

基于激光雷达数据的隧道变形监测方法评估

徐杨青¹, 孙杰^{2*}, 吴伟进², 肖伦波¹

(1. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北武汉 430064; 2. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北武汉 430074)



摘要: 随着激光技术的不断发展, 利用激光雷达数据进行隧道变形监测已成为当前研究的热点。为了探明现有方法在隧道变形监测中的适用性, 对现有的几种主流点云数据变形监测方法进行了整理归纳, 通过分析点云变化监测误差来源, 提出一套实验方法, 排除配准误差影响, 在不同的变形距离和不同的点云密度下对比分析了各种方法在隧道变形监测中的表现并分析了精度和点云密度之间的关系。实验表明, 在不考虑配准误差的情况下, 基于剖面的变化监测方法效果较好。

关键词: 激光雷达; 隧道; 变形监测; 误差; 剖面

中图分类号: P225

文献标志码: B

文章编号: 1672-4623(2019)02-0001-05

随着激光技术的不断发展, 激光精度也在不断地提高, 使得在较高精度变形监测领域使用激光扫描仪成为一种研究趋势。在隧道施工和运营管理过程中, 由于不良地质条件等原因导致隧道受压变形, 为了保证安全施工及运营并给相关部门提供决策信息, 应及时准确地对其进行变形监测。利用三维激光扫描仪进行隧道变形监测已成为当前研究的热点。托雷等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, 通过随机采样一致性算法和最小二乘平差算法提取隧道中轴线, 再通过调整隧道姿态、局部曲面拟合获取断面^[1]; 唐琨等提出一种通过中轴线上节点坐标偏移的方法提取变形量, 用区段拟合方法提取中轴线节点, 给出了利用三维激光扫描进行隧道变形监测的实施步骤^[2]; 李理等提出了基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法, 并对提取的两期断面进行了形变分析^[3]; 沙从术等讨论了隧道直径、隧道表面的粗糙度、扫描分辨率、扫描入射角、隧道表面的反射率等因素对扫描结果的影响^[4]; 李健等运用基于点云法向量差异的点云分割算法对点云数据进行抽稀, 使用抽稀后点云数据构建地铁隧道模型, 对隧道进行整体变形分析, 构建地铁隧道三维模型, 不仅提高了变形监测精度, 而且能够反映隧道整体变形趋势^[5]; 何桂珍等利用地面激光扫描技术快速采集地铁隧道点云数据, 对所采集的海量散乱点云进行去噪、配准等内业处理, 并对预处理后的点云数据应用分层切片技术获取断面, 通过断面点应用最小二乘法计算圆的圆心坐标和半径, 将计算值与设计值进行比较以

判断收敛情况^[6]; 王举使用 C2C (cloud to cloud)、C2M (cloud to mesh) 等方法对构筑物进行了变形监测^[7]。综上, 目前利用点云数据进行变形监测存在多种方法, 将这些方法应用于隧道变形监测大致可分为两类, 一类方法通过获取隧道点云中轴线、截面数据进行变化监测^[8]; 另一类方法直接对整体隧道点云进行变化监测, 包括 C2C、C2M 等。众多方法中哪种方法最适用于隧道监测的相关研究较少。本文提出一种实验方法, 能够有效排除配准误差影响, 在不同的位移和不同的点云密度情况下对各种方法进行比较分析, 旨在找出一种最适用于隧道变形监测的方法。

1 现有方法介绍

1.1 基于点到点 C2C 的比较方法

基于点到点的 C2C 变形分析方法, 将不同时同一坐标系下的点云数据直接求差来提取监测对象的变形量。该方法是通过计算两组点云数据中邻近点的距离来进行变形分析。

基于邻近点的直接 C2C 方法, 对于待比较点云的每个点, 可以在参考点云里定义一个邻近点, 这个邻近点类似于同名点。表面变化可以近似估计为最邻近点的距离。如图 1 中, 在参考点云中为待比较点云中的每一个点找出最近点并计算这两点间的距离。距离的准确度依赖于两期点云的粗糙度和点密度。当局部区域点云密度较小或者存在点云缺失时, 为了提高精度, 通过对局部区域进行建模来提高监测精度, 常用的方法有局部最小二乘平面拟合或者二次高程函数拟合的方法。

图 2 为点云到局部 LSP 模型 (least square plane,

收稿日期: 2017-11-15。

项目来源: 武汉市城建委科技计划项目 (201506)。

(* 为通讯作者)

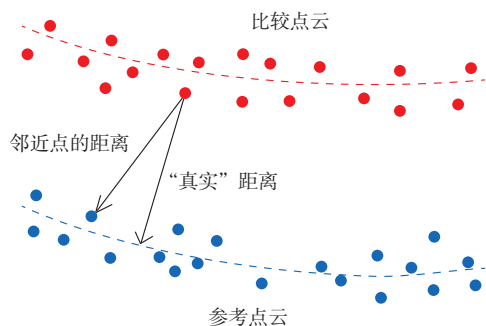


图 1 点云到点云比较 (C2C)

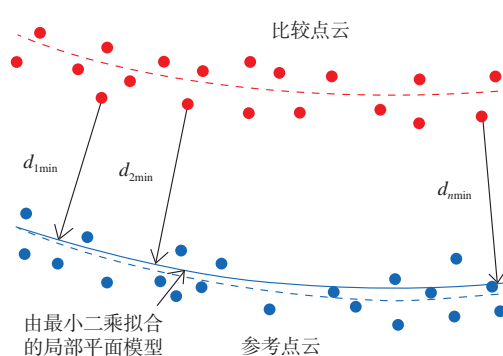


图 2 点云到局部 LSP 模型 (LSP)

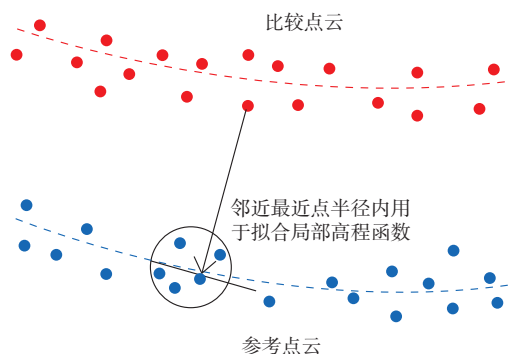


图 3 点云到局部 Quadric 模型 (QUA)

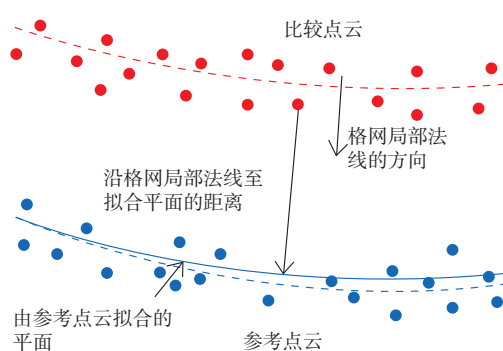


图 4 点云到模型 (C2M)

LSP) 的比较方法, 假设通过最小二乘拟合的方法将参考点云局部区域经过拟合后形成平面, 计算比较点云至拟合平面之间的距离。图 3 为点云到局部二次高程函数模型 (quadric, QUA) 的比较方法, 其原理是在参考点云中任意选取一个点, 并以选取的点为圆心、最小距离 R 为半径作一个圆, 落在圆内的点云集合可以拟合出一个平面。参考平面的实际位置可以通过基于二次高程函数模型拟合出来的函数表达并且有一定的准确度, 这样可以精确地将比较点云与参考点云之间的距离表达出来。

1.2 基于点到模型的变形分析

基于 C2M 的变形监测分析首先通过对参考点云进行内插得到模型, 然后计算待比较的点云数据到参考模型之间的距离。这种方法也是目前比较常用的方法, 如图 4 利用参考点云构建表面模型, 求取待对比点云数据中任意一点沿着局部网格法线方向至模型的距离。这种方法适用于表面起伏变化不大的环境。

1.3 基于剖面的变形分析

基于剖面的变形分析方法有多种, 为了便于和上文所列出的几种方法进行比较, 本文选用的方法为: 将预处理的隧道点云参考部分学者之前提出的方法^[1,3], 通过向 XOY 和 YOZ 平面投影计算中轴线, 沿着中轴线按照一定间隔提取 n 个剖面, 如图 5。把离散的剖面进行曲面拟合, 通过拟合计算剖面圆心坐标, 如图 6。

然后对比不同期点云同一位置剖面拟合出的圆心位移 $d_i (0 < i \leq n)$ 来判断剖面的变形, 不同期点云剖面变形用 $PM = \sum_{i=1}^n d_i / n$ 来表示。

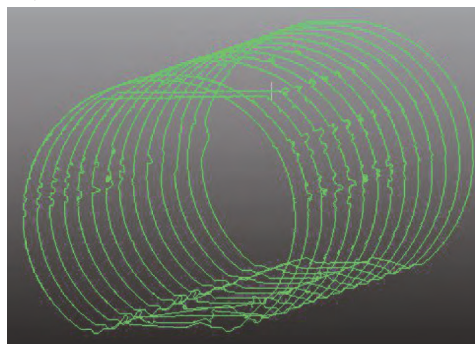


图 5 隧道点云连续剖面图

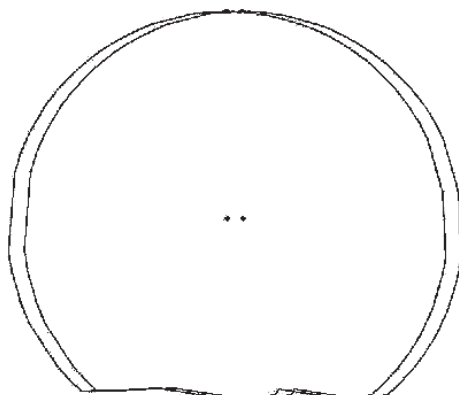


图 6 两期点云剖面圆心位移

2 点云变形监测误差源

在点云变形监测过程中存在的误差源主要来自两个方面: ①三维激光扫描获取点云数据时的误差, 譬如扫描仪自身系统误差、周围扫描环境带来的误差、扫描对象表面材质粗糙度等。②点云的配准误差, 在场景较大的情况下需要将多站数据进行配准拼接形成一个完整的实体, 而不同时相的点云数据进行比较时也需要进行配准。由于点云数据获取的站点坐标系不同, 加之点云的离散性, 数据在配准过程中存在一定的误差^[9]。

3 实验与分析

3.1 数据获取

本文所用实验数据采集于中国地质大学(武汉)校内隧道, 共 4 站数据, 平均每站数据含 2 000 000 个点。采集数据所用仪器为 RIEGL VZ400, 仪器标称扫描距离为 600 m, 实验室扫描精度可达 2 mm, 激光发射频率为 300 000 点/s。由于本文主要目的是针对各种变形监测方法进行比较分析, 为了避免配准产生的误差影响, 仅选用其中一站数据作为实验中的参考数据, 并将该站数据克隆后通过平移已知距离来模拟不同时相的待比较数据。此外, 为了避免点云之间的对应性, 对克隆后的数据还需要进行重采样, 如图 7。

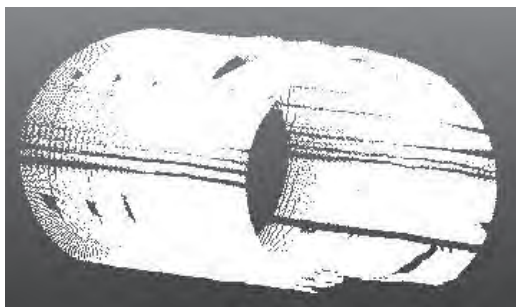


图 7 隧道点云数据

3.2 数据预处理

原始点云数据中包含了部分噪声点, 如隧道内的人、隧道壁上的电缆、照明设备等附着物、孤立点等。为保证只针对隧道壁进行变形监测, 必须从点云数据中滤除噪声点。对于孤立点, 由于其一般具有邻域点较少或不存在邻域的特征, 因而在孤立点的滤波过程中, 可以较为简单地在点云 K-D 树索引基础之上, 通过判断该点一定邻域范围的邻近点个数是否小于判定阈值来判断是否为孤立点。对于其他噪声点, 本文假设隧道剖面为一椭圆, 通过 RANSAC 方法剔除噪声点。滤波前后如图 8、9 所示。



图 8 滤波前点云数据



图 9 滤波后点云数据

将经过预处理的某一站隧道数据作为基准数据 R , 克隆并重采样的隧道数据作为比较数据 C , 比较数据 C 沿着竖直向上方向 (Z 正方向), 以 0.001 m 为间隔移动, 每次移动后分别用上文提及的几种方法 (点云到点云 (C2C)、点云到局部最小二乘拟合平面 (LSP)、点云到局部二次高程函数模型 (QUA)、点云到模型 (C2M)、剖面 (PM)) 对数据 R 和 C 做变形监测, 得到的结果用误差棒图表示。

如图 10 所示, PM 和 C2M 两种方法监测的平均变化距离比较接近竖直移动的真实距离, 精度从 0.000 8~0.001 mm, PM 方法监测出的平均变化距离和精度略优于 C2M 方法; C2C 方法在竖直移动距离 0.001~0.004 m 时, 监测出的平均变化距离比较接近真实距离; 当竖直移动距离从 0.004~0.02 m 时, C2C 方法监测出的平均变化距离大致成线性, 但始终小于真实距离; 当竖直移动距离 0.02 m 时, C2C 方法监测出的距离为 0.012 m, 精度 0.005 m, 点到局部模型的方法 (QUA/LSP) 监测出的平均距离呈现出一定的线性, 但是监测出的平均距离都小于真实距离。随着竖直移动距离增大, C2C、QUA 和 LSP 的精度也随之降低, 譬如, 在竖直移动距离为 0.006 m 时, C2C 误差为 0.001 7 m, LSP 和 QUA 误差分别为 0.001 8 m、0.001 9 m; 当竖直移动距离为 0.02 m 时, C2C 误差为 0.005 5 m, LSP 和 QUA 误差分别为 0.005 6 m、0.005 7 m。综上, PM 和 C2M 2 种方法监测出的平均距离较准确, 精度较高, 且 PM 方法略优于 C2M, C2C、LSP 和 QUA 3 种方法精度较差, 主要可能是由于参考点云中的噪声影响造成。

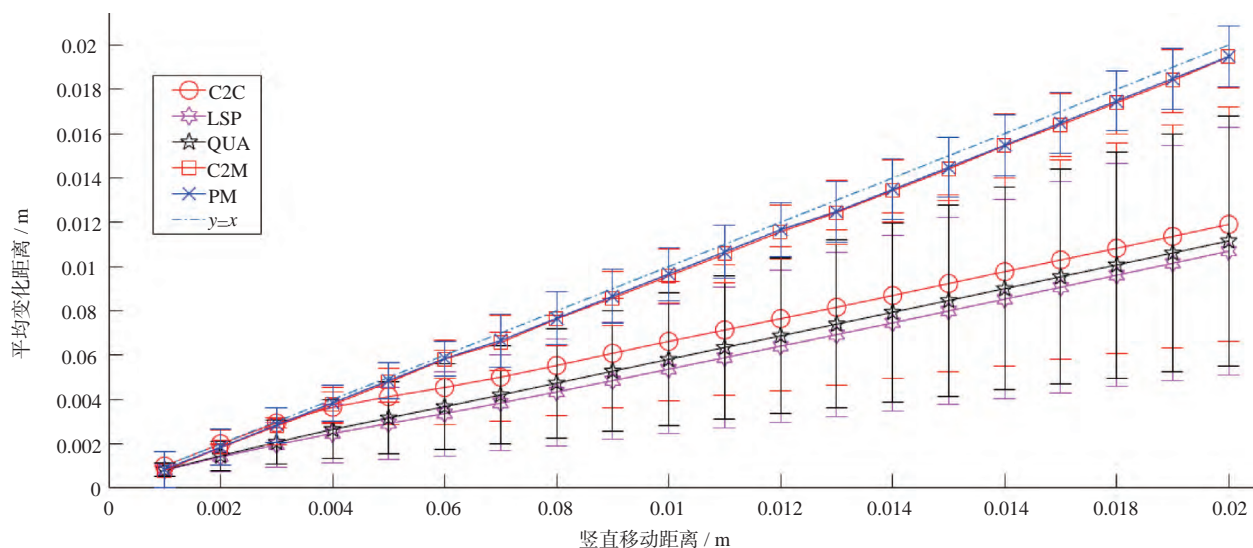


图 10 不同移动距离多种方法对比

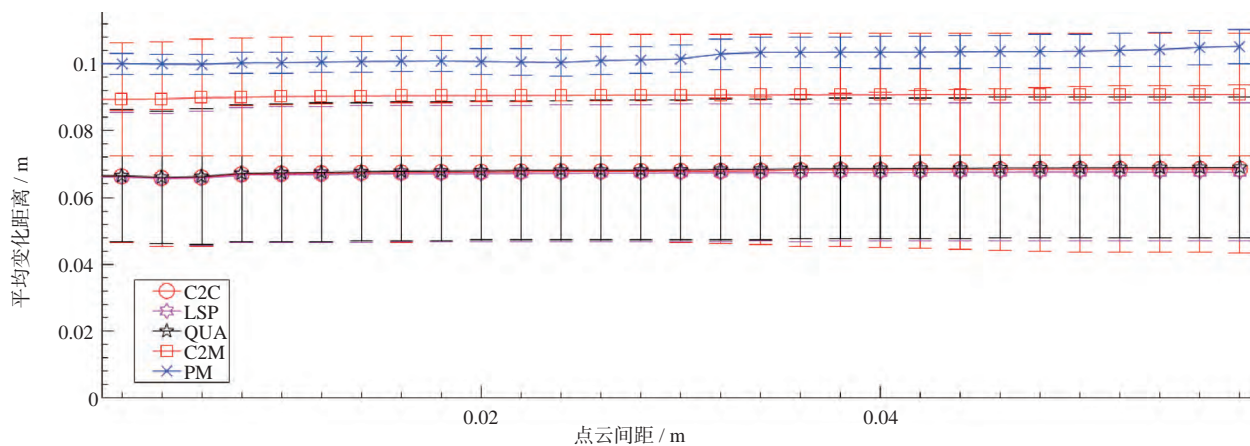


图 11 不同点密度多种方法对比

除了噪声对监测精度造成影响, 本文还分析了不同点云密度对上述几种方法的影响。将参考点云 R 和比较点云 C 以 0.002 m 点间距为起始进行重采样, 以 0.002 m 递增, 并将比较点云数据 C 沿着竖直向上方向 (Z 正方向) 移动 0.1 m , 在不同点间距下对上述方法进行比较, 最终结果用误差棒图表示。由图 11 可知, 在不同点云密度下对于上述几种方法监测出的平均变化距离影响不大。PM 方法监测结果最接近真实值 $0.099\sim 1.014\text{ m}$, 误差值随着点间距变大也从 0.003 m 升至 0.005 m ; C2M 方法监测结果仅次于 PM 方法, 但是 PM 方法精度受点间距影响不大, 误差范围在 $0.016\sim 0.018\text{ m}$; C2C、QUA 和 LSP 3 种方法监测出的平均变化距离基本在 $0.066\sim 0.068\text{ m}$ 范围内。随着点间距变大, C2C 方法误差由 0.019 m 升至 0.025 m , 而 QUA 和 LSP 两种方法的精度变化不大, 说明点到局部模型的方法精度对于点云密度变化不敏感。

由图 11 可知, 讨论的几种方法在已知值为 $Z=0.1$

时, 随着点云密度的变化, 监测精度也随之细微降低。为了研究监测精度与点密度之间的关系, 分别选取 3 种代表性的方法 C2C、C2M 和 PM 进行实验, 通过多元线性回归分析建立监测精度与点密度之间的关系。如图 12, C2C 方法 $R^2=0.965\ 6$; C2M 方法 $R^2=0.956\ 6$; PM 方法 $R^2=0.941\ 4$, 3 种回归分析进行 F 检验, P 均小于 0.05 , 说明 3 种监测方法的精度和点云间隔之间回归方程的显著性, 且拟合度较好。由此可以大致估算使用某种监测方法时为了达到理想的精度, 硬件性能、摄站距离和点云密度必须满足的要求。

综上, PM 的方法和 C2M 的方法在隧道变形监测中监测出的均值和精度较好, PM 方法精度略优于 C2M 的方法, 前提是不同时相剖面精准对应。C2C、QUA 和 LSP 3 种方法由于受噪声影响, 测出的均值与真实值之间存在一定的差距, 适用于快速监测。在不同点云密度下, 几种代表性的方法监测精度会略微降低, 且和点间隔之间大致符合二次元关系。因此, 在

较好的配准条件下或者点云密度较低的情况下，基于剖面的监测方法较适合于隧道变化监测，而直接基于点云比较的方法适用于快速监测。

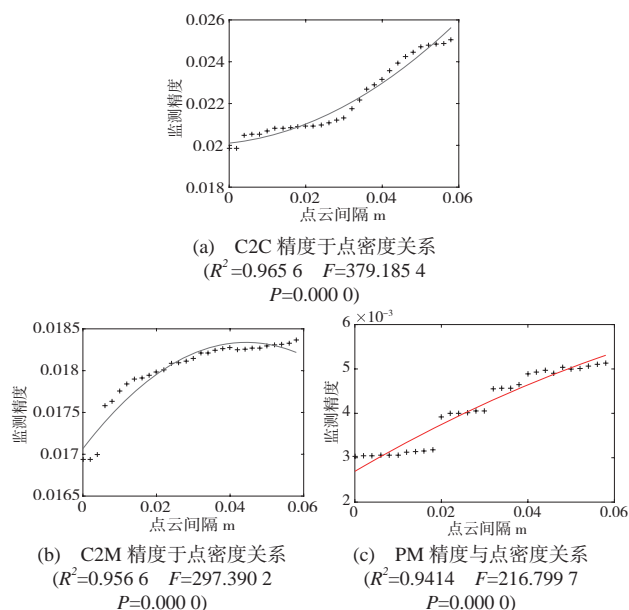


图 12 不同方法监测精度与点密度关系

4 结 语

对点云数据变形监测的几种主流方法进行了整理归纳，通过实验设计排除配准误差影响，在不同的移动距离和不同的点云密度下分析几种方法在隧道变形监测中的表现，旨在找出最适用于隧道变形监测的方法。通过实验的对比分析发现，基于剖面的监测方法

(PM) 监测均值和精度均为最优，基于点到模型的方法 (C2M) 表现次之，直接基于点云的监测方法 C2C、LSP 和 QUA 监测均值和精度略差，在点间距较大时，PM 方法依然能够保持较高精度。此外，本文对几种典型方法的监测精度和点云间距之间的关系进行了分析，发现均能较好地进行回归拟合，可为精确监测目标需求提供参考。

参考文献

- [1] 托雷, 康志忠, 谢远成, 等. 利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2013(2):171-175
- [2] 唐琨, 戴鑫, 黄祖登. 基于三维激光扫描的隧道变形监测方法研究 [J]. 地理空间信息, 2016(4):97-98
- [3] 李理, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法 [J]. 测绘学报, 2015(9):1 056-1 062
- [4] 沙从木, 潘洁晨. 基于三维激光扫描技术的隧道收敛变形整体监测方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(10):51-54
- [5] 李健, 万幼川, 江梦华, 等. 基于地面激光技术的隧道变形监测技术 [J]. 地理空间信息, 2012(1):14-17
- [6] 何桂珍, 杨军. 地铁隧道收敛变形监测方法的研究 [J]. 现代隧道技术, 2016(3):105-110
- [7] 王举. 基于激光扫描技术的水库大坝三维变形动态监测方法研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2015
- [8] 李宗平, 张永涛, 杨钊, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形与断面监测中的应用研究 [J]. 隧道建设, 2017(3):336-341
- [9] 刘绍堂, 潘国荣. 基于激光扫描的隧道变形监测的误差来源及变形分析 [J]. 铁道工程学报, 2013(5):69-74

第一作者简介: 徐杨青, 博士, 正高职高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计及科研工作。



本刊声明

为适应我国信息化建设, 扩大大刊及作者知识信息交流渠道, 本刊数据已被《中国核心期刊 (遴选) 数据库》《CNKI 中国期刊全文数据库》和《中文科技期刊数据库 (全文版)》等收录。在《地理空间信息》发表的论文均默认将其在著作权保护期内的复制权、发行权、汇编权、翻译权以及网络传播权授权给《地理空间信息》编辑部, 编辑部可将上述权利转授给第三方使用。作者不再许可他人以任何形式使用该篇论文, 但可以在其后续作品中引用 (或翻译) 该论文中部分内容或将其汇编在作者的非期刊类文集中。如不同意, 请事先声明, 本刊另作处理。其文章的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付 (已在收取发表费时折减和换算为杂志赠阅)。

(本刊编辑部)

Evaluation of Tunnel Deformation Monitoring Methods Based on Lidar Data

by XU Yangqing

Abstract With the continuous development of laser technology, tunnel deformation monitoring which use lidar data has become a hot topic in current research. In this paper, several main point cloud data change detection methods have been carried on the induction, to find out the applicability of the existing methods in the tunnel deformation monitoring, based on the analysis of error sources monitoring point cloud changes, a set of experimental method has been designed. An analysis with various methods in the tunnel change detection performance was made under different distances and different point cloud density, experimental results show that the profile based method is better without registration error.

Key words Light detection and ranging;tunnel;deformation monitoring;error;profile
(Page:1)

Application of PALSAR Data in the Structural Information Extraction of Vegetation-covered Area

by CUI Shun Yao

Abstract In order to solve the problems that the remote sensing technology facing in the geological structure information extraction of the vegetation-covered area, taking Fujian Shouning Area as a research area, we used L-band PALSAR dual-polarization radar data with certain penetrating power to do research. For detailed structural information, we performed the false color synthesis and filter to the data, and transformed the HH polarization channel into HSV color image. Finally, comparing with ASTER multi-spectral images in this area, we analyzed the advantages and disadvantages of PALSAR radar images. The results show that the interpretations of PALSAR radar structures are consistent with the main faults in the study area. The achievements of this investigation established the helpfulness of PALSAR data for geological structure analysis in the vegetation-covered area.

Key words PALSAR, radar, remote sensing, vegetation-covered area, geological structure
(Page:6)

Research on a Medical Convenience Evaluation Model in Frontier Minority Mountainous Regions

by SUN Lele

Abstract We proposed a medical convenience evaluation model with network vulnerability based on road network, which consists of three parts: network vulnerability indicators, accessibility indicators and road network complexity indicators. With the geographical conditions census data, we applied this model to the medical convenience calculation for 376 administration villages of Dehong Dai and Jingpo Autonomous Prefecture in Yunnan Province. The experiment results proved the effectiveness of this model. This study can provide a reference for the implementation of targeted poverty alleviation policies and the poor relocation policies.

Key words medical convenience, road network vulnerability, accessibility, minority
(Page:10)

Analysis of the Effect of GEO/IGSO/MEO Satellite on BDS Pseudo Range Differential Positioning Accuracy

by WANG Yang

Abstract In this paper, we analyzed the effect of GEO/IGSO/MEO satellite on BDS pseudo range differential positioning accuracy. First of all, we only added four GEO satellites in positioning. Then, in the condition of four GEO satellites all added in positioning, sequential tests were conducted to positioning that one IGSO satellite with bigger elevation angle was added to each. At last, in the condition of four GEO satellites and three IGSO satellites all added in positioning, sequential tests were conducted to positioning that one MEO satellite with bigger elevation angle was added to each. We analyzed the changes of HDOP, VDOP values and accuracy in three experiments. The Experiment indicates that in the current BDS satellite constellation (5GEO+6IGSO+3MEO) conditions, positioning accuracy is poor only when GEO satellite participating in the positioning. Adding IGSO satellite and MEO satellite in positioning can significantly improve the spatial structure and the positioning accuracy.

Key words BDS, HDOP, VDOP, pseudo range differential positioning accuracy
(Page:15)

Research and Application of Cadastral Surveying and Mapping Based on Vehicle LiDAR Measurement System

by JIA Bao

Abstract In this paper, based on the LiDAR measurement system of Beijing Geovision Tech. Co., Ltd, we discussed and analyzed the key technologies and working modes of LiDAR rural cadastral survey. And then, we used the demonstration application and data analysis of the experimental area to illustrate the advanced nature and feasibility of the technology and model. The study can provide a reference for the wider application of the vehicle LiDAR measurement system.

Key words car LiDAR system, cadastral survey, point clouds, precision analysis
(Page:18)

Key Technologies and Application Research on 1 : 500 Unmanned Aerial Vehicle Photography Without Image Control Point

by ZHU Xiaokang

Abstract Large scale mapping using unmanned aerial vehicle (UAV) without image control point is the trend of aerial photogrammetry. Taking Sirius

unmanned aerial system (Sirius-UAV) for example, we introduced the basic structure of fixed wing UAV, expounded the process of large scale UAV mapping without image control point, and discussed the adaptive route design, POS aided aerial triangulation, and other key technologies of data processing in aerial photogrammetry without control point. Combining with the engineering example, through comparative analysis between the feature points coordinates of the obvious objects in DEM and DOM and the measured coordinates of corresponding ground check points, we verified the feasibility of applying the Sirius-UAV Photogrammetry System to 1 : 500 mapping.

Key words UAV, large scale, route design, POS, aerial triangulation
(Page:22)

Development and Design of the Agriculture Comprehensive Information Application System Based on Cloud Platform

by ZHANG Xueli

Abstract In this paper, we designed the agriculture comprehensive information application system based on cloud platform, and analyzed the system structure and data organization. Then, we designed the application functions of the agriculture comprehensive information application system in detail, such as data acquisition, data visualization, data searching, data analysis, and data service sharing etc, and designed the spatial database and property database of this system. The system was developed in support of the acquisition, management by Play Framework using JAVA. The visualization of this system was realized by ArcGIS Server. This study can provide some scientific supports for the agriculture comprehensive production management and have wide application prospects.

Key words WebGIS, agricultural informatization, model simulation, cloud platform
(Page:27)

Spatial Pattern Analysis of Basic Public Service Based on Geographical Conditions Census

by WENG Zhongyin

Abstract In this paper, based on geographical conditions census data and geographical conditions monitoring, combining with the researches of scholars at home and abroad, we established an index system for basic public service spatial pattern, determined the monitoring and analysis method, and analyzed the pattern of public service in Yibin City and the correlation between basic public service spatial pattern and population or economics. The results show that the density of basic public service in Yibin is patchy distribution and gradually reduces from urban to rural areas. The density of basic public services in Yibin is positively related to population density and per capita GDP. There are high correlation with population density and no obvious correlation with per capita GDP.

Key words basic public service, geographical conditions census, geographical conditions monitoring, Yibin City
(Page:31)

GNSS Data Analysis Based on RTKLIB Preprocessing

by BAI Tianyang

Abstract Using RTKLIB to preprocess the GNSS observation data, we removed the appropriate observation period or satellite by looking at the satellite visibility, multipath effect, signal to noise ratio, DOP value and other graphics, which could provide a reliable solution for the subsequent solution quality assurance. The low frequency components could be extracted and analyzed by using wavelet transform to eliminate the high frequency components of random noise and multipath effects.

Key words RTKLIB, GNSS, multi-path effect, data preprocess, wavelet analysis
(Page:34)

Design and Implementation of Smart Tourism Information System in WeChat Environment

by ZHAO Peng

Abstract Smart Tourism is the development trend of the tourism industry, the development of Smart Tourism system has effectively promoted the intelligence development of the tourism industry. In this article, we described the design and implementation of each function of Smart Tourism system in detail. Based on the advantages of cloud computing, we deployed the system to the cloud platform. And we used WeChat marketing platform to integrate system functions with WeChat, in order to improve the tourist experience.

Key words Smart Tourism, cloud computing, cloud platform, WeChat public number
(Page:38)

Homestead Data Integration and Database Construction of Dongguan City

by HUANG Yuanjun

Abstract Taking the homestead data integration and database construction of Dongguan City for example, we illustrated the working process of cadastral investigation and digital management, and introduced the rural homestead management experience from five aspects, such as construction content, working content, data classification, data process and storage. This study can provide an important reference for the related work in other cities.

Key words geographical information, data integration, database construction, homestead
(Page:41)