

# 基于本体的无人系统任务规划研究综述

远望智库预见未来 无人争锋 2022-04-07 13:49

收录于话题

#无人系统 2 #任务规划 1 #分层规划网路 1 #航迹规划 1

电话 | 010-82030532 手机 | 18501361766  
微信 | tech99999 邮箱 | yw@techxcope.com



来源：无人机 作者：庞维建<sup>1,2</sup>, 李辉<sup>1,\*</sup>, 黄谦<sup>1</sup>, 李朋<sup>1</sup>, 马贤明<sup>1</sup>  
(1. 军事科学院, 北京 100091; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要：**作战知识是提高无人系统的自主作战能力的重要因素。如何系统规范地存储和表示作战知识,使无人系统能够根据高层任务指令,自主完成任务规划,并基于不断更新的战场知识进行重规划和智能决策,是一个新的研究领域。首先,通过对任务规划领域概念、规划方法和知识表示方法的梳理,提出了基于本体的任务规划框架。然后,总结了本体在机器人、无人系统、军事任务规划等领域的应用情况,分析了当前研究的特点和不足,并提出了该领域的重要研究方向。最后,针对构建无人系统任务规划本体时应遵循的原则和需要关注的关键能力指标进行了论述。

**关键词：**本体; 任务规划; 智能规划; 无人系统

## 0 引言

当前,世界主要军事强国都将无人系统研究置于重要的位置,尤其是具备自主能力的无人系统[1-8]。能够完成复杂任务的智能规划和决策是自主能力的重要标志。

在美军的自主控制等级(autonomous control level, ACL)分级[6]中,ACL7级以上为高级自主性,ACL7级的定义为“编队战术目标”。吴森堂提出的导弹自主编队协同制导控制等级(cooperation guidance & control level for missile autonomous formation, CGCL)[9]对最高级自主性——自主自治的定义为能够进行“使命任务运筹和战术任务动态规划”。

“战术目标”和“使命任务”都是相对抽象的任务指令,这种任务指令往往仅明确了任务的目标或者最终状态,而为了达到任务目标应该执行哪些行动、如何执行等任务规划将由无人系统自主完成。

当前,无人系统任务规划的研究主要集中在任务分配和航迹/轨迹规划两个方面,将规划问题看作组合优化问题,在遗传算法[10-11]、粒子群算法[12]、蚁群算法[13]、多智能进化算法[14-16]等智能算法的辅助下完成问题的求解。但是,从本质上来看,任务分配属于调度问题[17],解决的是谁去做的问题,航迹/轨迹规划属于运动规划问题,解决的是如何做的问题。对于一个任务来说,在解决怎么做和谁去做的问题之前,需要解决做什么的问题,这是任务规划需要完成的工作。例如无人机侦察打击任务,无人机完成这个复合任务需要根据所处状态判断执行起飞、机动到目标区域、打开传感器、搜索目标、打击目标、评估打击效果等子任务。这些子任务的规划属于符号规划问题,但当前无人系统自主处理和规划这些子任务的能力还很弱,针对此类问题的研究也很少。

实现这种智能规划能力的关键因素是知识和处理知识的能力[18-19]。这意味着需要一种能够形式化表示和处理战场环境、作战任务等知识的方法,使无人系统能够获取、表示和理解所需的战场知识,并根据获取的知识进行任务的智能规划。

本体技术是一种形式化的知识表示方法[20-21],在服务型机器人和自动化领域具有比较深厚的研究基础,在自主规划、抓取策略、智能空间认知等方面取得了大量的研究成果。军事领域中,

本体技术在战场态势表示与评估、多源信息融合、作战计划表示与校验、决策支持等方面的应用较为成熟,并逐步应用到空间站短期规划、生物恐怖事件救援任务决策、舰空导弹防空任务规划中,促进了军事任务规划和决策智能化的发展。

近几年来本体技术开始应用于无人机、无人驾驶汽车和无人潜航器等领域中,在异构知识库集成、态势表示与评估、智能决策、驾驶意图预测等方面得到了有效应用[22-25]。

如何系统规范地存储和表示战场知识,使无人系统能够根据人类指挥员的高层任务指令,快速地获取战场知识和作战领域经验知识,自主完成任务规划,并在执行过程中进行任务的重规划和智能决策,已经成为一个新的研究领域[26]。

本文首先对任务规划领域的概念、方法和知识表示方法进行系统梳理,分析了任务规划领域的发展方向,提出了基于本体的任务规划框架。然后,介绍了本体在机器人自主化、军事任务规划领域的应用情况,明确了本体在任务规划中的作用,分析了当前基于本体的任务规划研究现状和存在的问题,并提出若干重要的研究方向。最后,论述了无人系统任务规划本体的构建原则和关键能力指标。

1 任务规划发展概述

1.1 任务规划领域概念

路径/航迹规划是在连续空间中规划一条从起始点到终点的可行路径,一般不考虑时间因素。无人机的航迹规划、无人车的路径规划都属于路径/航迹规划的范畴,是空间约束下的优化问题。

轨迹规划在跟踪空间位置的同时,还需要对速度进行跟踪。此外,轨迹规划通常考虑三维场景,如机械臂的运动规划通常是轨迹规划,不仅要满足空间约束,也要满足时间约束。

路径/航迹规划和轨迹规划统称为运动规划,其解决的是怎么做的问题。

任务规划的定义有多种,但总体上来说,任务规划是寻找使问题从初始状态转移到目标状态的一系列行动的过程[27]。任务规划主要解决做什么的问题,通过推理行动的结果,在一系列可能的行动中做出选择。

调度是在一段时间内为任务分配有限资源的问题[28]。调度是一种特殊的情况,在这种情况下已经选择了行动,只留下分配这些任务的问题。调度通常被看作是任务规划的子问题。

## 1.2 任务规划方法

(1) 经典任务规划范式。斯坦福问题求解器(Stanford research institute problem solver, STRIPS)[29]是第一个经典任务规划求解器,问题被描述为实现既定目标,提出了一种使用预先条件和效果表示可执行行动的算子,称为STRIPS算子。经典任务规划在早期人工智能研究中得到广泛的应用,但是这种方法没有明确的时间模型,无法表示任务的资源消耗和需求,无法表征不确定信息,且只能指定达到的目标。

(2) 分层任务网络(hierarchical task network, HTN)。采用递归方法将高层任务扩展为底层任务。扩展过程由称为“方法”的规则驱动,“方法”可以看作是从高层任务到部分有序任务网络的映射以及行动约束集合。HTN最大的优势是可以通过设计“方法”来控制任务分解的过程,而在经典的规划方法中行动的条件和效果只是明确了什么情况下可以使用该行动。HTN规划方法在实际问题中得到广泛的应用[30]。

(3) 决策论规划方法。决策论规划方法将规划问题建模为马尔可夫决策过程[31],这种规划方法中状态的转移是概率的,特别适用于处理不确定情况下的规划问题。但是,马尔可夫决策过程难以解决具有任务目标的规划问题。

## 1.3 任务规划领域知识表示与建模

(1) 任务规划表示语言。规划表示语言是实现任务规划的第一步,STRIPS算子兼有规划问题表示和操作的能力,实现了规划问题的规范化表示,使规划问题的求解更加方便。文献[32]提出的体系结构描述语言,是STRIPS的早期扩展版本,相对于STRIPS提高了表示能力,但是语义模糊没有获得广泛的应用。规划领域定义语言(planning domain definition language,PDDL)是一种标准化的任务表示语言,也是最常用的描述语言[33-34]。PDDL是一种纯符号化方法描述规划问题的语言,无法描述涉及导航等几何计算的子问题。概率PDDL(probabilistic PDDL, PPDDL)是在PDDL语言的基础上扩展而来,能够以概率方式表示行动的结果,具备概率规划能力。面向对象的规划语言[35],融合了面向对象编程的优点,通过一个特定的接口,扩展了符号规划结果的外部访问特性。

(2) 任务规划领域知识表示方法。Nau[36]和Knoblock[37]等开始了规划领域建模的工作,并指出任务规划中需要更好的知识建模方法和更丰富的规划知识。文献[38]和文献[39]针对一般

任务构建了领域知识本体。Yolanda等人提出了一种聚焦计划表示(plan semantic net, PLANET)的本体[40],是一种聚焦计划表示的本体,通过将状态和行动的推理区别化对待的框架,通过映射规则实现非形式化文本中的语义, PLANET定义了计划上下文、目标、行动和任务,以及决策点等概念,并设计了联合作战空中任务指挥官本体、行动方针分析本体、对应变反应本体3种实用性的本体。但是,文献[38-40]也指出本体存在粒度无法支撑应用需要,缺少重要概念,没有考虑时间等问题。针对早期本体存在的这些问题,Rajpathak[41]等聚焦任务的形式化问题,形成了独立于特定领域、应用和推理方法的通用任务本体,明确了任务的初始状态、目标、计划、行动、代理、参数、时间域、约束、前提、成本函数、方案标准和规划模型等关键概念和准则。值得注意的是, Enrico提出的本体模型是基于业务概念建模语言(operational conceptual modelling language, OCML)[42],但是提供了从OCML转换到网络本体语言(ontology web language, OWL)[43]的机制,而在2004年OWL成为万维网联盟的推荐标准,并在之后成为比较重要和常用的本体建模语言。

(3) 不确定性知识表示方法。在现实世界中,特别是战场环境中,无人系统面临着处理大量不确定信息的情景,不确定性知识表示对于无人系统来说至关重要。当前处理不确定知识的数学理论主要有:模糊逻辑、贝叶斯网络、马尔可夫逻辑网络等。文献[44]将模糊逻辑引入到本体中,使用OWL2实现了模糊本体,通过概率注释方法表示信息的不确定性,能够表示模糊数据类型、模糊概念、模糊修饰符等模糊本体元素。文献[45]提出了一种从零开始构建模糊本体开发方法,并基于这种方法构建了一个海底环境的模糊本体。多实体贝叶斯网络(multi-entities Bayesian network, MEBN)[46]是贝叶斯网络的扩展,使用实体集合及实体之间的各种关系来表征环境中的不确定性。基于MEBN理论实现的本体技术,可以有效地解决推理问题,提高无人系统在任务执行过程中的应对能力,在欺诈检测[47]、海事预警[48]等领域都有应用,如图1所示。



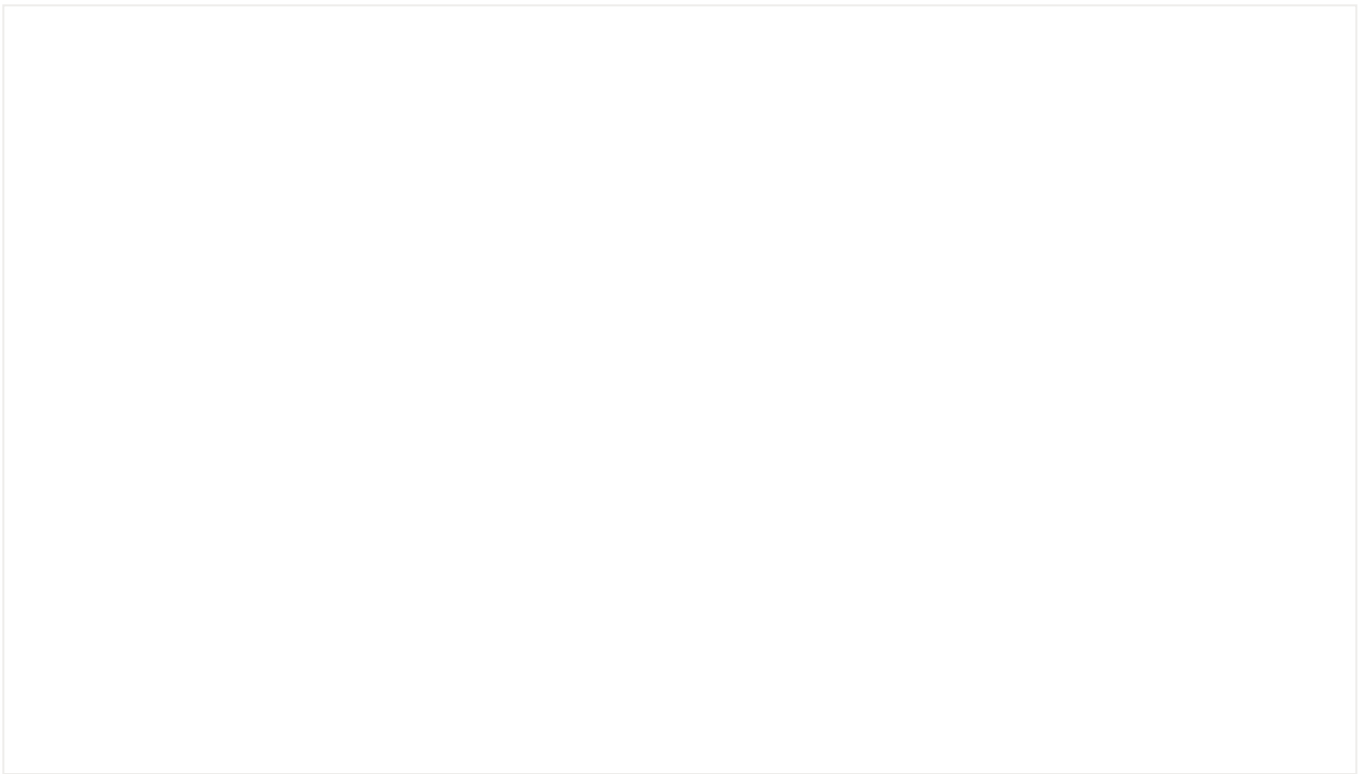


图1 用于估计海洋污染紧急程度的MEBN模型  
Fig.1 MEBN model for estimating emergency level of marine pollution

#### 1.4 无人系统任务规划的发展趋势

随着无人系统执行能力的提升,现实中的复杂任务不能再孤立地考虑任务规划和运动规划,许多行动都具有逻辑上和空间上的依赖性,以何种顺序执行何种行动与该行动如何在物理世界中执行密切相关。因此,需要研究集成了任务规划和运动规划的规划技术。文献[49]首次提出了任务&运动规划(task and motion planning, TMP)的概念,并提出了相应的测试集。TMP处理的不仅是空间优化问题,而且需要进行逻辑域中的知识推理。文献[50]首次将逻辑推理问题与空间搜索问题结合起来进行研究,提出了一种将任务规划使用的基于符号的表示方法与运动规划使用的数值表示方法链接起来的机制,规划过程中不仅考虑符号约束,同时考虑空间约束。文献[51]介绍了一种用于表示行动带来的物理作用的“语义附件”,使规划器能够在运行时计算状态变量的值,为符号规划中判断行动是否可行提供支持。文献[35]提出了一种面向对象的规划语言,与“语义附件”的功能类似,旨在通过外部访问为符号规划器提供数值变量,实现涉及数值的规划。文献[52]将“流”作为运动规划与PDDL语言之间的接口,实现了不限于特定领域的集成了数值计算模块的规划语言。

TMP概念中,任务规划、运动规划与知识之间存在着紧密的联系,如图2所示。

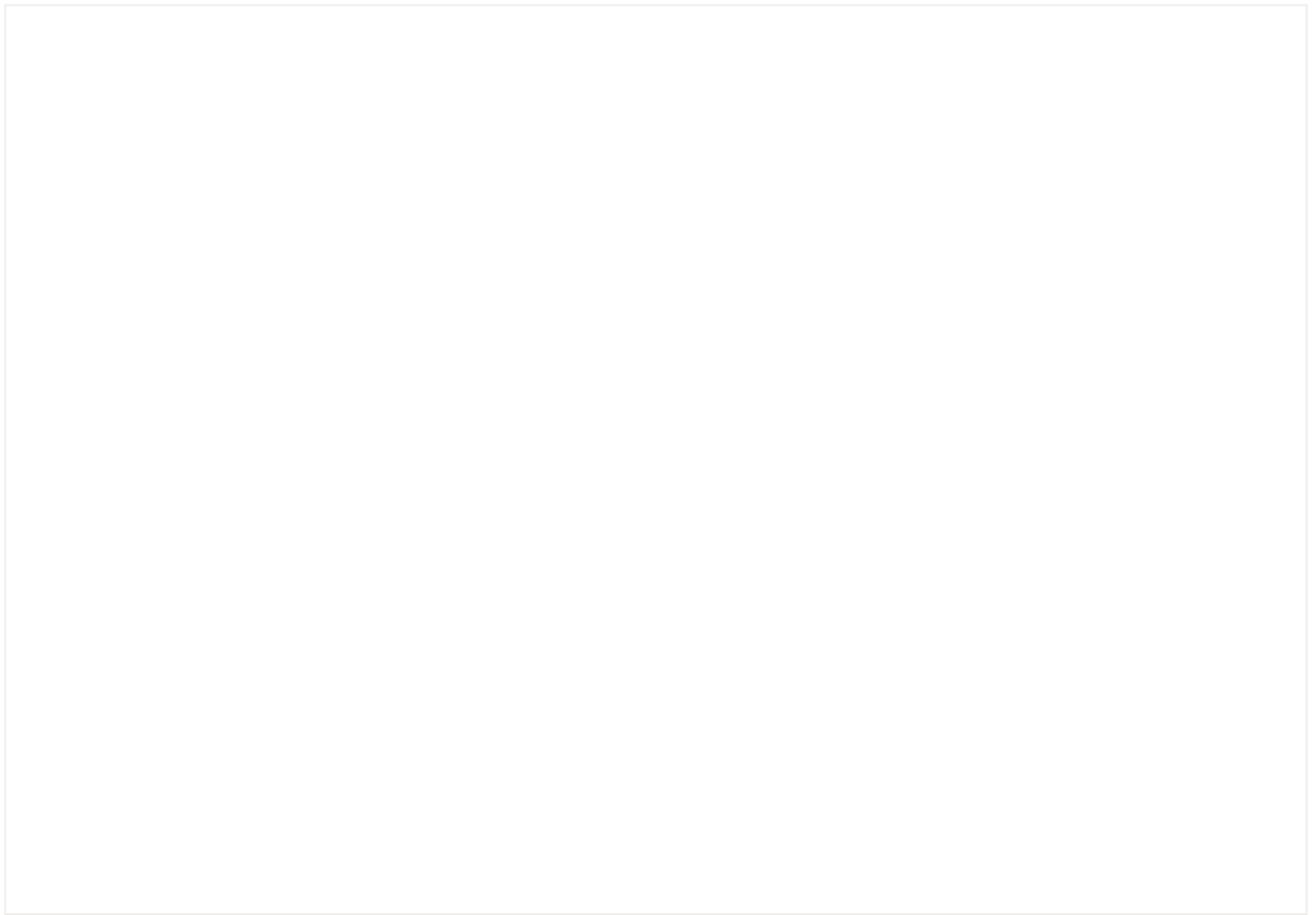


图2 知识与TMP关系  
Fig.2 Relationship between knowledge and TMP

AlphaGo的成功掀起了连接主义人工智能研究的热潮。但是随着研究的深入,深度学习的脆弱性也逐渐被发现[53-54]。文献[55]中介绍了第三代人工智能的三空间模型,提出将感觉提升为感知(符号)时机器就具备理解和基于知识的推理能力。文献[56]也指出智能决策的实现过程中,如何利用已有的知识是一个重要的问题。可见,具备自主性的无人系统任务规划融合了知识推理与空间优化的优势,符合下一代人工智能的发展方向。

因此,未来具备高度自主能力的无人系统任务规划必然是融合了知识推理与空间优化的复合体,可以称之为基于本体的任务规划。其框架如图3所示。

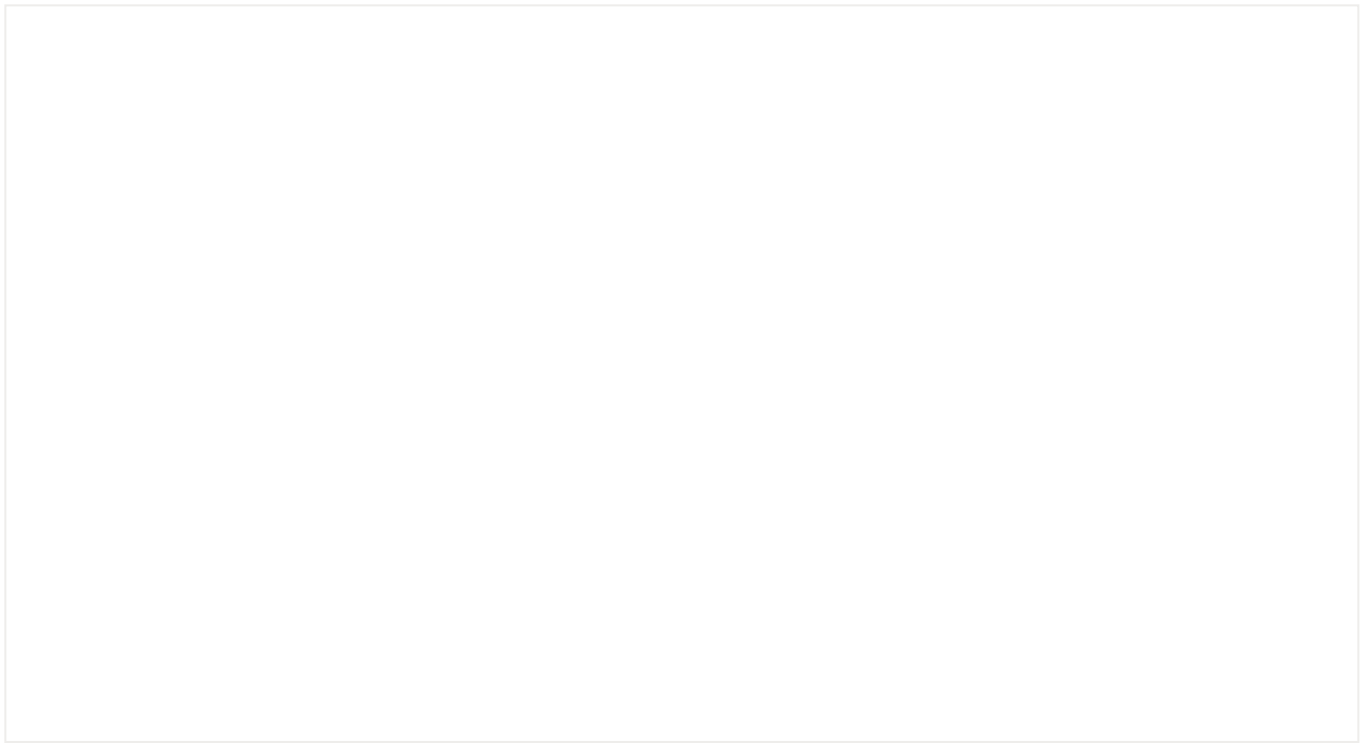


图3 基于本体的任务规划框架  
Fig.3 Framework of ontology-based task planning

基于本体的任务规划是知识推理与任务规划的结合体,其内涵可概括如下。

内涵之一:基于知识实现任务规划。基于知识意味着规划可以充分利用经验信息,这种经验信息包含人类的任务经验、无人系统在历次任务执行过程中学习到的经验,以及在虚拟的仿真世界中学习到的经验。基于知识意味着无人系统的任务规划具备了成长性和共享性的特征,能够像人类一样根据经验更好地完成某项任务。

内涵之二:任务规划与运动规划的集成规划框架。任务规划的作战行动序列生成、任务分配和航迹规划三个阶段本身具备高度的耦合性。在无人系统协同作战问题领域中,这种信息的耦合更加紧密。基于本体的任务规划立足于高层任务规划,同时考虑任务规划与运动规划的融合,实现无人系统任务的智能规划。

内涵之三:通过对数据和信息的知识化提高智能水平。知识化的作用有两个:一是便于信息和数据在无人系统之间的共享;二是结构化的知识更便于解释和推理。当前受到广泛关注的各种学习算法,本质上是在学习一种知识。这些知识需要有一个规范的表示和交互方式,以支持各类无人系统进行查询、共享和推理,提高智能的泛化性能。



## 2 本体在任务规划中的应用现状

### 2.1 本体在机器人和自主化系统任务规划领域中的应用现状

本体技术在机器人和自动化领域得到了广泛的关注,研究基础也最为深厚。因为,相对于无人机等无人装备来说,机器人的任务规划需要组织和筹划的行动更多,各行动之间也通常需要逻辑上的合理性和时间上的接续性。如对于送水服务来说,机器人需要完成移动到水杯位置、拿起水杯、移动到接水台、按压按钮、松开按钮、移动到顾客位置、递送水杯等一系列行动,同时还需要获取水杯位置、抓取策略、接水台位置、顾客位置等知识信息,并处理水是否接满这样的模糊问题。

虽然,机器人任务规划问题与无人机等无人作战系统的任务规划是不同的任务领域,但是两者都需要解决行动的组织 and 筹划问题,都面临着任务的分解,以及知识的表示、共享和处理等问题。因此,本体在机器人任务智能规划领域的研究对于解决无人系统智能规划问题具有较大的参考价值。

RoboBrain是一个超大规模的机器人知识引擎[57],从互联网和合作伙伴处获取知识,并对这些知识进行整合,从而形成一个庞大的机器人知识引擎。该项目采用基于对象的数据库进行知识的存储,致力于实现一个机器人学习和共享知识知识引擎,在人机交互、自然语言理解、机器人感知和任务规划等领域中提高机器人的智能水平。由于该知识引擎过于庞大,实际应用的效果并不理想,但该项目是较早开展机器人领域本体研究的项目之一。RoboBrain系统框架如图4所示。



图4 RoboBrain 系统框架图  
Fig.4 RoboBrain system architecture

KnowRob[58]是一种以行动为中心的任务本体模型。环境和任务知识以行动为中心进行组织可以使机器人能够很容易地访问其任务所需的知识。机器人观察到的知识也会增加到知识本体中,从而能够更好地适应动态变化的环境。但是,KnowRob致力于提高个体机器人的自主性,对多个机器人协同任务关注较少。KnowRob使用OWL语言实现知识的表示,但是OWL语义比较浅,只能够对类和个体之间的简单关系进行定义和较少的推理。因此,KnowRob还引入了对Prolog语言的支持以提升其知识推理能力[59]。

RoboEarth致力于为机器人建立一个进行知识交互和学习的互联网,以解决异构机器人系统的信息重用和交互问题[60]。其同样采用OWL语言构建世界模型,不仅定义了世界知识的要素,还定义了其中的关联关系。采用RoboEarth进行任务规划的机器人,在任务开始时,通过查询算法请求需要的任务相关知识。如果当前任务没有执行过,机器人可以记录学习的过程,并将学习到的知识上传到分布式的知识库中,实现知识的共享。

文献[61]提出一种为机器人提供空间智能的知识引擎。空间智能是指空间判断能力。具备空间判断能力的机器人能够从不同角度和空间对物体进行可视化,能够确定物体之间的空间关系并进行处理,其功能框架如图5所示。在进行任务规划时,机器人规划器在本体和传感器数据的支持下,自动处理空间信息和自然语言指令,不再需要像PDDL[62]那样进行复杂的语法定义。



图5 具备空间智能的智能规划流程图  
Fig.5 Intelligent planning flow chart with spatial intelligence

开放式机器人本体(open robots ontology, ORO)[63-64]是一种面向事件的知识存储和推理平台,该系统框架将来自不同来源的数据,如传感器、领域知识和人类输入信息集成到一个统一的本体中,其研究侧重于帮助机器人与人类互动,能够使用Pellet进行简单的推理。

感知与操作知识本体(perception and manipulation knowledge, PMK)[66]是一种面向自主机器人TMP的知识本体。利用OWL语言实现,通过逻辑编程语言SWI-prolog加载OWL本体,实现知识的查询。PMK还集成了认知模块,可根据传感器数据实现环境的感知并向知识本体中添加实例。使该框架具备感知推理、特征推理、态势推理和规划推理能力。

机器人任务规划本体(robot task planning ontology, RTPO)[26]是一种室内服务型机器人小型任务本体,使用OWL语言描述机器人的领域知识,并且设计了基于RTPO的任务规划算法。RTPO分为3个部分:任务本体、环境本体和机器人本体。通过相应的任务规划算法,机器人可以自主完成指定的高层任务。

本体技术在知识表示和运用上的优势使其正逐渐应用到无人潜航器、水下机器人、空间站短期任务规划、无人驾驶汽车等自主化领域中。协作网络中的智能网络化水下机器人(smart and networking underwater robots in cooperation meshes, SWARMs)[22],致力于实现不同制造商生产的水下机器人系统的协同作业,使用网络化本体技术解决了机器人交换异构信息的问题。网络化本体作为一种公共信息模型来表示不同领域的知识,并且为系统内的知识共享提供支持。其知识本体主要由4部分组成:无人系统、任务和规划、环境感知和认知、通信和网络。在SWARMs中,无人平台之间需要进行交换的信息都由本体定义,且支持不同的推理方式,如:本体推理、基于规则的推理和多实体贝叶斯网络。SWARMs本体结构如图6所示。

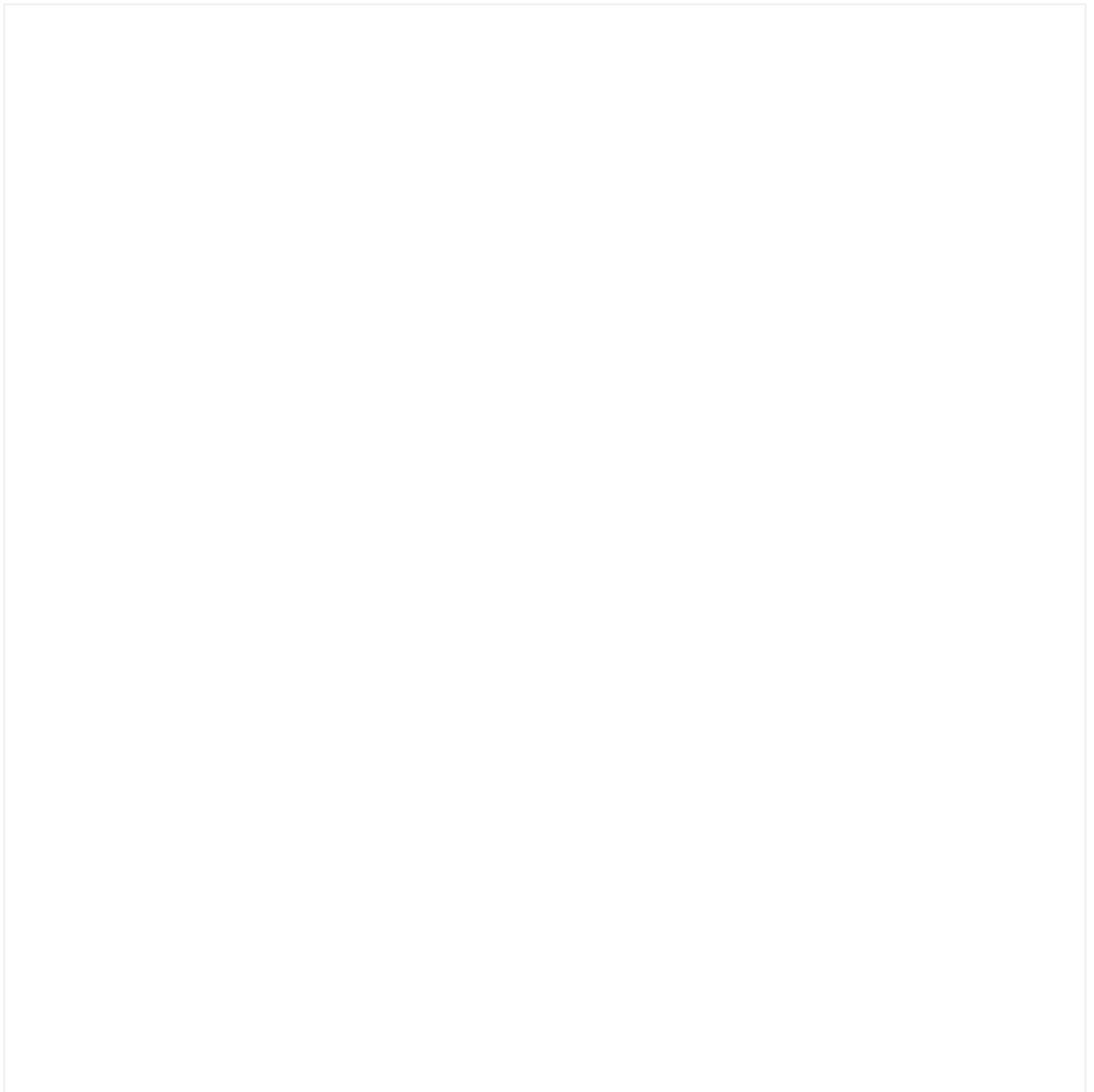


图6 SWARMs 本体结构  
Fig.6 SWARMs ontology structure

文献[24]提出了一种海洋无人潜航器智能控制架构,使用基于本体的动态规划决策,实现了无人系统对复杂环境的适应,使复杂繁琐的任务规划决策得以由计算机自动完成。该本体是一种适用于海洋无人潜航器任务智能规划和控制的领域知识本体。

文献[67]将本体理论应用于空间站短期任务规划中的问题描述和数据交互共享,满足了空间站短期任务规划领域中的问题描述需求和数据交互共享需求,为解决空间站短期任务规划提供了

支持。

无人驾驶汽车场景建模和智能规划与决策支持是本体的另一个重要的应用领域。文献[68]将本体应用于交通场景描述中。首先,使用隐马尔可夫模型(hidden Markov models, HMM)进行驾驶行为的学习。然后,并根据场景特征建立知识库,确定模型策略并存储先验知识。最后,通过后验概率和先验概率实现对目标车辆未来行为的预测。文献[69]在基于本体的驾驶场景模型的基础上,通过基于语义推理机制实现场景的多准则评估和驾驶决策生成。

除上述对于基于本体的任务规划方面的研究之外,在知识获取、现实世界与本体的映射等方面的研究也开始受到关注。PMK本体通过集成感知模块,实现了对物品和态势的推理能力,陈志贤等人将本体技术应用于复杂环境中机器人的自主规划[70-71],提出了基于整合活动图式的机器人任务规划经验学习方法,所学习到的任务经验可以泛化应用到同类任务的多情形自动规划问题之中。李泚泚[72]提出一种层次化物品知识自主构建方法,实现了物品实例知识的自主构建。

几种典型的知识本体情况对比如表1所示。总体来说,知识本体在任务规划领域的应用主要集中于室内服务型机器人,在专业无人系统,特别是无人作战系统中的应用还很少见。几种本体中,小型化、专业化的本体技术应用情况和表现要好于通用型的大规模本体。OWL是本体构建首选的表示语言,此外,本体通常会根据需要搭配相应的推理机,实现知识推理和应用。

表1 典型无人系统本体情况对比

Table 1 Comparison of typical robotic ontologies



2.2 本体在军事任务规划领域的应用现状



本体在军事任务规划领域有着深厚的研究历史。较早的任务规划本体,如PLANET就是基于军事应用背景研发的。本体技术在军事领域的应用已经涉及到了战场态势表示与评估、作战计划表示与校验等方面。这些应用场景都是进行任务规划不可或缺的知识来源,或者本身是任务规划的一部分。

(1) 基于本体的态势表示、感知与估计。早期的应用研究停留在比较浅的层面,本体更像是一个规范化表示信息的数据库,如文献[73]提出了一种基于本体的发布订阅系统,能够进行大量、连续的复杂语义查询。文献[21]构建了基于本体的战场态势表示方法,通过本体实现态势数据的统一规范表示和战场态势推理。文献[74]提出了一种基于本体的态势感知系统“BeAware!”,采用了基于规则的推理技术提高了系统的推理能力,贝叶斯网络与本体的结合使态势感知中大量的不确定性知识表示和推理问题得到了一定程度的解决。文献[48]将本体技术用于可疑船只的属性判断中,基于MEBN实现多源信息融合。文献[75]构建了网络威胁要素知识本体,并成功应用于网络威胁态势推演与评估。文献[76]将贝叶斯网络与本体技术相结合,提高了态势估计的准确度。文献[77]将本体与MEBN相结合用于无人作战系统在不确定场景下的智能决策。

(2) 基于本体的计划表示和评估。常识百科全书本体(enCYClopedia, CYC)[78]是第一个常识知识库,也经常作为上位本体来构建军事领域本体,如作战行动过程本体[79]。核心计划表示本体[80]是九十年代美国国防部高级研究计划局针对军事领域提出的军事计划表示本体,能够描述计划、过程、行动等通用信息。文献[81]构建的本体将计划看作是一系列的约束构成的集合,实现了任务的层次化分解。共享计划和行动表示本体[82]是集成了多项本体研究的成果而建立的一种共享计划本体,其计划的表示更加规范和全面。联合作战空中任务指挥官本体[83]是一种用于空军战役规划的本体,并且在应用中使用了基于知识的混合主动规划方法。文献[84]将本体用于作战方案的表示和完整性评估。基于本体的计划表示实现了特定领域规划知识的表示,使机器能够共享和重用现有的知识并进行复杂任务的规划。但这种基于知识的规划通常针对领域问题而专门设计的,不同领域之间具有不同的知识表示和描述方法,重用性很差。

### 2.3 知识本体在无人系统任务规划中的作用

(1) 基于领域知识实现任务智能规划。未来战场上异构无人系统的大规模应用,必然需要一个高效的任务规划和管理机制,实现大规模无人作战群体的高效智能任务规划。知识本体能够保存无人系统学习到的规划参数或者作战规则,并将之应用于未来的任务中。此外,通过知识本体的支持,无人系统可以针对人类的高层指令自动完成行动序列的生成,并检测任务是否可以达成,如文献[26]和文献[61]。

(2) 支持基于领域知识的任务重规划。实际场景中,无人系统面临越来越多的不确定性因素使无人系统很难通过一个固定的任务计划完成任务的执行,迫切需要任务重规划技术的支持。当前,领域知识在任务重规划中发挥着重要的作用,文献[85]构建了军事领域知识库与规则库,实现空中任务的重规划,文献[86]构建了水下机器人任务本体并用于任务的重规划。文献[87]指出基于领域知识的任务重规划方法,特别是通用化的知识库是重要的研究方向。

(3) 支持知识共享。本体为不同无人系统提供一个进行知识共享的基础,对信息交互进行了规范,使各个无人系统学习到的知识可以通过网络进行共享,如SWARMs本体。本体使无人系统之间的交互从信息交互的层面提升到知识交互的层面。通过作战知识的积累和共享,可以启发无人系统探究新型作战模式。

(4) 支持基于知识推理的慎思型智能决策。例如,在文献[88-89]中将人类实践过程中形成的经验常识应用于环境中车辆驾驶意图的判断上,并取得了良好的效果。本体是对知识的结构化描述,包含了概念之间的语义关系,这种语义关系是实现理性决策的基础。基于理性推理的决策具有可解释性和稳健性的特点。

### 3 现状分析与重要研究方向

#### 3.1 研究现状

(1) 本体构建技术相对成熟,有大量可供参考的案例,既有针对一般任务的本体,也有针对领域任务的应用本体。但是不同领域中的任务逻辑、知识需求、表示范围等仍然有比较大的差别。本体技术在新的领域应用仍需领域知识表示方法和表示能力等方面进行大量的研究。本体技术在研究初期就与军事问题紧密相关,在军事计划表示、态势分析中发挥了重要作用,但是本体在支持无人作战系统的任务规划方面还期待更加系统的研究。

(2) 行动学习能力成为新的研究热点。任务本体的构建通常需要领域专家的专门知识,但是专家领域知识的有限性和现实世界的复杂性,使无人系统行为的抽象化越来越困难。这导致了当前知识本体的构建往往局限于比较简单或者有限的场景,现实世界的领域本体模型往往很难开发和维护,因此人们在解决规划问题时往往很少使用领域知识,而是采用效率低但更容易的方法,除了专门研究规划问题的团体之外,对构建领域知识模型的关注很低[17]。文献[90]对机器学习

在行动模型和规划知识的自动获取方面的应用进行了综述,文献[91]重点在行动模型学习方面进行而来综述,并提出了研究的方向。行动模型的学习的输入通常是一组行动序列,输出则是PDDL等描述语言定义的行动模型。文献[92]提出了一种从非符号输入中学习一阶符号表示的方法,学习到的一阶符号可以直接作为规划器的输入,文献中展示了从汉诺塔、抓取和方块世界等经典任务规划问题的状态空间中提取移动、拾取和放下等行动模型的方法。

(3) 领域知识本体应用效果好,但仍存在异构本体集成和通用本体的研究需求。领域知识本体应用范围有限,在开放场景中的效果不佳。因此,通用化的本体依然有需求的紧迫性,但是受限于当前的技术水平,当前的研究多从异构本体的集成入手[23,93],解决实际问题。

### 3.2 重要研究方向

虽然对于任务规划本体的研究已经很多,但是如何将本体应用到任务尤其是复杂任务中的研究尚处于起步阶段。本体在机器人领域虽然取得了瞩目的成果,但是仍存在很多未解决的问题。以知识为中心,可以分成前中后3个部分,未来重要的研究方向如下。

(1) 前端主要研究知识的获取和认知问题,如从文本等结构化的数据中析取知识、如何从人类的行为中学习到经验并使之经验化、如何实现环境的认知和与知识本体的逻辑接地[94]等。文献[95]在基于示教的任务规划学习方面进行了研究。文献[96]研究了家庭环境中的逻辑接地问题。文献[90-91]分别从机器学习用于规划知识自动定义和行动模型学习两个方面进行了技术综述,指出知识表示、学习算法、知识的应用、现实世界的应用等重要问题。

(2) 居于中心位置的知识建模与表示仍然存在许多难以解决的问题,如异构本体的集成[93]、大规模知识本体下的处理效率、更强的表示能力、不确定知识的表示等,以及支撑计划重规划的规则库构建与运用等。当前知识表示语言表示能力有限,虽然各种拓展表示语言进行了功能的拓展,但是在描述现实世界,支撑复杂场景方面还需要进一步的研究。

(3) 后端主要研究知识的应用,如何在知识本体支持下实现智能规划和决策,需要将离散的符号规划与连续的空间寻优问题结合起来。然而,即使在机器人领域,这种融合仍仅是在比较浅显的层面,知识对任务规划的知识多是停留在知识查询的层面,很少能够体现出知识推理能力的作用。但是,随着学术界对于第三代人工智能的探索和思考,符号主义与连接主义的集成符合未来的发展趋势,无人系统的智能化研究也逐渐从底层的运动规划上升到任务规划层面,并呈现两者高度融合的特点,基于本体的无人系统任务规划属于后端应用问题,主要研究知识推理、任务规划和决策等知识的应用。

## 4 无人系统任务规划本体构建原则

构建无人系统任务规划本体需要考虑多方面的因素,本节从应用范围和目标、非功能性需求、功能性需求3个方面进行了阐释。

### 4.1 明确本体应用范围和目标

进行任务规划本体的构建,首先需要明确本体的应用范围和应达到的目标。无人作战系统的任务本体应立足其应用场景构建领域知识本体,防止出现本体过于泛化,规模过于庞大而难以应用的问题。无人作战系统任务规划本体应完成两个主要工作,一是清晰定义领域知识相关的概念;二是对概念之间的关系进行明确的定义。本体应能描述异构无人系统(如传感器、执行器等组件)及其工作的环境(如地形、威胁、障碍等战场要素),并对无人系统之间必须交换的信息进行明确的定义。

### 4.2 满足本体的非功能性需求

互操作性、模块化、可重用和可扩展是本体应具备的非功能性特征。互操作性是满足无人系统之间信息交换的基本条件;模块化要求对本体元素之间的耦合性进行必要的解耦,有利于本体元素的灵活组合;重用性使本体各元素可以方便地应用于不同的领域,或者能通过简单的修改适应新的场景;可扩展性是本体功能不断成长,适应更复杂场景的基本要求。

### 4.3 满足本体的功能性需求

(1) 本体需包含任务计划模型。支持任务规划是本体的首要功能需求。首先,任务规划本体应能够描述某个作战任务中包含的确切行动,行动的前提条件和效果等;其次,能够描述底层的任务分配、航迹规划的任务信息,便于无人系统之间进行知识和共享,实现任务协同。此外,本体还应能够对子任务和作战行动之间的协同配合关系,不同无人系统之间的协同关系进行描述。图7展示了任务本体各主要域之间的关系。



图7 无人作战系统任务本体  
Fig.7 Mission ontology of unmanned system task

(2) 本体应对无人系统的类别及其属性能力进行清晰的定义。无人系统的属性和能力是任务规划的约束条件之一,无人系统在进行高层任务指令的解析中,需要在本体中查询自身的属性和能力是否满足任务执行的条件。当使用基于能力的任务规划方法时,也需要查询自身能力以实现行动序列的生成。

(3) 本体应能够支持战场环境建模。战场环境信息是无人系统进行重规划和智能决策,正确执行任务的重要保证,无人系统任务本体应能够良好地定义和表示战场环境信息,如高程、电磁辐射、风速、气象、威胁、目标等。水下无人系统还应对水下作战环境信息进行表示,如盐度、

温度、洋流等。另外,本体应包含传感器模型,并能够利用传感器信息进行环境空间的信息表示。

(4) 本体应能够支持不确定信息的表示和推理。战场环境是一个动态环境,其中包含着大量的不确定性。任务本体应能够对这些不确定性信息进行标注并支持无人系统根据上下文数据进行知识推理。基于本体的知识推理过程如图8所示。



图8 知识推理过程示意图  
Fig.8 Diagram of knowledge inference process



- (1) 知识表示能力。知识表示能力是任务本体最重要的属性,任务本体需要能够表示两种知识:一类是因果知识,如子任务之间的协调配合关系、不同无人系统之间的协调配合关系、规则化的军事人员的作战经验知识等;一类是关于战场环境的世界知识,如目标区域的位置,可能存在的威胁的位置、属性和适用武器装备等信息。此外,现实世界中充斥着不确定性,战场环境中无人系统将面临更加复杂的不确定性,能够对这些不确定性信息进行合理的表示是任务本体适应复杂场景的重要基础。
- (2) 知识的快速检索和分发能力。任务本体的基本功能之一是实现无人系统之间的信息共享。随着任务本体的扩展和无人系统规模的扩大,其快速检索问题将会逐渐突显出来,对于较大规模的任务本体,需要设计合理的检索算法和数据存储结构,支持信息的快速检索和分发。
- (3) 推理能力。任务规划过程中的作战行动序列生成,故障应对,任务重规划等都需要根据存储的知识进行推理。可采用已有的推理机完成知识推理,或者根据应用领域设计适用性更好的推理机。在设计和构建本体时也需要对知识元素的属性进行合理的定义,以更好地支持推理。

## 6 结 论

本文对任务规划问题进行了系统梳理,分析了无人系统任务规划的发展趋势,回顾了本体技术在机器人、无人系统、军事任务规划等领域的应用情况,剖析了知识本体在提高无人系统任务自主性中的作用,提出了基于本体的任务规划概念,对本体构建原则和关键能力指标进行了系统阐释。知识能够支持无人系统的任务规划和决策制定,是无人系统自主能力提升的重要基础。构建无人系统任务规划本体是无人系统适应复杂战场环境,提高自主性,减少人为干预的有效途径。当前,本体技术在知识推理和共享、简单任务规划、智能决策方面得到了应用,但是对于非结构化和开放环境下的知识表示、群体无人系统协同等方面还期待更多的研究成果。此外,战场环境的不确定性带来的不确定知识表示,融合和推理问题也是需要重点关注的领域。综上所述,将本体引入无人系统任务规划领域,围绕着知识的获取、表示和运用构建智能化的任务规划框架,对于提高无人系统自主化能力具有重要的作用。

参考文献

[1] 金伟, 周震博. 2018年无人机研发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 163-172.

JIN W, ZHOU Z B. Review on frontier hotspots of unmanned aircraft systems in 2018[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(1): 163-172.

[2] 段海滨, 申燕凯, 王寅, 等. 2018年无人机领域热点评述[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 82-90.

DUAN H B, SHEN Y K, WANG Y, et al. Review of technological hot spots of unmanned aerial vehicle in 2018[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(3): 82-90.

[3] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2018.

SHEN L C, NIU Y F, ZHU H Y. Theories and methods of autonomous cooperative control for Multi-UAVs[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.

[4] 邓长春, 籍长国, 李小奇. 无人机作战应用论[M]. 北京: 蓝天出版社, 2011.

DENG C C, JI C G, LI X Q. Operational applications theory of UAV[M]. Beijing: Blue Sky Press, 2011.

[5] 李梦晗, 汪子盛, 徐楠, 等. 国内外轻型地面无人平台研究现状及发展趋势分析[J]. 专用汽车, 2019, 271(12): 56-60.

LI M H, WANG Z S, XU N, et al. Analysis of the research status and development trend of light unmanned ground platform at home and abroad[J]. Special Purpose Vehicle, 2019, 271(12): 56-60.

[6] U.S. Army. Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030[R]. Washington D. C.: Office of the Secretary of Defense, 2005: 1-213.

[7] 张阳, 司光亚, 王艳正. 无人机集群网电攻击行动协同目标分配建模[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2025-2033.

ZHANG Y, SI G Y, WANG Y Z. Modeling of cooperation target allocation of the UAV swarm cyberspace attack action[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019,

41(9): 2025-2033.

[8] 张阳, 司光亚, 王艳正. 无人集群作战建模与仿真综述[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(3): 30-36.

ZHANG Y, SI G Y, WANG Y Z. Review on modeling and simulation of unmanned swarm operation[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(3): 30-36.

[9] 吴森堂. 导弹自主编队协同制导控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

WU S T. Cooperative guidance & control of missiles autonomous formation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.

[10] MOUSAVI S, AFGHAH F, ASHDOWN J D, et al. Use of a quantum genetic algorithm for coalition formation in large-scale UAV networks[J]. Ad Hoc Networks, 2019, 87: 26-36.

[11] MENG H, XIN G Z. UAV route planning based on the genetic simulated annealing algorithm[C] // Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010: 788-793.

[12] SHIN J J, BANG H. UAV path planning under dynamic threats using an improved PSO algorithm[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020: 8820284.

[13] 王和平, 柳长安, 李为吉. 基于蚁群算法的无人机任务规划[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(1): 98-101.

WANG H P, LIU C A, LI W J. An optimizing UAV(unmanned aerial vehicle) mission planning with ANT algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(1): 98-101.

[14] 施孟佶. 复杂环境下多智能体一致性控制及其在协同飞行中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

SHI M J. Consensus control of multi-agent systems in complex environments and its applications in cooperative flight control of unmanned aerial vehicles[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

[15] 菅堃. 面向一致性的多智能体系统事件触发控制和分布式优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

JIAN L. On event-triggered control and distributed optimization for consensus of multi-agent systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[16] NUGRAHA Y, CETINKAY A, HAYAKAW T, et al. Dynamic resilient network games with applications to multi-agent consensus[J]. IEEE Trans.on Control of Network Systems, 2020, 8(1): 246-259.

[17] RAJPATHAK D G. Intelligent scheduling-a literature review[R]. Milton Keynes: Knowledge Media Institute, The Open University, 2001: 1-69.

[18] BACCHUS F, KABANZA F. Using temporal logics to express search control knowledge for planning[J]. Artificial Intelligence, 2000, 116(1/2): 123-191.

[19] EROL K, NAU D S, SUBRAHMANIAN V S. On the complexity of domain-independent planning[J]. Artificial Intelligence, 1992, 56: 223-254.

[20] RUDI S V, RICHARD B, DIETER F. Knowledge engineering: principles and methods[J]. Data & Knowledge Engineering, 1998, 25: 161-197.

[21] 王琦文. 战场态势推理关键技术研究及应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

WANG Q W. Research and application of key techniques of battlefield situational reasoning[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[22] LI X, BILBAO S, TAMARAM M J B, et al. SWARMs ontology: a common information model for the cooperation of under-water robots[J]. Sensors, 2017, 17(3): 569-588.

- [23] YAZDANI F, BLUMENTHAL S, HUEBEL N, et al. Query-based integration of heterogeneous knowledge bases for search and rescue tasks[J]. *Robotics and Autonomous Systems (RAS)*, 2019, 117: 80-91.
- [24] CARLOS C I. Intelligent autonomy for unmanned marine vehicles[M]. Switzerland: Springer Cham, 2015.
- [25] GENG X L, LIANG H W, XU H, et al. Human-driver speed profile modeling for autonomous vehicle's velocity strategy on curvy paths[C]∥*Proc.of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2016: 755-760.
- [26] SUN X L, ZHANG Y, CHEN J. RTPPO: a domain knowledge base for robot task planning[J]. *Electronics*, 2019, 8(10): 1105-1124.
- [27] BARTK R. On the boundary of planning and scheduling: a study[C]∥*Proc.of the 18th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group*, 1999.
- [28] PEREZ A G, BENJAMINS V R. Overview of knowledge sharing and reuse components: ontologies and problem-solving methods[C]∥*Proc.of the IJCAI-99 Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods*, 1999.
- [29] FIKES R E, NILSSON N J. STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving[J]. *Artificial Intelligence*, 1971, 2(3-4): 189-208.
- [30] WILKINS D E. Can AI planners solve practical problems?[J]. *Computational Intelligence*, 1990, 6(4): 232-246.
- [31] PUTERMAN M. Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [32] PEDNAULT E. ADL: exploring the middle ground between STRIPS and the situation calculus[C]∥*Proc.of the 1st International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 1989: 324-332.
- [33] GHALLAB M, KNOBLOCK C, WILKINS D, et al. PDDL-The planning domain definition language[R]. Connecticut: Yale Center for Computational Vision and

Control, 1998: 1-26.

[34] FOX M, LONG D. PDDL2.1: an extension to PDDL for expressing temporal planning domains[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2003, 20: 61-124.

[35] HERTLE A, DORNHEGE C, KELLER T, et al. Planning with semantic attachments: an object-oriented view[C]||Proc.of the 20th European Conference on Artificial Intelligence, 2012: 402-407.

[36] NAU D S, GUPTA S K, REGLI W C. AI planning versus manufacturing-operation planning: a case study[R]. Cambridge: Harvard University, 1995: 1-8.

[37] KNOBLOCK C A. Building a planner for information gathering: a report from the trenches[C]||Proc.of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems, 1996: 134-141.

[38] AUSTIN T. Plan ontology-a working document[R]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 1994.

[39] ANDRE VALENTE. Knowledge-level analysis of planning systems[J]. Sigart Bulletin, 1995, 6(1): 33-41.

[40] YOLANDA G A G, JIM B. PLANET: a shareable and reusable ontology for representing plans[C]||Proc.of the AAAI Workshop on Representational Issues for Real-world Planning Systems, 2000.

[41] RAJPATHAK D, MOTTA E. An ontological formalization of the planning task[C]||Proc.of the Ontological Formalization of the Planning Task, 2004: 305-346.

[42] ENRICO M. Reusable components for knowledge modelling-principles and case studies in parametric design problem solving[M]. The Netherlands: IOS Press, 1999.

[43] DEBORAH L, MCGUINNES S, HARMELEN F V. OWL web ontology language overview[R]. California: W3C Recommendation, 2004: 1-12.



- [44] BOBILLO F, STRACCIA U. Fuzzy ontology representation using OWL2[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2011, 52(7): 1073-1094.
- [45] LI X, MARTINEZ J F, RUBIO G. A new fuzzy ontology development methodology (FODM) proposal[J]. IEEE Access, 2016, 4: 7111-7124.
- [46] LASKEY K B. MEBN: a language for first-order Bayesian knowledge bases[J]. Artificial Intelligence, 2008, 172(2-3): 140-178.
- [47] CARVALHO R N, MATSUMOTO S, LASKEY K B, et al. Probabilistic ontology and knowledge fusion for procurement fraud detection in Brazil[M]. Uncertainty Reasoning for the Semantic Web II. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [48] CARVALHO R N, HABERLIN R, COSTA P C G, et al. Modeling a probabilistic ontology for maritime domain awareness[C]∥Proc.of the 14th International Conference on Information Fusion, 2011.
- [49] FABIEN L, NEIL D, CAELAN G, et al. Platform-independent benchmarks for task and motion planning[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2018,3(4): 3765-3772.
- [50] CAMBON S, GRAVOT F, ALAMI R. A robot task planner that merges symbolic and geometric reasoning[C]∥Proc.of the European Conference on Artificial Intelligence, 2004.
- [51] DORNHEGE C, EYERICH P, KELLER T, et al. Semantic attachments for domain-independent planning systems[C]∥Proc.of the 19th International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2009, 19-23.
- [52] GARRETT C R, LOZANO-PÉREZ T, KAEHLING L P. STRIPStream: integrating symbolic planners and blackbox samplers[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1802.08705>.
- [53] DONG Y P, SU H, ZHU J, et al. Towards interpretable deep neural networks by leveraging adversarial examples[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1708.05493>.

[54] DONG Y P, LIAO F Z, PANG T Y, et al. Boosting adversarial attacks with momentum[C]∥Proc.of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.

[55] 张钊, 朱军, 苏航. 迈向第三代人工智能[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(9): 1281-1302.

ZHANG B, ZHU J, SU H. Toward the third generation of artificial intelligence[J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(9): 1281-1302.

[56] 胡晓峰, 齐大伟. 智能决策问题探讨——从游戏博弈到作战指挥, 距离还有多远[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(4): 356-363.

HU X F, QI D W. On problems of intelligent decision-making-how far is it from game-playing to operational command[J]. Journal of command and control, 2020, 6(4): 356-363.

[57] SAXENA A, JAIN A, SENER O, et al. RoboBrain: large-scale knowledge engine for robots[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1412.0691>.

[58] TENORTH M, BEETZ M. KnowRob-knowledge processing for autonomous personal robots[C]∥Proc.of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, 2009, 4261-4266.

[59] TENORTH M, BEETZ M. Representations for robot know-ledge in the KnowRob framework[J]. Artificial Intelligence, 2015, 247: 151-169.

[60] WAIBEL M, BEETZ M, CIVERA J, et al. RoboEarth-a world wide web for robots[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(2): 69-82.

[61] SALAM K A, MUNAWAR A. Knowledge engine for robots using ontology[C]∥Proc.of the International Conference on Applied Computing and Information Technology, 2017: 25-28.

[62] AL-MOADHEN A, QIU R, PACKIANATHER M, et al. Integrating robot task planner with common-sense knowledge base to improve the efficiency of

planning[J]. Procedia Computer Science, 2013, 22: 211-220.

[63] LEMAIGNAN S, ROS R, MOSENLECHNER L, et al. ORO, a knowledge management platform for cognitive architectures in robotics[C]∥Proc.of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, 2010.

[64] LEMAIGNAN S. Grounding the interaction: knowledge management for interactive robots[J]. KI - Künstliche Intelligenz, 2013, 27(2): 183-185.

[65] DIAB M, AKBARI A, UD D M, et al. PMK-a knowledge processing framework for autonomous robotics perception and manipulation[J]. Sensors, 2019, 19(5): 1166-1188.

[66] WIELEMAKER J, SCHRIJVERS T, TRISKA M, et al. SWI-Prolog[J]. Theory and Practice of Logic Programming, 2012, 12(1-2): 67-96.

[67] 卜慧蛟, 张进, 罗亚中, 等. 基于本体理论的空间站短期任务规划领域建模研究[J]. 载人航天, 2016, 22(2): 191-201.

BU H J, ZHANG J, LUO Y Z, et al. Modeling of space station short-term mission planning domain based on ontology theory[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(2): 191-201.

[68] GENG X L, LIANG H W, YU B, et al. A scenario-adaptive driving behavior prediction approach to urban autonomous driving[J]. Applied Sciences, 2017, 7(4): 426-447.

[69] HUANG L, LIANG H W, YU B, et al. Ontology-based driving scene modeling: situation assessment and decision making for autonomous vehicles[C]∥Proc.of the 4th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, 2019.

[70] CHEN Z X, ZHAO B L, ZHAO S J, et al. Learning and planning based on merged experience from multiple situations for a service robot[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1832-1849.

[71] CHEN Z X, SONG C, YANG Y Y, et al. Robot navigation based on human trajectory prediction and multiple travel modes[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2205-2225.

[72] 李泚泚, 田国会, 路飞, 等. 面向服务机器人的物品知识自主构建方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 395-401.

LI C C, TIAN G H, LU F, et al. Automatic construction method for object knowledge on service robots[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 395-401.

[73] ZERVAKIS L, TRYFONOPOULOS C, PAPADAKIS-PESARESI A, et al. Full-text support for Publish/Subscribe ontology systems[C]∥Proc.of the European Semantic Web Conference, 2016.

[74] BAUMGARTNER N, GOTTESHEIM W, MITSCH S, et al. BeAware! -Situation awareness, the ontology-driven way[J]. Data & Knowledge Engineering, 2010, 69(11): 1181-1193.

[75] 司成. 基于本体的网络威胁态势推演与评估技术研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2015.

SI C. Research on network threat situation deduction and evaluation technology based on ontology[D]. Zhengzhou: Information Engineering University of the PLA, 2015.

[76] 黄玉奇. 基于贝叶斯网络和本体的态势估计方法[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.

HUANG Y Q. A method of situation assessment based on bayesian network and Ontology[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.

[77] WANG S, ZHANG Y, LIAO Z Y. Building domain-specific knowledge graph for unmanned combat vehicle decision making under uncertainty[C]∥Proc.of the Chinese Automation Congress, 2019: 4718-4721.

- [78] LENAT D. CYC: a large-scale investment in knowledge infrastructure[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11):33-38.
- [79] TATE A. Towards a plan ontology[J]. Journal of the Italian Association of AI, 1996, 9(1): 19-26.
- [80] PEASE R A, CARRICO M. JTF ATD core plan representation[C]∥Proc.of the AAAI Spring Symposium on Ontological Engineering, 1997: 24-26.
- [81] TATE A. Representing plans as a set of constraints-the model[C]∥Proc.of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems, 1996: 221-228.
- [82] TATE A. Roots of SPAR-shared planning and activity representation[J]. The Knowledge Engineering Review, 1998, 13(1): 121-128.
- [83] VAKEBTE A, BLYTHE J, GIL Y, et al. On the role of humans in enterprise control systems: the experience of INSPECT[C]∥Proc.of the JFACC Symposium on Advances in Enterprise Control, 1999.
- [84] 黎鑫. 基于本体的作战方案任务完整性评估方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
- LI X. A method of mission integrity assessment based on onto-logy[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [85] MYERS K L. CPEF-a continuous planning and execution framework[J]. AI Magazine, 1999, 20(4): 63-69.
- [86] 刘园园. 水下机器人规划修复方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- LIU Y Y. Reasearch on planning repair for autonomous underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [87] 邵天浩, 张宏军, 程恺, 等. 层次任务网络中的重新规划研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2833-2846.

SHAO T H, ZHANG H J, CHENG K, et al. Review of replanning in hierarchical task network[J]. System Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2833-2846.

[88] 耿新力. 城区不确定环境下无人驾驶车辆行为决策方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

GENG X L. Research on behavior decision-making approaches for autonomous vehicles in urban uncertainty environments[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

[89] 黄璐. 基于本体论的无人驾驶车辆场景评估与行为决策方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.

HUANG L. Research on ontology-based situation assessment and decision-making approach for autonomous vehicles[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[90] JIMÉNEZ S, DE L R T, FERNÁNDEZ S, et al. A review of machine learning for automated planning[J]. The Knowledge Engineering Review, 2012, 27(4): 433-467.

[91] ARORA A, FIORINO H, PELLIER D, et al. A review of learning planning action models[J]. The Knowledge Engineering Review, 2018: 33.

[92] BONET B, GEFFNER H. Learning first-order symbolic representations for planning from the structure of the state space[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1909.05546>.

[93] BATEMAN J, BEETZ M, BESSLER D, et al. Heterogeneous ontologies and hybrid reasoning for service robotics: the EASE framework[C]//Proc.of the 3rd Iberian Robotics Conference, 2017: 417-428.

[94] BESER D, CECIL J, FREEDMAN M, et al. A grounded approach to modeling generic knowledge acquisition[EB/OL]. [2021-01-15]. <https://arxiv.org/abs/2105.03207>.



[95] 陈志贤. 面向复杂环境的服务机器人自主规划方法研究[D]. 深圳: 中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院), 2019.

CHEN Z X. Study on approaches of automated planning of service robot for complex environment[D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences (Shenzhen Institutes of Advanced Technology), 2019.

[96] 李泚泚. 基于本体知识引导的家庭服务机器人抓取策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.

LI C C. Research on object grasp strategies for home service robot guided by ontology knowledge[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.

Review on ontology-based task planning for unmanned systems

PANG Weijian<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1,\*</sup>, HUANG Qian<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, MA Xianming<sup>1</sup>

(1. The Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China; 2. Beijing Aeronautical Engineering Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Operational knowledge is an important factor to improve the autonomous operational capability of unmanned systems. How to store and represent operational knowledge systematically and normatively, so that unmanned systems can autonomously complete mission planning according to the high-level task instructions, and carry out task planning and intelligent decision making based on constantly updated battlefield knowledge, is a new research field. Firstly, an ontology-based task planning framework is proposed by summarizing the concept, planning method, and knowledge representation method of task planning domain. Then, the application of ontology in robot, unmanned system, military mission planning, and other fields is summarized. The characteristics and shortcomings of current research are analyzed. And the important research direction of this problem is proposed. Finally, the principles that should be followed and the key capabilities that should be paid attention to when constructing the task planning ontology of unmanned system are discussed.

Keywords: ontology; task planning; intelligent planning; unmanned systems

作者简介

庞维建(1986—),男,工程师,博士研究生,主要研究方向为军事运筹、无人系统作战理论与技术。

李 辉(1964—),男,研究员,硕士,主要研究方向为军事运筹、军事评估。

黄 谦(1968—),男,研究员,博士,主要研究方向为战略运筹分析、联合作战模拟。

李 朋(1988—),男,工程师, 博士研究生,主要研究方向为网络信息体系。

马贤明(1979—),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为作战仿真、军事通信。

一网打尽系列文章，请回复以下关键词查看：

创新发展：[习近平](#) | [创新中国](#) | [协同创新](#) | [科研管理](#) | [成果转化](#) | [新科技革命](#) | [基础研究](#) | [产学研](#)

热点专题：[军民融合](#) | [民参军](#) | [工业4.0](#) | [商业航天](#) | [国家重点研发计划](#) | [装备采办](#) | [摩尔定律](#) | [诺贝尔奖](#) | [国家实验室](#) | [军工百强](#) | [试验鉴定](#) | [双一流](#) | [净评估](#)

前沿科技：[颠覆性技术](#) | [仿生](#) | [脑科学](#) | [精准医学](#) | [基因编辑](#) | [虚拟现实](#) | [增强现实](#) | [人工智能](#) | [机器人](#) | [3D打印](#) | [4D打印](#) | [太赫兹](#) | [云计算](#) | [物联网](#) | [互联网+](#) | [大数据](#) | [石墨烯](#) | [电池](#) | [量子](#) | [超材料](#) | [超级计算机](#) | [卫星](#) | [北斗](#) | [智能制造](#) | [不依赖GPS导航](#) | [5G](#) | [MIT技术评论](#) | [航空发动机](#) | [可穿戴](#) | [氮化镓](#) | [隐身](#) | [脑机接口](#) | [传感器](#) | [数字孪生](#)

先进武器：[无人机](#) | [轰炸机](#) | [预警机](#) | [运输机](#) | [直升机](#) | [战斗机](#) | [六代机](#) | [网络武器](#) | [激光武器](#) | [电磁炮](#) | [高超声速武器](#) | [反无人机](#) | [防空反导](#) | [潜航器](#)

未来战争：[未来战争](#) | [抵消战略](#) | [水下战](#) | [网络空间战](#) | [分布式杀伤](#) | [无人机蜂群](#) | [太空战](#) | [反卫星](#)

| [混合战](#) | [电子战](#) | [马赛克战](#)

**前沿机构：**[战略能力办公室](#) | [DARPA](#) | [快响小组](#) | [Gartner](#) | [硅谷](#) | [谷歌](#) | [华为](#) | [阿里](#) | [俄先期研究基金会](#) | [军工百强](#)

其他主题系列陆续整理中，敬请期待.....



### 战略前沿技术

“战略前沿技术”公众号为远望智库旗下前沿资讯媒体。“远望智库”聚焦前沿科技领域， ...  
1278篇原创内容

公众号



### 装备参考

远望智库旗下武器装备领域前沿资讯平台  
164篇原创内容

公众号



### 无人争锋

远望智库旗下无人装备领域前沿资讯平台  
6篇原创内容

公众号



### 空天大视野

远望智库旗下航空航天领域前沿资讯平台  
126篇原创内容

公众号



远望智库

与智者同行，为创新加速

公众号



军民融合观察

远望智库旗下军民融合领域前沿资讯平台

12篇原创内容

公众号



海洋防务前沿

提供海洋防务最新资讯，发布前沿技术最新动态

658篇原创内容

公众号



网信前沿观察

远望智库旗下网络信息领域前沿资讯平台

13篇原创内容

公众号



AI智胜未来

远望智库旗下人工智能领域前沿资讯平台

1篇原创内容

公众号



喜欢此内容的人还喜欢

国外预置式无人系统及其发展趋势  
无人争锋