

向人脑学习的UCAV认知导航航迹规划研究

吴德伟¹, 杜佳^{1,2*}, 戚君宜¹, 杨俊强²

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;2.西安通信学院,陕西西安,710106)

摘要 认知导航是支撑无人作战飞机自主飞行的重要导航方式,智能在线航迹规划是认知导航亟待解决的热点问题。为满足无人作战飞机的自主飞行能力需求,从“向人脑学习”的角度提出了无人作战飞机认知导航航迹规划新技术。首先分析了无人飞行器在线航路规划技术的研究现状,指出了其存在的主要问题,总结了技术发展趋势;其次针对当今在线航迹规划技术难以解决的环境/任务智能自适应问题,提出了“向人脑学习”的仿生航迹规划新方法,阐述了新方法的基本内涵与认知循环,明确了认知导航航迹规划的主要功能;最后对认知导航航迹规划的各项关键技术进行了剖析,指明了需要克服的难题。

关键词 无人作战飞机;认知导航;智能自适应;在线航迹规划;脑结构

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.011

中图分类号 V24 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0046-06

A New Progress on Intelligent Path Planning of UCAV Cognitive Navigation by Learning from Human Brain

WU Dewei¹, DU Jia^{1,2*}, QI Jun-yi¹, YANG Jun-qiang²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Xi'an Communications Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Cognitive Navigation is a new method of autonomous navigation for Unmanned Combat Aerial Vehicle, and intelligent real-time path planning is the most important function of Cognitive Navigation for UCAV autonomous flight. The new topic on UCAV intelligent path planning of cognitive navigation is discussed by learning from human brain. Firstly, the research status of UAV real-time path planning is surveyed, and its development trends are summarized. Secondly, in order to obtain higher intelligence and wider adaptability under the complex battlefield with different tasks, the intelligent path planning of cognitive navigation is proposed for the first time, the basic connotation and the complete cognitive cycle are illustrated, and the main functions of the novel technology are illustrated. Finally, some key technologies presented clearly indicate the way to the further research.

Key words: Unmanned Combat Aerial Vehicle; cognitive navigation; intelligent adaptability; real-time path planning; brain structure

收稿日期:2013-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273048)

作者简介:吴德伟(1963—),男,吉林省吉林市人,教授,博士生导师,主要从事导航定位研究.E-mail:wudewei74609@126.com

*通信作者:杜佳(1980—),女,博士生,主要从事飞行器起降引导与自主导航研究.E-mail:dujia0227@126.com

引用格式:吴德伟,杜佳,戚君宜,等.向人脑学习的UCAV认知导航航迹规划[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):46-50. WU Dewei, DU Jia, QI Junyi, et al. A new progress on intelligent path planning of UCAV cognitive navigation by learning from human brain [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 46-50.

无人作战飞机(Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV)作为一种高度信息化智能化的空天武器平台,需要具备极高的自主性^[1]才能在复杂战场环境中独立自主完成作战任务。美军无人机路线图明确指出,2015 年左右 UCAV 将通过认知过程实现自主飞行^[2-3]。为了满足 UCAV 自主飞行的能力要求,机上导航系统必须具有很强的环境感知及交互能力、更强的实时连续导航定位能力以及自主适应环境变化的智能在线航迹规划能力。

1 无人飞行器在线航迹规划

1.1 研究现状分析

无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle UAV)在线航迹规划的主要目标是确保 UAV 在不确定的战场环境下实时调整飞行线路,避开敌方威胁、险要地形以及人工障碍等不利因素,其本质是多目标多约束的最优化问题。目前,UAV 在线航迹规划算法主要有两种类型,一类是基于数学模型的航迹规划算法,一类是基于学习的航迹规划算法。基于数学模型的航迹规划算法主要由环境模型建立和基于代价函数的最小代价航迹搜索两部分组成,常用算法有启发式搜索算法^[5-6]、图搜索算法^[7-8]、群体智能算法^[9-11]和混合算法^[12-14]等。目前,结合飞行器动力性能约束削减航迹搜索节点^[15]、基于滚动优化策略实时规划局部航迹^[13,16]等方法,是解决航迹规划复杂性和实时性的主要手段;基于学习的航迹规划算法主要包括基于强化学习的航迹规划和基于经验知识学习的航迹规划两种类型。基于强化学习的航迹规划^[17-18]同样需要基于预先定义的代价函数,生成一条具有最小代价的航迹,但无需获取环境模型,通过不断尝试不同的行为策略,并对所希望的行为予以奖励,对不希望的行为予以惩罚,逐渐形成一种趋向目标的最优行为策略。基于经验知识学习的航迹规划算法^[19-20]主要利用习得的经验知识指导复杂战场环境下的最优航迹规划,通常该算法分为离线学习和在线规划两个阶段,在离线学习阶段积累规划经验知识,在线规划阶段先从知识库查询规划知识,在查询结果无效时,启动常规基于数学模型的规划算法实时规划飞行航迹。

UCAV 是一类新兴的无人飞行器,智能程度更高,自主性更强,需要高度智能化的在线航迹规划能力才能在复杂战场环境下灵活应变、自主飞行。目前,已有学者基于 UAV 在线航迹规划算法开展 UCAV 在线航迹规划算法研究^[21-22],但由于 UAV 在线航迹规划算法存在以下问题,难以满足 UCAV 自主飞行的导航要求。

1)结构框架简单。主要采用“感知→规划→优化→执行”的递阶式结构框架,无论航迹在之前的任务中是否已经规划过,都要“不假思索地”重复执行

完整的航迹规划循环迭代过程,导致实时性差、智能程度低。

2)经验学习能力较差。只能学习某种从状态到行为的简单映射,无法从复杂航迹规划过程中学习有用的方法和规则,难以在线增量学习规划经验。

3)自适应能力不足。只解决了简单的突发威胁或某一类作战任务目标突然改变时的实时航迹规划问题,难以在真实战场环境中面临众多环境与任务的不确定因素时使用。

1.2 发展方向

任务复杂、充满不确定因素的动态规划环境以及 UCAV 自主控制能力要求,共同推动着无人飞行器在线航迹规划技术的发展。其技术发展主要沿着平台数量由少到多、环境/任务的不确定程度由低到高以及智能自主水平由弱到强等 3 条主线进行,共同构成了无人飞行器在线航迹规划技术的三维发展空间。

1)研究平台主线。无人飞行器在线航迹规划技术研究从单机自主规划向多机协同规划方向发展。

2)不确定因素主线。环境不确定因素包括规划空间中的地形、威胁、气象、电磁等方面,任务不确定因素主要包含任务目标不确定以及任务类型不确定两方面。无人飞行器在线航迹规划中的不确定因素正从简单环境下突发静态/动态防空威胁,向同时考虑单一任务的目标突变、以及复杂环境下突发多种类型威胁与任务类型突变的方向发展。

3)智能自主水平主线。无人飞行器在线航迹规划技术正从初级智能向初级自适应、智能自适应方向发展。目前,初级智能在线航迹规划的研究最多,主要针对单一类型突发威胁“自动”规划最优航迹;初级自适应在线航迹规划智能程度更高,主要解决在多种类型突发情况下如何“自动”规划最优航迹。智能性更好、适应环境/任务变化的能力更强、能够实时或近实时自主地规划或修改规划策略的智能自适应在线航迹规划,无疑是无人飞行器在线航迹规划技术的未来发展方向。智能自适应的在线航迹规划技术研究主要在国外进行,研究重点集中在具有认知能力的体系结构的构建上^[23-26]。

但是,受限于当前人工智能应用水平的限制,智能自适应的在线航迹规划技术研究面临状态空间爆炸、大数据处理、自发育增进等瓶颈问题,有待于寻找新的途径加以克服和解决。

2 向人脑学习的航迹规划

2.1 人工智能、认知科学与认知导航

人工智能是模拟人类学习、推理、思维过程的技术科学,能使机器胜任一些通常需要人类智能才能完成的复杂工作,在机器人自主导航领域早有应用^[27-28]。UCAV 作为一种高度智能化的飞行器

人,其自主导航能力需要借助人工智能技术实现。然而,采用传统的人工智能技术尚无法满足实现UCAV自主导航能力的要求,实现UCAV导航系统的智能性成为了一项交叉学科范畴的极具挑战性的课题。近年来,认知科学^[29]对人脑工作机制的研究日益深入,有力地推动了人工智能技术的进步与发展,为高性能的UCAV导航系统研究开辟了新的技术途径。

由作者团队提出的UCAV认知导航,是无人机自主导航技术与人工智能、认知科学等学科相互碰撞中产生的一项新兴的导航技术。UCAV认知导航^[4]强调在认知理论的指导下,在对外界环境进行视觉认知的基础上,实时建立仿生的战场环境模型,模拟人类海马机理实现具有学习记忆、知识推理以及行为规划能力的导航信息处理,实现UCAV在最优航迹上的高精度智能自主导航。从本质上说,认知导航是对人类智能导航的简化过程与功能的模拟,具有巨大的智能潜力。

2.2 认知导航航迹规划

向人脑学习的航迹规划,就是认知导航的航迹规划,是UCAV认知导航的重要组成部分,其核心就是要解决在战场环境与任务高度不确定的情况下,UCAV智能自适应的在线航迹规划问题。

2.2.1 认知导航航迹规划的基本内涵

向人脑学习的UCAV认知导航航迹规划,强调基于宏观认知信息处理流程与微观脑区机能2个层次“向人脑学习”,模拟人类智能寻路过程,能够通过环境认知来获取战场环境信息,具有规划经验的自主学习能力和利用获得的规划空间、规划经验及UCAV内部状态的相关知识,在自主推理的基础上,实现航迹规划方式的实时改变和调整,适应外部战场环境的改变以及执行任务的变更,确保在复杂多变的战场环境下航迹规划的自适应能力和高度的智能性,达到快速规划最优可行飞行航迹的目的。

UCAV认知导航航迹规划具有认知性、智能性和适变性特征。其中,认知性是认知导航航迹规划的基础,强调对外部规划空间和内部UCAV状态的多域环境认知;智能性是认知导航航迹规划的关键,强调通过知识学习与推理决策,更好地适应环境的动态变化;适变性是认知导航航迹规划的最终目标,强调航迹规划方式灵活调整,适应复杂环境和任务的变化。

2.2.2 认知导航航迹规划的认知循环

从本质上说,UCAV认知导航航迹规划就是通过建立包含感知、学习、推理与决策等环节的仿人航迹规划认知过程,确保UCAV自主适应环境与任务的变化,高度智能地规划出最优可行航迹。认知导航航迹规划的认知循环见图1。

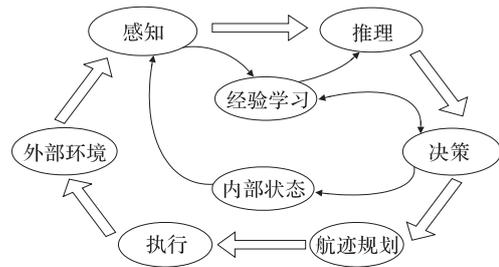


图1 UCAV认知导航航迹规划的认知循环
Fig.1 Cognitive cycle of intelligent path planning in UCAV cognitive navigation

认知循环由外环和内环组成。外环执行环境感知、推理决策以及规划执行等功能。内环具有UCAV内部状态感知、知识学习与存储等功能,甚至可模拟自主心智发育^[30]。认知导航航迹规划的完整认知过程可以描述为:首先,在实时感知外部环境和内部状态后,依据UCAV的任务执行情况、已规划好的初始航迹以及内环提供的经验知识进行推理,分析当前航迹是否发生环境突变、任务突变、航迹规划错误或智能体内部紧急状况;然后,根据分析推理的结果判断是否需要启动在线航迹规划,若需要则选择恰当的航迹规划方式并调整相关参数;最后,按照决策方案实时规划飞行航迹或按照初始航迹飞行。需要强调的是,内环中内部状态的感知、规划经验的学习与存储都是在决策之后进行,更新后的规划经验知识和内部状态信息在下一轮认知循环中与外部环境信息一同辅助推理、决策,实现航迹规划方式的快速调整。

2.3 认知导航航迹规划的主要功能

认知导航航迹规划属于智能自适应在线航迹规划算法,其主要功能包括动态不确定环境下的规划空间认知建模、仿人的规划经验积累、仿人的智能决策以及环境/任务自适应的可重构在线航迹规划。

2.3.1 动态不确定环境下的规划空间认知建模

UCAV规划空间感知是多层次、多目标的探测过程,感知的结果从数学角度表现为多维性。认知导航航迹规划从感知信息中提取可靠的低维度感知信息,建立一种具有一定认知能力的规划空间模型,为航迹规划提供重要的搜索平台。该规划空间模型能够根据规划任务的需要建立准确的地形地貌、战场威胁、复杂气象、电磁干扰和战场态势等“客观”环境信息模型,在环境动态变化时进行在线更新,还能够储存UCAV智能体的“主观”规划经验,用来提高航迹搜索的时效性。

2.3.2 仿人的规划经验积累

UCAV的规划经验有3种类型:①技能型经验,主要指用于紧急避障的感知-动作序列,类似于人脑的过程记忆(保持有关操作的技能,主要由知觉运动技能和认知技能组成);②事件型经验,主要指已规划好并成功执行了的飞行航迹,类似于人脑的情景记忆(存储个人发生的时间和经验的记忆形

式);③知识型经验,主要包括外部环境模型、航迹规划算法重构的规则与参数,类似于人脑的语义记忆(存储个人理解的事件的本质的知识,即记忆关于世界的知识)。3种类型的规划经验可以实时地、增量地、自组织地学习,还能够分类存储在仿人短时记忆系统和长时记忆系统的结构中,并在内部动机的驱动下完成规划经验的提取和使用。

经验知识对于重复执行的、突发情况下的以及未知环境下的在线航迹规划都有重要的指导作用,有助于提高算法的环境适应性和实时性。

2.3.3 仿人的智能决策

UCAV的航迹规划任务可分为低空突防航迹规划、区域侦察航迹规划、自主攻击航迹规划及协调攻击航迹规划等4种类型,无论哪种类型的航迹规划都可能面临突发静态/动态威胁、目标移动、任务突变与飞临未知环境等4类突发情况。认知导航航迹规划能够模拟地面操控人员的智能决策过程,在综合外部战场环境信息、内部UCAV状态信息以及规划经验知识的基础上,针对UCAV当前的航迹规划任务类型,分析判断UCAV飞行航迹是否发生上述突发情况,设计最优的航迹规划方案并选择合适的规划参数,推理预测下一步的航迹规划效果,为突发情况下飞行航迹的及时调整与修正提供支持。

2.3.4 环境/任务自适应的可重构在线航迹规划

认知导航航迹规划具备在线航迹规划算法自配置和自优化功能,从而实现在较短时间内不同航迹规划方案之间的智能切换。航迹规划的自配置能力体现在,根据环境与任务的变化调整代价函数的表示形式、最优的航迹搜索策略、航迹约束条件以及航迹平滑方法,重新构造在线航迹规划算法,使UCAV在不同环境和任务下都能快速规划出最优的飞行航迹。认知导航航迹规划还能够根据规划经验自主进行算法优化,提高不确定环境/任务下自适应航迹规划的鲁棒性和时效性。

3 实现认知导航航迹规划需解决的关键技术

3.1 “类人脑”结构框架设计

结构框架是认知导航航迹规划的顶层设计,是开展认知导航航迹规划技术研究的基础和前提。当前无人机航迹规划主要采用的递阶式结构框架不具有学习能力,无法满足UCAV智能自适应的航迹规划能力要求。而认知模型作为人类认知过程的计算机模型,通过模拟人类的认知机制,广泛应用于智能体的体系结构设计。“类人脑”认知模型^[31-32]是一种新兴的认知模型,其最大的优势在于通过模拟人类不同脑区的功能以及各个脑区的相互联系,从大脑认知机理上实现对人类认知过程的建模,具有空间

认知、经验积累、分析联想和推理决策能力,是认知导航航迹规划结构框架设计的重要基础。

需要进一步探索的问题包括:海马、前额皮层和新皮层等脑区功能分析;仿人类智能寻路过程的“类人脑”认知结构模型设计;UCAV航迹规划的“类人脑”结构框架建立。

3.2 规划空间模型创建

规划空间模型创建主要研究如何将感知的战场环境信息综合为整体的环境模型,并在动态不确定环境下实时更新,以支持最优航迹的搜索,是认知导航航迹规划的重要环节。当今的无人机航迹规划空间模型大多采用度量模型、非度量模型或二者的混合模型,从“客观”的视角描述环境空间中的地形、地貌,但是未能体现环境中包含的语义信息,不符合人类的空间认知特点。近年来,一种仿人的空间认知模型——认知地图^[33](Cognitive Map)得到了广泛的关注。认知地图能够建立情景中的事件和事件之间的关联关系,尤其对于复杂的、不确定的、相互关联的事件能够进行很好地模拟,十分适合UCAV认知导航航迹规划的要求。

如何设计UCAV航迹规划认知地图模型?战场上的威胁、地形、气象、电磁等重要信息如何建模表示?认知地图模型如何创建?如何进行动态环境下认知地图模型的在线更新?都是需要深入研究的难点问题。

3.3 规划经验认知学习与记忆

规划经验认知学习是仿人脑自主推理与决策以及自适应航迹规划算法重构的基础,其技术内涵包括对UCAV规划经验的知识表达以及一定时空范围内规划经验的认知学习。具有认知能力的学习算法必须具有增量学习特性、实时学习特性和自组织特性,目前主要通过人工神经网络学习算法和强化学习算法实现。其中,人工神经网络学习算法主要存在难以学习复杂任务、收敛速度慢等缺点;而强化学习算法则可以利用内在动机使智能体学习复杂行为,符合UCAV规划经验认知学习的特点。多巴胺调控机制Q学习算法^[34]是一种高性能强化学习方法,学习效率高、实时性好、具有增量学习能力,针对UCAV3种类型规划经验,重新设计内部动机函数、奖励函数和迭代函数,可能解决UCAV复杂航迹规划行为的认知学习问题。

规划经验认知记忆主要解决仿人的经验知识存储问题,是运用经验知识解决航迹规划问题的前提。需要解决的主要问题包括人类记忆机理研究、3种类型规划经验的存储方式分析、具有自主生长能力的规划经验记忆系统构建等。

3.4 基于“类人脑”认知模型的认知决策

基于“类人脑”认知模型的认知决策主要研究如何在规划经验的指导下,根据UCAV外部飞行环境、内部状态以及任务特点,模拟人类的自主决策过

程,在分析、推理和内部预演的基础上,实现最优航迹规划相关参数的选择,进而达到最优航迹规划方案调整的目的。认知决策的重要性在于,它是认知导航航迹规划的“中枢”,是航迹规划算法重构的重要依托。目前,常用的决策方法主要有自然决策和理性决策两种类型。其中,自然决策能够将人的经验融入到传统决策理论中,侧重于决策的过程;而理性决策是封装了认知原则的自然决策方法,能够模拟人类决策的内部机理,更适用于复杂多变、不确定性程度高、有时间压力的UCAV航迹规划环境。

近年来,基于认知模型的认知决策方法^[35]因其更为完美地展现了整个认知决策的过程而逐渐成为了认知决策领域关注的热点。然而,当前认知决策的研究尚属理论研究阶段,应用的认知模型也只有ACT-R、Soar2种,如何基于先进的“类人脑”认知模型进行认知决策?如何提取可用于决策的经验知识?如何在外部环境高度不确定的情况下提高认知决策的时效性?都是亟待进一步解决的难点问题。

3.5 可重构的航迹规划算法设计

可重构的航迹规划算法设计是认知导航航迹规划的核心技术,更是实现UCAV航迹规划自适应能力构建的关键。其技术内涵在于通过参数的动态调整,完成对航迹规划算法中的代价函数、约束条件以及路径搜索策略的自适应控制,从而适应动态变化的规划环境与不同的作战任务,实时规划出性能最优的可行飞行航迹。

不同于现有的仅将2种航迹规划算法在路径搜索策略上进行融合的混合算法,可重构航迹规划算法将多种智能航迹规划算法在多层次上进行灵活可控认知融合,满足瞬息万变的规划空间以及区域侦察、自主攻击、低空突防等变更的需要。

需要进一步解决的问题包括:自适应航迹代价函数的设计、约束条件的选取,最优航迹搜索策略研究,航迹规划算法的重构规则建立,自主适应环境变化与任务变更的事件触发机制研究等。

4 总结和展望

在动态战场环境下智能自适应地规划出最优可行飞行航迹,已经成为当今UCAV航迹规划研究领域一项具有挑战性的研究课题。本文为满足UCAV自主飞行能力要求,提出了仿人脑智能寻路机能的UCAV认知导航航迹规划新技术,从基本内涵、主要功能和关键技术对UCAV认知导航航迹规划进行了全面阐述,提出了认知导航航迹规划系统“类人脑”结构框架。UCAV认知导航航迹规划的技术优势在于:通过模拟人脑的智能寻路机理,实现仿人的自主学习与记忆、推理预测直至规划决策的认知过程,满足在复杂战场环境下UCAV在线航迹规划的高度智能性和自适应性的要求。

随着UCAV技术的日趋成熟和人工智能技术的不断深入,认知导航航迹规划必将引领UCAV智能在线航迹规划技术从单平台到多平台、从二维平面向多维战场空间的未来发展,为复杂战场环境下UCAV智能自主地适应环境变化与任务变更奠定重要的技术基础。进一步的研究将首先围绕UCAV规划空间建模展开,重点研究解决建立UCAV航迹规划的空间认知地图模型、度量规划空间的不确定性以及建模表示规划空间中航迹、地形、威胁、气象与电磁信息等方面的问题。

参考文献(References):

- [1] 陈宗基,魏金钟,王英勋,等.无人机自主控制等级及其系统结构研究[J].航空学报,2011,32(6):1075-1083.
CHEN Zongji, WEI Jinzhong, WANG Yingxun, et al. UAV autonomous control levels and system structure[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2011, 32(6):1075-1083. (in Chinese)
- [2] U S Army UAS Center of Excellence. Eyes of the army U.S. army roadmap for unmanned aircraft systems 2010-2035[R]. Fort rucker alabama: U S Army UAS Center of Excellence, 2010.
- [3] Office of the secretary of defense. Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030[R]. Washington DC: Office of the secretary of defense, 2005.
- [4] 吴德伟, 邵能建, 戚君宜. 基于认知理论的UCAV智能导航研究新进展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(4):52-57.
WU Dewei, TAI Nengjian, QI Junyi. A New Research Progress of UCAV Intelligent Navigation Based on Cognitive Theory[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(4):52-57. (in Chinese)
- [5] 刘莉, 于成龙, 王祝, 等. 小型无人机快速三维航迹规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12):2521-2526.
LIU Li, YU Chenglong, WANG Zhu, et al. Fast 3D route planning method for small UAV[J]. Systems engineering and electronics, 2013, 35(12): 2521-2526. (in Chinese)
- [6] 黄文刚. 无人机航路规划算法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2013.
HUANG Wengang. Path planning algorithm for UAV[D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2013. (in Chinese)
- [7] 莫松, 黄俊, 郑征, 等. 基于改进快速扩展随机树方法的隐身无人机突防航迹规划[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3):375-385.
MO Song, HUANG Jun, ZHENG Zheng, et al. Stealth penetration path planning for stealth unmanned aerial vehicle based on improved rapidly-exploring-random-tree[J]. Control theory & applications, 2014, 31(3): 375-385. (in Chinese)
- [8] 刘洋, 章卫国, 李广文. 基于改进PRM算法的路径规划研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1):104-106.
LIU Yang, ZHANG Weiguo, LI Guangwen. Study on path planning based on improved PRM method[J]. Application research of computers [J], 2012, 29(1):104-106. (in Chinese)
- [9] 傅阳光, 周成平, 胡汉平. 无人飞行器海上航迹规划差分进化算法研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(3):295-300.
FU Yangguang, ZHOU Chengping, HU Hanping. Research on differential evolution algorithm for path planning for unmanned serial vehicle in ocean environment[J]. Acta armamentarii, 2012, 33(3): 295-300. (in Chinese)
- [10] 李猛, 王道波, 盛守照, 等. 基于加权k-均值聚类与粒子群优化的多航迹规划[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(3):512-516.
LI Meng, WANG Daobo, SHENG Shouzhao, et al. Route planning based on particle swarm optimization with threat heuristic[J]. Electronics optics & control, 2011, 18(12):1-4. (in Chinese)

- [11] 胡中华.基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
HU Zhonghua. Research on some key techniques of UAV path planning based on intelligent optimization algorithm [D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics and astronautics, 2011.(in Chinese)
- [12] 王建青,李帆,赵建辉.基于混合粒子群优化的巡航导弹低空突防航迹规划[J].应用科学学报,2012,30(3):317-321.
WANG Jianqing, LI Fan, ZHAO Jianhui. Route planning in low altitude penetration for cruise missile based on a hybrid particle swarm optimization[J]. Journal of applied sciences, 2012, 30(3):317-323. (in Chinese)
- [13] 任敏,霍霄华.基于异步双精度滚动窗口的无人机实时航迹规划方法[J].中国科学:信息科学,2010,40(4):561-568.
REN Min, HUO Xiaohua. UAV real-time path planning base on double precision rolling windows strategy [J]. Science china: information sciences, 2010, 40(4): 561-568.(in Chinese)
- [14] 姚远,周兴社,张凯龙,等.基于稀疏 A* 搜索和改进人工势场的无人机动态航迹规划[J].控制理论与应用,2010,27(7):954-959.
YAO Yuan, ZHOU Xingshe, ZHANG Kailong, et al. Dynamic trajectory planning for unmanned aerial vehicle based on sparse A* search and improved artificial potential field[J]. Control theory & applications, 2010, 27(7):954-959. (in Chinese)
- [15] Szczerba R J, Galkowski P, Glickstein I S, et al. Robust algorithm for real-time route planning[J]. IEEE trans aero elec sys, 2000, 36: 869-878.
- [16] 魏铁涛,王剑薇,屈香菊.动态环境下在线航迹规划的滚动优化方法[J].飞行力学,2012,30(3):218-222.
WEI Tietao, WANG Jianwei, QU Xiangju. Receding optimization method for on-line path planning in dynamic environment[J]. Flight dynamics, 2012, 30(3):218-222. (in Chinese)
- [17] 郝钊钊,方舟,李平.基于 Q 学习的无人机三维航迹规划算法[J].上海交通大学学报,2012,46(12):1931-1935.
HAO Chuanchuan, FANG Zhou, LI Ping. A 3-D route planning algorithm for unmanned aerial vehicle based on q-learning[J]. Journal of shanghai jiaotong university, 2012, 46(12):1931-1935. (in Chinese)
- [18] 李东华,江驹,姜长生.多智能体强化学习飞行路径规划算法[J].电光与控制,2009,16(10):10-14.
LI Donghua, JIANG Ju, JIANG Changsheng. A flight path planning algorithm based on multi-agent reinforcement learning method[J]. Electronics optics & control, 2009, 16(10):10-14. (in Chinese)
- [19] 陈洋,张道辉,赵新刚,等.基于 IHDR 自主学习框架的无人机 3 维路径规划[J].机器人,2012,34(5):513-518.
CHEN Yang, ZHANG Daohui, ZHAO Xingang, et al. UAV 3D path planning based on IHDR autonomous learning framework[J]. Robot, 2012, 34(5):513-518. (in Chinese)
- [20] 沈淑梅,姚臣.启发式动态任务调度与航路规划方法[J].电光与控制,2012,19(9):63-66.
SHEN Shumei, YAO Chen. A heuristic and dynamic method for task scheduling and path planning[J]. Electronics optics & control, 2012, 19(9):63-66. (in Chinese)
- [21] 张煜,陈琨,沈林成.UCAV 空面多目标攻击三维航迹规划技术[J].国防科技大学学报,2012,34(5):107-114.
ZHANG Yu, CHEN Jing, SHEN Lincheng. 3-Dimensional trajectory planning for single UCAV attacking multiple targets[J]. Journal of national university of defense technology, 2012, 34(5):107-114. (in Chinese)
- [22] Qiu L J, Ye W. A study on the system structure of multi-UCAV cooperation mission planning[J]. Proceedings of the 10th world congress on intelligent control and automation, 2012:4030-4034.
- [23] 唐上钦,黄长强,胡杰,等.基于威胁等效和改进 PSO 算法的 UCAV 实时航路规划方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(8):1707-1710.
TANG Shangqin, HUANG Changqiang, HU Jie, et al. Threat equivalent and improved PSO algorithm based real-time method of UCAV route planning[J]. Systems engineering and electronics, 2010, 32(8): 1707-1710.(in Chinese)
- [24] Meng X Y, Zhu J H, Li G L, Tu X Y. Research on autonomous control system structure of ucav based on cognitive science[C]//Proceedings of IC-NIDC. Beijing: IEEE press, 2009: 861-865.
- [25] Corey Ippolito, Greg Pisanich, Larry A. Young. Cognitive emotion layer architecture for intelligent UAV planning, behavior and control [C]//IEEE AC paper # 1417, Version 2, Updated December 10, 2004.
- [26] Arie Yavnai. Hybrid architecture intelligent autonomous mission controller for high autonomy unv[J]. [S.l.]: American institute of aeronautics and astronautics, 2003: 15-18.
- [27] 汪明磊.智能车辆自主导航中避障路径规划与跟踪控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
WANG Minglei. Research on local collision-free path planning and path tracking control technologies in the autonomous navigation of intelligent vehicle[D]. Hefei: Hefei university of technology, 2013. (in Chinese)
- [28] 卢阿丽.用于智能车辆自主导航的立体视觉算法研究[D].南京:南京理工大学,2012.
LU Ali. Research on stereo vision algorithms used for autonomous navigation of intelligent vehicles[D]. Nanjing: Nanjing university of science & technology, 2012. (in Chinese)
- [29] Collins A. Why cognitive science[J]. Cognitive science, 1977, 1:1-2.
- [30] 陈东岳.具有感知和认知能力的智能机器人若干问题的研究[D].上海:复旦大学,2007.
Chen D Y. Several researches about intelligent robot with perception and cognition[D]. Shanghai: fudan university, 2007. (in Chinese)
- [31] Richard J. Oentaryo, Michel Pasquier. Knowledge consolidation and inference in the integrated neuro-cognitive architecture[J]. IEEE intelligent systems, 2011, 26(4):62-71.
- [32] Óscar J. Romero López, Angélica de Antonio Jiménez. Hybridization of cognitive models using evolutionary strategies [C]//2009 IEEE congress on evolutionary computation. Trondheim: IEEE press, 2009: 3213-3218.
- [33] 陈凤东.基于认知地图的移动机器人自主导航技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
CHEN Fengdong, F D. Mobile robot autonomous navigation based on cognitive map[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2009. (in Chinese)
- [34] 翟心昱.基于仿人脑认知计算模型的计算机视觉学习方法[D].杭州:浙江工业大学,2012.
ZHAI Xinyu. Human brain inspired cognitive computational model based robot visual learning method[D]. Hangzhou: Zhejiang university of technology, 2012. (in Chinese)
- [35] 范存群,王尚广,孙其博,等.基于认知自选择决策树的垂直切换方法研究[J].通信学报,2013,34(11):71-80.
FAN Cunqun, WANG Shangguang, SUN Qibo, et al. Vertical handoff research based on cognitive self-selection decision tree[J]. Journal on communications, 2013, 34(11):71-80. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)