

# 基于能力向量发挥率和拍卖的联盟形成策略

蒋建国, 夏 娜, 于春华

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘 要: 联盟形成是多 Agent 系统中的一个关键问题, 但已有策略对效用的平均分配没有反映出 Agent 对于联盟贡献的差异性, 而且不能保证联盟稳定性. 本文给出了一种新的联盟形成的行为策略, 在非减性效用分配原则的基础上, 提高了对额外效用分配的合理性, 在面向任务的领域中可以达到全局优化解, 较好地满足了稳定性、时效性、分布等要求.

关键词: 多 Agent 系统; 联盟; 行为策略; 拍卖

中图分类号: TP18 文献标识码: A 文章编号: 03722112 (2004) 12A2215203

## The Coalition Formation Strategy Based on Capability Vector Contribution2Rate and Auction

JIANG Jian2guo, XIA Na, YU Chun2hua

(Dept. of Computr & Infomation, Hfei University of Technology, Hfei, Anhui 230009, China)

Abstract: Coalition Formation is a key topic in Mult2Agent System. The current strategies don. t embody the difference of Agents contribution to coalition for allocating utility averagely, so they cannot guarantee the coalition stability. This paper presents a novel behavior strategy for coalition formation. It remains the principle of non2reducing utility allocation, and improves the justice of a2location for accrued utility. In task oriented domains this strategies can achieve a global optimal solution, which is stable, speedy and distributed.

Key words: mult2agent system; coalition; behavior strategy; auction

### 1 引言

Agent 间通过组成联盟, 可以提高求解问题的能力, 获得更多的报酬, 因此联盟是多 Agent 系统(MAS)的重要合作方法. 从 1993 年提出联盟方法以来, Ketchple, Rosenschein 和 Zol2kin 作了大量工作.

近年来, 联盟形成已成为多 Agent 系统研究的一个重要方面. 目前在 MAS 中, 联盟形成的基本理论是 N 人合作对策理论, 主要考虑如何在联盟内 Agent 间划分联盟的额外效用, 使 Agent 在决策时愿意形成全局更优的联盟.

#### 1.1 问题的描述

设 Agent 集  $N = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , 任意  $A_i$  都有一个能力向量:  $B_i = (b_{i1}^1, b_{i1}^2, \dots, b_{i1}^4, b_{i1}^5 \setminus 0, (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq r))$  用于定量描述  $A_i$  执行某种特定动作的能力大小. 设任务集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ , 每个任务  $t_j$  均有一定的能力需求  $B_j = (b_{j1}^1, b_{j1}^2, \dots, b_{j1}^4, b_{j1}^k \setminus 0, (1 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq r))$ , 在完成任任务  $t_j$  之后可以获得相应效用.

我们定义一个联盟  $C$  是  $N$  的一个非空子集, 一个联盟  $C$

有一个能力向量  $B_C = (b_{C1}^1, b_{C1}^2, \dots, b_{C1}^4, B_C)$  是联盟中所有 Agent 能力向量的总和, 即  $B_C = \sum_{A_i \in C} B_i$ , 对于联盟  $C$  而言, 要想完成任务  $t_j$ , 必要条件是:  $P \cap [I \setminus r, b_j^k] \setminus b_C^k$ .

我们作以下假设: (1) 和惯例一样<sup>[1-4]</sup>, 在特征函数对策(CFGs)中研究联盟形成. 每个联盟  $C$  的效用由一个特征函数  $V(C)$  给出. 我们假定  $V(C) \setminus 0$ , 与资源的数量成正比. 如果联盟  $C$  不满足上述必要条件, 则联盟值  $V(C)$  为 0, 否则联盟值  $V(C)$  为正数. (2) 在超加对策中研究联盟形成<sup>[4]</sup>, 即对任意两个联盟  $C_1, C_2 \in N, C_1 \cap C_2 = \emptyset$ , 有  $V(C_1 \cup C_2) \setminus V(C_1) + V(C_2)$  在这样的环境中, 联盟的生成是平凡的.

MAS 中每个 Agent 有自己的目标, 完成目标可以获得一定的效用. Agent 进行协作可以减少完成任务所需的工作量, 获得额外效用. Agent 为增大自身效用, 会选择其他 Agent 结成联盟. MAS 设计者为鼓励 Agent 联盟, 必须指定一种合适的效用划分规则.

Rosenschein<sup>[2]</sup>和 Luo Yi 提出的联盟形成机制的要求:

(1) 有效性: 各方分享所有共同效用,  $V(C)$  代表结成联盟

C 可以获得的总效用,  $u(A_i)$  代表 Agent  $A_i$  从联盟中所获得的效用, 则有  $\sum_{A_i \in C} u(A_i) = V(C)$ .

(2) 稳定性:

(a) 个体: 形成联盟后不会有 Agent 单独退出联盟而获得更大效用.

(b) 群体 (Pareto 最优): 增大联盟内某些 Agent 的效用就会损害其他 Agent.

(c) 联盟: 部分 Agent 退出联盟去组成新的联盟时不会获得更大的效用.

(3) 简单性: 交互过程的计算、通信开销应该比较小.

(4) 分布性: 不需要中央决策.

(5) 时效性: 当 Agent 有与其他 Agent 形成联盟的可能时, 越早加入联盟, 其效用越高.

(6) 在动态开放环境中的联盟形成是逐渐构建的过程, 不能依赖于预先决策选出最优方案.

### 11.2 相关的工作分析

多数划分方案是根据 Shapley 值<sup>[5]</sup>, 规定一个 Agent 应得的效用值等于它在联盟随机的所有形成次序中贡献的效用增量与此次序的概率的加权平均值:

$$u_i = \sum_{S \subseteq N, i \in S} \frac{(n-|S|-1)! |S|!}{n!} (V(S \cup \{i\}) - V(S)) \quad (1)$$

其中,  $S$  是  $N$  的不包含  $A_i$  的真子集,  $V(S)$  是  $S$  中 Agent 共同完成任务所获效用. Shapley 值方法计算复杂, 与联盟中 Agent 数成指数关系, 而且过分强调效用分配的平等, 忽视了在具体联盟形成过程中各 Agent 行动的不同, 导致整体效用增加时原联盟成员的效用下降, 联盟不稳定.

文献[6]提出的解决办法是承认联盟形成历史所产生的效用不平衡, 采取非减性效用分配原则, 鼓励 Agent 扩大联盟来获取更大的整体和个人利益. 这种联盟形成策略具有简单、时效性等优点, 优于 Shapley 值的方法. 但也有着局限性, 因为过分追求计算简单性, 对效用的平均分配没有反映出 Agent 对于联盟贡献的差异性; 另外, 后加入者因不满足于劣势效用可能会退出联盟去创建新的联盟, 如 Postman 问题中的振荡, 于是只好设立契约法则, 把不满足于劣势效用的 Agent 强制在联盟中, 从而维持联盟的稳定性. 这种契约法则也打击着能给联盟带来额外效用的 Agent 加入联盟的兴趣.

本文提出一种新的联盟形成的行为规范策略, 在动态开放环境中可以使 Agent 形成全局最优联盟, 更好地满足了稳定性、时效性、分布等要求. 本文首先给出了基于能力向量发挥率和拍卖的联盟形成策略, 进而给出了几个相关定理, 并进行了总结.

## 2 基于能力向量发挥率和拍卖的联盟形成策略

针对以上问题, 本文提出一种基于能力向量发挥率和拍卖的效用分配原则作为联盟形成的行为策略:

(1)  $k$  个 Agent 同时形成任务的求解联盟, 其效用按照成员 Agent 在该联盟中贡献的能力向量在任务的能力需求中所占的比重划分, 即:

$$u(A_i) = \frac{B_i}{B_j} V(C) = \frac{A_1 b_1^{lc} + A_2 b_1^{2c} + \dots + A_k b_1^{kc}}{A_1 b_1^{1c} + A_2 b_1^{2c} + \dots + A_k b_1^{kc}} \quad (2)$$

其中,  $B_i (B_i \in [B_j])$  是  $A_i$  在该联盟中贡献的能力向量,  $A_1, A_2, \dots, A_k$  是能力向量中各分量的权重, 且  $A_1 + A_2 + \dots + A_k = 1$ . 这种按劳分配的效用分配原则充分反映了 Agent 对于联盟贡献的差异性.

(2) 允许受邀加入联盟的 Agent 针对任务尽其所能, 即提高自能力向量的发挥率  $G = B_i P B_i$ , 从而争取更多的效用. 该策略可以促进 Agent 积极、及时地参加联盟, 提高联盟生成的速度, 具有较好的时效性. 另外, 允许能力向量发挥率较低的 Agent 在一定前提下为其它联盟贡献其剩余能力向量, 这有助于减少能力的浪费, 提高联盟的稳定性.

(3) 在当前联盟已经可以完成的情况下, 联盟中的成员 Agent 可以对外拍卖任务, 吸引更多 Agent 参加联盟, 提高联盟的整体效用. 而对额外效用的划分在拍卖时以报价的方式协商确定. 已有联盟  $\{A_i | i \in k\}$  加入  $A_j$  形成新联盟  $\{A_i\} \cup \{A_j\}$  时增加的效用为  $\Delta V = V(\{A_i, A_j\}) - V(\{A_i\}) - V(\{A_j\})$ , 协商划分的原则是:

$$u(A_i)_{\text{new}} = u(A_i)_{\text{old}} + (\Delta V \cdot O(A_i, A_j) / P_k) \quad (3)$$

$O(A_i, A_j)$  是原联盟成员对  $A_j$  的提供. 一方面, 原联盟成员效用非减而且在整体效用分配中处于优势地位, 另一方面, 后加入的 Agent 作为任务买家对当初协商的结果  $O(A_i, A_j)$  表示满意, 不会退出联盟去创建新的联盟. 该策略的协商一致稳定性明显优于契约法则的强制稳定性.

在本文的联盟形成策略下三个 Agent 的 Postman 问题<sup>[3]</sup>的递增求解过程如下:

任务  $t_j$  的能力需求  $B_j = 33, 3, 34$ ,  $A_1 = 1P6$ ,  $A_2 = 1P2$ ,  $A_3 = 1P3$ , Agent  $A_1, A_2, A_3$  的能力向量分别为:  $B_1 = 3, 2, 24$ ,  $B_2 = 31, 1, 14$ ,  $B_3 = 32, 2, 24$ ;  $V(\{A_i\} | i = 1, 2, 3) = 0$ ,  $V(\{A_1, A_2\}) = 3$ ,  $V(\{A_1, A_2, A_3\}) = 4$ .

(1) 形成联盟  $C = \{A_1, A_2\}$ , 效用分配  $u(A_1) = \frac{B_1}{B_j} V(C) =$

$\frac{B_1}{B_j} V(C) = 2$ ,  $u(A_2) = \frac{B_2}{B_j} V(C) = \frac{B_2}{B_j} V(C) = 1$ , 而不是简单的  $u(A_1) = u(A_2) = V(C) / 2 = 3P2$ .

(2) 形成联盟  $C = \{A_1, A_3\}$ , 不同的加入次序可能导致两种效用分配:

$$u(A_1) = \frac{B_{c1}}{B_j} V(C) = \frac{B_1}{B_j} V(C) = \frac{B_1}{B_j} V(C) = 2, u(A_3) = \frac{B_3}{B_j} V(C) = 1;$$

$$u(A_1) = \frac{B_1}{B_j} V(C) = 1, u(A_3) = \frac{B_3}{B_j} V(C) = \frac{B_3}{B_j} V(C) = 2.$$

越早加入联盟, 其效用越高. 因此每个 Agent 在每个决策点上都积极地选择合作策略.

(3) 联盟  $C = \{A_1, A_2\}$  拍卖部分任务, 吸引  $A_3$  加入联盟, 额外效用的划分通过报价协商为  $(1P4, 1P4, 1P2)$ ,  $O(A_i, A_j) = 1P2$ , 那么整体效用分配为  $u(A_1) = 1P4$ ,  $u(A_2) = 1P4$ ,  $u(A_3) = 1P2$ , 明显优于相关策略的  $u(A_1) = u(A_2) = 11P6$ ,  $u(A_3) = 1P3$

效用分配.

可见, 该策略不仅反映了 Agent 对于联盟贡献的差异性, 具有良好的时效性, 而且在非减性效用分配原则的基础上, 提高了对额外效用划分的合理性.

### 3 相关分析

**定理 1** 在理性超加对策中, 任意联盟不发生分解的必要条件是联盟成员效用非减.

**证明:** 如果联盟的效用划分不满足成员效用非减条件, 那么在超加对策中联盟扩张整体效用增加, 个体 Agent 效用减少, 于是总有部分 Agent 可以通过形成子联盟而获得更高效用, 联盟分解. 另外, 该必要条件有利于联盟形成的时效性.

**定理 2** 在理性超加对策中, 已有联盟  $C$  愿意扩充成员  $A_j$  来提高整体效用的必要条件是对于  $P(A_i | C, u(A_i)_{on\_hand} + f(i, \$V - O(C, A_j)) \setminus O(C, A_j))$ . 其中, 函数  $f(i, V)$  是  $A_i$  在效用  $V$  中划分.

**证明:** 假设  $v(A_i | C, u(A_i)_{on\_hand} + f(i, \$V - O(C, A_j)) < O(C, A_j)$ , 联盟  $C$  仍吸收  $A_j$  加入联盟, 那么原联盟成员  $A_i$  将丧失在整体效用分配中的优势地位, 这与 Agent 的理性矛盾. 因此, 必须满足  $P(A_i | C, u(A_i)_{on\_hand} + f(i, \$V - O(C, A_j)) \setminus O(C, A_j)$ , 已有联盟  $C$  才会愿意扩充成员来提高整体效用.

**定理 3** 在理性超加对策中, 保持全局优化联盟的稳定性的必要条件是对额外效用的划分也必须反映 Agent 对于联盟贡献的差异.

**证明:** 在定理 1、2 的前提下, 如果对额外效用的划分没能反映 Agent 对于联盟贡献的差异, 那么部分理性 Agent 必然会因为不满足于劣势效用而退出联盟去创建新的联盟, 于是全局优化联盟无法稳定.

### 4 结论

本文给出了一种基于能力向量发挥率和拍卖的联盟形成的行为策略, 其按劳分配的效用划分充分反映了 Agent 对于联盟贡献的差异性, 优于 Shapley 值方法和文献[6]提出的行为规范; 同时, 该策略在非减性效用分配原则的基础上, 通过报价、协商提高了对额外效用划分的合理性, 联盟的稳定性优于契约法则的强制稳定性. 在面向任务的领域中可以达到全局优化解, 较好地满足了稳定性、时效性和分布等要求.

参考文献:

[ 1 ] S Ketchpel. Forming coalitions in the face of uncertain rewards[ A ]. Proceedings of the twelfth national conference on Artificial Intelligence [ C ]. USA: AAAI Press, 1994. 414- 419.

- [ 2 ] J S Rosenschein. Consenting agents: Negotiation mechanisms for multiagent systems[ A ]. Proceedings of the thirteenth international joint conference on Artificial Intelligence[ C ]. Chambery, France, 1993. 792- 799.
- [ 3 ] G Zoltkin, J S Rosenschein. Coalition, cryptography, and stability: mechanisms for coalition formation in task oriented domains[ A ]. Proceedings of the twelfth national conference on Artificial Intelligence [ C ]. USA: AAAI Press, 1994. 432- 437.
- [ 4 ] T Sandholm, V Lesser. Coalition among computationally bounded agents [ J ]. Artificial Intelligence, Special Issue on Economic Principles of MultiAgent Systems, January, 1997, 94( 1 ): 99- 137.
- [ 5 ] P Dubey. The Shapley Value[ M ]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1988. 207- 216.
- [ 6 ] 罗翊, 石纯一. Agent 协作求解中形成联盟的行为策略[ J ]. 计算机学报, 1997, 20( 11 ): 961- 965.
- [ 7 ] L 2K Soh, C Tsatsoulis. Utility-based multiagent coalition formation with incomplete information and time constraints[ A ]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [ C ]. Washington, D. C, USA, 2003. 1481- 1486.
- [ 8 ] L 2K Soh, C Tsatsoulis. Realtime satisficing multiagent coalition formation[ A ]. Proceedings of 2002 AAAI Workshop on Coalition Formation in Dynamic Multiagent Environments[ C ]. Alberta, Canada, 2002. 7- 15.
- [ 9 ] 蒋建国, 骆正虎, 张浩等. 基于改进型蚁群算法求解旅行 Agent 问题[ J ]. 模式识别与人工智能, 2003, 16( 1 ): 6- 12.

作者简介:



蒋建国 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理、传感与智能控制等.



夏娜 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要研究方向为分布式人工智能、智能控制、进化计算等. E-mail: xianawo@tom.com.

于春华 女, 1979 年生, 助教, 主要研究方向为计算数学、小波理论等.