

无人作战平台认知导航及其类脑实现思想

吴德伟, 何晶[✉], 韩昆, 李卉

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 无人作战平台将是未来空天战场的主要作战力量, 认知导航正是应无人化平台智能自主运行控制的需要而提出的新型导航技术。通过对认知导航进行了深入剖析, 给出了认知导航的基本内涵, 以及在这一内涵下的认知导航框架结构和导航信息处理流程, 并分析了认知导航所具备的新质导航能力, 探讨了采用“类脑”技术实现认知导航的新途径, 最后提出了实现认知导航需要解决的关键技术。为实现无人化作战平台智能自主能力提供了理论框架, 具有较强的指导意义。

关键词 无人作战平台; 认知导航; 类脑导航技术; 智能自主

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.006

中图分类号 TP183; Q811 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0033-06

Cognitive Navigation and Its Thought of Brain-Inspired Realization in Unmanned Combat Platform

WU Dewei, HE Jing[✉], HAN Kun, LI Hui

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Unmanned combat platforms will be the main combat force in the future airfield. Cognitive navigation is a new kind of navigation technology which is proposed for the need of intelligent autonomous operation control of the unmanned platform. In this paper, we firstly made an in-depth analysis, proposed the basic connotation, framework structure and information processing flow, and analyzed the new navigation abilities of cognitive navigation. Secondly, we explored a new approach to cognitive navigation using brain-inspired technology. Lastly, we proposed the key technologies needed to be solved to realize cognitive navigation. This paper provided a theoretical framework for the realization of intelligent autonomous capability of unmanned combat platform, and had strong guiding significance.

Key words: unmanned combat platform; cognitive navigation; brain-inspired navigation technology; intelligent autonomous

运行平台无人化已经成为共识的发展方向, 图 1 是几种无人化平台的实例。以无人机发展为例, 美军无人作战飞机(Unmanned Combat Aerial Ve-

hicle, UCAV)的发展计划和 X-47B^[1]、法国“神经元”^[2]、中国“龙”系列等的飞行试验, 都预示着无人

机正从单功能、程序化运用, 向着多功能、智能化、自

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(61603409)

作者简介: 吴德伟(1963—), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 主要从事空天飞行器导航理论与技术研究。E-mail: wudewei74609@126.com

通信作者: 何晶(1989—), 女, 新疆昌吉人, 副教授, 博士, 主要从事军用航空导航研究。E-mail: hejing_78@163.com

引用格式: 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(自然科学版), 2018, 19(6): 33-38.
WU Dewei, HE Jing, HAN Kun, et al. Cognitive Navigation and Its Thought of Brain-Inspired Realization in Unmanned Combat Platform[J].
Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 33-38.

主化的飞行机器人方向发展,预示着未来的空天战场将充斥高度自主化的无人作战平台。无人机作为一种面临复杂作战环境、能够远离操控基地的无人化平台,其智能自主飞行是必须具备的核心能力之一,而这一核心能力的支撑就是智能自主导航控制技术,以此满足无人平台在人退出环路之后实现自

由运行、自主作为的需求。而能够对环境进行感知、智能导航信息处理和自主航迹规划的认知导航正是应无人化平台智能自主运行控制的需要而提出的新型导航技术。当前,类脑科学研究的蓬勃开展,为通过模拟人或动物的导航信息处理机制实现无人化平台的认知导航提供了重大机遇。



图1 无人化平台实例

Fig. 1 The instances of unmanned platform

1 认知导航的基本内涵和新质能力

1.1 认知导航的基本内涵

国外众多单位对认知地图和认知导航进行了研究。宾夕法尼亚大学的 R A Epstein 等人^[3]以及巴黎萨克莱大学 B. Gauthier 等人^[4]分别对人类空间导航过程中的认知机理进行了研究;谷歌公司 S. Gupta 等人^[5]提出了一种基于认知构图构建和路径规划的视觉导航方法。

国内方面,中科院王琳等人^[6]对认知地图的神经环路基础进行了研究;四川大学唐华锦团队^[7]基于内嗅皮层-海马体环路实现了运行体导航认知图的同步构建;北京工业大学于乃功团队^[8]。在传统 RatSLAM 的基础上提出了一种基于海马认知机理的认知地图构建方法,更加准确地体现了生物在导航中的生理学现象和认知功能实现过程。作者所在团队^[9]对基于认知理论的UCAV智能导航进行了研究,在UCAV认知导航框架、认知图构建、智能航迹规划等方面取得了一定的成果。

但是,以上研究主要集中在移动机器人领域,力图借鉴生物的认知机理提升机器人的导航能力,且并没有对认知导航给出清晰的定义。本文作者及团队经过长期的探索和研究,认为:认知导航是模仿生物认知特性的一种新型导航技术,通过多种传感器感知外界环境,利用智能及仿生技术实现具有知识

记忆、学习及推理特性的导航信息融合和认知图构建,以及具有认知特性的实时智能航迹规划,实现在最优航迹上的持续、安全、可靠、准确行进控制的智能自主导航。

认知导航区别于传统导航最重要的特征在于对环境和目标的“认知”能力,即对空间环境和导航规划决策的注意、记忆、学习、思维能力,同时认知导航中环境感知、导航信息处理和规划决策是一体化的,即运行体本身即为一个完整的智能体,从而实现运行体的智能自主导航。

图1给出了一种该内涵下的认知导航框架结构。

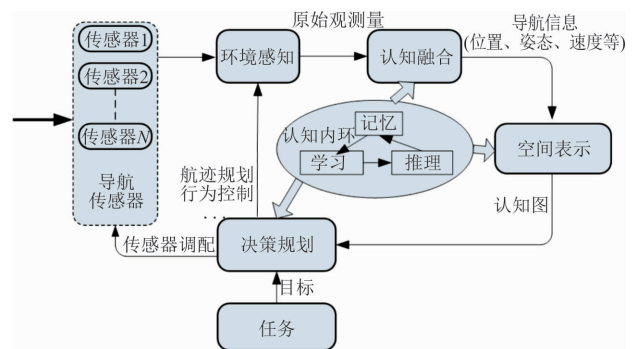


图2 认知导航框架结构

Fig. 2 The frame structure of cognitive navigation

在该框架下,导航信息处理流程为:由各导航传感器对环境进行感知,得到距离、角度、速度等原始观测量信息;然后在认知内环的支持下下进

行导航信息的认知融合、认知图的构建,提取以及决策规划,实现运行体的航迹规划、传感器选择、行为控制等。其中认知内环是认知导航的核心,通过认知科学的学习、推理和记忆功能来完成智能自主导航的信息融合、空间表示和航迹规划功能。

1.2 认知导航的新质导航能力

认知导航支持下的智能自主导航系统性能,包括组合导航精度、可用性与可靠性、实时性与连续性、抗扰抗损完好性等传统性能都将获得巨大的提升,同时还将提供传统导航方式不具备的新质导航能力。

1)环境自适应的传感器调配能力。不仅能够根据载荷条件、任务需要等随意使用传感器,即插即用,而且能够依据当前所处环境以随遇接入的形式选择主用或辅用传感器,最优化地发挥各个传感器的性能。

2)利用先验知识的在线航迹规划能力。利用导航认知图的实时更新和存储记忆能力,使当前的规划不断建立在以往运行过程先验知识的积累基础之上,确保航迹规划具有对规划约束条件的敏感性和实时性。

3)未知环境下的不间断持续导航能力。所谓未知的环境,是指运行体所处的没有用先验导航数据表征过的地理空间区域。地图就是一种用导航数据表征的地理空间区域先验数据形式,利用地图的导航方式就是利用先验数据的导航。以往地图的建立是由专业测绘人员完成的,且所提供的先验数据是服务于人的,也就是地图的修改完善、态势信息的指示都是基于人的语义环境,机器是无法识别的。未知环境是没有地图的区域,使用传统的有图导航方式是不能完成导航任务的。这就要求利用认知导航的能力,像人或动物一样能够在未知环境中进行探索、学习,实现同步的导航定位与地图构建,以探索者的姿态在摸索中完成任务,在学习中完成地图构建,并为今后的导航提供先验数据。

4)任务驱动的协同导航能力。智慧的一个重要体现是群体的行动。一个群体要协同完成任务,就要有群体成员间的相对导航能力,也要有整个群体的集群导航能力。当把一个集群看作一个整体的时候,群体成员就可以作为分布式传感器的携带者,集群的所有传感器联合感知环境,以一定的模式进行信息融合处理,在减轻单机载荷负担等有利条件下,就能够实现集群的认知导航,满足群体智能控制协同运行的能力要求。

5)自主起降的运行控制能力。对无人机而言,

自主起降尤其是自主着陆能力显得尤为重要。着陆过程是无人机最为危险的阶段,需要综合利用各种引导指示完成进近、下滑、接地、滑跑等动作。传统的着陆引导系统都还不能满足无人机全过程全自动起降引导的要求,尤其是相较动物依靠视觉就能选择着陆场地具有准确完成着陆任务的能力,现有的无人机着陆引导方式都还无法企及。实践证明,在无人机的起降阶段,人工干预飞行过程不仅不会增加飞行的安全性,还会因操控人员的隔空操控感而使起降飞行的危险程度加大。而引入人工智能的认知导航能够如同人员身临其境般地自主控制无人机的起降,并且还拥有了在应急情况下自主选择着陆场地并安全起降的能力。

6)态势信息的收集、存储和使用能力。认知导航的实现,意味着在无人化平台上引入了人工智能。拥有人工智能的无人平台,在通信系统的支持下必然拥有了收集、存储和使用态势信息的能力,从而使航迹规划和控制决策更富有时效性和时敏性,也就具备了和有人驾驶平台、其它无人平台等协同运用的能力。同时,态势信息的收集、存储和使用能力的建立,还使无人平台能够作为节点融入网络化的作战体系,成为以网络为中心的联合作战、体系作战的中坚力量。

1.3 认知导航是无人机作战平台的核心需求

无人化平台发展的重要目标之一就是不断提高其自主性。以无人机的发展方向为例:一是单机智能飞行,要求导航控制具备自主飞控、环境自适应、智能路径规划、自主起降等能力;二是多机智能协同,要求导航控制系统拥有进行语义交互的机器自然语境,能够协调规划飞行航线等;三是任务自主智能,就是摆脱人的操控,具有任务驱动的自主行为决策能力,以人工智慧任意到达。

要实现无人化平台自由运行、自主作为,无疑需要引入人工智能技术,在此条件下实现的导航一定是认知导航技术。这一方面要求无人平台能够自主调配传感器自动适应环境,建立符合复杂多变环境的泛在感知能力,实现异构多源传感器异类信息柔性融合的组合运用;另一方面要求对导航信息的处理引入认知科学的理论,以认知导航具有的学习记忆、知识推理以及行为规划等智能导航信息处理能力,实现无人平台在自主选择航迹上的持续性自由行进,达到全自动化运行控制的目标。

近代脑科学研究的进步促进了人工智能理论与技术的发展,也使以类脑的方式实现对人或动物认知导航机制的模拟成为可能,从而加快了在无人化平台发展中引入人工智能技术实现认知导航的步

伐,为机器智能时代的到来做出了技术支撑准备。

2 “向人脑学习”的认知导航实现途径

2.1 机器智能的发展

目前,机器智能系统的实现主要是通过人工智能技术对某种自然智能(比如动物、人)系统的模拟完成。更具体的说,自然智能是机器智能研究的原型,机器智能是对自然智能某种程度的模拟和复制。在具体应用上,通过这样的模拟机制来实现机器系统的智能化是一种直接且有效的方式。纵观整个智能生成机制模拟现状,已有的结构模拟方法、功能模拟方法、行为模拟方法和信息转换机制下模拟方法,它们在考虑机器系统智能化问题时,涉及的核心思想就是对自然智能系统的模拟。同时,目前认知科学领域中涉及的理论、方法、技术手段等也是源于自然智能系统。因此,在无人运行体认知导航的研究中,可以通过对自然智能系统导航机制的模拟来解决其智能自主导航问题。从目前科技的发展状况来看,以类脑空间导航机制研究的形式引入人工智能技术,依托认知导航的实现解决无人化平台智能自主导航控制的问题,无疑能够满足无人机等无人化平台高度自主性运用的要求,从而极大地促进无人机的加速发展。

就自然智能系统而言,大脑内具有一种最复杂、最完美、最有效的信息处理机制,这使得研究者以极大的兴趣去研究它的结构和机理^[7]。近几十年来脑神经科学飞速发展,正在逐步建立起大脑内部的导航信息处理机制,这些进展无论对脑神经科学本身还是对运行体导航领域的发展都将带来巨大而深远的影响,酝酿着重大的突破。而将大脑导航信息处理机制作为原型来实现的认知导航行为,势必会产生较为高级的智能导航行为。

2.2 类脑导航研究的现状

1948年,Tolman^[10]在研究大鼠寻找路径的行为时提出了认知图(Cognitive Map, CM)概念,认为大鼠利用大脑内部形成的某种空间表征来指引自身进行位置估计、路径规划、回避障碍等导航行为,但当时并没能对其进行深入说明。2014年诺贝尔生理学奖获得者约翰·奥基夫(John O'Keefe)^[11-12]、爱德华·莫泽(Edvard Moser)和迈布里特·莫泽(May-Britt Moser)^[13]3人共同揭示了大脑中的空间导航定位系统。他们通过实验发现了与生物导航密切相关的神经细胞:位置细胞(Place Cell, PC)和网格细胞(Grid Cell, GC),如图2所示。位置细胞位于大脑的海马区内,对位置信

息敏感;网格细胞位于大脑的内嗅皮层区,能够感知动物移动过程中的距离信息。所有的位置细胞组成了大脑中的“空间地图”,能够帮助生物确定自身在空间中的位置;所有的网格细胞联合起来构成一个“坐标系”,能够帮助生物完成准确定位和路径整合等任务。后来,随着研究的深入,头朝向细胞(Head Direction Cell, HDC)^[14]、边界细胞(Border Cell, BC)、时间细胞(Time Cell, TC)和速度细胞(Speed Cell, SC)等相继被发现,进一步揭示了啮齿类动物的导航机理,这些细胞的联合作用形成了大脑里精巧的“导航系统”,它像是精密的GPS,实时给出空间导航信息,指导人或动物向计划的目标前进。

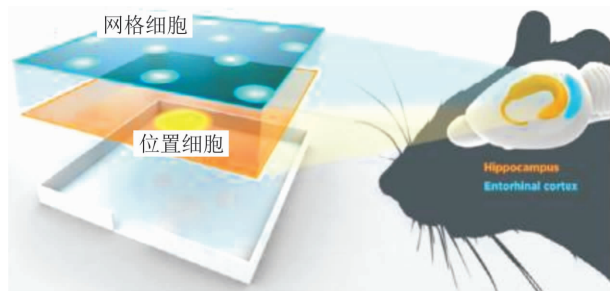


图3 大鼠导航细胞示意图

Fig. 3 The schematic of navigation cells of rat

国内外类脑导航机制研究的成果主要有:研究了网格细胞与位置细胞之间的信息转换机制^[15-17];研究了网格细胞和位置细胞的空间导航机理^[18-19];提出了多种基于网格细胞和位置细胞的空间导航模型^[20-22]。作者所带领的团队^[23-25]对基于网格细胞和位置细胞的类脑导航机理进行了研究,对类脑导航信息处理机制进行了建模仿真,为无人化平台类脑导航系统的构建奠定了基础。2018年英国伦敦的神经科学家和DeepMind的AI研究员^[26],应用深度学习技术训练出了非常类似于大鼠海马区内的网络细胞,证明了类网格表征为智能体提供了空间度量和向量运算,为导航提供基础。这些成果都是基于啮齿类动物大脑中各类导航细胞的放电特性和功能开展的,通过实验分析大鼠的导航机理并拓展出一些应用。

但目前类脑空间导航仅仅是对生物大脑海马结构的机理及结构模拟,即只包含了大脑的微观、介观层面,所实现的导航仅能适应简单环境,智能程度远未达到人类水平。要实现人类水平的智能,需要计算模型能够融合来自微观、介观、宏观多尺度脑结构和信息处理机制的启发。实现跨尺度机制的融合,才能够实质性颠覆现有计算模型,实现有深远影响的原始性创新。

3 实现认知导航需要解决的关键技术

认知导航的关键技术主要有:多源传感器的信息融合技术,认知图构建技术以及智能航迹规划技术等。

3.1 多源传感器的柔性信息融合技术

以多源异构传感器的即插即用、随遇接入、容错重构为目标的柔性信息融合,是实现认知导航环境感知表征、多样化任务使用、抗干扰防欺骗等能力所要解决的首要关键性问题,也是当前全源导航实现面临解决的首要难题,还没有找到有效的途径加以解决。

大脑能够应用感知到的视觉、听觉、嗅觉等外源性信息以及自身产生的内源性信息实时导航,这些信息的处理本质上就是一种多源传感器的柔性信息融合,且这种融合一定具有多维、异构、实时的特点。已有许多科研人员力图在脑神经科学研究成果启发下,以向大脑基于细胞空间信息组织、处理、运用机理进行学习的方式,探索大脑生物组织以神经计算形式进行信息处理的机制表现,在全新的并行处理、快速收敛、全局优化思想基础上,建立起多源传感器类脑神经计算柔性信息融合机制,这无疑能够克服采用传统信息融合技术所面临的时空失配、维数灾难等困难问题。

3.2 认知导航图构建及在未知环境下的利用技术

认知导航图的建立是实现认知导航的另一重要前提。大脑的导航方式可分为在已知环境下的有图导航和在未知环境下的无图导航,而无论哪种方式都需要对所处空间环境进行感知与表征,这相当于是人或动物自主完成的勘察与测绘,据此建立的导航图是一种认知的导航图。构建这种认知导航图,首先就要实现空间环境的有效感知和建模表示。传统的空间环境表征通常采用图形化或栅格化的度量方法,存在着计算复杂、空间和时间消耗大等问题。而大脑中表示空间环境的“认知地图”,虽然只是指示性的、概括的、不精确的环境抽象描述,但它能够很好地模拟复杂的、不确定的、相互关联的事件,信息存储和处理快速有效,且与任务相关。

因此,模拟动物大脑认知地图表示与存储方法,采用包含语法、语义及语用信息的全信息空间环境表征方法实现类脑认知地图构建,以及在未知环境下通过认知导航图的提取和匹配进行同步导航定位,必将突破因超大数据量存储和快速匹配搜索而面临的维数灾难等传统导航技术难以逾越的障碍问题。

3.3 基于语义信息环境的智能在线航迹规划技术

规划航迹是导航控制所必需的决策行为基准,是实施运行控制的决策依据。无人化平台为摆脱操控干预实现自主运行控制,要求能够进行智能在线的航迹规划,即要求在不确定的动态环境下,能够实时调整运行线路,回避攻击威胁、躲避地形障碍等约束条件,以最小的代价、最优的路线、最大的功效完成任务目标。

智能在线航迹规划不仅仅是通常意义上的动态多目标、多约束的实时最优化问题,更是涉及感知、处理、执行一体化的决策控制问题,而大脑处理此类问题正是一体化的智能过程。因此,通过借鉴大脑智能寻路机制,根据构建的类脑空间环境表征与构图方法,以基于类脑认知地图的智能航迹规划及搜索方式,才能满足无人系统自主运行的智能在线航迹规划要求。

4 结语

通过挖掘类脑空间导航的感知信息处理与自主执行机制,以引入人工智能和量子神经计算等技术实现的认知导航,能够建立起集传感器综合、智能信息处理、自主决策控制于一体的智能化的自主导航控制系统新体制,是实现无人化平台在未知环境下自由运行、在多机应用中协同配合、在行动过程中规避风险,达到以人类的智慧、机器的能力执行各种复杂任务的必然要求。

参考文献(References):

- [1] 沈林成,朱华勇,牛轶峰.从 X-47B 看美国无人作战飞机发展[J].国防科技,2013(5):28-36.
SHEN L C, ZHU H Y, NIU Y F. A Survey of Unmanned Combat Aircraft System Development from X-47B [J]. National Defense Science & Technology, 2013(5):28-36. (in Chinese)
- [2] 德俊.“神经元”和法国未来空中作战系统[J].国际航空,2009(8):35.
DE J. Neuron Program and Future French Combat Air System [J]. International Aviation, 2009(8):35. (in Chinese)
- [3] EPSTEIN R A, PATAI E Z, JULIAN J B, et al. The Cognitive Map in Humans: Spatial Navigation and Beyond [J]. Nature Neuroscience, 2017, 20(11): 1504-1513.
- [4] GAUTHIER B, WASSENHOVE W. Cognitive Mapping in Mental Time Travel and Mental Space Navigation [J]. Cognition, 2016, 154: 55-68.
- [5] GUPTA S, DAVIDSON J, LEVINE S, et al. Cogni-

- tive Mapping and Planning for Visual Navigation [J]. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, HI: IEEE, 2017:769.
- [6] 王琳,王亮. 认知地图的神经环路基础[J]. 生物化学与生物物理进展, 2017, 44(3): 187-197. (in Chinese)
WANG L, WANG L. Neural Circuit Basis of Cognitive Map [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2017, 44(3): 187-197. (in Chinese)
- [7] YUAN M L, TIAN B, SHIM V A, et al. An Entorhinal-Hippocampal Model for Simultaneous Cognitive Map Building [C]// Proceedings of the 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence. USA: AAAI Press, 2015: 586-592.
- [8] 于乃功, 苑云鹤, 李侗, 等. 一种基于海马认知机理的仿生机器人认知地图构建方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 52-73.
YU N G, YUAN Y H, LI T, et al. A Cognitive Map Building Algorithm Based on Cognitive Mechanism of Hippocampus [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 52-73. (in Chinese)
- [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.
WU D W, DU J, QI J Y, et al. A New Progress on Intelligent Path Planning of UCAV Cognitive Navigation by Learning from Human Brain [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2014, 15(5): 46-51. (in Chinese)
- [10] TOLMAN E C. Cognitive Maps in Rats and Man [J]. Psychological Review, 1948, 55(4): 189-208.
- [11] O'KEEFE J, DOSTROVSKY J. The Hippocampus as a Spatial Map. Preliminary Evidence from Unit Activity in the Freely-Moving Rat [J]. Brain Research, 1971, 34(1): 171-175.
- [12] O'KEEFE J, BURGE N. Geometrical Determinants of the Place Fields of Hippocampal Neurons [J]. Nature, 1996, 381: 425-428.
- [13] HAFTING T, FYHN M, MOLDEN S, et al. Microstructure of a Spatial Map in the Entorhinal Cortex [J]. Nature, 2005, 436: 801-806.
- [14] KEINATH A T. The Preferred Directions of Conjunctive Grid X Head Direction Cells in the Medial Entorhinal Cortex are Periodically Organized [J]. Plos One, 2016, 11(3): e0152041.
- [15] BUSH D, BARRY C, BURGESS N. What Do Grid Cells Contribute to Place Cell Firing [J]. Trends in Neurosciences, 2014, 37(3): 136-145.
- [16] MUESSING L, HAUSER J, WILLS T J, et al. A Developmental Switch in Place Cell Accuracy Coincides with Grid Cell Maturation [J]. Neuron, 2015, 86(5): 1167-1173.
- [17] KANTER B R, LYKKEN C M, AVESAR D, et al. A Novel Mechanism for the Grid-to-Place Cell Transformation Revealed by Transgenic Depolarization of Medial Entorhinal Cortex Layer II [J]. Neuron, 2017, 93(6): 1480-1492.
- [18] KRIEGESKORTE N, STORRS K R. Grid Cells for Conceptual Spaces [J]. Neuron, 2016, 92(2): 280-284.
- [19] KRAUS B J, BRANDON M P, ROBINSON R J II, et al. During Running in Place, Grid Cells Integrate Elapsed Time and Distance Run [J]. Neuron, 2015, 88(3): 578-589.
- [20] SANDERS H, RENNO-COSTA C, IDIART M, et al. Grid Cells and Place Cells: an Integrated View of Their Navigational and Memory Function [J]. Trends in Neurosciences, 2015, 38(12): 763-775.
- [21] YAN C K, WANG R B, QU J Y, et al. Locating and Navigation Mechanism Based on Place-Cell and Grid-Cell Models [J]. Cognitive Neurodynamics, 2016, 10(4): 353-360.
- [22] RENNO-COSTA C, TORT A B L. Place and Grid Cells in a Loop: Implications for Memory Function and Spatial Coding [J]. Journal of Neuroscience, 2017, 37(34): 8062-8076.
- [23] LI W L, WU D W, DU J, et al. A Biologically Inspired Model Based on a Multi-Scale Spatial Representation for Goal-Directed Navigation [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2017, 11(3): 1477-1491.
- [24] ZHOU Y, WU D W, DU J, et al. A Computational Model for Landmarks Acquisition in Positioning [J]. Journal of Intelligent and Robot Systems, 2016, 82: 537-553.
- [25] ZHOU Y, WU D W. Biologically Inspired Model of Path Integration Based on Head Direction Cells and Grid Cells [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2016, 17(5): 435-448.
- [26] BANINO A, BARRY C, URIA B, et al. Vector-Based Navigation Using Grid-Like Representations in Artificial Agents [J]. Nature, 2018, 557: 429-433.

(编辑: 徐楠楠)