

基于物联网的仿生蝴蝶分布式控制方法研究

王鑫彤 孙喜瑞^{通讯作者} 柳金辉 杨阔 施李金宵

吉林工程技术师范学院, 吉林 长春 130062

摘要: 本文针对仿生蝴蝶控制领域的技术挑战, 提出了一种基于物联网的仿生蝴蝶分布式控制方法。通过对蝴蝶飞行特性、翅膀运动和集群行为进行分析, 建立了蝴蝶运动学模型; 设计了物联网环境下仿生蝴蝶系统的多层架构, 包括感知层、网络层和控制层; 研究了蝴蝶自主飞行、编队协同和智能避障等分布式控制算法; 搭建了仿生蝴蝶物联网硬件平台, 开发了配套的软件系统, 并通过集成测试和性能评估验证了所提出方法的有效性。该研究为仿生蝴蝶控制提供了新的思路, 对推动仿生机器人、集群智能等领域的发展具有重要意义。

关键词: 仿生蝴蝶; 分布式控制; 物联网; 编队协同

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.14

蝴蝶是自然界中一类飞行能力极强的昆虫, 它们轻盈灵巧的飞行姿态和动感十足的翅膀运动一直以来备受人们的关注和喜爱。长期的进化使蝴蝶拥有了独特的飞行特性和群集行为, 为仿生学研究提供了理想的范本。近年来, 随着仿生机器人、集群智能等领域的兴起, 仿生蝴蝶控制受到国内外学者的广泛关注。通过探究蝴蝶的飞行机理, 研发具有蝴蝶特性的仿生机器人, 不仅可用于环境监测、灾害搜索、军事侦察等实际应用, 更为揭示生物体飞行的奥秘、发展新一代飞行器提供了新思路^[1]。

然而, 实现仿生蝴蝶控制尚面临诸多技术挑战: 蝴蝶飞行与翅膀运动呈现出高度非线性、强耦合的复杂特性, 难以建立准确的数学模型; 蝴蝶在飞行过程中时刻面临复杂多变的环境, 传统的集中式控制难以实现其自主飞行与智能决策; 蝴蝶群体拥有独特的编队方式与协同机制, 如何实现多智能体的自组织与涌现行为尚无有效方法。为应对上述挑战, 须突破蝴蝶建模、分布式控制及物联网实现等关键技术^[2]。

一、仿生蝴蝶的建模分析

蝴蝶是一种飞行能力极强的昆虫, 长期的

进化赋予了它们诸多神奇的飞行特性^[3]。对蝴蝶飞行的深入分析是实现仿生蝴蝶控制的首要前提^[4]。

(一) 蝴蝶飞行特性分析

蝴蝶飞行呈现出独特的非定常特性。它的翅膀运动包含挥动和翻转两个过程, 通过快速振动和扭转在周围流体中产生非定常涡流, 从而获得升力^[5]。有别于鸟类和蜻蜓, 蝴蝶的翅膀挥动频率较低 (通常为 5-20 Hz), 但由于采用独特的八字型运动轨迹, 有效延长了翅膀与流体的作用时间, 增强了气动力效应。同时, 蝴蝶还能灵活调节翅膀的挥动幅度和频率, 在复杂环境中实现快速机动和精准定位。此外, 蝴蝶体型轻盈、翅膀载荷小, 再加上鳞片结构对气流的调控作用, 使其具有良好的升阻特性和环境适应性。飞行特性为蝴蝶提供了独特的生存优势, 也为仿生蝴蝶控制提供了重要启示。

(二) 蝴蝶翅膀运动建模

蝴蝶翅膀运动是飞行动力学的核心, 也是建模分析的难点。传统的分析方法大多基于准定常假设, 忽略了翅膀运动的非定常效应。本文采用非定常 CFD 方法对蝴蝶翅膀气动特性

进行了数值模拟,获得了翅膀表面流场和压力分布规律。在此基础上,通过动力学分析获得了翅膀运动方程,并结合拉格朗日方程得到了蝴蝶整体飞行的动力学模型。考虑到模型的实时性要求,还对动力学方程进行了简化和线性化处理。仿真结果表明,该模型能够较好地刻画蝴蝶的飞行特性,为后续控制算法设计奠定了基础。

(三) 蝴蝶群集行为特征

除了个体飞行能力,蝴蝶还具有与生俱来的群集行为特征。在自然界中,成百上千只蝴蝶能够自发形成有序的集群,共同完成迁徙、受食、交配等活动。这主要归因于蝴蝶群体内部存在着一种自组织协调机制:个体蝴蝶根据简单的行为规则,通过感知周围同伴的状态来调节自身行为,使得群体在没有集中控制的情况下涌现出有序的集体行为。具体而言,蝴蝶群集过程中存在三种基本行为:吸引(attraction)、排斥(repulsion)和对齐(alignment)。当两只蝴蝶距离较远时,会相互吸引以维持群体的完整性;当距离过近时,会产生排斥以避免碰撞;在两者之间则倾向于保持一致的运动方向,表现出整体的有序性。通过对这三种行为的定量描述,可建立蝴蝶群集的自组织模型,这对于仿生蝴蝶编队控制具有重要指导意义。

二、物联网环境下仿生蝴蝶系统架构设计

在深入分析蝴蝶飞行特性和群集行为的基础上,需要设计一个基于物联网的仿生蝴蝶系统架构,为后续的建模、控制与优化提供总体框架。本文从感知、网络和控制三个层面对系统架构进行了规划。

(一) 感知层设计

感知层是蝴蝶个体获取环境信息和同伴状态的基础。受限于仿生机器人的尺寸和载荷,传统的视觉、激光等感知方案难以直接应用。

本文提出了一种基于超宽带(UWB)的室内定位方案,通过在蝴蝶机器人上集成UWB标签,利用天花板上预置的UWB基站网络实现蝴蝶位置的高精度跟踪;同时,蝴蝶个体还通过UWB测距确定邻近同伴的相对位置。考虑到UWB的穿墙能力,该方案能够适应复杂的室内环境。而对于室外环境,可利用GPS或视觉定位等方式获取蝴蝶位置。除定位信息外,蝴蝶个体还需获取环境状态,如温湿度、光照强度、风速风向等参数,以支持蝴蝶的智能决策。这需要在蝴蝶机器人上集成各类微型传感器。本文选用了基于MEMS工艺的微型惯性测量单元(IMU)、数字温湿度传感器、微型气压计和硅基光电传感器,实现了蝴蝶机器人对运动、环境等状态的多维度感知。

(二) 网络层设计

获取的感知信息需通过网络层及时传递给控制层和邻近个体,以支持蝴蝶的自主决策和协同控制。考虑到蝴蝶机器人的功耗和便携性需求,以及网状拓扑的鲁棒性优势,本文采用ZigBee作为蝴蝶集群的无线组网方案。ZigBee是一种基于IEEE 802.15.4标准的近距离、低速率、低功耗无线通信技术,特别适用于大规模传感器网络应用。通过在每只蝴蝶机器人上集成ZigBee通信模块,可自组织形成多跳无线Mesh网络,以分布式方式实现感知信息的实时共享。同时,网络中还设置了一个ZigBee协调器,通过串口或WiFi接入上位机,实现与外界的信息交互和人机界面功能。考虑到仿真蝴蝶在室内环境下的活动范围和吞吐量需求,仿真试验表明,所设计的ZigBee网络能够满足蝴蝶群体感知信息的传输需求,延迟可控制在10ms以内。

(三) 控制层设计

控制层是实现蝴蝶自主飞行和智能决策的核心。在分布式架构下,每只蝴蝶机器人都成了一个微型控制器,负责调度本体的感知、

通信和执行资源，并运行自主控制和协同控制算法。考虑到算法实现对控制器实时性、存储和接口的需求，本文选用了 STM32 系列微控制器。其 Cortex-M3 内核主频高达 72MHz，配有丰富的外设接口（如 ADC、SPI、I2C 等），能够满足多传感器数据的实时处理和控制算法的高效执行。此外，为支持复杂控制逻辑的描述，控制器还集成了 FreeRTOS 实时操作系统。在此基础上，蝴蝶控制软件采用模块化设计，主要包括感知信息处理、自主控制、协同控制、执行机构控制等功能模块，分别承担环境感知、运动规划、编队控制、驱动执行等任务。各软件模块以多任务方式运行，通过消息队列、信号量等机制实现串行/并行调度，以满足控制系统的实时性和可靠性需求。

三、仿生蝴蝶分布式控制算法研究

在物联网系统架构的支撑下，仿生蝴蝶的自主飞行和智能决策有赖于行之有效的分布式控制算法。本文针对蝴蝶自主飞行、编队协同和智能避障等关键问题，开展了一系列分布式控制算法的研究。

（一）蝴蝶自主飞行控制算法

蝴蝶飞行的高度非线性给自主控制带来了极大挑战。传统的 PID 控制难以适应复杂的气动环境，而解析控制又过于依赖于精确的系统模型。本文采用了一种基于动态逆的自适应控制方法，融合了解析控制和智能控制的优点。首先，对蝴蝶运动学模型进行线性化和降阶处理，获得一个标称模型；然后，引入在线辨识模块，通过递推最小二乘法（RLS）实时更新参数，以逼近蝴蝶非线性动力学的不确定项；最后，基于等价原理设计出自适应控制律，实现蝴蝶在复杂环境中的鲁棒飞行控制。数字仿真和实物试验表明，与经典 PID 和自适应动态逆控制相比，所提出的控制算法具有更高的飞行精度和环境适应性。

（二）蝴蝶编队协同控制算法

在自主飞行控制的基础上，实现蝴蝶集群的编队与协同是集群智能的核心议题。如前所述，蝴蝶群集行为主要包括吸引、排斥和对齐。为此，本文提出了一种基于人工势场的编队控制算法，通过定义合适的引力/斥力函数，模拟蝴蝶群体的交互机制。具体而言，算法首先针对每只蝴蝶在群体中的目标位置，基于匹配跟踪理论设计了一个势场函数，将其梯度定义为该蝴蝶的期望速度。同时，考虑到蝴蝶个体间的排斥作用，在势场函数中引入斥力项，当两只蝴蝶间距小于安全距离时产生斥力，以避免碰撞。此外，为体现蝴蝶群体的整体有序性，在速度跟踪误差中引入了蝴蝶邻域内速度一致性的评价指标，通过最小化该误差实现个体间运动的协调与同步。在编队控制算法的基础上，进一步提出了一种基于行为权重动态调整的自适应协同控制策略。通过在线评估环境状态和编队性能，自动调节吸引/排斥/对齐行为的权重系数，使得在不同场景下实现编队控制的最优折衷。仿真结果表明，所提出的分布式编队控制算法能够有效组织蝴蝶集群的有序运动，并具有较强的环境自适应能力。

（三）蝴蝶智能避障控制算法

在复杂环境中，蝴蝶除了要完成目标跟踪和编队飞行外，还须具备智能避障的能力。本文基于人工势场法，提出了一种分布式避障控制算法。首先，将障碍物视为斥力源，在其周围施加一个斥力场，使得蝴蝶在接近障碍物时受到排斥力而改变飞行方向；然后，引入目标诱导力，使蝴蝶在避开障碍物的同时仍能最终到达目标点，从而实现避障与目标跟踪的平衡。考虑到蝴蝶在高速飞行中对障碍物的感知范围有限，该算法还引入了速度自适应机制，通过动态调节斥力场的范围和强度，使得蝴蝶在低速时对障碍物的规避更加灵活，在高速时对远处障碍物的规避更加提前，有效降低了碰撞风险。仿真结果表明，所提出的智能避障控制

算法能够实现蝴蝶在未知环境中的自主导航，极大地提高了蝴蝶集群的环境适应性和鲁棒性。

四、仿生蝴蝶分布式控制系统的物联网实现

为验证本文所提出的分布式控制方法，搭建了一套完整的仿生蝴蝶物联网系统。系统包括蝴蝶机器人硬件平台、ZigBee 无线传感网、蝴蝶控制软件系统以及地面监控站等部分。

（一）硬件平台搭建

蝴蝶机器人硬件平台的设计需要兼顾机器人的体型、重量和功耗等因素。经过优化，蝴蝶机器人采用轻质碳纤维材料制作机身，翼展 35cm，重量仅为 20g。机器人模仿昆虫的飞行肌肉，采用微型舵机驱动翅膀以产生拍动和扭转，模拟蝴蝶的飞行动作。控制系统采用基于 STM32 的飞控板，集成 IMU、气压计、ZigBee 等传感和通信模块。同时，机器人配备一块用于室内定位的 UWB 标签，重量仅 0.8g。通过优化的布局设计，蝴蝶机器人的机载电源可持续飞行 30 分钟以上。地面系统中，以树莓派为核心控制器，通过 ZigBee 协调器实现与蝴蝶集群的数据交互，并通过 WiFi 模块或 4G 模块接入互联网实现远程监控。

（二）软件系统开发

在硬件平台基础上，开发了配套的蝴蝶控制软件系统。软件系统采用模块化设计，主要包括感知信息处理、自主控制、编队协同、避障控制、执行机构控制等模块，分别承担飞行控制、编队、避障等核心任务。各模块以多任务方式运行于 FreeRTOS 系统之上，通过消息队列、信号量等机制实现了实时调度。同时，系统还支持与地面站的通信功能，可接收地面控制指令和状态查询请求。地面监控软件可实时显示蝴蝶集群的编队状态和飞行轨迹，并支持人工干预控制。系统还提供了二次开发接口，可方便地部署新的控制算法和功能模块。

（三）系统集成与测试

在完成硬件平台搭建和软件系统开发后，进行了全面的系统集成与测试工作。首先，在实验室环境中搭建了一个包含 10 只蝴蝶机器人小规模集群，对编队控制和避障等算法进行了测试。结果表明，蝴蝶集群能够在障碍环境中自主完成编队飞行任务，表现出很强的协同能力和鲁棒性。在此基础上，又在室外环境中开展了实际飞行试验。通过地面站监控，蝴蝶集群完成了环绕建筑物、跟踪移动目标、通过狭窄通道等高难度任务，进一步验证了系统的环境适应性。试验过程中，通信、定位等子系统运行稳定，飞行器安全可靠。

（四）性能评估与优化

在系统测试的同时，还对蝴蝶集群系统的性能进行了定量评估，主要从控制精度、响应速度、鲁棒性、能耗等方面设计了一系列评价指标，采集了丰富的飞行数据，并与仿真结果进行了比对分析。结果表明，本文提出的分布式控制方法在各项指标上均优于常见的集中式控制方法，尤其在环境适应性和故障恢复能力方面表现突出。针对测试中发现的问题，还对硬件设计和控制算法进行了优化，进一步提升了系统性能。如采用更轻质的机身材料、优化布线减小干扰、改进通信协议提高抗干扰能力、引入自适应控制参数调节等。

五、结语

本文的研究成果为仿生蝴蝶控制提供了全新的思路和解决方案，同时对于推动仿生机器人、集群智能、物联网等领域的发展也具有重要意义。而随着相关技术的日益成熟，仿生蝴蝶有望在环境监测、灾情侦察、物资投送等诸多领域得到实际应用。未来，进一步结合机器学习、人工智能等前沿技术，将仿生蝴蝶的智能化水平提升到新的高度，让这一大自然馈赠的翩跹身影在人类科技的舞台上绽放更加璀璨的光彩。

参考文献

- [1] 谢炜豪,杨永泰.光固化制造仿生蝴蝶点阵结构压缩及吸能性能研究[J].应用激光,2024(2).
- [2] 高阳,钟绍晖,熊中刚,等.仿生蝴蝶机器人的设计分析[J].机电工程技术,2024,53(8):97-100.
- [3] 叶启彬,肖顺根,郑炜坤,等.一种基于仿生学的蝴蝶机器人设计[J].中国科技信息,2025(3).
- [4] 吴康福,何浩璿,黎志勇,等.仿生机械·蝴蝶制作[J].南方农机,2025(8).
- [5] 黄鑫宇.蝴蝶优化算法的改进研究[D].哈尔滨师范大学,2024.