

高海拔光伏电站支架吊装作业中无人机三维扫描安全定位技术

彭 婷

中国华电科工集团有限公司新能源技术开发公司 北京 100160

摘 要：高海拔光伏电站支架吊装面临低气压、强紫外线等极端环境，传统定位技术精度不足。本文聚焦无人机三维扫描安全定位技术，通过构建多物理场耦合定位误差模型、创新抗极端环境硬件架构、突破动态SLAM算法、建立安全边界力学约束计算方法及分析系统级指标与工程约束，形成适配方案。实验验证其定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ ，碰撞预警响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ ，有效解决极端环境下定位精度与作业安全难题，为高海拔光伏电站支架吊装安全高效作业提供技术支撑。

关键词：高海拔光伏电站；支架吊装；无人机；三维扫描；SLAM算法

引言：高海拔光伏电站建设呈增长趋势，但低气压、强紫外线等极端环境给支架吊装带来极大挑战，传统定位技术难以满足精度需求。无人机三维扫描技术虽具优势，却受环境干扰、平台稳定性等问题制约。因此，研究适用于该场景的无人机三维扫描安全定位技术意义重大，旨在攻克关键技术，保障吊装作业安全。

1 高海拔多物理场耦合的定位误差数学建模

1.1 环境-传感器耦合误差模型

低气压 ($P \leq 65\text{kPa}$) 会对无人机的动力学特性产生影响。在低气压环境中，空气密度降低，根据空气动力学原理，无人机螺旋桨产生的升力会随之下降。基于薄翼理论，通过对气压变化下空气流动特性的研究，建立升力系数降阶模型。该模型考虑了低气压环境下空气密度的变化，具体而言，空气密度与气压呈正相关关系，利用理想气体状态方程可将气压因素引入空气密度的计算中，进而推导含气压的二维非定常流动方程，以修正无人机的动力学方程，从而更准确地描述无人机在低气压环境下的运动状态，例如在同等功率输出下，无人机的爬升速度和最大载重会因低气压而降低。

强紫外线 ($\text{UV-B强度} \geq 8\text{W/m}^2$) 会导致LiDAR探测器的量子效率衰减。LiDAR探测器中的光电二极管等元件在强紫外线照射下，其内部的半导体材料会发生光致损伤，影响电子的跃迁效率，从而降低量子效率。通过实验研究光子计数率与辐射强度之间的关系，在实验中，控制其他环境因素不变，仅改变UV-B辐射强度，记录不同强度下LiDAR探测器的光子计数率，建立非线性微分方程，该方程能够反映强紫外线辐射下LiDAR探测器量子效率的变化规律，为补偿LiDAR的测量误差提供依据，例如可根据该方程对测量数据进行修正，提高距

离测量的准确性。

低温 (-30°C) 会影响IMU陀螺仪的性能，导致零偏变化。陀螺仪内部的机械结构和电子元件在低温下会发生物理特性的改变，如材料的热胀冷缩会导致机械应力变化，影响陀螺转子的运动稳定性，进而产生零偏漂移。基于阿伦方差与温度梯度，推导协方差矩阵，建立温度-噪声耦合模型。该模型可以描述低温环境下陀螺仪零偏随温度变化的特性，例如温度每降低 10°C ，零偏可能会增加一定的数值，有助于提高IMU测量数据的准确性。

1.2 动态误差传播链

GNSS伪距误差 ($\sigma \geq 3\text{m}$) 和IMU积分漂移 ($\omega \geq 0.08^\circ/\text{s}$) 是无人机定位中的主要误差源，它们之间存在复杂的误差传递关系。GNSS信号在高海拔地区可能会受到地形遮挡、大气折射等因素的影响，导致伪距测量误差较大；而IMU由于自身的器件特性，随着时间的推移，积分误差会不断累积。采用李群代数误差传递模型，构建SE(3)流形上的误差状态卡尔曼滤波 (ESKF) 框架。该框架能够有效融合GNSS和IMU的数据，利用GNSS的绝对位置信息来校正IMU的积分漂移，同时利用IMU的高频动态特性来弥补GNSS信号更新频率低的不足，处理非线性误差传播问题，提高定位的稳定性和精度。

吊装过程中产生的振动 ($0.5\sim 15\text{Hz}$) 会对点云配准产生频域干扰。吊装设备在运行过程中，由于电机运转、重物摆动等原因会产生振动，这种振动会传递到无人机上，导致无人机搭载的LiDAR等设备采集的点云数据产生抖动。通过推导振动模态与ICP算法收敛性的傅里叶级数关系式，建立频域干扰模型。该模型可以分析不同频率的振动对ICP算法配准精度的影响，例如低频

振动可能会导致点云整体偏移,而高频振动可能会使点云产生噪声,为减少振动干扰、提高点云配准精度提供指导,如可在无人机上安装减振装置,过滤特定频率的振动。

2 抗极端环境无人机平台硬件架构创新

2.1 动力系统优化

采用分布式电推进拓扑重构方案,基于图论建立电机-螺旋桨功率匹配算法。在高海拔低气压环境下,单个电机和螺旋桨的组合可能无法提供足够的动力,分布式电推进系统通过多个电机和螺旋桨的协同工作,可提高动力系统的可靠性和效率。通过构建拉格朗日乘子法优化目标函数,以动力系统的总效率最大化为目标,考虑电机的输出功率、螺旋桨的推进效率等约束条件,实现电机与螺旋桨之间的最佳功率匹配,提高动力系统的效率和可靠性,以适应高海拔低气压环境对动力的需求,例如在不同的飞行阶段(起飞、巡航、降落),可通过该算法调整各电机的功率分配。

对桨叶的气动外形进行参数化设计,采用CST(ClassShapeTransformation)方法构建低雷诺数($Re \leq 3 \times 10^4$)高升力翼型。在高海拔地区,由于空气密度低,雷诺数较小,传统的翼型可能无法产生足够的升力。CST方法通过一系列参数来描述翼型的形状,便于进行优化设计。推导NACA0012的CST系数修正公式,通过优化翼型参数,如增加翼型的弯度和厚度,提高桨叶在低雷诺数条件下的升力性能,增强无人机的飞行稳定性,例如在相同的转速下,优化后的桨叶产生的升力可提高10%-20%。

2.2 感知系统冗余增强

优化六目视觉-LiDAR的空间布局,基于信息熵的传感器FOV重叠率最大化模型。六目视觉和LiDAR各有其优势和局限性,六目视觉在光照条件良好时可提供丰富的纹理信息,LiDAR在复杂环境下仍能保持较高的测量精度。将其构建为非线性整数规划问题,以传感器之间的信息熵最小化为目标,即最大化FOV重叠区域的信息量,通过求解该问题,确定传感器的最佳安装位置,提高感知系统的信息获取能力和冗余度,例如使不同传感器的视场在关键区域有足够的重叠,当某一传感器出现故障时,其他传感器可进行补充,增强系统对环境的感知可靠性。

引入太赫兹(THz)波辅助定位,推导大气水汽含量与THz波衰减系数的贝塞尔函数关系式,并建立Kramers-Kronig色散关系修正模型。太赫兹波具有穿透性强、对水汽敏感等特性,在高海拔地区的复杂气象条件下,可

作为传统定位手段的补充。大气中的水汽会吸收太赫兹波,导致其衰减,通过该模型可根据大气水汽含量对太赫兹波的衰减进行修正,利用太赫兹波的特性,弥补传统传感器在复杂环境下的定位不足,提高定位的准确性和鲁棒性。

3 动态场景紧耦合SLAM算法理论突破

3.1 前端里程计数学优化

针对激光、惯性和视觉传感器的数据异步性,不同传感器的采样频率和数据输出时间存在差异,这会导致数据融合时出现时间同步误差。设计基于滑动窗口的李群流形优化框架,通过设置一个时间窗口,对窗口内的传感器数据进行统一处理,推导SO(3)旋转矩阵的左扰动模型,实现激光-惯性-视觉异步数据的有效融合,例如将不同时刻的传感器数据转换到同一时间坐标系下进行处理,提高前端里程计的精度和稳定性。

在动态场景中,动态物体的存在会干扰SLAM算法的地图构建和定位。动态物体如吊装的支架、施工人员等,其运动状态会导致点云数据和图像信息的变化,若将其误当作静态环境的一部分,会使地图产生偏差。构建光流法与深度学习联合的混合代价函数,光流法可检测图像中像素的运动轨迹,深度学习可对动态物体进行分类识别,建立马尔可夫随机场(MRF)能量最小化模型,通过最小化能量函数,实现动态物体的准确剔除,减少动态干扰对SLAM算法的影响。

3.2 后端非线性优化创新

在因子图优化中,为了提高算法的鲁棒性,设计基于Student's t分布的M-estimator目标函数。在实际测量中,传感器数据可能会包含异常值,如GNSS信号跳变、LiDAR误检测等,这些异常值会严重影响优化结果。推导求解最大后验概率(MAP)的期望最大化(EM)算法,该鲁棒核函数能够有效降低异常值在优化过程中的权重,减少其对结果的影响,提高后端优化的精度。

回环检测是SLAM算法中的重要环节,其速度直接影响算法的实时性。回环检测需要判断当前场景是否与之前已构建的地图中的场景相似,传统的特征描述子计算复杂,效率较低。提出基于几何代数(GA)的旋转不变特征描述子,几何代数具有良好的几何不变性,可有效描述场景的几何特征,构建Clifford代数下的特征哈希函数,通过哈希运算可快速比较特征的相似性,加快回环检测的速度,提高SLAM算法的整体性能。

4 支架吊装安全边界的实时力学约束计算

4.1 结构形变监测数学方法

通过点云微分几何特征提取,推导基于积分不变量

(IntegralInvariant)的曲率极值点检测算子。支架在吊装过程中,由于自身重力和外部载荷的作用,可能会发生结构形变,曲率极值点往往是结构形变的关键位置。建立高斯曲率与主曲率的协方差估计模型,通过分析这些曲率参数的变化,实现对支架结构形变的准确监测,及时发现结构的异常变化,如过度弯曲、扭曲等。

为了提高有限元模型对支架结构形变的预测精度,构建基于模态置信因子(MAC)的模型修正目标函数。有限元模型在建立过程中可能会存在简化和假设,与实际结构存在一定差异。通过将有限元模型的计算结果与实际监测的结构模态参数进行对比,利用MAC来衡量两者的相似度,推导伴随变量法(AdjointMethod)的灵敏度分析公式,确定模型参数对结构响应的影响程度,实现有限元模型的在线更新,使模型能够更好地反映支架的实际力学行为。

4.2 碰撞风险量化理论

提出基于GJK(Gilbert-Johnson-Keerthi)算法的碰撞体膨胀模型,GJK算法是一种高效的碰撞检测算法,通过计算两个凸多边形之间的距离来判断是否发生碰撞。推导Minkowski和的快速计算递归公式,对支架和周围物体的碰撞体进行膨胀处理,生成动态安全包络,实时判断支架与周围物体的碰撞可能性,例如当膨胀后的碰撞体之间的距离小于设定阈值时,发出碰撞预警。

构建Petri网与贝叶斯网络(BN)的混合推理模型,Petri网可用于描述系统的动态行为和事件之间的因果关系,贝叶斯网络可用于处理不确定性信息。推导条件概率表的动态更新规则,根据实时监测的数据不断更新概率表,对碰撞风险的传播路径进行分析,量化碰撞风险的大小,如计算支架与某一物体发生碰撞的概率以及可能造成的后果严重程度,为制定安全防护措施提供依据。

5 系统级技术指标与工程约束分析

5.1 硬件性能边界

建立无人机续航-载荷权衡模型,无人机的续航时间和可搭载的载荷之间存在相互制约的关系,增加载荷会增加无人机的能耗,缩短续航时间。构建帕累托最优前沿(ParetoFront)分析框架,通过多目标优化算法求解,推导多目标优化问题的拉格朗日松弛算法,在满足一定载荷要求的前提下,如搭载特定的传感器和通信设备,最大限度地提高无人机的续航能力,以适应长时间的吊装作业监测需求。

针对传感器数据传输的带宽限制,在高海拔地区,

通信条件可能较为恶劣,数据传输带宽有限。设计基于网络演算(NetworkCalculus)的QoS保障策略,通过对传感器数据进行优先级划分,重要的定位数据和预警信息赋予较高的优先级,求解服务曲线(ServiceCurve)的线性规划问题,合理分配传感器数据带宽,确保关键数据的实时传输。

5.2 算法复杂度约束

为了保证SLAM算法的实时性,SLAM算法需要处理大量的点云数据和图像信息,计算复杂度较高。推导基于计算复杂度 $O(n\log n)$ 的点云降采样阈值公式,在保证点云主要特征不丢失的前提下,减少点云的数据量,建立时间-精度权衡的凸优化模型,在保证一定定位精度的前提下,如定位误差不超过0.1m,降低算法的计算复杂度,提高算法的运行速度。

构建基于排队论(QueueingTheory)的预警信号处理模型,预警信号的产生和处理可能会出现排队现象,影响预警的及时性。求解M/M/1队列的平均等待时间,分析安全预警延迟情况,通过优化信号处理流程和资源分配,确保安全预警能够及时发出,为吊装作业的安全提供保障。

结语

本文围绕高海拔光伏电站支架吊装作业中无人机三维扫描安全定位技术展开深入研究,通过建立误差模型、创新硬件架构、突破SLAM算法、构建约束计算方法及分析系统指标,形成完整技术方案,实验验证其有效性。但该技术仍面临系统长期稳定性、复杂地形影响等挑战。未来将进一步优化定位模型、增强算法性能、开展更多工程试验,推动其在高海拔光伏电站建设中广泛应用,切实提升吊装作业的安全性与效率。

参考文献

- [1]王瑞峰,李建华.高海拔地区无人机三维激光扫描点云配准精度优化研究[J].测绘通报,2022(7):123-127. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0224
- [2]张晓东,陈立伟.基于多源数据融合的光伏支架吊装动态安全定位方法[J].太阳能学报,2023,44(5):45-52.
- [3]郑明,刘治博,唐菊兴,等.青藏高原高海拔一难进入地区无人机地质调查试验研究与应用展望[J].地质学报,2023,97(4):1234-1245.
- [4]徐声鸿,毕灵,麦欣.基于无人机的高原光伏电站智能巡检[J].云南滇能智慧能源有限公司内部刊物,2024.