

Research on Error Propagation and Accuracy Control of 3D Laser Point Cloud Data Registration

Peng Li^{1†}, Shuai Xin¹, Jin Li², Pengcheng Li¹

1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, 450001

2. Lanzhou jiaotong University Bowen College, Lanzhou, 730010

†Email: peng_li6789@163.com

Abstract

Due to the rapid development of mapping technology, three-dimensional laser scanning technology in the field of surveying and mapping applications are increasingly widespread, but the three-dimensional point cloud registration error propagation model has not yet unified, and not widely used in three-dimensional laser scanning. In this paper, the registration of the point cloud is analyzed by introducing the principle of photogrammetry. The propagation law of the three-dimensional laser point cloud registration error is discussed, and the traditional control measurement method is applied to the laser scanning surveying and optimized Perfect the error propagation model. Through the experiment, the quantitative relationship between the registration precision and the accumulation of multi - station registration error is verified, and the quality of the point cloud registration is estimated and the precision of the station can be controlled.

Keywords: 3D Laser Scanning; Point Cloud Registration; Error Propagation; Precision Control

三维激光点云数据配准误差传播研究与精度控制*

李鹏¹, 邢帅¹, 李瑾², 李鹏程¹

1. 信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001

2. 兰州交通大学博文学院, 甘肃 兰州 730010

摘要: 由于测绘科技的飞速发展, 三维激光扫描技术在测绘领域的应用日益广泛, 但目前还没有通用的三维点云配准误差传播模型, 且均未广泛应用到三维激光扫描领域。为此, 本文通过引入摄影测量学原理对各测站点云的配准进行分析, 探讨了三维激光点云配准误差传播的规律, 并将传统控制测量的方法应用到激光扫描测绘中, 并优化完善了误差传播模型。通过实验, 验证了点云配准过程中配准精度与多站配准误差积累的定量关系, 从而对点云配准质量进行评估预测。

关键词: 三维激光扫描; 点云配准; 误差传播; 精度控制

引言

随着三维激光扫描技术的快速发展, 各领域的三维扫描技术日趋成熟, 尤其是地面三维扫描仪的快速商业化, 促使三维扫描技术逐渐成为了一种全新的不可替代的测量技术, 并被广泛应用于测绘科学、计算机视觉、人工智能、航空航天、机械制造、计算机辅助医学、考古及文化遗产保护、逆向工程及虚拟现实等领域。但进行任何一项测量工作, 其结果都必须满足特定工程的具体精度要求, 如果测量结果不能满足精度, 则测量工作便被视为无效, 结果也将是不可信的[1]。三维激光扫描作为一项全新的测量技术, 就需要对各

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371436), 国家 973 计划项目 (2012CB720001)

种三维激光扫描仪器进行精度评定[2]，对各种测量成果进行精度评定，并对其建立误差模型实施精度控制。

三维激光点云数据的配准就是把不同测站测得的在不同坐标系下的点云数据通过坐标变换统一到同一坐标系下的过程，而相同的是，在传统的摄影测量中，对一组立体像对进行匹配的方法就是寻找同名像点，解算出空间相似变换参数，进行立体像对拼接[3]，完成坐标统一。为此我们可以依据摄影测量学立体像对的拼接方法及原理[4]，利用精度较高的公共靶标坐标进行三维点云数据配准的公共特征点[5]。但是由于三维扫描仪本身精度的影响，外部观测条件及操作人员的技术原因必然会导致采集到的靶标公共点存在一定的误差，应用含有一定误差的对应点对，必然会产生一定的配准误差，而且在进行多站扫描数据配准时，这种误差会进行逐站传播并且增加[6]，导致以后各站点会产生更大的配准误差，最终使得模型终点的累积误差增大[7-8]。因此本文依照摄影测量学立体像对影像匹配的原理，对地面三维扫描仪连续多站扫描的点云数据进行配准，利用最小二乘原理对各站匹配误差的传播规律进行研究，得出地面三维激光扫描仪误差传播模型。并通过具体的三维激光扫描实验，验证了各站点云配准的精度与点云模型传播积累误差之间的关系，并以此对该实验的精度进行控制。

1 三维激光点云数据配准的误差传播规律

由摄影测量学中影像匹配的原理可知需要求解 3 个角元素、3 个平移变换量及 1 个尺度变换量共 7 个空间相似变换参数，据此可以将多站点云配准误差传播的数学模型列为：

$$F = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = kR(\varphi, \omega, \kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $[X \ Y \ Z]^T$ 及 $[x \ y \ z]^T$ 为同一点在 2 个不同测站下的扫描坐标； $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 为两坐标系之间的平移参数； k 为尺度缩放系数； $R(\varphi, \omega, \kappa)$ 为旋转矩阵，其中 φ, ω, κ 为旋转矩阵的三个角元素。

使用泰勒级数将(1)式展开，取一次项，有：

$$\begin{aligned} V^{(k)} = & \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta X} \right) d\Delta X + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta Y} \right) d\Delta Y + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta Z} \right) d\Delta Z + \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi} \right) d\varphi + \left(\frac{\partial F}{\partial \omega} \right) d\omega + \left(\frac{\partial F}{\partial \kappa} \right) d\kappa + \\ & \left(\frac{\partial F}{\partial k} \right) dk + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) dx + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) dy + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \right) dz - (F - F_0) \end{aligned} \quad (2)$$

其中：

$$F_0 = k_0 R(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则误差方程可以表示为：

$$\begin{aligned} V^{(k)} = & \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta X} \right) d\Delta X + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta Y} \right) d\Delta Y + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta Z} \right) d\Delta Z + \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi} \right) d\varphi + \left(\frac{\partial f}{\partial \omega} \right) d\omega + \left(\frac{\partial f}{\partial \kappa} \right) d\kappa + \\ & \left(\frac{\partial f}{\partial k} \right) dk + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) dy + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right) dz - (F - F_0) \end{aligned} \quad (4)$$

取 A 为式(4)中 $V^{(k)}$ 的系数矩阵， $L = F - F_0$ ，则有：

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_x}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_x}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_x}{\partial \omega} & \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_x}{\partial k} & \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_y}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_y}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_y}{\partial \omega} & \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_y}{\partial k} & \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_z}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_z}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_z}{\partial \omega} & \frac{\partial f_z}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_z}{\partial k} & \frac{\partial f_z}{\partial x} & \frac{\partial f_z}{\partial y} & \frac{\partial f_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据配准原理和式(1)及(4)计算可得 2 个扫描系下 n 个同名点的配准误差方程式为:

$$\begin{bmatrix} V_{x_1}^{(k)} \\ V_{y_1}^{(k)} \\ V_{z_1}^{(k)} \\ \vdots \\ V_{x_i}^{(k)} \\ V_{y_i}^{(k)} \\ V_{z_i}^{(k)} \\ \vdots \\ V_{x_n}^{(k)} \\ V_{y_n}^{(k)} \\ V_{z_n}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial k} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial x} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial y} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial k} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial x} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial y} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial k} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial x} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial y} & \frac{\partial f_{z_1}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial k} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial x} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial y} & \frac{\partial f_{x_i}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial k} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial x} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial y} & \frac{\partial f_{y_i}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial k} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial x} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial y} & \frac{\partial f_{z_i}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial k} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial x} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial y} & \frac{\partial f_{x_n}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial k} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial x} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial y} & \frac{\partial f_{y_n}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \Delta Z} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \omega} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial k} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial x} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial y} & \frac{\partial f_{z_n}}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\Delta X \\ d\Delta Y \\ d\Delta Z \\ d\varphi \\ d\omega \\ d\kappa \\ dk \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_{x_1} \\ l_{y_1} \\ l_{z_1} \\ \vdots \\ l_{x_i} \\ l_{y_i} \\ l_{z_i} \\ \vdots \\ l_{x_n} \\ l_{y_n} \\ l_{z_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 $\mathbf{X}^{(d)} = [d\Delta X \ d\Delta Y \ d\Delta Z \ d\varphi \ d\omega \ d\kappa \ dk \ dx \ dy \ dz]^T$ 则式(6)可以表示为:

$$\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{A}\mathbf{X}^{(d)} - \mathbf{L} \quad (7)$$

令 $\sigma_\varphi^2, \sigma_\omega^2, \sigma_\kappa^2, \sigma_{\Delta X}^2, \sigma_{\Delta Y}^2, \sigma_{\Delta Z}^2, \sigma_k^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ 分别是 $\varphi, \omega, \kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, k$ 的方差以及特征点 x, y, z 的配准方差。

根据参数平差方法, 令 7 参数 $\varphi, \omega, \kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, k$ 的权矩阵为 \mathbf{P} , \mathbf{P} 为单位矩阵。

\mathbf{X} 可表示为:

$$\mathbf{X} = [d\Delta X \ d\Delta Y \ d\Delta Z \ d\varphi \ d\omega \ d\kappa \ dk] \quad (8)$$

则方差为:

$$\mathbf{D}_X = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Z}^2 & \sigma_\varphi^2 & \sigma_\omega^2 & \sigma_\kappa^2 & \sigma_k^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

特征点 x, y, z 的方差为 $\mathbf{D}_X = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_y^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$, 则 $\mathbf{X}^{(d)}$ 对应的方差为:

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Z}^2 & \sigma_\varphi^2 & \sigma_\omega^2 & \sigma_\kappa^2 & \sigma_k^2 & \sigma_x^2 & \sigma_y^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

则在使 $\min \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 成立时可得到未知数的解, \mathbf{V} 为求解 7 参数观测值的改正数, \mathbf{B} 为求解 7 参数时建立的误差方程式的系数矩阵, 则有:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L} \quad (11)$$

根据测量平差原理得 σ_0^2 为

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{3n-6} \quad (12)$$

上式中: n 为同名点对的数目, 令参数平差法中 7 参数的协因数矩阵为 \mathbf{Q}_{xx} , 则 $\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1}$, 由传播定律可知, 可由下式求解 7 参数的方差:

$$\mathbf{D}_X = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{xx} \quad (13)$$

则观测值的协因数矩阵为:

$$\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = \mathbf{Q} - \mathbf{B} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}^T \quad (14)$$

上式中 \mathbf{Q} 为单位阵。

由(13)式可得观测值估计值的方差为:

$$\mathbf{D} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{y}}\hat{\mathbf{y}}} = \sigma_0^2 - \mathbf{B} \mathbf{D}_x \mathbf{B}^T \quad (15)$$

因此, 方差 \mathbf{D}_n 中 10 个参数构成 10×10 的对角方阵 \mathbf{D}_N , 令:

$$\mathbf{D}_H = \begin{bmatrix} \sigma_{X_1}^2 & & & & & \\ & \sigma_{Y_1}^2 & & & & \\ & & \sigma_{Z_1}^2 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \sigma_{X_n}^2 & \\ & & & & & \sigma_{X_n}^2 \\ & & & & & & \sigma_{X_n}^2 \\ & & & & & & & \sigma_{X_n}^2 \end{bmatrix}_{3n \times 3n} \quad (16)$$

根据协方差矩阵传播定律, 由式(6)可得:

$$\mathbf{D}_H = \mathbf{A} \mathbf{D}_N \mathbf{A}^T \quad (17)$$

式(17)便是 2 个不同测站下配准点云的误差传播模型, 由此可以解算各点位误差, 并可依此衡量配准优劣。因此, 对于多站点云数据配准来说, 其误差传播模型为:

$$\mathbf{D}_n = \mathbf{A}_n \cdots \mathbf{A}_1 (\mathbf{A}_0 \mathbf{D}_0 \mathbf{A}_0^T) \mathbf{A}_1^T \cdots \mathbf{A}_n^T \quad (18)$$

式(18)中 $A_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ 是每次配准得到的配准参数所确定的系数矩阵, 可以通过(5)式进行求解;

$\mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_y^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$ 为第一次配准后的点位精度, 此后每一次配准后的点位精度 $(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2)$ 作为下一次配准过程中的已知值代入传播模型之中。

2 实施方案

2.1 方案设计

实验采用球形靶标配准、平面靶标配准及点云特征点配准三种方案,采取逆时针闭合环模式的多站配准实验方案,具体方案见图 1,从 1 号测站开始沿逆时针方向至 8 号测站,进行环形闭合测量,在计算过程中可以从任何一个测站开始对起点与终点处的共同靶标进行对比分析,计算配准参数及误差,对多站点云配准进行评价,从而验证误差传播模型。

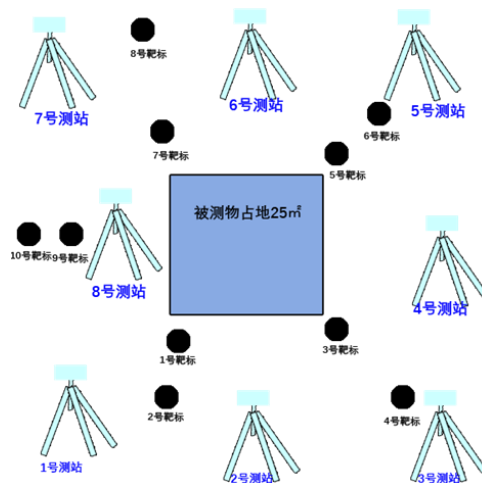


图 1 试验场设计图

试验中采用半径为 140mm 的标准靶标球，选择占地约 25 m²左右的被测物进行测量，测量场地内共布置 10 个靶标球，每站保证能扫描到 6 个靶标球，所有靶标球在扫描过程中点位固定，并在被测物表面设置 Faro 标准平面靶标 26 个，实验共设 9 站。使用 FARO focus 3D 130 扫描仪对实验场进行扫描测量，使用莱

卡 TM50 全站仪 1 台对测区内球形靶标及平面靶标进行测量，共获得点云数据 7812 万个数据点。本实验选择 1-8 号测站测得的数据，实验场景图如图 2 所示。



图 2 试验场实际影像图

2.2 数据处理

本次实验采用的是 FARO focus 3D 130 扫描仪对被测物及场景内靶标进行扫描，场景内球形靶标可以由 SCENE6.2.0 软件识别求得，被测物表面平面靶标也可由该软件识别得出（平面靶标作为辅助检查点），对各站提取的球靶标中心进行识别，并按照编号顺序进行存储，构成对应的特征点对。在分析了点云配准原理及多站配准点云误差传播模型的研究基础上，使用 MATLAB_2016a 编程实现点云配准误差模型的计算。

2.3 实验结果

依据上述三维激光点云数据误差传播模型的计算步骤，分别计算出各站点云配准误差传播模型的各个变量，计算结果如表 1 所示。由此可以计算出多站配准误差传播的中误差 σ 为 $\pm 4.9\text{mm}$ 。利用 7、8、9、10 号靶标球作为比较点，对比配准前后各自的坐标值，得到比较点各方向的中误差及点位中误差，计算结果如表 2 所示。

表 1 多站点云配准误差模型各参数计算结果（单位/m）

配准相邻两站	缩放系数 k	旋转矩阵 R			平移向量 T	中误差
1 测站与 2 测站	1.0017866	0.999859144	0.016783591	-0.000049873	-2.34612485	± 0.001789
		-0.016783632	0.999847043	-0.004919398	0.28930701	
		0.000042700	0.004919542	0.999987899	-0.74890963	
2 测站与 3 测站	1.0000723	0.984139516	0.177396173	-0.000107221	1.51571516	± 0.002249
		-0.177396099	0.984139405	0.000505034	1.87498508	
		0.000195111	-0.00047801	0.999999866	1.63459214	
3 测站与 4 测站	0.9999306	0.999399758	-0.03464083	-0.000369563	-0.42517465	± 0.002262
		0.034641043	0.999399649	0.000582239	0.49345538	
		0.000349172	-0.00059469	0.999999762	1.20504156	
4 测站与 5 测站	1.0001276	0.999216775	0.039565171	-0.000658253	-0.89761707	± 0.003739
		-0.039565393	0.999216929	-0.000327113	-0.35113001	
		0.000644795	0.000352901	0.999999729	1.51983985	
5 测站与 6 测站	1.0000198	0.995308757	-0.09674913	0.000287867	-2.35146471	± 0.003029
		0.096749352	0.99530838	-0.000879048	0.67491856	
		-0.000201469	0.00090277	0.999999572	1.24961836	
6 测站与 7 测站	1.0003976	0.999950262	-0.00996077	0.000505727	-0.33415135	± 0.002291
		0.009960791	0.999950389	-0.000033748	-2.33660247	
		-0.000505366	0.000038784	0.999999871	1.33036772	
7 测站与 8 测站	0.9999093	0.999646679	-0.026577837	0.000367111	-0.40514709	± 0.001936
		0.026577825	0.999646746	0.000037302	0.09296845	
		-0.000367972	-0.000027532	0.999999931	0.52681831	
8 测站与	0.999866	0.999381005	-0.035179514	-0.000091544	0.88449848	± 0.002998
		0.035179525	0.999381002	0.000112807	0.26737027	

1 测站 0.000087519 -0.000115958 0.999999989 -8.25747618

表 2 扫描的坐标和多站配准后的坐标对比表（单位/m）

比较点	扫描靶标	靶标球球心坐标/m		
		x	y	z
初始扫描坐标	9 号靶标球	-2.035267	-22.226038	-12.516008
	10 号靶标球	-1.728059	-24.084029	-12.502124
从测站 1 至测站 8 依次配准后坐标	9 号靶标球	-2.031656	-22.230421	-12.519154
	10 号靶标球	-1.723981	-24.081256	-12.500010
各方向中误差计算结果		±0.003852	±0.003667	±0.00268
初始扫描坐标	7 号靶标球	-7.792846	-16.857448	-14.398939
	8 号靶标球	-11.953856	-17.428715	-14.406451
从测站 8 依次至测站 7 配准后坐标	7 号靶标球	-7.789112	-16.852189	-14.394998
	8 号靶标球	-11.950329	-17.425781	-14.402978
各方向中误差计算结果		±0.003632	±0.004258	±0.003714
比较点点位中误差均值			±0.006336	

3 结论

三维激光点云配准的目的就是将不同测站测得的同一目标，完整的统一到同一坐标系下。但由于各种外界因素及仪器本身的影响，都会使配准产生误差。本文针对点云配准中配准误差的原因进行了分析与实验，并通过参数平差方法推导得出了多站点云误差传播模型，并通过实验进行了验证。通过对设站内靶标球配准前后的坐标进行对比分析表明，各测站的配准误差均在毫米级，其中相邻两测站的配准误差优于 4 毫米，多测站配准后的误差优于 5 毫米，且比较点位的中误差优于 7 毫米，通过以上数据可知，多站点云配准误差随配准次数增加而积累，但都属于同一量级，存在着闭合差的点位中误差和多站配准误差的量级基本一致，则说明了本文提出模型的正确性。

4 参考文献

- [1] 罗德安, 廖丽琼. 地面激光扫描仪的精度影响因素分析[J]. 铁道勘察, 2007, 33(4):5-8.
- [2] 官云兰, 程效军, 詹新武, 等. 地面三维激光扫描仪系统误差标定[J]. 测绘学报, 2014, 43(7):731-738.
- [3] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 测绘出版社, 1992.
- [4] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉大学出版社, 2002.
- [5] 李彩林, 郭宝云, 季铮. 多视角三维激光点云全局优化整体配准算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(2):183-189.
- [6] 蔡建民, 花向红, 宣伟, 等. 地面三维激光扫描仪系统误差模型研究及精度分析[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(5):17-21.
- [7] 程效军, 施贵刚, 王峰, 等. 点云配准误差传播规律的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12):1668-1672.
- [8] 邓永和. 误差传播律应用的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6):65-67.

【作者简介】

¹作者一 李鹏（1988-），男，本科，硕士研究生，研究方向：三维激光点云数据处理。Email:peng_li6789@163.com