

基于机械臂辅助的多视角三维点云拼接算法

何成刚¹, 郑衡^{1,3}, 丁克^{2,3*}, 林群煦¹¹五邑大学轨道交通学院, 广东 江门 529020;²广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510642;³佛山市南海区广工大数控装备协同创新研究院, 广东 佛山 528225

摘要 针对如何快速且准确地获取模具内部完整三维点云数据的问题,提出一种机械臂与三维视觉设备结合的三维点云拼接算法。在初拼接阶段,采用手眼标定方式获取手眼矩阵,并将各幅点云转换到机器人基坐标系,完成初步拼接,得到良好的配准初始位置。在此基础上,提出改进的迭代最近点(ICP)算法,通过结合内部形体描述子(ISS)特征获得关键点,并用随机一致性算法剔除错误匹配点,在点的匹配过程中采用点到面的方式进行匹配,最终得到完整的拼接点云。实验结果表明,所提算法在与ICP算法及其他改进的ICP算法的配准性能对比中具有良好的稳健性,算法耗时及配准误差明显下降,完整的拼接点云误差为0.12 mm,具有较高的工程实践价值。

关键词 机器视觉; 点云拼接; 三维点云; 迭代最近点算法; 机械臂

中图分类号 TP391.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222822

Multi-View 3D Point Cloud Stitching Algorithm Based on Robotic Arm Assistance

He Chenggang¹, Zheng Heng^{1,3}, Ding Ke^{2,3*}, Lin Qunxu¹¹School of Rail Transportation, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, China;²College of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510642, Guangdong, China;³CNC Equipment Cooperative Innovation Institute Foshan Nanhai Guangdong Technology University, Foshan 528225, Guangdong, China

Abstract Aiming at the problem of how to quickly and accurately obtain complete 3D point cloud data within a mold, a 3D point cloud stitching algorithm combining a robotic arm and a 3D visual device is proposed. In the initial stitching process, the hand-eye calibration method is used to obtain the hand-eye matrix, and the point cloud is converted to the robot base coordinate system to complete preliminary stitching and obtain a good initial registration position. On this basis, an improved iterative closest point (ICP) algorithm is proposed, which combines intrinsic shape signature (ISS) features to obtain key points, and uses random consistency algorithm to eliminate erroneous matching points. During the point matching process, point to face matching is used to obtain a complete spliced point cloud. The experimental results show that the proposed algorithm has good robustness in comparison with the ICP algorithm and other improved ICP algorithms in terms of registration performance, and the algorithm time consumption and registration error are significantly reduced. The error of a complete mosaic point cloud is 0.12 mm, which has high engineering practical value.

Key words machine vision; point cloud stitching; point cloud; iterative closest point algorithm; robotic arm

1 引言

目前的三维机器视觉测量方式主要通过安装三维

传感器在支架上使用,只能检测产品某个角度的点云且存在物体遮挡问题,难以从各角度得到物体的详细信息,无法获得不同视角下完整的融合点云数据。三

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-22; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515110807)、佛山市科技创新项目(FS0AA-KJ919-4402-0074)、五邑大学高层次人才科研启动计划项目(AG2018001)

通信作者: *ceo@hinyeung.com

维点云拼接技术能有效获取物体完整的点云信息,可更全面、完整地测量和检测待测点云。

点云拼接在三维重建中的应用愈加广泛,如逆向工程^[1]、移动机器人^[2]、地图构建技术^[3]等。点云拼接的原理是将各视角相机坐标系下得到的点云经过旋转和平移变换到与目标点云相匹配的位姿并融合成完整的点云。通常点云拼接的过程是将各点云分别配准并最终拼接为完整点云。配准过程分为初始配准与精确配准。初始配准的目的是把两个同位置的点云进行大致配准,将两个点云位姿接近,使之后精配准阶段的对应点距离减小。其中,初始配准^[4-5]的常用方法有主元分析法、标签法以及特征分析法。另外有基于旋转台的配准方法^[6-7],该方法在旋转台上固定物体,根据旋转角建立坐标转换关系,但要求待测物中心与旋转台中心基本重合。精配准阶段常用迭代最近点(ICP)算法^[8]对点云进行配准。荆路等^[9]通过基于尺度不变特征变换(SIFT)结合 ICP 的方法使两点云间的粗配准获取较好的初始位置,但提取特征点时会额外消耗一定的时间。王春阳等^[10]针对点云噪声对配准影响大的问题,提出一种将改进的体素云连通性分割方法与加权最近邻距离比结合的配准算法,解决了分割过程中误剔除问题并提升了配准过程效率。王程远^[11]针对 ICP 算法效率低的问题,提出基于单位四元数的 ICP 算法,通过 K 维树状结构(KD-tree)方法加快遍历点云的速度以缩短耗时,但该算法对特征较少的物体适用性较低。文献[12-13]通过机械臂运动学方程有效将点云转换到良好的初配准位置。

针对模具弯曲面较大且成像视野较小,单次拍摄成像无法获得完整点云图的问题,本文提出一种针对模具内部的三维点云拼接方法,基于机器人结合三维传感器的方式进行手眼标定实验获得手眼矩阵,将各视角下拍摄获取的点云转换到同一机器人坐标系下,获取良好的多幅点云初始位姿,并采用改进的 ICP 算法在精确配准阶段进行点云配准,最终实现不同角度下对模具内部点云的精确快速拼接。

2 方法原理

所提基于机械臂辅助的多视角点云拼接方法分为两个步骤:1)通过手眼标定将点云转换到良好的初始位置;2)通过改进的 ICP 算法实现精确拼接。具体流程如图 1 所示。通过艾利特机器人的开发接口以及显扬三维传感器的开发接口搭建实验平台,首次使用该系统先进行手眼标定实验获得手眼矩阵,设计机器人走点运动并拍照的通用流程,使机械臂到达设定的机械臂位姿位置并触发三维传感器拍照。将各视角的点云根据其对应机械臂位姿和获得的手眼矩阵转换到基坐标系以实现初配准。然后对 ICP 算法进行优化,通过内部形态描述子(ISS)进行关键点提取并剔除部分匹配不成功的点。在匹配点过程中采用点到面的方式进行匹配,最后得到完整的拼接点云。

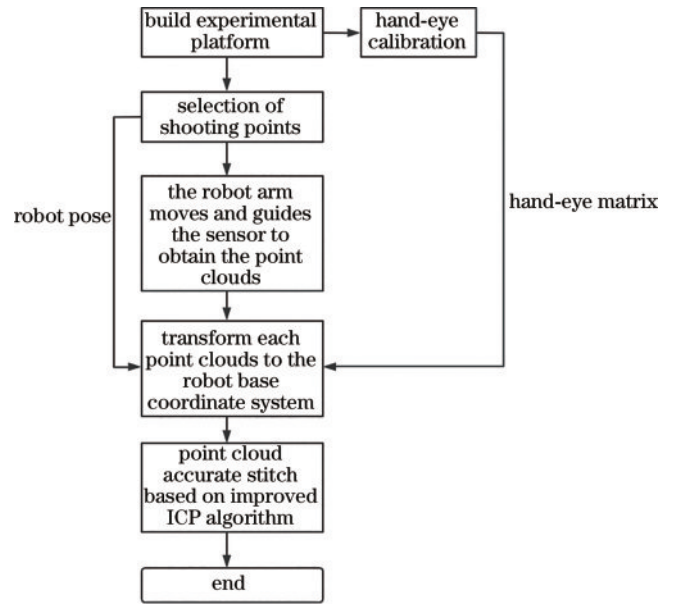


图 1 多视角点云拼接方法流程

Fig. 1 Flow chart of multi-perspective point cloud stitching method

2.1 实验平台搭建

所使用的三维传感器是显扬 HY-M5 双目三维相机,采用结构光技术,通过 RGB 镜头和投影仪获取 1920 pixel×1200 pixel 的彩色图像,其检测的深度范围为 0.7~2 m,扫描速度达到 300 Hz,适用景深为 1360 mm。开发工具为 Visual Studio 2019, CPU 为 AMD 3600。

搭建的三维点云拼接实验平台如图 2 所示,上位机连接三维传感设备与机器人控制柜,并且将三维传感设备固定安装在机械臂末端法兰盘上。针对模具内部测量难的问题,实验采集的对象为路墩模具,以采集模具内部的点云数据。采集点云数据时,设定 5 个机械臂末端位姿坐标作为各拍摄视角的点位,当机械臂达到设定点位时触发三维传感器拍照,完成单次点云收集。

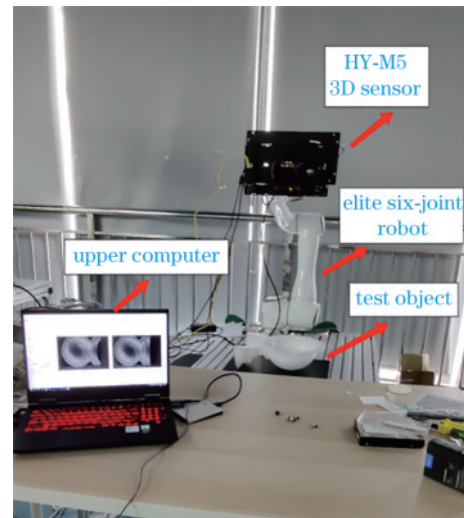


图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

然后按照设定点位顺序机械臂运动到下一个点位,直至各视角的点云数据收集完成,机械臂停止运动。

2.2 结合机械臂的手眼标定初配准方法

通过机械臂多视角移动地获取点云,能解决传统的单视角三维测量中因遮挡无法获取完整三维点云数据的问题,既有小视野成像精度高的特点,又可通过移动机械臂获取完整的各视野点云信息。但相机在不同姿态下对同一物体拍摄获取的点云数据是基于当前相机坐标系获取的,各幅点云数据之间的位姿信息相差过大会导致后续配准效率下降。因此针对待测物与机械臂的末端相对位置固定不变的关系,通过手眼标定方式得到标定板到机器人坐标系的转化关系,把各视角获得的点云转换到同一机器人基坐标系下,使各点云间位姿基本接近。图 3 为手眼关系模型。其中, {b} 为机器人基坐标系, {c} 为相机坐标系, {g} 为机器人末端坐标系, {t} 为标定板坐标系, bT_g 为机器人末端到基坐标系的转换关系, gT_c 为相机到机器人末端坐标系的转换关系,即所需的手眼矩阵, cT_t 为相机到标定板坐标系的转换关系。

因标定板与机械臂基座的相对位置是固定的,让

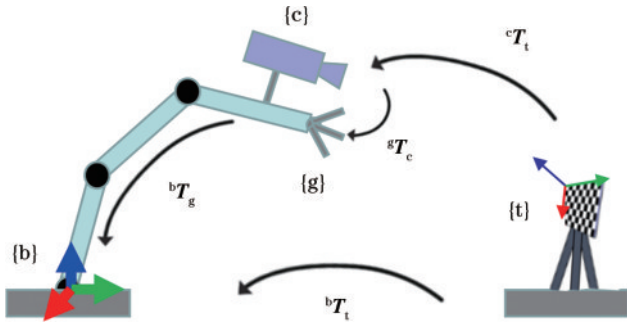


图 3 手眼标定系统

Fig. 3 Hand-eye calibration system

机械臂变换不同位姿并拍摄标定板,根据前后两次机械臂位姿的变化关系建立坐标系变换方程^[14]:

$${}^bT_{g1} \times {}^gT_c \times {}^cT_{t1} = {}^bT_{g2} \times {}^gT_c \times {}^cT_{t2}, \quad (1)$$

式中: ${}^bT_{g1}$ 和 ${}^bT_{g2}$ 分别表示机械臂变换前后机械臂末端与基座的关系; ${}^cT_{t1}$ 和 ${}^cT_{t2}$ 分别表示机械臂变换前后标定板到相机的变换关系。式(1)变换后可得

$$({}^bT_{g2}^{-1} \times {}^bT_{g1}) \times {}^gT_c = {}^gT_c \times ({}^cT_{t2} \times {}^cT_{t1}^{-1}). \quad (2)$$

在式(2)中,机械臂末端在前后两个位姿之间的变换关系可由 $A = {}^bT_{g2}^{-1} \times {}^bT_{g1}$ 表示,相机坐标系在前后两个位置之间的转换关系可由 $B = {}^cT_{t2} \times {}^cT_{t1}^{-1}$ 表示, gT_c 则为所需的手眼矩阵。由式(2)可知,手眼标定求解问题可以转化为 $AX = XB$ 的求解问题,其中,需要求解的未知量 X 即为式(2)中的 gT_c 。

针对 $AX = XB$ 方程的求解问题,采用 Daniilidis^[15] 提出的对偶四元数标定方法,通过双四元数化利用奇异值分解实现手眼旋转和平移矩阵的同步解。在使用机械臂移动拍照过程中,选取 5 个拍摄点位,其目的是保证每两个相邻的点位之间都有足够多的重合位置,为之后拼接过程对重叠部分点云有更多的相同特征实现精配准。获得手眼矩阵后,结合各视角拍摄的机器人位姿,将点云转换至机械臂基坐标系的公式为

$${}^bT_t = \begin{bmatrix} R_{bt} & T_{bt} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^bT_g \times {}^gT_c \times {}^cT_t, \quad (3)$$

式中: cT_t 是相机外参,由三维相机标定获取; gT_c 为上述已求的手眼矩阵; bT_g 为机械臂末端到机械臂基座的转换关系,在矩阵运算中为 4×4 的齐次旋转矩阵。 bT_g 的齐次旋转矩阵可从机器人示教器上获得的机械臂末端笛卡儿位姿坐标 $(X_g, Y_g, Z_g, R_{X_g}, R_{Y_g}, R_{Z_g})$ 转换得到,其中的旋转子矩阵部分由式(4)转换得到,平移子矩阵部分为 $[X_g \ Y_g \ Z_g]^T$ 。

$$R_{bg} = \begin{bmatrix} \cos R_x \cos R_y & -\sin R_x \cos R_z + \cos R_x \sin R_y \sin R_z & \sin R_x \sin R_z + \cos R_x \sin R_y \cos R_z \\ \cos R_y \sin R_x & \cos R_x \cos R_z + \sin R_x \sin R_y \sin R_z & -\cos R_x \sin R_z + \cos R_z \sin R_y \sin R_x \\ -\sin R_y & \sin R_z \cos R_y & \cos R_y \cos R_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

得到转换后的点云仅需用到三维坐标,对式(3)进一步简化可得:

$$\begin{bmatrix} T_{bt} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^bT_g \times {}^gT_c \times \begin{bmatrix} T_{ct} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

输入原始点云数据 $T_{ct} = [X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 可得到转换后的在机械臂基坐标系下的点云数据 $T_{bt} = [X_b \ Y_b \ Z_b]^T$ 。最终各视角获得的点云通过转换到同一坐标系使其位姿基本接近。

2.3 基于 ICP 算法的多视角点云精配准方法

由于机械臂的运动存在定位偏差以及手眼矩阵的求解计算会带来一定的误差,因此在得到初始配准的转换点云之后,虽然各视角点云的位姿在转换后已经接近,但点云间并非完好拼接。为得到更准确的拼接

点云,需要继续通过精确配准减小误差。ICP 算法通过点与点之间不断匹配进行旋转和平移,以最小二乘法为准则,当待测点与目标对应点之间的距离达到最小值或达到设定的迭代次数时完成迭代。ICP 算法的基本迭代公式为

$$M(R, T) = \operatorname{argmin}_M \sum_{n=1}^k (Mp_i - q_i)^2, \quad (6)$$

式中:转换矩阵 $M(R, T)$ 中的 R 表示旋转矩阵, T 表示平移矩阵; p 为源点云坐标的集合; q 为目标点云坐标的集合。

为提高 ICP 算法的性能,在保证配准精度的情况下提高配准效率,对 ICP 算法进行改进。针对点云点数较大情况下配准耗时较长问题,对点云提取 ISS

特征关键点,在保留点云重要特征的同时减少点云数量以减小配准计算量。同时对于点云存在噪点和点云间存在非重合区域问题,采用随机一致性(RANSAC)算法剔除错误匹配点,并在寻找对应点过程中采用“点到面”方式减少迭代过程中陷入局部极值的问题。

2.3.1 ISS 特征提取

本实验采集的点云都包含数十万个点,而 ICP 在匹配点对时是基于整个点云搜索的。除此之外,点云噪点的存在容易导致匹配错误,因此点云数量过大会明显降低配准效率。常用的体素滤波方式虽然能有效降低点云数量,但对点云本身的特征保留不完整从而降低配准效率和精度。ISS 特征提取是一种描述三维物体形态的方式,通过领域信息建立局部坐标系,有计算效率高和特征保留度良好的优点^[16-17]。设点云 C 中有 n 个点云,设 $c_i=(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$, 提取 ISS 关键特征点的流程如下。

1) 对点云 C 中的每个点 c_i 建立一个局部坐标系,并对所有点设定搜索半径 r , 得到 c_i 搜索范围内的点 c_j ;

2) 以点云 C 中各 c_i 为中心、 r 为半径范围,并计算该区域内各点的权值 ω_{ij} , 权值表达式为

$$\omega_{ij} = \frac{1}{\|c_i - c_j\|}, |c_i - c_j| < r; \quad (7)$$

3) 计算每个点 c_i 的协方差矩阵:

$$\text{cov}(c_i) = \frac{\sum_{|c_i - c_j| < r} \omega_{ij} (c_i - c_j)(c_i - c_j)^T}{\sum_{|c_i - c_j| < r} \omega_{ij}}; \quad (8)$$

4) 计算每个点 c_i 协方差矩阵的特征值 $\{\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i\}$, 然后将特征值由大到小排列;

5) 设置不超过 1 的阈值 ϵ_1 和 ϵ_2 , 当对应点的特征值满足

$$\begin{cases} \frac{\lambda_2^i}{\lambda_1^i} \leq \epsilon_1 \\ \frac{\lambda_3^i}{\lambda_1^i} \leq \epsilon_2 \end{cases}, \quad (9)$$

该点即为 ISS 关键点;

6) 反复上述过程,遍历所有点后停止,获取符合设定条件的关键点云并保存。

2.3.2 错误点对剔除

由于点云噪声的干扰,并非全部配对的点对关系都是准确的,会存在错误配准的点对。使用随机一致性算法剔除错误对应点对关系^[18],提升变换矩阵的评估精度同时减少配准耗时。对于两个点云,其变换关系如下:

$$s \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & m_3 & m_6 & m_9 \\ m_1 & m_4 & m_7 & m_{10} \\ m_2 & m_5 & m_8 & m_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: s 为尺度变量; (x_i, y_i, z_i) 为目标点云中的点,其对应源点云中的点 (x_i', y_i', z_i') ; M 为两个点云间的仿射变换矩阵。变换矩阵 M 中包含 12 个未知参数,每一组点云可以列出 2 个满足映射关系的方程,因此需 6 对对应点进行线性方程组求解。通过多次随机选择具有噪声的一组点云中的子空间进行模型估计。

基于随机一致性算法去除错误对应点的具体流程如下:

1) 在对应点集中任意提取多个对应点对,根据其刚性性质求取变换矩阵;

2) 计算对应点集中剩余点对在此刚性变换矩阵下的距离误差,当对应点的距离偏差低于预设的阈值时,把此对应点设为样本内点,高于预设的阈值时则将该点剔除;

3) 重复上述流程,直到迭代次数达到设定的迭代数值结束计算。

2.3.3 点到面的 ICP 配准拼接

ICP 算法在处理点云曲面的局部弯曲结构部分时,容易在匹配过程中出现较多错误匹配,使目标函数在计算时陷入局部最优。基于点到面(point-to-plane)的匹配方式将对对应关系通过点到切平面的距离表示,可改善该问题,更精确获得对应点^[19-20]。图 4 为点到目标点云切平面方式的匹配示意图。其中, n_i 表示为待测点云某一点上的法向切平面。基于点到目标点云平面对应点的匹配过程如下:

1) 遍历目标点云 p 中的点 p_i , 计算其法向量及其法向切平面 n_i ;

2) 在待配准点云 q 中寻找点 q_i, q_j 为到法向切平面 n_i 距离最近的点;

3) 若找到点 q_i , 则 q_i 即为 p_i 的对应点;

4) 循环以上步骤,得到两个点云间的对应点集合

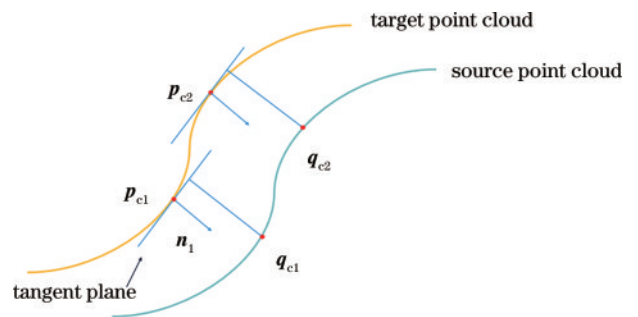


图 4 点到面方式配准示意图

Fig. 4 Schematic diagram of point-to-plane registration

并迭代得到旋转矩阵。

点到面匹配的迭代公式为

$$\mathbf{M}_{\text{opt}}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \operatorname{argmin}_{\mathbf{M}} \sum_{n=1}^k [(\mathbf{M}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i]^2. \quad (11)$$

$$\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta \\ \alpha & 1 & -\gamma \\ -\beta & \gamma & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

变换矩阵可转换为

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{T}(t_x, t_y, t_z) \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta & t_x \\ \alpha & 1 & -\gamma & t_y \\ -\beta & \gamma & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

因此式(11)可以改写为

$$\hat{\mathbf{M}}_{\text{opt}} = \operatorname{argmin}_{\hat{\mathbf{M}}} \sum_{n=1}^k [(\hat{\mathbf{M}}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i]^2. \quad (14)$$

式(14)的 $(\hat{\mathbf{M}}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i$ 可以写成线性表达式:

$$(\hat{\mathbf{M}}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i = \begin{bmatrix} \hat{M}_{11} & \hat{M}_{12} & \hat{M}_{13} & \hat{M}_{14} \\ \hat{M}_{21} & \hat{M}_{22} & \hat{M}_{23} & \hat{M}_{24} \\ \hat{M}_{31} & \hat{M}_{32} & \hat{M}_{33} & \hat{M}_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{ix} \\ n_{iy} \\ n_{iz} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: $\hat{\mathbf{M}}$ 包含 $\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z$ 这6个参数。对于 k 对匹配点,可以转化为

$$\min_{\hat{\mathbf{M}}} \sum_{n=1}^k \|(\hat{\mathbf{M}}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i\|^2 = \min_x \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2. \quad (16)$$

对于转换矩阵 \mathbf{M}_{opt} 中的旋转矩阵 $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$,因经过初始配准后两个点云之间旋转角比较小,有 $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1$,则 $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$ 的表达式为

因此 \mathbf{M}_{opt} 的求解可以转化为求解 \mathbf{x}_{opt} 的线性最小二乘问题:

$$\mathbf{x}_{\text{opt}} = \operatorname{argmin}_x \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2, \quad (17)$$

该线性最小二乘问题可通过奇异值分解的方式进行求解,最终得到两点云间的转换矩阵。

利用点到面的ICP算法进行精确拼接后,可得到精确配准矩阵,将各幅待拼接点云转化到目标点云的坐标系中并完成点云拼接。

3 实验与分析

3.1 手眼标定实验

在机械臂手眼标定的初配准方法中,进行手眼标定实验时选定相机视野下占1/8~1/5面积的13×12棋盘格标定板,通过示教器操控机械臂运动到不同的末端位姿,每次运动的平移位置或欧拉角都相比上一个机器人位姿有超过10 mm或10°的变化,采集16组数据。所收集的机械臂末端位姿坐标如表1所示。

通过对偶四元数标定方法求解,当结果差值收敛于设定的平稳范围内后结束标定,得到最终手眼矩阵:

$$\begin{bmatrix} -9.84 \times 10^1 & -6.04 \times 10^{-3} & -1.77 \times 10^{-1} & 9.60 \times 10^1 \\ 1.76 \times 10^{-1} & 4.48 \times 10^{-2} & -9.92 \times 10^{-1} & -9.60 \times 10^1 \\ 1.38 \times 10^{-2} & -9.98 \times 10^{-1} & -4.30 \times 10^{-2} & 1.05 \times 10^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

表1 标定实验机械臂末端位姿

Table 1 Robot end poses in calibration experiment

Pose	Pose coordinate(X, Y, Z, R _x , R _y , R _z)	Pose	Pose coordinate(X, Y, Z, R _x , R _y , R _z)
1	(-327.17, 356.48, 673.93, 80.04, -4.04, -175.44)	9	(-210.35, 303.19, 757.49, 88.29, -13.09, -176.03)
2	(-57.62, 228.68, 780.93, 80.05, -4.04, -175.44)	10	(-210.35, 303.2, 757.49, 74.9, -3.88, -177.69)
3	(-57.62, 375.69, 688.73, 80.05, -4.04, -175.44)	11	(-210.34, 303.19, 757.48, 76.48, -17.16, 173.48)
4	(-318.22, 205.7, 781.74, 80.05, -4.02, -175.44)	12	(-210.34, 303.19, 757.49, 88.43, -11.95, -170.72)
5	(-62.17, 216.53, 696.9, 80.05, -4.04, -175.44)	13	(-210.33, 303.19, 757.49, 87.04, 9.38, -177.55)
6	(-62.17, 374.77, 763.96, 80.05, -4.04, -175.44)	14	(-210.33, 303.19, 757.49, 80.17, -0.24, 172.16)
7	(-322.69, 221.55, 683.1, 80.05, -4.03, -175.45)	15	(-210.34, 303.19, 752.82, 74.73, -14.17, 176.56)
8	(-346.63, 354.13, 756.82, 80.05, -4.03, -175.45)	16	(-210.34, 303.19, 752.82, 85.51, -2.13, -163.37)

3.2 坐标转换初拼接

根据手眼矩阵和拍摄不同视角点云时对应机械臂末端的笛卡儿位姿坐标,将各视角点云统一转换到机器人基坐标系,如图5所示。各幅点云从各自相机坐标系下

凌乱的姿态排布转换成较好的融合拼接效果,通过三维点云测量软件测量可知,通过手眼矩阵转换坐标系后各点云之间的偏差距离约在2 mm,各点云之间的位姿基本一致,可为后续精配准阶段提供较佳的配准初始位置。

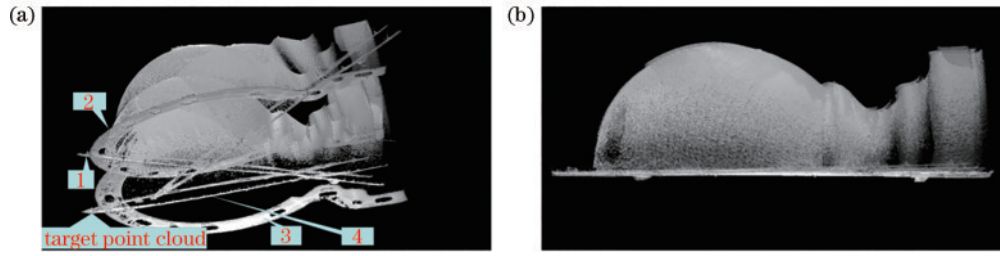


图5 初配准效果。(a)转换前各点云;(b)转换后各点云

Fig. 5 Initial registration effect. (a) Each point cloud before transformation; (b) each point cloud after transformation

3.3 拼接实验分析

在精拼接阶段,对于得到的5幅点云的精拼接,将拥有最多点云数量的正上方视角作为目标点云,与其他4个经过初始旋转变换的点云进行配准,最终融合成完整的拼接点云。

3.3.1 ISS特征提取

在改进的ICP算法中,基于ISS特征点提取后各视角获得的点云在保留特征基础的情况下,数量约为原来的1/15,点云中的孔轮廓亦能清晰保留,提取的特征能更好代表待配准点云,提高点云配准效率。

图6为点云特征提取前后效果,表2为特征提取前后点

表2 特征提取前后各视角点云数量

Table 2 Number of point clouds in each view before and after feature extraction

Point cloud	Points number before feature point extraction	Points number after feature point extraction
Point cloud 1	335611	16922
Point cloud 2	426565	18278
Point cloud 3	391920	20648
Point cloud 4	27042	12714

云数量的变化。

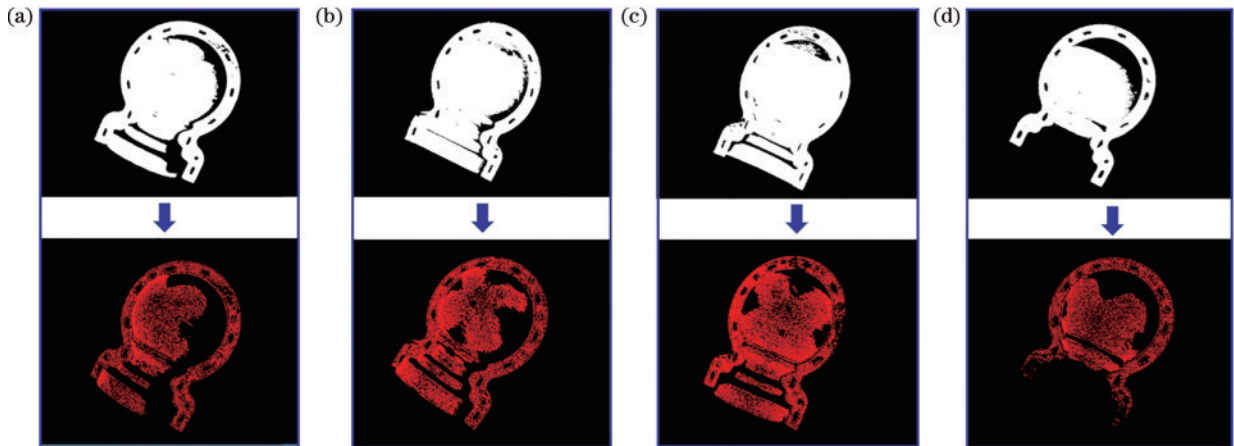


图6 各点云ISS特征点提取效果。(a)点云1;(b)点云2;(c)点云3;(d)点云4

Fig. 6 ISS feature points extraction effect of each point cloud. (a) Point cloud 1; (b) point cloud 2; (c) point cloud 3; (d) point cloud 4

3.3.2 错误点对剔除

实验所用到的点云为在线获取的点云,待测物点云表面存在的噪声点云会干扰配对,同时两个相互配准点云间的非重合区域中存在一定数量的点,亦会一定程度影响配对。采用随机一致性算法对该局外点进行剔除,表3为剔除错误点对前后的对应点对比及耗时。可以看出,剔除错误点对后匹配的对点集合更加精简,有助于配准精度的提升。另外各点云配对过程中剔除错误点对过程的耗时均在400ms左右,对整体算法的耗时影响较小。

3.3.3 初拼接坐标系下点云配准性能分析

在经过初始配准后,各视角点云都转换到了同一坐标系下。在该坐标系下进行精配准误差评估和配准

表3 随机一致性剔除错误点对数量及耗时

Table 3 Number and time consumption of random consistency of elimination error point pairs

Source point cloud	Matching point pairs	Point pairs after elimination	Time /ms
Point cloud 1	16934	13902	282
Point cloud 2	18242	12304	402
Point cloud 3	20648	18964	291
Point cloud 4	12708	7579	626

效率分析,其中,误差评估以原始待配准点云和目标点云之间对应点的平均欧氏距离作为评判标准。同时与传统的 ICP 算法以及改进的 Sift-ICP 算法进行比较, Sift-ICP 算法结合了尺度不变特征变换方式获取特征对应点。从表 4 和表 5 可以看出,各点云在良好的初始配准基础上,精确配准的配准误差都有较好的表现,所提改进的 ICP 精配准方法在配准精度上比其他两个方法有微小提升,各点云配准误差对比 ICP 算法下降 0.0059 mm、0.0037 mm、0.0093 mm 和 0.0008 mm。同时由于特征点提取效率更快且提取后点云数量较小,所提方法耗时明显减少,对比耗时表现较好的 Sift-ICP,耗时下降 49648 ms。综合配准误差和配准耗时的结果,所提改进的 ICP 方法在配准性能上有不错的表现。

表 4 在初拼接坐标系下各点云在不同方法下的配准时间

Table 4 The registration time of each point cloud under different methods in the initial stitch coordinate

Method	Registration time /ms			
	Point cloud 1	Point cloud 2	Point cloud 3	Point cloud 4
ICP	22720	31011	19342	22997
Sift-ICP	15286	19946	16756	13356
Proposed ICP method	4422	4969	4486	1819

表 5 在初拼接坐标系下各点云在不同方法下的配准误差

Table 5 The registration error score of each point cloud under different methods in the initial stitch coordinate

Method	Registration error /mm			
	Point cloud 1	Point cloud 2	Point cloud 3	Point cloud 4
ICP	0.1205	0.1378	0.1171	0.1980
Sift-ICP	0.1383	0.1438	0.1319	0.2213
Proposed ICP method	0.1146	0.1341	0.1078	0.1972

3.3.4 点云配准完整过程性能分析

结合初始配准和精确配准两个阶段,对点云配准的完整过程进行误差评估和配准效率分析。在实验分析中以 NDT-ICP 方法和 Sift-Super 4PCS 方法^[21]进行对比。NDT-ICP 方法通过正态分布概率密度函数描述点云的局部性质,减小特征匹配中点云噪声等影响。Sift-Super 4PCS 方法通过尺度不变特征变换提取特征点,并结合超四点快速鲁棒匹配算法进行初配准,最后用 ICP 算法精配准。

从表 6 和表 7 可以看出,所提方法在配准误差上相较 NDT-ICP,各点云配准误差分别下降了 51.8%、60.7%、48.0% 和 6.7%,和 Sift-Super 4PCS 方法相比配准误差下降了 41.4%、38.1%、62.8% 和 17.4%。

表 6 各点云在不同方法下的配准时间

Table 6 The registration time of each point cloud under different methods

Method	Registration time /ms			
	Point cloud 1	Point cloud 2	Point cloud 3	Point cloud 4
NDT-ICP	51710	42638	46009	52953
Sift-Super 4PCS	38542	44383	42088	28838
Proposed method	6819	7727	7301	4165

表 7 各点云在不同方法下的配准误差

Table 7 The registration error score of each point cloud under different methods

Method	Registration error /mm			
	Point cloud 1	Point cloud 2	Point cloud 3	Point cloud 4
NDT-ICP	0.2386	0.3414	0.2074	0.2114
Sift-Super 4PCS	0.1958	0.2168	0.2901	0.2387
Proposed method	0.1146	0.1341	0.1078	0.1972

在时间方面的优化效果也很明显,在各视角点云的配准时间总和的对比中,所提方法得益于初始配准时所需的旋转矩阵可以通过手眼矩阵以及对应机器人位姿直接计算,无需遍历整个点云特征,因此各视角下配准时间稳定,且总时间大幅下降,在点云数量点达到数十万个的情况下有效提升了拼接速度。

图 7 为不同方法的配准效果。可以看出,所提方法在拼接的融合度方面相比其他方法更高,曲面部分点云良好地融合在一起。在点云配准细节中可见,球状曲面位置中两个点云的配准偏差更小,两个点云的曲面部分紧密地贴合,有更好贴合度,可准确还原物体实际尺寸。最终通过对各视角点云的融合拼接弥补单个点云有缺失或细节不完整的问题,得到的完整模具拼接点云如图 8 所示。

为进一步验证所提方法的实用性,对拼接后的完整点云进行点云测量处理。然后通过提取球状部分点云,并用随机一致性算法拟合估计测量路墩模具内部的球状半径。在表 8 中,通过与游标卡尺测出来的测量值作为对比可知,所提方法的测量误差为 0.12 mm,有较强的工程实践价值。

表 8 完整拼接点云尺寸测量值

Table 8 Measurement of the complete stitching point cloud

Measurement object	Measurement of vernier caliper /mm	Measurement of proposed method /mm	Error /mm
Radius of the sphere inside the mold	101.50	101.62	0.12

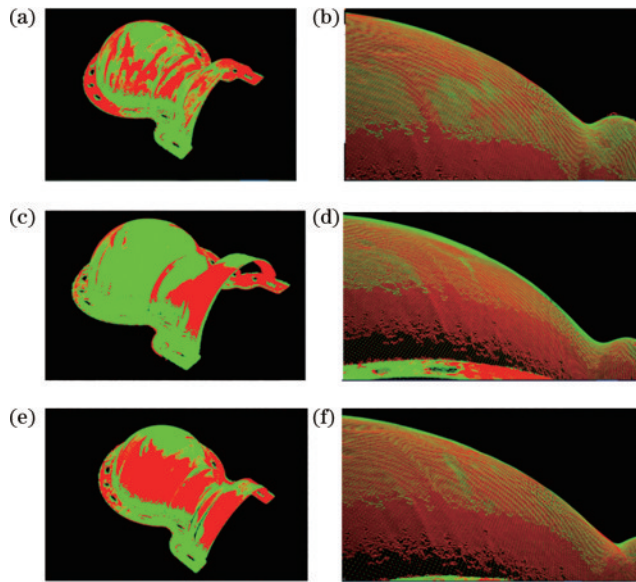


图 7 点云配准效果。(a)所提方法配准效果;(b)所提方法配准细节;(c)NDT-ICP方法配准效果;(d)NDT-ICP方法配准细节;(e)Sift-Super 4PCS方法配准效果;(f)Sift-Super 4PCS配准细节

Fig. 7 Point cloud registration effect. (a) Registration effect of proposed method; (b) registration detail of proposed method; (c) registration effect of NDT-ICP; (d) registration detail of NDT-ICP; (e) registration effect of Sift-Super 4PCS; (f) registration detail of Sift-Super 4PCS

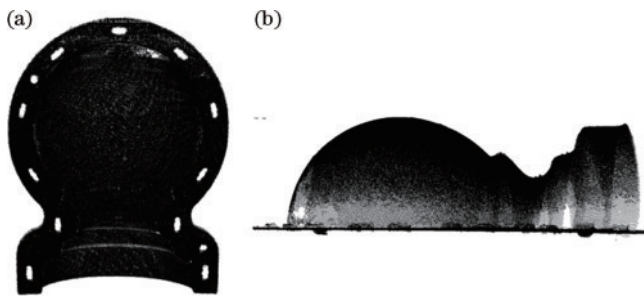


图 8 完整拼接点云。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 8 Complete stitching point cloud. (a) Front view; (b) side view

4 结 论

结合机械臂对待测物进行多视角拍照成像,通过手眼标定得到手眼矩阵并拍摄视角对应的机械臂位姿,将各视角点云从相机坐标系变换到机器人基坐标系下,获得良好的初拼接位置。然后对ICP算法进行改进优化,将各初始变换后的点云进行配准后拼接融合得到完整的拼接点云。与其他拼接算法的对比结果表明,所提算法在精度以及拼接耗时方面都得到优化,提高了算法的准确性和效率。结合机械臂获取各视角点云的方法具有稳定性高、效率高的优点,有较高的应用价值。但仍有不足之处,机器人手眼标定后三维相机与机器人末端的相对位置若出现明显变动,则需要

重新进行手眼标定。另外成像范围受限于机械臂的自由度以及量程,因此下一步的研究侧重可放在拼接算法的适用范围上。

参 考 文 献

- [1] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于点云数据的逆向工程技术研究综述[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 49-53.
Wang X L, Sun W L, Zhang J J, et al. Review on reverse engineering research based on point cloud data[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(2): 49-53.
- [2] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 214-228.
Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 214-228.
- [3] 王立鹏, 张佳鹏, 张智, 等. 基于SLAM定位的多位姿点云拼接与分割方法研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 39-44, 50.
Wang L P, Zhang J P, Zhang Z, et al. Research on splicing and segmentation method of multiple position and attitude point cloud based on SLAM localization[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(4): 39-44, 50.
- [4] 解则晓, 徐尚. 三维点云数据拼接中ICP及其改进算法综述[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 99-103.
Xie Z X, Xu S. A survey on the ICP algorithm and its variants in registration of 3D point clouds[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(1): 99-103.
- [5] 邓嘉, 侯晨辉, 刁婉, 等. 三维点云数据的配准算法综述[J]. 信息与电脑(理论版), 2017(23): 51-52, 56.
Deng J, Hou C H, Diao W, et al. Summarization of registration algorithm of 3D point cloud data[J]. China Computer & Communication, 2017(23): 51-52, 56.
- [6] 郎威, 薛俊鹏, 李承杭, 等. 基于旋转台参数标定实现多视角点云拼接[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1104003.
Lang W, Xue J P, Li C H, et al. Splicing of multi-view point clouds based on calibrated parameters of turntable [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1104003.
- [7] 贾鹤鸣, 孟羽佳, 邢致恺, 等. 基于点云拼接的植物三维模型重建[J]. 应用科技, 2019, 46(1): 19-24.
Jia H M, Meng Y J, Xing Z K, et al. Reconstruction of three dimensional model of plant based on point cloud stitching[J]. Applied Science and Technology, 2019, 46(1): 19-24.
- [8] 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.
- [9] 荆路, 武斌, 方锡禄. 基于SIFT特征点结合ICP的点云配准方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(7): 944-950.
Jing L, Wu B, Fang X L. Point cloud registration method based on the SIFT feature points combined with ICP algorithm[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7): 944-950.

- [10] 王春阳, 李国瑞, 刘雪莲, 等. 基于 IVCCS 的三维点云配准算法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 20210491.
Wang C Y, Li G R, Liu X L, et al. 3D point cloud registration algorithm with IVCCS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 20210491.
- [11] 王程远. 三维重建中的点云拼接算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
Wang C Y. Research on point cloud mosaic algorithm in 3D reconstruction[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [12] 武梦楠, 李丽宏. 基于机械臂的 Kinect 车辆轮廓点云配准[J]. 计算机工程, 2019, 45(11): 315-320.
Wu M N, Li L H. Kinect point cloud registration for vehicle outline based on robotic arm[J]. Computer Engineering, 2019, 45(11): 315-320.
- [13] Shi Q, Xi N. Automated data processing for a rapid 3D surface inspection system[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 3939-3944.
- [14] 彭谦之. 基于机器人的线结构光三维扫描系统关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019: 40-41.
Peng Q Z. The key technology research on line structured light 3D scanning system based on robot[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019: 40-41.
- [15] Daniilidis K. Hand-eye calibration using dual quaternions [J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(3): 286-298.
- [16] 谢洪, 陈立波, 聂倩, 等. 利用点云配准的空地影像融合技术[J]. 测绘通报, 2022(6): 82-87.
Xie H, Chen L B, Nie Q, et al. Air-ground image fusion technology with point cloud registration[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(6): 82-87.
- [17] 彭杰, 李磊民, 石繁荣. 无阈值改进随机抽样一致性点云配准算法[J]. 制造业自动化, 2020, 42(10): 72-76.
Peng J, Li L M, Shi F R. No-threshold improved random sample consensus point cloud registration algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(10): 72-76.
- [18] 李宇翔, 郭际明, 潘尚毅, 等. 一种基于 ISS-SHOT 特征点云配准算法[J]. 测绘通报, 2020(4): 21-26.
Li Y X, Guo J M, Pan S Y, et al. A point cloud registration algorithm based on ISS-SHOT features[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 21-26.
- [19] 马洁莹, 田暄, 翟庆, 等. 基于点到面度量的多视角点云配准方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 120-132.
Ma J Y, Tian X, Zhai Q, et al. Registration of multi-view point sets based on point-to-plane measurement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 120-132.
- [20] Makovetskii A, Voronin S, Kober V, et al. Affine registration of point clouds based on point-to-plane approach[J]. Procedia Engineering, 2017, 201: 322-330.
- [21] 鲁铁定, 袁志聪, 郑坤. 结合尺度不变特征的 Super 4PCS 点云配准方法[J]. 遥感信息, 2019, 34(5): 15-20.
Lu T D, Yuan Z C, Zheng K. Super 4PCS point cloud registration algorithm combining scale invariant features [J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(5): 15-20.