

一种多智能体系统计算市场模型

胡军 王克宏 康小强 石纯一

(清华大学计算机系 北京 100084)

摘要 本文针对网络信息服务问题提出一种多智能体 MAS(multi-agent system)计算市场模型,定义了计算市场、计算任务、Consumer 和 Server 实体;分析了实体在计算市场中的行为,证明存在针对任务的市场平衡;确定衡量市场效率的标准是市场运行造成的资源分配与最优分配的距离。

关键词 多智能体,分布式人工智能,计算市场。

分布式人工智能 DAI(distributed artificial intelligence)中多智能体系统 MAS(multi-agent system)的研究越来越热。MAS 的研究基于理性(Rational)Agent,重点是 Agent 之间的交互,即多个 Agent 对其目标、资源进行合理分配,协调相互行为,以实现各自目标或合作完成共同目标。开放信息系统理论、计算生态学和计算市场分别从开放并发、进化以及微观经济的角度研究 MAS。^[1~3]

Miller 和 Drexler 分析了市场与计算问题,提出建立大规模直接的计算市场并设想 Agoric Open System 系统。^[4] Agoric 系统从经济角度出发看待涉及目标、资源与行为的系统计算问题,认为市场机制是计算模型从集中到分散的自然结果。

MAS 研究中的经济方法还包括合同网络和资源分配算法。合同网络(Contract Net)利用招标—投标协议进行自组织的任务分配和求解,缺点是通讯开销大,不适应多 Agent。^[5,6] Wellman 利用经济学的可计算一般均衡理论(CGE)研究了货物运输问题,通过构造模拟货物运输市场,确定市场最优配置。^[7] CGE 强调整个经济系统的联系与平衡,属于静态的价格决定论,因此比较适合静态的约束满足问题。

当前,在建立直接的计算市场研究中还存在着缺乏对计算市场的明确定义、对系统模型的定量研究以及确定计算市场中的价格机制,并从经济学中得到简化等问题。我们针对网络信息服务问题提出一种 MAS 的计算市场模型。模型包括 Consumer 和 Server 2 类实体、产品和计算资源 2 类市场、实体求解的任务以及市场运行的价格机制。通过分析追求最大效用的实体行为与价格的关系来确定系统达到平衡。另外,还考虑了计算市场模型的效率和在分

* 本文研究得到国家 863 高技术项目基金资助。作者胡军,1970 年生,硕士研究生,主要研究领域为分布式人工智能。王克宏,1941 年生,副教授,主要研究领域为知识工程,分布式人工智能。康小强,1969 年生,博士研究生,主要研究领域为分布式人工智能。石纯一,1935 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能应用基础和知识工程。

本文通讯联系人:胡军,北京 100084,清华大学计算机系

本文 1995-08-10 收到修改稿

布环境下实现的信息延迟问题.

1 模型

模型背景为网络信息服务问题. 分布网络上提供多种信息服务, 一个请求任务要求分别或按照一定次序访问这些服务. 以篇章理解问题(TUP)^[8]为例, 一个篇章需经分词、断句、语法分析、语义分析等方法处理, 不同方法由不同实体 Agent 提供. 可能有些篇章只需作分词, 有些只要断句, 有些中间结果还需经专门解综合处理等.

模型表示如下:

$$Model = \langle M, C, S, Method, Resource, TASK \rangle \tag{1}$$

$$M = \{M_0, M_1, M_2, \dots, M_n\}$$

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$$

$$S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_i, \dots, S_n\}$$

$$S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij}, \dots\}$$

$$Method = \{method1, method2, method3, \dots, methodn\}$$

$$Resource \in R \quad TASK = \{T_{t_1}, T_{t_2}, \dots, T_{t_i}, \dots\} \quad t_1 < t_2 < \dots < t_i < \dots$$

$$T_{t_i} = (G_i) \quad G_i = (V_i, E_i, W_i)$$

模型如图 1. 模型由市场集合 M , Consumer 实体集合 C , Server 实体集合 S , 计算资源 $Resource$, 方法集 $Method$, 任务序列 $TASK$ 组成. 其中市场集合 M 包括产品市场 $M_i (1 \leq i \leq n)$ 和计算资源市场 M_0 两类, $Server$ 实体类别数与方法集 $Method$ 中方法个数相同, 每一类 $Server$ 实体提供一种方法服务. 如 S_{11}, S_{12}, S_{13} 是同类 $Server$ 实体, 且它们都提供 $method_1$ 方法服务. $Resource$ 是计算市场中的计算资源, 所有实体的活动均需消耗计算资源, 假设计算资源为实数, 可以无限细分.

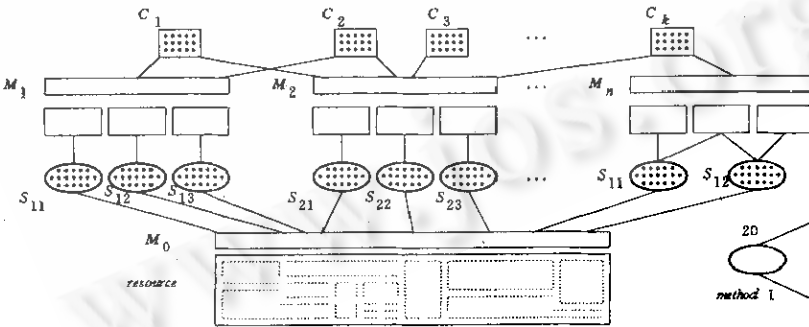


图1 TBCM结构图

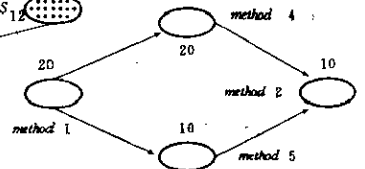


图2 任务结构

$TASK$ 是系统按时间的任务输入序列, t_i 时刻早于 $t_j (i < j)$ 时刻. 输入的任务 T_{t_i} 为一个有向加权图 G_i . 顶点集 V_i 属于 $Method$, 有向边 $v_m v_n \in E_i (v_m, v_n \in V_i)$ 表示接受完 v_m 方法服务后再接受 v_n 方法服务. $W_i = \{\langle \text{顶点}, \text{权值} \rangle, \langle \text{顶点}, \text{权值} \rangle, \dots\}$ 分别表示需要某类 $Server$ 实体(方法)服务的工作量. 一个任务图 G_i 的例子如图 2. 此任务需先执行 $method_1$ 20 个单位工作量, 然后分别执行 $method_4$ 20 个单位与 $method_5$ 10 个单位, 最后执行 $method_2$ 10 个单位. $method_2$ 执行条件可定义为 $method_4$ 与 $method_5$ 方法都完成或完成任意一个即可.

$$M_i = \langle RULE_i, U_i, Q_i \rangle \quad (2)$$

$M_i (1 \leq i \leq n)$ 是 S_i 类 *Server* 的产品市场, 提供 $method_i$ 方法服务, 一部分 *Consumer* 实体和全部 S_i 类 *Server* 实体在 M_i 中运行. M_i 包括一个市场规则 $RULE_i$ 和 *Server* 实体当前价格信息 $U_i = (U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}, \dots)$ 以及质量信息 $Q_i = (Q_{i1}, Q_{i2}, Q_{i3}, \dots)$.

$$C_i = \langle \text{当前任务集, 当前联系产品市场集, } g_{ci}(U, Q, K_c), \text{知识集 } K_c \rangle \quad (3)$$

Consumer 实体接收 *TASK* 序列中的任务, 根据任务图, 通过计算函数 g_{ci} 从相应的产品市场中选择一个合理的 *Server* 实体执行任务. *Consumer* 的选择依据包括: 联系的第 K 个产品市场中所有 *Server* 的价格 U_k 和质量 Q_k ; 其他知识, 如历史信息.

$$M_0 = \langle RULE_0, p_0 \rangle \quad (4)$$

$$S_{ij} = \langle U_{ij}(B_{ij}, R_{ij}), f_{s_{ij}}(U_{ij}, p_0), I_{ij} \rangle \quad (5)$$

计算资源市场 M_0 是模型的核心. *Consumer* 实体的生存也需要计算资源 *Resource*, 但为简化, 假设参与 M_0 的只有 *Server*. *Server* 提供实际的方法服务, 并将信息公布到产品市场. 二元效用函数 $U_{ij}(B_{ij}, R_{ij})$ 反映 *Server* 的“生产特性”, $I_{ij} \in R$ 表示现有资本, 而策略函数 $f_{s_{ij}}(U_{ij}, p_0)$ 决定 *Server* 在 M_0 市场的行动是买进、卖出还是不动作. *Server* 实体的目标是整体效用最大, 即 $U_{ij} + I_{ij}$ 最大. p_0 是 *Resource* 价格, B_{ij} 是 S_{ij} 的当前执行任务负载, R_{ij} 为 S_{ij} 当前拥有资源数量.

模型的目标是确定由时刻追求最大效用的实体构成的市场的平衡, 以及达到平衡的条件、市场的效率和时间的作用. 整个计算市场的建立面向任务输入, 由 *Consumer Agent* 接收任务, 选择 *Server Agent*, 自组织求解. 底层计算资源市场通过市场的价格机制调节同一种类以及不同种类 *Server* 间的资源分配, 以达到系统的合理行为. M_0 的平衡是对输入任务序列的自适应.

2 计算资源市场 M_0 平衡

假定 M_0 为一个理想的竞争市场, 符合以下特征:

- (1) 价格既定. 任一参与 M_0 运行的 *Server* 实体不能操纵市场价格, 市场上的买卖者之间独立, 都仅面对一个既定市场价格, 他们的供求总量决定 p_0 .
- (2) 产品同质. 买卖双方行动与对方是谁无关.
- (3) 要素自由. 计算资源 *Resource* 通过买卖可自由在所有 *Server* 之间转移.
- (4) 信息充分. *Server* 充分、及时掌握价格信息, 不会以高于市价购买或低于市价卖出. 理想市场不考虑时间因素, 资源利用最优, 适于理论分析.

下面通过具体分析 *Server* 行为与价格的关系, 确定 M_0 的平衡.

Server 是 M_0 的主体, 效用函数 $U(B, R)$ 给出 *Server* 拥有一定 *Resource* 和任务负载 B 时获得的效用, 决定了 *Server* 的“生产特征”. *Server* 时刻通过计算 $f_s(U, p_0)$ 决定在 M_0 的行动, 以追求 $U + I$ 最大. 行动分为买进、卖出和不动作, 因此 *Server* 不希望 $U + I$ 减小.

设 $x > 0$ $y > 0$ $r > 0$, $+r$ 表示欲购进 r *Resource*, $-r$ 表示欲卖出 r *Resource*, 0 为不买也不卖, 买进或卖出的收益函数为:

$$G_{buy}(r) = U(B, R+r) - U(B, R) - rp_0 \quad (6)$$

$$G_{sell}(-r) = U(B, R-r) - U(B, R) + rp_0$$

设买进 $xResource$ 与卖出 $yResource$ 分别获得买进和卖出的最大收益,即

$$G_{buy}(x) = \max\{G_{buy}(r)\} \tag{7}$$

$$G_{sell}(-y) = \max\{G_{sell}(-r)\}$$

则策略函数可定义为:

$$f_i(U, p_0) = \begin{cases} +x & \text{if } G_{buy}(x) > G_{sell}(-y) > 0 \\ -y & \text{if } G_{sell}(-y) > G_{buy}(x) > 0 \\ 0 & \text{if } G_{buy}(x) = G_{sell}(-y) \text{ or } G_{buy}(x) < 0 \text{ 且 } G_{sell}(-y) < 0 \end{cases} \tag{8}$$

以下3种 $U(B, R)$ 函数代表3种不同的 *Server*, 如图3. (设 $B=10$, 且 $R=10$ 时 U 最大)

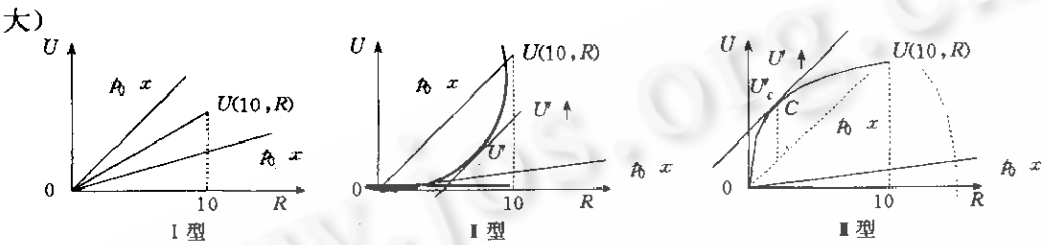


图3 三种 $U(B, R)$ *Server*

I 型: 当价格高于固定的收益率 $U(B, R)$ 的斜率时, 希望全部卖出; 反之, 则尽量买进. 如果 M_0 中全部是 I 型 *Server*, 则买卖不会发生.

II 型: 同 I 型一样, 不是全部买进就是全部卖出, 只是买进或卖出取决于当时状态的收益率 U' .

III 型: 收益率 $U' \in [0, +\infty)$, *Server* 处于 C 状态时

$$f_i(U, p_0) = \begin{cases} +x & x \text{ 满足 } U'c + x = p_0 & \text{if } p_0 < U'c \\ -y & y \text{ 满足 } U'c + y = p_0 & \text{if } p_0 > U'c \\ 0 & & \text{if } p_0 = U'c \end{cases} \tag{9}$$

III 型 *Server* 收益率递减, 收益在资源与任务配置达到一定值时最优. III 型 *Server* 对于价格反应灵活, 以后的讨论将只限于 III 型. 图中的虚线部分表明, 当资源相对任务冗余时, 收益率为负. 实际上, 虚线反映了 *Server* 的“投机”性: 如不对过剩资源加以限制, *Server* 可以通过将冗余资源高价卖出获取利润.

定义1. 任意时刻, M_0 上供求总量相等, 称 M_0 达到平衡.

由于理想市场信息充分原则限制, M_0 市场规则 $RULE_0$ 规定如下:

- (1) M_0 沿时间轴按时间段运行, 一般平衡后进入下一时间段, p_0 初值随意;
- (2) 输入任务仅发生在时间段的最开始处, *Server* 先接受任务, 后在 M_0 行动;
- (3) M_0 不平衡时, 买者多, 涨价; 卖者多, 降价.

引理1. 任一时间段内, p_0 上涨使欲卖出总量增加, 欲买进总量减小; 反之, 欲卖出总量减小, 欲买进总量增加.

证明: III 型 *Server*, 根据(8)式, 无论处于何种状态, 面对确定价格 p_0 , 都有唯一的使效用最大的 $f_i(U, p_0)$, 设状态为 $U(B^*, R^*)$, 则对 $p_0 \in [0, +\infty)$ 有函数 $f_i(U(B^*, R^*), p_0)$, 且 $f_i(U(B^*, R^*), p_0)$ 连续、单调下降, 所以每一个 *Server* 在 p_0 上升时均趋向于卖出; 反之, 趋向买入.

定理1. 任一时间段内(任务输入完), M_0 可达到平衡, 且平衡点唯一.

证明:将所有 *Server* 的 $f_i(U, p_0)$ 函数加总,由于每个 $f_i(U, p_0)$ 连续、单调下降,因此加总函数也连续、单调下降。根据引理,可以找到两点,分别大于 0 和小于 0,表示买入超过卖出和卖出超过买入,又由于单调连续,所以存在零点即平衡点,且平衡点唯一。可以看出,平衡时,*Server* 的效用在 p_0 下最大。

定理 2. 所有 *Server* 的状态不变是保持平衡的充分条件。

状态不变, $U(B, R)$ 不变,有 $f_i(U, p_0)$ 输出不变,因此 M_0 保持平衡。但是,平衡的保持却不要求所有 *Server* 的状态不变。

一个极端的平衡例子为,只具有相同 $U(B, R)$ 且当时状态相同的 2 个 *Server* 的 M_0 市场。如没有外界输入,两人将在无穷时间内都趋向于既不买也不卖。

对于一个任务输入序列 $TASK = (T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, \dots)$, 不计时间延迟,有唯一的描述任务分布的矢量函数 $B(t) = (B_1(t), B_2(t), B_3(t), \dots)$, $B_i(t)$ 为第 i 个 *Server* 的输入任务函数。假设所有 *Server* 的 $U(B, R)$ 函数完全相同,则 M_0 计算资源的最优分配 $R^*(t) = (R_1^*(t), R_2^*(t), \dots, R_i^*(t), \dots)$ ($R_i^*(t)$ 为第 i 个 *Server* 拥有的资源) 满足下列条件:

$$R_1^*(t) + R_2^*(t) + R_3^*(t) + \dots + R_i^*(t) + \dots = Resource \quad (10)$$

$$B(t)/R^*(t) = \text{常数}$$

定义 2. t 时刻 M_0 计算资源的分配与当时最优分配的距离为 $\delta(t) = |R^{**}(t) - R^*(t)|$ $R^{**}(t)$ 与 $R^*(t)$ 为最优分配 $R^*(t)$ 与分配 $R(t)$ 的单位矢量, $\delta(t)$ 为这 2 个单位矢量的距离。

$\delta(t)$ 表明了任意时刻 M_0 市场运行造成的计算资源分配与理想的按比例分配的差异,可作为衡量市场效率的标准。 $\delta(t)$ 与 $U(B, R)$ 函数、*Server* 数量、资源总量等有关,在实际系统中,还与信息延迟有关。

3 产品市场

产品市场联系 *Consumer* 和 *Server* 实体。*Consumer* 的目标是获取收益,但不是通过“生产”,而是起到一种类似“经纪人”的作用。*Consumer* 在面对多个产品市场和其他 *Consumer* 时,可以有复杂的市场行为,如转承包任务等。

实际的产品市场中,*Server* 的生产效率、求解质量、收益率均可以存在差异。质量信息 Q_i 一般是恒定的,价格信息 U_i 反映了 *Server* 的当前状态。

Consumer 选择 *Server* 方式可以有如下几种:(1)重视质量:倾向选择提供较高质量服务的 *Server*。(2)重视价格:倾向于价格较低的服务。(3)固执选择:不管环境变化,始终选择某些 *Server*。(4)根据其他 *Consumer* 行为选择:包括追随他人行动和采取别人相反行动等。

4 模拟实验

根据模型,我们在工作站上编写了模拟程序,进行了以下实验:

(1) M_0 平衡。选择一定数目 *Server*, $U(B, R)$ 函数相同,曲线形状如图 3 ■ 型, $RULE_0$ 为理想市场, $TASK$ 随机分布。限于篇幅,实验数据省略,结论如下:一定时间内可达到平衡,任务多时,平衡价格高;反之价格较低。 δ 的值始终小于 0.15,表明市场效率较高,且当资源紧张时, δ 更小,说明市场的强烈的供求关系导致更加合理的资源分配。还有, p_0 的升降反应

了供需状况,但价格的数值并不精确反映系统状态.

(2)开放环境. 模型的实现必须考虑开放系统问题包括信息延迟和实体、资源变化. 初步的实验得出以下结论:①对市场中的实体,信息延迟在较长时间里有不利影响,模型的 δ 值偏大;②当普遍存在延迟时,市场行为与任务输入之间有一时间差,如 δ 考虑到这种延迟, δ 值就会很小;③实体及资源可动态增减,规模延展性好.

(3)Consumer 行为. Consumer 的选择策略针对不同分布的任务序列有效. 如对短周期性的任务增加,固执性选择 δ 值较小.

5 结 语

本文尝试建立直接的计算市场,通过引入理想市场限制条件,初步分析了实体的行为与市场平衡的关系. 未来工作将集中研究计算市场的动态特性和应用背景.

参考文献

- 1 Hewitt C, Inman J. DAI Betwixt and between: from "intelligent agents" to open systems science. *IEEE Trans. on SMC*, Nov/Dec 1991, **21**(6):1409~1419.
- 2 Hewitt C. Open information systems; semantics for distributed artificial intelligence. *Artificial Intelligence*, 1991, **47**:79~106.
- 3 Olafsson S. A general model for task distribution on an open heterogenous processor system. *IEEE Trans. on SMC*, Jan. 1995, **25**(1):43~58.
- 4 Müller M S, Drexler K E. Markets and computation; agoric open systems. *The Ecology of Computation*, Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland), 1988. 133~173.
- 5 Davis R, Smith R G. Negotiation as metaphor for distributed problem solving. *Artificial Intelligence*, 1983, **20**(1): 63~109.
- 6 Sandholm T. An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations. *Proc. of AAAI-93*, 1993. 256~262.
- 7 Wellman M P. A general-equilibrium approach to distributed transportation planning. *Proc. of AAAI-92*, 1992. 282~289.
- 8 石纯一等. 面向篇章理解的多智能体系统 MAS/TH3. *计算机学报*.

A MULTI-AGENT COMPUTATIONAL MARKET MODEL

Hu Jun Wang Kehong Kang Xiaoqiang Shi Chunyi

(Department of Computer Science Tsinghua University Beijing 100080)

Abstract A quantity model of multi-agent computational market is presented. The authors define computational market, task, Consumer and Server entity, prove there exists an equilibrium in the market, and use the distance from the optimal allocation of computing resources as the criteria of the market proficiency.

Key words Multi-agent, distributed artificial intelligence, computational market.