

基于激光雷达三维扫描和倾斜摄影的 线路空间关系检测

李晓斌*, 梁祖鸿, 李勇, 肖琪, 周游

广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529000

摘要 针对线路空间关系难于快速全面获取、精确定量测定的问题,提出了一种基于地基激光三维(3D)扫描和无人机倾斜摄影分别获取线路点云、线路周边真 3D 情境的方法。将用改进 Bursa 算法匹配的点云和 3D 情境的空间坐标融合后导入地理信息系统平台,在仿真环境中自动快捷地检定线路的空间状态。将构建的数据融合配准流程应用于实例中,实验结果表明,激光 3D 扫描与倾斜摄影在数据采集时可互为补充。相比原始 Bursa 算法,改进 Bursa 算法的精度可提升 10%~50%,点云与 3D 情境的配准融合精度优于 ± 2 cm;且融合后的 3D 效果逼真、空间信息完整、人机交互性强,能快速完成线路的精细测量。

关键词 遥感;激光雷达三维扫描;倾斜摄影;空间关系

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1628003

Tilt Photography and Lidar Three-Dimensional Scanning for Route Spatial Relationship Detection

Li Xiaobin*, Liang Zuhong, Li Yong, Xiao Qi, Zhou You

Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Jiangmen, Guangdong 529000, China

Abstract This paper proposes a method based on ground-based laser three-dimensional (3D) scanning and drone tilt photography to obtain the route point cloud and the true 3D situation around the route, addressing the difficulty of quickly and comprehensively obtaining the spatial relationship of the route and accurately and quantitatively determining the problem. For automatically and swiftly evaluating the spatial state of the route in the simulation environment, the point cloud matched by the enhanced Bursa algorithm and geographical coordinates of the 3D scenario are fused and transferred into the geographic information system platform. The experimental results suggested that laser 3D scanning and tilt photography can complement one other in data collection when using the created data fusion registration technique as an example. The accuracy of the enhanced Bursa algorithm may be raised by 10%–50% compared to the original Bursa algorithm, and the registration and fusion accuracy of the point cloud and 3D situation is better than ± 2 cm. After fusion, the 3D effect is lifelike, spatial information is complete, and human-computer interaction is strong, which can quickly complete the fine measurement of the route.

Key words remote sensing; lidar three-dimensional scanning; tilt photography; spatial relationship

OCIS codes 280.3640; 280.4788

1 引言

随着各地数字电网的紧步实施,输电线路的空

间关系可视化逐渐成为线路管理的关键,线路空间状态(空间几何特征、与周边地物的相对关系、线路空间的发展变化等)也成为人们最关注的问题

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2020-11-13; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(030700KK52180151)

通信作者: *32672849@qq.com

之一^[1-3]。用传统现场测绘、无人机(UAV)拍照或视频等方法对线路空间状态进行检测时,具有人工投入大、事后延滞长、难以定量分析、成果数据表达抽象等问题,难以全面直观、精确定量反映线路的空间状态。而用激光雷达(Lidar)巡检线路时,会出现直升机航线申请、运维与安全、点云处理专业门槛高等问题,导致成本高昂,难以全面普及,因此,无人机激光雷达、地基激光雷达得到了人们的广泛研究^[4-5]。

无人机倾斜摄影具有高效、成果空间属性完整、真三维(3D)建模效果直观逼真、用户体验性强等优势,在测绘地理信息行业得到了迅猛发展^[6-8]。目前,单独采用激光雷达或无人机倾斜摄影对线路空间进行测定时均存在一些问题。激光 3D 扫描能精确反映线路悬线的空间特征^[9-12],但受限于点云的处理效率与成本,主要关注对象是线路本身,忽略了线路周边环境,导致线路空间关系表达遗漏。激光扫描配合拍照功能可映射扫描对象的纹理,但形成的视觉 3D 显示放大后会出现像素块,影响细化操作。无人机倾斜摄影能对相机拍摄的地物进行全面建模^[13-16],但无人机飞行路线及相机组的构成存在建模盲区,且难以精确控制无人机的飞行姿态,从而影响真 3D 模型的精度。

针对上述问题,本文提出了一种基于激光雷达 3D 扫描和无人机倾斜摄影的线路空间关系检测方法。用地基激光 3D 扫描点云的结果精确反映线路的几何特征,用无人机倾斜摄影的真 3D 显示作为线路空间分析的情境。通过改进 Bursa 算法完成二者坐标系的高精度匹配,再将坐标系经数据格式转换导入地理信息系统(GIS)平台,在 3D 仿真环境中快速检测线路的空间关系。实验结果表明,用本方法改进 Bursa 算法后,测定线路空间关系的精度可达到 cm 量级。

2 基本原理

2.1 两种方法的优势互补

激光雷达 3D 扫描、无人机倾斜摄影各有优缺点且存在较强的互补性。无人机倾斜摄影是一种所见即所得的数据采集方式,通过现场多角度拍摄地物照片,按无人机的系统位置(POS)数据信息组成地物像对,利用空中三角关系解算立体像对像素级同名点匹配的空间坐标,形成纹理映射关系并搭建真 3D 模型。该方法的优点是 3D 显示效果直观且空间属性明确,缺点是飞行姿态及无人机相机组结

构存在盲区。设站激光雷达 3D 扫描是从已知点对扫描对象发射激光信号并接收反射信息,然后根据该信息确定扫描对象的空间位置等属性,容易获取线型、镂空对象(如杆塔、悬线)的精确特征,其数学精度可靠,能补充无人机倾斜摄影对该类地物不敏感、存在盲区的不足。

将无人机倾斜摄影、激光雷达 3D 扫描数据融合在同一 GIS 平台运行,其中,低空无人机倾斜摄影可完成线路环境的拍摄并进行真 3D 建模,将其导入 GIS 平台后作为基底数据,是后续空间分析的情境;地面设站激光雷达 3D 扫描可完成线型、镂空地物(杆塔、悬线)或无人机盲区(遮盖区域)的建模,确保信息完整及关键特征信息精确。准确融合的前提是二者具备明确的空间坐标并能精确统一到同一个坐标系中。

2.2 改进 Bursa 算法对空间坐标系的转换

激光雷达 3D 扫描采用设站坐标系,独立设站点云精度高,多站配准后的精度可达到 mm 量级。无人机倾斜摄影采用的是地理坐标系,更侧重基础地理信息的采集利用,会涉及到无人机的姿态控制等因素,倾斜摄影构建的模型精度一般在 cm 量级。将两个坐标系变换到统一的精度会决定后续 3D 点云、无人机倾斜摄影真 3D 模型的匹配叠加精度。

常用 Bursa 算法^[17](也被称为 7 参数算法)完成两套空间直角坐标系间的转换,即将坐标系通过 3 个轴向平移、旋转和比例缩放。经典的 Bursa 算法可表示为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + (1 + \mu) \times \mathbf{R}(\alpha, \beta, \chi) \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中, $(X, Y, Z)^T$ 为需要预测的坐标, $(X', Y', Z')^T$ 为已知坐标, $x_0, y_0, z_0, \mu, \alpha, \beta, \chi$ 为模型的 7 个参数,分别为 3 个平移参数、1 个尺度参数、3 个旋转角度参数, $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \chi)$ 为由 3 个轴向旋转角构成的旋转矩阵。这 7 个参数可通过同名点在两套坐标系的已知坐标值构造线性方程逆向解算确定。

在 Matlab 编程计算过程中,旋转矩阵 $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \chi)$ 可由轴向旋转角的三角函数迭代、近似计算得到,更适用于小角度的转换计算。而输电线路的跨度长、线路转向角度大、条带状等特性,导致扫描设站网与无人机像控网畸形,解算时容易出现旋转角度大、迭代次数多、解算效率低的问题。因此,借鉴文献

[18]的思路,将 $R(\alpha, \beta, \chi)$ 拓展为 9 参数正交矩阵,可表示为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + (1 + \mu) \times \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 \\ \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中,新旋转矩阵中的 9 个参数仍是轴向旋转角的三角函数,包括 3 个独立参数和 6 个非独立参数。其中,6 个非独立参数可由 3 个独立参数的相关函数表示,若 $\omega_2, \omega_3, \xi_3$ 为独立参数,则函数关系可表示为

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{1 - \omega_2^2 - \omega_3^2} \\ \psi_3 = \sqrt{1 - \omega_3^2 - \xi_3^2} \\ \xi_1 = \frac{-\omega_1 \omega_3 \xi_3 - \omega_2 \psi_3}{1 - \omega_3^2} \\ \xi_2 = \sqrt{1 - \xi_1^2 - \xi_3^2} \\ \psi_1 = \omega_2 \xi_3 - \omega_3 \xi_2 \\ \psi_2 = \omega_3 \xi_1 - \omega_1 \xi_3 \end{cases} \quad (3)$$

由于参数间为非线性函数关系,直接以(2)式、(3)式进行解算比较繁杂。因此,对其进行泰勒微分线性化并代入同名点的已知坐标值,得到的误差方

程为

$$V_i = A_i X + L_i, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

式中, $X = (x_0, y_0, z_0, \mu, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \psi_1, \psi_2, \psi_3)^T$ 为待解算参数矩阵, A_i 为系数矩阵, L_i 为对应点的坐标转换差值。根据(4)式构建间接平差法方程并预设初值迭代解算参数矩阵 X 。(4)式为典型的线性模型,对初值的预设要求非常宽松,从而将大角度解算转换为小角度的迭代解算,使模型不受旋转角大小的限制。

改进后算法的参数虽然由 7 个增加到 13 个,但线性化后的误差方程避免了大量的乘法、开方运算,程序编制更简便,算法的适用范围和精度也得到了提升。

2.3 数据融合的配准流程

用激光雷达 3D 扫描点云精确反映线路的几何特征,将无人机倾斜摄影真 3D 显示作为线路空间分析的情境,设置的数据融合配准流程如图 1 所示。融合过程包括 2 个底层问题:第一个问题是多源数据精度控制及其融合配准,多源数据包括无人机倾斜摄影像控点、无人机倾斜摄影获得的像对、无人机姿态控制参数以及激光雷达 3D 扫描地面设站点、激光点云及扫描的其他信息等,这些空间数据通过

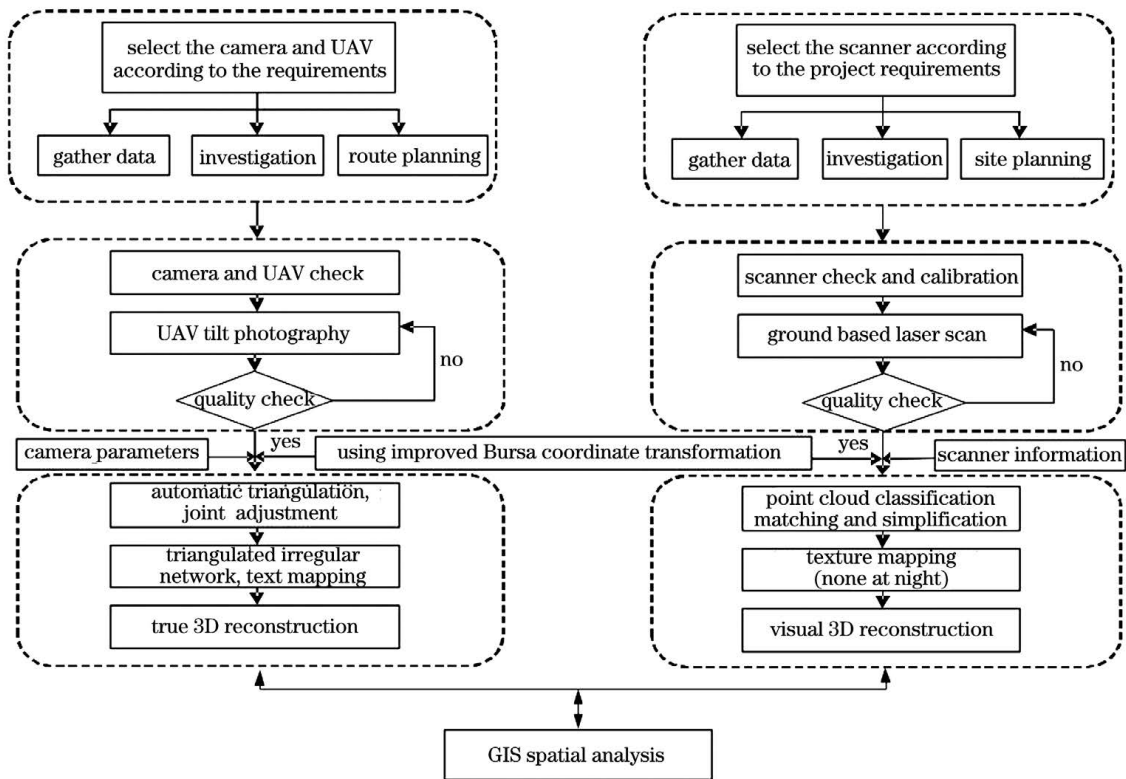


图 1 数据融合的流程

Fig. 1 Flow chart of the data fusion

改进的 Bursa 算法配准。第二个问题是通过开发数据接口使 3D 扫描点云(常用. LAS 格式)、无人机倾斜摄影真 3D 建模成果(常用. OSGB 格式)数据便于导入 GIS 平台。

3 实例分析

某 220 kV 多回路高压输电工程中的单向线路长约 44 km, 杆塔、悬线等设施数量大。线路经过的区域地形多样, 包括城镇、农村、山区以及错综复杂的电力线网、城镇市政道路的高架、轨道交通线轨交织的情形。目前, 该项目经过的区域有多个重大项目正在施工, 线路与其他既有线路交叉跨越现象比较常见, 而前期并未考虑其他专业设计, 如市政跨线桥、轨道高跨断。这些复杂线路的空间关系会影响

线路安全, 因此, 必须明确各处线路交叉跨越的空间关系并判断其是否满足设计的安全性要求。

3.1 两套坐标系的转换匹配

必须将地基激光雷达 3D 扫描设站点、无人机倾斜摄影影像控点统一到一个空间坐标系中, 外业对两个控制网采用快速静态联测并用改进的 Bursa 算法进行坐标转换, 得到的坐标转换残差如表 1 和图 2 所示。其中, 坐标值的整数部分已解密。可以发现, 已知点(参与解算模型参数的点 $D_1 \sim D_6$) 3D 坐标 x 、 y 、 h 对应的轴向差异 D_x 、 D_y 、 D_h 不超过 3 mm; 原始 Bursa 算法的点位残差(Difference)最大值为 3.00 mm, 改进 Bursa 算法的点位残差约减小了 10%~50%, 这表明改进算法的内符合精度更高, 可以忽略坐标转换模型本身引起的精度损失。

表 1 改进算法的残差表

Table 1 Residual table of the improved algorithm

unit: m

No.	Ground truth			Calculated value			Difference value				
	x	y	h	x	y	h	D_x	D_y	D_h	Difference	Algorithm
D_1	24060.021	37224.324	22.443	24060.020	37224.322	22.444	0.001	0.002	-0.001	0.00240	Bursa
				24060.021	37224.323	22.444	-0.0002	0.001	-0.001	0.00143	improved
D_2	24823.904	47866.557	5.833	24823.904	47866.556	5.831	0	0.001	0.002	0.00224	Bursa
				24823.904	47866.557	5.832	0	0	0.001	0.00100	improved
D_3	26115.766	56014.570	7.750	26115.768	56014.572	7.752	-0.002	-0.002	-0.002	0.00346	Bursa
				26115.767	56014.571	7.751	-0.001	-0.001	-0.001	0.00173	improved
D_4	26349.928	40731.982	3.899	26349.926	40731.983	3.900	0.002	-0.001	-0.001	0.00245	Bursa
				26349.928	40731.981	3.900	0	0.001	-0.001	0.00141	improved
D_5	28106.627	28881.954	3.686	28106.626	28881.957	3.685	0.001	-0.003	0.001	0.00332	Bursa
				28106.626	28881.952	3.684	0.001	0.002	0.002	0.00300	improved
D_6	29318.775	36961.722	3.580	29318.777	36961.723	3.577	-0.002	-0.001	0.003	0.00343	Bursa
				29318.775	36961.720	3.582	0	0.002	-0.002	0.00283	improved

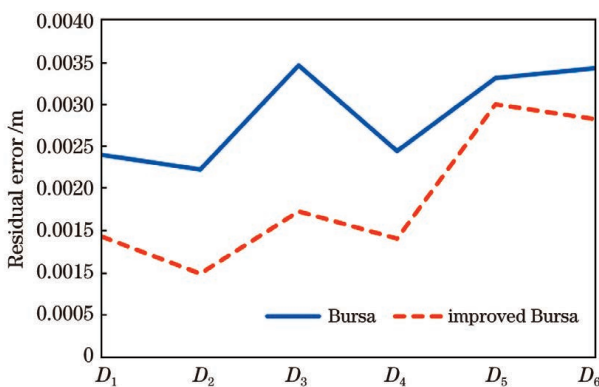


图 2 坐标转换点的残差曲线

Fig. 2 Residual error of the coordinate transformation point

为了验证改进算法的可靠性, 计算得到设站点、像控点的外业实测检查精度如表 2 所示。其中, 检测点 $P_1 \sim P_{10}$ 的计算值与实际值的轴向差异不超过 ± 2 cm, 点位差均值为 1.8 cm (小于 ± 2.5 cm), 满足输电线路空间关系测定的精度要求。

3.2 地基激光三维扫描获取的线路点云

采用某影像 3D 激光扫描仪对线路地面设站进行扫描, 扫描杆塔时对向设站或围绕设站, 按设计线路走向设站。为了完成全覆盖、保证测程, 一般每 2 个杆塔之间设 2~3 站。采用 TBC 或 Real works 软件完成点云去噪、匹配、拼接。点云的扫描结果如

表 2 外业抽查的精度
Table 2 Precision of the field survey

unit: m

No.	Calculated value			Surveyed value			Difference value		
	x	y	h	x	y	h	D_x	D_y	D_h
P_1	32659.71	62922.242	66.616	32659.708	62922.247	66.605	-0.002	0.005	-0.011
P_2	42807.804	64663.308	72.891	42807.799	64663.306	72.869	-0.005	-0.003	-0.022
P_3	44881.183	85990.467	57.705	44881.190	85990.450	57.724	0.007	-0.017	0.019
P_4	49879.346	54628.685	52.897	49879.326	54628.679	52.895	-0.019	-0.006	-0.002
P_5	51569.381	68903.335	55.265	51569.365	68903.343	55.263	-0.016	0.008	-0.002
P_6	52650.06	72017.472	53.668	52650.048	72017.471	53.656	-0.012	0	-0.012
P_7	54060.021	57224.324	72.443	54060.008	57224.310	72.452	-0.013	-0.014	0.009
P_8	56349.928	60731.982	53.899	56349.923	60731.964	53.913	-0.005	-0.018	0.013
P_9	58106.627	48881.954	53.686	58106.630	48881.963	53.685	0.003	0.009	-0.001
P_{10}	59318.775	56961.722	53.580	59318.767	56961.735	53.588	-0.008	0.013	0.008

图 3 所示,可以发现,杆塔、悬线的点云完整,且放大后细节清晰、棱角分明,能客观反映线路设施的空间几何特征,如图 3(a)所示。激光扫描对线型、镂空对象特征的反映能力强,单站点云的内符合精度优于 $\pm 1\text{ mm}$ 。但受限于扫描对象静态反射激光信号不产生叠影的要求,该方法对线路周边植物枝叶的风动反射点云误差较大,如图 3(b)中左下角植被叠影不能显示轮廓,无法作为地物空间关系测定的依据。

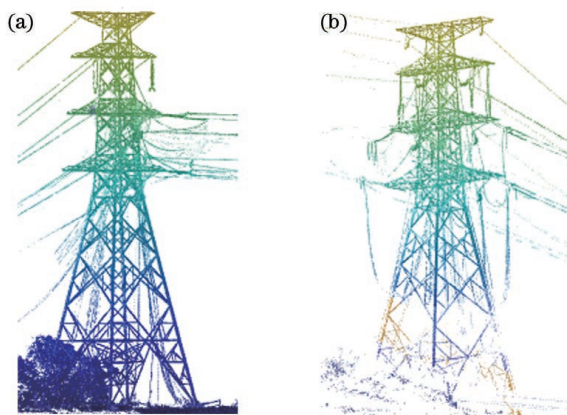


图 3 点云的扫描结果。(a)点云 1;(b)点云 2
Fig. 3 Scanning result of the point cloud. (a) Point cloud 1; (b) point cloud 2

3.3 无人机倾斜摄影及真三维建模

采用固定翼、螺旋翼相结合的无人机搭载镜头组,对线路开展倾斜摄影,拍摄宽度不小于线路杆塔最大臂张宽度的 2 倍。为了保证重叠度,避免周边地物发生遗漏,实际中按 200 m 的宽度拍摄。现场

布设像控点与激光扫描地面设站点同步外业快速静态联测并统一平差,用商业软件完成航域分割、航线规划、像对质量初检、空三解算并搭建 44 km 长的线路真 3D 模型,如图 4、图 5 所示。其中,模型的地面分辨率为 2 cm。可以发现,倾斜摄影建立的模型逼真细腻,镜头覆盖范围内的地理信息完整,分辨率满足精细测量的要求。图 4 中的场景受相机分辨率及航摄重叠度的影响,树冠下及其他遮盖处信息有所缺失。图 5 采用地面激光 3D 扫描获取的点云叠加补充并与倾斜摄影的成果进行融合后,杆塔空间特征清晰、无遗漏。



图 4 基于倾斜摄影构建的真 3D 模型
Fig. 4 True 3D model based on tilt photography

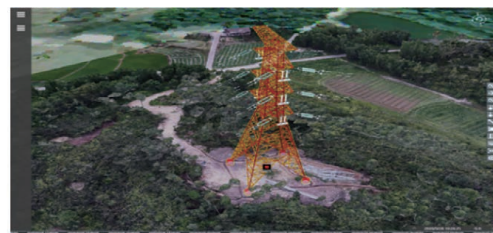


图 5 基于激光点云和倾斜摄影构建的真 3D 模型
Fig. 5 True 3D model based on laser point cloud and tilt photography

3.4 空间测量与分析

将杉树的两项扫描成果(主要为 OSGB/.LAS 数据)转换并导入 GIS 平台,形成线路空间现状仿真,完成线路的几何特征测量、线路与公路交通跨越空间分析、线路与既有线路交叉空间分析等,结果如图 6、图 7 所示。其中,线路悬线某点与地面净空的垂直距离为 9.562 m,正负号表示距离矢量方向。可以发现,二者通过坐标配准导入 GIS 平台后,匹配情况良好,可全面反映线路及周边地物的空间关系,借助 GIS 平台既有的功能,可使测定线路与地物的空间关系精度达到 cm 量级。

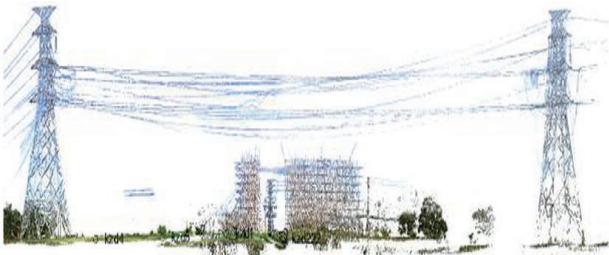


图 6 线路的空间关系

Fig. 6 Spatial relationship of the route

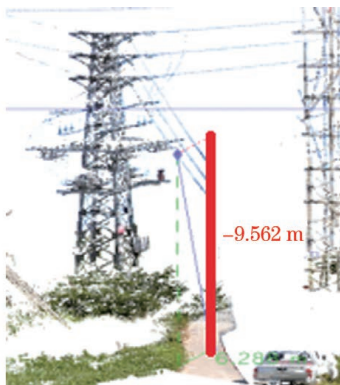


图 7 实测的线路空间关系

Fig. 7 Measured spatial relationship of the route

4 结 论

实验采用无人机倾斜摄影(cm 量级)、激光雷达 3D 扫描(mm 量级)两种数据采集方式,获得对象的高精度空间特征,并将两种方法获得的数据进行融合,得到线路杆塔、悬线等线路对象完整的空间特征。将激光雷达 3D 扫描与无人机倾斜摄影的坐标系经过空间基准转换后叠加融合,为了保证数据的叠加精度,用改进后的 Bursa 算法统一两套成果的空间基准。外业检测结果表明,该算法的转换精度优于 ± 2.5 cm(轴向差异不超过 ± 2 cm,点位差均值为 1.8 cm),满足线路空间关系测定的要求。将融合配准的 3D 数据导入 GIS 平台后无属性丢失,

空间信息完整,成果逼真,点云内符合精度在 mm 量级,基于倾斜摄影构建的模型地面分辨率为 2 cm,平台测量的分析精度达到 cm 量级。相比传统现场工点测量方法,本方法中的激光雷达 3D 扫描可自动化,测量效率高、精度高;相比单一使用激光雷达 3D 扫描的方式,本方法中的无人机倾斜摄影真 3D 建模可提供线路的真实情景,空间状态直观、逼真,与周边地物空间关系明确,无遗漏,且人机交互性更强。下一步还需针对仿真情景下的潜在应用研究,如借助 GIS 平台的空间分析功能模拟研究台风等极端情况下线弧风摆等空间特征的发展变化。

参 考 文 献

- [1] He X, Ai Q, Zhu T Y, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019.
贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [2] Wang F, Wang Q, Sun J L, et al. Realdata-driven 3D smart simulation technology for substation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 112-117.
王菲, 王球, 孙建龙, 等. 真实数据驱动下的变电站三维智能仿真技术研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 112-117.
- [3] Liu L, Zhang Y Z, Wang X, et al. Research on deep integration of power cyber physical system under energy internet goals[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 2-9.
刘林, 张运洲, 王雪, 等. 能源互联网目标下电力信息物理系统深度融合发展研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 2-9.
- [4] Cai Y F, Huang Z H, Wu X Q, et al. Typhoon wind field observation method for overhead transmission lines in coastal area using Doppler lidar[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(4): 17-23, 84.
蔡彦枫, 黄增浩, 吴新桥, 等. 基于测风激光雷达的沿海架空输电线路台风观测方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 17-23, 84.
- [5] Huang T, Zhao S F, Bai Y R, et al. Method of real-time road target depth neural network detection for UAV flight control platform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041509.
黄涛, 赵栓峰, 拜云端, 等. 面向无人机飞控平台的实时道路目标深度神经网络检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041509.
- [6] Yan C. Application of 3D laser real scene technology

- in commanding urban construction [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(4): 142-143.
- 闫晨. 三维激光实景技术在智慧城市建设中的应用 [J]. *测绘通报*, 2016(4): 142-143.
- [7] Sun J, Xie W H, Bai R J. UAV oblique photogrammetric system and its application [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(6): 145-150.
- 孙杰, 谢文寒, 白瑞杰. 无人机倾斜摄影技术研究与应用 [J]. *测绘科学*, 2019, 44(6): 145-150.
- [8] Chu J, Sheng Y N. Application of UAV tilt photogrammetry in urban 3D modeling and 3D data updating [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(S1): 130-135.
- 褚杰, 盛一楠. 无人机倾斜摄影测量技术在城市三维建模及三维数据更新中的应用 [J]. *测绘通报*, 2017(S1): 130-135.
- [9] Liu D Q, Zhang J, Jin J C. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110002.
- 刘德庆, 张杰, 金久才. 基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0110002.
- [10] Ren Z J, Lin S Z, Li D W, et al. Mask R-CNN object detection method based on improved feature pyramid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041502.
- 任之俊, 蔺素珍, 李大威, 等. 基于改进特征金字塔的 Mask R-CNN 目标检测方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041502.
- [11] Chen L L, Zhang Z D, Peng L. Real-time detection based on improved single shot MultiBox detector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011002.
- 陈立里, 张正道, 彭力. 基于改进 SSD 的实时检测方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011002.
- [12] Xu X C, Xu A G, Yu D. Study on influence factors of scanning point cloud registration of 3D laser [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(2): 14-18.
- 徐辛超, 徐爱功, 于丹. 地面三维激光扫描点云拼接影响因素分析 [J]. *测绘通报*, 2017(2): 14-18.
- [13] Li Y, Su G Z, Lin Z J. Study on the method of extracting high precision DEM from oblique image [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(2): 30-34.
- 李莹, 苏国中, 林宗坚. 倾斜影像中提取高精度 DEM 的方法研究 [J]. *测绘通报*, 2017(2): 30-34.
- [14] Guo L K. Research on TDOM production with use of oblique photography [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(2): 79-81, 97.
- 郭林凯. 利用倾斜摄影进行 TDOM 制作的研究 [J]. *测绘通报*, 2017(2): 79-81, 97.
- [15] Di G S, Shen B Q, Gao B, et al. Application and accuracy analysis of image free UAV aerial photography system in highway strip terrain survey [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(2): 159-160.
- 狄桂栓, 沈彪群, 高波, 等. 免像控无人机航摄系统在公路带状地形测量中的应用与精度分析 [J]. *测绘通报*, 2017(2): 159-160.
- [16] Li Z K, Zheng S F, Liu R, et al. Comparison of several kinds of image processing software for unmanned aerial vehicle [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(6): 82-86.
- 黎治坤, 郑史芳, 刘锐, 等. 几种无人机正射影像处理软件的比较 [J]. *测绘通报*, 2016(6): 82-86.
- [17] Qiu W N, Tao B Z, Yao Y B. The theory and method of surveying data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.
- 邱卫宁, 陶本藻, 姚宜斌. 测量数据处理理论与方法 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [18] Chen Y, Shen Y Z, Liu D J. A simplified model of three dimensional-datum transformation adapted to big rotation angle [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(12): 1101-1105.
- 陈义, 沈云中, 刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(12): 1101-1105.