

文章编号:1671-8860(2013)09-1057-06

文献标志码:A

线状特征约束下基于四元数描述的 LiDAR 点云配准方法

王永波^{1,2} 杨化超^{1,2} 刘燕华^{1,2} 牛晓楠^{1,2}

(1 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室,徐州市大学路1号,221116)

(2 中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室,徐州市大学路1号,221116)

摘要:针对经典的基于同名点状特征匹配的 LiDAR 点云配准算法存在计算量大,点状特征提取精度低,以及基于七参数转换模型的 LiDAR 点云配准算法中方程线性化过程对配准精度影响较大的特点,提出了以线状特征作为 LiDAR 点云配准的基元,利用四元数法来表达旋转矩阵,进而形成线状特征约束下基于四元数描述的 LiDAR 点云配准方法,给出了线状特征约束下三维相似变换的相似性测度表达方法,推导并论证了以线状特征作为配准基元时同名线状特征需要满足的条件。根据四元数与旋转变换矩阵之间的对应关系,求解了基于四元数法的旋转矩阵,并根据旋转变换矩阵求解了平移及缩放系数。

关键词:LiDAR; 点云; 配准; 四元数; 线状特征

中图法分类号:P237.9

全面、真实、快速、准确地再现地理空间实体及其环境信息是数字城市建设的关键,也是 3D GIS 的核心研究问题之一。多年来,国内外学者在空间三维数据的采集与处理方面进行了大量的研究,取得了许多重要的研究成果。在现有的三维数据采集方法中, LiDAR 凭借其高效、高精度等优良特性,为数字城市空间数据获取和实时更新提供了可靠的保证。然而,源于地理实体的空间复杂度普遍较高, LiDAR 传感器的视觉面较窄等原因,基于 LiDAR 技术的三维数据采集通常需要沿着多个不同的视向对目标地理实体及其周边地物进行扫描,并基于相应的配准算法将原本各自独立的测站拼接到一起,以实现对地理实体及其周边环境的全面表达。

根据配准过程中所选择配准基元的不同,可将现有的 LiDAR 点云配准算法分为 4 类:基于同名点匹配的 LiDAR 点云配准^[1-6]、基于同名线状特征匹配的 LiDAR 点云配准^[7-8]、基于同名面状特征匹配的 LiDAR 点云配准^[9]以及基于点、线、面

共同约束的 LiDAR 点云配准^[10]。受限于 LiDAR 采样分辨率的影响,通常难以从 LiDAR 点云中精确提取点状特征,因此使得基于同名点匹配的 LiDAR 点云配准算法的配准精度难以得到保证。相比之下,基于同名线状特征、面状特征匹配的的 LiDAR 点云配准算法则可以有效避免这一问题,配准结果通常具备较高的精度。另外,根据配准过程中旋转变换表示方法的不同,可将现有算法分为基于迭代最小二乘法的 LiDAR 点云配准^[1-10]与基于四元数描述的 LiDAR 点云配准^[11-14]两大类。其中,前者通过旋转变换矩阵来描述配准过程中的旋转变换,并通过方程线性化来实现配准参数的求解,由于线性化本身存在一定的近似性,因此,在某种程度上影响了配准结果的精度;后者基于四元数来描述配准过程中的旋转变换,其应用四元数来表达三个基本的旋转参数,即绕 Y 轴的旋转角 φ 、绕 X 轴(绕 φ 旋转后的 X 轴)的旋转角 ω 和绕 Z 轴(经过 $\varphi\omega$ 角旋转后的 Z 轴)的旋转角 κ ,有效地避免了非线性方程线性化过程中的精度损

收稿日期:2013-03-27。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001297,41271444,41001312);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012569);江苏高校优势学科建设工程资助项目;中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室开放研究基金资助项目(LED2010B10)。

失。更为重要的是,四元数法是一种直接解法,配准之前无需得到 LiDAR 点云配准的初值,因此计算上更为便利。

本文以线状特征作为 LiDAR 点云配准的基本元,探讨了线状约束下基于四元数的 LiDAR 点云配准方法,实现了 LiDAR 点云的高效、高质量配准,以确保配准之后点云数据的整体性及其与原始采样实体表面的一致性,保证三维表面拓扑重建的质量。

1 四元数及其运算规则

四元数是由 Hamilton 在 1843 年提出的数学概念,类似于复数,四元数表示的是一个 4 维空间,它由一个实部 q_0 和三个虚部 q_1, q_2, q_3 构成:

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1 \vec{i} + q_2 \vec{j} + q_3 \vec{k} = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T \quad (1)$$

则四元数的基本运算规则可以表示如下:

1) 四元数相乘:

$$\begin{aligned} \mathbf{pq} = & (p_0 q_0 - p_1 q_1 - p_2 q_2 - p_3 q_3) + \\ & (p_0 q_1 + p_1 q_0 + p_2 q_3 - p_3 q_2) \vec{i} + \\ & (p_0 q_2 - p_1 q_3 + p_2 q_0 + p_3 q_1) \vec{j} + \\ & (-p_0 q_3 + p_1 q_2 - p_2 q_1 + p_3 q_0) \vec{k} \end{aligned} \quad (2)$$

写成矩阵形式,则有:

$$\mathbf{pq} = \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix} \mathbf{p} = \bar{\mathbf{Q}} \mathbf{p} \quad (3)$$

同样, \mathbf{q} 与 \mathbf{p} 相乘有:

$$\mathbf{qp} = \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \mathbf{p} = \mathbf{Q} \mathbf{p} \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (q_0)^2 + (q_1)^2 - (q_2)^2 - (q_3)^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 0 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & (q_0)^2 - (q_1)^2 + (q_2)^2 - (q_3)^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 0 & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & (q_0)^2 - (q_1)^2 - (q_2)^2 + (q_3)^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

据此,旋转矩阵 \mathbf{R} 和旋转四元数 \mathbf{q} 的对应形

2) 四元数的点积:

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{q} \cdot \mathbf{p} = p_0 q_0 + p_1 q_1 + p_2 q_2 + p_3 q_3 \quad (5)$$

3) 四元数的共轭:

$$\mathbf{q}^* = q_0 - q_1 \vec{i} - q_2 \vec{j} - q_3 \vec{k} \quad (6)$$

且有:

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}^* = (q_0)^2 + (q_1)^2 + (q_2)^2 + (q_3)^2 = \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} \quad (7)$$

进一步可推导出:

$$\mathbf{q}^{-1} = \mathbf{q}^* / \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} \quad (8)$$

除此之外,还有一个重要的公式:

$$(\mathbf{pq}) \cdot \mathbf{r} = \mathbf{p} \cdot (\mathbf{rq}) \quad (9)$$

2 基于四元数描述的旋转矩阵求解

2.1 基于四元数的旋转矩阵表示

已知空间一采样点 $\mathbf{p}_i = (p_{i,x}, p_{i,y}, p_{i,z})$, 用四元数可表示为:

$$\mathbf{p}_i = 0 + p_{i,x} \vec{i} + p_{i,y} \vec{j} + p_{i,z} \vec{k} \quad (10)$$

假设一过原点的旋转轴,其单位方向向量 $\mathbf{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$, 那么绕该轴旋转角度 φ 的旋转变换,可用旋转四元数表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{q} = & \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)(\omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}) = \\ & q_0 + q_1 \vec{i} + q_2 \vec{j} + q_3 \vec{k} \end{aligned} \quad (11)$$

因此,将 \mathbf{p} 经过旋转变换转化为 \mathbf{p}' 的过程表示为:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{qpq}^* = \dot{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{p}} \mathbf{p}^{-1} \quad (12)$$

用矩阵表示为:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{qpq}^* = (\bar{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q}) \dot{\mathbf{p}} = (\bar{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q}) \dot{\mathbf{p}} \quad (13)$$

此时,有:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = & \begin{bmatrix} (q_0)^2 + (q_1)^2 - (q_2)^2 - (q_3)^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & (q_0)^2 - (q_1)^2 + (q_2)^2 - (q_3)^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & (q_0)^2 - (q_1)^2 - (q_2)^2 + (q_3)^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

已知旋转四元数 q ,即可以求出旋转矩阵 R 。

2.2 相似性测度

如图1所示,AB是从基准测站LiDAR点云上提取的一条线段,1-2是从待配准测站LiDAR点云上所提取的一条线段,假设两条线段为同名线段,但AB线段与1-2线段的端点不一一对应,为了基于共线方程推导AB与1-2之间的对应关系^[7]:

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + S \mathbf{R}_{(\varphi, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + S \mathbf{R}_{(\varphi, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $(X_T, Y_T, Z_T)^T$ 表示基准测站坐标系统与第二测站LiDAR坐标系统之间的平移向量; R 是第二测站LiDAR坐标系统与基准测站LiDAR坐标系统之间的旋转矩阵; S 、 λ_1 和 λ_2 表示缩放因子。两式相减即可得到:

$$(\lambda_2 - \lambda_1) \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = S \mathbf{R}_{(\varphi, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

将缩放因子 S 、 λ_1 和 λ_2 合并,即可得到:

$$\begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \mu \mathbf{R}_{(\varphi, \omega, \kappa)} \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

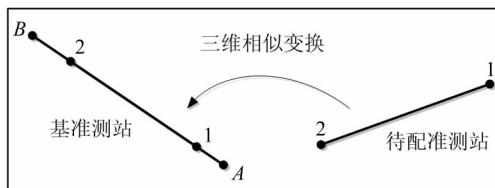


图1 LiDAR点云配准的相似性测度^[7]

Fig. 1 Similarity Measurement of LiDAR Point Cloud Registration^[7]

2.3 目标函数及其最小化

根据式(19)的描述可知,计算旋转矩阵时,目标函数满足:

$$f(H) = f(\mu, R) = \sum_{i=1}^N \|Q_i - \mu \mathbf{R} \mathbf{P}_i\|_2^2 \quad (20)$$

三维旋转矩阵 R 是一个正交矩阵,因此,有 $\|\mathbf{R} \mathbf{P}'_i\|_2^2 = \|\mathbf{P}'_i\|_2^2$,因此,式(20)展开得到:

$$f(H) = f(\mu, R) = \sum_{i=1}^N \|Q_i - \mu \mathbf{R} \mathbf{P}_i\|_2^2 = \sum_{i=1}^N \|Q_i\|_2^2 - 2\mu \sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i) + \mu^2 \sum_{i=1}^N \|\mathbf{P}_i\|_2^2 \quad (21)$$

为使目标函数 $f(\mu, R)$ 达到最小,使 $\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i)$ 达到最大即可, $\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i)$ 用四元数法可表示为:

$$\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i) = \sum_{i=1}^N (\mathbf{q} \mathbf{p}'_i \cdot \mathbf{q}^*) \cdot \mathbf{q}'_i \quad (22)$$

据式(9)所示的四元数运算规则,可将式(22)作如下变换:

$$\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i) = \sum_{i=1}^N (\mathbf{q} \mathbf{p}'_i) \cdot (\mathbf{q}'_i \mathbf{q}) \quad (23)$$

进一步用矩阵形式表达如下:

$$\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i) = \sum_{i=1}^N (\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{q}) \cdot (\mathbf{Q}_i \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N (\bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{q})^T \cdot (\mathbf{Q}_i \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N \mathbf{q}^T \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{q} = \quad (24)$$

$$\mathbf{q}^T \left(\sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{P}}_i \mathbf{Q}_i \right) \mathbf{q} = \mathbf{q}^T \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{N}_i \right) \mathbf{q} = \mathbf{q}^T \mathbf{N} \mathbf{q}$$

$$\text{式中, } \bar{\mathbf{P}}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta x_{21} & -\Delta y_{21} & -\Delta z_{21} \\ \Delta x_{21} & 0 & \Delta z_{21} & -\Delta y_{21} \\ \Delta y_{21} & -\Delta z_{21} & 0 & \Delta x_{21} \\ \Delta z_{21} & \Delta y_{21} & -\Delta x_{21} & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta x_{BA} & -\Delta y_{BA} & -\Delta z_{BA} \\ \Delta x_{BA} & 0 & -\Delta z_{BA} & \Delta y_{BA} \\ \Delta y_{BA} & \Delta z_{BA} & 0 & -\Delta x_{BA} \\ \Delta z_{BA} & -\Delta y_{BA} & \Delta x_{BA} & 0 \end{bmatrix}.$$

可知,使 $\mathbf{q}^T \mathbf{N} \mathbf{q}$ 达到最大值时,即可使 $\sum_{i=1}^N Q_i \cdot (\mathbf{R} \mathbf{P}_i)$ 最大化。

设矩阵 \mathbf{N} 对四元数 q 的特征值为 $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 对应特征值 λ_i 的特征向量为 e_i :

$$\mathbf{N} e_i = \lambda_i e_i \quad (25)$$

则四元数 q 可以用这4个特征向量 $e_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为基表示为:

$$q = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3 + a_4 e_4 \quad (26)$$

若四元数 q 为旋转矩阵,则满足 $(a_1)^2 + (a_2)^2 + (a_3)^2 + (a_4)^2 = 1$,因此,有:

$$q^T \mathbf{N} q = (a_1)^2 \lambda_1 + (a_2)^2 \lambda_2 + (a_3)^2 \lambda_3 + (a_4)^2 \lambda_4 \leq \lambda_{\max} \quad (27)$$

则当 $q^T \mathbf{N} q$ 取得最大值时,对应于矩阵 \mathbf{N} 取得最大特征值 λ_{\max} ,对应 λ_{\max} 的特征向量,即为目

标旋转矩阵的四元数表示。

3 缩放因子与平移向量

恢复了旋转矩阵之后,还需要探讨如何恢复缩放因子以及平移向量。

令 $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T = \mathbf{R}_{(\varphi, \omega, \kappa)} [X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T$, 则可将式(16)改写为:

$$\lambda_1 \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T + Sx_1 - X_A \\ Y_T + Sy_1 - Y_A \\ Z_T + Sz_1 - Z_A \end{bmatrix} \quad (28)$$

分别将式(28)中的第1、2行除以第3行,可得:

$$\begin{cases} \frac{(X_B - X_A)}{(Z_B - Z_A)} = \frac{(X_T + Sx_1 - X_A)}{(Z_T + Sz_1 - Z_A)} \\ \frac{(Y_B - Y_A)}{(Z_B - Z_A)} = \frac{(Y_T + Sy_1 - Y_A)}{(Z_T + Sz_1 - Z_A)} \end{cases} \quad (29)$$

与上述方法类似,可将式(17)改写为:

$$\begin{cases} \frac{(X_B - X_A)}{(Z_B - Z_A)} = \frac{(X_T + Sx_2 - X_A)}{(Z_T + Sz_2 - Z_A)} \\ \frac{(Y_B - Y_A)}{(Z_B - Z_A)} = \frac{(Y_T + Sy_2 - Y_A)}{(Z_T + Sz_2 - Z_A)} \end{cases} \quad (30)$$

结合式(29)与式(30),可得:

$$\begin{cases} \frac{(X_T + Sx_1 - X_A)}{(Z_T + Sz_1 - Z_A)} = \frac{(X_T + Sx_2 - X_A)}{(Z_T + Sz_2 - Z_A)} \\ \frac{(Y_T + Sy_1 - Y_A)}{(Z_T + Sz_1 - Z_A)} = \frac{(Y_T + Sy_2 - Y_A)}{(Z_T + Sz_2 - Z_A)} \end{cases} \quad (31)$$

一对同名线可以构建如式(31)所示的两个约束条件,该约束条件可以用于估算两个参数。两对相交的线段可以产生4个方程,平移参数可以正确估算,然而,缩放系数没有办法估算。因此,至少需要两对不共面的线段来估算这些参数。

4 实验

本文提出线状特征约束下基于四元数描述的LiDAR点云配准算法已经通过C++编程实现,并采用如图2所示的基于奥地利Riegl公司的LMS-Z420i系列地面LiDAR设备采集得到的某建筑物立面点云来验证算法的正确性与有效性。

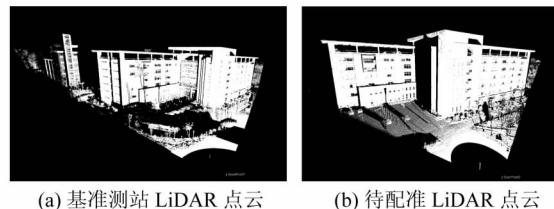


图2 基于不同角度对同一建筑物采集得到的LiDAR点云

Fig. 2 LiDAR Point Cloud of the Same Building from Different Perspectives

基于点云的线状特征提取,本文方法是首先通过人机交互的方式选择相应的LiDAR点云实现平面的拟合,在此基础上,通过平面相交的方法来实现线状特征的精确提取。实验过程中,分别从两个测站提取了4对同名线状特征(图2),每对线状特征通过两个端点进行标示(表1),其中,Line₄与Line₁共面;理论上相交;Line₄与Line₂异面,Line₄与Line₃理论上平行。

基于表1的同名线状特征数据,选择了3种方案对本文的配准算法进行测试:①选择一对共面且理论上相交的同名线状特征求解待配准测站与基准测站之间的旋转变换矩阵;选择一对异面

表1 同名线状特征

Tab. 1 Conjugate Line Features

线段编号	基准测站		待配准测站	
	起点坐标	终点坐标	起点坐标	终点坐标
Line ₁	(-49.943, 14.296, 23.493)	(-49.916, 14.270, 20.056)	(-35.988, -0.269, 19.411)	(-35.152, -0.237, 15.714)
Line ₂	(-52.874, 11.405, 25.928)	(-58.359, 5.934, 25.943)	(-40.478, -1.459, 19.876)	(-46.747, -3.209, 18.454)
Line ₃	(-54.129, -22.611, 22.984)	(-65.514, -11.162, 22.841)	(-56.989, -30.003, 12.646)	(-61.129, -14.477, 11.870)
Line ₄	(-69.168, 33.610, 22.454)	(-79.727, 44.207, 22.308)	(-42.624, 26.023, 16.350)	(-46.586, 40.816, 15.593)

线状特征求解待配准测站与基站测站之间的平移与缩放系数;②选择一对共面且理论上相交的同名线状特征求解待配准测站与基准测站之间的旋转变换矩阵;选择多对线状特征(至少有两条线状特征异面)求解待配准测站与基站测站之间的平移与缩放系数;③选择多对同名线状特征(至少有两条线状特征共面且理论上相交)求解待配准测站与基准测站之间的旋转变换矩阵;选择多对

线状特征(同名测站中,至少有两条线状特征异面)求解待配准测站与基站测站之间的平移与缩放系数。配准完成之后,以配准后同名线状特征之间的角度偏差为基元计算配准中误差,结果如表2,测试方案3的配准效果图如图3。

从表2给出的测试结果可以看出:①不管选择几对同名线状特征,相邻两个测站之间的缩放系数始终非常接近于1,这与实际情况相符;②旋

表2 线状特征约束下基于四元数的LiDAR点云配准结果

Tab. 2 Results of Linear-Feature-Constrained Registration Method Which is Realized Via Quaternion

测试方案	所选同名线状特征			配准中误差/(°)
	结果 R	结果 T	结果 S	
1	Line ₁ , Line ₄ $\begin{bmatrix} 0.850 & -0.495 & 0.180 \\ 0.479 & 0.869 & 0.123 \\ -0.218 & -0.018 & 0.976 \end{bmatrix}$	Line ₂ , Line ₄ $-22.999, 29.292, -2.230$	Line ₂ , Line ₄ 0.998	0.030
2	Line ₁ , Line ₄ $\begin{bmatrix} 0.850 & -0.495 & 0.180 \\ 0.479 & 0.869 & 0.123 \\ -0.218 & -0.018 & 0.976 \end{bmatrix}$	Line ₁ ~ Line ₄ $-22.984, 29.404, -2.313$	Line ₁ ~ Line ₄ 1.000	0.025
3	Line ₁ ~ Line ₄ $\begin{bmatrix} 0.850 & -0.495 & 0.181 \\ 0.479 & 0.869 & 0.124 \\ -0.218 & -0.019 & 0.976 \end{bmatrix}$	Line ₁ ~ Line ₄ $-22.992, 29.447, -2.361$	Line ₁ ~ Line ₄ 1.001	0.025

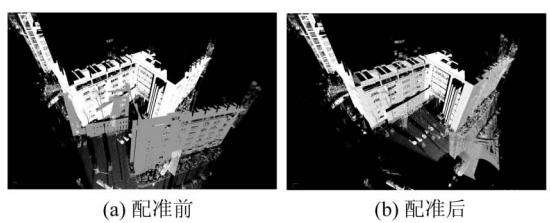


图3 配准结果(测试方案3)

Fig. 3 Effect of Registration Result (the 3rd Scheme)

转矩阵 R 对于同名线状特征的数目变化不敏感,利用两条理论上共面且相交的同名线状特征和利用4条同名线状特征的配准结果相差甚微,几乎可以忽略不计,这也从另外一个层面上印证了配准结果的精确性;③平移向量 T 对于同名线状特征的变化反应灵敏,究其原因,是因为在配准过程中仅利用线状特征的方向向量对平移向量进行估算,因此,在实际应用过程中,为了尽可能提高配准的精确度,应尽可能多选择几条同名特征线段参与平移向量 T 的计算。

5 结语

与经典的基于同名点匹配的LiDAR点云配准方法以及基于迭代最小二乘的LiDAR点云配准方法相比,线状特征约束下基于线状特征匹配的LiDAR点云配准方法具备如下优点:①基于平面拟合与相交的方式提取线状特征的方法其自身可以有效削弱LiDAR点云采集过程中偶然误差的影响,且同名线状特征相互间对应关系的建立比较简单,端点之间无需建立精确的对应关系;②配准过程中省去了线性化的步骤,在某种程度上减少了由于线性化所带来的精度损失,更为重要的是,基于四元数描述的LiDAR点云配准无

需事先知道旋转矩阵的初值,因此,适用范围更广。

然而,注意到配准过程中变换参数的求解顺序依次为旋转矩阵、缩放因子与平移向量,如此分解使得算法在理论上欠严谨,实现基于四元数描述的旋转矩阵表达的前提下,旋转矩阵、缩放因子与平移向量的同步求解将是本文后续工作的研究重点;此外,配准过程中综合考虑点状、线状、面状特征的约束,实现多种特征约束下的LiDAR点云的配准将是本文后续工作的重要方向。

参 考 文 献

- [1] Arun K S, Huang T S, Bostein S D. Least-squares Fitting of Two 3D Point Sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(9): 698-700
- [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] Chetverikov D, Stepanov D, Krsek P. Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets: The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(3): 299-309
- [4] 贺磊, 余春平, 李广云. 激光扫描数据的多站配准方法[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(6): 410-413
- [5] 盛业华, 张卡, 张凯, 等. 地面三维激光扫描点云的多站数据无缝拼接[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 233-237
- [6] 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
- [7] Habib A, Mwafag G, Michel M, et al. Photogram-

- metric and LiDAR Data Registration Using Linear Features[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(6): 699-707
- [8] Guan Yunlan, Zhang Hongjun. Initial Registration for Point Clouds Based on Linear Features [C]. Fourth International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM), Sanya, China, 2011
- [9] Park S Y, Subbarao M. An Accurate and Fast Point-to-Plane Registration Technique[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(16): 2 967-2 976
- [10] 郑德华, 岳东杰, 岳建平. 基于几何特征约束的建筑物点云配准算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 464-468
- [11] Horn B K. Closed-form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions[J]. Journal of Optical Society of America(Series A), 1987, 4(4):629-642
- [12] Horn B K. Closed form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices[D]. Journal of the Optical Society of America(Series A), 1988, 5 (7): 1127-1135
- [13] 杨现辉. 基于对偶四元数的点云配准算法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010
- [14] 赵双明, 郭秋燕, 罗研, 等. 基于四元数的三维空间相似变换解算[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(10): 1 214-1 217

第一作者简介:王永波,博士,副教授,主要从事三维数据采集与处理方面的研究。
E-mail: ybwang@cumt.edu.cn

Linear-Feature-Constrained Registration of LiDAR Point Cloud via Quaternion

WANG Yongbo^{1,2} YANG Huachao^{1,2} LIU Yanhua^{1,2} NIU Xiaonan^{1,2}

- (1 Key Laboratory for Land Environment & Disaster Monitoring of SBSM, China University of Mining & Technology,
1 Daxue Road, Xuzhou, 221116, China)
- (2 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining & Technology,
1 Daxue Road, Xuzhou, 221116, China)

Abstract: Considering the large amount of computation & low accuracy of extracted point-like features are the two main disadvantages of traditional point-to-point based registration methods which is designed for LiDAR point cloud, and the accuracy of registration results is seriously decreased by the linearization procedure of traditional 7-parameter based transformation approaches, a new registration approach is designed to overcome above disadvantages, which selects linear features as registration primitives, and uses quaternion to represent rotation matrix. Similarity measure of the linear-feature-constrained 3D transformation procedure is presented, and the formulation of registration procedure is exactly deduced. Besides, the detailed procedure of how to calculate rotation, translation & scale is also presented. Experiments show that the presented approach is efficient & effective. More importantly, by using quaternion to represent rotation matrix, the new presented approach avoids the decrease of accuracy, meanwhile, due to the characteristic of quaternion, it also needs few calculation resources compared to traditional registration methods.

Key words: LiDAR; point cloud; registration; quaternion; Linear features

About the first author: WANG Yongbo, Ph. D, associate professor. His research focuses mainly on acquisition & processing of LiDAR point cloud.

E-mail: ybwang@cumt.edu.cn