

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311124

# 仿生扑翼飞行机器人自主导航系统研究进展\*

蒋济州<sup>1</sup>, 徐文福<sup>1,2</sup>, 潘尔振<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院 深圳 518055; 2. 广东省智变机构与适应性机器人重点实验室 深圳 518055)

**摘要:**仿生扑翼飞行机器人模仿自然界鸟类和昆虫等生物的飞行方式,具有安全性强、迷惑性好等优点,在灾害救援、反恐防暴等方面具有极其重要的应用前景。为实现其在未知复杂环境下的自主飞行并执行探测任务,需研制一套集感知建图、规划避障与飞控制导等功能模块为一体的导航系统。本文首先对扑翼飞行机器人的导航系统进行了概述,按照翼展大小将扑翼飞行机器人分为微小型和大中型两类,其次对比分析了国内外在微小型、大中型扑翼飞行机器人导航系统方面的主要研究进展。接着对自主导航系统所涉及到的感知定位与建图、运动规划与避障、轨迹跟踪与飞控制导等关键技术进行了分析总结,指出其局限性及亟待解决的问题。最后,对未来的研究趋势进行了展望,包括提升机载嵌入式计算能力、多模态信息融合、面向多模态飞行的流场感知、仿生视觉系统研究、群体感知与编队控制等热点方向。

**关键词:**扑翼飞行机器人;自主导航系统;感知与建图;规划与避障;飞控制导

**中图分类号:** TP242 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 41310

## Survey on autonomous navigation systems of bionic flapping-wing flying robot

Jiang Jizhou<sup>1</sup>, Xu Wenfu<sup>1,2</sup>, Pan Erzhen<sup>1,2</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;  
2. Guangdong Key Laboratory of Intelligent Morphing Mechanisms and Adaptive Robotics, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Bio-inspired Flapping-Wing Flying Robot (FWFR) mimicking the flight mechanism of animals like birds and insects in nature has the advantages of high safety and good disorientation, which has extremely significant application prospects in disaster rescue, anti-riot and other aspects. In order to realize autonomous flight and perform detection tasks in unknown complex environments, a navigation system integrating functional modules such as perception and mapping, planning and obstacle avoidance, and flight control guidance, etc. need to be developed. This paper firstly gives an overview of the FWFR's navigation system by classifying the robot into two categories of micro and medium-large according to the wingspan size, and then compares and analyzes the main research progresses in the navigation system of both FWFRs at home and abroad. Then, the key technologies involved in autonomous navigation systems such as perceptual localization and mapping, planning and obstacle avoidance, trajectory tracking and flight control guidance, etc. are analyzed and reviewed, the limitations and urgent problems are also pointed out. Finally, an outlook on future research trends is provided, including enhancing onboard embedded computing capabilities, multi-modal information fusion, multi-modal flight flow field perception, research of biomimetic vision systems, and swarm perception and formation control etc.

**Keywords:** flapping-wing flying robot; autonomous navigation system; perception and mapping; planning and obstacle avoidance; flight control and guidance

## 0 引 言

仿生扑翼飞行机器人 (bio-inspired flapping-wing flying robot, FWFR) 模仿自然界鸟类和昆虫等生物的飞行机理, 通过扑动来提供飞行所需的升力和推力。扑翼飞行机器人具备特有的气动理论, 可通过扑动-滑翔-悬停等多模态飞行方式组合实现敏捷机动, 提高续航时间。由于机翼多采用柔性蒙皮材料, 与固定翼、旋翼飞行器螺旋桨推进方式相比安全性更强、高空飞行隐蔽性更好, 目前在军事勘察、灾后救援、反恐防暴、机场驱鸟等场景下具有重要的应用前景。

未知环境下的自主导航是目前无人机领域的研究热点和发展趋势, 无人机导航系统通过传感器采集信息进行状态估计, 规划平滑且无冲突的路径, 使无人机快速安全的到达目标位置<sup>[1]</sup>。在固定翼和旋翼飞行器上, 自主导航系统已得到广泛研究与应用<sup>[2-6]</sup>, 而扑翼飞行机器人的自主导航系统目前尚处于初级阶段, 大多针对感知<sup>[7]</sup>、规划避障<sup>[8]</sup>与飞控制导<sup>[9]</sup>等子系统的研究, 缺乏一套完整的导航集成方案。相比之下, 扑翼飞行机器人自主导航系统的研究更具挑战性, 因为扑翼飞行机器人是典型的非定常空气动力学和非线性时变系统, 动力学建模和分析十分复杂, 受负载和重心位置限制较为严格。此外, 扑动会产生不可避免的周期性俯仰振动和高机动引起的突发运动, 扑频与样机固有频率相同时引发的共振问题同样不可忽视, 剧烈的抖动会导致视觉传感器运动模糊和光强变化, 也会影响惯性传感器的测量精度。同时, 因机翼与尾翼组件结构设计所导致的非完整性约束, 使得姿态控制存在强耦合性。综上, 在不借助外部传感器(如动捕系统和激光跟踪仪)的前提下, 扑翼飞行机器人难以准确地感知自身状态与获取环境信息, 以上问题均给精确控制与制导带来了挑战。

扑翼飞行机器人的相关研究在近年来取得了突破性进展, 现有扑翼飞行机器人的综述和调查主要集中在样机设计<sup>[10]</sup>、气动机理与结构耦合<sup>[11-14]</sup>、机翼气动机理与设计<sup>[15-16]</sup>、动力学建模与控制<sup>[17-18]</sup>、运动学与机构设计<sup>[19]</sup>、自主起降<sup>[20-21]</sup>、能耗研究<sup>[22]</sup>、驱动机构<sup>[23-24]</sup>、悬停机构<sup>[25-26]</sup>、系统辨识<sup>[27]</sup>与视觉感知<sup>[28-29]</sup>等技术上, 而无人机导航的综述类文章<sup>[1-3]</sup>, 鲜有特定针对扑翼飞行机器人而展开的。因此, 本文对近年来国内外扑翼飞行机器人自主导航系统研究进行详尽的综述与调查, 旨在为未来具身智能的扑翼飞行机器人自主导航系统研制提供参考。

本文根据翼展大小将扑翼飞行机器人划分为大中型和微小型两种, 对比国内外典型的扑翼飞行机器人导航系统。针对扑翼自主导航系统所涉及到的 3 项关键技术

分别展开综述, 并分析现有研究所存在的问题。并对未来扑翼自主导航系统的研究方向与发展趋势进行展望。

## 1 国内外典型扑翼飞行机器人导航系统

### 1.1 自主导航系统概述

无人机自主导航系统主要包括感知定位与建图、运动规划与避障、轨迹跟踪和飞控制导 3 个功能模块, 如图 1 所示。无人机通过内部和外部传感器来获得自身和周围环境的状态信息, 通常用于无人机导航的机载内部传感器包括视觉传感器、全球定位系统(global positioning system, GPS)、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)和激光雷达等, 外部传感器, 例如动捕系统(室内环境)和激光跟踪仪(室内或室外环境), 用于辅助测量与提供精准定位。有限的负载和功耗使无人机在传感器的选择上十分苛刻, 需兼顾重量、功耗和精度等性能指标。目前无人机自主导航采用的主流方案包括: 全球卫星导航系统与惯性导航系统组合(global navigation satellites system & inertial navigation system, GNSS/INS)、基于视觉的导航与基于激光的导航等。GNSS/INS 组合导航采用 GPS 和 IMU(陀螺仪、加速度计和磁力计等)的传感器组合方案, GNSS 确定惯性系下的位置与高度, 根据陀螺仪输出建立导航坐标系, 联合磁力计解算姿态航向信息, 对加速度计的测量值进行积分解算导航坐标系下的速度和位置。GNSS/INS 组合导航的精度受限于 GPS 定位精度与 IMU 累计误差, 扑翼飞行机器人往复扑动所产生的机体振动将带来额外的测量噪声与零偏, 因此该方案难以长时间、准确地估计位置与姿态, 往往需要借助多路惯性元件的冗余设计与滤波算法进行融合降噪。视觉传感器具有轻巧、便宜和低功耗等优点, 可提供丰富的环境特征和纹理信息, 由于其良好的抗干扰能力, 常用于动态环境感知<sup>[1]</sup>。此外, 由于大部分视觉传感器具有良好的隐蔽性, 近年来逐渐成为无人机导航的主流方案<sup>[3]</sup>。根据相机的种类不同, 视觉传感器可分为单目相机、立体相机、RGB-D 相机、鱼眼相机和事件相机等。扑翼飞行机器人视觉导航首先需解决图像防抖与视觉增稳问题, 相关研究从云台增稳<sup>[30-31]</sup>和数字图像算法增稳<sup>[32-34]</sup>角度提出了多种解决方案, 但尚未能生成稳定的图像输入直接用于视觉导航, 这是由于帧相机在快速扑动时存在图像模糊和对光强变化敏感等问题。与传统帧相机不同, 事件相机通过捕捉记录场景光照变化生成事件, 对运动模糊和光强变化具有鲁棒性, Eguiluz 等<sup>[29]</sup>评估对比了单目相机、事件相机和激光雷达在扑翼飞行机器人上的适用性, 通过实验证明扑动频率、线加速度与生成事件数量具有相关性, 验证了事件相机更适用于存在周期抖动的扑翼平台, 为扑翼视觉导航系统的研究开辟了新思路。激光

导航利用激光的准直性和不分散性,通过收发激光信号为无人机提供精确的距离测量和定位,对光照和环境干扰具有强鲁棒性。激光雷达根据扫描方式不同可分为单线式和多线式两种,单线式激光雷达尺寸小、扫描速度快,但每次只能测量1个方向上的距离信息,而多线式激光雷达能够扫描多维平面生成稠密的三维点云,但成本相对较高。由于激光雷达重量、功耗、价格和测距量程等问题,在扑翼飞行机器人导航中少有实际应用,目前在扑翼平台上的主要应用是垂直安装单线式激光雷达,用于辅助飞行高度测量<sup>[35]</sup>。

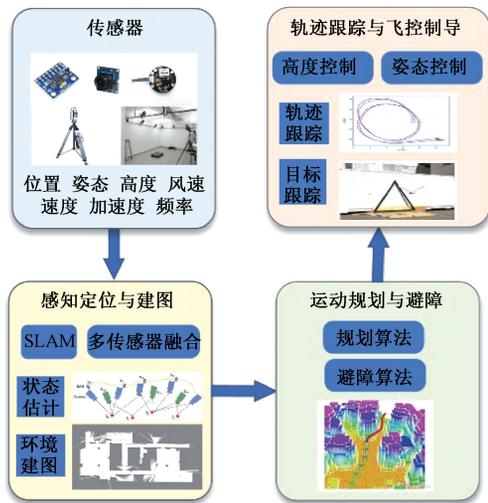


图1 无人机自主导航系统3大功能模块

Fig. 1 Three major functional modules of UAV autonomous navigation system

根据扑翼飞行机器人的翼展大小可大致分为仿鸟类和鹰类的大中型扑翼飞行机器人(翼展 $\geq 50$  cm)和仿昆虫的微型扑翼飞行机器人(翼展 $< 50$  cm)。微型扑翼飞行机器人的特点为较高的扑频(20~600 Hz)、较低的扑动翼质量占比(小于5%)和较低的飞行雷诺数<sup>[14]</sup>,具备更灵活的机动与自主悬停能力,这有助于自主导航、控制和着陆系统的开发<sup>[36-37]</sup>,但同时计算和负载能力通常十分有限,执行任务场景多为室内或户外低空飞行。大中型扑翼飞行机器人具备更强的负载能力,允许携带更多的传感器,特点是较低的扑频(1~20 Hz),较高的扑动翼质量占比(10%~20%)、较高的飞行雷诺数和飞行速度,执行任务场景主要为户外高空飞行。由于其自身重量不可忽视,涉及多体动力学知识,扑动时难以视为单刚体进行简单建模,这也导致了大中型扑翼飞行机器人在控制律的设计上更为复杂。下面分别介绍国内外具有代表性的大中型和微型扑翼飞行机器人导航系统研究进展。

## 1.2 大中型扑翼飞行机器人导航系统

西班牙塞维利亚大学 GRVC Robotics Lab 研发了基于大型仿鹰机器人平台 E-FLAP 的视觉导航系统 Eye-

Bird,这是首个采用事件相机的机载视觉导航系统,如图2所示。E-FLAP 样机翼展 1.5 m,本体重量 510 g,最大能承受 520 g 有效负载,相当于其自身重量的 100%<sup>[38]</sup>,强大的负载能力使样机能够携带更多的传感器。机载视觉导航系统 Eye-Bird 硬件主要包括 DAVIS 346 相机(包含事件相机、单目相机和 MPU9250)、惯性元件 VectorNav VN-200 IMU、CPU Khadas VIM3 等,事件相机流的处理、状态解算和视觉伺服均在 VIM3 CPU 上进行,如图2所示。外部传感器采用了 Leica MS50 TotalStation 激光跟踪仪(室外)和 OptiTrack 动捕系统(室内)作为飞行机器人位置和姿态角的测量真值。

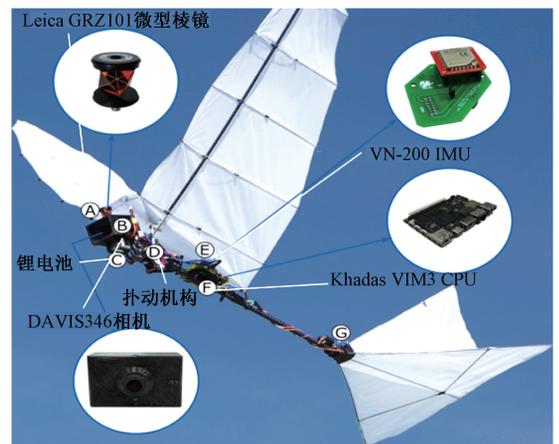


图2 Eye-Bird 导航系统设计与硬件组成

Fig. 2 Design and hardware composition of Eye-Bird system

基于 Eye-Bird 视觉导航系统,Rodriguez 等<sup>[7]</sup>提出了首个用于扑翼飞行机器人的感知数据集“GRIFFIN Perception Dataset”,数据集共采集了室内外场景下的3种类型共21组数据集,分别是未铺设地标的 Base 数据集、铺设地标的 ArUco 参考数据集和用于人像目标检测的 People 数据集,如图3所示。为验证所提供数据集的可行性和有效性,采用惯性视觉里程计 ROVIO 算法<sup>[39]</sup>估计运动轨迹并与真值进行了对比。

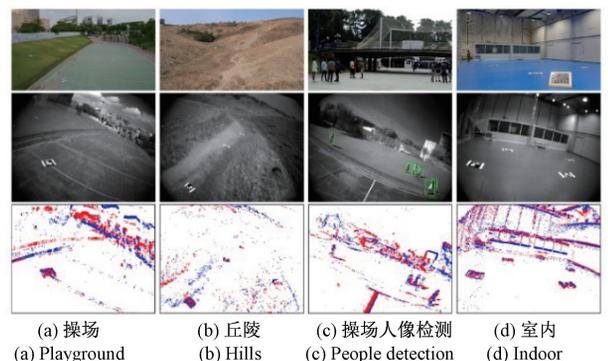


图3 4种室内外场景下的飞行数据集

Fig. 3 Flight datasets for four indoor and outdoor scenarios

视觉伺服是一种基于视觉感知的控制技术,用于实现对目标物体或场景的精准跟踪和控制。Eguiluz 等<sup>[40]</sup>提出了一种应用于扑翼平台的视觉伺服方法,图像处理方面,通过提取线交点作为特征点,采用扩展卡尔曼滤波提供快速鲁棒的线跟踪检测,利用当前线特征与目标位置之间的图像平面差异来引导机器人朝向目标姿态飞行。伺服控制方面,设计了一种高增益反馈控制器控制平尾和垂尾的实现俯仰与偏航机动,并在室内外场景进行了实际飞行验证,如图 4 所示。

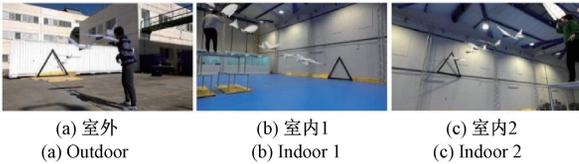


图 4 3 种场景下 FWFR 目标跟踪飞行示意图  
Fig. 4 Target tracking flight of FWFR in three scenarios

Rodriguez 等<sup>[41]</sup>提出了首个应用于大型扑翼的动态避障方法,采用时间滤波、角点检测、光流、聚类的处理流程识别动态障碍物,基于膨胀策略计算最小安全偏航角和俯仰角,控制平尾、垂尾运动实现动态避障,在室内外场景下采用 3 种不规则物体进行了飞行实验,所提出动态避障算法平均成功率高达 89.7%,如图 5 所示。

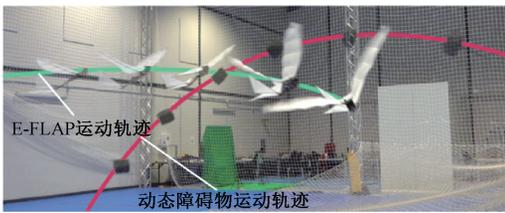


图 5 E-Flap 机器人执行动态避障的序列图  
Fig. 5 Sequence image of the E-Flap robot performing an obstacle avoidance maneuver

Eye-Bird 作为首个采用事件相机的大中型扑翼机载视觉导航系统,在样机负载、视觉感知、动态避障、目标跟踪和飞控制导方面均体现了较高的自主性,事件相机对于扑翼平台的振动具有鲁棒性,但由于事件相机和激光跟踪仪高昂的成本,其适用性存在一定局限。基于感知数据集的状态估计算法与评价还有待深入,同时尚未实现全自主无人导航飞行和避障。

哈尔滨工业大学智能机器人“凤凰”团队先后设计了具有长续航能力的 HIT-Hawk 和具备强抗风能力的 HIT-Phoenix 大型扑翼飞行机器人系列样机,如图 6 所示,采用 GNSS/INS 组合导航方案实现了集起飞、巡航、着陆为一体的全自主飞行,为超视距飞行提供了可能性<sup>[9,42-43]</sup>。HIT-Hawk 翼展长 1.8 m,样机本体重量 770 g,

最大起飞重量 1.5 kg,可携带其自重 140% 的负载自主飞行长达 120 mins。HIT-Phoenix 翼展长 2.2 m,样机本体重量 680 g,在 HIT-Hawk 样机基础上增加了翅膀整体刚度,使其能够在户外 4 级风力下正常飞行<sup>[42]</sup>。组合导航系统硬件设计与集成方案如图 7 所示,主要包括自研集成 IMU 和气压计的飞控模块、空速管、GPS、霍尔传感器等,飞控模块通过电调连接直流无刷电机驱动机翼扑动,同时控制两个舵机实现尾翼偏航和俯仰机动。

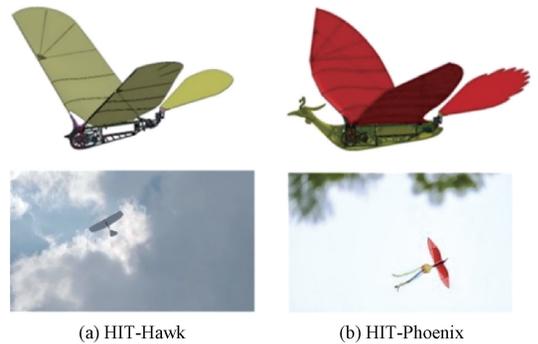


图 6 HIT-Hawk 和 HIT-Phoenix 样机平台  
Fig. 6 HIT-Hawk and HIT-Phoenix platform

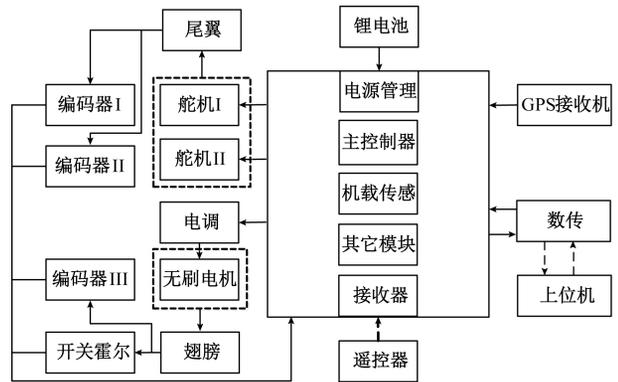


图 7 HIT-HAWK&Phoenix 组合导航系统硬件设计与集成  
Fig. 7 Hardware design and integration of inertial navigation system

基于 HIT-Hawk 和 HIT-Phoenix 两种样机平台, Pan 等<sup>[44]</sup>从系统工程的角度对机载嵌入式控制器和地面站进行了整体设计,嵌入式飞控用于收集和处理多种传感数据并运行飞行控制律,地面站提供可视化的人机交互,可实时监测飞行状态与参数,该工作为惯性导航系统研发提供了完备的硬件平台。

大型扑翼机器人机翼重量不可忽视,基于 HIT-Phoenix 样机平台, Xu 等<sup>[9]</sup>在状态估计和控制器设计中,考虑瞬态气动力而不是周期平均值。针对姿态和轨迹高度耦合的问题,提出了基于模糊控制策略的串级 PID 控制方法,实现了自主、半自主和手动控制模式下多模态飞行控制。

在此基础上,Liu 等<sup>[42]</sup>提出了一种多传感器融合的扑翼状态感知和估计方法,姿态控制环采用显式互补滤波算法来融合惯性传感器和磁力计的数据,解决了姿态发散的问题。位置控制环通过卡尔曼滤波将惯导、GPS 和气压计高度测量进行融合提高位置和速度估计精度,通过户外飞行实验证明了其融合滤波算法的可行性。

以上研究采用多传感器融合方案,提高了大中型扑翼飞行机器人状态估计准确性与飞控制导精度,一定程度上解决了因传感器精度与平台振动所导致的单一传感器测量不准确的问题。

在中型扑翼飞行机器人这一量级最具代表性的是西北工业大学研制的仿生鸽子 Dove<sup>[34]</sup>,其翼展 50 cm,样机本体重 220 g,搭载了集成 IMU、GPS 和气压计的飞控模块、OV7725 摄像头和图传链路,如图 8 所示。同样采用 GNSS/INS 组合导航实现自主飞行,通过无迹卡尔曼滤波算法抑制姿态估计发散,基于总能量控制法来控制飞行高度。图像处理模块通过对特征的滤波与匹配来减少图像抖动。Dove 具备巡航与自主飞行能力,图传可向 4 km 内的地面站传输实时稳定的视频,对中型扑翼飞行机器人总体设计与导航系统具有很大启发意义,但其有限的负载能力(<100 g)对于传感器选择存在一定局限性。

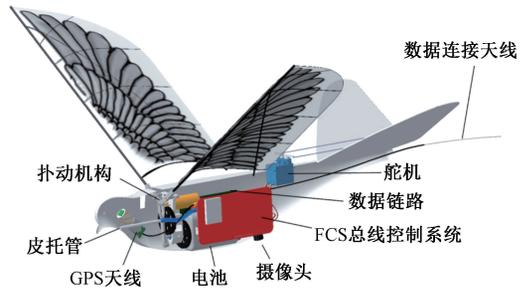


图 8 Dove 硬件系统组成

Fig. 8 Hardware system configuration of Dove

北京科技大学研制了适用于长续航飞行的仿鹰 USTB-Hawk<sup>[45]</sup>和适用于高机动飞行的全舵机驱动仿鸟 USTBird<sup>[46-47]</sup>样机。USTB-Hawk 翼展 1.78 m,样机本体重 670 g,可搭载 165 g 的视觉系统 Eagle-Eye,由两自由度云台<sup>[48]</sup>和长短焦摄像头组成。USTB-Hawk 可划分为结构组件、电子器件和负载系统等 3 个模块,如图 9 所示。通过质量分配法优化样机整体布局,结合计算流体力学仿真分析,机身、机翼和尾翼在经过 3 个阶段的轻量化设计后,可搭载 7 000 mAh 3 S 电池持续飞行约 80 mins。

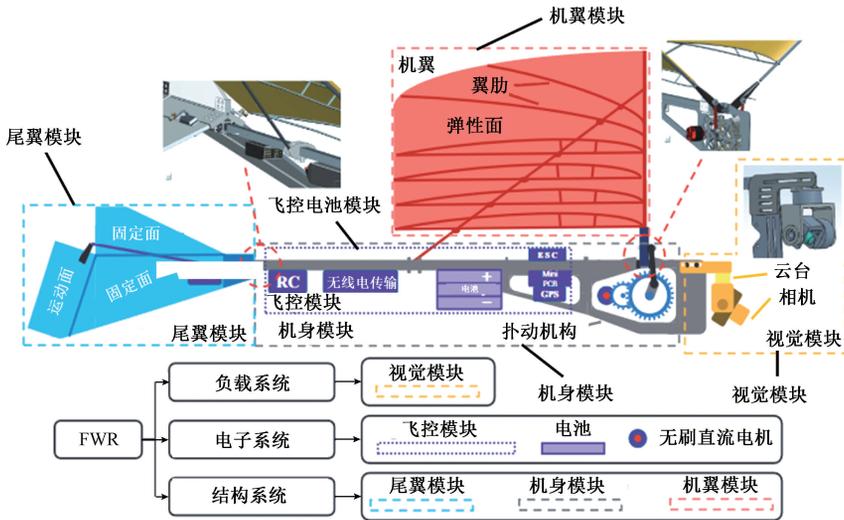


图 9 USTB-Hawk 结构布局

Fig. 9 The overall structure of USTB-Hawk

USTBird 翼展 1.2 m,样机本体重量 167 g,采用无尾翼设计,两个舵机独立驱动左右翅膀,通过改变两侧机翼的幅度、频率和相位的翼拍运动学实现差动转向。硬件组成包括 STM32F407 飞控、IMU、GPS、气压计和 700TVL 摄像头等,两自由度云台用于视觉增稳,如图 10 所示。采用无迹卡尔曼滤波提高 GPS 位置估计精度,双闭环分段 PD 控制器控制偏航角,在外圆半径 40 m 和内圆半径 10 m 的圆环内实现了自主巡航。全舵机无尾翼的差动

控制方案能够提高样机的机动性,但限制了扑动频率,飞行可靠性上还有待验证,同时对非对称翼拍运动学控制环节提出了较高要求。

### 1.3 微小型扑翼飞行机器人导航系统

荷兰代尔夫特理工大学专注于仿昆虫微型扑翼飞行机器人的自主视觉导航系统研究,旨在提升微型扑翼复杂环境下的自主飞行能力,先后研制了 DelFly I<sup>[49]</sup>、DelFly II<sup>[50]</sup>、DelFly Micro<sup>[51]</sup>、DelFly Explorer<sup>[52]</sup>和 DelFly

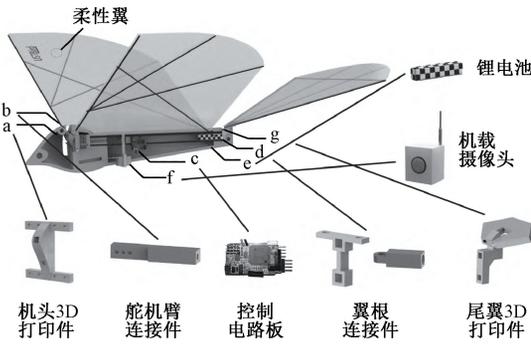


图 10 USTBird 整体结构图

Fig. 10 The overall structure of USTBird

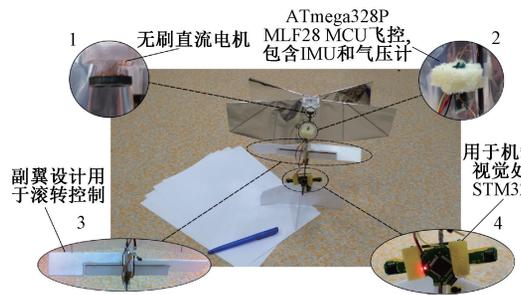


图 12 DelFly Explorer 硬件组成

Fig. 12 Hardware components of DelFly Explorer

Nimble<sup>[53-54]</sup> 5 代不同样机。

第一代样机 DelFly I 翼展 50 cm, 本体重量 21 g, 采用双机翼非对称设计, 由于飞行方向上双机翼运动所产生的相位差造成了相机图像模糊。为克服不对称性, 设计了一种齿轮轴垂直于飞行方向的新型传动机构, 从而诞生了第二代样机 DelFly II, 其翼展为 28 cm, 本体重量 16.07 g。DelFly Micro 在前两代样机的基础上进行了轻量化设计, 翼展仅有 10 cm, 本体重量也减至 3.07 g, 如图 11 所示。搭载机载 CMOS 相机的 DelFly II 能够控制高度和航向, 基于视觉导航实现自主环绕立柱转圈<sup>[50]</sup>, 展现了基于视觉感知的目标跟踪与飞控制导能力。

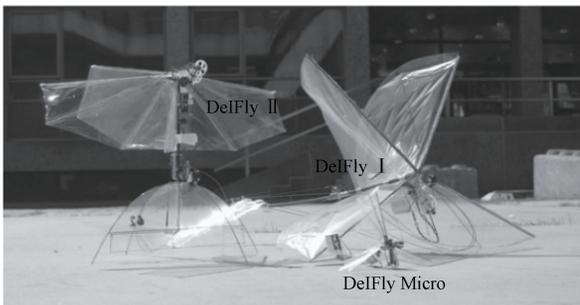


图 11 DelFly I, DelFly II 和 DelFly Micro 演化示意图

Fig. 11 Evolution diagram of DelFly I, DelFly II and DelFly Micro Prototype

随着样机的不断迭代, DelFly 平台自主导航和避障能力不断提高。DelFly Explorer 翼展长 28 cm, 本体重量 20 g, 搭载 4 g 的双目相机, 机载 STM32F405 处理器能实时处理 128 Pixels×96 Pixels 图像信息, 集成 IMU 和气压计用于姿态和高度测量, 如图 12 所示。Wagter 等<sup>[52]</sup> 通过设定左右视差图像的阈值, 采用了半全局匹配算法成功实现了静态避障功能。Tijmons 等<sup>[8]</sup> 所提出的“水滴”避障算法对昆虫级扑翼飞行机器人规划避障具有重要启发性, 该方法能使 DelFly Explorer 在未知环境中自主避障飞行长达 9 mins。

最新一代的 DelFly Nimble<sup>[53]</sup> 翼展 28 cm, 样机本体重量 29.92 g, 采用无尾翼设计, 使其能够实现悬停以及任意方向的运动。采用机载的单目相机方案, VL53L0X 微型激光雷达辅助提供 2 m 内的高度测量, 定制的 STM32F405 处理器用于飞控和实时图像处理, 如图 13 所示。Olejnik 等<sup>[35]</sup> 在该平台上提出基于像素对平分线间的概率霍夫变换来实现避障, 在 2018 年国际微型飞行机器人 (international micro aerial vehicle, IMAV) 竞赛中成功完成了线跟踪和圆环门检测避障等任务, 如图 14 所示。

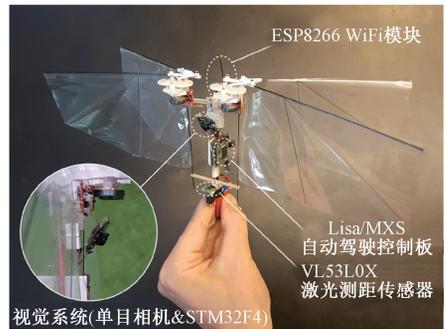


图 13 DelFly Nimble: 无尾翼布局

Fig. 13 DelFly Nimble: Configuration of tailless flapping wing



(a) 线跟踪实验 (a) Line tracking (b) 圆环门穿越实验 (b) Circle gate crossing

图 14 自主线跟踪和圆环门穿越实验

Fig. 14 Autonomous line tracking and circle gate crossing experiments

2008 年哈佛大学的 Wood 等<sup>[54]</sup> 研发了一种本体重量仅有 60 mg 的仿蝇飞行机器人 Harvard Microrobotic Fly, 并于 2011 年研制了本体重 110 mg 的可控驱动仿蜜蜂扑翼飞行机器人 Robobee。为提高 Robobee 样机的自

主飞行能力, Duhamel 等<sup>[55-56]</sup> 在本体重 68 mg 的样机平台上首个搭载了 33 mg 的 Tam4 光流传感器进行高度反馈控制, 基于如图 15 所示的传感器配置, Tam4 采集的图像信号发送至微处理器 Arduino Mega 2560, 输出光流脉冲序列后再被传输到 DSP 中, 从而实现高鲁棒性的高度反馈控制。Fuller 等<sup>[57]</sup> 受昆虫启发, 采用机载视觉传感器实现高度控制与自稳飞行。飞行实验证明了通过控制角速度来稳定俯仰和滚转方案的可行性, 如图 16 所示。

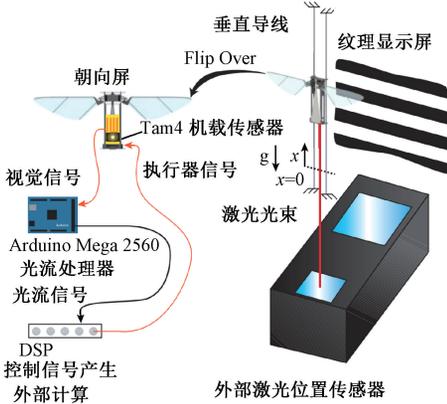


图 15 机载光流传感器实现高度控制

Fig. 15 On-board optical flow sensor for altitude control

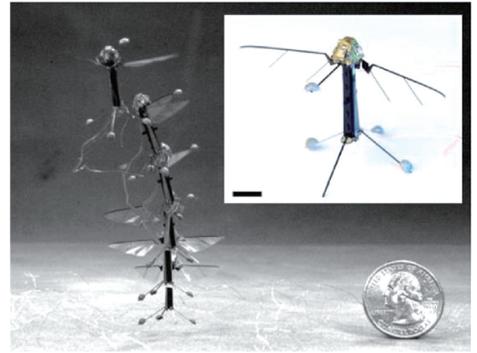


图 16 机载视觉传感器实现自稳飞行

Fig. 16 On-board vision sensors for self-stabilizing flight

Robobee 提高了仿昆虫级微型扑翼飞行机器人的机载感知与控制能力, 但离自主避障飞行还存在一定距离。

表 1 对上述具有代表性的国内外扑翼飞行机器人平台样机与导航系统研究现状进行了汇总, 分别从轨迹跟踪、目标跟踪和自主避障等 3 个自主导航功能上进行了对比, 其中基于视觉与 GNSS/INS 多传感器融合导航的大型扑翼 E-FLAP 和微型扑翼 DelFly 具备较高程度的自主飞行能力。

表 1 典型扑翼自主导航系统研究现状对比

Table 1 Comparison of current researches on typical flapping wing autonomous navigation systems

规模	样机平台	研发机构	导航类型	轨迹跟踪	目标跟踪	自主避障
大中型	E-FLAP	塞维利亚大学	视觉、卫星、惯导	II	II	II
大中型	HIT-Hawk&Phoenix	哈尔滨工业大学	卫星、惯导	II	O	O
大中型	Dove	西北工业大学	卫星、惯导	II	O	O
大中型	USTB-Hawk&USTBird	北京科技大学	卫星、惯导	II	O	O
微小型	DelFly	代尔夫特理工大学	视觉、卫星、惯导	II	II	II
微小型	Robobee	哈佛大学	视觉、惯导	II	O	O

## 2 扑翼自主导航系统关键技术

### 2.1 感知定位与建图

感知定位与建图模块作为整个扑翼自主导航系统的输入端, 主要功能包括自身状态的估计(定位)和对环境的构建(建图)。GNSS/INS 组合导航的定位精度取决于当地卫星数量, 适用于主要任务场景为户外高空飞行的大中型扑翼飞行机器人。然而, 受多径效应和非视距传播等影响, 在楼宇、山谷、丛林和室内等场景下 GNSS 定位精度大幅降低, 与其他主动定位技术进行紧耦合或深耦合能进一步提高定位精度, 例如融合 UWB<sup>[58]</sup>、激光雷达<sup>[59]</sup>、动捕系统<sup>[60-61]</sup>等, 利用各传感器的优劣互补可提

高非结构化环境下的定位精度。同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术由于可同步实现定位与构建三维环境地图, 成为当前无人机导航领域的研究热点, SLAM 最早源于机器人领域<sup>[62-64]</sup>, 主要解决未知环境中三维结构如何实时重建以及对机器人自身进行定位等问题。基于 SLAM 的导航方案适用于作业场景为室内或户外低空飞行的微小型或大中型扑翼飞行机器人。传统 SLAM 框架由前端、后端、回环检测与建图 4 部分组成, 前端里程计用于解算机器人和环境路标位置, 后端优化对长时间大规模状态进行校准, 回环检测用于避免相同位置下的重复估计, 最终建立地图用于后续的规划与导航。目前具有代表性的 SLAM 框架例如基于特征点匹配的 ORB-SLAM 系列<sup>[65-67]</sup>、基于滤波的

MCSKF<sup>[68]</sup>、基于滤波紧耦合的 ROVIO<sup>[39]</sup> 和基于光流跟踪紧耦合的 VINS<sup>[69-70]</sup> 系列已经在多旋翼无人机导航领域得到了广泛引用。刘浩敏等<sup>[71]</sup> 对当前 3 类主流单目视觉 SLAM 技术进行了综述, 并从定位精度、效率和鲁棒性等多项指标分析了各方案的优缺点。赵良玉等<sup>[72]</sup> 针对多旋翼无人机平台, 总结评价了当前纯视觉和视觉惯导融合的 SLAM 方案。苗升等<sup>[73]</sup> 梳理了无人机平台视觉 SLAM 主流框架技术。更进一步地, Delmerico 等<sup>[74]</sup> 在 PC 端和单板嵌入式等 4 种平台上评估了多种 VIO 主流方案的性能, 对比了同时运行 EuRoC 数据集时的姿态估计精度、每帧处理时间以及 CPU 内存负载, 对于飞行机器人嵌入式平台和 VIO 算法选型具有重要指导作用。

针对扑翼飞行机器人感知定位与建图问题, 国内外专家学者开展了相关研究。Rodriguez 等<sup>[75]</sup> 提出了用于捕获扑翼飞行器着陆环节多传感器信息的仿真数据集 ROSS-LAN, 基于 tau 理论计算着陆飞行轨迹, 并采用自适应控制方法实现定点自主着陆<sup>[76]</sup>。建立一套完整的扑翼感知数据集对于检验和调试改进算法具有重要意义, Rodriguez 等<sup>[7]</sup> 提出的首个大型扑翼感知数据集 GRIFFIN, 填补了扑翼机器人感知数据集研究的空白。

抑制扑翼平台的抖动带来的图像丢失是视觉感知的关键, 针对扑翼周期性振动相机图像模糊的问题, Pan 等<sup>[31]</sup> 提出了应用于大型仿鸟扑翼飞行机器人的三轴云台增稳系统, 将每个周期内相机俯仰和滚转抖动幅度限制在 5° 以内。Fu 等<sup>[48, 77]</sup> 针对大型仿鹰扑翼飞行机器人提出一种仿生鹰眼微型视觉系统, 设计两轴长短焦摄像头组合云台方案来增强全局视野并提高局部分辨率。两种云台增稳系统示意图如图 17 所示, 尽管相机云台增稳为后续扑翼视觉导航系统研发提供了硬件保障, 但目前采用的云台增稳系统在应对大型扑翼周期性振动问题上仍存在显著的可靠性问题, 微型云台很难抵消大幅振动, 大中型云台超过了平台额定负载。

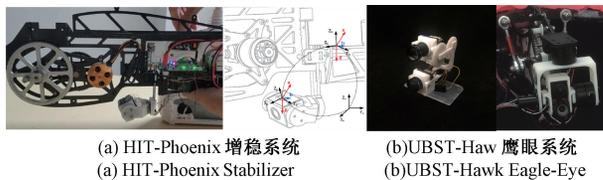


图 17 两种扑翼云台增稳系统

Fig. 17 Two kinds of flutter head stabilization system

准确的状态估计对于后续规划避障和飞控制导起着决定性作用, 只利用单个传感器采集数据往往容易导致漂移和估计姿态发散等问题, 因此目前通常采用多传感器融合方案来实现更准确的状态估计。多传感器融合需首要解决的数据频率对齐问题, Forster 等<sup>[78]</sup> 最早提出了

IMU 预积分的方法, 通过将两关键帧间的多个 IMU 数据进行预积分, 进而得到频率一致的传感器输出。在此基础上, Dong 等<sup>[61]</sup> 基于一种外部视觉和机载惯导松耦合方案实现了扑翼飞行机器人的无漂移状态估计, 采用扩展卡尔曼滤波的凸组合方法, 融合了动捕系统 OptiTrack 和机载 MPU9250 数据, 利用 IMU 高频但存在漂移和 OptiTrack 低频但估计准确的特点进行优势互补, 在其研发的机械驱动的三旋翼<sup>[79]</sup> 和电机驱动的 X 翼两种微型扑翼样机上开展了飞行实验。仿生光流法模拟昆虫的视觉机理, 通过光流测量自身运动从而获取位置与环境信息, Zufferey 等<sup>[80]</sup> 将光流信息用于机载感知和图像处理中, 光流直接耦合到微小型飞行机器人的转向指令上, 实现机器人快速响应。除了惯导、视觉和激光等传统感知方案以外, 扑翼飞行机器人翅膀扑动能够获得体感反馈从而感知周围环境, 基于这一原理, 普渡大学的 Tu 等<sup>[81]</sup> 发现扑动时机翼瞬时载荷可以通过测量驱动电机的电流来获得, 提出一种基于触觉反馈的扑翼飞行机器人感知导航方法, 通过飞行实验, Purdue 蜂鸟机器人能够穿越狭窄、未知障碍物空间, 证明了该自主导航系统的可行性, 该方法在惯导和视觉导航方案外开拓了基于触觉反馈的新型感知导航模式。

综上, 扑翼飞行机器人 6 自由度 (degree of freedom, DOF) 感知定位与状态估计方法可总结为以下 4 种:

1) 基于 OptiTrack 和 Vicon 等动作捕捉系统的外部传感器状态估计, 在微小型扑翼飞行机器人室内飞行实验中已得到广泛应用<sup>[61]</sup>。

2) 基于视觉、GNSS/INS、激光等机载传感器的内部传感器状态估计<sup>[9, 42]</sup>, 同时适用于室内外飞行的大中型和微小型扑翼飞行机器人。

3) 基于内部和外部传感器融合的方案, 需解决不同传感器数据频率对齐的问题, 融合方案往往能够得到更好的状态估计结果, 但算法计算复杂度也会相应提高, 需要在计算速度和精度上进行博弈。

4) 基于生物启发式的光流传感器方案。该方法通常不对飞行机器人进行状态估计, 而是强调训练对输入图像信息的正确响应<sup>[49]</sup>, 其通常在纹理丰富的场景下具有高鲁棒的表现。

在得到准确的定位与状态估计后, 扑翼飞行机器人需要获取周围环境信息, 对于主要执行高空户外飞行任务的大中型扑翼飞行机器人, GPS 和高精度 RTK 可直接提供米级乃至厘米级的定位, 并获取用于航迹规划的全局卫星地图。对于执行室内飞行和户外低空飞行为主的微小型扑翼飞行机器人, 可采用仿生光流法或视觉惯性融合 SLAM 来感知定位与建图。常见的用于无人机导航的建图类型包括栅格地图、八叉树地图<sup>[82]</sup>、点云地图和欧氏距离场<sup>[83]</sup>等。除了以上环境感知方法外, Rodriguez

等<sup>[7]</sup>基于事件相机对动态场景的快速响应,所拍摄的事件流能够还原出部分地图信息,识别障碍物从而实现动态避障<sup>[41]</sup>,如图18所示。但对于户外大规模小尺度目标场景而言,事件信息流的存储内存占用较大,因此难以还原出类似于3D稠密点云信息用于导航<sup>[84]</sup>。

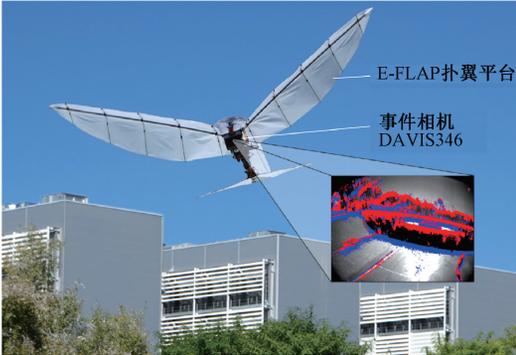


图18 基于事件相机流还原地图信息

Fig. 18 Restore map information based on event camera streams

扑翼飞行机器人目前在感知定位与状态估计方面均取得了一定成果,在环境感知与建图方面,现阶段扑翼视觉系统大多用于实现航拍<sup>[34]</sup>与目标识别检测<sup>[44,47,77]</sup>功能,采用图传与地面站的方案将视频流回传用于区域监测与勘查,如表2所示。扑翼飞行机器人的实时定位与建图需进一步考虑扑翼飞行的动力学约束,结合云台控制、图像增稳与多传感器融合等技术,提高机载计算能力,兼顾环境地图存储占用,还有待进一步研究。

## 2.2 运动规划与避障

运动规划与避障模块旨在确定飞行机器人状态和周围环境信息后,为机器人规划出一条无冲突的平滑路径,其中无冲突的路径规划问题也包含了静态与动态避障问题。对于路径规划问题,根据地图信息是否已知可分为全局路径规划和局部路径规划<sup>[1]</sup>,常见的全局路径规划方法主要包括图搜索算法、基于采样的算法和智能算法等;局部路径规划方法包括动态窗口法和图优化方法等。

表2 扑翼飞行机器人感知定位与建图研究现状总结

Table 2 Summary of the current status of research on perceptual localization and map building for FWFR

文献	样机类型	视觉增稳	感知硬件方案	定位与状态估计	环境建图
[75]	两种均可	NaN	激光、视觉、卫星、惯导	Tau 理论轨迹计算	Gazebo 仿真
[7]	大中型	NaN	事件相机、卫星、惯导、动捕、激光跟踪仪	ROVIO	事件信息流
[31,42]	大中型	三轴云台	单目相机、卫星、惯导	无迹卡尔曼滤波	NaN
[46-48,77]	大中型	两轴云台	长短焦相机、卫星、惯导	无迹卡尔曼滤波	NaN
[61,79]	微型	NaN	动捕、卫星、惯导	扩展卡尔曼滤波、VIO 紧耦合	NaN
[81]	微型	NaN	机翼力反馈	电机电流变化计算	NaN

Zhou 等<sup>[6,85-87]</sup>针对四旋翼无人机提出了一系列考虑运动可行性的高效路径规划与轨迹生成算法,如融合欧式距离场梯度信息与动态约束的 Fast-Planner 算法<sup>[85-86]</sup>,在此基础上迭代出不考虑欧式距离场梯度的 EGO-Planner<sup>[87]</sup>,并拓展到多四旋翼集群动态规划算法 EGO-Swarm<sup>[6]</sup>。对于避障问题,Badrloo 等<sup>[88]</sup>将基于视觉的无人机避障划分为单目和双目避障方法,其中单目避障可分为基于运动的、基于外观的、基于深度的和基于扩展膨胀的方法,双目避障主要采用计算视差直方图进行阈值检测的方法。

根据具体飞行场景和任务需求不同,扑翼飞行机器人运动规划与避障可分为两种技术方案。针对大中型扑翼飞行机器人执行高空户外飞行任务的情况,可以借鉴参考固定翼飞行器 L1 控制律<sup>[89]</sup>与总能量控制法,当进入自稳巡航阶段后,通过设定起始目标位置或航迹,使其按照预定轨迹进行直线或绕圆飞行<sup>[9,90]</sup>。在这种情况下,考虑避障的运动规划需求较少。针对主要飞行场景为室内或户外低空 GNSS 信号受阻区域的微型或大中

型扑翼飞行机器人,需同时考虑避障与最优路径规划问题。

扑翼飞行机器人受非完整性约束,是典型的强耦合、欠驱动系统,难以视为单刚体进行建模分析,相比于旋翼和固定翼飞行器,扑翼飞行机器人扑动运动学和气动力学特性建模更为复杂,这增加了考虑动力学可行性的路径规划算法设计和优化的难度。此外,由于扑翼几何形状时变特性,简单的几何膨胀法在避障方面无法有效应用,这对于避障算法的设计提出了更高要求。

目前扑翼飞行机器人路径规划与避障方法主要包括基于扩展的、基于视差直方图的、基于外观的方法和光流法。Tijmons 等<sup>[8]</sup>提出了基于机载双目视觉的水滴算法,如图9所示,并在 DelFly Explorer 样机上验证了其优于基于反应的避障策略,这是首个应用于扑翼飞行机器人的规划与避障算法集成。在此基础上,王思鹏等<sup>[91]</sup>针对摄像头偏置安装导致飞行机器人重心偏移的问题改进了水滴策略,提出一种心形避障算法,并将其与示教学习辅助的强化学习局部路径相结合,实现扑翼飞行机器人的局

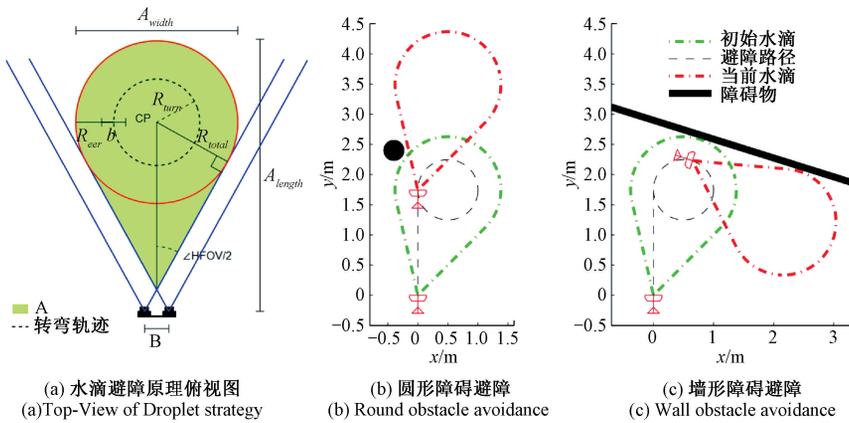


图 19 基于机载双目视觉的水滴法<sup>[8]</sup>避障原理示意图

Fig. 19 Schematic diagram of the water droplet method<sup>[8]</sup> for obstacle avoidance based on onboard stereo vision

部路径规划,但缺乏扑翼样机飞行实验,仅在仿真分析层面证明其方法的有效性。

Rodriguez 等<sup>[41]</sup>基于扩展的方法首次实现了大型扑翼动态避障功能,将扑翼飞行机器人膨胀为长方体,动态障碍物碰撞为球体,计算最小安全偏航角和俯仰角控制避障。王昕鹏<sup>[92]</sup>设计了一套集图像增稳、人像检测和避障算法等功能为一体微型扑翼飞行机器人视觉系统,提出基于 ORB 特征的实时障碍物检测算法,通过尺度膨胀算法估测与障碍物的距离,跳帧匹配算法保证算法的实时性,但样机尚未完全实现自主飞行,仅在静态条件下验证了避障响应。郑皓等<sup>[93]</sup>建立了扑翼动态避障模型,提出全局与局部相结合的路径规划策略。基于双目相机的视差直方图法在处理室内纹理较少的图像时展现出较强的鲁棒性,Wagter 等<sup>[52]</sup>基于 DelFly Explorer 的双目视觉方案,采用半全局匹配算法,通过设定阈值计算双目视差直方图来判断障碍物。Qiang 等<sup>[94]</sup>在该方法基础上进行了简化,在翼展 27 cm,重 18 g 的 X 翼样机上提出了一种基于单目视觉的 Farneback 稠密光流法结合模糊控制策略,通过图传将视频流传输到地面站进行处理,基本实现了静态避障功能,该方法能够快速识别一些简单静态障碍物,但直接将单目图像一分为二的阈值判别法依赖于丰富的障碍物纹理图像特征,避障精度难以得到保证。基于单目视觉外观的方法要求图像中具备明显的外观和纹理,以便提取和匹配特征点,该方法存在的问题是难以获取准确的深度信息来进行有效的避障判断。Croon 等<sup>[49]</sup>在 DelFly II 样机平台上引入用于障碍物检测的外观线索,通过随机采样的方法来减小提取外观特征的计算量从而实现机载实时避障。光流法在成像平面上计算像素点的运动速度,从而对相机状态进行估计,但由于其对小位移和光强不变的严格假设,用于扑翼飞行机器人导航存在一定难度,Garcia 等<sup>[95]</sup>在重 10 g 的玩具 VAMP

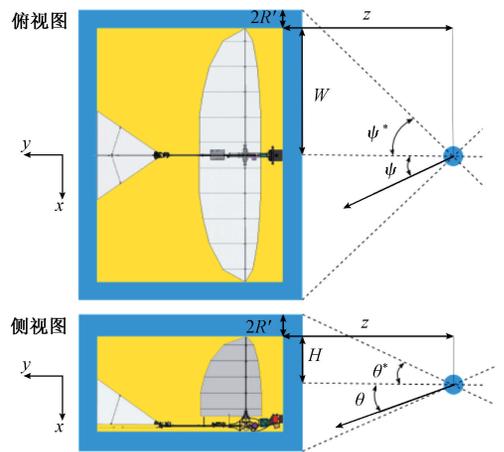


图 20 基于最大偏航和俯仰角的几何约束碰撞评估方法<sup>[41]</sup>

Fig. 20 Geometrically constrained collision evaluation method based on the maximum yaw and pitch angles<sup>[41]</sup>

扑翼平台上评估了光流法的可行性,提出一种将扑翼平台光流测量与实时反馈的电机电流进行关联的方法,部分消除了因俯仰抖动所造成的光流测量误差。

目前针对扑翼飞行机器人的规划避障算法研究主要集中在飞行场景为室内的微型扑翼样机上,如表 3 所示,基于视觉的避障算法在处理静态和动态障碍物的避障成功率方面还有待进一步提高。实现同时考虑运动学与动力学可行性、路径平滑性和低计算开销的无冲突路径规划是当前需要解决的难题。

### 2.3 轨迹跟踪与飞控制导

扑翼飞行机器人的飞控制导旨在实现样机的全自主多模态飞行,涵盖了起飞、巡航、悬停、滑翔、翱翔、转弯和着陆等多个飞行环节。飞控制导模块基于感知层和规划层提供的传感器与规划避障任务信息,融合处理后生成相应的控制指令和信号,飞行机器人执行控制指令实现

表3 扑翼飞行机器人路径规划与避障算法研究现状总结

Table 3 Summary of the current research on path planning and obstacle avoidance for FWFR

文献	样机类型	传感器方案	计算单元	规划和避障策略	避障类型
[8]	微小型	双目相机、IMU、气压计	机载 ATmega328P	水滴算法	静态避障
[51]	微小型	双目相机、IMU、气压计	机载 ATmega328P	半全局匹配、视差直方图法	静态避障
[91]	微小型	双目相机	NaN	心形算法、强化学习	静态避障
[41]	大中型	事件相机、IMU	机载 Khadas VIM3	光流法、扩展膨胀	动态避障
[92]	微小型	单目相机、IMU	图传-地面站	尺度膨胀、跳帧匹配	静态避障
[93]	微小型	NaN	NaN	视差直方图法	动态避障
[94]	微小型	单目相机、IMU	图传-地面站	光流法、视差直方图法	静态避障
[95]	微小型	单目相机、蓝牙模块	机载微处理器	光流法	静态避障

轨迹跟踪和避障功能,扑翼轨迹跟踪与避障技术对底层飞控的控制精度和敏捷性提出了更高要求。控制精度方面,涉及到对机翼及尾翼的姿态、协调和节律进行精准调控,需要借助高精度传感器和鲁棒高效的控制算法;敏捷性方面,底层飞控需要具备高性能数据处理能力和响应能力,以实现快速精准的激励响应。此外,传统无人机成熟的飞控模块难以直接迁移应用到扑翼平台上。由于扑翼飞行机器人缺少副翼,复杂的气动特性和非线性时变特征,升推力的产生与气动特性强相关,使得扑翼飞行机器人准确的动力学建模变得十分困难,目前主要通过系统辨识<sup>[96]</sup>、风洞试验<sup>[12]</sup>和数值分析<sup>[97]</sup>等方法来计算动力学模型参数,因此飞行控制层需定制开发集成电路板并针对样机平台设计飞行控制律。

针对扑翼飞行机器人飞控制导层存在的以上问题,

国内外专家学者开展了相关研究。在扑翼飞行机器人动力学与气动力系统建模方面,主要有等效刚体动力学建模<sup>[17]</sup>、机翼尾翼动力学分析<sup>[17,98]</sup>与多体动力学建模<sup>[99]</sup>等方法。塞维利亚大学 Gayango 等<sup>[99]</sup>设计了一款固定翼-扑翼复合平台,并根据拉格朗日公式建立了统一的螺旋桨与扑翼多体动力学与气动力模型,通过微控制器和开关可实现基于上反角的扑翼与固定翼切换。无尾翼的全舵机驱动可实现各部分独立控制,从而达到更精确的姿态和运动控制效果,Huang 等<sup>[47]</sup>设计了一种由双舵机驱动的仿鸟型扑翼飞行机器人 USTBird-I,可独立解耦控制三姿态角完成俯冲、翻滚和滑翔等敏捷机动,采用串级 PD 控制器控制偏航角,可实现区域自主巡航功能,在此基础上基于视觉系统能够完成滑翔飞行模态下的空投任务<sup>[100]</sup>,如图 21 所示。与 Eguiluz 等<sup>[40]</sup>基于线跟踪检测

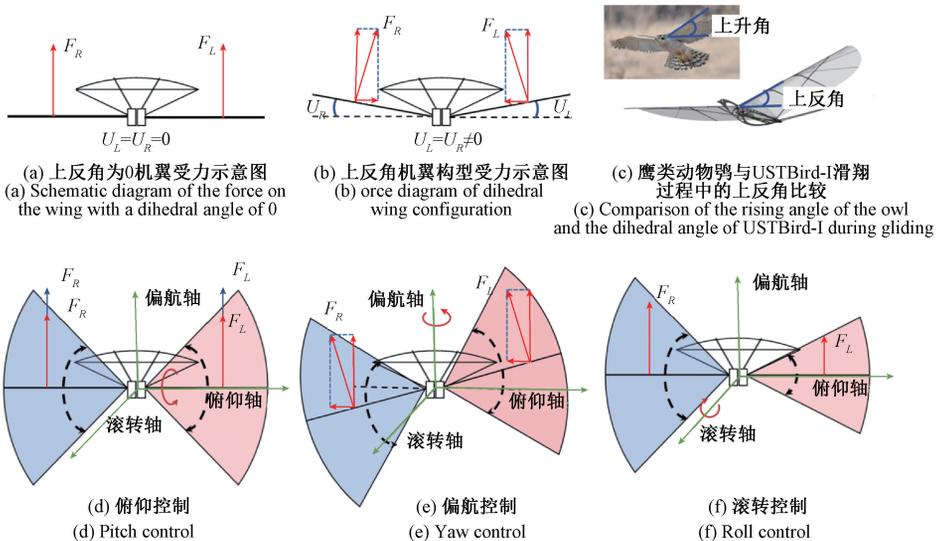


图 21 基于独立舵机驱动的滑翔与姿态控制方法<sup>[47]</sup>

Fig. 21 Gliding and attitude control method based on independent servo drive<sup>[47]</sup>

的图像处理的视觉伺服方法不同,Ryu 等<sup>[101]</sup>在改造的 X 翼微型扑翼平台上实现了视觉伺服与绕圆轨迹跟踪控制,采用颜色分割、形态变换、滤波和过滤椒盐噪声等形态学操作,通过 bang-bang 控制实现自主绕圆飞行与伺服控制,并基于 PID 控制设计了绕圆轨迹跟踪策略。尽管没有对样机模型和动力学建模展开深入研究,但该项研究基于单目相机、Vicon 动捕系统和地面站的集成架构,使扑翼飞行机器人同时实现了绕圆飞行与视觉伺服等功能,横向控制精度较高。扑翼飞行机器人在上下最大行程角时受阵风影响显著,因此实现精确的轨迹跟踪对控制律设计提出了新的要求,He 等<sup>[98]</sup>近似建立了扑翼飞行机器人运动学和动力学模型,所提出的自适应控制律在位置和姿态环实现了扑翼飞行机器人高精度轨迹跟踪,该研究对控制律进行了详细推导并给出了 Lyapunov 稳定性证明。

自主起降栖息技术对飞行的全生命周期至关重要,扑翼飞行机器人通常采取人工抛飞或借助滑轨加速起飞,由于没有起落架和支撑机构辅助,实现精准的自主着

陆栖息十分困难,针对该问题,Maldonado 等<sup>[76]</sup>设计了一种基于自适应反步法的控制律以实现扑翼飞行机器人滑翔状态下的精准栖息,经过多次室内飞行测试验证了参考轨迹在接近栖息点时具有良好的收敛性。

Zufferey 等<sup>[102]</sup>结合视觉识别与检测系统和双稳态夹紧鸟爪机构,成功实现了携带鸟爪的扑翼机器人在栖木上的栖息控制,如图 22 所示。Paranjape 等<sup>[36]</sup>采用了一种非对称机翼上反角的横向控制策略,有效地控制了无垂尾扑翼飞行机器人的轨迹和航向,通过改写时域飞行动力学方程为空间域并应用双激励 PID 控制,设计了新的闭环飞行制导律,最终实现了扑翼自主栖息着陆机动功能,通过飞行实验验证了控制算法精度。Rao 等<sup>[103]</sup>利用位置传感器 PSD 测量值作为观测,实现飞行机器人仿鸟类的精准自主着陆,通过着陆轨迹优化和扩展卡尔曼滤波法进行状态估计,验证了基于视觉的栖息导航方案有效性。Lin 等<sup>[104]</sup>提出了一种基于双目视觉的改进 P-Control 控制方法来实现稳定的高度控制,但缺少双目视觉目标跟踪和轨迹跟踪等导航的深入研究。

表 4 扑翼飞行机器人轨迹跟踪与飞控制导研究现状总结

Table 4 Summary of the current status of research on trajectory tracking and flight control guidance of FWFR

文献	样机类型	驱动方式	控制方法	实现功能
[46-47, 98, 100]	大中型	双舵机驱动机翼	串级 PD	敏捷机动、空投、自主巡检
[9]	大中型	电机驱动机翼、舵机驱动尾翼	串级 PID	全自主飞行、轨迹跟踪
[101]	微型	电机驱动机翼、舵机、线圈驱动尾翼	bang-bang 控制、PID	轨迹跟踪、目标跟踪
[76, 102]	大中型	电机驱动机翼、舵机驱动尾翼	自适应反步法	定点栖息、栖木栖息
[36]	微型	NaN	双激励 PID	自主栖息着陆

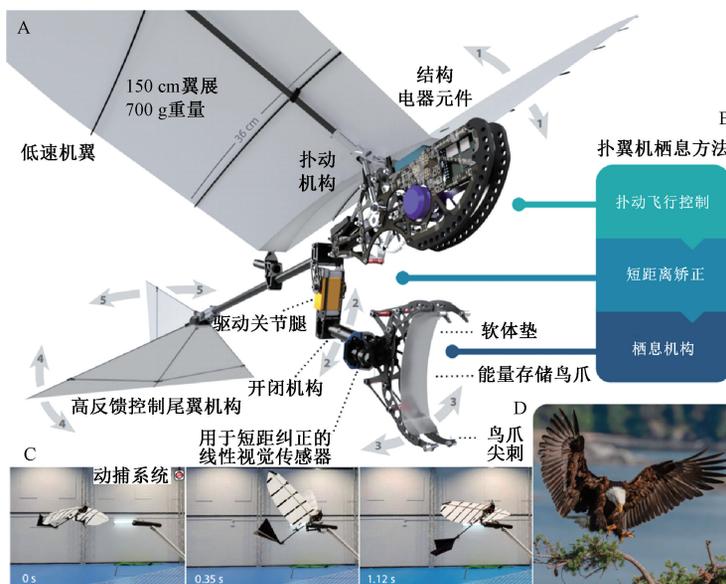


图 22 具有鸟爪的扑翼机器人栖木栖息控制<sup>[102]</sup>

Fig. 22 Perching control of a FWFR with bird claws<sup>[102]</sup>

为此,设计一套稳定、鲁棒的控制律对于扑翼飞行机器人的稳定和自主飞行有着重要意义。目前扑翼飞行机器人轨迹跟踪与飞控制导现状如表4所示,可总结为以下3点:

1) 从样机设计角度出发。通过全舵机控制将三轴姿态角部分解耦的无尾翼控制方案能够有效提高控制精度与敏捷机动性能<sup>[47]</sup>,但飞行可靠性难以满足大翼展样机长航时飞行需求。对于可靠性要求较高的大型单段翼扑翼飞行机器人来说,一般通过电机驱动机翼往复扑动,舵机驱动尾翼控制姿态,由于其缺少副翼控制滚转机动,故通常采用等效上反角的设计,利用偏航与滚转耦合效应来实现转向,同时提高其横向滚转稳定性。

2) 绝大多控制算法集中在滑翔稳定状态前提下,将其等效成固定翼飞行器来考虑,例如定点栖息<sup>[76]</sup>和空投<sup>[100]</sup>等,扑动状态下的自稳飞行控制、基于视觉的目标识别、跟踪与伺服还需进一步研究。

3) 轨迹跟踪、自主飞行控制律设计上主要以无模型的串级PID控制为主<sup>[42,47]</sup>,尽管采用系统辨识技术能够实现动态PID调参得到理想的激励响应,但在多模态自主飞行的扩展性和鲁棒性上还有待加强,需在建立准确的多体动力学模型基础上采用例如自适应鲁棒控制、滑模控制和模型预测控制等非线性控制方法。

### 3 未来研究展望

通过对比国内外具有代表性的扑翼飞行机器人导航系统,分析导航系统所涉及到的3种关键技术,可以发现目前扑翼自主导航系统的研究还相对初级,尤其是集成感知定位、规划避障和控制跟踪等多项功能模块的总体性研究还相对较少。受制于扑翼样机平台飞行效率与操纵稳定性,扑翼自主导航系统面临着独特的挑战,与相对成熟稳定的固定翼和旋翼无人机相比,扑翼飞行机器人具身智能尚有很大的发展空间,结合现有研究和趋势,提出以下几点作为未来研究的展望:

1) 提升扑翼样机平台的机载嵌入式计算能力。

图像处理对于算力有较高要求,将图像视频流借助图像传输模块回传地面站计算处理,在返回样机平台的外部解决方案始终存在数据传输时延、丢包等问题,难以保证实时性。未来可考虑在负载能力允许的条件下搭载更高算力的机载CPU\GPU计算平台,利用可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)并行计算与MCU实时控制功能的有效融合,使机载计算平台能够同时具备高性能计算和快速响应的能力,地面站终端仍需提供可视化监测、人机交互和辅助导航等功能,这将有助于提高图像处理速度,为基于视觉融合方案的准确感知定位与伺服提供硬件基础。

2) 多模态信息融合的自主导航技术。

视觉传感器能够提供丰富的图像纹理信息,但容易受到户外光照变化和平台固有振动的影响;惯性传感器能够提供精确的运动状态信息,但存在零偏和漂移等问题;激光雷达可以提供精确的距离和地图信息,但对于细节和纹理较少的场景作用有限,且受到扑翼平台重量和功耗的严格限制。外部传感器可作为状态估计的真值用于检验估计精度,也可通过融合进一步提高估计精度,例如动捕系统OptiTrack和Vicon等能够在室内环境提供准确的状态估计,激光跟踪仪可在室内外精确计算状态和轨迹信息。通过多模态信息融合,可以充分发挥各种传感器的优势,弥补各自的局限性,基于滤波<sup>[34,42,68]</sup>、非线性优化<sup>[67-70]</sup>、深度学习<sup>[105]</sup>等融合算法来实现对扑翼飞行机器人位置、姿态、速度和环境感知的精确估计和预测,从而实现更安全、可靠和智能的自主导航。

3) 面向多模态飞行的流场感知与自主导航。

环境中流场、风能等信息源对扑翼机器人姿态、速度和能耗具有显著影响,这在极端复杂气候条件下尤为明显。针对扑翼飞行机器人扑动-滑翔-翱翔-悬停等多模态飞行模式,感知流场能够预测来流方向和速度,起到稳定机身姿态、增强横向稳定性和抗扰性的作用。捕获风能可利用自然上升气流从而减小飞行功耗,可真正实现仿生鹰类静态和动态翱翔运动。针对流场和风能感知,基于视觉传感器的光流法可以利用图像序列中的像素位移来估计飞行机器人相对于流场的速度和方向。同时,利用机器学习和深度学习技术,可以对当地流场和风能数据进行模式识别和预测。通过对流场和风能变化的分析,扑翼飞行机器人可以调整飞行姿态并规划最优的飞行路径,以最小的能量消耗实现高效飞行。

4) 扑翼仿生视觉系统研究。

自然界的飞行动物通过长期的自然选择进化出了高度适应飞行的视觉系统。飞行动物通常拥有广阔的视野和高分辨率的视觉能力,例如鹰隼类动物可以在几百米到几千米的高空发现潜在猎物,通过俯冲和快速机动向猎物展开攻击。此外,高动态视野使得飞行动物能迅速捕捉到移动物体的位置和运动方向,以追踪同伴或猎物的行为模式。这些视觉特征和适应策略为仿生视觉系统的研究提供了灵感,通过借鉴飞行动物的视觉机制,可开展增强视野、远距立体视觉和高速追踪视觉的研究,进一步提高仿生性与环境适应性。

5) 扑翼飞行机器人群体感知与编队控制。

受制于传感精度与范围,单机器人难以胜任复杂多样的环境监测与勘探任务,通过向分布式群体智能感知发展<sup>[106]</sup>,实现对彼此状态和周围环境的感知,可提高任务效率与可靠性,扩大搜索范围。扑翼编队控制是实现群体感知的基础,自然界中大部分飞行生物采取结伴飞

行来提高飞行效率、保障群体安全,已有文献对 V 型编队的气动特性机理开展了研究<sup>[107]</sup>,扑翼编队目前亟待解决的问题包括非悬停模态下如何建立群体通信模型、如何实现准确的多机位置感知和如何动态调整编队并保持稳定性等<sup>[108]</sup>。

## 4 结 论

本文主要对现阶段扑翼飞行机器人自主导航系统的研究进展和关键技术进行了总结与分析。导航系统对扑翼飞行机器人实现全自主飞行具有重要意义,将扑翼飞行机器人按照规模尺度分为大中型和微小型两种类型,分别介绍了国内外典型的扑翼飞行机器人导航系统研究进展,并从自主飞行能力角度进行了分析与比较。对扑翼导航系统涉及的 3 个关键技术:感知定位与建图、运动规划与避障和轨迹跟踪与飞控制导的研究现状进行了梳理,分析了各技术在扑翼应用上所存在的问题。最后对扑翼飞行机器人未来发展趋势进行了展望,重点包括提升机载嵌入式计算能力、多模态信息融合、面向多模态飞行的流场感知与自主导航、仿生视觉系统研发、群体感知与编队控制等未来热点方向。

## 参考文献

- [ 1 ] LU Y, XUE Z, XIA G S, et al. A survey on vision-based UAV navigation [ J ]. *Geo-spatial Information Science*, 2018, 21(1): 21-32.
- [ 2 ] GYAGENDA N, HATILIMA J V, ROTH H, et al. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 152: 104069.
- [ 3 ] AL-KAFF A. Survey of computer vision algorithms and applications for unmanned aerial vehicles [ J ]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 92:447-463.
- [ 4 ] ESCOBAR-ALVAREZ H D, JOHNSON N, HEBBLE T, et al. R-ADVANCE: Rapid adaptive prediction for vision-based autonomous navigation, control, and evasion[J]. *Journal of Field Robotics*, 2018, 35(1): 91-100.
- [ 5 ] BARRY A J, FLORENCE P R, TEDRAKE R. High-speed autonomous obstacle avoidance with pushbroom stereo[J]. *Journal of Field Robotics*, 2018, 35(1): 52-68.
- [ 6 ] ZHOU X, ZHU J, ZHOU H, et al. EGO-swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments [ C ]. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2021: 4101-4107.
- [ 7 ] RODRIGUEZ-GOMEZ J P, TAPIA R, PANEQUE J L, et al. The GRIFFIN perception dataset: Bridging the gap between flapping-wing flight and robotic perception [ J ]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1066-1073.
- [ 8 ] TIJMONS S, DE CROON G, REMES B, et al. Obstacle avoidance strategy using onboard stereo vision on a flapping wing MAV [ J ]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(4): 858-874.
- [ 9 ] XU W, PAN E, LIU J, et al. Flight control of a large-scale flapping-wing flying robotic bird: System development and flight experiment [ J ]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(2): 235-249.
- [ 10 ] CHEN C, ZHANG T. A review of design and fabrication of the bionic flapping wing micro air vehicles [ J ]. *Micromachines*, 2019, 10(2): 144.
- [ 11 ] 薛栋,宋笔锋,宋文萍,等. 仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展 [ J ]. *空气动力学学报*, 2018,36(1):88-97.  
XUE D, SONG B F, SONG W P, et al. Advances in coupling aeroelasticity and flight dynamics of bird inspired FMAV [ J ]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(1): 88-97.
- [ 12 ] SHYY W, AONO H, CHIMAKURTHI S K, et al. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity [ J ]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, 46(7): 284-327.
- [ 13 ] PLATZER M F, JONES K D, YOUNG J, et al. Flapping wing aerodynamics: Progress and challenges [ J ]. *AIAA Journal*, 2008, 46(9): 2136-2149.
- [ 14 ] SHYY W, KANG C, CHIRARATTANANON P, et al. Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight [ J ]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, 472(2186): 20150712.
- [ 15 ] 宋笔锋,粮鑫雨,薛栋,等. 鸟翼空气动力学机理的研究现状和进展综述 [ J ]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(6):893-910.  
SONG B F, LANG X Y, XUE D, et al. A review of the research status and progress on the aerodynamic mechanism of bird wings [ J ]. *Science China Technologica Sciences*, 2022,52(6), 893-910.
- [ 16 ] GERDES J W, GUPTA S K, WILKERSON S A. A review of bird-inspired flapping wing miniature air vehicle designs [ J ]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2012, 4(2): 021003.

- [17] 贺威,丁施强,孙长银.扑翼飞行器的建模与控制研究进展[J].自动化学报,2017,43(5):685-696.  
HE W, DING SH Q, SUN CH Y. Research progress on modeling and control of flapping-wing air vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(5):685-696.
- [18] TAHA H E, HAJJ M R, NAYFEH A H. Flight dynamics and control of flapping-wing MAVs: A review[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 70 ( 2 ): 907-939.
- [19] BIN A, BIN M R A S, BIN Y H, et al. Flapping wing micro-aerial-vehicle: Kine-matics, membranes, and flapping mechanisms of ornithopter and insect flight[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29 ( 5 ): 1159-1177.
- [20] MA D, SONG B, WANG Z, et al. Development of a bird-like flapping-wing aerial vehicle with autonomous take-off and landing capabilities[J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(6): 1291-1303.
- [21] KAKALETSIS E, SYMEONIDIS C, TZELEPI M, et al. Computer vision for autonomous UAV flight safety: An overview and a vision-based safe landing pipeline example[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 54(9): 1-37.
- [22] 赵民,张祥,付强,等.仿生扑翼飞行器能耗研究进展[J].工程科学学报,2022,44(12):2111-2123.  
ZHAO M, ZHANG X, FU Q, et al. Research progress on the energy consumption of bionic flapping-wing aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(12): 2111-2123.
- [23] 张弘志,宋笔锋,孙中超,等.扑翼飞行器驱动机构回顾与展望[J].航空学报,2021,42(2):80-101.  
ZHANG H ZH, SONG B F, SUN ZH CH, et al. Driving mechanism of flapping wing aircraft: Review and prospect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 80-101.
- [24] ZHANG C, ROSSI C. A review of compliant transmission mechanisms for bio-inspired flapping-wing micro air vehicles [ J ]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(2): 025005.
- [25] XIAO S, HU K, HUANG B, et al. A review of research on the mechanical design of hoverable flapping wing micro-air vehicles [ J ]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(6): 1235-1254.
- [26] PHAN H V, PARK H C. Insect-inspired, tailless, hover-capable flapping-wing robots: Recent progress, challenges, and future directions [ J ]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 111: 100573.
- [27] KHAN Q, AKMELIAWATI R. Review on system identification and mathematical modeling of flapping wing micro-aerial vehicles [ J ]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1546.
- [28] 付强,陈向阳,郑子亮,等.仿生扑翼飞行器的视觉感知系统研究进展[J].工程科学学报,2019,41(12): 1512-1519.  
FU Q, CHEN X Y, ZHENG Z L, et al. Research progress on visual perception system of bionic flapping-wing aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(12): 1512-1519.
- [29] EGUILUZ A G, RODRIGUEZ-GOMEZ J P, PANEQUE J L, et al. Towards flapping wing robot visual perception: Opportunities and challenges [ C ]. 2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS), IEEE, 2019: 335-343.
- [30] 梁旭.仿生扑翼飞行机器人云台设计及控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
LIANG X. Design and control of a camera stabilizer for bionic flapping-wing robotic bird [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [31] PAN E, LIANG X, XU W. Development of vision stabilizing system for a large-scale flapping-wing robotic bird [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 ( 14 ): 8017-8028.
- [32] GUO H, LIU S, ZHU S, et al. View-consistent meshflow for stereoscopic video stabilization [ J ]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2018, 4(4): 573-584.
- [33] LIU F, NIU Y, JIN H. Joint subspace stabilization for stereoscopic video [ C ]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2013: 73-80.
- [34] YANG W, WANG L, SONG B. Dove: A biomimetic flapping-wing micro air vehicle [ J ]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2018, 10(1): 70-84.
- [35] OLEJNIK D A, DUISTERHOF B P, KARÁSEK M, et al. A tailless flapping wing MAV performing monocular visual servoing tasks [ J ]. Unmanned Systems, 2020, 8(4): 287-294.
- [36] PARANJAPE A A, CHUNG S J, KIM J. Novel dihedral-based control of flapping-wing aircraft with application to perching [ J ]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(5): 1071-1084.
- [37] TIMMERMANS S, VANIERSCHOT M, VANDEPITTE D. Aerodynamic model updating using wind-tunnel setup

- for hummingbirdlike flapping wing nanorobot[J]. *AIAA Journal*, 2022, 60(2): 902-912.
- [38] ZUFFEREY R, TORMO-BARBERO J, GUZMAN M M, et al. Design of the high-payload flapping wing robot e-flap[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 3097-3104.
- [39] BLOESCH M, BURRI M, OMARI S, et al. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2017, 36(10): 1053-1072.
- [40] EGUILUZ A G, RODRIGUEZ-GOMEZ J P, TAPIA R, et al. Why fly blind? Event-based visual guidance for ornithopter robot flight [C]. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2021: 1958-1965.
- [41] RODRIGUEZ-GOMEZ J P, TAPIA R, GARCIA M, et al. Free as a bird; Event-based dynamic sense-and-avoid for ornithopter robot flight[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 5413-5420.
- [42] LIU G, WANG S, XU W. Flying state sensing and estimation method of large-scale bionic flapping wing flying robot[J]. *Actuators*, 2022, 11(8): 213.
- [43] PAN E, XU H, YUAN H, et al. HIT-hawk and HIT-phoenix: Two kinds of flapping-wing flying robotic birds with wingspans beyond 2 meters [J]. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2021, 1: 100002.
- [44] PAN E, LIU J, CHEN L, et al. The embedded on-board controller and ground monitoring system of a flapping-wing aerial vehicle [C]. 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), IEEE, 2018: 72-77.
- [45] WU X, HE W, WANG Q, et al. A long-endurance flapping-wing robot based on mass distribution and energy consume method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022: 1-10.
- [46] 贺威, 刘上平, 黄海丰, 等. 独立驱动的仿鸟扑翼飞行机器人的系统设计与实验 [J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(1): 12-22.
- HE W, LIU SH P, HUANG H F, et al. System design and experiment of an independently driven bird-like flapping-wing robot[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(1): 12-22.
- [47] HUANG H, HE W, WANG J, et al. An all servo-driven bird-like flapping-wing aerial robot capable of autonomous flight [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5484-5494.
- [48] FU Q, WANG X, ZOU Y, et al. A miniature video stabilization system for flapping-wing aerial vehicles[J]. *Guidance, Navigation and Control*, 2022, 2(1): 2250001.
- [49] DE CROON G C H E, DE CLERCQ K M E, RUIJSINK R, et al. Design, aerodynamics, and vision-based control of the DelFly [J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2009, 1(2): 71-97.
- [50] DE CROON G C H E, DE WEERDT E, DE WAGTER C, et al. The appearance variation cue for obstacle avoidance [C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic, IEEE, 2010: 1606-1611.
- [51] DE CROON G C H E, PERÇIN M, REMES B D W, et al. The DelFly [M]. Dordrecht; Springer Netherlands, 2016.
- [52] DE WAGTER C, TIJMONS S, REMES B D W, et al. Autonomous flight of a 20-gram flapping wing MAV with a 4-gram onboard stereo vision system [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2014: 4982-4987.
- [53] KARÁSEK M, MUIJRES F T, DE WAGTER C, et al. A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns [J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1089-1094.
- [54] WOOD R J. The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 341-347.
- [55] DUHAMEL P E J, PEREZ-ARANCIBIA C O, BARROWS G L, et al. Biologically inspired optical-flow sensing for altitude control of flapping-wing microrobots[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(2): 556-568.
- [56] DUHAMEL P E J, PEREZ-ARANCIBIA N O, BARROWS G L, et al. Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor [C]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2012: 4228-4235.
- [57] FULLER S B, KARPELSON M, CENSI A, et al. Controlling free flight of a robotic fly using an onboard vision sensor inspired by insect ocelli [J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2014, 11(97): 20140281.
- [58] 陈红梅, 常林江, 徐振方, 等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(7): 98-107.

- CHEN H M, CHANG L J, XU ZH F, et al. UAV collaborative navigation algorithm based on tight combination of GNSS/INS/UWB in complex environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 98-107.
- [59] SHI C, LAI G, YU Y, et al. Real-time multi-modal active vision for object detection on UAVs equipped with limited field of view LiDAR and camera [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(10): 6571-6578.
- [60] YANG B, YANG E, YU L, et al. Adaptive extended kalman filter-based fusion approach for high-precision UAV positioning in extremely confined environments[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 28(1): 543-554.
- [61] DONG X, WANG Z, LIU F, et al. Visual-inertial cross fusion: A fast and accurate state estimation framework for micro flapping wing rotors [J]. Drones, 2022, 6(4): 90.
- [62] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Towards the robust-perception age [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [63] DURRANT-WHYTE H, BAILEY T. Simultaneous localization and mapping: Part I [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2): 99-110.
- [64] BAILEY T, DURRANT-WHYTE H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 108-117.
- [65] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [66] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [67] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRIGUEZ J J G, et al. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [68] MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation [C]. Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2007: 3565-3572.
- [69] QIN T, LI P, SHEN S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [70] QIN T, PAN J, CAO S, et al. A general optimization-based framework for local odometry estimation with multiple sensors [J]. ArXiv Preprint, 2019, ArXiv: 1901.03638.
- [71] 刘浩敏, 章国锋, 鲍虎军. 基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 855-868.
- LIU H M, ZHANG G F, BAO H J. A survey of monocular simultaneous localization and mapping [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 855-868.
- [72] 赵良玉, 朱叶青, 金瑞. 多旋翼无人机单目 V-SLAM 研究综述 [J]. 航空兵器, 2020, 27(2): 1-14.
- ZHAO L Y, ZHU Y Q, JIN R. Review of monocular V-SLAM for multi-rotor unmanned aerial vehicle [J]. Aero Weaponry, 2020, 27(2): 1-14.
- [73] 苗升, 刘小雄, 黄剑雄, 等. 无人机视觉 SLAM 环境感知发展研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 1-6, 41.
- MIAO SH, LIU X X, HUANG J X, et al. Research on development of UAV visual SLAM environment perception [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(8): 1-6, 41.
- [74] DELMERICO J, SCARAMUZZA D. A benchmark comparison of monocular visual-inertial odometry algorithms for flying robots [C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2018: 2502-2509.
- [75] RODRÍGUEZ-GÓMEZ J P, GÓMEZ E A, MARTÍNEZ-DE D J R, et al. ROSS-LAN: Robotic sensing simulation scheme for bioinspired robotic bird landing [M].
- [76] MALDONADO F J, ACOSTA J Á, TORMO-BARBERO J, et al. Adaptive nonlinear control for perching of a bioinspired ornithopter [C]. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2020: 1385-1390.
- [77] FU Q, WANG S, WANG J, et al. A lightweight eagle-eye-based vision system for target detection and recognition [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(22): 26140-26148.
- [78] FORSTER C, CARLONE L, DELLAERT F, et al. On-

- manifold preintegration for real-time visual-inertial odometry [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(1): 1-21.
- [79] DONG X, LI D, XIANG J, et al. Design and experimental study of a new flapping wing rotor micro aerial vehicle [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(12): 3092-3099.
- [80] ZUFFEREY J, KLAPTOCZ A, BEYELER A, et al. A 10-gram Microflyer for vision-based Indoor Navigation[C]. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2006: 3267-3272.
- [81] TU Z, FEI F, ZHANG J, et al. Acting is seeing: Navigating tight space using flapping wings [J]. *ArXiv Preprint*, 2019, ArXiv: 1902.08688.
- [82] HORNING A, WURM K M, BENNEWITZ M, et al. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees [J]. *Autonomous Robots*, 2013, 34(3): 189-206.
- [83] OLEJNIKOVA H, TAYLOR Z, FEHR M, et al. Voxelblox: Incremental 3D euclidean signed distance fields for on-board MAV planning [C]. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017: 1366-1373.
- [84] GALLEGO G, DELBRUCK T, ORCHARD G, et al. Event-based vision: A survey [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(1): 154-180.
- [85] ZHOU B, PAN J, GAO F, et al. RAPTOR: Robust and perception-aware trajectory replanning for quadrotor fast flight [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1992-2009.
- [86] ZHOU B, GAO F, WANG L, et al. Robust and efficient quadrotor trajectory generation for fast autonomous flight [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 3529-3536.
- [87] ZHOU X, WANG Z, YE H, et al. EGO-planner: An ESDF-free gradient-based local planner for quadrotors [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 478-485.
- [88] BADRLOO S, VARSHOSAZ M, PIRASTEH S, et al. Image-based obstacle detection methods for the safe navigation of unmanned vehicles: A review [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3824.
- [89] PARK S, DEYST J, HOW J. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2004: 4900.
- [90] TISDALE J, KIM Z W, HEDRICK J K. Autonomous UAV path planning and estimation [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(2): 35-42.
- [91] 王思鹏, 杜昌平, 郑耀. 基于强化学习的扑翼飞行器路径规划算法 [J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 851-860.
- WANG S P, DU CH P, ZHENG Y. Local planner for flapping wing micro aerial vehicle based on deep reinforcement learning [J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 851-860.
- [92] 王昕鹏. 应用于微型扑翼飞行器的实时视觉系统设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- WANG X P. Design of real-time vision system applied in flapping-wing micro air vehicle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [93] 郑皓, 余立均, 智鹏鹏, 等. 仿生扑翼微型飞行器动态避障策略研究 [J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1-9 [2023-09-24]. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211187.
- ZHENG H, YU L J, ZHI P P, et al. Study on dynamic obstacle avoidance strategy for flapping-wing micro air vehicles [J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*: 1-9 [2023-09-24]. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211187.
- [94] QIANG F, JIN W, LE G, et al. Obstacle avoidance of flapping-wing air vehicles based on optical flow and fuzzy control [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 38: 2.
- [95] GARCIA B F, FEARING R. Optical flow on a flapping wing robot [C]. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009: 5027-5032.
- [96] ARMANINI S F, DE VISSER C C, DE CROON G C H E, et al. Time-varying model identification of flapping-wing vehicle dynamics using flight data [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, 39(3): 526-541.
- [97] XIAO T, LI Z, DENG S, et al. Numerical study on the flow characteristics of micro air vehicle wings at low Reynolds numbers [J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2016, 8(1): 29-40.
- [98] HE W, MU X, ZHANG L, et al. Modeling and trajectory tracking control for flapping-wing micro aerial vehicles [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(1): 148-156.
- [99] GAYANGO D, SALMORAL R, ROMERO H, et al.

Benchmark evaluation of hybrid fixed-flapping wing aerial robot with autopilot architecture for autonomous outdoor flight operations [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(7): 4243-4250.

- [100] HUANG H, HE W, FU Q, et al. A bio-inspired flapping-wing robot with cambered wings and its application in autonomous airdrop[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(12): 2138-2150.
- [101] RYU S, KWON U, KIM H J. Autonomous flight and vision-based target tracking for a flapping-wing MAV[C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2016: 5645-5650.
- [102] ZUFFEREY R, TORMO-BARBERO J, FELIU-TALEGÓN D, et al. How ornithopters can perch autonomously on a branch[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7713.
- [103] RAO D M K K, YANHUA W. A vision-based navigation system for perching aircraft[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(2): 555-566.
- [104] LIN S H, HSIAO F Y, CHEN C L, et al. Altitude control of flapping-wing MAV using vision-based navigation [C]. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, IEEE, 2010: 21-26.
- [105] SAMARAS S, DIAMANTIDOU E, ATALOGLOU D, et al. Deep learning on multi sensor data for counter UAV applications—A systematic review[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 4837.
- [106] 尹翌, 贺威, 邹尧, 等. 基于“雁阵效应”的扑翼飞行机器人高效集群编队研究[J]. *自动化学报*, 2021, 47(6): 1355-1367.
- YIN ZH, HE W, ZOU Y, et al. Efficient formation of flapping-wing aerial vehicles based on wild geese queue effect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(6): 1355-1367.
- [107] BILLINGSLEY E, GHOMMEM M, VASCONCELLOS R, et al. Unsteady aerodynamic analysis and effectiveness of bio-inspired flapping wings in V-formation flight[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2023, 237(2): 402-418.
- [108] 王元鹏. 大型仿生扑翼飞行机器人自主编队飞行队形

设计及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

WANG Y P. Design and realization of autonomous formation flying of large bionic flapping-wing flying robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

## 作者简介



蒋济州, 2019年于大连理工大学获得学士学位, 2022年于同济大学获得硕士学位。现为哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院机械工程专业博士研究生, 主要研究方向为扑翼飞行机器人自主感知与导航。

E-mail: 22b953004@stu.hit.edu.cn

**Jiang Jizhou** received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2019, received his M.Sc. degree from Tongji University in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Harbin Institute of Technology (Shenzhen). His main research interests include flapping wing flying robot autonomous perception and navigation.



徐文福, 2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位。现为哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为仿生扑翼飞行机器人、柔性机器人、空间机器人。

E-mail: wfxu@hit.edu.cn

**Xu Wenfu** received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2007. He is currently a professor at Harbin Institute of Technology (Shenzhen). His main research interest include bio-inspired flapping wing flying robot, flexible robots and space robots.



潘尔振(通信作者), 2022年于哈尔滨工业大学(深圳)获得博士学位。现为哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院助理教授, 主要研究方向为仿生扑翼飞行机器人。

E-mail: perzhen@hit.edu.cn

**Pan Erzhen** (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology (Shenzhen) in 2022. He is currently an assistant professor at Harbin Institute of Technology (Shenzhen). His main research interest is bio-inspired flapping wing flying robot.