

仿生变构型飞行器智能控制技术:进展与展望

郭 雷^{1,2}, 王恩美², 卢 昊², 王陈亮¹, 郭克信^{2,3}, 余 翔^{1,2}, 乔建忠¹

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 杭州创新研究院, 浙江杭州 310051; 3. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 仿生变构型飞行器是一种为适应环境和任务的变化而具备动物外部构型变化能力的新型飞行器, 变构型的动态飞行特征给控制系统设计带来了一系列挑战。飞行器仿生变构型的过程是一种飞行器“眼、耳、脑、体、翼”等多器官协调的智能行为, 控制系统设计的主要目标是在“感知—决策—反馈—执行”全控制回路的框架下解决“为何变”“如何变”等智能行为的设计问题, 赋予飞行器(特别是无人飞行器)在复杂干扰和不确定环境下强自主、强适应、强生存等智能能力。结合近年来智能控制和仿生技术的发展, 从仿生智能的视角梳理变构型飞行器控制技术的研究现状和存在问题, 指出仿生变构型飞行器设计需要完成从“方法论”“系统论”设计到“环境/任务/系统一体化”设计亦即“行为论”设计的跨越; 进一步提出了机理与数据混合驱动建模、多维信息仿生感知、智能自适应变形决策、变形与飞行一体化控制、全回路安全控制等前沿科学问题, 并给出了可能的解决思路。

关键词: 变构型飞行器; 智能控制; 仿生智能; 安全控制; 行为控制

中图分类号: V 249

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.04.002

Intelligent Control Technologies for Bio-inspired Morphing Flight Vehicles: Progress and Prospect

GUO Lei^{1,2}, WANG Enmei², LU Hao², WANG Chenliang¹, GUO Kexin^{2,3},
YU Xiang^{1,2}, QIAO Jianzhong¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Hangzhou Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 310051, Zhejiang, China;

3. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Bio-inspired morphing flight vehicles (BiMFVs) can change their shape and structure to adapt to the variations of the environments and tasks. As an intelligent system, BiMFVs can realize the cooperation of multiple organs such as “eye”, “ear”, “brain”, “body”, and “wing”. The design of the intelligent control system mainly aims to solve the problems such as “why to morph” and “how to morph” under the frame work of “perception, decision, feedback, and actuation”, so that the flight vehicles (especially unmanned flight vehicles) can have strong autonomy, strong adaptability, and strong survival in complex situations with disturbances and uncertainties. BiMFVs represent a fundamental, strategic, advanced, and cross technology, but its control system design faces a series of challenges. In this paper, based on the development of intelligent control and bio-inspired technologies in recent years, the existing results for the intelligent control of BiMFVs are reviewed and analyzed. The results show that the design of BiMFVs should achieve the leap from “method design” and “system design” to “environment-mission-system integrated design”, i.e., “behavior design”. Furthermore, some frontier scientific problems together with some potential solutions are proposed from the viewpoint of bionics, including hybrid mechanism and data driven modeling, bio-inspired perception of multi-dimensional information, intelligent adaptive morphing decision-making, integrated control of

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-06-26

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2021601B016); 浙江省博士后科研项目择优资助(ZJ2021077); 浙江省自然科学基金(LZ22F030012)

作者简介: 郭 雷(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为抗干扰控制理论与应用、先进导航与控制系统。

通信作者: 乔建忠(1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器导航、制导与控制。

morphing and flight, and safety control of the closed-loop system, and some possible solutions are given.

Key words: morphing flight vehicle; intelligent control; bio-inspired intelligence; safety control; behavior control

0 引言

人类自古就有像鸟一样自由飞行的梦想,从我国几千年前《墨子》中记载的竹雀到 20 世纪初莱特兄弟发明的现代飞机,无不体现人们对翱翔天空的孜孜追求。飞行器技术本身就是仿生技术发展的标志性成果。

传统飞行器大多采用固定构型,在大空域、宽速域、复杂多样化任务环境下的适应性、安全性和智能化程度不足。与此对应,自然界的飞行动物可根据任务、环境和自身状态灵活改变外形,以获取高低空、高低速优化配置的飞行能力,实现在恶劣自然环境和天敌威胁下的机动规避。近年来,受仿生学的启发,在仿生技术和材料、机构、防热等技术发展的推动下,变构型飞行器引起了研究人员的高度关注^[1-4]。

仿生变构型飞行器是指一类能够实时感知外部环境 and 态势,并结合飞行任务和自身状态主动仿照动物外部构型变化而改变形态,旨在获取最佳气动外形以实现高效飞行的智能飞行器。变构型需求基于环境和任务的改变而动态调整,飞行器通过变构型实现更强的适应性和智能性。因此无人仿生变构型飞行器是一种智能性更强的无人系统。仿生变构型飞行器成为目前航空航天领域最具基础性、战略性、前沿性和交叉性的高新技术之一,具有广阔的军民两用前景。

系统变构型的需求主要来源于环境和任务方面,主要表现在:1) 空域、速域、气流和阵风等飞行环境和气象因素变化,包括在高低海拔和高低速飞行时翼展和翼型的变化;2) 在面临威胁、风险和机会时飞行任务和目标的变化,包括在实现规避、觅食和寻偶等机动能力时构型的变化。不同于固定构型飞行器,变构型飞行器通过构型变化来改善气动特性、增强操纵和控制能力以适应环境变化,并满足多样化任务需求。变构型飞行器的变形机制呈现多样性,例如固定翼飞行器有翼展伸缩、头部弯曲、前后掠转变、扑翼、柔性翼、可折叠作业机构等变形机制,旋翼飞行器有倾转旋翼、翼架变构、可折叠抓取机构等变形机制^[2-6]。

飞行生物通过不同器官在环境感知、任务规

划、变形决策、肌肉调动与执行等多环节的有机协作并经反复学习与进化,才实现智能变形飞行,这是一个复杂的多器官协调和神经元决策的过程。迄今为止,其中的生物学奥妙也未能得到充分的揭示和发现。“道法自然而又超越自然”,变构型飞行器特别是无人变构型飞行器要实现安全、高效、智能飞行,除了需要探索智能材料、变形机构、气动布局等“看得见”的技术之外,还需研究涵盖“感知—决策—反馈—执行”全回路的智能操控系统这一“看不见”的神经元解译和行为控制技术。控制系统作为变构型飞行器的“眼、耳、脑、体、翼”的操纵和协调者,必须具备回答、决策并解决“何时变”“如何变”“怎么飞”“怎么控”等问题的能力。其中,“何时变”是指根据环境、目标、本体的感知信息判断变形机制执行的时空窗口;“如何变”是指飞行过程中的变形决策,即根据感知信息选择某种指标并决定哪个部位变形及相应的变形量;“怎么飞”是指动态环境与任务下的轨迹规划,根据感知结果并结合构型变化引入的性能提升规划出可行的优化飞行轨迹;“怎么控”是指变构型飞行过程中的变形伺服控制与姿态控制。变构型飞行器的控制问题已经不仅仅局限于先进控制方法的设计,也已超越了控制系统的设计,而是包含了控制行为的设计。

对于飞行器而言,由于材料、机构、传感器和执行器的能力受限,体现神经元协调和实现过程的智能操控能力显得更为关键,成为目前变构型飞行器所面临的一个关键科学问题。飞行器对于环境和态势的适应能力体现在风速风向、大气密度、温度湿度等环境信息和天敌、食物、巢穴、配偶等态势信息的获取和感知;飞行器连续构型变化和大飞行包线特征,导致飞行器本身存在动基座变质心、气动/结构强耦合、快时变强非线性、多通道强约束、多干扰强不确定等问题。飞行器变构型的过程实质上是从一个平稳态到另一个平稳态的变化过程,籍此过程达到适应环境和任务变化,增加实时性和机动性、节省能量等目的。变构型导致的质心偏移、气流异常以及升阻力变化都严重制约控制系统的性能,甚至威胁飞行安全^[2]。这些因素给变构型飞行器控制系统的精确性、快速性、适应性和安全性提

出了极为苛刻的要求,使得传统面向固定构型飞行器的控制方法难以适用。在复杂不确定动态任务和环境下,实现具备强适应、强自主、强生存特征的智能控制,是仿生变构型飞行器研发中需要解决的核心问题。

本文结合近年来国内外科技发展趋势,从仿生智能的视角梳理变构型飞行器控制技术的研发现状,探讨一些挑战性难题以及可能的解决思路,以推动仿生变构型飞行器技术的发展,服务于国防和国民经济建设。

1 研究现状

1.1 面向控制的飞行器动力学建模

变构型飞行器智能控制面临的挑战之一在于其动力学难以建模,主要体现在结构与飞行力学间的强耦合性、大空域宽速域下的气动差异性、任务/环境变化等因素造成的不确定性等。与此同时,变构型飞行器广泛使用的轻质柔性材料也使得飞行器存在不容忽视的弹性模态。传统建模方法包括参数化建模、多体建模、柔性体建模等,主要依赖于飞行器的物理机理。美国学者将机翼等效为2个铰接梁,采用Lagrange方法得到了变构型飞行器的动力学方程,并分析了对称变形和非对称变形时的动力学特性^[7]。我国南航研究团队利用参数化建模得到了变形翼的有限元模型,进而分析了飞行器动力学特性和气动弹性^[8]。

为提升模型精度,机理和数据混合驱动的建模方法近年来受到关注。美国学者^[9]利用低保真度模型和有限的高保真度数据来训练神经网络,并采用将多种保真度模型嵌入神经元的方式来加速训练过程,可在相同数量训练数据样本下将飞行器建模精度提高一个数量级。瑞士学者^[10]引入基于动态模态分解的数据驱动方法,提升了对变形机翼气动/结构耦合非线性的建模精度,无需将工作点限制在线性化平衡点附近。南航研究团队提出了一种面向一体化设计的高超声速飞行器变参代理建模方法,通过参数分类决策减小了计算量,并得到了包含飞行条件、本体特征等多参数的线性变参代理模型^[11]。北航研究团队研发了一种仿鹰空中捕捉的空中特种无人机,针对动基座、变质心等不确定性的产生机制和作用机理,提出了一种离线-在线

相结合的强耦合模型建模和验模方法,首先利用先验信息和离线数据构造基准模型,再通过在线数据迭代进行精细化的模型修正^[12]。

现有机理与数据混合驱动的建模方法在一定程度上有效刻画了变构型飞行器的耦合和非线性特征。然而,变构型飞行器在变形赋能的同时,也引入了质心偏移、变形误差、惯性参数时变不确定性等多源异质异构干扰。量化系统在变形赋能和多源干扰作用下的能力边界,不仅能为控制系统设计提供依据,也可反向指导飞行器总体设计。目前该方面研究成果鲜有报道,亟需结合机理和数据混合驱动建模方法开展系统性研究。同时,强烈变构型的过程可能是一个状态不再平衡、系统特性不再是恒定的特殊过程,传统的动力学建模方法不再适用。

1.2 仿生信息感知技术

动物通过眼、耳、皮肤等器官感知环境和态势,其中高精度的导航定位是实现高精度飞行控制行为的前提,变构型飞行器为实现环境-任务自适应的最优构型调节,对信息感知能力提出了更高的要求。仿生信息感知技术通过模仿动物的器官和神经,实现对空间运动信息、环境信息及目标信息的全面感知,以提高自主性、环境适应性及智能性。研究基于仿生机理的多维度信息感知技术,为“何时变”“如何变”提供决策依据,具有重要意义。

英国学者^[13]指出蚊子的江氏器可以十分精确地感知气压变化,进而可以利用靠近壁面时的气流变化发现并规避障碍物,基于此原理为四旋翼设计了仿生气压传感器,实现基于近面效应的壁面检测。美国学者^[14-15]受动物胡须启发设计了气流传感器,构建气流-惯性里程计并应用于无人机,通过测量风速减小漂移和位置误差。美国学者^[16]使用飞蛾触须作为气味传感器,引导无人机在密闭空间中自主探测规避障碍,并找到气味源,实验结果显示昆虫触须灵敏度远高于金属氧化物气体传感器。

以视觉里程计(Visual Odometry, VO)、同步定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)等为代表的视觉导航技术,近年来在自动驾驶、无人机等领域得到了广泛研究与应用^[17-18]。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出了

快速轻量自主(Fast Lightweight Autonomy, FLA)项目,通过视觉辅助导航技术,为卫星导航信号干扰、拒止环境下的自主导航提供了有效解决途径^[19]。

英国科学家 O'Keefe^[20]关于海马体中具有定位功能的“位置细胞”开展研究,其成果获得 2014 年诺贝尔生理学奖。蜻蜓、蜜蜂等昆虫一方面可以利用“平衡棒”的惯性机制在空中保持平衡,也能够通过感知环境光场的变化来测量位置、速度、姿态等导航信息^[21-25]。2019 年,法国国家科学研究中心团队研制仿生偏振罗盘,设计了一种基于偏振光定向的仿沙漠蚂蚁六足机器人,实现了沙漠蚂蚁利用天空偏振光归巢行为的模仿,实现了无全球定位系统(Global Positioning System, GPS)条件的自主位置解算、路径跟踪的功能^[25]。在仿生导航领域,国内大连理工大学、国防科技大学、中北大学和北京航空航天大学等单位针对不同应用领域也做出了重要贡献,目前的关键技术指标已超过法国团队的水平^[26]。

目前,基于仿生机理的视觉导航、偏振导航、天文导航等导航手段因具有无源性、自主性、隐蔽性和抗干扰性等独特优势,已成为在干扰拒止、博弈对抗、陌生静默等极端恶劣情况下实现自主导航的主要手段。但是在仿生科学领域仍然存在众多未知科学奥秘,仿生传感器如何与变构型飞行器结合,实现复杂环境下具有自适应性、自重构性、自抗扰性的多维度信息自主感知有待深入探索研究。未来的研究难点是改变现有的分离设计模式,实现任务载荷和平台载荷的一体化设计,完成对环境信息、目标信息和本体运动信息的“视听共融”。

1.3 变构型飞行器智能决策方法

飞行器智能决策主要回答“何时变”和“如何变”问题,选择任务和环境自适应的最优构型是决策关注的重点。飞行器受限于物理、信息和时空等约束,并伴有能量、速度和机动能力等指标,决策涉及约束条件、优化指标、决策方法、模型构建和求解效率等多个方面,采用合适的优化算法可缩短决策时间,提高决策效率。

现有智能决策指标以飞行器的气动性能和操纵性能优化为主。美国学者^[27]采用元启发式优化算法搜寻低阻力系数的构型,以满足可变厚度机翼

的几何和升力约束,并设计数据驱动控制器对机翼进行变形控制。西北工业大学研究团队在给定任务下,以变后掠飞行器的攻角、马赫数、后掠角等为变量生成训练数据,建立 Kriging 模型,通过对飞行器进行气动性能预测,离线解算出飞行过程中的最优后掠角^[28]。国防科技大学团队利用 3 自由度动力学模型和热流密度模型,将高超声速变形飞行器的滑翔轨迹和机翼前缘总热量作为优化目标,通过在滑翔距离和热量目标之间折衷平衡,给出了滑翔过程中的变后掠翼模式^[29]。密歇根大学研究团队将机翼变形技术融合在轨迹规划中,以达到节省燃料的目的^[30]。受塘鹅捕鱼、鸽子着陆运动规划启发,浙江大学研究团队在三维轨迹的基础上加入了对时间的规划,增强飞行器轨迹调整能力^[31]。北京航空航天大学团队根据变形飞行器的气动力约束,通过粒子群优化算法来改变飞行器外形^[32]。受老鹰捕猎行为过程中的构型变化启发,北京航空航天大学团队提出了一种基于滚动时域优化的最优运动轨迹方法,完成仿鹰无人机的空中捕获任务^[33]。

现有针对飞行器智能决策的研究主要面向特定飞行任务,基于不同外形下的升力/阻力参数等气动性能进行分析决策,且大多仅考虑机翼对称变形,存在“预设任务、固定模式、理想环境”的局限性。从仿生的角度来说,需要在“时间-空间-物理-能量-信息”等多维约束下,针对环境变化和任务变化等需求,开展融合头部弯曲、变展长、变翼型、变后掠等多种变形模式下任务/环境自适应的智能决策方法研究。

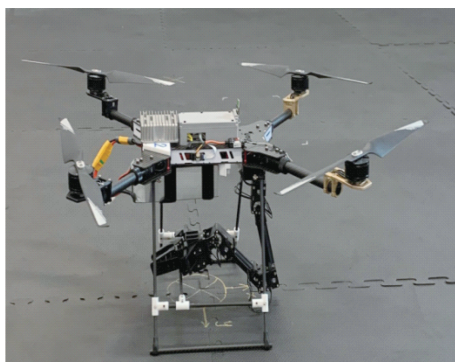
1.4 飞行器变形与姿态控制技术

变构型的目的是为了适应环境和任务变化,特别是应对干扰、对抗、威胁和风险,因此飞行器机动控制十分重要。飞行器在变形过程中会引起气动特性变化,构型快速变化导致的快时变和强耦合特性大幅增加了控制器设计的难度。对变构型飞行器而言,保证平衡、超快、超准的控制品质是控制器设计的主旨。

LQG、LQR、增益调度等传统线性控制方法相继被应用于不同变构型飞行器的姿态控制中^[34-36]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)研究团队指出,当飞行器存在强不确定性时,增益调度控制在控制律切

换过程中可能存在突变问题,难以保证系统的全局稳定性^[37]。美国空军实验室研究团队针对柔性变构型飞行器提出了一种非线性鲁棒自适应控制方法,以解决参数不确定性和弹性模态干扰问题^[38]。西北工业大学研究团队利用自适应超螺旋滑模控制技术来处理变后掠翼飞行器的气动参数和质量参数不确定性,提升了纵向运动的控制精度^[39]。变

构型过程涉及环境变化、目标变化和本体变化,可能导致多源干扰和不确定性的产生。针对风干扰影响下的空中目标捕获过程,基于复合精细抗干扰策略^[40-42],北京航空航天大学研究团队针对自主研发的仿鹰灵巧抓捕特种无人机(如图 1 所示)提出了一种姿态控制方法,可补偿、抑制和消纳变构型抓捕过程中的质心偏移、风扰等多源干扰^[12]。



(a) 灵巧作业无人机



(b) 空中捕获过程

图 1 北航团队:灵巧作业无人机实现对飞行目标空中捕获

Fig. 1 Aerial manipulator for capture missions developed by Beihang research group

现有针对变构型飞行器的控制研究大多考虑一些特定的工作点,难以实现大空域、宽速域、外形连续变化情形下的智能控制。此外,现有结果普遍基于变形伺服控制和姿态控制分离设计的策略,将变形带来的附加力和附加力矩视为对姿态控制系统的干扰,较为保守。飞行器仿生变构型的目的是提高环境和任务变化的“生存”能力,是一种高度智能的行为^[43-44]。为充分利用变形来实现节能、省力、高效控制的目的,亟需开展变形与姿态一体化控制技术研究。特别地,飞行器的剧烈变构型过程对应一个不稳定的过渡过程,传统的稳定性指标需要拓展到一个“失稳态”快速终结的时空综合控制指标,这也可视为一种新型的指定性能控制问题^[43]。

2 趋势与展望

现代控制理论的初心就是动物和机器的融合,控制和智能科学的研究目的之一就是赋予机器以类似生物的能力^[43-44]。变构型飞行器控制技术的发展趋势是赋予系统更高的智能性、适应性和安全性,其中仿生智能技术是需要借鉴的重要研究思路。为实现复杂任务环境下仿生变构型飞行器的智能自主控制,必须实现从“控制方法”“控制系统”

到“控制行为”的理论跨越。为此,以下关键技术领域值得深入探索。

2.1 机理与数据混合驱动的建模与系统量化技术

仿生变构型飞行器首要特点是仿生能力,其动力学模型是典型的强耦合、强不确定、强非线性、快时变系统,变形为飞行器赋能的同时也会引入变形误差、质心偏移等多源、异质、异构干扰。此外,在大空域、宽速域、连续变外形的条件下,仿生飞行机理尚不明确,传统基于能量守恒的动力学机理建模面临重大挑战。因此,亟需融合机理和数据驱动建模优势,开展环境、目标与变构型飞行器强耦合动力学系统建模技术研究,突破头部弯曲/变翼展/变后掠等情形下气动/运动耦合模拟、数据和机理混合驱动建模、参数智能辨识、系统能力量化分析等关键技术,建立面向控制行为的飞行器姿态/轨迹/构型/干扰一体化表征的深耦合控制系统模型。

2.2 基于环境/目标/本体多维信息的仿生感知技术

仿生变构型飞行器的控制要体现从传统的“系统论”设计思想到“环境/目标/系统(本体)一体化”的设计思想。从控制行为的角度,变构型的前因就

是环境或任务的变化,精准感知环境/目标/本体状态信息是变构型飞行器进行变形决策的重要前提。自然界的动物经过进化,通常具备对于光线、磁场、气味、震动、声音等信息的独特感知手段,使其能在复杂恶劣的生存环境中完成觅食、迁徙等活动;仿生感知技术具有无源性、自主性、隐蔽性和抗干扰等独特优势。针对变构型飞行器,需揭示生物多器官信息协同感知机理,通过生物、材料、光学、电子等多学科交叉,研制新型仿生传感器,突破多模式仿生组合传感器的无缝智能切换、抗干扰信息融合、任务载荷和运动载荷一体化设计等关键技术,提升高动态、非结构化、干扰/拒止环境下飞行器的信息获取能力。

2.3 高动态多约束下的智能自适应变形决策方法

变构型飞行器是“时间-空间-物理-能量-信息”多维约束严重的系统,并时常遂行高动态、多样化、大空域、宽速域的飞行任务。结合飞行器高效飞行的环境变化、任务需求和高动态多约束的飞行特征,需开展基于感知信息的智能自适应变形决策理论与方法研究,探索头部弯曲、变翼展、变后掠等不同变形机制和变形约束,在飞行任务包络范围内分析典型工作点各变形机制下的气动性能提升和变形效费比,突破仿生外形知识库构建和优化、事件和数据混合驱动的智能变形决策、基于感知信息的自适应外形/任务/轨迹规划一体化等关键技术,实现任务和环境自适应的飞行器外形主动优化。

2.4 变构型模式下全回路智能安全控制技术

安全控制是变构型飞行器完成飞行任务的基本要求和重要保障,其主旨是在变构、损伤、故障、攻击等异常模式下提升系统的安全和免疫智能^[42-43]。变构型的目的是从一个稳定态到另一个稳定态的过程,面向变构型的构型突变、飞行器舵面损伤、变形机构故障、网络攻击、任务目标改变等异常模式,需开展基于感知信息的飞行器全回路智能安全控制技术研究,突破动静混合异常事件快速诊断、风险评估与预测、柔性任务重构、制导律快速在线重构、复合安全控制、感知控制一体化等关键技术,实现面向多尺度耦合因素的能力推演和机制重建,赋予仿生变构型飞行器极端环境下强适应、强自主、强生存等智能行为能力。

2.5 提高生存能力的变形与绿色控制技术

变构型往往是为了实现节省能量、减少风险以适应环境变化的目标,动物通过变构型等“绿色”控制的行为以提高生存能力^[43-44]。对于环境干扰和不确定性而言,仿生控制与传统方法的不同之处在于,要实现从干扰“消除”到“消纳”和“利用”的转变^[43-44]。传统的变形与飞行分离控制策略面临失稳风险,且难以充分发挥变构型带来的气动环境优势,限制了飞行器的敏捷机动能力,难以实现“绿色”的控制目标。为此,亟需开展复杂不确定环境下变形与飞行一体化控制技术研究,提出“时间-空间-物理-能量-信息”多约束下混合异类多执行机构动态控制分配策略,将头部弯曲角度、展长、后掠角等变形量视为控制输入,以变形辅助姿态控制,实现变形和飞行的有机协调控制,减少控制系统“精力”和“体力”的消耗,避免过度损害环境和浪费资源,实现“节能、节时、省心、省力”的“绿色”控制目标,完成复杂不确定环境下绿色高效的机动变形飞行。

3 结束语

仿生变构型飞行器是目前航空航天领域的重要发展方向,是实现高效智能飞行的重要手段。本文围绕“何时变”“如何变”“怎么飞”“怎么控”等变构型飞行器的核心科学问题,总结了仿生变构型飞行器控制技术的研究现状,阐述了从“控制方法”“控制系统”到“控制行为”设计的必要性,提出了机理与数据混合驱动建模、多维信息仿生感知、智能自适应变形决策、变形与飞行一体化控制、全回路智能安全控制等关键技术难题,并给出了可能的解决思路。仿生变构型飞行器属于典型的多学科交叉军民两用高新技术,是一个从“方法论”“系统论”设计到“环境/任务/系统一体化”亦即“行为论”设计的跨越。建议高校、科研院所、学术机构以及相关部门开展紧密合作,促进多学科交叉融合,在仿生变构型飞行器领域开展联合技术攻关,满足国防和国民经济建设的迫切需求。

参考文献

- [1] XU D, HUI Z, LIU Y, et al. Morphing control of a new bionic morphing UAV with deep reinforcement learning [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92: 232-243.

- [2] 白鹏,陈钱,徐国武,等.智能可变形飞行器关键技术发展现状及展望[J].空气动力学学报,2019,37(3):426-443.
- [3] CHU L, LI Q, GU F, et al. Design, modeling, and control of morphing aircraft: a review [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(5): 220-246.
- [4] HAN J, HUI Z, TIAN F, et al. Review on bio-inspired flight systems and bionic aerodynamics [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(7): 170-186.
- [5] LANDERS M, HALL L, AUMAN L, et al. Deflectable nose and canard controls for a fin-stabilized projectile at supersonic and hypersonic speeds [C]// 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference. Reston, USA: AIAA Press, 2003: 3805.
- [6] AJANIC E, FEROSKHAN M, MINTCHEV S, et al. Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities[J]. Science Robotics, 2020, 5(47): eabc2897.
- [7] OBRADOVIC B, SUBBARAO K. Modeling of flight dynamics of morphing-wing aircraft [J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(2): 391-402.
- [8] YUE C, ZHAO Y. An improved aeroservoelastic modeling approach for state-space gust analysis [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 99: 103148.
- [9] BEACHY A, BAE H, BOYD I, et al. Emulator embedded neural networks for multi-fidelity conceptual design exploration of hypersonic vehicles [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(5): 2999-3016.
- [10] FONZI N, BRUNTON S L, FASEL U. Data-driven nonlinear aeroelastic models of morphing wings for control [J]. Proceedings of the Royal Society A, 2020, 476(2239): 20200079.
- [11] 汤佳骏,曹瑞,刘燕斌,等.面向一体化设计的高超声速飞行器变参建模方法[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(9):1320-1328.
- [12] ZHANG W, LIU Q, WANG M, et al. Design of an aerial manipulator system applied to capture missions [C]// 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2021: 1063-1069.
- [13] NAKATA T, PHILLIPS N, SIMÕES P, et al. Aerodynamic imaging by mosquitoes inspires a surface detector for autonomous flying vehicles [J]. Science, 2022, 368(6491): 634-637.
- [14] KIM S, KUBICEK R, PARIS A, et al. A whisker-inspired fin sensor for multi-directional airflow sensing [C]// 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2020: 1330-1337.
- [15] TAGLIABUE A, HOW J P. Airflow-inertial odometry for resilient state estimation on multirotors [C]// 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2021: 5736-5743.
- [16] ANDERSON M J, SULLIVAN J G, HORIUCHI T K, et al. A bio-hybrid odor-guided autonomous palm-sized air vehicle [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 16(2): 026002.
- [17] 张海,吴克强,张晓鸥.视觉导航技术的发展[J].导航定位与授时,2017,4(2):1-8.
- [18] ZHOU X, WEN X, WANG Z, et al. Swarm of micro flying robots in the wild [J]. Science Robotics, 2022, 7(66): eabm5954.
- [19] PASCHALL S, ROSE J. Fast, lightweight autonomy through an unknown cluttered environment: distribution statement; a approved for public release; distribution unlimited [C]// 2017 IEEE Aerospace Conference. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2017: 1-8.
- [20] NobelPrize. org. The nobel prize in physiology or medicine 2014 [EB/OL]. (2014-10-06) [2022-04-21]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/.
- [21] DEORA T, SINGH A, SANE S. Biomechanical basis of wing and haltere coordination in flies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(5): 1481-1486.
- [22] SRINIVASAN M, ZHANG S, ALTWEIN M, et al. Honeybee navigation: nature and calibration of the "odometer" [J]. Science, 2000, 287(5454): 851-853.
- [23] WALLRAFF H G. Conceptual approaches to avian navigation systems [M]. Berlin: Springer, 1991: 128-165.
- [24] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 30(1/2): 39-64.
- [25] DUPEYROUX J, SERRES J R, VIOLLET S, et al. AntBot: a six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments [J]. Science Robotics, 2019, 4(27): 0307.
- [26] 张霄,王悦,郭雷.强干扰环境下的自主导航与控制新技术[J].自动化博览,2015(4):68-72.
- [27] JÚNIOR J M M, HALILA G L O, KIM Y, et al.

- Intelligent data-driven aerodynamic analysis and optimization of morphing configurations[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 121: 107388.
- [28] CHEN X, LI C, GONG C, et al. A study of morphing aircraft on morphing rules along trajectory[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(7): 232-243.
- [29] PENG W, YANG T, FENG Z, et al. Analysis of morphing modes of hypersonic morphing aircraft and multiobjective trajectory optimization [J]. *IEEE Access*, 2018, 7: 2244-2255.
- [30] JASA J P, HWANG J T, MARTINS J R R A. Design and trajectory optimization of a morphing wing aircraft [C]// 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, USA: AIAA Press, 2018: 1382.
- [31] YANG Z, FANG Z, LI P. Bio-inspired collision-free 4D trajectory generation for UAVs using tau strategy [J]. *Journal of bionic engineering*, 2016, 13(1): 84-97.
- [32] MA T, LIU Y, YANG D, et al. Research on the design of smart morphing long-endurance UAVs [J]. *The Aeronautical Journal*, 2021, 125(1283): 22-41.
- [33] 余翔,吕尚可,刘钱源,等.一种针对质心偏移和基座浮动的带臂旋翼无人机姿态控制方法:CN110850887A [P].2020-11-13.
- [34] WANG X, ZHOU W, WU Z, et al. Tracking control system design for roll maneuver via active wings using macro fiber composites [C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston, USA: AIAA Press, 2016: 4012.
- [35] BAI B, DONG C. Modeling and LQR switch control of morphing aircraft[C]// 6th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2013: 148-151.
- [36] 张尧,张婉,别大卫,等.智能变体飞行器研究综述与发展趋势分析[J].*飞航导弹*,2021(6):14-23.
- [37] HANSON J. Advanced guidance and control project for reusable launch vehicles [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA Press, 2000: 3957.
- [38] FIORENTINI L, SERRANI A, BOLENDER M A, et al. Nonlinear robust adaptive control of flexible air-breathing hypersonic vehicles[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(2): 402-417.
- [39] YAN B, DAI P, LIU R, et al. Adaptive super-twisting sliding mode control of variable sweep morphing aircraft [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92: 198-210.
- [40] 郭雷,朱玉凯.多源干扰系统复合自主抗干扰控制技术[R].*中国科研信息化蓝皮书*,2020:210-220.
- [41] GUO L, CAO S. Anti-disturbance control for systems with multiple disturbances [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [42] 郭雷,余翔,张霄,等.无人机安全控制系统技术:进展与展望[J].*中国科学:信息科学*,2020,50(2):184-194.
- [43] 郭雷,袁源,乔建忠,等.无人系统免疫智能技术[J].*航空学报*,2020,41(11):142-146.
- [44] 郭雷,朱玉凯,乔建忠,等.无人系统生存智能与安全、免疫、绿色控制技术[J/OL].*航空学报*.[2022-04-21].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220509.2335.020.html>.