

基于激光跟踪仪的多测站地面激光扫描点云配准方法

谭舸^{1,2}, 花向红^{1,2*}, 陶武勇^{1,2}, 赵不钊^{1,2,3}, 李丞^{1,2}

¹武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079;

²武汉大学灾害监测与防治研究中心, 湖北 武汉 430079;

³东华理工大学江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013

摘要 针对地面三维激光扫描点云的多测站配准问题, 提出一种利用激光跟踪仪来辅助实现点云配准的新方法。该方法利用激光跟踪仪跟踪、求解地面三维激光扫描仪移站前后的位置及姿态变化, 建立移站前后扫描点云数据之间的坐标转换关系数学模型, 从而实现多视角地面激光点云数据的配准。该方法对多片点云重叠度无要求, 无需粘贴和提取标志点, 且适用于不同尺寸、特征待测物体和不同测量环境。实验结果表明, 该方法配准精度不低于 0.71 mm, 且效率较高, 可配合地面三维激光扫描仪使用。

关键词 测量; 激光跟踪仪; 激光点云; 点云配准; 坐标变换

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1710002

1 引言

地面激光扫描仪(TLS)能够灵活、高精度地获取地面物体的三维点云信息, 因此被广泛地应用于遗迹保护与修复^[1]、建筑物三维(3D)模型重建^[2]、变形监测^[3]中。在实际应用中, 由于扫描仪视野有限, 为获取被测物体表面完整的三维信息, 扫描仪需要进行多站位、多视角的扫描, 获取待测物体的分站位点云信息。因此必须对多站点云进行配准, 得到待测物体的完整点云信息, 这也是场景重建、分割和分类的前提^[4]。

国内外大量学者对此进行了广泛研究。目前应用最广泛的配准方法是迭代最近点(ICP)算法, 由Besl等^[5]提出。该算法思想简单、性能优越, 但速度和稳健性极大依赖于待配准点云数据的初始位置, 不恰当的初值将直接导致错误的配准结果, 需配合有效且鲁棒性高的粗拼接技术。其余已有的配准方法包括但不限于以下。

利用靶标或标志点的配准方法^[6-8], 通过人为在扫描仪相邻两次测量的公共视场内粘贴标志点(粘

贴平面或空间靶标)来进行辅助拼接, 标志点法多用于大型物体三维量测。对于小型物体, 由于其表面积小, 曲率半径小, 标志点变形较大使得配准精度较低^[9]。且该方法存在繁琐的标志点粘贴、清除工作, 易损坏待测物体, 不适用于软质待测目标, 标志处点云数据损失等缺点, 应用受限较多。

精确标定的旋转平台法^[10-12], 郎威等^[13]通过精确标定旋转台参数, 从而获得转台坐标系和扫描仪测量坐标系之间的转换关系模型, 根据旋转角度建立坐标转换矩阵, 实现多个视角下的点云粗配准。但该方法具有标定过程繁琐、只能得到特定视角下三维点云的位置关系、待测物体尺寸不能超过旋转平台且需要固定于转台上、测量系统与转台的相对位置不能发生变化等缺点。

基于点云特征的自动配准方法^[14-20], 基于不同视角点云的相同特征, 实现多视角点云的配准, 此类方法无需引入任何外加约束, 依靠计算机算法来实现多视角点云的配准, 但要求待测物体具有较为明显的线、面、颜色、结构等几何特征, 对相邻视角点云重叠度也有要求, 因此普适性不高, 在实际工程测量

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(41674005, 41871373)、东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金(DLLJ202015)

通信作者: *xhhua@sgg.whu.edu.cn

中应用亦较少。

马国庆等^[21-23]利用 iGPS (indoor Global Positioning System) 世界坐标系, 以室内定位的方法来实现对扫描仪位置的定位和跟踪, 配合工业机器人实现了较好的点云配准结果。但是此方法只适合于室内环境, 且要求被测物体尺寸在机器人臂展的范围内, 室外环境或应用于大尺寸物体测量时受限。

综上所述, 以上方法都有一定的局限性。本文提出了一种基于激光跟踪仪的多测站地面激光扫描点云配准方法, 可以克服上述方法的缺陷。该方法通过关闭地面激光扫描仪的位置传感器的方式, 使得扫描坐标系成为一个相对于扫描仪机身保持不变的独立坐标系。将四个跟踪仪球棱镜基座分别固定于三维激光扫描仪机身, 通过一次“标定”过程, 求解出四个基座点在扫描坐标系下的坐标。由于扫描坐标系已经是一个相对于扫描仪机身保持不变的独立坐标系, 基座点坐标在任意扫描仪测站坐标系下不变。每次扫描仪移站后, 使用激光跟踪仪配合球棱镜测量四个基座点在跟踪仪坐标下的坐标, 结合“标定”结果, 则可求解任意测站扫描坐标系的相对旋转及平移矩阵, 建立移站前后扫描坐标系之间的转换关系数学模型, 实现多视角点云的精确配准。

2 本文方法的基本原理

本文方法具体步骤分为如下 5 个部分: 1) 搭建激光跟踪仪和激光扫描仪组成的测量系统, 关闭激光扫描仪的位置传感器, 并将 4 个跟踪仪球棱镜基座合理固定于扫描仪机身恰当位置, 保证在某一视角下, 跟踪仪能够观测到所有球棱镜基座点而不会被扫描仪机身所遮挡; 2) 将 4 片平面靶标固定于光滑墙面上, 跟踪仪和扫描仪分别设站观测所有平面靶标特征点, 建立跟踪仪坐标系和扫描仪坐标系的即时位置关系, 跟踪仪结合球棱镜观测固定于扫描仪机身上的基座点, 通过建立的坐标系间的即时位置关系, 得到基座点在扫描仪坐标系下的坐标, 完成“标定”; 3) “标定”结束后, 结合实际测量条件和目的, 在保持跟踪仪对扫描仪通视的情况下, 跟踪仪、扫描仪可分别移动至合理位置设站; 4) 利用跟踪仪结合球棱镜, 测量扫描仪移站前(后)的球棱镜基座点坐标, 建立扫描仪分测站的相对位置关系; 5) 扫描结束后, 利用建立的分测站的相对位置关系数学模型对多测站点云数据进行配准。

2.1 激光跟踪仪测量系统

激光跟踪仪是一款大尺寸精密测量仪器, 采用

激光干涉测距与角度编码器测角原理, 集激光干涉测距技术、光电检测技术、精密机械技术、计算机及控制技术、现代数值计算理论于一体, 对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标, 是大尺度空间测量中精度最高和最重要的工业科学仪器^[23]。同时, 其拥有测量精度高、全自动测量、测量范围大等传统测量仪器无法比拟的优点。激光跟踪仪是一个典型的极坐标测量系统, 本身具有独立坐标系, 通过测量斜距 S 与俯仰角 θ 、水平角 φ 来确定目标位置, 它的测量原理如图 1 所示。

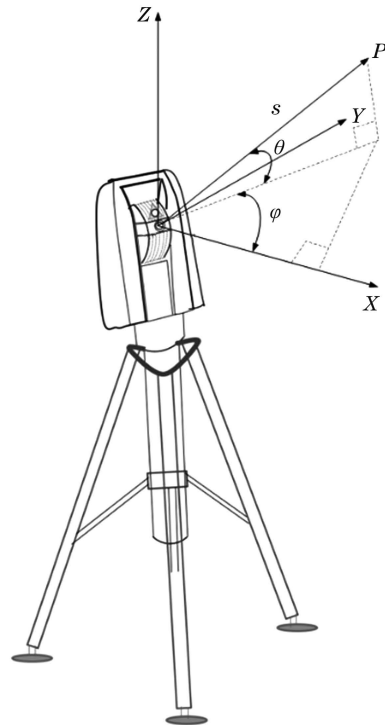


图 1 激光跟踪仪测量原理

Fig. 1 Measurement principle of laser tracker

目标点 P 位置坐标可表示为

$$\begin{cases} X = S \sin \theta \cos \varphi \\ Y = S \sin \theta \sin \varphi \\ Z = S \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

配合图 2(b) 中 T-Probe 手持式测针, 实现接触式高精度测量方案, 在 12 m 范围内对测针接触点坐标测量精度可达亚微米级。配合图 2(c) reflector 球棱镜及基座使用, 光学定心精度不超过 $\pm 3 \mu\text{m}$, 重复测量精度可达 $10 \mu\text{m}$ 。可在直径 160 m 范围内进行自动定位与追踪, 实现高速动态测量。reflector 球棱镜测量及定心精度远高于 T-Probe 手持式测针, 因此, 为提高测量效率与精度, 使用 reflector 球棱镜基座作为追踪扫描仪位置姿态的中介点。



图 2 激光跟踪仪测量系统。(a)激光跟踪仪；(b)T-Probe 手持式探测针；(c)球棱镜和基座

Fig. 2 Laser tracker measurement system. (a) Laser tracker; (b) T-Probe handheld probe; (c) reflector and pedestal

2.2 “标定”原理

“标定”过程旨在确定球棱镜基座点在扫描仪坐标系下的位置,整个系统的配准精度在很大程度上依赖于基座点的“标定”结果精度。本文配合激光跟踪仪的 T-Probe 手持式探测针、球棱镜以及片完全

漫反射平面靶标来完成标定。

合理安置激光跟踪仪和激光扫描仪,确保两台仪器能同时观测到全部平面靶标。扫描仪以最大分辨率及最高质量完成一次扫描,将测量点云导入 CloudCompare 软件中,得到四个平面靶标中心点在扫描仪坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下的坐标 $X_i(x_i, y_i, z_i)^T$ 。将球棱镜依次放置于 4 个基座点上,并测出其在跟踪仪坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$ 下坐标 $X_j(x_j, y_j, z_j)^T$ 。使用 T-Probe 手持式探测针依次测量 4 个平面靶标中心点,得到靶标中心点在跟踪仪坐标系下坐标 $X_m(x_m, y_m, z_m)^T$ 。由奇异值分解(SVD)法计算由 X_m 到 X_i 的旋转矩阵 R_{mi} 及平移向量 T_{mi} 。

$$X_i = X_m * R_{mi} + T_{mi} \tag{2}$$

则 R_{mi} 和 T_{mi} 亦是跟踪仪坐标系至扫描仪坐标系的坐标系转换矩阵。则基座点在扫描仪坐标系下的坐标 $X_s(x_s, y_s, z_s)^T$ 可表示为

$$X_s = X_j * R_{mi} + T_{mi} \tag{3}$$

标定过程示意图如图 3 所示。

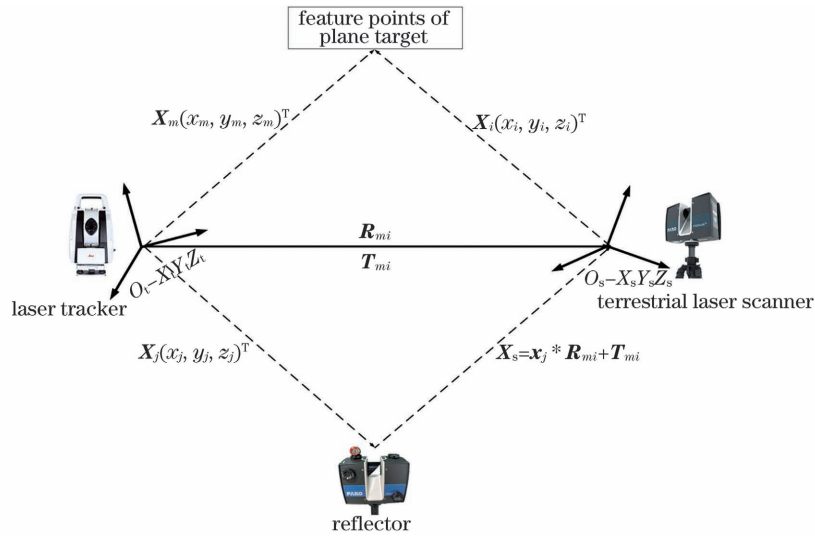


图 3 标定过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calibration process

在关闭扫描仪的位置传感器后,扫描仪坐标系是一个相对于扫描仪机身具有旋转、平移不变特性的独立坐标系。而 4 个基座点都牢固粘贴于扫描仪机身,所以 4 个基座点在扫描仪坐标系下的坐标在经过一次“标定”以后即不再改变,无需再次“标定”。

2.3 SVD 法求解坐标系变换矩阵

SVD 法^[24]从最小二乘原理出发,利用两个坐标系下两组相互对应的三维坐标点集,通过简化和奇异值分解的方法,得到其坐标系转换关系,求解其

旋转矩阵 R 和平移向量 T 。 $x_A = \{x_{A1}, x_{A2}, \dots, x_{An}\}$, $x_B = \{x_{B1}, x_{B2}, \dots, x_{Bn}\}$ 是一对空间同名点集,可根据这两个点集计算他们的旋转及平移矩阵,其最小二乘表达式可表示为

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 \|x_{Bi} - (R x_{Ai} + T)\|^2 \tag{4}$$

旋转矩阵 R 和平移向量 T 应使得(4)式中 Σ^2 最小。 X_A 和 X_B 为两组点集重心坐标,令 $x_i = x_{Ai} - X_A$, $y_i = x_{Bi} - X_B$,则(4)式可表示为

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \|y_i - \mathbf{R}x_i\|^2. \quad (5)$$

要使 Σ^2 最小, 等价于使下式中 $\sum_{i=1}^n \omega_i^2 y_i^T \mathbf{R}x_i$ 取最大值。

$$\sum_{i=1}^n \omega_i^2 y_i^T \mathbf{R}x_i \leq \text{tr} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \mathbf{R}x_i y_i^T \right) = \text{tr}(\mathbf{R}\mathbf{H}), \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H} = \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_i y_i^T \right)$ 。对矩阵 \mathbf{H} 进行奇异值分解,

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T. \quad (7)$$

此时, 旋转矩阵 \mathbf{R} 可通过下式计算

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T. \quad (8)$$

平移向量 \mathbf{T} 可由 \mathbf{R} 和 x_i, y_i 求得

$$\mathbf{T} = y_i - \mathbf{R}x_i. \quad (9)$$

由此计算得出的 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} , 在最小二乘准则下, 转

换差异 Σ^2 最小。两个坐标系之间的转换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

2.4 分测站配准

“标定”结束后, 即可得到在任意扫描仪坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 下保持不变的基座点坐标 $X_s(x_s, y_s, z_s)^T$ 。为求解不同测站扫描仪坐标系的坐标变换关系, 以激光跟踪仪坐标系作为全局坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 。

基于激光跟踪仪的地面激光扫描点云配准模型如图 4 所示, 一共包含 $n+1$ 个坐标系: n 个扫描仪坐标系 $O_{s_1}-X_{s_1} Y_{s_1} Z_{s_1} \cdots O_{s_k}-X_{s_k} Y_{s_k} Z_{s_k}, O_{s_{k+1}}-X_{s_{k+1}} Y_{s_{k+1}} Z_{s_{k+1}} \cdots O_{s_n}-X_{s_n} Y_{s_n} Z_{s_n}$, 和一个跟踪仪世界坐标系 $O_w-X_w Y_w Z_w$, 其中 n 为地面激光扫描仪的分测站数。

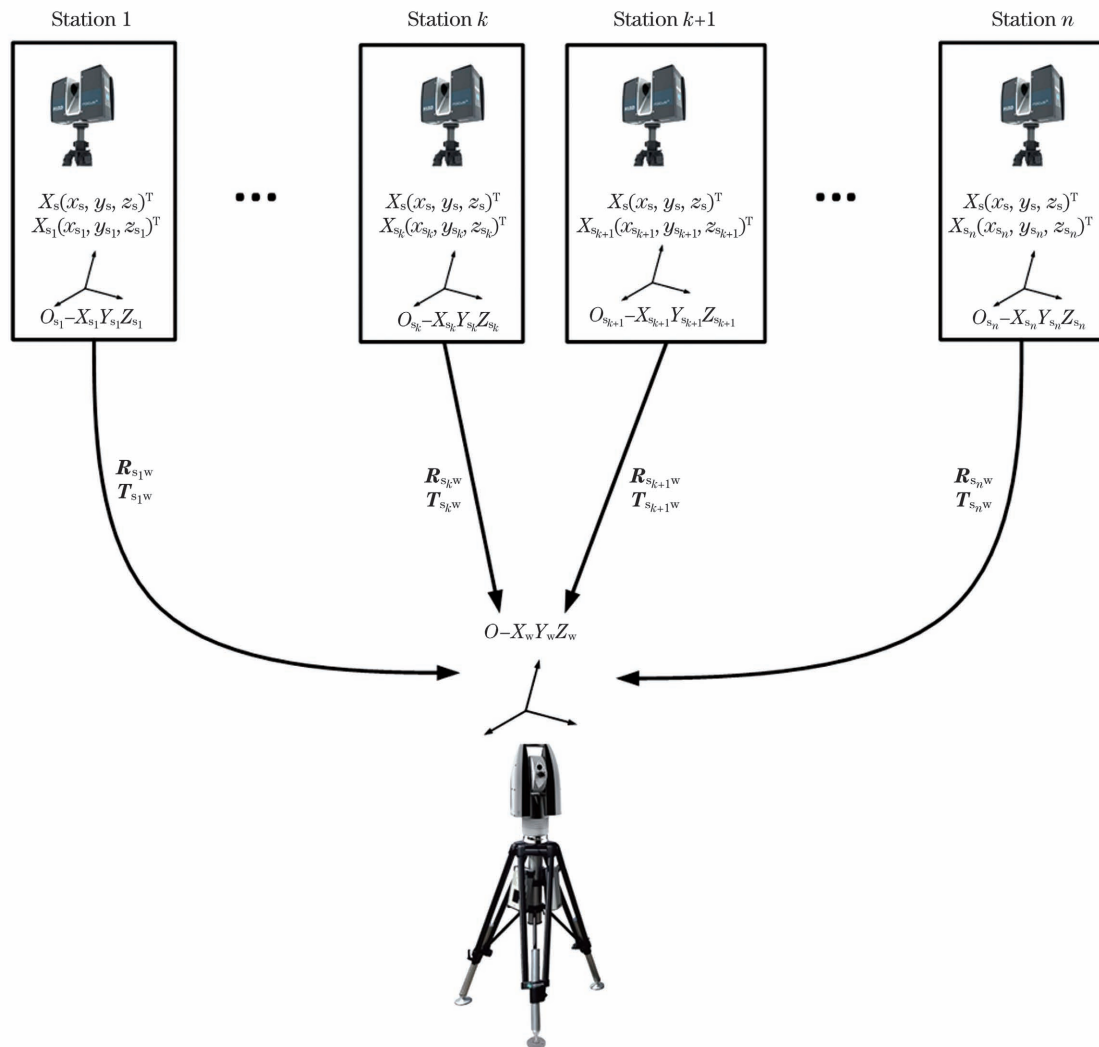


图 4 配准原理图

Fig. 4 Schematic of registration

$R_{s_1w}, T_{s_1w}, \dots, R_{s_kw}, T_{s_kw}, R_{s_{k+1}w}, T_{s_{k+1}w}, \dots, R_{s_nw}, T_{s_nw}$ 分别为各测站坐标系与世界坐标系转换

的旋转及平移矩阵。若以扫描仪第一次设站的坐标系 $O_{s_1}-X_{s_1}Y_{s_1}Z_{s_1}$ 为配准坐标系, 设 P 为待测物体上任意一点, P 点在 $O_{s_k}-X_{s_k}Y_{s_k}Z_{s_k}$ 坐标系下坐标为 $P_{s_k}(X_{s_k}, Y_{s_k}, Z_{s_k})$ 。那么, 通过下式可将 $P_{s_k}(X_{s_k}, Y_{s_k}, Z_{s_k})$ 转换至基坐标系下。

$$P_{1_k}(X_{1_k}, Y_{1_k}, Z_{1_k}) = [R_{s_k w} * P_{s_k}(X_{s_k}, Y_{s_k}, Z_{s_k}) + T_{s_k w} - T_{s_1 w}] * R_{s_1 w}^{-1}, \quad (11)$$

式中: $P_{1_k}(X_{1_k}, Y_{1_k}, Z_{1_k})$ 即为点 P 在基坐标系 $O_{s_1}-X_{s_1}Y_{s_1}Z_{s_1}$ 下的坐标。由 (11) 式可知, 基于激光跟踪仪的地面激光扫描点云配准模型的主要工作是求解各测站坐标系与世界坐标系转换的旋转及平移向量 $R_{s_1 w}, T_{s_1 w}, \dots, R_{s_k w}, T_{s_k w}, R_{s_{k+1} w}, T_{s_{k+1} w}, \dots, R_{s_n w}, T_{s_n w}$ 。

以扫描仪第 k 站为例, 为求解旋转矩阵 $R_{s_k w}$ 和平移向量 $T_{s_k w}$, 需确定一组空间同名点在扫描仪坐标系 $O_{s_k}-X_{s_k}Y_{s_k}Z_{s_k}$ 和跟踪仪坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的坐标。在各测站坐标系下, 粘贴于扫描仪机身的球棱镜基座点具有相同坐标 $X_s(x_s, y_s, z_s)^T$, 已于标定过程中求出。在第 k 测站时, 待扫描完成后, 将球棱镜依次置于 4 个基座上, 配合激光跟踪仪测量基座点在 k 站点时的坐标 $X_{sk}(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})^T$, 则 $X_s(x_s, y_s, z_s)^T$ 和 $X_{sk}(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})^T$ 具有如下关系:

$$X_{sk}(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})^T = R_{s_k w} * X_s(x_s, y_s, z_s)^T + T_{s_k w}. \quad (12)$$

旋转矩阵 $R_{s_k w}$ 和平移向量 $T_{s_k w}$ 可由 SVD 法求解出。

以相同方法求解出 $R_{s_1 w}$ 和 $T_{s_1 w}$, 则可根据 (11) 式将第 k 站扫描点云与第 1 站(基准站)扫描点云统一坐标系, 完成点云配准。事实上, 为了较少多次坐标系转换所带来的误差, 也可将所有测站的点云数据根据下式统一至跟踪仪世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下。其中, $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 为点 P 在跟踪仪世界坐标系的坐标。

$$P_w(X_w, Y_w, Z_w) = R_{s_k w} * P_{s_k}(X_{s_k}, Y_{s_k}, Z_{s_k}) + T_{s_k w}. \quad (13)$$

按上述方法, 依次完成所有 n 次测站的点云配准, 即可得到完整的物体三维点云信息。

3 点云配准实验与结果分析

3.1 室内配准实验

为验证本文方法的正确性, 搭建了基于激光跟踪仪的地面激光扫描点云测量系统, 如图 5 所示。系统包括一台徕卡公司生产的型号 Leica-AT960 绝对激光跟踪仪, 和一台法如 Focus-150 三维激光扫描仪。Leica-AT960 绝对激光跟踪仪的标称测角精度为 $\pm(15+6) \mu\text{m}/\text{m}$, 标称测距精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$, 标称点位精度为 $\pm(15+6) \mu\text{m}/\text{m}$ 。Focus-150 三维激光扫描仪标称测量精度为 $\pm 1 \text{ mm}$, 设定扫描分辨率为 $1/4$, 在室内环境下, 分别从四个站位对一个小型工业器件和石膏雕像进行两次扫描测量。其中, 石膏雕像长、宽均为 17.6 cm , 高为 50 cm 。小型工业器件长为 7.23 cm , 宽为 8.21 cm , 高为 15.02 cm 。采用本文提出的配准方法, 进行点云粗配准。

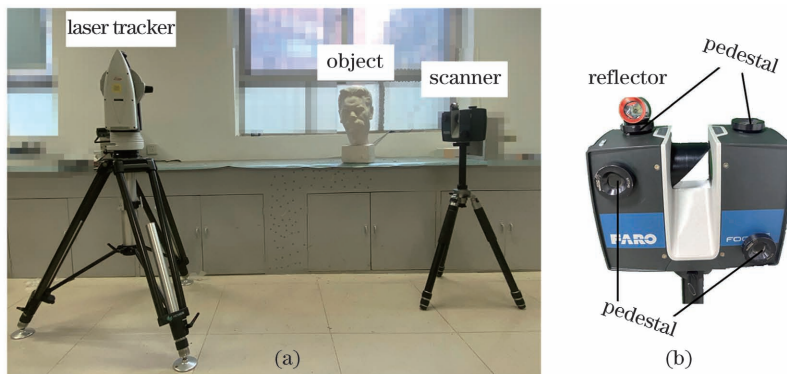


图 5 测量系统。(a)仪器和被测物;(b)扫描仪的局部放大图

Fig. 5 Measurement system. (a)Instrument and object; (b) local magnification of scanner

图 6 是配准前第 1~4 测站测得的小型工业器件点云可视化效果图。

图 7(a)~(d)分别是不同视角下的小型工业器

件粗配准结果。然后利用 ICP 算法进行精配准, 图 7(f)~(i)分别是不同视角下的小型工业器件精配准结果。为便于观察, 图 7(e)和(j)分别是小型工业

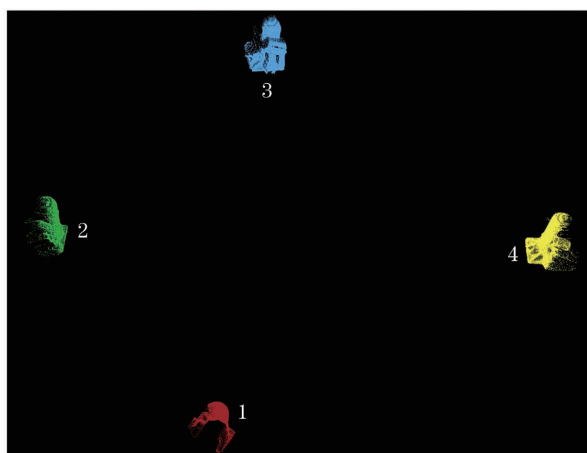


图 6 小型工业器件配准前的点云可视化效果图

Fig. 6 Visualization of point cloud before registration of industrial device

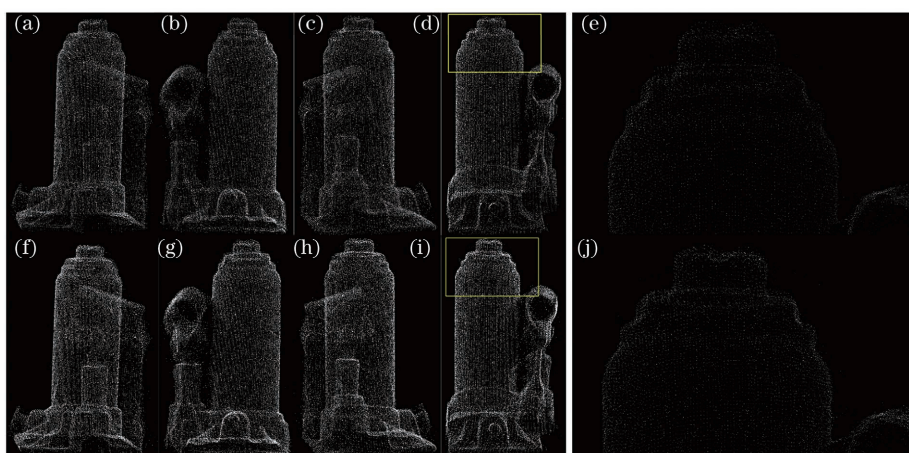


图 7 不同视角下的配准结果。(a)~(d)粗配准结果;(e)粗配准结果局部放大图;(f)~(i)精配准结果;(j)精配准结果局部放大图

Fig. 7 Registration results from different perspectives. (a)~(d) Coarse registration results; (e) local magnification of coarse registration result; (f)~(i) accurate registration results; (j) local magnification of precise registration result

器件粗配准与精配准方框部分局部放大图。

图 8 是配准前第 1~4 测站测得的石膏雕像点云可视化效果图。

石膏雕像的粗配准结果如图 9 所示,由于石膏雕像的粗配准与精配准结果差异在各个视角下均不明显,所以本文只给出粗配准结果示意图。



图 8 石膏雕像配准前的点云可视化效果图

Fig. 8 Visualization of point cloud before registration of statue

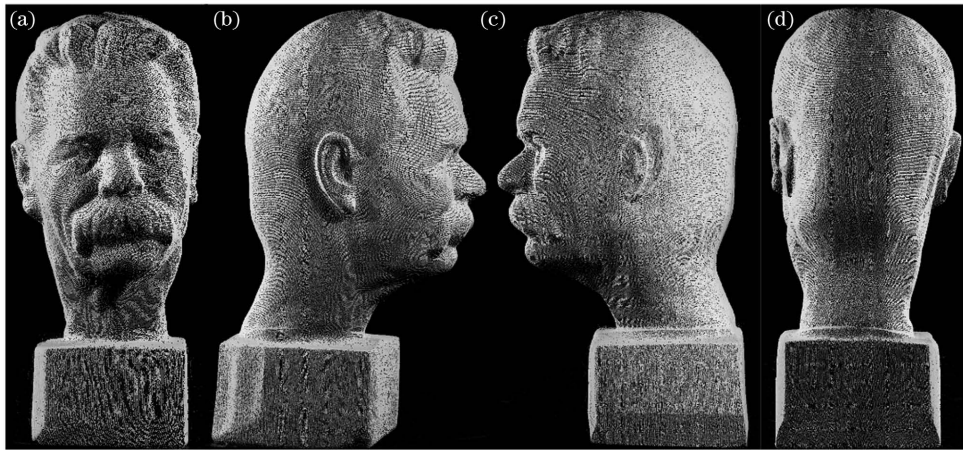


图 9 不同视角下的石膏像配准结果。(a)正面;(c) 90°视角;(f) 270°视角;(d)背面

Fig. 9 Registration results of statue from different perspectives. (a) Frontal perspective; (b) 90° viewing; (c) 270° viewing; (d) 180° viewing

将均方根值(RMS)作为衡量点云配准效果的指标,则本文方法的相邻站位点云重叠区域配准误差如表 1 所示,使用 ICP 方法精配准后的重叠区域配准误差如表 2 所示。表中 S12 定义为被测雕像第

1 测站和第 2 测站测量点云的配准误差,S23 为第 2 测站和第 3 测站测量点云的配准误差,I12 为被测小型工业器件第 1 测站和第 2 测站扫描点云的配准误差,以此类推。

表 1 相邻站位点云粗配准误差

Table 1 Coarse registration error of neighboring station point cloud

Statue overlap area /mm	Coarse registration /RMS	Industrial device overlap area /mm	Coarse registration /RMS
S12	0.66	I12	0.56
S23	0.51	I23	0.67
S34	0.48	I34	0.65
S41	0.71	I41	0.68

表 2 相邻站位点云精配准误差

Table 2 Precise registration error of neighboring station point cloud

Statue overlap area /mm	ICP /RMS	Industrial device overlap area /mm	ICP /RMS
S12	0.18	I12	0.12
S23	0.19	I23	0.13
S34	0.12	I34	0.04
S41	0.14	I41	0.07

从图 7 和图 9 的粗配准结果可以看出,本文提出的粗配准方法可以很好地配准两个相邻的点云。其中小型工业器件经 ICP 精配准后,在器件的上边缘部分(图 7 方框部分)效果较粗配准有肉眼可见的改善,但不太明显。石膏雕像在任何视角下,精配准结果较粗配准结果未有明显易见的改善。综上,本文方法的粗配准效果较好,能够为精配准提供足够好的姿态。

配准误差最大为 0.68 mm,平均为 0.64 mm,得到了精度较高的粗配准结果。这样 ICP 算法只需要经过较少的迭代即可得到精配准结果。经 ICP 精配准后误差均在 0.2 mm 以下,雕像的精配准误差最大为 0.19 mm,平均为 0.16 mm;小型工业器件的精配准误差最大为 0.13 mm,最小只有 0.04 mm,平均为 0.09 mm。石膏雕像和小型工业器件的粗配准精度都为亚毫米级,精配准精度达到了 0.2 mm 以下,且小型工业器件的精配准效果更好。分析原因为:小型工业器件的表面特征更加丰

由表 1、表 2 可以看出,雕像石膏粗配准误差最大为 0.71 mm,平均为 0.59 mm;小型工业器件粗

富,因此使用 ICP 方法进行精配准时,算法的迭代次数更少、收敛效果更佳;而石膏雕像表面皆为光滑曲面特征,在精配准时往往会陷入局部最优或迭代次数较多、收敛较慢等问题,导致了石膏雕像与小型工业器件粗配准精度类似,但后者的精配准效果更好。

3.2 室外无人驾驶实验车配准实验

为对本文测量方法进行精度评定,将 26 个精确加工的编码标志点均匀粘贴于无人驾驶实验车上,

在室外环境下从 6 个站位对无人驾驶实验车进行了扫描测量。若以本文 3.1 节所使用的扫描仪某一测站坐标系为配准基坐标系,需要利用点云数据的公共部分进行点云的顺序配准,这样就会产生累积误差和误差传递的问题^[25]。因此,决定以跟踪仪坐标系作为配准基坐标系,将所有分测站点云数据统一至跟踪仪世界坐标系下。使用本文方法对分测站点云进行配准,图 10 为不同视角下的无人驾驶实验车配准结果。

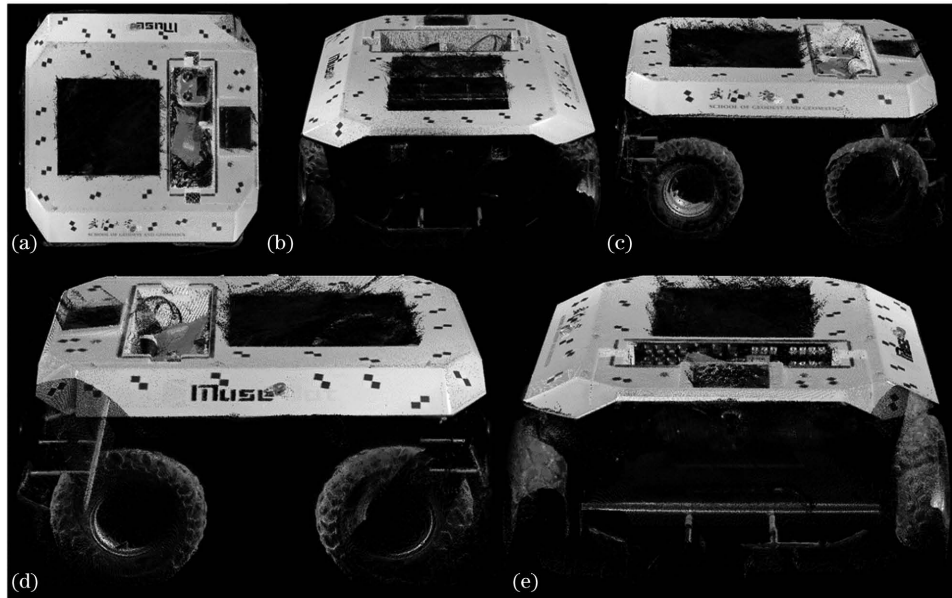


图 10 无人驾驶实验车在不同视角下的配准结果。(a)正上方;(b)(c) 0°和 90°;(d)(e) 180°和 270°
Fig. 10 Registration results of unmanned experimental vehicle under different perspectives. (a) Above;
(b)(c) 0° and 90°; (d)(e) 180° and 270°

将编码标志点在配准后的点云数据中的坐标与真实数据)进行比对,26 个编码标志点的坐标偏差使用跟踪仪直接测得的编码标志点坐标(以此作为如表 3 所示。

表 3 标志点坐标偏差

Table 3 Deviation of marking points

unit: m

Serial number	True value			Measurement			dX	dY	dZ	Deviation
	X	Y	Z	X	Y	Z				
A	3.854045	2.043060	-0.731043	3.852141	2.042778	-0.730052	0.001904	0.000282	-0.000991	0.002165
B	3.837528	2.139680	-0.702917	3.835734	2.140062	-0.702309	0.001794	-0.000382	-0.000608	0.001932
C	3.911482	2.349449	-0.702390	3.910909	2.348018	-0.701854	0.000573	0.001431	-0.000536	0.001632
D	3.941915	2.477005	-0.701041	3.940384	2.476593	-0.700919	0.001531	0.000412	-0.000122	0.001590
E	3.946203	2.613563	-0.700132	3.946061	2.611508	-0.700132	0.000142	0.002055	0.000000	0.002060
F	3.983856	2.725562	-0.698709	3.982665	2.723969	-0.698069	0.001191	0.001593	-0.000640	0.002089
G	3.884202	2.880149	-0.726915	3.882811	2.879381	-0.726698	0.001391	0.000768	-0.000217	0.001603
H	3.755817	2.770859	-0.699560	3.754152	2.769162	-0.699967	0.001665	0.001697	0.000407	0.002412
I	3.729364	2.922657	-0.732008	3.728376	2.921324	-0.731506	0.000988	0.001333	-0.000502	0.001734
J	3.529337	2.814357	-0.700831	3.527730	2.813142	-0.701545	0.001607	0.001215	0.000714	0.002138
K	3.535536	2.964299	-0.731730	3.534737	2.962755	-0.731491	0.000799	0.001544	-0.000239	0.001755

续表

Serial number	True value			Measurement			dX	dY	dZ	Deviation
	X	Y	Z	X	Y	Z				
L	3.404690	2.971072	-0.720809	3.404365	2.969911	-0.721118	0.000325	0.001161	0.000309	0.001245
M	3.253632	3.028907	-0.732404	3.252974	3.027738	-0.733193	0.000658	0.001169	0.000789	0.001556
N	3.116722	2.878858	-0.703782	3.115175	2.878594	-0.703757	0.001547	0.000264	-0.000025	0.001569
O	2.994037	2.452192	-0.705750	2.992278	2.452173	-0.706052	0.001759	0.000019	0.000302	0.001784
P	3.001766	2.373500	-0.704538	3.001550	2.372954	-0.705976	0.000216	0.000546	0.001438	0.001553
Q	2.937048	2.231523	-0.748692	2.936890	2.230449	-0.747950	0.000158	0.001074	-0.000742	0.001315
R	3.011326	2.166202	-0.736976	3.010121	2.166311	-0.737758	0.001205	-0.000109	0.000782	0.001441
S	3.117890	2.166922	-0.724112	3.116354	2.165675	-0.725483	0.001536	0.001247	0.001371	0.002407
T	3.299000	2.133830	-0.719385	3.297237	2.133577	-0.720010	0.001763	0.000253	0.000625	0.001888
U	3.377920	2.255868	-0.704839	3.376946	2.254402	-0.705421	0.000974	0.001466	0.000582	0.001854
V	3.525863	2.074015	-0.722650	3.525816	2.074665	-0.722099	0.000047	-0.000650	-0.000551	0.000853
W	3.542835	2.219203	-0.704651	3.542162	2.219047	-0.705085	0.000673	0.000156	0.000434	0.000815
X	3.656599	2.140160	-0.702573	3.657006	2.140230	-0.702828	-0.000407	-0.000070	0.000255	0.000485
Y	3.636190	2.048413	-0.722264	3.635042	2.047634	-0.722305	0.001148	0.000779	0.000041	0.001388
Z	3.727651	1.966563	-0.752961	3.726005	1.966300	-0.752167	0.001646	0.000263	-0.000794	0.001846
Average							0.001063	0.000844	0.000539	0.001658

与跟踪仪直接测得的坐标数据相比,经多次配准后的点云中的标志点坐标数据在 X 方向上的偏差最大,最大为 1.9 mm,平均为 1.06 mm;在 Z 方向上最小,最大为 1.43 mm,平均只有 0.53 mm;分析因为在激光跟踪仪在测量和标定的过程中,由于大部分平面标志点和漫反射平面靶标都平行于地面放置,激光跟踪仪的测针对中误差对垂直于地面的 Z 方向坐标值影响较少,X 和 Y 方向(平行于地面)上的坐标值受到测针对中误差影响较大,因此偏差亦更大。总的坐标偏差受到坐标转换误差、扫描仪测量误差以及跟踪仪测量误差的三重误差累计最大为 2.41 mm,平均为 1.65 mm。

同时,在配准后的点云数据中选取被测车身上的 11 条特征线段在 CloudCompare 软件中进行拟合,得到 11 条特征线的长度数据,与跟踪仪直接测得并拟合的长度数据进行对比,特征线的长度偏差如表 4 所示。与跟踪仪直接测得的长度数据相比,测量点云的线段最大长度偏差小于 0.8 mm,平均偏差为 0.29 mm,相较于标志点坐标数据偏差精度有较大提升。分析因为,长度的拟合、计算过程中,消去、减轻了部分测量误差和坐标转换误差对测量结果的影响。长度拟合数据的精度较高,能够满足大多数工业测量环境的要求。

表 4 特征线偏差

Table 4 Deviation of characteristic lines

unit: m

Serial number	True value	Measurement	Deviation
Line 1	0.131143	0.131914	-0.000771
Line 2	0.118167	0.118286	-0.000119
Line 3	0.157465	0.157519	-0.000055
Line 4	0.229590	0.229913	-0.000323
Line 5	0.153218	0.152741	0.000477
Line 6	0.162166	0.162508	-0.000343
Line 7	0.205130	0.205180	-0.000050
Line 8	0.443959	0.443784	0.000175
Line 9	0.162158	0.162020	0.000139
Line 10	0.107340	0.106942	0.000398
Line 11	0.184169	0.183790	0.000378
Average			0.000293

在室外测量中,具体到工程应用,测量效率至关重要。本文方法中,跟踪仪配合球棱镜可在 160 m 范围内实现高精度、快速、动态测量,分测站的 4 个球棱镜基座点测量可在不超过 10 s 内完成。为直观地表示本文方法的效率,定义仅为辅助实现多测站地面激光扫描点云配准所做的准备工作为辅助测量工作,测量次数为辅助测量次数,所用时间为辅助测量时间,那么在一次完整的测量任务中:为完成“标定”过程,激光跟踪仪的辅助测量次数为 8 次,辅助测量时间约为 20 s,辅助测量工作包括平面靶标以及 4 个跟踪仪球棱镜的固定,辅助测量时间约为 240 s,总共需要约 260 s 的辅助测量时间;分测站扫描测量过程中,辅助测量次数为 $4n$ 次(其中 n 为测站数),辅助测量时间约为 $(10n)$ s;总的辅助测量时间约为 $(10n+260)$ s。

与此相比,传统的布设靶球的方法需要在相邻测站适当位置内布设 4 个公共靶球,共需完成 $8n-8$ 次靶球布设与清除工作,辅助工作量较大,辅助测量时间约为 $(480n-480)$ s;传统方法虽然没有辅助测量次数,但是需要在每一测站点云中提取靶球点云并拟合其球心坐标,即使利用某些测量软件的自动提取算法,仍旧面临着合理的参数设置以及球体的误匹配问题,在此假设其为理想情况辅助测量时间为 0,那么传统方法总的辅助测量时间约为 $(480n-480)$ s。

当测站数 $n \geq 2$ 时,在具体的工程应用中,本文方法即比传统的布设靶球的方法花费更少的辅助测量时间,具有更高的测量效率。

4 结 论

针对多测站地面激光扫描点云的配准问题,本文提出一种利用激光跟踪仪辅助配准的方法,通过在扫描仪机身上安置球棱镜基座的方法,对扫描仪移站前后的位置变换矩阵予以求解,建立移站前后扫描坐标系的转换关系数学模型。利用此模型对多测站地面激光扫描点云数据统一至同一坐标系下,完成多测站扫描点云的粗配准,为 ICP 算法提供了良好(粗配准误差不超过 0.71 mm)且稳健的初值。本文方法操作简单,准确度高,在不打开扫描仪位置传感器的情况下,在整个测量过程中仅需一次“标定”。

本文方法中,激光跟踪仪配合球棱镜可在 160 m 范围内实现高精度、快速、动态测量,当测站数 $n \geq 2$ 时,与传统的布设靶球的方法相比,测量效

率更高。而且,相对于“标志点”法,本文方法避免了繁琐的标志点安装清除工作,也保护了被测物体表面不受损坏;相对于旋转平台法,本文方法“标定”过程简单,可适用于超过平台尺寸的物体测量,“标定”完成后扫描仪可自由移动;相对于基于点云特征的自动配准方法,本文方法对重叠度和被测物特征无要求,普适性和稳健性更强;相对于基于 iGPS 的配准方法,本文方法可适用于半径 160 m 空间内的室外环境,更加灵活。

参 考 文 献

- [1] Lindstaedt M, Mechelke K, Schnelle M, et al. Virtual reconstruction of almaqah temple of yeha in Ethiopia by terrestrial laser scanning [C] // Proceedings of the 4 th ISPRS International Workshop 3D-ARCH, March 2-4, 2011, Trento, Italy. Hannover: ISPRS, 2011: XXXVIII-5/W16.
- [2] Yan L, Wei F. Single part of building extraction from dense matching point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0710004.
闫利, 魏峰. 利用密集匹配点云的建筑单体提取算法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0710004.
- [3] Travelletti J, Oppikofer T, Delacourt C, et al. Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS) [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37: 485-490.
- [4] Yang B S, Zang Y F. Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 95: 109-121.
- [5] 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.
- [6] Lei Y Z, Li Z W, Zhong K, et al. Mismatching marked points correction method based on random sample consensus algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315002.
雷玉珍, 李中伟, 钟凯, 等. 基于随机抽样一致算法的误匹配标志点校正方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315002.
- [7] Liu X L, Peng X, Yin Y K, et al. A method for global registration of range data combined with markers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 1010-1014.
刘晓利, 彭翔, 殷永凯, 等. 借助标志点的深度数据

- 全局匹配方法[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 1010-1014.
- [8] Wei X G, Liu T, Liu Z. Three-dimensional measurement data registration based on planar circle target[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215002. 魏新国, 刘涛, 刘震. 基于平面圆靶标的三维数据拼接[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215002.
- [9] Zhang Y L, Li X X, Yang X, et al. Rotation splicing for small parts measurement [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2005(1): 32-35. 张艳丽, 李晓星, 杨兴, 等. 小型零件测量的旋转拼接[J]. 航天制造技术, 2005(1): 32-35.
- [10] Ye Y P, Song Z. An accurate 3D point cloud registration approach for the turntable-based 3D scanning system [C] // 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, August 8-10, 2015, Lijiang, China. New York: IEEE Press, 2015: 982-986.
- [11] Zhou L M, Zheng S Y, Huang R Y. A registration algorithm for point clouds obtained by scanning objects on turntable [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 73-79. 周朗朗, 郑顺义, 黄荣永. 旋转平台点云数据的配准方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 73-79.
- [12] Li H Z. Multiple-view 3D reconstruction method based on turntable [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 30-47. 李怀泽. 基于旋转平台的多视角三维重建[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 30-47.
- [13] 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. 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.
- [14] He Y, Liang B, Yang J, et al. An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1862-1878.
- [15] Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215005. 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.
- [16] Yang B S, Dong Z, Dai W X, et al. Automatic registration of multi-view terrestrial laser scanning point clouds in complex urban environments [C] // 2015 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM), July 8-10, 2015, Fuzhou, China. New York: IEEE Press, 2015: 141-146.
- [17] Tao W Y, Hua X H, Chen Z P, et al. Fast and automatic registration of terrestrial point clouds using 2D line features[J]. Remote Sensing, 2020, 12(8): 1283-1299.
- [18] Wang Y B, Zheng N S, Bian Z F. Planar feature-constrained, quaternion-based registration algorithm for LiDAR point clouds [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2310001. 王永波, 郑南山, 卞正富. 平面特征约束下基于四元数描述的 LiDAR 点云配准算法[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2310001.
- [19] Tang Z R, Liu M Z, Jiang Y, et al. Point cloud registration algorithm based on canonical correlation analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0404006. 唐志荣, 刘明哲, 蒋悦, 等. 基于典型相关分析的点云配准算法[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0404006.
- [20] Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Three-dimensional point cloud splicing technology of complex surfaces based on iGPS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204003. 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维点云拼接技术[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204003.
- [21] Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Point-cloud splicing technology for large-scale surface topography measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0504001. 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大尺寸曲面形貌测量系统的点云拼接技术[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0504001.
- [22] Liu L, Ma G Q, Gao Y, et al. Flexible measurement technology of complex curved surface three-dimensional shape robot based on iGPS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304006. 刘丽, 马国庆, 高艺, 等. 基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304006.
- [23] Zhang H J, Ma J J, Zhang J. Multi parameter error model and calibration of laser tracker[J]. Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 20-30. 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 20-30.
- [24] Eggert D W, Lorusso A, Fisher R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms [J]. Machine Vision and Applications, 1997, 9(5/6): 272-290.
- [25] 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,

Multiview Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Registration Method Based on Laser Tracker

Tan Ge^{1,2}, Hua Xianghong^{1,2*}, Tao Wuyong^{1,2}, Zhao Bufan^{1,2,3}, Li Cheng^{1,2}

¹ School of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

² Disaster Monitoring and Prevention Research Center of Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

³ Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract

Objective The terrestrial laser scanner can flexibly and accurately obtain three-dimensional (3D) point cloud data of ground objects. Thus, it is widely used in heritage protection and restoration, building 3D model reconstruction, and deformation monitoring. In practical applications, owing to its limited field of view, the scanner should conduct multistation and multiview scanning to obtain complete substation cloud information of the object to be measured. Therefore, the registration of a multisite cloud is necessary to obtain the complete point cloud information of the object to be measured, which is also the premise of scene reconstruction, segmentation, and classification. The traditional point cloud registration methods, such as the registration method using target or landmark points, rotating platform method, automatic registration method based on point cloud features, and auxiliary registration method using indoor Global Positioning System (iGPS) world coordinate system, usually face problems of weak robustness and low efficiency. In this study, a registration method of the terrestrial laser scanning point cloud based on a laser tracker is proposed to overcome the above defects.

Methods In the proposed method, the position sensor of the terrestrial laser scanner is turned off, so that the scanning coordinate becomes an independent coordinate system relative to the scanner body. Four spherical prism bases of the tracker are fixed on the body of the 3D laser scanner. The coordinates of the four base points in the scanning coordinate system are calculated using a “calibration” process. Because the scanning coordinate is an independent coordinate system that remains unchanged relative to the scanner body, the base point coordinates remain unchanged in any scanner station coordinate system. After the scanner moves, the laser tracker is used to measure the coordinates of the four base points in the tracker coordinates. Combined with the “calibration” results, the relative rotation and translation matrix of the scanning coordinate system of any station can be solved. Additionally, a mathematical model of the transformation relationship between the scanning coordinate system before or after the moving station can be established to achieve accurate registration of the multiview point cloud.

Results and Discussions In the indoor environment, a small industrial device and a gypsum statue are scanned from four stations. The proposed registration method is used for coarse point cloud registration. The coarse registration results (Figs. 7 and 9) showed that the proposed coarse registration method can accurately register two adjacent point clouds. After iteration closest point (ICP) fine registration of small industrial devices, the coarse registration effect on the upper edge of the device (yellow box in Fig. 6) is better than that of the coarse registration, which can be seen by naked eyes; however, it is not noticeable. No significant difference between the coarse and fine registration results of gypsum statues is observed. Thus, the coarse registration effect of the proposed method worked perfectly, which can provide a sufficient initial pose for fine registration. Tables 1 and 2 show that the maximum coarse registration error of statue is 0.71 mm, with an average of 0.59 mm; the maximum coarse registration error of the small industrial devices is 0.68 mm, with an average of 0.64 mm, and the coarse registration result with high accuracy is obtained. Thus, the ICP algorithm only needs a few iterations to obtain accurate registration results. After ICP fine registration, the error is less than 0.2 mm.

Conclusions Aiming at the registration problem of multistation terrestrial laser scanning point cloud, a method that

uses a laser tracker to assist the registration is proposed. By placing a spherical prism base on the scanner body, the position transformation matrix of the scanner before and after moving the station is calculated. A mathematical model of the transformation relationship between the scanning coordinate system before and after the station moving is established. Using this model, the data of multistation ground laser scanning point clouds are unified to the same coordinate system, and the coarse registration of multistation scanning point clouds is completed, providing a good (coarse registration error is not greater than 0.71 mm) and robust initial value for ICP algorithm. The proposed method is easy to operate and has high accuracy. Without opening the scanner position sensor, only one “calibration” is needed in the entire measurement process.

Key words measurement; laser tracker; laser point cloud; point cloud registration; coordinate transformation

OCIS codes 120.0280; 120.4640; 120.5800; 100.6890