

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.017

# 三维激光扫描仪在排水管网测量中的应用

崔家武, 李海军, 曾波, 甄兆聪

(广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510060)

**摘要:** 随着城市地下管线信息化管理、表达和应用从二维向三维延伸,可利用三维激光扫描及点云建模技术开展三维管网建设工作。以某排水管网为研究案例,采用架站式激光扫描仪和移动式激光扫描仪对排水管网进行扫描,主要介绍了两种扫描方式的技术要点及优缺点,最后对管网扫描精度进行了分析。结果表明,采用三维激光扫描仪测量排水管网,可以解决传统二维管线空间关系不明晰、显示效果不直观等问题,此次研究可为未来大规模开展管网激光扫描工作提供经验。

**关键词:** 排水管网; 架站式激光扫描; 移动式激光扫描; 点云

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0099-07

## Application of 3D Laser Scanner in Drainage Pipe Network Measurement

CUI Jia-wu, LI Hai-jun, ZENG Bo, ZHEN Zhao-cong

(Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** With the extension of urban underground pipeline information management, expression and application from two-dimension to three-dimension, 3D laser scanning and point cloud modeling technology can be used to carry out 3D pipe network construction. Taking a drainage pipe network as a case, this paper studies the scanning of drainage pipe by using stand-up laser scanner and mobile laser scanner, mainly introduces the technical points, advantages and disadvantages of the two scanning methods, and finally analyzes the scanning accuracy of the pipe network. The results show that using 3D laser scanner to measure the drainage pipe network can solve the problems of unclear spatial relationship and unintuitive display effect of traditional 2D pipeline, which can provide experience for future large-scale pipeline network laser scanning work.

**Key words:** drainage networks; stand-up laser scanning; mobile laser scanning; point cloud

排水管网是城市重要的市政基础设施,具有防洪排涝、水污染防治等功能。排水管网竣工测量可以获取排水管网的空间属性信息,从而为管网建库及运营管理提供数据支持。长期以来,排水管网主要利用全站仪/RTK(Real Time Kinematic)测量仪获

取排水井空间坐标,利用钢尺、L形测深杆等工具量取管道埋深及尺寸,必要时需要人工下井进行测量;管网数据采集完成后,利用“点”“线”“面”绘制管网二维平面图,最后录入管道埋深、材质、管径等重要属性。

基金项目:广州市城市规划勘测设计研究院有限公司科技基金项目(2022科研<测>13)

通信作者:李海军 E-mail: 920955669@qq.com

随着城市的发展,地下管线越铺越密,其空间关系错综复杂,二维管网图在地下管线设计、建设及运营管理中逐渐捉襟见肘;响应实景三维中国建设、建设三维地下管线数据库已成时代趋势<sup>[1-5]</sup>。建设三维管网需要获取地下管网详细空间信息,传统“全站仪测点、钢尺量深”的测量手段不再适用。三维激光扫描仪具有强大的空间数据获取能力,是三维管网数据获取的有效技术手段<sup>[6-7]</sup>。以某排水管网测量为例,研究利用架站式激光扫描仪和移动式激光扫描仪对排水管进行测量,探索内外业技术要点,分析管网扫描精度,为今后大规模开展管网激光扫描工作提供借鉴。

### 1 三维激光扫描技术

激光扫描仪主要由激光发射系统、激光接收系统、扫描系统和信息处理系统组成<sup>[8]</sup>。激光发射系统发射激光,激光遇到障碍物后反射并由激光接收系统接收,通过测量激光信号由发射到接收的时间差或者相位差,可以获得距离信息;扫描系统利用马达带动激光测距模块沿水平或竖直方向快速旋转,以实现激光扫描;信息处理系统综合激光测距信息和发射角度信息,可以获得所有测点的相对三维空间坐标。

根据工作模式不同,三维激光扫描仪可分为架站式激光扫描仪和移动式激光扫描仪,其中移动式激光扫描仪按照载体不同,又可分为手持式、背包式、车载、船载、无人机载等类型。

#### 1.1 架站式激光扫描原理

架站式激光扫描原理较为简单,首先按照仪器有效测距将作业区域分成多个子区域,再逐站进行扫描,最后将各站扫描的激光点云进行拼接。架站时可将激光扫描仪架设于控制点上或者地面任意位置,在静止状态下完成单站扫描,再搬至下一站扫描。测站间扫描区域需要一定的重合,以实现测站间点云的拼接,一般可利用公共标靶或者公共特征进行拼接。点云整体拼接结束后,可利用控制点标靶对点云进行整体坐标转换,从而赋予点云绝对坐标。

#### 1.2 移动式激光扫描原理

相对于架站式激光扫描,移动式激光扫描系统更为复杂,其作业方式也相对灵活。移动式激光扫描即激光扫描仪需要在运动状态下进行扫描,并实

时进行点云拼接和建图。为实现移动式扫描,激光扫描系统通常融合了GNSS(Global Navigation Satellite System)定位、惯导和SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)等技术。

SLAM是同步定位与地图构建技术,指运动系统根据传感器信息一边计算自身位姿、一边构建地图,其中定位与建图是相互耦合的过程,一方面系统根据实时位姿可以增量式构建地图,另一方面系统将重复观测到的特征与地图特征进行匹配可以确定自身位姿,即两者相辅相成,互为统一。

根据传感器不同,SLAM可分为激光SLAM和视觉SLAM。激光SLAM是利用激光雷达对周围环境进行实时扫描,通过点云特征匹配定位和建图,主要包括激光点云去畸变、点云特征提取、位姿估计、优化建图等步骤<sup>[9]</sup>。视觉SLAM利用相机获取周围环境信息,其原理是通过图像序列特征像素的运动来推算相机的运动<sup>[10]</sup>。视觉SLAM主要包括特征提取、特征跟踪、闭环检测、地图构建和位姿估计等步骤<sup>[11]</sup>。两者的区别是激光SLAM通过激光传感器测量环境几何信息,可以直接得到距离和角度等信息,适用于室内、室外等比较结构化的环境,可以在较长距离上实现较高的定位精度;视觉SLAM利用相机获取环境图像信息,主要基于图像纹理、色彩等提取特征进行定位和建图,适用于室内、室外光照充足、均匀等环境,其精度相对低于激光SLAM。此外,惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)也经常作为SLAM的辅助传感器与激光雷达/相机进行组合<sup>[12]</sup>,IMU由加速度计和角速度计组成,能够对单传感器SLAM系统的位姿信息进行校正或补充。

激光SLAM在诸如隧道、长廊等缺乏特征或结构单一的环境中,容易出现精度下降甚至失效等情况,而视觉SLAM易受光照、纹理等因素影响,尤其是单目相机存在尺度不确定、尺度漂移、需要初始化等问题,故融合激光雷达、相机和惯导等多种传感器是提升SLAM系统精度和鲁棒性的有效途径<sup>[13-15]</sup>。

### 2 数据采集与处理

#### 2.1 三维激光扫描仪

实验采用的三维激光扫描仪为徕卡公司生产的BLK2GO和BLK360(见图1),其中BLK2GO是手

持式移动激光扫描仪, BLK360是站式静态激光扫描仪,两款扫描仪的主要技术参数见表1。BLK2GO集激光雷达、SLAM、全景相机、IMU等技术于一体,能够以三维点云和图像的方式记录目标物。BLK2GO将激光SLAM和视觉SLAM进行融合,推出GrandSLAM双重定位技术,将激光定位、视觉追踪、AI算法有机融合,相比传统的SLAM技术精度更高。BLK360集激光扫描技术、图像获取技术于一身,轻便小巧,无需整平,放稳即测,3 min即可完成单站全景影像的获取和三维激光点云的扫描。



图1 实验用三维激光扫描仪  
Fig.1 Experimental 3D laser scanners

表1 扫描仪主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of scanner

技术指标	BLK2GO	BLK360
尺寸/mm	高 279, 直径 80	高 165, 直径 100
质量/g	775	1 000
扫描范围/m	0.5~25	0.6~60
扫描速率/ (10 <sup>4</sup> 点·s <sup>-1</sup> )	42	36
视场角/(°)	水平:360, 竖直:270	水平:360, 竖直:300
精度	相对精度:0.6~1.5 cm; 绝对精度:2 cm	测距精度:4 mm@10 m/ 7 mm@20 m; 点云精度:6 mm@10 m/ 8 mm@20 m
相机系统	细节相机:1 200 万像素, 视场90°×120°;全景相机: 3 镜头,480 万像素,视场 300°×135°	全景相机:3 镜头, 1 500 万像素,全景影 像1.5 亿像素,视场 360°×300°

BLK2GO 适用于多空间复杂场景,无需架站,可手持设备移动式扫描,大大提高了扫描效率;在穿越空间时,借助GrandSLAM技术,可实现空间无缝衔接。BLK360比BLK2GO精度更高、细节更丰富,但在穿越空间时,需要在通视点处架站扫描,遇到

多空间场景时,其扫描效率较低,点云拼接工作量大。

BLK2GO和BLK360具有软件通用性。在进行扫描时,可通过手机上的BLK2GO Live APP实时查看3D点云及轨迹路线,及时查缺补漏,避免返工;扫描结束后,可通过BLK Data Manager软件进行数据导出,并利用Cyclone Register 360软件完成点云拼接和输出。

2.2 外业数据采集

实验区域位于广州市花都区某道路施工地,沿道路施工方向,其地下深约3~5 m处理有暗渠。由于暗渠宽度比窨井直径大,且部分窨井下方建有井室,常规手段难以获取井下管道信息。为此,分别将BLK2GO、BLK360两款设备固定在伸缩杆上,再下放到井下进行扫描。

暗渠走向、控制点及控制标靶的布设见图2。

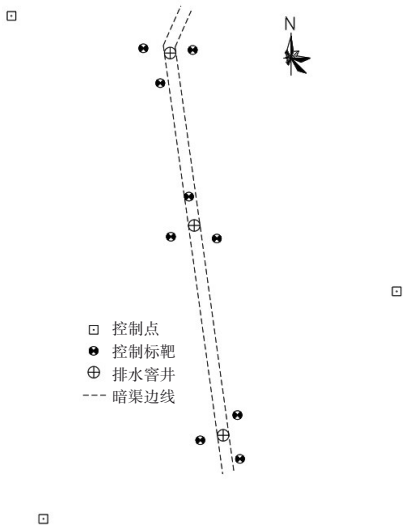


图2 暗渠、控制点及标靶的布设示意

Fig.2 Layout of culverts, control points and target boards

实验区域内共有3座排水窨井,相邻两个窨井间隔约35 m。实验区布设3个控制点,采用“广州市连续运行卫星定位服务系统(GZCORS)”进行测量,每个控制点初始化测量3测回,每测回测量20 s,测回间隔1 min;1 h后重复测量3测回进行检核,同时采用全站仪进行夹角及边长等检核。经数据处理,控制点平面精度优于1 cm,高程精度优于2 cm。由于施工地开阔、缺乏特征物,为满足两款扫描仪的使用要求,分别在每个窨井周边布设3个控制标靶,并获取其精确坐标。为了后期检验点云精度,同步采集了周边变电箱、水泥平台等特征点。



由表1可知, BLK2GO、BLK360的扫描范围分别为0.5~25、0.6~60 m, 而检查井半径大部分小于0.5 m, 需考虑减少扫描盲区对扫描工作的影响。由于BLK2GO是移动式扫描, 故其可在移动扫描过程中清除盲区; BLK360一般固定在井下进行扫描, 应尽量降低其支架高度, 减少扫描盲区的影响。

### 2.2.1 BLK2GO数据采集

BLK2GO为移动式激光扫描仪, 理论上1测次可以完成地面及3座窨井地下暗渠的扫描, 但由于窨井为光滑圆环, 缺乏特征, BLK2GO每次穿越狭窄竖井时精度都会下降, 如此反复, 在扫描第3座窨井地下暗渠时, BLK2GO需要5次穿越狭窄竖井, 其精度将大大降低。

为了提高扫描精度, BLK2GO分3测次进行扫描, 第1测次先完成整个地面的扫描, 然后在终点处缓慢下放到第1座窨井内完成暗渠的扫描; 中断扫描, 提升扫描仪至地面, 移至第2座窨井附近准备第2测次扫描, 仪器先在地面进行初始化, 完成地上部分扫描, 再下放到井下进行扫描; 第3测次则完成第3座窨井及其暗渠的扫描。

由于竖井由光滑圆环组成, 其结构单一, BLK2GO在下放过程中容易失效, 需在井口上方搭建特征物, 如木板、水马、铁架等。在BLK2GO放进竖井前, 需在井口上方先停留5~10 s, 使扫描仪充分采集井上、井下特征, 再缓慢下放。即便如此, 由于竖井狭长、光滑等原因, BLK2GO在下放过程中仍然容易失效, 可利用绳子或网挂将若干个方形特征物放进竖井内, 待特征物稳定后再缓慢下放扫描仪。

### 2.2.2 BLK360数据采集

BLK360为架站式扫描仪, 相对于BLK2GO, 没有SLAM失效等困扰, 在扫描地下暗渠时工作状态稳定可靠, 但因为缺乏SLAM技术, BLK360无法一架次完成地上、地下的扫描。竖井的地上和地下部分需要BLK360分两架次进行扫描, 最后再进行拼接, 因此BLK360需要6架次才能完成3座竖井地上及地下的扫描。

虽然BLK360不会因为环境特征缺少而失效, 但由于井上和井下的点云需要拼接, 而圆形的竖井缺乏特征用于拼接, 因此采用BLK360进行扫描时, 同样需要在井口上方增加特征物, 可利用木板等物体盖住井口的一半, 并确保两次扫描时木板不发生位移, 则后期井上、井下点云拼接时可利用木板与

井口的两个交点进行拼接。

### 2.3 点云数据处理与分析

扫描结束后, 利用BLK Data Manager软件将数据从仪器导出, 再导入Cyclone Register 360软件进行数据处理。数据处理主要包括点云拼接和绝对坐标转换, 其中点云拼接包括俯视图平面坐标配准和侧视图高程配准, 必要时两者需要迭代配准; 点云配准结束后, 导入标靶坐标, 在点云群上识别标靶并精确刺点, 将点云转换至绝对坐标系, 最后将点云成果导出。

BLK2GO点云数据拼接需要分别将第2测次和第3测次的地下点云与第1测次的地面点云进行拼接, 执行2次拼接操作; 由于第2测次和第3测次均在地面完成初始化, 其与第1测次点云的重合区域在地面, 可利用地面特征物、标靶进行拼接, 拼接精度较高。BLK360点云数据拼接需先将地面上3个测站点云进行拼接, 再分别将3个井下测站点云与地面点云进行拼接, 执行5次拼接操作; 井下测站点云与地面测站点云重合区域局限于井口, 由于重合区域少, 其拼接精度相对于BLK2GO更低。本次扫描竖井内壁直径为0.8 m, 假设其拼接误差为2 mm, 当扫描管道长30 m时, 管道终点偏差为7.5 cm。

BLK2GO、BLK360扫描点云底视图见图3。由图3可知, BLK360架站扫描会因为被遮挡、扫描盲区等原因造成地面点云存在较多空洞, 而BLK2GO因为移动式扫描, 地面扫描较齐全, 缺漏较少。

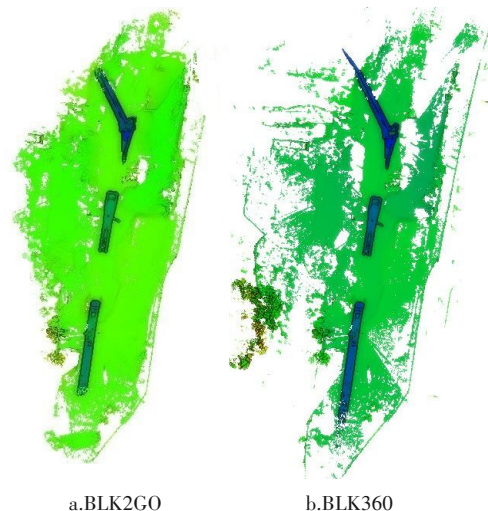


图3 BLK2GO和BLK360的扫描点云底视图

Fig.3 Scanning point cloud bottom views of BLK2GO and BLK360

图 4 为 BLK2GO、BLK360 扫描点云侧视图,由于中间的管道与两边的管道埋深不一致,中间管道呈“几”字形向下延伸后再与两边管道相接,造成中间管道扫描长度较短,两边分别扫描约为 10 m。虽然 BLK2GO(25 m)、BLK360(60 m)有效射程差距较大,但两者扫描管道长度差距并不大,BLK2GO 有效扫描 20 m,超出 20 m 后点云较为零散,BLK360 有效扫描管道 30 m,同样超出 30 m 后点云稀薄,这是因为管道空间狭窄,随着管道越来越远,激光与管道的入射角也越来越小,进而导致激光测距失效。

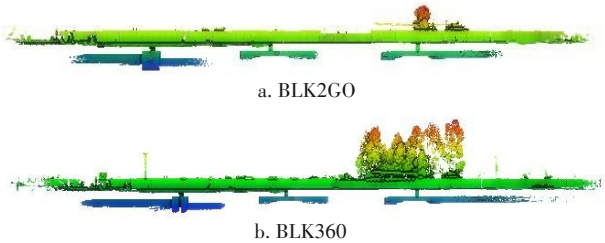


图 4 BLK2GO 和 BLK360 扫描点云侧视图  
Fig.4 Scanning point cloud side views of BLK2GO and BLK360

图 5 为 BLK2GO、BLK360 扫描点云细节图。由图 5 可知,BLK360 扫描的井室出现带状空洞,其原因是受到了伸缩杆的遮挡,而 BLK2GO 虽然也存在伸缩杆遮挡问题,但其可以通过自身转动或移动扫描填补空洞。当然,BLK360 也可通过增加测站改变其位置或者朝向来填补空洞,但会给内外业增加更多时间成本。

排水管网一般存在水体等,当激光照射到水面上,大部分激光会被水体吸收,少部分会发生折射、散射和镜面反射,造成水体位置没有点云数据,也无法获取水体下的管道信息,造成管道扫描不齐,有条件的可以利用声呐设备进行扫描;另外,激光的液面反射也会对管道的扫描工作造成一定影响,形成噪声点云,可利用滤波算法对噪声点云进行预

处理。

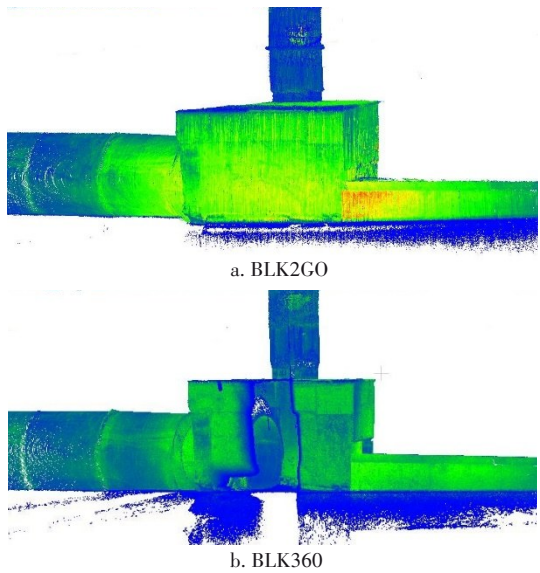


图 5 BLK2GO 和 BLK360 的扫描点云细节  
Fig.5 Scanning point cloud details of BLK2GO and BLK360

2.4 精度分析

BLK2GO 的误差来源主要包括激光扫描误差、点云拼接误差和 SLAM 定位误差,其中点云拼接误差和 SLAM 定位误差为主要误差,激光扫描误差为次要误差。BLK360 为架站式静态扫描,相对于 BLK2GO 少了 SLAM 定位误差。

由于地下暗渠无法利用全站仪等常规仪器进行测量,直接对扫描暗渠进行精度评定存在困难,可利用地面实测特征点与扫描点云进行点位比对分析。

表 2 为地面上 BLK360、BLK2GO 扫描点云与全站仪实测 15 个特征点的点位较差。由表 2 可知,BLK360 在地面上的精度高于 BLK2GO,BLK360、BLK2GO 的点位较差均值分别为 3.8、4.4 cm,最大点位较差分别为 5.2、5.8 cm。

表 2 扫描仪点云与全站仪实测点的点位较差

Tab.2 Point gap between the scanner point cloud and the measured point of the total station															cm	
特征点序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
点位 较差	BLK360	3.5	2.5	2.9	4.1	3.8	4.5	5.0	4.6	4.5	5.2	3.6	3.2	4.3	2.7	3.3
	BLK2GO	3.9	3.4	3.5	2.9	5.0	5.2	4.8	5.5	3.7	4.0	5.4	4.3	5.8	4.5	4.8
注： BLK360和BLK2GO的点位较差均值分别为3.8、4.4 cm。																

对于地下暗渠部分,可以叠加 BLK2GO 和 BLK360 两者的管道点云,分析其 3 段管共 6 个管道端点的偏差,即可获得两者管道的最大偏差。由于

BLK2GO 扫描管道较 BLK360 短,以 BLK2GO 的管道端点为准,将其与 BLK360 同位置的管道进行平面和高程比对,结果见表 3。

表3 BLK2GO和BLK360在6个管道端点处的偏差  
Tab.3 Deviation of BLK2GO and BLK360 at the 6 end points of the pipeline

管道长度/m	18.3	11.5	7.4	11.3	8.6	20.0
平面偏差/cm	6.6	4.2	2.5	3.8	3.0	6.8
高程偏差/cm	3.5	2.2	1.2	1.9	1.5	3.6

注：管道长度指管道端点至窰井中心的平面距离。

由表3可知,整体上,管道长度越大,BLK2GO和BLK360的平面和高程偏差越大,在管道长度为20.0 m处,两者最大平面偏差为6.8 cm,最大高程偏差为3.6 cm。

### 2.5 内业成图及三维建模

通过量取点云数据,可以获取管道埋深、管道形状(方形或圆形)、管道截面尺寸、井室尺寸、井底埋深等重要属性;将点云数据导入CAD、EPS三维测图等绘图软件,通过描摹可以绘制暗渠平面图;另外,也可以将点云数据导入CAD、3ds Max等三维建模软件进行建模。本项目基于CAD 2016建模,利用“插入-附着”加载点云,并根据点云手动建模;对于管道缺失部分,采用延伸管道的方式补齐;由于3段管接口处高差落差大,存在扫描盲区,接口处的建模与现实存在偏差。本次建模仅为示意性展示,效果如图6所示。



图6 地下暗渠三维建模

Fig.6 3D modeling of underground culvert

## 3 结语

利用三维激光扫描及点云建模技术开展三维管网建设工作,可以解决传统二维管线空间关系不明晰、显示效果不直观等问题。分别利用架站式激光扫描仪BLK360和移动式激光扫描仪BLK2GO对排水管网进行扫描,结果表明,三维激光扫描仪适用于排水管网扫描,为未来大规模开展管网激光扫描工作提供了经验。通过对上述两种扫描方式对比分析,可以得到以下结论:

① 在地下管网及地面地形扫描项目中,架站式激光扫描仪相比移动式激光扫描仪需要更多测站才可以完成扫描工作。

② 在扫描竖井时,由于井壁光滑、结构单一,移动式激光扫描仪存在SLAM容易失效等问题,需

要人为在井口或者井壁增加特征物;架站式激光扫描仪在井下作业时工作状态稳定可靠,不存在扫描失效等困扰,但同样需要在井口增加特征物以供后期点云拼接。

③ 架站式激光扫描仪比移动式激光扫描仪的点云拼接工作量大;另外,架站式激光扫描仪只能通过井口特征物完成地上和地下点云拼接,拼接难度更大,拼接精度也相对较低;但由于移动式激光扫描仪通过竖井时精度也会有所下降,因此较难评定两种扫描方式在地下管网部分的精度。

④ 在地面部分的扫描工作中,BLK360比BLK2GO扫描精度更高。

⑤ 架站式激光扫描仪在井下扫描作业中,容易因为伸缩杆遮挡造成扫描存在条带状空洞,而移动式激光扫描仪可通过自身转动或移动扫描填补空洞。

### 参考文献:

- [1] 杜国明, 龚健雅, 熊汉江, 等. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002(5):534-537.  
DU Guoming, GONG Jianya, XIONG Hanjiang, et al. Key technique about visualization of urban 3D pipe network and implementation of system functions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002(5):534-537(in Chinese).
- [2] 周京春. 地下管网三维空间数据模型及自动化精细建模方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016.  
ZHOU Jingchun. Research on 3D Spatial Data Models and Refined 3D Automatic Modeling Methods for Underground Pipeline [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(in Chinese).
- [3] 熊自明, 葛文, 吴绍民, 等. 城市三维地下管网信息系统研究与实现[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(1):59-62.  
XIONG Ziming, GE Wen, WU Shaomin, et al. Research and realization of urban 3D underground pipeline network information system [J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(1):59-62 (in Chinese).
- [4] 张翔, 王方雄, 崔羽. 城市三维管网地理信息系统的设计与开发[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(2):17-19.  
ZHANG Xiang, WANG Fangxiong, CUI Yu. Design and development of city 3D pipe GIS [J]. Journal of



- Geomatics, 2015, 40(2): 17-19 (in Chinese).
- [5] 王国牛. 城市三维管网建库及高效可视化[J]. 测绘科学, 2015, 40(4): 67-70, 154.  
WANG Guiniu. Study on the database construction and efficient visualization of 3D urban pipeline[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(4): 67-70, 154 (in Chinese).
- [6] 彭浩, 朱德才, 吴凯华. 基于SLAM技术的地下暗渠探测方法[J]. 北京测绘, 2022, 36(10): 1412-1416.  
PENG Hao, ZHU Decai, WU Kaihua. Underground channel detection method based on SLAM technology[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2022, 36(10): 1412-1416 (in Chinese).
- [7] 罗峰. 基于激光SLAM技术的渠箱测量[J]. 工程勘察, 2021, 49(9): 70-73.  
LUO Feng. Drainage box measurement based on laser SLAM technology[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(9): 70-73 (in Chinese).
- [8] 王忠博. 基于激光雷达和IMU的同时定位与建图算法研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.  
WANG Zhongbo. Research on Simultaneous Location and Mapping Method Based on Lidar and IMU [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2022 (in Chinese).
- [9] 亓玉浩, 关士远. 基于激光SLAM的综采工作面实时三维建图方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 139-144.  
QI Yuhao, GUAN Shiyuan. Real-time 3D mapping method of fully mechanized working face based on laser SLAM[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 139-144 (in Chinese).
- [10] 王锦凯, 贾旭. 视觉与激光融合SLAM研究综述[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 356-361.  
WANG Jinkai, JIA Xu. Survey of SLAM with camera-laser fusion sensor[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 356-361 (in Chinese).
- [11] 李延真, 石立国, 徐志根, 等. 移动机器人视觉SLAM研究综述[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(7): 40-45.  
LI Yanzhen, SHI Liguang, XU Zhigen, *et al.* A review of vision SLAM methods on mobile robot[J]. Intelligent Computer and Applications, 2022, 12(7): 40-45 (in Chinese).
- [12] 田野, 陈宏巍, 王法胜, 等. 室内移动机器人的SLAM算法综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 223-234.  
TIAN Ye, CHEN Hongwei, WANG Fasheng, *et al.* Overview of SLAM algorithms for mobile robots[J]. Computer Science, 2021, 48(9): 223-234 (in Chinese).
- [13] 毛军, 付浩, 褚超群, 等. 惯性/视觉/激光雷达SLAM技术综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 17-30.  
MAO Jun, FU Hao, CHU Chaoqun, *et al.* A review of simultaneous localization and mapping based on inertial-visual-lidar fusion[J]. Navigation Positioning & Timing, 2022, 9(4): 17-30 (in Chinese).
- [14] 王光庭, 曹凯, 刘豪. 基于激光雷达与视觉信息融合的SLAM方法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(1): 9-13, 19.  
WANG Guangting, CAO Kai, LIU Hao. SLAM method based on lidar and visual information fusion[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 33(1): 9-13, 19 (in Chinese).
- [15] 马争光, 赵永国, 刘成业, 等. 激光和视觉融合SLAM方法研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(3): 1-6.  
MA Zhengguang, ZHAO Yongguo, LIU Chengye, *et al.* Survey of SLAM with laser-camera fusion sensor[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(3): 1-6 (in Chinese).

作者简介: 崔家武(1992- ), 男, 广东茂名, 硕士, 工程师, 主要研究方向为测绘数据并行处理。

E-mail: 864885814@qq.com

收稿日期: 2023-05-02

修回日期: 2023-07-17

(编辑: 衣春敏)