

基于 Multi-Agent 系统的多飞行器协同路径规划方法的研究

刘 铭 徐 杨 陈 峥 梁 瀚 孙 婷 婷

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

摘 要 无人多飞行器(UAV)协同技术是当前分布式人工智能的一个热点领域,其中一个关键技术在于如何实现多 UAV 集群根据复杂环境中目标、威胁、地形变化以及各 UAV 之间的性能约束动态进行实时性航路规划。提出一种基于 Multi-agent 系统的多 UAV 对实时动态多目标进行路径规划的方法。其核心是基于 Multi-agent 系统的 decentralized 控制方案。在 Multi-agent 平台上,实现了 agent 对于环境、目标、任务等路动规划约束条件的建模,同时提出了多 agent 动态路径规划方法的实现方案。方案使用 DisCSP 模型框架,将基于真实复杂战场环境的实时路径规划问题所涉及的多复杂限制条件,抽象成 Multi-agent 系统中的各个约束条件,通过多 agent 间 Dynamic Programming 过程求解多 UAV 实时动态多目标的路径规划和协同任务分配的 ABT 算法,并实现在动态威胁和地形以及动态目标下具备集群协同能力的多 UAV 实时仿真系统。

关键词 多飞行器,多智能体系统,分布式约束满足,动态规划

Decentralized Multi-Agent Based Cooperative Path Planning for Multi-UAVs

LIU Ming XU Yang CHEN Zheng LIANG Han SUN Ting-ting

(School of Computer Science&Engineering, UESTC, Chengdu 611731, China)

Abstract The Multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) coordination is popular in domains of distributed artificial intelligence. One of the key challenges is the real time path planning of multi-UAVs according to their dynamic targets, threatens, and terrain changes in the complex environment, as well as the constraints of the UAVs themselves. This paper proposed a novel approach toward this challenge. Our model is based on multi-agent model with decentralized control to UAV teams. By modeling the constraints of the environment, their allocated targets and other dynamical constraints in real battle fields such as threatens, they can be represented by constraint agents. Therefore, a multiple UAV path planning problem can be converted into a traditional DisCSP problem. We adopted the dynamical programming progress to design the interaction between agents so that multi-agent teams can solve the DisCSP with the ABT algorithm and a feasible planned path for each UAV can be produced according to its dynamical constrains and allocated target. We simulated the multi-UAVs dynamical path planning in two scenarios: with dynamical threatens and terrains; with dynamical targets to manifest the feasibility of our designs.

Keywords Multi-UAVs, Multi-agent system, DisCSP, Dynamic programming

随着现代战争的快速发展,天空已经成为战争的一个主战场。各种各样功能各异的无人飞行器都已成为战场的主角,数量庞大的 UAV 协同合作,完成复杂的军事任务将成为必然。如何通过有效的控制策略对飞行器集群进行高效控制、协同作战并使集群处于最佳作战态势,是一个亟需解决的问题。飞行器集群控制主要体现在两个方面:协同目标任务管理和协同航路规划。协同任务必须以规划好的路径为基础,因此协同路径规划成为研究多飞行器集群控制的首要课题。现在国内对相关技术方案的研究还处于发展阶段,普遍研究都采用中心式控制策略。这种设计完全忽略了真实战场环境中,在通信上不能保证集群中心主机及时有效地更新战场环境信息,做出正确的路径判断,更不能保证有效信息的及

时传递;且在集群作战情况下,中心控制主机目标明显、负载大,一旦中心主机被摧毁或发出错误指挥信息,整个飞行器作战集群将处于瘫痪或失控状态。这就说明,传统的中心式控制模式将不再满足需求。

对于路径规划方案,目前广泛的研究主要集中在低维、低速、相对静态环境下进行路径规划,已经提出了许多种路径规划方案,并且仍有很多学者热衷于这个领域的研究和拓展。现有的方案多数围绕已知飞行器起始点和目标点,且中间障碍物处于已知的状态进行路径规划。现在最常见的方案为采用启发式算法(Heuristic Algorithm)^[1]进行规划,其中 A* 算法^[2]最具代表性,即在有限环境中,根据设定的最大安全距离和对障碍信息的掌握规划出可行的避让路径。这一类算法还

到稿日期:2011-02-14 返修日期:2011-05-01 本文受国家自然科学基金(60905042,60950110354)和航空基金(20100580005)资助。

刘 铭(1986—),男,硕士生,主要研究方向为多智能体系统、物联网;徐 杨(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式人工智能、多智能体系统、语义网、传感器网络,E-mail:xuyang.uestc@gmail.com;陈 峥(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式系统、智能化技术;梁 瀚(1988—),男,硕士生,主要研究方向为多智能体系统;孙婷婷(1987—),女,硕士生,主要研究方向为多智能体系统。

有 Viapoint 方法和弹性波段算法,自由空间 Voronoi 路径规划优化算法、基于粒子优化算法、基于神经网络方案、基于遗传算法、基于模糊混合规划等的路径规划方案。

上述研究都主要集中在低维、低速、相对静态环境下进行路径规划,所使用的求解机制处于大范围、多障碍、高维、受限空域等约束环境中,对于多 UAV 路径规划,需要进行大量的参数计算。一旦环境中出现动态障碍,或者是以动态目标为即时规划对象,则先前规划路径就往往不能再满足飞行需求,因此往往很难取得令人满意的结果。

多 UAV 路径规划问题,究其本质来看,是一个动态规划(Dynamic Programming)^[3,4]的过程。这个过程一般是一个多级决策的过程,其思想就是将总问题分成多级子过程,然后分别求出各级子过程的最优值,从而得出总问题的控制量,使系统性能指标达到最优。其核心是贝尔曼最优性原理^[5]。

我们的研究是在多智能体系统(MAS, Multi-agent System)^[6]框架下,结合动态规划过程,通过战术数据链路系统^[7]的信息采集传递,为多 UAV 在出发点和多目标间规划多条最优或次优的飞行航路。本文的核心是鉴于多智能体系统在分布式人工智能中的独特优势,研究由人和多 UAV 组成的社会型智能体框架所必需的知识模型、通讯和推理过程,关注多个智能体互相交互过程中共同求解的一个公共问题。这一思想体现了一种分析、设计和实现大型、复杂系统的方法途径。基于 agent 的观点提供了一种更合理、更具可操作性的方式来描述和解决多飞行器系统自主决策的问题。我们通过各 agent 间的通讯、合作、协调、调度、管理及控制来表达实际系统的结构、功能及行为特性,为实际问题提供了一种统一的框架。

1 基于多 agent 的多飞行器动态目标路径规划总体设计框架

本文采用多 agent 系统中经典的分布式人工智能(DAI, Distributed Artificial Intelligence)^[8]框架,实现了非中心式(Decentralized)的控制方案^[9,10],避免了传统中心式控制在真实复杂战场环境中不能保证实时通信和有效控制等问题。DAI 是解决大规模分布式问题最直接和有效的模型。我们的多 agent 系统的总体框架如图 1 所示。

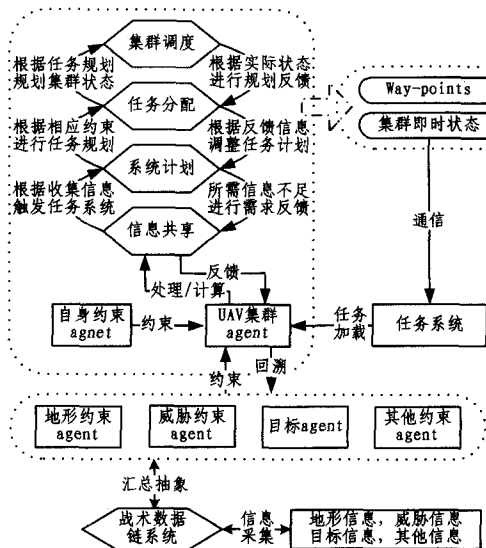


图 1 基于 DAI 的多智能体系统框架

从图 1 中可以看出,系统为一个分布式的流程框架。下层 agent 层由各个约束条件抽象组成,上层 agent 层由 UAV 集群和 UAV 自身约束构成,上层处理层由调度、任务分配、系统计划和信息共享组件构成。UAV 集群内部每一 UAV 都通过上层 4 组件完成约束、信息共享、信息处理、单机路径生成、任务信息加载,并通过信息共享机制完成集群状态调控和信息反馈过程。在本系统框架中,当多个 agent 处于同一个变量环境中的时候,它们之间也存在着某种约束,这些约束可以用来建模一个 agent 想要达到的一种目标状态,也可以表示包含依赖性选择的状态,使得约束满足求解技术能够让 agent 更容易地做出决策,为各个 agent 寻找一组满足它们之间约束的解。分布式人工智能应用问题都可以看作分布式约束满足问题(DisCSP)^[11,12]。本研究正是基于比较经典的异步回溯(ABT, Asynchronous Backtracking)^[10]算法,实现了 UAV 集群在复杂约束环境中对于多目标、多任务的动态即时路径规划。

2 基于约束表示的多 agent 设计

结合多智能体模型基本框架,构建本研究的 MAS 系统 agent 模型基本定义。

P:性能。对 UAV 所产生的路径进行评价,包括对路径的长度(越短)、所受威胁的概率(越小)、碰撞概率(越小)等进行评价。

E:环境。包含 UAV 所涉及的区域中的已知威胁、地形、目标和 UAV 集群中其他 UAV 等。

S:感知。系统 agent 所代表的 UAV 对涉及环境的感知力,通常是以经纬高度或者映射来代表任务区域中的位置、任务点等。

A:行为。系统规划产生的 agent 行为,由 MAS 系统根据各个约束条件计算解,在此表现为规划的 waypoints, $P_i = \{W_i^1, W_i^2, \dots, W_i^n\}$ 。

在设计研究模型时,根据 UAV 集群的实际飞行性能要求、协作机动以及所涉及的各个约束条件等进行综合考虑。经过分析,对研究涉及多约束条件进行分类建模描述。

(1) UAV 自身性能约束 agent 建模:主要指其机动性能(如飞行参数和飞行包线^[13])、资源和时间的配给等,构架自身性能约束条件集合 $C_{per} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, i \in Z^+$;

(2) 地形约束 agent 建模:主要指可通过观测的地形约束(如山体、高建筑等),构建无碰撞飞行路径地形约束集合 $E_{geo} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$;

(3) 威胁约束 agent 建模:主要指对我方 UAV 产生威胁的一些障碍(如敌方防空火力、雷达区域等),构建评估约束集合 $T_{men} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$;

(4) 目标 agent 建模:UAV 集群在协作任务时,根据不同目标种类和状态,构架目标约束集合 $A_{obj} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;

(5) 系统中其他 UAV 的 agent 建模:对于 UAV 集群的协同机动,每一个 UAV 都是集群中其他飞行的一个约束,在集群的控制和协调任务中,相隔通信距离、安全半径、编队队形、任务目标分配、冲突避免等都是必须要考虑的,据此构架集群控制集合 $U_{clu} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。

以上抽象的系统 agent 模型通过计算环境中威胁、地形和其他 UAV 约束的状态动态生成 waypoints 的个数。但由

于 UAV 集群在进行信息交互和协作任务时,系统对于环境的信息采集存在即时性,因此在获得新的信息时,动态改变相应 agent 的状态,以应对诸如新威胁的发现或已有威胁的消亡等状况。

3 多 UAV 实时协同路径规划算法

从以上多 agent 模型可以看出,设计的核心问题在于如何实现多 agent 的即时交互;根据 agent 自身所表示的约束,多 agent 系统如何求解并规划路径 waypoints。

3.1 Multi-agent 协作算法模型

考虑到多飞行器集群的飞行特性,即飞行器之间存在相互协作、相互制约的特性,每架飞行器应拥有独立的飞行空间、自身的火控覆盖范围,保证飞行器飞行轨迹不相交,避免碰撞事故,同时要保证飞行器集群的攻击范围不存在空白,即保证攻击范围的全面覆盖。故将该问题分析为多飞行器之间存在一定的约束关系,即在不发生冲突的情况下实现协同机动任务。因此,鉴于分布式系统特别适用于表示及求解规模大、难度高、动态变化快的组合问题,我们将采用 DisCSP 框架对多 UAV 集群进行建模。

DisCSP 指将一个全局的问题分解成多个子任务,分配给多个智能体;每个智能体(agent)负责全局解的一部分,即部分分解;通过智能体间的通信和合作,最终完成求解。故在该框架下将全局多 UAV 的飞行规划问题分解为单个 UAV 路径求解问题。每个 UAV 实现路径规划后,与和自己有约束关系的 UAV 进行通信,以确保各自的解满足全局解的需求,进而完成全局解的求解。由图 1 可以看出,模型的第一层为多 UAV 建立的 DisCSP 模型层,模型的第二层为各种约束抽象 agent 层。

3.2 多 UAV 协同路径规划在 DisCSP 问题下的求解方法

假设现 UAV 集群协作完成某一任务问题,可建立如下模型。

一组协作完成的多 UAV 集合, $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots\}$, $i \in \mathbf{Z}^+$, 其中 U_i 需要完成从对应起始点 $S_i = \{x_i^s, y_i^s, z_i^s\}$ 到动态目的地点 $G_i = \{x_i^g, y_i^g, z_i^g\}$ 的任务。假设 U_i 的飞行路径由 $n-1$ 个飞行轨迹点组成,定义路径点集合 $P_i = \{W_i^0, W_i^1, \dots, W_i^n\}$, 其中 W_i^k 为即时规划路径点。当 $k=0$ 时, W_i^0 为该飞行的起始点 S_i^0 ; 当 $k=n$ 时, W_i^n 为该飞行路线的终点 G_i^n 。考虑在实际复杂战场飞行环境中,每个 U_i 都拥有一定的飞行空间 $Area_i$, 其中 $Area_i$ 以 (x_i, y_i, z_i) 为中心、以 r 为安全半径。飞行器 U_i 在 $Area_i$ 的范围内将受到不同约束 $E_{geo}^i = \{e_i, \dots, e_{i+m}, \dots\}$ 的限制,故 U_i 的飞行轨迹由性能约束、目标及所受环境约束共同决定产生, $U_i \times G_i \times E_{geo}^i \rightarrow P_i$ 。根据 UAV 性能约束 C_{per} 、集群约束 U_{clu} 、地形约束 E_{geo} 、威胁约束 T_{men} 和目标约束 A_{obj} , 有 $Rel \subseteq C_{per} \times U_{clu} \times T_{men} \times A_{obj}$ 。定义 U_i 飞行轨迹可行域 D_i , $D_i = \{v_i^0, \dots, v_i^1, \dots\}$, v_i^k 为相关约束作用下 U_i 的可行轨迹点,最终满足 Rel_i 的 v_i^k 即为飞行路径规划中的一个轨迹点 W_i^k 。如不满足,则返回上一层,根据约束条件继续求解。

建立函数 $Func = \{Func_1, \dots, Func_i, \dots\}$ 为多 UAV 的飞行轨迹效用函数集合。 $Func_i$ 为 U_i 的一个效用函数,在所有 UAV 的轨迹点满足全局约束条件的情况下,定义 S_{best} 为即时最优可行解:

$$S_{best} = \operatorname{argmax}(\sum_{i=1}^m Func_i)$$

3.3 多 UAV 协同路径规划路径生成算法描述

基于以上建立的多智能体约束模型和求解方法,建立表 1 所列的求解算法流程。

表 1 基于异步回溯的多约束求解算法

ABT based Multi-agent System Constraints Algorithm	
1;	Initialization
2;	define waypoint func $F(U, G, E_{geo})$;
3;	define constraint func $Rel(C_{per}, U_{clu}, T_{men}, A_{obj})$;
4;	while received (new_domain_i) do
5;	$v_i^j \leftarrow F(U_j, G_j, E_{geo}^j)$;
6;	$current_value \leftarrow ok?$;
7;	when received ($ok?, v_i^j$) do
8;	add v_i^j to agent_view;
9;	check agent_view;
10;	if v_i^j satisfy $Rel(C_{per}, U_{clu}, T_{men}, A_{obj})$
11;	else if $current_value \leftarrow nogood$;
12;	when received ($nogood, v_i^j$) do
13;	add v_i^j to agent_view;
14;	check agent_view;
15;	select any $v_i^k \in D_i$;
16;	if $v_i^k \leftarrow F \cap Rel \cap nogood$ then
17;	$v_i^j \leftarrow v_i^k$;
18;	end if;
19;	end if;
20;	then $w_i^j \leftarrow v_i^j$;
21;	end do;
22;	end while;

根据智能体之间信息交互特性,从表 1 可以看出,在系统决策过程中,每个 agent 异步执行发送接收 ok? 和 nogood 消息以及维护一个 agent_view 的操作,agent_view 用来记录其他 agent 当前赋值。由随机 agent 初始化变量值,向与之有约束关系的较低优先级的 agent 发送包含当前变量赋值的信息。若一个 agent 接收到从高优先顺序 agent 发来的 ok? 消息,则检查其赋值与优先顺序高的 agent 的当前赋值是否满足约束关系。如果不满足约束关系,即产生冲突,则必须改变自己的赋值;如果该 agent 值域中没有能与高优先顺序 agent 的赋值相一致的值,就产生一个新的约束关系(也就是 nogood),并且将 nogood 传递给高优先顺序 agent,同时提升自己的优先级至最高,选定自己合适的赋值。这样被回溯的 agent 就改变自己的赋值。agent 接收消息 ok? 和 nogood 消息后,检查 agent_view 以及回溯,直到求得合适解为止。虽然在算法中,agent 看上去是顺序地响应接收到的消息,但是在实际问题中,一个 agent 可以同时处理几个消息。当一个 agent 不断地寻找满足其他 agent 的解时,其优先级不断提高,则在解的传递检测中优先考虑其对解的选择与检测。

系统在处理静态、已观测出的约束限制时,通过静态约束分解独立运算相关约束进行求解。该求解过程主要利用 agent 的自主特性,异步独立对当前自身约束条件下的飞行轨迹进行可行解的求解运算。同时记录各个 agent 满足的难易程度,实现优先级的调整,在产生轨迹点的同时为添加动态实时约束做准备。

当系统处理实时动态约束时,将静态约束计算轨迹点依次通过动态约束 agent 判断是否满足新加入的动态约束条件。当动态约束条件得不到满足时,通过约束条件修正可行解并判断该新的可行解是否满足所有约束 agent 的约束条件。当多次进行一类 waypoints 的计算时,可重复利用不断

更新的约束 agent 的优先级进行处理。

4 仿真分析

结合上述理论及相关问题约束模型框架,我们构架如下仿真环境。对每个 UAV,设定其雷达覆盖半径 c_1 、武器可攻击角度 c_2 、在可攻击时与目标的夹角 α 、被目标追击时与目标的夹角 β ,并定义双飞最大可攻击半径 γ 与 ψ 。相关定义如下。

α :我方 UAV 在与目标遭遇时与目标的夹角即为我飞行器攻击角度。在实际测试中,为保证定位准确性, α 尽可能保持最小取值;

β :被目标追击时与目标的夹角即为我方飞行器最小防卫角度。在实际测试中,为保证最大生存, β 尽可能保持最大取值。

根据约束模型及参数设定,飞行轨迹函数可定义如下。

$$u(\alpha, d) = \begin{cases} 0, & d > c_1 \\ (1 - \frac{\alpha}{c_2})(-\frac{4}{c_1}d^2 + \frac{4}{c_1}d), & 0 < d < c_1 \text{ \& } \alpha < c_2 \\ 0, & \alpha > c_2 \text{ \& } d > 0 \end{cases}$$

$$u(\beta, d) = \begin{cases} 0, & d > c_1 \\ \frac{\beta}{c_2}, & 0 < \beta < c_2 \\ 1, & \pi > \beta > c_2 \end{cases}$$

式中, $d = f(d)$ 。从而可以得出单飞行器的效用函数 $F_U = c_1 u(\alpha, d) + c_2 u(\beta, d)$, c_1, c_2 为相关权系数。

4.1 试验 1

测试 UAV 集群面对不同动态目标任务在发生实时目标重新分配后的路径规划情况。

定义图 2 所示的区域,设定我方 5 架 UAV, $U_i, i \in (0, 1, 2, 3, 4)$, 分别给定目标对象,敌我双方都以编队队型进入地图。假设敌目标性能略低于我 UAV 性能,可覆盖。各 UAV 及目标编号如图 2 所示。

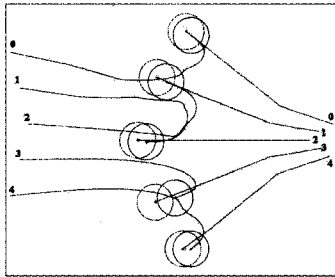


图 2 UAV 集群动态目标路径重规划

从图 2 中看出,敌我双方机群均以三角编队进入地图区域,图中圆圈表示可攻击半径。根据任务需求,在路径规划时,最大限度保证我方 UAV 生存,即始终处于敌攻击区域外;同时为保证完成任务,必须使目标在我攻击半径内。在飞行过程中,根据新任务需求, U_1 和 U_2 在飞行途中进行了目标置换,经过一系列路径重规划,最终完成任务需求。

试验表明,本研究设计的基于分布式多智能体系统能够有效解决多 UAV 集群在实时路径规划中对二次任务分配所涉及的动态目的路径的重规划问题。

4.2 试验 2

测试 UAV 集群在有限动态障碍环境中对动态环境多目标任务的路径规划。

定义图 3 所示的区域,设定 5 架 UAV,由圆点表示, $U_i, i \in (0, 1, 2, 3, 4)$ 。小方块代表其目标点,颜色一一对应。这些 UAV 从不同点出发,完成各自从出发点 to 目标点的任务。环境障碍和目标点根据时间变化发生一定改变和位移。假设目标点移动速度低于我 UAV 移动速度。从此任务下达到结束,每单位时间截图记录。

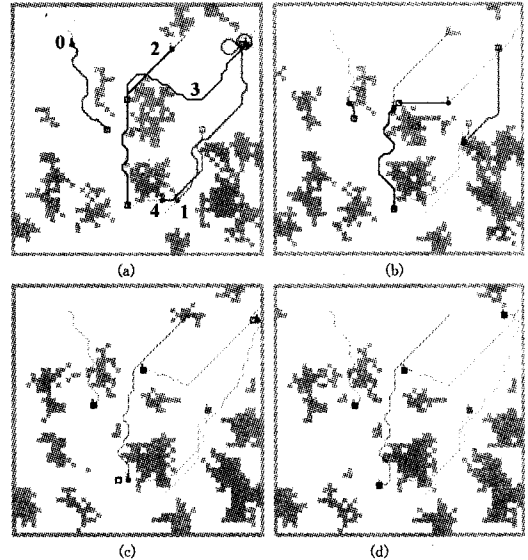


图 3 UAV 集群动态障碍环境路径规划

从图 3 看出,5 架 UAV 各自分配一个动态目标,环境障碍随时间发生变化,UAV 编号如图所示。

图 3(a):路径规划初期,基于多 agent 系统的即时通信共享机制,在相关约束下, U_3 与 U_4 初始规划路径出现绕行,以避免发生碰撞。

图 3(b):系统根据环境新约束产生和 UAV 位置改变,更改 agent 状态,根据新获得信息重新规划 UAV 路径。图中每条路径线的深色部分代表预规划路径,浅色部分代表实际飞行路径。

图 3(c): U_0, U_1, U_3 均已到达各自目标点,但是 U_2, U_4 动态目标位置发生变化,预期规划路径不能到达目标任务点。

图 3(d):系统根据每个 UAV 不同目标位置点、移动方向和周围障碍动态变化情况,重新规划路径,最终完成对目标点的任务。

试验表明,本研究设计的分布式多智能体系统框架能够有效解决多 UAV 集群在动态障碍环境中对于动态目标的实时路径规划问题。

结束语 对于多 UAV 实时协同路径规划问题,本文提出了一种基于 Multi-agent 系统的多 UAV 动态任务目标即时路径规划方案,详细给出了系统结构的设计和协同规划策略。利用 Multi-agent 系统在分布式人工智能技术方面的独特优势,通过多智能体协作框架,结合 Dynamic Programming 过程进行飞行器集群的实时动态路径规划和协同任务分配,摆脱了先前飞行器路径规划中算法结构简单、不能即时有效处理随机动态约束的缺陷,并在多飞行器集群控制以及协作任务分配上给出了可行方案。

本研究旨在提出一种采用 DisCSP 框架建模并用多智能体协作解决问题的方案。但关于如何改进算法,使智能体间

(下转第 233 页)

- [6] 王国胤. Rough 集理论与知识获取[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001
- [7] 苗夺谦,周杰,张楠,等. 基于代数方程组的属性约简研究[J]. 电子学报,2010,38(5):1021-1028
- [8] Maria S, Maite L. Rough set based approaches to feature selection for case-based reasoning classifiers[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(2): 280-292
- [9] Rokach L. Decomposition methodology for classification tasks: a meta decomposer framework[J]. Pattern Analysis and Applications, 2006, 9: 257-271
- [10] Fischer B. Decomposition of time series—comparing different methods in theory and practice[R]. Eurostat Working Paper, 1995
- [11] Wang M, Liu B, Tang J H, et al. Metric learning with feature decomposition for image categorization [J]. Neurocomputing, 2010, 73(10-12): 1562-1569
- [12] Kusiak A. Decomposition in data mining: an industrial case study [J]. IEEE Trans Electron Packag Manuf, 2000, 23(4): 345-353
- [13] Bazan J G, Latkowski R, Szczuka M. Missing template decomposition method and its implementation in rough set exploration system[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing, Kobe, LNAI, 2006: 254-263
- [14] Zhang Q Z. An Approach to Rough Set Decomposition of Incomplete Information Systems[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, IEEE, 2007: 2455-2460
- [15] Nguyen H S, Nguyen S H, Skowron A. Decomposition of task specification problems[C]// Proceedings of the 11th International Symposium on Foundations of Intelligent Systems, Warsaw, LNAI, 1999: 310-318
- [16] Fayyad U M, Irani K B. Multi-Interval Discretization of Continuous-valued Attributes for Classification Learning [C] // Proceedings of the 13th International Joint Conference of Artificial Intelligence, France, 1993: 1022-1027
- [17] Wang Y, Tetko I V, HallMark A, et al. Gene selection from microarray data for cancer classification—a machine learning approach[J]. Computation Biology and Chemistry, 2005, 29(1): 37-46
- [18] Au A, Chan K C C, Wong A K C, et al. Attribute clustering for grouping, selection, and classification of gene expression data [J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2005, 2(2): 83-101
- [19] Deb K, Reddy A R. Reliable Classification of Two Class Cancer Data Using Evolutionary Algorithms[J]. BioSystems, 2003, 72(1/2): 111-129
- [20] Cho S B, Ryu J. Classification gene expression data of cancer using classifier ensemble with mutually exclusive features[C]// Proceedings of the IEEE, Special Issue on Bioinformatics Part-I: Advances and Challenges. New York: IEEE Press, 2002: 1744-1753

(上接第 222 页)

通信高效可靠, 以及如何选择更优的解, 以达到最佳态势, 并未做深入探讨。近年来, 分布式约束满足问题和分布式约束最优化问题(DCOP)^[11] 越来越受到关注, 理论渐趋成熟, 多飞行器即时路径规划问题也开始利用其理论框架。然而, 针对具体的算法优化和最优解的选择还有待研究, 这是未来的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Brosh E, Shavitt Y. Approximation and Heuristic Algorithms for Minimum Delay Application-layer Multicast Trees [C] // IEEE INFOCOM. 2004
- [2] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107
- [3] Bellman R. Dynamic Programming[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1957
- [4] Bertsekas D P. Dynamic Programming and Optimal Control [M]. volumes 1 and 2, Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 1995
- [5] Wu Z, Yu Z Y. Dynamic Programming Principle for One Kind of Stochastic Recursive Optimal Control Problem and Hamilton-Jacobi-Bellman Equation[J]. Siam Journal on Control and Optimization, 2008, 47(5): 2616
- [6] Hernández A G, Fallah-Seghrouchni A E, Soldano H. Distributed Learning in Intentional BDI Multi-agent Systems[C]// Proceedings of the Fifth Mexican International Conference in Computer Science (ENC'04). 2004
- [7] Asenstorfer J, Cox T, Wilksch D. Tactical Data Link Systems and the Australian Defence Force (ADF)-Technology Developments and Interoperability Issues[M]. Commonwealth of Australia, February 2004
- [8] Petcu A. A Class of Algorithms for Distributed Constraint Optimization[M]. ISBN 978-1-58603-989-9. 2009
- [9] Chan Y M, Cruz J B J R. Decentralized stochastic adaptive nash games [J]. Optimal Control Applications & Methods, 1983, 4: 163-178
- [10] Wang X, Lu C, Koutsoukos X. Enhancing the robustness of distributed real-time middleware via end-to-end utilization control [C]// IEEE RTSS, 2005
- [11] Yokoo M, Durfee E H, Ishida T, et al. The Distributed Constraint Satisfaction Problem: Formalization and Algorithms[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1998, 10(5)
- [12] Lee D, Arana I, Ahriz H, et al. Multi-Hyb: A Hybrid Algorithm for Solving DisCSPs with Complex Local Problems[C]// IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology Workshops. 2009
- [13] U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge[M]. ISBN-13: 978-15660277507. 2009