

基于熟人联盟及扩充合同网协议的多智能体协商模型

陶海军 王亚东 郭茂祖 王翰伦

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(hjtao@hit.edu.cn)

A Multi-Agent Negotiation Model Based on Acquaintance Coalition and Extended Contract Net Protocol

Tao Haijun, Wang Yadong, Guo Maozu, and Wang Hanlun

(School of Computer Science & Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Contract net protocol is widely used in multi-agent systems because of its high extensibility and flexibility in a dynamic environment. However, many shortages exist while applying the traditional contract net protocol in multi-agent systems, such as rapidly increasing of the negotiation cost along with the system's dimension, no guarantee of the negotiation quality and difficulties in adapting the dynamic environment, etc. A multi-agent negotiation model based on the acquaintance coalition and the extended contract net protocol are presented to improve the efficiency of negotiation. The structure of the multi-agent negotiation model is given to support the extended contract net protocol. The acquaintance coalition policy, the trust degree parameter and the adjustment rule are introduced and used to construct the extended contract net protocol. Finally, through an example and analysis of a missile defense system which uses the model, improvement of the negotiation efficiency is proven.

Key words multi-agent system; extended contract net protocol; acquaintance coalition; trust degree

摘要 合同网协议可扩充性好,处理动态环境能力强,在多智能体系统协商中应用广泛.在分析了经典合同网协议的优缺点后,提出了基于熟人联盟及扩充合同网协议的多智能体系统协商模型.根据模型设计了适合扩充合同网协议的系统结构,引入了熟人联盟以及信任度参数,提出熟人联盟生成方法及信任度更新规则并构造了基于经典合同网协议的扩充合同网协议.最后通过对一个导弹防御例子的测试及分析,证实了该模型在保证协商质量的基础上,有效地降低了协商代价.

关键词 多智能体系统;扩充合同网协议;熟人联盟;信任度

中图法分类号 TP18

1 引言

协商是多 Agent 系统(MAS)实现协调和解决 MAS 目标、知识和资源冲突的关键环节,是建立在通信语言之上的一种 Agent 交互机制,Agent 之间通过协商对某些问题达成一致意见. MAS 协商问

题正被越来越多的学者关注,他们从 DAI、社会心理学、经济学等不同的领域进行研究.

Smith 和 Davis 于 1980 年提出合同网协商模型^[1].它通过引入市场中的招标—投标—中标机制,对系统的任务进行委托分配,从而解决资源、知识的冲突等问题.后来被很多研究者应用于 MAS 协商研究.

经典合同网协议在解决多智能体协商问题时有很多不足之处,主要体现在系统负载会随着问题规模的扩大急剧上升、协商质量不能保证以及难以适应任务环境的动态变化等方面.因此在实际应用中对其进行了很多细化和扩充,如 Sandholm 等人将层次结构、边界成本计算等概念^[2,3]以及 Chen 将投标阈值^[4]引入到合同网的投标和授标的决策过程中,以限制协商过程中的计算及通信开销;Fischer 等人在合同网中引入临时信任/拒绝、模拟交易等机制来优化任务分配^[5];Collins 等人将仲裁机制融合在谈判过程中以防止投标过程中的欺诈行为^[6];Lee 等人将承诺期限加入合同网来适应任务环境的动态变化^[7]等等.另外, Bouzouia 等人在利用学习机制来优化合同网任务分配过程^[8]方面也做了有益的探讨.

为了满足大型开放式 MAS 的需要,降低合同网协商的通信开销,提高协商速度,本文构造了基于扩充合同网协商模型的系统结构,在经典合同网协议中引入了熟人联盟策略以及 Agent 信任度参数,并提出熟人联盟生成算法以及信任度更新规则并应用于经典合同网协议中,设计了一种基于熟人联盟的扩充合同网协议,在保证协商质量的基础上有效地提高了协商的效率.最后通过导弹攻防模拟测试与结果分析,验证了协商模型的有效性.

2 协商模型结构

根据背景项目的分布式应用领域以及扩充的合同网协议的需要,构造了基于扩充合同网协议的 MAS 协商模型混合式系统结构.使用公告板^[9]作为中介服务机构,为模型中的所有 Agent 的通信提供中介服务.依据各类 Agent 在系统中的地位,将模型中的 Agent 分为: Task Agent(TA)负责与用户的交互,接受用户下达的任务并进行分解、调度,并将任务完成结果反馈给用户; Command Agent(CA)负责 Agent 联盟中成员的组织管理、联盟任务的投标及联盟内的任务分配; Application Agent(AA)承担具体的任务.每个联盟由一个 CA 与若干 AA 构成,联盟间可以进行动态通信.

2.1 Task Agent 结构

TA 是模型中惟一与外界用户交互的 Agent,是整个模型的逻辑管理者.主要进行外界任务的接收并进行协商处理,其核心是公告板系统.公告板系统为模型中的信息交互提供公共服务,各联盟在公告板上注册其主要信息,包括类型、地址和能力描述关键字. TA 结构如图 1 所示:

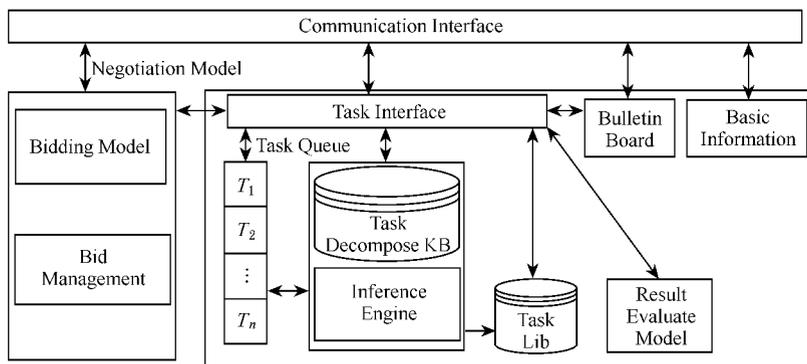


Fig. 1 Structure of task agent.

图 1 Task Agent 结构

TA 中关键技术为:根据 E-WFL 推理系统^[10]的模糊知识表示方法,结合领域特性构造任务分解知识库,将当前任务、联盟信息等内容(取决于任务分解知识库的设计)进行编码,作为事实输入到推理机中以解决任务分解问题,然后分配子任务给各联盟解决.

2.2 Command Agent 结构

CA 直接完成任务的申请及联盟内的进一步分解

执行,是一个联盟的代表以及通信者.主要功能包括:

- ① 根据熟人模型进行联盟组织管理;
- ② 作为联盟的代表者,在系统中进行合同网投标活动;
- ③ 将中标结果进行分解,在联盟内部进行任务的分解、分配以及结果整理并反馈给 TA.

根据扩充合同网协议的要求,设计了如图 2 所示的 CA 结构:

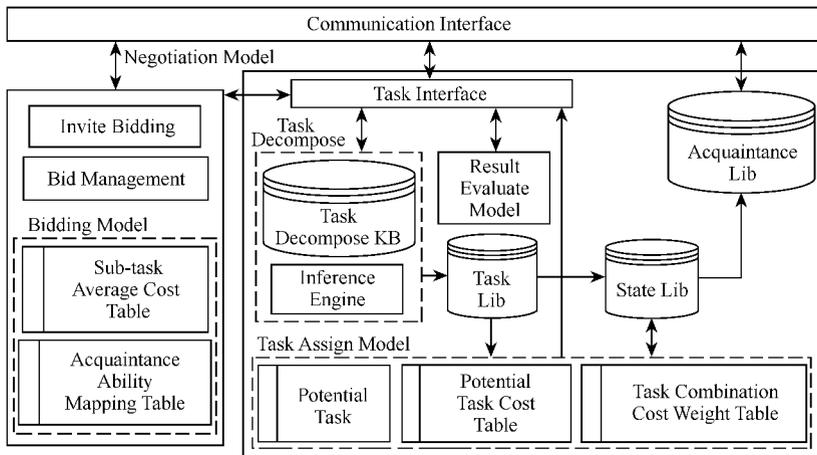


Fig. 2 Structure of command agent.

图2 Command Agent 结构

3 扩充合同网协商协议

利用 Agent 的心智状态参数改造经典合同网协议,设计实现了扩充合同网协商协议.以熟人联盟机制将系统中的 Agent 组成若干联盟,以联盟为基本单位进行任务的投标,在管理者的中标决策函数中揉合了信任度参数,以更好地进行任务的分配.在任务执行过程中,不断更新熟人联盟以及信任度参数以反映任务环境的变化.

3.1 熟人联盟

为跟踪成功合作的 Agent 联盟,引入 Agent 熟人集的概念.

定义 1. Agent a_i 的熟人集是跟 a_i 达成功合作而且合作程度超过一定频度的 Agent 集合.这种在协商过程中引入熟人集合而形成的协商模型称为熟人模型(acquaintance model)^[11].

常用的熟人模型有 Twin-base^[12]和 Tribase^[13]模型. Tribase 模型是对 Twin-base 模型的改进,主要思想来源于熟人模型.本文结合熟人联盟和 Tribase 模型,提出一种基于熟人的 Agent 联盟策略,在任务求解过程中 Agent 保存联盟信息(熟人信息库),充分利用这些信息减少了联盟形成过程中的通信开销并节约联盟形成时间,提高了整个系统的效率.

3.1.1 联盟机制

以下给出形成联盟时所必须进行的协商需要的能力定义及代价计算方法.

(1) Agent 及其能力描述

系统中所有的 Agent 构成一个集合 $A = \{a_1,$

$a_2 \dots a_n\}$,用 m 维向量 $B_{a_i} = (b_{i1}, b_{i2} \dots b_{im})$ 描述 a_i 的能力,向量 $COST_{a_i} = (cost_{i1}, cost_{i2} \dots cost_{im})$ 描述对应能力向量的耗费代价.其中, b_{ij} 是 a_i 能够完成的某一个特定功能的量化能力, $cost_{ij}$ 表示完成 b_{ij} 时 a_i 需要花费的代价.

(2) 联盟及其能力描述

联盟是一组合作的、能共同完成某一任务的 Agent 集合: $C = \{a_1, a_2 \dots a_k\}$. 联盟的指挥者掌握整个联盟内的成员 Agent(熟人)的能力等相关信息,为联盟的指挥者.

联盟 C 的能力用向量 $B_c = \sum_{a_i \in C} B_{a_i}$ 表示.

(3) 任务及其能力需求描述

系统中有 k 个独立的待求解任务 $T = \{t_1, t_2, \dots t_k\}$. 求解任务 t 需要的能力表示为向量 $B_t = (b_1, b_2 \dots b_m)$. 联盟 C 能够承揽任务 t 的必要条件为 $B_{ti} \leq B_{ci}, \forall i \in [1, m]$.

(4) 联盟投标值的计算

设目前联盟投标任务为 T ,联盟在对该任务进行给出投标值前,先将任务分解为 $T = \{t_1, t_2 \dots t_n\}$. 设其中联盟自身能解决的子任务为 $T_{in} = \{t_{i1}, t_{i2} \dots t_{il}\}$,相应的代价为 $C_{in} = \{c_{i1}, c_{i2} \dots c_{il}\}$,求解这些子任务所用的代价和为 $C_y = \sum_{c_{ir} \in C_{in}} c_{ir}$.

设联盟需求助其他联盟解决的子任务为 $T_{out} = \{t_{o1}, t_{o2} \dots t_{om}\}$ 相应的代价为 $C_{out} = \{c_{o1}, c_{o2} \dots c_{om}\}$,求解子任务所用的代价和为 $C_n = \sum_{c_{os} \in C_{out}} c_{os}$.

由于联盟的投标的任务 $T = T_{in} + T_{out}$,联盟对该任务 T 给出的投标值为 $C = C_{in} + C_{out}$. 这种投标的方法综合联盟自身的能力和目前市场中的实际

情况,使投标结果更符合人类活动的规律.

3.1.2 熟人集的修改规则

与人类社会合作关系类似,在 MAS 中,Agent 倾向于选择和自己有较密切协作关系的合作者.本文采用熟悉度表示 Agent 之间的历史合作关系.

定义 2. $R_{ij} = \frac{a_j \text{ 完成 } a_i \text{ 委托任务数}}{a_i \text{ 向 } a_j \text{ 提出的委托数}}$ 称为 Agent a_i 对 a_j 的熟悉度, $R_{ij} \in [0, 1]$.

在每次任务协商解决完成后,Agent 修改与其合作的 Agent 的熟悉度值并依据更新后的熟悉度调整其熟人集.下面给出联盟熟人集的具体修改规则:

(1) 熟人进入规则

if a_j 申请进入联盟 C then $R_{ij} = R_{\text{initial}}$, $C \leftarrow (C \cup a_j)$

(2) 熟悉度修改规则

if a_i 与 a_j 成功合作 then $R_{ij} = \min(1, R_{ij} + \delta)$, $\delta \in (0, 1)$ 称为合作因子.

if a_i 与 a_j 未能合作或合作失败 then $R_{ij} = \max(0, R_{ij} - \lambda)$, $\lambda \in (0, 1)$ 称为渐忘因子.

δ 与 λ 可以随熟人集的大小进行动态调整,以适应 Agent 的能力分量和任务求解环境的动态变化.

(3) 熟人退出规则

if $R_{ij} < R_l$ then $C \leftarrow (C - a_j)$, $R_{ij} = 0$.

3.2 信任度与中标决策函数

3.2.1 信任度

定义 3. a_i 相信 a_j 能够顺利完成任务的程度称为信任度,记为 $Tr(a)$, $Tr(a) \in [0, 1]$.

定义 4. a_i 把任务委托给 a_j 所需要的最小信任度称为系统的信任阈,记为 T_l , $T_l \in [0, 1]$.

当招标对象集较大时,为提高任务委托时的效率,减少系统开销,可以采用信任阈 T_l 来控制招标范围.信任度是进行任务委托的主要指标之一.对某个 Agent 的信任度越高,则将任务委托给它的可能性就越大.

当 Agent a 成功地完成了任务 t 时,管理者将 $Tr(a)$ 上调 δ_T , $\delta_T \in [0, 1]$. 表示为

if $eval(a, t) \geq V_H$ then $Tr(a) = \min[1, Tr(a) + \delta_T]$, V_H 为任务完成的评价阈值.

当 Agent 未能按照要求完成任务 t , 下调 $Tr(a)$, 表示为

if $eval(a, t) \leq V_H$ then $Tr(a) = \max[0, Tr(a) - \delta_T]$.

3.2.2 中标决策函数

传统的中标决策函数对于不同的领域问题采取不同策略,较有代表性的有加权平均法、最大/最小

值法、最大密度法(二分法)等.

在传统的决策函数中,没有考虑 Agent 间的信任程度.结合前面定义的 Agent 信任度参数,管理者修改 Agent a_i 对任务 T_j 的投标值为

$$V'(a_i, T_j) = (1 - \lambda)V(a_i, T_j) + \lambda \times Tr(a_i) \times V(a_i, T_j),$$

其中 $\lambda \in [0, 1]$ 代表信任度在投标决策过程中占的权重,使用修改后的投标值进行中标者的筛选.根据不同的应用领域,通常取 $\lambda \in [0.0, 0.2]$.

3.3 协商过程

利用熟人联盟机制、Agent 心智状态以及中标决策函数,以联盟为基本的投标单元,构造如下基于扩充的合同网协商过程:

(1) TA 接收任务 TG,并将其存储于其任务队列 $TaskQueue$ 中.

(2) 当 TG 到达队首时,TA 取出 TG,利用任务分解推理机及知识库,将其分解为若干个独立的子任务,即 $TG = (T_1, T_2, \dots, T_n)$. 置 TA 为系统管理者.

(3) 管理者查询公告板上的 Agent 联盟,对于每个任务 T_j ,依据联盟的能力描述关键字以及各个联盟的状态,向在公告板上注册了的系统中的所有活跃着的,并且能提供服务的 CA 发布任务 T_j 的招标信息进行招标,并设定回复时间期限 $T_{\text{time-out}}$.

(4) 收到任务 T_j 招标信息的 Agent 联盟根据自身能力,决定是否投标,若确定能完成任务 T_j ,则给出相应的投标值 $V(i, T_j) = b_i$,向系统当前管理者进行投标,否则回复消息给管理者通知不能完成任务.

(5) 若在时间 $T_{\text{time-out}}$ 内管理者没有收到任何关于任务 T_j 的投标书,管理者停止操作,转(11); 否则 TA 根据自己的中标决策函数 F ,改进后的投标值 $V(a_i, T_j)$ 选择特定的 CA 作为中标 Agent,向其发送中标通知,同时通知其他投标者投标失败.

(6) 若中标者愿意执行任务,向管理者发送确认通知;否则中标者不发送确认消息,管理者在 $T_{\text{time-out}}$ 没有收到确认消息转(10).

(7) 若在 $T_{\text{time-out}}$ 内管理者收到确认通知,向中标者发送任务 T ,监督执行;否则转(10).

(8) 中标 CA 收到任务 T_j 后,调用任务分解模块,将任务分解为 $T_j = \{t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jm}\}$,在联盟内分配、求解.然后返回任务的执行结果给当前系统管理者,同时根据心智状态参数更新规则、更新相关的心智状态参数.

(9) 若联盟没有完全完成任务, 设剩余任务为 T_j' , 令 $T_j' = T_j$, 同时中标者成为新的管理者, 转(10); 否则转(12).

(10) 一轮协商处理结束.

(11) 若管理者决定进行新一轮招标, 转(3).

(12) 任务协商处理结束.

4 实验结果

区域导弹防御系统由区域导弹自动防御系统指挥中心、雷达系统、若干个导弹防御作战部队组成. TA 对应于区域导弹自动防御系统指挥中心, 每个 CA 对应于一个导弹防御作战联盟, 每个 AA 对应于一个作战单元. 每个 CA 的能力由其作战打击类型、打击范围决定, 描述为四元组 (类别, 中心经度, 中心纬度, 半径). 任务分解知识库由 6 条模糊规则组成, 根据目标打击的代价、目标间分散程度及系统中已注册的 Agent 联盟能力设计.

设定有 50 个执行 Agent, 任务由 5 个增长到 30 个, 协商代价测试结果如图 3 所示:

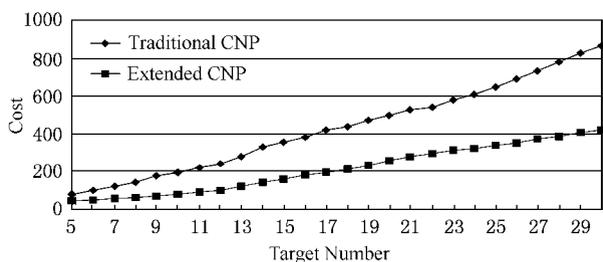


Fig. 3 Negotiation cost of missile defense example.

图 3 导弹防御模拟协商代价测试结果

任务求解代价如图 4 所示:

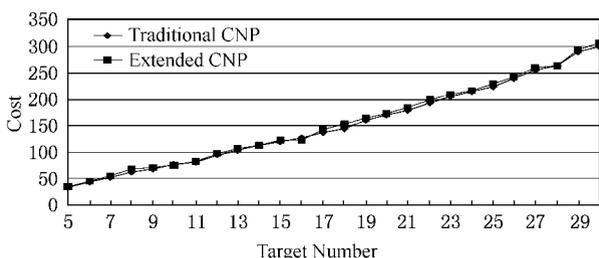


Fig. 4 Cost of task solving in missile defense example.

图 4 导弹防御模拟任务求解代价测试

由以上测试结果可以看出, 在同等规模的 MAS 中, 经典合同网协议在协商时耗费的通信代价要大大高于扩充合同网协议. 这是因为扩充合同网以联盟为基本投标单位, 联盟能力较普通 Agent 强, 因此

在一次协商过程中某个联盟可以承揽多项任务, 这样就减少了协商次数. 另外在联盟内部的任务分配上使用了优化算法, 这些因素都导致了通信代价的降低. 另外, 两个协议在任务完成代价方面, 两个算法基本持平, 这得益于扩充合同网中利用信任度参数的应用保证了协商的质量. 但是扩充合同网在通信次数上的优势是以计算量的增加(信任度、熟悉度的计算)以及额外的训练作为代价的, 因此比较适合用于易变性低, 强调通信代价的领域.

5 结论及进一步研究

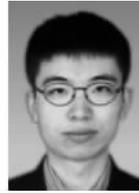
本文针对经典合同网协议在大规模 MAS 系统协商时开销大、速度慢等缺点, 构造了基于扩充合同网的协商模型的体系结构. 在经典合同网协议中引入熟人机制、信任度、熟悉度等心智状态参数描述 Agent 的社会属性并记录 Agent 之间的历史合作情况, 在保证协商质量的基础上提高了协商的效率.

熟人联盟的生成及结构的稳定性, 也即是熟悉度的调整规则的收敛性, 在很大程度上依赖于领域的低易变性. 在一个复杂系统中如何保证联盟的有效生成及相对稳定, 是一个需要进一步研究的问题. Agent 间的信任度调整规则比较简单, 根据领域问题的不同, 可能会出现 Agent 间的信任度始终大体相同的情况, 这样就使得信任度在任务的分配过程中的作用削弱, 徒然增加计算代价, 此问题也需要做进一步研究.

参 考 文 献

- 1 R. G. Smith, R. Davis. The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver [J]. IEEE Tran. Computers, 1980, C-29(12): 1104~1113
- 2 T. Sandholm, V. R. Lesser. Coalition among computationally bounded agents [J]. Artificial Intelligence, 1997, 94(1): 99~137
- 3 T. Sandholm, V. R. Lesser. Advantages of a leveled commitment contracting protocol [C]. In: Proc. 13th National Conf. Artificial Intelligence. Menlo Park, CA: AAAI Press, 1996. 126~133
- 4 Chen Xueguang. Further extensions of FIPA contract net protocol: Threshold plus DoA [C]. In: Proc. 2004 ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2004. 135~141
- 5 Klaus Fischer, Jörg P. Müller. A model for cooperative

- transportation scheduling [C]. In : Proc. 1st Int'l Conf. Multi-Agent Systems. Cambridge, MA : MIT Press, 1995. 169~175
- 6 John Collins, Ben Youngdahl, Scott Jamison, *et al.* A market architecture for multi-agent contracting [C]. In : Proc. 2nd Int'l Conf. Autonomous Agents. New York : ACM Press, 1998. 256~278
- 7 Lee Kyoung Jun, Chang Yong Sik, Lee Jae Kyu. Time-bound negotiation framework for electronic commerce agents [J]. Decision Support Systems, 2000, 28(4): 319~331
- 8 Bouzouia, Bouchea. Performance enhancement of a contract net protocol based system through instance-based learning [C]. In : The 2004 IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation. Menlo Park, CA : AAAI Press, 2004. 523~528
- 9 Liu Hong, Lin Zongkai. A cooperative design approach supporting dynamic task assignment [J]. Journal of Software, 2001, 12(12): 1830~1836 (in Chinese)
(刘弘, 林宗楷. 一种支持动态任务分配的协同设计方法 [J]. 软件学报, 2001, 12(12): 1830~1836)
- 10 Chao Deng, Maozu Guo, Yadong Wang. Research on knowledge representation and inference based on extended weighted fuzzy logic [C]. ISHTA2003 Conf., Beijing, 2003
- 11 S. Kraus Shehory. Methods for task allocation via agent coalition formation [J]. Artificial Intelligence, 1998, 101(122): 165~200
- 12 W. Cao, C-G. Bian, G. Hartvigsen. Cooperator-base and task-base for agent modeling [C]. In : AAAI-96 Workshop on Agent Modeling. Menlo Park : AAAI Press, 1996. 105~111
- 13 Viadimir Marik, Michal Pechoucek, Olga Stepankova, *et al.* Multi-agent system for production planning [J]. Applied Artificial Intelligence, 2000, 14(7): 727~762



Tao Haijun, born in 1975. Ph. D. candidate and lecturer in the Harbin Institute of Technology. His current research interests include multi-agent system theory and machine learning technology.

陶海军, 1975年生, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为多智能体系统及机器学习理论.



Wang Yadong, born in 1964. Professor and doctoral supervisor in the Harbin Institute of Technology. His main research interests are knowledge engineering, multi-agent system and bioinformatics.

王亚东, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为知识工程、多智能体系统及生物信息学.



Guo Maozu, born in 1966. Professor and doctoral supervisor in the Harbin Institute of Technology. His main research interests are machine learning, bioinformatics and color matching technology.

郭茂祖, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器学习、生物信息学及色彩匹配技术.



Wang Hanlun, born in 1975. Received his master degree in the Harbin Institute of Technology in 2003, senior member of CCF. His main research interests include multi-agent system.

王翰伦, 1975年生, 硕士, 中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为多智能体系统.

Research Background

The research work is supported by the National 863 Hi-Tech Project, the National Defense Foundation, and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province. In the first project, the research mainly focuses on DPS. The others focus on multi-agent systems.

We study the architecture, communication protocol, negotiation, cooperation and multi-agent reinforcement learning. Our research includes the following aspects:

- (1) The architecture of a multi-agent system that is suitable for large-scale problems.
- (2) Efficiency negotiation models and protocols with resource bounded environments.
- (3) Cooperation algorithms based on genetic algorithms.
- (4) Effective multi-agent reinforcement learning algorithms in cooperative, partially observed environments, which is to improve the multi-agent system's performance.