

人工反应扩散网络模型及其应用研究

黄国锐¹, 王世贵², 刘晓琴³, 丁光照¹

(1. 中国人民解放军31002部队, 北京100094; 2. 陆军炮兵防空兵学院, 安徽合肥230031;
3. 安徽农业大学经济技术学院, 安徽合肥230061)

摘要: 内分泌系统是由各种内分泌细胞组成的复杂系统, 其蕴含的基于荷尔蒙的反应扩散信息处理机制, 对仿生智能理论和技术的研究具有重要的借鉴意义. 在分析生物内分泌系统中荷尔蒙的反应扩散作用机理基础上, 提出了人工反应扩散网络模型和基于该模型的自学习算法, 该模型通过模拟荷尔蒙的扩散以及与受体的反应来实现对人工生命体的控制. 为了验证模型及其算法的有效性, 本文做了机器人自动导航控制的仿真实验, 结果也表明了该模型及其算法具有良好的自适应求解能力.

关键词: 内分泌系统; 荷尔蒙; 反应扩散; 机器人; 行为控制

中图分类号: TP393.08 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)12-2569-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.12.016

Research on Artificial Reaction Diffusion Network Model and Its Application

HUANG Guo-rui¹, WANG Shi-gui², LIU Xiao-qin³, DING Guang-zhao¹

(1. 31002 Division of PLA, Beijing 100094, China; 2. Army Artillery Air Defense Academy, Hefei, Anhui 230031, China;
3. Economic and Technical College of Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230061, China)

Abstract: Endocrine system is a complex system composed of various endocrine cells. It contains a hormone-based reaction diffusion information processing mechanism, which provides very important reference for the research of bionic intelligence theory and technology. Based on the analysis of the reaction diffusion mechanism of hormones in biological endocrine system, an artificial reaction diffusion network model and a self-learning algorithm based on the model are proposed. The model simulates the diffusion of hormones and the reaction with receptors to control artificial life. In order to verify the validity of the model and its algorithm, a simulation experiment of robot automatic navigation control is done. The results also show that the model and algorithm have good adaptive resolution ability.

Key words: endocrine system; hormone; reaction diffusion; robot; behavior control

1 引言

以仿生智能为代表的自然计算一直是人工智能领域的研究热点, 并取得了丰硕的研究成果, 如神经网络、遗传算法和人工免疫系统等^[1-3]. 人工内分泌系统的研究也是其中一个重要方面, 目前该研究主要集中在两个方面: 一是借鉴内分泌系统对神经系统的调节作用机理, 提出了集神经网络和内分泌系统于一体的自主体行为控制算法^[4], 并将之应用于机器人行为控制; 二是基于内分泌情感反应机制, 提出了情感自主体模型^[5], 并在此基础上探索动态复杂环境中自主体自适

应能力生成机理. 上述两个方面的研究, 都将人工内分泌系统作为一个整体进行建模, 主要是对其外在表现出来的调节功能进行仿真, 缺乏对其内部信息处理机制的研究. 本文在分析内分泌系统内部荷尔蒙的反应扩散作用机理基础上, 建立了人工反应扩散网络模型和基于该模型的自学习算法, 并对模型和算法的应用展开了初步研究.

2 荷尔蒙的反应扩散

内分泌系统由各种内分泌细胞构成, 细胞之间没有直接的物理连接, 而是通过荷尔蒙的分布式反应扩

散而相互联系的,所有内分泌细胞连同它们分泌的荷尔蒙组成一个复杂巨网络结构^[4].而神经系统则不同,神经系统内部神经元之间是有物理连接的,基于神经元之间相互作用的机理,人们提出了人工神经网络模型,并取得了非常广泛的应用.受人工神经网络成功应用的启发,我们认为对内分泌系统的网络调节机理展开深入研究,并基于此建立新型人工智能模型,具有重要的意义.

在生物内分泌网络中,节点是内分泌细胞,节点间的连接是通过细胞所分泌的荷尔蒙的反应扩散来实现的^[6,7].不同种类内分泌细胞的表面都分布着特定的荷尔蒙受体,这些受体有选择地接受其他一种或多种内分泌细胞分泌的荷尔蒙,并对其自身分泌荷尔蒙的行为进行调节,增加或减小荷尔蒙的分泌^[8].内分泌细胞之间没有直接接触,其相互作用是通过荷尔蒙在血液里扩散并在目标细胞(靶细胞)上的反应来实现的.

荷尔蒙受体与荷尔蒙之间的反应作用是有特异性的,一种荷尔蒙受体只能对一种特定的荷尔蒙起反应.内分泌分析实验结果表明^[6],荷尔蒙受体分子与荷尔蒙分子的表面不是光滑的,而是凹凸不平的,相互耦合形成了复杂可变的立体结构型态.荷尔蒙是一种结构可变化配体,而荷尔蒙受体则是结构可变化配基,配体和配基之间可相互诱引,以便更好适应对方的结构型态.而且不少荷尔蒙受体分子的表面结构还存在亚型,这就为荷尔蒙与荷尔蒙受体发生特异性作用提供了基础.荷尔蒙分子和荷尔蒙受体分子的结构是由基因决定的^[4,9],是生物长期遗传进化的结果.

综上所述,内分泌系统中的信息传递是通过荷尔蒙的反应扩散来实现的,它有两个特点:一是扩散的无定向性.荷尔蒙的扩散没有目标方向性,其随血液流动到生物机体的各个部位;二是行为反应的特异性.同一荷尔蒙在不同的靶细胞(荷尔蒙受体)上会引起不同的行为反应,而这种行为反应的特异性是由遗传基因决定的.鉴于此,本文提出了人工反应扩散网络(Artificial Reaction Diffusion Network, ARDN)模型和基于该模型的自学习算法,并将其应用于机器人的行为控制仿真实验.

3 基于荷尔蒙反应扩散作用机制的 ARDN 模型

3.1 ARDN 模型的生物学基础

内分泌系统中荷尔蒙的调节作用如图 1 所示,其中实线表示增强作用,即箭尾端的内分泌细胞对箭头端的内分泌细胞的荷尔蒙分泌起到增强作用.相反,虚线表示减弱作用,即箭尾端的内分泌细胞对箭头端的内分泌细胞的荷尔蒙分泌起到减弱作用.如内分泌细胞 i

所分泌的荷尔蒙一方面增强细胞 j 的分泌,另一方面减弱细胞 l 的分泌.内分泌系统中有一类细胞(神经分泌细胞)受神经系统的控制,将神经信息转化为内分泌系统中的荷尔蒙;还有一类内分泌细胞分泌的荷尔蒙可直接调节非内分泌靶器官或组织的行为;其他内分泌细胞分泌的荷尔蒙主要在系统内部发生调节作用,维持内分泌系统的动态平衡^[10].通过荷尔蒙的扩散以及与荷尔蒙受体之间的反应,使各种内分泌细胞形成了一个网络结构.

从整体功能看,内分泌系统虽然受神经系统的调节,但是是局部和有限的,其对机体的调节功能主要是依赖于系统内部细胞之间复杂的相互作用,对这种复杂相互作用的建模值得深入研究.

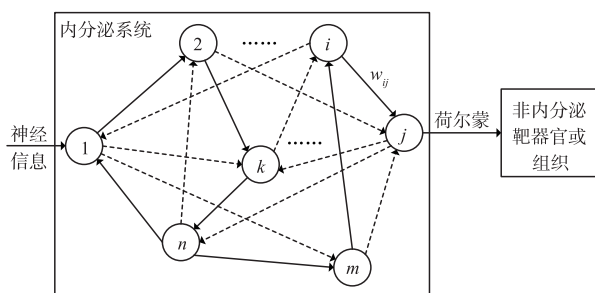


图1 荷尔蒙调节作用示意图

基于对荷尔蒙反应扩散作用机理的认识,同时受神经网络模型的启发,我们认为用荷尔蒙反应扩散网络模型来描述内分泌系统的结构和行为是合适的.

3.2 ARDN 模型的设计

3.2.1 ARDN 的网络结构

与人工神经网络相类似,ARDN 也由节点以及节点间的网络连接所构成.节点代表各种内分泌细胞,它们分泌与其种类相对应的特异性荷尔蒙.节点间的连接体现了细胞之间的相互作用关系,连接强度对应于细胞之间的相互作用强度,它是通过荷尔蒙分子与荷尔蒙受体分子之间的反应来实现的.如图 1 所示, w_{ij} 表示第 i 种内分泌细胞和第 j 种内分泌细胞之间的作用强度,其大小主要取决于荷尔蒙分子与荷尔蒙受体分子之间的匹配度.荷尔蒙与荷尔蒙受体分子之间的匹配度是长期进化形成的,如果没有发生基因突变,该匹配度是不可改变的.虽然荷尔蒙与荷尔蒙受体分子之间的匹配度是不可改变的,但是网络中节点之间的连接强度(如 w_{ij})是可以在环境自适应过程中得到变化的.变化的途径有两种:一是改变相应内分泌细胞的数量,进而改变它们所分泌荷尔蒙的浓度;二是改变细胞膜上荷尔蒙受体分子的数量.这种调节机理使得内分泌系统具有很强的环境自适应能力.显然,ARDN 的结构是一个连通的有向图,但是是非全连接的,因为不是所

有内分泌细胞之间都存在增强或减弱的调节关系.

3.2.2 网络节点的设计

网络节点表示的是内分泌细胞,与人工神经网络中的神经节点不同,ARDN 中的内分泌节点都是自治个体,具有独立的能力. 内分泌节点个体的行为特异性是由其基因决定的. 网络节点的结构(基因)定义如图 2 所示. 把所有内分泌节点的基因片段连接在一起,就得到了整个反应扩散网络节点的基因序列.

这里假定 ARDN 中一共只分泌四种荷尔蒙,每一种内分泌节点的基因序列由四个片段所构成,对应于四种荷尔蒙的分泌. 在实际应用中,ARDN 中荷尔蒙的种类要根据求解问题的复杂度来确定. 每一个基因片段都包含三个值域:Flag、GS 和 Area. Flag 值域的取值为 0 或 1,当为 0 时,表示该内分泌节点不分泌此荷尔蒙;相反当取值为 1 时,则分泌该荷尔蒙. GS 值域的取值可以为 G (Greater) 或 S (Smaller),当取值为 G 时,表示内分泌节点的激活度大于 Area 域表示的值时,分泌该荷尔蒙;相反当取值为 S 时,表示内分泌节点的激活度小于 Area 域表示的值时,分泌该荷尔蒙. Area 表示分泌特定荷尔蒙时,该节点的激活度阈值 σ_{ij} ,即内分泌节点 i 分泌 j 类荷尔蒙 H_j 时的阈值,其取值为大于 0 且小于 1 的实数.

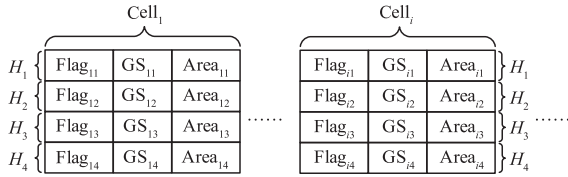


图2 ARDN 的节点结构

节点 i 分泌荷尔蒙 H_j 的浓度 CH_{ij} 用式(1)进行计算. 其中 $\alpha_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的激活度, k_j 是常数系数,当 GS 值域的取值为 G 时, k_j 等于 1; 当 GS 值域的取值为 S 时, k_j 等于 -1 . $\text{Sign}(\cdot)$ 是符号函数,表示当其自变量大于 0 时,其取值为 1; 否则,其取值为 0.

$$CH_{ij}(t) = |(\alpha_i(t) - \sigma_{ij})| * \text{Sign}((\alpha_i(t) - \sigma_{ij}) * k_j) \quad (1)$$

3.2.3 网络连接的遗传基因的设计

网络连接是通过荷尔蒙与荷尔蒙受体分子之间的反应来实现的. 针对前面设定的四种荷尔蒙,相对应也有四种荷尔蒙受体分子,都分布在内分泌细胞膜上. 为此,设计了如图 3 所示的网络连接的遗传基因编码.

H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 分别表示单个网络连接上的四种荷尔蒙受体分子所能接受的荷尔蒙的种类. SW 是一个标识符,如果 SW 的取值为 S (Strengthen),则表示该荷尔蒙受体在接受到 H_i 表示的荷尔蒙时,会增强该网络连接;相反,如果 SW 的取值为 W (Weaken) 时,则会减弱该网络连接. 增强或减弱的大小的由相应荷尔蒙浓度

决定. 所有网络连接的遗传基因编码连结在一起,就组成了整个 ARDN 连接的基因编码序列.

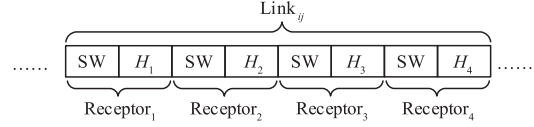


图3 ARDN 的网络连接结构

3.2.4 网络节点和连接的状态方程

一个网络节点的激活度(状态)是由与之相连的所有网络节点的状态和网络连接的强弱(权重)决定的. 这里的网络连接是由荷尔蒙与荷尔蒙受体的相互作用而形成的,其权重受荷尔蒙浓度的调节. 网络节点的状态方程如式(2)和式(3)所示.

$$A_j(t+1) = \rho * \alpha_j(t) + S_j(t) + \sum_{i=1}^N w_{ij}(t) * \alpha_i(t) \quad (2)$$

$$\alpha_j(t+1) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - A_j(t+1))} \quad (3)$$

式(2)中 N 表示网络节点的个数, $\alpha_i(t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的激活度, $w_{ij}(t)$ 表示 t 时刻节点 i 对节点 j 的调节作用强度, $\sum w_{ij}(t) * \alpha_i(t)$ 表示 t 时刻所有相连节点对节点 j 的刺激总和, $S_j(t)$ 表示环境对节点 j 的刺激, ρ 是一个大于 0 小于 1 的常数,用于表示上一时间步的节点激活度对当前时间步节点激活度的影响, $A_j(t+1)$ 是中间变量. 式(3)用一个 S 型函数把节点的激活度归一化到 (0,1) 区间.

基于上述设计的网络连接结构,建立了其状态方程,如式(4)~(7)所示.

$$w_{ij}(t+1) = \frac{\exp(WV_{ij}(t+1)) - 1}{\exp(WV_{ij}(t+1)) + 1} \quad (4)$$

$$WV_{ij}(t+1) = \begin{cases} w_{ij}(t) + \eta * Q * (1 + w_{ij}(t)), & Q > 0 \\ 0, & Q = 0 \\ w_{ij}(t) + \eta * Q * (1 - w_{ij}(t)), & Q < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Q = \sum_{SW=S} C_{total}(H_j) - \sum_{SW=W} C_{total}(H_j) \quad (6)$$

$$C_{total}(H_j) = \sum_{i=1}^N CH_{ij}(t) \quad (7)$$

从式(5)可以看出,随着 Q 值的大小不同,采用了不同的规则. 当 $Q > 0$ 时,表示网络连接在接受多种荷尔蒙的综合刺激后,得到了加强;相反,当 $Q < 0$ 时,网络连接得到了减弱. η 表示学习率, $WV_{ij}(t+1)$ 是引入的中间变量. $w_{ij}(t+1)$ 表示 $t+1$ 时刻节点 i 对节点 j 的调节作用强度,是用式(4)将 $WV_{ij}(t+1)$ 归一化到 $(-1, 1)$ 区间而得到的. 式(7)中的 $CH_{ij}(t)$ 表示 t 时刻节点 i 所释放的荷尔蒙 H_j 的浓度,用式(1)计算.

4 基于 ARDN 模型的行为选择算法

基于 ARDN 模型的行为选择算法 (Behavior Selection Algorithms based on ARDN model, 以下简称 BSA - ARDN) 的详细步骤如下:

步骤 1: 随机生成初始群体, 群体中的每个个体表示一个 ARDN 结构, 包含网络节点和连接的定义.

步骤 2: 对每个个体, 运用基于 ARDN 模型的自学习算法 (Self-learning Algorithms based on ARDN model, 以下简称 SAARDN) 进行自学习, 并在学习结束后进行适应度评估计算.

步骤 3: 如果达到最大进化代数, 或最优个体的适应度无明显变化, 则结束; 否则转向第四步.

步骤 4: 选择、交叉和变异等遗传操作, 更新得到新一代群体, 并转向步骤 2.

SAARDN 的流程如图 4 所示. 其中荷尔蒙扩散和荷尔蒙反应是内分泌系统实现调节功能的主要步骤.

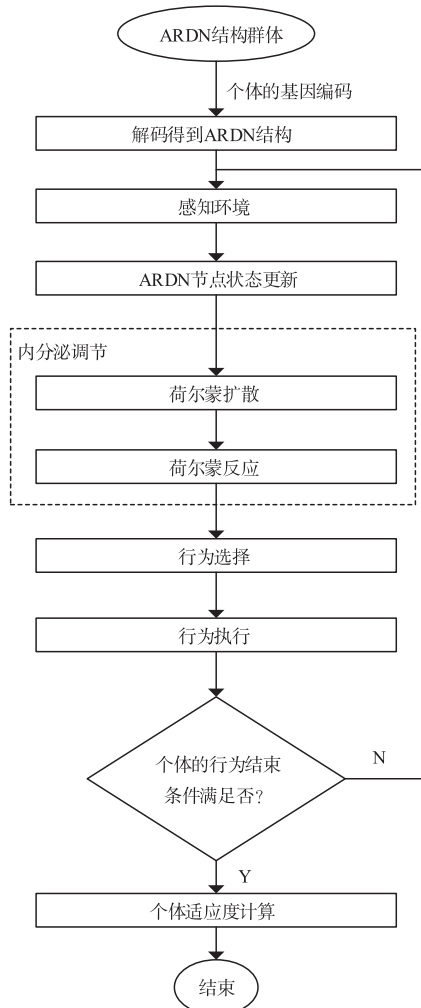


图4 SAARDN流程

个体的遗传基因编码由两部分构成. 其中一部分用于描述网络节点的状态, 另一部分用于描述网络连接的状态 (即荷尔蒙与荷尔蒙受体之间的关系和作用强度). 个体能在与环境的交互中, 通过 SAARDN 进行自学习, 逐渐提高对环境的自适应能力. ARDN 中节点之间连接关系和权重受先天 (遗传) 和后天 (自学习) 的共同调节作用. 这样设计的结果既保证了算法的收敛速度, 又避免了陷入局部最优解, 符合自然计算设计^[2]的一般要求.

5 仿真实验设计及结果分析

选用通用 Khepera Robot 仿真平台^[11,12] 来进行实验. Khepera 机器人结构如图 5 所示. 它有 8 个障碍探测传感器以及两个发动机, 通过改变发动机左右两个轮子的转速和转向, 可以使 Robot 完成前进、倒退、左转、右转等动作.

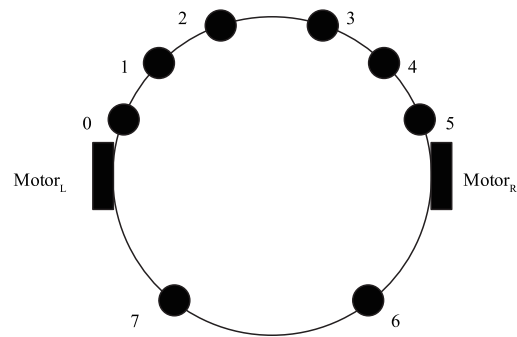


图5 Khepera仿真机器人结构

5.1 仿真实验设计

针对 Khepera 机器人在复杂环境中的自主导航问题, 设计了一个三层的 ARDN, 即输入层、隐藏层和输出层. 输入层设置 8 个节点, 分别对应 Khepera 的八个感知器, 感知器的感知结果是 0 到 1 之间实数. 隐藏层节点数设置为 6; 输出层节点数设置为 2, 分别对应机器人的两个发动机. 在 ARDN 中, 共设置了四种类型的荷尔蒙, 分别为: 增大左轮速度的荷尔蒙 (h_L^+)、减小左轮速度的荷尔蒙 (h_L^-)、增大右轮速度的荷尔蒙 (h_R^+)、减小右轮速度的荷尔蒙 (h_R^-). 网络连接有两种类型: 一种连接到左轮发动机 $Motor_L$, 另一种连接到右轮发动机 $Motor_R$. 第一种连接上只有两种荷尔蒙受体, 分别接受 h_L^+ 和 h_L^- . 第二种网络连接上也只有两种荷尔蒙受体, 分别接受 h_R^+ 和 h_R^- .

个体适应度 F_{fit} 的计算如式 (8) 所示. 其中, B_p 表示碰撞惩罚, 取为 -250. $Z_{visited}$ 表示机器人到访的区域数. 将机器人总的活动空间划分为 $5 * 5$ 个方格, 每个方格表示一个大小为 $150 * 150$ 的区域. LEN 为机器人的运动轨迹长度. V 表示每行进一步的奖励, 其计算方法如

式(9)所示. 群体中的每个个体都分别进行十次运动导航实验, 每次试验中的最大时间步数均设为 1000, 十次试验计算出来的平均值作为该个体的适应度.

$$F_{\text{fit}} = B_p + 250 * Z_{\text{visited}} + V + \text{LEN} \quad (8)$$

$$V = \sum_{\text{step}} (V_L + V_R) (2 - (V_L - V_R)^2) \quad (9)$$

5.2 实验结果与分析

基本上述仿真实验设计, 本文进行了两种独立对比实验. 实验 1 是用 BSA-ARDN 算法控制机器人的行为选择; 实验 2 是将图 4 中内分泌调节的两个步骤删除, 得到基于遗传算子 (Genetic Algorithm, GA) 的机器人行为选择算法. 每种实验群体规模均为 30, 进化代数设为 20.

采用 BSA-ARDN 控制的机器人具有良好的避障能力, 在前方或一侧出现障碍时, 机器人会以小角度转向自动避开障碍. 最优个体的行进轨迹如图 6 所示, 经过若干代的先天进化和后天自学习, 机器人几乎遍历了所有可以行走的区域.

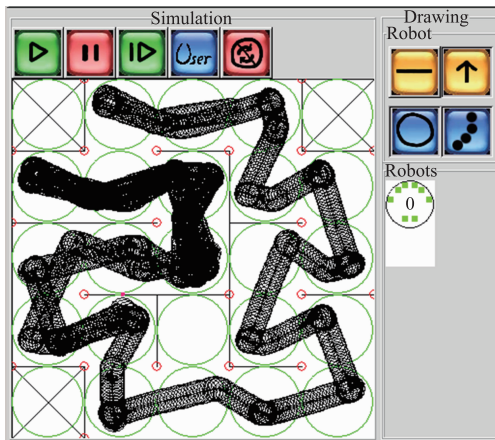


图6 机器人的最优行进轨迹

在实验 2 中, 用 GA 控制的仿真机器人漫游能力普遍比较弱, 典型的机器人行进轨迹如图 7 所示. 机器人

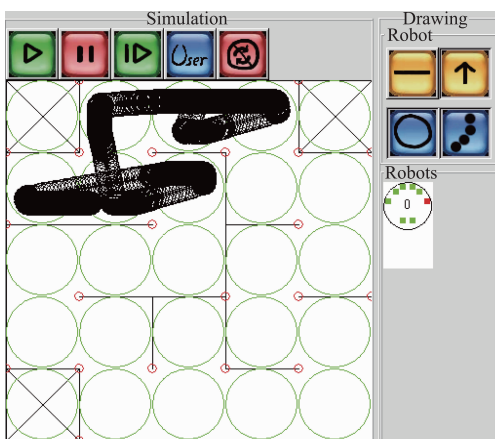


图7 进化机器人的典型行进轨迹

不能遍历所有可以行走的区域. 这种漫游能力与进化机器人方法^[13]得到的结果是一致的.

将机器人遍历的区域数作为算法性能指标进行对比, BSA-ARDN 和 GA 的求解曲线如图 8 所示, 无论是求解速度还是解的性能 BSA-ARDN 都要远远优于 GA. 对算法复杂度和稳定性的理论分析, 将在后续研究工作中进一步展开.

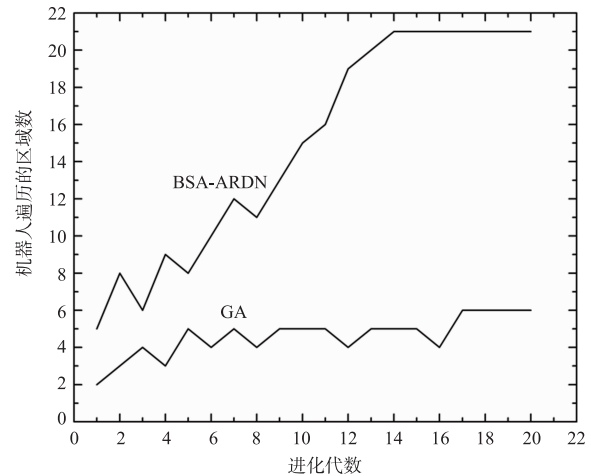


图8 两种算法的求解曲线图

6 结束语

内分泌系统和神经系统的调节机理不同, 它是通过荷尔蒙的反应扩散作用来实现对机体功能的调节. 本文在深入分析内分泌系统中荷尔蒙的反应扩散作用机理的基础上, 设计了 ARDN 模型和基于该模型的自学习算法, 并进行了机器人的自主导航仿真实验, 结果验证了该模型和算法的有效性. 对 ARDN 结构的最优设计、学习算法的一些参数的最优选取和上述实验结果的理论分析还需要做更深入的研究.

参考文献

- [1] Muniyandi R C, Maroosi A. Enhancing the simulation of membrane system on the GPU for the N-queens problem [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24 (4): 740 - 743.
- [2] 康琦, 安静, 汪镭, 等. 自然计算的研究综述[J]. 电子学报, 2012, 40(3): 548 - 558.
Kang Q, An J, Wang L, et al. Nature-inspired computation: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 548 - 558 (in Chinese).
- [3] 刘渊, 杨永辉, 张春瑞, 等. 一种基于遗传算法的 Fuzzing 测试用例生成新方法[J]. 电子学报, 2017, 45(3): 552 - 556.
Liu Y, Yang Y H, Zhang C R, et al. A novel method for fuzzing test cases generating based on genetic algorithm

- [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3): 552 – 556 (in Chinese).
- [4] Lin G D, Wang X F. DHMRCs model: A hormone inspired multi-robot formation algorithm [A]. Proceedings of the 2012 Second International Conference on Electric Information and Control Engineering [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2012. 597 – 600.
- [5] 梁建伟. 人工内分泌情感模型及其在机器人漫游中的应用[J]. 通化师范学院学报(自然科学), 2015, 36(3): 5 – 8.
Liang J W. Artificial endocrine emotion model and its application in robot wandering [J]. Journal of Tonghua Normal University (Nature Science), 2015, 36(3): 5 – 8 (in Chinese).
- [6] 王玉. 人工内分泌模型中人工激素调节机制的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
Wang Y. Research on Artificial Hormones Modulation Mechanism of Artificial Endocrine Model [D]. Xian: Xian University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [7] 赵理, 王磊, 徐庆征. 人工内分泌机制在最近邻规则约减中的应用[J]. 应用科学学报, 2012, 30(4): 397 – 407.
Zhao L, Wang L, Xu Q Z. Nearest neighbor rule condensation algorithm based on artificial endocrine system [J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(4): 397 – 407 (in Chinese).
- [8] Pacher M. Using a machine learning algorithm to control an artificial hormone system [A]. Proceedings of the 2014 IEEE International Symposium on Object/ Component/ Service-Oriented Real-Time Distributed Computing [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2014. 317 – 325.
- [9] Weng J Y. A bridge-islands model for brains: Developing numeric circuits for logic and motivation [A]. Proceedings of the 2014 International Joint Conference on Neural Networks [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2015. 2608 – 2615.
- [10] Formolo D, Bosse T. A conversational agent that reacts to vocal signals [A]. Proceedings of the 2016 8th International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment [C]. Utrecht, The Netherlands: Springer, 2017. 285 – 291.
- [11] Ganapathy V, Soh C Y, Lui W L D. Utilization of webots and khepera II as a platform for neural q-learning controllers [A]. Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. 783 – 788.
- [12] 李方舟. 基于内分泌算法的机器人行为控制 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
Li F Z. An Endocrine System Inspired Behavior Controlling Algorithm for Robots System [D]. Shanghai: Donghua University, 2016 (in Chinese).
- [13] Ziegler J, Banzhaf W. Evolving control metabolisms for a robot [J]. Artificial Life, 2001, 7(2): 171 – 190.

作者简介



黄国锐 男, 1975 年 1 月生于安徽省太湖县, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为计算智能、机器学习和大数据分析等。
E-mail: 349922283@qq.com



王世贵 男, 1974 年 1 月生于江苏省东台市, 博士, 副教授, 主要研究方向为装备需求分析与评估、智能信息处理等。

刘晓琴 女, 1975 年 6 月生于安徽省太湖县, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算智能、机器学习等。

丁光照 男, 1983 年 5 月生于山东省高密市, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能机器人、人工智能等。