人工智能 多Agent系统 联盟形成 MAS (13)

维普资讯 http://www.cqvip.com

计算机科学 1999Vol. 26№. 4

50-53

多 Agent 系统中的联盟形成*)

Coalition Formation in Multi-Agent Systmes

徐晋晖 石纯一 TP18

（清华大学计算机系 北京 100084）

Abstract Coalition is a cooperative method in multi-agent systems. This paper summarizes formal description of coalition problem, process and methods of coalition formation, and discusses existent problems.

Keywords Coalition, Coalition formation, Coalition structure, Coalition value

1. 引言

自 1993 年文[1,4,8]提出联盟方法以来，已取得了一定的进展。通过联盟可以提高 Agent 求解问题的能力，获得更多的报酬，因而联盟是多 Agent 系统(MAS)的重要合作方法。下面先给出问题的描述，然后论及联盟的形成过程。

设 agent 集 $N=\{A_1,A_2,\cdots,A_n\}$，资源集 $Q=\{(q_1,q_2,\cdots,q_n)\}$，其中 $q_i=(q_i^1,q_i^2,\cdots,q_i^k)$，$q_i^j$ 表示 A_i 第 j 种资源的数量；任务集 $T=\{T_1,T_2,\cdots,T_n\}$，其中 $T_i=\{t_i^1,t_i^2,\cdots,t_i^m\}$ 是 A_i 的任务集，t_i^j 是 A_i 的第 j 个任务，对每一个任务有对应的资源需求说明；每一个 Agent 开始都持有一定的资源。

MAS 的问题求解是如何在 Agent 之间进行资源和任务的重组，使得每一个 Agent 既能完成任务，又能节省资源取得满意的报酬？这可通过联盟方法来完成。

一个联盟 C 可以用 $\langle N_c,q_c,Q_c,T_c,T_c',V(c),U_c\rangle$ 来描述，其中 N_c 是 N 的子集，q_c 是 C 拥有的资源，Q_c 是资源分配的结果，T_c 是 C 的任务集合，T_c' 是任务分配的结果，$V(c)$ 是联盟的值，$U_c=(u_1,\cdots,u_{|c|})$ 是 $V(c)$ 对 C 成员的一个分配。

联盟问题是求一个满足稳定性要求的 $\langle U,CS\rangle$，$\langle U,CS\rangle$ 为问题求解的一个中间状态或最后结果，其中联盟结构 $CS=\{C_1,C_2,\cdots,C_p\}$ 是 N 的一个划分，$U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$ 是每个 Agent 所得报酬的描述。

函数 V 是 $2^N\to R$ 的映射，如果对 N 的子集 S、T，当 $S\cap T=\phi$，有 $V(S\cup T)\geqslant V(S)+V(T)$ 称 V 满足超加性，否则 $V(S\cup T)<V(S)+V(T)$ 称 V 满足次加性。在超加情况下所有的 Agent 应组成一个大联盟，最后的 $CS=\{N\}$；相反在次加情况下应互不结盟，最后的 $CS=\{\{A_1\},\{A_2\},\cdots,\{A_n\}\}$。通常以 Agent 通过联盟合作带来的额外效用作为联盟的值，一般有 $V(\{A_i\})=0$，就是单个 Agent 作为联盟的联盟值是 0。

联盟的形成过程是：1)联盟结构 CS 的产生；2)求解联盟值，将联盟结构每一个可能的联盟的资源和任务进行组合分配，求得相应的联盟值；3)将联盟值在成员之间进行分配，求得一个稳定的 U。这三步是互相交互的，需不断反复求得一个符合稳定性要求的 $\langle U,CS\rangle$。

作为一种联盟方法应满足最小性质要求：

1. 方法的有效性：指通过联盟带来的额外效用不应该比形成联盟所需的通讯和计算资源开销小；

2. 结果的稳定性：有个人、群体、联盟三种理性要求，即：(i)个人理性公式 $u_i\geqslant V(\{A_i\})$；(ii)群体理性公式是对于$\forall S\in CS$，有 $\Sigma A_{i\in S}u_i=V(S)$，(有的文章中公式是 $\Sigma A_{i\in N}u_i=V(N)$，这只对超加性适用)；(iii)联盟理性公式是，对于$\forall S\in CS$，有$\forall T\in S$ 且 $\Sigma A_{i\in T}u_i\geqslant V(T)$，这是强理性要求，往往难以保证。

3. 计算的分布性：计算和通讯的分布，防止通讯瓶颈和瘫痪点现象的发生。

4. 过程的简单性：要求得一个满意的结果采用穷尽所有可能的方案是不现实的，因为这是一个 NP 问题。

有的文章中也提到对称性，非减性等。

*)本文得到国家自然科学基金和清华大学研究生院博士学位论文基金资助。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2. Shehory 与 Kraus 的联盟形成方法

2.1 基于协商的联盟形成协议[4]

在超加情况下，Agent 通过协商对效用分配达成一致，结盟，然后象一个 Agent 一样进行新的循环，直到大联盟出现。初始 Agent 互不结盟。

1. 每一个联盟计算与其他联盟的联盟值，并按从大到小次序排队。

2. 选取队列的第一个作为结盟对象，（在超加环境下，一定存在最少两个联盟可能配对），如只有一对，平均分配额外效用，否则进行协商，达到满意为止。

3. 一对联盟结盟，并对联盟中的成员，按协商的比例进行新效用的分配，进入新的循环。

2.2 通过联盟进行任务的分配[5]

这是在 DPS 环境下将任务集中的每一任务，分配给每一个联盟，使所有联盟值的和达到最大。算法要求设定每个联盟的最大成员数 K，以及一个 Agent 只属于一个联盟。过程是：

1. 完成联盟值计算的分布，形成需要 A_i 计算的 CL_i。这里 CL_i 是一个表，表元素是一个需 A_i 计算的包括 A_i 在内的联盟。

（1）每一 Agent 计算包含它在内的成员数不超过 K 的可能联盟，形成相应的列表 CL_i；

（2）对 CL_i 的可能联盟，与其成员通讯，获得它们的能力；

（3）通知那些成员，A_i 你承诺联盟值的计算。

2. 计算联盟值

对 CL_i 的每一元素，从任务集中选取可能完成的任务，并计算价值，选最大的作为联盟值。

3. 选择联盟

（1）每一 Agent 从 CL_i 中选取 $w_i=c_i/|C_i|$ 最小者，c_i 是联盟的代价（价值的倒数），$|C_i|$ 是联盟成员数。

（2）在所有的 Agent 之间选择最小的 w_i，确定本次循环选择的联盟。

4. 形成联盟

对应的联盟成员结盟，并退出联盟过程，其它的 Agent 返回 2 继续，直到所有的成员结盟，或没有可能完成的任务为止。

这里的方法限定一个 Agent 只能加入一个联盟，必然存在能力的浪费，文[6]提出了相应的改进。

2.3 面向核的联盟形成模型[7]

一个联盟 C 的超出 $e(C)=V(C)-\Sigma_{A_i\in C}u_i$，这里的 $e(C)$ 是相对于目前的 $\{U,CS\}$ 而言；Agent a 对 b 的最大超出 $S_{ab}=\mathrm{MAX}_{C|a\in C,b\notin C}e(C)$，这里 $e(C)$ 是包括 a 而不包括 b 的联盟的超出。若 $S_{ab}>S_{ba}$，且 $u_b>V(\{b\})$，则称 a 强于 b；若：(i) $S_{ab}=S_{ba}$；(ii) $S_{ab}>S_{ba}$ 且 $u_b=V(\{b\})$；(iii) $S_{ab}<S_{ba}$ 且 $u_a=V(\{a\})$，其中之一成立，则称 a 和 b 目前处于平衡状态。若每一个 $C\in CS$ 的成员都处于平衡状态，则称 $\{U,CS\}$ 是稳定的；所有稳定的 $\{U,CS\}$ 构成核。

基于 Stearns 转移机制的面向核的联盟形成模型是从一个最初的 $\{U,CS\}$，通过协商演化为一个满足多项式核稳定的 $\{U,CS\}$ 的过程。为了降低计算的复杂度，模型限制联盟的成员数在 $[K_1,K_2]$ 范围内。在自主的信息 Agent 之间，模型得到实际的应用[3]。

1. 初始 $\{U,CS\}$ 是 $CS=\{\{A_1\},\cdots,\{A_n\}\}$，$U=\langle 0,\cdots,0\rangle$。

2. 每一个联盟与 C_p 重复以下步骤，直到没有建议为止：

（1）确定可能与 C_p 结盟的联盟；

（2）对每一个可能的联盟 C_r 设计一个 $\{U_{new},CS_{new}\}$，这里 CS_{new} 是使 C_p、C_r 合并，其他保持不变，U_{new} 的设计满足：(i) $V(C_p)+V(C_r)<V(C_p\cup C_r)$，(ii) 对于所有 $i\in C_p\cup C_r$ 有 $u_{new-i}>u_i$，(iii) 对于所有 $i\in C_p$ 有 $u_{new-i}>u_{rnew-i}$，这里 u_{rnew} 是指 C_p 收到的其他联盟的建议；

（3）C_p 将建议发给 C_r；

（4）如果 C_r 接受，那么产生新的 $\{U_{new},CS_{new}\}$。

3. 如果都无建议，且计算时间尚未结束，进入下一步，否则结束。

4. 如果目前的结果满足核稳定，结束，否则转 5。

5. 由于变化会给其他的 Agent 带来不满意，这样引起联盟的解体，应执行与 2 类似的步骤，进一步优化，直到产生满足核稳定的结果或计算时间结束。

3. 基于密码机制的联盟形成方法

Zlotkin 与 Rosenschein[2] 依密码机制，对基于 Shapley 值方法进行了改进，使得算法复杂度在超加环境下由指数级降为线性级。

Shapley 值的计算考虑所有的排列，而实际只有一种排列，这样提出随机排列机制：Agent 任选一种排列形成联盟，每个 A_i 所得的效用 $u_i=V(C\cup\{i\})-V(C)$，$V(C)$ 是 A_i 加入前联盟 C 的值。如果每一个排列有相等被选取的机会，那么随机排列机制能给每一个 Agent 与它的 Shapley 值相等的期望效用。

为了在 Agent 之间达到一个一致同意的排列

维普资讯 http://www.cqvip.com

(因为谁都不愿意先参加),采用密码机制。

1. 每一 Agent 选一排列和密钥,利用密钥加密,将加密的信息广播给其他 Agent;

2. 当 Agent 接受到所有的反馈信息时,广播密钥;

3. 每一 Agent 用相应的密钥解密,进行组合得到一致同意的排列。

4. Ketchpel 的联盟形成算法

Ketchpel 基于 Shapley 值和稳定婚姻算法,提出面向一般环境的联盟形成算法,并针对不同的 Agent 有不同的联盟值估计引入 Agent 之间的拍卖机制。

4.1 确定性的联盟形成算法[8]

算法由四个循环体组成,每次选出一对联盟,直到没有可以配对的联盟。

1. 通讯阶段:每一联盟通过通讯获得其他联盟的信息,包括联盟的值、计算联盟值所需的数据。

2. 计算阶段:计算联盟 Shapley 值,根据 $u_s=V(S)/2+(V(S\cup T)-V(T))/2$,$u_t=V(T)/2+(V(S\cup T)-V(S))/2$,分配联盟值,将所有 $u_s>V(S)$ 的联盟按 u_s 从大到小排列。

3. 配对阶段:每一联盟依排列次序,通知其他的联盟,如与它结盟可以获得的效用,并对接受的信息进行比较,作出同意或拒绝的响应,直到出现一个最好的配对。

4. 结合阶段:两个配对的联盟结盟,然后继续循环。

4.2 不确定性的联盟形成算法[9]

如 A、B 形成联盟,但对联盟值有不同的估计,分别是 $V_A(AB)$,$V_B(AB)$。为了解决这种不确定性,引入两个 Agent 之间的拍卖机制。选出联盟受理者,承担不确定性的风险,被管理者接受管理者提供给它的效用,在 4.1 节的结合阶段,加入管理者选举过程。

设 $O(A,B)$ 是 A 对 B 的提供,$O(B,A)$ 是 B 对 A 的提供,有以下情况:

1. A 和 B 都想成为管理者,$V_A(AB)-O(A,B)>O(B,A)$ 且 $V_B(AB)-O(B,A)>O(A,B)$,这时可以增加 $O(A,B)$ 和 $O(B,A)$ 达到同意。

2. A 想当管理者且 B 同意,$V_A(AB)-O(A,B)>O(B,A)$ 且 $V_B(AB)-O(B,A)\leqslant O(A,B)$,这时 A 成为管理者。

3. 对称于 2,B 成为管理者。

4. A 和 B 都不想成为管理者,$V_A(AB)-O(A,B)\leqslant O(B,A)$ 且 $V_B(AB)-O(B,A)\leqslant O(A,B)$,这时可以减少 $O(A,B)$ 和 $O(B,A)$ 达到同意。

5. 受限 Agnet 的联盟

Sandholm 与 Lesser 分析了在计算资源受限情况下联盟值、最优联盟结构和稳定性[10,11]。

在计算资源受限情况下,联盟值的计算需考虑计算资源的开销,

$V_S(C_{comp})=-\min_{R_S}[C_S(R_S)+C_{comp}*R_S]$

$V_S(C_{comp})$ 是联盟 S 在单位时间价格 $C_{comp}\geqslant 0$ 下的联盟值,随 C_{comp} 增大而减小;R_S 是联盟 S 的计算资源数;$C_S(R_S)$ 是 S 在 R_S 下采用一算法、求出的 S 完成领域任务的开销,随 R_S 增大而减小。$V_s(C_{comp})$ 由三个因素决定:(i)领域问题,Agent 的任务和资源,在理性 Agent 中这是唯一因素,(ii)运行平台,确定 C_{comp} 的大小,(iii)求解算法。

如果对 N 的所有互不相交子集,有 $V_{S\cup T}(C_{comp})\geqslant V_s(C_{comp})+V_T(C_{comp})$,那么对于 C_{comp} 而言是受限理性超加环境(BRSUP),否则 $V_{S\cup T}(C_{comp})<V_s(C_{comp})+V_T(C_{comp})$,是受限理性次加环境(BRSUB)。与理想意义上的超加、次加一样对于 BRSUP 而言,最大的社会利益联盟结构是 $\{N\}$,对于 BRSUB 而言是 $\{\{A_1\},\cdots,\{A_n\}\}$。

5.1 $C_s(R_s)$ 与联盟结构的关系

如将所有联盟值计算出来,是容易判断环境类型的,进而容易判断联盟结构,但这是不现实的,Sandholm 和 Lesser 给出了根据 $C_s(R_S)$ 判断环境类型的定理。

定理 1 [BRSUP 充分条件] 如果对 N 的所有互不相交子集 R_S,R_t 有:$C_{S\cup t}(R_S+R_t)\leqslant C_s(R_S)+C_t(R_t)$,那么对所有 C_{comp} 而言环境是 BRSUP。反之有 BRSUP,却不能保证得出相应的条件。

定理 2 [BRSUP 充分必要条件] 如果对 N 的所有子集 W,$C_w(R)$ 是 R 上的递减凸函数,那么定理 1 的充分条件也是必要条件。

定理 3 [BRSUB 充分条件] 如果对 N 的所有互不相交子集 R_S,R_t 有:$C_{S\cup t}(R_S+R_t)>C_s(R_S)+C_t(R_t)$,那么对所有 C_{comp} 而言环境是 BRSUB。反之有 BRSUB,却不能保证得出相应的条件,即使 $C_w(R)$ 是 R 上的递减凸函数。

5.2 联盟结构的稳定性

问题是满足联盟稳定性要求的 CS 集合,对所有的 C_{comp} 而言,受限理性核心 $BRC(C_{comp})=\{(U,CS)|N$ 的所有子集 S,$\Sigma_{i\in S}u_i\geqslant V_S(C_{comp})$ 且 $\Sigma_{i\in N}u_i=\Sigma_{j\in CS}V_j(C_{comp})\}$,在有些情况下可能是空集。

维普资讯 http://www.cqvip.com

定理 4 如果对所有的 C_{comp} 而言有 BRSUB，那么 BRC(C_{comp})非空。

平衡集合 $\beta=\{B_1,\cdots,B_p\}$，这里 B_j 是 N 的子集，且存在正的系数 $\lambda_1,\cdots,\lambda_p$，对 N 的每一成员有 $\Sigma_{\{j,i\in B_j\}}\lambda_j=1$；不包括任何平衡集合的平衡集合称为最小平衡集合；$\beta$ 中两两相交非空的最小平衡集合，称为适当的最小平衡集合。

定理 5 在受限理性大联盟情况下，BRC 非空的充分必要条件是对于每一个最小平衡集合，有 $\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * V_{B_j}(C_{comp})\leqslant V_N(C_{comp})$。

定理 6 在受限理性 BRSUP 情况下，BRC 非空的充分必要条件是对于每一个适当的最小平衡集合，有 $\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * V_{B_j}(C_{comp})\leqslant V_N(C_{comp})$。

定理 7 在受限理性大联盟情况下，BRC 非空的充分必要条件是对于每一个最小平衡集合，对所有 B_j 和 R_{B_j} 有 $\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * C_{B_j}(R_{B_j})\geqslant C_N(\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * R_{B_j})$。

定理 8 在受限理性 BRSUP 情况下，BRC 非空的充分必要条件是对于每一个适当的最小平衡集合，对所有 B_j 和 R_{B_j} 有 $\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * C_{B_j}(R_{B_j})\geqslant C_N(\Sigma_{j=1}{}^{p}\lambda_j * R_{B_j})$。

6. 讨论

目前在 MAS 中，联盟形成的基本理论是 N 人合作对策理论，如 Shapley 值、核、核心等。

6.1 N 人合作对策与联盟形成

1. N 人合作对策主要考虑如何划分联盟值，检查划分的稳定和公平性，没有考虑算法，只考虑解的存在性，这样许多结论的算法复杂度是指数级的，而在 MAS 中必须考虑可实现性。

2. N 人合作对策不考虑资源和通讯的开销，计算分布的要求。

3. N 人合作对策假设联盟值是已知的，不考虑如何计算，在 MAS 中联盟值的计算是一个问题，因为有些不易计算，且存在不确定性、不完全、甚至欺骗性行为。

4. N 人合作对策，为 MAS 中联盟形成提供一定的指导，但必须进行改进。

6.2 联盟形成的问题

虽然有许多线性级的联盟算法，但仍存在一些问题，

1. 缺少形式化的理论，现有工作都以 N 人合作对策为基础，但 N 人合作对策并不完全适用，必须建立一套适合 MAS 的形式理论。

2. 现有联盟形成算法是在任务和资源给定的情况下求满意的 $\{U,CS\}$，当任务求解完成后联盟解体。在新的任务来临时重新形成，而人类的联盟行为是采用适当调整办法，达到新的 $\{U,CS\}$，这样应研究在任务和资源变化情况下对 $\{U,CS\}$ 的调整演化方法。

3. 联盟值的计算是联盟形成算法的基础，计算会带来计算资源开销，如能根据任务和资源情况，不计算联盟值而直接求得 $\{U,CS\}$，将降低计算的复杂度。

4. 现有算法没有考虑多 Agent 交互下经验的学习能力。

5. 现有算法是一种单纯的计算，在联盟过程中，伴随 Agent 思维状态(BDI)的变化，同时 BDI 的变化对联盟产生影响，因而须考虑 BDI 与联盟的关系。

参考文献

1 Zlotkin G, Rosenschein J S. One, two, many, Coalitions in multi-agent systems. In: Proc. of the Fifth European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World. 1993

2 Zlotkin G, Rosenschein J S. Coalition, cryptography and stability, mechanisms for coalition formation in task oriented. In: Proc. AAAI-94. 1994

3 Klush M, Shehory O. A Polynomial Kernel-oriented Coalition Algorithm for Rational Information Agents. In: Proc. ICMAS-96. 1996

4 Shehory O, Kraus S. Coalition formation among autonomous agents: Strategies and complexity. Same to [1]

5 Shehory O, Kraus S. Task allocation via coalition formation among autonomous agents. In: Proc. IJCAI-95. 1995

6 Shehory O, Kraus S. Formation of overlapping coalition for precedence-ordered task-execution among autonomous agents. In: Proc ICMAS-96. 1996

7 Shehory O, Kraus S. A kernel-oriented model for coalition formation in general environments: implementation and results. In: Proc. AAAI-96. 1996

8 Ketchpel S. Coalition formation among autonomous agents. Same to [1]

9 Ketchpel S. Forming coalitions in the face of uncertain rewards. In: Proceedings AAAI-94. 1994

10 Sandholm T W, Lesser V R. Coalition formation among bounded rational agents. In: Proc. IJCAI-95. 1995

11 Sandholm T W, Lesser V R. Coalition among computationally bounded agents. Artificial Intelligence, 1997, 94