

典型群体突现行为的模糊控制与仿真

朱圣怡, 方洋旺, 叶圣涛

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对突现行为产生原因复杂、实际应用广泛的特点,提出一种基于数据挖掘与模糊逻辑的群体突现行为控制方法。首先基于传统 Swarm 模型,通过遍历 8 个影响突现行为产生的参数,得到不同参数下的 agent 的动态数据;同时,利用线性回归和中心聚类算法识别不同参数下所产生的突现行为类型,获得直线型与圆圈型突现行为所对应参数;然后结合 C4.5 数据挖掘算法,进一步精确参数取值范围;最后,利用模糊逻辑方法实现了多智能体产生圆圈型或直线型突现行为的控制。通过仿真验证了所提出控制方法的有效性。

关键词 突现行为;数据挖掘;模糊逻辑

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.017

中图分类号 TP3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0103-06

Fuzzy Control and Simulation of Typical Group Emergent Behavior

ZHU Shengyi, FANG Yangwang, YE Shengtao

(Aeronautic Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at the features that the emergent behavior is widely used and the occurred reasons are complex, a method of group emergent control based on data mining and fuzzy logic is proposed. Firstly, based on the traditional Swarm model, the dynamic data of agents under different parameters are obtained by traversing eight parameters influenced on the occurrence of emergent behavior. Meanwhile, linear regression and central clustering algorithm are used to recognize the type of emergent behavior under different parameters, and obtain the corresponding parameters of linear and circular emergent behavior. Then, the C4.5 algorithm is applied to precise parameters' value range. Finally, the control of the occurrence of circular and linear multi-agent emergent behavior is realized by the fuzzy logic method. The effectiveness of the proposed control method is verified by simulation.

Key words: emergent behavior; data mining; fuzzy logic

自然生态系统中存在着大量由简单的、不具有高级智能的个体组成的群体,通过个体间的协调交互,往往能产生群聚、队形协作、自然分工等复杂的群体智能行为,这种现象称为突现(emergence)^[1-2]。

根据这些突现行为^[2],科学家通过定义个体行

为规则,形成了一系列群体动力学模型^[3-5]。如基于“Boids”模型^[4]的群聚模型(Swarm);元胞自动机模型(Cellular Automata)^[5];细胞神经网络模型(Cellular Neural Networks)等^[5]。其中,Vicsek 模型具备复杂系统的一些关键特征,如动态行为、局部相互

收稿日期: 2018-01-24

基金项目: 2017 全国博士后创新人才支持计划(BX201700104)

作者简介: 朱圣怡(1994-),女,湖北监利人,硕士生,主要从事群体智能研究。E-mail: 18519532145@163.com

引用格式: 朱圣怡, 方洋旺, 叶圣涛. 典型群体突现行为的模糊控制与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6): 103-108.
ZHU Shengyi, FANG Yangwang, YE Shengtao. Fuzzy Control and Simulation of Typical Group Emergent Behavior[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 103-108.

作用和变化的邻居关系等^[6-7]。目前,国外已有人提出了一种可以用来对突现行为进行检测并且分类的多智能体仿真框架,并通过无人机群进行了验证^[8]。突现的应用范围也十分广泛,在交通^[9]、物联网^[10]等方面进行建模分析解决实际问题都得到了较好的效果。

通过对不同模型比较分析,本文选择了建立在经典模型理论上的 Swarm 模型^[11],进一步改进算法,在 MATLAB 平台下得到了更为清晰准确的 Swarm 模型的仿真,通过在一定范围内遍历 8 个初始数据,得到产生不同群体行为的大量数据,然后利用识别算法进行有效数据的筛选。

1 基于 Swarm 模型的群体突现计算仿真

1.1 Swarm 模型

Swarm 模型中的个体被称为 agent,每个 agent 的行为参数和相邻 agent 的相互作用决定 agent 的运动方向和速度。参数的不同,可以使多个 agent 在整体上表现出 Swarm 系统中的多种突现行为。在每一模拟时间段 Δt 中,agent 的瞬时加速度向量为^[6]:

$$\mathbf{V} = c_1 \mathbf{V}_1(d) + c_2 \mathbf{V}_2 + c_3 \mathbf{V}_3 + c_4 \mathbf{V}_4 + c_5 \mathbf{V}_5$$

$$\mathbf{A} = A_{\max} \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} \quad (1)$$

式中所有参数含义详见文献^[12]。

所有 agent 的运动规律都遵循下面动力学方程:

$$\mathbf{p}(t + \Delta t) = \mathbf{p}(t) + \mathbf{V} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \mathbf{A} \cdot \Delta t^2 \quad (2)$$

式中: \mathbf{p} 为每一模拟时间段 Δt 中 agent 的瞬时位置。

1.2 群体突现计算仿真

首先通过文献^[5,12]中已知的对应群体行为中各参数的取值关系给 $c_1 \sim c_5$ 、 V_{\max} 、 A_{\max} 和 d 8 个参数设置遍历范围,使每个 agent 都按照公式(1~2)来更新速度、加速度与位移信息,最终可以得到不同的动态模拟群体行为^[13-14]。

其次根据识别算法进行圆圈型和直线型突现行为的识别,筛选出有效数据。本文采用线性回归方法通过所有 agent 的 x - y 平面投影点拟合出直线,然后通过计算所有投影点与拟合直线的距离来判断是否形成直线型突现行为;采用 k-means 聚类算法,通过计算所有 agent 与聚类中心的距离来判断是否形成圆圈型突现行为。如果识别出直线型与圆圈型

突现行为则保存对应的 8 个参数。

从大量仿真数据中选取了 4 种典型群体行为形成效果较好的数据,所设置的参数见表 1。

表 1 典型突现行为参数设置

形状	零散	群聚	圆圈	直线
c_1	6.00	5.00	1.00	4.00
c_2	9.00	7.00	9.00	10.00
c_3	1.00	2.00	5.00	7.00
c_4	5.00	5.00	10.00	8.00
c_5	8.00	6.00	1.00	4.00
V_{\max}	36.00	6.00	9.00	9.00
A_{\max}	11.00	40.00	39.00	40.00
d	0.59	0.59	0.14	0.01

图 1 为表 1 数据仿真的 4 种典型群体行为,图 2 为其他学者得到的 MATLAB 平台下 Swarm 模型仿真结果,对比可见,本文的算法所得到的仿真结果更加清晰准确。

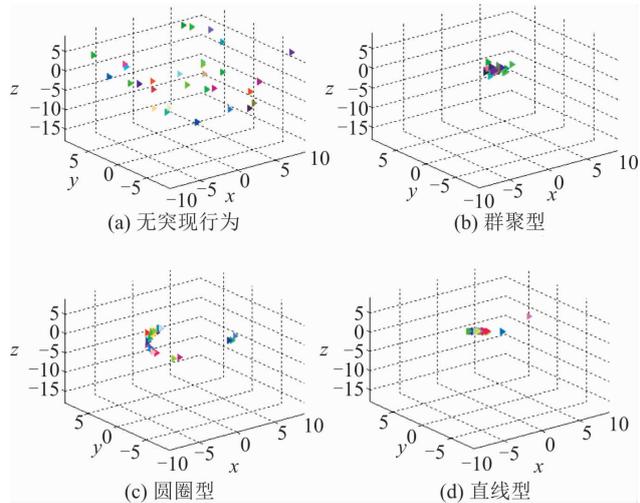


图 1 不同参数设置下的仿真结果

Fig. 1 Simulation results under different setting parameters

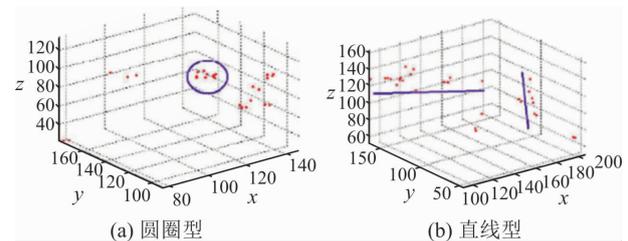


图 2 文献^[5]的仿真结果

Fig. 2 Simulation results from other scholar

无突现行为在实际中不会用到,群聚型突现行为在实际中运用情况相对较少,通过观察直线型与圆圈型突现行为产生所设置的参数的规律,发现只有部分数据可以产生效果非常好的直线型或圆圈型突现行

为,且同一组数据由于各变量的初始化数值是随机的,突现行为的产生也不具有必然性。因此,本文假设:变量不同初始值下只要能产生一次直线型或圆圈型突现行为,就算有效数据。经过反复的仿真实验验证,最终得到 200 组直线型数据和 45 组圆圈型数据。

2 基于 C4.5 算法的 Swarm 模型参数规则挖掘方法

C4.5 算法所产生的分类规则易于理解,并且准确率较高^[15]。本文利用 C4.5 算法进行数据挖掘,找出产生对应群体行为时各参数的取值关系,提取规则并进行解释说明。

2.1 参数挖掘方法及流程

Step 1 计算类别信息熵,即计算所有样本中各类别出现的不确定性之和。

$$\text{info}(D) = \text{entropy}\left(\frac{a}{a+b}, \frac{b}{a+b}\right) = -\frac{a}{a+b} \log\left(\frac{a}{a+b}\right) - \frac{b}{a+b} \log\left(\frac{b}{a+b}\right) \quad (3)$$

式中: a 和 b 分别表示所有样本中直线型和圆圈型出现的实例数量。

Step 2 计算每个属性的信息熵,即在某种属性条件下,各类别出现的不确定之和。

$$\text{info}(x) = \text{info}([a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n], x = c_1, c_2, \dots, c_5, V_{\max}, A_{\max}, d) \quad (4)$$

其中 $[a_i, b_i]$ 表示每个属性第 i 种情况下直线型和圆圈型的实例数量。计算方式如下:假设 $a_1 + a_2 + \dots + a_n + b_1 + b_2 + \dots + b_n = m$,则有:

$$\text{info}([a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n]) = \frac{a_1 + b_1}{m} \text{info}([a_1, b_1]) + \dots + \frac{a_n + b_n}{m} \text{info}([a_n, b_n]) \quad (5)$$

Step 3 计算信息增益,即信息不确定性减少的程度。如果一个属性的信息增益越大,就表示用这个属性进行样本划分可以更好地减少划分后的不确定性,即应选择该属性作为结点。

$$\text{Gain}(x) = \text{info}(D) - \text{info}(x),$$

表 2 对应群体行为中各参数取值

Tab. 2 Parameters' value of the corresponding group behavior

形状	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	V_{\max}	A_{\max}	d
直线	—	0~10	0~10	7±	0~8	6~9	36~40	—
圆圈	—	8~10	0~4	0~10	0~4	6~9	36~40	0.2±

观察表 2 所给出的参数取值范围,发现与进行规则挖掘的极少量原始数据的个别参数值不存在包含关系。分析其原因应该是 C4.5 算法在进行数据挖掘过程中存在剪枝,将少数数据剔除,得到能覆盖

$$x = c_1, c_2, \dots, c_5, V_{\max}, A_{\max}, d \quad (6)$$

Step 4 计算属性信息值,即考虑某种属性进行分裂时分支的数量信息和尺寸信息,因此不考虑子集中所包含的类别,产生一个内在的信息值。

$$\text{split info}(x) = \text{info}([p_1, p_2, \dots, p_n]), x = c_1, c_2, \dots, c_5, V_{\max}, A_{\max}, d \quad (7)$$

式中: p_1, p_2, \dots, p_n 表示每个属性中的 n 个子集。可以看出 $p_i = a_i + b_i$ 。计算方式如下;假设 $n=3$,用 p, q, r 分别表示 $p_1/(p_1 + p_2 + p_3), p_2/(p_1 + p_2 + p_3), p_3/(p_1 + p_2 + p_3)$ 则有:

$$\text{entropy}(p, q+r) = \text{entropy}(p, q+r) + (q+r) \text{entropy}\left(\frac{q}{q+r}, \frac{r}{q+r}\right) \quad (8)$$

Step 5 计算信息增益率,即信息增益除以信息值。

$$\text{Gainratio}(x) = \text{info}(x) / \text{splitinfo}(x), x = c_1, c_2, \dots, c_5, V_{\max}, A_{\max}, d \quad (9)$$

在子结点中重复上述步骤直至得到最优结果。

在 WEKA 平台下选择 J48 算法即 C4.5 算法来实现数据挖掘^[16]。选择的训练数据集包含了 $c_1 \sim c_5, V_{\max}, A_{\max}, d$ 和形状 9 个属性,共有 245 个例子。将数据集导入 WEKA 平台,进行数据预处理,例如删除离群点,或者删除多余条件的属性,离散化某些数值型属性等。对比每一次预处理后的结果正确率和生成的规则,确定最后的数据预处理操作,并得到最终的规则集。

2.2 参数挖掘结果分析

通过上述过程得到规则集,并结合各参数和变量在 swarm 模型中的实际特性,发现式(1)中的向量 V_1 至 V_5 的值在给定初始随机值后依据程序中给定的关系式而自动发生变化。而设定的 8 个参数 $c_1 \sim c_5, V_{\max}, A_{\max}$ 和 d 则对智能体的群体行为的产生起决定性的作用。

结合规则,并通过分析产生不同群体行为的参数值,得到更为准确的直线型和圆圈型群体行为中各参数的取值关系,如表 2 所示。

大多数数据的规则。与其他文献中所提出的参数取值范围对比,存在大量交叉部分。

在 MATLAB 平台下再次进行仿真实验验证得到规则的正确性。以圆圈型为例,在取值范围内遍

历各参数取值,观察每一次参数改变得到的三维图形,发现 agent 都有一个圆圈型运动的趋势,差别在于有的参数下得到的圆圈型更为标准。

3 基于模糊逻辑的群聚行为控制方法

根据第 2 节参数规则挖掘得到的产生直线型与圆圈型群体行为的参数取值范围,便可以用模糊逻辑控制方法来实现无群体行为的智能体产生圆圈型或直线型群体行为,或者直线型群体行为和圆圈型群体行为的相互转变。

3.1 模糊控制方法

本文通过 MATLAB 中的 Sim 函数调用 Simulink 程序,并通过 Simulink 的可视化编程与 m 文件相结合实现模糊控制算法。

被控对象为对智能体群体行为的产生起决定性作用的 8 个参数 $c_1 \sim c_5, V_{\max}, A_{\max}$ 和 d 。对这 8 个参数分别进行模糊控制,即采用并行控制的方式同时进行。为使程序更简便,通过量化因子和比例因子使 8 个参数具有相同的论域,并且选用相同的隶属度函数以及模糊规则。下面以参数 c_1 为例,介绍模糊控制算法^[17]的具体实现步骤^[18]。

Step 1 本文选择了二维模糊控制系统,如图 3 所示。2 个输入变量为误差 e 和误差变化率 e_c 。

$$\begin{aligned} e &= r - y & e_c &= de/dt \\ x_0 &= K_e e_c & y &= K_e e \\ u &= K_u z_0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: K_e 和 K_e 分别是误差 e 和误差变化率 e_c 的量化因子; K_u 是输出控制量 u 的比例因子; r 为通过 random number 控件和 saturation 控件产生的一个处于规则范围内的标准值;模糊控制的输出量 u 作为反馈变量返回到 MATLAB 程序中与原始参数值作和,得到新的参数值 y , y 的初始值为通过 from workspace 控件导入的初始参数值。

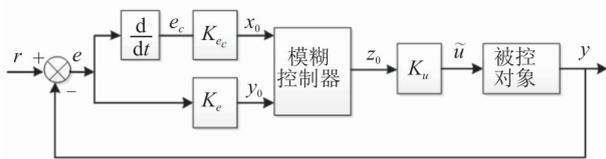


图 3 模糊控制系统结构

Fig. 3 The structure of fuzzy control system

Step 2 将输入变量的基本论域正规化为模糊量,定义模糊集合及其隶属度函数。 e 和 e_c 的实际变化范围是其基本论域,分别记为 $[-e, e]$ 和 $[-\Delta e, \Delta e]$, x_0, y_0 和 z_0 的论域均取为 $[-5, 5]$, 则量化因子可计算为:

$$K_e = \frac{5}{e}, K_{e_c} = \frac{5}{\Delta e} \quad (11)$$

如图 4 所示,各输入输出变量的隶属度函数均选择简单的三角型,且模糊子集均划分为 5 个量化等级,为[负大 负小 零 正小 正大],相应的英文字符为[NL NS ZO PS PL]。

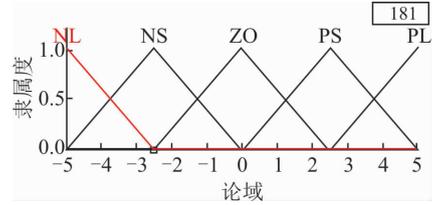


图 4 输入、输出变量隶属度函数

Fig. 4 The input and output membership function

三角型隶属度函数的解析式如式(12)。

$$\mu_f(x) = \begin{cases} \frac{x-b}{a-b}, & b \leq x \leq a \\ \frac{c-x}{c-a}, & a \leq x \leq c \\ 0, & x < b \text{ 或 } x > c \end{cases} \quad (12)$$

Step 3 根据已经转换的模糊量设计模糊规则集,按模糊推理合成规则计算控制量。

其模糊控制规则形式为 R^i : if e is A_i and e_c is B_j the \tilde{u} is \tilde{u}_{ij} , 其中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。模糊规则见表 3。

表 3 模糊规则表

Tab. 3 The fuzzy rule table

$e_c \backslash e$	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	NL	NL	NL	NS	ZO
NS	NL	NL	NS	ZO	PS
ZO	NL	NS	ZO	PS	PL
PS	NS	ZO	PS	PL	PL
PL	ZO	NS	PL	PL	PL

Step 4 将模糊控制量解模糊化为非模糊的普通变量 z_0 , 再经过比例因子变换成基本论域上的的控制量 u , 记 u 的基本论域为 $[-u, u]$, 则比例因子由下式可得:

$$K_u = \frac{u}{z_0} \quad (13)$$

采用重心法进行解模糊。 z 的可能性分布曲线与横坐标轴所包围的面积上求该面积的重心, 重心的横坐标作为解模糊化的结果 z_0 。

$$z_0 = \frac{\int_b^a z \mu_F(z) dz}{\int_b^a \mu_F(z) dz} \quad (14)$$

式中: F 为 z 分布曲线; a, b 为曲线 F 与横轴 z 的两

端交点。

3.2 群聚行为控制仿真

在 MATLAB 平台下基于 Swarm 仿真模型进行模糊控制。首先判断随机给定的 8 个参数的取值是否在能够生成突实现行为(直线型或圆圈型)的规则范围内。如果在规则范围内,则按照 Swarm 行为仿真程序运行;如果不在规则范围内,则通过模糊逻辑方法对参数进行调整,直至其在给定规则范围内后

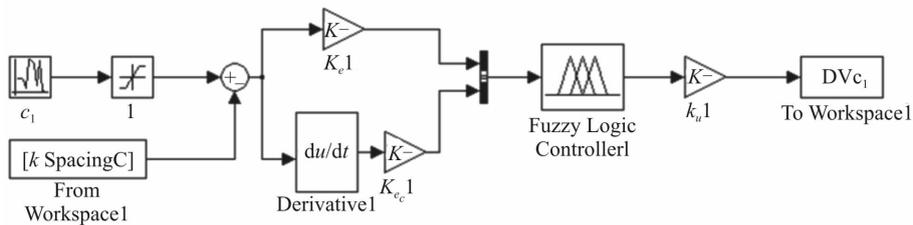


图5 Simulink 主要仿真程序

Fig. 5 The main Simulink simulation program

以随机参数产生圆圈型群聚现象为例,由图 6 可知,刚开始智能体都是杂乱无章的,通过模糊控制方法调整参数,使其慢慢靠向可以产生圆圈型突实现行为的参数范围,大约在 10 s 完成模糊控制,最终可以实现将随机给定的参数值控制到规则范围内,并产生较好的群聚行为现象。

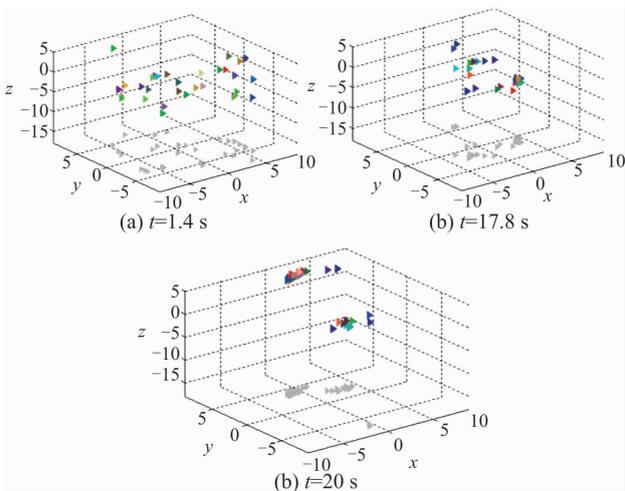


图6 模糊控制下不同时刻的群体现象

Fig. 6 Group phenomena at different times under fuzzy control

4 结语

本文提出的 Swarm 模型仿真算法相比已有的仿真算法,得到的突实现行为效果更好,可以清楚地看到圆圈型和直线型突实现行为,这也为后面的识别算法提供了好的基础条件。采用识别算法代替人主观判断是否产生突实现行为,在一定程度上提升了有效

再按照 Swarm 行为仿真程序运行得到群体行为。

根据第 2 节中参数规则得到的 2 套模糊控制规则分别能实现圆圈型和直线型突实现行为的产生。由无突实现行为到直线型圆圈型突实现行为和直线型与圆圈型突实现行为的相互转换区别在于 8 个影响参数的初始赋值。

Simulink 主要仿真程序见图 5,剩下 7 个参数均做相同操作。

突实现行为数据采集的效率。然后利用 C4.5 算法对有效数据进行数据挖掘得到参数规则,相比已有的参数规则,进一步缩小了取值范围,并通过仿真验证了参数规则的正确性。最后利用得到的参数规则分别形成能产生圆圈型和直线型突实现行为的模糊规则,用模糊控制方法控制一组随机给定的参数最终能够产生较好的直线型或圆圈型突实现现象。

本文所提出的典型突实现行为控制方法可以作为蜂群无人机或子母弹等群聚行为控制的基础,以达到希望的编队或目标打击效果。

参考文献(References):

- [1] 薛洪涛,杨光,潘亮,等. 基于多智能体协同进化机制的突实现行为研究[C]//第 32 届中国控制会议论文集. 2013;7179-7184.
XUE H T, YANG G, PAN L, et al. Emergent Behavior Research Based on Multi-Agent Coevolution Mechanism [C]// Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. 2013; 7179-7184. (in Chinese)
- [2] ZHU Y F, TANG X M. Overview of Swarrn Intelligence [C]// Proceedings of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010). Taiyuan; ICCASM, 2010; 9400-9403.
- [3] 吴淦,周凯,刘群,等. 突实现计算的研究进展[C]// 中国人工智能学会第 12 次全国会议学术年会论文集 (CAAI-12). 哈尔滨, 2007; 974-983.
WU Y, ZHOU K, LIU Q, et al. Development on Emergent Computing Research [C]// CAAI-12. Harbin; CAAI, 2007; 974-983. (in Chinese)
- [4] REYNOLDS C W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavior Model [J]. ACM SIGGRAPH

- Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [5] 吴渝, 苏捷, 周凯, 等. 突现计算模型和行为研究进展及案例分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7096-7102.
WU Y, SU J, ZHOU K, et al. Research Survey of Emergent Computation Models, Behaviors and Case Analysis [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7096-7102. (in Chinese)
- [6] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACOB E, et al. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles[J]. Physical Review E, 1995, 75(6): 1226-1229.
- [7] ZHANG X Y, JIAN M, JIA S M, et al. Optimal Fractional Order of Self-Propelled Particles in the Synchronization Motion [C] // 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: CCC, 2017: 11374-11378.
- [8] SINGH S, LU S. Detection and Classification of Emergent Behaviors Using Multi-Agent Simulation Framework(WIP)[C]//Society for Modeling & Simulation International (SCS). 2017:23-26.
- [9] KPONYO J J, NWIZEGE K S. A Distributed Intelligent Traffic System Using Ant Colony Optimization: A Netlogo Modeling Approach[C]//2nd International Conference on Systems Informatics, Modelling and Simulation. 2016: 11-17.
- [10] ROCA D, NEMIROVSKY D, NEMIROVSKY M, et al. Emergent Behaviors in Internet of Things: The Ultimate Ultra-Large-Scale System [J]. IEEE Micro, 2016, 36(6): 36-44.
- [11] SHI H, WANG L, CHU T. Swarming Behavior of Multi-agent Systems [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2004, 2(4): 313-318.
- [12] 吴渝, 唐红, 刘洪涛. 网络群体智能与突现计算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WU Y, TANG H, LIU H T. Web Swarm Intelligence and Emergent Computation [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 吴渝, 杨晶晶, 王利. Swarm 模型突现行为的动力学特性分析[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 108902.
WU Y, YANG J J, WANG L. Kinetic Property Analysis of Emergent Behaviors in Swarm Model [J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(10): 108902. (in Chinese)
- [14] 吴渝, 杨晶晶, 陈涌涛. Swarm 突现性指标体系及有效性[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2011, 23(6): 733-740.
WU Y, YANG J J, CHEN Y T. Metrics System of Swarm Emergent and Its Efficiency [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2011, 23(6): 733-740. (in Chinese)
- [15] 王志春, 刘丽娜. 一种改进的 C4.5 决策树算法[J]. 电子技术与软件工程, 2016(9): 182-183.
WANG Z C, LIU L N. An Improved C4.5 Decision Tree Algorithm [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016(9): 182-183. (in Chinese)
- [16] 威腾, 弗兰克, 霍尔. 数据挖掘: 实用机器学习工具与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WITTEN I H, FRANK E, HALL M A. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques [M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)
- [17] MENDEL J M. Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Direction [M]. Berlin: Prentice Hall PTR, 2001.
- [18] 刘革辉, 单杰锋, 郑楚光. Matlab 软件中的 Fuzzy Logic 工具箱在模糊控制系统仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2000, 17(5): 69-72.
LIU G H, SHAN J F, ZHENG C G. The Application of Matlab's Fuzzy Logic Toolbox on Simulation of Fuzzy Control System [J]. Computer Simulation, 2000, 17(5): 69-72. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)