第6卷第10期
1995年10月

软 件 学 报
JOURNAL OF SOFTWARE

Vol. 6, No. 10
Oct. 1995

一类开放 DAI 系统的动态行为研究*

王学军 石纯一 胡 蓬

(清华大学计算机系,北京 100084)

摘要 本文针对 Rosenschein 合理主体理论中的静态性、局部性等缺陷以及 Huberman 的计算生态学理论中缺乏对单主体的描述等不足加以改进,在对系统进行合理性假设的基础上,引入系统中合理主体与系统的相互作用,进而研究了开放系统的动态性.

关键词 开放 DAI 系统,合理主体,合理性假设.

开放分布式人工智能系统(ODAIS)是由一些自主主体组成,对复杂的任务进行异步计算.与传统 DAI 系统相比,ODAIS 的外部特征是在任何时侯均可与外部世界交换信息,其内部本质是对矛盾不一致的处理[1].由于 ODAIS 没有中心控制,自主主体根据不完备的知识与常常不一致的信息进行局部决策,系统存在着复杂的动态特性.在传统的 DAI 关于智能主体的研究中,Rosenschein 等人的合理主体理论[2-4]较为完善.但该理论诸多方面不适合于 ODAIS 的研究.如缺乏对系统整体行为的探讨,主体知识完备性假设,静态性,封闭性.Huberman 在其计算生态学理论[5]中使用微分方程研究ODAIS系统行为,但他的研究将主体认定为低智能的而且未加以描述,还对系统引入许多苛刻的假设.

针对上述问题,本文以系统主体的合理性假设为基础,引入时间因素,用概率和微分方程研究大型 ODAIS 中合理主体与系统的相互作用以及它们在不同合理性假设下的不同行为,进而研究了 ODAIS 的动态行为特性.我们的研究是针对一类大型 ODAIS 系统的.在此系统中,逻辑同构的各主体服务于不同的组织或个人,主体追求本身利益的最大化.由于共用有限资源等原因,在选择、分配资源时,系统有许多复杂的动态行为.

1 基本定义与合理性假设

模型 $ODAIS=\langle A, Act, R, \Phi, ra\rangle$,(隐含时间).其中 $A(t)$、$Act(t)$、$R(t)$分别表示 t 时刻系统主体集、系统各主体的可选行为集、系统资源.

令 $act_i \in Act(t)(a\in A(t))$为 a 主体在 t 时刻的行为.$act_A(t)=\prod_{a\in A(t)} act_a(t)$为 t 时刻$A(t)$中所有主体的联合行为.$Act_A(t)=\{act_{A^*}(t)\mid A^*\subset A\}$为不同联合行为 $act_A(t)$的集合.

---

* 本文 1994-02-25 收到,1994-08-30 定稿

作者**王学军**,1967年生,助教,主要研究领域为分布式人工智能.**石纯一**,1935年生,教授,主要研究领域为人工智能.**胡蓬**,1962年生,副教授,主要研究领域为分布式人工智能.

本文通讯联系人:王学军,北京 100084,清华大学计算机系

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Φ 为主体 a 于 t 时刻在联合行为 $act_A(t)$ 下的收益. 其定义为:

定义 1. 函数 Φ: $A\times T\times Act_A(T)\rightarrow R$. ($T$ 为时间集)

对于各主体来说,Φ 的值难以预知,因为其它主体的行为难以预知. 下面给出 3 个预测 Φ 的函数.

定义 2. 函数 $\Phi1$: $A\times T\times Act\rightarrow R\times[0,1]$.

$\Phi1(a,t,act_a(t))$ 的值表为 (r,est),即 i 预计于 t 时刻进行 $act_a(t)$ 可得收益 r,其可能性为 est.

定义 2 完全不考虑别的主体知识,无法准确预测. 需要一个可预测别的主体行为的函数.

令 $ga(a,t,act_a(t))$ 为 t 时刻当 a 主体进行 $act_a(t)$ 时,别的主体可能的行为集. 其元素 $act_{A-\{a\}}(t)=\prod_{b\neq a}act_b(t)$. 该集合满足全局合理性假设(将在后面定义).

定义 3. 函数 $\Phi2$:

$\Phi2(a,t,act_a(t))=\{\Phi(a,t,act_a(t)\times act_{A-\{i\}}(t)\,|\,act_{A-\{a\}}(t)\in ga(a,t,act_a(t))\}$.

当主体数目很多时,一个主体不可能也不需要对其它所有主体建立模型,可以通过预测整个系统的行为来确定收益值.

定义 4. 函数 $\Phi3$: $\Phi3(a,t,act_a(t))=\{\Phi(a,t,act_A(t))\,|\,act_A(t)\in ga(t)\}$

其中 $ga(t)$ 为 t 时刻系统的行为集.

本文规定所有主体满足:

个体合理性假设:主体 $a\in A$ 在 t 时刻是合理的,当且仅当 a 认为该行为与其它主体行为组成的联合行为 $act_A{}'(t)$ 使 $\Phi(a,t,act_A{}'(t))=\max\limits_{act_A(t)\in Act_A(t)}\{\Phi(a,t,act_A(t))\}$.

令 $Rm(task,a,t)$ 为 t 时刻 a 在任务 $task$ 中的合理行为集. $Rm(task,G,t)$ 为主体集 G 的合理联合行为集,与文献[2]中类似,它们的基本性质如下. (证明略)

定理 1. $Rm(task,G,t)\subset\prod_{i\in G}Rm(task,a,t)$, $Rm(task,G,t)\subset Act_G(t)$

定理 2. $((\forall\ r1\in\Phi3(a,t,d_a(t)),\forall\ r2\in\Phi3(a,t,c_a(t))),(r1<r2))$

$\Rightarrow d_a\notin Rm(task,a,t)$

RA 为关于其它主体的合理性假设集,其元素为 $ODAIS$ 模型中的 $ra1,ra2,ra3$. 当主体数很多时,某一主体对整个系统影响很小,此时 RA 也可被认为是关于系统的合理性假设.

$RA=\{ra1,ra2,ra3\}$.

$ra1$:(最小合理性假设):$ga(t)=Act_A(t)$,即系统主体的行为是随机的(缺乏知识).

$ra2$:(分离合理性假设):$ga(t)=Rm(task,A,t)$,即所有主体都是合理的.

$ra3$:(唯一合理性假设):$ga(a,t,act_a(t))=ga(a,t,act_a{}'(t))$,且 $|ga(a,t,act_a(t))|=1$,即其它主体行为已定好,不会改变. 即每一主体假定其余主体行为已经事先定好,不会改变.

$ra3$ 仅当 $ra2$ 为真时成立.

2 主体的合理性与系统行为

令 $A_j(t)\subset A(t)(j\in Act(t))$,$A_j(t)$ 表示 t 时刻进行 j 行为的主体集;令 $u_j=|A_j(t)|$ 表 t

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

时刻进行 j 行为的主体数. 可得 $$\sum_{j\in Act(t)}|A_j(t)|=|A(t)| \tag{1}$$

下面研究 $ODAIS$ 中 $|A_j(t)|$ 的变化.

令 $P(u_1,\cdots,u_m,t)$ 或 $P(\vec{u},t)$,($\vec{u}=(u_1,\cdots,u_m)$)为 $u_1,\cdots,u_m$ 在 t 时刻出现的概率,有

$$\sum_{\vec{u}}P(\vec{u},t)=1 \tag{2}$$

令 $\rho_j(a,t)$ 为 t 时刻 a 主体认为 $\Phi3(a,t,j)$ 最大的概率. 有: $$\sum_{j\in Act(t)}\rho_j(a,t)=1 \tag{3}$$

在 t 时刻,系统中有 n 个主体选择 j 的概率为:

$$P(u_1,\cdots,u_{j-1},u_{j=n},u_{j+1},\cdots,u_m,t)=\sum_{\substack{|G|=n\\ G(t)\subset A(t)}}\prod_{\substack{a\in G(t)\\ b\in A(t)-G(t)}}\rho_j(a,t)(1-\rho_j(b,t)) \tag{4}$$

这一运算是十分复杂的,我们引入 $\rho_j(a,t)$ 的平均值 $\overline{\rho_j(t)}$. 由于主体同构,

$$\overline{\rho_j(t)}=\frac{1}{n}\sum_{a\in A(t)}\rho_j(a,t) \tag{5}$$

令 $P(:j)$ 为主体改做 j 行为的概率,$P(j:)$ 表示放弃 j 行为改做其它行为的概率. 有:

$$P(j:)=\alpha\Delta t(1-\overline{\rho_j(t)}) \qquad P(:j)=\alpha\Delta t\,\rho_j(t) \tag{6}$$

其中 α 为单位时间内主体做选择的次数.

当 Δt 足够小时,整个系统变化是微小的,可近似认为 $\overline{\rho_j(t)}\approx\overline{\rho_j(t+\Delta t)}$. 当 $\Delta t\to 0$ 时,整个系统要么无变化,要么仅有一个变化,即某主体从行为 i 改为行为 j,($i,j\in Act(t)$).

(1)$i\to j$,概率为: $\sum P(\vec{u}',t)(u_j+1)\overline{\rho_i(t)}\alpha\Delta t$,($\vec{u}'=(u_1,\cdots,u_j+1,u_i-1,\cdots)$)

(2)无变化,概率为: $1-\sum_{i\neq j}u_j\,\overline{\rho_i(t)}\alpha\Delta t$

可得,
$$\frac{dP}{dt}=\alpha\Big(\sum_{i\neq j}P(\vec{u}',t)(u_j+1)\overline{\rho_i(t)}-P(\vec{u},t)\sum_{i\neq j}u_j\,\overline{\rho_i(t)}\Big) \tag{7}$$

本文所关心的是整个系统行为与单主体的关系,因此 $A_j(t)$,$|A_j(t)|$ 以及 $\overline{|A_j(t)|}$ 的变化是重要的。利用公式 $\overline{f}=\sum_a f(x)P(x,t)$,可得

$$\overline{|A_j(t+\Delta t)|}\approx\alpha\Delta t\sum_{k\in Act(t)}\overline{A_k(t)\rho_j(t)}=\alpha\Delta t\,\overline{A(t)\rho_j(t)}$$

所以
$$\frac{d\,\overline{|A_j(t)|}}{dt}=\alpha\big(|A(t)|\overline{\rho_j(t)}-\overline{|A_j(t)|}\big) \tag{8}$$

上面的计算均假定 $\Delta t\to 0$ 时,$A(t)$ 与 $\overline{\rho_j(t)}$ 不变.

以上的讨论是针对主体知识的不完备进行的,开放系统的另一重要特征是延迟信息的作用. 假设系统平均延迟时间为 τ,主体只能根据 $(t-\tau)$ 时刻系统的状态进行判断,因此(8)变为
$$\frac{d\,\overline{|A_j(t)|}}{dt}=\alpha\big(|A(t-\tau)|\big)\overline{\rho_j(t-\tau)}-\overline{|A_j(t)|} \tag{9}$$

(9)式的 $\overline{\rho_j(t-\tau)}$ 依赖于不同的系统假设,下面分别进行研究.

3 最小合理性假设下的系统行为

在最小合理性假设下,系统主体的行为是随机的,主体缺乏关于别的主体的知识. 若 Act 不变,$\overline{\rho_j(t-\tau)}=\overline{\rho_j(t)}=\frac{1}{k}$ $\quad(k=|Act|)$.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(9)的解为 $$\overline{|A_j(t)|}=\frac{|A(t-\tau)|}{k}-(|A(t-\tau)|-\overline{|A_j(0)|})e^{-at} \tag{10}$$

当 $t\to\infty$，$\overline{|A_j(t)|}\approx\frac{|A(t-\tau)|}{k}$

合理主体 i 无法根据系统状态确定行为，只能根据主体知识进行判断.

结论 1. 在最小合理性假设下，信息的延迟对合理主体不发生影响.

结论 2. 在最小合理性假设下，系统中使用各种行为的主体数趋于相等.

结论 3. 在最小合理性假设下，合理主体使用 $\Phi1$ 函数确定自己的行为.

4 分离合理性假设下的系统行为

先讨论一个极端的情形，所有主体知识完备，无信息延迟($\tau=0$). 假设 j 策略最好. 此时，$\rho_j(i,t)=1$. (9)的解为：$$\overline{|A_j(t)|}=|A(t)|-(|A(t)|-\overline{|A_j(0)|})e^{-at} \tag{11}$$

当 $t\to\infty$，$$\overline{|A_j(t)|}=|A(t)|$$

在实际的开放系统中不可能存在完备的知识，我们将 $\rho_j(i,t)$ 简单地认定为正态分布：

$$N(\mu,\sigma^2;x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right],$$

可得 $$\overline{\rho_j(t)}=\int_{-\infty}^{\infty}dxN(\overline{\Phi3(j,t)},\sigma^2;x)\prod_{j\neq i}\int_{-\infty}^{x}dyN(\overline{\Phi3(i,t)},\sigma^2;y) \tag{12}$$

为便于讨论，令 $|Act(t)|=2$，即 $Act(t)=\{1,2\}$.

(9)的解为 $$\overline{A_1(t)}=|A(t-\tau)|\overline{\rho_1(t-\tau)}-(|A(t-\tau)|\overline{\rho_1(t-\tau)}-\overline{A_1(0)})e^{-at} \tag{13}$$

在实际的开放系统中，资源能力是有限的，当大量主体进行同一行为时，将导致资源短缺，产生“拥挤”问题[3].

令 $r_j(t)$ 为资源 $R(t)$ 支持 j 策略所得收益，R_j 为最大收益，假定 $r_j(t)$ 仅于 $|A_j(t)|$ 有关.

$$r_j(t)=R_j-\Gamma_j|A_j(t)| \qquad (\Gamma_j \text{ 为能力常数})$$

$$r_i(t)-r_j(t)=(R_i-R_j)+\Gamma_j|A_j(t)|-\Gamma_i|A_i(t)|$$

当引入信息延迟的影响，并令 $j=1,2$ 时，(12)变为：

$$\overline{\rho_1(t)}=(1+erf((R_1-R_2)+\Gamma_2(|A(t-\tau)|-2\Gamma_1|A_1(t-\tau)|/\sigma\sqrt{2})/2$$

erf 是一个错误函数.

这种动态特性使 $\rho_j(i,t)$ 与 $|A_j(t-\tau)|$ 变得相关，引入了许多复杂问题. 观察方程：

$$\frac{d\overline{|A_1(t)|}}{dt}=-\sum_i D_i\overline{A_1(t-\tau_i)} \tag{14}$$

其解为形式如 $$\overline{|A_1(t)|}=e^{-\lambda t} \qquad (\lambda \text{ 可能很复杂})$$

因为 $\frac{d\overline{|A_1(t)|}}{dt}=-\lambda e^{-\lambda t}$，　所以 $\lambda e^{-\lambda t}=\sum_i D_i\overline{|A_j(t-\tau_i)|}$　所以 $1=\sum D_i e^{\lambda\tau_i}/\lambda$

两边求导可得，$\lambda=\frac{1}{\tau_i}$ 时，上式右边最小，即 $\sum D_i e^{\lambda t}\sum_i D_i^{e^{\lambda\tau_i}}/\lambda\geqslant\sum_i\tau_i D_i e^{\tau_i/\tau_i}=e\sum_i\tau_i D_i$

若要 λ 为实根，必须满足 $ke<=1$.

当 $k>1/e$ 时，(14)必有非 0 虚根. 由于(14)是(9)的一个简化情形，(9)也可能有虚根. 虚根将导致 $\overline{|A_j(t)|}$ 随 t 振荡. 振荡的充分(不必要)条件为：

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$\sum D_i\tau_i > \frac{1}{e}$，即 τ_i 足够大时($\tau_i \gg \frac{1}{\alpha}$)，系统将振荡，且不收敛.

结论 4. 在分离合理性假设下，当延迟时间足够大时，系统将产生不收敛的振荡.

5 唯一合理性假设下的系统行为

由于分离合理性包含了唯一合理性，因此在唯一合理性假设下，系统仍有可能振荡. 但合理主体有可能根据历史信息猜测系统当前状态.

在唯一合理性假设下，其它主体有已确定的、唯一的选择，主体 a(我们所观察的合理主体)可以认为其它主体按振荡曲线行动，并可根据历史信息得出振荡周期 Tos. a 可以引入附加延迟时间 τ'，使 $\tau+\tau'=Tos$，并根据($t-(\tau+\tau')$)的系统状态判断当前状态，得出正确的 $\rho_j(i,t)$.

结论 5. 在唯一合理性假设下，合理主体可以根据($t-\tau-\tau'$)时的系统信息(($\tau_i+\tau_i'$)$=Tos$)猜测系统当前状态.

需要说明的是，结论 5 仅在分离合理假设下是不成立的，因为其它主体的行为是不确定的，如果多数主体采用同一策略，整个系统的延迟时间将变为 $\tau+\tau'$，反而使振荡加剧.

结论 6. 结论 5 的策略仅在唯一合理性假设下成立.

6 例 子

为便于理解，讨论 1 个 ODAIS 资源分配的例子.

设 t 时刻，系统为($A(t)$,$Act(t)$,$R(t)$,Φ,ra). 其中 $|A(t)|=100$，即共有 100 个主体. $R(t)=\{R1,R2\}$，$R1$，$R2$ 为处理器，它们为整个系统共享，$R1$ 的速度为 $R2$ 的 3 倍. $Act(t)=\{SR1,SR2\}$，$SR1$ 为选择 $R1$，$SR2$ 为选择 $R2$. 该系统没有中心控制，各主体根据自已的判断选择处理器. 由于主体数很多，单主体不可能对其它所有主体建立模型，只能根据系统状态进行判断.

(1)$ra=ra1$，系统为最小合理性时. 各主体行为随机，由于缺乏关于别的主体的知识，选择 $R1$ 和 $R2$ 的主体数将趋于相等. 如图 1(a)所示. (假设 $|A_{SR1}(0)|=0$)

(2)$ra=ra2$，系统为分离合理性，

首先讨论主体知识完备，无延迟时间的情况. 根据(11)，系统的变化如图 1(b). 在图 1(b)中，$|A_{SR1}(0)|=0$，各主体逐渐发现 $R1$ 的能力较强，渐渐转为 $SR1$. 当 $|A_{SR1}(0)|\approx 3|A_{SR2}(t)|$时，$R1$ 的速度降至与 $R2$ 相同，系统趋于稳定.

再讨论一般情形.

令 $\alpha=1$，$\Gamma_1=1$，$\Gamma_2=3$(其单位为单位时间). 根据(9)，系统行为如图 2 所示.

图 2 可以直观理解如下，由于知识不完备，各主体逐步分辨哪个策略最优. 又由于资源无法容纳大量采用同一策略的主体，而信息有延迟，当主体看到 $t-\tau$ 时刻使用 $R1$ 可得很高收益时，$R1$ 已发生了 t 时刻的“拥挤”，即大批主体使用 $R1$ 导致其速度已低于 $R2$. 在 $t+\tau$ 时刻，当主体看到 t 时刻的“拥挤”时，系统中使用 $R1$ 的主体又已过量地减少了. 图 2(a)中 $\tau=1$ 时，(9) 式仍为实根，$|A_{SR1}(t)|$逐渐收敛到最佳点；(b)中 $\tau=10$，(9)式产生虚根，系统产生不能收敛的振荡.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

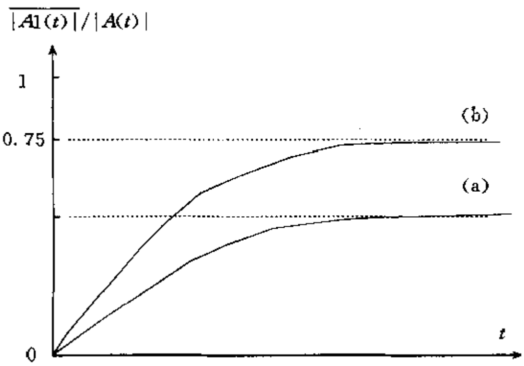

图1 (a) ra1下的情形 (b) ra2下的特例

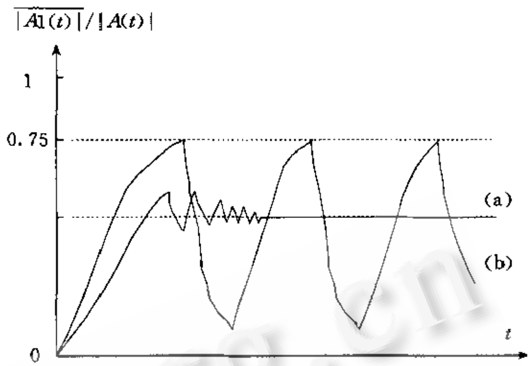

图2 ra2下的一般情形 (a)τ=1 (b) τ=10

(3)$ra=ra3$;即系统为唯一合理时,系统同样会出现图2的振荡;但合理主体可以根据唯一合理性假设,设置附加延迟时间,猜测当前系统状态.

7 结　论

本文通过主体行为与系统状态描述,研究了主体与系统行为的联系.并将单主体行为与大系统行为联系起来.但这些研究仍是初步的.例如为简化问题引入许多限制条件,并对系统做了较较苛刻的规定,在分离合理性假设下,防止系统行为振荡的策略仍有待研究.

参考文献

1 Hewitt C, Inman J. DAI betwixt and between: from "intelligent agents" to open systems science. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 1991,**21**(6):1409－1420.

2 Rosenschein J S. Rational interaction: cooperation among intelligent agents. Ph.D, Stanford University, 1986.

3 Zlotkin G, Rosenschein J S. Negotiation and task sharing among autonomous agents in cooperative domains. In: Proc. Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit, USA, August 1989. 912－917.

4 Zlotkin G, Rosenschein J S. Multi－agent planning as a negotiation in distributed search. In: Proc. Thirteenth International Joint Conference of Artificial Intelligence, Paris, France, August 1993. 416－422.

5 Huberman B A, Hogg T. The behavior of computational ecologies. In: Huberman B A ed. The Ecology of Computation, Amsterdam: North－Holland, 1988. 38－42.

THE DYNAMICS OF AN OPEN DAI SYSTEM

Wang Xuejun　Shi Chunyi　Hu Peng

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

Abstract　In this paper, in view of the weakness of staticness and locality in the rational agents' theory of Rosenschein and the lack of description of single agent in the computational ecology of Huberman, the authors introduce the time parameter, on the basis of the rationality assumptions of the system, to give a formal description of the interaction between the rational agents and the system in a class of open DAI system, using the probability and the differential equation, so as to research the properties of dynamical behavior of open systems.

Key words　Open DAI system, rational agent, rationality assumption.

© 中国科学院软件研究所　http://www.jos.org.cn