

# 行为建模及其在多 Agent 系统中的应用

冯 翔 张进文

(华东理工大学信息科学与工程学院 上海 200237)

**摘 要** 五行学说蕴含信息动力学,然而在网络中却一直未被很好地利用,为此提出一种基于五行原理的五行粒子模型方法来求解多 Agent 系统的分布式问题。五行粒子模型可以很好地描述和处理多 Agent 系统中 Agent 之间存在的随机、并发、多类型的交互行为。基于五行粒子模型内部存在的生克关系,以及五行自身蕴含的稳定性和平衡性,对五行粒子模型和多 Agent 系统分布式问题求解进行探讨,并对多 Agent 系统中的各个 Agent 进行行为建模,进而提出多 Agent 系统分布式问题求解的五行粒子模型算法。最后,通过实验验证了该算法的有效性。

**关键词** 五行粒子模型,行为建模,多 Agent 系统,资源分配

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.041

## Behavior Modeling and its Application in Multi-agent System

FENG Xiang ZHANG Jin-wen

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract** Five elements theory owns the informational dynamics, but it has not been used in current networks. This paper proposed a novel five elements particle model based on five elements theory, which can effectively solve distribution problem in multi-agent system. This model can describe and handle the random, parallel and multi-types coordination among Agents in multi-agent system. According to the relation of generation and control, and the inner stability and balance in five elements theory, we built a connection between the multi-agent system and five elements particle model. Meanwhile, the behaviors among Agents were well modeled, which is the prominent part in our five elements particle model algorithm. At last, we validated the effectiveness of our model through experiments.

**Keywords** Five elements particle model, Behavior modeling, Multi-agent system, Resource allocation

## 1 引言

计算机网络环境是充满活性的复杂社会,因此网络环境中存在着复杂的信息动力学行为<sup>[1]</sup>。狭义网络行为指人们在社交网络中所表现出的社会行为;广义网络行为则包括支撑电子网络空间的计算机、服务器等设施间数字信号传输和数据信息流动时所表现出的行为,即网络内部及网络之间也存在目标导向的社会行为<sup>[2]</sup>。随着网络规模的日益扩大,对网络中的节点控制越来越复杂,我们期望赋予节点智能性,对节点进行行为建模,通过社会关系计算得出行为因子,以此来量化诸多节点之间的复杂关系,使其能够根据节点之间的行为关系自行进行控制与判断。认识网络行为的关键在于数学建模,2011年《Science》发表的文章提到:“认识真实世界最好的方式是建立计算机模型,其可以直观而简单地描述问题。”<sup>[3]</sup>。本文将分布式人工智能中的多 Agent 系统作为载体,对其 Agent 进行行为建模。

分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence, DAI)包括分布式问题求解(DPS)和多 Agent 系统(MAS), DPS 关

注的是如何通过各个 Agent 之间的合作来增加系统的总体效益,而忽略了个人效益;相反,在 MAS 中,每个个体在社会交互过程中都只关注个人利益,而没有使用全局控制策略去考虑共同的目标,即忽略了总体效益<sup>[4]</sup>。而目前为止,对 DPS 和 MAS 问题的求解模型算法<sup>[5-7]</sup>大多都有如下问题和局限性:(1)仅仅考虑了比较简单的社会交互行为和双方都能意识到的双向协调行为,如合作与竞争。而在现实应用中,Agent 之间是存在着非常复杂的社会意向和行为的,其中包括单向的、潜在的社会行为,这些行为在很大程度上会影响到 MAS 的问题求解。(2)研究的 Agent 大多是自私的或者非自私的,即:Agent 只考虑自身利益或者只考虑整体利益,而事实上,Agent 个体应该具有双重性,即希望在获得自身最大利益的同时带动系统的总体利益。(3)解决 MAS 问题的环境大多是静态和确定性的,难以描述社会行为的随机性和并发性,不具有实时性和动态性。(4)现有方法难以区分 Agent 个体的社会行为和非社会行为,未深入到社会职能的本质特征。

为了弥补上述不足,本文对多 Agent 系统进行了探讨,提出了一个新的基于五行原理的五行粒子模型,该模型将 MAS

到稿日期:2014-05-17 返修日期:2014-07-17 本文受国家自然科学基金(60905043, 61073107, 61173048),上海市教育委员会科研创新项目,中央高校基本科研业务费,大学生创新项目资助。

冯翔(1977-),女,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为分布并行计算、人工智能、网络通信, E-mail: xfeng@ecust.edu.cn; 张进文(1991-),男,硕士生,主要研究方向为分布并行计算、网络通信。

中的问题求解过程转化为力场中大量粒子运动达到平衡的过程,并且在过程中考虑了粒子之间基于五行衍化的行为。

## 2 社会行为

多 Agent 社会中的 Agent 的行为是复杂多变的, Agent 由于具有自觉能动性,从自身利益出发,其行为对整体利益的实现有利也有弊,因此必须区分社会行为和非社会行为,将有利于更好地协调 Agent 的行为。对于处于社会中的 Agent 来讲,其真正有意义的行为是社会行为;如果 Agent 个体的信念、愿望、目的与参与合作的其他 Agent 的意愿有关,并且其行为有利于共同目标、共同利益的实现,同时也满足其自身需求,则这样的行为是有益的社会行为。如果个体 Agent 为了最大化满足自身需求而破坏了社会的整体需求和利益,这样的行为就是有害的社会行为,我们称为非社会行为。

在社交网络中,社交性要求社交网络有至少两个或多个 Agent。在社交网络中, Agent 之间的行为有干扰,因为它们都试图达成自己的目标。一般情况下,一个 Agent 的行为会对另一个的目标产生相关影响。干扰可以分为正面干扰和负面干扰<sup>[8-10]</sup>。

正面干扰:一个 Agent 的行为有助于另一个 Agent 实现或修复特定目标。

负面干扰:一个 Agent 的行为妨碍了另一个 Agent 实现特定目标。

文献[11]描述了人类之间的行为关系,当 Agent 个体的信念(beliefs)和目标(goals)都与其他 Agent 的意识(mind)有关,而该 Agent 个体的行为正是基于这样的信念和目标时,其行为才是社会性行为,也就是说,一个 Agent 的行为是否是社会行为,不是根据行为本身的外部描述来判断。例如,一个 Agent 将门关上,若他是为了防止风雨或噪音,则不是社会行为。本文研究的是具有社会行为的社会 Agents 所组成的 MAS 的代数模型。Agent  $A_i$  根据关于 Agent  $A_j$  所怀意向的信念,  $A_i$  可能产生与  $A_j$  有关的不同类型的社会行为。

社会行为从人工智能和哲学的角度可以看做是与个人行为相反的<sup>[12]</sup>。面向一些目标的智能系统会表现出某种社会行为<sup>[13]</sup>。对于这类智能系统,我们可以定义社会行为是以目标为导向的行为。本文只讨论和分析了目标导向行为、目标导向 Agents 和目标导向系统。目标导向系统可能包括也可能不包括关于目标的任何明确的内部表示。目标导向行为的概念是基于目标的概念以及 Rosenblueth 和 Wiener 提出的“有目的行为”, Miller, Galanter 和 Pribram 在心理学上进一步推进了这一概念。

## 3 五行理论衍生的行为

利用五行研究社会行为,即利用社会演化规律研究社会行为。我国古代学者提出五行学说<sup>[14]</sup>,来源于自然,应用于社会。通过五行,他们能够进行较为简单的预测,趋利避害,保持社会平衡。

将五行引入社会行为模型的主要目的在于:通过对社会演化规律的研究,我们可以根据 Agent 属性提前预测某些行为的发生,从而避免欺诈、病毒、利用等不法行为所带来的危害。通过五行调节,将整体系统维持在平衡的最低状态,消耗最少资源就可维持系统运转。五行的基本生克关系如图 1 所示。

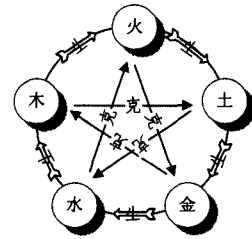


图 1 五行属性图

在之前的研究中,我们基于通信将社会交互分为单向交互和双向交互。但在原有的五行模型中,只存在单向交互,即只有 5 个属性之间的单向生克关系,显然不符合现实情况。注意到,在五行模型中,对不同属性的 Agent 之间的关系进行了描述,但是对同属性 Agent 的关系并未加以区分,因此我们定义:

在环境相生(资源充足)的情况下,同属性 Agent 之间为合作关系;

在环境相克(资源紧缺)的情况下,同属性 Agent 之间为竞争关系。

在添加相生与相克的基础上,我们将行为分成 6 类,如表 1 所列。其中生与被生、克与被克在五行的循环圈中可以合并。再按照五行属性不同,可以将生、克、相生、相克分别分为 5 类,用五行元素和符号予以表示,如表 2 所列。表 2 中的相生和相克关系是根据资源的紧缺状况而定的,如果资源充足,则同属性的 Agent 之间为相生关系;如果资源紧缺,则同属性之间为相克关系。得到了五行行为分类之后,所需要关注的是如何将 Agent 的属性进行划分,从之前的工作<sup>[10]</sup>中可以看出,如果是对行为进行分类,则非常繁琐,需要人工干预区分,且容易造成主观判断失误。因此,需要从产生行为的动机(原因)进行分析,即研究 Agent 的五行属性特征。

表 1 六类行为

行为	符号表示	语言表达	最终获益者
生	$A \rightarrow B$	A 促进 B 实现其目标	B
被生	$A \leftarrow B$	B 促进 A 实现其目标	A
克	$A \Rightarrow B$	A 克制 B 实现其目标	A
被克	$A \Leftarrow B$	B 克制 A 实现其目标	B
相生	$A \leftrightarrow B$	A、B 互相促进	A 和 B
相克	$A \Leftrightarrow B$	A、B 互相抑制	无

表 2 五行符号表示

	1	2	3	4	5
生	金 $\rightarrow$ 水	水 $\rightarrow$ 木	木 $\rightarrow$ 火	火 $\rightarrow$ 土	土 $\rightarrow$ 金
克	水 $\Rightarrow$ 火	火 $\Rightarrow$ 金	金 $\Rightarrow$ 木	木 $\Rightarrow$ 土	土 $\Rightarrow$ 水
相生	金 $\leftrightarrow$ 金	水 $\leftrightarrow$ 水	木 $\leftrightarrow$ 木	火 $\leftrightarrow$ 火	土 $\leftrightarrow$ 土
相克	金 $\Leftrightarrow$ 金	水 $\Leftrightarrow$ 水	木 $\Leftrightarrow$ 木	火 $\Leftrightarrow$ 火	土 $\Leftrightarrow$ 土

## 4 五行理论的正确性说明

使用五行学说对网络行为模型进行分类,其中的关键是五行理论中的“五”,需要知道五行理论中的“五”意味着什么,为什么选择“五”这个数字。我们知道,小世界理论中的六度空间来源于实验研究,而五行中的“五”是否正确,我们通过与四维和六维的属性空间比较来进行说明。

从图 1 中的五行属性图可以发现,在五维属性空间里,任意两个属性之间都存在直接的影响关系,而且任意两个元素之间都是连通的,即对于任意两个属性元素 A、B, A 和 B 互相可到达。元素 A 和元素 B 要么是直接相连,要么是由其他

的元素关联起来的,由此可以说明,任意两个元素之间不仅存在着直接的影响关系,而且还存在着间接的影响关系。Agent 之间不仅可以直接相互影响,也可以通过其他 Agent 来影响其他的 Agent。这是符合现实社会和现有社会网络的特点的。

如果将五维属性改为四维或六维属性,如图 2 所示,可以看到属性之间的行为关系将产生一定的变化,在四维属性空间里,描述相克关系时,不再是单边行为。六维属性空间虽然符合相生相克规律,但任意两个元素之间不再具有直接联系。所以四维和六维属性空间并不能完整描述社会网络中的节点之间的行为关系。

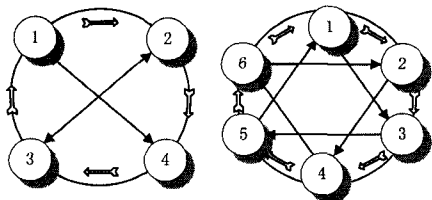


图 2 四维属性和六维属性

与此同时,我们发现该模型之所以选择“五”,也是符合力学规律的,根据经典力学,任何两个物体之间都存在着相互作用力。在该模型属性数目大于“五”后,虽然符合相生相克的规律,但是却不能保证任意两个元素之间皆有相互作用,这有悖于经典力学规律。

## 5 问题模型

在多 Agent 系统中,多个任务并行执行是不可避免的,然而 Agent 的资源是有限的,如何合理动态地对资源进行分配是个亟待解决的问题。考虑有  $n$  个 Agent 的多 Agent 系统,需要完成  $m$  个不同的任务,用  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  表示系统中的 Agent,  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  表示任务,我们将多 Agent 系统中的资源分配问题抽象为如表 3 所列的矩阵,其中  $r_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻 Agent  $A_i$  对于任务  $T_j$  的资源分配量,  $f_{e_{ij}}(t)$  表示在  $t$  时刻 Agent  $A_i$  在完成任任务  $T_j$  时所具有的五行属性特征,  $\zeta_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻 Agent  $A_i$  对于任务  $T_j$  的执行意向强度,  $\zeta_{ij}(t)$  可以通过  $t$  时刻各个 Agent 所具有的五行属性特征的生克关系的量化计算得到。

表 3 MAS 在  $t$  时刻的资源分配矩阵

	$T_1$	$\dots$	$T_j$	$\dots$	$T_m$
$A_1$	$r_{11}(t), f_{e_{11}}(t), \zeta_{11}(t)$	$\dots$	$r_{1j}(t), f_{e_{1j}}(t), \zeta_{1j}(t)$	$\dots$	$r_{1m}(t), f_{e_{1m}}(t), \zeta_{1m}(t)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$A_i$	$r_{i1}(t), f_{e_{i1}}(t), \zeta_{i1}(t)$	$\dots$	$r_{ij}(t), f_{e_{ij}}(t), \zeta_{ij}(t)$	$\dots$	$r_{im}(t), f_{e_{im}}(t), \zeta_{im}(t)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$A_n$	$r_{n1}(t), f_{e_{n1}}(t), \zeta_{n1}(t)$	$\dots$	$r_{nj}(t), f_{e_{nj}}(t), \zeta_{nj}(t)$	$\dots$	$r_{nm}(t), f_{e_{nm}}(t), \zeta_{nm}(t)$

为了将资源在每个时间间隔分配给不同的任务,根据社会网络,定义了 Agent 与任务之间的关系  $x_k(t) = \{x_{1k}, \dots, x_{nk}, \dots, x_{nk}\}$ 。如果在  $t$  时刻, Agent  $A_i$  的资源被分配给任务  $k$ ,那么  $x_{ik}(t) = 1$ ; 否则为 0。

但是,由于资源的有限性,资源的分布在每个时刻必须满足如下约束:

$$\sum_{k=1}^m r_{ik}(t) x_{ik}(t) = 1 \quad (1)$$

其中  $r_{ik} (0 \leq r_{ik} \leq 1)$  表示 Agent  $A_i$  分配在任务  $k$  上的资源数量。

设  $C = (c_{ik})_{n \times m}$  为一个二维向量,表示第  $i$  个 Agent 对于第  $k$  个任务的资源分配权重,上述资源分配问题可以抽象为在约束(1)的条件下,最大化式(2)。

$$z(R) = (C)^T R X = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ik} r_{ik} x_{ik} \quad (2)$$

## 6 行为的意向强度及五行属性

### 6.1 行为的意向强度

为了将行为进行量化,我们将 Agent 之间的复杂行为关系转化为直观的数值计算,用意向强度来表示 Agent 执行任务的优先级:如果关于某个任务  $A$  生  $B$ ,即  $A \rightarrow B$ , $A$  对  $B$  是具有促进作用的,那么  $B$  执行该项任务的意向强度将加  $\delta_2$ , $A$  执行该项任务的意向强度将加  $\delta_1$ ;如果关于某个任务  $A$  克  $B$ ,即  $A \Rightarrow B$ , $A$  对  $B$  是具有抑制作用的, $A$  抑制  $B$  的目的是  $A$  希望自己去执行该项任务,因此  $B$  执行该项任务的意向强度将减  $|\delta_4|$ , $A$  执行该项任务的意向强度将加  $\delta_3$ ;如果关于某个任务  $A$  和  $B$  相生,即  $A \leftrightarrow B$ ,则  $A$  和  $B$  执行该项任务的意向强度都将加  $\delta_5$ ;如果关于某个任务  $A$  和  $B$  相克,即  $A \Leftarrow B$ ,则  $A$  和  $B$  执行该项任务的意向强度都将减  $|\delta_6|$ ;如果关于某个任务, $A$  和该任务无关,而  $B$  和该任务相关,则  $A$  将主动削弱自己执行该任务的意向强度,让其他 Agent 去执行,因此  $A$  的意向强度将减  $|\delta_7|$ , $B$  的意向强度保持不变。上述的  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7$  分别表示受不同行为关系的影响,造成的 Agent 意向强度的变化程度。显然,不同的行为所造成的影响程度是不同的,因此用  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7$  来代表不同的影响程度,其中  $\delta_4, \delta_6, \delta_7$  为负值,其他为正值。表 4 对该量化关系进行了归纳。

表 4 行为量化过程

行为关系	A 的意向强度	B 的意向强度
A 生 B	$\delta_1$	$\delta_2$
A 克 B	$\delta_3$	$\delta_4$
A B 相生	$\delta_5$	$\delta_5$
A B 相克	$\delta_6$	$\delta_6$
A 为空属性	$\delta_7$	0
A B 都为空属性	0	0

### 6.2 五行属性

在五行学说中,世间万物皆属五行,都可以用五行描述,根据五行学说中“木、火、土、金、水”的固有特征,将 Agent 完成不同任务时所展现的特征属性抽象出来,如表 5 所列。

表 5 五行的属性举例

属性	性质	特征	行为	.....
金	硬	清静 收杀	主持 决策 刻苦	.....
水	软	寒冷 流动	可变 需求 向下	.....
木	长	生条 发达	进取 业绩 向上	.....
火	热	炎热 升腾	努力 实施 增进	.....
土	沃	长养 承载	承受 基础 根本	.....

建立行为特征集合  $B = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\}$ , 其中,

$B_1 = \{\text{硬, 清静, 收杀, 主持, 决策, 刻苦}\}$

$B_2 = \{\text{软, 寒冷, 流动, 可变, 需求, 向下}\}$

$B_3 = \{\text{长, 生条, 发达, 进取, 业绩, 向上}\}$

$B_4 = \{\text{热, 炎热, 升腾, 努力, 实施, 增进}\}$

$B_5 = \{\text{沃, 长养, 承载, 承受, 基础, 根本}\}$

在  $t$  时刻, Agent  $A_i$  关于任务  $T_j$  所展现的行为特征为  $b_{ij}, b_{ij} \in B_k, k = 1, 2, 3, 4, 5$ 。相应的属性特征如表 6 所列。

表 6 行为属性特征

$b_{ij}$ 属于	$f_{c_{ij}}$
$B_1$	金
$B_2$	水
$B_3$	木
$B_4$	火
$B_5$	土

由表 6 可知,我们可以得到每个 Agent 在时刻  $t$  时关于任务  $T$  所表现出的属性特征,属性特征之间则形成了不同的生克关系,即构成了 Agent 之间的行为关系。

用  $\beta_{ijk}$  表示 Agent  $A_i$  和  $A_j$  关于任务  $T_k$  的行为关系对  $A_i$  所造成的行为导向影响。 $\beta_{ijk}$  可以由表 3 中的关系得到,即  $\beta_{ijk} = \beta_{ijk} + \delta_i, t=1, 2, \dots, 7$ 。

## 7 五行粒子模型算法

### 算法伪代码

输入:  $c_{ik}, x_{ik}, \zeta_{ik}$

输出:

1. 初始时刻:  $t=0; R_{ik}(t)$  随机产生关系。

2. while( $du_{ik}/dt \neq 0$ )

do

$t \leftarrow t+1$

$u_{ik}(t)$  -Remark1

$du_{ik}/dt$  -Remark2

$dr_{ik}/dt$  -Remark3

$r_{ik}(t) \leftarrow r_{ik}(t-1) + dr_{ik}/dt$

$dc_{ik}(t)/dt$  -Remark4

$c_{ik}(t) \leftarrow c_{ik}(t-1) + dc_{ik}/dt$

Remark1 每个 Agent 作为个体的单独效用函数定义如下:

$$u_{ik}(t) = a[1 - \exp(-c_{ik}(t)r_{ik}(t)x_{ik}(t))], 0 < a < 1 \quad (3)$$

Remark2 通过下式获得迭代速度:

$$v_{ik}(t) = \frac{du_{ik}}{dt} = \frac{\partial u_{ik}}{\partial t} \cdot \frac{dr_{ik}}{dt} + \frac{\partial u_{ik}}{\partial c_{ik}} \cdot \frac{dc_{ik}}{dt} \quad (4)$$

Remark3 分布和权重的增量定义如下:

$$\frac{dc_{ik}(t)}{dt} = \lambda_1 \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial r_{ik}(t)} + \lambda_2 \frac{\partial J(t)}{\partial c_{ik}(t)} - \lambda_3 \frac{\partial P(t)}{\partial c_{ik}(t)} - \lambda_4 \frac{\partial Q(t)}{\partial c_{ik}(t)} \quad (5)$$

$$\frac{dr_{ik}(t)}{dt} = \lambda_1 \frac{\partial u_{ik}(t)}{\partial r_{ik}(t)} + \lambda_2 \frac{\partial J(t)}{\partial r_{ik}(t)} - \lambda_3 \frac{\partial P(t)}{\partial r_{ik}(t)} - \lambda_4 \frac{\partial Q(t)}{\partial r_{ik}(t)} \quad (6)$$

对所有 Agents 的整体效用函数定义如下:

$$J(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m u_{ik}(t) \quad (7)$$

使得所有 Agents 的最小个人效用增加的潜在的能量函数定义如下:

$$P(t) = \epsilon^2 \ln \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \exp[-u_{ik}^2(t)/2\epsilon^2] - \epsilon^2 \ln mn \quad (8)$$

其中,  $0 < \epsilon < 1$ 。

粒子间的行为交互函数定义为:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m | \sum_{j=1}^n r_{jk}(t)x_{jk}(t) - 1 |^2 - \sum_{i,k}^{u_{ik}} \{ [1 + \exp(-\zeta_{ik}(x))]^{-1} - 0.5 \} dx \quad (9)$$

其中,  $Q(t)$  中的第一项是与 Agent 的资源容量约束相关的,第

二项包括了 Agent 之间的社会交互,考虑了各个时段 Agent 关于某项任务的执行意向强度,第二项使得  $Q(t)$  成为我们想要的单调递减函数,如图 3 所示。

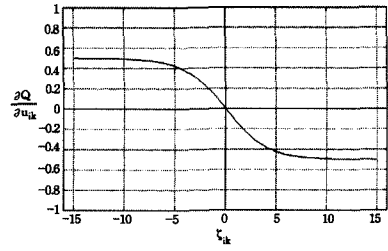


图 3  $\frac{\partial Q}{\partial u_{ik}}$  的单调性图示

对于 Agent,如下 4 个方面会影响演化中的资源分布向量和权重向量  $C$ :

(1) Remark1 中定义的个人效用方程是为了实现 Agent 的个人目标;

(2) 整体效用方程  $J$  是为了实现问题系统的解;

(3) 最小化个人效用函数  $P$  是为了实现最大最小公平分布;

(4) 在 Agents 中的迭代是为了满足约束条件和描述粒子之间的行为交互。

## 8 实验分析

### 8.1 实例分析

为了便于说明问题,我们将多 Agent 系统具体化为一个机器人系统,机器人各个部件视为不同的 Agent,这里主要考虑机器人的 7 个主要部位:眼睛、鼻子、耳朵、手臂、手、腿和脚,依次用  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$  表示,现在给机器人分配 3 个任务:开门、听写和找到食物并带回,依次用  $T_1, T_2, T_3$  表示。

由表 5 和表 6 可知,眼睛 Agent 在执行开门任务时具有主持、决策的作用,因此将眼睛( $A_1$ )执行开门任务( $T_1$ )时的五行属性标记为“金”,即  $fe_{11}$  = 金;腿( $A_6$ )和脚( $A_7$ )执行开门任务( $T_1$ ),而鼻子与执行开门任务是无关系的,直接将其五行属性标记为空,用  $fe_{21} = 0$  表示,此时该 Agent 将尽力避开该任务,并减弱自己对该任务的意向强度,以免对其他 Agent 造成干扰。因此,我们可以得到 7 个 Agent 关于 3 个任务的不同属性,如表 7 所列。

表 7 Agent 在不同任务下的属性分配

Agent	开门 $T_1$	听写 $T_2$	找到食物并带回 $T_3$
$A_1$ : 眼睛	金	土	木
$A_2$ : 鼻子	0	0	土
$A_3$ : 耳朵	0	木	0
$A_4$ : 手臂	木	水	火
$A_5$ : 手	水	火	火
$A_6$ : 腿	土	0	火
$A_7$ : 脚	土	0	土

用  $\beta_{ijk}$  表示 Agent  $A_i$  和  $A_j$  关于任务  $T_k$  的行为关系对  $A_i$  所造成的行为导向影响,例如关于开门任务  $T_1, A_1$  和  $A_2$  的行为关系对  $A_1$  的行为导向影响为  $\beta_{211} = +\delta_7$ ,对  $A_2$  的行为导向影响为  $\beta_{211} = 0$ ;关于开门任务  $T_1, A_1$  和  $A_4$  的行为关系对  $A_1$  的行为导向影响为  $\beta_{411} = +\delta_3$ ,对  $A_4$  的行为导向影响为  $\beta_{411} = -\delta_4$ 。根据此规则,可以得到 Agent 关于  $T_1$  的行为量化矩阵  $(\beta_{ij1})_{n \times n}$ ,如表 8 所列。

表 8 各 Agent 关于  $T_1$  的行为量化矩阵  $(\beta_{ij})_{n \times n}$

$\beta_{ij}$	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
A <sub>1</sub>	0	0	0	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_2$
A <sub>2</sub>	$\delta_7$	0	0	$\delta_7$	$\delta_7$	$\delta_7$	$\delta_7$
A <sub>3</sub>	$\delta_7$	0	0	$\delta_7$	$\delta_7$	$\delta_7$	$\delta_7$
A <sub>4</sub>	$\delta_4$	0	0	0	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_3$
A <sub>5</sub>	$\delta_2$	0	0	$\delta_1$	0	$\delta_4$	$\delta_4$
A <sub>6</sub>	$\delta_1$	0	0	$\delta_4$	$\delta_3$	0	$\delta_6$
A <sub>7</sub>	$\delta_1$	0	0	$\delta_4$	$\delta_3$	$\delta_6$	0

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

将 Agent  $A_i$  在  $t$  时刻对目标  $T_k$  的意向强度  $\zeta_{ik}(t)$  定义为

$$\zeta_{ik}(t) = \sum_{j=1}^n \beta_{ijk}(t) \quad (10)$$

由式(10)得到各个 Agent 对任务  $T_1$  的意向强度如表 9 所列。

表 9 各 Agent 关于任务  $T_1$  的意向强度

$\zeta_{i1}(t)$	意向强度
1	$\delta_1 + 2\delta_2 + \delta_3$
2	$5\delta_7$
3	$5\delta_7$
4	$\delta_1 + 2\delta_3 + \delta_4$
5	$\delta_1 + \delta_2 + 2\delta_4$
6	$\delta_1 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_6$
7	$\delta_1 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_6$

类似地,根据式(10)、表 3 和表 6 中的关系,我们可以得出 Agent  $A_i$  在  $t$  时刻对目标  $T_k$  的意向强度,即行为因子  $(\zeta_{ik})_{n \times n}$ ,如表 10 所列。

表 10 Agent 在不同任务下的行为因子  $(\zeta_{ik})_{n \times n}$

Agent	$T_1$	$T_2$	$T_3$
A <sub>1</sub>	$\delta_1 + 2\delta_2 + \delta_3$	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_4$	$3\delta_1 + 2\delta_2$
A <sub>2</sub>	$5\delta_7$	$3\delta_7$	$3\delta_2 + \delta_5 + \delta_4$
A <sub>3</sub>	$5\delta_7$	$2\delta_1 + \delta_2$	$6\delta_7$
A <sub>4</sub>	$\delta_1 + 2\delta_3 + \delta_4$	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3$	$2\delta_1 + \delta_2 + 3\delta_5$
A <sub>5</sub>	$\delta_1 + \delta_2 + 2\delta_4$	$\delta_1 + \delta_3 + \delta_4$	$2\delta_1 + 3\delta_5$
A <sub>6</sub>	$\delta_1 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_6$	$3\delta_7$	$2\delta_1 + \delta_2 + 2\delta_5$
A <sub>7</sub>	$\delta_1 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_6$	$3\delta_7$	$3\delta_1 + \delta_4 + \delta_5$

从上述分析过程中可以看到,行为因子是由各个 Agent 执行某项任务时所具备的五行特征之间的关系所驱动,因此只要对多 Agent 系统中的 Agent 进行最基本的属性分析即可,避免了对 Agent 之间行为的人为判断。

为了进一步说明该算法的有效性,我们在计算机上用 Matlab 进行了仿真实验。在行为关系量化过程中,将相关参数设置为: $\delta_1 = 2, \delta_2 = \delta_3 = 4, \delta_4 = -4, \delta_5 = 6, \delta_6 = -6, \delta_7 = -2$ ,由此得到行为因子  $\zeta_{ik}$  如表 11 所列。

表 11 Agent 在不同任务下的行为因子  $\zeta_{ik}$

$\zeta_{ik}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
A <sub>1</sub>	14	2	14
A <sub>2</sub>	-14	-6	14
A <sub>3</sub>	-14	12	-12
A <sub>4</sub>	6	10	26
A <sub>5</sub>	-2	2	22
A <sub>6</sub>	-4	-6	24
A <sub>7</sub>	-4	-6	8

初始时刻,将资源平均分配给每个相关任务,得到  $z(R)$  初始值为 4.033。运用五行粒子算法进行迭代之后, $z(R)$  达到最大值 6.999,此时资源已经按照粒子(Agent)之间的行为关系进行了分配,此时资源分配向量  $R$  为:

从资源分配向量  $R$  中可以看出,在  $t$  时刻 Agent 的资源都分配到了各个任务中。因此五行粒子模型算法对于解决多 Agent 系统中的资源分配问题是有效的。

## 8.2 算法比较

为了进一步说明五行粒子算法的有效性,我们将它与 Shehory 和 Kraus 提出的 Shehory-Kraus 联盟算法<sup>[15]</sup>进行比较,Shehory-Kraus 联盟算法合理利用了 Agent 之间的联盟行为来解决社会网络中的资源分配问题。五行粒子模型算法和 Shehory-Kraus 联盟算法的比较效果如图 4 和图 5 所示。

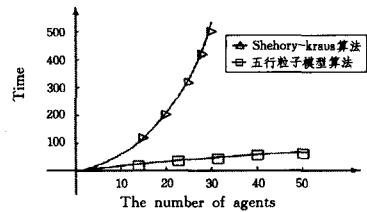


图 4 随着 Agent 数量的增加两个算法的效率比较

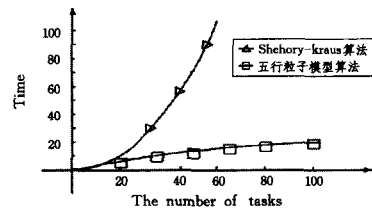


图 5 随着任务数量的增加两个算法的效率比较

从图 4 和图 5 可以看到,Shehory-Kraus 联盟算法的时间复杂度随着问题规模的增大是呈指数增长的,而五行粒子模型算法可以较好地处理大规模问题。而且 Shehory-Kraus 联盟算法需要人为地分析和设置两个 Agent 之间的行为,在有  $n$  个 Agent、 $m$  个任务的问题中,该行为设置的时间复杂度为  $O(n * n * m)$ ,在解决大规模问题时,显然是不合适的。而本文通过对 Agent 关于任务的属性分析和设置,则将复杂度降低到了  $O(n * m)$ 。

**结束语** 本文首次基于五行原理对网络中的 Agent 进行了行为建模,结合物理学中的粒子运动所具有的动力学以及五行自身蕴含的稳定性,构造了相应的五行粒子模型,并通过解决多 Agent 系统中的资源分配问题验证了该模型的正确性。五行粒子模型具有以下特点:

- (1)能够描述多 Agent 系统中的复杂关系,通过行为建模,能将 Agent 之间的行为关系进行量化;
- (2)考虑到了 Agent 的个人效益和系统的总体效益,克服了相关算法的局限性和不足;
- (3)所有粒子的演化过程是并行的,具有高度并行性,可以对其进行并行操作;
- (4)“五行”自身具有实时性、动态性,可以处理随机突发情况,对环境有很好的适应性。

## 参考文献

- [1] Shuai Dian-xun, Shuai Qing. Particle Dynamics Approach to Multi-agent Systems[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2006; 2470-2475
- [2] De Giacomo G, Patrizi F. Automatic behavior composition synthesis[J]. Artificial Intelligence, 2013, 196(3): 106-142
- [3] Re C, Res T. Coming Soon to a Lab Near You: Drag-and-Drop Virtual Worlds[J]. Science, 2011, 331(6018): 669-671
- [4] Rupert M, Li C. An Organisational Multi-agent Systems Approach for Designing Collaborative Tagging Systems[J]. Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, 2008, 2(1): 114-117
- [5] Tang Yong-li, Li Cong-dong. Dynamic Optimized Allocation of Distributed Manufacturing Resources Based on MAS[C]// IEEE International Conference on Control and Automation, 2007: 1431-1434
- [6] Jiang Yi-chuan, Zhou Yi-feng. Task Allocation for Undependable Multiagent Systems in Social Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(8): 1671-1681
- [7] Owliya M, Saadat M. Agent-Based Interaction Protocols and Topologies for Manufacturing Task Allocation[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Systems, 2013, 43(1): 38-52
- [8] Chang Y C, Chu C P. Applying learning behavioral Petri nets to the analysis of learning behavior in Web-based learning environments[J]. Information Sciences, 2010, 180(5): 995-1009
- [9] Conte R, Castelfranchi C. Cognitive and Social Action[M]. UCL Press, London, 1995
- [10] Xiang Feng, Lau . Behavioral modeling with the new bio-inspired coordination generalized molecule model algorithm[J]. Information Sciences, 2013, 252(10): 1-19
- [11] Jiang H, Jin S, Wang C. Prediction or not? An energy-efficient framework for clustering-based data collection in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(6): 1064-1071
- [12] Chenji H, Stoleru R. Toward Accurate Mobile Sensor Network Localization in Noisy Environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(6): 1094-1106
- [13] Isalan M. Systems biology: A cell in a computer [J]. Nature, 2012, 488(7409): 40-41
- [14] Yun-Wei, Duan-Chanlun. Modeling on the Five Elements Theory of Traditional Chinese Medicine Based on Predicate Logic Theory[C]// International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, 2009: 1-4
- [15] Shehory O, Kraus S. Methods for task allocation via agent coalition formation[J]. Artificial Intelligence, 1998, 101(1/2): 165-200
- 
- (上接第 194 页)
- [8] Benchettara N, Kanawati R. Supervised Machine Learning applied to Link Prediction in Bipartite Social Networks[C]// 2010 International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining. New York, 2010: 326-330
- [9] Zhu J, Hong J, Hughes G. Using Markov chains for link prediction in adaptive Web sites[M]// Soft-Ware 2002; Computing in an Imperfect World. Northern Ireland 2002; 60-73
- [10] Lerman K, Intagorn S, Kang J H, et al. Using Proximity to Predict Activity in Social Networks[C]// Proceeding WWW' 12 Companion Proceedings of the 21st International Conference Companion on World Wide Web. 2012; 555-556
- [11] Kossinets G. Effects of missing data in social networks[J]. Social Networks, 2006(28): 247-268
- [12] Salton G, McGill M J. Introduction to Modern Information Retrieval [M]. McGraw-Hill, Auckland, 1983
- [13] Breese J S, Heckerman D, Kadie C. Empirical analysis of predictive algorithms for collaborative filtering[C]// Proceedings of the fourteenth conference on uncertainty in artificial intelligence (UAI-98). 1998, 43-52
- [14] Adamic L, Adar E. Friends and neighbors on the web[J]. Social Networks, 2003(25): 211-230
- [15] Jin Y D, Zhou T, Wang B H, et al. Power-law strength-degree correlation from resource-allocation dynamics on weighted networks[J]. Physical Review Letters, 2007(15): 21-29
- [16] Symeonidis P, Tiakas E, Manolopoulos Y. Transitive Node Similarity for Link Prediction in Social Networks with Positive and Negative Links[C]// Proceedings of the fourth ACM Conference on Recommender System 2010. Barcelona, Spain, ACM Press, 2010: 183-190
- [17] Aggarwal C C. Social Network Data Analytics [M]. Springer, 2011; 39-48
- [18] 彭勇行, 赵新泉. 管理决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 46-70  
Peng Yong-xing, Zhao Xin-quan. Management Decision Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2008; 46-70
- [19] Meisel M K, Clifton A D, MacKillop J, et al. Egocentric social network analysis of pathological gambling [J]. Addiction, 2013, 108(3): 584-591
- [20] Van Noorden Richard. Online collaboration: Scientists and the social network[J]. Nature, 2014, 512(7513): 126-1299
- [21] Geckil I K, Anderson P L. Applied game theory and strategic behavior [M]. Chapman and Hall/CRC, 2009: 19-31
- [22] Daskalakis C, Goldberg P W, Papadimitriou C H. The complexity of computing a nash equilibrium[C]// Proceedings of the 38th annual ACM symposium on Theory of computing (STOC' 06). 2006; 71-78
- [23] Wu T Y, Lee W T, Guizani N, et al. Incentive mechanism for P2P file sharing based on social network and game theory[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 41: 47-55
- [24] Chen L. Corporate yield spreads and bond liquidity[R]. East Lansing; Michigan State University, 2005
- [25] Brin S, Page L. The Anatomy of a Large-scale Hyper textual Web Search Engine [J]. Computer Networks, 1998, 30: 107-117
- [26] 朱郁筱, 吕琳媛. 推荐系统评价指标综述 [J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(2): 163-167  
Zhu Yu-xiao, Lv Lin-yuan. Evaluation Metrics for Recommender Systems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(2): 163-167
- [27] Niu Shu-zi, Guo Jia-feng, Lan Yan-yan, et al. Top-k learning to rank; labeling, ranking and evaluation[C]// Proceedings of the 35th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. Portland, Oregon, USA, 2012