

多 Agent 系统问题求解的广义粒子模型方法

帅典勋 王 兴 冯 翔

(华东理工大学计算机科学与工程系 上海 200237)

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100080)

摘 要 提出一种多 Agent 系统分布式问题求解的新的广义粒子模型,将复杂环境下多 Agent 系统资源分配和任务规划的优化问题转变为广义粒子模型中的粒子运动学和动力学问题.广义粒子模型可以描述和处理的复杂环境包括多 Agent 系统中的 Agent 之间存在的随机、并发、多类型的交互行为.各 Agent 有不同的个性、自治性、生命周期、拥塞程度和故障几率等.本文讨论了广义粒子模型和多 Agent 系统分布式问题求解的关系,提出了广义粒子模型的数学物理模型和多 Agent 系统分布式问题求解算法,并且证明了它们的正确性、收敛性、稳定平衡性等基本性质.通过复杂环境下多 Agent 系统资源分配和任务规划问题的实验和比较,证实了广义粒子模型方法的有效性及其特点.

关键词 多 Agent 系统;资源分配和任务规划;分布式问题求解;动力学系统;广义粒子模型

中图法分类号 TP18

A Generalized Particle Model For Problem-Solving in Multi-Agent Systems

SHUAI Dian-Xun WANG Xing FENG Xiang

(Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

(State Key Laboratory of Intelligence Technology and System, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract This paper is devoted to a novel generalized particle model (GPM) approach to distributed problem-solving in MAS, which transforms the optimization problem of resource assignments and task allocations of MAS in complex environment into the kinematics and dynamics in GPM. The complex environment in MAS that the proposed GPM approach may deal with includes: A variety of interactions randomly and concurrently occurring among agents; different personality and autonomy of distinct agents; different life-cycle period, congestion degree and failure rate for distinct entities in MAS. At first, the relation between the GPM and MAS in the context of distributed problem-solving is expatiated. Then the mathematical-physical formalization for GPM and the parallel algorithm GPMA are presented. The basic properties of the GPMA algorithm, including the feasibility, convergency and stability, are discussed. Through a number of simulation experiments and comparisons related to resource assignments and task allocations in MAS in complex environment, the authors demonstrate many advantages of the proposed GPM approach over other coalition methods for MAS problem-solving in terms of the parallelism and the suitability for complex environment.

Keywords multi-agent systems; resource assignments and task allocations; distributed problem-solving; dynamical systems; generalized particle model

1 引言

分布式人工智能 (Distributed Artificial Intelligence, DAI) 中多 Agent 系统 (Multi-Agent Systems, MAS) 问题求解方法基本上有两种类型^[1,2]: 一种类型是各 Agent 共同寻求整个系统的最大效益, 另一种类型是各 Agent 各自寻求自身的最大利益. 两种类型都涉及 Agent 间的结盟、合作和交互, 但是后者没有全局控制, 没有全局一致性知识, 也可以没有全局的优化目标. 以联合意图框架 (joint intention framework)^[3,4] 为代表的问题求解策略是先结盟再规划求解, Agent 之间协作的不确定性比较大; 而基于共享规划或者部分全局规划 (partial global planning)^[5] 的问题求解策略是先对问题进行规划, 然后 Agent 按照规划采取或者调整其协调行动, 这种求解策略的协作比较松散, 缺乏必要的意外处理机制及手段. 基于弹簧网络的多 Agent 系统问题求解方法^[6~9], 通过自组织动力学策略, Agent 之间的协调过程和 MAS 的问题求解过程密不可分.

目前多 Agent 系统问题求解的模型和方法^[10~18] 普遍存在着以下问题和局限性:

(1) MAS 中各 Agent 各自寻求自身最大利益的问题求解方法实际上是将 Agent 个体都看作是自私的. 而各 Agent 共同寻求整个系统的最大效益的问题求解方法实际上是将 Agent 个体都看作是无私的. 其实这只是两种简单化的极端情况. 应该考虑 Agent 个体的双重性, 即既希望获取自身的最大利益, 又需要促进系统的总体利益, 这种双重性的程度因 Agent 个体而异. 在这种意义下, 不同的 Agent 个体可以表现出不同程度的个性和自治性.

(2) MAS 中 Agent 之间的协调仅限于一些比较简单的社会交互行为, 只涉及交互双方都能意识到的双向的协调行为. 实际上, 在 Agent 之间存在着许多复杂的社会行为, 其中包括单向的、没能意识到的社会行为, 它们很大程度上影响到多 Agent 系统的问题求解.

(3) 当前的符号逻辑方法, 其协同机制的局限很

大, 难以描述社会行为的随机性和并发性, 难以区分 Agent 个体的社会行为和非社会行为, 未深入到社会智能的本质特征, 而且, 只能处理合作、竞争等少数较简单的社会行为. 符号逻辑方法基本上是串行的或者小规模并行的, 不适于实时性要求高的问题求解.

(4) 目前大多数多 Agent 系统分布式问题求解模型难以描述相变现象、自组织现象和量变到质变现象, 在问题求解过程中不能及时处理环境和 Agent 本身的动态变化, 例如涉及 Agent 生命周期、新陈代谢、负载程度和随机故障等情况.

为了克服上述的问题和局限性, 本文提出一种新的广义粒子模型, 将多 Agent 系统分布式问题求解转化为广义粒子模型的运动学和动力学演化过程. 广义粒子模型可以刻画 Agent 个体不同的个性和自治性, 可以表示 Agent 之间中许多复杂的、随机的、并发的社会交互和社会协调行为, 能够描述多 Agent 系统中产生的相变、自组织和量变到质变现象, 能够处理环境的随机性变化, 而且, 广义粒子模型具有高度的并行性和通用性, 其模型、方法、算法基本上与问题的规模无关, 便于用 VLSI 的 Systolic 阵列硬件实现.

2 多 Agent 系统问题求解的广义粒子模型

不失一般性, 我们通过 MAS 中的分布式资源分配和任务规划问题, 讨论并建立相应的广义粒子模型. 在时段 τ , 设有任务 Agent 的集合 $\mathcal{G}(\tau) = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$ 和资源 Agent 的集合 $\mathcal{A}(\tau) = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. 在时段 τ 中的时刻 t , 资源 Agent A_i 给任务 Agent G_k 分配资源 $a_{ik}(t)$, 同时任务 Agent G_k 付给资源 Agent A_i 单位资源报酬 $p_{ik}(t)$. A_i 关于 G_k 的意图强度 $\zeta_{ik}(t)$ 与 Agent 之间的交互性有关, $\zeta_{ik}(t)$ 越大, 那么越有可能增加资源分配量 $a_{ik}(t)$ 和单位资源报酬 $p_{ik}(t)$. 这样, 我们得到一个如表 1 所示的分配矩阵 $\mathbf{S}(t) = [s_{ik}(t)]_{n \times m}$, 其中 $s_{ij}(t) = \langle a_{ij}(t), p_{ij}(t), \zeta_{ij}(t) \rangle$.

表 1 MAS 中资源分配和任务规划问题的分配矩阵

	G_1	...	G_j	...	G_m
A_1	$a_{11}(t), p_{11}(t), \zeta_{11}(t)$	...	$a_{1j}(t), p_{1j}(t), \zeta_{1j}(t)$	...	$a_{1m}(t), p_{1m}(t), \zeta_{1m}(t)$
...
A_i	$a_{i1}(t), p_{i1}(t), \zeta_{i1}(t)$	...	$a_{ij}(t), p_{ij}(t), \zeta_{ij}(t)$	...	$a_{im}(t), p_{im}(t), \zeta_{im}(t)$
...
A_n	$a_{n1}(t), p_{n1}(t), \zeta_{n1}(t)$	...	$a_{nj}(t), p_{nj}(t), \zeta_{nj}(t)$	...	$a_{nm}(t), p_{nm}(t), \zeta_{nm}(t)$

在时段 τ 中的时刻 t , MAS 的系统状态可以表示为表 2 所示的增广矩阵 $\pi(t, \tau)$. 其中,除了分配矩阵 $\mathcal{S}(t)$ 以外,还涉及三个相关矩阵 $\mathcal{D}(\tau)$, $\mathcal{H}(\tau)$, $\mathcal{C}(\tau)$. 他们分别表示任务 Agent 之间、资源 Agent 之间、任务 Agent 和资源 Agent 之间的相关性和依赖性,例如,对于 $\mathcal{G}(\tau) \times \mathcal{G}(\tau)$ 上的矩阵 $\mathcal{D}(\tau) = [d_{ij}] \in \{0, 1\}^{m \times m}$, $d_{ij} = 1$ 当且仅当任务 Agent G_i 依赖于任务 Agent G_j ; 对于 $\mathcal{A}(\tau) \times \mathcal{A}(\tau)$ 上的矩阵 $\mathcal{H}(\tau) = [h_{ij}] \in \{0, 1\}^{n \times n}$, $h_{ij} = 1$ 当且仅当资源 Agent A_i 与资源 Agent A_j 存在交互; 对于 $\mathcal{G}(\tau) \times \mathcal{A}(\tau)$ 上的矩阵 $\mathcal{C}(\tau) = [c_{ij}] \in \{0, 1\}^{m \times n}$, $c_{ij} = 1$ 当且仅当任务 Agent G_i 涉及资源 Agent A_j . 我们假定, $\pi(t, \tau)$ 中相关矩阵 $\mathcal{H}(\tau)$, $\mathcal{D}(\tau)$, $\mathcal{C}(\tau)$ 随 τ 而变化,而对于给定的 τ , 资源分配矩阵 $\mathcal{S}(t)$ 随 t 而变化. 因此, MAS 中资源分配和任务规划的问题描述可以形式化为: 对于时段 τ 给定的相关矩阵 $\mathcal{D}(\tau)$, $\mathcal{H}(\tau)$, $\mathcal{C}(\tau)$, 考虑 Agent 的交互性、自治性等因素, 分布并行地求出优化的分配矩阵 $\mathcal{S}(t)$.

表 2 在时段 τ 中的时刻 t , 描述 MAS 的系统状态的增广矩阵 $\pi(t, \tau)$

	$\mathcal{G}(\tau)$ $1 \times m$	$\mathcal{A}(\tau)$ $1 \times n$
$\mathcal{A}(\tau)$ $n \times 1$	$\mathcal{S}(t)$ $n \times m$	$\mathcal{H}(\tau) \in \{0, 1\}^{n \times n}$
$\mathcal{G}(\tau)$ $m \times 1$	$\mathcal{D}(\tau) \in \{0, 1\}^{m \times m}$	$\mathcal{C}(\tau) \in \{0, 1\}^{m \times n}$

广义粒子模型将 MAS 问题求解过程转化为引力场内粒子的运动学和动力学演化过程和自组织过程. 如图 1 所示, 对于分配矩阵 \mathcal{S} 中每一个元素 s_{ik} , 在广义粒子模型中有且仅有一个粒子与它对应, 为方便起见, 该粒子也记为 s_{ik} . 对于 MAS 中的任务 Agent G_k , 如果资源 Agent A_i 与资源 Agent A_j 结盟, 则在广义粒子模型中粒子 s_{ik} 和 s_{jk} 聚合成一个宏粒子, 记为 $[s_{ik}, s_{jk}]$. 对于多 MAS 中的资源

Agent A_k , 如果任务 Agent G_i 与任务 Agent G_j 结盟, 则在广义粒子模型中粒子 s_{ki} 和 s_{kj} 聚合成一个宏粒子, 记为 $[s_{ki}, s_{kj}]$, 而且, 小粒度的宏粒子可以聚合成粒度更大的宏粒子. 粒子或者宏粒子之间不同的相互作用力表示 MAS 中 Agent 之间不同的社会交互行为. 不同粒子或者宏粒子的自主驱动力表示 MAS 中不同 Agent 或者 Agent 群体的自治性. 引力场本身对于粒子或者宏粒子产生的引力表示 MAS 中各 Agent 或者 Agent 群体追求系统整体利益最大化的行为. 粒子和宏粒子在上述多种力的合力的作用下, 按照设定的粒子运动学和动力学方程, 同时进行运动和演化. 当这种演化过程收敛达到稳定平衡状态, 它就对应于 MAS 问题的优化解.

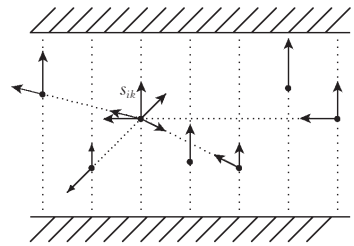
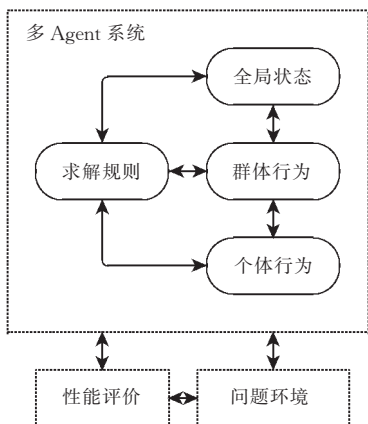
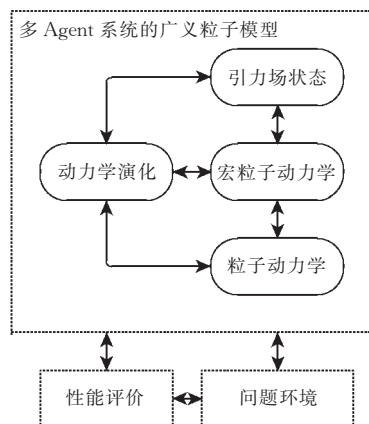


图 1 MAS 资源分配和任务规划问题的广义粒子模型 (上下边界之间的区域为引力场 F , 粒子或者宏粒子之间存在不同的相互作用力)

MAS 问题求解的功能模块包括 6 个部分, 它们与广义粒子模型之间的对应关系如图 2 所示. 粒子模型的动力学演化和自组织过程用于实现 MAS 的“求解规划”模块的功能; 广义粒子模型的“问题环境”模块包括问题求解过程中可能出现的随机性、突发性等复杂情况, 例如 Agent 的新陈代谢、行为变异、随机故障、过载拥塞等; 广义粒子模型的“性能评价”模块除了评价解的优化程度以外, 还包括自组织动力学过程的收敛性、稳定性、灵敏性等.



(a) 通常的多 Agent 系统问题求解的功能结构



(b) 基于广义粒子模型的多 Agent 系统问题求解的功能结构

图 2 多 Agent 系统分布式问题求解的功能模型的对比

注释 1.

1) 意图强度 $\zeta_{ik}(t)$ 的计算. 我们在文献[19~22]中讨论了 MAS 中 Agent 之间典型的社会交互行为及其形式化方法, 其中包括竞争、合作、规避、利用、投靠、诱导、欺骗、偏好、对抗、报答、妥协等许多不同类型, 而且考虑到了单向的、自发的社会交互行为. 文献[10~13]将社会交互行为分为 4 大类别: $\mathcal{L}^{(01)}$, $\mathcal{L}^{(00)}$, $\mathcal{L}^{(10)}$ 和 $\mathcal{L}^{(11)}$. 计算资源 Agent A_i 对任务 Agent G_k 的在时刻 t 的意图强度 $\zeta_{ik}(t)$ 时, 需要考虑下面几种情况: 对于任务 Agent G_k , 资源 Agent A_i 产生与资源 Agent A_j 的交互行为 β_{ijk} ; 资源 Agent A_j 产生与资源 Agent A_i 的交互行为 β_{jik} ; 对于资源 Agent A_i , 任务 Agent G_k 产生与任务 Agent G_j 的交互行为 β'_{kji} ; 任务 Agent G_j 产生与任务 Agent G_k 的交互行为 β'_{jki} . 假定这些交互行为产生的效果是加性的 (Addition), 于是我们有

$$\zeta_{ik}(t) = \sum_{h_{ij}=1, c_{ki}=1, c_{kj}=1} \zeta_{ijk}(t) + \sum_{h_{ji}=1, c_{ki}=1, c_{kj}=1} \zeta_{jik}(t) + \sum_{d_{kj}=1, c_{ki}=1, c_{ji}=1} \zeta'_{kji}(t) + \sum_{d_{jk}=1, c_{ki}=1, c_{ji}=1} \zeta'_{jki}(t) \quad (1)$$

其中,

$$\zeta_{ijk}(t) = \begin{cases} \zeta, & \beta_{ijk} \in \mathcal{L}^{(01)} \cup \mathcal{L}^{(00)} \\ -\zeta, & \beta_{ijk} \in \mathcal{L}^{(10)} \cup \mathcal{L}^{(11)} \end{cases} \quad (2)$$

$$\zeta'_{kji}(t) = \begin{cases} \zeta, & \beta'_{kji} \in \mathcal{L}^{(01)} \cup \mathcal{L}^{(00)} \\ -\zeta, & \beta'_{kji} \in \mathcal{L}^{(10)} \cup \mathcal{L}^{(11)} \end{cases} \quad (3)$$

ζ 是正的小数.

式(1)~(3)的含义解释如下: 对于任务 Agent G_k , 交互行为 β_{ijk} 如果属于 $\mathcal{L}^{(01)}$ 或者 $\mathcal{L}^{(00)}$, 则表示资源 Agent A_i 对于资源 Agent A_j 的交互行为将加强 Agent A_i 关于任务 Agent G_k 的意图强度. 但是, 如果 β_{ijk} 属于 $\mathcal{L}^{(10)}$ 或者 $\mathcal{L}^{(11)}$, 则表示该交互行为将削弱 Agent A_i 关于任务 Agent G_k 的意图强度. 另外, 交互行为 β_{jik} 如果属于 $\mathcal{L}^{(10)}$ 或者 $\mathcal{L}^{(00)}$, 则表示资源 Agent A_j 对于资源 Agent A_i 的交互行为将加强资源 Agent A_i 关于任务 Agent G_k 的意图强度; 否则, 交互行为 β_{jik} 将削弱资源 Agent A_i 关于任务 Agent G_k 的意图强度. 同样地, 可以解释式(3). 为了简单起见, 这里我们假定 Agent 两两之间的各交互行为对意图强度的削弱或者加强程度都等于 ζ .

2) 与通常物理学粒子模型的差别. 本文的广义粒子模型在以下 5 个方面不同于通常的物理学粒子

模型: (1) 广义粒子模型中的粒子自身具有一定的自主驱动力, 以表示 Agent 的不同程度的自治性. (2) 广义粒子模型中粒子除了具有速度、加速度、动量、动能、势能等状态参数外, 还像神经元或者化学元素一样具有自身的活性, 并映射为粒子的动力学状态, 以表示 Agent 的个性和理性程度. (3) 广义粒子模型中粒子的活性程度 (动力学状态) 是它所受到的激励程度的分段线性函数, 以获得粒子动力学状态的稳定平衡点. (4) 广义粒子模型中各粒子所受到的激励程度, 又与各 Agent 的目标和意图有关, 以实现基于群体智能的 MAS 问题的多目标优化. (5) 广义粒子模型中粒子之间存在多种类型的相互作用力, 其中包括单方向的、非对称的、非线性的相互作用力, 以表示 Agent 之间复杂的社会交互行为.

3 广义粒子模型的数学物理模型和算法

3.1 模型

设 MAS 有 m 个资源 Agent 和 n 个任务 Agent, 广义粒子模型中的粒子 s_{ik} 对应于表 1 的分配矩阵 \mathcal{S} 中的元素 s_{ik} . 广义粒子模型中有 $m \times n$ 个基本粒子. 在时间段 τ , 广义粒子模型中粒子的运动学和动力学模型定义如下.

定义 1. 粒子 s_{ik} 在时刻 t 的效益 $u_{ik}(t)$ 定义为 $p_{ik}(t)$ 和 $a_{ik}(t)$ 的连续可微的严格凹函数:

$$u_{ik}(t) = \alpha_{ik} [\exp(-p_* a_*) - \exp[-(p_{ik}(t) + p_*)(a_{ik}(t) + a_*)]] \quad (4)$$

所有粒子的总效益函数 $J(t)$ 定义为

$$J(t) = \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m u_{ik}(t) \quad (5)$$

其中, p_* 和 a_* 都是正的偏置常数, 它们与任务 Agent 和资源 Agent 在时间段 τ 的拥塞、代谢、故障、优先级等因素有关; $0 < \alpha_{ik}, \alpha < 1$; 不失一般性, 我们假定 p_*, p_{ik}, a_* 和 a_{ik} 都规格化为 $[0, 1]$ 中的数.

定义 2. 在时刻 t , 力场 F 本身对粒子的向上引力产生的势能函数 $P(t)$ 定义为

$$P(t) = \epsilon^2 \ln \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp(-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2) - \epsilon^2 \ln mn, \quad 0 < \epsilon < 1 \quad (6)$$

定义 3. 在时刻 t , 粒子之间的相互作用力产生的势能函数 $Q(t)$ 定义为

$$Q(t) = \xi_1 \sum_{i=1}^n \left| \sum_{k=1}^m a_{ik}(t) - r_i(\tau) \right|^2 + \xi_2 \sum_{k=1}^m \left| \sum_{i=1}^n a_{ik}(t) - d_k(\tau) \right|^2 -$$

$$\sum_{i,k} \int_0^{u_{ik}} \{ [1 + \exp(-\zeta_{ik}x)]^{-1} - 0.5 \} dx \quad (7)$$

其中, $0 < \xi_1, \xi_2 < 1$, r_i 是资源 Agent A_i 在时间段 τ 拥有的资源, d_k 是任务 Agent G_k 在时间段 τ 需求的资源. 意图强度 ζ_{ik} 由式(1)决定.

定义 4. 粒子 s_{ik} 在时刻 t 的混合能量函数 $\Gamma_{ik}(t)$ 定义为

$$\Gamma_{ik}(t) = -\lambda_{ik}^{(1)} u_{ik}(t) - \lambda_{ik}^{(2)} J(t) + \lambda_{ik}^{(3)} P(t) + \lambda_{ik}^{(4)} Q(t) \quad (8)$$

其中, $0 < \lambda_{ik}^{(1)}, \lambda_{ik}^{(2)}, \lambda_{ik}^{(3)}, \lambda_{ik}^{(4)} \leq 1$.

定义 5. 设坐标原点位于引力场的上下边界的中心线上, $q_{ik}(t)$ 为粒子 s_{ik} 在时刻 t 的垂直坐标. 粒子 s_{ik} 的运动学和动力学方程定义为

$$\begin{cases} dq_{ik}(t)/dt = \Psi_{ik}^{(1)}(t) + \Psi_{ik}^{(2)}(t) & (9) \\ \Psi_{ik}^{(1)}(t) = -q_{ik}(t) + \gamma v_{ik}(t) & (9a) \\ \Psi_{ik}^{(2)}(t) = I_{ik} + \sum_{j=1}^m \omega_{jk} u_{jk}(t) + \sum_{j=1}^n \omega_{ij} u_{ij}(t) & (9b) \end{cases}$$

其中, $\gamma > 1$; I_{ik} 为偏置常数; ω_{jk} 为粒子 s_{ik} 和粒子 s_{jk} 的关联权值, ω_{ij} 为粒子 s_{ik} 和粒子 s_{ij} 的关联权值, 它们分别表示这些粒子之间的聚合程度, 在 $[-1, +1]$ 之间取值. $v_{ik}(t)$ 表示粒子 s_{ik} 的动力学状态, 它是 $q_{ik}(t)$ 的分段线性函数, 定义为

$$v_{ik}(t) = \begin{cases} 0, & q_{ik}(t) < 0 \\ q_{ik}(t), & 0 \leq q_{ik}(t) \leq 1 \\ 1, & q_{ik}(t) > 1 \end{cases} \quad (10)$$

3.2 广义粒子模型算法(GPMA)

在时间段 τ , 已知 m 个任务 Agent $\mathcal{G}(\tau) = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$, n 个资源 Agent $\mathcal{A}(\tau) = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 资源 Agent A_i 拥有的资源容量为 $r_i(\tau)$. 任务 Agent G_k 的资源需求为 $d_k(\tau)$. 基于广义粒子模型的 MAS 问题求解的分布并行算法如下:

1. 在初始时刻 t_0 , 并行设定各粒子 s_{ik} 的资源分配量 $a_{ik}(t_0)$ 和单位资源价格 $p_{ik}(t_0)$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $k \in \{1, 2, \dots, m\}$.

2. 根据各个 Agent 的个性和自治性, 并行选择和决定式(8)和各粒子动力学方程中的参数.

3. 按照式(4)并行计算时刻 t 力场 F 中各粒子 s_{ik} 的效益 $u_{ik}(t)$.

4. 按照式(9)并行计算时刻 t 力场 F 中各粒子 s_{ik} 的运动速度 $dq_{ik}(t)/dt$.

5. 如果时刻 t 所有粒子都达到平衡状态, 即 $dq_{ik}(t)/dt = 0$, 则算法成功结束. 否则, 由 $a_{ik}(t)$, $p_{ik}(t)$ 和 $\zeta_{ik}(t)$, 各粒子 s_{ik} 分别按照下式计算 $dp_{ik}(t)/dt$ 和 $dq_{ik}(t)/dt$:

$$dp_{ik}(t)/dt = \lambda_{ik}^{(1)} \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} + \lambda_{ik}^{(2)} \frac{\partial J(t)}{\partial p_{ik}(t)} - \lambda_{ik}^{(3)} \frac{\partial P(t)}{\partial p_{ik}(t)} - \lambda_{ik}^{(4)} \frac{\partial Q(t)}{\partial p_{ik}(t)} + \lambda_{ik}^{(5)} q_{ik}(t) \quad (11)$$

$$da_{ik}(t)/dt = \lambda_{ik}^{(1)} \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} + \lambda_{ik}^{(2)} \frac{\partial J(t)}{\partial a_{ik}(t)} - \lambda_{ik}^{(3)} \frac{\partial P(t)}{\partial a_{ik}(t)} - \lambda_{ik}^{(4)} \frac{\partial Q(t)}{\partial a_{ik}(t)} + \lambda_{ik}^{(5)} q_{ik}(t) \quad (12)$$

其中, $0 < \lambda_{ik}^{(5)} \leq 1$.

6. 各粒子 s_{ik} 并行计算

$$q_{ik}(t + \Delta t) = q_{ik}(t) + \frac{dq_{ik}(t)}{dt} \Delta t,$$

$$p_{ik}(t + \Delta t) = p_{ik}(t) + \frac{dp_{ik}(t)}{dt} \Delta t,$$

$$a_{ik}(t + \Delta t) = a_{ik}(t) + \frac{da_{ik}(t)}{dt} \Delta t,$$

然后转步 3.

注释 2.

1) 我们将证明: 式(6)表示的引力场 F 产生的势能函数 $P(t)$ 就是时刻 t 关于任一资源 Agent 和任一任务 Agent 的最小效益. 式(7)表示的势能函数 $Q(t)$, 其第一和第二项分别表示资源 Agent 的资源利用率和任务 Agent 的需求满足率, 第三项表示 Agent 间的社会交互行为. 由于资源利用率、需求满足率和 Agent 间的社会交互都涉及 Agent 相互之间的利害关系, 因此, 广义粒子模型中它们都表现为粒子之间的相互作用力, 用势能函数 $Q(t)$ 进行描述. $\varphi(t) = \left. \frac{\partial Q(t)}{\partial u_{ik}(t)} \right|_{a_{ik}, p_{ik}} = \{ [1 + \exp(-\zeta_{ik}(t) u_{ik}(t))]^{-1} - 0.5 \}$ 是意图强度 $\zeta_{ik}(t)$ 的 Sigmoid 函数. 如果 $\zeta_{ik}(t)$ 越大, 则 $\varphi(t)$ 越大, 随后我们可以看到, 它力图增加效益 $u_{ik}(t)$, 即此时的社会交互行为的作用是使资源 Agent A_i 和任务 Agent G_k 强化其资源分配 $a_{ik}(t)$ 和单位资源报酬 $p_{ik}(t)$.

2) 式(8)表示的混合能量函数 $\Gamma_{ik}(t)$ 中的系数 $\lambda_{ik}^{(1)}, \lambda_{ik}^{(2)}, \lambda_{ik}^{(3)}, \lambda_{ik}^{(4)}$ 分别刻画粒子 s_{ik} 对于它自身效益、全局效益、粒子的最小个体效益、资源利用率、需求满足率、粒子间交互的关注程度, 也就是说, 它刻画了一个资源 Agent 关于一个任务 Agent 的自治性和个性. 式(9b)中的关联权值系数 ω_{ij} 和 ω_{jk} 分别描述相应的 Agent 之间的结盟强度, 即表 1 中同行和同列元素对应的粒子之间的聚合强度.

3) 因为

$$\frac{du_{ik}(t)}{dt} = \left. \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} \right|_{p_{ik}} \frac{da_{ik}(t)}{dt} + \left. \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} \right|_{a_{ik}} \frac{dp_{ik}(t)}{dt},$$

广义粒子模型算法 GPMA 实际上是计算联立微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dq_{ik}(t)}{dt} = f_1(q_{ik}(t), u_{ik}(t), a_{ik}(t), p_{ik}(t)) \\ \frac{du_{ik}(t)}{dt} = \begin{cases} f_2(q_{ik}(t), u_{ik}(t), a_{ik}(t), p_{ik}(t)), \\ dq_{ik}(t)/dt \neq 0; \\ 0, dq_{ik}(t)/dt = 0; \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

其中 f_1 和 f_2 是由式(9), (11), (12) 得到的关于 $q_{ik}(t), u_{ik}(t), a_{ik}(t), p_{ik}(t)$ 的函数. 我们将证明, 联立微分方程(13) 能够收敛到稳定平衡状态, 从而得到 MAS 资源分配和任务规划的优化解.

4) 广义粒子模型算法 GPMA 的粒子个数的复杂性为 $O(m \times n)$, 其中 m 和 n 分别为任务 Agent 和资源 Agent 的个数. 引力场 F 中所有粒子的运动学和动力学过程的计算是并行的. 算法的计算时间复杂性取决于力场粒子都达到平衡状态时, 算法并行步 3 和并行步 4 的迭代次数. 式(11)和式(12)的计算可以并行进行, 也可以交替进行, 或者二者以不同的频度进行. 实际上, 如果由资源 Agent A_i 决定对于任务 Agent G_k 资源分配值 $a_{ik}(t)$, 而由任务 Agent G_k 决定对资源 Agent A_i 的单位资源价格值 $p_{ik}(t)$, 则可以交替计算式(11)和式(12); 如果 $p_{ik}(t)$ 和 $a_{ik}(t)$ 是由资源 Agent A_i 和任务 Agent G_k 协商决定, 则可以并行计算式(11)和式(12).

4 广义粒子模型和算法的性质

广义粒子模型和算法的基本性质包括其可行性、收敛性和稳定平衡性, 可概括为下面的几个定理.

引理 1. 式(11)和式(12)的第一项和第二项将促使粒子 s_{ik} 单调地增加其个体效益 u_{ik} , 增加程度与 $(\lambda_{ik}^{(1)} + \alpha\lambda_{ik}^{(2)})$ 成正比.

证明. $\left\langle \frac{dp_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_j$ 和 $\left\langle \frac{da_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_j$ 表示式(11)和式(12)的第 j 项. 则 $\left\langle \frac{dp_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_1$ 和 $\left\langle \frac{da_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_1$ 使粒子 s_{ik} 的个体效益 u_{ik} 有变化率

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{du_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_1 &= \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} \left\langle \frac{dp_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_1 + \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} \left\langle \frac{da_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_1 \\ &= \lambda_{ik}^{(1)} \left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} \right)^2 + \lambda_{ik}^{(1)} \left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} \right)^2 \\ &= \lambda_{ik}^{(1)} \left[\left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} \right)^2 \right] \geq 0; \end{aligned}$$

类似地, $\left\langle \frac{dp_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_2$ 和 $\left\langle \frac{da_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_2$ 使粒子 s_{ik} 的个体效益 u_{ik} 有变化率

$$\left\langle \frac{du_{ik}(t)}{dt} \right\rangle_2 = \alpha\lambda_{ik}^{(2)} \left[\left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial p_{ik}(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial a_{ik}(t)} \right)^2 \right] \geq 0.$$

引理 2. 式(11)和式(12)的第二项将促使粒子 s_{ik} 单调地增加总效益函数 $J(t)$, 增加程度与 $\alpha\lambda_{ik}^{(2)}$ 成正比.

证明. 类似于引理 1 的证明.

引理 3. 当式(6)中的参数 ϵ 很小时, 减小引力场势能函数 $P(t)$, 意味着增加最小个体效益 $\min_{i,k}\{u_{ik}(t)\}$.

证明. 设 $H(t) = \max_{i,k}\{-u_{ik}^2(t)\}$, 则有

$$\begin{aligned} \left[\exp\left(\frac{H(t)}{2\epsilon^2}\right) \right]^{2\epsilon^2} &\leq \left[\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp\left(\frac{-u_{ik}^2(t)}{2\epsilon^2}\right) \right]^{2\epsilon^2} \\ &\leq \left[mn \exp\left(\frac{H(t)}{2\epsilon^2}\right) \right]^{2\epsilon^2}, \end{aligned}$$

上述不等式取对数后得

$$\begin{aligned} H(t) &\leq 2\epsilon^2 \ln \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp(-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2) \\ &\leq H(t) + 2\epsilon^2 \ln mn, \end{aligned}$$

其中 mn 是常数, 当参数 ϵ 很小时, 得到

$$\begin{aligned} H(t) &\approx 2\epsilon^2 \ln \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp(-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2) - 2\epsilon^2 \ln mn \\ &= 2P(t). \end{aligned}$$

因此, 势能函数 $P(t)$ 取决于最小个体效益 $\min_{i,k}\{u_{ik}(t)\}$. 减小引力场势能函数 $P(t)$, 意味着增加最小的个体效益 $\min_{i,k}\{u_{ik}(t)\}$. 证毕.

引理 4. 式(11)和式(12)的第三项将促使粒子 s_{ik} 单调地增加最小个体效益 $\min_{i,k}\{u_{ik}(t)\}$, 增加程度与系数 $\lambda_{ik}^{(3)} \omega_{ik}^2(t)$ 成正比, 这里 $\omega_{ik}(t) = \exp(-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2) / \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp(-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2)$.

证明. 类似于引理 1 的证明, 并且根据引理 3 可得证.

引理 5. 式(11)和式(12)的第四项将促使粒子 s_{ik} 单调地减少交互势能函数 $Q(t)$, 减少程度与系数 $\lambda_{ik}^{(4)}$ 成正比.

证明. 类似于引理 1 的证明.

定理 1. 式(11)和式(12)将促使粒子 s_{ik} 单调地减少其混合能量函数 $\Gamma_{ik}(t)$.

证明. 由引理 1 至引理 5 可得证.

定理 2. 广义粒子模型和算法适合于复杂环境下 MAS 问题求解, 复杂环境包括: MAS 中各 Agent 有不同的个性和自治性; Agent 之间存在随机的、并发的、多种类型的交互性; 各 Agent 有不同的可用性(代谢、拥塞、故障、优先度等).

证明. 由引理 1 至引理 5 和定理 1 可得证.

引理 6. 设 $\gamma - 1 > -\Psi_{ik}^{(2)}(t) > 0$ 成立. 如果当 $q_{ik}(t) < 0$ 和 $q_{ik}(t) > 1$ 时, 有 $\frac{\partial \Psi_{ik}^{(2)}(t)}{\partial q_{ik}(t)} < 1$, 而且当 $0 < q_{ik}(t) < 1$ 时, 有 $\frac{\partial \Psi_{ik}^{(2)}(t)}{\partial q_{ik}(t)} \geq 1 - \gamma$, 则粒子 s_{ik} 存在

稳定平衡点: $q_{ik}(t) < 0, v_{ik}(t) = 0$ 或者 $q_{ik}(t) > 1, v_{ik}(t) = 1$.

证明. 当 $\gamma > 1$ 时, 由式(9a)得到 $\Psi_{ik}^{(1)}(t)$ 与 $q_{ik}(t)$ 的关系, 它包括图 3 中的三个开线段: I, II 和 III 以及两个点 c_1 和 c_3 , 其中 c_1 和 c_3 不包括在 I, II 和 III 中. 由式(9), 对于任何平衡点 $dq_{ik}(t)/dt = 0$, 当且仅当 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t) = \Psi_{ik}^{(1)}(t)$. 因此, 当 $\gamma - 1 > -\Psi_{ik}^{(2)}(t) > 0$ 时, 平衡点可能位于 I, II 和 III 上, 但不可能位于点 c_1 和 c_3 上.

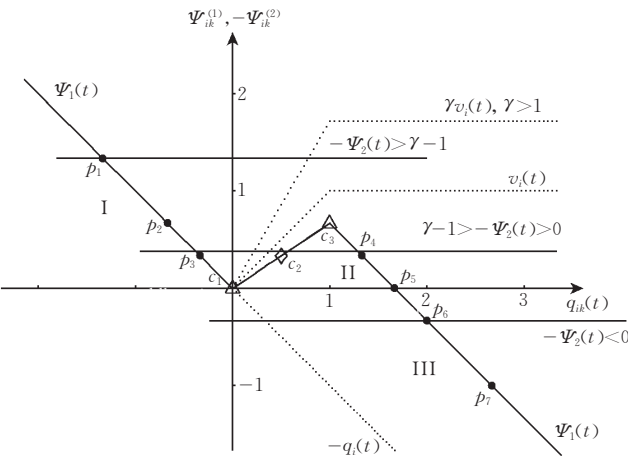


图 3 当 $\gamma > 1$ 时, 粒子 s_{ik} 的动力学状态 $v_{ik}(t)$ 可能达到的平衡点 ($\Psi_{ik}^{(1)}(t)$ 与 $q_{ik}(t)$ 的关系为分段线性函数, 由线段 I、线段 II、线段 III 和点 c_1, c_3 组成. $\Psi_{ik}^{(1)}(t) = -\Psi_{ik}^{(2)}(t)$ 的点为平衡点. 其中, \bullet 表示稳定平衡点, \triangle 表示鞍点, \diamond 表示不稳定平衡点)

设 t_0 时刻粒子 s_{ik} 的平衡点在 III 或者 I 上, 即 $\left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_0} = 0$, 而且在时刻 t_1 , 围绕该平衡点产生一个

任意小的扰动 Δq_{ik} . 由 $\frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} = -1$ 以及由给定条件:

当 $q_{ik}(t) < 0$ 和 $q_{ik}(t) > 1$ 时, $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} < 1$ 成立,

我们有 $c = \left[\frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} + \frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} \right] < 0$. 于是,

$$\begin{aligned} \Delta \frac{dq_{ik}}{dt} &= \left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_1} - \left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_0} \\ &= [\Psi_{ik}^{(1)}(t_1) - \Psi_{ik}^{(1)}(t_0)] + [\Psi_{ik}^{(2)}(t_1) - \Psi_{ik}^{(2)}(t_0)] \\ &= \Delta \Psi_{ik}^{(1)}(t) + d\Psi_{ik}^{(2)}(t) \approx \left[\frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} + \frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} \right] \Delta q_{ik}(t) \\ &= -|c| \Delta q_{ik}(t), \end{aligned}$$

即 $\left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_1}$ 总是与扰动 Δq_{ik} 符号相反, 换言之, 扰动 Δq_{ik} 将被抑制, 粒子 s_{ik} 将回到它原来在 III 或者 I 上的平衡点.

另外, 设时刻 t_0 粒子 s_{ik} 的平衡点在 II 上. 由

$\frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} = \gamma - 1 > 0$ 及由给定条件当 $0 < q_{ik}(t) < 1$

时, 有 $\frac{\partial \Psi_{ik}^{(2)}(t)}{\partial q_{ik}(t)} \geq 1 - \gamma$, 我们得到

$$c = \left[\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} + \frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} \right] \geq 0 \quad \text{以及} \quad \left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_1} \approx \left[\frac{d\Psi_{ik}^{(1)}(t)}{dq_{ik}(t)} + \frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} \right] \Delta q_{ik} = |c| \Delta q_{ik},$$

因此, $\left. \frac{dq_{ik}}{dt} \right|_{t_1}$ 总是与扰动 Δq_{ik} 符号相同, 即扰动 Δq_{ik} 被维持或者被增强, 使粒子 s_{ik} 的状态脱离它在 II 上原来的平衡点. 即 II 上的平衡点是不稳定的.

因此, 如果存在稳定平衡点, 它们只可能在 I 或者 III 上, 即 $q_{ik}(t) < 0, v_{ik}(t) = 0$ 或者 $q_{ik}(t) > 1, v_{ik}(t) = 1$. 证毕.

引理 7. 设 $\gamma > 1, -\Psi_{ik}^{(2)}(t) < 0$. 如果当 $q_{ik}(t) > 1$ 时 $\frac{\partial \Psi_{ik}^{(2)}(t)}{\partial q_{ik}(t)} < 1$, 则粒子 s_{ik} 的稳定平衡点为: $q_{ik}(t) > 1, v_{ik}(t) = 1$.

证明. 类似于引理 6 的证明.

引理 8. 设 $\gamma > 1, -\Psi_{ik}^{(2)}(t) > \gamma - 1$. 如果当 $q_{ik}(t) < 0$ 时 $\frac{\partial \Psi_{ik}^{(2)}(t)}{\partial q_{ik}(t)} < 1$ 成立, 则粒子 s_{ik} 的稳定平衡点为: $q_{ik}(t) < 0, v_{ik}(t) = 0$.

证明. 类似于引理 6 的证明.

引理 9. 设 $\gamma > 1, -\Psi_{ik}^{(2)}(t) \leq \gamma - 1$. 如果当 $q_{ik}(t) = 1^{+0}$ 时, $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} < 1$ 成立, 而且当 $q_{ik}(t) = 1^{-0}$ 时, $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} \geq 1 - \gamma$ 成立, 则平衡点 $c_3 = (q_{ik}(t) = 1, v_{ik}(t) = 1)$ 是鞍点. 另外, 如果当 $q_{ik}(t) = 0^{-0}$ 时, $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} < 1$ 成立, 而且当 $q_{ik}(t) = 0^{+0}$ 时, $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} \geq 1 - \gamma$ 成立, 则平衡点 $c_1 = (q_{ik}(t) = 0, v_{ik}(t) = 0)$ 是鞍点.

证明. 类似于引理 6 的证明.

定理 3. 设 $\gamma > 1$ 成立. 粒子 s_{ik} 的动力学方程(9)有稳定平衡点的充分必要条件是: 当 $q_{ik}(t) = 0, v_{ik}(t) = 0$ 时, $-\Psi_{ik}^{(2)}(t) > 0$; 而且 $q_{ik}(t) = 1, v_{ik}(t) = 1$ 时 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t) < \gamma - 1$.

证明. 因为 $\Psi_{ik}^{(2)}(t)$ 不是 $q_{ik}(t)$ 的显函数, 有 $\frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} = 0$, 即满足引理 6 至引理 9 的条件 $1 - \gamma \leq \frac{d\Psi_{ik}^{(2)}(t)}{dq_{ik}(t)} < 1$, 因此交点 c_1, c_3 是鞍点; 在 II 上的平衡点是不稳定的; 在 I 和 III 上的平衡点是稳定的.

充分性. 我们要证明, 如果在点 $c_1 = (q_{ik}(t) = 0,$

$v_{ik}(t)=0$), 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)>0$, 而且在点 $c_3=(q_{ik}(t)=1, v_{ik}(t)=1)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)<\gamma-1$, 则粒子 s_{ik} 的动力学状态将不可逆转地进入 I 或者 III 区域, 即要证明不可能出现下面的情形: II 上的平衡点, 当受到扰动时, 平衡点向点 c_1 或者 c_3 移动, 一旦到达点 c_1 或者 c_3 时, 又回到 II 区域, 使得动力学方程(9)的状态始终在 II 区域、点 c_1 或点 c_3 之间震荡. 因此, 我们先考虑 $q_{ik}(t)=0, v_{ik}(t)=0$ 的情形: 由式(9a)有 $\Psi_{ik}^{(1)}(t)=0$, 因此在点 c_1 得到: $\frac{dq_{ik}}{dt} = \Psi_{ik}^{(1)}(t) + \Psi_{ik}^{(2)}(t) = \Psi_{ik}^{(2)}(t)<0$, 它既表示点 c_1 不可能是平衡点, 否则, 在点 c_1 应该有 $\frac{dq_{ik}}{dt}=0$; 而且它也表示, 当粒子 s_{ik} 在 II 上的不稳定平衡状态变迁到达点 c_1 时, 由于在点 c_1 有 $\frac{dq_{ik}}{dt}<0$, q_{ik} 的减小使得粒子 s_{ik} 的动力学状态经过点 c_1 进入 I 区域; 而且一旦进入 I 区域, 就不可能经过点 c_1 再重新进入 II 区域, 否则, 在点 c_1 应该有 $\frac{dq_{ik}}{dt}>0$.

类似地, 我们可以证明, 如果在点 $c_3=(q_{ik}(t)=1, v_{ik}(t)=1)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)<\gamma-1$, 则在点 c_3 有 $\frac{dq_{ik}}{dt} = \Psi_{ik}^{(1)}(t) + \Psi_{ik}^{(2)}(t) = \gamma-1 + \Psi_{ik}^{(2)}(t)>0$, 点 c_3 不可能是平衡点, 而且粒子 s_{ik} 的动力学状态可由不稳定的 II 区域经过点 c_3 进入 III 区域; 一旦进入 III 区域, 就不可能经过点 c_3 再重新进入 II 区域.

因此, 粒子 s_{ik} 的动力学状态必然不可逆转地进入 I 区域或者 III 区域, 即有稳定平衡点.

必要性. 我们要证明, 如果动力学方程(9)有稳定平衡点, 则在点 $c_1=(q_{ik}(t)=0, v_{ik}(t)=0)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)>0$, 而且在点 $c_3=(q_{ik}(t)=1, v_{ik}(t)=1)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)<\gamma-1$. 反证法如下: 设在点 $c_1=(q_{ik}(t)=0, v_{ik}(t)=0)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)\leq 0$. 于是, 在点 c_1 有, $\frac{dq_{ik}}{dt} = \Psi_{ik}^{(1)}(t) + \Psi_{ik}^{(2)}(t) = \Psi_{ik}^{(2)}(t)\geq 0$. 其中,

$\frac{dq_{ik}}{dt}=0$ 表示点 c_3 是平衡点; $\frac{dq_{ik}}{dt}>0$ 表示, 当粒子 s_{ik} 在 II 上的不稳定平衡状态变迁到达点 c_1 时, 由于在点 c_1 有 $\frac{dq_{ik}}{dt}>0$, q_{ik} 的增加使得粒子 s_{ik} 的动力学状态由点 c_1 重返 II 区域, 于是, 粒子 s_{ik} 的动力学状态可能始终在 II 和 c_1 之间震荡. 与动力学方程(9)有稳定平衡点的前提假设矛盾.

类似地, 我们可以用反证法证明, 如果在点 $c_3=(q_{ik}(t)=1, v_{ik}(t)=1)$, 有 $-\Psi_{ik}^{(2)}(t)\geq\gamma-1$, 则粒子

s_{ik} 的动力学状态可能始终在 II 和 c_3 之间震荡. 与动力学方程(9)有稳定平衡点的前提假设矛盾. 证毕.

定理 4. 粒子的动力学方程(9)有稳定平衡点的充分必要条件是可以满足的, 亦即通过参数选择, 可使定理 3 的条件成立.

证明. 由于 $\gamma>1$, 而且式(9b)的 $\Psi_{ik}^{(2)}(t)$ 中所有的 $w_{jk}, w_{ij}, u_{jk}(t), u_{ij}(t)$ 都是有界的, 因此, 总可以选择参数 I_{ik} , 使得在任何时刻都有 $0<-\Psi_{ik}^{(2)}(t)<\gamma-1$ 成立, 即有

$$0 < I_{ik} + \sum_{j=1}^m w_{jk} u_{jk}(t) + \sum_{j=1}^n w_{ij} u_{ij}(t) < \gamma - 1 \quad (14)$$

成立, 即满足定理 3 的充分必要条件. 证毕.

定理 5. 令 $\gamma>1$ 以及式(14)成立, 则广义粒子模型的动力学过程一定收敛. 证毕.

证明. 我们构造广义粒子模型的 Lyapunov 函数 $L(t)$ 如下:

$$L(t) = \sum_{i,k} \left\{ [-0.5(\gamma-1)v_{ik}(t)^2] + \int_0^t \frac{dv_{ik}(x)}{dx} [-\Psi_{ik}^{(2)}(x)] dx \right\},$$

因为 $\gamma>1, -\Psi_{ik}^{(2)}(t)<\gamma-1$ 成立, 我们有 $|L(t)| \leq \sum_{i,k} (\gamma-1)|v_{ik}(t)|^2 + (\gamma-1) \sum_{i,k} |v_{ik}(t)|$.

考虑到 $0 \leq v_{ik}(t) \leq 1$, 于是 $|L(t)|$ 是有界的.

另外, 由于 $\frac{dv_{ik}(t)}{dq_{ik}(t)} = \begin{cases} 1, & 0 < q_{ik}(t) < 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$, 我们

得到

$$\begin{aligned} \frac{dL(t)}{dt} &= - \sum_{i,k} \frac{dv_{ik}(t)}{dt} \frac{dq_{ik}(t)}{dt} \\ &= - \sum_{i,k} \frac{dv_{ik}(t)}{dq_{ik}(t)} \left(\frac{dq_{ik}(t)}{dt} \right)^2 \leq 0. \end{aligned}$$

有界的 $L(t)$ 随时间单调减小, 因此, 广义粒子模型的动力学过程一定收敛. 又由定理 3, 4 知, 广义粒子模型的动力学过程一定收敛到达稳定平衡状态.

5 仿真实验

即使在不考虑自治、交互、故障、拥塞等因素的简单情况下, 计算机 ATM 网络带宽分配问题也是 NP-完全问题^[23]. 基于广义粒子模型的多 Agent 系统问题求解的仿真实验中, ATM 网络的链路作为资源 Agent, ATM 网络的虚通路(VPC)作为任务 Agent. 同时考虑到, 各 Agent 可有不同的目标、优先级、故障率、拥塞度、自治性、交互性等复杂情况^[24~27]. 仿真实验中, 随机生成不同规模的网络拓

扑结构,并且随机产生不同的带宽分配需求.为了表示各 Agent 的不同个性、自治性、交互性和目标多样性,随机产生广义粒子模型中不同粒子的有关参数.

基于多 Agent 系统问题求解模型的网络带宽分配过程中,广义粒子模型中各粒子动力学状

态的变化情况如图 4 所示.网络规模对广义粒子模型中粒子最小效益函数和系统总效益函数的影响如图 5 所示.广义粒子模型 GPM 算法和著名的 MAX-MIN 算法的比较结果如图 6 所示.可以看到,它们虽然有差不多的带宽分配公平性,但是广

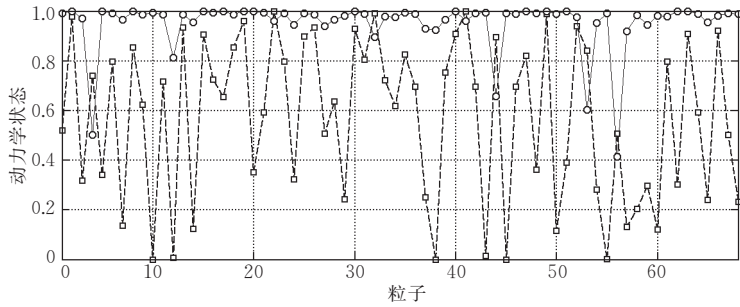
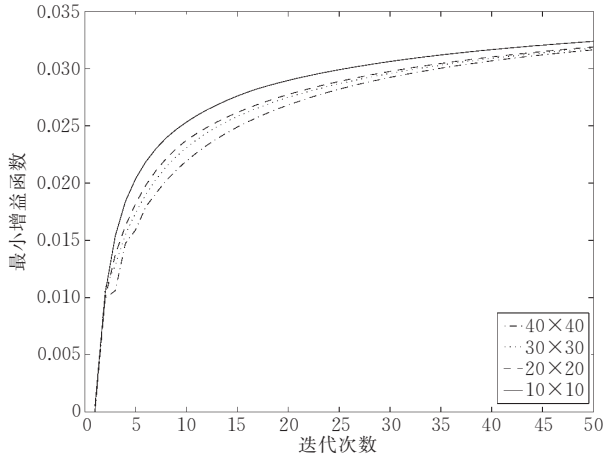
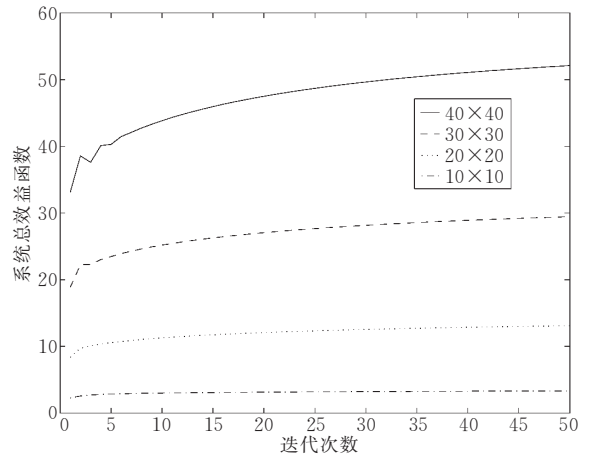


图 4 基于多 Agent 系统问题求解模型的网络带宽分配过程中,广义粒子模型中粒子动力学状态的变化情况(其中, \square 和 \circ 分别 wl 为粒子的初始状态和最终稳定平衡状态.虚通路 Agent 数量:40,链路 Agent 数量:40;粒子数量:1600;广义粒子模型的参数: $\lambda_{ik}^{(1)}=0.2, \lambda_{ik}^{(2)}=0.3, \lambda_{ik}^{(3)}=0.4, \lambda_{ik}^{(4)}=0.1, \lambda_{ik}^{(5)}=0.05, \epsilon=0.05$)

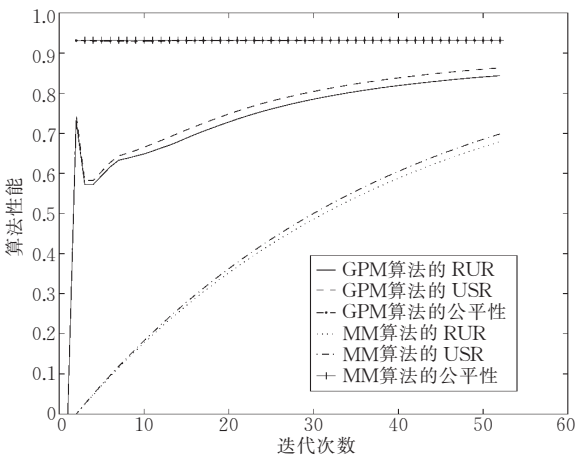


(a) 粒子的最小效益函数

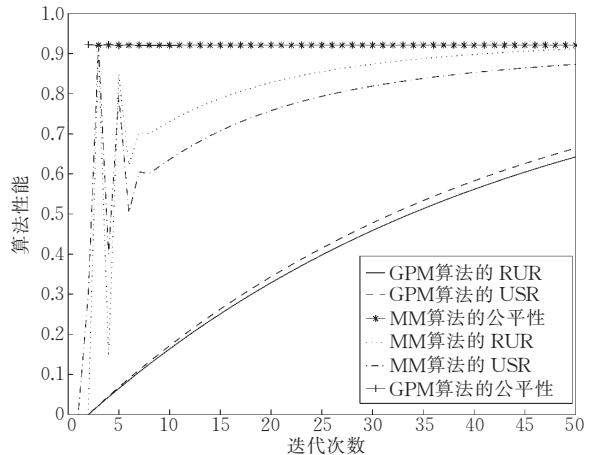


(b) 系统总效益函数

图 5 不同的网络规模下,广义粒子模型中粒子的最小效益函数和系统总效益函数随时间的变化过程(网络规模分别为:10×10,20×20,30×30,40×40,相应的粒子数量分别为:100,400,900,1600,仿真实验的其它参数与图 4 相同)



(a) Agent 数量 900,网络规模 30×30



(b) Agent 数量 1600,网络规模 40×40

图 6 不同的网络规模下,广义粒子模型 GPM 算法和 MMA 算法在 3 种性能指标方面的比较:网络带宽分配的公平性 Fairness,总带宽需求满意度 USR,总带宽利用率 RUR 随时间变化过程

义粒子模型 GPM 算法在收敛速度、总带宽需求满意度 USR、总带宽利用率 RUR 等方面具有优越的性能。

6 结 论

本文提出了多 Agent 系统分布并行问题求解的广义粒子模型和算法,讨论和论证了它们的性质。当各 Agent 有不同程度的自治性、个性、交互性和目标时,广义粒子模型和算法可以分布并行地求解 MAS 中的资源分配和任务规划问题。广义粒子模型和算法可以收敛达到稳定平衡状态。仿真实验证实了广义粒子模型和方法对于多 Agent 系统分布并行问题求解的有效性。

理论分析和仿真实验表明,广义粒子模型和算法主要有以下特点:

(1)将多 Agent 系统分布式问题求解转化为广义粒子模型中的运动学和动力学演化过程。

(2)可以应用于复杂环境下多 Agent 系统分布式问题求解,包括各 Agent 有不同的个性、自治性、可用性、交互性。克服了目前多 Agent 系统分布式问题求解的许多方法在这些方面存在的诸多问题和局限性;

(3)能够描述多 Agent 系统中随机的、并发的的事件以及关于相变、自组织等动力学现象;

(4)所有粒子的动力学演化过程是并行的,因此具有高度的并行性;

(5)广义粒子模型和算法基本上与问题的规模无关,便于用硬件实现。

参 考 文 献

- 1 Shehory O., Kraus S.. Methods for task allocation via agent coalition formation. *Artificial Intelligence*, 1998, 101: 165~200
- 2 Chaudhury A.. Two mechanisms for distributed problem solving. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1998, 28(1): 48~55
- 3 Levesque H. J.. All I Know: A study in Autoepistemic Logic. *Artificial Intelligence*, 1990, 42: 263~309
- 4 Shehory O., Kraus S., Yadgar O.. Emergent cooperative goal-satisfaction in large-scale automated-agent systems. *Artificial Intelligence*, 1999, 110: 1~55
- 5 Kersten G. E., Noronha S. J.. Rational agents, contract curves, and inefficient compromises. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1998, 28(3): 326~338
- 6 Shuai Dian-Xun, Feng Xiang. Distributed problem solving in multiagent systems: A spring net approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2005, 20(4): 66~74

- 7 Shuai Dian-Xun, Feng Xiang. Distributed problem solving in multi-agent systems based on a new spring net approach. In: *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, Beijing, China, 2004, 417~420
- 8 Shuai Dian-Xun, Wang Liang, Deng Zhi-Dong. A crossbar composite spring net approach to parallel optimization for computer networks resources. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(3): 313~319(in Chinese)
(帅典勋,王 亮,邓志东.网络资源并行优化的纵横弹簧网络方法. *计算机学报*, 2002, 25(3): 313~319)
- 9 Shuai Dian-Xun, Wang Liang. A new composite-spring-net-based approach to distributed problem solving in multi-agent system. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(8): 853~859(in Chinese)
(帅典勋,王 亮.一种新的基于复合弹簧网络的多 Agent 系统分布式问题求解方法. *计算机学报*, 2002, 25(8): 853~859)
- 10 Ren Z., Anumba C. J., Ugwu O. O.. The development of a multi-agent system for construction claims negotiation. *Advances in Engineering Software*, 2003, 34: 683~696
- 11 Ren Z., Anumba C. J.. Multi-agent systems in construction-state of the art and prospects. *Automation in Construction*, 2004, 13: 421~434
- 12 Vincent G., Christophe L. P., Sami S.. A multi-agents architecture to enhance end-user individual based modelling. *Ecological Modelling*, 2002, 157: 23~41
- 13 Emmanouilides C. J., Kasperidis S., Taylor J. G.. A random asymmetric temporal model of multi-agent interactions: Dynamical analysis. *Physica D*, 2003, 181: 102~120
- 14 Wu D. J., Yanjun S.. Cooperation in multi-agent bidding. *Decision Support Systems*, 2002, 33: 335~347
- 15 Anumba C. J., Ren Z., Thorpe A., Ugwu O. O., Newnham L.. Negotiation within a multi-agent system for the collaborative design of light industrial buildings. *Advances in Engineering Software*, 2003, 34: 389~401
- 16 Jason J. C., Shih-Wei S.. AgentGateway: A communication tool for multi-agent systems. *Information Sciences*, 2003, 150: 153~164
- 17 Yong-Jun Z., Zhen R.. Real-time optimal reactive power dispatch using multi-agent technique. *Electric Power Systems Research*, 2004, 69: 259~265
- 18 Kraus S.. Negotiation and cooperation in multi-agent environments. *Artificial Intelligence*, 1997, 94: 79~97
- 19 Shuai Dian-Xun, Deng Zhi-Dong. A new algebraic modeling approach to distributed problem-solving of multi-agent systems. *Journal of Computer Science and Technology*, 2002, 17(4): 481~490
- 20 Shuai Dian-Xun, Ju Jing, Deng Zhi-Dong. Hyper distributed and hyper parallel algebraic approach to MAS problem solving. In: *Proceedings of the ISCA International Conference Parallel Distributed Computing Systems*, Las Vegas, USA, 2000, 481~487
- 21 Shuai Dian-Xun, Gu Jing. A new algebraic modeling for distributed problem solving of multi-agent systems (Part I): Social behavior, Social situation and social dynamics. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(2): 130~137(in Chinese)
帅典勋,顾 静.多 Agent 系统分布式问题求解的代数模型方

- 法(I): 社会行为和社会动力学. 计算机学报, 2002, 25(2): 130~137
- 22 Shuai Dian-Xun, Gu Jing. A new algebraic modeling for distributed problem-solving of multi-agent systems (Part II): Colony intelligence and social dynamics. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(2): 138~147(in Chinese)
 帅典勋, 顾 静. 多 Agent 系统分布式问题求解的代数模型方法(II): 群体智能和社会动力学. 计算机学报, 2002, 25(2): 138~147
- 23 Vedantham, Sundararajan, Iyengar S. S. The bandwidth allocation problem in the ATM network model is NP-complete. Information Processing Letters, 1998, 65(4): 179~182
- 24 Wijngaards N. J. E. , Overeinder B. J. , van Steen M. , Brazier F. M. T. . Supporting Internet-scale multi-agent systems. Data and Knowledge Engineering, 2002, 41: 229~245
- 25 Kelly F. P. . Mathematical modeling of the Internet. In: Engquist B. , Schmid W. ed. . Proceedings of the Mathematics Unlimited-2001 and Beyond. Berlin: Springer-Verlag, 2001, 685~702
- 26 Low S. H. . A duality model of TCP and Queue management algorithms. IEEE ACM Transactions on Networking, 2003, 11(4): 525~536
- 27 Massonlie L. , Roberts J. . Bandwidth sharing: Objectives and algorithms. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 320~328



SHUAI Dian-Xun, born in 1941, Ph. D. , professor and Ph. D. supervisor. His research interests are artificial intelligence, distributed parallel computing, quantum computation and network dynamics.

WANG Xing, born in 1982, M. S. candidate. His research interests include artificial intelligence, network communication.

FENG Xiang, born in 1977, Ph. D. candidate. Her research interests include artificial intelligence, parallel distributed computing, computer networks.

Background

This work was supported by the following research projects: the National Natural Science Foundation of China; "The New Approach to Network Information Exploitation" (Grant No. 60135010), "Generalized Particle Model Approach to Distributed Parallel Intelligent Processing" (Grant No. 60473044), "Generalized Solitary Wave Approach to Distributed Parallel Intelligent Processing" (Grant No. 60575040), and "Hyper-Distributed Hyper-Parallel Intelligent Processing Based on Generalized Cellular Automata and Artificial Embryology" (Grant No. 60073008); the National Key Foundational R&D Project (973) of China: "The Self-Organizing Temporal-Spatial Behavior in Computer Networks" (Grant No. G1999032707). These projects are mainly devoted to develop new theories and methods for distributed parallel problem-solving under complex environment, such as multi-agent systems, computer networks and so on, all of which are very challenging and hard to solve by using conventional approaches.

The authors have proposed a generalized cellular autom-

ata (GCA) used in the network modelling, data compression, self-organizing clustering, fast packet switching, and parallel optimization. The authors further extend the GCA approach to a novel generalized particle model (GPM) approach. The GPM approach transforms the problem-solving into kinematics and dynamics of particles, and has many advantages over GCA and other traditional methods in terms of distributed problem-solving in complex environment. The complex environment that the proposed GPM approach can deal with includes: the multi-type coordination, multi-degree autonomy, multi-objective optimization, high-scale parallelism, and many complicated phenomena, such as phase-transition, random failure, intermittent congestion and so on. The GPM approach also has the extensibility to higher-dimension higher-order versions, and the feasibility for hardware implementation in VLSI systolic array. The GPM approach has been used to the problem-solving in MAS, the service orchestration in Grid computing, data self-organizing clustering, and parallel optimization in networks.