

地面激光点云多源约束的稳健整体配准

王国利¹, 王晏民²

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室 湖北 武汉 430079; 2. 北京建筑工程学院
测绘与城市空间信息学院 北京 100044)

Robust Integrated Registration of Terrestrial LiDAR Point Cloud with Multi-type Constraints

WANG Guoli, WANG Yanmin

摘要: 采用多源约束后方差迭代整体配准法, 通过试验证明该方法可以有效降低配准粗差影响, 提高点云的配准质量和稳定性。

关键词: 地面激光点云; 约束; 选权迭代; 配准

一、前言

近年来, 地面激光扫描技术在大型工程中的应用增多, 如大型古建筑及现代建筑的监测、隧道开挖等, 而在这些大体量目标的测量中, 需要进行多个视角的扫描, 然后通过配准来完成整体对象点云模型的构建。点云数据配准主要有两大类思路: 一是利用三维点集的重合性, 在重叠区域寻找同名点并通过反复迭代最后实现数据配准, 这方面有代表性的是 Besl 和 McKay 提出的 ICP (iterative closest point) 算法^[1], 这类算法是自由形态曲面点云的主要配准方法, 近十几年许多研究学者为改善 ICP 算法效率和精度, 在搜索最近点过程和加快收敛速度方面进行了改进^[2-3]。还有一种思路即是直接通过对象的特征约束来进行配准, 通过直接布设控制点与扫描模型绑定或是通过对象中的特征直接求解转换参数来实现空间坐标变换与统一。文献[4-6]先后提出了基于多源约束的配准方法并列出了相关的配准误差模型进行试验, 验证了多类型约束配准的可行性。这类方法虽然在实际配准数据中灵活多变且计算速度快, 但是在处理过程中将所有参与配准的约束作为等权来平差对待, 而约束本身存在各种误差因素, 导致配准结果不稳定甚至出现严重偏差, 需要采用一定方法消除或削弱粗差, 保证稳定的配准结果。本文在多源约束模型的建立和粗差探测方面作了探索和试验。

二、多约束误差方程建立

1. 点约束误差方程

对于待配准的多站点云中的特征点 $X_{i0} = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$ 与观测点 $X_i = (x_i, y_i, z_i)$ 存在如下关系

$$X_{i0} - (\lambda RX_i + \Delta X) = 0 \quad (1)$$

式中, R 为旋转矩阵; ΔX 为平移参数。一般的, 在点云运算中尺度参数 $\lambda = 1$ 。线性化后代入相关参数后可以得到观测点的误差方程为

$$V_{X_i} = A_1 t + B_1 \Delta X - L_1 \quad (2)$$

式中, A_1 为旋转矩阵 R 线性化相关的系数阵; t 为旋转参数; B_1 为线性变换系数阵; ΔX 为平移参数; L_1 为点观测值残差项。

2. 面约束误差方程

平面有两个参数: 中心 $P(p_x, p_y, p_z)$ 及法向 $F(f_x, f_y, f_z)$, 对于点云中的特征面 $S_0(P_0, F_0)$, 与其观测值 $S(P, F)$ 存在两个约束条件: 法向平行及中心在同一个平面内。

对于法向平行条件, 约束满足如下关系

$$F_0 - RF = 0 \quad (3)$$

线性化以后得到法向误差方程为

$$V_{S_1} = A_{21} t - L_{21} \quad (4)$$

式中, A_{21} 为法向组成的系数阵; t 中仅包含旋转矩阵的变换参数; L_{21} 为法向残差。

对于中心同面约束, 满足如下关系

$$F_0 \cdot (P_0 - RP - \Delta X)^T = 0 \quad (5)$$

分离相关变量后得到中心误差方程

收稿日期: 2010-11-29

基金项目: 北京市人才强教资助计划(PHR20110511); 北京市教育委员会重点项目(KZ200910016001)

作者简介: 王国利(1983—), 男, 河南焦作人, 博士生, 主要研究方向为精密工程测量、三维激光扫描处理理论与方法。

$$V_{S_2} = A_{22}t + B_{22}\Delta X - L_{22} \quad (6)$$

合并式(4)和式(6)可以得到

$$V_S = A_2t + B_2\Delta X - L_2 \quad (7)$$

式中 $A_2 = [A_{21}^T \ A_{22}^T]^T$; $B_2 = [0 \ B_{22}^T]^T$; $L_2 = [L_{21}^T \ L_{22}^T]^T$ 。

3. 线约束误差方程

线约束也有两个参数,线上一点 $P(p_x \ p_y \ p_z)$ 及其法向 $F(f_x \ f_y \ f_z)$,对于点云中的特征线 $L_0(P_0, F_0)$,其观测值 $L(P \ F)$ 也存在法向平行约束,误差方程式结果同式(4)

$$V_{L_1} = A_{31}t - L_{31} \quad (8)$$

对于线性约束,满足 P 在 L_0 上,令 $P' = RP \ P$ 到 P_0 平移量 ΔX_p ,满足如下表达

$$\left. \begin{aligned} f_{0y}(p'_x - p_{0x} + \Delta x_p) - f_{0x}(p'_y - p_{0y} + \Delta y_p) &= 0 \\ f_{0z}(p'_x - p_{0x} + \Delta x_p) - f_{0x}(p'_z - p_{0z} + \Delta z_p) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

分离相关变量并线性化以后得到表达式,简化为类似式(6)的误差方程为

$$V_{L_2} = A_{32}t + B_{32}\Delta X - L_{32} \quad (10)$$

合并式(8)和式(10)可以得到

$$V_L = A_3t + B_3\Delta X - L_3 \quad (11)$$

式中 $A_3 = [A_{31}^T \ A_{32}^T]^T$; $B_3 = [0 \ B_{32}^T]^T$; $L_3 = [L_{31}^T \ L_{32}^T]^T$ 。

将3类模型统一,结合式(2)、式(7)、式(11)可以得到如下方程

$$V = \begin{matrix} A \\ N \times 1 \end{matrix} t + \begin{matrix} B \\ N \times 6k \ 6k \times 1 \end{matrix} \Delta X - \begin{matrix} L \\ N \times N \ N \times 1 \end{matrix} \quad (12)$$

式中 k 为配准的点云站点数; N 为误差方程个数, $N = (3m + 5n + 4l)$ m 、 n 、 l 分别为配准的点、线、面观测测量个数,可按照间接平差模型来统一解算。

三、多类型约束配准的粗差探测

地面激光点云的配准中同组拟合特征精度,对于一些人引起的测量大的粗差可以在整体配准前通过同名点匹配发现;对于小的粗差,可以采用选择权迭代法进行粗差探测。粗差探测的经典方法是 Baarda 数据探测法,但是该方法只能定位单个粗差,对于多组同精度观测的粗差探测比较有效的是 El-Hakim 提出的带权数据探测法及验后方差选择权迭代法^[7-8]。本文选用验后方差法进行选择权迭代试验,验后方差的权函数及检验量如下

$$P_{ij}^{v+1} = \begin{cases} P_i^{v+1} = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\hat{\sigma}_i^2} & T_{ij} < F_{\alpha, 1, r_i} \\ \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2 r_{ij}}{V_{ij}^2} & T_{ij} \geq F_{\alpha, 1, r_i} \end{cases} \quad (13)$$

式中 检验量 $T_{ij} = \frac{\hat{\sigma}_{ij}^2}{\hat{\sigma}_i^2}$; 检验量 $F_{\alpha, 1, r_i}$ 一般取 4.13 或 3.29 相当于显著水平 $\alpha = 0.1\%$, 检验功效 $\beta = 80\%$ 或 76% 时的情况。

四、配准试验分析

采用某学院图书馆扫描配准作为试验,使用徕卡 Scan Station 2 扫描仪,共获取 10 站扫描数据,站点分布如图 1 所示。布设扫描标靶点 17 个,面约束 8 个,线性约束 3 个,图书馆实际视野中,建筑正面视野开阔,适合布设标靶,建筑后面及侧面则视野狭窄,需要加设其他约束来完成。图 2 是其中 3 站数据。

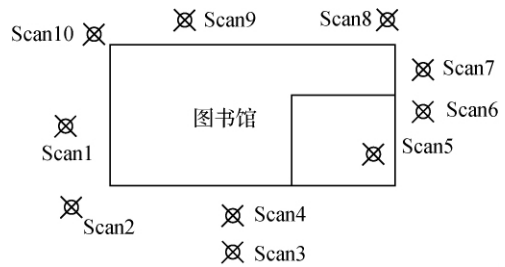


图 1 扫描站点分布

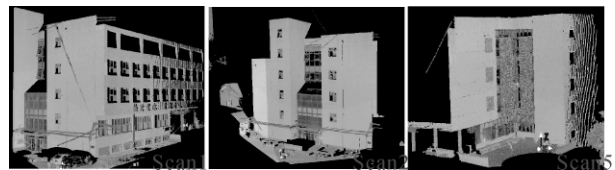


图 2 部分原始扫描点云

试验首先对所有约束采用等权整体平差,然后人为加入粗差进行平差,并与设定检验量后的平差进行对比,具体结果采用平差后观测点到点云模型待定点的距离误差来描述,这些点实际上也反映了点云数据的配准情况,如图 3 所示。

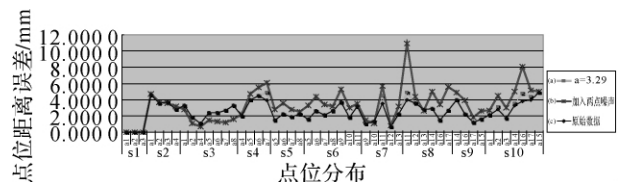


图 3 配准结果对比

等权平差时,共迭代 4 次,单点最大距离误差小于 5 mm,数据配准后点云重叠很好。试验中分别在 Scan8 的 a11 点 z 方向加入 10 mm, Scan10 的 a17 点 z

(下转第 41 页)

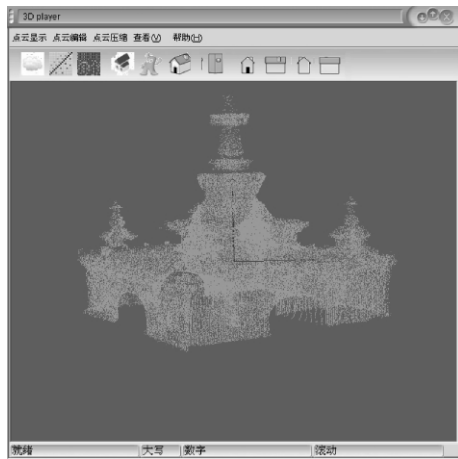


图6 均匀采样法与特征点法相结合的压缩效果图

实例证明,特征点法保留了原始点云的主要特征信息,对于海量的点云数据可以通过均匀采样法与特征点法相结合的方式,在提高点云压缩效率的基础上,保留点云的特征信息。

(上接第21页)

方向加入5 mm 误差后,采用等权平差得到的结果为图3(b)中曲线上的点,可以看出粗差影响到了整个配准点云情况,此时选用选择权迭代函数,检验量 $F_{\alpha,1,r_i}$ 取3.29,即检验功效为76% 时候进行迭代3次,结果如图3中的(a)曲线,迭代的结果基本未加入粗差时候相同,拼接后的点云重叠状况良好。整体配准完成后的点云如图4所示。

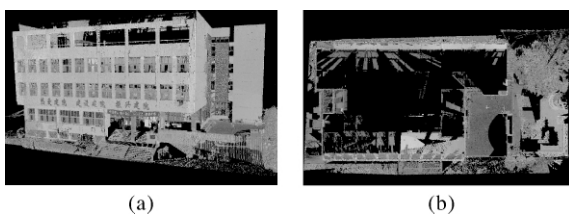


图4 图书馆配准后点云模型

五、结束语

本文采用验后方差选择权迭代方法来增强多约束模型配准的稳健性,经试验验证能够合理分配参与配准的各类型约束的配准误差,减少粗差影响,提高了地面激光点云数据多约束配准抗粗差的能力。经过选择权迭代的整体配准后,降低了粗差影响,提高了配准灵活性与可靠性,具有较好的实

五、结束语

点云实例表明,在MFC平台下,采用基于特征点的点云压缩算法,可以实现点云的数据简化。结果表明,该技术能够保留点云数据的特征信息,具有一定的研究和应用价值。如何提高特征点压缩的效率,将是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 曹力. 多重三维激光扫描技术在山海关长城测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2008(3): 31-33.
- [2] 马立广. 地面三维激光扫描测量技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [3] 张毅. 地面三维激光扫描点云数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [4] 李海英. 三维激光扫描点云压缩方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [5] 袁夏. 三维激光扫描点云数据处理及应用技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

用价值。

参考文献:

- [1] BESL P J, MCKAY N D. A Method for Registration of 3D Shape [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [2] CHEN Y, MEDIONI G. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images [J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.
- [3] PARK S Y, SUBBARAO M. An Accurate and Fast Point-to-Plane Registration Technique [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(16): 2967-2976.
- [4] WANG Yanmin, WANG Guoli. Integrated Registration of Range Images from Terrestrial LiDAR [C] // ISPRS. Beijing: [s. n.], 2008.
- [5] 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): 464-467.
- [6] JAW J J, CHUANG T Y. Feature-based Registration of Terrestrial LiDAR Point Clouds [C] // ISPRS. Beijing: [s. n.], 2008.
- [7] 李德仁. 利用选择权迭代法进行粗差定位[J]. 武汉测绘学院学报, 1984(1): 64-66.
- [8] 王旭华, 韩涛. 边角网粗差定位的改进带权数据探测法[J]. 测绘通报, 2004(1): 14-16.