

机器地图的认知逻辑与建图模型

贾奋励, 杨剑, 游雄, 李科, 田江鹏, 郑束蕾

战略支援部队信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001

摘要: 机器地图是为提升无人平台复杂环境认知与理解能力而提出的一类新型地图。本文以机器地图的概念模型为基础, 从认知科学视角提出一种以记忆结构与过程为参考、符合认知逻辑的机器地图建图理论模型。通过分析记忆的结构与过程、心象地图的内容与组织, 认知架构和机器人系统中的环境认知等问题, 梳理出机器地图的认知逻辑及其对机器地图建图模型的支撑。在此基础上, 分析了机器地图的任务目标和内容分类, 从信息组织、逻辑结构与生成过程3方面提出机器地图建图模型的设计原则。基于该原则, 设计了机器地图建图的逻辑结构和过程模型。在逻辑结构方面, 从空间、视觉、情境、图式、规则等方面细化了感知地图、工作地图和长时地图中的内容与结构关系; 在过程模型方面, 按照认知活动抽象出包括理解、注意、推理、学习、行动的机器地图建图基本活动, 并提出内隐和外显两类建图过程。机器地图的认知逻辑与建图模型, 本质上是对机器地图认知计算机制的阐释, 从抽象层次上为研究人员提供协同研究的基础框架, 也为相关技术与数据的集成、评估、运用提供参考。本文的研究还为数字孪生或虚拟地理环境的构建提出新的目标与要求。

关键词: 遥感, 机器地图, 认知逻辑, 建图模型, 无人平台

中图分类号: P208/P2

引用格式: 贾奋励, 杨剑, 游雄, 李科, 田江鹏, 郑束蕾. 2024. 机器地图的认知逻辑与建图模型. 遥感学报, 28(5): 1177-1188

Jia F L, Yang J, You X, Li K, Tian J P and Zheng S L. 2024. Cognitive logic and map construction model of machine maps. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1177-1188[DOI: 10.11834/jrs.20233066]

1 引言

当前, 无人平台正迅速在许多领域进行应用, 从商业、工业和医疗部门到物理安全、国防以及太空探索 (Chen 等, 2022), 已成为现代社会的有机组成部分。特别是在单调重复、危险、未知环境中, 无人平台较之有人平台优势明显。但目前无人平台的自主、智能、协作能力 (Chen 等, 2022) 尚不足以支撑其在这些环境中完成各项任务, 原因之一在于复杂环境认知与理解作为实现上述能力的共性基础仍是瓶颈问题。

针对上述问题, 游雄等 (2023) 提出发展机器地图的思路, 并构建了机器地图的概念模型。机器地图是一种适用于无人平台认知理解环境信息、建立环境认知模型、进行空间推理决策的新型地图, 具有测制用一体和持续自主学习的突出特点 (游雄 等, 2023), 是测绘产品从为人服务向为智

能机器人服务方向延伸的一种尝试 (高俊, 2017)。

机器地图的提出缘于心象地图这一认知现象的启发; 其概念模型参考借鉴了具身认知、记忆理论等认知科学理论 (游雄 等, 2023); 其发展需要人工智能、机器人学等认知交叉学科的支撑, 可以说认知科学是机器地图的重要理论与技术基础。机器地图研究的目的, 一方面是将地图的服务对象拓展至无人平台, 另一方面也希望通过无人平台空间认知机制研究来探索地图及相关工具的空间认知本质。对于这样一个认知交叉领域, 有多种研究思路, 如认知心理学试图对人的空间认知过程进行建模, 探索空间认知的机理规律; 人工智能领域通过构建人工神经网络实现特定的空间认知能力, 侧重于开发空间智能应用。而在同一个研究思路下, 由于解决问题的侧重点及颗粒度的差异性, 也会出现不同的抽象模式, 形成不同层次的解决方案, 为机器地图提供互为补充

收稿日期: 2023-03-06; 预印本: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42130112, 42271464); 中原学者游雄科学家工作室科研项目(2020)

第一作者简介: 贾奋励, 研究方向为空间认知与机器地图、全息地图与虚拟地理环境。E-mail: fljia_ieu@126.com

通信作者简介: 游雄, 研究方向为地图学、作战环境学。E-mail: youarexiong@163.com

的实现路径。

本文以机器地图概念模型为基础,采用认知心理学研究思路,提出一种以记忆结构与过程为参考、符合认知逻辑的机器地图建图理论模型。该模型延续机器地图概念模型中将其视为无人平台的“空间认知脑”(游雄等,2023)的观点,将机器地图建图视为“脑”中的“记忆”结构与过程。机器地图建图的逻辑结构是对机器地图内容组成及关系的静态描述,其合理性是测制用一体特征实现的关键;建图过程是对机器地图形成过程的动态描述,是体现持续自主学习的关键,二者既互为约束又相互支撑,为机器地图的技术框架设计与实现路径提供参考。

2 机器地图的认知逻辑

机器地图是新生事物,但将认知理论与计算机系统相结合的研究思路已有几十年历史了。本节从人的记忆模型入手分析记忆的结构与过程,进而分析心象地图的信息内容与组织特点。随后挖掘认知架构和机器人系统环境认知与空间记忆的实现方式。通过挖掘、总结认知科学中空间认知相关共识,梳理机器地图的认知逻辑,也为机器地图建图模型提供原型参考与逻辑借鉴。

2.1 记忆的结构与过程

记忆结构是指构成记忆的多个机能上相互独

立,但内容、特征和组织上存在明显差异的认知加工系统;记忆过程是指以记忆结构为基础,各认知加工系统间信息流动和变化的认知操作,如信息编码、组织与提取;记忆结构与过程是不可分的,通常看作统一整体进行研究(鲁忠义和杜建政,2005)。

Atkinson和Shiffrin(1968)从信息加工过程的角度,提出了记忆多存贮模型,认为记忆可分成3个不同的子系统,包括感觉记忆、短时记忆、长时记忆。Baddeley和Hitch(1974)在短时记忆基础上提出了工作记忆模型,认为工作记忆负责暂时存储和处理认知任务所需信息,由中央执行系统、语音回路、视觉空间模板和情景缓冲器4个子系统构成。情景缓冲器可视为整合视觉、空间和语音的成分,与长时记忆相关联(彭聃龄,2019)。在工作记忆的早期(视觉编码)阶段,客体的位置与客体本身作为一个整合的信息单元储存,但随工作记忆的最终形成,位置表征与客体表征会分离开来(鲍旭辉,2014)。

长时记忆得益于神经科学、心理学等多学科的不懈研究,逐步形成了多重记忆理论。该理论认为大脑依赖于多个独立、并行活动的模块来存储信息,每个模块具有不同的性质、动力学和神经基础(图1)(Ferbinteanu,2019)。不同形式的记忆因存储的信息性质不同而具有不同的发展轨迹与可塑性,以及不同的学习和遗忘速度(Nadel,2020)。

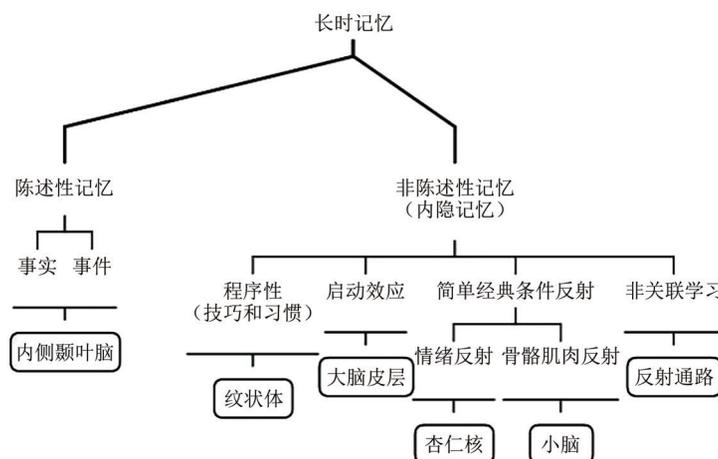


图1 多重记忆理论对长时记忆的划分(译自Ferbinteanu,2019)

Fig. 1 The classification of long-term memory by multiple memory theory (translated from Ferbinteanu, 2019)

关于记忆的基本单元,Miller(1956)提出了“组块”的概念,即将若干较小信息单位联合组成较大的信息加工单位及加工过程。记忆容量是就

组块数而言的。工作记忆的容量是有限的,视觉空间模板的容量不仅受客体特征的影响,同时受视觉场景结构表征的影响(Brady等,2011)。而

长时记忆可容纳的组块则是无限的（鲁忠义和杜建政，2005）。

机器地图概念模型中提出其具有感知地图、工作地图和长时地图3类，正是受记忆多存贮模型的启发。但是这3类地图中的内容及其关系，还需要借鉴上述认知研究成果加以细化。

2.2 心象地图的内容与组织

心象地图被认为是人类对环境的心理表征（Tversky, 1993），由加利福尼亚大学的心理学家Tolman（1948）通过大鼠的空间认知行为实验而提出。Tolman（1948）认为生物体在神经系统中建立了类似地图的结构，并得出4个重要观点：（1）心象地图存在多种尺度；（2）存在由相应的生物结构支撑的多种学习方式；（3）除了基于奖励的学习外，隐式学习也是存在的；（4）动物在自己学到的地图中会对事件存在预期。这4个观点奠定了心象地图最基本的特点，如多尺度性、多种学习方式、以空间信息为基础整合其他信息等。

随后，心象地图的研究主要从神经科学和行为实验两个方面开展。神经科学主要探究构成心象地图的大脑神经机制。O'Keefe和Nadel（1978）在Tolman研究基础上提出海马体是产生和存储心象地图的大脑中枢；心象地图作为一种环境心理映射系统与多类记忆相关；心象地图在探索环境时被创建，可以迅速获取并用于导航的理论设想。上世纪70年代起，大脑海马—内嗅皮层中的位置细胞、方向细胞、边界细胞和网格细胞陆续被发现（O'Keefe和Dostrovsky, 1971；Hafting等, 2005；Keinath, 2016；Moser和Moser, 2013），使人们意识到大脑依托这些表达特定信息的细胞实现对物理世界的编码，证实了心象地图的存在。

行为实验主要研究心象地图的功能、结构、内容、形式等。相关证据表明，心象地图可以使空间行为变得灵活，比如路线规划或调整（Whittington等, 2022）。人类的心象地图是结构化的、多层次的（Hirtle和Jonides, 1985；McNamara, 1986；McNamara等, 1989）；具有全局以及单个或多个局部参考框架（Meilinger等, 2014），局部参照框架之间的空间关系通过全局参考框架确定（Greenauer和Waller, 2010）。心象地图的结构化特点与记忆中的“组块”（Gobet等, 2001）和认知的分层模型（Cohen, 2000）一致，并具有多重信息

处理优势，包括检索速度和效率的提高，以及更为经济的存储空间（Madl等, 2016b）。Lynch（1960）以城市导航为例，指出心象地图的认知结构包括路径、边缘、区域、节点和地标。Tversky（1993）用“认知拼贴”来描述心象地图的本质，认为空间对象的心理表征是部分重叠的知识片段的集合，其中个别的知识片段可能是空间的、视觉的或文本的，空间分量可能是扭曲和变形的。Uttal等（2010）则表明空间分类信息的偏差会随着时间的推移而加大。Kim和Maguire（2018）认为在心象地图中，位置与高度信息同样被编码，因此空间位置的完整三维编码是可能的。可见，心象地图具有与实用地图不一样的结构、内容、组织形式等。

心象地图还可以看作组织各种知识的通用编码机制的实例，说明人类如何学习和使用抽象的、可概括的知识（Behrens等, 2018）。这种知识组织功能使生物能够智能的从稀疏观察中进行快速推理，学习常见的任务规则，从而在新任务中更快地学习和运用（Whittington等, 2022）。

2.3 认知架构中的环境认知与空间记忆

认知架构是通用人工智能研究的一部分，目标是创建能够推理不同领域问题、发展洞察力、适应新情况并自我反思的程序（Kotseruba和Tsotsos, 2020），可用于广泛、多层次、多领域的行为分析（Sun, 2007）。认知架构研究往往基于特定的认知理论，需要符合生物和计算两方面的合理性，以此作为长期发展该框架的理论基础，因此对机器地图研究具有重要的参考价值。

目前所发展的大多数架构研究认知的特定方面，如注意力、情绪等，只有部分架构涉及到环境认知与空间记忆问题，如4D/RCS（Albus, 1991, 2007）、SOAR/SVS（Lehman等, 2006；Wintermute, 2009）、ACT-R（Anderson等, 2004；Trafton等, 2013）、Casimir（Schultheis和Barkowsky, 2011）、CLARION（Sun, 2012）、LIDA（Madl等, 2013；Kugele和Franklin, 2021）等。O'Reilly（1998）、Webb（2001）和Madl等（2016a）分别对生物启发计算模型的设计原则给出了具有借鉴意义的结论。结合上述研究与机器地图的特点，本文从环境认知与表达的任务、维度、参考系、表征形式等视角对上述认知架构进行分析（表1）。

表1 典型认知架构中的“地图”对比
Table 1 Comparison of “maps” in typical cognitive architectures

对比项	4D/RCS	SOAR/SVS	ACT-R	Casimir	CLARION	LIDA
理论基础	皮质超柱与其下丘脑核的神经机制	Kosslyn的视觉意象理论	具身认知	空间类比表征结构	多重记忆理论	全局工作空间理论、多重记忆理论、情境(具身)认知、认知负载理论等
位置	存在于长期存储器 and 短期存储器中的世界模型知识库	存在于系统的工作记忆和长期记忆	存在于描述性记忆和程序性记忆中	存在于系统的工作记忆和长期记忆	存在于系统的显性记忆和隐性记忆中	存在于系统的工作记忆和长期记忆
任务	预测、更新、规划、任务执行	运动规划、仿真环境中空间问题解决	操纵无人机:预测、规划、地图构建、参考系变换	空间知识处理、空间推理	复杂雷区导航	路径规划、地图学习
内容	外部世界的时间、空间、实体、事件和状态信息	外部实体及其空间关系信息	对象特征、位置、语义信息,以及情境信息	拓扑关系、距离和方向知识、形状信息	时间、距离、方向、	位置、语义、距离、形状等
维度	二维和三维	二维和三维	二维和三维	—	二维	二维和三维
参考系	世界坐标系、对象坐标系、自我中心球	全局坐标系、自我中心坐标系、任意坐标系(定性描述)	世界坐标系、自我中心坐标系	世界坐标系、自我中心坐标系	世界坐标系、自我中心坐标系	世界坐标系、自我中心坐标系
表征形式	包括矢量地图、地图像素帧、列表或框架、符号计算。其中:空间分布用二维地图表示,外部世界投影到二维平面所缺失的知识用地图叠置层表示,叠置层数量不限;关于实体、事件和状态的知识用列表或框架表示;物理、化学、光学、逻辑、数学规则用函数及参数表示	包括二维像素数组、3D多面体、场景图以及符号表征。其中:视觉缓冲区以二维像素数组表示视觉信息。空间场景包含来自多种感官的信息,定量地表示为3D空间中描述多面体的连续坐标。针对视觉、空间和运动数据的长期记忆,称为感知长时记忆	主要采用符号计算。其中:在视觉空间中描述图像信息,在构型空间进行导航和定位;在操纵空间进行抓取等操作	采用类似语义网的形式。其中:对象类别及对象自身以及对象间的空间关系用语义网的形式存储在长期记忆中。工作记忆负责将长期记忆检索的结果生成与任务相关的表征	采用局部分布表示的显式知识和存储在神经网络中的隐式知识。其中:空间表示可以通过以“块”(类似于ACT-R块)的形式关联显式知识来获得;相应的感官输入用隐式表示	采用分层的模态表征。其中:表示对象或地标的感知关联节点与位置节点相关联。位置节点是表示空间位置的特殊感知关联节点;它们排列在具有不同分辨率的二维矩形网格层中。各层相互连接,多个高分辨率位置节点投影到单个低分辨率位置节点(有重叠);实现了空间聚类
分辨率	取决于地图生成和使用方式	—	—	取决于地图生成和使用方式	—	分层认知地图

注:表中“—”为文献未提及。

表1所列的认知架构中,除Casimir是专注于空间知识加工的架构外,其他架构都属于通用认知架构。分析表1可见,认知架构的基本模块往往与所选择的认知理论相吻合,生物启发的特点突出。尽管建立在不同的理论基础之上,但围绕环境认知,上述认知架构的空间任务具有相似性,大多数都包含导航、路径规划、地图构建等,这是由于无人平台的复杂行为均需以这些空间行为为基础,体现出环境认知的基底性作用。而围绕

架构的目标任务,环境认知的内容也呈现出类似的特点,说明在较为抽象的层次上,环境中的事物事件的位置信息、几何信息、语义信息、关系信息及其发展演化,都与无人平台密切相关。从认知结果的维度和表征形式可以看出,大部分架构都可以提供二维或三维的认知结果;但表征形式具有较大差异,这与架构所采用的计算模型、推理方式密切相关,体现出环境表征与计算系统的紧密联系;同时在单一架构当中,认知结果的

表征形式也是多样化的，说明环境认知结果本身的复杂性，单一形式无法完全表达环境相关内容，也无法支撑认知架构系统的各项任务。

在所有架构当中，记忆都是重要的组成部分。但对于架构中的记忆分类，所选择的方案并不相同，如 4D/RCS、SOAR/SVS、Casimir 都采用了短时—长时记忆分类，ACT-R 采用了描述性记忆和

程序性记忆分类，而 CLARION、LIDA 则在短时—长时记忆分类基础上进一步细分，以应对不同内容需要。表 2 选取了 CLARION 和 LIDA 中与环境认知相关的记忆分类以及记忆与内容、表征的对应关系，体现出不同类型记忆功能上重叠并相互补充的特点。

表 2 CLARION 和 LIDA 中记忆类型及与内容对应关系

Table 2 Types of memory and their correspondence to content in CLARION and LIDA

认知架构	记忆分类	记忆类型与内容、表征类型的关系		
		记忆类型	表征实体	表征类型
CLARION	长时记忆： 外显记忆：程序性记忆、语义记忆、情境记忆	外显记忆	规则和块	符号/局部表征
	内隐记忆：程序性记忆、语义记忆、情境记忆	内隐记忆	神经网络	分布式表征
	工作记忆： 感觉输入、目标结构、其他临时信息			
LIDA	长时记忆： 知觉联想记忆、陈述性记忆、短暂情景记忆、空间记忆、程序性记忆、感觉运动记忆、注意力选择	知觉联想记忆	对象、事件、实体、概念及关系的特征	节点关联
		陈述性记忆	情境和语义	规则、抽象符号
		空间记忆	认知地图	分层节点关联
	短时记忆： 感觉记忆、工作空间、全局工作空间、运动选择、运动计划执行	程序性记忆	图式	抽象模板的实例化

2.4 机器人系统的环境认知

与认知架构的高层次、普适性相对应，一些机器人系统瞄准单一任务或某类复杂环境开展长距离/长时间自主环境探索，也取得了重要进展，如 Tesla 无人车道路行驶、专注机器人自主探索地下复杂地形的 DARPA SubT 项目 (DARPA, 2023)、波音公司的水下环境全自主探索无人潜航器 Echo Seeker (Boeing, 2015) 等。这些机器人系统往往在技术体系中部分借鉴认知理论或加入认知启发的模块，并取得了较好效果。

例如近年兴起的基于鸟瞰视图 BEV (Bird Eye View) 的自动驾驶感知决策一体化技术 (Hu 等, 2022) 就是典型代表。基于 BEV 的感知决策一体化技术包括感知、预测与规划 3 个模块。从感知到规划，整个流程循环往复执行，为无人驾驶车辆提供端到端的实时感知与决策能力，但其并不包括“记忆”模块，且感知、预测与规划模块须进行离线样本学习。已有学者在机器人系统中引入双记忆模块，并开发了记忆的检索、遗忘、巩固和编码方法，用来提升机器人系统在复杂环境下

对新旧空间知识的持续学习能力，最终实现鲁棒的空间定位与地点识别 (Yin 等, 2023)。

总体而言，记忆和心象地图的组织性、结构化、分布式的特点已得到普遍认同。这些特点已经在认知架构和机器人系统的技术体系中得到应用，走通了认知理论应用于计算系统的路径。因此，以空间认知相关理论为基础构建机器地图的建图模型，本身是可行的。但由于记忆和心象地图研究本身仍存在成果分散、多视角解读、多维度描述等特点，使得如何将相关理论与研究问题相契合，是机器地图建图模型面临的重要问题。因此，首先需要明确机器地图任务目标，在此基础上抽象出认知逻辑引导下的机器地图建图模型构建原则，进而设计建图模型，这是将认知理论与机器地图相结合的可行路径。

3 机器地图的建图模型

3.1 机器地图的任务目标与内容分类

机器地图通过感知、工作和长时 3 类地图 (游

雄等, 2023), 为无人平台提供了当前外部环境的
状态, 并为无人平台提供未来一定时间域内的环
境预测, 使其可以规划下一步行动。对外部世界
当前和未来状态的估计与预测, 建立在对过去世
界状态的识别、加工、学习等基础上。因此, 机
器地图的任务目标是为无人平台提供关于外部环
境状态的记录、维护、估计与预测, 其中记录与

维护是估计与预测的基础。

无人平台外部环境的状态主要包括当前的情
境、环境中的事物、事件及其关系。描述情境的
目的是为了机器地图更具有针对性, 能够对无
人平台完成各项任务起到指引作用。为此, 可以
对情境进行细分(图2)。

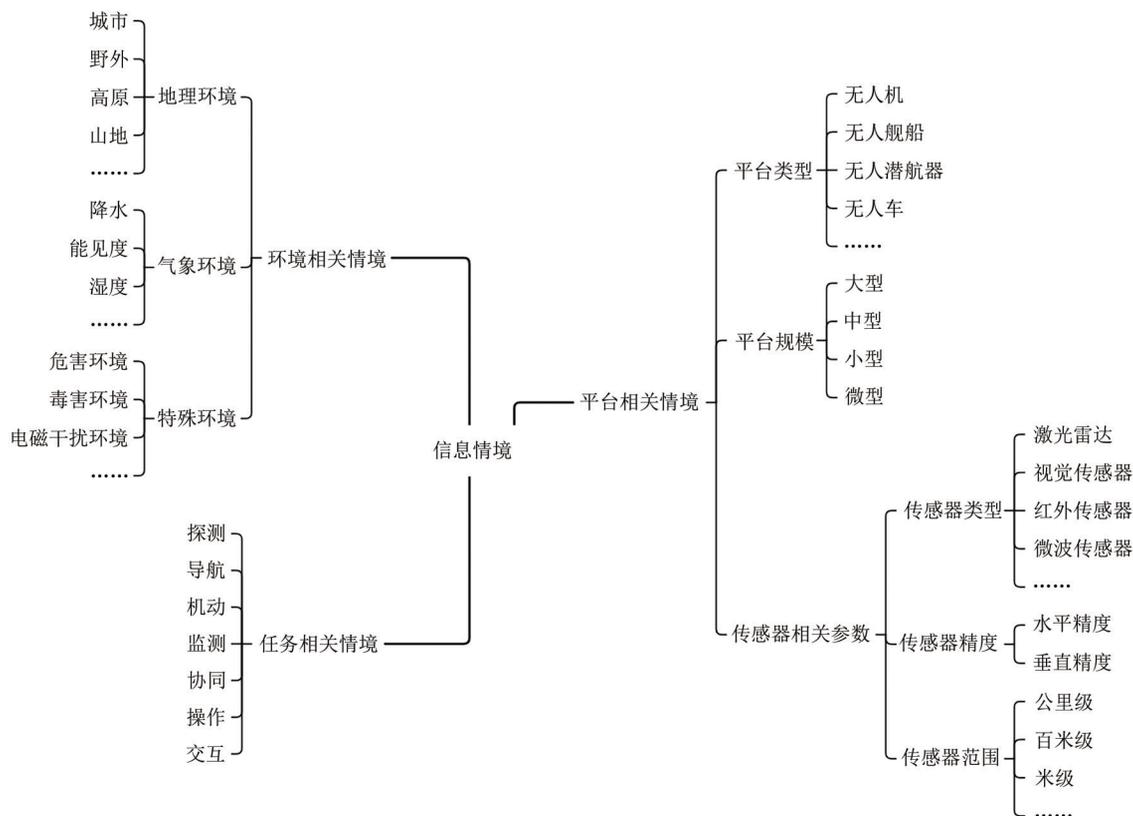


图2 机器地图信息情境划分

Fig. 2 Classification of the context context information of a machine map

对于环境中的事物、事件, 主要描述其物理
特征、几何形状、语义类别、时空位置、演化过
程等多个侧面, 而关系则描述时空关系、语义关
系等。借鉴记忆具有“图式”的特性, 在机器地
图中, 通过对环境信息的深度加工, 可以构建事
物、事件的特征图式、结构图式以及关系图式等,
为无人平台的空间推理提供支撑。由于所描述的
内容丰富、类型多样, 需要针对每种信息的特点
设计适宜该内容的表征形式(表3)。

3.2 机器地图建图模型的设计原则

基于本文第2章认知逻辑分析, 结合机器地图
自身目标与内容, 本文提出机器地图建图模型的

设计原则如下: (1) 基于分布式表征的环境信息
组织: 借鉴记忆中“组块”的思想, 按照内容、
表征形式、加工深度等维度, 设计逻辑结构单元,
以保证机器地图构建和使用的灵活性; (2) 基于
多重记忆理论的逻辑结构设计: 借鉴多重记忆理
论, 将感知地图、工作地图、长时地图3类地图中
的内容区分为性质不同的多种类型, 从而按照类
型确定其抽象程度、更新与遗忘频率以及学习加
工过程; (3) 基于脑认知活动的建图过程建模:
参考认知科学对人脑认知活动的研究, 将机器地
图建图过程抽象为基本活动及其组合形式, 从而
实现机器地图建图过程建模与抽象描述, 为技术
研究与集成提供参考模型。

表3 机器地图中不同内容的表征形式

Table 3 Representations of different contents in a machine map

内容类别	表征形式
物理特征	栅格数据(图像块、点云块);符号表征;函数、参数等
几何形状	栅格数据(图像块、点云块);符号表征
语义类别	语义树或网络
空间关系	关系模型(符号表征)
时空位置	抽象位置描述(符号表征)
语义关系	语义树或网络;
演化过程	符号表征;函数、参数等
特征图式	显式或隐式特征描述
结构图式	符号表征;语义网络
关系图式	符号表征;语义网络
知识规则	显式或隐式知识描述(符号表征)
情境信息	符号表征;语义网络

3.3 机器地图的逻辑结构设计

在本文中，机器地图的逻辑结构是在认知逻辑引导下，对机器地图的结构组成与组分间关系的抽象描述。结合上述分析以及3类地图划分，本文设计了如下的机器地图结构（图3）。

如图3所示，机器地图的逻辑结构以感知地图、工作地图和长时地图为基本组织形式。在每类地图中，所包含的信息类型大致相同，如3类地图都具备空间信息、视觉信息、情境信息。但长时地图还具有图式、先验知识等信息。在每类地图中，不同类型信息之间存在转化或关联关系，而转化或关联关系都需要通过每类地图对应生成器中的计算组件来实现。这些计算组件功能相对单一，复用性强。

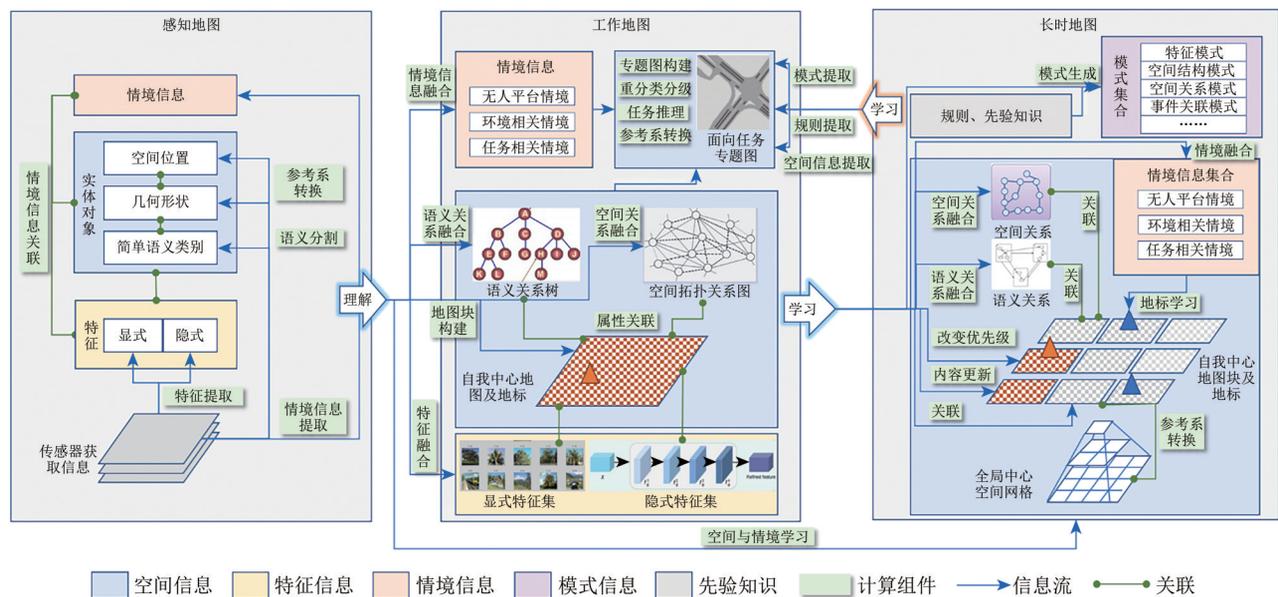


图3 认知视角下机器地图逻辑结构设计

Fig. 3 The logical structure of a machine map from the cognitive perspective

感知地图类似于感觉记忆，但并不仅仅是存储传感器获取的信息，还要进行初步加工，获得实体对象的特征、位置、几何形状以及简单或粗略的语义类别等信息。感知地图的信息会传递给工作地图，在工作地图中进一步加工。工作地图功能上类似于工作记忆，包含视觉信息、空间信息、情景信息以及为完成特定任务而构建的专门地图。在工作地图中，视觉信息主要是实体的特征信息，一个实体可具有多种特征。针对感知地图中不断传输的特征数据，工作地图要进行比对、融合等，形成特征数据集，并与实体相关联。工

作地图中的空间信息主要是指以无人平台为参照系构建的自我中心地图块，其构建主要是将感知地图中形成的不同视角、类型、分辨率等的实体信息进行融合以及参考系转换等。地图块中包含空间参考、实体的几何形状与空间位置以及地标，多个地标构建起该地图块的骨架。地标也是划分地图块的重要标志，以保证每个地图块在信息量和数据量之间达到一定的平衡。而实体语义类别与关系、空间关系单独存放，并与地图块中的实体关联。情境信息将视觉信息与空间信息与特定的情境相关联。工作地图还具有面向任务提供专

门地图的能力,即结合长时地图中的先验、规则以及情境推理结果等,通过注意力学习获得面向任务的信息要求,对基础环境模型进行加工,如参考系转换、重新分类分级、推理计算等,形成面向任务如路径规划、导航、探测等的专门地图。

长时地图以感知地图和工作地图为信息来源,将感知地图和工作地图中相对零散的信息进行更广泛的关联、管理、加工,形成具有全局参考的环境模型。长时地图将工作地图形成的自我中心地图块进行关联、整合,并与全局中心多尺度空间网格形成位置关联,使得每个自我中心地图块既保持局部坐标系的精度,又具有全局位置。而每个自我中心地图块中的内容类型与工作地图相类似,但长时地图管理的信息更全面,需要将工作地图中的信息进行整合,如语义关系融合、空间关系的融合等。长时地图中还存有面向不同任务的先验知识、规则知识等,服务于面向任务的工作地图构建。长时地图保留了抽象的情境信息,

并与地图块形成关联。因此,在长时地图中可能具有相同空间范围与空间尺度、但情境不同的多个地图块。这样的组织形式便于长时地图进行深加工,如图式的提取。图式是长时地图专有信息,具有不同类型与层次,如不同类型实体的特征图式、结构图式、实体之间的空间依存关系图式、事件发生顺序图式等。图式对于空间推理与环境状态预测具有重要作用。

3.4 机器地图的建图活动与过程设计

区别于测制分离的地图制图过程,机器地图的建图是在无人平台与环境交互过程中自主完成的,具有不断在以往经验中学习的能力。而无人平台通过运用机器地图,环境认知能力不断提高,行动能力不断增强。机器地图的建图与理解、注意、推理、学习、行动等基本活动相关。这些基本活动的序列构成了机器地图的建图过程。表4说明了这些基本活动的含义。

表4 机器地图建图的基本活动

Table 4 Basic activities in building a machine map

基本活动	含义	进一步解释
理解	对无人平台获取的环境感知数据自动解译,提取其中环境要素的基本信息,形成对当前任务情境的基本理解	浅层理解:基于各类传感器获取的信息,进行实体形状、简单语义等理解 深层理解:融合多类型传感器经浅层理解后得到的不同形式、视角、坐标系等信息,构建完整的空间实体及其关系
注意	采用注意力机制不断检查工作地图或长时地图中的环境模型,从中选择显著性内容	—
推理	理解任务需求,自主开展环境认知的推理	任务推理:根据情境信息确定任务相关实体及关系类型 内容推理:确定显著性内容中哪些用于学习及行动
学习	通过重复、经验等获得新的信息、行为模式或能力的过程	外显学习:通过推理驱动,注意机制选择的内容被用于学习并在工作地图中生成面向任务的专门地图 内隐学习:长时地图通过学习来演化发展,实现信息与知识积累
行动	在机器地图的支撑下,形成空间行为序列	—

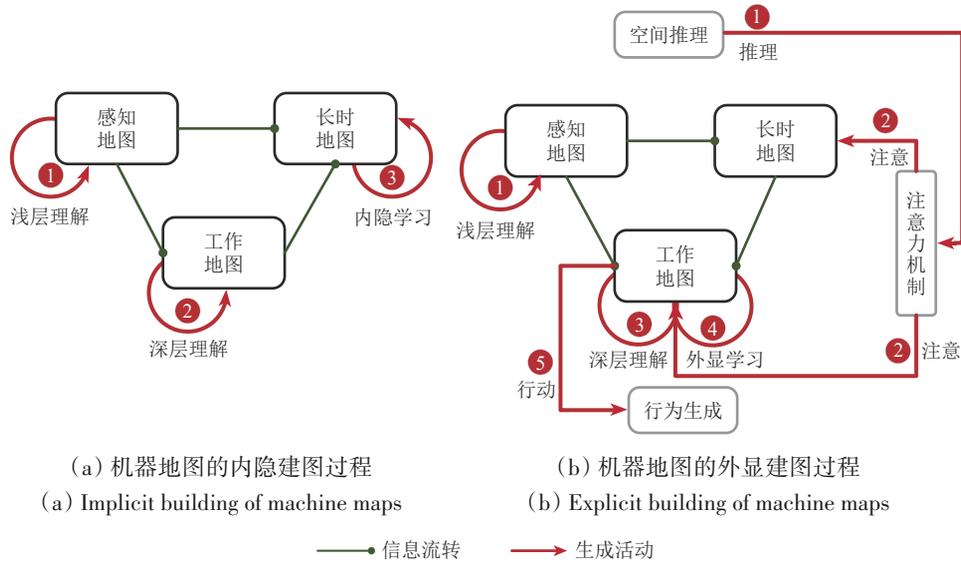
综合上述活动可以发现,机器地图存在两个目标、路径不尽相同的建图过程(图4)。

(1) 内隐建图过程:如图4(a)所示,在无人平台的运行过程中,通过感知地图和工作地图的不断演化与支撑,长时地图中的内容不断丰富、知识累积不断增加。该过程包含3个活动:浅层理解、深层理解和内隐学习。首先,感知地图获取无人平台对外部任务环境或内部系统环境的感知信号,包括视觉(图像、视频)、听觉(音频)、文字(指令或者音频)等多模态感知信息,并自

动触发特征检测器,从中提取包括显式特征(如结构线、图像语义块)和隐式特征(如隐向量表示)在内的底层特征。而后,感知地图进行实体要素解译,获取其空间、几何、语义属性信息,产生即时感知结果,送入工作地图。工作地图基于感知结果,进行形式、视角、坐标系等方面信息的融合,构建完整的空间实体及其关系,形成具有自我中心参考的地图块,并送入长时地图。长时地图将对新进入的自我中心地图块进行系列处理,包括建立该地图块与全局中心参考的映射

关系、该地图块的语义信息、关系信息、情境信息与长时地图原有信息之间的融合、针对重复出现的地块刷新其优先级等。进一步的，长时地图

还需要检测该地图块中是否包含新的特征图式、结构图式、关系图式等，并更新已有的图式信息库，实现长时地图的演化发展。



(a) 机器地图的内隐建图过程
(a) Implicit building of machine maps
(b) 机器地图的外显建图过程
(b) Explicit building of machine maps

—●— 信息流转 —→ 生成活动

图4 机器地图的内隐与外显建图过程

Fig. 4 Implicit and explicit building of machine maps

(2) 外显建图过程：如图4 (b) 所示，面向特定的任务，工作地图会在其自身、感知地图和长时地图支撑下形成满足特定任务的专门地图并支撑空间行为的生成。该过程包含6个活动：浅层理解、推理、注意、深层理解、外显学习和行动。

与内隐生成过程相同，外显生成过程同样以浅层理解为开端，之后在工作地图中进行深层理解。但外显生成过程在浅层理解的同时，需要进行任务推理和内容推理，以获得与当前任务、环境、设备等情境要素最相关的实体与关系类型。推理的结果将传递给注意力模块。注意力模块采用注意力机制不断检查工作地图或长时地图中的环境模型，从重要等级、紧急程度、移动性以及感知特征显著性等方面选择显著性内容。注意筛选也会触发相应的外显学习过程，使得工作地图利用深层理解的结果、长时地图获取的相关空间记忆、情境记忆和陈述性记忆，生成面向特定任务的环境模型，支持无人平台完成空间决策行为生成。在这一过程中，感知地图和工作地图都具有瞬态更新的特点。

内隐建图过程和外显建图过程在无人平台运行过程中通常是并行的，共同为无人平台的环境认知提供帮助。

4 结 论

本文以机器地图概念模型为指导，借鉴认知相关领域的研究成果，分析了机器地图的认知逻辑，并在此基础上设计了机器地图的建图模型。本文的研究本质上是对机器地图认知计算机制的阐释，为后续机器地图技术与验证提供参考框架。但本文仅仅是机器地图相关研究中的一个视角，偏重于理论模型设计，因此选择合适的任务与场景进行原理性验证，是今后需要完成的首要工作。希望通过本文引起同行对机器地图研究的关注，共同推动机器地图的发展。

机器地图是认知主体迁移而产生的一种新型地图，但其意义不止与此。本文认为机器地图将对虚拟地理环境以及数字孪生环境的构建产生重要影响，这种影响体现为一种双向促进的关系。

(1) 机器地图研究可提高虚拟地理环境以及数字孪生环境的数据获取能力。机器地图构建的目标之一是为无人平台自主认知环境提供工具。在机器地图的加持下，无人平台可以在复杂、危险等环境中完成包括环境探索、导航、监测等各项空间行为。由于机器地图本身所具有的形式化特征，使其不仅可以满足无人平台自主使用，也

可以作为虚拟地理环境和数字孪生环境的重要数据来源,使虚拟地理环境和数字孪生环境所模拟的环境更加复杂多样、实时有效,从而提升虚拟地理环境和数字孪生环境的现势性与准确性。

(2) 虚拟地理环境以及数字孪生可为机器地图提供验证模型的仿真实验环境。在无人平台相关研究中,构建仿真环境进行认知概念模型开发、功能研发测试、性能对比检验是一种常用的有效手段。机器地图的研究尚属起步,特别需要有效的仿真环境对基础理论与模型框架进行可行性、效率与效果等多方面验证。虚拟地理环境和数字孪生环境以数据库和模型库为支撑,具备模拟各种环境状态的能力(林琿等,2016),是机器地图进行仿真实验的理想平台。但无人平台的环境认知机理与人不同,目前面向人认知特性的虚拟地理环境及数字孪生环境的构建方式,是否适合机器地图,尚缺乏系统的研究与论证。本文将机器地图的建图模型分解为逻辑结构、建图活动与建图过程,可以针对逻辑结构中的每种结构要素、每个建图活动以及完整的建图过程进行有针对性的分析研究,从而降低服务于机器地图研究的虚拟地理环境及数字孪生环境构建的难度,使其应用面得到扩展与深化。满足上述要求的虚拟地理环境和数字孪生环境如何构建,将是后续研究的重要问题之一。

参考文献(References)

- Albus J S. 1991. Outline for a theory of intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(3): 473-509 [DOI: 10.1109/21.97471]
- Albus J S. 2010. Reverse engineering the brain. *International Journal of Machine Consciousness*, 2(2): 193-211 [DOI: 10.1142/S1793843010000448]
- Anderson J R, Bothell D, Byrne M D, Douglass S, Lebiere C and Qin Y L. 2004. An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111(4): 1036-1060 [DOI: 10.1037/0033-295X.111.4.1036]
- Atkinson R C and Shiffrin R M. 1968. Human memory: a proposed system and its control processes. *Psychology of Learning and Motivation*, 2: 89-195 [DOI: 10.1016/S0079-7421(08)60422-3]
- Baddeley A D and Hitch G. 1974. Working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 8: 47-89 [DOI: 10.1016/S0079-7421(08)60452-1]
- Bao X H. 2014. Promotion Effect of Visual Long-Term Memory on Visual Short-Term Memory. Xi'an: Shaanxi Normal University (鲍旭辉. 2014. 视觉长时记忆对视觉短时记忆的促进作用. 西安: 陕西师范大学)
- Behrens T E J, Muller T H, Whittington J C R, Mark S, Baram A B, Stachenfeld K L and Kurth-Nelson Z. 2018. What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior. *Neuron*, 100(2): 490-509 [DOI: 10.1016/j.neuron.2018.10.002]
- Boeing. 2015-07-14. Meet Echo Seeker-Boeing's newest unmanned underwater vehicle goes deep, goes long[N/OL]. [2023-02-01] <https://www.boeing.com/features/2015/07/bds-echo-seeker-07-15.page>
- Brady T F, Konkle T and Alvarez G A. 2011. A review of visual memory capacity: beyond individual items and toward structured representations. *Journal of Vision*, 11(5): 4 [DOI: 10.1167/11.5.4]
- Chen J, Sun J and Wang G. 2022. From unmanned systems to autonomous intelligent systems. *Engineering*, 12: 16-19 [DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.007]
- Cohen G. 2000. Hierarchical models in cognition: do they have psychological reality?. *European Journal of Cognitive Psychology*, 12(1): 1-36 [DOI: 10.1080/095414400382181]
- DARPA Subterranean (SubT) Challenge[N/OL]. [2023-02-01]. <https://www.darpa.mil/program/darpa-subterranean-challenge>
- Ferbinteanu J. 2019. Memory systems 2018-Towards a new paradigm. *Neurobiology of Learning and Memory*, 157: 61-78 [DOI: 10.1016/j.nlm.2018.11.005]
- Gao J. 2017. The 60 anniversary and prospect of Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1219-1225 (高俊. 2017. 图到用时方恨少,重绘河山待后生——《测绘学报》60周年纪念与前瞻. 测绘学报, 46(10): 1219-1225) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170503]
- Gobet F, Lane P C R, Croker S, Cheng P C H, Jones G, Oliver I and Pine J M. 2001. Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(6): 236-243 [DOI: 10.1016/S1364-6613(00)01662-4]
- Greenauer N and Waller D. 2010. Micro- and macroreference frames: specifying the relations between spatial categories in memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(4): 938-957 [DOI: 10.1037/a0019647]
- Hafting T, Fyhn M, Molden S, Moser M B and Moser E I. 2005. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436(7052): 801-806 [DOI: 10.1038/nature03721]
- Hirtle S C and Jonides J. 1985. Evidence of hierarchies in cognitive maps. *Memory and Cognition*, 13(3): 208-217 [DOI: 10.3758/BF03197683]
- Hu S C, Chen L, Wu P H, Li H Y, Yan J C and Tao D C. 2022. ST-P3: end-to-end vision-based autonomous driving via spatial-temporal feature learning//17th European Conference on Computer Vision. Tel Aviv: Springer: 533-549 [DOI: 10.1007/978-3-031-19839-7_31]
- Keinath A T. 2016. The preferred directions of conjunctive grid X head direction cells in the medial entorhinal cortex are periodically organized. *PLoS ONE*, 11(3): e0152041 [DOI: 10.1371/journal.pone.0152041]
- Kim M and Maguire E A. 2018. Hippocampus, retrosplenial and para-

- hippocampal cortices encode multicompart ment 3D space in a hierarchical manner. *Cerebral Cortex*, 28(5): 1898-1909 [DOI: 10.1093/cercor/bhy054]
- Kotseruba I and Tsotsos J K. 2020. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications. *Artificial Intelligence Review*, 53(1): 17-94 [DOI: 10.1007/s10462-018-9646-y]
- Kugele S and Franklin S. 2021. Learning in LIDA. *Cognitive Systems Research*, 66: 176-200 [DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.11.001]
- Lehman J F, Laird J and Rosenbloom P. 2006. A gentle introduction to soar, an architecture for human cognition[EB/OL]. https://www.academia.edu/29539874/A_Gentle_Introduction_to_Soar_an_Architecture_for_Human_Cognition_2006_Update
- Lin H, Zhang C X, Chen M and Zheng X Q. 2016. On virtual geographic environments for geographic knowledge representation and sharing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1290-1298 (林辉, 张春晓, 陈旻, 郑新奇. 2016. 论虚拟地理环境对地理知识的表达与共享. *遥感学报*, 20(5): 1290-1298) [DOI: 10.11834/lrs.20166185]
- Lu Z Y and Du J Z. 2005. *Psychology of Memory*. Beijing: People's Education Press (鲁忠义, 杜建政. 2005. *记忆心理学*. 北京: 人民教育出版社)
- Lynch K. 1960. *The Image of the City*. Cambridge: MIT Press
- Madl T, Franklin S, Chen K, Montaldi D and Trapp R. 2016a. Towards real-world capable spatial memory in the LIDA cognitive architecture. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 16: 87-104 [DOI: 10.1016/j.bica.2016.02.001]
- Madl T, Franklin S, Chen K and Trapp R. 2013. Spatial working memory in the LIDA cognitive architecture//The 12th International Conference on Cognitive Modelling. Ottawa: [s.n.]
- Madl T, Franklin S, Chen K, Trapp R and Montaldi D. 2016b. Exploring the structure of spatial representations. *PLoS ONE*, 11(6): e0157343 [DOI: 10.1371/journal.pone.0157343]
- McNamara T P. 1986. Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, 18(1): 87-121 [DOI: 10.1016/0010-0285(86)90016-2]
- McNamara T P, Hardy J K and Hirtle S C. 1989. Subjective hierarchies in spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(2): 211-227 [DOI: 10.1037/0278-7393.15.2.211]
- Meilinger T, Riecke B E and Bühlhoff H H. 2014. Local and global reference frames for environmental spaces. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(3): 542-569 [DOI: 10.1080/17470218.2013.821145]
- Miller G A. 1956. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2): 81-97 [DOI: 10.1037/h0043158]
- Moser E I and Moser M B. 2013. Grid cells and neural coding in high-end cortices. *Neuron*, 80(3): 765-774 [DOI: 10.1016/j.neuron.2013.09.043]
- Nadel L. 2020. What is a memory that it can be changed?//Lane R D and Nadel L, eds. *Neuroscience of Enduring Change*. Oxford: Oxford University Press: 11-24 [DOI: 10.1093/oso/9780190881511.003.0002]
- O'Keefe J and Dostrovsky J. 1971. The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Research*, 34(1): 171-175 [DOI: 10.1016/0006-8993(71)90358-1]
- O'Keefe J and Nadel L. 1978. *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Oxford University Press
- O'Reilly R C. 1998. Six principles for biologically based computational models of cortical cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(11): 455-462 [DOI: 10.1016/S1364-6613(98)01241-8]
- Peng D L. 2019. *General Psychology*. 5th ed. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group (彭龄. 2019. *普通心理学*. 5版. 北京: 北京师范大学出版社)
- Schultheis H and Barkowsky T. 2011. Casimir: an architecture for mental spatial knowledge processing. *Topics in Cognitive Science*, 3(4): 778-795 [DOI: 10.1111/j.1756-8765.2011.01151.x]
- Sun R. 2007. The importance of cognitive architectures: an analysis based on CLARION. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 19(2): 159-193 [DOI: 10.1080/09528130701191560]
- Sun R. 2012. Memory systems within a cognitive architecture. *New Ideas in Psychology*, 30(2): 227-240 [DOI: 10.1016/j.newideapsych.2011.11.003]
- Tolman E C. 1948. Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4): 189-208 [DOI: 10.1037/h0061626]
- Trafton J G, Hiatt L M, Harrison A M, Tanborello F P, Khemlani S S and Schultz A C. 2013. ACT-R/E: an embodied cognitive architecture for human-robot interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2(1): 30-55 [DOI: 10.5898/JHRI.2.1.Trafton]
- Tversky B. 1993. Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models//Frank A U and Campari I, eds. *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*. Marciana Marina: Springer: 14-24 [DOI: 10.1007/3-540-57207-4_2]
- Uttal D H, Friedman A, Hand L L and Warren C. 2010. Learning fine-grained and category information in navigable real-world space. *Memory and Cognition*, 38(8): 1026-1040 [DOI: 10.3758/MC.38.8.1026]
- Webb B. 2001. Can robots make good models of biological behaviour?. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(6): 1033-1050 [DOI: 10.1017/S0140525X01000127]
- Whittington J C R, McCaffary D, Bakermans J J W and Behrens T E J. 2022. How to build a cognitive map. *Nature Neuroscience*, 25(10): 1257-1272 [DOI: 10.1038/s41593-022-01153-y]
- Wintermute S. 2009. An overview of spatial processing in Soar/SVS. CCA-TR-2009-01. Center for Cognitive Architecture University of Michigan
- Yin P, Abuduweili A, Zhao S Q, Xu L Y, Liu C L and Scherer S. 2023. BioSLAM: a bioinspired lifelong memory system for general place recognition. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(6): 4855-4874 [DOI: 10.1109/TRO.2023.3306615]

You X, Jia F L, Tian J P, Yang J and Li K. 2023. The machine map and its conceptual model. *Journal of Geo-Information Science*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5809.p.20230308.1038.002.html> (游

雄, 贾奋励, 田江鹏, 杨剑, 李科. 2023. 机器地图及其概念模型. *地球信息科学学报*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5809.p.20230308.1038.002.html>)

Cognitive logic and map construction model of machine maps

JIA Fenli, YANG Jian, YOU Xiong, LI Ke, TIAN Jiangpeng, ZHENG Shulei

School of Geospatial Information, SSF Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Unmanned platforms are rapidly being used in many different fields. However, improving their cognition and understanding of complex environments remains a challenging research problem. Machine maps are a new class of maps proposed to address this problem. Based on the conceptual model of the machine map, this paper adopts the research perspective of cognitive science and further proposes a theoretical model of the machine map's construction, which is cognitive, plausible, and consistent with the cognitive structure. This paper first discusses the theoretical roots of machine maps in cognitive science in terms of the origin, formation, and development of machine maps. Second, this paper briefly reviews the research on the structure and generation of memory models, mental image maps, cognitive architectures, and environmental cognition issues of robotic systems. Furthermore, it discusses the cognitive structure of the machine map and its supporting role in the map construction model of machine maps. Third, this paper proposes the design principles of the machine map's construction model, which includes the organization of environment information using distributed representations, structural design of the machine map using a multistore memory system, and modeling of the generation of the machine map with a reference of brain cognitive activities. Furthermore, this paper presents the task objectives, content classification, detailed logical structure, and generation of the machine map's construction. The perceptual map conducts preliminary processing of information acquired by sensors to obtain information about the features, location, geometry, and semantics of entities in the surrounding environment. The working map is functionally similar to the working memory in human brains, which contains visual information, spatial information, situational information, and specialized maps constructed to accomplish specific tasks. The long-time map uses perceptual map and working map as information sources, and the fragmented information in the perceptual map and working map is associated, managed, and processed more extensively to form an environment model with global reference. Finally, the machine map generation's primary activities (e.g., understanding, attention, inference, learning, and action) and processes (e.g., implicit map generation and explicit map generation) are discussed based on the logical structure. Implicit map generation refers to the process in which the content and knowledge in the long-term map are continuously enriched and accumulated through the continuous evolution and support of the perceptual map and the working map during the operation of the unmanned platform. This process contains three activities: shallow understanding, deep understanding, and implicit learning. Explicit map generation refers to the process in which the working map forms a specialized map for a given task to meet the specific task requirements and supports the generation of spatial behavior under the support of itself, perceptual map, and long-term map. The process consists of six activities: superficial understanding, inference, attention, deep understanding, episodic learning, and action. The cognitive structure and map construction model, which is an interpretation of the machine map cognitive computing system, can serve as a basic framework for researchers interested in the machine map, enabling them to carry out collaborative research at a more abstract level, and provide references for the integration, evaluation, and application of related technologies and data. This paper also describes new requirements and goals for constructing digital twin or virtual geographic environments.

Key words: remote sensing, machine map, cognitive logic, map construction model, unmanned platform

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42130112, 42271464)