

# 利用三维点云数据的地铁隧道断面 连续截取方法研究

托 雷<sup>1</sup> 康志忠<sup>1</sup> 谢远成<sup>2</sup> 王保前<sup>1</sup>

(1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京市学院路 29 号,100083)

(2 上海市城市建设设计研究总院,上海市东方路 3447 号,200125)

**摘 要:**提出了一种可应用于变形监测的基于三维激光点云的隧道断面连续截取方法。该方法分为点云拼接、中轴线提取和断面截取。隧道中轴线的提取通过随机采样一致性算法和最小二乘平差算法完成;断面截取过程先基于隧道轴线信息调整隧道姿态,再对隧道数据采取局部曲面拟合进行,其中引用了限制最小二乘算法和随机采样一致性算法。采用 RIEGL VE-400 获取的地铁隧道点云数据进行了验证。实验证明了本文方法在三维激光扫描技术的应用方面具有一定的实践意义。

**关键词:**隧道变形监测;断面截取;曲面拟合;三维激光扫描;随机采样一致性

**中图分类号:**P258; P231.5

对地铁隧道的变形监测,测量方法可分为接触式测量和非接触式测量两种。接触式测量需在隧道内壁的不同位置人工安装倾斜仪来获得倾斜角和变化<sup>[1]</sup>。非接触式测量主要为使用测量机器人进行测量,文献[2]中提出了一种利用车载相位式激光测距装置对隧道内壁进行连续测量以检测其变形状态的方法。测量机器人则可以与编程计算器配套使用来获取隧道断面<sup>[3]</sup>,也可以通过控制软件进行断面测量,或由 PDA 控制数据采集,如 TM 隧道断面测量系统<sup>[4]</sup>。文献[5]采用 WinCE 开发平台,开发了基于 GPT-9000A 的可进行自动隧道断面收敛测量的记载软件 Easy-Scan 来操控测量机器人进行数据采集。文献[6]使用 Leica TCRA1101 结合 TPSPRO 断面测量系统获取断面数据。但上述监测方法监测点数量有限,监测时间长,精度易受环境因素影响;同时,由于运营中的地铁隧道比在建地铁隧道在监测过程中对时间的要求更为苛刻,因此效果并不理想。而三维激光扫描仪无接触测量,能高密度、高分辨率地获取扫描物体的海量点云数据,同时对环境光线、温度都要求较低,作为隧道变形监测的新方法更为理想也更为必要,我国已有部分城市地铁隧道采用三维激光扫描方法进行检测<sup>[7]</sup>。

本文基于三维激光扫描数据,以运营中的地铁隧道为研究对象,提出了一种连续截取地铁隧道断面的方法。其步骤主要是先采集、拼接三维点云数据<sup>[8]</sup>,然后进行隧道中值线提取,最后进行断面截取。

## 1 基于邻域局部曲面拟合的隧道断面截取

### 1.1 利用 RANSAC 拟合隧道中轴线

隧道中轴线的作用是表达隧道的姿态和走势信息,即在轴线上任意选取一点,都可计算出隧道在该处的法向(即断面截取方向),以保证所截取的断面与隧道正交。

本文方法中,将隧道法向旋转至 Y 坐标轴的正交方向,即根据法向与 X 坐标轴和 Z 坐标轴的角度关系进行调整;因此,本文所用中轴线由 XOY 面的中轴线和 YOZ 面的中轴线两部分组成,如图 1 所示。具体推算步骤如下。

1) 将三维点云数据分别投影在 XOY 面和 YOZ 面上,并提取其两侧的边界点;

2) 对 XOY 面和 YOZ 面提取的边界点分别用二次曲线方程进行曲线拟合,即:

收稿日期:2012-12-02。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41171358);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;国家 863 计划资助项目(2012AA12A204)。

$$\begin{cases} X = P_{xy_1}y^2 + P_{xy_2}y + P_{xy_3} \\ Z = P_{yz_1}y^2 + P_{yz_2}y + P_{yz_3} \end{cases} \quad (1)$$

其中,隧道轴线拟合方程的参数估计采用随机采样一致性(random sample consensus,RANSAC)算法<sup>[9]</sup>;

3) 拟合出两侧的边界曲线后,以其中任意一

边界作为起始边界重新等间隔采集,并分别计算出点集1每个点在其法线方向上与另一侧边界的交点(点集2),然后利用点集1、2求得一系列中点;再对另一侧边界以同样方法求得一系列中点,对这两列中点的均值进行曲线拟合,作为最终的中轴线。

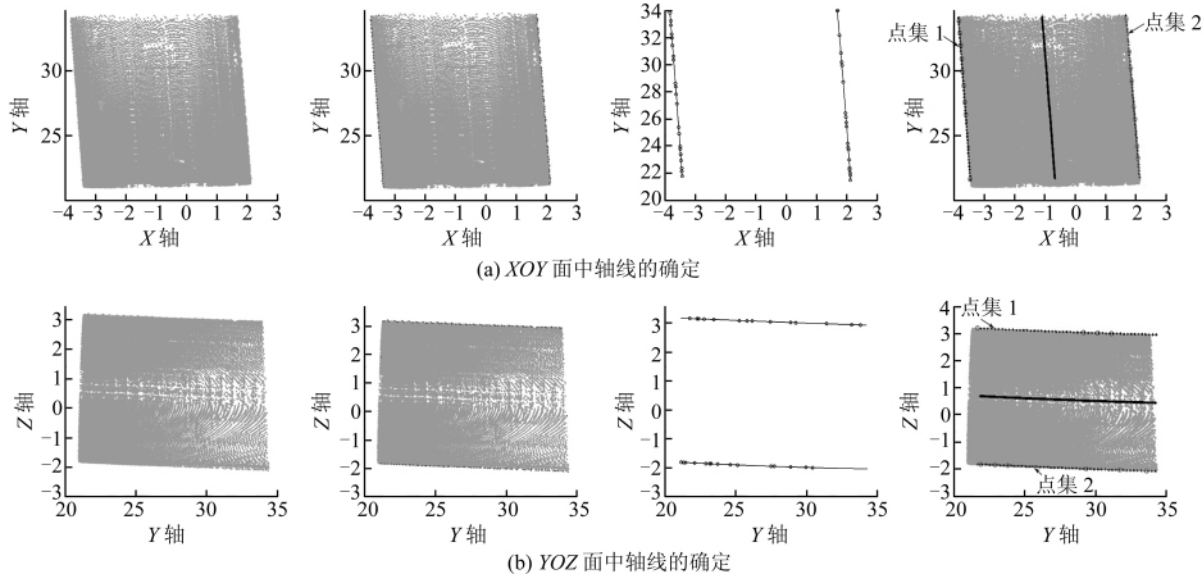


图1 隧道中轴线的拟合  
Fig.1 Tunnel Axis Fitting

1.2 基于邻域局部曲面拟合的断面截取

对隧道点云数据进行断面截取的一般方法为,先对隧道整体进行全局拟合,然后沿某一参照方向对隧道曲面进行断面截取。考虑到地铁隧道里程较长,三维点云数据量大,本文以局部曲面拟合代替对隧道的整体曲面拟合,不仅能够有效降低计算成本,还能排除其他不相关数据对拟合区域的干扰。

此部分可分为点云局部坐标系变换和基于局部曲面拟合的断面截取两部分,拟将点云的轴线方向变换至某一坐标轴的平行方向,再进行正交方向的断面截取,如图2所示。

需要根据隧道中轴线确定隧道的姿态,然后通过旋转矩阵基于相应角度分量进行姿态调整<sup>[10]</sup>,本文方法中分别绕Z坐标轴和X坐标轴旋转角度值 $\varphi, \phi$ ,如图3所示,使截取位置的法向与Y坐标轴的正交方向一致。

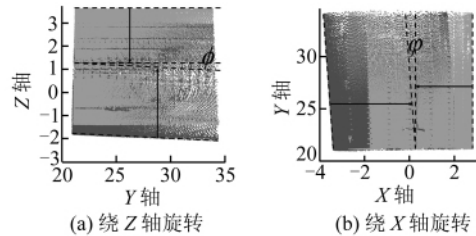


图3 姿态调整  
Fig.3 Orientation

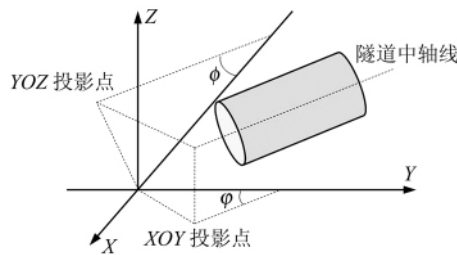


图2 局部坐标系变换示意图  
Fig.2 Local Coordinate System Transformation

对隧道点云数据 $[x_i \ y_i \ z_i]^T$ 和截取点 $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 按如下步骤变换后在相应坐标值 $[x'_0 \ y'_0 \ z'_0]^T$ 处截取断面:

$$[x'_i \ y'_i \ z'_i]^T = \mathbf{AB} [x_i \ y_i \ z_i]^T \quad (2)$$

$$[x'_0 \ y'_0 \ z'_0]^T = \mathbf{AB} [x_0 \ y_0 \ z_0]^T \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,

1.2.1 基于中轴线调整隧道姿态

为了在隧道走向的正交方向截取断面,首先

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}.$$

并求得断面坐标值  $[x' \ y' \ z']^T$  如下:

$$[x' \ y' \ z']^T = [x'_0 \ y'_0 \ z'_0]^T + R[\cos\theta \ 0 \ \sin\theta]^T \quad (4)$$

其中,  $\theta \in [0, 2\pi]$ , 为断面点与轴线上截取点连线所对应的角度值。

最后, 将断面按原旋转角度逆向旋转至初始位置, 即完成一次截取过程:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d = \sqrt{\frac{[r_y(x_1 - x_0) - r_x(y_1 - y_0)]^2 + [r_z(y_1 - y_0) - r_y(z_1 - z_0)]^2 + [r_x(z_1 - z_0) - r_z(x_1 - x_0)]^2}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}} \quad (6)$$

式中,  $r_x = \cos\theta, r_y = 0, r_z = \sin\theta, \theta \in [0, 2\pi]$ 。

筛选出交会方向的最邻近点后, 以此点为中心, 确定出其周围某一距离阈值范围内的所有点, 如图 4 所示, 通过如下方程对该区域数据做二次曲面拟合<sup>[11-12]</sup>:

$$a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 z^2 + a_4 xy + a_5 yz + a_6 xz + a_7 x + a_8 y + a_9 z + a_{10} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + \\ a_6^2 + a_7^2 + a_8^2 + a_9^2 + a_{10}^2 = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 参数  $a_1, a_2, \dots, a_{10}$  为拟合方程的限制最小二乘解<sup>[13]</sup>。

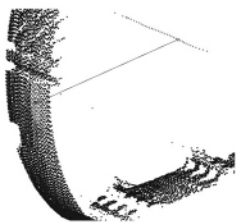


图 4 提取拟合邻域

Fig. 4 Interesting Area Extracting

求得曲面方程参数后, 利用式 (4) 计算  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$  处截取方向与拟合曲面的交点坐标, 其中  $\theta \in [0, 2\pi]$ , 为断面点与轴线上截取点连线所对应的角度值。将  $[x \ y \ z]^T$  代入式 (7) 求解  $R$ , 即可计算得到断面点坐标值。因为地铁隧道的标准形状为圆形, 在截取断面后可用圆形模型对断面使用 RANSAC 算法剔除噪音点。

### 1.2.2 对指定邻域做局部曲面拟合

断面截取过程利用地铁隧道的三维点云数据来完成, 虽然点云数据具有 mm 级的空间分辨率, 但点还是离散的, 不能保证每个截取位置都有对应的激光点, 因此需对截取区域进行曲面拟合。

本文所提出的方法为, 以轴线上一点为中心, 在截取断面方向上旋转  $360^\circ$ , 其间对断面上每个截取角度提取一定范围邻域内的激光点进行局部曲面拟合, 然后内插出该位置的断面点, 以下对某一角度的交会方法进行说明。

首先, 在这个角度上, 需要通过空间中一点  $P(x_1, y_1, z_1)$  到直线  $L: \frac{x-x_0}{r_x} = \frac{y-y_0}{r_y} = \frac{z-z_0}{r_z} = R$  的距离计算公式, 确定出点云中最邻近这一方向的直线的一个点, 如图 4 所示, 公式如下:

## 2 实验与分析

本文所用实验数据采集于上海地铁某区间段, 共 8 站数据, 平均每站数据含 260 万个激光点, 测站拼接精度为亚 mm 级。采集数据所用仪器为 RIEGL VZ-400, 仪器标称扫描距离为 600 m, 100 m 处一次单点扫描精度为 2 mm, 角分辨率为  $0.0005^\circ$ , 激光发射频率为 300 000 点/s, 扫描视场范围  $100^\circ \times 360^\circ$  (垂直  $\times$  水平)。

### 2.1 引用 RANSAC 拟合隧道中轴线

对 RANSAC 算法做一点改进<sup>[14]</sup>, 即每次采样多抽取一个点, 用于临时模型参数的检验, 若不符合该参数, 则不对其计算一致点集合, 直接进行下一次抽样, 可提高算法的效率。得到模型参数后对其进行最小二乘平差, 以改正后的参数作为拟合结果。

### 2.2 基于邻域局部曲面拟合的断面截取

#### 2.2.1 断面截取

对同一段点云数据分别采用全局拟合和局部拟合进行断面截取, 该段隧道长度为 33.52 m, 数据激光点数为 4 769 436 个。

首先用现有软件对隧道点云数据进行全局拟合, 然后设定一参考方向进行连续断面截取。结果表明该方法存在以下问题: ① 全局拟合包含了对无关区域的拟合, 消耗了运算时间; ② 软件只能设置一个参考方向进行连续的断面截取, 而隧道的法向是一直变化的, 因此不能保证每个断面

都与隧道正交。

针对此,本文通过局部拟合实验进行比较。按第1节给出的方法,交会出该位置的断面点,最终求出0°~360°之间所有截取角度上的交点,即为截取断面的结果,如图5(a)所示。同样地,在隧道中轴线上选择起始点并设置断面间隔,可以进行断面的连续截取。截取后,对断面使用基于圆形模型的RANSAC算法剔除噪音点,如图5(b)所示。需要注意的是,截取过程中截取角度的间隔在理论上可以任意加密,但同时也需要更多的计算时间,视实际需求而定。

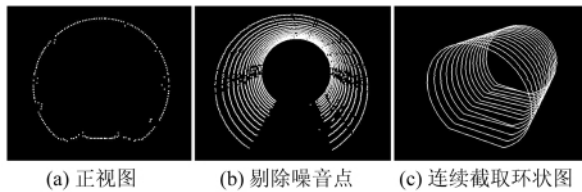


图5 断面截取效果

Fig. 5 Extraction of Cross-section

局部拟合实验过程通过VC++6.0编程实现拟合后完成,在设置1°为截取间隔(360点/断面)的情况下,截取每个断面平均用时为2.7s,完成

全局拟合实验中同样的工作量需要时间为3.2min。可见局部拟合实验在保证每个断面均与隧道正交的同时,在运算时间上较全局拟合具有一定的优势;除时间因素外,在精度方面也有一定优势。传统的全局拟合基于点云数据构建三角网格并进行内插,而内插精度受点云密度的直接影响,因此在时间和精度方面不能兼顾,而且全局拟合在精度方面并不突出<sup>[15]</sup>。

### 2.2.2 曲面拟合及精度分析

假设检验区域m数据的曲面拟合精度,首先从m中抽出一一点p<sub>0</sub>,用剩余的点进行二次曲面拟合。求得二次曲面方程系数后,还需要通过p<sub>0</sub>与轴线上截取断面的中心点来确定旋转分量r<sub>x</sub>、r<sub>y</sub>、r<sub>z</sub>。此后即可计算出原角度方向与拟合曲面的交点,并可以通过比较此交点与点p<sub>0</sub>的偏移量来衡量曲面拟合的精度。表1为随机抽取数据点的坐标值及其拟合点位偏差。其中最大偏差为1.5mm,最小偏差为0.1mm,平均偏差为0.8mm。以此方法进行不同期数据的比较,形变量在mm级至cm级浮动,如图6所示,结果符合形变趋势,因此本文方法的拟合精度能够满足应用需要。

表1 抽样点拟合精度

Tab.1 Accuracy of Quadric Fitting

抽出点坐标/m			拟合点坐标/m			点位偏差/m	中误差/10 <sup>-8</sup> m
X	Y	Z	X	Y	Z		
-3.171	15.578	0.051	-3.170 5	15.578	0.051 0	0.000 5	5.967
-3.182	15.544	0.013 3	-3.182 1	15.544	0.133 0	0.000 1	5.981
-2.842	15.680	1.918	-2.840 9	15.680	1.917 3	0.001 3	4.717
-2.864	15.759	1.875	-2.864 6	15.759	1.875 4	0.000 7	5.853
-0.596	15.576	-1.573	0.596 5	15.576	-1.574 4	0.001 5	4.732

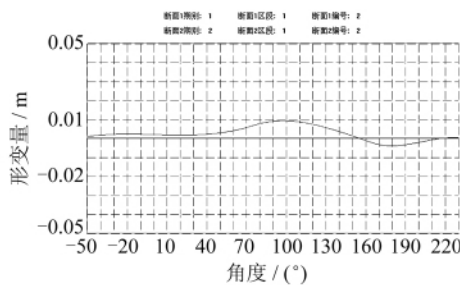
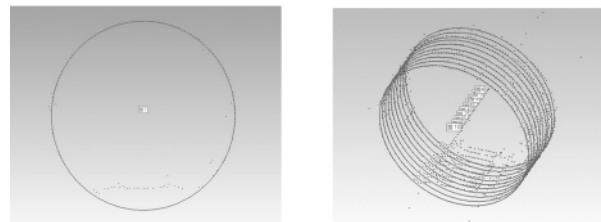


图6 形变曲线

Fig. 6 Deformation Curve



(a) 断面拟合正视图

(b) 多断面拟合比较

图7 断面拟合效果

Fig. 7 Vertical Section Fitting

### 2.3 断面拟合精度分析

通过上述方法对隧道连续截取断面后,将每个断面分别拟合为一个圆形(图7(a)),并计算出每两个圆形之间的半径差值,以此可表示隧道某一区段的整体收敛情况。

本文在Y∈[14.75,17.00]区间内共截取10个断面,断面间隔为0.25m,并分别对每个断面做了圆形拟合(图7(b))。表2为各拟合圆形的

表2 拟合圆形半径比较

Tab.2 Comparison of Circle Fitting

截取位置/m	拟合半径/m	相邻圆半径差/m	截取位置/m	拟合半径/m	相邻圆半径差/m
14.75	2.746	0.001	16.00	2.749	0.002
15.00	2.747	-0.001	16.25	2.751	-0.006
15.25	2.746	0.005	16.50	2.745	-0.003
15.50	2.751	-0.006	16.75	2.742	0.002
15.75	2.745	0.004	17.00	2.744	

半径,其中相邻圆形最大半径差值为 6 mm,最小半径差值为 1 mm,平均差值为 3 mm。

### 3 结 语

通过对上海地铁某区间段隧道的数据采集,以实验验证了本文所阐述的方法,并证明其在运算成本和保证正交截取方面与全局拟合相比都具有一定的优势。但是,上述方法也存在一些不足之处,如测段距离较长时拼接精度会有所降低;在隧道转弯不能前后通视时,前后测段的衔接问题等,这些都是有待解决的问题。该方法在多期数据的处理和比较方面还有待进一步完善。

#### 参 考 文 献

- [1] 李欣,方长运. 比赛特收敛测量系统[J]. 三晋测绘, 2004, 11(3,4): 34-37
- [2] 周奇才,金奇,高嵩,等. 基于激光测距技术的隧道断面形变检测系统[J]. 测控技术, 2010, 29(5): 44-46
- [3] 许小松. 全站仪配编程计算器进行隧道断面测量[J]. 数字技术与应用, 2010, 11: 36
- [4] 陶坤,何小平. TM 隧道断面测量系统在施工质量控制中的应用[J]. 施工技术, 2008, 37(11): 73-76
- [5] 黄茂华,谢义林. 隧道收敛测量方法研究[J]. 北京测绘, 2009, 4: 14-16
- [6] 刘礼刚,秦想姣. 徕卡 TCRA1101 全站仪在隧道断面测量中的应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(6): 356-357
- [7] 陆震. 地铁隧道变形监测技术[J]. 施工技术, 2009, 38: 105-106
- [8] Kang Zhizhong, Li J, Zhang Liqiang, et al. Automatic Registration of Terrestrial Point Clouds Using Reflectance Panoramic Images[J]. Sensors, 2009, 9(4): 2 621-2 646
- [9] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395
- [10] 滕志远,张爱武. 单位四元素法在激光点云坐标转换中的应用[J]. 测绘通报, 2010, 11: 7-10
- [11] 张梅,文静华,张祖勋,等. 基于特征关系图的似二次曲面物体三维几何建模[J]. 光电子·激光, 2010, 21(8): 1 252-1 256
- [12] 王解先. 工业测量中一种二次曲面的拟合方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(1): 47-50
- [13] Rabbani T. Automatic Reconstruction of Industrial Installations[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006
- [14] 曲天伟,安波,陈桂兰. 改进的 RANSAC 算法在图像配准中的应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(7): 1 849-1 851
- [15] 王宗跃,马洪超,彭检贵,等. 基于 LiDAR 数据生成光滑等高线[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11): 1 318-1 321

第一作者简介:托雷,硕士生,主要从事地面激光扫描数据的分析与处理。

E-mail:tlbeijing@foxmail.com

## Continuously Vertical Section Abstraction for Deformation Monitoring of Subway Tunnel Based on Terrestrial Point Clouds

TUO Lei<sup>1</sup> KANG Zhizhong<sup>1</sup> XIE Yuancheng<sup>2</sup> WANG Baoqian<sup>1</sup>

(1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, 29 Xueyuan Road, Beijing 100083, China)

(2 Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, 3447 Dongfang Road, Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Intelligent total station is the general approach for deformation monitoring of the subway tunnel in current use, but the data size is limited and the labor cost is high during information extracting. A method for vertical section abstraction based on 3D point cloud is proposed in this paper, which can be applied for deformation monitoring. This approach includes 3 parts: point cloud registration, tunnel central axis calculation and vertical section abstraction. The central axis of a subway tunnel can be determined through RANSAC algorithm and least square adjustment; the orientation of tunnel firstly has to be adjusted in terms of the central axis, then the data can be fitted by local quadric fitting, which includes

(下转第 185 页)

## 参 考 文 献

- [1] 袁修孝,张雪萍,付建红. 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(3):338-344
- [2] Cramer M, Stallmann D, Haala N. Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3):198-205
- [3] 袁修孝,付建红,左正立,等. 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(10):847-850
- [4] 袁修孝,杨芬,赵青,等. 机载 POS 系统视准轴误差检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12):1 039-1 043
- [5] 崔红霞. 无人机低空数码摄影测量系统研究[D]. 武汉:武汉大学, 2006
- [6] 刘军,王冬红,张永生. GPS/INS 系统 HPR 与 OPK 角元素的剖析与转换[J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 54-56
- [7] Chebeane H, Echaliier F. Towards the Use of a Multi-agents Event Based Design to Improve Reactivity of Production System[J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 37(1-2):9-13

第一作者简介:姚娜, 博士生, 研究方向为遥感影像信息度量与不确定性分析, 低空无人机摄影测量。

E-mail:nayao@foxmail.com

## Boresight Misalignments Calibration of POS System Considering Synchronization Error

YAO Na<sup>1</sup> LIN Zongjian<sup>2</sup> REN Chaofeng<sup>1</sup> WANG Changzhou<sup>3</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 Beitaping Road, Beijing 100039, China)

(3 Guizhou Guihang Unmanned Aerial Vehicles Limited Liability Company, 87 Shixi Road, Anshun 561000, China)

**Abstract:** The function model of boresight misalignments calibration is derived, and the synchronization error of POS system is considered as an item of calibration, and a strict estimation method for the error is put forward. The experimental results show that the accuracies of calibrated boresight misalignments and angular elements conversation are remarkably improved while considering the synchronization error.

**Key words:** POS; boresight misalignments; exterior orientation angular elements; synchronization error; accuracy

**About the first author:** YAO Na, Ph.D candidate, majors in information amounts and uncertainty analysis of remote sensing imagery and low altitude photogrammetry by unmanned aircraft vehicles.

E-mail: nayao@foxmail.com

(上接第 175 页)

constrained least squares algorithm and RANSAC algorithm. The feasibility and accuracy of the proposed method have been verified using the point clouds acquired by RIEGL VZ-400 laser scanner, and the practical significance for applications of 3D laser scanning is reflected to some extent.

**Key words:** tunnel deformation monitoring; vertical section abstraction; quadric fitting; 3D laser scanning; random sample consensus

**About the first author:** TUO Lei, postgraduate, majors in analysis and processing of terrestrial laser scanning data.

E-mail: tlbeijing@foxmail.com