doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.02.023

车载和背包式激光数据融合技术及应用

李　振[1]
（1. 星际空间（天津）科技发展有限公司，天津 300384）

摘　要：通过研究线性内插同名点匹配方法，两者相互融合，处理后点云可以高精度识别不同特征地物。结合车载激光LiDAR和背包式激光LiDAR各自的优势，运用点云融合技术解决传统1∶500地形图测绘遗留的难点及相互兼容性。此技术完全满足地形图更新、城市道路设计、三维数字城市和古建筑测量等应用需求。

关键词：车载激光点云；背包式激光点云；融合技术；线性内插同名点匹配；融合技术；同名点
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）02-0113-06

Vehicle-borne and Backpack Laser Data Fusion Technology and Application

LI Zhen[1]
(1. Stargis (Tianjin) Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: With the rapid development of domestic economy, the speed of 4D surveying and mapping products is getting faster and faster. Traditional surveying and mapping technology is difficult to meet the demand of construction period. The emergence of multi-platform radar equipment, such as vehicle-borne, airborne and backpack, causes the corresponding point clouds to be incompatible with each other. As the latest surveying and mapping technology, vehicle-borne laser system and backpack laser system have gradually become the main technology of surveying and mapping. Based on vehicle-borne laser point cloud accuracy advantages, we researched the linear interpolation same name point matching method, fused the two together, which could high accuracy identify different features. Combining with the advantages of vehicle-borne laser LiDAR and backpack laser LiDAR, we used point cloud fusion technology to solve the difficulties of traditional surveying and mapping technology legacy and mutual compatibility. This technology can be applied to topographic map update, urban road design, 3D digital city and ancient building survey.

Key words: vehicle-borne laser point cloud, backpack laser point cloud, fusion technology, linear interpolation same name point matching, same point

近年来，随着激光SLAM技术的发展，基于激光SLAM的背包式移动测量系统应运而生。徕卡公司的Pegasus Backpack移动背包扫描系统，系统集成了GPS全球定位、惯性导航、相机传感器和三维激光扫描仪等先进设备。GPS定位给出测量设备位置，惯性导航给出行测量设备前进方向和照相机姿态，全景相机利用GPS和惯导数据给出外方位元素等信息将5张相片拼接成全景相片[1-7]。

车载激光LiDAR可以快速获取公路路面和路面两侧物体的高精度三维信息和灰度信息；背包激光LiDAR能快速、灵活地获取机动车无法行驶地区的数据，通过SLAM技术，自身数据相互优化、解算，形成最终的成果点云。

1　数据获取流程及优化原理

基于天津市河西区慢行交通改善项目，本文结合车载激光LiDAR系统和背包激光LiDAR系统各自特点，研究了一种线性内插同名点匹配方法，达到点云数据高精度融合。

1.1　车载激光LiDAR系统数据获取

车载移动激光测量系统主要为设计部门提供主线路基重要测量控制点和抽稀后的点云，为了保证测量结果可靠，测量前需要提前布设测标并将其作为点云数据纠正的控制点（以下简称测标）；然而市区无需提前布设测标，每个十字路口的斑马线角点作为测标，这样既可以节省成本，又可以内业精准确定测标位置。

1.1.1　设备检校

设备检校是保证车载激光扫描测量成果精度的核心环节。车载采集数据前对激光传感器的Heading、Roll和Pitch 3个姿态角进行精细检校。选取一个特征建筑物作为检校依据，用于确定系统各传感器同POS系统的位置关系，在具体实施时，沿建筑物外围分别

收稿日期：2021-08-31。
项目来源：天津市重点研发计划科技支撑重点项目（18YFYSZC00120）。

顺时针和逆时针测量2次。在建筑物四周侧墙面上，大致均匀的布设一些特征控制点，在窗户、门等存在墙面凹凸的位置布设特征控制点，每个墙面大致均匀布设10~20个控制点，经检校双激光器获取同一路段点云数据匹配精度优于1 cm，可用于下一步路面扫描。

1.1.2 点云数据获取

车载Lynx外业测量主要包括测区内GPS基站架设和车载激光移动测量工作。

1）GPS基站架设。GPS基站架设按照传统GPS静态观测技术要求实施。车载测量时以其中处于测区中心的控制点架设GPS基站，确保基站覆盖半径小于15 km，采样频率不低于1 Hz。

2）测量城市道路路面点。根据项目设计网图和交通通行情况，设计车辆行驶路径。

1.1.3 测标测量

根据车载点云数据灰度信息，人工选择斑马线角点作为测标。选取原则如下：

1）选取位置为十字路口斑马线角点或多个航带重叠处特征点。

2）灰度显示清晰。

3）上方无高楼树木等大型地物遮挡。

测标基于点云中记录的地物灰度信息进行识别。测标平面测量采用RTK方法进行施测，高程采用图根水准测量方法施测。测标平面和水准成果应做平差计算，满足相应的规范要求。

1.2 背包激光LiDAR系统数据获取

根据测区范围及车载激光LiDAR测量被遮挡或无法扫描的范围，人工标记出没有点云数据范围。结合背包式激光LIZDAR系统特性和周围环境，测量人员设计不同地段的路线及设备参数。

1.3 数据优化原理及融合技术

1.3.1 车载激光点云优化

根据以往工程经验，在GNSS信号稳定状态下，车载激光移动测量点云精度满足1∶500地形图精度。在GNSS信号状态不稳定，GNSS断断续续地接受卫星信号，在短时间内惯导系统会维持高精度状态，长时间信号失锁，会降低数据精度。面对整个测区数据，人工整体优化数据，提高数据精度。相同测区、不同时间段车载点云的平面和高程位置存在差异，通过在专业pospac软件中查看轨迹精度报告图，清晰地分析出某时段精度优与差。在此基础上，通过两次测量的同名点和测标点，重点优化精度较差点云，再进行测区整体点云平差优化。

原始车载点云数据平面精度为15 cm，高程精度为10 cm。为满足设计精度需求，采用线性内插同名点匹配方法，车载点云进行了整体平差和精度优化。

$$Z_i' = Z_i + \Delta H_1 + (H_2 - h_2 - H_1 + h_1) \times \frac{T_i - T_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中，Z_i'为时刻i的点云正常高；Z_i为时刻i的点云实际获取高程；H_1、H_2为T_1、T_2时刻的正常高；h_1、h_2为T_1、T_2时刻的点云实际获取高程。

1.3.2 背包激光点云解算

通过徕卡软件Inertial Explorer，作业人员将背包式设备采集的pos数据和基站静态数据导入该软件，解算航迹线数据；在PegasusManager软件中解算点云数据。

首先导入点云数据，选择SLAM模块，点云自身精度匹配，然后根据航迹线数据和原始点云数据解算背包成果点云，并赋予颜色形成彩色点云。

1.3.3 点云融合技术

车载激光LiDAR系统长距离内，GPS时间短，双GPS形成GAMS，导致点云变化小，形成线性变化，为线性内插同名点匹配方法做基础。相对高精度车载激光点云，背包激光点云的点密度和点质量会随着测量人员身体浮动大小来波动，且整体GPS精度波动比较大。综上所述，点云融合的基础是车载激光点云，通过线性内插同名点匹配方法优化背包激光点云，

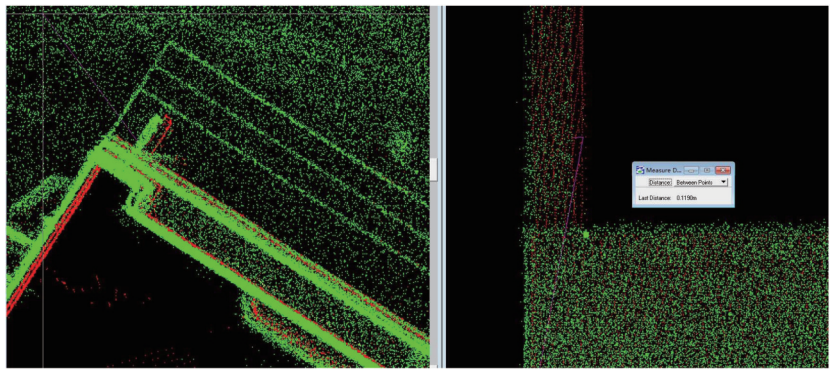


图1 车载激光点云和背包激光数据点云平面错位(红色为车载点云,绿色为背包点云)

最终形成融合点云。车载激光点云和背包激光点云融合在同一个工程下，两部分点云数据会出现平面和高程错位，具体如图1所示。

由于缺漏区域位于墙角、树下和高楼旁，背包激光测量系统中GNSS长时间处于失锁状态，高精度惯导系统也无法保证其高精度。在这种情况下，背包激光数据只能依靠车载激光点云数据来优化自身精度。具体步骤如下：

1）在车载激光点云数据和背包激光点云数据里，按照一定距离分别选取同一地物的特征点，分别命名KZD_1和JZ_1。首先这些同名点分别是地物角点、窗口棱角和广告牌角点等；其次，它们分别在激光数据中能够被清楚识别，如图2~4所示。

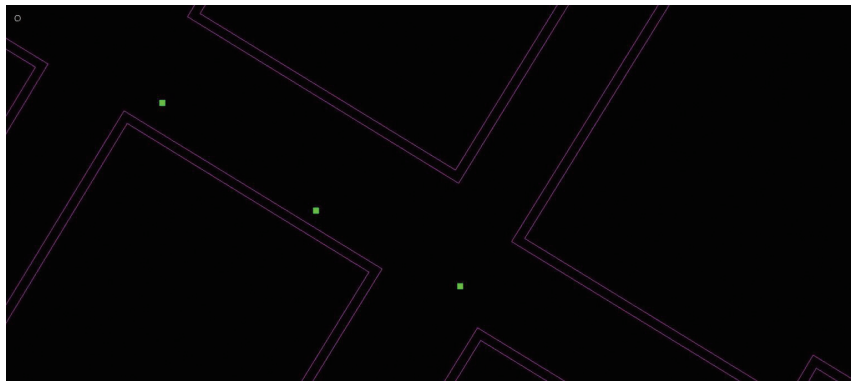


图2　同名点的位置

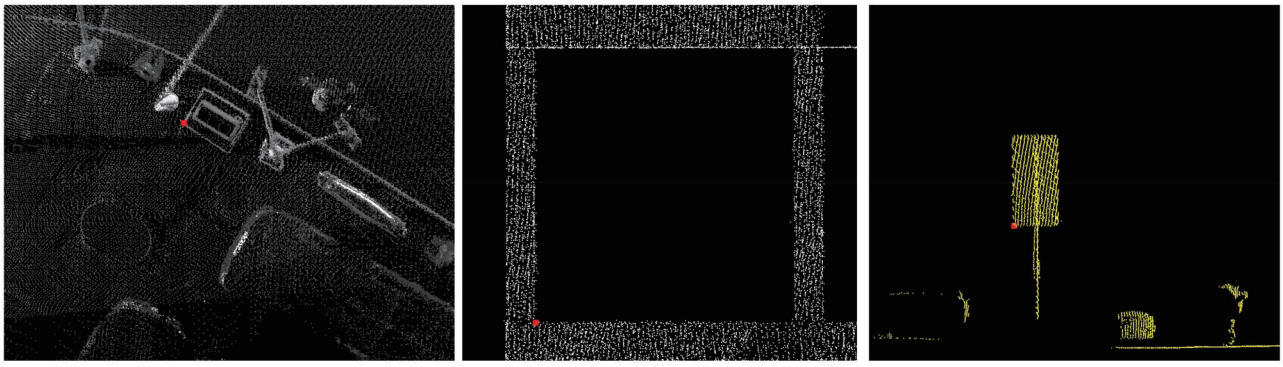


图3　车载激光点数据KZD_1、KZD_2、KZD_3的位置

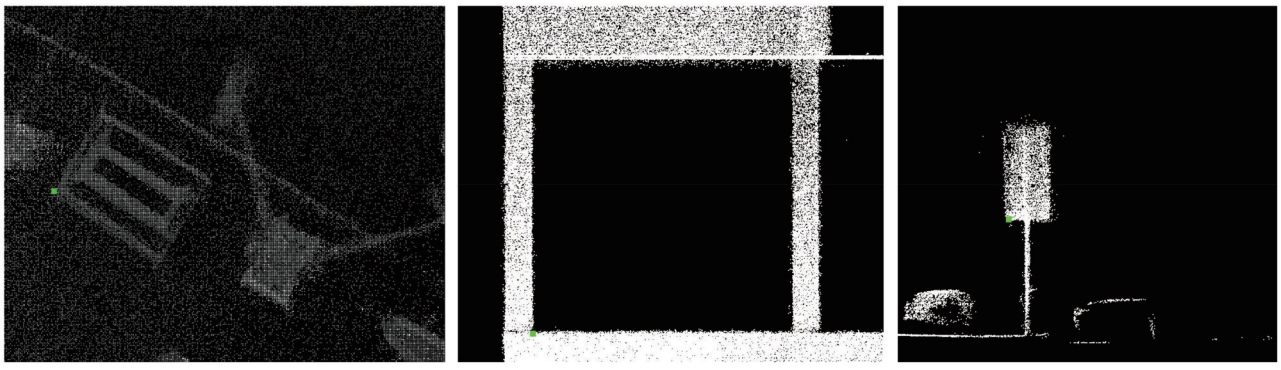


图4　背包激光点数据JZ_1、JZ_2、JZ_3的位置

2）通过步骤1）中的同名点位置坐标，分析背包激光点云数据在短时间内无GNSS信号下，通过惯导系统，点云数据的位置是按照线性方程变化的，如图5所示。

3）同名点不同点云数据坐标值做比较，求得在同名点位置处的变化量，即为真实值的偏移量。MicroStation软件中，通过对每个同名点真实值偏移量的分析，应用线性内插同名点匹配方法，软件自动优化背包激光

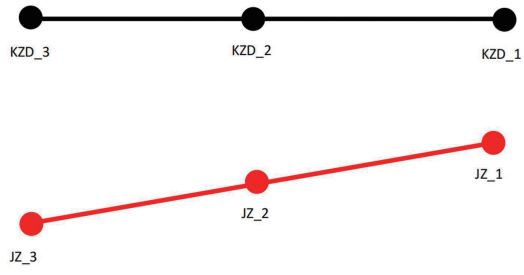


图5　背包激光点数据线性变化

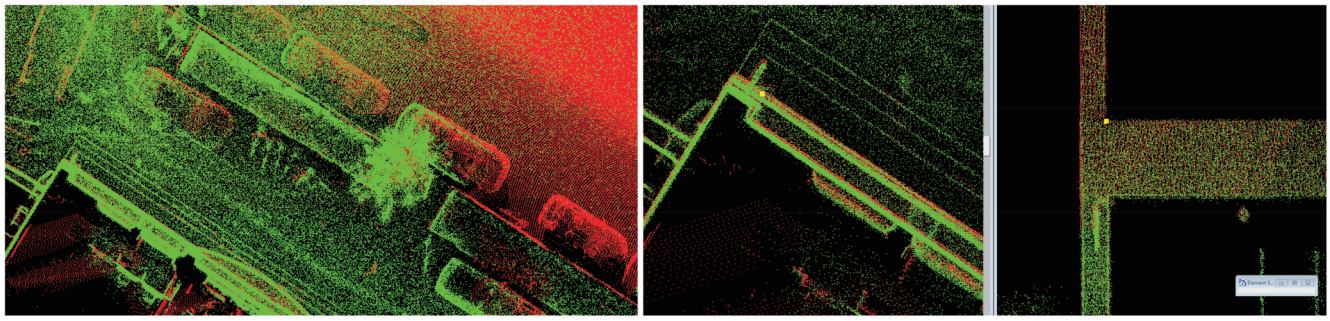


图6 融合后点云数据平面、高程图(红色为车载点云,绿色为背包点云)

点云。优化后的背包激光点云与车载激光点云相互融合，具体如图6所示。背包激光点云数据既弥补了车载激光点云数据的漏洞，又充分体现了二者的兼容性。

2 工程应用

该技术本次应用在天津市河西区慢行交通改善项目，全长52.46 km，左右两侧30 m的1∶500地形图。全线主路采用车载激光测量技术获取点云数据，两侧遮挡区域采用背包式激光LiDAR测量数据获取点云，通过pos解算、点云输出、点云优化、点云融合和内业绘制外业调绘等流程，生产出满足1∶500比例尺专题地形图。

2.1 成果规格和主要技术指标

平面坐标系统采用天津90城市坐标系统；高程系统采用1972年天津市大沽高程系，2015年高程。地形图需标注交叉口、路段、人行道、重要地物的出入口以内的5 m范围高程；标注道路及两侧人行道高程(每5 m一个高程点)；标注立交桥范围内的高程及桥底面高程（每5 000一个高程点)；行道树及绿化带内树逐颗测量具体位置，并标明树种、树径；其他的内容按照1∶500地形图技术要求测绘。图形数据应采用Autodesk的DWG数据格式。

2.2 项目数据采集

根据项目测量技术需求，本项目采用加拿大Optech公司的LYNX HS600车载激光系统，脉冲频率200 KHz，线频为100 Hz，平均车速50 km/h；徕卡公司的Pegasus Backpack移动背包扫描系统，脉冲频率200 KHz，线频为100 Hz，平均速度为正常人行走速度。主干道和次干道路面较宽，路两侧存在花台和行道树，车载激光无法全面采集到路两侧点云数据，故此道路上采用背包测量，弥补车载激光点云的短板。支干道路面较窄，两侧较少遮挡物，车载激光测量基本上满足技术需求，少部分需要采用背包测量采集。根据路面上车的流量，车载激光测量采集时间为9∶30~16∶00和21∶00~5∶00，背包激光测量采集时间为9∶30~16∶00。

2.3 测标测量

1∶500地形图根控制点相对于邻近等级控制点的点位中误差不得大于0.05 m，高程中误差不得大于1/10等高距。测标平面控制采用天津网络RTK布设，按照规范中图根平面控制点技术要求测量，直接测量获得WGS84平面坐标，转换为天津90城市坐标；测标高程采用图根水准测量，起算点不低于四等精度控制点。

根据车载激光点云灰度特性，选取特征点作为测标点和检查点，其中检查点不参与点云优化。通过点云灰度显示，作业人员可以清晰地识别出测标；整个项目选取40个测标和12个检查点，均匀分布在整个项目中。

2.4 激光点云数据优化

2.4.1 车载激光点云数据优化

项目组进行了车载激光移动测量的外业工作，共花费2个白天和1个夜晚。作业完成后，利用DiskExtract提取得到车载原始扫描数据文件；然后，利用PosPac MMS进行POS数据解算；通过GPS差分解算，对车载激光移动测量数据成果进行了精度分析和过程质量检查。图8为测量解算GPS差分解算的精度分析报告：图中的X坐标轴为作业过程中的GPS时间，Y轴是平差解算时的平面和高程误差值。其中红线和黑线为平面的精度示意线，绿线为高程精度示意线。平缓区域为正常测量过程的时段，精度突变的区域为上跨桥梁遮挡或耸立高楼遮挡等GPS信号不好时段。该曲线图可有效反映GPS动态差分测量的精度。选取所解航迹线平面精度优于3 cm，高程精度优于5 cm的时间段对应的点云数据。依据精度曲线图择优选取对应时间的点云数据，最终确定用于成果制

作的点云数据。

最后，将原始扫描数据、POS数据解算数据导入LMS预处理软件中生成车载点云数据成果。在LMS软件中，设置点云坐标系统。项目中天津90坐标系统是独立坐标系统，故在LMS中设置生成UTM50坐标系统。在MicroStation软件中，利用覆盖测区的基础控制点批量完成点云数据从UTM50坐标系到天津90坐标系统的转换。

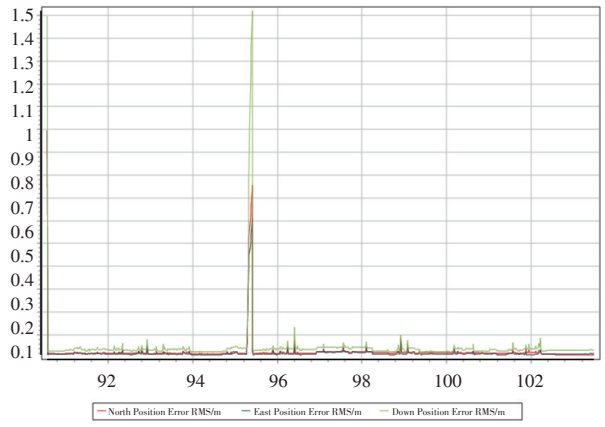


图8　航迹线解算结果

为保证激光点云精度，利用40个高精度测标图根点成果，软件对车载激光点云进行了整体平差和精度优化。相关数据处理工作通过我公司自主研发的Star-Modeler软件中批处理自动化完成。项目共布设路面检查点共计12个，评价测标图根点仅用于精度评价，不参与车载点云平差和精度优化。对比图9和图10，得出结论：车载激光点云数据平面和高程精度得到大幅度提高。

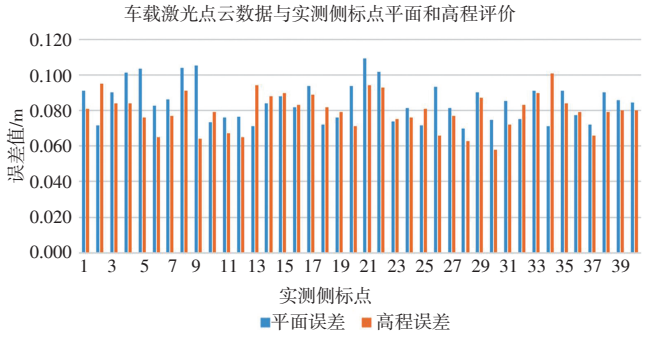


图9　原始车载点云与实测测标点的误差图

2.4.2　背包激光点云数据优化及融合

在徕卡Inertial Explorer和Pegasus Backpack相关软件中，运用SLAM技术、GNSS后处理定位和IMU惯导系统自动解算，生成背包激光点云数据。通过车载和背包激光点云数据对比，人工选出98个同名点位。在MicroStation软件中，利用线性内插同名点匹配方法，优化背包激光点云数据。优化后的车载和背包激光点云数据导入同一个工程，方便后期内业处理。融合后的激光点云数据精度高度一致，范围内无遗漏。

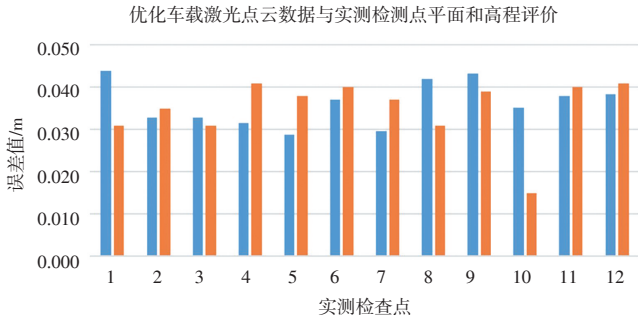


图10　优化车载点云与实测检测点的误差图

2.5　1∶500地形图内业处理

内业根据点云数据进行全要素采集。融合点云数据灰度、断面信息、高程信息与基础地物的形状和空间信息，软件清晰地分辨出不同地物及其准确位置。基于不规则三角网（PTD）的算法，激光点云数据分离出地面点，再通过TIN网构建数字高程模型，人工干预剔除粗差点，获得高精度地面点数据。基于地面点数据，公司自主研发的切断面软件，每5 m精确地提取断面高程数据，满足业主对地面点高程密度需求，极大地缩短外业采集时间和提高数据精度，特别针对城市林立的高楼、密林间、车流量密集的道路等传统测量困难地点。

外业调绘。巡视调绘时，对所有地物进行核实，补调隐藏、新增和漏测的地物；对遗漏与新增地物无法用截距法定位时，采用RTK测量、全站仪测量等常规方法定位。

内业编辑是在AutoCAD绘图系统中进行的。根据外业修测和补测的数据，按照图式及设计书要求进行属性转换和编辑。编辑过程中对外业图件中有疑问的或者未能明确定性的地物则作标识，由外业调绘人员现场补调确认后再编辑上图，分队检查员对照修补测图上机检查确保无差、错、漏后，进行分层分色及线型、字体的检查，完成后再回放编辑后的线划图，交外业实地复查，再次修改后进行图幅拼接成图。

3　结　论

融合后的点云数据满足项目精度要求，通过对地形图要素进行精度检核统计分析，得到平面精度±0.136 m，高程中误差为±0.085 m的评价结果，满足

项目1∶500地形图需要的平面和高程的精度要求。相对传统测量，主要优势如下：①外业作业生产有安全保障。②不影响作业公路的正常交通运行。③外业作业效率高、内业数据处理自动化程度高，在项目工期、质量方面均具有优势。

通过项目的实施和总结，合格成果验证了点云融合技术解决传统测绘技术遗留的难点和相互兼容性问题，并可以为高精度地形图提供重要的技术支撑。

参考文献

[1] 李德仁.移动测量技术及其应用[J].地理空间信息,2006,4(4):1-5

[2] 李德仁,郭晟,胡庆武.基于3S集成的LD2000系统移动道路测量系统及其应用[J].测绘学报,2008,37(3):272-276

[3] 张志勇.全景移动测量系统及其应用前景展望[J].测绘通报,2014(3):79-81

[4] 侯亚娟,葛中华.车载移动测量系统在大比例尺地形图质检工作中的应用研究[J].测绘通报,2015(11):60-63

[5] 卢秀山,黄磊.基于激光扫描数据的建筑物信息网格化提取方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(10):852-855

[6] Manandhar D,Shibasaki R. Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) for 3-D GIS[C].IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE,2001

[7] 杨铁利,关艳玲.农村地籍测量中SSW控制点的设置[J].辽宁科技大学学报,2018,41(1):58-62

作者简介：李振（1990—），工程师，研究方向为雷达数据处理。

（上接第107页）

[6] 武立平,龚浩,赵晓龙,等.基于DInSAR技术的阳泉矿区形变监测与分析[J].煤矿安全,2018,49(7):193-197

[7] 崔喜爱,曾琪明,焦健,等.大气效应对合成孔径雷达干涉测量的影响[J].中国科技论文,2013,8(4):302-306

[8] 姜德才,张继贤,张永红,等.百年煤城地表沉降融合PS/SBAS InSAR监测:以徐州市为例[J].测绘通报,2017(1):58-64

[9] 李达,邓喀中,高晓雄,等.基于SBAS-InSAR的矿区地表沉降监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(10):1 531-1 537

[10] 李勇发,左小清,麻源源,等.基于PS-InSAR技术和遗传神经网络算法的矿区地表沉降监测与预计[J].地球物理学进展,2020,35(3):845-851

[11] 周文韬,张文君,杨元继,等.矿区地表沉降监测的一种组合模型预测方法[J].大地测量与地球动力学,2021,41(3):308-312

[12] Berardino P,Fornaro G,Lanari R,et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(11):2 375-2 383

[13] Sandwell D,Mellors R,Xiao P T,et al. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation[J]. Eos,Transactions American Geophysical Union,2011,92(28):234

[14] 陈数.Sentinel-1数据在同震形变和震后形变研究中的应用[D].北京:中国地震局地震研究所,2018

第一作者简介：熊威（1988—），硕士，工程师，主要从事形变测量与地质灾害方面的研究。