

基于视觉感知与光流融合的仿生扑翼飞行器自主避障系统研究

黄俊程 冯德林 文家焱 蒋柏毅 石丽媛*

桂林学院 广西 桂林 541006

【摘要】：本文针对仿生扑翼飞行器在复杂环境下自主避障能力差的问题，根据仿生扑翼飞行器尺寸重量功耗受限的特点，提出一种视觉与光流融合的避障系统方案。搭建轻量化实验平台，设计分层感知框架，优化光流算法，融合视觉特征做轻量 SLAM；建立全局、局部、光流应急三层规划架构，整合 A*全局规划、局部轨迹优化、光流模糊控制。仿真结果表明，系统轨迹误差小、避障成功率高，满足实时性要求，飞行姿态稳定，可以为城市低空物流、应急救援等场景提供可靠的技术支持。

【关键词】：仿生扑翼飞行器；自主避障；视觉-光流融合；SLAM；路径规划

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.059

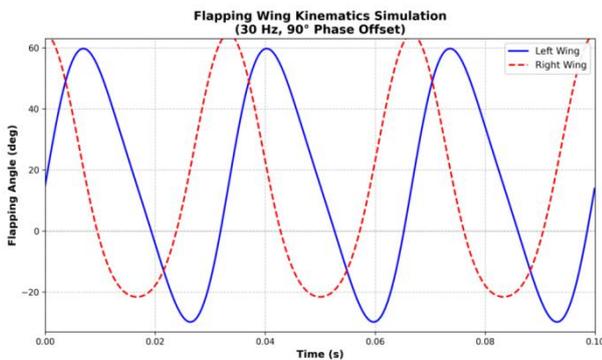
1 引言

目前城市空中交通(UAM)概念不断推进,电动垂直起降(eVTOL)飞行器也成了研究的热点^[1]。仿生扑翼飞行器(FWMAV)模仿了鸟类和昆虫的飞行方式,有悬停、高机动性、低噪音等优势,在城市峡谷、室内等复杂密集的环境下适应性较好。但是它的自主应用受到 SWaP 约束下的实时环境感知和避障能力的限制,这也是目前的主要瓶颈。视觉和光流融合感知是一条非常有前景的技术路线,本研究主要攻克相关难题,使 FWMAV 由遥控模式向自主智能化方向发展,有理论意义也有实际应用价值。

2 系统建模与平台概述

2.1 扑翼飞行器平台

团队设计了一款轻量化扑翼飞行器(FWMAV)实验平台。机身用的是碳纤维复合材料,机翼则采用 PEEK 薄膜复合结构,翼型经过气动优化,带有非线性扭转特性。驱动机构选了对称式双曲柄双摇杆结构,扑动角度范围在-28°~58°之间,频率也能在 14 到 36Hz 之间调节^[2]。另外左右机翼可独立控制,这样就能实现滚转、俯仰以及偏航动作,整个平台的机动性和稳定性都比较出色^[3]。



通讯作者：石丽媛，学生创新研究项目指导老师。

2.2 动力学模型建立

基于 Lagrange 方程推导系统动力学模型。系统动能包含平动动能与转动动能,势能为重力势能。广义力项包含气动力 F_a 、机构驱动力 F_d 及重力 F_g 。最终导出的动力学方程组如下:

$$m\dot{v}_b + m \omega \wedge v_b = F_a + F_d + F_g \quad (1)$$

$$J \dot{\omega} + \omega \wedge J \omega = M_a + M_d \quad (2)$$

其中, J 为转动惯量矩阵, M_a 和 M_d 分别为气动力矩与驱动力矩。该模型构成了后续避障控制算法设计的数学基础^[4]。

2.3 视觉传感器

视觉传感器选型上采用 Intel RealSense D435i RGB-D 相机作为主要的感知设备。该相机具有轻量化(14g)、适中的测量范围(0.1-10m),高帧率和同步输出 RGB 和深度信息的能力,非常符合扑翼飞行器对负载、实时性、环境感知的综合需求。为了保证后续视觉算法的精度,根据张正友标定法对相机做了内参标定和畸变校正,建立了准确的针孔模型,校正了径向和切向畸变,使图像残差控制在亚像素级别,为后面视觉感知和定位算法提供了高质量、低畸变的图像输入。

3 视觉与光流融合感知

3.1 适配 FWMAV 的稠密光流优化

团队使用了 Farneback 稠密光流算法,考虑到 FWMAV 运动幅度大、姿态变化剧烈的特点,做了三项优化。一是用 IMU 数据做图像旋转补偿,尽量减小自身运动造成的干扰;这是应对剧烈运动的重要一步;二是将计算范围集中在图像中下部的扇形前瞻区域,可以明显降低硬件运算负担;三是利用前向、后向误差检查来消除抖动噪声,使光流场更可信。

3.2 基于光流的障碍物检测与距离估计

障碍物的快速检测，主要靠分析经过补偿后的光流残差（也就是运动显著性），再结合光流场散度的突变情况来实现。之后结合已获取的飞行高度、相机俯仰角和前飞速度这些参数，要么依据地面特征点的光流信息，要么假设障碍物底部与地面接触，就能估算出障碍物的纵向近似距离和碰撞时间（TTC），为后续快速避障决策提供核心依据^[5]。

3.3 视觉特征辅助的环境理解

在结构化场景（走廊）中为了提高导航的稳定性以及航向的准确性，使用 Canny 边缘检测算法提取环境中的显著轮廓，然后通过霍夫变换识别出墙脚线、天花板线等具有几何规律的特征直线。这些引导线特征可以用来计算走廊视觉消失点以及其中线方向，从而达到对飞行器航向实时校正和定心飞行控制的目的。在非结构化或者通用场景下，系统转用轻量级的 ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) 特征来进行环境感知。ORB 特征有很好的旋转不变性和较高的计算效率，适合于嵌入式设备。经过特征检测、描述和匹配之后，可以得到相邻帧之间相机的运动，从而辅助视觉里程计做位姿估计。同时结合多帧间特征点的一致性检验，可以区分静态背景和运动障碍物，稳定出现在多帧中的特征点被当作静态结构，短暂存在或者运动不一致的特征被当作动态障碍。该方法在一定程度上克服了单纯使用光流法时，由于纹理缺失或者全局运动干扰导致的不足，提高了系统对于复杂动态环境的感知鲁棒性。

4 轻量化视觉 SLAM

4.1 融合位姿估计

视觉里程计估计这块，我们用的是“ORB 特征法+ICP 点云配准”的融合思路。先靠 ORB 特征匹配结合 RANSAC 算法求解帧间运动，得到结果后就把它当作初始值，再借助 RGB-D 的深度信息，通过 ICP 算法做进一步的点云配准优化。最后用卡尔曼滤波器动态融合两种方法输出的位姿数据，这样能明显提升在弱纹理这类复杂场景下的鲁棒性和定位精度。

4.2 回环检测与地图构建

回环检测我们用基于 ORB 特征的词袋 (BoW) 模型，核心目的就是抑制长期定位漂移。检测到回环之后就通过图优化对整体的位姿轨迹做全局调整。另外，将多个关键帧的深度信息融合成三维点云地图，再将三维点云地图离散化成适合路径规划的三维栅格地图，即八叉树格式，就可以直观地反映出障碍物的空间分布情况。

5 融合光流的分层路径规划

5.1 全局路径规划

在搭建好的三维栅格地图上，我们用改进后的 A* 算法来做全局路径搜索^[1]。启发函数这边选的是欧氏距离，另外在代

价函数里加了转弯、高度变化的惩罚项——毕竟要适配 FWMAV 的运动特性，这么改会更贴合实际。优化之后的 A* 算法，效率比原来高了不少。

5.2 局部轨迹优化

面对全局路径上那些离散的航点，我们借助改进后的 EGO-Planner 框架做局部轨迹优化。轨迹用均匀 B 样条曲线来表征，再通过梯度下降法（像 L-BFGS 这类）去最小化目标函数——这个函数里包含了平滑项、碰撞代价项和动力学约束项。最终能生成连续平滑、且满足动力学可行性的局部避障轨迹，这样才能保证底层控制器能精准跟踪上。

5.3 光流应急反应控制

这一层属于并行运行的快速反应模块，用模糊逻辑来指导光流引导控制器。输入参数有前向光流散度、左右光流不对称性、TTC 等。核心就是以 if-then 规则库为基础，高散度且 TTC 值小就对应大幅转向，通过解模糊操作输出航向修正指令和速度缩放因子。这些指令会和局部规划器输出的期望轨迹做优先级融合，在紧急情况下，光流指令要优先执行。最终得到给底层姿态控制器的融合指令，对突发障碍进行毫秒级的快速响应。

6 仿真实验与结果分析

基于 ROS (Noetic) 与 Gazebo 11 搭建了高保真仿真环境，集成了 FWMAV 动力学模型与传感器模型^[6]。设计了城市低空动态环境与室内复杂结构化环境两类典型场景进行测试。

关键结果 (Key Results)

(1) 轨迹精度 (Trajectory Accuracy)：系统绝对轨迹误差 (ATE) ≤ 0.13 米，优于同类 FWMAV 视觉 SLAM 基准。

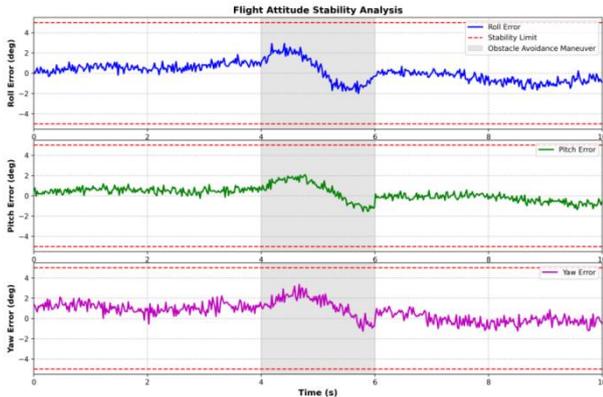
环境类型	绝对轨迹误差 (ATE)	相对轨迹误差 (RPE)
城市环境	0.13±0.04m	0.05±0.01m
室内环境	0.09±0.02m	0.03±0.01m

(2) 避障成功率 (Obstacle Avoidance Success Rate)：城市环境 80% (4/5 次成功)，室内环境 100% (5/5 次成功)。一次失败源于对高速动态障碍响应延迟。

环境类型	绝对轨迹误差 (ATE)	相对轨迹误差 (RPE)
城市环境	0.13±0.04m	0.05±0.01m
室内环境	0.09±0.02m	0.03±0.01m

(3) 计算实时性 (Computational Real-Time Performance)：所有核心感知、规划模块平均处理时间均低于 33.3ms (对应 30Hz)，满足实时性要求。

(4) 飞行稳定性 (Flight Stability)：滚转、俯仰、偏航角最大偏差分别为 3.5° 、 3.0° 、 4.3° ，速度波动系数小，姿态稳定，满足 FWMAV 控制标准^[5]。



仿真结果全面验证了所提系统架构与方法的有效性、实时性与鲁棒性。

参考文献：

- [1] 王彪.cVTOL 飞行器视觉自主避障技术仿真研究[J].航空学报,2021,42(5):325-336.
- [2] 郭梦辉,苏汉平,舒宁.多自由度仿生扑翼机构设计与运动建模[J].机械工程学报,2019,55(12):89-98.
- [3] 邹才均.扑翼飞行器高效传动铰链结构设计[J].机械设计,2020,37(4):78-84.
- [4] 柯希俊.考虑多效应的扑翼飞行器扩展准稳态气动模型[J].空气动力学学报,2020,38(4):678-686.
- [5] 昂海松,陈明,杨阳.柔性扑翼机低速风洞试验与动态流场显示[C]//中国航空学会飞行力学专业委员会学术年会.西安:中国航空学会,2021:45-50.
- [6] 王涵.基于光学动作捕捉系统的扑翼飞行器性能评估技术[J].实验技术与管理,2020,37(8):143-147.

7 总结与展望

对于 FWMAV 在复杂环境中的自主避障问题，本文提出并验证了由视觉和光流融合感知模块、轻量化 SLAM 技术、分层规划控制系统组成的一套完整的系统。核心创新点，第一，针对 FWMAV 平台做算法优化，保证算法能适应实际平台需求；第二，搭建视觉和光流互补的感知框架，弥补单一感知方式的不足；第三，设计出包含光流应急反应机制的分层规划架构。从仿真结果可知，该系统性能达到要求，满足预期。

后续的工作从三个方面进行推进：第一，引入轻量化的深度学习模型解决语义分割、动态预测等任务；第二，研究能源感知的避障决策；第三，提高系统在极端动态场景、恶劣环境（刮风、下雨等）下的适应能力，使其能够应对更加复杂的情况。除此之外，多 FWMAV 协同避障和自主探索技术也值得进一步研究，扩大应用场景，最后加快实物平台集成进度，进行野外实地验证，实现从仿真到实际应用的跨越。