

用于浮雕的线激光扫描三维重建系统

方宇¹, 柯晓龙^{1,2*}, 俞永恒¹, 余献龙¹, 王振忠³

¹厦门理工学院机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;

²福建省绿色智能清洗技术与装备重点实验室, 福建 厦门 361024;

³厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005

摘要 线激光扫描技术多用于零件的表面检测,也可用于物体的三维重建。许多浮雕工艺品由于没有数字模型而无法复现,可利用线激光扫描将浮雕逆向生成三维模型,便于浮雕工艺品的加工。通过结合机器人与线激光,获取浮雕的点云数据,逆向建立浮雕的三维数字模型。搭建三维重建系统,根据实际模型的尺寸计算出机器人的扫描路径,机器人结合线激光扫描得到浮雕点云数据;进行点云数据的预处理,再根据基准平面,补偿带有机器人误差的点云数据;利用基于衍生的迭代最近点(GICP)算法进行点云的自动拼接,并对点云进行后处理;随后利用Delaunay三角剖分算法与曲面重建算法进行三维模型的重建。以老鹰浮雕为重建对象进行实验,实验结果表明用路径扫描拼接的点云处理更为方便,补偿数据后,精度可提高40.48%,有显著补偿效果,浮雕模型重建后与基准模型的标准差平均为0.0576 mm,可满足浮雕模型的重建需求。

关键词 线激光扫描; 机器人控制; 误差补偿; 三维重建; 浮雕

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230707

Three-Dimensional Relief Reconstruction System Based on Laser Line Scanning

Fang Yu¹, Ke Xiaolong^{1,2*}, Yu Yongheng¹, Yu Xianlong¹, Wang Zhenzhong³

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China;

²Fujian Province Key Laboratory of Green Intelligent Cleaning Technology and Equipment, Xiamen 361024, Fujian, China;

³School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

Abstract Laser line scanning technology is primarily used for surface inspection of mechanical parts and three-dimensional (3D) reconstruction of objects. Many relief artifacts cannot be reconstructed owing to the absence of digital models; however, laser line scanning can perform relief reversal and generate a 3D model for the processing of these relief artifacts. In this study, a robot and line laser are combined to obtain point cloud data and reconstruct a 3D digital model of reliefs. To calculate the scanning path of a robot, a 3D reconstruction system based on the size of the reference model is constructed, and the robot is combined with the laser line scan to obtain the point cloud data of the relief. The point cloud data is preprocessed, and then the point cloud data with robot error is compensated according to the reference plane. Based on the derived iterative closest point (GICP) algorithm, the point cloud is automatically stitched and postprocessed. The 3D model is then reconstructed according to the Delaunay triangulation and surface reconstruction algorithms. The experiments were performed with an eagle relief as the reconstruction object. The experimental results show that implementing path scanning in point cloud stitching provides an easy to execute process, with 40.48% improvement in the accuracy after data rectification and significant error compensation. Additionally, the average standard deviation between the reconstructed relief and reference model is 0.0576 mm, meeting the requirements of the reconstruction effort.

Key words laser line scanning; robot control; error compensation; three-dimensional reconstruction; relief

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(52075462)、福建省自然科学基金(2022J011245)、厦门市产学研项目(2023CX0410)

通信作者: *kexiaolong@xmut.edu.cn

1 引言

三维重建是对三维物体建立一个能让计算机显示和处理的数据模型,在计算机环境下对其进行处理分析,使其能在计算机中表达客观世界的虚拟现实技术。大型场合中三维重建主要用于数字化城市的重建、大型器械的损伤检测^[1]、古迹的保护与修复等工作^[2];而在小型场合中多用于零件缺陷检测与外形重建^[3-4],且大多使用线激光和结构光设备^[5-6]。如邓世祥等^[7]搭建了检测与加工一体的线激光实验平台,对叶片的检测数据进行补偿。张鹏程等^[8]提出了一种线激光交叠式扫描的叶片三维重建方法,该方法能较好地重建出叶片的形貌,以便更清楚地观察叶片缺陷。也有一部分学者将三维重建应用于木雕、石雕等艺术品上。如 Zhang 等^[9]提出一种非刚性单图像纹理映射方法,用于古雕塑的重建,该方案可以解决纹理映射中局部细节区域不匹配的问题,并且适用于可变焦距或未校准相机捕获的图像,但是过程中有过多的人工干涉。Liu 等^[10]针对雪雕的重建,提出了一种在复杂光环境中使用的基于结构光的精确快速鲁棒的测量方法,该方法能消除大多数环境噪声,但对结构光无标记点的区域测量会增加累积的误差。

以上线激光研究多用于零件的检测,立体石雕等工艺品的三维重建则多用结构光或图像,而有关线激光用于浮雕类工艺品的研究鲜有报道。传统浮雕多为人工凿刻,或基于数字模型进行加工,若无数字模型则无法用机床等设备进行加工,而建立数字模型一般需要请专业人士进行设计。对此,本文通过结合线激光与工业机器人对无数据模型的浮雕进行三维重构。搭建结合机器人与线激光的扫描平台,提出浮雕的扫描路径与数据预处理算法,对预处理后的点云数据进行误差补偿;并提出基于衍生的迭代最近点(GICP)算法的自动点云拼接算法,对补偿后的点云块进行自动拼接,配合点云后处理算法和Delaunay三角剖分技术生成浮雕模型,实现对浮雕的三维重建。

2 扫描平台搭建与浮雕点云数据获取

2.1 实验平台搭建

建立针对浮雕模型的线激光扫描三维重建系统,该系统由 ABB 公司的 IRB 4600 型工业机器人、日本基恩士 Keyence 公司的 LJ-G200 型线激光设备、计算机和扫描平台组成,线激光设备原理如图 1 所示。利用激光打到物体上的漫反射和三角测量法原理,根据反射角度及已知的激光和激光位移传感器之间的距离,线激光的数字信号处理器能计算出传感器和被测物体之间的距离,并得到 x 和 z 方向上的坐标值,但无法获取完整的三维坐标 (x, y, z) 。本研究可通过机器人与线激光之间的通信获取完整的三维坐标,浮雕扫

描平台如图 2 所示。

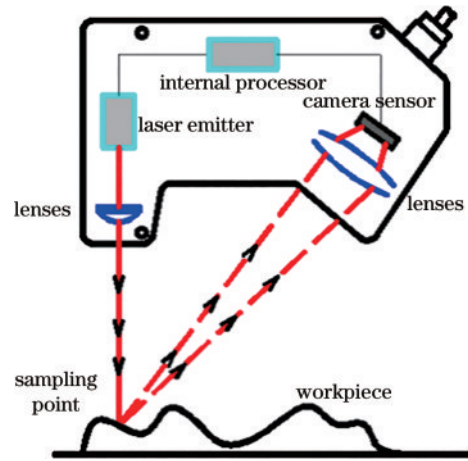


图 1 线激光原理

Fig. 1 Diagram of line laser principle

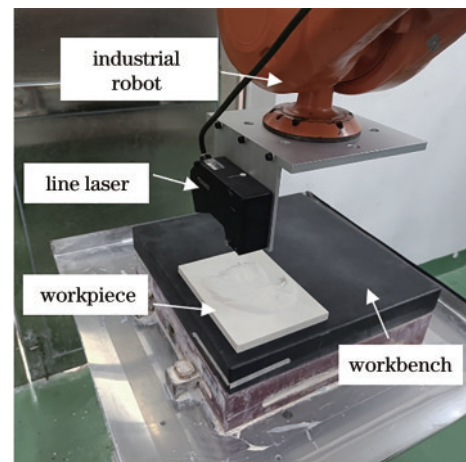


图 2 机器人与线激光扫描平台

Fig. 2 Robot with line laser scanning platform

2.2 浮雕点云数据获取

机器人和线激光根据计算获得的路径对浮雕模型进行扫描,扫描过程如图 3 所示。

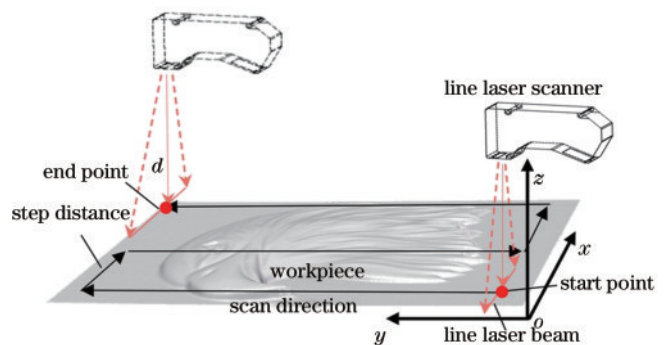


图 3 浮雕扫描过程示意图

Fig. 3 Schematic of the scanning process for the relief

沿图中的路径进行扫描, z 轴为线激光垂直物体表面的方向, y 轴为机器人前进方向(扫描方向), x 轴为激光线的方向。线激光测量宽度为 W ,测量高度为

d , 采样周期为 3.8 ms, 沿 z 轴的重复采样精度为 $2\ \mu\text{m}$, 沿 x 轴的重复采样精度为 $20\ \mu\text{m}$, 线性精度为 $\pm 0.1\%$ 。线激光光束投射在模型上, 线激光宽度测量范围为 $-\frac{W}{2}$ 至 $+\frac{W}{2}$, 采样点的间隔为 $0.1\ \text{mm}$ 。 y 方向为线激光每次采样的行进方向即机器人运动方向, 线激光扫描采样一次, 就将采样时机器人的 y 坐标读取一次, 线激光到模型的距离为 d 。机器人的工件坐标系 $(X_{\text{robot}}, Y_{\text{robot}}, Z_{\text{robot}})$ 的原点设置在工件的扫描起点处, 它与线激光坐标系之间需要进行坐标转换, 点云数据的坐标值的表达式分别为

$$x_{ij} = -\frac{W}{2} + j \times 0.1 + X_{\text{robot}}, \quad j = 0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$y_{ij} = Y_{\text{robot}}, \quad (2)$$

$$z_{ij} = d_{ij} + Z_{\text{robot}}, \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为点云的宽度方向坐标值, y_{ij} 为点云的长度方向坐标值, z_{ij} 为点云的高度方向坐标值; i 和 j 为线激光第 i 次扫描数据的第 j 个点。

3 误差分析与补偿

机器人在运动过程中的变速、变姿等情况及机器人本身的运动误差会影响数据的精度, 导致误差的产生, 从而使扫描得到的点云数据会带有机器人的误差。Zhong 等^[11]提出了一种运动学误差的评定与补偿方法, 该方法通过将每个位置的误差量在编程时补偿到位置坐标上来抑制误差, 但在机器人行进过程中会存在变速或抖动的情况。本节主要目的是通过补偿机器

人在扫描运动过程中 z 轴方向抖动引起的误差, 提高线激光的最终测量精度。具体方法: 利用蔡司三坐标测量机对 000 级大理石平板进行面形测量, 获得基准面形数据; 利用“机器人+点激光传感器”的方式, 对该大理石平板进行面形测量, 得到某一测量路径下点激光测量数据与三坐标测量基准数据的差值, 该差值即为该路径下的机器人 z 轴方向误差; 将该误差补偿到机器人的数据中, 从而提高测量精度。本文采用德国蔡司的 Contura G3 三坐标测量机, 探头分辨率为 $0.05\ \mu\text{m}$, 整体测量精度优于 $1.8\ \mu\text{m}$ 。

使用三坐标测量机, 如图 4 所示, 对大理石平面进行 x 方向和 y 方向的光栅式路径数据采集, 对两个方向数据进行叠加并取交叉点, 对交叉点进行插值细化处理, 数据采集处理结果如图 5 所示。

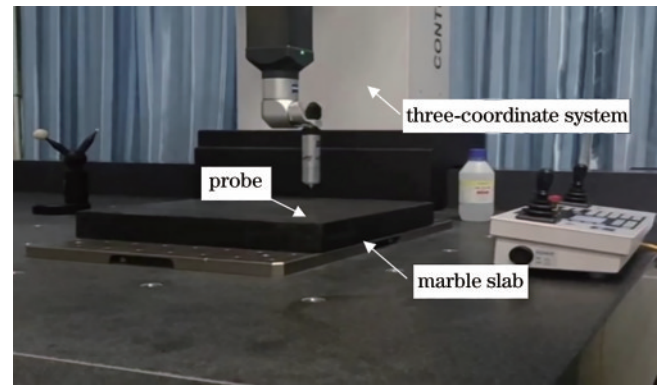


图 4 三坐标机采集大理石平板

Fig. 4 Three-coordinate instrument to collect marble plate

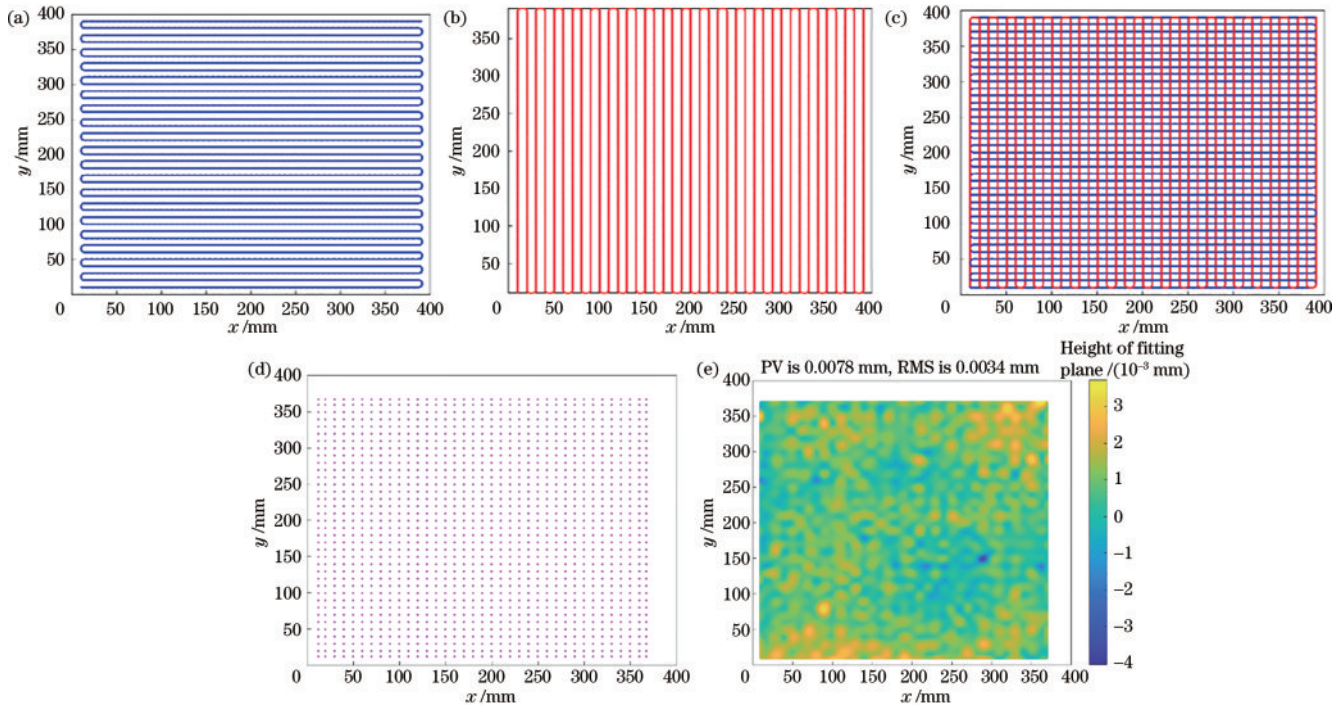


图 5 数据采集处理。(a) x 方向平面数据; (b) y 方向平面数据; (c) x - y 数据交叉; (d) 数据取交叉点; (e) 交叉点插值

Fig. 5 Data acquisition and processing. (a) x direction plane data; (b) y direction plane data; (c) x - y data crossover; (d) taking the intersection of the data; (e) intersection interpolation

对数据进行插值处理后,计算得到平面的波峰波谷(PV)值为 $7.8 \mu\text{m}$,均方根(RMS)值为 $3.4 \mu\text{m}$,此精度可作为扫描的基准使用。

用机器人与点激光测量大理石平板,点激光为日

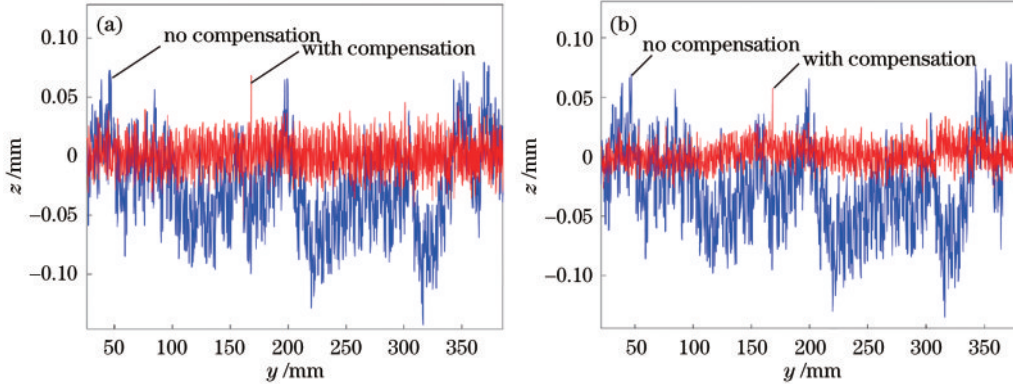


图 6 点激光数据补偿结果。(a)差值补偿的第二次测量结果;(b)差值补偿的第三次测量结果
Fig. 6 Point laser data compensation results. (a) Second measurement result of deviation compensation; (b) third measurement result of deviation compensation

从图 6 看出补偿方案效果明显,将差值补偿到第二次测量结果实验,其 RMS 值从补偿前 0.044 mm 降低到 0.015 mm ;将差值补偿到第三次测量结果实验,其 RMS 值从补偿前 0.043 mm 降低到 0.011 mm 。

此外,在没有点激光传感器的情况下,也可以直接采用线激光测量的方式来取代点激光传感器进行误差标定。其思路是利用测量路径下任一位置的线激光测量数据和相应位置的三坐标面形数据,拟合出该位置机器人的误差值。然而,由于本文采用的线激光精度相对点激光较低,因此在实际的实验过程中,采用点激光的方式进行机器人精度补偿。

4 点云数据的处理算法

目前点云处理方案主要有两大类:基于机器人扫描的手眼标定方法和多次扫描后将点云两两配对的方法。刘旭^[12]采用手眼标定的方法配合机器人的运动轨迹,进行叶片的三维测量,然而手眼标定需要花很多时间计算机人到激光设备的变换矩阵。郭逸豪^[13]通过不同视角扫描得到物体的点云数据,用拼接算法对不同视角下的点云数据进行拼接。这种方法在获取点云数据时,需要从不同视角测量多次,在进行点云拼接时也需要多次调整点云位置才能拼接,过程较为繁琐。因此,本文提出基于路径扫描的自动拼接方法,可按照扫描路径一次扫描完成,获取的点云数据结合预处理算法得到自动拼接,不需要人工多次干预,省去了大量计算和重复操作的麻烦。

4.1 点云获取扫描算法与预处理算法

扫描路径如图 3 所示,扫描流程如图 7 所示。机器人扫描路径算法的原理:测量浮雕尺寸,设置初始扫描步距,程序判断模型宽度是否小于单条激光长度,若小

本基恩士 Keyence 的 LK-H020,其光点直径为 $25 \mu\text{m}$,重复精度为 $0.02 \mu\text{m}$ 。取第一次测量结果和基准数据作差,将差值补偿到第二次测量和第三次测量的数据上,补偿结果如图 6 所示。

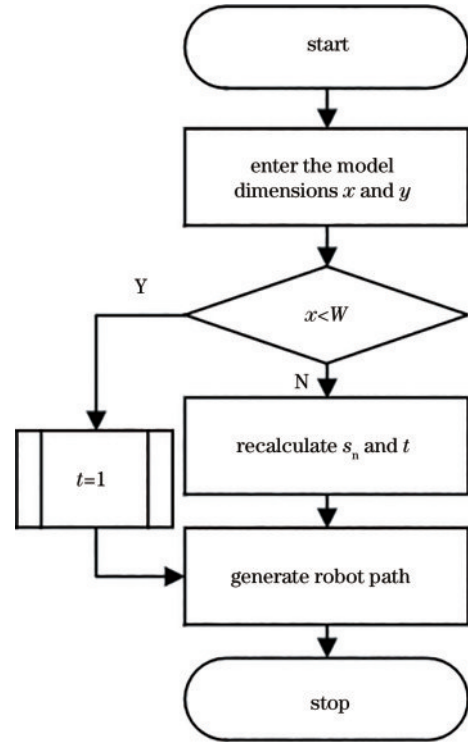


图 7 浮雕扫描流程
Fig. 7 Flow chart of embossed scanning

于,则机器人和线激光只需要在模型长度方向扫描一次;若大于,算法则自动重新计算扫描步距,并计算出模型沿长度方向的扫描次数。扫描次数的计算表达式为

$$t = \left\lceil \frac{x + D}{s} \right\rceil, \quad (4)$$

式中: t 为长度方向的扫描次数; s 为初始步距; x 为浮雕模型宽度; D 为模型宽度方向边缘外的余量,故计算

时需要加上。新步距的计算公式为

$$s_n = \frac{x + D}{t} \quad (5)$$

根据扫描次数和新步距,最终可得到机器人扫描路径的坐标点,将这些坐标点输入到计算路径程序中,由算法生成机器人运动路径程序。如浮雕模型尺寸为 200 mm,宽为 150 mm,则通过扫描路径算法计算得到扫描次数 t 为 3,新步距 s_n 为 55 mm,以此计算出路径的坐标点。

由于机器人在往复运动的过程中存在加减速和回程误差,对测量精度带来一定影响。为此,线激光在扫描时往 y 方向两侧偏置一定距离,并在最后数据处理时将这部分的数据作为无效数据剔除。

机器人与线激光按扫描路径得到的原始点云数据如图 8 所示。根据扫描路径算法中得到的扫描新步距 s_n 与物体的长度 y 进行点云的粗位移拼接,其实际是一种点云的平移,即将目标点云移动一定距离,表达式为

$$P' = P + d, \quad (6)$$

式中: P' 为平移后的点云数据; P 为需要位移的目标点云; d 为移动的距离向量。它们的坐标形式为

$$P' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, d = \begin{pmatrix} \partial_x \\ \partial_y \\ \partial_z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

由此得到

$$x' = x + \partial_x, y' = y + \partial_y, z' = z + \partial_z. \quad (8)$$

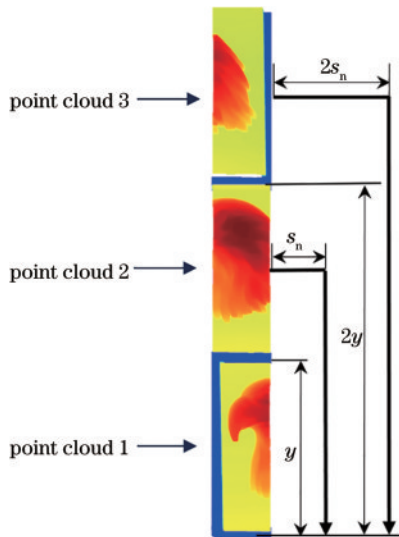


图 8 原始点云平移过程

Fig. 8 Original point cloud translation process

P 到 P' 的变换过程可表示为 $P' = TP$, 变换矩阵 T 一般称为平移向量,为

$$T = T(\partial_x, \partial_y, \partial_z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \partial_x \\ 0 & 1 & 0 & \partial_y \\ 0 & 0 & 1 & \partial_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

平移过程如图 8 所示。根据扫描次数 t 和点云的长 y 对平移后的点云进行分块,预处理后的点云如图 9 所示,但还存在轻微的错开(机器人实际行走距离与理想距离 y 存在轻微偏差),错开部分对应点对的均方根误差(RMSE)分别为 0.237 mm 和 0.198 mm,因此需要对点云进行拼接处理。

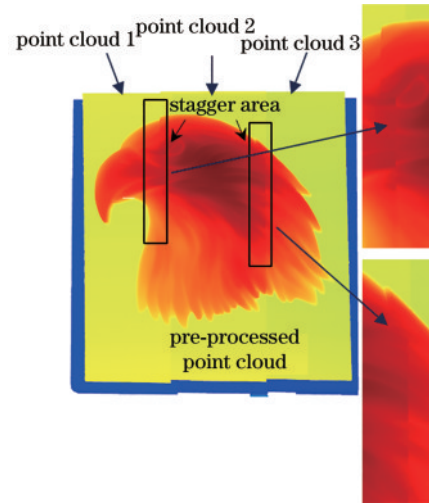


图 9 预处理后轻微错开的点云

Fig. 9 Slightly staggered point cloud after preprocessing

4.2 点云自动拼接算法

点云拼接作为三维重建的前提,其精度与效果对三维重建有着非常重要的影响。点云间拼接的过程其实就是求得两点云之间的旋转平移矩阵,把源点云变换到和目标点云同坐标系下,源点云为 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 目标点云为 $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$, 点云拼接过程可表示为 $Q = RP + T$ 。点云拼接算法最早由 Besl 等^[14]提出,ICP 算法的主要内容是最小化目标函数,表达式为

$$f(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q^i - R \times P^i - T|^2. \quad (10)$$

但初始 ICP 算法有不便之处,后衍生出一些速度更快、配准鲁棒性更高的方法,如 GICP 算法^[15-16]。本文对 GICP 算法进行优化,根据扫描间隔,自动计算点云的拼接阈值,大致步骤如下。

1) 遍历所有点云 M , 计算得到每两条点云数据间隔距离的集合 $D = \{d_1 \dots d_k \dots d_n\}$, 取 D 在 0.35 mm 到 0.65 mm 之间的值, $d_k = y_{k+1} - y_k$, 然后计算 D 的平均值作为拼接阈值 τ 。

2) 在预处理算法粗拼接后,得到两簇互为近邻的对应点对 $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 和 $Q = \{q_i | i =$

1, 2, ..., n}, 其中 p_i 和 q_i 为互相匹配的点。

3) 设置精度阈值 σ 作为停止迭代的条件。

4) 根据对应关系生成新的匹配点对。

5) 利用最小二乘法求解刚性变换的矩阵 T , 每簇对应点的拼接误差 ε_i 为

$$\varepsilon_i = q_i - Tp_i \quad (11)$$

6) 计算变换矩阵的函数为

$$T = \arg \min \sum \varepsilon_i^T (C_i^q + T \times C_i^p \times T^T)^{-1} \varepsilon_i \quad (12)$$

式中: C_i 为单个点云的协方差矩阵。

7) 判断 $|\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i| < \sigma$ 是否符合, 若不符合, 返回步骤 4), 符合则结束迭代。

所提方法在预处理时已对点云数据进行粗拼接和分块处理, 点云的自动拼接算法会根据点云数据分块的数量自动计算拼接次数, 并根据点云的扫描间隔计算拼接阈值。点云按分块顺序进行两两拼接, 如先将点云 1 与点云 2 拼接, 再将拼接后的点云与点云 3 进行拼接, 以此类推。点云从导入到拼接完成不需要人工干预, 拼接过程如图 10 所示。

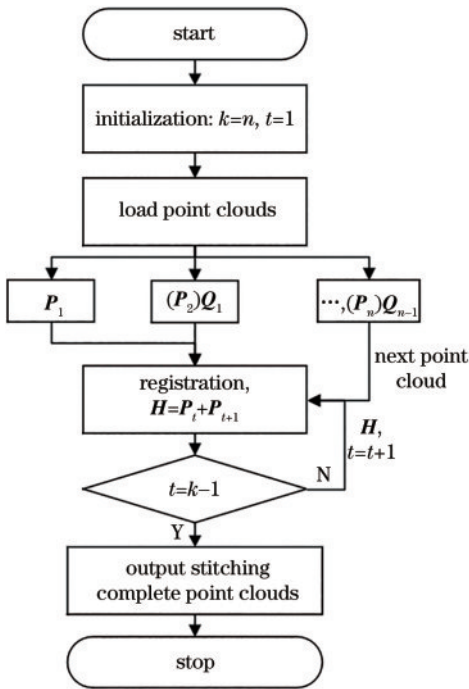


图 10 拼接过程流程

Fig. 10 Flow chart of splicing process

点云拼接后的结果如图 11 所示, 对应点对的 RMSE 分别变为 0.116 mm 和 0.113 mm, 错开部分已拼接完成。

4.3 点云后处理算法

点云拼接后, 两两点云之间会存在重复部分, 可设置一个距离阈值进行索引, 以前一片点云为基础, 筛选出两片点云中重复部分的点云, 并在第二片点云中剔除(反之亦可), 重复部分点云如图 12 所示, 剔除后的结果如图 13 所示。

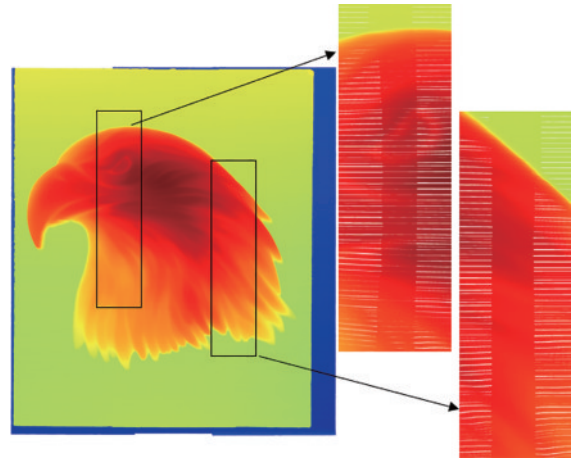


图 11 拼接后的点云数据

Fig. 11 Point cloud data after stitching

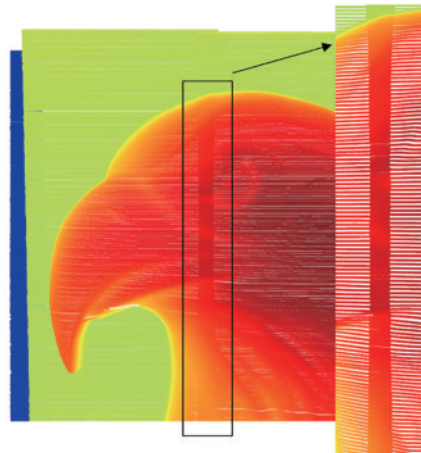


图 12 重复部分点云

Fig. 12 Repeat part of the point cloud

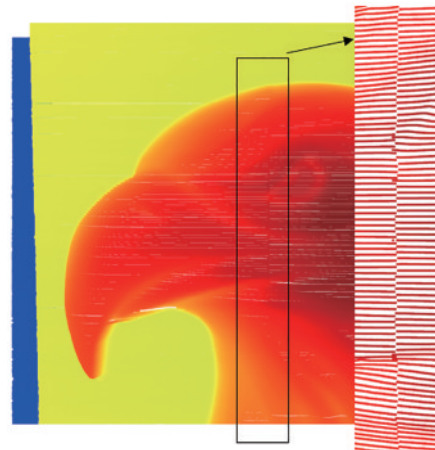


图 13 剔除重复部分后的点云

Fig. 13 Point cloud after eliminating duplicates

在线激光扫描过程中, 会将浮雕周围的环境一并扫入数据, 点云数据中会存在噪声点和无效点, 如图 14 所示。需要对这些无效点云进行剔除, 使其不会影响到点云处理完后的建模。本文使用直通滤波算法过滤掉这些无效点, 剔除无效数据后的点云如图 15 所示。

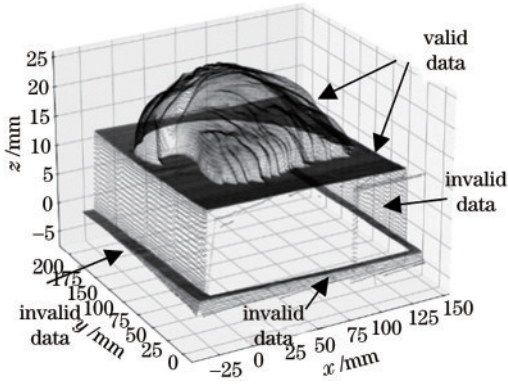


图 14 点云数据图

Fig. 14 Point cloud data graph

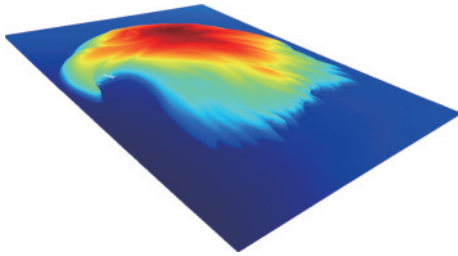


图 15 剔除无效数据后的点云

Fig. 15 Point cloud after removing invalid data

在线激光传感器扫描过程中,存在如线激光工装与机器人的安装误差、工件装夹误差、工件与基准底面不平整引入的误差等,从而导致扫描得到的点云数据带有倾斜成分,如图 16 所示。

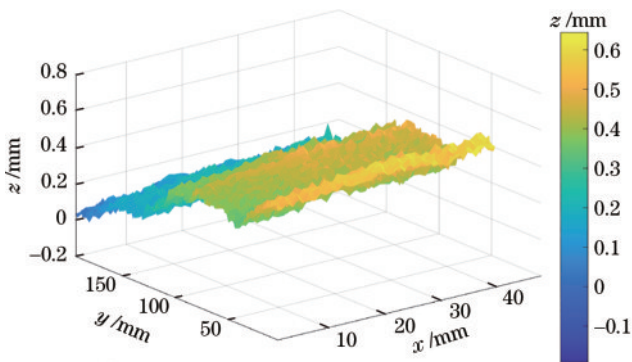


图 16 倾斜点云图

Fig. 16 Tilt point cloud image

倾斜点云数据在处理时会影响到点云的拼接和后续处理,因此需要对点云进行调平处理即水平面校准,校准步骤为:

- 1) 筛选出大致在水平面的点;
- 2) 利用筛选出的地面点估算水平面方程

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (13)$$

那么校准前水平面法向量为 $\mathbf{A} = (a \ b \ c)$;

3) 利用水平面法向量 $\mathbf{A} = (a \ b \ c)$ 和点云坐标系的法向量 $\mathbf{B} = (0 \ 0 \ 1)$, 求得点云的旋转矩阵 \mathbf{R} ;

4) 把倾斜的点云乘上旋转矩阵 \mathbf{R} 就是水平面校准

后的点云。校准后的数据如图 17 所示。

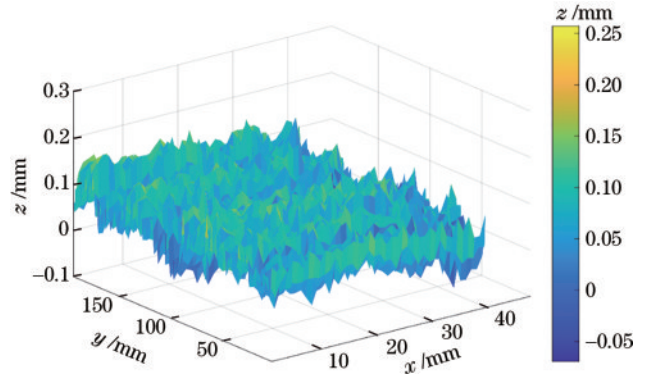


图 17 水平面校准后的点云

Fig. 17 Point cloud after horizontal calibration

4.4 点云的三角剖分与模型重建

点云的三角剖分是一种广泛应用于曲面重建的方法,使用最广泛的是 Delaunay 三角剖分及其优化技术^[17]。Delaunay 三角剖分的最大化最小角特性和空圆特性^[18]使生成的三角网格都是唯一的, Delaunay 三角剖分技术能更好地处理点云数据,生成三角网格^[19]。Delaunay 三角剖分技术在二维点云数据的三角网格生成中有很好的效果,但是如浮雕等三维立体的物体,由于点云之间拓扑关系复杂,生成的三角网格会存在交错和空洞的情况^[20-21],此技术不能得到很好的效果,因此使用平面投影的 Delaunay 三角剖分技术生成浮雕模型点云的三角面片能解决这个问题。该方法原理为:将处理完的浮雕点云数据投影至二维平面(x-y面)上;随后将这个二维平面上的点云生成三角网格,并将每个点的深度坐标(点云的 z 坐标)带回到二维平面上的三角网格点,变成三维空间的三角网格模型^[22];最后将三维网格转换成 STL 格式, STL 模型如图 18 所示。生成的 STL 模型可用于浮雕的加工,也可以对没有数字模型的浮雕进行重现。

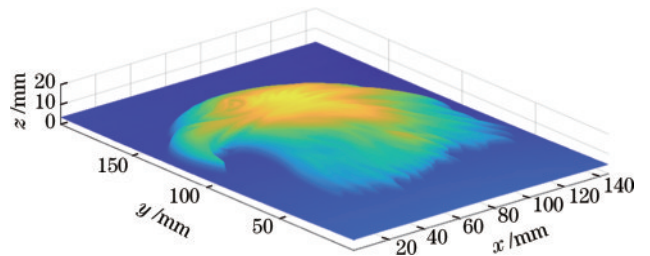


图 18 STL 模型

Fig. 18 STL model

5 实验结果对比及分析

在三维模型建立后,对三维模型的精度进行分析,设计验证实验。1) 浮雕模型存在加工误差(加工实物与原数字模型形貌误差较大),利用手持三维扫描仪采集数据,对加工后的浮雕进行重建。该扫描仪为加拿

大 Creaform 形创公司的 HANDYSCAN 3D 系列的 REVSCAN,其面形测量精度为 0.05 mm,工件表面可测量最小距离(即分辨率)为 0.1 mm。将手持三维扫描仪重建的模型作为基准模型。2)验证重建后的模型精度,将未补偿的点云数据生成模型后与基准模型进行对比,得出误差值(该误差为重建精度误差),再对补偿后的数据模型与基准模型进行对比,得出补偿后的精度误差,最终得出重建精度和补偿前后的误差对比,验证重建和补偿的有效性。

5.1 实验平台搭建

为验证线激光扫描数据重建后的精度,将手持三维扫描仪得到的模型数据作为基准,对线激光扫描得到的模型数据补偿前后的误差进行评估。图 19 为手持扫描仪得到的基准模型和线激光扫描得到的重建模型补偿前后的距离色彩图^[23]。图中显示了误差范围在 [-1 mm, 1 mm] 的频率(多次测量结果相似,取一组图作为参考)。其中红色、蓝色分别表示正、负距离,误差越大颜色越深。用补偿前后的平均差、标准偏差、均方误差对模型精度进行定量分析,结果如表 1~3 所示。

表 1 模型补偿前后的平均差值

Table 1 Mean deviation before and after model compensation unit: mm

Measurement No.	Mean deviation before compensation	Mean deviation after compensation
1	-0.0043	0.0021
2	-0.0037	0.0028
3	-0.0065	0.0032
4	-0.0043	0.0035
5	-0.0064	0.0024

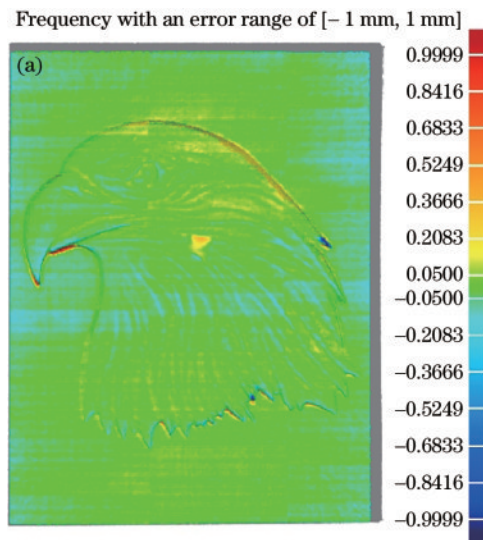


表 2 模型补偿前后的标准偏差值

Table 2 Standard deviation before and after model compensation unit: mm

Measurement No.	Standard deviation before compensation	Standard deviation after compensation
1	0.0741	0.0584
2	0.0631	0.0573
3	0.0614	0.0586
4	0.0608	0.0563
5	0.0615	0.0572

表 3 模型补偿前后的均方误差值

Table 3 Mean squared error before and after model compensation unit: mm

Measurement No.	Mean squared error before compensation	Mean squared error after compensation
1	0.0625	0.0391
2	0.0454	0.0275
3	0.0612	0.0426
4	0.0429	0.0273
5	0.0632	0.0385

5.2 实验结果分析

从图 19 可知,补偿前模型面型的部分区域值存在小于基准模型面型值的情况,误差在 0.2 mm 左右。由于受线激光成像原理的限制,模型在垂直区域会使相机无法接收到激光信号,导致极少数部分出现极值区域,如图 20 所示。极值区域横截图如图 21 所示。

从表 1~3 可以分析出:模型在补偿后与手持扫描仪得到的模型更接近,误差更小,补偿后平均差值更与基准模型接近;标准偏差平均为 0.0576 mm;均方误差

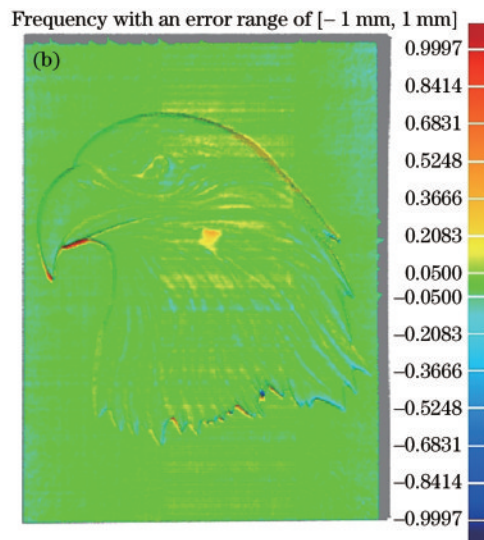


图 19 重建模型补偿前后对比。(a)补偿前与基准模型的对比;(b)补偿后与基准模型的对比

Fig. 19 Reconstruction comparison before and after model compensation. (a) Comparison with benchmark model before compensation; (b) comparison with benchmark model after compensation

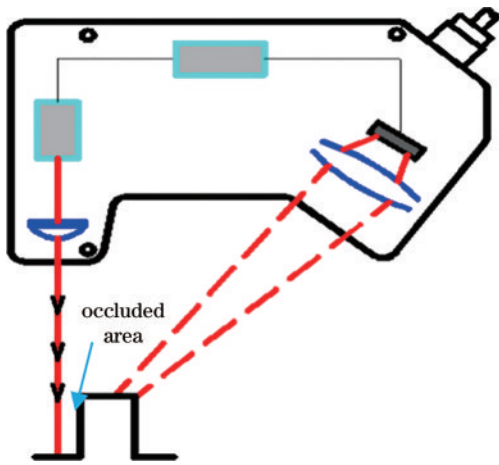


图 20 遮挡区域原理

Fig. 20 Schematic diagram of occlusion area

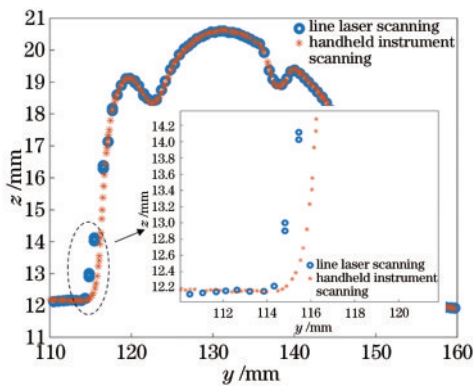


图 21 极值区域横截图

Fig. 21 Cross section of extreme value region

减小约 40%。模型的数据补偿有明显效果,且补偿后的模型的重建效果更佳,更接近基准模型。

6 结 论

结合机器人与线激光,搭建了浮雕模型点云数据采集的实验平台,该平台可以满足大部分浮雕模型的扫描要求。并提出一种点云自动拼接算法,根据模型尺寸,进行扫描路径的计算和点云数据的处理,提高了点云处理的效率。然后利用三坐标机测量大理石平面,生成基础平面数据,结合点激光、线激光与机器人,对机器人运动过程中的误差进行数据的补偿,数据补偿平均精度可提高 40.48%。对点云数据进行拼接与对无效点进行剔除,利用 Delaunay 三角剖分技术重建 STL 模型,逆向生成浮雕的三维模型,逆向后的模型与基准模型的标准差平均为 0.0576 mm。综上所述,使用线激光能较好地实现浮雕模型的三维重建,但本方案对浮雕模型垂直区域的数据获取有一定局限性,在后续工作中需要进一步完善扫描策略。

参 考 文 献

[1] 吴军,李鑫,刘少禹,等.基于后方定位的飞机蒙皮损

伤视觉检测全局三维重建方法[J].光学学报,2021,41(11):1115002.

Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.

[2] 屠大维,兰浩,张曦.文物数字化三维重建技术研究[J].激光与光电子学进展,2019,56(19):191504.

Tu D W, Lan H, Zhang X. Digital three-dimensional reconstruction technology of cultural relics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191504.

[3] 韩家杰,周建平,薛瑞雷,等.线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J].中国激光,2021,48(14):1402010.

Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.

[4] 王红平,王宇,赵世辰,等.基于十字激光的双目视觉钻铆孔质量检测[J].中国激光,2022,49(21):2104002.

Wang H P, Wang Y, Zhao S C, et al. Quality inspection of riveting holes by binocular vision based on cross laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104002.

[5] 杨帆,刘斌,初录,等.基于网格结构光的双目测量方法[J].中国激光,2021,48(23):2304004.

Yang F, Liu B, Chu L, et al. Binocular measurement method using grid structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2304004.

[6] 杨帆,丁晓剑,曹杰.基于彩色结构光的自由曲面三维重建方法[J].光学学报,2021,41(2):0212001.

Yang F, Ding X J, Cao J. 3D reconstruction of free-form surface based on color structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0212001.

[7] 邓世祥,吕彦明,王康,等.线激光测量点云数据误差的预测与补偿[J].激光与光电子学进展,2022,59(16):1628006.

Deng S X, Lü Y M, Wang K, et al. Prediction and compensation of point cloud data error in line laser measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1628006.

[8] 张鹏程,刘瑾,杨海马,等.航空发动机损伤叶片的激光交叠式三维重建[J].激光与光电子学进展,2020,57(16):161504.

Zhang P C, Liu J, Yang H M, et al. Laser overlapping three-dimensional reconstruction of damaged aero engine blade[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161504.

[9] Zhang F, Huang X F, Fang W, et al. Texture reconstruction of 3D sculpture using non-rigid transformation[J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(5): 648-655.

[10] Liu W C, Zhang L G, Zhang X L, et al. 3D snow sculpture reconstruction based on structured-light 3D vision measurement[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3324.

[11] Zhong B, Xu Q, Wang J, et al. Evaluation and compensation of a kinematic error to enhance prepolishing accuracy for large aspheric surfaces by robotic bonnet

- technology[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25085-25100.
- [12] 刘旭. 基于机器人线激光扫描的叶片三维测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Liu X. Research on 3D measurement method of blade based on robot line laser scanning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [13] 郭逸豪. 线激光测量系统的开发和点云拼接的实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
Guo Y H. Development of line laser measurement system and realization of point cloud stitching[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [14] 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.
- [15] Segal A, Haehnel D, Thrun S. Generalized-ICP[C]// Robotics: Science and Systems V, Robotics: Science and Systems Foundation, June 28 - July 1, 2009, University of Washington, Seattle, USA. [S.l.: s.n.], 2009.
- [16] 林宝尉, 王法胜, 孙怡. 基于 SGICP 的点云尺度估计及配准算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(5): 202-207.
Lin B W, Wang F S, Sun Y. SGICP-based point cloud scale estimation and alignment algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(5): 202-207.
- [17] Perumal L. New approaches for Delaunay triangulation and optimisation[J]. Heliyon, 2019, 5(8): e02319.
- [18] 刘剑, 白迪. 基于特征匹配的三维点云配准算法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215005.
Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215005.
- [19] Kim J, Cho J. Delaunay triangulation-based spatial clustering technique for enhanced adjacent boundary detection and segmentation of LiDAR 3D point clouds[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3926.
- [20] Su T Y, Wang W, Liu H X, et al. An adaptive and rapid 3D Delaunay triangulation for randomly distributed point cloud data[J]. The Visual Computer, 2022, 38(1): 197-221.
- [21] Bhattarai S, Dahal K, Vichare P, et al. Adapted Delaunay triangulation method for free-form surface generation from random point clouds for stochastic optimization applications[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 61(2): 649-660.
- [22] 官东林, 文国军, 王玉丹, 等. 基于线激光扫描的岩石激光钻孔的三维重建和可视化[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 173-183.
Guan D L, Wen G J, Wang Y D, et al. 3D reconstruction and visualization for laser drilling hole on rock based on line laser scanning[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 173-183.
- [23] He Y, Zheng S Y, Zhu F B, et al. Real-time 3D reconstruction of thin surface based on laser line scanner[J]. Sensors, 2020, 20(2): 534.