

DOI: 10.3901/JME.2019.23.001

定位细胞认知机理启发的机器人导航研究综述*

丛明^{1,2} 邹强¹ 刘冬^{1,2} 杜宇³

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024;

2. 大连理工江苏研究院有限公司 常州 213164;

3. 大连大华中天科技有限公司 大连 116023)

摘要: 快速准确完成目标导航是哺乳动物赖以生存的一个重要能力,海马体和内嗅皮层是实现其空间认知及导航能力的主要脑区,网格细胞和位置细胞等多细胞的协同作用可以为大脑提供一套综合定位系统,实现了哺乳动物更高水平的认知功能。综述了哺乳动物海马相关定位细胞在机器人自主导航领域的最新研究进展,重点介绍了定位细胞认知机理启发的机器人环境建模、地图构建及行为规划与控制等领域的研究成果。最后对定位细胞启发机器人应用存在的问题进行分析和讨论,并对未来发展方向做了展望。

关键词: 定位细胞; 环境建模; 地图构建; 行为规划

中图分类号: TP242

Review of Robot Navigation Inspired by the Localization Cells' Cognitive Mechanism

CONG Ming^{1,2} ZOU Qiang¹ LIU Dong^{1,2} DU Yu³

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Dalian University of Technology Jiangsu Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213164;

3. Dalian Dahuazhongtian Technology Co., Ltd., Dalian 116023)

Abstract: Fast and accurate target navigation is an important ability for the mammals, and the hippocampus and entorhinal cortex are the main regions of brain to realize the spatial cognition and navigation ability. The cooperation of grid cells, place cells and other related cells provides the brain an integrated positioning system, which realizes that mammals can perform higher-level cognitive functions. The latest research in the field of robot autonomous navigation with mammals' localization cells were reviewed, especially focus on the localization cells' cognitive mechanism inspired robotic environment modelling, map building and behavior planning and controlling. At last, the deficiencies of current research and the future trend of autonomous robot navigation are analyzed and discussed.

Key words: localization cells; environment modelling; map building; behavior planning

0 前言

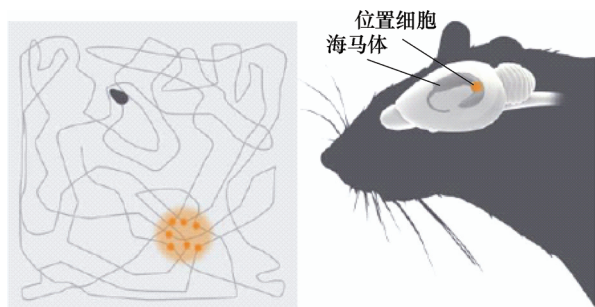
使机器人具有类人一样的智能一直是机器人和人工智能领域追求的目标。在当前结构化环境下机器人自主导航过程中,其行为组织方法通常抽象于底层的运动感知系统,导致在行为序列规划层次和感知与行为控制层次之间存在空白,这成为机器人系统在复杂动态环境中获得自主导航性能的一大瓶颈^[1]。而自然界哺乳动物不需要高精度的传感器就能在复杂、动态环境中生存,通过回忆之前的经验

可较好地完成导航任务,同时产生新的知识和能力。生物学以老鼠为研究对象,发现老鼠在经过少量的学习试验后,能够基于记忆摆脱陌生的环境,找到视野之外的目标^[2-4],而损伤了海马^[5]或内嗅皮层^[6]的老鼠则不能有效完成该任务。研究表明,哺乳动物海马结构和内嗅皮层是空间认知的核心脑区,在空间记忆和导航方面有着重要作用^[7-8]。

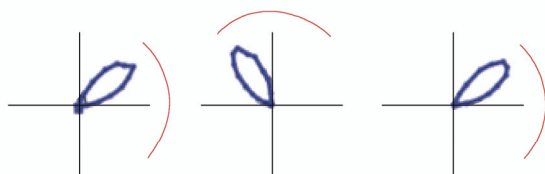
O'KEEFE 等^[9]在 1971 年发现,大鼠脑海马体中存在一种锥体神经细胞,每当大鼠身处屋子某个特定地点的时候,该细胞总会被激活,而其他神经细胞则在大鼠身处其他地方的时候被激活,这种细胞称为位置细胞,如图 1a 所示。位置细胞建立了脑区和外界物理世界的映射关系^[10],是构成认知地图的基础^[11]。通过在不同环境中激活不同的位置细

* 国家自然科学基金(61503057)、辽宁省自然科学基金联合基金(20180520017)和常州市科技支撑计划(CE20185009)资助项目。20190131收到初稿,20190819收到修改稿

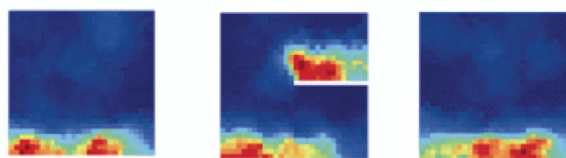
胞,关于环境的记忆能以位置细胞活性的特定组合形式存在于海马体中,生成环境认知地图^[12]。TAUBE 等^[13]在 1990 年发现,在脑后下托中存在一种头方向依赖的神经细胞,当动物的头部朝向特定方向时该细胞被激活,这种神经细胞称为头朝向细胞,如图 1b 所示。1996 年 O'KEEFE 等^[14]预测在大脑内存在一类边界细胞,当动物处于某个封闭环境某个方向的边界旁,这类细胞就会被激活,如图 1c 所示。研究推测,边界细胞可以让动物确定自身相对环境空间边界的位置。HAFING 等^[15]在 2005 年发现,大鼠脑的内嗅皮层存在一种神经细胞,当大鼠经过特定地点的时候就会激活,这些特定地点组成了六边形网格,这种细胞称为“网格细胞”,如图 1d 所示,它以独特的空间模式激活,所有网格细胞联合形成一个坐标系,允许进行路径整合、精确定位和路径搜寻,使得空间导航成为可能。



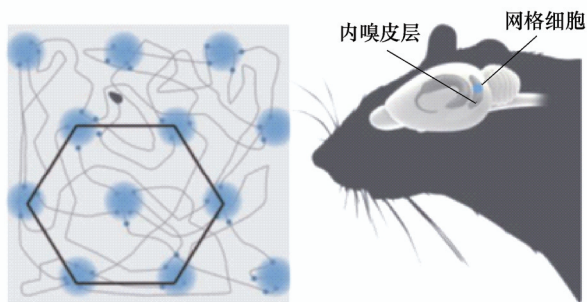
(a) 位置细胞激活模式



(b) 头朝向细胞激活模式



(c) 边界细胞激活模式



(d) 网格细胞激活模式

图 1 空间定位细胞

网络细胞和头朝向细胞及边界细胞合作识别动物头部朝向及环境边界,并与海马体内的位置细胞形成网络回路,在大脑中组成一套综合定位系统^[16],就像大脑内置的 GPS,可执行预期规划等更高水平的认知功能,如图 2 所示^[17]。网络细胞和位置细胞的研究成果荣获 2014 年诺贝尔生理学或医学奖,共同回答了大脑如何给周围空间创造地图,如何在复杂环境中寻找路径^[18]。哺乳动物正是依靠这些空间能力才能在环境中识别、记忆并辨别方向。

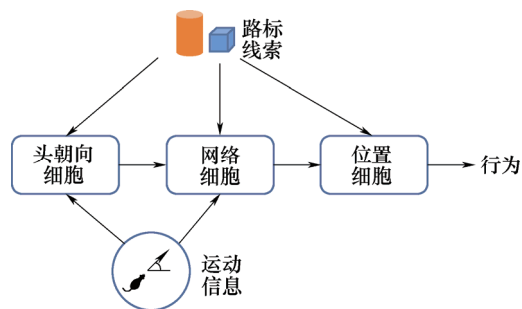


图 2 定位细胞协同作用

定位细胞的研究涉及生物学、认知神经学及仿生学等学科,基于位置细胞的认知地图特性^[19]和网格细胞的路径整合特性^[15],定位细胞逐渐被应用于移动机器人仿生导航领域。本文将对位置细胞、网络细胞、头朝向细胞等在机器人环境建模、地图构建、行为规划与控制等领域应用的研究现状进行论述,探讨定位细胞认知机理在机器人导航研究中未来可能的发展趋势。

1 定位细胞启发机器人环境建模

在复杂多变环境中,机器人需要有合适的环境建模方法以处理环境的多源不确定性。机器人通常采用某种地图形式建模环境,主要有度量地图^[20]、拓扑地图^[21]及混合地图^[22]。

目前定位细胞启发的机器人导航模型主要有位置细胞启发的环境建模、网络细胞-位置细胞联合作用启发的环境建模等。

1.1 位置细胞启发环境建模

早期主要启发于海马体位置细胞建立对应空间关系的抽象环境认知地图^[23-26]。GAUSSIER 等^[27]模拟生物海马机理提出一种海马系统模型,利用视觉细胞和位置细胞的特性,通过对视觉信息和位置信息不断学习形成机器人位置认知从而建立环境状态,并实现对状态进行存储及状态间的连接进行学习和预测。REDISH 等^[28-29]提出一种模型框架用于揭示海马体及其传入传出结构在啮齿类动物导航过

程中的作用,如图 3 所示,导航可以通过四种不同空间表示的交互关系来解释,分别是动物的局部视图,路径整合器,依靠局部视图和路径整合器的位置编码器,以及头部朝向。此外该模型提供了一个用于轨迹规划的目标子系统及一个允许动物在不同环境中导航的参考系选择子系统。BARRERA 等^[30-31]提出一种基于老鼠海马神经生理学设计的真实机器人导航模型,允许机器人在结构化环境中不同位置获得不同奖励值,同时建立环境拓扑地图,并可以执行目标指向性导航,如图 4 所示,该模型由不同功能模块组成,其主要模仿了大鼠大脑结构中学习与记忆相关的一些功能。该模型依赖运动信息和视觉信息以及海扁学习^[32]进行位置表示和识别,并采用强化学习^[33]允许机器人学习和忘却奖励位置,以实现目标导航。

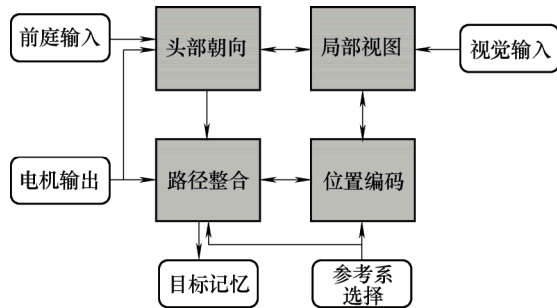


图 3 REDISH-TOURETZKY 空间认知模型

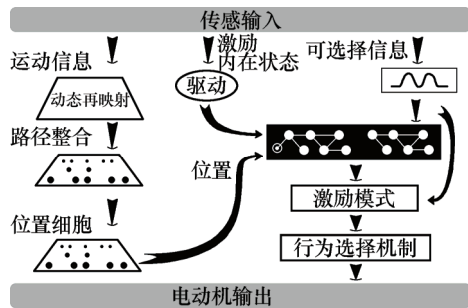


图 4 BARRERA-WEITZENFELD 空间认知模型

李伟龙等^[34]提出一种基于生物位置细胞放电机理的空间位置表征模型,通过建立运行体空间位置与运行体和不同路标之间距离的对应关系,从生物自主感知空间位置角度出发任意探索构建位置细胞图,然后利用感知的距离信息激发位置细胞放电从而估计运行体位置,仿真试验表明通过选择合适的阈值和运动训练时间能够更好地完成运行体空间位置表征并且定位精度更高。刘冬等^[35-36]引入神经元激励机制模拟海马体神经元的组织机制,抽象状态神经元模拟位置细胞以映射高维环境感知,结合视觉场景和位置信息建模情景事件,建立一种情景记忆驱动的马尔科夫决策过程用于实现机器人对环境的认知及多源不确定条件下的行为控制,如图 5

所示为情景学习过程中状态神经元组织形成网络结构过程,该方法可自行组织状态神经网络结构以适应新的感知信息,在不破坏原情景记忆的情况下学习新的情景经验,并对环境知识学习过程中产生的不确定信息具有一定鲁棒性。

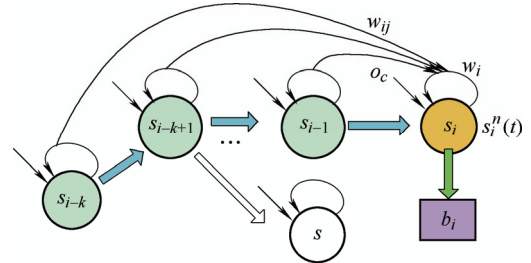


图 5 状态神经元组织情景记忆过程

1.2 网格-位置细胞启发环境建模

随着网格细胞的发现以及被认为是哺乳动物路径整合系统的核心^[37-38],竞争吸引子网络模型^[39]通过整合里程计信息和路标信息以形成对环境的连续认知,可实现虚拟机器人^[40]和真实机器人^[41-42]的环境建模。动态环境仿真试验发现,通过对位姿的不断评估与纠正,网格细胞可以处理感知的不确定性^[43]。基于该理论,TEJERA 等^[44]在 BARRERA-WEITZENFELD 模型基础上,集成一个基于线性震荡干扰模型的网格细胞模型,用于整合内部前庭信息提供里程计信息,并集成一种位置重置机制用于校正里程计误差,如图 6 所示,该模型通过仿真进行了验证。GONZALO 等^[45]在 TEJERA-LLOFRIU 模型基础上,提出一种基于大鼠神经生理学的空间认知仿生机器人模型,该模型集成了海马位置细胞、内嗅皮层网格细胞和头朝向细胞。通过仿真实验对该空间认知仿生机器人模型进行了评估,结果表明该模型能够减少机器人导航过程中的定位误差,有望实现机器人长期导航。

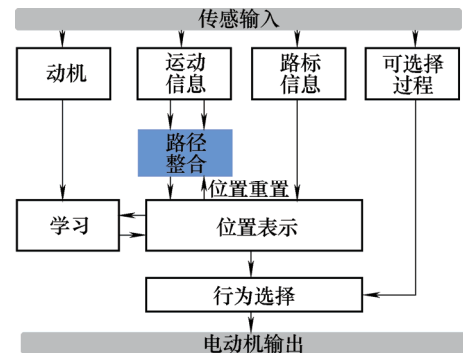


图 6 TEJERA-LLOFRIU 空间认知模型

国内学者陈孟元^[46]将鼠类脑细胞中边界细胞、局部场景细胞、网格细胞、速度细胞和位姿细胞等具有定位导航功能的细胞应用于 SLAM 研究中,结

合具有实时关键帧匹配的闭环检测算法以避免光线对 SLAM 的影响,融合速度细胞和边界细胞以避免障碍物对 SLAM 的影响,拟构建一种基于多细胞导航机制的 BVGSP-SLAM 模型,如图 7 所示。

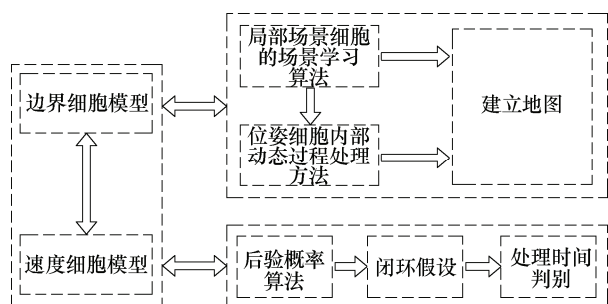


图 7 BVGSP-SLAM 模型

综上,目前定位细胞启发的机器人环境建模方式重点关注对定位细胞的功能性理解,并提出一种生物模型模拟细胞定位功能,实现机器人对环境的认知特性。其中位置细胞启发的机器人环境建模起步较早,基于位置细胞的特定位置放电机制,能够建立哺乳动物脑区和外界环境的映射关系,通过在不同环境激活不同位置细胞,关于环境的记忆能够以位置细胞活性的特定组合形式存在于海马体中,其认知地图特性,用于机器人建立环境拓扑地图。基于网格细胞的路径整合特性,部分生物模型引入网格细胞整合自运动线索,提高机器人定位精度,实现机器人对环境的精确建模。随着对生物导航特性研究的深入,位置细胞、网格细胞、头朝向细胞和边界细胞等联合启发环境建模成为一种可能,有望实现机器人在未知环境下的精确建图和导航。

2 定位细胞启发机器人地图构建

地图构建是自主移动机器人研究领域的一项重要挑战,哺乳动物在空间环境的活动被认为能形成空间环境的认知地图^[47],网格细胞其路径整合机制使大脑不仅能表达相对的矢量关系,而且能根据自运动线索和初始相对位置信息对空间进行认知地图表达^[37],能够指导哺乳动物在未知环境中的有效导航运动。结合生物系统的这些导航特性可提升 SLAM 的整体性能,获得较好的解决方案。目前定位细胞启发的地图构建方法主要有位置细胞启发的地图构建,多细胞协作启发的地图构建及定位细胞相关神经网络启发的地图构建。

2.1 位置细胞启发地图构建

CUPERLIER 等^[48]利用当前位置细胞及下一时刻的位置细胞建立一种过渡细胞模型,如图 8 所示,

用一个过渡细胞表示机器人相邻两个时刻的位置和上一时刻的运动方向,利用过渡细胞建立了环境认知地图,并指导机器人目标规划。朱青等^[49]受位置细胞启发,分别建立一种用于将动物所处的空间位置进行定位的空间向量地图和用于进行路径重述的基于目标的向量图,通过结合空间向量地图和基于目标的向量图,提出一种智力探索启发的认知地图建模方法,如图 9 所示,该模型能够针对不同目标找到合适的路径。周阳等^[50]结合 SURF 算法的鲁棒性和 IHDR 树的分类识别和记忆功能,提出了一种基于 IHDR 树的位置细胞构建方法。利用 SURF 算法提取环境感知信息中的特征点,将特征点的描述矢量集和其在地理空间中的位置集组合形成地形空间中的路标集,生成训练样本,以 IHDR 建树原则对路标信息双重聚类,然后将聚类后的叶子节点作为表征对应地形空间环境的位置细胞,完成位置细胞的构建。仿真结果表明该方法构建的位置细胞能有效表征地形空间环境,且对一定的噪声干扰具有鲁棒性。HAFNER^[51]利用位置细胞构建机器人探索区域的认知地图,该地图由位置细胞和位置野表征,但该方法预先设定了位置细胞数量和连接。EEDM 等^[52]借鉴网格细胞沿着内嗅皮层背侧至腹侧轴不同位置的放电野和网格间距不同这一生物现象,通过构建不同放电野大小的位置细胞,提出了一种分层次的位置细胞建模环境的方法,提高了智能体的探测范围,降低了噪声干扰强度,允许虚拟智能体进行目标驱动的导航。

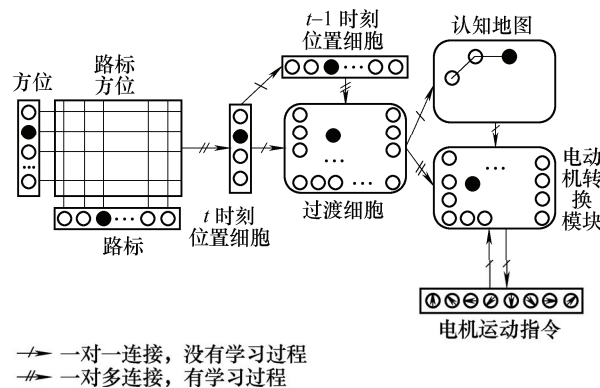


图 8 CUPERLIER 系统神经网络模型架构

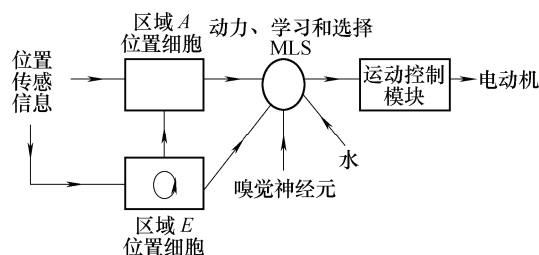


图 9 智力探索模型

2.2 多细胞协作启发地图构建

生物研究表明,多细胞的协同作用可提高机器人定位精度^[48, 53],从而有效提高建图和导航精度。ARLEO^[54]利用头朝向细胞和位置细胞判别机器人的方向和位置,执行机器人定位、地图构建和目标回忆,并在较小的人工环境进行了实验验证,其可获得基于目标驱动的导航行为。STROSSLIN 等^[55]提出一种基于位置细胞和头朝向细胞的无监督 Hebbian 学习法建立环境认知地图,并通过一种基于奖励的学习机制学习目标导航行为,利用视觉输入校正路径整合器实现机器人自我定位,并进行了仿真实验验证。YUAN 等^[56]简化了网格细胞与位置细胞的相互作用,采用竞争吸引子网络建立网格细胞模型,通过竞争 Hebbian 学习算法选择获胜网格细胞,用于整合自运动线索并生成位置细胞,利用视觉信息校正路径整合过程中的误差,从而构建精确环境认知地图,地图构建过程如图 10 所示,该模型有助于研究空间认知的神经机制。JAUFFRET 等^[57]结合视觉位置细胞模型,头朝向细胞模型及路径整合神经网络模型,基于视觉位置细胞模型和路径整合单元之间的关联学习机制减小路径整合过程产生的误差,通过合并网格细胞和视觉位置细胞模型提出一个多模式位置细胞模型,该模型重在验证网格细胞模型的可行性,以建立环境地图。

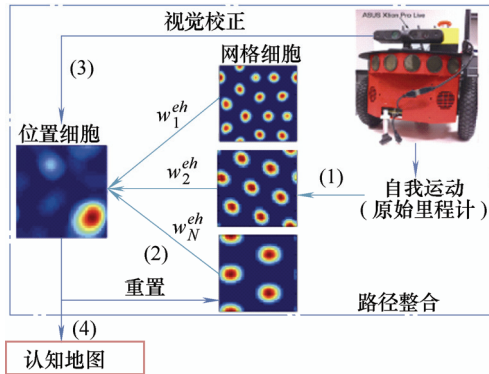


图 10 认知地图构建过程

于乃功等^[58]模仿海马结构空间细胞的认知机理提出了一种构建环境认知地图的方法,如图 11 所示。通过构建统一的空间细胞吸引子计算模型对自身运动线索进行路径积分,利用环境的颜色深度图像进行闭环检测,对空间细胞路径积分进行误差修正,从而生成精确的环境认知地图,该模型有效体现出生物在导航中的生理学现象和认知功能实现过程,为仿海马认知机理的机器人导航方法研究奠定了基础。

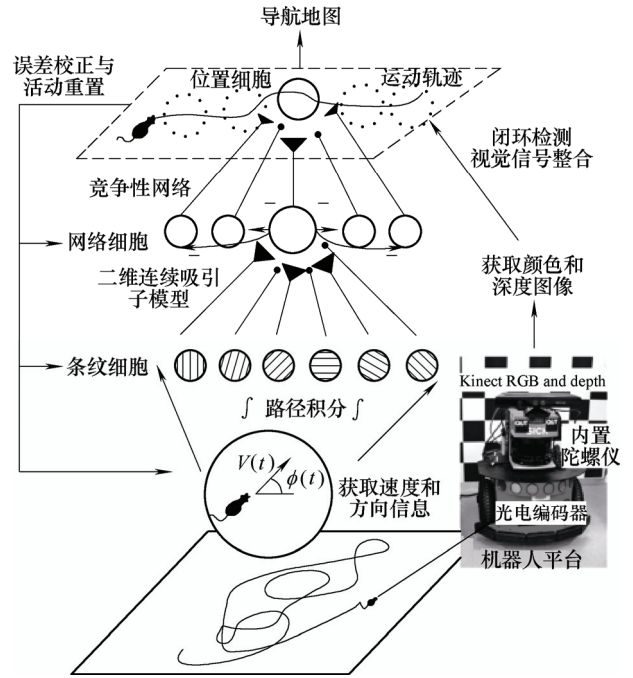


图 11 环境认知地图构建方法

2.3 定位细胞相关神经网络启发地图构建

GIOVANNANGELI 等^[59-60]提出一种基于生物学启发的神经网络架构模拟海马体模型,该架构时间序列学习和空间学习,通过学习感知-动作建立环境认知地图。HIREL 等^[61]提出基于生物神经网络学习感知事件以形成环境认知地图,可以用来选择最优行为来实现动物的目标导航,该模型适用于学习和解决涉及时空知识的任务,并在小型人工环境进行实验,研究结果强调了海马体在空间和时间预测方面的作用,以及前额皮质在学习任务相关目标方面的作用。WEILLER 等^[62]提出一种基于行为认知的 SLAM 方法,将环境划分为离散状态来模拟位置野,机器人通过记忆不同状态下电机的动作和传感器的输出来探索学习环境,执行指定目标的路径规划。YAN 等^[63]提出了一种生物学启发的多神经网络建立空间认知地图,在自我探索和导航过程中,地图不断适应机器人的物理约束,可实现机器人地图构建、定位与路径规划。

大多数定位细胞启发的地图构建方法重点关注对大脑功能的理解,并提出准确的生物模型测试其合理性,而不是面向真实机器人的实用性地图构建与定位^[64-65],鲁棒性差,不能适应环境的复杂性。RatSLAM^[66]模拟海马体的空间导航能力取得了重大进展,基于位姿细胞构建竞争吸引子网络,如图 12 所示,能够在现实大区域环境中进行地图构建。TIAN 等^[67]在 RatSLAM 基础上采用 RGB-D 传感器提高机器人视觉闭环检测能力,校正机器人路径整合误差,为机器人导航构建精确

认知地图。邹强等^[68]结合 RatSLAM 和情景记忆, 引入状态神经元模拟位置细胞, 构建状态神经元连接权值矩阵, 建立一种以事件为顶点, 事件连接权值为边的情景认知地图, 其可有效用于机器人路径规划研究。

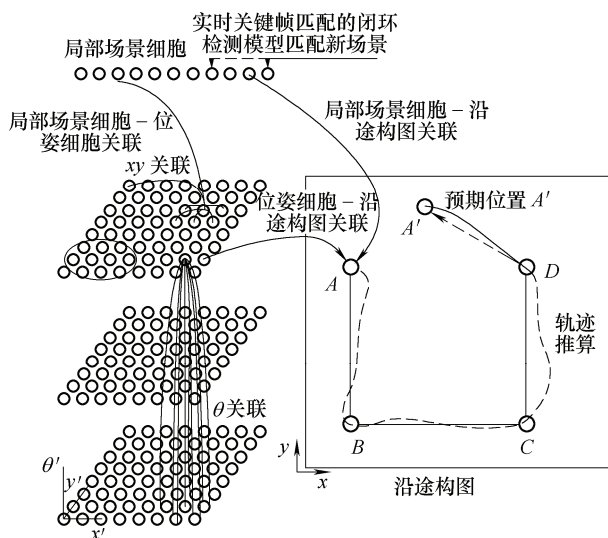


图 12 RatSLAM 系统

综上, 目前定位细胞启发的地图构建研究主要从神经细胞生物学角度和工程应用角度出发。基于神经细胞生物学基础研究地图构建往往侧重于对哺乳动物大脑功能的理解, 采用计算机方法模拟位置细胞、网格细胞及其他相关细胞间信号传递关系, 提出合理的生物模型, 并通过进行大量实验追求与导航相关的生物特性以验证其准确性。相反, 从工程角度出发研究地图构建往往更加关注如何从物理层面解释导航相关问题, 并努力通过各种技术方法获取运行体的具体位置, 实现导航过程, 忽略了细胞间的神经信号传递, 缺乏对神经细胞生物学的研究。侧重点的不同导致很难将两者联系起来, 因此如何将生物对导航信息的处理机制与现有导航方式相结合值得进一步研究。

3 定位细胞启发机器人行为控制

行为学研究发现, 网格细胞路径整合机制能够利用自身运动线索计算出相对于环境重要位置的矢量关系^[69], 使大脑不仅能表达相对的矢量关系, 而且可以在不依赖外界线索的条件下实现路径的计算^[7]。然而使用单纯的自身运动线索进行空间定位会与实际情况产生偏差^[19], 接收外源性感觉输入的位置细胞通过与网格细胞形成的网络回路能够有效提高哺乳动物的精确定位能力。因此目前不少研究将定位细胞应用于机器人行为控制领域。

3.1 位置细胞启发机器人行为控制

基于位置细胞启发的机器人行为控制通常关注试验条件下定性或定量的模拟生物行为。ARLEO^[54]基于头朝向细胞和位置细胞获取目标驱动的空间导航行为。GIOVANNANGELI 等^[59-60]基于生物学启发的神经网络模拟海马体模型, 学习感知-动作建立环境认知地图, 通过对状态的预测进行目标驱动的行为规划。OSHIRO 等^[70]提出位置细胞自组织模型, 并基于视觉传感器数据进行机器人导航仿真, 以达到使用较少细胞获得较高解析度的目的。HIREL 等^[61]受位置细胞启发, 提出基于神经网络学习感知事件形成环境的认知地图, 实现机器人在小型设定环境中完成连续位置导航任务。MILFORD 等^[71-72]基于 RatSLAM 算法建立的经验地图利用梯度法获取到达目标位置耗时最短的路径, 进行机器人在小环境中的导航应用研究。ROJAS-CASTRO 等^[73]提出了一种机器人自主导航环境下的位置细胞模型, 该模型对位置具有高鲁棒性, 即使表征该位置的一个或多个模式被删除或不可见, 该模型仍然可以识别该位置, 此外该模型允许机器人能够在导航过程中与环境交互以不断更新模型, 试验结果验证了增量学习的优势, 使机器人能够应对任何不可预见的变化, 从而适应环境。李伟龙等^[74]提出基于多尺度空间表征的生物启发目标指引导航模型, 采用高斯模型模拟位置细胞放电率, 并将其作为 Q 学习的状态输入, 然后采用模拟退火方法完成行为选择, 通过多次探索学习使运行体能够正确规划出一条从起始点到目标点的最短路径, 仿真结果表明该方法是可行的。其他一些控制模型^[75-77]则通过抽象位置细胞的功能进行机器人行为控制。

3.2 网格细胞启发机器人行为控制

哺乳动物内嗅皮层多空间尺度网格细胞的研究成果启发了网格细胞用于机器人行为控制的研究。网格细胞是动物空间导航系统的重要组成部分。KUBIE 等^[78]采用度量地图建模环境, 并基于内嗅皮层网格细胞间连接强度的学习模式, 提出一种具有预见性的导航机制。HOWARD 等^[79]创新采用一个真实任务探索大脑在导航过程中是如何编码到目标的距离, 研究结果表明海马体和内嗅皮层分别能够编码到达目标位置的路径和欧几里得距离。BARRY 等^[80]综述了网格细胞、位置细胞、头朝向细胞及边界细胞等在智能体自定位研究的应用, 其生物神经机制有效提升机器人理论定位精度。ZENO^[81]提出一种神经生物学启发的移动机器人导航建图系统, 通过 FPGA 芯片模拟网格细胞的功能, 利用 FPGA 模拟基于并行空间感知的神经活动, 并在路径规划

中提供帮助。ERDEM 等^[82]提出了基于空间细胞信息传递机理的导航模型,如图 13 所示,其面向目标的空间导航是由前向线性预见性轨迹模型(HiLAM)实现,该模型主要由头朝向细胞、持续震荡细胞、网格细胞和位置细胞构成的网络实现的。在未知环境中智能体能够通过随机探索逐渐形成位置细胞地图,构成了对探索环境的完整表达,在探索阶段之后,智能体能够根据对目标位置的记忆,通过前向线性预见性轨迹模型在若干个候选的方向中选择下一个面向目标位置的移动方向,面向目标的路径规划是由网格细胞的震荡干扰模型实现的,能够在前向线性预见性轨迹探测中发现以前没有经历过的捷径,并进行了仿真试验研究。ERDEM 等^[52]后来针对该模型进行了改进,如图 14 所示,通过构建不同放电野大小的位置细胞,提出了一种分层次的位置细胞地图结构模型,显著提高了可线性预见探测的范围,改变了先前模型中单一位置野表达位置带来的低效率和噪声干扰等问题。

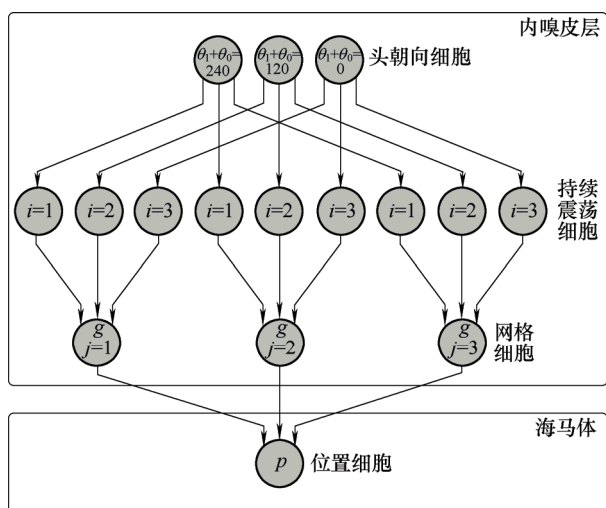


图 13 基于空间细胞的面向目标的导航模型

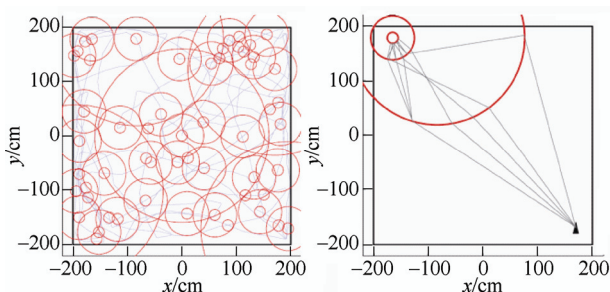


图 14 分层次位置细胞地图

在近期研究中,ERDEM 等^[83]将前向预见性轨迹模型与 RatSLAM 模型结合,提出一种在视觉环境下的仿海马导航模型,将解剖学、生理学与行为学研究相结合,用于实际的机器人导航中,结果显示,该模型能在实际空间中自适应的获取轨迹信息,

并以最优路径进行导航。国内邵能建等^[84]提出一种基于多尺度网格细胞的路径整合方法,该方法模拟内嗅皮层的相同区域网格细胞放电特征相同,不同区域放电特征递增变化的特点,构建尺度递增的仿生多尺度网格图组,在各层中引入突触样式计算各细胞权值,通过细胞的活跃度变化表征各网格层中位置的变化,并在各层分别实现路径整合,进而利用低尺度整合结果调整高尺度整合,提高空间位置的推算精度,实现无人作战飞机导航的空间方位自主推算。ANDREA 等^[85]基于网格细胞的路径整合特性,提出一种深度强化学习模型用于训练智能体使其具有哺乳动物的导航能力,仿真结果验证网格细胞可以用于目标向量式导航,并在复杂环境仍能够保持稳定性。

综上,定位细胞启发的机器人行为控制重点研究目标驱动向量式导航。其中基于位置细胞的位置特异性,位置细胞启发的行为控制方法则通常是进行路径跟随的研究,即基于已学习到的路径进行遍历路径行为控制,无法进行尚未遍历到的位置间的路径规划。而网格细胞为动物提供了独特的基于神经生物学的坐标系,利用该坐标系统则可以模拟动物的路径整合功能,建立空间认知模型和精确认知地图,其可在未遍历路径中寻找最佳导航路径,但大都应用于小型试验环境或仿真环境中。

4 当前存在问题及未来展望

综上所述,定位细胞认知机理启发的机器人应用受到了广泛的关注。通过模拟哺乳动物海马体的环境认知机理,构建自主移动机器人的环境认知及导航模型,并且取得了一定的成果。然而现阶段自主移动机器人对环境的认知及适应能力还远不足动物的水平。

(1) 自主移动机器人认知地图构建过程中多利用感知映射行为,基于神经网络算法或仿海马体模型修改权值进行经验存储,缺乏网格细胞和位置细胞交互形成空间记忆的研究应用。对机器人来说,研究内嗅皮层网格细胞与海马体位置细胞的相互作用及空间记忆储存的机理,类如情景记忆^[86],能够建立细胞之间的连接属性,与基于运动和对先前位置认知所形成的距离感知相互联系起来,可感知自主移动机器人自身在环境中所处的位置,以及与周围路标的关系,有效存储机器人学习到的时空经验,可以为后续机器人路径规划及行为控制提供思路,能够实现机器人认知行为学习、规划、预测与推理,具备较高的认知智能。

(2) 机器人工作环境普遍存在着多源不确定性, 而现有机器人导航模型局限于小型试验环境或仿真环境, 较少涉及对不确定性的处理, 复杂环境任务适应性差或不能适应, 且缺乏细胞数据关联以实现多目标与未遍历路径的认知行为规划能力。边界细胞位于哺乳内嗅皮层, 能够通过细胞活性计算自身到达边界的距离^[87]。因此在机器人仿生导航模型中融合边界细胞, 能够实现移动机器人对动态障碍物的实时避障, 进一步提高机器人的导航性能。

(3) 从生物学出发, 动物往往是通过多种感知方式认识和理解环境, 并利用积累的经验知识获取自身在空间中的相对位置, 重在提出合理的生物模型以验证其准确性。从工程学出发, 现有导航方式则更加关注如何从物理层面解释导航相关问题, 并努力通过各种计算机方法实现导航过程, 缺乏对神经细胞生物学, 而且存在位置识别算法差和计算量大等问题。因此, 在深入分析哺乳动物网格细胞和位置细胞的激活特性基础上, 将生物学导航方式与现有导航方式相结合能够有效降低位置识别的误差率, 提高算法效率, 有望提高机器人的自主导航性能。

5 结论

快速准确完成目标导航是哺乳动物赖以生存的一个重要能力, 海马体和内嗅皮层是实现其空间认知及导航能力的主要脑区。近年来, 定位细胞的认知机理受到了广泛的关注, 逐渐被应用于移动机器人仿生导航领域。研究人员从不同角度, 大量试验去理解哺乳动物导航的基本技能。构建哺乳动物的环境认知和导航模型, 取得了一定成果, 然而现阶段的移动机器人自主导航性能还远远不足哺乳动物, 因此有必要寻求哺乳动物大脑空间认知机制启发的导航机理以提高机器人对环境和任务的适应性, 促进智能导航的研究进展, 使机器人具有认知智能, 面向复杂任务实时产生自主行为, 适应复杂多变环境。

参 考 文 献

- [1] MATHIS R, YULIA S, GREGOR S. A robotic architecture for action selection and behavioral organization inspired by human cognition[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura, Portugal. New York: IEEE, 2012: 2457-2464.
- [2] MORRIS R G M, GARRUD P, RAWLINS J N P, et al. Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions[J]. *Nature*, 1982, 297(5868): 681-683.
- [3] TOURETZKY D S. The role of the hippocampus in solving the Morris water maze[J]. *Neural Computation*, 2014, 10(1): 73-111.
- [4] STEELE R J, MORRIS R G M. Delay-dependent impairment of a matching-to-place task with chronic and intrahippocampal infusion of the NMDA-antagonist D-AP5[J]. *Hippocampus*, 1999, 9(2): 118-136.
- [5] PEARCE J M, ROBERTS A D L, GOOD M. Hippocampal lesions disrupt navigation based on cognitive maps but not heading vectors[J]. *Nature*, 1998, 396(6706): 75-77.
- [6] STEFFEMACH H, WITTER M, MOSER M, et al. Spatial memory in the rat requires the dorsolateral band of the entorhinal cortex[J]. *Neuron*, 2005, 45(2): 301-313.
- [7] 于乃功, 李偶, 方略. 海马空间认知机理及其在仿生机器人导航中的应用[J]. *生物工程前沿*, 2015, 4(1): 1-14.
YU Naigong, LI Ti, FANG Lue. The hippocampus spatial cognitive mechanism and its application in the biomimetic robot navigation[J]. *Biotechnology Frontier*, 2015, 4(1): 1-14.
- [8] 于平, 徐晖, 尹文娟, 等. 网格细胞在空间记忆中的作用[J]. *心理科学进展*, 2009, 17(6): 1228-1233.
YU Ping, XU Hui, YIN Wenjuan, et al. The roles of grid cells in spatial memory[J]. *Advances in Psychological Science*, 2009, 17(6): 1228-1233.
- [9] 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.
- [10] WAGATSUMA H, YAMAGUCHI Y. Neural dynamics of the cognitive map in the hippocampus[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2007, 1(2): 119-141.
- [11] O'KEEFE J, NADEL L. The hippocampus as a cognitive map[M]. New York: Clarendon Press, 1978.
- [12] 李伟龙, 吴德伟, 周阳, 等. 基于生物位置细胞放电机理的空间位置表征方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(8): 2040-2046.
LI Weilong, WU Dewei, ZHOU Yang, et al. A method of spatial place representation based on biological place cells firing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2016, 38(8): 2040-2046.
- [13] TAUBE J S, MULLER R U, JR R J. Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. II. Effects of environmental manipulations[J]. *Journal of Neuroscience*, 1990, 10(2): 436-447.
- [14] O'KEEFE J, BURGESS N. Geometric determinants of the place fields of hippocampal neurons[J]. *Nature*, 1996,

- 381(6581): 425-428.
- [15] HAFTING T, FYHN M, MOLDEN S, et al. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex[J]. *Nature*, 2005, 436(7052): 801-806.
- [16] BUZSAKI G, MOSER E. Memory, navigation and theta rhythm in the hippocampal-entorhinal system[J]. *Nature Neuroscience*, 2013, 16(2): 130-138.
- [17] WYETH G, MILFORD M. Spatial cognition for robots-robot navigation from biological inspiration[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009, 16(3): 24-32.
- [18] Nobel Media AB. The Nobel prize in physiology or medicine 2014[EB/OL]. [2019.04.02]. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2014/summary/>.
- [19] 左艳芳, 罗非, 崔彩莲. 海马位置细胞对空间信息的处理[J]. *生理科学进展*, 2006, 37(1): 6-10.
- ZUO Yanfang, LUO Fei, CUI Cailian. Processing of spatial information by hippocampal place cells[J]. *Process in Physiological Sciences*, 2006, 37(1): 6-10.
- [20] PREUCIL L, STEPAN P, KULICH M, et al. Towards environment modeling by autonomous mobile systems[C]// IFIP/IEEE International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services: Knowledge and Technology Integration in Production and Services: Balancing Knowledge in Product and Service Life Cycle, September 25-27, 2002, Deventer, Netherlands. New York: IEEE, 2002: 509-516.
- [21] CHOSET H, NAGATANI K. Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): Toward exact localization without explicit localization[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2002, 17(2): 125-137.
- [22] YAMANAKA S. Mobile robot navigation using hybrid simplified map with relationships between places and grid maps[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(22): 616-621.
- [23] ARLEO A, SMERALDI F, GERSTNER W. Cognitive navigation based on nonuniform Gabor space sampling, unsupervised growing networks, and reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(3): 639-652.
- [24] FRANZIUS M, SPRELELER H, WISKOTT L. Slowness and sparseness lead to place, head-direction, and spatial-view cells[J]. *Plos Computational Biology*, 2007, 3(8): 1605-1622.
- [25] OSHIRO N, KURATA K, YAMAMOTO T. A self-organizing model of place cells with grid-structured receptive fields[J]. *Artificial Life & Robotics*, 2007, 11(1): 48-51.
- [26] CHAVARRIAGA R, STRSSLIN T, SHEYNIKHOVICH D, et al. A computational model of parallel navigation systems in rodents[J]. *Neuroinformatics*, 2005, 3(3): 223-241.
- [27] GAUSSIER P, REVEL A, BANQUET J P, et al. From view cells and place cells to cognitive map learning: Processing stages of the hippocampal system[J]. *Biological Cybernetics*, 2002, 86(1): 15-28.
- [28] REDISH A D, TOURETZKY D S. Navigating with landmarks: Computing goal locations from places codes[J]. *Symbolic Visual Learning*, 1997, 1: 325-351.
- [29] REDISH A D, TOURETZKY D S. Cognitive maps beyond the hippocampus[J]. *Hippocampus*, 2015, 7(1): 15-35.
- [30] BARRERA A, WEITZENFELD A. Bio-inspired model of robot adaptive learning and mapping[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 9-15, 2006, Beijing, China. New York: IEEE, 2006: 4750-4755.
- [31] BARRERA A, WEITZENFELD A. Biologically-inspired robot spatial cognition based on rat neurophysiological studies[J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25(1-2): 147-169.
- [32] HEBB D O. The organization of behavior a neuropsychological theory[M]. New York: Wiley, 1949.
- [33] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning: an introduction[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(5): 1054-1054.
- [34] 李伟龙, 吴德伟, 周阳, 等. 基于生物位置细胞放电机理的空间位置表征方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(8): 2040-2046.
- LI Weilong, WU Dewei, ZHOU Yang, et al. A method of spatial place representation based on biological place cells firing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2016, 38(8): 2040-2046.
- [35] 刘冬, 丛明, 高森, 等. 融合神经元激励机制的机器人情景学习与行为控制[J]. *机器人*, 2014, 36(5): 576-583.
- LIU Dong, CONG Ming, GAO Sen, et al. Robotic episodic learning and behavior control integrated with neuron stimulation mechanism[J]. *Robot*, 2014, 36(5): 576-583.
- [36] LIU D, CONG M, DU Y. Episodic memory-based robotic planning under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(2): 1762-1772.
- [37] MCNAUGHTON B L, BATTAGLIA F P, JENSEN O, et al. Path integration and the neural basis of the 'cognitive map'[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2006, 7(8): 663-678.
- [38] NAVRATILOVA Z, GIOCOMO L M, FELLOUW J M,

- et al. Phase precession and variable spatial scaling in a periodic attractor map model of medial entorhinal grid cells with realistic after-spike dynamics[J]. *Hippocampus*, 2012, 22(4): 772-789.
- [39] MILFORD M J, WYETH G F, PRASSER D. RatSLAM: a hippocampal model for simultaneous localization and mapping[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 26-May 1, 2004, New Orleans, USA. New York: IEEE, 2004: 403-408.
- [40] GUANELLA A, VERSCHURE P F. A model of grid cells based on a path integration mechanism[C]// *International Conference on Artificial Neural Networks*, September 10-14, 2006, Athens, Greece. Berlin: Springer, 2006: 740-749.
- [41] MILFORD M, SCHULZ R, PRASSER D, et al. Learning spatial concepts from RatSLAM representations[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55(5): 403-410.
- [42] WYETH G, MILFORD M. Spatial cognition for robots: Robot navigation from biological inspiration[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(3): 24-32.
- [43] MILFORD M J, WILES J, WYETH G F. Solving navigational uncertainty using grid cells on robots[J]. *PLoS Computational Biology*, 2010, 6(11): 1-14.
- [44] TEJERA G, LLOFRIU M, BARRERA A, et al. A spatial cognition model integrating grid cells and place cells[C]// *International Joint Conference on Neural Networks*, July 12-17, 2015, Killarney, Ireland. New York: IEEE, 2015: 1-8.
- [45] GONZALO T, MARTIN L, ALEJANDRA B, et al. Bio-inspired robotics: A spatial cognition model integrating place cells, grid cells and head direction cells[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, 91(1): 85-99.
- [46] 陈孟元. 鼠类脑细胞导航机理的移动机器人仿生 SLAM 综述[J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 107-117.
- CHEN Mengyuan. Overview of mobile robot bionic slam based on navigation mechanism of mouse brain cells[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2018, 13(1): 107-117.
- [47] TOLMAN, EDWARD C. Cognitive maps in rats and men[J]. *Psychological Review*, 1948, 55(4): 189-208.
- [48] CUPERLIER N, QUOY M, GAUSSIÉ P. Neurobiologically inspired mobile robot navigation and planning[J]. *Front. Neurobotics*, 2007, 1: 1-15.
- [49] 朱青, 王如彬. 基于智力探索的认知地图建模[C]// *全国神经动力学学术会议*, 3月28-31日, 2012, 上海, 中国. 北京: 中国力学学会, 2012: 55-70.
- ZHU Qing, WANG Rubin. A model of cognitive map based on mental exploration[C]// *National Conference on Neurodynamics*, March 28-31, 2012, Shanghai, China. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2012: 55-70.
- [50] 周阳, 吴德伟, 邵能建, 等. UCAV 地形空间环境感知中位置细胞构建方法[J]. *空军工程大学学报*, 2014, 15(1): 62-66.
- ZHOU Yang, WU Dewei, TAI Nengjian, et al. A method of constructing place cells in UCAV terrain space environment perception[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2014, 15(1): 62-66.
- [51] HAFNER V V. Robots as tools for modelling navigation skills – a neural cognitive map approach[J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2012, 38: 315-324.
- [52] ERDEM U M, HASSELMO M E. A biologically inspired hierarchical goal directed navigation model[J]. *Journal of Physiology Paris*, 2014, 108(1): 28-37.
- [53] JAUFFRET A, CUPERLIER N, GAUSSIÉ P. Multimodal integration of visual place cells and grid cells for navigation tasks of a real robot[C]// *International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, August 27-30, 2012, Odense, Denmark. Berlin: Springer, 2012: 136-145.
- [54] ARLEO A. Spatial learning and navigation in neuro-mimetic systems: Modeling the rat hippocampus[D]. Milan: University of Milano, 2000.
- [55] STROSSLIN T, SHEYNIKHOVICH D, CHAVARRIAGA R, et al. Robust self-localisation and navigation based on hippocampal place cells[J]. *Neural Networks*, 2005, 18(9): 1125-1140.
- [56] YUAN M, TIAN B, SHIM V A, et al. An entorhinal-hippocampal model for simultaneous cognitive map building[C]// *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, January 25-29, 2015, Austin, USA. Palo Alto: AAAI Press, 2015: 586-592.
- [57] JAUFFRET A, CUPERLIER N, GAUSSIÉ P. From grid cells and visual place cells to multimodal place cell: A new robotic architecture[J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2015, 9(1): 1-23.
- [58] 于乃功, 苑云鹤, 李倜, 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, FAN 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.
- [59] GIOVANNANGELI C, GAUSSIÉ P, DESILLES G. Robust mapless outdoor vision-based navigation[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9-15, 2006, Beijing, China. New

- York: IEEE, 2006: 3293-3300.
- [60] GIOVANNANGELI C, GAUSSIER P. Autonomous vision-based navigation: Goal-oriented action planning by transient states prediction, cognitive map building, and sensory-motor learning[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 22-26, 2008, Nice, France. New York: IEEE, 2008: 676-683.
- [61] HIREL J, GAUSSIER P, QUOY M, et al. The hippocampo-cortical loop: Spatio-temporal learning and goal-oriented planning in navigation[J]. *Neural Networks*, 2013, 43(7): 8-21.
- [62] WEILLER D, LAER L, ENGEL A K, et al. Unsupervised learning of reflexive and action-based affordances to model adaptive navigational behavior[J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2010, 4(2): 1-15.
- [63] YAN W J, WEBER C, WERMTER S. Learning indoor robot navigation using visual and sensorimotor map information[J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2013, 7(15): 1-14.
- [64] KRICHMAR J L, NITZ D A, GALLY J A, et al. Characterizing functional hippocampal pathways in a brain-based device as it solves a spatial memory task[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(6): 2111-2116.
- [65] SAMU D, EROS P, UJFALUSSY B. Robust path integration in the entorhinal grid cell system with hippocampal feed-back[J]. *Biological Cybernetics*, 2009, 101(1): 19-34.
- [66] 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.
- [67] TIAN B, SHIM V A, YUAN M, et al. RGB-D based cognitive map building and navigation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2013: 1562-1567.
- [68] 邹强, 丛明, 刘冬, 等. 基于生物认知的移动机器人路径规划方法[J]. *机器人*, 2018, 40(6): 894-902.
ZOU Qiang, CONG Ming, LIU Dong, et al. Path planning of mobile robots based on biological cognition[J]. *Robot*, 2018, 40(6): 894-902.
- [69] MITTELSTAEDT M L, MITTELSTAEDT H. Homing by path integration in a mammal[J]. *Naturwissenschaften*, 1980, 67(11): 566-567.
- [70] OSHIRO N, KURATA K, YAMAMOTO T. A self-organizing model of place cells with grid-structured receptive fields[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2007, 11(1): 48-51.
- [71] MILFORD M, WYETH G. Persistent navigation and mapping using a biologically inspired SLAM system[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2009, 29(9): 1131-1153.
- [72] MILFORD M, WYETH G, PRASSER D. Efficient goal directed navigation using RatSLAM[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2005: 1097-1102.
- [73] ROJAS-CASTRO D M, REVEL A, MENARD M. Robotic and document analysis cross-fertilization: Improving place cells based robot navigation[C]// International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, November 13-15, 2016, Phuket, Thailand. New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [74] 李伟龙, 吴德伟, 卢虎, 等. 基于多尺度空间表征的生物启发目标引导导航模型[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1363-1370.
LI Weilong, WU Dewei, LU Hu, et al. Bio-inspired goal-directed navigation model based on multi-scale spatial representation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1363-1370.
- [75] NUXOLL A, LAIRD J E. A cognitive model of episodic memory integrated with a general cognitive architecture[C]// International Conference on Cognitive Modelling, July 30-August 1, 2004, Pittsburgh, USA. USA: CiteSeerx, 2004: 220-225.
- [76] ENDO Y. Anticipatory robot control for a partially observable environment using episodic memories[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, USA. New York: IEEE, 2008: 2852-2859.
- [77] JOCKEL S, WESTHOFF D, ZHANG J. EPIROME - a novel framework to investigate high-level episodic robot memory[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 15-18, 2008, Sanya, China, New York: IEEE, 2008: 1075-1080.
- [78] KUBIE J L, FENTON A A. Linear look-ahead in conjunctive cells: An entorhinal mechanism for vector-based navigation[J]. *Frontiers in Neural Circuits*, 2012, 6(1): 203-209.
- [79] HOWARD L R, JAVADI A H, YU Y C, et al. The hippocampus and entorhinal cortex encode the path and euclidean distances to goal during navigation[J]. *Current Biology*, 2014, 24(12): 1331-1340.
- [80] BARRY C, BURGESS N. Neural mechanisms of self-location[J]. *Current Biology*, 2014, 24(8): 330-339.
- [81] ZENO P J. Using an FPGA to emulate grid cell spatial

- cognition in a mobile robot[C]// IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics, September 19-22, 2016, Paris, France. New York: IEEE, 2016: 7-8.
- [82] 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.
- [83] 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 & Memory*, 2015, 117: 109-121.
- [84] 邵能建, 吴德伟, 戚君宜. 多尺度网格细胞路径综合方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(6): 756-760. TAI Nengjian, WU Dewei, QI Junyi. Method to realize path integration based on multi-scaled grid cells[J]. *Journal of Beijing Univesrty of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(6): 756-760.
- [85] BANINO A, BARRY C, URIA B, et al. Vector-based navigation using grid-like representations in artificial agents[J]. *Nature*, 2018, 557(7705): 429-433.
- [86] TULVING E. Elements of episodic memory[M]. Oxford: Clarendon Press, 1983.
- [87] BJERKNES T L, MOSER E I, MOSER M B. Representation of geometric borders in the developing rat[J]. *Neuron*, 2014, 82(1): 71-78.
-
- 作者简介:** 丛明, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构与机器人学, 智能控制, 工业机器人技术与应用, 仿生机器人及控制。
E-mail: congmm@dlut.edu.cn
- 邹强, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能机器人与系统, 移动机器人智能控制。
E-mail: zq0819@mail.dlut.edu.cn
- 刘冬(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能机器人与系统, 智能控制, 机器人机构学。
E-mail: liud@dlut.edu.cn
- 杜宇, 女, 1981 年出生, 博士。主要研究方向为机器人认知控制, 机器人机构学, 人机交互等。
E-mail: dutduyu@foxmail.com