

# 机载激光雷达景像匹配辅助导航方法



王晓龙, 赵龙

北京航空航天大学, 北京 100191

**摘要:**以可见光视觉传感器方案为代表的景像匹配导航方法容易受光照、天气等外部环境变化影响,无法完成图像信息的有效采集,导致导航系统误差发散。为解决该问题,本文提出了一种机载激光雷达景像匹配辅助导航方法。首先,对激光点云数据进行预处理,拼接激光点云数据并提取点云强度信息构建激光点云强度图像;其次,基于异源图像特征匹配方法提取激光点云强度图像与先验基准地图中的特征信息进行特征匹配;最后,从特征匹配结果中提取匹配定位信息,将其引入惯性/景像匹配融合导航框架,进而校正惯性导航系统发散误差。经真实飞行数据测试验证,本文方法能有效抑制惯性导航系统的误差发散,其导航精度 $\leq 2\text{m}$ ,并且可实现全天时条件下应用。

**关键词:**激光雷达; 图像匹配; 景像匹配导航; 惯性导航; 融合导航

中图分类号: V249

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.12.005

景像匹配导航是一种采用视觉传感器获取飞行器周围或目标区域附近的航拍图像,通过与事先建立的基准地图(如数字正射影像图(DOM))匹配来获取飞行器位置数据的自主导航方法<sup>[1]</sup>。该类方法与传统的惯性导航、卫星导航等技术并行发展,并且可以作为这些技术的有效补充。通过赋予飞行器“视觉”能力,景像匹配导航利用图像间的匹配搜索和识别等技术,能够在卫星信号拒止等强电磁干扰对抗环境下飞行器的长航时、高精度导航需求。

根据所采用成像传感器方案的不同,现阶段景像匹配导航方法主要可以分为基于光学、红外和雷达图像三种类型<sup>[2]</sup>。其中,以“战斧”巡航导弹为代表的光学图像匹配导航技术能够通过直接成像,为系统提供高分辨率且清晰的目标图像<sup>[3]</sup>。然而,当应用于烟雾、尘埃等能见度差以及夜晚等环境中时,其性能会因为难以对环境有效成像出现显著下降;基于红外图像匹配技术的景像匹配导航方法虽然在昼夜和能见度低的条件下依然具备良好的工作能力和光电干扰抵抗能力,但该类方法所采用的成像传感器往往有效作用距离有限,难以实现远距离工作;采用合成孔径雷达(SAR)、干涉合成孔径雷达(InSAR)等传感器的雷达图像匹配导航技术相较于前两者在全天时、全天候,以及较高飞

行高度的应用方面具有明显优势,但该类传感器在近距离成像方面同样存在一定局限性且易受干扰,同时由于该类设备的造价普遍较高,更是限制了其在更广范围机载导航系统中的应用<sup>[4]</sup>。

此外,近年来为提升景像匹配导航抗干扰能力的改进算法也不断涌现<sup>[5-7]</sup>。Zhao Chunhui等<sup>[8]</sup>在利用视觉里程计对飞行器帧间连续相对运动进行估计的同时,通过在景像匹配可用区域利用图像匹配获取飞行器绝对定位信息,并将其作为辅助定位信息消除里程计的积累误差进而实现连续高精度导航。Wang Huaxia等<sup>[9]</sup>则利用在不同日期和时间采集的数字地表模型(DSM)制备基准阴影地图,通过提取航拍图与基准图中的阴影信息并将其作为一种新的景像匹配稳定特征,增强了景像匹配方法在光线变化环境中的鲁棒性。

随着传感器技术的不断改进,激光雷达作为一种主动成像测量传感器,在弹载末段制导和大地测绘等领域逐步得到广泛应用<sup>[10]</sup>。相较于被动成像传感器,激光雷达具备抗干扰能力强、信息量大等特点,能够直接获取三维空间分布信息。然而,尽管激光雷达已在上述领域取得了显著成就,但在飞行器景像匹配导航方面的应用成果却相对较少。

收稿日期: 2024-04-28; 退修日期: 2024-07-25; 录用日期: 2024-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(42274037); 航空科学基金(2022Z022051001)

引用格式: Wang Xiaolong, Zhao Long. Airborne LiDAR scene matching aided navigation method[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12): 40-46. 王晓龙, 赵龙. 机载激光雷达景像匹配辅助导航方法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12): 40-46.

激光雷达通过发射激光光束获取包括距离图像和强度图像等信息在内的激光点云数据,其中强度图像和光学图像具有相同的机理和相似的性质,在异源图像匹配中表现出良好的可匹配性,因此将激光雷达应用于飞行器景像匹配导航具有重要价值。

因此,本文提出了一种机载激光雷达景像匹配辅助导航方法,首先通过拼接一定范围内的点云数据,构建激光点云强度地图;其次利用异源图像特征匹配方法,提取点云强度图像与可见光景像基准地图中的特征信息,完成特征匹配并对飞行器位置参数进行估计。通过构建惯性/景像匹配组合导航框架,将位置估计结果作为观测信息,校正惯性导航系统发散误差。在此基础上,通过真实飞行数据对本文所提出的方法进行测试,并与纯惯性导航解算结果以及惯性/卫星组合导航解算结果进行对比,验证了所提方法的有效性。

## 1 激光点云强度图像构建方法

### 1.1 激光点云建图

激光点云建图通过提取三维空间点云数据中的水平分布及强度信息,将其转换为点云强度图像。其中,激光点云数据由固定连接在飞行器机体上的下视机载激光雷达扫描系统获取,其工作示意图如图1所示。该系统通过向下发射激光脉冲,接收反射信号,获取地面或地表物体的空间分布以及反射强度信息。

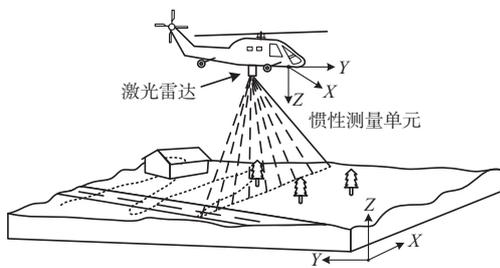


图1 机载激光雷达扫描成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of airborne LiDAR scanning imaging

为确保生成的点云强度图像能够覆盖足够的区域范围并为景像匹配提供足够的特征信息,需要对一定帧数内的点云数据进行空间对齐和整合。为此,本文以 $k$ 时刻导航坐标系 $n$ 中载体位置为原点,建立局部导航坐标系 $n_k$ ,对相邻帧 $j$ 时刻的三维点云数据 $p_j^l$ 进行坐标转换及航带拼接,得到局部导航坐标系 $n_k$ 下的点云区域地图。该变换关系可以表示为

$$p_j^{n_k} = T_{b_k}^{n_k} T_{b_j}^{b_k} T_i^b p_j^l \quad (1)$$

式中, $T_i^b$ 为激光雷达坐标系 $l$ 向载体坐标系 $b$ ,即惯性测量元件(IMU)坐标系的位姿变换矩阵; $T_{b_j}^{b_k}$ 为由惯性导航估计得到的相邻帧间载体相对运动位姿变换矩阵; $T_{b_k}^{n_k}$ 为 $k$ 时刻由载体坐标系 $b$ 向导航坐标系 $n$ 的位姿变换矩阵。

为建立点云强度图像,需要从点云中截取一定矩形成像区域内的数据,并将其由原始时间序列投影至大地平面后按一定网格分辨率大小进行重采样,得到规则格网化的二维数据阵列。其中,由于激光雷达在扫描过程中会产生一定的“强度异常点”,该类的强度值要明显区别于周围近邻点,如果不对其进行处理,后续点云图像像素值的量化结果将会受到影响,图像有效灰度范围将被明显压缩。为此,本文采用增量式 $K$ 维树结构<sup>[11]</sup>对重投影后的点云数据进行遍历搜索,通过统计被遍历点坐标 $p_i$ 周围近邻点的强度值分布均值 $\mu_i$ 和标准差 $\sigma_i$ ,当点 $p_i$ 的强度值 $r_i$ 满足式(2)中条件时,即判定该点为强度异常点并将其从原始点云中剔除。

$$|r_i - \mu_i| > 3\sigma_i \quad (2)$$

此外,为使点云强度值更好地适应灰度图像的范围,需要对规则格网化后的点云强度值进行拉伸和量化处理,使处理后的点云强度值能够刚好被映射至0~255的整数范围内,得到最终的激光点云强度图像建图结果。

### 1.2 激光点云强度图像预处理

由于激光的相干性和目标表面材质的粗糙性,经点云建图处理后的激光点云强度图像中通常存在明显的散斑噪声。这种噪声不仅降低了图像的成像质量,而且还将对景像匹配过程中的特征提取和匹配工作造成干扰,影响景像匹配结果的准确性和可靠性。因此,对点云强度图像进行优化,有效处理图像中的噪声成分便显得尤为重要。

点云强度图像中的散斑噪声是一种呈随机分布的乘性噪声,本文首先通过对图像进行同态变换,将难处理的乘性噪声转换为加性噪声。同态变换不仅能够简化图像噪声的处理过程,还能够增强图像的细节特征,为后续的降噪处理提供更好的数据基础。

在同态变换的基础上,进一步采用小波分解技术对图像进行多尺度分析。小波分解能够根据图像中有效信号和噪声两种分量不同分布特征将两者分离,使有效信号分量主要集中于低频系数区域,噪声成分则主要分布于高频系数区域中。本文采用指数修正阈值函数<sup>[12]</sup>对小波分解后的高频系数区域进行处理,即

$$\hat{\omega}_i = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_i) \left( |\omega_i| - \lambda \frac{\exp(\lambda + 1)}{\exp(|\omega_i + 1|)} \right), & |\omega_i| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_i| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\omega_i$  与  $\hat{\omega}_i$  分别为经小波分解和阈值函数处理后的高频分量系数;  $\lambda$  为经贝叶斯萎缩 (BayesShrink) 法<sup>[13]</sup> 确定的小波阈值。通过该方法可以有效地减少激光点云强度图像中的散斑噪声, 提高图像的成像质量, 进而为后续景像匹配提供更准确的特征信息。

## 2 异源图像景像匹配辅助导航方法

### 2.1 异源图像特征匹配定位

传统图像匹配算法大多是基于待匹配图像之间具有相似灰度或者颜色分布这一假设, 这意味着该类算法通常仅适用于具有相同成像模式的同源图像间匹配任务。而由于点云强度图像与可见光基准图像在灰度分布上存在显著差异, 这就导致许多传统的图像匹配算法无法有效用于异源图像间的匹配任务。

为解决点云强度图像与可见光基准图像间的异源图像匹配问题, 本文采用基于结构一致性增强的方向结构直方图 (HOSM) 描述子<sup>[14]</sup> 对图像中的特征点检测结果建立特征描述并用于匹配, 其实现流程如图 2 所示。

该方法首先基于可见光基准图像与点云强度图像在强边缘结构方面所具有的相似性和稳定性, 采用扩充索贝尔 (Sobel) 算子提取异源图像在多方面的边缘结构图, 用于获取尽可能多的图像关键结构信息; 其次基于局部对比提取导向图像, 对边缘结构图进行导向滤波并生成多方向结构特征图, 增强异源图像间的结构一致性; 最后以加速分割测试 (FAST) 特征点检测结果为中心, 在结构特征图中基于特征点周围像素子区域内像素的分布情况, 构建归一化联合特征直方图, 以此作为特征点描述子用于特征匹配。

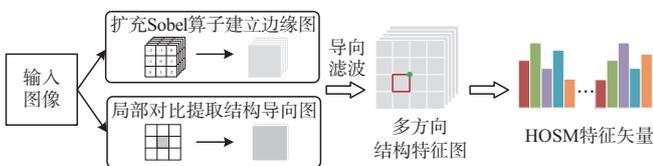


图2 基于HOSM特征描述子建立方法

Fig.2 Establishment method based on HOSM feature descriptor

在特征匹配的过程中, 若仅依靠欧式距离来衡量描述子间的相似性, 往往会产生大量的误匹配点对, 这将严重影响匹配结果的准确性。因此, 为提高正确匹配点对的比例,

本文基于最近邻比率 (NNDR) 策略对匹配结果进行优化。NNDR 策略通过比较每个特征点描述子与其最近邻以及次近邻描述子间的距离来判断匹配结果的可靠性, 具体可以表述为

$$\frac{\|D_q - D_t^1\|}{\|D_q - D_t^2\|} \leq t \quad (4)$$

式中,  $\|\cdot\|$  为描述子间的欧式距离;  $D_q$  为点云强度图像中特征点对应的 HOSM 描述子矢量;  $D_t^1$  与  $D_t^2$  分别为基准景像地图中与  $D_q$  间距离最近和次近的特征点 HOSM 描述子矢量;  $t$  为 NNDR 比率阈值系数, 本文设置为 0.85。

为进一步提升匹配结果的准确性, 本文在采用 NNDR 优化策略的基础上, 利用随机采样一致性 (RANSAC) 算法对优化结果进一步筛选。RANSAC 算法通过迭代从优化后的匹配点对中随机抽取样本, 计算图像间变换模型并评估其对所有数据的适应度, 从而筛选出一组最佳匹配点对, 以此来排除与其对应模型不符的误匹配点对。

景像匹配的目的是通过提取定位信息, 确定飞行器自身位置。传统的基于滑窗式遍历搜索的匹配方法容易产生过多的重复计算, 导致匹配效率低下。为解决该问题, 本文以 2.2 节构建的惯性/景像匹配组合导航框架对飞行器位姿的估计结果为中心, 根据  $3\sigma$  原则提取 3 倍位置估计误差范围内的先验基准图片段, 用于与点云强度图像进行匹配。基于异源图像特征匹配结果确定飞行器位置坐标的原理如图 3 所示。

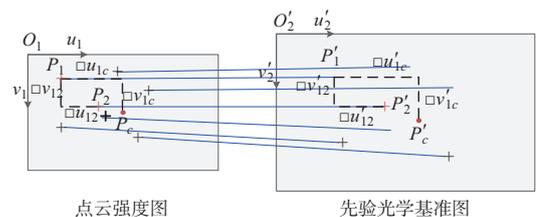


图3 基于匹配点对获取景像匹配定位信息

Fig.3 Obtain scene matching positioning information based on matching point pairs

在得到图像特征匹配结果后, 通过选取点云强度图像中任意两组互异特征点 ( $P_1, P_2$ ) 及先验基准图中对应匹配特征点 ( $P'_1, P'_2$ ), 利用上述点对在各自图像中的纵横像素坐标差值 ( $\Delta u_{12}, \Delta v_{12}$ ) 和 ( $\Delta u'_{12}, \Delta v'_{12}$ ), 确定先验基准图在纵横两个方向相对点云强度图像的比例系数 ( $S_u, S_v$ ) 为

$$\begin{cases} S_u = \Delta u'_{12} / \Delta u_{12} \\ S_v = \Delta v'_{12} / \Delta v_{12} \end{cases} \quad (5)$$

基于RANSAC算法确定比例系数的最优结果。点云强度图像中心点 $P_c$ 的像素位置已知,因此可以基于比例系数确定其在先验基准图中对应点 $P'_c$ 的像素位置进而获取该点的全局位置信息,完成景像匹配。

## 2.2 惯性/景像匹配融合导航框架

景像匹配技术常被用作辅助导航方式,用于与惯性导航相结合,形成融合导航系统以此来提高飞行器导航系统精度。误差状态卡尔曼滤波(ESKF)是一种高效的状态估计算法,能够在避免扩展卡尔曼滤波(EKF)所带来的线性化误差的同时,保证对系统状态的实时估计和对系统状态误差的校正。本文基于ESKF对惯性/景像匹配融合导航系统进行建模,选取15维惯性导航系统误差状态矢量 $\delta\mathbf{x}(t)$ 为

$$\delta\mathbf{x}(t) = [(\delta\mathbf{r}^n)^T \ (\delta\mathbf{v}^n)^T \ \phi^T \ \mathbf{b}_g^T \ \mathbf{b}_a^T]^T \quad (6)$$

式中, $(\delta\mathbf{r}^n)^T$ 为位置误差矢量; $(\delta\mathbf{v}^n)^T$ 为速度误差矢量; $\phi^T$ 为姿态误差矢量; $\mathbf{b}_g^T$ 为陀螺仪零偏矢量, $\mathbf{b}_a^T$ 为加速度计零偏矢量。上述各矢量均为时变矢量,为方便书写,省略了时间符号 $t$ 。

惯性导航误差方程和建模为一阶高斯马尔可夫过程的陀螺仪与加速度计零偏<sup>[15]</sup>为

$$\begin{cases} \delta\dot{\mathbf{r}}^n = \delta\mathbf{v}^n \\ \delta\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{f}^n \times \phi - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times \mathbf{v}^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta\mathbf{v}^n + \mathbf{b}_a^n \\ \dot{\phi} = \delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n - (\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times \phi + \mathbf{b}_g^n \\ \dot{\mathbf{b}}_g = -\frac{1}{T_g} \mathbf{b}_g + \mathbf{w}_g \\ \dot{\mathbf{b}}_a = -\frac{1}{T_a} \mathbf{b}_a + \mathbf{w}_a \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{f}$ 为加速度计感知的比力真值矢量; $\delta\omega_{ie}$ 与 $\delta\omega_{en}$ 分别为地球自转角速度 $\omega_{ie}$ 和位置角速度 $\omega_{en}$ 的扰动误差矢量; $T_g$ 和 $T_a$ 为一阶高斯马尔可夫过程的相关时间; $\mathbf{w}_g$ 和 $\mathbf{w}_a$ 为一阶高斯马尔可夫过程的驱动白噪声矢量。以此建立得到ESKF系统状态方程

$$\delta\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{F}(t)$ 为由式(7)确定的系统状态转移矩阵; $\mathbf{G}(t)$ 为系统噪声矩阵

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{w}(t)$ 为系统噪声矢量

$$\mathbf{w}(t) = [\mathbf{w}_v^T \ \mathbf{w}_\phi^T \ \mathbf{w}_g^T \ \mathbf{w}_a^T]^T \quad (10)$$

当景像匹配结果可用时,系统以惯性导航递推位置与由景像匹配获得的匹配定位位置的差值作为位置观测信息矢量 $\delta\mathbf{z}(t)$ ,并构建ESKF量测方程

$$\delta\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{H}(t) = [\mathbf{I}_{2 \times 2} \ \mathbf{0}_{2 \times 13}]$ 为系统观测矩阵, $\mathbf{n}(t) = [n_x \ n_y]^T$ 为系统量测噪声矢量,其方差根据先验景像地图网格分辨率大小的倍数进行设定。当景像匹配结果不可用时,系统则仅执行惯性导航力学编排及ESKF的预测过程。通过观测方程可以完成对系统误差状态递推结果的修正,并基于修正后的系统误差状态完成对系统状态的反馈更新。

## 3 试验与结果分析

### 3.1 试验数据准备

为验证本文所提方法的有效性和可行性,在试验部分通过直升机机载激光雷达测量系统采集真实飞行数据对其进行测试。如图4所示,机载测量系统配备一台机载激光雷达扫描设备,该设备可在150~6000m地面高度下具备最高可达1MHz的地面点云扫描频率和10°~60°动态可调的视场角(FOV)大小,能够在飞行过程中捕提高精度和高分辨率且宽度固定的地面点云信息。

除激光雷达外,该机载测量系统还配备IMU传感器,其采样频率达到125Hz,可用于提供高精度的飞行器姿态和加速度数据。同时,系统还装备了全球导航卫星系统(GNSS)接收机,用于与惯性导航融合,获取飞行器的导航定位信息真值。此外,为了拍摄地面图像,用于制备先验景像地图数据,系统还配备了可见光视觉传感器。

在数据采集阶段,直升机按照预先规划的航线飞行。在飞行过程中,激光雷达、IMU以及GNSS协同工作,同步



图4 直升机机载激光雷达测量系统

Fig.4 Helicopter airborne LiDAR measurement system

采集地面的点云数据和飞行器的姿态数据。在数据采集完成后,利用专业软件和采集的位姿数据对所拍摄得到的可见光图像进行拼接和处理,制作飞行航线范围内的先验景像地图。

本文利用A、B两组经上述机载测量系统采集于某市城郊地区的飞行数据对所提方法进行测试。其中,飞行路径A组数据历时约55s,轨迹长度约1.5km;飞行路径B组数据历时约49s,轨迹长度约1.3km。此外,经专业后处理软件对航线上采集到的激光点云和可见光图像进行处理和拼接,得到连续点云条带片段和对应的先验景像地图片段,其中点云条带最大宽度为220m,先验景像地图的网格分辨率大小为0.2m。

### 3.2 试验结果分析

为保证点云强度图像能够为景像匹配提供足够的特征信息的同时,平衡计算机数据处理的效率和景像匹配定位结果的准确性,本文根据飞行器的平均飞行速度,合理地控制了点云建图初始区域的大小。在具体处理过程中,每构建一组点云强度图像即进行一次景像匹配以获取载体的位置定位信息,并将得到的定位信息作为观测值对惯性导航状态误差进行修正。

A和B两组数据测试的统计结果见表1,A组数据在不同方向导航定位误差对比曲线如图5所示,其中红色曲线代表纯惯性导航解算结果,蓝色曲线为本文所提方法的解算结果,并以框线标注了在测试过程中部分连续匹配定位失败情况下仅进行惯性导航解算和ESKF预测过程的对应时间节点。

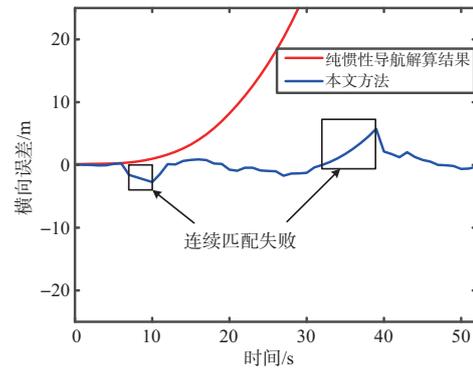
表1 景像匹配辅助导航解算结果统计

Table 1 Statistics of scene matching assisted navigation solution results

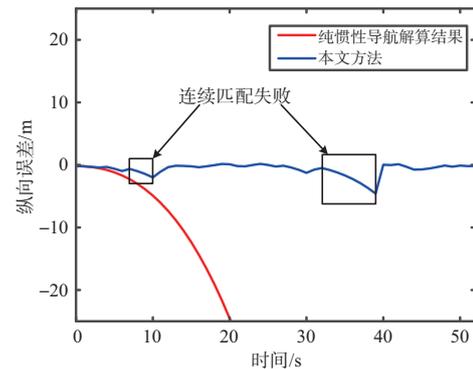
飞行路线	路径长度/km	匹配总次数	匹配成功比率/%	最小定位误差/m	最大定位误差/m	RMSE/m
A	1.5	54	72	0.03	4.09	1.94
B	1.3	49	80	0.02	5.02	1.06

从表1中可以看出,在两段飞行数据中,本文所提方法成功实现了70%以上的异源图像匹配定位任务,并且能够将匹配定位误差控制在5m左右、最终导航定位解算结果均方根误差(RMSE)在2m以内。

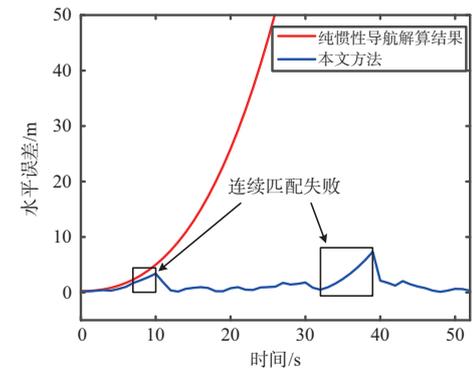
此外,从图5中也可以看出,本文方法相对于纯惯性导航解算结果可以有效抑制导航定位误差发散,且在一段连续匹配失败过程之后仍能重新确立定位位置并对定位误差实现有效的校正。



(a) 横向定位误差对比曲线



(b) 纵向定位误差对比曲线



(c) 水平定位误差对比曲线

图5 A组飞行数据定位误差对比曲线

Fig.5 Group A flight data positioning error comparison curve

综上所述,本文方法能够在利用激光点云数据进行异源图像特征匹配的基础上,实现最高可达像素级的定位精度,并且能够为飞行器的自主导航定位提供有效的技术支持。

## 4 结论

本文通过采用机载激光雷达测量系统采集的真实飞行数据对所提方法进行测试,验证了将激光雷达作为图像传感器应用于景像匹配导航系统的可行性和有效性。研究结

果表明,基于异源图像特征匹配方法,对点云强度图像与可见光图像进行配准得到匹配定位信息,用于辅助校正惯性导航发散误差,可以实现对飞行器位置的高精度定位,解决了在复杂环境下对飞行器施行有效自主导航定位的实际问题。

尽管本文研究取得了一定的成果,但仍存在一些不足之处和遗留问题。例如,点云数据的处理和异源图像匹配算法的计算复杂度较高,需要进一步优化提高算法的实时性和适用性,以满足未来应用于机载端实时导航定位需求。此外,主要针对试验区域的数据进行了测试和分析,未来还需要对更多不同环境下的数据进行测试,以进一步探索本方法的使用范围并验证其通用性。总体而言,本文方法为飞行器在复杂环境下的高精度导航定位提供了一种有效的技术路径,为后续相关研究的开展和应用提供了参考和借鉴。

AST

## 参考文献

- [1] 赵春晖,周昉慧,林钊,等. 无人机景象匹配视觉导航技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 507-519.  
Zhao Chunhui, Zhou Yihui, Lin Zhao, et al. Review of scene matching visual navigation for unmanned aerial vehicles[J]. Scientia Sinica Informationis, 2019, 49(5): 507-519. (in Chinese)
- [2] 范小虎,曹娟,李本岭,等. 景象匹配制导技术现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2011(5): 73-76.  
Fan Xiaohu, Cao Juan, Li Benling, et al. Current status and development trends of scene matching guidance technology[J]. Aerospace Technology, 2011(5): 73-76. (in Chinese)
- [3] 朵英贤,宋迺志. 战斧巡航导弹的作战模式与技术发展[J]. 中北大学学报, 2005(6): 403-407.  
Duo Yingxian, Song Qiuzhi. Attack mode analysis and technology development of cruise missile[J]. Journal of North University of China, 2005(6): 403-407. (in Chinese)
- [4] 邵慧,刘建业,熊智. 惯性/SAR图像组合导航技术的发展[J]. 航空科学技术, 2013(5): 71-75.  
Shao Hui, Liu Jianye, Xiong Zhi. Development of INS/SAR image integrated navigation system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(5): 71-75. (in Chinese)
- [5] Ali B, Sadekov R N, Tsodokova V V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems[J]. Gyroscopy and Navigation, 2022, 13(4): 241-252.
- [6] Lin Yi, Gao Fei, Qin Tong, et al. Autonomous aerial navigation using monocular visual - inertial fusion[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35(1): 23-51.
- [7] 刘畅,李嘉杰,眭海刚,等. 基于FLoFTR算法的无人机实时在线地理定位[J]. 航空科学技术, 2023, 34(5): 87-94.  
Liu Chang, Li Jiajie, Sui Haigang, et al. Real-time geolocation on UAV based on FLoFTR algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(5): 87-94. (in Chinese)
- [8] Zhao Chunhui, Wang Rongzhi, Zhang Tianwu, et al. Visual odometry and scene matching integrated navigation system in UAV[C]. 17th International Conference on Information Fusion (FUSION). IEEE, 2014: 1-6.
- [9] Wang Huaxia, Cheng Yongmei, Liu Nan, et al. An illumination-invariant shadow-based scene matching navigation approach in low-altitude flight[J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 3869.
- [10] 李建中,彭其先,李泽仁,等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1117-1123.  
Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1117-1123. (in Chinese)
- [11] Cai Yixi, Xu Wei, Zhang Fu. Ikd-tree: An incremental kd tree for robotic applications[J]. arXiv Preprint arXiv:2102.10808, 2021.
- [12] 马滔. 面向激光雷达和可见光图像的异源匹配及融合方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
Ma Tao. Research on multi-source image matching and fusion methods for LiDAR and visible images[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] Karthikeyan K, Chandrasekar C. Speckle noise reduction of medical ultrasound images using Bayesshrink wavelet threshold[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 22(9): 8-14.
- [14] Ma Tao, Ma Jie, Yu Kun. A local feature descriptor based on oriented structure maps with guided filtering for multispectral remote sensing image matching[J]. Remote Sensing, 2019, 11(8): 951.
- [15] 赵龙. 惯性导航原理与系统应用设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2020.  
Zhao Long. Inertial navigation principles and system application design[M]. Beijing: Beihang University Press, 2020. (in Chinese)

## Airborne LiDAR Scene Matching Aided Navigation Method

Wang Xiaolong, Zhao Long

*Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract:** Scene matching navigation methods based on visible light visual sensor solutions are often vulnerable to external environmental changes such as illumination and weather, which leads to ineffective image information collection and divergence of navigation system errors. To address this issue, this paper proposes an airborne LiDAR-based scene matching aided navigation method. Firstly, the LiDAR point cloud data is preprocessed, stitched, and the intensity information of the point cloud is extracted to construct a LiDAR point cloud intensity image. Secondly, by employing a method for heterogeneous image feature matching, feature information from the intensity image and the prior map is extracted for matching. Finally, the extracted matching positioning information is integrated into the inertial/scene matching fusion navigation framework to correct the divergence error of the inertial navigation system. Through experimental validation with real flight data, the proposed method can effectively suppress error divergence of the inertial navigation system, with a navigation accuracy within 2m, and can be applied under all-weather conditions.

**Key Words:** LiDAR; image matching; scene matching navigation; inertial navigation; fusion navigation

---

**Received:** 2024-04-28; **Revised:** 2024-07-25; **Accepted:** 2024-09-27

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(42274037); Aeronautical Science Foundation of China(2022Z022051001)