

无线传感器网络技术在倾斜摄影测量中的应用研究

徐帅军[†]

(甘肃煤田地质局综合普查队,甘肃 天水 741000)

摘要:针对传统的摄影测量平面化、精度低等问题,提出了一种基于无线传感网络技术的倾斜摄影测量方法。首先在无人机上搭载多个传感器、摄像机和无线通信设备对待测量地物进行摄影,利用搭载的窄带物联网和长距离低功耗无线数据通信技术无线通信设备将采集到的影像和相关信息传输出去,对侧面影像进行光轴经纬度模拟,再结合尺度不变特征转换算子实现多视影像匹配,最后采用体素结构近似内蕴点云简化算法对迭代最近点算法进行改进,实现地物影像的点云配准,最终实现倾斜摄影测量。该方案能够立体地展示被测物的各项信息,测量精度高,抗干扰能力强,经过实验,匹配准确率高于97%,配准均方根误差有明显降低。

关键词:倾斜摄影测量;SIFT算子;ICP算法;AIVS算法;无线传感器网络

中图分类号:TP39

文献标识码:A

Research on the Application of Wireless Sensor Network Technology in Tilt Photogrammetry

XU Shuaijun[†]

(Comprehensive Survey Team of Gansu Coalfield Geological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: Aiming at the problems of flatness and low accuracy of traditional photogrammetry, this study proposed a tilt photogrammetry method based on wireless sensor network technology. Firstly, multiple sensors, cameras and wireless communication equipment were equipped on the UAV to photograph the measured ground objects. Narrowband internet of things (NB-IoT) and narrowband low-power wireless data communication technology (Long Range LoRa) are used to transmit the captured images and related information, and simulate the latitude and longitude of the optical axis of the side image. Combining scale invariant feature transform (SIFT) operator to achieve more visual image matching, finally uses the voxel structure approximate intrinsic (approximate intrinsic voxel structure, The simplified AIVS) point cloud algorithm improves the iterative closest point (ICP) algorithm, realizes point cloud registration of ground object images, and finally realizes oblique photogrammetry. The scheme can display the information of the measured object in three dimensions, with high measurement accuracy and strong anti-interference ability. After experiments, the matching accuracy is higher than 97%, and the registration error of root mean square is significantly reduced.

Key words: tilt photogrammetry; SIFT operator; ICP algorithm; AIVS algorithm; wireless sensor network

倾斜摄影测量是一种新型的测量方法,这种测量方法需借助无线传感器网络技术进行地物影像的传输,能够立体地展现被测物的各项特征。现有的倾斜摄影测量研究中,文献[1]基于载波相位和后处理的动态差分构建了水利工程倾斜摄影测量实景三维模型,利用无人机进行了倾斜摄影测量,测量得到的模型包含纹理信息且测量精度高,但该方案仅适用于水利工程相关的工程测绘,无法沿用到其他场合。文献[2]利用倾斜摄影测量构建了悬索桥的三维模型,模型几何精度高,提高了桥梁病害检测效率,降低了检测难度,但该方法较易受到外界干扰,稳定性较差。文献[3]将倾斜摄影测量技术和无人机光学雷达结合起来构建了河道数字孪生模型,模型轮廓清晰,解决了河道工程测绘受遮挡、信号差的问题,但该方法运算成本较高,适用于要求较高的测绘项目。国外研究中,文献[4]提出了一种基于倾斜摄影测量的树木建模方法,构建参数模型模拟树木生长,还提出了一种基于控制参数分析的模型优化方案,最终实现了城市树木的建模,模型工作效率高,但该方案是通过预测得到的建模模型,不适用于工程测绘项目。文献[5]提出了一种基于邻域窗口的对象级变化检测方法,建立了考虑矿山类型的开采计算方法对矿山进行倾斜摄影测量,提高了露天矿变化检测精度和检测鲁棒性,但该方案仅针对采矿相关工程,不具备普适性。

针对这些问题,设计了一种基于无线传感器网络技术的倾斜摄影测量方法,先利用多个传感器采集地物影像及相关信息,再通过 NB-IoT 和 LoRa 进行影像传输,运用改进的 SIFT 算子进行多视影像匹配,最后采用 ICP 算法实现倾斜摄影测量的点云配准,最终实现对地物的测量。

1 基于改进 SIFT 算子的倾斜摄影测量多视影像匹配

倾斜摄影测量通过无线传感器采集多方位的地物影像,产生的多视影像不仅包含传统影像的正射影像,还包括地物的侧面影像,因此需对有重合度的影像进行提取同名点,即影像的特征匹配^[6]。

SIFT 算子通过对影像进行平移、旋转等操作实现特征匹配^[7],但由于多视影像中的倾斜影像匹配准确率较低,因此本研究采用一种改进的 SIFT 算子对多视影像进行匹配。

由于使用无人机拍摄的地物倾斜影像会受到成像时的光轴的影响,导致影像变形,而影像变形

的决定因素为光轴的经度和纬度,因此本研究先对影像光轴的经度和纬度进行模拟^[8],模拟后再利用 SIFT 算子对其进行特征匹配。

想要对光轴的经纬度进行模拟,就需先对经度角和纬度角进行采样,采样后再生成一个影像仿射变换矩阵,实现对影像的视角模拟。先求出影像的倾斜度,倾斜度如式(1)所示:

$$t = \left| \frac{1}{\cos \theta} \right| \quad (1)$$

式中, t 表示倾斜度, θ 即为纬度角。倾斜参数模拟图像如图 1 所示。

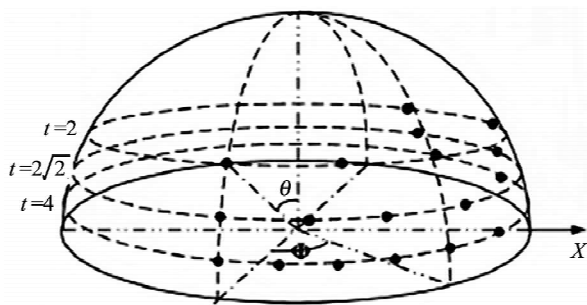


图 1 倾斜参数模拟图像

从图 1 可以看出,倾斜度 t 和经度角 φ 存在数学关系,因此,想要对光轴经纬度进行采样,只需对倾斜度进行采样,如式(2)所示:

$$t = 1, a, a^2, \dots, a^n \quad (2)$$

式中, a 为常数, $a > 1$, 倾斜度 t 以等比数列形式采样,对应的经度角采样如式(3)所示:

$$\varphi = 0, \frac{b}{t}, \dots, \frac{kb}{t} \quad (3)$$

式中, φ 为经度角, $b = 72^\circ$, $\frac{kb}{t} < 180^\circ$ 。对光轴经纬度的采样需要图 1 的倾斜参数模拟和旋转参数模拟共同完成,旋转参数模拟如图 2 所示:

经过图 1、图 2 的参数模拟后,将得到的倾斜度 t 和经度角 φ 代入影像仿射变换矩阵中,变换矩阵如式(4)所示^[9]:

$$\mathbf{I}^*(\varphi, t) = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \mathbf{I} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{I}^*(\varphi, t)$ 表示光轴经纬度模拟处理后的影像, $\mathbf{I}$ 表示待处理影像。光轴经纬度处理后即可采用 SIFT 算子进行多视影像匹配。

2 基于改进 ICP 的倾斜摄影测量点云配准

倾斜摄影测量中包含多个无线传感器,因此需

对其进行数据融合,本研究采用改进的 ICP 算法对点云数据进行配准,实现数据融合^[10]。

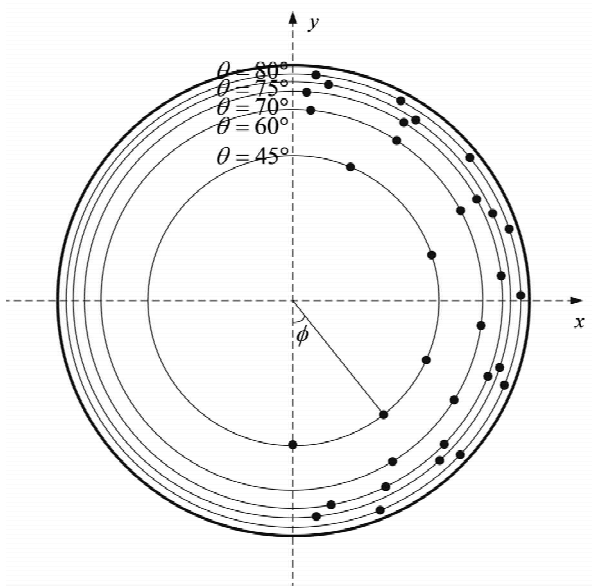


图 2 旋转参数模拟图像

ICP 算法先计算点与点的对应关系及度量距离,再更新变换矩阵达到最小距离,重复进行这两步计算直到收敛。设定两个点云集合如式(5)所示:

$$\begin{cases} \{P_i | p_i \in \mathbf{R}^3, i = 1, 2, 3, \dots, n\} \\ \{Q_i | q_i \in \mathbf{R}^3, i = 1, 2, 3, \dots, n\} \end{cases} \quad (5)$$

式中, i 表示点云数量, $\{P_i\}$ 表示源点云, $\{Q_i\}$ 表示目标点云, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵^[11]。先计算出源点云 $\{P_i\}$ 中的点再目标点云 $\{Q_i\}$ 中对应的最近点,如式(6)所示:

$$q_i = \mathbf{R} \cdot p_i + t \quad (6)$$

式中, q_i 为目标点云 $\{Q_i\}$ 中的点, p_i 为源点云 $\{P_i\}$ 中的点, t 为平移矩阵。通过式(6)对源点云 $\{P_i\}$ 变换后得到新的变换点集,设定平均距离误差为目标函数进行迭代计算,如式(7)所示:

$$(\mathbf{R}^*, t^*) = \arg \min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \cdot p_i + t - q_i\|^2 \quad (7)$$

式中, $(\mathbf{R}^*, t^*)$ 表示变换后的矩阵,即为 ICP 算法得到的点云配准结果。

为了降低计算难度,本研究采用 AIVS 算法对点云数据进行预处理,点云数据中体素越密集的地方越多有效信息,AIVS 算法将点云数据体素结构分解为子任务集合,实现对点云数据集合的简化^[12]。

ICP 算法以距离作为度量函数,而距离抗干扰能力差,较易受到外界影响,将度量函数换成

Welsch 函数,如式(8)所示:

$$\min_{\mathbf{R}, t} E(\mathbf{R}, t) = \sum_{i=1}^M \Psi_v(\|\mathbf{R} \cdot p_i + t - \hat{q}_i^{(k)}\|^2) + I_{\text{SO}(d)}(\mathbf{R}) \quad (8)$$

式中, p_i 表示源点云中的点, k 表示变换次数, $\hat{q}_i^{(k)}$ 表示目标点云中对应的点 k 次变换得到的结果, $I_{\text{SO}(d)}(\mathbf{R})$ 表示指示函数,当 $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ 且 $\det(\mathbf{R}) = 1$ 时,指示函数为 0, Ψ_v 表示 Welsch 函数, Ψ_v 如式(9)所示:

$$\Psi_v(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2v}} \quad (9)$$

式中, v 是一个可调参数,调节 v 的值, x 为 Welsch 函数变量,绘制对应的 Welsch 函数曲线,如图 3 所示。

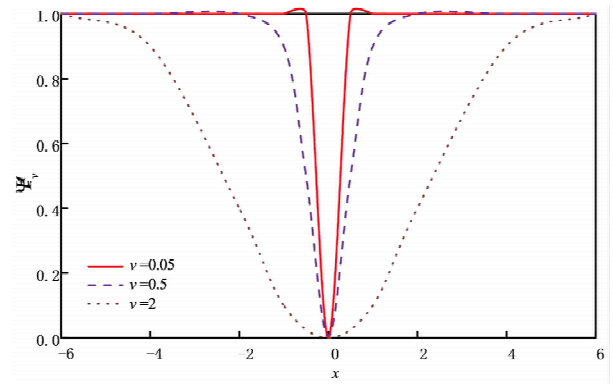


图 3 Welsch 函数曲线

由图 1 可以看出, x 趋向无穷时, Welsch 函数趋向于最大,设定初始位置最近点距离的中值为参数 v ,根据式(8)进行迭代计算,当目标函数出现收敛时,减小参数 v 的取值,直至低于预设终止数值,实现倾斜摄影测量的点云配准^[13]。

3 无线传感网络技术在倾斜摄影测量中的应用

倾斜摄影测量的各个步骤都包含多个传感器,因此倾斜摄影测量需借助无线传感器网络(Wireless Sensors Networks, WSN)技术,WSN 融合了嵌入式技术、无线通信技术和传感器技术,其中包括多个传感器节点,传感器节点采集到的信息再通过无线通信网络传输给用户^[14],WSN 系统结构如图 4 所示。

图 4 中每个传感器节点都包含微处理器和多个传感器,通过这些传感器能够更全面地把地物的各项信息传输给用户,本研究设计的倾斜摄影测量流程如图 5 所示。

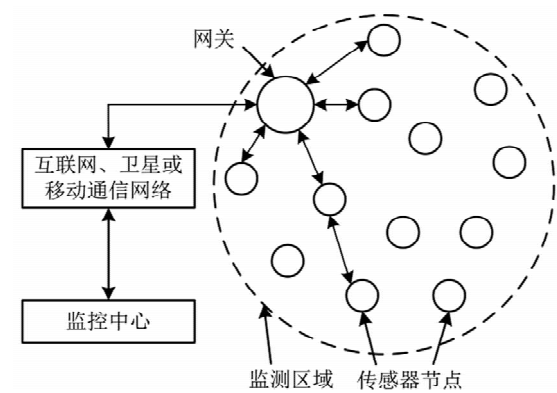


图 4 WSN 系统结构

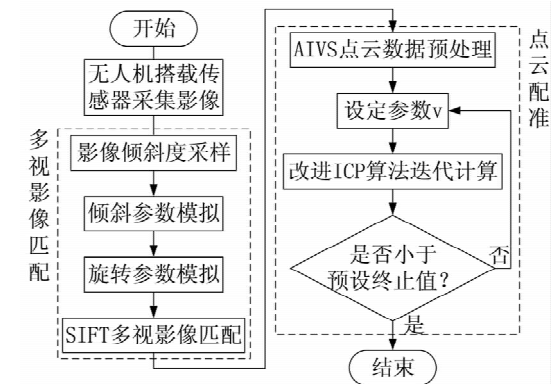


图 5 倾斜摄影测量流程

由图 5 可以看出,想要实现对影像的各种处理,需先利用传感器进行影像采集,可见 WSN 在倾斜摄影测量中具有十分重要的作用,因此本文针对倾斜摄影测量搭建了无线传感器网络。待测量物通过无人机组进行拍摄和影像信息传输,无人机组包含 k 个无人机,每个无人机上搭载了 m 个摄像机、 n 个传感器及无线通信模块,本研究采用 NB-IoT 和 LoRa 结合的方法实现无线通信^[15]。

NB-IoT 是一种低功耗广域网技术,基于蜂窝网络在运营商基站内运行,传输效率高,覆盖范围大。LoRa 基于次-GHz 的频段运行,传输距离相较于 NB-IoT 较短,但不依赖运营商基站,具有更强的灵活性^[16]。将 NB-IoT 和 LoRa 结合起来,能够保证传感器信号传输的覆盖范围,且功耗低,可靠性强。

经过无人机组拍摄和传输后,即可得到地物的多视影像及影像的倾斜度,传输进多视影像匹配模块对其进行经纬度模拟,利用 SIFT 算子实现倾斜摄影测量多视影像匹配;再将匹配后的影响通过无线通信设备传输给点云配准模块,最终实现地物影像的配准。

4 实验结果与分析

为了验证本研究所设计的基于无线传感器网络技术的倾斜摄影测量方法的各项性能,搭建实验架构利用 MATLAB 进行仿真实验,实验架构如图 6 所示。

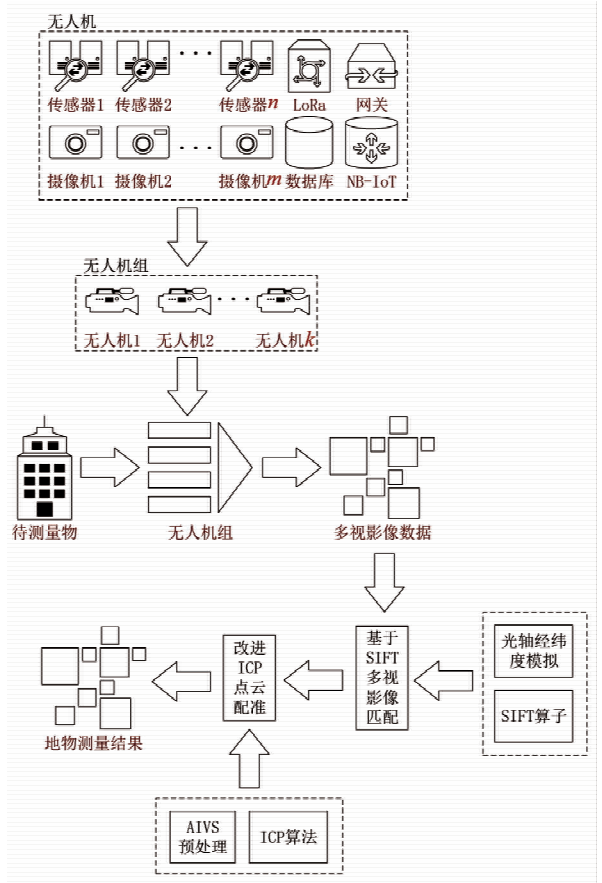


图 6 倾斜摄影测量实验架构

为了验证改进后的 SIFT 算子相较改进前是否有性能提升,利用改进前后的 SIFT 算子分别对正射影像进行影像匹配,匹配结果如表 1 所示。

表 1 正射影像匹配

算法	匹配点数	错误点数	正确率
改进 SIFT	3364	25	99.25%
SIFT	215	6	97.21%

从表 1 可以看出,改进后的 SIFT 算子对于正射影像匹配的匹配点数明显增多,且正确率较高。利用改进前后的 SIFT 算子分别对倾斜影像进行影像匹配,匹配结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,未改进的 SIFT 算子无法对倾斜影像进行匹配,改进 SIFT 算子匹配点数相较

正射影像有一定减少,但匹配正确率仍旧较高。因此,改进后的 SIFT 算子性能优越,匹配正确率较高。

表 2 倾斜影像匹配			
算法	匹配点数	错误点数	正确率
改进 SIFT	588	12	97.95%
SIFT	0	0	0

为了验证改进的 ICP 算法的各项性能,引入均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为算法评价指标,用于评估配准结果的准确度。均方根误差如式(10):

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|Rp_i + t - q_i\|^2}$$

(10)

式中, E_{RMS} 即为均方根误差。设置三组实验点云,A 组为随机选取无人机拍摄影像生成的点云,B 组、C 组都为无人机近景拍摄影像生成的点云,三组实验点云数据如表 3 所示。

表 3 实验点云数据		
实验点云	影像数量	三维点数量
A 组	2300	47766
B 组	5000	237370
C 组	1700	416216

分别采用 ICP 算法、AA-ICP 算法、Fast-ICP 算法和本研究改进的 ICP 算法对三组实验点云进行配准,计算配准结果的均方根误差和配准时间,其中配准时间用于衡量算法的实时性和效率。实验结果如表 4 所示。

表 4 点云配准实验					
		ICP 算法	AA-ICP 算法	Fast-ICP 算法	改进 ICP 算法
A 组	E_{RMS}	0.069	0.069	0.069	0.062
	配准时间/s	22	17	19	28
B 组	E_{RMS}	2.833	2.833	2.833	2.443
	配准时间/s	408	465	172	1168
C 组	E_{RMS}	2.455	2.301	2.301	2.212
	配准时间/s	103	135	87	368

将表 4 中 A 组实验点云实验结果绘制成图像,如图 7 所示。

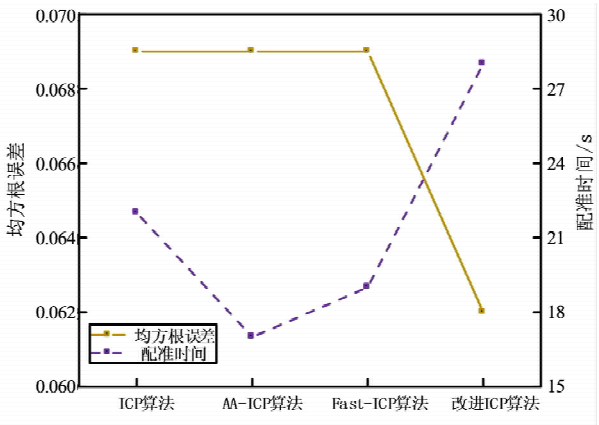


图 7 A 组实验点云配准

从图 7 可以看出,对于 A 组实验点云,改进 ICP 算法均方根误差有少量降低,配准消耗时间有一定程度的升高。将表 4 中 B 组实验点云实验结果绘制成图像,如图 8 所示。

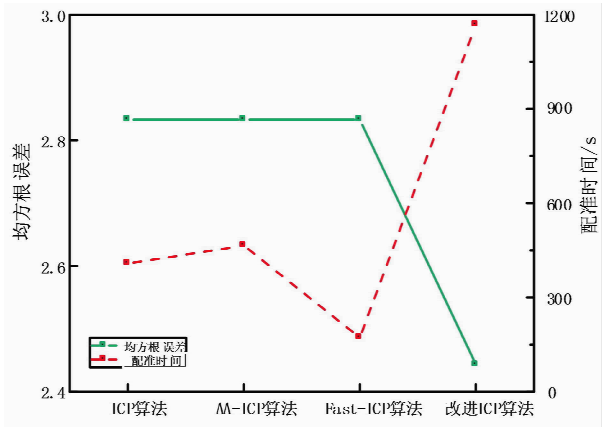


图 8 B 组实验点云配准

从图 8 可以看出,对于 B 组实验点云,改进 ICP 算法均方根误差明显降低,Fast-ICP 算法配准消耗时间最短,本研究改进的 ICP 算法配准时间最长。将表 4 中 C 组实验点云实验结果绘制成图像,如图 9 所示。

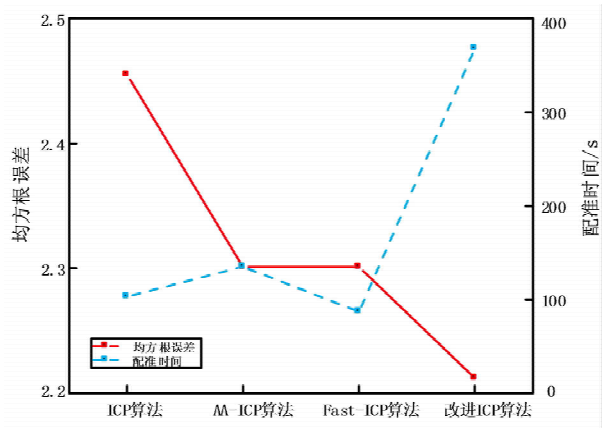


图 9 C 组实验点云配准

从图 9 可以看出,对于 C 组实验点云,AA-ICP 算法和 Fast-ICP 算法的均方根误差都较原始 ICP 算法有明显下降,本研究的改进 ICP 算法均方根误差最小,但配准时间最长,由此可以得出,本研究采用的改进 ICP 算法均方根误差最低且稳定性较强,虽然配准时间有少量升高但仍能保持较高的配准效率。

为了验证无线传感器网络技术的性能,以丢包率作为评价指标进行实验分析,将本文采用的 WSN 技术与文献[1]、文献[2]和文献[3]方法进行对比分析,比较在不同传输距离的情况下,WAN 的性能变化。四种方法丢包率对比结果如图 10 所示。

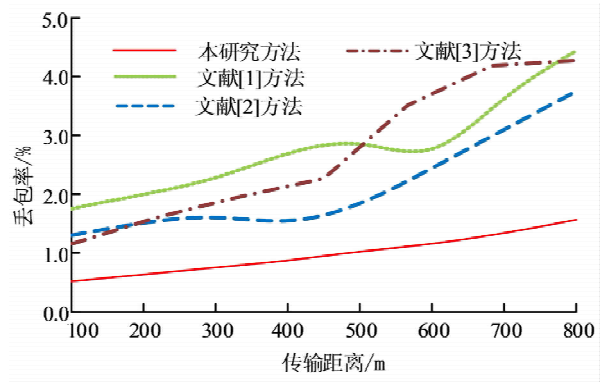


图 10 四种方法丢包率对比结果

由图 10 可知,随着传输距离的增加,四种方法的丢包率整体来说均增加,意味着数据在传输过程中丢失的概率也在增加。但本研究方法的丢包率明显低于其他三种方法,且随着传输距离的增加,丢包率趋势增长的并不明显,最高增长到 1.5%,远低于其他三种方法。因此,本研究采用无线传感器网络技术在数据传输上,有着卓越的优势,进一步验证了本研究方法的有效性和可行性。

5 结 论

设计了一种基于无线传感器网络的倾斜摄影测量方法。利用搭载了传感器和摄像机的无人机采集待测量地物的多视影像,通过对倾斜影像的光轴经纬度进行模拟改进了 SIFT 算子,实现了多视影像匹配。运用 AIVS 算法对影像点云数据进行预处理,简化了点云数据,将有效信息提取出来,设置 Welsch 函数为度量函数优化 ICP 算法,实现了倾斜摄影测量的点云配准。最后结合 NB-IoT 和 LoRa 构建了无线传感器网络,实现被测地物影像信息的无线传输。该方案匹配、配准准确率高,抗

干扰能力强,但识别效率还需进一步提高,后续应在这方面深入研究。

参考文献

[1] 张林杰,黄筱,饶维冬,等.网络 RTK 和 PPK 辅助水利工程免像控无人机倾斜摄影测量三维建模分析[J].测绘通报,2023,553(4):115—120.

[2] 吴凌霄,段祝庚,江学良.无人机倾斜摄影测量构建悬索桥三维模型与病害检测——以邵阳市桂花大桥为例[J].科学技术与工程,2023,23(8):3153—3161.

[3] 樊冰,胡晓宁,马良,等.无人机 LiDAR 及倾斜摄影测量技术在复杂河道工程测绘中的融合研究[J].水运工程,2023,604(1):11—17+28.

[4] WANG X XIANG H Y, NIU W Y, et al. Oblique photogrammetry supporting procedural tree modeling in urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 200.

[5] CAO D G, ZHANG B L, ZHANG X B, et al. Optimization methods on dynamic monitoring of mineral reserves for open pit mine based on UAV oblique photogrammetry[J]. Measurement, 2023, 207: 112364.

[6] 胡云华,许海超,曲双锋,等.倾斜摄影测量技术在生产建设项目水土保持监管中的应用[J].水土保持研究,2022,29(6):438—443.

[7] 李文举,王子杰,崔柳.基于多特征融合和改进 SIFT 的目标跟踪算法[J].郑州大学学报(理学版),2024,56(1):40—46.

[8] 盛海泉,覃婕,周吕,等.无人机倾斜摄影测量与 GNSS 土方量测算精度对比分析[J].测绘通报,2022(S2):310—315.

[9] 蔡小超,唐红涛.运用倾斜摄影测量技术精细提取新疆皮山县地质构造定量参数[J].地震研究,2022,45(3):468—478.

[10] 程建华,丁惠倩,常乐,等.基于 TERCOM-ICP 联合算法的水下地形匹配方法研究[J].导航定位与授时,2023,10(2):39—46.

[11] 刘禹麒,陈广亮,蔡岳臻,等.一种基于倾斜摄影测量点云密度自适应分割的建筑物边界提取方法[J].测绘通报,2022,546(9):52—57.

[12] 尹长林,许文强,姜琦,等.倾斜摄影三维建筑模型自动单体化与轮廓提取方法[J].测绘工程,2023,32(3):62—68.

[13] 王立新,郭凰,杨佳宇,等.无线通信在结构健康监测系统的应用研究综述[J].科学技术与工程,2023,23(6):2229—2241.

[14] 申小萌.无线传感器网络在食品物流监控中的应用——《无线传感器网络:原理与实践》评述[J].食品与机械,2022,38(4):241—242.

[15] 李蕾,方明科.基于证据理论加权融合的无线传感器网络路由算法[J].吉林大学学报(理学版),2020,58(5):1223—1228.

[16] 袁开银,王峰.基于指标选择和加权融合的无线传感器网络安全风险评估[J].吉林大学学报(理学版),2020,58(4):937—943.