

# 浅析三维激光扫描技术在地铁工程测量的应用

李 泉

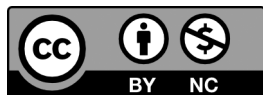
泉州市城市规划勘测设计研究院，泉州

**摘 要** | 旨在调查研究三维激光扫描技术在地铁隧道测量的应用方向和技术成熟度，为其在隧道工程测量的推广应用提供指导。近几年大量文献针对三维激光扫描技术在地铁隧道测量的应用进行了研究，本文综合分析了当前各研究方向实现方法、精度、作业效率及实际应用效果，表明：（1）在隧道中轴线提取、纵横断面及限界测量、调坡调线、三维建模等方面三维激光扫描技术应用成熟，但是作业效率需进一步提高；（2）在断面变形与收敛分析方面，激光扫描技术优势显著，得到较广泛的应用，编入到 2016 版《建筑变形测量》规范中；（3）在隧道裂缝和渗水检测方面有所尝试，但精度效率有待考证。

**关键词** | 隧道测量；三维激光扫描技术；断面测量；变形测量；断面收敛分析；三维建模

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



三维激光扫描技术改变了传统单点采集数据的作业模式，利用激光测距原理，能快速自动连续获取点云数据，从而提高数据采集效率。该技术是 20 世纪 90 年代中期激光应用研究的重大突破，已经在文物考古、建筑测绘、地形测量、交通事故调查、城市规划测量、三维仿真等领域得到推广应用。三维激光扫描

技术在地铁隧道工程测量的应用,在 2012 年之前鲜有报刊杂志报道。近几年在测绘类和土木工程类核心期刊陆续有大量论文发布,为激光扫描技术在地铁隧道工程测量的应用提供了相应的理论和实践知识,证明了技术可行性。三维激光扫描技术可在阴暗潮湿环境自动扫描,不需要人工对中、瞄准聚焦,可快速获得与线路相匹配的特征点(直缓点、缓圆点、圆缓点、缓直点等),准确测量曲线段的超高等数据。近两年的大量文献发表,通过实践和实际应用证明了激光扫描在地铁测量的优势,激光扫描技术的应用降低作业人员劳动强度,提升地铁变形测量、验收测绘的作业效率。本文对地面激光扫描技术在地铁隧道测量应用中隧道中轴线、纵横断面、限界的测量;断面变形与收敛分析;三维建模;管片接缝内壁渗水及裂缝识别等方面进行了详尽的调查和系统的分析。

## 1 现行地铁隧道测量方法

### 1.1 传统全站仪测量法

采用常规全站仪测量方法,逐级布设控制点,采集地铁车站及区间隧道特征点,结合建设单位竣工图纸绘制成果图表。投入人员多:每个小组至少需要 3 人(设站、前后视、碎步测量)。效率比较低:地下环境比较差,光线昏暗,对仪器设站对中整平、前后点的瞄准影响大,加大了导线测量的难度,严重影响了测量效率。测量精度难以控制:由于无法准确判断出区间隧道内的直缓点、缓圆点及隧道顶最高点的位置,在碎步测量中只能加大采集密度来弥补。工作人员安全隐患多:车站主体内分布有不明的坑洞,地面上堆放杂物等安全隐患,对碎步测量人员存在更多的安全隐患。

### 1.2 新型测量技术

(1) 摄影测量对环境光线要求高,限制了其在隧道测量的应用。(2) 激光隧道断面仪可以直接获取隧道断面,但其一次架站只能获得一个断面,对于长度较长、采集密度要求较高的隧道,检测耗时较长。(3) 隧道限界检测车可以快速、动态地获取等间隔隧道横断面,但其造价高,只能在铺轨后才能使用,

目前我国投入使用的数量不多。

## 2 激光扫描测量方法

三维激光扫描技术改变了传统的单点变形观测模式,使传统的点测量向“形测量”转化,同时具有较强穿透性,精度高,对环境适应能力强等优点,比较适合于地铁隧道的测量应用。孔祥玲等讨论了三维激光扫描技术在隧道竣工测量领域内应用的可行性、技术优势、测量方法和数据处理方法;王敏等结合三维激光点云测量技术,提供了基于地面三维激光扫描仪的一体化智能化隧道(地下空间)限界检测应用整体解决方案;朱宁宁提出利用三维激光扫描点云截取隧道横断面拟合椭圆进行形变监测的方法;许少辉将该技术应用到地铁隧道竣工测量中,得到了地铁隧道详实、高精度的基础数据;魏楚文开发了地铁隧道激光扫描检测小车,并对测量数据的采集、存储与处理方法进行研究,提高了地铁隧道变形监测的数据采集效率;袁海涛等提出了基于点云扫描技术实现地铁限界检测与调线调坡自动化设计,同时构建了系统的功能架构提高适用性,研究成果将进一步提升地铁限界检测及调线调坡的工作效率和质量。

### 2.1 中轴线、纵横断面及限界测量

隧道中轴线表达了隧道的姿态和走势,轴线上任取一点的法向,可作为断面截取方向,实现所截取断面与隧道的正交。在点云配准完成后,提取中轴线截取断面是激光点云隧道应用的基础步骤,现有文献的处理为:

#### (1) 边界投影拟合法

边界投影拟合将隧道点云投影到坐标平面上,然后拟合两条边界线,求取两边界任意一点的法线方向上的中点,对两列中点的均值拟合曲线,提取最终的中轴线。该方法简单实用,提取的中轴线虽然不是严格意义上的中轴线,但是提取精度能够得到保证。

#### (2) 圆柱体拟合中线法

圆柱体拟合中线法将隧道点云按照管片长度进行分割,再对分段点云拟合圆柱面,把圆柱面的轴线作为该段隧道的轴线。该方法仅适用于圆柱形隧道中

轴线的拟合提取。

### (3) 三维不变距法

李双将隧道点云分段,采用基于三维不变距的中轴线提取方法,提取了分段隧道三维空间的中轴线。该方法提取的隧道点云不受隧道形态影响,具有旋转平移不变性。

### (4) 快速成型技术切片拟合法

何桂珍等利用快速成型技术进行切片,提取断面点云,采用点云切片拟合法提取中轴线。上述各方法提取的轴线不同,但仅作为截取断面、定位里程的基线,并不影响后期断面点云提取和拟合。因此,王令文等则直接采用隧道设计中轴线为基准提取隧道横断面,也得到了理想的实验结果。在轴线提取基础上,王文旭等、王敏等进行了地铁隧道调线调坡、纵横断面测量、限界测量等方面的研究,经实际应用,测量精度均能满足规范要求,但是测量作业效率有待提高。

## 2.2 断面变形与收敛分析

沿隧道中轴线设定等距间隔点,与中轴线正交截取断面,依据截取的断面点云技术形变值进行收敛分析。根据比较对象不同,收敛分析方法分为两种:与设计值比较、两期点云比较进行形变分析。与全站仪测量结果进行比较确定激光点云数据是一种更为有效可靠的形变监测手段。李理等将三维激光扫描技术与常规测量方法相结合,用于隧道收敛测量及运营维护等形变监测,并对提取的断面形变信息进行了精度分析与验证,试验结果点位均方差  $\pm 5.3\text{mm}$ ,距离均方差  $\pm 2.4\text{mm}$ ,分别满足城市轨道交通工程测量规范中变形监测级所要求的  $\pm 6\text{mm}$  和  $\pm 8\text{mm}$ ,证明了该方法的可行性和有效性。刘绍堂等提出了采用隧道多点整体监测取代传统单点监测的方法,将三维激光扫描技术应用于隧道变形监测领域,通过两期隧道断面点云比较,收敛变形最大值在  $18\text{mm}$  以内、拱顶下沉在  $8\text{mm}$  以内,隧道断面的变形接近一个扁平椭圆的结构,与传统测量方法得到的结果一致。何桂珍等通过截取隧道断面点云数据拟合圆,提取圆心坐标和半径,与设计值比较计算进行收敛分析;比较两期点云(间隔  $3\text{d}$ )的坐标

值,计算日安全位移 1mm,日稳定位移 0.3mm,满足规范要求。史玉峰等通过对隧道两期扫描数据模型进行叠加分析,得到隧道纵横断面上的整体位移量。谢雄耀等研究了基于地面三维激光扫描技术的隧道相对变形测量方法,以全站仪的测量结果为基准,验证了该方法在隧道相对变形测量中的可靠性。王令文等通过截取的点云分别同标准圆、全站仪测量的结果进行了比较;各个断面最大变形均在 2cm 左右,但在里程 23309 到里程 23344 的最大变形量出现较大变动,在里程 23321.801 和里程 23337.398 断面变形最大达到 10cm。经现场查实,该地段有堆土现象,使得隧道管壁出现大的变形。

## 2.3 地铁隧道三维建模

建立地铁隧道三维模型,实现地铁隧道更为直观地展现及地铁环境的虚拟漫游,有助于隧道验收和后期运营阶段的管理。建模方法大致分为三角剖分建模和断面拟合建模。

### (1) 三角剖分建模法

史玉峰等基于 NURBS 曲面理论方法建立了扫描隧道点云数据的三维模型。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,使用抽稀后的点云数据构建地铁隧道模型;上述方法建模精度高,但是点云面片不规整,一般情况下数据量大,不利于后期渲染计算与三维漫游。

### (2) 断面拟合建模法

谢雄耀等提出一种基于点云的隧道三维建模算法,运用误差分布统计规律进行降噪,通过将圆柱面拟合和椭圆拟合结合的方法建立了隧道三维模型。该方法通过拟合失去了真实形状信息,但是所建模型面片规整,数据量小,便于渲染计算和浏览查看。

## 2.4 管片接缝内壁渗水及裂缝识别

王令文等研究了三维激光扫描技术在隧道检测中的应用,结合扫描仪获得的影像数据进行渗水、裂缝分析。实验表明,采用该检测技术可得到可靠的隧道检测信息,对隧道检测具有一定的实用价值。近年来,GRP5000 激光全息成

像扫描系统在地铁隧道裂缝、渗水、掉块等病害识别方面有所应用,其作业流程简单,更利于数字化管理,但是目前识别效率相对较低且裂缝存在易误识问题,自动化程度需进一步提高。

### 3 结论

通过上述文献的调查研究,激光扫描技术应用于地铁隧道测量,具有精细化、自动化特点,适应于地铁隧道的恶劣作业环境,目前技术已较为成熟,但是测量效率方面仍有待提高。具体应用情况如下:(1)基于三维激光扫描技术获取的点云数据能够准确提取轴线,准确地进行断面测量、限界测量、调线调坡及三维建模,目前已得到实际应用。(2)激光点云具备较高的相对精度,能够获取高精度的隧道断面“形”信息,其观测成果能表达断面内或测量空间范围内多方位的净空变形,解析数据可导出多个监测点相对于基准点(线)的距离及其变化、或多组对应监测点间矢量长度及其净空变形,是目前隧道测量中最成熟的应用方向,已纳入到《建筑变形测量规范》中。(3)在隧道渗水、裂缝识别方面,单独采用激光点云,其分辨率远远达不到识别裂缝的程度,而渗水对材质反射率的影响,使得渗水区域易于被探测,但是应用案例较少,识别精度及实用性有待考证。

### 参考文献

- [1] 王峰,林鸿,李长辉.地面三维激光扫描技术在城市测绘中的应用[J].测绘通报,2012(5):47-49.
- [2] 何桂珍,杨军.地铁隧道收敛变形监测方法的研究现代隧道技术[J].2016,53(3):105-110.
- [3] 许少辉.地面三维激光扫描技术在地铁隧道竣工测量中的应用[J].城市勘测,2016(6):68-72.
- [4] 刘海辰,王鑫森,朱俊鹏.激光全息成像扫描系统在地铁结构健康检测中的应用[J].施工技术,2017(S1):779-781.

# Analysis of the Application of 3D Laser Scanning Technology in Subway Engineering Measurement

Li Quan

*Quanzhou Urban Planning Survey and Design Research Institute, Quanzhou*

**Abstract:** The aim is to investigate and study the application direction and technical maturity of 3D laser scanning technology in subway tunnel measurement, and to provide guidance for the popularization and application of tunnel engineering measurement. In recent years, a large number of literatures have studied the application of 3D laser scanning technology in subway tunnel measurement, and this paper comprehensively analyzes the current research direction implementation methods, precision, operational efficiency and practical application effect, indicating: (1) in the tunnel axis extraction, cross-sectional and limit measurement, slope adjustment line, 3D modeling and other aspects of 3D laser scanning technology application mature, but the operating efficiency needs to be further improved; (2) In the aspect of section deformation and convergence analysis, laser scanning technology has significant advantages, has been widely used, and is incorporated into the 2016 edition of the “Building Deformation Measurement” specification; (3) There are some attempts in tunnel cracks and water seepage detection, but the accuracy efficiency has yet to be verified.

**Key words:** Tunnel measurement; 3D laser scanning technology; Section measurement; Deformation measurement; Section convergence analysis; 3D modeling