



基于仿生智能的无人作战飞机控制技术发展新思路

段海滨^{①*}, 邵山^②, 苏丙未^③, 张雷^④

① 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 北京 100191;

② 沈阳飞机设计研究所, 飞行控制部, 沈阳 110035;

③ 北京临近空间飞行器系统工程研究所, 总体二室, 北京 100076;

④ 空军装备研究院, 综合计划处, 北京 100085

* E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2009-08-21; 接受日期: 2009-12-28

国家自然科学基金项目(批准号: 60975072, 60604009)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2008ZC01006)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-10-0021)、中央高校基本科研业务费-领航创新基金 A 类(批准号: YWF-10-01-A18)和北京科技新星计划(批准号: 2007A017)资助

摘要 仿生智能和无人作战飞机均已分别成为国际人工智能和航空航天领域中备受关注的研究热点和前沿性课题. 本文在系统阐述仿生智能和无人作战飞机基本概念原理的基础上, 结合目前研究现状从基于人工脑的无人作战飞机高智能化自主控制、基于群体智能理论的多无人作战飞机协同控制、基于群智能-Bayesian 网络的复杂作战态势评估、基于仿生硬件的无人作战飞机高智能化自主控制、网络环境下基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制等方面提出了无人作战飞机控制技术的发展新思路, 这些思路的实现将极大提高作战任务的有效性及生存概率具有重要意义, 同时也为无人作战飞机的智能化、综合化和先进化提供新的突破方向和切实可行的技术途径.

关键词

仿生智能
无人作战飞机
人工脑
自主控制
Bayesian 网络
仿生硬件
异构分布协同

1 引言

未来信息技术的一个必然发展趋势是智能化, 而这种智能化实现的有效途径应是向自然界中多种形式的智能行为学习和模拟. 自然界中的许多自适应优化现象不断给人以启示: 生物体和自然生态系统可通过自身的演化就使许多在人类看起来高度复杂的优化问题得到完美的解决^[1]. 近些年来, 一些与经典的数学规划原理截然不同的、试图通过模拟自然生态系统机制以求解复杂问题的仿生智能(bio-inspired intelligence, BI)方法相继出现(如遗传算

法、蚁群优化、微粒群优化、人工免疫、人工蜂群优化、文化进化、情感计算、DNA 计算等), 大大丰富了现代优化技术, 也为那些传统最优化技术难以处理的组合优化问题提供了切实可行的解决方案^[2]. 伴随着模拟自然与生物机理为特征的仿生智能计算时代的悄然兴起, 一些仿生智能技术已在经典 NP-C 问题的求解和实际应用中显示出强大的生命力和进一步发展的潜力.

仿生智能技术具有较强的鲁棒性、优良的分分布式计算机制、易于与其它方法相结合等优点. 尽管大部分算法的严格理论基础尚未奠定^[3], 国内外的有关研

究还处于实验探索和初步应用阶段,但是目前人们对仿生智能的研究已经拓展到了多个应用领域,由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题,而且在仿生智能的硬件实现上也取得了很多突破性进展,从而使仿生智能展现出勃勃生机和广阔的发展前景。

无人作战飞机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)是一种有动力、可控制、能携带多种任务设备、执行多种任务,并能重复使用的无人作战飞行器,也是一种充分利用信息技术革命成果而发展的高性能信息化武器装备平台。无人作战飞机不仅可广泛用于通讯、气象、灾害监测、农业、地质、交通等多个民用领域,而且还还可应用于智能监控和侦察、人工干扰、诱饵、网点通信、对敌防空压制、攻击机/巡航导弹防御、目标攻击、空空作战、边境巡逻等军事领域。

无人作战飞机系统的每个组成部分都是一个高技术的复杂子系统,而且各个组成部分相互之间具有很强的依赖性和协调性。因此,高技术密集性和“系统之系统(system of systems)”是无人作战飞机系统的两个重要特征。无人作战飞机不仅在民用方面大显身手,而其所具有的重量轻、低成本、零伤亡、机动性高、隐蔽性好和适应性强等特点,使其可适应长时间、大纵深作战,甚至可成为空中作战武器平台,支持海、陆、空、天、电五维一体的未来高技术战争。因此,由于无人作战飞机在未来军事斗争中具有突出的地位和作用,近几年来各军兵种对无人机系统的需求十分旺盛,目前已有多种型号的无人作战飞机列入了“杀手锏”装备发展计划。当前,以美国为首的西方各国都投入大量的人力、财力和物力进行无人作战飞机的研究,美、英、法、德等国相继抛出其无人机研究方案和技术验证报告。美国国防高级研究计划局分别与空军、海军联合研制 X-45A 空军无人作战飞机和 X-47A 海军无人作战飞机。美国国防部在 2005 年 8 月 8 日发布的无人机路线图《无人飞行器系统路线图 2005~2030》中,把无人作战飞机置于优先发展的位置(图 1)^[4]。2007 年 12 月 18 日,美国国防部又发布了《无人飞行器系统路线图 2007~2032》^[5],与 2005 版的主要区别是对无人系统收集的数据进行更加完善的标记来改进作战指挥员之间侦查、监视和情报任务的传播方式。

瑞典、意大利、西班牙、希腊、瑞士、比利时和

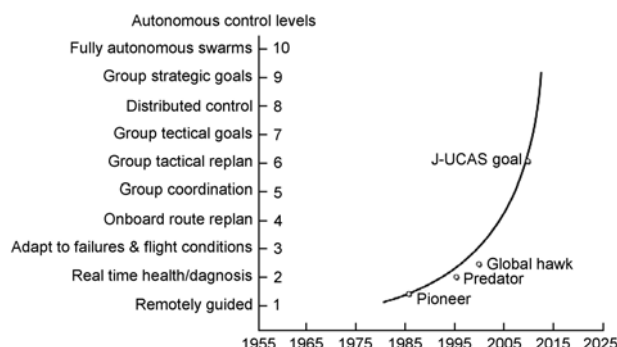


图 1 2005 版美国无人飞行器系统发展路线图(2005~2030)

法国联合开发“神经元”无人机原型机。俄罗斯正加大无人作战飞机的投资和研发力度,在高空长航时战略侦察无人机、无人作战飞机和先进旋翼无人机等技术领域努力追赶美国。除了军事强国以外,一些第三世界国家和军事不发达国家也纷纷涉足无人机领域,在全球兴起一股研制无人作战飞机的热潮。但是我国目前现有的无人作战飞机装备和技术能力与世界先进国家相比在许多方面还有很大差距,以其军事应用为目的的新思想、新概念、新原理等基础研究和应用研究还比较薄弱。

多无人作战飞机协同控制是无人作战飞机系统的核心内容和关键技术之一,其内容主要包括多机协同编队飞行及编队重构、态势评估及定位、任务分配、航路规划及重规划、通信问题、信息融合等方面^[6]。西方国家虽然在无人作战飞机的控制与实现技术上处于国际领先地位,但是他们在多无人作战飞机协同控制技术方面仍然存在很多研究空白,特别是采用仿生智能技术对多无人作战飞机协同控制问题进行研究,目前还处于起步阶段,因此,我们国家在这个时候对这一新兴的多学科交叉领域进行立项并深入研究显得十分必要。

目前在高智能化自主无人作战飞机控制方面存在的主要问题就是无人作战飞机的自主控制性问题,这也是目前困扰各国军工科研人员的头等难题,目前的芯片处理速度还不够快,软件尤其是高度自适应的软件也没有,导致目前无人作战飞机的智能化存在处理速度慢、可靠性低等瓶颈问题^[7]。总的来说,无人战机的高智能自主控制是一项艰巨的工程,只有在容错技术、行为智能和自适应推理系统(如神经网络)取得突破的前提下,无人作战飞机的智能化才

能成为现实. 而人工脑(artificial brain)、群体智能、仿生硬件等交叉学科领域的仿生智能新技术为无人作战飞机的高度智能化工程实现提供了可行的技术途径. 此外, 多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制也是一个新兴的战略研究领域.

仿生智能涌现过程中所体现出的动态性、自组织性、协同性、强鲁棒性等特点与复杂战场环境下对无人作战飞机控制的许多要求是相符的. 本文在阐述仿生智能和无人作战飞机基本概念原理的基础上, 从基于人工脑的无人作战飞机高智能化自主控制技术、基于群体智能理论的多无人作战飞机协同控制技术、基于群智能-Bayesian 网络的复杂作战态势评估技术、基于仿生硬件的无人作战飞机高智能化自主控制技术、网络环境下基于元启发式(meta-heuristic)智能的多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制等方面提出了无人作战飞机控制技术发展的新思路, 这些技术对于极大提高作战任务的有效性以及无人作战飞机的生存概率具有重要的意义, 同时也为无人作战平台的智能化、综合化和先进化提供新的突破方向和切实可行的技术途径.

2 发展思路

图 2 给出了本论文所提出的基于仿生智能的无人作战飞机控制技术发展新思路框架.

2.1 基于人工脑的无人作战飞机高智能化自主控制技术

自主控制领域的人工脑主要是指发展类似人脑有认知能力的硬件的研究^[8]. 人工脑融入了进化的思

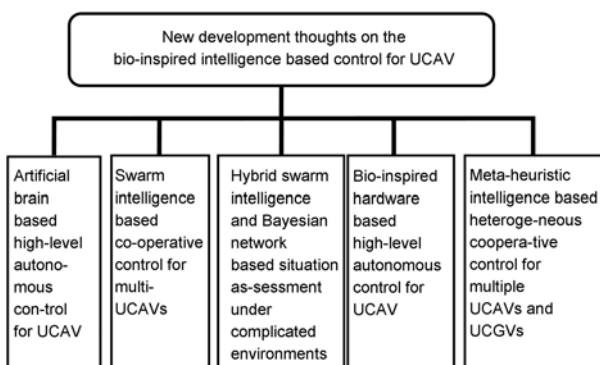


图 2 基于仿生智能的无人作战飞机控制技术发展新思路框架图

想, 通过学习具有前期记忆的能力, 可以对外界环境“认知”、“思考”、“决定”, 形成对外界环境进行反应的“行为”, 如图 3 所示.

人工脑结合人工智能及控制工程理论, 从人工生命的观点, 用计算机作为手段再现脑的思维决策过程, 用“人工脑”控制器能够使无人作战飞机具有更高的智能化. 人工脑采取了两方面的实现方式: 类似生命的模型(life-like modeling)和社会模型(social modeling), 包括传统的用于神经系统的学习模型, 如人工神经网络. 人工脑控制器主要完成两方面的功能: 一是控制的功能, 它控制无人作战飞机的各种动作; 另一个是学习的功能, 首先掌握基本的生存知识和技能, 然后从外界环境中学习到相关的具体知识. 当然, 在控制无人作战飞机飞行运动过程中也要学习和获得知识.

人工脑无人作战飞机是在无人作战飞机控制系统中应用人工生命方面的理论、方法. 这里所谓的“人工生命”的理论、方法和技术包括有关“人工脑”、“人工感官”、“人工器官”、“人工人”及“人工动物”的理论、方法和技术. 人工脑无人作战飞机控制系统的基本体系结构见图 4 所示.

(1) 基于人工脑的“智能控制器”: 用计算机软、硬件或光机电材料研究、开发的各种模拟“自然脑”的脑模型作为未来无人作战飞机的控制核心. 由于

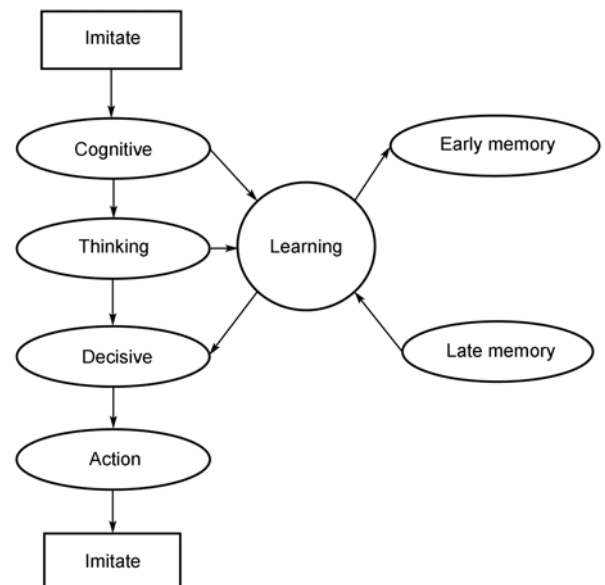


图 3 人工脑信息处理过程

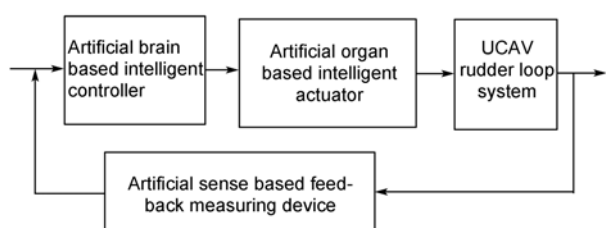


图4 人工脑无人作战飞机的基本控制结构

人工脑具有高水平的“人工思维智能”，所以基于人工脑的智能控制器的无人作战飞机具有很强的自主性。

(2) 基于人工感官的反馈测量装置：人工感官是指模拟人或动物感觉器官的技术模型，基于人工感官的反馈装置是由多种智能传感器形成多媒体集成的人工感官系统，使得无人作战飞机具有相应的视觉、听觉，以及多感官信息融合、多模式数据挖掘等功能。

(3) 基于人工器官的控制执行机构：人工器官是指模拟人体或动物的效应器官的技术模型，如人工手臂、人工腿脚、人工心脏等。无人作战飞机上安装上基于人工器官的执行机构，可以模拟人体的手脚、心脏的控制机理和调节功能，在执行人工脑控制器下达的命令过程中实现双向调节、协调控制。

2.2 基于群体智能理论的多无人作战飞机协同控制技术

群体智能起源于科学家对群体性昆虫的观察和研究。从蜜蜂、蚂蚁等昆虫的成虫来看，它们的智商并不高，也没有谁在指挥，但它们却能协同工作，建起坚固、漂亮的巢穴，集中食物、抚养子女，依靠群体的能力，发挥了超出个体的智能，这就叫群体智能。在计算智能领域，群体智能是指任何启发于群居性昆虫群体和其它动物群体的集体行为而设计的算法和分布式问题解决装置。群体智能包括基于群体的智能进化算法，如遗传算法、蚁群优化法、粒子群优化等。如果把这种理论应用到无人驾驶飞机方面，比如每架无人作战飞机和导弹差不多，只装备低性能传感器和简单程序，但是让这种简易的无人作战飞机大量出动，相互协作，攻击目标。尽管每个传感器的探测能力比较低，但是群体最前面的无人作战飞机会近距离地探测目标，并立刻把探测到的信息传递给后面的无人作战飞机，后面的无人作战飞机就

会对目标群起而攻之。对于有人机来说，这是极难对付的。人的头脑再机敏也无法同时对付10架、20架无人作战飞机的攻击，图5给出了群体智能的一般流程^[1]。

群体智能的特点和优点主要有^[1]：

(1) 群体中相互合作的个体是分布式的，这样更能够适应当前网络环境下的工作状态；

(2) 没有中心的控制与数据，这样的系统更具有鲁棒性，不会由于某一个或者某几个个体的故障而影响整个问题的求解；

(3) 可以不通过个体之间直接通信而是通过非直接通信进行合作，这样的系统具有更好的可扩充性；

(4) 由于系统中个体的增加而增加的系统的通信开销在这里十分小。系统中每个个体的能力十分简单，这样每个个体的执行时间比较短，并且实现也比较简单，具有简单性。

群体智能的上述优点已使其成为信息处理领域的一个重要研究方向。群体智能以其分布性、简单性、灵活性和健壮性在组合优化问题、知识发现、通信网络、机器人等研究领域显示出的潜力和优势，使得群体智能成为无人作战飞机控制领域一个研究新热点。据媒体报道，美国五角大楼正在资助一个称为虫群战略(swarm strategy)的群体智能研究项目，研究内容主要涉及用群体智能等技术来指挥协调无人飞行器和地面车辆的运动。

群体智能理论在未来多无人作战飞机领域的研究和应用可主要集中在下述几个方面：

(1) 基于分布式多智能体(agent)的多无人作战飞机协同控制；

(2) 基于群体智能的多无人作战飞机的协同航路规划及其重规划；

(3) 基于群体智能的多无人作战飞机编队控制及其重构；

(4) 基于群体智能的多无人作战飞机对地攻击态势评估及协同目标分配；

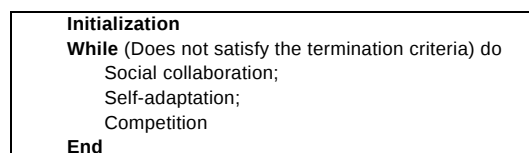


图5 群体智能的一般流程

(5) 基于群体智能的多无人作战飞机协同目标攻击.

2.3 基于群智能-Bayesian 网络的复杂作战态势评估技术

由于复杂作战态势评估的输入数据和知识库数据都含有不确定性, 解决它需要从不完全、不确定的或者不精确的知识和信息中做出推理, 完成对当前战场态势的解释, 所以, 不确定、不完全的知识如何表示, 如何推理是实现态势评估所必须完成的关键所在. 基于概率知识表达的 Bayesian 网络成为人工智能中非精确知识表达与推理领域近十几年来研究的热点, Bayesian 网络(bayesian network, BN)是一种用网络拓扑来表示客观随机事件的因果关系, 以 Bayesian 概率理论为推理基础的处理不确定性因素的工具^[9]. Bayesian 网络具有很严密的数学依据和理论基础, 其思想符合人类思考、理解、学习和抽象的过程, 而且其网络结构能够很好的响应结构的改变. 在不确定性问题的处理上, Bayesian 网络显得非常可靠和有效. Bayesian 网络的计算模型化已经成为建设决策知识系统的一个重要部分, 并被称为智能软件, 广泛应用于“诊断与故障检测、医疗诊断、交通管理、军事目标自动识别、数据挖掘、作战意图自动估计、信息融合”等方面. 在使用 Bayesian 网络进行事件推理之前, 首先应确定 Bayesian 网络结构, 即根据数据进行 Bayesian 网络学习. 而 Bayesian 网络结构的确定是一个被证明了的 NP-hard 问题, 使用启发式算法是解决 NP-hard 问题很好的途径. 可将 Bayesian 算法和群智能优化结合, 使用群智能元启发方式指导了搜索过程.

每群智能个体使用增量式的方法构筑网络, 如图 6 所示, 定义 G_0 为初始状态, 下标 0 表示 G 为空图^[10], G_h 表示当前状态有 h 条边, 智能个体每一步就是从当前某状态 G_h 增加一条有向边 $x_i \leftarrow x_j$ 到新的状态 G_{h+1} , 即 $G_{h+1} = G_h \cup \{x_i \leftarrow x_j\}$, 在终止状态时, 已找不到新的边使 G 所对应的 Bayesian 网络打分值更高.

上述思路有效地利用了问题域的启发信息, 同时很好地发挥了智能群之间简单却有效的相互协作作用, 适合解决大规模的 Bayesian 网络学习问题, 从而实现无人作战飞机对复杂作战态势的有效评估.

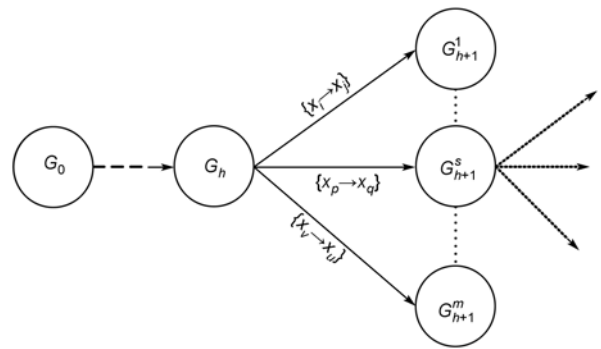


图 6 智能个体构造 Bayesian 网络过程

2.4 基于仿生硬件的无人作战飞机高智能化自主控制技术

仿生硬件早期也称为演化硬件 (evolvable hardware, EHW)^[3], 是一种能根据外部环境的变化而自主地、动态地改变自身的结构和行为以适应其生存环境的硬件电路, 它可以像生物一样具有硬件自适应、自组织和自修复特性. 早在 20 世纪 60 年代, 计算机之父 Neumann^[11]就提出了研制具有自繁殖与自修复能力通用机器的伟大构想. 1992 年, 日本学者 Garis^[12]和瑞士联邦工学院的科学家们同时提出了将 FPGA 的结构可重配置特性与进化算法相结合的方案, 标志着仿生硬件这一新兴研究领域的正式诞生. 随后仿生硬件的研究得到了迅猛发展, 很多国内外学者投身其中. 同时, 鉴于这一新兴研究领域可望在空间探索和国防应用中产生巨大影响, 美国航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)和国防部(department of defense, DoD)对仿生硬件也表现出极大的兴趣^[13], 并于 1999 年召开了首届 NASA/DoD 仿生硬件专题讨论会, 之后每年都要举行一次类似的讨论会, 以促进仿生硬件的理论研究和应用开发, 其研究目标是研制用于航天飞机、宇宙飞船、空间探测器、人造卫星、战略飞机、核潜艇的自适应与自修复电子系统和测控系统.

仿生群体智能在无人作战飞机控制方面的硬件实现需要应用到仿生硬件. 仿生硬件模拟自然进化过程, 将仿生优化算法的思想用于硬件物理结构的设计, 特别是电子系统的设计. 仿生硬件的硬件基础是可编程逻辑器件, 可用如下公式来描述该定义^[14]: 仿生硬件(EHW)=仿生算法+可编程逻辑器件(FPGA).

通过对交替逻辑与路由结构之间的选择, 可将

FPGA 视为软件与硬件系统之间联系的桥梁. 利用目前流行的专业软件可快速地完成许多传统电路的设计, 从而避免了传统电路设计中一些不必要的开支, 并能快速纠正设计中所出现的一些错误. 将电路配置到 FPGA 芯片上并切换到运行模式, 而该模式的内在并行性可保证其高效的快速性能. FPGA 技术加速了系统的开发研制进程, 这项技术不仅适合于快速成型, 而且还可替代中小规模生产中的逻辑门阵列. 基于仿生智能的 FPGA 设计结构如图 7 所示^[15].

由图 7 可见, 该仿生硬件结构主要包括三个基本模块, 即群体模块、发生器模块和评价模块. 基于群体智能的无人作战飞机仿生硬件主要有如下特点.

(1) 硬件自组织

基于仿生进化机理的仿生硬件无须人员干预, 可实现硬件的自组织、自动化设计^[16], 能通过硬件自身的在线进化过程来获得具备预期功能的电路和无人作战飞机系统结构. 利用仿生硬件能实现无人作战飞机硬件的标准化、可重用性、多用途以及通用化.

(2) 硬件自适应

仿生硬件能满足复杂空战环境变化对硬件所要求的结构与功能自适应性, 而目前传统的硬件电路无法实现这种结构自适应. 无人作战飞机仿生硬件通过电路结构与参数的在线自适应调整, 可有效解决如因作战损失、空战环境改变而引起无人作战飞机控制电路性能变化的问题, 也可组成高速并行信息处理的自适应控制硬件系统.

(3) 硬件自修复

目前无人作战飞机电子系统的结构越来越复杂, 系统集成化是必然趋势. 若高度集成化的无人作战飞机嵌入式电子系统在运行中出现故障, 传统的容错与系统功能恢复方法难以实现, 而且这种板级部件冗余容错系统结构复杂, 其重构算法繁琐, 硬件体

积较大, 成本较高, 容错能力与系统可靠性有限; 而仿生硬件可以弥补这些不足.

(4) 执行速度快

无人作战飞机仿生硬件自适应的结果是新的硬件结构自身, 因此, 与其它基于软件的自适应系统相比, 仿生硬件能得到显著的加速, 而这一优点正是复杂作战环境下无人作战飞机控制系统所需要的.

2.5 网络环境下基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制技术

元启发式智能主要是指一类通用型的启发式智能方法, 这类方法的优化机理不过分依赖待解问题的结构信息, 并可与各类控制方法进行有效结合, 还可应用到众多类别的复杂组合优化问题中. 目前元启发式智能已成为仿生智能交叉学科中一个非常活跃的前沿性研究领域.

无人作战车是一种有动力、可控制、能携带多种任务设备、执行多种任务, 并能重复使用的地面移动式武装机器人^[17]. 网络环境下多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制技术是一个新的研究领域, 该技术可以拓宽无人作战飞机和无人作战车的应用范围, 提高其侦察、搜救及执行其它任务的效率. 但是其在自主性、动态性、协同性等方面所表现出的高要求使得常规的协同控制方法已显得无能为力, 而且该技术中渗透着许多强耦合、多约束的复杂控制与决策问题, 而这些问题通常具有组合爆炸的搜索空间^[18]. 常规的基于数学规划方法已显得无能为力, 而基于元启发式智能的分布式协同控制方法则是一种有前途的发展方向 and 主要技术途径.

Chaimowicz 等人^[19]把多无人机/无人车异构协同形象地比喻成“空中牧羊犬”, 并提出了一种基于机器视觉的“空中牧羊犬”分层递阶框架. 图 8 给出了由

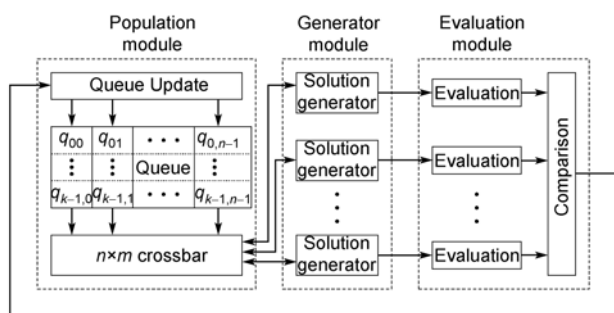


图 7 包含群体、发生器和评价模块的仿生硬件设计结构



图 8 多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同掩护军队自动运输任务想定

美国海军研究院 McCook^[20]所绘制的一种多无人作战飞机/无人作战车异构协同掩护军队自动运输的任务想定。

由图 8 可见,多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制的目的是控制和协调一组或几组无人作战飞机及无人作战车之间的行为,以执行和完成相互协调的特定任务。西方国家(特别是美国)虽然在多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制与实现技术上处于国际领先地位,但他们在该领域仍然存在很多研究空白,特别是采用元启发式智能对多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制问题进行研究,目前还处于起步阶段。

网络环境下多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制中将利用元启发式智能的如下特点:

(1) 在元启发式智能涌现的过程中,新的信息会很快被加入到环境中,而由于启发式信息更新机制的存在,旧的信息会不断被丢失,体现出一种动态特性;

(2) 群体所表现出来的复杂行为是通过简单个体的交互表现出高度的智能,因此具有自组织性;

(3) 由于许多元启发智能体在环境中感受散布的信息同时,没有中心的控制与数据,这使得不同的智能体会有不同的选择策略,具有分布并行性;

(4) 最优方案是通过众多智能体的群体合作被搜索得到的,这一过程具有协同性;

(5) 元启发式智能中的每个个体只能感知局部信息,个体的能力所遵循的规则非常简单,同时系统用于通信的开销较少,所以元启发式智能的实现简单,易于扩充;

(6) 单个智能个体之间、群体之间以及与环境之间的相互作用、相互影响、相互协作,使智能群体可

以完成非常复杂的任务,不会由于某一个或几个智能个体的故障而影响对整个问题的求解,这种适应性表现为元启发式智能的鲁棒性。

元启发式智能在网络环境下多无人作战飞机/无人作战车异构分布协同控制领域的研究和应用可主要集中在下述几个方面:

(1) 基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车异构群集运动技术;

(2) 基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车可视化导航技术;

(3) 基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车“追逃”技术;

(4) 基于元启发式智能的多无人作战飞机/无人作战车异构任务链技术。

3 结束语

近年来,仿生智能技术有了惊人的快速发展,而无人作战飞机控制技术的设计与实现基本上仍遵循一种固定的模式。今天,当大家争相研制高性能无人作战飞机的时候,就感到常规的设计与实现技术难以满足新型无人作战飞机的发展需求。新型无人作战飞机强调要高、精、尖,特别在智能化方面有很高的要求,各种技术上也要创新,从而带来研制上的高难度和高风险。目前由于受到固有的技术思想的羁绊,使得研制出来的新型无人作战飞机中智能的成份并不多,难以实现跨越式发展。而仿生智能技术则可极大提高无人作战飞机的智能性、作战任务的有效性以及无人机的生存概率。本文所提出的发展思路可为新型无人作战飞机的智能化、综合化和先进化提供新的突破方向和可行的技术途径。

参考文献

- Kennedy J, Eberhart R, Shi Y H. Swarm Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 2001
- Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behavior. *Nature*, 2000, 406: 39—42
- 段海滨. 蚁群算法原理及其应用. 北京: 科学出版社, 2005
- Office of the Secretary of Defence. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005—2030, 2005
- 美国国防部. 无人飞行器系统路线图 2005~2030. 2007, <http://www.dsti.net/News/43995.htm>
- Nikolos I K, Valavanis K P, Tsourveloudis N C, et al. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation. *IEEE T Sys Man Cy B*, 2003, 33: 898—912
- Tanner H G, Christodoulakis D K. Decentralized cooperative control of heterogeneous vehicle groups. *Robot Auton Syst*, 2007, 55: 811—823
- Garis H de, Batty T. “Multi-Mod”: A PC based software system for controlling an artificial brain containing 10,000 evolved neural net

- modules. Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, Portland, 2004. 1: 816—819
- 9 彭星光, 高晓光, 魏小丰. 基于贝叶斯优化算法的UCAV编队对联合目标的协同攻击研究. 系统仿真学报, 2008, 20: 2693—2696
 - 10 Luis M C, Juan M F, Jose A G, et al. Ant colony optimization for learning Bayesian networks. Int J Approx Reason, 2002, 31: 291—311
 - 11 Neumann J V. Theory of Self-reproducing Automata. Illinois: University of Illinois Press, 1966
 - 12 Garis H de. Evolvable hardware: genetic programming of Darwin machine. Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, Innsbruck, 1993. 441—449
 - 13 Langeheine J, Becker J, Folling S, et al. A CMOS FPTA chip for intrinsic hardware evolution of analog electronic circuits. Proceedings of the 3rd NASA/ DOD Workshop on Evolvable Hardware, Pasadena, 2001. 172—175
 - 14 赵曙光, 杨万海. 基于函数级FPGA原型的硬件内部进化. 计算机学报, 2002, 25: 666—669
 - 15 Diesel O, Guntsch M, Middendorf M. Population based ant colony optimization on FPGA. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology, Hong Kong, 2002. 125—132
 - 16 Stephen L S, David P C. Evolving image processing operations for an evolvable hardware environment. Proceedings of the 5th International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware, Trondheim, 2003. 332—343
 - 17 Tanner H G, Christodoulakis D K. Decentralized cooperative control of heterogeneous vehicle groups. Robot Auton Syst, 2007, 55: 811—823
 - 18 Hettiarachchi S, Spears M W. Distributed adaptive swarm for obstacle avoidance. Int J Intell Comp Cybern, 2009, 2: 644—671
 - 19 Chaimowicz L, Kumar V. Aerial shepherds: coordination among UAVs and swarms of robots. Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, Toulouse, 2004. 1—10
 - 20 McCook C J R, Esposito J M. Flocking for heterogeneous robot swarms: a military convoy scenario. Proceedings of the 39th IEEE Southeastern Symposium on System Theory, Macon, 2007. 26—31