DOI:10.14075/j.jgg.2011.02.019

第31卷第2期 大地测量与地球动力学 Vol.31 No.2
2011年4月 JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS Apr.,2011

文章编号:1671-5942(2011)02-0129-04

地面三维激光扫描的点云配准误差研究*

徐源强[1,2]　高井祥[1,2]　张　丽[1,2]　王　坚[1,2]　郑南山[1,2]

1)中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室,徐州 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 221116

摘　要　针对闭合条件下地面三维激光扫描点云配准产生的闭合差,基于测量平差理论,提出一种闭合差分配方法。首先通过间接平差理论求出各相邻测站间的坐标转换参数及其精度,再对闭合差按与方差成正比分配给各测站。通过多站点云配准实验,验证了该方法能在一定程度上提高点云配准的精度。

关键词　地面三维激光扫描;ICP算法;点云配准;配准误差;误差分配

中图分类号:TP751　　**文献标识码**:A

RESEARCH ON POINT CLOUD REGISTRATION ERROR OF TERRESTRIAL LASER SCANNING

Xu Yuanqiang[1,2], Gao Jingxiang[1,2], Zhang Li[1,2], Wang Jian[1,2] and Zheng Nanshan[1,2]

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

Abstract　The existence of point cloud registration error must cause error propagation of multi stations registration. Aiming at the closed error of point cloud registration of terrestrial 3D laser scanning, a distributing approach of closed error based on the theory of surveying error adjustment is proposed. Firstly, the parameters of coordinate transformation and their accuracy of each adjacent station are worked out according to the indirect adjustment theory. Secondly, the closed error is adjusted to each station by variance proportion. Through the experiment of point cloud registration of multi stations, the results indicate that the approach improves the point cloud registration accuracy.

Key words: terrestrial 3D laser scanning; ICP algorithm; point cloud registration; registration error; error adjustment

1　引言

近年来,地面三维激光扫描技术在测绘、土木工程、逆向工程、三维城市建模、文物保护等领域的应用越来越广泛[1,2]。由于物体的遮挡、扫描仪的限制等原因,要完成对一个物体的完整三维数据获取,地面三维激光扫描仪需要多测站多角度进行扫描。但在不同测站进行扫描的坐标系不同,因此需要通过点云配准将多站扫描数据拼接到同一坐标系下,以获得物体表面的完整的形状信息。

点云配准[3]通常采用ICP算法[4,5]或改进的ICP算法[6,7],对目标点集的每一个点在参考点集中

* 收稿日期:2011-01-01
基金项目:教育部博士点基金(200802900501);教育部博士点基金(新教师)(200802901516);国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金(LEDM2009A01)
作者简介:徐源强,男,1986年生,硕士研究生,主要研究GPS及三维激光扫描数据处理.E-mail:yqxu1986@163.com

找一个与之距离最近的点，建立点对的映射关系，然后以点对间距离平方和最小为条件，通过最小二乘法迭代解算出一个最优坐标变换关系式。这类拼接方法的精度高，但只适用于存在明确对应关系的点集之间的拼接，且对海量点云数据进行迭代计算过程速度较慢。简单的方法可以通过相邻测站3个或3个以上的公用标靶采用六参数法进行序列配准，最终将多站扫描数据拼接到同一坐标系下。但由于扫描测量不可避免地存在误差，从而导致点云配准存在误差，多站配准必然会引起误差传递。为了保证点云配准的精度，必须对点云配准的误差传播及误差分配进行研究。

2 点云配准的基本模型

点云配准实际上是一种刚体变换，两组点云之间不存在缩放关系，因此可以通过3个旋转参数(α,β,γ)和3个平移参数(x_0,y_0,z_0)实现坐标转换。坐标转换模型为：

$$F=\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=R(\alpha,\beta,\gamma)\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x_0\\y_0\\z_0\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，(X,Y,Z)和(x,y,z)分别为同一点在参考坐标系和目标坐标系下的坐标，R为旋转矩阵，(α,β,γ)为3个角元素，(x_0,y_0,z_0)为平移参数。

将式(1)进行线性化得到：

$$F=F_0+\left(\frac{\partial F}{\partial x_0}\right)dx_0+\left(\frac{\partial F}{\partial y_0}\right)dy_0+\left(\frac{\partial F}{\partial z_0}\right)dz_0+\left(\frac{\partial F}{\partial \alpha}\right)d\alpha+\left(\frac{\partial F}{\partial \beta}\right)d\beta+\left(\frac{\partial F}{\partial \gamma}\right)d\gamma \tag{2}$$

由此可得误差方程式为

$$V=B\hat{x}-L \tag{3}$$

其中，$V=[V_1,V_2,\cdots,V_n]^T$，$\hat{x}=(dx_0,dy_0,dz_0,d\alpha,d\beta,d\gamma)^T$，$L=F-F_0$

$$B=\begin{bmatrix}
\frac{\partial F_{X1}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{X1}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{X1}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{X1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{X1}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{X1}}{\partial \gamma}\\
\frac{\partial F_{Y1}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{Y1}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{Y1}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{Y1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{Y1}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{Y1}}{\partial \gamma}\\
\frac{\partial F_{Z1}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{Z1}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{Z1}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{Z1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{Z1}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{Z1}}{\partial \gamma}\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\
\frac{\partial F_{Xi}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{Xi}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{Xi}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{Xi}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{Xi}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{Xi}}{\partial \gamma}\\
\frac{\partial F_{Yi}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{Yi}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{Yi}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{Yi}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{Yi}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{Yi}}{\partial \gamma}\\
\frac{\partial F_{Zi}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{Zi}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{Zi}}{\partial z_0} & \frac{\partial F_{Zi}}{\partial \alpha} & \frac{\partial F_{Zi}}{\partial \beta} & \frac{\partial F_{Zi}}{\partial \gamma}
\end{bmatrix}$$

当两个坐标系具有$n(n\geqslant 3)$对同名点时，由间接平差原理可得：

$$\hat{x}=(B^TPB)^{-1}B^TPL \tag{4}$$

单位权方差σ_0^2，参数的协因数阵和协方差阵分别为：

$$\sigma_0^2=\frac{V^TPV}{3n-6} \tag{5}$$

$$Q_{XX}=(B^TPB)^{-1} \tag{6}$$

$$D_{XX}=\sigma_0^2 Q_{XX} \tag{7}$$

3 点云配准误差分配

坐标转换模型(1)通过变换可以得到：

$$\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}&x_0\\a_{21}&a_{22}&a_{23}&y_0\\a_{31}&a_{32}&a_{33}&z_0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_i\\y_i\\z_i\\1\end{bmatrix} \tag{8}$$

令

$$T=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}&x_0\\a_{21}&a_{22}&a_{23}&y_0\\a_{31}&a_{32}&a_{33}&z_0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{9}$$

由式(8)知，T为坐标转换矩阵，通过左乘T即可完成坐标转换。假设将第$i+1$站点云数据转换到第i站的坐标转换矩阵为T_{i+1}，则从最后一站——第n站转换到第1站的变换矩阵为$T_nT_{n-1}T_{n-2}\cdots T_3T_2$，当满足闭合条件，即从第1站转换到第1站时，应满足[8]：

$$T_{n+1}T_nT_{n-1}\cdots T_3T_2=E \tag{10}$$

但由于点云序列配准累积误差的存在，导致模型端点处的配准误差比较大，使得上式不成立，从而产生旋转角和平移参数闭合差。若干个旋转矩阵的乘积仍为旋转矩阵，因此$T=T_{n+1}T_nT_{n-1}\cdots T_3T_2$仍为一个旋转矩阵，可由$T$求出旋转角和平移量的闭合差。

$$\begin{cases}f_\alpha=\alpha'-0=\alpha'\\f_\beta=\beta'-0=\beta'\\f_\gamma=\gamma'-0=\gamma'\end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases}f_{x_0}=x_0'-0=x_0'\\f_{y_0}=y_0'-0=y_0'\\f_{z_0}=z_0'-0=z_0'\end{cases} \tag{12}$$

式中，α'、β'、γ'、x_0'、y_0'、z_0'分别为由第1站计算到第1站的旋转矩阵计算出来的3个旋转角和3个平移量。

由式(10)可以看出，点云配准的闭合差是由各

相邻测站间的配准误差累积产生的,且各相邻测站之间的配准精度不相同。由闭合导线闭合差分配可知,角度闭合差平均分配,坐标闭合差与距离成正比分配,是按与其相应方差成正比进行分配的。因此将点云配准闭合差按照与方差成正比,依次递增的分配给各测站,即各测站的旋转角参数和平移量参数改正数为:

$$v_{\alpha_i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}\sigma_{\alpha_k}^2}{\sum_{k=2}^{n+1}\sigma_{\alpha_k}^2},\quad v_{\beta_i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}\sigma_{\beta_k}^2}{\sum_{k=2}^{n+1}\sigma_{\beta_k}^2},\quad v_{\gamma_i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}\sigma_{\gamma_k}^2}{\sum_{k=2}^{n+1}\sigma_{\gamma_k}^2} \tag{13}$$

$$v_{x0}^{i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}(\sigma_{x0}^{k})^2}{\sum_{k=2}^{n+1}(\sigma_{x0}^{k})^2},\quad v_{y0}^{i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}(\sigma_{y0}^{k})^2}{\sum_{k=2}^{n+1}(\sigma_{y0}^{k})^2},\quad v_{z0}^{i}=\frac{\sum_{k=2}^{i}(\sigma_{z0}^{k})^2}{\sum_{k=2}^{n+1}(\sigma_{z0}^{k})^2} \tag{14}$$

式中,n为测站总数,i为第 i测站($i=2,3,\cdots,n+1$,$i=n+1$时即为第 1站)。

通过坐标转换矩阵求出的旋转角和平移量参数加上其相应的改正数,则可得出各扫描站相对于项目坐标系旋转参数的平差结果,然后代入式(1)计算各站扫描点云在项目坐标系中的坐标。

4 实验验证

采取闭合环的多站配准实验方案,即从起点站开始,沿闭合环进行多站配准,最后再回到起点站。扫描仪设站 4次,按序列拼接依次计算各相邻测站间的配准参数,中误差及参数方差,并通过计算最终得到闭合差,按式(13)(14)进行误差分配,结果如表 1。

表 1　各扫描站的坐标转换参数及其改正数

Tab.1　Coordinate transformation parameters and their adjustments at each scanning station

扫描站		1	2	3	4	1
旋转角(°)	α	0	−0.160 4	−0.241 3	−0.447 5	−0.032 5
	v_α	0	0.001 3	0.019 8	0.027 5	0.032 5
	β	0	−0.200 5	0.293 0	0.286 8	0.109 5
	v_β	0	−0.004 4	−0.066 9	−0.092 8	−0.109 5
	γ	0	85.296 3	179.873 7	146.209 6	−0.034 7
	v_γ	0	0.001 4	0.021 2	0.029 4	0.034 7
平移量(m)	x_0	0	3.976 9	6.941 2	5.078 8	0.000 3
	v_{x0}	0	−0.000 0	−0.000 2	−0.000 3	−0.000 3
	y_0	0	8.351 6	2.283 4	−7.406 1	0.010 1
	v_{y0}	0	−0.000 4	−0.006 2	−0.008 5	−0.010 1
	z_0	0	−0.001 5	−0.032 3	−0.021 6	0
	v_{z0}	0	0	0	0	0

为了近似地评价误差分配的好坏,选择经过点云精度影响最大的第 4站,选择若干点,分别计算出在闭合差分配前后经点云配准后的坐标,并与其在第 1站中的同名点进行比较,计算坐标差值 Δ_x、Δ_y和 Δ_z,点位中误差为:

$$m_p=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2)}{n}} \tag{15}$$

通过计算可以得到,闭合差分配前的点位中误差为 11 mm,闭合差分配后的点位中误差为 6.4 mm,通过闭合差分配后的配准精度要好于分配前的配准精度。因此通过闭合差分配后的点云配准可以更好的反映物体完整的三维信息,从而提高其测量结果的可靠性。

5 结语

针对点云序列配准中产生的误差积累,给出了误差闭合差的分配方法。该方法是基于在各站配准后的参数方差,根据有限的同名点对计算各站的坐标平移和旋转参数及闭合条件将闭合差按照与方差成正比进行分配,计算量小。从实验可以看出,本文提出的闭合差分配方法对点云配准结果有一定的改善。但由于闭合差实际上是由各相邻测站的配准误差的非线性函数,简单的将其线性处理不能在真正意义上将闭合差完全正确分配,为了更好地分配点云配准闭合差,应对点云配准误差传播规律[9]及非线性条件下的闭合差分配等理论进行研究。

参 考 文 献

1　施贵刚,等.地面三维激光扫描多视点云配准设站最佳次数的研究[J].大连海事大学学报,2008,34(3):64−66.(Shi Guigang et al. Optimal station position number for terrestrial laser scanning multi-view point cloud registration[J]. Journal of Dalian Maritime University,2008,34(3):64−66)

2　潘国荣,等.三维激光扫描拟合直线自动提取算法研究[J].大地测量与地球动力学,2009,(1):57−63.(Pan Guorong et al. Research on fitting line automatic extraction algorithm of 3D laser scanning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2009,(1):57−63)

3　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.(Zheng Dehua, Yue Dongjie and Yue jianping. Algorithm for building scanning point cloud registration based on geometric feature constraint[J]. Acta A Geodaetica et Cart Ographica Sinica,2008,37(4):464−468)

4　郑德华.ICP算法及其在建筑物扫描点云数据配准中的应用[J].测绘科学,2007,32(2):31−32.(Zheng Dehua. ICP algorithm and application in the data registration of building scanning point cloud[J]. Science of Surveying and

Mapping 2007, 32(2): 31—32)
5 戴静兰,陈志杨,叶修梓. ICP算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517—521. (Dai Jinglan, Chen Zhiyang and Ye Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517—521)
6 袁建英,等. 改进ICP算法实现多视点云精确配准研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(5): 27—30. (Yuan Jianying, et al. Research on precise registration of multi-view point cloud based on improved ICP algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2008, 27(5): 27—30)
7 罗先波,钟约先,李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(8): 1 104—1 106. (Luo Xianbo, Zhong Yuexian and Li Renju. Data registration in 3-D scanning systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(8): 1 104—1 106)
8 张凯. 三维激光扫描数据的空间配准研究[D]. 南京师范大学, 2008. (Zhang Kai. Research on spatial registration for three-dimensional laser scanning data[D]. Nanjing Normal University, 2008)
9 程效军,等. 点云配准误差传播规律研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 1 668—1 672. (Cheng Xiaojun, et al. Research on point cloud registration error propagation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(12): 1 668—1 672)

(上接第124页)

参 考 文 献

1 周冬梅. 基于小波变换的多路径误差研究[D]. 江西理工大学, 2009. (Zhou Dongmei. Research on multipath effect of GPS based on wavelet transform[D]. Jiangxi University of Science and Technology, 2009)
2 成伟. GPS精密定位误差及其相位多路径误差分析研究[D]. 长安大学, 2003. (Cheng Wei. Study on GPS precise position error and phase multipath effect[D]. Chang'an University, 2003)
3 张永恒. 结构健康监测中的GPS多路径效应研究[D]. 大连理工大学, 2009. (Zhang Yongheng. Research on multipath effect of GPS in structural health monitoring[D]. Dalian University of Technology, 2009)
4 戴吾蛟,丁晓利,朱建军. GPS动态变形测量中的多路径效应特性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, (1): 65—70. (Dai Wujiao, Ding Xiaoli and Zhu Jianjun. Study on multipath effect in structure health monitoring using GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, (1): 65—70)
5 张波,黄劲松,苏林. 利用信噪比削弱GPS多路径效应的研究[J]. 测绘科学, 2003, 28(3): 32—35. (Zhang Bo, Huang Jinsong and Su Lin. A research on using SNR values to mitigate carrier phase multipath in GPS surveying[J]. Science of Surveying and Mapping, 2003, 28(3): 32—35)
6 郭杭,余敏,薛光辉. GPS多路径效应实例计算与分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 95—96. (Guo Hang, Yu Min and Xue Guanghui. GPS multipath mitigation and analysis—a case study[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(5): 95—96)
7 彭世荣. 消除GPS多路径误差的重构相关曲线法研究[D]. 大连理工大学, 2006. (Peng Shirong. Research on the reconstructing correlation curve method to eliminate GPS multipath error[D]. Dalian University of Technology, 2006)
8 黄德武. GPS变形监测中多路径效应影响研究[D]. 西南交通大学, 2005. (Huang Dewu. Research on GPS multipath effects on deformation monitoring[D]. Southwest Jiaotong University, 2005)