旋转过程中点云的重叠率的同时尽可能地增加旋转路径中的工件点云采集的扫描效率,减少多视角点云的配准次数,需要计算相邻视角点云之间的可视部分及重叠率,在保证期望重叠率阈值的条件下,尽可能的降低两片相邻视角点云的重叠率。

通过对目标点云体素化处理,将点云体素分为占用体素格(可见点云)和被遮挡体素格(不可见点云)^[18]。

在进行点云路径规划的计算过程中,由于实际不可见点云(被遮挡体素格点云)对于路径规划的重叠率计算无贡献,属于路径规划的无用信息,因此采用更加严格的体素格筛选条件,具体筛选逻辑如图 9 所示。

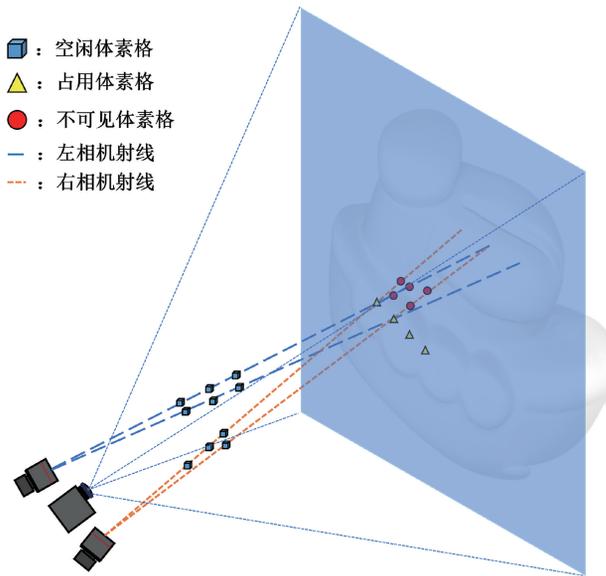


图 9 射线穿透体素格

Fig. 9 Casting ray through voxels

基于射线穿透体素格的点云可视部分计算,实现对真实采集点云的预测。结合二分法计算重叠率,寻找当前视角下满足重叠率阈值的临界角度。迭代计算,最终实现尽可能少的旋转次数得到物体表面全覆盖的扫描的粗配准转台路径。

3 实验验证

3.1 实验系统搭建

方法采用基于双目条纹结构光的扫描仪进行物体表面三维点云的重建,设备如图 10 所示。使用的设备有:

海康威视 CH120-10UM 相机 2 台,像元尺寸大小 $2.5 \mu\text{m}$ 。相机的分辨率 $4\ 096 \times 3\ 000$,镜头焦距为 12 mm 。投影仪芯片型号为 DLP4710,分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 080$,微镜尺寸 $5.4 \mu\text{m}$ 。扫描仪工作距离 500 mm 。使用电机为江云光电 Y100SC06,分辨率为 0.1° 。

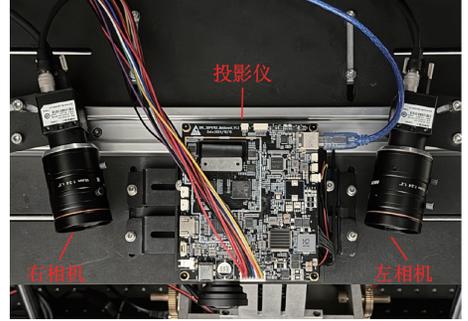


图 10 双目条纹结构光扫描仪

Fig. 10 Binocular structured light scanner

本实验的被测物摆放相对位姿如图 11 所示,为了保证物体全貌在相机的工作画幅下,实验使用的工件尺寸计算步骤,如式(14)和(15)计算得到,工作距离 500 mm 下,水平尺寸 $< 437 \text{ mm}$,垂直尺寸 $< 225 \text{ mm}$ 。

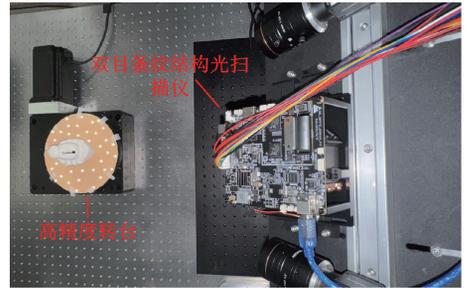


图 11 点云路径规划系统

Fig. 11 Scanning path planning system

水平视场画幅大小为:

$$H_c = \frac{W_{\text{HCMOS}} \cdot d_{\text{workplace}}}{f_{\text{camera}}} = \frac{10.5 \times 500}{12} \approx 437 \quad (14)$$

垂直视场画幅大小为:

$$V_c = \frac{W_{\text{VC MOS}} \cdot d_{\text{workplace}}}{f_{\text{camera}}} = \frac{5.4 \times 500}{12} \approx 225 \quad (15)$$

式中: H_c 为水平视场画幅; W_{HCMOS} 为水平方向相机 CMOS 尺寸; V_c 为垂直视场画幅; $W_{\text{VC MOS}}$ 为垂直方向相机 CMOS 尺寸; $d_{\text{workplace}}$ 为工作距离; f_{camera} 为相机焦距。上述各参数单位均为 mm 。

3.2 双目条纹结构光精度验证

依照德国工程师协会 2012 年发布的“VDI/VDE 2634-2”技术标准来进行双目条纹投影结构光系统精度

验证^[27]。本方案通过对标准球进行3组不同位姿,每组位姿重建10次的结果进行统计,统计出双小球的半径和球心距离进行精度分析。

被测小球采用标准球,如图12所示。图12中A球、B球直径均为29.996 9 mm,圆度均 $<5 \mu\text{m}$;球间距为120.008 6 mm,不确定度 $<0.6 \mu\text{m}$ 。测量标准球结果数据如表1所示。通过标准球计算得到A球直径的最大偏差为0.008 mm,B球最大偏差为0.006 mm,球心距最大偏差为0.024 4 mm。精度满足点云重建要求。



图12 标准圆球

Fig. 12 Standard sphere

表1 标准球测量结果

Table 1 Measurement results of standard balls

(mm)

A球半径	B球半径	测量球心距	A球直径偏差	B球直径偏差	球心距偏差
30.004 9	30.001 3	119.984 600 5	0.008 0	0.004 4	-0.023 999 482
30.003 5	30.001 8	119.985 504 5	0.006 6	0.004 9	-0.023 095 455
30.003 5	30.001 0	119.985 644 7	0.006 6	0.004 1	-0.022 955 325
30.002 8	30.000 9	119.984 200 4	0.005 9	0.004 0	-0.024 399 615
30.001 5	29.999 9	119.985 942 4	0.004 6	0.003 0	-0.022 657 563
30.003 6	30.002 9	119.987 064 5	0.006 7	0.006 0	-0.021 535 483
30.000 6	29.997 8	120.020 777 4	0.003 7	0.000 9	0.012 177 360
29.998 5	30.000 0	119.988 459 0	0.001 6	0.003 1	-0.020 141 008
30.002 1	29.998 4	119.988 331 3	0.005 2	0.001 5	-0.020 268 713
30.002 1	29.998 3	119.988 331 3	0.005 2	0.001 4	-0.020 268 713

3.3 转轴标定精度验证

转轴标定精度直接决定点云粗配准的质量,也是后续进行点云三维重建路径规划的依据。依据上文所述基于标定板特征点的转轴标定方法,使用标定得到的转轴直线方程,利用标定板在不同位姿下的特征点同名点,计算其到转轴直线的垂线夹角,取均值作为标定板间的实际旋转角度。实验中将被测标定板旋转11次,每次 5° ,得到转轴的标定精度,如表2所示,误差等于实际角度与标称角度之差。

转台精度为 0.1° ,基于标定板的转轴标定精度误差最大 $E_{\text{Max}}=0.077^\circ$,平均误差为 $0.038 9^\circ$,均方根误差 $RMSE=0.026 352^\circ$,最大误差 $E_{\text{Max}}(0.077^\circ)$ 小于转台自身的精度(0.1°)。因此,标定后的转轴可用精度可达 0.1° 。

3.4 路径规划实验结果

图13展示了点云在模拟的三视锥模型照射下得到的预测点云的结果示意图(编号①~⑨分别代表采集和预测的点云的位姿顺序)。通过对该条件下的可视点云进行计算,规划出点云的旋转角度路径。通过设置合适的

表2 基于标定板的转轴精度验证

Table 2 Verification of rotational axis accuracy ($^\circ$)

序号	标称角度	实际角度	误差
1	5.000 0	4.986 0	-0.014 0
2	5.000 0	5.006 9	0.006 9
3	5.000 0	5.029 7	0.029 7
4	5.000 0	5.018 2	0.018 2
5	5.000 0	5.058 1	0.058 1
6	5.000 0	5.048 1	0.048 1
7	5.000 0	5.051 3	0.051 3
8	5.000 0	5.053 0	0.053 0
9	5.000 0	5.077 1	0.077 1
10	5.000 0	5.042 4	0.042 4
11	5.000 0	5.057 1	0.057 1

重叠率阈值,可实现满足点云重叠率要求的旋转路径规划。与传统均匀旋转的多视角点云采集方式相比,在多视角配准次数一致的前提下,该方法可有效提升

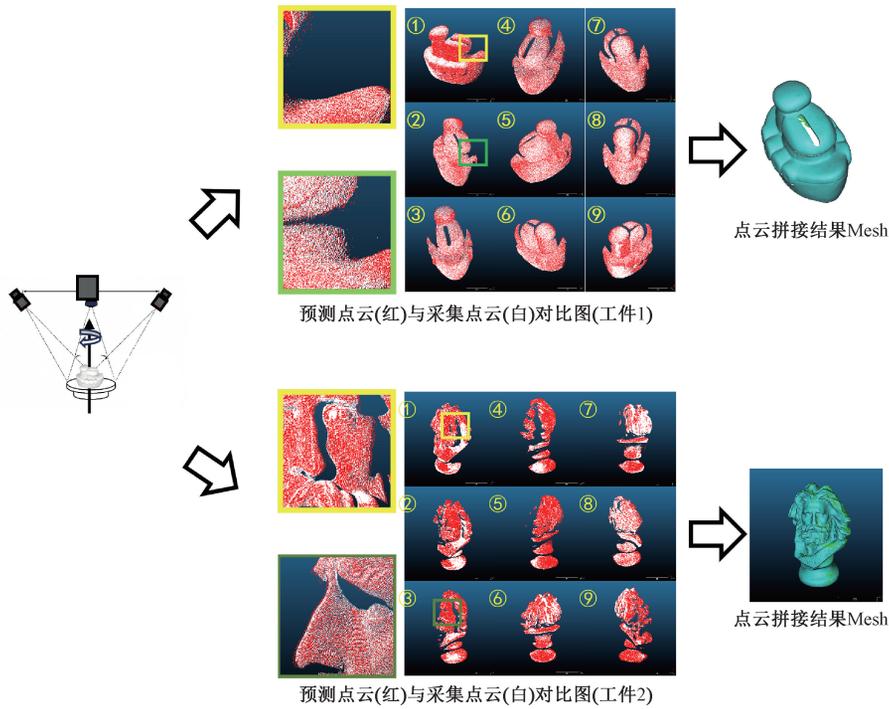
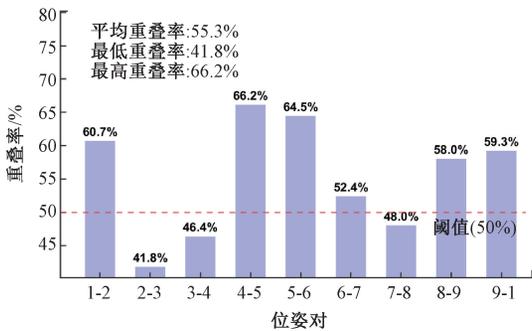


图 13 点云预测采集结果示意图(工件 1、工件 2)

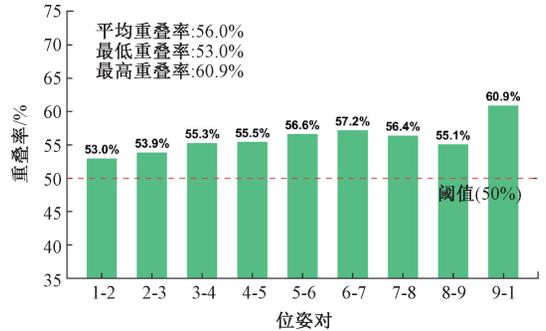
Fig. 13 Results of the predicted point cloud and collected point cloud(workpiece1 & workpiece2)

相邻点云之间的重叠率,具体对比结果如图 14 所示(图 14(a)为均匀旋转方法点云重叠率,图 14(b)为本文方法点云重叠率)。实验结果显示,工件 1 基于本方法的

最小有效采集次数为 9 次,而传统方法为 12 次、单次旋转 30°;工件 2 基于本方法的最小有效采集次数为 11 次,传统方法为 18 次、单次旋转 20°。



(a) 均匀旋转方法 9 个 pose 相邻视角重叠率(角度间隔 40°)
(a) The overlap rate of adjacent view for 9 poses in the uniform rotation method(angular interval: 40°)



(b) 本文方法 9 个 pose 相邻视角重叠率(非均匀旋转)
(b) The overlap rate of adjacent views for 9 poses in proposed method (non-uniform rotation)

图 14 本文方法与均匀旋转方法相邻视角点云重叠率

Fig. 14 Point cloud overlap rate between adjacent viewpoints in the proposed method compared with the uniform rotation method

表 3 是对方法的效率进行评估的结果。工件 1 采用本文路径规划算法点云多视角配准平均耗时 $t = 24.21152\text{ s}$,对比 12 次配准时间提升约 43%;工件 2 本文方法的多视角配准平均耗时 $t = 58.204\text{ s}$,对比 18 次配准时间提升约 40.5%。

序配准后,与标准被测点云(以 pose1 为基准进行配准)之间的点间距的分布趋势(纵轴体现分布特性)。这是配准结果的定性分析展示,具体量化误差见下文图 16。

图 15(a)~(d)是点云配准结果的归一化点间距分布图,用于展示均匀旋转方法(图 15(a)和(c))与本文旋转方法(图 15(b)和(d))下,工件多视角点云经过顺

图 15(a)和(c)采用均匀旋转方法,图 15(a)是工件 1 (9 个视角)的多视角点云,经顺序粗配准及精配准后与标准被测点云对比,得到的最近点对点间距分布结果;图 15(c)为工件 2 (11 个视角)的同流程配准结果。图 15(b)和(d)采用本文旋转方法,图 15(b)是工件 1

表3 工件1&工件2点云配准时间表
Table 3 Time of Point Cloud Registration for Workpiece1 & Workpiece2

方法	工件1				工件2			
	序号	点云多视角次数	点云加载时间/s	点云配准时间/s	序号	点云多视角次数	点云加载时间/s	点云配准时间/s
本文方法	1	9	3.92140×10^{-5}	23.27710	1	11	4.34080×10^{-5}	58.11500
	2	9	3.74590×10^{-5}	24.98770	2	11	4.06970×10^{-5}	58.08510
	3	9	3.93420×10^{-5}	23.71840	3	11	4.01430×10^{-5}	58.20150
	4	9	5.53650×10^{-5}	24.65710	4	11	4.07700×10^{-5}	57.98900
	5	9	3.73940×10^{-5}	24.41730	5	11	4.35550×10^{-5}	58.62940
	均值 t			4.17548×10^{-5}	24.21152	均值 t		4.17146×10^{-5}
均匀旋转方法	1	12	4.01290×10^{-5}	42.06520	1	18	3.65110×10^{-5}	98.08270
	2	12	3.61660×10^{-5}	43.17000	2	18	4.37580×10^{-5}	98.23970
	3	12	4.09890×10^{-5}	40.49810	3	18	4.15550×10^{-5}	98.17560
	4	12	4.28420×10^{-5}	41.70150	4	18	4.06990×10^{-5}	97.72930
	5	12	3.65730×10^{-5}	44.94320	5	18	4.35570×10^{-5}	97.69630
	均值 t			3.93398×10^{-5}	42.47560	均值 t		4.12160×10^{-5}

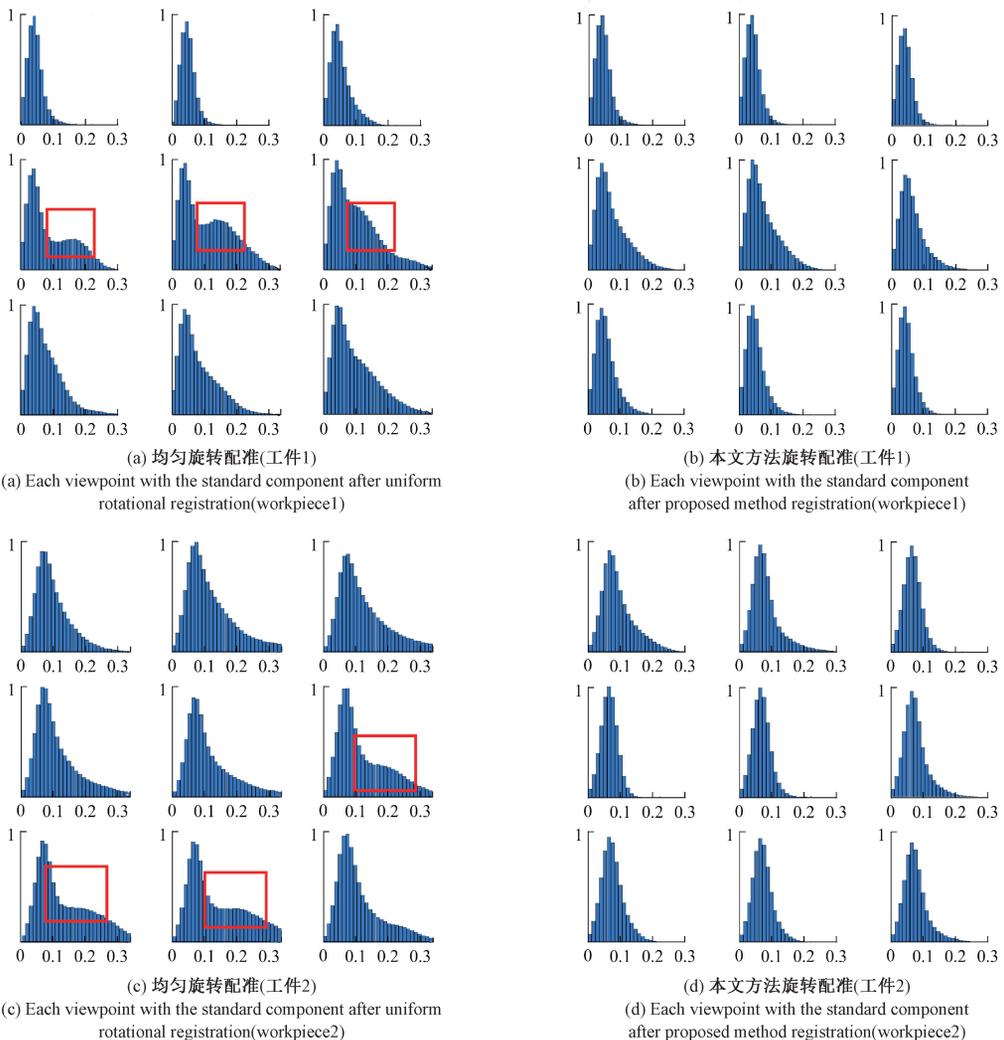


图15 点云配准点间距分布
Fig. 15 Point distribution map after point cloud registration

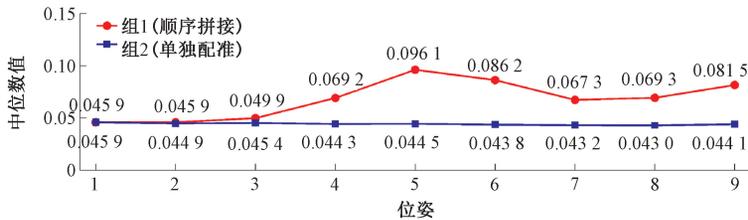
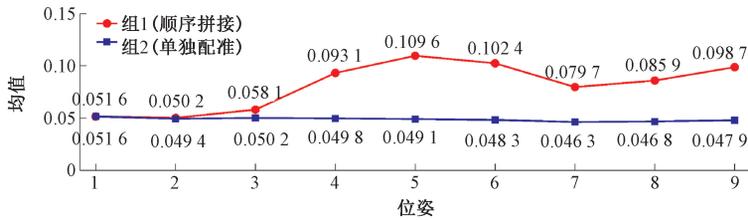
(9 个视角),图 15(d)为工件 2(11 个视角)经相同流程处理后的配准结果。

单视角点云与标准被测点云的配准结果中,其点间距分布近似符合正态分布特征。多视角点云按顺序配准后,单一视角与标准被测点云的相对位姿会发生改变,点间距分布也发生改变:如图 15(a)、(c)(均匀旋转方法)顺序配准后点间距分布图呈现双峰分布(方框圈出区域为误差集中区域),这一特征直观反映出配准过程中存在位姿偏差;对比图 15(a)、(c)和(b)、(d),两例工件的结果均表明:基于本文方法的顺序点云配准,其点间距分布的一致性显著优于均匀旋转方法。

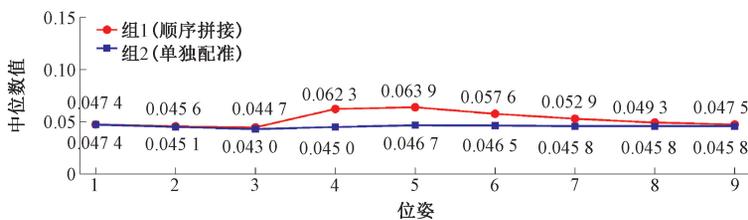
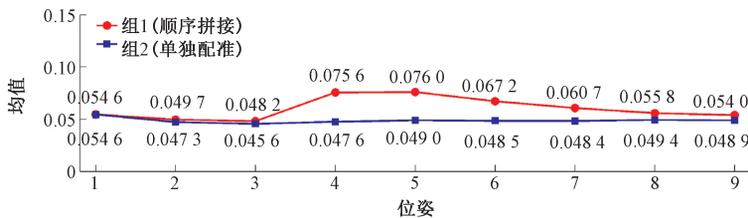
图 16(a)、(b)分别对应工件 1 的均匀旋转方法与本文方法的点间距分布均值及中位数值(图 16(a)~(d)中,圆点标记的折线代表组 1,即以 pose1 为基准顺序拼接的点云,与 pose1 配准所得标准工件点云

分布图的均值、中位数值;方块标记的折线代表组 2,即每个 pose 点云和标准工件点云单独配准后,对应的点云分布图的均值、中位数值);图 16(c)、(d)对应工件 2 的均匀旋转方法与本文方法的点间距分布均值及中位数值,其图中组之间对应关系和图 16(a)、(b)相同。

本文方法在确保重叠率不低于阈值的条件下进行多视角点云配准,对比基线数值均为每个视角与目标点云单独配准的点云分布的均值与中位数值。工件 1 和工件 2 在相同数量的配准视角下,与均匀旋转方法相比,本文方法各视角的配准误差(相对单独配准的基线)降低了 50% 以上。图 16(a)~(d)所示,工件 1 和工件 2 的配准误差均值为 0.011 39 和 0.008 18 mm,较均匀旋转均值误差 0.032 21 和 0.044 52 mm 分别降低 64.64% 和 81.62%。



(a) 均匀旋转方法(工件1)
(a) Uniform rotation method(workpiece1)



(b) 本文方法(工件1)
(b) The proposed method(workpiece1)

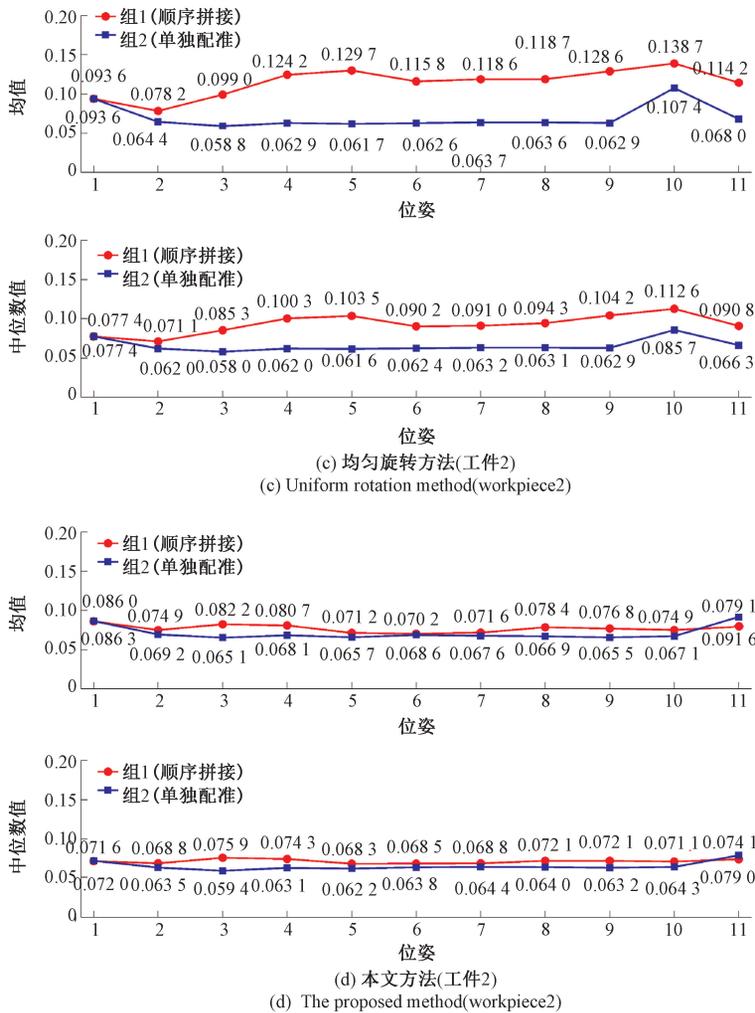


图 16 点云点间距分布均值和中位数值

Fig. 16 Mean value and median value of point cloud distribution map

4 结 论

针对传统工件的三维重建过程中多视角点云配准效率与精度难以兼顾的问题,本文提出一种基于三视锥模型与高精度转台的多视角点云配准优化方法。所提方法通过将条纹结构光模拟成物理模型,采用射线投射方法计算可视点云体素格,结合高精度转台提供稳定点云采集位姿,在确保相邻视角点云重叠率以保障配准精度的前提下,合理减少转台旋转配准次数,实现高效高精度的点云多视角配准与三维重建。实验结果表明,对比均匀旋转方法,本文方法在两类工件的三维重建任务中,在配准效率方面,工件1点云配准平均时间为24.21152s,较均匀旋转方法配准时间提升约43%,扫描次数减少3次;工件2多视角配准平均时间为58.204s,配准时间提升约40.5%,扫描次数减少7

次。在配准精度方面,工件1和工件2的平均配准均值误差为0.01139和0.00818mm,较均匀旋转均值误差0.03221和0.04452mm分别提升64.64%和81.62%,验证本文方法在保障配准精度的同时提升了扫描检测效率,适用于工业现场大批量工件的快速检测场景,具有较强的工业应用价值。后续研究将重点提升算法配准的鲁棒性,以及针对工业场景的转台精度提升。优化对工业场景中高反光工件的点云处理与配准精度;同时拓展方法的泛用性,使其能够适配更多类型的工业工件和更复杂的检测场景,进一步增强算法的工程实用性与推广价值。

参考文献

- [1] WANG Y Y, ZHANG H T, LIU Y Y, et al. Measurement of 3D pavement morphology using improved binocular reconstruction under structured light constraint mechanism[J]. Road Materials and Pavement Design,

- 2025: 1-21.
- [2] 邢倩慧, 魏妍婧, 胡灿昱, 等. 基于结构光双目视觉的腐蚀钢材表面三维重建[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(2): 355-363.
XING J H, WEI Y J, HU C Y, et al. Three-dimensional reconstruction of corroded steel surface based on structured light binocular vision[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(2): 355-363.
- [3] YU J, MAI S P, XU Y X, et al. Real-time high-accuracy 3-D measurement system for complex scenes using cross-projected Gray-code and phase-shifting patterns[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(1): 1398-1408.
- [4] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 27-41.
DING SH W, ZHANG X H, YU Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 27-41.
- [5] 李彦, 范彦志, 方怡哲, 等. 融合图像与点云的曲面工件涂胶质量检测方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(8): 53-60.
LI Y, FAN Y ZH, FANG Y ZH, et al. A method of gluing quality detection for curved workpieces based on image and point clouds fusion processing[J]. Laser Journal, 2024, 45(8): 53-60.
- [6] 董力, 江文松, 罗哉, 等. 多角度弱纹理文物三维扫描测量方法[J]. 计量学报, 2024, 45(6): 769-776.
DONG L, JIANG W S, LUO Z, et al. Multi-angle weak texture cultural relics 3D scanning measurement method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(6): 769-776.
- [7] 王娜, 邹宾. 基于逆向工程的饭盒模具成型零件再设计与加工[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(1): 135-137.
WANG N, ZOU B. Redesign and machining of lunch box mold forming parts based on reverse engineering[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2025, 61(1): 135-137.
- [8] MA J, MENG X, WANG H S, et al. Comprehensive improvement of binocular structured light calibration method based on radical-conservative cooperative particle swarm[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8155.
- [9] OU Y M, FAN J F, ZHOU CH, et al. Binocular structured light 3-D reconstruction system for low-light underwater environments: Design, modeling, and laser-based calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-14.
- [10] 刘勇, 张国锋, 胡鹏宇, 等. 多视角沙姆成像的高精度结构光三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 33-40.
LIU Y, ZHANG G F, HU P Y, et al. High-precision structured-light 3D measurement method based on multi-view Scheimpflug imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 33-40.
- [11] LUO H, ZHANG K, YANG N, et al. A robust method for multi-view 3D data stitching based on pasted marked points[J]. Measurement, 2024, 228: 114364.
- [12] 王洪伟, 亢太波, 邓海涛, 等. 环形编码标志点鲁棒识别研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1734-1740.
WANG H W, KANG T B, DENG H T, et al. Robust recognition of circular coded markers[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(9): 1734-1740.
- [13] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
LI ZH W. Research on structured light 3D measuring technology and system based on digital fringe projection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [14] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 3212-3217.
- [15] 钟佩思, 李洪琦, 毕研治, 等. 基于改进点云配准算法的堆叠工件位姿估计[J]. 仪表技术与传感器, 2025(9): 101-107.
ZHONG P S, LI H Q, BI Y ZH, et al. Position estimation of stacked workpieces based on improved point cloud alignment algorithm[J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(9): 101-107.
- [16] 龚国强, 田演, 夏鑫宇, 等. 基于局部特征提取与参数估计的多视角点云拼接方法[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-23[2025-09-16].
GONG G Q, TIAN Y, XIA X Y, et al. Multi-view point cloud stitching method based on local feature extraction and parameter estimation[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress, 1-23[2025-09-16].
- [17] DIBARI P, NITTI M, PATRUNO C, et al. An accurate hardware calibration and 3D point cloud stitching towards automatic quality control in aerospace manufacturing[C]. 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace, 2022: 265-269.
- [18] PENG W X, WANG Y N, MIAO ZH Q, et al.

- Viewpoints planning for active 3-D reconstruction of profiled blades using estimated occupancy probabilities (EOP) [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5): 4109-4119.
- [19] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [20] 王睿宇, 景会成, 包启龙. 基于特征提取和改进 ICP 的点云配准方法[J]. *应用光学*, 2025, 46(4): 805-812.
WANG R Y, JING H CH, BAO Q L. Point cloud registration method based on feature extraction and improved ICP [J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(4): 805-812.
- [21] SALVI J, MATABOSCH C, FOFI D, et al. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(5): 578-596.
- [22] 王昊天, 王鹏, 李岳, 等. 基于编码立体靶标的单轴转台标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(7): 171-182.
WANG H T, WANG P, LI Y, et al. Single-axis turntable calibration method based on coded stereo target[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(7): 171-182.
- [23] 张峰峰, 陈龙, 杨欣荣, 等. 基于双目结构光的肝脏表面三维重建系统标定研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(10): 1391-1398.
ZHANG F F, CHEN L, YANG X R, et al. Calibration of 3D reconstruction system for liver surface based on binocular structured light [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1391-1398.
- [24] SONG L M, LIU ZH N, LI Y P, et al. Rotation axis calibration of a 3D scanning system based on dual-turntable angle cancellation[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(4): 894-903.
- [25] MO C L, WANG L ZH, REN M D, et al. Scanning measurement method of small size parts without marks[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 409-422.
- [26] KRIEGEL S, RINK C, BODENMULLER T, et al. Efficient next-best-scan planning for autonomous 3D surface reconstruction of unknown objects[J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2015, 10(4): 611-631.
- [27] CARFAGNI M, FURFERI R, GOVERNI L, et al. Metrological and critical characterization of the Intel D415 stereo depth camera[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 489.

作者简介



朱君益, 2022 年于华东理工大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为三维重建与光学精密测量技术。

E-mail: Ld677SiAR@sjtu.edu.cn

Zhu JunYi received his B. Sc. degree from East China University of Science and Technology in 2022. Now he is a master's student at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include 3D reconstruction and optical precision measurement technology.



陶卫(通信作者), 于 1997 年和 2003 年获得哈尔滨工业大学的学士学位与博士学位, 现为上海交通大学自动化与感知学院教授, 主要研究方向为激光传感技术, 光学精密测量技术。

E-mail: taowei@sjtu.edu.cn

Tao Wei (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 1997 and 2003, respectively. Now she is a professor at the School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include laser sensing technology and optical precision measurement.