

三维激光倒置扫描关键技术研究

张志鹏, 邵学君, 庞庆

(中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 对比常规三维激光正置扫描技术, 研究了三维激光倒置扫描关键技术。研究倒置扫描入射角技术, 确定了硬件三脚架倒置安装条件, 满足合理的扫描入射角, 达到点云的较好采集效果。在软件方面研究了高效自动去除噪点技术, 实现倒置扫描噪点的自动高效去除。通过试验比较, 采用三维激光倒置扫描关键技术, 能够较好实现倒置扫描且扫描效果较好, 降低了现场工作强度, 提高了工作效率, 拓展了三维激光扫描技术应用领域, 为采用倒置扫描技术、自动高效噪点处理技术等方面提供参考, 同时, 也为红外技术在图像融合、影像信息识别、图像降噪等方面提供借鉴。

关键词: 三维激光; 倒置扫描; 点云; 噪点; 红外技术

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2021)08-0752-05

Research on the Key Technology of 3D Laser Inverted Scanning

ZHANG Zhipeng, SHAO Xuejun, PANG Qing

(China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The key technologies of 3D laser inverted scanning are mainly studied through the introduction of conventional 3D laser positive scanning technology. The inverted scanning incident angle technology was researched, and the hardware tripod inverted installation conditions were determined to attain a reasonable scanning incident angle and achieve a good acquisition effect of point clouds. On the software side, the technology of efficient and automatic noise removal was examined to realize the automatic and efficient removal of noise in inverted scanning. Through experimental comparison, the key technology of 3D laser inversion scanning can be used to achieve better inversion scanning and scanning results. Moreover, it can be used to reduce the intensity of work, improve work efficiency, and expand the application field of 3D laser scanning. The application fields of 3D laser scanning technology have expanded, and can be used as a reference in the application of inverted scanning technology, automatic and high-efficiency noise processing technology, and so on. Furthermore, this method provides a reference for infrared technology in image fusion, image information recognition, image noise reduction, and so on.

Key words: 3D laser, inverted scanning, point clouds, noise point, infrared technology

0 引言

三维激光扫描技术是一种先进的全自动高精度立体扫描技术^[1], 以非接触、快速扫描、获取信息量大、实时性强、自动化测量等特点逐渐在工程测量、文物保护、医学研究等领域得到推广应用^[2-3]。测量过程一般采用正置的扫描方式。随着三维扫描技术应用的拓展, 在对一些以铁路罐车为代表的大型容器扫描时, 发现正置扫描方式难以满足现场测量要求。正置扫描方式需要操作人员进入容器内, 而容器内常常含

氧量不足, 有毒、有害、腐蚀介质会对人身安全造成危害, 如不进入容器内扫描则需要多次移站扫描, 多次移站扫描一方面耗时效率低, 同时受现场场地限制, 另一方面后续海量点云拼接等处理耗时且效果不好。倒置扫描技术凭借其技术优势, 应用需求不断扩大。倒置扫描无需操作人员进入容器内, 人员安全有保障, 一站扫描, 不受外界场地等影响, 现场工作量小且工作效率高, 点云质量相对高, 后续点云处理快速高效。目前, 倒置扫描技术在国内外研究较少, 为了解决以上迫切需求, 开展了三维激光倒置扫描关键

收稿日期: 2020-07-08; 修订日期: 2021-07-30.

作者简介: 张志鹏 (1982-), 男, 内蒙古巴盟人, 副研究员, 硕士, 主要从事铁路三维激光扫描技术研究, E-mail: zhangzp@rails.cn.

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重点项目 (2016D001-C)。

技术研究, 通过研究设计倒置扫描硬件入射角关键技术和软件自动高效快速去噪关键技术, 实现三维激光倒置扫描。

1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术采用激光测距技术和精密分度技术, 用激光作为光源进行高速电子测距, 水平方向按照预定分度缓慢旋转, 垂直方向按照预定分度高速旋转, 接收器接收反射回来的激光, 实现对被测对象三维扫描, 扫描示意图如图 1 所示。三维激光扫描获取高准确度、高密度的(x,y,z)三维坐标点云^[4-5], 通过将海量点云进行配准、合并、去杂、平滑、数据分割、三维变换^[6-8], 并将经过以上处理的点云进行数据精简、模型构建等^[9-10], 最终形成由点云组成的被扫描对象的数据模型, 依据该数据模型进行相关后期计算处理^[11-12], 具体流程如图 2 所示。

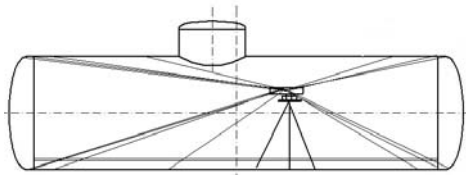


图 1 正置扫描示意图

Fig.1 Schematic diagram of forward scanning

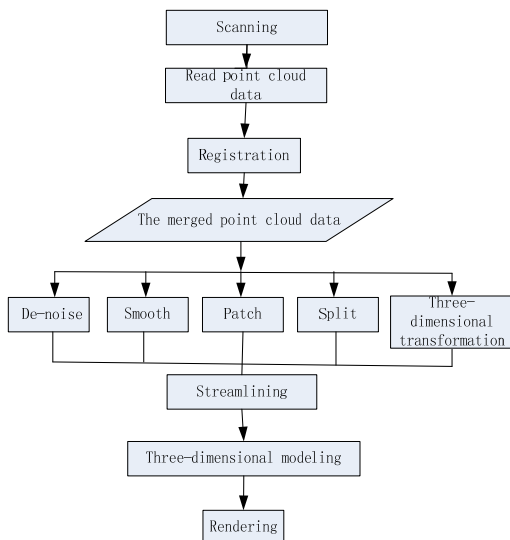


图 2 三维激光扫描流程图

Fig.2 Scanning flow chart

2 倒置扫描硬件关键技术

倒置扫描硬件除三维激光扫描仪具备倒置补偿功能、三脚架具备倒置使用功能外, 主要考虑扫描仪倒置后采集点云的质量问题, 在此主要考虑扫描入射角问题, 倒置扫描示意图如图 3 所示。

当三维激光扫描仪激光发射器发射出激光到达被扫描对象表面时会发生漫反射^[13], 其中一部分激光会经扫描对象表面反射后回到扫描仪激光接收器^[14-15]。能否有效反射回扫描仪激光接收器直接影响扫描效果。我们在研究时注意到, 当激光发射光轴与目标漫反射面法线重合时, 主要反射能量集中在一定角度区域内, 相比较之下, 发射的激光束越倾斜、发射的距离将会越远、发射的激光能量也将会越弱, 直接导致激光接收器接收到反馈回来的激光能量衰减, 甚至没有到达接收器能量已消耗殆尽, 从而导致扫描仪能识别的点云较少, 反映在点云图上就是黑洞和噪点。我们开展大量试验, 经过试验对比, 针对同一扫描对象得到截然不同的扫描效果, 如图 4 所示, 左侧扫描点云由于没有合理设置入射角导致点云缺失严重, 右侧扫描点云在合理设置入射角后, 对应位置没有出现相似的情况且点云效果良好。

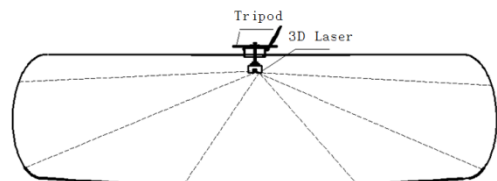


图 3 倒置扫描示意图

Fig.3 Schematic diagram of inverted scanning

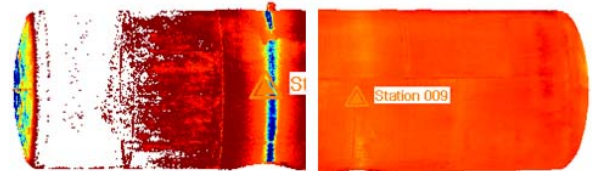


图 4 扫描点云对比图

Fig.4 Scanning point cloud comparison

通过调整三维激光扫描仪与被扫描对象之间的位置关系, 避免出现不合理的入射角。以铁路罐车(箱)为例, 在扫描过程中调整三脚架安装条件, 即通过调整三脚架的位置和中轴的长度使得三维激光扫描仪倒置后在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向发生变换, 实现合理的扫描入射角。经过大量试验, 我们研究得到, 对于一定功率的发射激光, 在激光束与被扫描对象的夹角保持 35°入射角扫描时, 扫描效果较好, 所以在倒置扫描时, 需要确定三脚架的固定位置以及调整中轴长度, 实现在条件最苛刻的位置倒置扫描入射角满足 35°。以 25°入射角、以 35°入射角、以 45°入射角为例, 扫描标靶点云效果如图 5 所示, 相比图(a)25°入射角扫描标靶点云和图(c)45°入射角扫描标靶点云, 图(b)35°入射角扫描标靶点云效果较好。

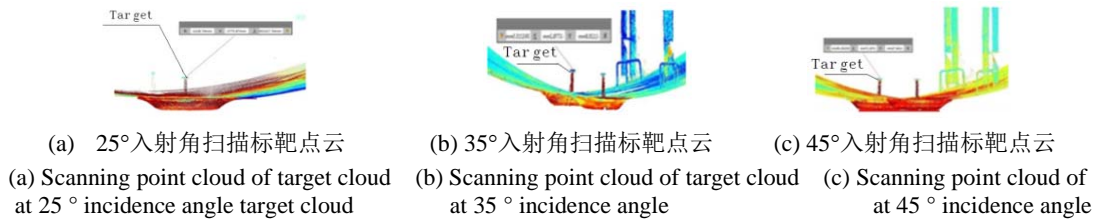


图5 不同入射角扫描点云效果

Fig.5 Scanning point cloud effect at different incident angles

3 倒置扫描软件关键技术

常规的点云处理过程需要大量人工参与、步骤繁琐、工作量大^[16-17]，倒置扫描软件关键技术主要针对倒置扫描实现自动高效快速去噪处理。

首先，倒置坐标转换。由于倒置扫描，扫描的点云图与正常视觉正好相反，需要将倒置的点云翻转，采用围绕坐标轴旋转的复合来表示旋转。沿着y坐标轴旋转180°，实现点云的正置。

绕y轴旋转的矩阵表示式如(1)所示：

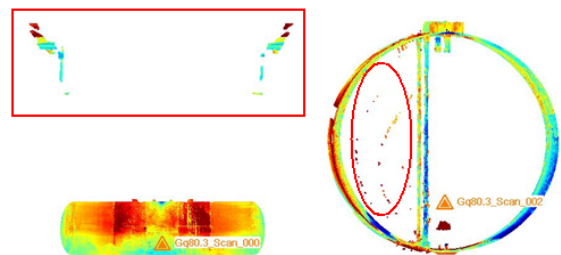
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： θ 表示指定的旋转角。

其次，去除孤立的噪点。由于三维激光扫描的轨迹是基于螺旋式的激光点高速往返完成的，我们设置一站内的扫描对象一般为连续过渡且可见，所以在一条扫描的螺旋线轨迹上的任何相邻的若干个点云 (x,y,z) 之间都应有较强的一致性。即点云按照X、Y、Z方向排列具有一致性，该一致性基于扫描设置的参数和扫描精度而确定，在对点云处理时，首先，按照顺序依次查看三维空间中有点云的部位，记录有点云部位并划分为不同的点云集合 $\{1,2,3,4,5,6,7, \dots\}$ ，在不同的点云集合中依次以点云为中心，向周围扩展并查看其周围点云部位坐标 (X,Y,Z) ，判断是否存在X、Y、Z方向排列一致性，这样直到查看完所有划分的点云部位和点云集合 $\{1,2,3,4,5,6,7, \dots\}$ ，从而可以有效剔除非连续的内部的和外部孤立的噪点，如图6所示为存在噪点的点云图，图(a)为外部非连续的孤立噪点，图(b)为内部非连续的孤立噪点。

最后，主要去除点云贴合较为紧密的噪点即对较厚的点云“墙”进行“瘦身”。依据上一步对点云进行区域划分后形成的点云集合 $\{1,2,3,4,5,6,7, \dots\}$ ，对每个集合的边缘数据 (X,Y,Z) 进行比较分析，由于

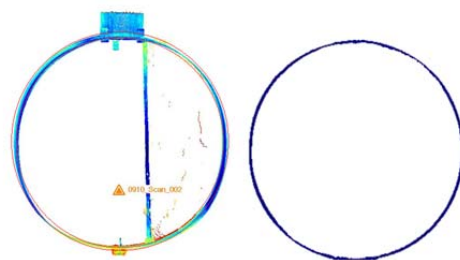
点云一致性的特点，通过逐项计算区域内X、Y、Z直到 $X_n、Y_n、Z_n$ ，从而可以确定该区域实际物体的走向 $\pm X、\pm Y、\pm Z$ ，按照走向我们设定前后 $\pm X、\pm Y、\pm Z$ 三维的变化，预设点云前后、左右、上下三维阈值范围为 $M, M \in [M_{min}, M_{max}]$ ，其中 M_{min} 为点云集内点云前后、左右、上下最小值， M_{max} 为点云集内点云前后、左右、上下最大值。通过 $M \in [M_{min}, M_{max}]$ 将点云集内有效点云进行确定，然后在三维范围内分别对X、Y、Z在同一坐标的前后、左右、上下计算其平均值 $X_A、Y_A、Z_A$ ，在该点云集内按照 $X_A、Y_A、Z_A$ 结合实际物体走向生成一个较薄的点云层，该点云层经过处理后的“薄”点云，去除了噪点，扫描点云更接近扫描真实结构。通过以上操作实现了噪点的有效处理，获取了较好点云模型，如图7所示去噪前后对比图，图(a)为去噪前较厚的点云，图(b)为去噪后较薄的点云。



(a) 外部孤立噪点 (b) 内部孤立噪点
(a) External isolated noise (b) Internal isolated noise

图6 存在噪点的点云

Fig.6 Point cloud with noise



(a) 去噪前点云 (b) 去噪后点云
(a) Point cloud before denoising (b) Point cloud after denoising

图7 噪点比较图

Fig.7 Noise comparison diagram

4 试验

通过对同一扫描对象进行比较试验,图8为采用正置扫描后采集的点云图,扫描过程移站5次。图9为采用倒置扫描后采集到的点云图,扫描过程中确定好三脚架倒置的位置,然后将中轴长度调整为1.2 m,满足入射角35°的要求。扫描获取点云后,采用新方法进行点云噪点处理,最终得到处理好的点云图。通过试验比较发现,在点云采集阶段,正置扫描需要移站5次,需要寻找特征对象,耗时45 min。倒置扫描仅需扫描1站,用时4 min。相比较可知,正置扫描工作量是倒置扫描的5倍、耗时11倍。在点云处理方面,正置扫描需要拼站且点云数据量庞大,通用软件处理耗时约50 min,对于噪点处理需要大量的人工处理且效果不理想,最终的点云图与实际结构误差大,而采用倒置扫描软件技术,点云无需拼接,点云量小,处理速度快,自动高效去除噪点,最终的点云图效果较好且与实际结构误差小。

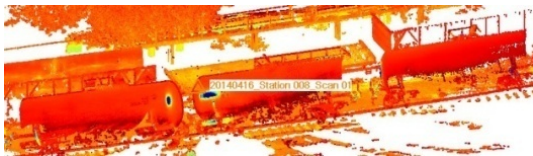


图8 正置扫描点云图

Fig.8 Forward scanning point cloud

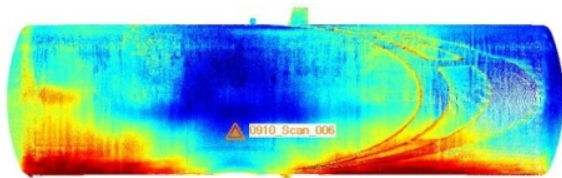


图9 倒置扫描点云图

Fig.9 Inverted scanning point cloud

采用倒置扫描技术处理后的点云效果如图10所示,点云效果较好,为后续计算奠定较好的基础。

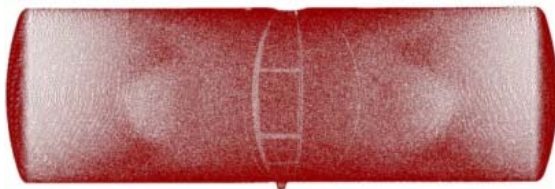


图10 去噪后的点云图

Fig.10 Point cloud image after denoising

5 结论

通过研究三维激光倒置扫描硬件、软件关键技术,较好实现了三维激光准确、快速倒置扫描,试验表明采集点云数据质量较高,可自动高效去除噪点,极大

地降低了现场工作强度,提高了工作效率,促进了三维激光扫描技术的推广应用,为红外技术在数据采集和降噪等方面提供借鉴,具有较好的技术价值和经济意义。

参考文献:

[1] 国家市场监督管理总局. 铁路罐车和罐式集装箱容积三维激光扫描仪校准规范[S]. JJF1719-2018: 北京: 中国质检出版社, 2019.
State Administration of market supervision. Calibration Specification for 3D Laser Scanner for Volume Measurements of Rail Tankers and Tank Containers[S]. JJF1719-2018: Beijing: China Quality Inspection Press, 2019.

[2] 白汉学. 三维激光扫描仪伺服控制系统与数据采集系统的设计与实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 66-92.
BAI Hanxue. Design and Implementation of Servo Control and Data Acquire System for 3D Laser Scanner[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 66-92.

[3] 蔡宽. 基于点云的三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
CAI Kuan. Research on 3D Reconstruction Technology Based on Point Cloud[D]. Dissertation of Harbin Institute of Technology, 2010: 38-86.

[4] 傅青喜. 铁路罐车容积检定与计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005:9-29.
FU Qingxi. Volume Verification and Measurement of Railway Tank Car. Beijing: China Metrology Publishing, 2005: 9-29.

[5] 邵学君. 铁路罐车(箱)容积三维激光扫描测量方法[J]. 中国铁道科学, 2014(2): 79-85.
SHAO Xuejun. Three-dimensional laser scanning method for volume measurement of railway tank car (box) [J]. China Railway Science, 2014 (2): 79-85.

[6] 孙君顶, 赵慧慧. 图像稀疏表示及其在图像处理中的应用[J]. 红外技术, 2014(7): 533-537.
SUN Junding, ZHAO Huihui. Sparse representation and applications in image processing[J]. Infrared Technology, 2014(7): 533-537.

[7] 汪开理. 三维激光点云与全景影像匹配融合方法[J]. 测绘通报, 2013(12): 131-132.
WANG KaiLi. A method of matching and fusion of 3D laser point cloud and panoramic image [J]. Mapping Bulletin, 2013 (12): 131-132.

[8] Behzad V Farahani, Francisco Barros, Mihai A Popescu, et al. Geometry acquisition and 3D modelling of a wind tower using a 3D laser scanning technology[J]. Procedia Structural Integrity, 2019(9): 712-717.

[9] 张靖, 周明全, 张雨禾, 等. 基于马尔可夫随机场的散乱点云全局特征提取[J]. 自动化学报, 2013(12): 131-132.
ZHANG Jing, ZHOU Mingquan, ZHANG Yuhe, et al. Global feature

- extraction of scattered point cloud based on Markov random field[J]. *Journal of Automation*, 2013 (12): 131-132.
- [10] 张志鹏. 基于铁路罐车(箱)容积三维激光回波强度D模型的入射角特性研究[J]. *应用激光*, 2017(4): 609-613.
- ZHANG Zhipeng. Study on the geometric characters of D-model of the 3D laser scanning [J]. *Applied Laser*, 2017(4): 609-613.
- [11] 毕超, 刘京亮, 刘飞, 等. 激光测头的光束空间矢量标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2015(12): 3775-3777.
- BI Chao, LIU Jingliang, LIU Fei, et al. Calibration method of space vector of beam for point laser sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015(12): 3775-3777.
- [12] Bruno Silva Marció, Philipp Nienheysen, Daniel Habor, et al. Quality assessment and deviation analysis of three-dimensional geometrical characterization of a metal pipeline by pulse-echo ultrasonic and laser scanning techniques[J]. *Measurement*, 2019(10): 30-37.
- [13] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. *测绘通报*, 2016(2): 143-144.
- XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(2): 143-144.
- [14] Siwei Chen, Megan L Walske, Ian J Davies. Rapid mapping and analyzing rock mass discontinuities with 3D terrestrial laser scanning in the underground excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018(10): 28-35.
- [15] Johannes Schauer, Andreas Nüchter. Removing non-static objects from 3D laser scan data[J]. *Journal of Photo Grammetry and Remote Sensing*, 2018(7): 21-26.
- [16] 郭震冬, 黄亮, 顾正东, 等. 三维激光扫描技术在古建筑测量中的应用[J]. *智能城市*, 2019(9): 1-2.
- GUO Zhendong HUANG liang GU Zhengdong et al. Application of 3D laser scanning technique in ancient building survey[J]. *Intelligent City*, 2019(9): 1-2.
- [17] Daniel Nâfors, Maja Barring, Maxime Estienne, et al. Supporting discrete event simulation with 3D laser scanning and value stream mapping: benefits and drawbacks[J]. *Procedia CIRP*, 2018(7): 1536-1541.