

仿复眼增强型导航仪

杨健¹, 刘鑫¹, 赵谦¹, 张腾¹, 白昊天¹, 张霄¹, 余翔^{1,2}

(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)

摘要: 导航系统是无人机、无人车、水下潜航器等无人系统的“眼睛”和“耳朵”。针对无人系统在卫星信号拒止、干扰对抗、陌生静默等复杂环境的长航时自主导航难题, 通过对生物体复眼、平衡棒等多传感器官导航信息获取、融合与匹配机制的学习、理解和实现, 研制了具有自主知识产权的仿复眼增强型导航仪, 关键器部件自主可控。本仪器具有快响应、无源自主、误差不积累等优点, 可作为复杂环境下惯性、视觉、地磁、卫星等导航方式的增强型手段, 具有重要的科学研究意义和广阔的工程应用前景。

关键词: 仿生导航; 智能感知; 组合导航; 信息融合; 仿生智能

Enhanced Navigator of Bio-inspired Compound Eye

Yang Jian¹, Liu Xin¹, Zhao Qian¹, Zhang Teng¹, Bai Haitian¹, Zhang Xiao¹, Yu Xiang^{1,2}

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

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

Abstract: Navigation system is the "eyes" and "ears" of unmanned systems such as unmanned aerial vehicles, unmanned vehicles and underwater vehicles. In order to address the technical challenge of long-endurance autonomous navigation of unmanned systems in satellite signal rejection, interference and confrontation, and unfamiliar environments, an enhanced navigator of bio-inspired compound eye with independent intellectual property rights is developed. It is inspired by learning, understanding and realizing the mechanism of acquiring, fusing and matching the navigation information of multi-sensor officials such as compound eyes and balance rods of organisms, and the key instrument components are independently controllable. The developed instrument has the advantages of fast response, passive autonomy, non-accumulated error, which can be used as an enhanced means of inertial, visual, geomagnetic, satellite and other navigation methods in complex environments.

Keywords: bionic navigation; intelligent sensing; integrated navigation; information fusion;

1 传感器设计背景和应用价值

导航技术为无人系统提供姿态、速度和位置等空间运动信息，是其完成任务并顺利返航的关键技术。目前常用导航方式有惯性导航、卫星导航、视觉导航、地球物理场导航等。然而，现有导航手段仍然存在一定的缺点，例如，惯性导航存在长时间累计误差^[1]、卫星导航易受遮挡干扰^[2]、视觉导航难以适应非结构化环境^[3]等。近年来，随着电子干扰、对抗、欺骗技术的飞速发展，对导航装备在卫星拒止、博弈对抗、陌生静默等复杂环境的自主性、适应性和鲁棒性提出了更高的要求。经过亿万年进化，生物体高超的自主导航能力令人叹服，为提高复杂环境下导航系统的自主性、适应性和抗干扰能力提供了新的解决途径^[4]。

21 世纪以来，美国航空航天局(NASA)、国防部(DoD)等研究机构先后提出了包括“仿生工程探测系统(BEES)”、“轻量快速自主(FLA)”等多个研究项目，用于解决地面与空中无人系统在无 GNSS 信号、磁干扰、非结构化等环境下的自主导航与定位难题。例如：在 2004 年，NASA 提出了利用偏振光、光流、视觉等自主导航方式，用于研究不依赖 GPS 的无人机偏振辅助组合导航技术(图 1)。此外，美国北极星公司已开发出 SkyPASS 偏振光传感组件^{[5][6]}，用于无人机、Javelin 导弹系统等领域，解决 GPS 干扰环境下的自主导航定位难题，该技术对我国严格封锁(图 2)。



图 1 NASA 无人机导航系统

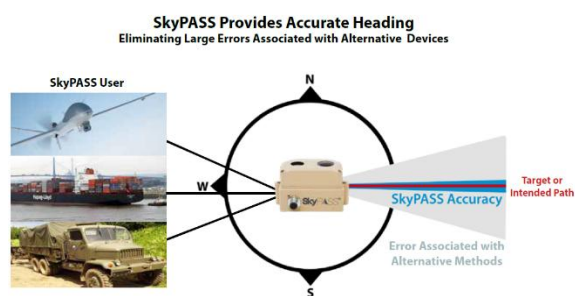


图 2 美国 SkyPASS 应用

近年来，美、法等国重要科研机构针对拒止环境自主导航难题进行了相关研究。2018 年，伊利诺伊大学、美华盛顿大学等科研机构人员合作研制仿螳螂虾眼偏振相机，基于此实现了水下无 GPS 条件下的全球定位功能，首次展示了利用水下偏振光信息的水下无源全球定位系统(图 3)^[7]，Nature 期刊刊文对其进行了报道^[8]。2019 年，法国国家科学研究中心等机构研究团队研制偏振光学罗盘搭载于仿沙蚁六足机器人(图 4)^[9]，实现了无 GPS 条件的自主位置解算、路径跟踪的功能，引起了新华网、澎湃新闻等媒体的热点跟踪报道^{[10][11]}。

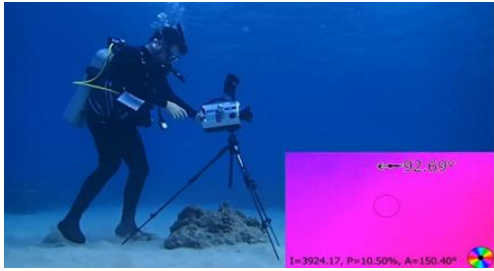


图3 仿螳螂虾眼偏振相机系统定位测试

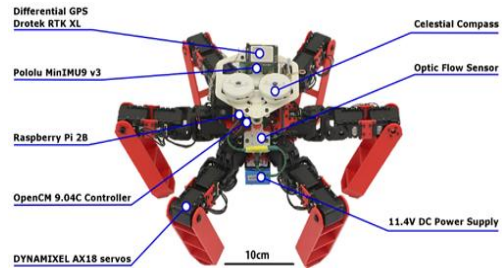


图4 仿沙蚁六足机器人

本团队围绕复杂不确定环境下的适应性、三维运动空间的可用性、多模式组合导航系统智能匹配融合三大科学问题,学习、理解与复现了生物体复眼类神经元结构和信息处理机制,突破仿生复眼多源干扰建模、紧耦合建模与复合干扰滤波、抗干扰姿态估计等关键技术,研制仿复眼增强型导航仪。本仪器具有无源自主、误差不积累、快响应等特点,无卫星信号、标志点等条件下航向精度可达 0.10° , 关键技术指标均达到或超过美国 SkyPASS 最新一代产品。本仪器成功应用于彩虹-5 (CH-5) 长航时无人机、发射对准系统等多个无人平台,结果表明其能够显著增强无人系统的自主导航能力和生存能力,为我国无人系统全自主导航技术突破提供了一类有效的解决方案。

2 创新点与优势

仿复眼增强型导航仪模拟自然界生物位置、姿态和速度等运动信息的自主感知机理与信号处理机制,揭示复杂环境下飞行动物的三维空间运动信息获取原理及多源信息融合机制,突破仿复眼神经元自适应感知机理及传感器设计、多源信息紧组合建模与抗干扰信息融合、多模式仿复眼组合导航系统设计与集成等关键技术。本仪器模拟并复现生物巡航过程中的自主导航、定位、环境感知等功能,可有效解决卫星导航信号干扰、博弈对抗、陌生静默等复杂环境下的无人系统自主导航定位难题。相比较于惯性、卫星、视觉等导航方式,仿复眼增强型导航仪可为解决以下场景自主导航难题提供强有力的解决手段:

(1) 卫星信号干扰环境: 2021 年我国卫星导航产值超过 4600 亿。但在复杂环境下卫星信号易受遮挡或干扰,本仪器可成为卫星导航的增强型和换代型设备,有效提高无人系统在无卫星信号或卫星信号受干扰环境下的可靠性和生存能力。

(2) 陌生非结构化复杂环境: 视觉导航、地形辅助等导航技术在无人机、自动驾驶等领域已经得到广泛应用,但其在沙漠、荒原等特征点稀疏的非结构化环境无法适用。本仪器具有无源自主、不依赖于结构化信息等特点,为解决在陌生非结构化任务场景下的自主导航难题提供了新的途径。

(3) 快响应发射对准环境: 本仪器具有开机自启动、快响应、误差不积累等特点,可与惯

性导航优势互补, 并具备快响应初始对准能力, 能够有效提高复杂任务场景下无人系统装备快速机动与发射对准能力!

3 实现方案简介

3.1 设计原理

生物学家研究发现, 多种昆虫、迁徙鸟类、两栖类等生物复眼神经系统中具有特殊的偏振敏感结构和信号处理机制, 且能通过与多传感器官协同匹配实现复杂环境下自主导航定位, 以完成觅食、归巢及迁徙等生命活动, 如沙蚁可以在恶劣的环境中觅食数百米后在偏振光的帮助下找到回家的路^[12], 候鸟会在迁徙的过程中会利用偏振线索校准自身磁罗盘^[13]。因此, 仿复眼增强型导航仪通过学习、理解和模拟生物复眼系统偏振敏感结构和光学信号处理机制, 获取和解译偏振度、偏振角、大气光强等自然光场信息, 复现了生物多器官协同感知与信息匹配融合策略, 突破了卫星信号干扰、陌生静默等复杂非结构化环境无人系统信息感知与自主导航技术^{[14][15]}。

具体而言, 针对无人平台干扰拒止、博弈对抗等复杂非结构化环境自主导航需求, 本仪器模拟生物多器官协同机制设计偏振/惯导紧组合导航模型^[15]。紧组合导航模型利用偏振传感器的原始光强信息直接与惯导信息融合, 以降低对偏振传感器通道数量的依赖性, 减少量测噪声的传递过程, 增强仿复眼增强型导航仪的灵活性和环境适应能力。此模型根据偏振矢量和散射平面的垂直关系, 建立如下载体系(b系)下的偏振矢量映射关系:

$$p^b = \begin{bmatrix} \cos \xi \\ \sin \xi \\ 0 \end{bmatrix} = \pm \frac{(C_n^b(I - \phi \times) S^n) \times o^b}{\|((C_n^b(I - \phi \times) S^n) \times o^b)\|_2} \quad (1)$$

其中, S^n 表示导航系(n系)下的太阳矢量, o^b 表示观测矢量, C_n^b 表示带误差的姿态转换矩阵。而后, 通过上述关系建立了每个测量通道的偏振光强 Z_{pol}^i 与三维姿态失准角 ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 的直接关系。与传统的基于航向、偏振矢量以及太阳矢量的融合模型相比, 此模型中量测噪声 v_{pol}^i 没有经过多次非线性转换, 直接反映了偏振光强的噪声。

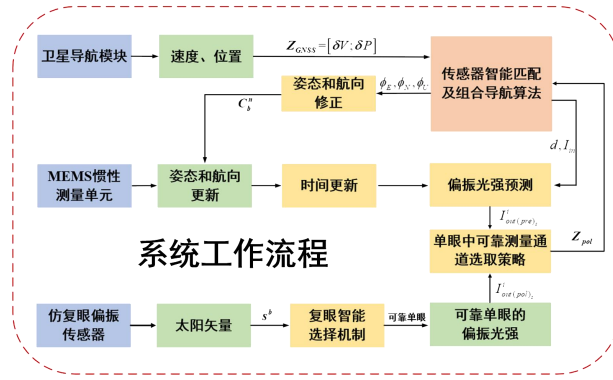


图 5 仿复眼增强型导航仪工作流程

克服仿复眼增强型导航仪偏振测量通道可能会遭受遮挡等干扰导致性能衰减的问题,本仪器中提出了一个基于紧组合模型的高可靠融合策略,如图 5 所示,以实现偏振传感器的可靠测量通道自适应的选择。同时,本仪器中建立了关于偏振光强的可信度判别函数^[15]:

$$\left. \begin{aligned} |\Delta I_{out}^i(k)| &\geq \text{Thresh, Occlusion error or Outliers} \\ |\Delta I_{out}^i(k)| &< \text{Thresh, Normal value} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, $|\cdot|$ 表示正交化, Thresh 表示阈值。仿复眼增强型导航仪通过可信度判别可自适应选择传感器通道的量测信息,满足基于偏振/惯导紧组合的可靠融合测量需求,可有效提高仿复眼增强型导航仪的复杂任务环境适应性。

3.2 设计方法

仿复眼增强型导航仪学习、理解和复现生物体复眼类神经元感知结构与信号处理机制及多器官协同感知结构与融合导航策略,进行了高集成度小型化一体化软硬件总体方案设计,原理图如图 6 所示。本仪器由多源导航信息感知模块、仿复眼偏振感知模块、卫星基准模块等组成,同时预留了 RS232 串口与 CAN 通信接口,支持单点通信与多点通信,实现了基于光/机/电/磁多传感器的一体化集成(如图 7 所示)。本仪器可获取并解译偏振光场、三轴加速度、陀螺仪等惯性、地磁场和卫星信号等多源导航信息,内置多源信息导航融合算法以实时进行信息融合匹配,同时可自主设定周期通过监控口对外发送实时的姿态、航向、位置等导航信息。此外,系统内部集成了多模式导航智能切换算法,在受到 GNSS、电磁干扰情况下可智能切换组合导航模式,能够有效增强导航系统的环境适应性与抗干扰能力。

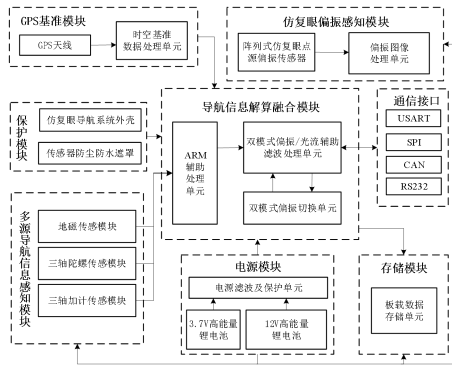


图 6 仿复眼增强型导航仪原理设计图

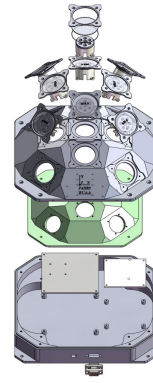
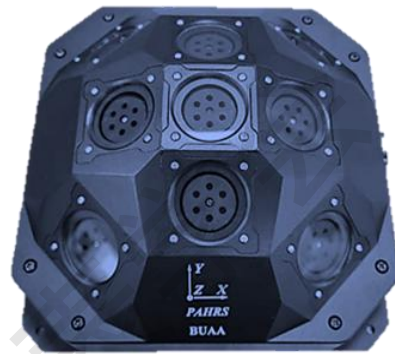


图 7 仿复眼增强型导航仪



3.4 实验验证过程

围绕无人机在长航时高动态飞行任务场景高精度、强自主的导航需求，仿复眼增强型导航仪研发团队联合航天 11 院 CH-5 无人机团队，于甘肃嘉峪关机场进行了中大型无人机长航时机载飞行测试(图 8)。此次测试以 CH-5 无人机的双天线 GPS 为测试基准，完成了仿复眼增强型导航仪在 GNSS 信号拒止情况下的自主导航性能评估。在飞行速度区间为 136.8Km/h-259Km/h，飞行高度为 1522.4m-3014.9m，90 分钟长航时飞行工况下，系统感知偏振度为 0.48~0.49，稳态飞行仿复眼增强型导航仪航向精度可达到 $0.1^\circ(1\sigma)$ 。仿复眼增强型导航仪精度、体积、功耗以及动态性等关键技术指标达到或超过美国 SkyPASS 最新一代产品，为 CH-5 等高空长航时无人机在卫星拒止、非结构化等环境下高精度长航时自主导航难题提供了解决途径。



图8 CH-5 飞行测试

参考文献:

- [1] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 18-36.
- [2] 杨文钰, 李东兵, 隋毅, 等. 2020 年国外不依赖卫星的导航技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2021, 1: 25-30.
- [3] 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.
- [4] 郭雷, 王恩美, 卢昊, 等. 仿生变构型飞行器智能控制技术: 进展与展望[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(04): 25-32.
- [5] Pham K, Chen G, et al. Passive optical sensing of atmospheric polarization for GPS denied operations[C]. In Proceeding of SPIE, 2016, 9838: 98380Y-1-98380Y-14.
- [6] Aycock T, Lompadó A, et al. Using atmospheric polarization patterns for azimuth sensing. In Proceeding of SPIE[C], 2014, 9085: 90850B-1-90850B-11.
- [7] Powell S, Garnett R, Marshall J, et al. Bioinspired polarization vision enables underwater geolocation[J]. Science advances, 2018, 4(4): eaao6841.
- [8] Graydon O. Global position by polarization[J]. Nature Photonics, 2018, 12(6): 318-318.
- [9] Dupeyroux J, Serres J, Viollet S. AntBot: A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments[J]. Science Robotics, 2019, 4(27): eaau0307.
- [10] 法国开发出可利用阳光导航的“机器蚂蚁”[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1625591710856296941&wfr=spider&for=pc>, 2019-02-16
- [11] 模仿沙漠蚂蚁, 法国研发出首个用阳光而非 GPS 导航的机器人[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1625807928398470773&wfr=spider&for=pc>. 2019-02-18
- [12] Leibold F, Ronacher B. Transfer of directional information between the polarization

compass and the sun compass in desert ants[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2015, 201(6): 599-608.

[13] Patel R, Cronin T. Mantis shrimp navigate home using celestial and idiothetic path integration[J]. *Current Biology*, 2020, 30(11): 1981-1987.

[14] Yang J, Liu X, Zhang Q, et al. Global autonomous positioning in GNSS-challenged environments: a bio-inspired strategy by polarization pattern[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, PP(99):1-1.

[15] Liu X, Yang J, Li W, et al. Tightly coupled modeling and reliable fusion strategy for polarization-based attitude and heading reference system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, pp. 1–1.

中国仪器仪表表学