

# 对群体 Agent 的意图跟踪\*

李毅, 石纯一

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

E-mail: ddft@public.bta.net.cn

http://www.tsinghua.edu.cn

**摘要:** MAS 中, 一个 agent 对其他 agent 进行跟踪、监视, 并推断出其高级目标和意图是重要的, 对多个 agent 的跟踪, 既要知道每个 agent 的意图, 也要分析出群体意图, 以便于协作或对抗. 引入群体思维状态和群体理性, 在资源有限的情况下, 可同时跟踪个体和群体意图, 并相互依赖, 以提高准确性和效率. 还讨论了多 agent 对多 agent 的跟踪, 改进了 Tambe 等人的工作.

**关键词:** agent; 群体; 跟踪; 意图

**中图法分类号:** TP18      **文献标识码:** A

多 agent 系统(MAS)中, agent 需要对其他 agent 进行跟踪、监视, 推断其高级目标和意图, 且不仅应跟踪单个 agent, 还应跟踪多个 agent, 并推断 agent 的群体目标和意图<sup>[1,2]</sup>.

当跟踪的 agent 数量太多时, 会耗费大量计算资源和时间, 为此, Tambe 提出 sharing in Agent-Group Tracking 模型, 通过分享模型来优化跟踪. 所建系统用来模拟空战中的智能领航 agent, 运行于 ModSAF 模拟环境中, 并计算 agent 间 sharing 和 unsharing 的代价, 以决定是否采用 model sharing. 但以组成员协商、思维和工作方式高度一致为前提, 这是模型的局限性<sup>[3]</sup>.

Team work 是 agent 合作的一种面向共同目标的特殊问题求解形式, Tambe 基于联合意图理论和联合规划理论提出了一种灵活实用的队工作模型. 队模型由队状态和队算子组成, 其中队的状态是关于队组成情况的描述, 队算子是对一个联合行动的联合承诺, 既表示了该队目前采取的联合活动, 又指定了每一个成员所扮演的角色. 主要引入: (1) 建立联合意图的同步器, 基于请求-确定协议描述了联合意图的建立过程; (2) 队工作的监控和修改方法, 在联合行动中 agent 要保证行动的一致性, 通过监控发现出错的角色, 进而启动相应的队修改活动, 并研究了基于社会诊断的错误发现和恢复方法; (3) 为了降低通信开销, 给出结合决策理论和通信选择机制, 以保证联合意图的实现可在不通信的情况下进行, 适合于通信资源有限或显示通信有害的环境.

为跟踪群体 agent 的联合意图和规划, Tambe 提出了 Team tracking, 采用队工作模型来进行群体跟踪, 队工作模型是 joint intention framework 的一种应用概念, team work 涉及 team member 的 joint goal, joint intention, joint commitments 和 joint activities. 算法建立在对个体 agent 跟踪的基础上, 但在开放环境和资源有限条件下, 可能无法完全、准确跟踪 agent 个体, 故也存在局限性<sup>[4]</sup>.

Model sharing 和 Team tracking 算法的共同之处在于均使用了 BDI 思维状态理论<sup>[5]</sup>, 利用理性平衡的特点推断意图. 两者目的不同, 前者利用组内成员思维状态基本一致的特点, 提高跟踪 agent 的效率, 后者在跟踪 agent 的基础上, 推断群体的意图. 可看出, 对个体和群体的跟踪是互为因果的, 因此需统一考虑.

MAS 中, 需同时跟踪个体和群体的意图, 在资源有限和开放式环境下, 完全跟踪难以实现. 合理的算法应在

\* 收稿日期: 2000-10-18; 修改日期: 2001-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69973023; 60173011)

作者简介: 李毅(1974 - ), 男, 河北高阳人, 博士, 主要研究领域为多 agent 系统; 石纯一(1935 - ), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为人工智能应用基础.

资源有限的情况下,尽可能推断可能的个体和群体意图,且群体意图的推断可随着个体意图的推断而逐步求精.

## 1 模型描述

群体意图的表示涉及到共同承诺、联合意图,群体意图可分解为一组个体意图的集合. Agent 集合  $A=\{agent_1, agent_2, \dots, agent_n\}$  的群体意图  $g$  可描述为  $A$  中各 agent 具有联合持续目标  $g$ , 且互相信任共同实现此目标. 群体意图  $g$  对应的个体意图集合  $\{i_1, i_2, \dots, i_n\}, i_j (1 \leq j \leq n)$  是  $agent_j$  为实现  $g$  所承诺的个体意图,  $i_j$  也表示为  $g[j]$ .

**定义 1.** 个体对手模型. 如  $agent_1$  跟踪  $agent_2$ , 则  $agent_1$  所要建立的对手  $agent_2$  模型  $O=\langle B, D, I_S, I_P, I_W, H \rangle$ .  $O$  在  $agent_1$  的 BDI 模型的信念中, 即  $Bel(agent_1, O)$ . 其中

$B: \psi \in B \Rightarrow Bel(agent_2, \psi)$ ,  $B$  包含  $agent_1$  所知道的  $agent_2$  中的 Belief.

$D: \psi \in D \Rightarrow Des(agent_2, \psi)$ ,  $agent_2$  的 Desire 集合是  $D$  的一个子集, 即  $D$  包含了  $agent_2$  所有可能的 Desire, 也可将  $D$  表示为  $Dall$ - $Dban$ ,  $Dall$  表示 Desire 的全集,  $Dban$  表示  $agent_2$  所不具有的 Desire.

$I_S: \psi \in I_S \Rightarrow Int(agent_2, \psi)$ ,  $I_S$  表示可以确定的  $agent_2$  的 Intention, 包括先验的 Intention 和通过观察、通信等手段获得的 Intention.

$I_P$ : 对手的可能 Intention, 是通过已有 BDI 信息推断出的当前  $agent_2$  可能具有但无法确定的 Intention. 引入可能 Intention 的可信度, 定义可信度函数  $b: i \rightarrow [0, 1]$ , 可信度范围为  $0 \sim 1.0$  表示不可信,  $1$  表示肯定. 若  $i \in I_S$ , 则  $b(i)=1$ .

$I_W$ : 表示  $agent_2$  所有可能的 Intention 中  $agent_1$  所关心的部分, 为 Intention 的观察窗口. 不考虑  $I_W$  之外的 Intention.

$H: H=\{a_i\}$ ,  $a_i$  表示  $agent_2$  在特定时间所执行的特定动作, 所记录一定时间内对手的历史信息等.

约定  $O$  中的  $B, D, I_S$  以及  $\psi \in I_P, B, D, I_S \quad \{\psi\}$  均满足典型的 BDI 逻辑约束关系. 但模型中,  $B, D, I_P$  无须满足 BDI 约束, 允许  $I_P$  集中的 Intention 相互矛盾.

对个体模型做一个扩展, 将其延伸到群体领域, 给出群体模型的描述. MAS 具有开放和不确定性特点, 模型也应考虑此特点.

**定义 2.** 群体对手模型. 设 agent 所跟踪的 agent 群体模型  $GO=\langle A, OP, GI_S, GI_P, GI_W, GH \rangle$ .  $GO$  在 agent 的 BDI 模型的信念中, 即  $Bel(agent, GO)$ . 其中

$A=\{agent_1, agent_2, \dots, agent_n\}$ , 表示构成群体的  $n$  个 agent 的集合.

$OP=\{O_1, \dots, O_n\}$ ,  $O_j$  为  $agent_j$  的个体模型.

$GI_S=\{g_1, \dots, g_p\}$ ,  $GI_S$  表示可以确定的群体意图, 包括先验的知识和通过观察、通信等手段获得的群体意图. 对  $j, k, 1 \leq j \leq p, 1 \leq k \leq n$ , 有  $g_j[k] \in O_k$  的  $I_S$ , 即确定的群体意图对应的个体意图应属于确定意图.

$GI_P=\{g_1, \dots, g_m\}$ , 群体的可能意图, 是通过  $GO$  中已有信息推断出的当前对手可能具有但无法确定的群体意图. 对  $j, k, 1 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq n$ ,  $g_j[k] \in O_k$  的  $I_S$  或  $I_P$ , 但  $h, 1 \leq h \leq n, g_j[h] \in O_h$  的  $I_P$ , 即可能的群体意图对应的是个体意图的确定意图或可能意图, 且至少存在一个个体意图是可能意图.

$GI_W=\{g_1, \dots, g_q\}$ , 表示在所有可能的群体意图中 agent 所关心的部分, 为群体意图的观察窗口. 模型将不考虑  $GI_W$  之外的群体意图. 对  $j, k, 1 \leq j \leq q, 1 \leq k \leq n, g_j[k] \in O_k$  的  $I_W$ .

Agent 具有理性平衡特点,  $B, D, I$  元素相互转换、制约, 互不矛盾. 相对于个体引入群体理性, 群体理性是指群体意图间互不矛盾.

为刻画群体意图矛盾, 将个体意图矛盾扩展到群体意图, 定义群体意图相容算子  $Pg(g_1, g_2)$ , 当值为  $0$  时, 表示  $g_1$  和  $g_2$  矛盾, 当值为  $1$  时, 表示  $g_1$  和  $g_2$  不矛盾.

**定义 3.** 群体意图相容算子  $Pg$ .

对群体意图  $g_1$  和  $g_2$ , 若  $k, 1 \leq k \leq n$ , 使得  $g_1[k] \in O_k$  的  $I_S, g_2[k] \in O_k$  的  $I_S$ , 且  $g_1[k]$  和  $g_2[k]$  矛盾, 则  $Pg(g_1, g_2)=0$ ;

或使得  $g_1[k] \in O_k$  的  $I_S, g_2[k] \in O_k$  的  $I_P$ , 且  $g_1[k]$  和  $g_2[k]$  矛盾, 则  $Pg(g_1, g_2)=0$ ;

或使得  $g_1[k] \in O_k$  的  $I_P, g_2[k] \in O_k$  的  $I_S$ , 且  $g_1[k]$  和  $g_2[k]$  矛盾, 则  $Pg(g_1, g_2)=0$ ;

否则,  $Pg(g_1, g_2)=1$ .

定义 4. 群体理性.

对  $GO$ , 若  $GI_S$  间不存在矛盾, 即  $g_1, g_2 \in GI_S, Pg(g_1, g_2)=1$ , 且  $GI_P$  和  $GI_S$  间不存在矛盾, 即  $g_1 \in GI_P$  和  $g_2 \in GI_S, Pg(g_1, g_2)=1$ , 则  $GO$  是理性的.

## 2 意图跟踪算法

意图跟踪算法对  $A$  中各 agent 进行跟踪, 并推断其个体意图和群体意图.

Step 0. 初始化  $GO$  各元素, 并调用  $OP$  各元素的初始化过程,  $GI_S$  来自于先验知识和观察,  $GI_P = \emptyset$ .

Step 1. 通过感知, 更新  $GI_S$ , 维持群体的理性平衡.

(a) 通过感知, 更新  $GI_S$ ;

(b)  $GI_W$  中各元素, 若不与  $GI_S$  中元素矛盾, 则加入到  $GI_P$  中.  $g_1 \in GI_W$ , 若对  $g_2 \in GI_S$ , 均有  $Pg(g_1, g_2)=1$ , 则  $GI_P = GI_P \cup \{g_1\}$ .

Step 2. 为减少计算量, 削减待跟踪的 agent 集合, 得到  $A$  的子集  $A'$ . 参考 Tambe 的 sharing 模型, 对于思维状态相同的 agent, 将其模型做拷贝, 并将其中一个从 agent 集合中去掉:

(a)  $A' = A$ ;

(b) 若  $\exists j, j' < j', agent_j$  和  $agent_{j'}$  思维状态相同, 则令  $O_j = O_{j'}, A' = A' - \{agent_j\}$ , goto (b), 否则, goto (c);

(c) exit.

由于 agent 能力有限, 对某些 agent 可能无法跟踪, 故进一步将无法跟踪的 agent 从  $A'$  中去掉.

Step 3. 利用已有的群体模型和个体模型, 跟踪 agent 个体. 因资源有限, 设可跟踪 agent 个体  $X$  次. 假设跟踪不同 agent 所需资源是一样的.

(a) 初始化, 根据当前跟踪 agent 集合  $A'$  和群体可能意图集合  $GI_P$ , 构造意图矩阵  $T$ :

$$T = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} & \dots & i_{1n} \\ i_{21} & i_{22} & \dots & i_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{m1} & i_{m2} & \dots & i_{mn} \end{pmatrix},$$

表示有  $n$  个 agent,  $m$  个可能的群体意图, 矩阵元素为个体意图.

(b) 确定跟踪的 agent 个体  $j$ , 对  $agent_j$  实施跟踪, 更新  $O_j$ .

对被跟踪 agent 的选择, 取决于 agent 对跟踪对象的关心程度, 以及跟踪的效果, 即能否有效地削减可能意图, 可参考可能意图之比.

(c) 重置  $A'$  和  $GI_P$ , 并得到新的意图矩阵: 对  $\forall g \in GI_P$ , 若  $\exists j$ , 使  $agent_j \in A'$  且  $g[j] \notin O_j$  的  $I_S$  且  $g[j] \notin O_j$  的  $I_P$ , 则

(c1) 从  $GI_P$  中删除  $g$ ;

(c2) 将  $agent_j$  从  $A'$  中删除;

(c3) 由  $A'$  和  $GI_P$  构造新的意图矩阵  $T$ .

(d)  $Y++$ , 若  $GI_P = \emptyset$ , 或  $A' = \emptyset$ , 或  $Y = X$ , 则结束; 否则, goto (b).

Step 4. 若存在剩余计算资源, 则继续跟踪 agent.

(a) 若  $A' \neq \emptyset$  and  $Y < X$ , 则继续, 否则结束;

(b) 选择  $\forall agent_j \in A'$ , 将  $agent_j$  从  $A'$  中删除, 按个体意图跟踪算法跟踪  $agent_j, Y++$ ;

(c) goto (a).

Step 5. 修正个体意图, 对  $GI_P$  排序.

(a) 对本次循环 (Step 1~Step 4) 中未被跟踪的  $agent_j$ , 令  $O_j$  中各元素保持不变;

(b) 若  $GI_P \neq \emptyset$ , 为对决策提供支持, 我们将个体意图可信度函数扩展到群体意图, 并依据可信度对意图排序,  $g_j$  的可信度定义为对应的个体意图可信度的乘积.

定义 5. 群体意图可信度函数  $bg: g \rightarrow [0, 1], bg(g) = \prod_{k=1}^n b(gi[k])$ .

(c) 修正未被跟踪的 agent 意图的可信度.

若  $GI_p \neq \emptyset$ , 对未被跟踪的  $agent_j$  中的  $i \in O_j$  的  $I_p$ , 令  $GI_{ij} = \{g | g \in GI_p \text{ 且 } g[j] = i\}$ ,  $GI_{ij}$  是群体意图集合, 且其元素所对应的  $agent_j$  的个体意图为  $i$ , 若  $GI_{ij} \neq \emptyset$ , 则  $b(g[j]) = \max(\sqrt{bg(g)}, g \in GI_{ij})$ .

意图跟踪算法基本思路为跟踪 agent 个体, 通过个体 BDI 得到个体意图, 进而利用个体与群体思维状态间的联系和群体理性, 推断群体意图, 并通过群体意图修正个体意图可信度.

群体模型的有效性表现为  $GI_s, GI_p$  和  $OP$  的有效性, 以及  $GI_p$  中各元素的可信度取值合理. 有效性取决于个体对手模型的有效性和  $GI_s, GI_w$  等的有效性, 以及 agent 的观察、感知和推理能力. 当  $GI_p$  的  $m > 1$  时, 表示存在多个可能的群体意图, 因为本身存在多组模型或信息不充分. 当  $GI_p$  为空时, 表示无可能的群体意图, 因为本身不存在群体意图或信息不准确.

算法考虑了单个 agent 对多个 agent 的跟踪, 可将其扩展为多 agent 对多 agent 的跟踪. 这样可减少单个 agent 所需的跟踪数量, 但增加了通信开销.

设  $A'' = \{agent''_1, \dots, agent''_r\}$  是准备跟踪  $A$  的  $r$  个 agent 的集合, 将  $A$  划分为  $r$  个子集  $A_1, \dots, A_r$ , 对  $\forall v, 1 \leq v \leq r$ ,

(a)  $agent''_v$  对  $A_v$  使用群体跟踪算法;

(b) 将跟踪结果通知其他 agent;

(c) 接收其他 agent 发送的  $A_v (v \neq v)$  中各 agent 的模型;

(d)  $agent''_v$  合并其所得  $A$  中各 agent 模型, 并按群体模型更新可能意图集合.

设跟踪一个 agent 代价为  $cost1$ , 发送一个 agent 模型代价为  $cost2$ , 接收一个 agent 模型代价为  $cost3$ , 则

当  $\sum cost1 \cdot (n - |A_v|) \geq \sum cost2 \cdot (n - |A_v|) + \sum cost3 \cdot (n - |A_v|)$ , 可知扩展算法提高了总体跟踪效率;

当对  $\forall v, 1 \leq v \leq r, cost1 \cdot (n - |A_v|) \geq cost2 \cdot (n - |A_v|) + \sum cost3 \cdot (n - |A_v|)$  时, 可知对每个 agent, 扩展算法均提高了跟踪效率.

### 3 实验分析

为验证算法有效性, 以足球为背景进行了实验分析. 利用 TH-Soccer 平台构造了 A 和 B 两个 agent 足球队, 由 A 队和 B 队进行对抗比赛, 并在 A 队的各 agent 中引入群体意图跟踪算法, 分不同情形做了实验.

实验 1. 跟踪算法中, 不考虑群体意图, 只跟踪个体 agent 意图, 重点考察 Step 2 中 model sharing 的效果, 实验中设定在同一球队内, 两队员位置接近时, 认为思维状态基本一致, 可采用 sharing 模型.

实验 2. 跟踪算法中, 不采用 Step 2, 重点考察 Step 3 中的算法有效性, 即利用对手群体意图跟踪其个体意图.

实验 3. 完全依算法进行实验.

实验环境为 WindowsNT4.0, 开发环境为 Microsoft VC++5.0, 如下所示.

	A 胜 B	A 平 B	A 负 B
实验 1	43	12	45
实验 2	54	9	37
实验 3	59	10	31

由结果可知, 实验 3 中 A 队胜率最高, 说明算法将个体理性与群体理性相结合, 与只考虑个体意图或只考虑群体意图相比, 可有效跟踪个体、群体意图. 通过实验 2 的结果优于实验 1 可分析得知, 在足球比赛中, 队员间由于位置、分工不同, 所以通过群体意图推断个体意图比通过相似队员推断个体意图更有效.

### 4 结 语

MAS 中, 一个 agent 对其他 agent 的跟踪、监视, 并推断出其高级目标和意图是重要的. 本文引入群体思维状态和群体理性, 可在资源有限的情况下, 同时跟踪个体和群体意图, 并相互依赖, 以提高准确性和效率, 还讨论了多 agent 对多 agent 的跟踪, 改进了 Tambe 等人的工作, 使得在对抗等信息不完全的条件下建立个体、群体对手模型, 并为 agent 决策提供支持成为可能.

在未来的工作中, 应将该算法引入具有实际应有背景的 MAS 领域, 使其进一步完善.

**References:**

- [1] Tambe, M. Building agent teams using an explicit teamwork model and learning. *Artificial Intelligence*, 1999,110(4):215~239.
- [2] Stone, P., Veloso, M. Task decomposition, dynamic role assignment, and low-bandwidth communication for real-time strategic teamwork. *Artificial Intelligence*, 1999,110(4):241~273.
- [3] Tambe, M. Recursive agent and agent-group tracking in a real-time. In: *Dynamic Environment, ICMAS-95*, 1995. 368~375.
- [4] Tambe, M. Tracking dynamic team activity. In: *Proceedings of the ICMAS'97*, 1997. 80~87.
- [5] Haddadi, A. , Sundermeyer, K. *Belief-Desire-Intention Agent Architectures*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. 169~185.

**Intention Tracking in Agent-Group\***

LI Yi, SHI Chun-yi

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

E-mail: ddf@public.bta.net.cn

<http://www.tsinghua.edu.cn>

**Abstract:** In MAS, it is important for an agent to track and keep watch on others, and to infer their high-level objectives and intentions. As far as tracking multiple agents is concerned, in order to decide whether to coordinate or to compete, it is desired not only to learn every agent's intention, but also to infer the group's intention. In this paper, the mental states of agent-group, the group rationality are introduced, Which makes it possible to track both individual and group intentions under the constraint of limited resources. Tracking individual intention and tracking group intention are interdependent, Which enhances the accuracy and the efficiency. The tracking of multiple agent's to multiple agents is also discussed. And the work of Tambe *et al* is improved.

**Key words:** agent; group; track; intention

---

\* Received October 18, 2000; accepted March 2, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.69973023, 60173011