

文章编号: 1001-0920(2005)12-1426-03

一种基于利益均衡的联盟形成策略

夏 娜, 蒋建国, 于春华, 吴 琼
(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘 要: 联盟形成是多 Agent 系统中的一个关键问题, 主要研究如何在联盟内 Agent 间划分联盟效用, 使 Agent 在决策时愿意形成全局更优的联盟, 但已有策略对额外效用的平均分配没有顾及后加入联盟的 Agent 的利益, 不利于全局优化联盟的形成. 对此, 给出一种基于利益均衡的联盟形成策略, 在非减性效用分配等原则的基础上, 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、时效性以及分布等要求.

关键词: 多 Agent 系统; 联盟; 效用; 策略

中图分类号: TP301

文献标识码: A

A Coalition Formation Strategy Based on Benefit Equilibrium

X I A N a, J I A N G J i a n - g u o, Y U C h u n - h u a, W U Q i o n g

(Department of Computer and Information Science, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
Correspondent: X I A N a, E-mail: xiananawo@tom.com)

Abstract: Coalition formation is a key topic in multi-agent system. It mainly deals with the coalition utility allocation among agents in coalition. The current strategies do not consider the benefit of those agents who join in coalition later for allocating the increased utility averagely, and go against the formation of global optimal coalition. A novel coalition formation strategy based on benefit equilibrium is presented, which remains the principle of non-reducing utility allocation, and improves the justice of allocation for increased utility. In task oriented domains the proposed strategy can achieve a global optimal solution, which is stable, speedy and distributed.

Key words: Multi-agent system; Coalition; Utility; Strategy

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, Zoltkin, Rosenschein 和 Sandholm 做了大量工作^[1,2]. 近年来, 联盟形成已成为多 Agent 系统研究的一个重要课题. 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 $N = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 任务集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$. 定义一个联盟 S 是 N 的一个非空子

集. 作以下假设: 1) 和惯例一样^[1,2], 在特征函数对策(CFGS)中研究联盟形成. 结成联盟 S 可以获得的效用由一个特征函数 $V(S)$ 给出. 假定 $V(S) \geq 0$, 与资源的数量成正比. 如果联盟 S 不能完成任务, 则 $V(S)$ 为 0, 否则为正数. 2) 在超加对策中研究联盟形成^[2], 即对任意两个联盟 $S_1, S_2 \subseteq N, S_1 \cap S_2 = \emptyset$, 有 $V(S_1 \cup S_2) \geq V(S_1) + V(S_2)$. 在这样的环境中, 联盟扩张可以带来额外效用, 并用 ΔV 表示.

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. Zoltkin 和 Rosenschein^[1] 提出了联盟形成机制的要求:

1) 有效性: 各方分享所有共同效用, $V(S)$ 代表联盟 S 可以获得的总效用, $u(A_i)$ 代表 Agent A_i 从联

收稿日期: 2004-11-09; 修回日期: 2005-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474035).

作者简介: 夏娜(1979-), 男, 安徽芜湖人, 博士生, 从事分布式人工智能、计算智能等研究; 蒋建国(1955-), 男, 安徽黄山人, 教授, 博士生导师, 信号与信息处理、传感与智能控制等研究.

盟中所获得的效用, 则有 $u(A_i) = V(S)$.

2) 稳定性: 个体: 形成联盟后不会有 Agent 单独退出联盟而获得更大效用; 群体 (Pareto 最优): 增大联盟内某些 Agent 的效用就会损害其他 Agent; 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

1.2 相关工作的分析

多数划分方案是根据 Shapley 值^[3], 规定一个 Agent 应得的效用值等于其在联盟随机的所有形成次序中贡献的效用增量与此次序概率的加权平均值, 即

$$u(A_i) = \sum_{S \subset N, i \in S} \frac{(n - |S| - 1)! \cdot |S|!}{n!} \times (V(S \cup \{i\}) - V(S)), \quad (1)$$

其中 S 是 N 的不包含 A_i 的真子集 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[4]提出的解决方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、时效性好等优点, 优于 Shapley 值的方法 但也存在局限性: 因为过分追求计算简单性, 对额外效用的平均分配完全没有顾及后加入联盟的 Agent 的利益, 导致这些 Agent 因不满足于劣势效用可能会退出联盟, 如 Postman 问题中的振荡, 于是只好设立契约法则, 将这些 Agent 强制在联盟中, 从而维持联盟的稳定性 这种契约法则严重打击了能给联盟带来额外效用的 Agent 加入联盟的兴趣, 不利于全局优化联盟的形成

文献[5~7]主要讨论了在信息不完全和时间约束等特定环境中的联盟形成机制

本文则提出一种基于利益均衡的联盟形成策略, 在动态开放环境中可使 Agent 形成全局优化联盟, 更好地满足稳定性、时效性及分布等要求

2 新策略的理论基础

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 S 愿意扩充 A_j 来提高整体效用的必要条件是对于 $\forall A_i \in S$,

$$u(A_i)_{\text{on-hand}} + f(i, \Delta V) \geq O(S, A_j).$$

其中: $u(A_i)_{\text{on-hand}}$ 是联盟成员 A_i 已获得的效用; ΔV 是 A_j 加入联盟所带来的额外效用; $f(i, \Delta V)$ 是 A_i 从 ΔV 中分得的效用; $O(S, A_j)$ 是联盟对后加入者 A_j 的提供

证明 假设 $\exists A_i \in S, u(A_i)_{\text{on-hand}} + f(i, \Delta V) < O(S, A_j)$, 联盟 S 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 $\forall A_i \in S, u(A_i)_{\text{on-hand}} + f(i, \Delta V) \geq O(S, A_j)$, 已有联盟 S 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, 保持全局优化联盟稳定性的必要条件是: 对额外效用的划分必须保证给联盟带来额外效用的 Agent 的基本利益, 并能反映 Agent 对于联盟贡献的差异

证明 在定理 1 和定理 2 的前提下, 如果对额外效用的划分没能保证给联盟带来额外效用的 Agent 的基本利益, 或者没有反映 Agent 对于联盟贡献的差异, 那么这些理性 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.

因为定理 1 和定理 2 维护了联盟已有成员的利益, 而定理 3 充分保障了后加入联盟的 Agent 的利益, 所以这是一种基于利益均衡的联盟形成理论

3 基于利益均衡的联盟形成策略

1) k 个 Agent 同时形成任务 t_j 的求解联盟, 其效用平分, 即

$$u(A_i) = V(S) / k.$$

2) 已有联盟 $S = \{A_i | i \leq k\}$, 加入 A_j 形成新联盟 $S' = \{A_i, A_j\}$. 额外效用 $\Delta V = V(S') - V(S)$ 按以下公式进行划分:

当 $\Delta V \leq \min(u(A_i))$ 时,

$$O(S, A_j) = \Delta V \frac{\Delta V}{V(S')} + \frac{\Delta V}{k+1} \left(1 - \frac{\Delta V}{V(S')} \right); \quad (2)$$

当 $\Delta V > \min(u(A_i))$ 时,

$$O(S, A_j) = \frac{k \min(u(A_i)) + \Delta V}{k+1} \cdot \frac{\Delta V}{V(S')} + \frac{\Delta V}{k+1} \left(1 - \frac{\Delta V}{V(S')} \right); \quad (3)$$

同时

$$u(A_i) \Big|_{i=1, \dots, k} = u(A_i)_{\text{on-hand}} + (\Delta V - O(S, A_j)) / k, \quad (4)$$

其中 $\min(u(A_i))$ 是联盟 S 中所有成员已获效用的最小值。

分析: 根据定理 1,

$$O(S, A_j) \leq \Delta V. \quad (5)$$

根据定理 2, 对于 $\forall A_i \in S$,

$$u(A_i)_{\text{on-hand}} + f(i, \Delta V) \geq O(S, A_j).$$

设计 $f(i, \Delta V) = \frac{\Delta V - O(S, A_j)}{k}$, 带入上式得

$$O(S, A_j) \leq \frac{k u(A_i)_{\text{on-hand}} + \Delta V}{k+1} \Rightarrow O(S, A_j) \leq \frac{k \min(u(A_i)) + \Delta V}{k+1}. \quad (6)$$

综合式(5)和式(6)得到 $O(S, A_j)$ 的上界:

当 $\Delta V \leq \min(u(A_i))$ 时,

$$O(S, A_j) \leq \Delta V;$$

当 $\Delta V > \min(u(A_i))$ 时,

$$O(S, A_j) \leq \frac{k \min(u(A_i)) + \Delta V}{k+1}.$$

根据定理 3, 为了保证 A_j 的基本利益, 得到 $O(S, A_j)$ 的下界为

$$O(S, A_j) \geq \frac{\Delta V}{k+1}. \quad (7)$$

仍然根据定理 3, 为使效用划分反映出 Agent

对于联盟贡献的差异, 设计 $\frac{\Delta V}{V(S')}$ 和 $1 - \frac{\Delta V}{V(S')}$ 分别作为 $O(S, A_j)$ 上、下界的加权因子, 得到式(2)~(4).

显然, 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; 同时, 后加入联盟的 Agent 对这种体现利益均衡的 $O(S, A_j)$ 表示满意, 不会轻易退出联盟去创建新的联盟

4 与相关方法的比较

考虑 3 个 Agent 的 Postman 问题^[1]: 任务 t_j , Agent A_1, A_2, A_3 ; $V(\{A_i\} | i=1, 2, 3) = 0, V(\{A_1, A_2\}) = 3, V(\{A_1, A_2, A_3\}) = 4$

采用本文的联盟形成策略, 递增求解过程如下:

1) 形成联盟 $S = \{A_1, A_2\}$ 时, 效用划分为 $u(A_1) = u(A_2) = 3/2$;

2) 联盟 $S = \{A_1, A_2\}$ 加入 A_3 形成新联盟 $S' = \{A_1, A_2, A_3\}$ 时, 额外效用 $\Delta V = 1 - \min(u(A_i)) =$

$3/2$, 那么根据式(2)和式(4)得

$$O(S, A_3) = 1 \times \frac{1}{4} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{4} \right) = \frac{1}{2},$$

$$u(A_1) = \frac{3}{2} + \frac{1}{4} = \frac{7}{4},$$

$$u(A_2) = \frac{3}{2} + \frac{1}{4} = \frac{7}{4}.$$

表 1 给出了 Shapley 值方法、文献[4]的方法和本文策略的求解过程比较

表 1 3种方法求解过程比较

联盟	{A ₁ }	{A ₁ , A ₂ }	{A ₁ , A ₂ , A ₃ }			
	V(S) = 0	V(S) = 3	V(S') = 4			
效用	u(A ₁)	u(A ₁)	u(A ₂)	u(A ₁)	u(A ₂)	O(S, A ₃)
Shapley 值方法	0	3/2	3/2	4/3	4/3	4/3
文献[4]的方法	0	3/2	3/2	11/6	11/6	1/3
本文策略	0	3/2	3/2	7/4	7/4	1/2

由表可见, Shapley 值方法在 $\{A_1, A_2\}$ $\{A_1, A_2, A_3\}$ 时, 整体效用增加, 个体效用却从 $3/2$ 下降到 $4/3$, 因此联盟不稳定; 文献[4]的方法在 $\{A_1, A_2\}$ $\{A_1, A_2, A_3\}$ 时, 虽然个体效用也增加了, 但 $O(S, A_3) = 1/3$ 没有顾及到后加入联盟的 A_3 的利益, 联盟也不稳定; 本文策略在 $\{A_1, A_2\}$ $\{A_1, A_2, A_3\}$ 时, 不仅原联盟成员的效用增加了 ($3/2 \rightarrow 7/4$), 在整体效用分配中处于优势地位 ($7/4 \rightarrow 1/2$), 而且 A_3 的基本利益得到了保障, 对联盟的贡献得到了体现 ($O(S, A_3) = 1/2 \rightarrow 1/3$). 可见本文策略提高了对额外效用划分的合理性, 维护了双方的利益

5 结 语

本文给出一种基于利益均衡的联盟形成策略, 该策略在非减性效用分配等原则的基础上, 提高了对额外效用划分的合理性, 维护了双方的利益, 优于 Shapley 值方法和文献[4]提出的行为规范, 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 (References)

[1] Zoltkin G, Rosenschein J S. Coalition, Cryptography, and Stability: Mechanisms for Coalition Formation in Task Oriented Domains [A]. Proc of the National Conf on Artificial Intelligence [C]. Seattle: AAAI Press, 1994: 432-437.
 [2] Sandholm T W, Lesser V R. Coalition Among Computationally Bounded Agents [J]. Artificial Intelligence, 1997, 94(1): 99-137.
 [3] Perez-Castrillo D, Wettstein D. Bidding for the Surplus: A Non-cooperative Approach to the Shapley Value [J]. J of Economic Theory, 2001, 100(2): 274-294
 (下转第 1433 页)

算法描述及仿真实例分析可知, 基于协方差 ICA 分析的多重振荡源分离定位方法切实可行. 同时通过对比分析, 发现其他时域 PCA/ICA, 协方差 PCA 等方法对解决该类问题存在着不足

参考文献(References)

- [1] Hagglund T. A Control-loop Performance Monitor[J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3(11): 543-1551.
- [2] Xia C, Howell J. Loop Status Monitoring and Fault Localisation [J]. *J of Process Control*, 2003, 13(7): 679-691.
- [3] Thornhill N F, Shah S L, Huang B, et al Spectral Principal Component Analysis of Dynamic Process Data [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 833-846
- [4] Thornhill N F, Huang B, Zhang H. Detection of Multiple Oscillations in Control Loops[J]. *J of Process Control*, 2003, 13(1): 91-100
- [5] Xia C, Howell J. Isolating Multiple Sources of Plant-wide Oscillations Via Independent Component Analysis [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(8): 1027-1035
- [6] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. *Independent Components Analysis* [M]. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [7] 杨竹青, 李勇, 胡德文. 独立成分分析方法综述[J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 762-772
(Yang Z Q, Li Y, Hu D W. Independent Component Analysis: A Survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 762-772.)
- [8] Li R F, Wang X Z. Dimension Reduction of Process Dynamic Trends Using Independent Component Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(3): 467-473
- [9] Kano M, Hasebe S, Hashimoto I, et al Evolution of Multivariate Statistical Process Control: Application of Independent Component Analysis and External Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(6-7): 1157-1166
- [10] 张贤达. *现代信号处理*[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 7-8
(Zhang X D. *Modern Signal Process* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 7-8.)

(上接第 1425 页)

- [4] Claudio B, Andrea P, Lorenzo M. Fault Tolerant Control of the Ship Propulsion System Benchmark [J]. *Control Engineering Practices*, 2003, 11(4): 483-492
- [5] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A Robust Detection and Isolation Scheme for Abrupt and Incipient Faults in Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576-593
- [6] Jiang B, Wang J L, Soh Y C. An Adaptive Technique for Robust Diagnosis of Faults with Independent Effects on System Outputs [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(11): 792-802
- [7] 王占山, 张化光. 一类自适应观测器的故障估计性能 [J]. *东北大学学报*, 2004, 25(12): 1134-1137.
(Wang Z S, Zhang H G. Performance of Fault Estimation of a Class of Adaptive Observer [J]. *J of Northeastern University*, 2004, 25(12): 1134-1137.)

(上接第 1428 页)

- [4] 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
(Luo Y, Shi C Y. Behavior Strategy to Form Coalition in Agent Cooperative Problem-solving [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(11): 961-965)
- [5] Leen K S, Costas T. Utility-based Multiagent Coalition Formation with Incomplete Information and Time Constraints [A]. *Proc of SM C-03* [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 1481-1486
- [6] Leen K S, Costas T. Real-time Satisficing Multiagent Coalition formation [A]. *Working Notes of the AAAI Workshop on Coalition Formation in Dynamic Multiagent Environments* [C]. Menlo Park: AAAI Press, 2002: 7-15
- [7] Maria V B, Ricardo C, Jose L P, et al A Stable and Feasible Payoff Division for Coalition Formation in a Class of Task Oriented Domains [A]. *Proc of the 8th Int Workshop on Intelligent Agents VIII* [C]. London: Springer-Verlag Press, 2002: 324-334