引文格式：唐菲菲,王巨晖,王章朋,等. 一种顾及主方向的点云配准施工检测方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 43-46. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.12.009

一种顾及主方向的点云配准施工检测方法

唐菲菲[1]，王巨晖[1]，王章朋[2]，陈星池[1]
（1. 重庆交通大学 智慧城市学院，重庆 400074；2. 上海宝冶集团有限公司，上海 201908）

摘　要：面向建筑物施工的全局偏差检测需求，提出一种顾及主方向的PCA-ICP点云配准施工检测方法。首先将BIM设计模型数据转换为BIM点云数据；然后运用顾及主方向的PCA（主成分分析）粗配准结合ICP（迭代最近点）精配准，即顾及主方向的PCA-ICP配准方法，在无控制点条件下实现三维激光点云与BIM点云配准，并计算配准均方误差 E；最后利用 M_3C_2 算法和均方误差 E 计算出三维激光点云与BIM点云之间的偏差值和偏差值误差范围，最终统计得到施工偏差结果。以某体育场馆钢结构为例，实验结果表明，该方法较常规偏差检测方法可以得到建筑物实际施工的全局偏差。实验结果可为建筑物施工提供参考。

关键词：光点云；点云配准；点云主方向；M_3C_2距离计算；施工检测
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0043-04

Construction Detection Method for Point Cloud Registration Considering the Main Direction

TANG Feifei[1], WANG Juhui[1], WANG Zhangpeng[2], CHEN Xingchi[1]
(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 201908, China)

Abstract: Aiming at the global deviation detection requirements of building construction, we proposed a PCA-ICP point cloud registration construction detection methodconsidering the main direction. Firstly, we converted the BIM design model data into BIM point cloud data. Then, we used PCAcoarse registration with respect to the principal direction combined with ICPfine registration, that is, taking into account the PCA-ICP registration method in the main direction to realize the registration of 3D laser point cloud and the cloned laser point cloud under the condition of no control points, and calculated the registration mean square error. Finally, we utilized the M_3C_2 algorithm to calculate the deviation value under the premise of considering the mean square error and obtained the construction deviation result by statistics. Taking the steel structure of a stadium as an example, we found that the method can obtain the global deviation of actual construction of building compared with the conventional deviation detection method, providing a reference for building construction.

Key words: laser point cloud, point cloud registration, main direction of point cloud, M_3C_2 distance calculation, construction detection

目前融合设计模型和点云数据进行钢结构偏差检测方法主要包括将离散点云与设计模型直接进行叠加对比、利用施工现场的辅助参照物来确定点云数据的绝对坐标、根据现场采集点云进行三维重建然后与设计模型进行比对等，但是上述方法存在需要参照物、三维建模流程复杂等问题。因此本文提出利用转换后的设计模型点云与三维激光扫描点云，通过一种主方向的点云配准方法来实现建筑物偏差检测，一定程度上提高了检测效率，降低操作复杂性。

1　三维激光点云与BIM模型预处理

1.1　三维激光点云预处理

为保证数据配准精度，需要对三维激光点云数据进行拼接和去噪预处理。由于被测物体形状复杂、场景空间大，因此需要对场景进行多测站扫描，多站、多方位扫描的数据进行拼接才能得到完整的点云数据[1]。本次扫描所使用的扫描仪为Trimble SX10，采用“设站-扫描”的方式进行扫描，无需设置标靶。拼接后的点云如图1所示。此外，为了减少冗余数据，删

收稿日期：2022-07-26。
项目来源：重庆交通大学研究生科研创新项目（2022S0087）；重庆市教委科学技术研究项目（KJQN201900728）。
第一作者简介：唐菲菲（1980—），博士，副教授，研究方向为三维激光点云数据处理与应用，E-mail：fftang80@126.com。

除栅栏、吊机、柱子和地面等无关点云（如图2）。同时，扫描测量过程中受到目标体表面质量的粗糙程度、测量人员操作经验、测量仪器精度、野外环境等诸多因素的影响会产生一些离群的噪声点，给后续的数据配准带来误差，所以需要剔除这些噪声点。本文采用统计滤波算法[2]进行去噪，去噪原理为：首先计算出每个点与邻域 K 个点的平均距离，假设得到的平均距离为高斯分布，则可以得到对应的均值 μ 和标准差 σ，然后设定距离阈值 $D_{max}=\mu+n\sigma$，最后将平均距离大于 D_{max} 的点作为离群点剔除。本文设置 K 为20，n 为1。去噪效果如图3、4所示。

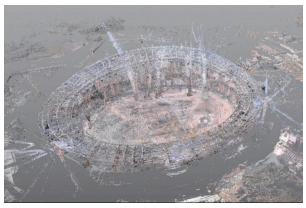


图1 拼接后的点云

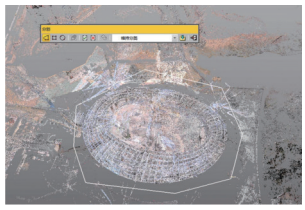


图2 点云删选

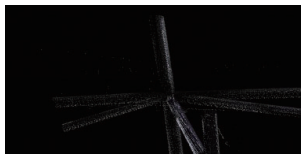


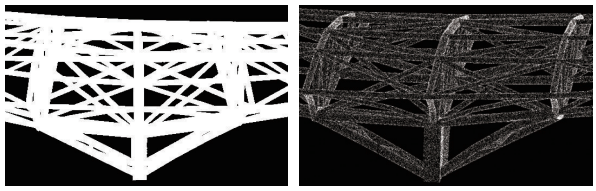
图3 剔除噪声前



图4 剔除噪声后

1.2 BIM模型预处理

为了使BIM模型能够与三维激光扫描离散点云进行配准，本文首先将BIM模型离散化，即转换为离散点云数据（如图5a）。同时，考虑到过高的点密度会增加数据处理的时间，对数据精度的提高作用却并不明显的问题，且不同点密度和点数量对于配准效果也会有所影响[3]。因此，本文对BIM模型转换后得到的表面点云进行重采样，并设置采样点密度和采样点数量设置与三维激光扫描点云的点密度和点数量大致相同。BIM模型离散化后平均点间距为0.011 m，根据三维激光点云的平均点间距0.032 m，设置BIM点云平均点间距与三维激光点云相当（如图5）。

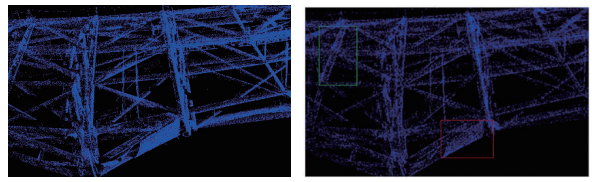


a BIM模型离散化后原始点云　　b BIM点云采样后

图5 BIM模型点云采样前后

采样后的BIM点云和三维激光扫描仪点云数据量仍然十分巨大，存在大量冗余数据，海量冗余数据不仅占用较大存储空间，并且大大降低后期数据处理的效率[4]。针对这一问题，本文采用密度自适应体素栅格降采样[5]的方法对三维激光点云和采样后的BIM点云数据进行降采样，即将三维激光扫描点云和采样后的BIM点云划分成若干个三维体素栅格，并设置体素边长为 L 和体素中最少点数为 n。当边长为 L 的体素中点云数量大于 n 则保持边长不变，点云数量小于 n 则扩大边长直至体素内点云数量满足最少点数的约束条件。最后用每一个体素栅格中的重心点来近似表示栅格中其他的点。当 L 较大时体素内的点较多，采样率较低，导致点云几何特征损失较多；当 L 较小时体素内的点较少，采样率较高，导致点云降采样效果不明显，无法起到降低后期数据处理效率的目的。经过大量实验，以20%采样率为依据，设置参数 L 为0.002、n 为5可以得到较为理想的下采样效果。

点云降采样前后对比如图6所示，其中高密度区域精简效果更为突出（如图6b红色框），使整体点云密度更加均匀。降采样后的圆柱特征和钢架节点仍然较为明显，很好的保留了点云的几何特征（如图6b绿色框）。



a 降采样前　　b 降采样后

图6 原始点云降采样前后对比示意图

2 点云配准与距离计算

2.1 顾及主方向的PCA粗配准与ICP精配准

主成分分析（PCA）是将高维数据进行降维处理来提取数据主要特征方向的一种方法。PCA配准方法流程如下：假设待配准点云为 $P=\{P_1,P_2,\cdots,P_i\}$，目标点云为 $Q=\{Q_1,Q_2,\cdots,Q_i\}$，首先利用公式（4）计算出点云 P 和 Q 的质心 $\bar{P}$ 和 $\bar{Q}$，并根据公式（5）（6）构造3×3的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_P$、$\boldsymbol{C}_Q$。然后利用奇异值分解得到 所对应特征向量 $\boldsymbol{C}_P$、$\boldsymbol{C}_Q$，分别代表待配准点云和目标点云的主方向。最后利用公式（7）和（8）将初始旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 和初始平移向量 $\boldsymbol{T}_0$ 计算出来。

$$\bar{P}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}P_i,\ \bar{Q}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n}Q_i \tag{4}$$

$$\boldsymbol{C}_P=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i-\bar{P}\right)\left(P_i-\bar{P}\right)^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{C}_Q=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(Q_i-\bar{Q}\right)\left(Q_i-\bar{Q}\right)^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{R}_0 = U_P U_Q^{-1} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{T}_0 = \bar{Q} - \boldsymbol{R}_0 \times \bar{P} \tag{8}$$

但是该方法并没有考虑到特征向量 $\boldsymbol{U}_P$、$\boldsymbol{U}_Q$ 具有正负2个方向，未对主方向进行判定和调整，因此，有可能会配准到点云的相反方向。点云数据的对称性和高度相似性容易导致粗配准产生180°旋转的误匹配和陷入局部最优等，如果初始配准时2个点云数据集的空间位置差距过大，会导致后面精配准产生错误的配准结果。因此为了得到精配准能用的初始变换矩阵，需要对特征向量的方向进行判定，即对初始旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 和初始平移矩阵 $\boldsymbol{T}_0$ 进行调整。

基于上述分析，本文对主方向进行判定和调整的具体方法如下：特征向量 $\boldsymbol{U}_P$ 和 $\boldsymbol{U}_Q$ 表示待配准点云 P 和目标点云 Q 的主方向，其中3个列向量分别表示X、Y、Z坐标轴。因为每个方向都存在反向的可能，所以一共有8种变换的情况。均方误差（MSE）是反映估计量与被估计量之间差异程度的一种度量，当两片点云配准过后重叠度越大，均方根误差就越小。如果2个点云数据集的主方向一致，那么均方误差是这8种情况中最小的。根据这一思想，首先计算出这8种情况所对应的均方误差，然后使用最小均方误差所对应的主方向情况来计算初始旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 和初始平移向量 $\boldsymbol{T}_0$。

通过搜索最近点确定初始转换后 P 在 Q 中所对应的点集为 N（设该点集中共有 n 个点），然后利用公式（9）来确定均方误差。

$$E = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P - N_n\right)\left(P - N_{dn}\right)^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

经过上述粗配准后只能使点云配准到大致正确的位置，为了达到施工检测的精度要求，还需要对粗配准结果进行ICP精配准。

ICP算法最早由Besl、McKay所提出[6]，主要通过迭代的方式为待配准点查找对应点，使得目标点云 Q 与待配准点云 P 之间的距离最小。将上述粗配准方法所得到的初始旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 和初始平移向量 $\boldsymbol{T}_0$ 作为ICP精配准的输入矩阵，使点云最终完成精确配准。

2.2　点云与点云之间的距离计算和误差分析

本文采用M_3C_2（多尺度模型与模型点云比较）算法[7]计算点云与点云之间的距离作为偏差检测结果。该方法对点密度和点云噪声的变化具有鲁棒性，其中影响该方法计算精度的因素主要为局部点云粗糙度和配准精度。为了保证最后偏差检测结果的可靠性，需要将最后的配准误差计算出来。

本文配准误差计算过程：首先克隆原始三维激光点云，然后考虑到两片点云之间不同的旋转角度和平移距离对于同一配准方法的配准效果具有较大影响，利用三维激光点云与BIM点云配准后所得到的初始变换矩阵 $\boldsymbol{T}_1$ 与精配准变换矩阵 $\boldsymbol{T}_2$ 将克隆激光点云移动到与设计点云几乎相同的位置，以此来消除两片点云之间因不同旋转角度和平移距离对于配准效果的影响。理论上，克隆前后的点云经过配准后应该处于完全重合的状态，但是因为配准误差的存在，点云之间会有一定的偏差。本文将克隆前后点云配准的均方误差 E 作为配准偏差值reg。L_{M3C2i}计算步骤如下：

1）通过下采样的方式确定出参与计算的核心点 i。

2）对于任何给定的核心点 i，搜索该点半径为D/2范围内的邻域点集合NN_i，通过对邻域点拟合最佳平面来得到i点的法线，邻域点NN_i中每一点到拟合平面距离的标准差作为衡量i点附近粗糙度的指标。

3）在i点的法线确定好之后，定义一个半径为d/2的圆柱，圆柱的轴线经过点i，并沿法向量定向。所定义的圆柱将同时与2个点云数据集相交，分别得到数量为 n_1 和 n_2 的2个子集。把每一个子集投影到圆柱体的轴上（原点在 i 上），得到2个距离分布，分布的均值将得到点云在法线方向平均位置 i_1 和 i_2，其标准偏差 $\sigma_1(d)$ 和 $\sigma_2(d)$ 将作为点云在法向方向粗糙度的局部估计。点 i_1 和 i_2 之间的距离将作为2个点云数据集之间距离的局部值L_{M3C2i}。

该方法最重要的参数为法线比例（normal scale）和投影比例（projection scale），较大的法线比例会产生更为均匀的法线方向，随后的距离计算更能代表两片点云之间的平均正交距离L_{M3C2i}。为了使法向向量不受粗糙度的影响，法线比例至少比粗糙度大20到25倍。投影比例会影响$LOD_{95\%}$的检测水平，所以投影比例设置应足够大，平均至少包含20个点，同时应尽量避免测量的空间分辨率下降。根据上述规律和参数调整，最后normal scale和projection scale分别设置为0.110 541和0.055 270。

为了衡量该方法的精度，在95%置信水平下为局部点云粗糙度和配准误差构造空间可变置信区间$LOD_{95\%}$，并用基于高斯统计的参数化方法来计算$LOD_{95\%}$，如公式（10）所示。

$$\mathrm{LOD}_{95\%}(d) = \pm 1.96\left(\sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2}} + \mathrm{reg}\right) \tag{10}$$

3 实验与分析

3.1 点云配准

本文所用实验数据为某体育场馆钢结构三维激光点云数据（如图7），平均点密度约为500 pt/m^2。实验区域为整个体育场馆框架的上方钢结构区域，实验前将大部分钢架支柱裁剪掉，保持与BIM点云所包含区域大致一样即可。

预处理后三维激光点云与BIM点云的初始相对位置，使用传统PCA配准方法进行配准，结果显示无法获得正确的配准效果，2片点云呈现出180°的旋转误匹配，因此无法为ICP精配准提供一个可使用的粗配准转换参数。使用本文粗配准方法和ICP精配准方法对三维激光点云和BIM点云进行配准，结果显示本文配准方法可以使三维激光点云与BIM点云精确配准，并得到初始变换矩阵 $\boldsymbol{T}_1$（公式11）和精配准变换矩阵 $\boldsymbol{T}_2$（公式12）。

利用初始变换矩阵 $\boldsymbol{T}_1$ 和精配准变换矩阵 $\boldsymbol{T}_2$ 将克隆激光点云移动到与设计点云几乎相同的位置，并计算均方误差 E 约等于0.01。

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}1.000 & -0.008 & 0.013 & -16.944\\ -0.013 & -0.022 & 1.000 & 2.018\\ -0.007 & -1.000 & -0.022 & -1.92\\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}1.000 & -0.013 & 0.008 & 0.063\\ 0.013 & 1.000 & -0.022 & 0.079\\ 0.008 & 0.022 & 1.000 & -0.002\\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix} \tag{12}$$

根据整体配准结果和局部放大图可以看出，本文的配准方法能够将三维激光点云和BIM点云较高精度的配准在一起，并且点云整体没有呈现出向一个方向位移的情况，这也充分说明本文配准方法最大可能消除了配准误差对于结构偏差检测结果的影响。

3.2 距离计算与偏差结果统计

将配准之后的激光点云与BIM点云利用M3C2算法进行距离计算，结果如图7所示。为了更好地观察钢结构整体的变化情况将变化区域与未变化区域分别用红色和蓝色进行表示（如图8）。

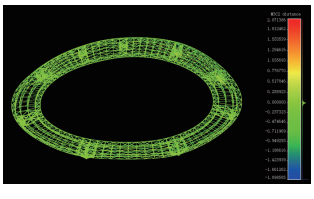


图7 M3C2距离计算结果

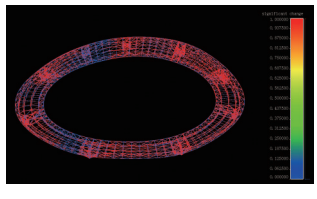


图8 结构偏差可视化

根据图7得出结果：整体偏差范围为−1.898 585~2.071 386 cm，其中98%的变形值在−1~1 cm之间，大约2%的变形值的绝对值超过1 cm。图8中钢结构没有发生变形的区域约占总体的45.79%。其中 $\mathrm{LOD}_{95\%}(d)=\pm 3.6$ mm，则整体最大的偏差范围为−2.258 585 ~2.431 386 cm。根据色谱图能够观察出钢结构全局变化的情况，快速高效的掌握建筑物施工的质量，并确定出相应部位的变形值范围，为相关检测单位提供数据支持，有针对性地对不符合要求的地方进行维护改造。

4 结 语

本文提出一种顾及主方向的点云与点云高精度配准方法，实现建筑物施工偏差全局检测。首先将BIM模型点云与三维激光点云进行降采样，去除冗余数据；接着通过顾及主方向的PCA粗配准方法配合ICP精配准方法，将BIM点云和三维激光点云进行配准；最后利用M_3C_2方法计算BIM点云与激光点云数据之间的偏差。这一施工检测方法融合了BIM数据与点云数据，相比于其他检测方法不仅可以计算出偏差值的误差范围，并得到更加可靠的整体偏差范围，还可以在无需控制点和三维建模的情况下快速高效的掌握建筑物变形情况，并对超过变形允许值的部位及时进行维护整改，对于降低复杂建筑物的全局结构检测数据处理难度和提高检测效率有较大帮助。在下一步研究中，会通过检测其他钢结构建筑物的偏差情况来验证本文方法的效果，并进行精度验证进一步优化调整本方法。

参考文献

[1] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Towards 3D Point Cloud Based Object Maps for Household Environments[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2008, 56(11): 927-941

[2] 朱凌, 石若明. 地面三维激光扫描点云分辨率研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 405-410

[3] 林松, 田林亚, 毕继鑫, 等. 基于最优邻域局部熵的点云精简算法[J]. 测绘工程, 2021, 30(5): 12-17

[4] 李朋超, 王金涛, 宋吉来. 基于PCL的3D点云视觉数据预处理[J]. 计算机应用, 2019, 39(增刊): 227-230

[5] Besl P.McKay N (1992) A Method for Registration of 3-DShapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 1992, 14(2): 239-256

[6] Dimitri L, Nicolas B, Jérôme L. Accurate 3D Comparison of Complex Topography with Terrestrial laser Scanner: Application to the Rangitikei Canyon (N-Z)[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013(8): 312-318

[7] 滕志远, 张爱武. 单位四元素法在激光点云坐标转换中的应用[J]. 测绘通报, 2010(11): 7-10