

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.001

仿生导航技术综述

胡小平, 毛 军, 范 晨, 张礼廉, 何晓峰, 韩国良, 范 颖

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 仿生导航技术是一种模仿动物导航机理的新型导航技术, 涉及认知科学、机器学习、计算机视觉和信息融合等多个学科。仿生导航因具有自主性好、自适应性强等特点, 近年来成为了导航领域的研究热点之一。首先阐述了仿生导航的内涵, 然后从仿生导航传感器技术和仿生导航方法两个方面简要介绍了国内外研究现状和发展趋势。其中, 仿生导航传感器技术包括了仿生光罗盘、仿生磁罗盘、仿生复眼等内容; 仿生导航方法主要涉及导航经验知识的表达与机器学习、仿生多源异质导航信息融合、面向任务的仿生路径规划与导航等。最后, 对仿生导航技术进行了总结, 并对未来发展进行了展望。

关键词: 仿生导航; 仿生罗盘; 仿生复眼; 导航经验知识

中图分类号: V249

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)04-0001-10



Bionic Navigation Technology: A Survey

HU Xiao-ping, MAO Jun, FAN Chen, ZHANG Li-lian, HE Xiao-feng, HAN Guo-liang, FAN Ying

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Bionic navigation is a new navigation technology, which draws inspirations from animals in the nature. It is an interdisciplinary research field at the boundary between cognitive science, machine learning, computer vision, information fusion and other techniques. Recently, bionic navigation has received great attention as it is a highly autonomous and adaptive navigation technique. This paper firstly presents a short introduction to bionic navigation, and then reviews the developments and current trends in bionic navigation sensors and bionic navigation methods. The review of bionic navigation sensors includes bionic polarization compass, bionic geomagnetic compass and bionic compound eye. While the review of bionic navigation methods includes navigation knowledge representing and learning, multi-source information fusion and goal-directed path planning and navigation. Lastly, we summarize the development of bionic navigation technology and present some key research topics for further development.

Key words: Bionic navigation; Bionic compass; Bionic compound eye; Navigation knowledge

0 引言

以卫星导航系统为核心的导航定位与授时体

系在国防和国民经济发展中发挥着不可或缺的支持作用。众所周知, 卫星导航信号易受干扰, 过分地依赖卫星导航在战时将面临巨大的风险。因此,

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(61773394, 61573371)

作者简介: 胡小平(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导航、制导与控制技术方面的研究。E-mail: xphu@nudt.edu.cn

如何提升各类运动体在卫星导航信号拒止环境下的自主导航能力,是目前导航领域面临的重大挑战。近年来,仿生导航、视觉/惯性组合导航、全源导航等多种新型自主导航技术逐渐成为研究热点,以期为解决目前导航领域面临的相关难题提供新的技术途径。

仿生导航是一项多学科交叉融合的新型自主导航技术。动物行为学和生理学的研究成果以及人工智能、微纳米制造、高性能芯片、计算机视觉等相关技术的发展为研究仿生导航技术提供了有力支撑。本文从仿生导航的内涵、仿生导航传感器技术、仿生导航方法等方面简要介绍了国内外研究现状和发展趋势。

1 仿生导航的内涵

大自然中许多动物具有惊人的导航本领,例如:北极燕鸥每年往返于南、北两极地区,旅程达 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ km}$,从不迷航;信鸽能够在距离饲养巢穴数百 km 远的陌生地方,顺利返回巢穴;美洲的黑脉金斑蝶每年秋季从加拿大飞到墨西哥,行程约 4800 km,却从不迷路。

在 19 世纪 40 年代, Tolman 发现在迷宫实验中的老鼠能够迅速地找到通往食物的捷径,并且当熟悉路径被阻挡后能够找到新的路径^[1]。据此, Tolman 提出了认知地图的概念,认为认知地图中包含有产生复杂导航行为的经验知识^[2]。从目前生物学的研究成果可知,动物导航经验信息的信息源主要包括视觉、运动感知、地磁、天空偏振光以及声觉和嗅觉等。神经学领域的研究还发现了多种与动物导航行为密切相关的功能性神经细胞,包括位置细胞^[3-4]、网格细胞^[5-6]、头朝向细胞^[7-8]等。最新研究还表明,多个位置细胞的联合激活机制与动物认知运动环境的拓扑结构以及拓扑空间中的路径规划有关^[9-10]。虽然现有研究还没有完全解释大脑神经活动与动物导航行为之间的相互作用机制,但相关研究成果仍然开阔了人类对动物导航方式的理解。

对昆虫^[11]和鸟类^[12-13]等动物导航行为的研究成果也为仿生导航技术提供了丰富的参考。对信鸽返巢行为的研究发现:将同一信鸽在同一地点多次释放后,虽然它们每次的返巢路线都各不相同,但都经过某些相同的地标节点(如图 1 所示)^[12];并且,这些地标节点往往具有明显的地理特征信

息^[13]。信鸽的返巢路线可以看成是将这些地标节点按某种方式连通的拓扑导航路线图。国内有的学者将信鸽与候鸟的这种导航行为抽象为“航向约束+环境感知+学习推断”的导航模式^[14-15],他们认为“航向约束+环境感知”是靠器官与大脑的联动来实现的,学习推断结果的正确与否是靠导航经验知识与导航决策机制的共同作用来保证的。

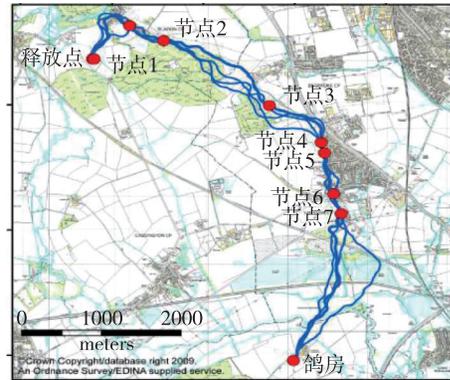


图 1 信鸽回巢路线示意图(图片来源于文献[12])

Fig. 1 The homing trajectories of a pigeon
(Reproduced from [12])

仿生导航,顾名思义是一种“模仿+借鉴”动物导航本领的新的导航技术。传统导航技术大多数情况是在几何空间内研究导航问题,关注于对导航参数的精确测量。然而,自然界中大多数动物往往不具备对导航参数精确测量的能力,但它们仍然能够完成各种复杂的导航任务。

与常用的导航技术相比,除了导航传感器层面的差别外,仿生导航技术最大的特点是可以综合利用几何空间内的导航信息与拓扑空间内的导航经验知识、导航拓扑空间关键节点的引导指令等,从而得到面向任务的导航指令集,然后按照某种导航模式(例如,“航向约束+环境感知+学习推断”的节点递推导航模式)引导载体运动。根据需要,可以将多个不同类型的仿生导航传感器进行组合,也可以将仿生导航传感器与其他导航传感器(例如,惯性传感器)组合,构成混合式仿生导航系统。

2 仿生导航传感器技术

仿生导航传感器包括仿生光罗盘、仿生磁罗盘、仿生复眼等,这些导航传感器借鉴了动物器官感知自然环境形成导航信息的机理和大脑内导航细胞处理信息的机制,可以将自然界的光、磁和场景特征等信息源转化为载体运动的航向、位置、速

度、姿态等导航信息,具有全自主、抗干扰、测量误差不会随时间积累等特点。

2.1 仿生光罗盘技术

仿生光罗盘是一种通过借鉴动物视觉器官感知太阳偏振光信息(包括月光)的机理,以获得载体航向信息的传感器。其基本工作原理是:通过偏振光传感器测量天空的偏振信息,根据天空观测点处偏振光的最大E矢量振动方向垂直于由观测者、天空观测点以及太阳所构成的观测平面的特殊几何关系,结合时间、观测位置和太阳星历,解算出载体的航向角。

2000年,Lambrinos等采用光电二极管,研制了一种模仿昆虫偏振光敏感单元的点测量式仿生光罗盘^[16]。此后,大连理工大学褚金奎教授课题组对这种结构的偏振光罗盘进行了改进,并提出了一种新的定向算法^[17-18]。中北大学刘俊教授团队分别研制了四通道和六通道的点测量式偏振光罗盘,并对传感器标定方法进行了深入分析^[19-20]。国防科技大学胡小平教授团队研制了六通道点测量式仿生光罗盘^[21]和基于相机的面测量式仿生光罗盘^[22-23],并对光罗盘定向算法^[24-25]和光罗盘/多传感器组合导航方法进行了深入研究^[26-29]。仿生光罗盘的国内外发展概况如图2所示。

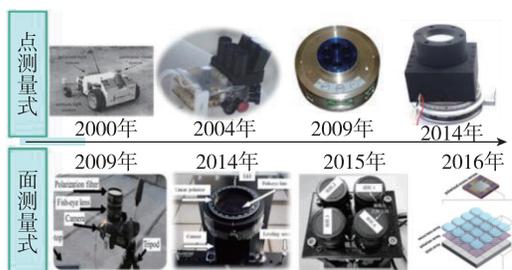


图2 国内外仿生光罗盘技术发展概况

Fig. 2 The development of the polarization compass

仿生光罗盘与传统的航向传感器相比,具有抗干扰性强、误差不随时间积累、易于微型化等优点,主要缺点是定向精度受天空能见度影响较大。目前,对仿生光罗盘技术的研究主要集中在大气偏振模式建模^[30]、传感器误差机理分析与补偿方法^[31-32]、偏振光定向算法^[24-25, 32]、像素化偏振成像专用芯片技术、微型化集成技术、全天候复杂天空背景自适应技术^[26]等方面。其中,像素化偏振成像专用芯片和微型化集成技术是研究的热点和难点。

从原理上考虑,偏振光相机既可以用于偏振成像^[24],也可以作为偏振光罗盘使用^[33]。但应该指出的是,采用偏振光相机作为航向传感器,有些大材小用,也不利于偏振光罗盘的微型化和低成本。从已查到的文献资料来看,目前还没有有一款微型化的偏振光罗盘样机问世。

2.2 仿生磁罗盘技术

信鸽视网膜上的光敏分子易受光的激发,形成单重态和三重态的自由基对。当外界磁场介入后,会影响单重态和三重态分子的转换速率,这样就建立了磁场和光信息转换的关系^[34](如图3所示);此外,信鸽上喙及内耳结构中喇叭状的非晶铁质层能够对微弱的地磁信号进行集聚放大,从而实现对微弱地磁信号的感知^[35]。现有仿生磁罗盘的基本工作原理也有两类:一类是基于自由基对磁敏感机理,设计制造自由基对磁敏感单元,实现高灵敏地磁场检测;另一类是基于非晶铁质涂层和链状磁片的磁敏感效应,利用高磁导率材料加工磁性集聚结构进行增敏,实现大量程高精度地磁场测量。仿生磁罗盘具有灵敏度高、全天候全区域、易于微型化等优点,主要缺点是易受电磁干扰。

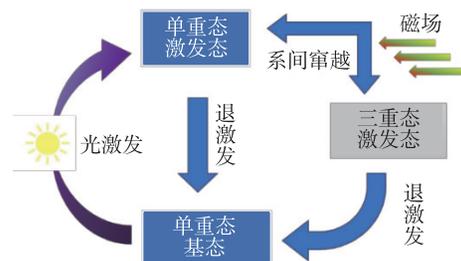


图3 自由基对磁敏感原理示意图

Fig. 3 Illustration of the radical-pair-based magnetoreceptor

目前,对仿生磁罗盘技术的研究主要集中在自由基对及铁磁颗粒团簇地磁敏感机理^[36-37]、量子磁光效应敏感材料制备工艺、磁矢量测量技术、传感器误差机理分析与补偿方法、微型化集成技术等方面。

需要指出的是,如果将仿生光罗盘与仿生磁罗盘以及微惯性测量单元(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)组合^[29],进行小型化、一体化集成设计,构成仿生复合罗盘,可以实现优势互补,显著增强仿生航向传感器的整体性能,并且还可以增加概略定位功能(定位精度在几十 km 量级)^[38]。

2.3 仿生复眼技术

研究发现,昆虫复眼是由成千上万个结构和功能相同的子眼构成的一种特殊成像系统。以曲面阵列方式排列的子眼视场角度能够达到全视场,使得复眼在环境感知方面有着独特的优势。仿生复眼是借鉴昆虫的视觉器官感知光流和环境特征信息的机理,测量载体姿态、速度和位置等导航参数的传感器,其基本工作原理是:通过多个面向不同方向的孔径,对大视场内的场景进行成像,然后集成到同一探测器上进行图像输出。在此基础上,通过仿生光流和场景识别等算法,获得载体的运动速度和在环境中的相对位置等信息。仿生复眼系统具有体积小、视场大、畸变小、孔径多、灵敏度高、动态范围高等优点。

目前,国内外已经提出了多种仿生复眼设计方案。2007年,Radtke等提出了一种球面仿生复眼结构^[39];Julia等则实现了一种可在晶圆上进行加工构建的复眼系统,有效降低了复眼尺寸^[40];受节肢动物复眼结构的启发,Song等在2013年研发出了一款近半球面形的仿生复眼^[41];Voillet等在圆柱面上集成了630个小眼,实现了大视场成像效果^[42];Xiao采用了可伸展的硅基光电探测器,成功集成了包含180个小眼的半球面状复眼传感器^[43];Hao结合了昆虫复眼结构和人类视觉器官结构,研制了一种混合型的仿生复眼系统^[44]。仿生复眼传感器的发展概况如图4所示。当前,仿生复眼传感器已进入实用阶段,例如美国的新一代无人机“蜂鸟”上就配备了一部18亿像素的高分辨率复眼相机。

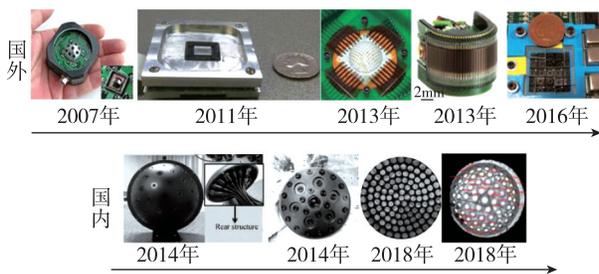


图4 国内外复眼传感器技术发展概况

Fig. 4 The development of the artificial compound eye

目前,对仿生复眼技术的研究主要集中在仿生复眼结构设计与实现^[45]、微光学耦合成像工艺^[46]、图像校正和高动态/超分辨率方法^[47]等;仿生复眼未来的发展趋势有快速/高精度运动测量、仿生复眼

系统小型化设计与集成制造技术等方面。

3 仿生导航方法

仿生导航方法主要涉及导航经验知识的表达与机器学习、多源异质导航信息柔性融合和面向任务的仿生路径规划与导航等方面。

3.1 导航经验知识的表达与机器学习方法

经验知识是动物完成各项复杂导航任务的重要基础。例如,在迷宫实验中的老鼠随着导航经验知识的积累,能够迅速找到最佳觅食路径^[1]。信息源是提炼经验知识的基础,离线或在线获取的经验数据已广泛地应用于现有导航系统中。例如,离线构建的街景图^[48]、道路网络图^[49]、卫星地图^[50]等可以为无人车、无人机的自主定位与导航提供丰富的先验参考信息。在未知环境中,则可以通过存储在线获取的环境感知数据作为导航经验知识^[51]。然而,现有导航方法在经验知识的表达、组织和应用方面都与动物相差甚远。

动物对导航经验知识的表达方法具有较好的鲁棒性,它们能够在复杂环境下使用视觉地标和天空偏振态等进行导航。在基于视觉的导航经验知识表达方面,虽然研究者们采用了多种基于手工设计的视觉特征表达方法^[52],但这些表达方法仍易受到光照、视角和季节变化等因素的影响。近年来,有研究者采用机器学习的方法,例如支持向量机^[53]和卷积神经网络^[15]等技术,对视觉经验的表达方法进行了学习,并展现出了良好的特征表达鲁棒性。除视觉信息以外,天空偏振光、地磁等也是动物导航经验知识的重要来源。但当前对地磁和偏振光的研究大多集中于仿生传感器方面,对基于地磁和偏振光的经验知识表达与学习研究则相对缺乏。

动物能够对经验知识之间的相互关系进行学习和表达,形成可供自主导航使用的经验知识图谱。Cummins等采用无监督学习方法,构建了视觉特征之间的概率依赖树,并根据特征之间共同出现的概率来判断载体位置^[76]。认知科学研究表明,动物的认知地图中采用了拓扑图的形式对经验知识进行组织和表达^[9, 54]。利用拓扑图表达经验知识之间的空间关系不仅符合高等动物的认知,还可以有效降低路径规划中的搜索空间,提升路径规划算法的实时性。然而,现有导航拓扑图大多是基于环境中天然的拓扑结构进行构建的,例如,道路网络图^[49]、室内平面图^[55]等。基于位置细胞、网格细胞

等构建的类脑导航模型也可以构建出二维平面环境的导航拓扑图,但相关研究仅处于仿真验证阶段^[56]。当前,对面向无人机等在三维开放空间中运动的导航拓扑图研究则相对较少。

此外,有学者认为导航经验知识还包括知识推理机制,这种推理机制能够迅速找到通往目标点的捷径或安全路线^[15, 57]。值得关注的是,关于图网络方面的研究为导航经验知识表达与知识推理提供了新的思路。图神经网络不仅能够学习各知识节点和节点连通边的表达方法,还能够解决最短路径规划等推理问题^[57]。最近,Chen 等首次实现了基于图神经网络的自主导航与定位^[58]。

3.2 仿生多源异质导航信息融合方法

无论是动物还是移动载体,在导航过程中都需要对自身的运动状态进行估计,鲁棒、准确的导航状态估计往往需要对多种导航信息进行融合。在传统导航系统中广泛使用的信息融合方法有卡尔曼滤波器、粒子滤波器等。这些方法具有较好的导航参数估计精度,但需要建立准确的数学模型,且对融合信息的时间同步关系、空间标定关系、噪声特性等有一定要求。与此相比,许多动物虽然不具备精确估计导航参数的能力,但却展现出惊人的自主导航能力,这与它们优秀的多源异质导航信息融合能力紧密相关。

神经科学领域的研究成果部分揭示了动物的多源异质导航信息融合机制。Milford 等基于吸引子网络模型,构建了包含位置细胞和方向细胞模型的 RatSLAM 算法,实现了对路径积分信息和视觉重定位信息的有效融合^[59]。虽然该方法采用了精度较低的路径积分模块和低维度的视觉特征模板,但仍然在室外大范围实验中展现出了优异的建图与定位性能。网格细胞是位置细胞的主要输入,据此研究者们将多尺度的网格细胞通过竞争学习^[60-61]或干涉模型^[14]激活位置细胞,形成对位置的鲁棒估计。此外,通过构建三维吸引子网络和多层级方向细胞,可以实现在三维空间中对路径积分和视觉重定位信息的有效融合^[62]。

人工神经网络具有与生物神经元类似的连接结构,因此也被认为是一种仿生信息处理方式。深度神经网络通过大量的神经元和复杂的连接关系,可以实现复杂的信息处理功能。2017 年,Ronald 提出了 VINet 深度网络结构,首次实现了视觉/惯性组合里程计功能^[63]。后续,研究者们提出了多种

改进神经网络结构,对视觉/惯性^[64]、雷达/视觉/惯性^[65]等多源异质信息进行了有效融合,并展现出了与基于传统卡尔曼滤波的组合方法相近的导航参数估计精度。在复杂环境和传感器噪声模型未知等条件下,基于神经网络的信息融合方法比传统组合方法展现出了更为优异的鲁棒性。然而,神经网络高度依赖于训练数据,当传感器特性或测量数据与训练数据有较大差异时,基于神经网络的组合导航精度也会随之下降。如何有效结合神经网络在信息融合鲁棒性方面的优势以及模型类方法在精度和模型解释性等方面的优势成为了当前的研究热点之一。近年来,有研究者提出了多种与卡尔曼滤波器相似的信息融合神经网络结构,以发挥两类方法在多源异质信息融合中的优势^[66]。

3.3 面向任务的仿生路径规划与导航方法

路径规划是在一定的约束条件下,根据载体当前状态和目标状态,寻找最优路径的过程。传统导航方法中,常用的路径搜索方法有 A* 搜索算法^[67]和 Dijkstra 搜索算法^[68]等。在大范围路径规划中,由于搜索空间维度较高,传统路径搜索方法所需的计算资源和时间成本较高。与此相比,动物的导航行为具有明显的目标导向(goal-directed)特点,即能够根据特定导航任务快速规划出运动路径。

偏振光导航是在自然界中发现的一种典型的面向任务的导航方式。研究发现,沙漠蚂蚁在觅得食物后,可以从距离巢穴数百米的地方几乎沿直线准确返回。目前,研究者们认为蚂蚁融合了从偏振光获取的航向信息和计步/光流中提取的距离信息进行路径积分;然后根据路径积分结果估计指向蚁穴的返回向量,当到达蚁穴附近时则依靠熟悉的地标特征引导。Lambrions 等首次在轮式移动平台上实现了这种仿沙漠蚂蚁的偏振光导航方式^[16];褚金奎等基于自研的偏振光罗盘,在两轮移动平台上实现了仿生偏振光自主导航^[69];Julien 等利用多足机器人的计步信息和 2 个由 14 个像素组成的偏振光罗盘进行了自主导航实验,结果表明该多足机器人具有与沙漠蚂蚁相似的导航行为^[70]。当前,已有的仿生偏振光导航案例都应用于地面移动平台。而蜜蜂、蜻蜓等飞行昆虫也利用偏振光进行导航,研究适用于小型无人机的仿生偏振光导航具有重要的应用前景。

信鸽等动物能够认知导航环境的拓扑结构,并根据拓扑地图进行面向任务的节点递推导航(如图

1所示)。节点递推导航具有重要的应用价值,当导航系统的精度不足以直接将载体从起始点引导至终点时,载体可以按顺序经过多个节点,并利用节点中的经验知识(如已知的地标特征等)校正导航误差,提升到达目标点的置信度。位置细胞的联合激活特性被认为与动物的节点递推导航方式密切相关^[9-10]。基于位置细胞特性,Erdem构造了类脑细胞计算模型,并在仿真环境下实现了节点递推路径规划,然而该模型仅停留在仿真验证阶段^[56, 71]。视觉信息是影响位置细胞充放电活动的主要因素之一^[72],因此有研究者将离散分布的地标特征构建为拓扑节点,并采用人为设计的连接规则构建节点之间的连通边,然后采用图搜索的方法进行自主导航^[73]。在动物的认知地图中,不同节点中的经验知识是如何进行关联的这一机理还没有被人类揭示,但信鸽的返巢路线表明几何空间中相隔较远的节点区域在拓扑空间中也存在连通边。分析认为,这是因为信鸽能够借助偏振光、地磁等提供的航向约束信息飞越几何空间中不相邻的节点区域。据此,有研究者提出了根据导航系统的航向保持精度指标构建拓扑节点之间的连通边;在节点递推导航过程中,则依靠航向约束飞越拓扑空间中的相邻节点^[15]。

面向任务的导航方法也可以描述为一个学习推断过程。动物能够在日常的导航任务中不断地积累经验知识,当环境发生变化或导航任务发生变化时,它们仍然能够根据经验知识采取灵活的导航策略到达目标点。采用机器学习技术对面向任务的运动策略进行学习已成为当前的研究热点之一。唐华锦等构建了一种循环脉冲神经网络,用于模拟大脑学习导航经验的过程,并成功运用于实际移动平台小范围的自主导航中^[74]。DeepMind的研究人员通过深度学习技术,使神经网络中的神经元具有与导航细胞类似的激活特性;据此,他们还采用了强化学习方法对面向任务的自主导航策略进行学习(如图5所示)^[75],在仿真环境中,通过学习得到的导航策略能够迅速找到高效通往目标点的路径。最新研究还表明,大脑中也存在强化学习机制,并且动物进行导航推断的知识图谱结构与其他任务的经验知识图谱(例如,推断人际关系的知识图谱)可能是同一知识图谱,只是应用实体有所不同^[54]。

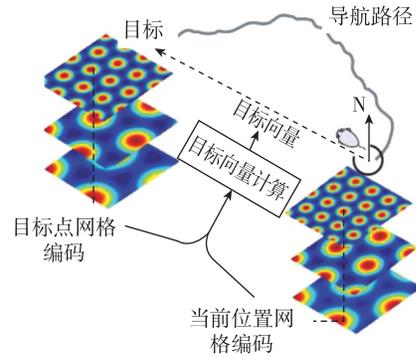


图5 面向任务的仿生导航方法示意图(图片来源于文献[75])

Fig. 5 Schematic of vector-based bio-inspired navigation

(Reproduced from [75])

4 总结与展望

仿生导航技术是导航领域未来发展的新方向,也是当前的研究热点之一。各种仿生导航传感器的研制丰富了导航系统的感知能力;仿生导航方法的发展则为解决当前所面临的导航难题提供了新的技术途径。目前,国内外仿生导航技术研究方兴未艾。2019年,美国波士顿大学、澳大利亚墨尔本大学等联合研究的 Neuro-Autonomy 项目获得了美国海军研究院 750 万美元的资助,以期在动物导航神经活动、导航知识表示、自主导航与控制等方面进行突破,构建可在非结构化环境和未知环境中自主移动的无人平台;美国能源部资助斯坦福研究中心的 BrainSLAM 项目关注于构建仿类脑模型的同时建图与定位技术;DeepMind 公司则聚焦于基于机器学习技术的仿生导航系统,以期实现灵活自主的导航功能。

展望未来,仿生导航技术需要在导航传感器与导航方法 2 个方面进行突破:

1) 现有仿生导航传感器虽然实现了对相应感知信息的测量,但在信噪特性、功耗体积等方面都与动物器官存在较大差距,还需进一步对动物器官的感知机理、传感器结构设计、传感器加工工艺等方面进行深入研究。此外,基于仿生传感器的导航信息提取算法也是研究重点之一,研究鲁棒性好、自适应性强、精度高的仿生光罗盘定向算法、仿生光流运动估计算法、光磁复合定向算法等可为仿生导航系统提供可靠的导航信息。

2)目前,动物的导航机理还没有完全被人类所理解。研究认为,大脑中位置细胞、网格细胞等导航细胞的充放电活动与动物的视觉、嗅觉和路径积分等信息密切相关。然而,器官感知信息驱动导航细胞活动的具体机制还没有被完全揭示;大脑中各种不同的导航细胞是如何相互作用、协同工作,进而产生各种灵活高效的导航行为的过程也还有待进一步探究。为解决上述问题还需要在认知学、动物行为学、机器学习等领域开展交叉研究。近年来,将动物导航机理与机器学习技术相结合,研究智能化的仿生导航技术逐渐成为新的发展趋势。深度神经网络中复杂的神经元连接关系,可用于模拟大脑导航细胞的空间编码、知识学习、信息融合和导航推断等机制。深度学习技术为构建智能的仿生导航系统提供了新的技术手段;同时,动物导航过程中的神经活动和认知机理则为孕育出新的机器学习方法提供了基础。例如,最新研究表明,与导航密切相关的大脑前额皮层中的学习推断过程可以用元强化学习进行描述^[77]。

参考文献

- [1] Tolman E C, Honzik C H. Introduction and removal of reward, and maze performance in rats[J]. University of California Publications in Psychology, 1930 (4): 257-275.
- [2] Tolman E C. Cognitive maps in rats and men[J]. Psychological Review, 1948, 55 (4): 189.
- [3] O'Keefe J. Place units in the hippocampus of the freely moving rat [J]. Experimental Neurology, 1976, 51(1): 78-109.
- [4] O'Keefe J, Burgess N. Dual phase and rate coding in hippocampal place cells: theoretical significance and relationship to entorhinal grid cells[J]. Hippocampus, 2005, 15(7): 853-866.
- [5] Hafting T, Fyhn M, Molden S, et al. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex[J]. Nature, 2005, 436(7052): 801.
- [6] Moser E I, Moser M B. A metric for space[J]. Hippocampus, 2008, 18(12): 1142-1156.
- [7] Giocomo L M, Stensola T, Bonnevie T, et al. Topography of head direction cells in medial entorhinal cortex[J]. Current Biology, 2014, 24(3): 252-262.
- [8] Taube J S, Muller R U, Ranck J B. Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis [J]. Journal of Neuroscience, 1990, 10(2): 420-435.
- [9] Javadi A H, Emo B, Howard L R, et al. Hippocampal and prefrontal processing of network topology to simulate the future [J]. Nature Communications, 2017(8): 14652.
- [10] Pfeiffer B E, Foster D J. Hippocampal place-cell sequences depict future paths to remembered goals[J]. Nature, 2013, 497(7447): 74-79.
- [11] Zeil J. Visual homing: an insect perspective[J]. Current Opinion in Neurobiology, 2012, 22 (2): 285-293.
- [12] Mann R, Freeman R, Osborne M, et al. Objectively identifying landmark use and predicting flight trajectories of the homing pigeon using Gaussian processes [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 55 (8): 210-219.
- [13] Guilford T, Biro D. Route following and the pigeon's familiar area map [J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(2): 169-179.
- [14] 马涛. 基于位置约束和航向约束的仿生导航方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
Ma Tao. Research on position and orientation constraints based bio-inspired navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016(in Chinese).
- [15] 毛军. 面向空中和地面无人平台的仿生节点递推导航方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2019.
Mao Jun. Bio-inspired topological navigation for ground and aerial unmanned vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019(in Chinese).
- [16] 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.
- [17] Zhao K, Chu J, Wang T, et al. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [18] Chu J, Zhao K, Zhang Q, et al. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 148(1): 75-82.
- [19] 王晨光, 唐军, 杨江涛, 等. 仿生偏振光检测系统的设计与实现[J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 260-265.
Wang Chenguang, Tang Jun, Yang Jiangtao, et al. Design and implementation of bionic polarized light detection system[J]. Semiconductor Optoelectronics,

- 2016, 37(2): 260-265(in Chinese).
- [20] 刘俊, 唐军, 申冲. 大气偏振光导航技术[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(2): 1-6.
Liu Jun, Tang Jun, Shen Chong. Atmospheric polarization navigation technology[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(2): 1-6(in Chinese).
- [21] Xian Z, Hu X, Lian J, et al. A novel angle computation and calibration algorithm of bio-inspired sky-light polarization navigation sensor[J]. Sensors, 2014, 14(9): 17068-17088.
- [22] Fan C, Hu X, Lian J, et al. Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization navigation sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(10): 3640-3648.
- [23] Wang Y, Hu X, Lian J, et al. Design of a device for sky light polarization measurements[J]. Sensors, 2014, 14(8): 14916-14931.
- [24] Wang Y, Hu X, Lian J, et al. Bionic orientation and visual enhancement with a novel polarization camera[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1316-1324.
- [25] Fan C, Hu X, He X, et al. Multicamera polarized vision for the orientation with the skylight polarization patterns[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 1.
- [26] Wang Y, Hu X, Zhang L, et al. Polarized light compass-aided visual-inertial navigation under foliage environment[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(17): 5646-5653.
- [27] Xian Z, He X, Lian J, et al. A bionic autonomous navigation system by using polarization navigation sensor and stereo camera[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(5): 1107-1118.
- [28] Fan C, Hu X, He X, et al. Integrated polarized skylight sensor and MIMU with a metric map for urban ground navigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(4): 1714-1722.
- [29] He R, Hu X, Zhang L, et al. A combination orientation compass based on the information of polarized Skylight/Geomagnetic/MIMU[J]. IEEE Access, 2019(8): 10879-10887.
- [30] Zhao H, Xu W, Zhang Y, et al. Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28589-28603.
- [31] 张欢, 徐军. 偏振光导航误差分析[J]. 导航定位学报, 2015(1): 33-35, 40.
Zhang Huan, Xu Jun. The analysis on bias of polarized navigation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015(1): 33-35, 40(in Chinese).
- [32] 王玉杰, 胡小平, 练军想, 等. 仿生偏振光定向算法及误差分析[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 211-216.
Wang Yujie, Hu Xiaoping, Lian Junxiang, et al. Algorithms and error analysis of bionic orientation based on polarized light[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(2): 211-216(in Chinese).
- [33] 张文静, 马龙, 赵立双, 等. 基于微偏振阵列成像的实时天空偏振光导航[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2): 9-11, 15.
Zhang Wenjing, Ma Long, Zhao Lishuang, et al. Real-time sky polarized light navigation based on micropolarized array imaging[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(2): 9-11, 15(in Chinese).
- [34] Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds[J]. Biophysical Journal, 2000, 78(2): 707-718.
- [35] Fleissner G, Holtkamp-Rötzler E, Hanzlik M, et al. Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons[J]. Journal of Comparative Neurology, 2003, 458(4): 350-360.
- [36] Yan L, Tao S. Avian magnetoreception model realized by coupling a magnetite-based mechanism with a radical-pair-based mechanism[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 048701.
- [37] Stoneham A M, Gauger E M, Porfyrakis K, et al. A new type of radical-pair-based model for magnetoreception[J]. Biophysical Journal, 2012, 102(5): 961-968.
- [38] 褚金奎, 时超, 王寅龙, 等. 偏振光实时定位系统的设计[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 308-315.
Chu Jinkui, Shi Chao, Wang Yinlong, et al. Design of polarized light real-time positioning system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 308-315(in Chinese).
- [39] Radtke D, Duparré J, Zeitner U D, et al. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3067-3077.
- [40] Meyer J, Brückner A, Leitel R, et al. Optical cluster eye fabricated on wafer-level[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17506-17519.
- [41] Song Y M, Xie Y, Malyarchuk V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. Nature, 2013, 497(7447): 95-99.
- [42] Viollet S, Godiot S, Leitel R, et al. Hardware archi-

- ture and cutting-edge assembly process of a tiny curved compound eye[J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 21702-21721.
- [43] Xiao J, Song Y M, Xie Y, et al. Arthropod eye-inspired digital camera with unique imaging characteristics[C]// *International Society for Optics and Photonics, SPIE Defense + Security*, 2014: 90831L.
- [44] Hao Q, Wang Z, Cao J, et al. A hybrid bionic image sensor achieving FOV extension and foveated imaging [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1042.
- [45] 郝永平, 李伦. 仿生复眼结构设计及其成像系统研究新进展[J]. *激光与红外*, 2015(12): 1407-1412.
Hao Yongping, Li Lun. New progress in structure design and imaging systems of artificial compound eye [J]. *Laser & Infrared*, 2015(12): 1407-1412(in Chinese).
- [46] Li Z, Xiao J. Mechanics and optics of stretchable elastomeric microlens array for artificial compound eye camera[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(1): 014904.
- [47] Lee W B, Jang H, Park S, et al. COMPU-EYE: a high resolution computational compound eye[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2013-2026.
- [48] Majdik A L, Verda D, Albers-Schoenberg Y, et al. Air-ground matching: appearance-based GPS-denied urban localization of micro aerial vehicles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(7): 1015-1039.
- [49] Brubaker M A, Geiger A, Urtasun R. Map-based probabilistic visual self-localization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(4): 652-665.
- [50] Chiu H P, Das A, Miller P, et al. Precise vision-aided aerial navigation [C]// *Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, 2014: 688-695.
- [51] Churchill W, Newman P. Practice makes perfect? managing and leveraging visual experiences for lifelong navigation[C]// *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012: 4525-4532.
- [52] Garcia-Fidalgo E, Ortiz a. Vision-based topological mapping and localization methods: a survey[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 64: 1-20.
- [53] Linegar C, Churchill W, Newman P. Made to measure: bespoke landmarks for 24-hour, all-weather localisation with a camera[C]// *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, 2016: 787-794.
- [54] Behrens T E, Muller T H, Whittington J C, et al. What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior[J]. *Neuron*, 2018, 100(2): 490-509.
- [55] Dayoub F, Duckett T. An adaptive appearance-based map for long-term topological localization of mobile robots[C]// *Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 3364-3369.
- [56] Erdem U M, Hasselmo M. A goal-directed spatial navigation model using forward trajectory planning based on grid cells[J]. *European Journal of Neuroscience*, 2012, 35(6): 916-931.
- [57] Battaglia P W, Hamrick J B, Bapst V, et al. Relational inductive biases, deep learning, and graph networks[J]. *arXiv preprint arXiv:1806.01261*, 2018.
- [58] Chen K, De Vicente J P, Sepulveda G, et al. A behavioral approach to visual navigation with graph localization networks[J]. *arXiv preprint arXiv:1903.00445*, 2019.
- [59] Milford M J, Wyeth G F. Mapping a suburb with a single camera using a biologically inspired SLAM system[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(5): 1038-1053.
- [60] 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 Naigong, Yuan Yunhe, Li Ti, et al. A cognitive map building algorithm by means of cognitive mechanism of hippocampus[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(1): 52-73(in Chinese).
- [61] Yuan M, Tian B, Shim V A, et al. An entorhinal-hippocampal model for simultaneous cognitive map building[C]// *Proceedings of 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015.
- [62] Yu F, Shang J, Hu Y, et al. NeuroSLAM: a brain-inspired SLAM system for 3D environments[J]. *Biological Cybernetics*, 2019, 113(5-6): 515-545.
- [63] Clark R, Wang S, Wen H, et al. Vinet: visual-inertial odometry as a sequence-to-sequence learning problem[C]// *Proceedings of 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2017.
- [64] Chen C, Rosa S, Miao Y, et al. Selective sensor fusion for neural visual-inertial odometry [C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019: 10542-10551.
- [65] Chen C, Rosa S, Lu C X, et al. SelectFusion: a generic framework to selectively learn multisensory fusion[J].

- arXiv preprint arXiv:1912.13077, 2019.
- [66] Chen C, Lu C X, Wang B, et al. DynaNet: neural Kalman dynamical model for motion estimation and prediction[J]. arXiv preprint arXiv:1908.03918, 2019.
- [67] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
- [68] Cormen T, Leiserson C, Rivest R, et al. Introduction to algorithms(3rd Edition)[M]. The MIT Press, 2009.
- [69] Chu J, Wang H, Chen W, et al. Application of a novel polarization sensor to mobile robot navigation [C]// Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), 2009.
- [70] Dupeyroux J, Serres J R, Viollet S. AntBot: a six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(27): eaau0307.
- [71] Erdem U M, Milford M J, Hasselmo M E. A hierarchical model of goal directed navigation selects trajectories in a visual environment[J]. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2015, 117: 109-121.
- [72] Ravassard P, Kees A, Willers B, et al. Multisensory control of hippocampal spatiotemporal selectivity[J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1342-1346.
- [73] Augustine M, Ortmeier F, Mair E, et al. Landmark-tree map: a biologically inspired topological map for long-distance robot navigation[C]// Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO), 2012: 128-135.
- [74] Tang H, Yan R, Tan K C. Cognitive navigation by neuro-inspired localization, mapping, and episodic memory[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2017, 10(3): 751-761.
- [75] Banino A, Barry C, Uria B, et al. Vector-based navigation using grid-like representations in artificial agents[J]. *Nature*, 2018, 557(7705): 429.
- [76] Cummins M, Newman P. FAB-MAP: probabilistic localization and mapping in the space of appearance [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(6): 647-665.
- [77] Wang J X, Kurth-Nelson Z, Kumaran D, et al. Prefrontal cortex as a meta-reinforcement learning system[J]. *Nature Neuroscience*, 2018, 21: 860-868.