

内外源注意的无人系统智能感知应用研究

唐勇^{1,2}, 周典乐³, 王涛^{4,5}

- (1. 西北工业大学 民航学院, 西安 710073; 2. 中航(成都)无人机系统股份有限公司, 成都 610097;
3. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 4. 中山大学 智能工程学院, 广州 510006;
5. 广东省消防科学与智能应急技术重点实验室, 广州 510006)

摘要: 针对未来无人系统智能化以及多无人系统协同感知与认知发展需求, 亟需解决信息过载以及跨平台多源感知信息融合的科学问题, 提出通过研究仿生内源性和外源性注意力的调节作用机理, 探索多源注意机制对无人系统智能感知系统调节作用机制, 对其映射异构多源感知器与行为决策控制的作用机理进行研究; 结合采用脑认知能够联合来自不同感官通道的线索对外部世界中的物体和事件实现快速高效信息过滤和异构多源认知, 并采用不同的参照系来表征物体的特征和位置, 构建一种基于仿生多源注意机制的智能感知与信息处理框架, 对工程化实现无人系统智能感知与认知系统具有一定的设计参考价值。

关键词: 智能感知; 内源注意力; 外源注意力; 注意机制; 异构多源信息; 整合调节

Application Research on Intelligent Perception of Unmanned System Based on Internal and External Attention

TANG Yong^{1,2}, ZHOU Dianle³, WANG Tao^{4,5}

- (1. School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. UAS Co., Ltd., Aviation Industry Corporation of China (Chengdu), Chengdu 610097, China;
3. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
4. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 560006, China;
5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Intelligent Emergency Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In view of the intelligence of unmanned systems and the development needs for collaborative perception and cognitive of multiple unmanned systems in the future, there is an urgent need to solve the scientific problems of information overload and multi-source perception information fusion of cross-platform. The regulation mechanism of bionic endogenous and exogenous attention is proposed, the regulation mechanism of multi-source attention mechanism is explored on the intelligent perception system of unmanned systems, and the mechanism of the mapping heterogeneous multi-source perceptions and behavior decision control is studied. By the use of brain cognition, the clues from different sensory channels can be combined to achieve the rapid and efficient information filtering and heterogeneous multi-source cognition of objects and events in the external world, and the different reference systems is used to represent the features and positions of objects to construct the framework of intelligent perception and information processing based on the bionic multi-source attention mechanism, which provides a certain design reference value for the realization of the intelligent perception and cognitive system of unmanned system.

Keywords: intelligent perception; endogenous attention; exogenous attention; attention mechanism; heterogeneous multi-source information; integrated regulation

0 引言

容易想象到的是一个人的注意力容易被周围的声、光等影响分散注意力从而影响到工作, 如何保持注意力集中有意识的控制自己在心理学领域称为“注意力控制”或者“认知控制”^[1-4]。对于生物个体来所, 其能够将来自不同感

知通道(视觉、听觉、触觉等)的信息相互作用并整合为统一的、连贯的和有意义的知觉过程, 这个过程被称为多感觉整合调节^[5]。

Posner等^[6]将注意力分为两类, 包括内源性注意(endogenous attention)和外源性注意(exogenous attention)。外源性注意又被称为被动性或刺激性驱动注意, 指的是个体以

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-04-27。

基金项目: 四川省科技计划资助(2020YFG0472); 国家自然科学基金面上项目(61975151)。

作者简介: 唐勇(1982-), 男, 四川乐至人, 博士研究生, 研究员, 主要从事无人机系统方向的研究。

周典乐(1983-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 讲师, 主要从事光电信息处理方向的研究。

通讯作者: 王涛(1981-), 男, 河南郑州人, 博士, 副教授, 博导, 主要从事智能无人系统、飞行器制导与控制系统仿真、多智能体协同规划与决策方向的研究。

引用格式: 唐勇, 周典乐, 王涛. 内外源注意的无人系统智能感知应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 283-288.

外信息引起的无意识注意或者叫下意识注意,这也可以看做是直觉性人工智能模型的驱动模型基础。例如,在一个安静的教室内,有学生突然大声吼会自然吸引其他人的注意。

无人系统的自主智能体现在对于环境的自主感知、认知,再到行动规划到控制决策的自主能力。针对未来无人作战平台要求高度自主化,吴德伟教授等^[7-10]在认知理论应用于自主导航控制领域做了大量工作,并且提出了一种认知导航框架及其类脑实现方法。韩崇昭等^[11]从生物多模感知认知启发提出了新的多源异构信息融合工程论方法,应用于无人系统目标识别。而 J. D. Boskovic 等^[12]则认为机器人自主控制涵盖了在线感知、信息处理认知以及控制方法重构等内容。申静^[13]研究了选择注意机制与多感觉的整合对于人类自身运动认知的影响。Lounis 等^[14]提出了一种全局混合反应/认知的多控制架构用于机器人自主控制决策,执行多种任务包括避障、目标跟踪定位以及路径跟随等。易长安等^[15]提出了一种基于分析函数描述的认知机器人的潜在动作模型。感知与行动密切相关,注意机制成为构建具有认知能力和意识型系统的基础。李岳明等^[16]提出一种基于注意力机制和模糊逻辑的运动规划控制方法。认知架构用于解决无人系统多样化环境下的效率、功能性以及可集成性、可扩展性以及可维护性^[17]。Lee 等^[18]研究用增强学习方法解决无人直升机在发动机故障场景下的自主旋转问题。有关研究学者总结了有关移动机器人未知环境自主控制决策领域的相关研究成果并出版了一些论著^[19-20]。刘箴^[21]通过引入注意机制实现虚拟人这个自主智能体的环境感知认知模型,从而增强虚拟人行动的真实性。刘扬等^[22]参考 Stevens 视觉认知模型和注意的神经控制回路信息处理结构提出一种视觉显著性计算模型。赵一帆等^[23]提出引入注意机制的人工势场的路径规划方法,解决容易出现局部极小值的问题,应用于机器人导航控制。段海滨等^[23]提出一种基于仿鹰眼视皮层网络认知机制的无人受油机视觉位姿精确测量方法,实现无人机自主空中加油精确对接。孟宪宇等^[25-26]利用多源注意力理论研究了人工鱼自主行为驱动的多感知融合算法。高峰等^[27]提出采用决策场理论和贝叶斯理论进行诱导信息下驾驶员路径选择行为决策建模用于描述行为决策的动态。Nelson 等^[28]人在研究近距离无人机空中格斗,使用经典制导律和博弈论的方法进行自主决策并做决策效能评估。无人系统不仅要和外部环境进行智能交互认知并进行决策控制,同样需要无人系统自身环境的认知控制决策^[29-30]。胡晓峰等^[31]更是创新的将多注意力机制融入到战场的态势感知与认知过程从而达到执行辅助决策。

多源注意力与多感觉调节与整合之间的存在极为重要的关联作用机制,这对于未来无人系统尤其多无人系统协同作战运用中涉及到的从跨域多源感知、协同任务规划到体系联合作战决策都具有重要的参考价值。大多数学者的研究集中在选择注意模型的构建以及在视觉系统中的注意机制运用,一些研究人员^[32-33]从心理学角度针对内外源注意力整合多感觉线索已经有一些研究,但是还没有结合无人系统智能感知系统应用内外源注意力进行多感知调节与

整合,从而为实现仿生智能无人系统提供重要的工程设计理论基础。

1 内源性和外源性注意整合

1.1 内源性和外源性注意机制的作用

许多研究结果发现,人类的选择注意系统存在两种不同的注意机制,一种是受到意图控制的内源性选择注意,另一种是取决于刺激特性不受意图控制的外源性选择注意,并且这两种注意机制对感知信息加工的时间进程有所差异,这对智能无人系统感知信息的处理有着极大的设计参考价值:

1) 外源性选择注意显著存在重叠的对感知信息进行加工处理;

2) 外源性注意是对外援刺激能够以快速、自动的、非随意的方式吸引注意;

3) 内源性注意对感知信息的则是一种缓慢的、受控制的和随意的关注点分配;

4) 内外源性注意对于感知空间中的选择注意是一种全空间的注意分配。

基于上述内外源注意对于感知系统信息处理的启示,无人系统在于环境感知与行为决策控制之间自主协调,而内源性和外源性注意机制的混合作用能够在关联环境智能感知与行为决策控制上具有巨大的优势,成为解决智能无人系统关键技术的热点之一。对于智能无人系统来说,内外源注意机制与自主行为决策控制的关联应用总体架构如图 1 所示。

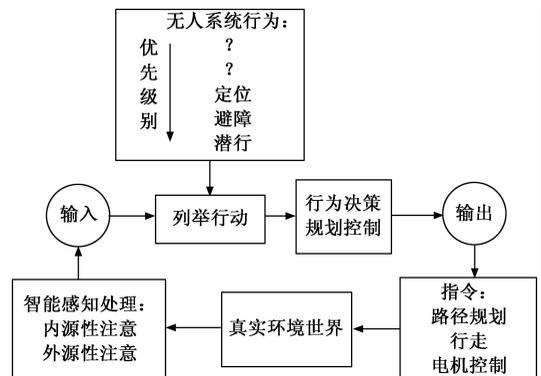


图 1 无人系统内外源注意机制的智能感知应用架构

简单来说,这种内外源注意机制发生作用都是源自于中枢神经系统的神经元和突触的物理特性,并非是什么神秘的特征,而是一种电磁场或者量子效应。尤其需要注意的是,构建智能无人系统所需要的意识认知能力经常与这两种选择性注意紧密联系在一起,内源性注意形成直觉性的智能行为控制能力,外源性注意形成一种刺激—反应性的智能行为能力。两种模式的选择性注意将无人系统的智能行为设计带入到意识工程系统领域,并且也允许我们控制进入大脑的大量数据。

1.2 无人系统内外源注意的多感觉融合应用

人的感知系统结构及其链接关系是根据内外源注意实

现多感知的高效管理、感知信息融合以及过载信息过滤, 图 2 为人的多感知与决策控制系统结构示意图。对于无人系统需要构建可靠的智能感知系统, 其所装备的多源同质、多源异质传感器从而构建仿人的多感知器, 利用内源性和外源性选择注意机制的不同驱动模式以及相互约束作用关系建立智能环境感知模型, 实现对多探测器的资源调度以及高效率的感知信息处理、存储和决策应用。

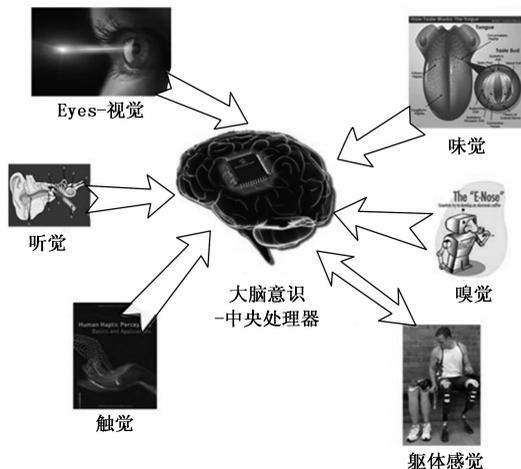


图 2 人的感知器与控制系统体系结构示意图

对于无人系统来说, 多感知器融合必然要综合利用不同传感器如惯性传感系统、红外视觉、温度传感器、可见光视觉、声纳系统、雷达系统以及激光测距系统等(见图 3) 内外环境感知器的互补或特征指引关系, 结合内外源选择注意混合驱动模式, 以便实现仿人的智能感知信息处理结构, 在信息处理方式上实现:

1) 对低层感知系统以并行处理方式进行, 全感知空间加速感知信息处理速度;

2) 高层认知系统以串行方式进行, 通过刺激外源性特征和任务意图内源注意, 对信息进行筛选处理, 实现快速处理。

从工程实现角度理解无人系统的多感觉意识系统, 可以总结为: 意识系统产生自一个高度互联的复杂的集成系统的系统, 这些系统之间采用非线性脉冲神经网络用来对大量输入感知觉数据进行数据融合进而进行学习、存储记忆、思考以及控制一个复杂的动力子系统。一个意识工程系统必须具备能够学习和理解真实世界的状况, 并且最为关键的是通过各种算法技术包括遗传算法、机器学习、模糊逻辑、认知结构以及神经网络的突发性行为研究。

2 内外源注意的智能感知作用机制

大脑无时无刻都在接受大量的环境感知信息输入, 多感知整合能够将来自不同感知器的信息组合并减少感知系统内的干扰信息, 从而促进多感知器重要信息的检测、识别和定位^[34]。外源性注意能够促进刺激的检测、识别和定位, 能够增强同一位置相对应的同构探测器或异构感知器的信息处理, 加快无人系统对环境变化刺激的应变速度^[35], 同时对感

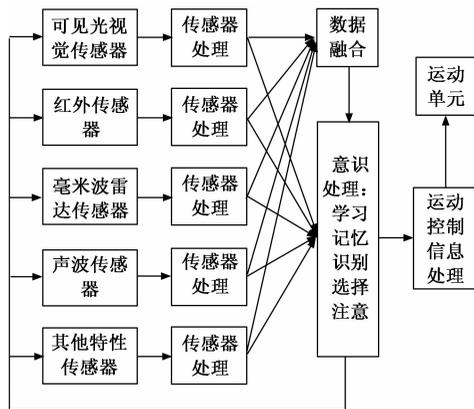


图 3 无人系统的自主行为决策控制结构示意图

知信息处理需求是临时的, 快速产生同时快速消失。而内源性注意则有其空间定向效应, 随着任务需求的变化而变化, 是一种信息持续搜索跟踪的驱动源。因此有必要探讨内外源注意在感知调节中的作用原理, 尤其针对无人系统智能感知系统应用研究中的可以提供极具价值的设计参考。

2.1 内外源智能感知与决策控制的关联

目前研究选择注意机制都集中于视觉信息处理, 通过分析文献资料总结人脑多种注意机制及其在多感知器与自主行为决策控制中所发挥的作用模式(见图 4), 研究多选择注意机制之间的约束作用关系, 基于空间位置和时空信息、基于非空间特征的目标客体等多种注意加工机制模型在感知与行为决策之间的关联模式, 分析其在基于多感觉注意机制的无人系统自主行为决策控制中的作用机理, 建立在复杂环境下多感觉内外源注意信息与动态行为决策反应的关系模型。

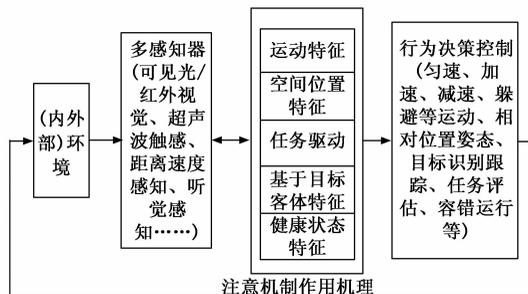


图 4 注意机制关联多感知器与行动决策控制的关系结构

感知系统信息来源包括内部和外部两种环境, 而对环境感知依靠多感知器生成相应特征的感知信息, 内源性和外源性注意机制是一种混杂驱动作用, 内源性注意机制是面向无人系统任务目标特征实现在线实时驱动, 并对行为决策控制构成一种全时工作闭环环路。外源性注意机制则通过一种临时信息驱动机制, 对行为决策与规划产生局部的、短时效应影响。比如, 对于无人作战装备进行战术侦察搜索任务来说, 内源性注意就是战术敌方目标信息驱动, 而对于战场环境中突发的枪炮声临近, 这是一种外源性的注意驱动, 对于无人系统执行战场生存行为规划与决策至

关重要，对于此类感知信息的应用从而执行掩体寻找定位、躲避路线规划以及行动控制，这种依赖内源和外源注意力驱动的智能感知、决策与规划控制一体的闭环结构是无人系统智能话能力的一种基本架构，而智能感知技术的重要依托就是仿生内外源注意力模型的构建与应用。

2.2 内外源注意力的多感知信息整合调节作用

对仿生视觉系统而言，内外源注意力的视觉驱动使得人类可以选择与自己正要进行的行为最相关的视觉信息。比如，驾驶员的安全驾驶关键依赖于行车过程中各种障碍的检测和实时监视停车标志、交通灯，而每一种视觉环境都有其复杂性和信息量负荷过载的特征。为了应对这样一个潜在的信息过载问题，内源和外源性注意机制扮演着两种关键的角色：

1) 内源性注意用于选择任务行为相关的信息并忽略不相关的或者妨碍信息；

2) 外源性注意能够根据感知状态和目的加强所选择的信息。

依照生物视觉注意机制存在非均匀采样的特征，暨在注视区域内保持高分辨率，或者可以保持实际输入图像的采样率不变；而在注视区域四周，则可以按照距离注视中心区域的远近按照逐级降低的采样率进行采样。设计一种矩形区域非均匀采样模型（见图 5），这种非均匀采样的方法有利于大幅减少信息传输对通信带宽的需求，同时提高运算效率^[36]，并且信息过滤算法仅涉及加减以及少量的乘运算，非常有利于大幅降低对计算机硬件系统性能的需求，更便于实现智能无人系统低功耗、低成本和小型化的发展需要。

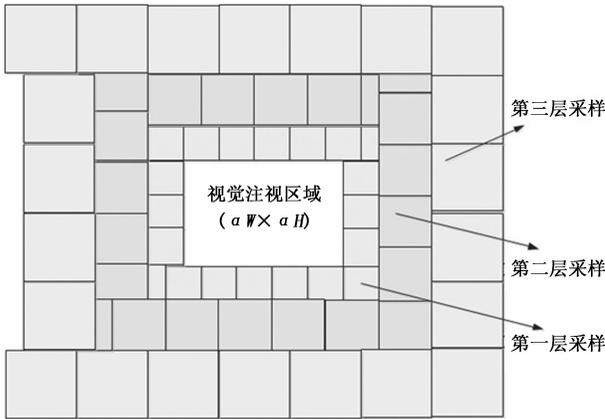


图 5 按矩形区域模拟非均匀采样算法示意图

图中原图像尺寸记作 $W \times H$ ，其中注意驱动的观察窗口尺寸大小设置为： $aW \times aH$ ， a 作为注意区域大小确定参数是由外部指令或者检测与识别目标的尺寸决定，注视区域块内保持高图像分辨率或者对输入原始数据率不变，以尽可能保留更多的重要信息。而对于内外源注意区以外的图像采样率，根据其相对注意焦点的距离，逐级降低采样率。简单来阐述，给定一个矩形窗口，按照行采样，从注意区域第一层采样开始，3 个像素点存储一个，第二层采样点，增大矩形区

域，5 个采样点存储一个数据信息，第三层采样点，再次增大矩形选择区域，7 个采样点存储一个数据。

根据以上描述，给出下面以采样点距离注意区域中心的距离为参数，设置非均匀采样率。假设在第 i 个采样层的矩形采样区域大小为 $W_i \times H_i$ ，其大小设置要求满足采样率越高，那么采样的矩形区域应当越小，并且在该采样层内，在其采样范围内按照均匀采样进行。随着视觉图像距离注视区域的距离增加，相应的矩形采样区域增大，即存在如下关系：

$$W_i \times H_i < W_{i+1} \times H_{i+1}$$

这是对视觉信息的内外源驱动形成的一种信息获取应用模式，暨视觉注意力应用，图 6 为按此方式仿真生成的一种仿真图，视觉图像中空中的物体以及色彩艳丽作为外源注意驱动实现注意信息的有效整合，并调节信息存储等应用。



(a) 原始输入图像



(b) 注视区选择后的非均匀采样图

图 6 非均匀采样仿真结果前后对比图

再以无人系统的健康状态监控与管理评估应用来表明内外源注意驱动的智能感知调节作用。在智能无人系统的实际应用中，对照仿生智能尤其是人的任务目标规划，前提是对自身健康状态的实时评估，其次对任务完成的能力进行评估，再做行动决策，进而执行行为规划和控制。

无人系统健康管理信息同样受到内源性和外源性注意驱动，并形成不同的信息获取与处理模式：

1) 内源性注意要求对无人系统自身的动力支持系统、行动控制能力以及探测感知系统的工作状态、有效工作能力进行实时评测，作为内环境感知的重要支撑；

2) 外源性注意的核心问题需要对无人系统自身各个组成分系统包括结构系统、导航系统、控制系统、制导系统和动力系统等存在可能的突发故障进行实时的检测诊断，这是无人系统智能化能力的基本表现。

内源和外源性注意有助于无人系统实现智能感知信息控制处理，且内源性和外源性注意与多感知器存在紧密的交互关系。具体总结为：

1) 外源性注意通过自下而上的方式实现多感知器的信

息调节与整合,包括空间不确定性、感知敏感度和探测通道间信号强度差异 3 种理论假说。内源性注意是通过自上而下实现对多感知器信息产生调节作用。

2) 多感知信息的调节与整合同样反作用调节内源和外源性注意,多感知整合自上而下地调节外源性注意(多异构探测器所产生的不同时间、空间和目标等信息特征对外援注意反应程度的排序等影响);多感知整合自上而下地调节内源性注意(表现为无人系统任务目标因应环境和自身状态的变化而实现动态变化)

已有的一些研究成果表明^[37]:任务要求与目标、注意负荷以及智能系统个体期望能影响内源性注意对多感知器整合的调节效应;任务类型会影响外源性注意调节多感知器整合调节效应的大小。

3 结束语

本文针对无人系统智能感知系统具有多源异构特征,甚至未来多域协同无人系统要求具备跨域协同智能感知能力,存在时空不确定性、信息过载、通信带宽有限、大数据量延迟、注意负载和个体与群体期望博弈等挑战性问题,这些都对智能感知系统提出了新的研究课题。而仿生的内外源注意机制,不仅对于个体同样对于群体组织都具有非常巧妙地多感知信息整合与调节作用,并且通过内源和外源注意的引入能够实现智能感知系统的构建,对于实现复杂动态环境下有效应用智能无人系统完成复杂任务具有重要的工程价值。通过本文的相关研究,主要得出以下主要结论:

1) 对内源性和外源性注意机制的作用进行总结,并结合无人系统多源异构感知系统运用提出一种内源和外源注意应用模型,给出了仿人的无人系统多感觉信息融合架构。

2) 对内外源注意机制在观察、判断、决策到行动(OODA, observation, orientation, decision & action) 环节的关联模式进行了分析,通过结合具体应用提出了内外源注意力的多感知调节运用方法。

3) 本文仅初步探讨了仿生内外源注意对于构建无人系统智能感知系统的基本理论、运用方法和模式,下一步还需在无人系统的实际环境感知信息处理应用中进行系统级架构演示验证和工程模型的研究。采用更加先进的传感器和更加合理的传感器信息管理结构,提高无人系统对于外部环境和自身状态的感知和认知能力,同样借助于人的多感知内外源注意机制构建无人系统的多源异构/同构协同探测器的综合管理系统。

参考文献:

[1] Sensory modality matters in attentional control [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017 (3): 66.
 [2] TALSMA D, KOK A, SLAGTER H A, et al. Attentional orienting across the sensory modalities [J]. *Brain & Cognition*, 2008, 66 (1): 1-10.
 [3] SANTANGELO V, BELARDINELLI M O, SPENCE C, et al. Interactions between voluntary and stimulus-driven spatial at-

tention mechanisms across sensory modalities [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2009, 21 (12): 2384-2397.

- [4] EYSENCK M W, DERAKSHAN N, SANTOS R, et al. Anxiety and cognitive performance: attentional control theory [J]. *Emotion*, 2007, 7 (2): 336.
 [5] TANG X Y, WU J L, SHEN Y. The interactions of multisensory integration with endogenous and exogenous attention [J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2016, 61: 208-224.
 [6] POSNER M I, COHEN Y. Components of visual orienting [J]. *Attention and Performance X: Control of Language Processes*, 1984 (32): 531-556.
 [7] 吴德伟, 邵能建, 戚君宜. 基于认知理论的 UCAV 智能导航研究新进展 [J]. *空军工程大学学报*, 2015 (4): 52-56.
 [8] 吴德伟, 何 晶, 韩 昆, 等. 无人作战平台认知导航及其类脑实现思想 [J]. *空军工程大学学报*, 2018, 19 (6): 33-38.
 [9] 吴德伟, 杜 佳, 戚君宜, 等. 向人脑学习的 UCAV 认知导航航迹规划研究 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2014, 15 (5): 46-51.
 [10] 吴德伟, 李伟龙, 周 阳, 等. 实现无人机认知导航的视觉环境感知研究进展 [J]. *飞航导弹*, 2014, 12 (12): 9-13.
 [11] 韩崇昭, 韩德强, 介 婧. 从生物感知认知到系统工程方法论 [J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28 (s): 75-93.
 [12] BOSKOVIC J D, PRASANTH R, MEHRA R K. Multi-layer architecture for intelligent control of unmanned aerial vehicles [C] // *AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, Technologies, and Operations*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002: 1-11.
 [13] 申 静. 选择性注意和多感觉整合对自身运动感知的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
 [14] ADOUANE L. Reactive versus cognitive vehicle navigation based on optimal local and global PELC* [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 88: 51-70.
 [15] 易长安, 闵华清, 罗荣华, 等. 基于分析函数描述的认知机器人潜在动作模型 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, S1: 70-72, 88.
 [16] 李岳明, 万 磊, 孙玉山, 等. 一种基于注意力机制的 AUV 控制层指令理解方法 [J]. *机器人*, 2012, 34 (4): 406-410, 417.
 [17] ROSENBLOOM P S. Rethinking cognitive architecture via graphical models [J]. *Cognitive Systems Research*, 2011, 12 (2): 198-209.
 [18] LEE D J, BANG H. Autonomous autorotation of an unmanned helicopter using a reinforcement learning algorithm [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2013, 10 (2): 98-104.
 [19] 蔡自兴, 贺汉根, 陈 虹. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
 [20] 沈林成, 徐 昕, 朱华勇, 等. 移动机器人自主控制理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
 [21] 刘 箴, 虚拟人一种导航方法研究 [J]. *宁波大学学报*, 2004, 17 (3): 13-318.
 [22] 刘 扬, 杨 伟, 郑逢斌. 视觉选择性注意的认知神经机制与

显著性计算模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35 (3): 584 - 589.

[23] 赵一帆, 李孝安. 基于注意机制的改进人工势场的机器人路径规划 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (9): 2094 - 2097.

[24] 段海滨, 张奇夫, 邓亦敏, 等. 基于仿鹰视觉的无人机自主空中加油 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (7): 1450 - 1458.

[25] 孟宪宇, 薛燕荣, 王 昊, 等. 人工鱼多感知系统融合研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (2): 379 - 383.

[26] 孟宪宇, 薛燕荣, 班晓娟. 虚拟环境下人工鱼感知融合模型研究 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26 (13): 1160 - 1162.

[27] 高峰, 王明哲. 诱导信息下的路径选择行为模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10 (6): 64 - 69.

[28] RAMIREZ L N, ŻBIKOWSKI R. Effectiveness of autonomous decision making for unmanned combat aerial vehicles in dog-fight engagements [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41 (4): 1021 - 1024.

[29] KHADIDOS A, CROWDER R M, CHAPPELL P H. Exogenous fault detection and recovery for swarm robotics [J]. IFAC - PapersOnLine, 2015, 48 (3): 2405 - 2410.

[30] OTOUM S, KANTARCI B, MOUFTAH H T. Detection of

(上接第 250 页)

深入的分析, 以解决更复杂的问题。同时深入研究面向多机器多任务的 3D 打印调度问题, 与其他智能优化算法进行对比, 进一步分析算法能力, 提高算法搜索能力。

参考文献:

[1] QIANG L, KUCUKKOC I, ZHANG D Z. Production planning in additive manufacturing and 3D printing [J]. Computers & Operations Research, 2017, 83: 157 - 172.

[2] 王强华, 孙阿良. 3D 打印技术在复合材料制造中的应用和发展 [J]. 玻璃钢, 2015 (4): 9 - 14.

[3] 额日登布鲁格. 3D 打印技术的理论与实践 [D]. 北京: 中共中央党校, 2016.

[4] 郝南海. 基于蚁群算法的 3D 打印批次规划 [J]. 制造技术与机床, 2017, (3): 146 - 149.

[5] 徐金涛, 毛 丽, 刘建业. 一种 3D 打印机的加工时间估算方法 [P]. 中国: CN109648856B, 2021 - 04 - 16.

[6] 刘洪铭, 曾鸿雁, 周 伟, 等. 基于改进粒子群算法作业车间调度问题的优化 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2019, 49 (1): 57 - 62.

[7] 任 宇. 中国与主要发达国家智能制造的比较研究 [J]. 工业经济论坛, 2015, 2 (2): 68 - 76.

[8] 徐 军, 王天伦. 3D 打印机控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (3): 51 - 54.

[9] RICKENBACHER L, SPIERINGS A, WEGENER K. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) [J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19 (3): 208 - 214.

[10] BRAHMADATTAV, MISHRA, et al. Short - term scheduling of batch processes. a comparative study of different approaches [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44 (11): 22 - 34.

known and unknown intrusive sensor behavior in critical applications [J]. IEEE Sensors Letters, 2017, 1 (5): 1 - 4.

[31] 孔亦思, 胡晓峰, 朱 丰, 等. 战场态势感知中的注意力机制探析 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29 (10): 2233 - 2240.

[32] KOELEWIJN T, BRONKHORST A, THEEUWES J. Attention and the multiple stages of multisensory integration: a review of audiovisual studies [J]. Acta Psychologica, 2010, 134 (3): 372 - 384.

[33] 彭 姓, 常若松, 任桂琴, 等. 外源性注意与多感觉整合的交互关系 [J]. 心理科学进展, 2018, 26 (12): 2129 - 2140.

[34] STEIN B E, STANFORD T R. Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2008, 9 (4): 255 - 266.

[35] SPENCE C. Cross modal spatial attention [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1191 (1): 182 - 200.

[36] 訾 方, 立言俊, 张 科, 等. 矩形非均匀采样算法和对数极坐标变换算法的比较分析 [J]. 计算机应用, 2007, 27 (7): 1619 - 1623.

[37] 彭 姓, 常若松, 任桂琴, 等. 外源性注意与多感觉整合的交互关系 [J]. 心理科学进展, 2018, 26 (12): 2129 - 2140.

[11] MÉNDEZ C, CERDÁ J, GROSSMANN I E, et al. State - of - the - art review of optimization methods for short - term scheduling of batch processes [J]. Computers & Chemical Engineering, 2006, 30 (6/7): 913 - 946.

[12] 王 彬, 唐 昊, 戴 飞, 等. 打印参数可变模式下 3D 打印批调度问题研究 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (9): 10.

[13] 郝南海. 考虑打印件排布的 3D 打印批次规划 [J]. 现代制造工程, 2017, (5): 5.

[14] 刘杉杉, 何金龙. 用于微流控制备的 3D 打印机设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (3): 82 - 85, 97.

[15] 曾齐高, 李积彬, 罗 飞. 金属 3D 打印机挤出装置的结构设计 [J]. 模具制造, 2018, 18 (1): 82 - 85.

[16] 陈 强, 王宇嘉, 林炜星, 等. 改进粒子群算法求解分布式柔性车间调度问题 [J]. 电子科技, 2021, 34 (10): 63 - 68.

[17] 丁 涛, 向升斌, 李表奎, 等. 基于改进粒子群算法的生鲜电商冷链终端配送车辆路径问题研究 [J]. 物流技术, 2016, 35 (2): 68 - 72.

[18] 吴廷发. 基于粒子群优化算法的非线性系统参数估计 [D]. 汕头: 汕头大学, 2013.

[19] BERGH F, ENGELBRECHT A P. A study of particle swarm optimization particle trajectories [J]. Information Sciences, 2006, 176 (8): 937 - 71.

[20] 许 君, 鲁海燕, 石柱娟. 限制速度粒子群优化和自适应速度粒子群优化在无约束优化问题中的应用 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (3): 668 - 74.

[21] 张 静, 王万良, 徐新黎, 等. 混合粒子群算法求解多目标柔性作业车间调度问题 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (6): 715 - 722.

[22] 张 凡, 王 雷, 赵 娟, 等. 粒子群算法种群规模和迭代次数对系统优化效果的影响研究 [J]. 青海电力, 2020, 39 (2): 12 - 20.