

基于LiDAR技术的轨道交通地下区间三维信息模型重建技术研究

高章超 陈琳

上海市隧道工程轨道交通设计研究院 上海 200235

摘要：随着BIM技术等数字化手段的应用，近几年上海地铁在新建线路中提出了数字化交付的目标，将三维空间数据从建设期沿用至漫长的运维期，面对上海地铁长期运营维保和对部分老旧线路进行大修改造的庞大需求，需要一套完整的轨道交通空间数据作为支撑，目前对既有线地下空间三维信息模型的重建，现场核对工作量大、复测效率低、作业时间短。针对上述问题，本文提出了基于LiDAR技术对轨道交通地下区间进行360°全断面移动式激光扫描，采用新一代2D断面激光扫描仪+轨道检测车，不依赖惯性导航等外加传感器即可复原地下空间三维数据，具有低成本、高效率、高精度的特点；提出了以统一里程为媒介，对区间隧道进行三维线性复原，并建立2D断面扫描到空间三维的映射关系；研究了地下区间空间三维数据高效复原和轨旁设施设备的精准里程和空间三维定位，同时基于区间快速建模插件进行逆向建模，大幅提高建模效率。

关键词：激光雷达测量技术；轨道交通；三维信息模型；逆向建模

1 引言

截至2024年1月，全国共开通运营城市轨道交通线路308条，运营里程超过1万公里，上海地铁从1993年迈入地铁时代以来，最早的轨道交通线路已开通运营超过30年，地下隧道区间作为轨道交通及其重要组成部分，其运营维护保养关乎地铁运营安全和乘客体验度，而传统铁路运营维护中耗时耗力的人工上线巡检方式存在作业效率低、作业安全等问题，已满足不了日益增长的现场复测需求。无论是对既有轨道交通线路地下区间开展定期复测，用于隧道管片错台、多期断面变化、结构变形监测、渗漏水检测及裂缝识别^[1]、衬砌表面病害识别、接触网导高检测^[2]、限界检测等应用，还是基于BIM、倾斜航摄等数字化技术建设轨道交通空间数字基础设施，实现现场设施设备管理从粗放式走向精细化，提升运营维保质量、对既有运营线路开展复测和建设轨道交通空间数据库已经逐渐成为一种趋势。一些即将面临大修改造和开通时间较早的线路，存在图纸缺失、管理台账的数据与现场存在偏差等问题，导致运营维保管理对象不清晰、数字化手段较为缺乏，因此对地下区间开展现场复测和重建三维信息模型具有十分重要的意义。

2 移动式激光雷达（LiDAR）测量技术

传统测量方式对轨道交通运营中线路的采集复测通常采用接触式的测量方式，包含使用全站仪、水准仪、收敛计等测量仪器进行人工上线测量，存在作业工序

多、测量效率低、受人为影响较大和安全隐患等问题，尤其对于上海地铁来说，列车运营时间较为密集，能够集中对运营中的线路开展数据采集的“天窗期”时间非常之短。随着数字化和新型测绘技术的快速发展，工程测量和数据采集向着多传感器、多角度、多分辨率、多数据融合等方向发展，激光雷达（Light Detection and Ranging, LiDAR）技术作为一种全新的非接触式快速测量技术，具有高效率、高精度、数据量大、数字化程度高等特点^[3]。激光雷达测量的原理是通过激光发射器向被测断面发射激光脉冲，经过被测断面反射，部分反射回来的激光能够被接收器所接收，通过测量激光发射与接收的时间差，即获得激光发射中心到被测断面的距离，其激光测距精度可达到毫米级别，并可在短时间内采集到海量的数据点（扫描速率可超过1百万点/秒）。使用搭载在移动平台的激光雷达设备对隧道区间进行扫描，可以快速获取轨道交通轨行区域高密度、高精度的点云（Point Clouds）数据。

激光雷达测量在铁路与轨道交通工程中的应用十分广泛，北京地铁、南京地铁、宁波地铁等利用移动式激光扫描技术，通过螺旋扫描获取隧道断面连续数据，最后利用软件提取每一个隧道断面点云数据信息，来分析隧道区间的整体情况，提高了隧道变形收敛、错台、病害识别和结构监测的效率。但移动式激光扫描本质上是一种2D的断面扫描方式，本身在缺乏GNSS信号（Global Navigation Satellite System）的地下区间的扫描数据不具备空间绝对位置信息，需要依赖定位定姿系

项目：上海申通地铁集团有限公司科研计划项目（QN23R005）

统 (Positioning and Orientation System, POS), 后者需要集成多种不同种类的传感器, 同时以控制点数据进行纠正^[4], 其误差来源和特征十分复杂, 组合惯导 (Inertial Navigation System, INS) 技术发展, 使得POS解算的精度达到了理论上的厘米级, 但缺乏系统地比较分析和可靠度验证。

如何基于LiDAR测量技术, 获取运营轨道交通线路地下区间准确的空间位置信息, 开展区间盾构结构、附属设施及轨旁设施设备三维信息模型逆向重建, 是本文主要的研究内容。

3 运营地铁线路地下区间数据采集与逆向建模技术路线

一些项目上对铁路和轨道交通隧道区间进行移动激光扫描, 主要目的是对隧道结构进行断面分析, 用于隧道收敛、变形监测、病害识别等用途, 并按照断面的相对位置进行隧道内的病害定位。通过距离测量装置如安

装在轨道检测车的车轮旋转轴上用于精确量算车辆行驶线性距离的编码器, 把脉冲计数求和得到距离增量, 从而得出旋转车轮移动的距离, 在此基础上, 对扫描数据进行一定的线性排布, 得到相对位置准确的点云数据, 有些没有安装编码器的, 甚至只要求对扫描得到的螺旋线数据进行简单拼接, 对病害做定量分析和粗略定位。但上述场景都不涉及扫描点云数据的三维空间复原, 地下空间的三维空间精确定位一直是业内难题, 本文以上海轨道交通某条运营线路的某段盾构区间工程为背景, 针对该区间及附属设施设备测量空间定位及三维信息模型逆向重构问题, 应用LiDAR技术对该段盾构区间进行移动式激光雷达测量, 采集360°全断面数据, 提出了基于线路平纵曲线要素数据和实际现场轴线复测数据对隧道三维线形进行复原, 获取三维空间下的准确里程和坐标数据, 最终使用基于Autodesk Revit平台的快速建模插件创建三维信息模型的完整技术路线 (如图3-1)。

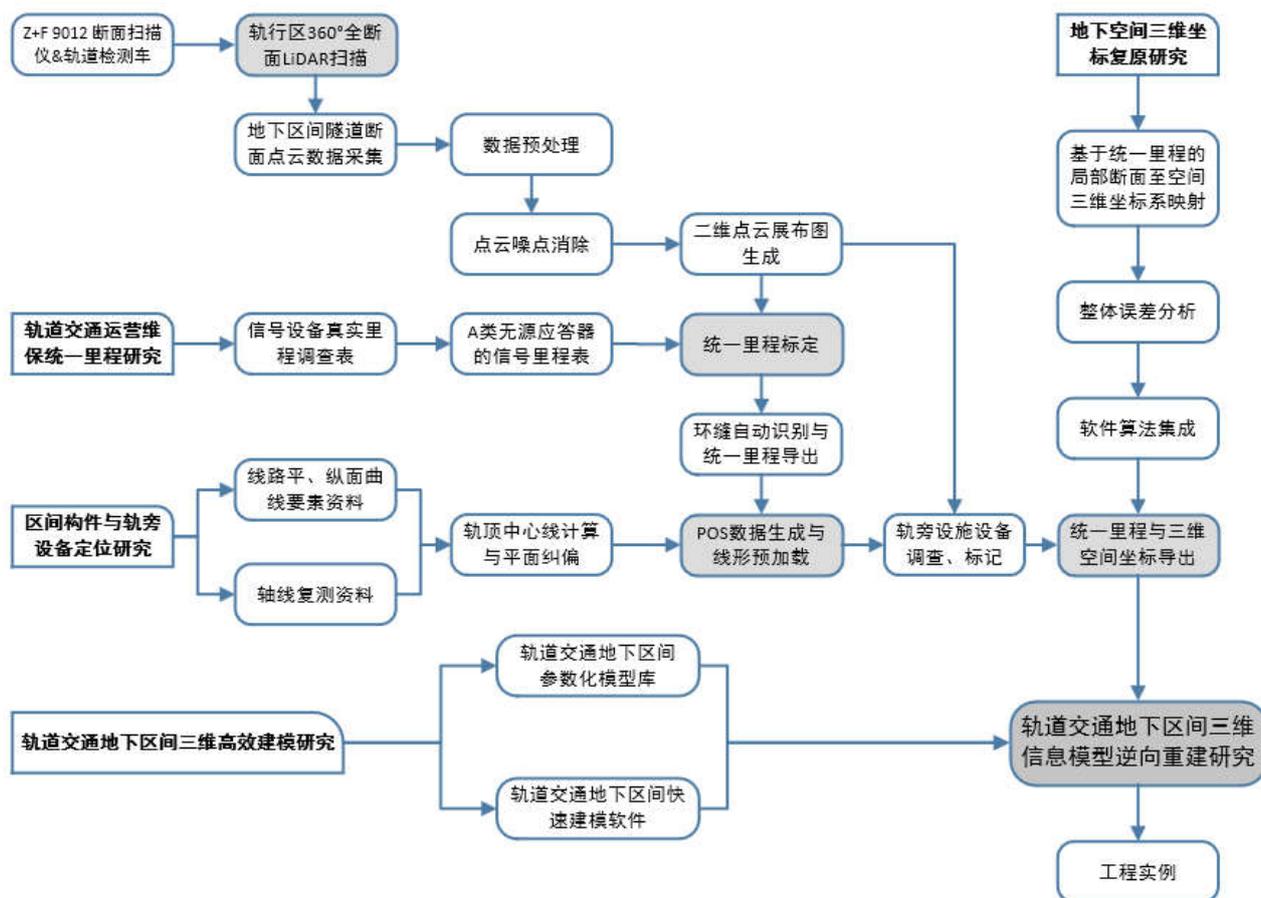


图3-1 技术路线图

3.1 实现基于信号设备的线路统一里程

此前在上海轨道交通运营线路的里程管理中, 轨道

专业使用KP里程、线路和建筑专业使用城市三维坐标、信号专业使用区段号+偏移量的信号里程, 供电专业使用

定位杆、锚段关节号来确定现场位置，各专业里程定义不统一，加上现场标识牌安装存在较大误差，部分设施设备台账表存在重复、缺失等问题，导致运营维保在设施设备管理方面存在多专业联动困难、沟通协调口径不一致的现象，影响现场联合施工和作业定位。2022年上海地铁提出统一各维保专业的里程坐标，里程方面各专业按照不含断链数据的信号设备所在里程统一进行定位管理。

3.2 建立基于统一里程建立局部断面至空间三维间的映射关系

隧道激光断面扫描采集系统各单元所处的坐标系不统一，需在数据处理阶段进行坐标系逐步转换^[5]，以统一里程为媒介，最终得出三维空间绝对坐标下的准确位置关系。

a) 扫描坐标系

坐标系原点位于激光发射器中心，激光测距系统通过测量激光束的相位差来精确计算原点距目标点的距离，通过编码系统中的角度编码器记录垂直角度和水平角度，再与目标点的距离同时编码，形成目标点在极坐标系中的一个坐标位置，再转换至直角坐标系。

b) 隧道断面坐标系

轨道交通的铁轨由两条平行的钢轨组成，钢轨之间的间距固定，隧道激光扫描处理软件利用这种结构上的显著特征，自动识别出高反射强度的钢轨点云，据此提取出轨顶面中心的“种子点”，并以该点为原点建立直角坐标系，并平移、旋转横断面点云数据获取隧道断面^[6]。实现上述扫描坐标系与隧道断面坐标系的坐标换算，主要在于消除激光发射器与钢轨顶面之间的高度差，这个参数在单套采集系统中一般为固定值。

c) 基于统一里程的三维空间坐标映射

为实现隧道断面坐标系对应至三维空间，本文提出基于线路平、纵曲线要素数据，并以某个不受长短链影响的里程为起点位置，生成线路的三维中心线，并结合基于现场沉降观测点（布设于轨枕或道床轴线附近）的轴线复测数据进行纠偏，纠正后的中心线位于轨顶面高度上、平行轨道的中线位置处。经过统一里程标定后，将追踪到的点云轨顶面中心“种子点”对应至给定的上述线路三维中心线上，实现扫描的局部断面坐标系映射至绝对坐标系下的三维空间之中（如图3-2），与此同时也赋予了点云数据的三维位置关系。

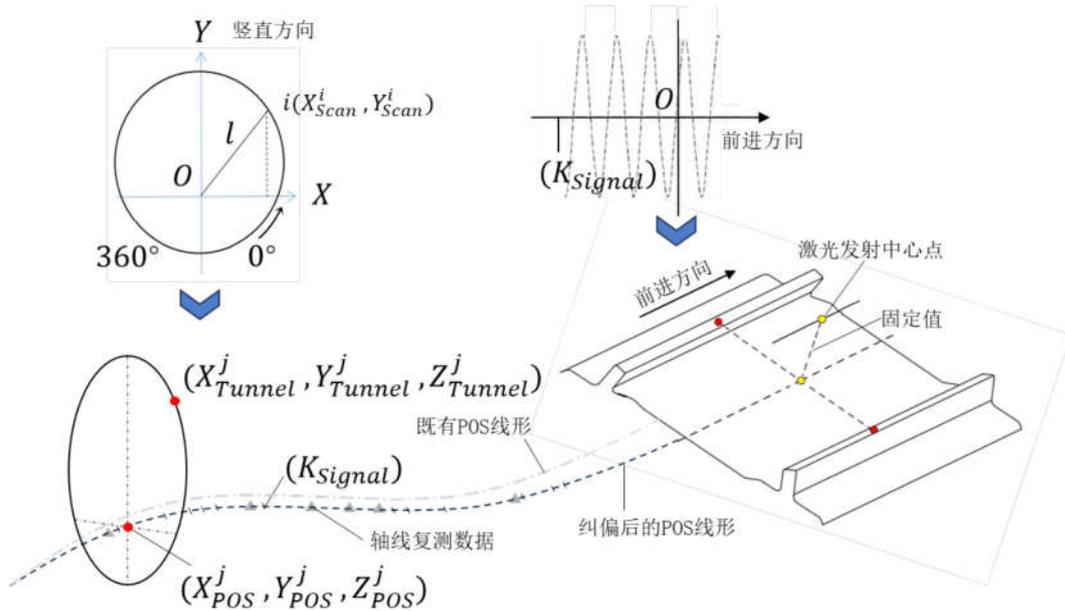


图3-2 局部断面坐标映射至三维空间

3.3 地下区间空间数据复原与逆向建模

利用LiDAR技术，一次扫描即可采集当前时空下的轨行区全断面高精度测量数据，并经过数据处理最终实现地下隧道区间的三维空间数据复原。本文提出了基于复测的信号设备里程进行统一里程标定，保障扫描数据成果的线性里程精度，使用测距误差 $\leq 1\text{mm}$ 的高精度激

光雷达测量设备，数据处理软件内置稳健估计拟合、距离（强度）阈值、K-Means聚类算法剔除点云噪声点，确保断面解算精度，并基于统一里程和隧道三维线形，逐环计算前后管片环缝所在位置的钢轨顶面“种子点”三维坐标，实现隧道局部断面坐标系至三维坐标系的精准映射，最终以多维度精度保障，实现厘米级的地下区

间各专业构件和轨旁设施设备精确定位的技术路线。据此本文研究了基于快速建模插件的区间三维信息模型逆向重建,对隧道区间内部结构、轨道、给排水、接触网、动力照明、通信信号等专业构件和轨旁设施设备创建三维信息模型,利用成熟的参数化模型库等工具提升建模效率。

4 地下轨行区间空间数据采集与处理

4.1 数据采集

一套完整的隧道激光扫描采集系统由电动轨道检测车、激光雷达测量设备、平板电脑、一体化专用电池、遥控器及线材配件等组成,采用新一代Z+F PROFILER 9012激光断面扫描仪,其点云扫描速度高于1百万点/秒,断面扫描速度高达200转/秒,集成于电动轨道检测车上,可进行全断面360°、高精度、高密度的移动快速扫描。使用隧道激光扫描采集系统对上海轨道交通某条运营线路的某段盾构区间工程进行了激光断面扫描,扫描采用中速(3.6km/h)模式,在夜间的“运营空窗期”内开展扫描作业。

4.2 数据处理

a) 统一里程标定与隧道线形加载

使用隧道激光扫描数据处理软件对扫描的.zfs格式原

始数据进行加载和预览,将三维点云投影到二维平面生成二维预览影像图(展布图),在展布图中逐一对现场实测复核后的信号专业A类信标(无源应答器)逐一标记其所在信号里程,赋予各扫描断面以统一里程数据,同时对以电机驱动的轨道检测车存在的匀速里程误差(约3‰)进行纠正,并处理外业扫描时不可避免的设备中途停车、间断扫描数据。软件基于展布图自动识别盾构管片环缝及其所在统一里程,加载纠偏后的线路隧道三维线形后,自动逐环计算当前环缝位置的轨面中心点三维坐标,对于车站站台和矩形段结构部分,计算点的间距根据是否位于直线段、缓和曲线段、圆曲线段上而适当放宽要求,但均不大于5米。隧道线形加载后,软件、按插值法计算展布图上的任意位置处的三维空间坐标。

b) 轨旁设施设备调查与标记

对运营线路的轨旁设施设备调查,由维保各专业公司的工程师基于数据处理软件和点云展布图进行标记定位(如图4-1),软件可计算标记点或标记几何中心所在统一里程和空间三维坐标并支持导出。此外,根据统一里程逆推得到的各专业原始里程数据,亦可对比既有台账数据,减轻现场复核工作量,提升维保管理力度和效率等,本文不再赘述。

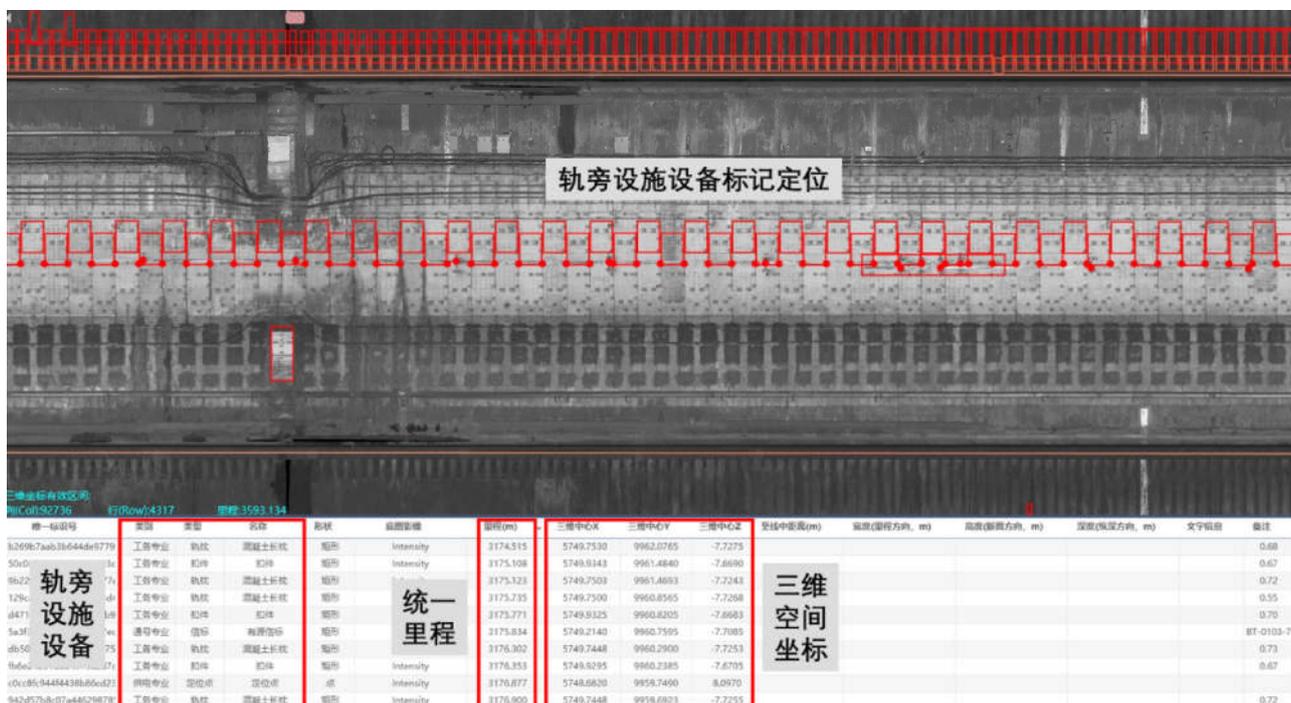


图4-1 基于数据处理软件的轨旁设施设备标记定位

5 地下区间三维信息模型逆向重建

传统方式对既有线地下区间三维信息模型的创建依赖于准确的图纸、台账等资料,才能实现对轨行区的隧

道结构、轨道、动力照明、接触网等设施设备进行复原。由于长期运营期间现场设施设备存在更新变化,施工或竣工图纸、台账等现有资料与现场存在较多不一致

性，因此基于图纸、台账等资料复原的三维模型很难确保设施设备位置和数量与现场保持一致、无遗漏，因此本文提出了基于LiDAR技术的地下区间空间数据采集成果复原地下区间三维信息模型的方法。根据第4章节数据处理成果，可以快速得到标记轨旁各专业设施设备的统一里程、空间位置（XYZ坐标），基于里程或空间三维坐标，可快速、准确地创建地下区间三维信息模型。

案例项目基于Autodesk Revit环境，通过 Revit API 二次开发，研究基于线路要素以及设施设备空间坐标的轨道交通区间快速建模软件，在地下区间曲线段结合曲线参数和轨道超高，计算实际的隧道中心线，能够对盾构管片、轨道专业等依托于线性定位的构件进行精确装配，实现在Revit软件上进行地下区间的精确建模。同时结合从采集的点云数据中获取各设施设备的空间坐标信息，从而确保创建的轨旁各专业设施设备三维信息模型的空间位置与现场保持一致，解决传统基于图纸等资料建立三维信息模型与现场不一致问题。

5.1 地下区间三维信息模型创建技术路线

1) 建立各专业设施设备参数化模型库。根据各专业

的设施设备类型及实际运维需求建立参数化模型库，覆盖结构专业的地下区间各类型管片、联络通道、特殊管片、疏散平台等；轨道专业包括预制道床板、轨枕、扣件等；动力照明专业包括应急照明灯具、疏散指示灯、配电箱等，以及其他各专业设施设备模型。

2) 实现基于线路数据的各类设施设备空间定位。通过设计师使用的线路设计软件接口开发，自动录入或手动输入线路设计的平纵曲线参数，通过Revit API 调用线路参数根据里程进行坐标、高程实时计算，为设施设备布置提供空间定位信息。

3) 研究各专业设计和建模规则及构件放置的算法，并与参数化模型库进行关联，实现盾构管片、轨道、联络通道、机电设备等专业构件的精准布置。

4) 对于上述方式不能覆盖的设施设备，按照第4章节轨旁设施设备方法，直接基于点云展布图进行标记并获取此部分设施设备的统一里程、空间三维坐标数据，结合设施设备参数化模型库快速布置模型。

技术路线图如图5-1。

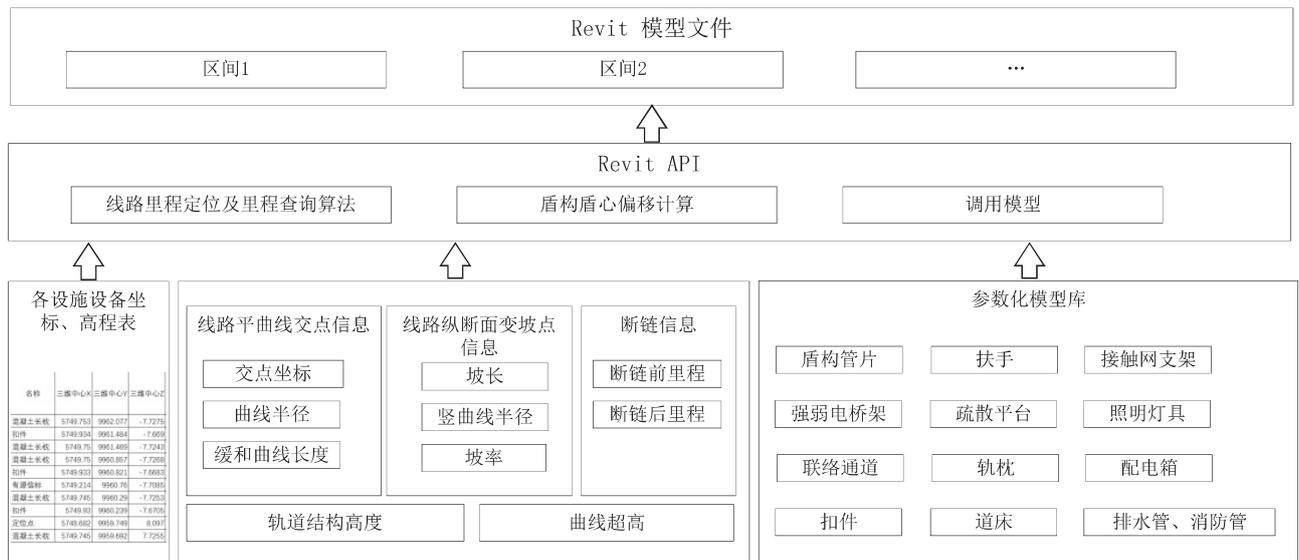


图5-1 地下区间三维信息模型逆向重建技术路线

5.2 设施设备布置

轨道交通地下区间设施设备结构形式可大致分为两种，一种为点状设施设备，如管片、扣件、轨枕、强弱电桥架、照明灯具、疏散指示灯等，另外一种为线性设施设备，如钢轨、整体道床、排水管等。不同结构形式的设施设备布置方式不同。

a) 点状设施设备布置

对于点状设施设备，按里程或等间距计算出空间定

位信息，通过轨道交通区间快速建模软件，根据坐标或等间距进行模型布置，在曲线段结合超高数据对模型围绕线路中心线进行旋转（如图5-2）。

b) 线性设施设备布置

对于现浇道床、钢轨等线性结构，可通过轨道交通区间快速建模软件，先等间距布置道床外轮廓（自适应族样板）模型，然后通过外轮廓的拟合方式来形成线性模型。另外，由于运维部门对线性结构也有维护分段的

要求, 可通过Revit多点自适应构件, 按最小维护尺度布

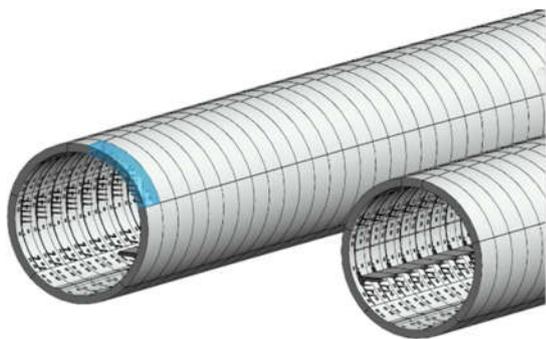


图5-2 点状设施设备布置示例

置线性模型, 解决线性构件分段问题。

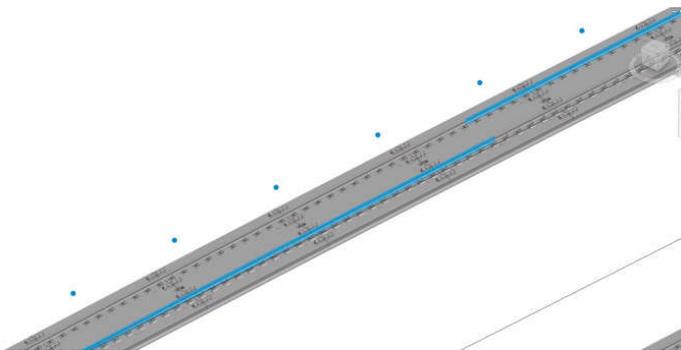


图5-3 线性结构模型布置示例

5.3 应用案例

本项目以上海轨道交通某运营线路某地下区间为例, 对该区间采用双圆盾构管片, 使用轨道交通区间快速建模软件, 逆向重建的区间三维信息模型与现场采集的空间三维点云数据高度融合, 从而达到了区间各专业设施设备空间数据与实际现场一致的目标, 确保了三维空间数据的准确性。

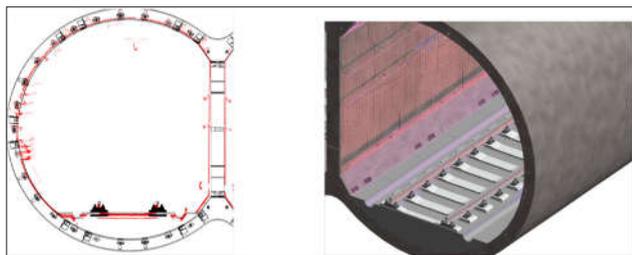


图5-4 模型与点云数据融合示例

6 结语和展望

本文提出了基于LiDAR技术的轨道交通地下区间走行区空间数据采集和三维信息模型逆向重建的完整技术路线, 对轨道交通数字基础设施搭建、既有城市轨道交通运营线路的快速测量、维保公司各专业轨旁设施设备调查等存在一定的借鉴意义。但仍存在一些不足之处, 同时展望需要继续研究的方向。

(1) 目前依据轴线复测数据对线路中心线的调整方式依旧以人工调整为主, 依赖线路设计或相关专业人士的经验, 缺乏对整个线路的考虑, 导致调整后的偏差情况可能仍然存在, 应研究通过优化算法更智能地对线路平、纵曲线要素等线路参数进行领域内的微小调整, 从而形成最终校核、纠偏的线路。

(2) 在一些隧道裂缝、渗漏水等病害识别的应用场景下, 将高清相机进行环向线阵排列, 与激光雷达扫描

设备集成或以牵引方式同时进行扫描, 数据融合后能更好地提高数据精度, 此外, 将彩色线阵相机拍摄的高清图像处理后, 还可作为建模贴图, 提升建模精细度。

(3) 随着机器学习、人工智能等技术的发展, 应研究应用该技术, 训练直接基于点云或基于图像数据, 提高对轨旁设施设备、隧道结构与表观病害等目标的智能辨识效率和准确度, 以及基于人工智能技术对点云数据进行语义分割和快速逆向建模, 提升三维信息模型创建效率。

参考文献

- [1]陈昌文.基于三维激光扫描技术的隧道渗漏水检测及裂缝识别[D].重庆交通大学,2023.DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.000464.
- [2]卢建军,黄小斌,吴勇等.基于移动三维激光扫描技术的地铁隧道接触网高检测新方法[J].城市轨道交通研究,2024,27(01):200-205+209.DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.036.
- [3]陈明安.地铁盾构隧道激光扫描海量数据处理及应用研究[D].北京交通大学,2016.
- [4]丁孝兵,高志强,杨坤.基于惯导和CPⅢ控制点的地铁隧道移动激光扫描三维点云重建[J].测绘通报,2021,(09):112-115+129.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0285.
- [5]吕静.地铁隧道内线路平纵断面调整方法研究[D].石家庄铁道大学,2023.DOI:10.27334/d.cnki.gstdy.2023.000946.
- [6]艾中亮,鲍艳,郭飞等.基于三维激光扫描技术的地铁盾构隧道中轴线高程提取方法[J].城市轨道交通研究,2023,26(03):68-71+77.DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.013.