

# 基于平面基元组的建筑物场景点云自动配准方法

梁 栋<sup>1</sup> 王红平<sup>1</sup> 刘修国<sup>1</sup> 沈永林<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国地质大学(武汉)信息工程学院,湖北 武汉,430074

**摘 要:**三维激光扫描点云在建筑物场景配准中存在同名特征难以区分、投票匹配算法复杂度高等问题。为此,提出了一种基于平面基元组的建筑物场景点云自动配准方法。平面基元组被定义为具有近似相同法向量的点云面集合。该方法从点云中提取平面基元,根据平面法向量方向,划分平面基元组,然后借助基元组搜索同名平面,利用单位四元数法估计转换参数。实验结果表明,该方法适用于建筑物场景,能够实现点云的自动配准。

**关键词:**建筑物;平面提取;层次聚类;平面基元组;点云配准;随机采样一致性(RANSAC)  
**中图法分类号:**P231.5 **文献标志码:**A

三维激光扫描仪能快速对目标表面离散采样,获取大量高精度的数据点信息,形成致密点云。为获得完整的目标表面,通常需准确配准多站点云,因此,高精度和自动化的点云配准显得越发重要<sup>[1]</sup>。

现有点云配准方法主要分为三种。第一种是 Besl 等<sup>[2]</sup>提出的基于迭代优化的 ICP (iterative closest point) 算法,该算法能通过迭代获得较高的配准精度。为了提高 ICP 算法的收敛性,许多学者对算法的误差评价函数、对应点搜索策略、采样方法等关键步骤进行了改进<sup>[3-7]</sup>,形成了 ICP 算法家族。但该类算法对点云的位置初值和子集包含关系有很高的要求。第二种是基于几何特征的配准算法,如基于自旋图像<sup>[8]</sup>、点标记<sup>[9]</sup>、积分不变量<sup>[10]</sup>等几何特征的配准算法。采用这些特征作为配准基元无需初始位置,适合对自由曲面点云配准,但在存在自相似及结构重复性的建筑物场景中,容易出现误匹配现象,并且受到扫描仪自身分辨率的限制及系统噪声的影响,待配准的多个测站点云间并不存在严格意义上的同名点对,利用同名点方法较难准确地获取测站间的匹配关系<sup>[11]</sup>。第三种是基于投票机制的配准算法。该类方法通过穷举对应关系计算变换矩阵,从中选择全局最优的变换作为最终结果。投票方法无需初值且对适用场景要求较低。但是该类方法需

对所有可能结果进行穷举,因此需要足够的穷举次数。通常结合几何不变量等方法减少穷举次数,如 Aiger 提出的 4PCS (4-Points Congruent Sets) 方法<sup>[12]</sup>,Weinmann 提出的基于随机采样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 配准方法<sup>[13]</sup>,以及 Theiler 采用的最大可能集匹配方法<sup>[14]</sup>等。

本文针对建筑物场景点云粗配准中,基于几何特征的方法对相似特征难以区分和投票方法穷举次数过多的问题,结合建筑物场景中大量平面特征的特点,提出了一种平面特征分组策略来简化场景,以二面夹角和平面基元面积为不变量,利用平面特征结合 RANSAC 方法求解变换参数的配准方法。

## 1 基于平面基元组的点云配准方法

受扫描仪自身分辨率的限制及系统噪声的影响,待配准的多个测站点云间并不存在严格意义上的同名点对,利用同名点方法难以准确地获取测站间的匹配关系<sup>[15]</sup>。利用建筑物场景中普遍存在大量平面特征的特点,将海量点云的配准转换为少量同名平面的配准,是简化计算、提高配准准确性的有利途径。

### 1.1 平面基元提取

本文采用一种高效 RANSAC 方法<sup>[16]</sup>从点云

中提取平面,然后利用 MCMD\_Z 方法<sup>[17]</sup>对提取的平面进行粗差剔除,拟合高精度平面基元。对属于同一个平面的点集进行主成分分析,将第一和第二主成分方向分别作为长和宽的方向,构建点集平面投影的外接矩形作为平面基元,矩形的几何中心即为平面基元的几何中心。计算平面基元的几何中心  $c_p$ 、单位法向量  $n_p$ 。采用何文峰的方法<sup>[15]</sup>计算点云在平面上的投影面积  $S_p$ 。按照不同视角中相同平面法向量方向一致的原则,利用 Pathak 的方法<sup>[18]</sup>对平面基元的法向量进行调整,使场景中平面的法向量统一朝向外侧。由于平面基元的面积和二面角在旋转平移变换中具有不变性,故本文采用面积和二面角作为相似性测度。

1.2 平面基元聚类

建筑物场景通常包含大量对称或相似的平面。如果直接在目标和参考平面集中搜索同名平面,计算量较大且部分相似平面难以区分。针对此,本文通过对平面基元分组以简化场景。

平面基元分组即依据平行平面法向量方向一致原则,将场景划分为内部存在平行关系的平面基元组。借助平面基元组求解粗略旋转参数,在粗略旋转参数约束下建立平面匹配,减少投票方法的穷举次数,简化计算。

在建筑物场景点云配准中,通常难以事先确定平面基元组的数目。因此,本文采用层次聚类方法,根据平面的方向进行分组。可认为法向量夹角小于夹角阈值  $t_\theta$  的平面方向相同,可将其归为同一平面基元组。假设有一个球心位于原点,半径为单位长度的球,则可以将场景中所有平面(图 1(a))的单位法向量看作一个分布在球表面的点集(图 1(b)),利用平均距离对点集进行层次聚类(图 1(c)),对聚类后的类别求类别中心;选取距离类别中心最近的球面样本点对应的法向量为该类别的组法向量;根据分类树结果选取合适的夹角阈值  $t_\theta$ ,并得到距离阈值  $t_d = r \cdot t_\theta$ ,其中  $r=1$ ,为球面半径;按照距离阈值选取合理的分类作为分组结果(图 1(d))。

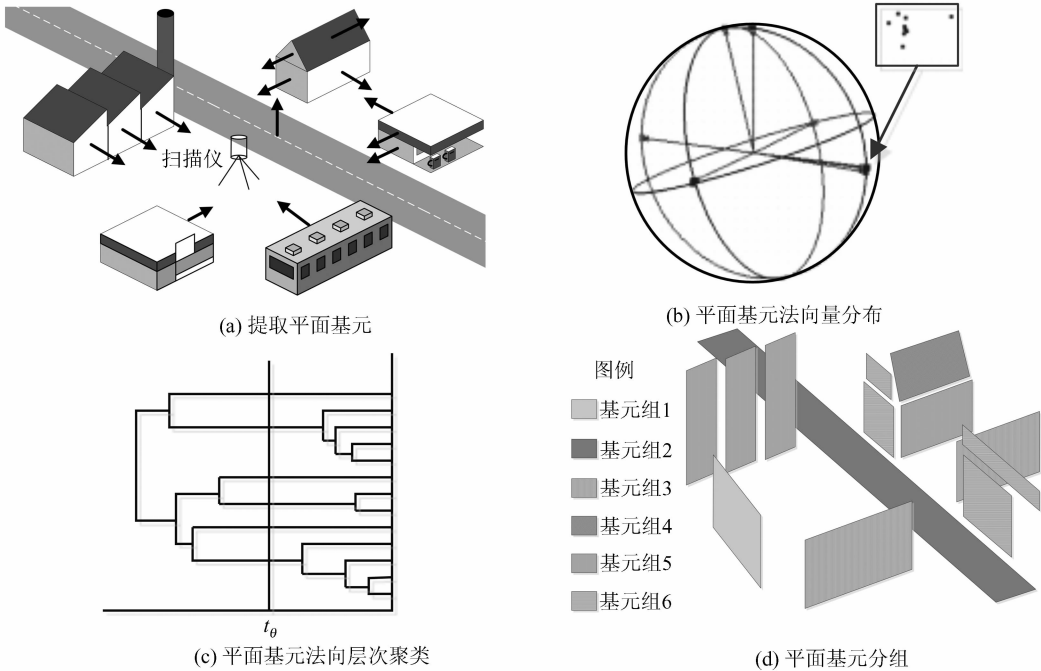


图 1 利用层次聚类对平面基元分组示意图  
Fig. 1 Schematic Diagram of Planar Primitives Grouping Using Hierarchical Cluster

1.3 配准策略

计算从目标点云到参考点云的变换参数,需在两个集合中找到 3 对或 3 对以上不平行的同名平面。根据同名平面基元组的法向量计算旋转变换参数,利用法向量和原点-平面距离获取平移矩阵。若平面基元正确匹配,则同名平面的法向量方向一致,此时两视角中方向一致的平面对数目

最多。在此约束下,对相同面积的平面基元建立匹配,并利用单位四元数法<sup>[19]</sup>计算变换参数。

同一坐标系内的各个平面间的二面角不随系统的旋转平移变换而改变,二面角的这一特性决定了它可以作为用于计算旋转变换参数的几何不变量。由于所有平面基元都已按照是否平行分为若干组,各平面基元组之间均互不平行,则 3 个平

面基元组  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的组法向量  $\mathbf{n}_A$ 、 $\mathbf{n}_B$ 、 $\mathbf{n}_C$  之间存在 3 个夹角  $\theta_{AB}$ 、 $\theta_{BC}$ 、 $\theta_{AC}$ , 这 3 个夹角分别对应 3 个平面基元组之间的姿态关系。本文采用 3 个平面基元组间的法向量夹角  $\theta_{AB}$ 、 $\theta_{BC}$ 、 $\theta_{AC}$  和平面基元的面积作为不变量, 结合 RANSAC 方法建立同名平面匹配, 计算从目标数据集  $P$  到参考数据集  $Q$  的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{t}$ , 步骤如下。

(1) 将 3 个平面基元组的组法向量  $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 、 $\mathbf{n}_3$  作为确定旋转变换模型的最小观测值集合, 计算参考平面集合中任意两个平面基元组的组法向量夹角, 夹角关系保存为  $\text{LIST}_Q$ 。

(2) 随机抽取目标平面集合中的 3 个平面基元组  $G_p^i (i=1, 2, 3)$ , 计算组间代表法向夹角, 得到 3 个角度值  $\theta_{12}^p, \theta_{23}^p, \theta_{13}^p$ 。在  $\text{LIST}_Q$  中搜索与这 3 个夹角差异小于  $t_\theta$  的对应角, 并结合平面基元组内基元的面积值  $S_{13}^i$ , 判断  $G_p^i (i=1, 2, 3)$  和参考平面集合中的 3 个平面基元组  $G_Q^i (i=1, 2, 3)$  中是否存在同名平面(图 2)。如果平面基元组夹角存在对应关系, 且对应平面基元组内存在面积差别小于阈值  $t_s$  的平面基元(图 3), 则认为可能存在同名平面。若不存在夹角和面积对应关系, 则重新抽取新的平面基元组。

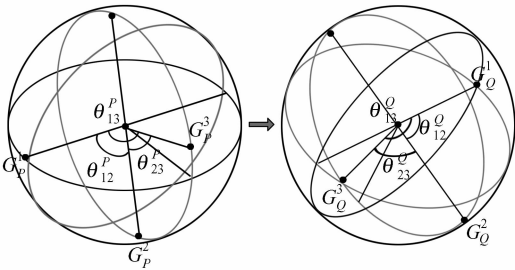


图 2 与目标平面基元组对应的参考平面基元组搜索过程

Fig. 2 Searching the Reference Primitive Groups Corresponding to Object Primitive Groups

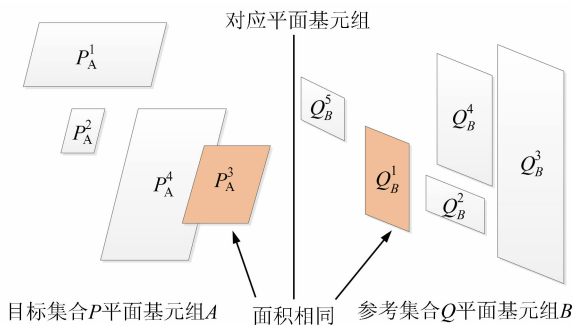


图 3 目标平面与参考平面相同的情况

Fig. 3 Same Plane in Object and Reference Plane Sets

(3) 对可能存在同名关系的情况, 根据平面基元组对应的 3 对法向量  $\mathbf{n}_{P_1}$ 、 $\mathbf{n}_{P_2}$ 、 $\mathbf{n}_{P_3}$  和  $\mathbf{n}_{Q_1}$ 、

$\mathbf{n}_{Q_2}$ 、 $\mathbf{n}_{Q_3}$  计算旋转变换  $\mathbf{R}_i$ 。使用该旋转变换  $\mathbf{R}_i$  对目标平面集合中的所有平面进行旋转, 计算旋转后的目标平面集合与参考平面集合中平面基元组的法向量夹角, 统计法向量方向一致的平面基元组对的数目  $n_c$ 。

(4) 重复步骤(2)~(3)  $K$  次, 抽样次数  $K > \log(1-P_e)/\log(1-P_o)$ 。其中  $P_e$  为期望随机选择的 3 个平面基元组在重叠区域的概率,  $P_o$  为估计的两视角数据间的重叠区域的比例。

(5) 选取具有最大平行平面基元组对数目  $n_{c \max}$  的  $G_{P_i}^j$  和  $G_{Q_i}^j (i=1, 2, 3)$  作为初步最佳映射。由于具有最大  $n_{c \max}$  的平面基元组对应可能不止一种情况, 因此  $j \geq 1$ , 该组合对应的  $\mathbf{R}_m^j$  即为初步最佳组旋转矩阵。按照  $\mathbf{R}_m^j$  对  $G_{P_i}^j (i=1, 2, 3; j \geq 1)$  作旋转变换得到变换后的平面基元组  $G_{P_i}^{m_j}$ 。

(6) 在对应组  $G_{P_i}^{m_j}$  和  $G_{Q_i}^j$  中找到面积相同(面积差别小于阈值  $t_s$  且最接近)的平面基元  $\text{Plane}_{P_i}^{m_j}$  和  $\text{Plane}_{Q_i}^j (i=1, 2, 3; j \geq 1)$  建立匹配关系。检查  $\text{Plane}_{P_i}^{m_j}$  和  $\text{Plane}_{Q_i}^j$  对应的 3 对几何中心组成的 3 个矢量  $\overrightarrow{PQ_i}^j$  (起点为  $\text{Plane}_{P_i}^{m_j}$  的中心, 终点为  $\text{Plane}_{Q_i}^j$  的中心) 是否存在方向和长度一致关系(图 4), 以免场景中存在具有相同面积且平行的平面出现误匹配。若存在一致, 计算对应的四元数  $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  和平移向量  $\mathbf{t}$ 。

(7) 计算所有  $G_{P_i}^{m_j}$  和  $G_{Q_i}^j (i=1, 2, 3; j \geq 1)$  的组合对应的  $\mathbf{q}$  和  $\mathbf{t}$ , 对计算结果中具有近似相等  $\mathbf{q}$  和  $\mathbf{t}$  的对应平面重新建立平面映射关系。按照最小二乘原则对匹配的平面特征计算最佳旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵, 此变换参数也是目标点云到参考点云的变换参数。

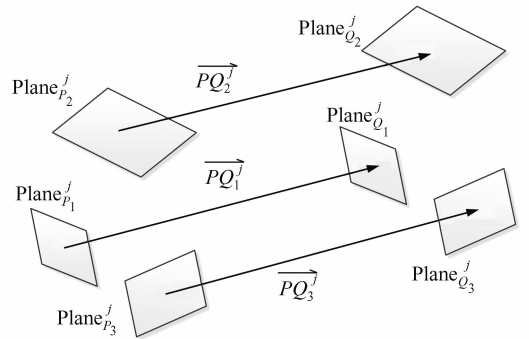


图 4 平面基元几何中心矢量约束

Fig. 4 Constraint with Vectors from Reference to Target Planar Primitive Centers

#### 1.4 精度验证

为验证算法自动配准的精度, 在点云的公共区域选取同名平面, 利用三个平面求交点, 将交点作为控制点, 计算控制点转换后的精度<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{(\sum \Delta^2 X_i + \sum \Delta^2 Y_i + \sum \Delta^2 Z_i)}{n-1}} \quad (1)$$

式中,  $i=1,2,3,\cdots,n$ ,  $n$  为特征点对的数目;  $X_i$ 、 $Y_i$ 、 $Z_i$  为控制点在标点云中控制点转换到参考坐标系中的坐标值,  $\Delta X_i = X_i - X'_i$ ,  $\Delta Y_i = Y_i - Y'_i$ ,  $\Delta Z_i = Z_i - Z'_i$ 。

2 实例验证

本文采用 Reigl VZ-400 地面三维激光扫描仪,工作时,扫描仪沿水平面顺时针方向匀速旋转,激光束竖向逐列扫描被测物体表面,并自动解析记录激光的回波信号。本文进行了多组实验,现举两例予以说明。

实验一 扫描场景为一片建筑群,点云区域为  $200 \times 100$  m。扫描内容主要包含建筑物立面、行人、车辆、道路和植被。两测站重叠区域约 70%。图 5 为未经配准的两测站点云,图 5 中黑色为目标点云  $P$ ,点数量约  $2.43 \times 10^6$  个,灰色为参考点云  $Q$ ,点数量约  $3.61 \times 10^6$  个。忽略面积过小或所含点数过少的平面,从目标点云  $P$  中提取平面基元 32 个,从参考点云  $Q$  中提取平面基元 43 个。按照  $0.1^\circ$  夹角阈值,  $P$ 、 $Q$  分别被分为 9 组和 15 组(图 6),图 6 中竖线为分组阈值。从  $P$  和  $Q$  中寻找 7 对存在公共平面的平面基元组,根据面积相等原则,从公共平面基元组中选出 7 对面积差别最小的平面基元建立匹配,计算变换参数。图 7 为配准后的两测站点云。选取 7 个控制点检查,变换精度  $\sigma_P = 0.015$  m。

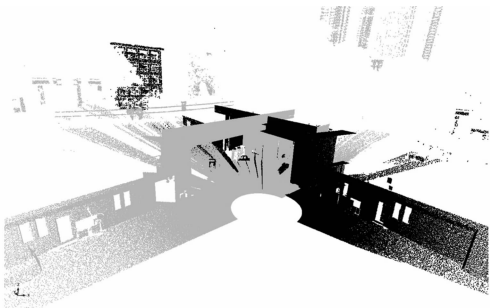
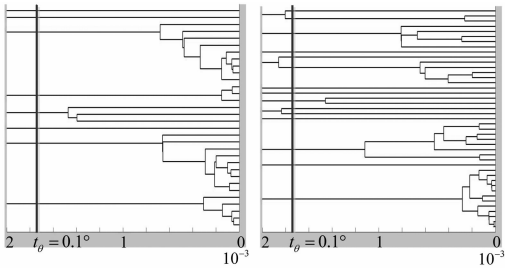


图 5 未经配准的两站点云  
Fig. 5 Unregistered Point Clouds

实验二 点云区域为  $500 \times 300$  m。扫描内容主要包含建筑物墙面、道路和植被。两测站重叠区域约 40%。图 8 为未经配准的两视角点云,黑色为目标点云  $P$ ,点数量约  $1.40 \times 10^6$  个,灰色为参考点云  $Q$ ,点数量约  $8.37 \times 10^5$  个。忽略面积过小或所含点数过少的平面,从目标点云  $P$  中提取平面基元 26 个,从参考点云  $Q$  中提取平面



(a)  $P$  中平面基元分组结果 (b)  $Q$  中平面基元分组结果

图 6  $P$  与  $Q$  中平面基元分组结果  
Fig. 6 Result of Planar Primitives Grouping in  $P$  and  $Q$

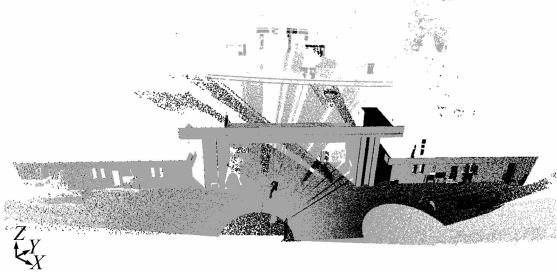


图 7 配准后的两站点云  
Fig. 7 Registered Point Clouds

基元 38 个。按照  $0.5^\circ$  夹角阈值分别被分为 7 组和 10 组(图 9)。从中选出 5 对匹配基元,计算得到变换参数。图 10 为配准后的两测站点云。选取 5 个控制点检查,变换精度  $\sigma_P = 0.062$  m。

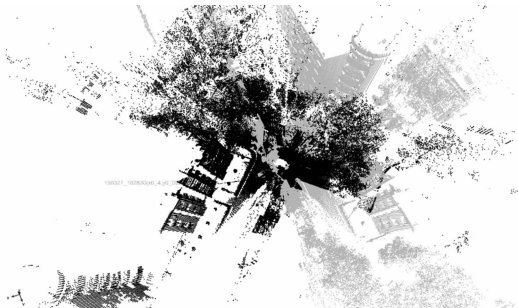


图 8 未经配准的两站点云  
Fig. 8 Unregistered Point Clouds

实验一的变换精度高于实验二,主要是由于匹配的同名平面基元越多,求解的变换参数越精确。此外,当场景较大时,距离较远的建筑物点云较为稀疏,该区域噪声所占比例较大,造成平面基元的拟合误差较大,利用这些平面基元的配准结果也出现相应的偏差。当扫描场景较小时,一般只针对目标区域精细扫描,噪声所占比例较少,配准结果也较为理想。在实验二中,受场景重叠度限制,可用于匹配的同名平面基元数量较少。为了满足三对以上不平行平面的配准要求,选用了较远区域的建筑物立面。由于实验二中扫描仪设

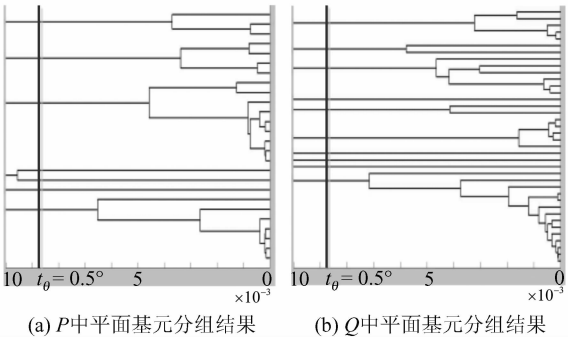


图 9 中平面基元分组结果

Fig. 9 Result of Planar Primitives Grouping

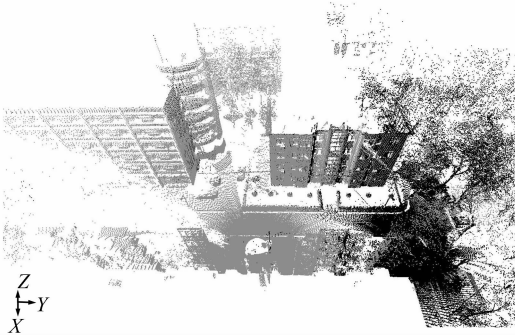


图 10 配准后的两站点云

Fig. 10 Registered Point Clouds

置的采样间隔较大,平面点云获取完整度降低,使同名平面基元的面积偏差增大,导致可匹配平面较少。且路面存在起伏,地表平面拟合误差较大,提取的平面基元包含噪声较多。多方面因素造成了实验二的配准精度降低。实际应用中,为了获取建筑物完整表面,会从多个角度对建筑物整体进行扫描,多个测站形成一个闭合环,通过分配闭合差的方法进一步减小相邻两站配准带来的累积误差<sup>[21]</sup>。

与基于 ICP 的配准方法相比,本文方法只需要两次扫描获取的数据具有足够的重叠度,就可以求出用于粗配准的变换参数,更加方便灵活,无需标靶辅助和人工选取同名特征;相对于直接从点云中提取同名点的配准方法,本文方法在扫描线较为稀疏的点云配准时具有更好的鲁棒性;与其他利用平面特征的配准方法相比,本文方法采用平面分组的策略将场景中的大量平面简化为几个方向相同的平面集合,有利于降低搜索同名平面的复杂度。本文方法的配准精度对平面基元的参数精度较为依赖,要求建筑物场景点云相邻两站的重叠区域内至少包含 3 对或 3 对以上互不平行的同名平面,且平面的整体形状获取较为完整。

### 3 结 语

本文提出了一种基于平面基元组的点云自动配准方法。该方法将平面基元按法向量方向分组,采用 RANSAC 方法匹配平面基元,实现建筑物点云的自动配准。实验结果表明,该方法具有自动化程度高,无需人工选取初值的优点,可用于建筑物场景点云粗配准。

### 参 考 文 献

[1] Zhang Jianqing, Zhai Ruifang, Zheng Shunyi. Automatic Seamless Registration of 3D Multiple Range Views[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 100-103(张剑清, 翟瑞芳, 郑顺义. 激光扫描多三维视图的全自动无缝镶嵌[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(2): 100-103)

[2] 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

[3] Jost T, Hugli H. A Multi-resolution Scheme ICP Algorithm for Fast Shape Registration[C]. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, Padova, Italy, 2002

[4] Trucco E, Fusiello A, Roberto V. Robust Motion and Correspondences of Noisy 3D Point Sets with Missing Data [J]. *Pattern Recognition, Letters*, 1999, 20 (9):889-898

[5] Zinsser T, Schmidt H, Niermann J. A Refined ICP Algorithm for Robust 3D Correspondences Estimation[C]. International Conference in Image Processing, Barcelona, Spain, 2003

[6] Chow C, Tsui H, Lee T. Surface Registration Using a Dynamic Genetic Algorithm[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37 (1):105-117

[7] Zheng Li, Zhang Jianqing, Luo Yuejun. Close Multi-view Metrical Data Registration[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 199-202 (郑莉, 张剑清, 罗跃军. 多视结构光点云的自动无缝拼接[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 199-202)

[8] Johnson A. Spin-images: A Representation for 3-d Surface Matching[D]. USA: Carnegie Mellon University, 1997

[9] Chua C. Point Signatures: A New Representation for 3d Object Recognition[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 25 (1):63-85

[10] Gelfand N, Mitra N J, Guibas L J, et al. Robust

- Global Registration[C]. Symposium on Geometry Processing, Vienna, Austria, 2005
- [11] Wang Yongbo, Yang Huachao, Liu Yanhua, et al. Linear-Feature-Constrained Registration of LiDAR Point Cloud via Quaternion[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1 057-1 062(王永波, 杨化超, 刘燕华, 等. 线状特征约束下基于四元数描述的 LiDAR 点云配准方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(9): 1 057-1 062)
- [12] Aiger D, Niloy M, Cohen-Or D. 4-Points Congruent Sets for Robust Pairwise Surface Registration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 85-94
- [13] Weinmann M, Weinmann M, Hinz S, et al. Fast and Automatic Image-based Registration of TLS Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): S62-S70
- [14] Theiler P W, Schindler K. Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds Using Natural Planner Surfaces[C]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne, Australia, 2012
- [15] He W, Ma W, Zha H. Automatic Registration of Range Images Based on Correspondence of Complete Plane Patches[C]. *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, Ottawa, Canada, 2005
- [16] Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection [J]. *Computer Graphics Forum*, 2007, 26(2):214-226
- [17] Nurunnabi A, West G, Belton D. Outlier Detection and Robust Normal-curvature Estimation in Mobile Laser Scanning 3D Point Cloud Data[J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(4):1 404-1 419
- [18] Pathak K, Birk A, Vaskevicius N, et al. Fast Registration Based on Noisy Planes with Unknown Correspondences for 3-D Mapping[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(3): 424-441
- [19] Wang Li, Li Guangyun, Zhang Qifu, et al. Plane Fitting and Transformation in Laser Scanning[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(2):101-104 (王力, 李广云, 张启福, 等. 激光扫描中平面拟合及坐标转换模型构建[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2):101-104)
- [20] Yang Wei, Liu Chun, Liu Dajie. Accuracy Analysis of Laser Scanning Data Coordinate Transformation [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2004, 3: 61-63(杨伟, 刘春, 刘大杰. 激光扫描数据三维坐标转换的精度分析[J]. 工程勘察, 2004, 3: 61-63)
- [21] Xu Yuangqiang, Gao Jingxiang, Zhang Li, et al. Research on Point Cloud Registration Error of Terrestrial Laser Scanning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 129-132(徐源强, 高井祥, 张丽, 等. 地面三维激光扫描的点云配准误差研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 129-132)

## Automatic Registration of Building's Point Clouds Based on Planar Primitive Groups

LIANG Dong<sup>1</sup> WANG Hongping<sup>1</sup> LIU Xiuguo<sup>1</sup> SHEN Yonglin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In this paper, we present an automatic registration method based on planar primitive groups for building point clouds. This method distinguishes planar features with similar structures found in urban scenes, and reduces feature matching search complexity. In the method, planar patches with similar normal vectors are defined as a planar primitive group. We extract planes from point clouds as planar primitives. Using a threshold, we cluster the planar primitives with the similar normal vectors into groups. Finally, we match the planar primitives in groups, and calculate transformation parameters with an extended quaternion method. Experimental results show that this method is effective for automatic registration of building point clouds.

**Key words:** building; plane extraction; hierarchical clustering; planar primitive group; point clouds registration; RANSAC

**First author:** LIANG Dong, PhD candidate, specializes in point cloud data processing and uncertainty analysis on 3D geology modelling. E-mail: bomer2000@sina.com

**Corresponding author:** LIU Xiuguo, PhD, professor. E-mail: LiuXg318@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41471355; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. CUGL120267.