

SIGA: 一种新的自适应免疫遗传算法*

乔少杰^{1,2}, 唐常杰¹, 代术成¹, 李川¹, 陈瑜¹, 邱江涛¹, 刘齐宏¹

(1. 四川大学计算机学院, 四川 成都 610065;

2. 新加坡国立大学计算机学院, 新加坡 117590)

摘要: 为了克服传统遗传算法收敛速度慢和容易陷入局部最优的不足, 提出了一种新的自适应免疫遗传算法 SIGA (Self-adaptive Immune Genetic Algorithm)。新算法对遗传算子进行改进, 提出了自适应交叉和变异算子, 保证了种群多样性和防止早熟现象发生; 为了使免疫算子兼顾个体多样性和提高种群个体适应度的水平, 提出了基于相似性矢量距离的免疫选择算法。实验表明, 与传统的遗传算法和免疫算法相比, 该算法收敛速度提高了 3~90 倍, 求解精度达到 10^{-3} , 并有效地抑制了早熟现象。

关键词: 自适应; 免疫遗传算法; 免疫选择; 早熟

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 03-0006-04

简单遗传算法 (Simple Genetic Algorithm, SGA) 虽然已经较为完善, 在人工智能、模式识别等众多领域得以应用, 但在处理大规模网络时遗传算法仍然存在着“早熟”现象, 局部搜索能力差, 进化过程中不能较好地利用系统信息; 并且进化后期易出现振荡现象, 因此不能保证以最大概率收敛到全局最优解^[1]。近年来生物领域的研究发现人工免疫原理对提高遗传算法的性能具有重要的启迪作用^[2]。

人工免疫系统是一种受生物免疫理论启发的学习技术, 其研究成果涉及到机器控制、数据处理、优化学习等领域, 已经成为继模糊逻辑、神经网络和进化计算后人工智能的又一研究热点^[3]。由于免疫行为可以很好地保持种群的多样性, 有效地改善算法的寻优效果, 因此国内外的学者开始致力于这方面工作的研究。但是, 目前提出的基于免疫学理论的算法都是在解决具体问题中提出的, 还没有像遗传算法那样应用广泛的一般模式。免疫遗传算法 (Immune genetic algorithm, IGA) 就是将遗传算法与免疫算法的优点结合起来形成的一种新型算法^[4], 因此对其进行的研究具有重要的指导意义。

1 相关工作

传统的免疫遗传算法往往选取与种群个体适应度成正比的方式设计免疫选择算子, 极易使种群中适应度相似的个体迅速增长, 从而导致算法不能收敛。针对这一不足, 文献 [5] 中提出的 IGA 系统

应用退火选择算法, 该算法可以极大地降低进化过程中“退化”现象的发生, 但没有考虑种群多样性对进化过程的影响。文献 [6] 模拟部分免疫特点提出一种免疫遗传算法, 该算法的优化能力强于遗传算法, 但变异算子的自适应能力较差。

针对上述方法的不足, 本文提出一种新的自适应交叉和变异算子, 保证了种群的多样性和防止了早熟现象的发生; 提出了一种基于相似性矢量距离的免疫选择算法, 该算法既考虑了抗体的适应度, 又与抗体的浓度相关, 提高了求解问题的准确性。

2 自适应免疫遗传算法——SIGA

免疫遗传算法的基本思想就是在传统遗传算法的基础上加入一个免疫算子, 加入免疫算子的目的是防止种群退化。免疫算子由接种疫苗和免疫选择两个步骤组成^[5]。

2.1 SIGA 算法描述

在 SIGA 算法中, 抗体群体中所有个体均采用二进制编码, 交叉操作选择单点和双点交叉两种方式, 目的是既可以保持种群进化的多样性, 又不会因为多点交叉破坏个体中较好的模式^[7]。其中交叉点的选取是通过自适应交叉率 P_c 获取的, 变异操作是对每个基因座以自适应变异率 P_m 进行变异。算法的主要步骤如下:

1) 确定种群大小 N 和种群个体长度 l , 随机生成种群, 并将种群中的个体二进制编码, 同时将种群分为 P 个子群体以实现小生境隔离^[7];

* 收稿日期: 2007-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773169); 四川省青年软件创新工程资助项目 (2007AA0032)

作者简介: 乔少杰 (1981 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 唐常杰; E-mail: tangchangjie@cs.scu.edu.cn

2) 对求解问题进行分析从中提炼出最基本的特征信息, 即疫苗;

3) 从第一代个体 ($n=1$) 开始, 对 P 个子群体进行自适应交叉和变异操作;

4) 采用文献 [8] 提出的方法对种群个体进行浓度控制及激励值计算。

5) 对经过复制的个体进行免疫操作。免疫选择采用 2.3 节提出的基于相似性矢量距离的免疫选择算法。

6) 如果满足算法终止条件则结束计算, 否则 $n = n + 1$ 转第 3 步骤。

2.2 自适应交叉和变异算子

目前普遍认为遗传操作中交叉率和变异率应该随着遗传操作而自适应地变化, 这样有组织的进化具有更高的鲁棒性和全局最优性。本文对文献 [9] 提出的自适应交叉、变异率进行改进得如下所示的自适应交叉和变异率。

(a) 自适应交叉率为:

$$p_c^i = \begin{cases} p_c^{i-1} - \frac{(p_c^{i-1} - p_c^{i-2}) * (f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ p_c^{i-1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $i=2, \dots, n$, p_c^i 表示第 i 代两个进行交叉操作个体的交叉率, f_{max} 是当前种群中最大的适应度函数值, f_{avg} 是每代群体的平均适应度函数值, f' 表示进行交叉的两个个体中较大的适应度函数值, p_c^1 是初始化时第一代的交叉概率。

从公式 1 可以发现 $f' \geq f_{avg}$ 时, 表示经过上一代的交叉操作, 抗体取得了比较满意的进化效果, 可以适当降低上一代交叉率的取值, 保证 SIGA 算法不退化为随机搜索。当 $f' < f_{avg}$ 时, 上一代的交叉概率不发生变化, 使抗体保持较好的变异效果。

(b) 自适应变异率为:

$$p_m^i = \begin{cases} p_m^{i-1} - \frac{(p_m^{i-1} - p_m^{i-2}) * (f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg}, i = 2, \dots, n \\ p_m^{i-1}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

其中, p_m^i 表示第 i 代变异个体的变异率, f 是要变异个体的适应度函数值。通过使用自适应变异算子可以提高变异操作的效率, 加快收敛速度。

2.3 基于相似性矢量距离的免疫选择算法

选择概率通常与个体适应度成正比, 这样很容易使种群中具有相似适应度的个体迅速增加, 从而导致算法未成熟收敛。为了克服传统算法的不足, 借鉴文献 [4] 提出的改进免疫遗传算法的思想, 提出了基于相似性矢量距离的免疫选择算法。

本文采用抗体编码的 Manhattan 距离来度量抗体之间的相似性, 即求取抗体 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 之间的相似度为:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|} \quad (3)$$

d 越大, 两个抗体之间的相似度越低; 如果 $d=0$, 则两个抗体完全相同。于是, 抗体 X 的浓度定义为^[4]:

$$\rho_i = \frac{D(X)}{N} \quad (4)$$

其中, 函数 $D(X)$ 表示与抗体 X 相似度小于 δ 的抗体数目; δ 表示一个给定的抑制阈值。

定义 2^[4] 抗体 X 的矢量距离为:

$$S(x_i) = \sum_{j=1}^n |f(x_i) - f(x_j)| \quad (5)$$

其中, x_i 表示所求问题的优化解, $f(x_i)$ 为抗体适应度函数, $j = 1, 2, \dots, N$, N 表示抗体的数目。

基于抗体矢量距离的免疫选择概率为:

$$P_s(x_i) = \frac{\alpha S(x_i)}{\sum_{i=1}^n S(x_i)} + (1 - \alpha) e^{-\rho_i} \quad (6)$$

其中 α 为常数调节因子, 且 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。由式 (6) 可以发现, 选择概率既与抗体的适应度有关又与抗体的相似度有关。这样选择的抗体群在一定程度上可以克服抗体陷入局部最优, 保持抗体的多样性。

常数调节因子 α 可以改变选择概率每部分的权值。如果 $\alpha=1$, 则式 (6) 是将抗体矢量距离作为选择概率的免疫选择算法; $\alpha=0$, 式 (6) 成为基于抗体相似性的免疫选择算法。由式 (6) 知, 在抗体浓度一定的条件下, 抗体矢量距离越大选择概率越大; 在抗体矢量距离一定的条件下, 抗体浓度越大选择概率越小。这样能有效地防止某些个体控制选择过程, 有助于抑制群体中所有的个体都陷于同一极值而停止进化的个体早熟现象, 增强了局部搜索能力^[4]。

3 实验

3.1 二维测试函数实验分析

为了分析 SIGA 算法函数优化的求解性能, 将其与自适应混沌克隆进化规划算法 (ACCEP)^[9], 保留最优值的标准遗传算法 (SGA) 进行对比, 并通过实验结果证明了 SIGA 算法的有效性。

本文选用文献 [10] 中第三节实验部分使用的二维测试函数 $f_1 \sim f_5$ 。为了保证算法之间的可比性, 本文对不同的方法尽量采用一致的参数设置,

取算法总进化代数数为 100; 对于 SGA, 取交叉率 $P_c = 0.9$, 变异率 $P_m = 0.08$, 种群规模都为 50; ACCEP 和 SIGA 的种群规模为 25, 克隆规模为 50, 这样保证各种算法每代的函数值计算次数大致相同; SIGA 采用本文提出的自适应交叉率和变异率, ACCEP 使用文献 [10] 中使用的变异控制参数。表 1 所示为 30 次随机独立运行的统计结果, 其中, 前两种算法的实验结果参见文献 [10], N_1 为得到最优值的次数, $N_2/N_3/N_4$ 表示得到最优值的最少代数/最大代数/平均代数。

表 1 算法优化性能比较

Tab. 1 Comparison of the optimization performance

测试函数	SGA			ACCEP			SIGA		
	N_1	N_2	N_3/N_4	N_1	N_2	N_3/N_4	N_1	N_2	N_3/N_4
f_1	10	28	202/112	30	1	152/47	30	1	87/35
f_2	2	12	13/12.5	30	1	82/11	30	1	15/10
f_3	30	9	56/21	30	5	10/7	30	5	13/9
f_4	8	9	1383/308	30	2	7/4	30	1	8/4
f_5	9	1	95/29	30	1	16/7	30	1	9/4

通过实验我们发现, SIGA 和 ACCEP 算法的求解精度和稳定性明显优于 SGA 算法。因为本文采用了自适应交叉和变异算子, 极大地提高了求解问题的准确性, 求解精度可以达到 10^{-3} , 而 ACCEP 算法通过 Logistic 混沌序列自适应调整变异尺度可以产生和 SIGA 相当的优化效果。

表 1 结果表明, SIGA、ACCEP 都能够找到全局最优解, 有效地抑制了早熟现象。因为 SIGA 采用了基于相似性矢量距离的免疫选择算法, 避免了未成熟收敛现象。SIGA 由于采用了自适应变异算子, 每次运行均能获得最优解, 而且收敛速度稍优于 ACCEP, 比 SGA 提高了 3~90 倍。

3.2 TSP 问题的求解

TSP 问题作为经典的组合优化问题, 属于 NP 类问题, 目前还没有算法能够有效地解决。本文将其作为测试基准, 对 $n = 20$ 的 TSP 问题进行研究, 其 20 个点的坐标参见文献 [11], 最终得到的最优抗体为 1-3-12-2-9-17-6-20-13-5-16-18-7-19-15-10-8-4-11-14。如图 1 所示, 实验结果与文献 [4] 得到的最优抗体一致。

为了进一步比较不同算法之间的收敛性, 采用和文献 [4] 相同的算法参数设置, 其中, SGA (选择概率 $P_r = 0.7$, $P_c = 0.6$, $P_m = 0.4$), IGA ($P_r = 0.03$, $P_c = 0.6$, $P_m = 0.4$), 文献 [4] 提出

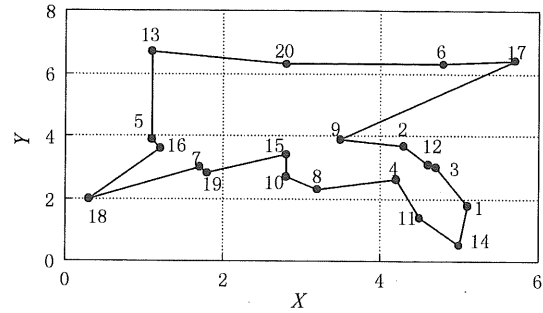


图 1 TSP 问题的最优抗体路线

Fig. 1 The optimal path of TSP problem by SIGA

的免疫遗传算法 (常数调节因子 $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.4$, 抑制阈值 $\delta = 25$, $P_r = 0.03$, $P_c = 0.6$, $P_m = 0.4$) 以及 SIGA ($\alpha = 0.6$; P_c , P_m 采用本文提出的自适应交叉和变异率); 种群规模为 100, 克隆比例为 5, 最大迭代次数为 1000, 实验结果如图 2 所示。

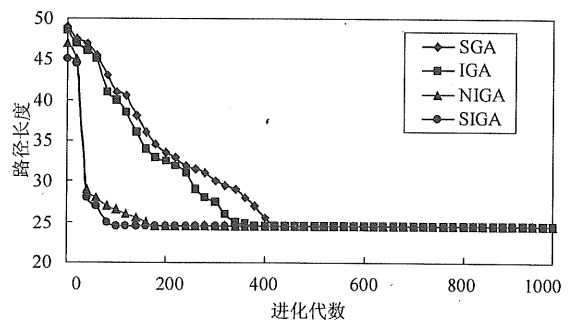


图 2 TSP 问题收敛速度对比

Fig. 2 Comparison of the converging speed for solving TSP problem

对以上四种算法取 10 次实验中收敛最好的结果在进化代数上进行对比。从图 2 可以发现, 尽管每种算法都能得到最优解, 但不同的算法在收敛速度上差异很大, SIGA 的收敛速度最快, 平均进化 120 代便找到最优解, 其次是文献 [4] 提出的免疫遗传算法 (为了便于表达, 简称为 NIGA), 而 SGA 的收敛速度最慢。因为本文采用了基于相似性矢量距离的免疫选择算法, 有效地防止某些个体控制选择过程, 提高了算法的收敛速度。

参考文献:

- [1] CHANG W A, RAMAKRISHNA R S. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 566-579.
- [2] HUNT J E, COOKE D E. Learning using an artificial immune system [J]. Journal of Network and Computer Application, 1996, 19: 189-212.

- [3] DASGUPTA D, FORREST S. Artificial immune systems in industrial applications [C]. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, IEEE Press, 1999, 257 - 267.
- [4] 段玉波, 任伟建, 霍凤财, 等. 一种新的免疫遗传算法及其应用 [J]. 控制与决策, 2005, 20(10): 1185 - 1188.
- DUAN Y B, REN W J, HUO F C, et al. A kind of new immune genetic algorithm and its application [J]. Control and Decision, 2005, 20(10): 1185 - 1188.
- [5] JIAO L C, WANG L. A novel genetic algorithm based on immunity [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics-part A: Systems and Humans, 2000, 30(5): 552 - 561.
- [6] WANG L, JIAO L C. The immune genetic algorithm and its convergence [C]. Signal Processing Proceedings IC-SP98, 1998, 1347 - 1350.
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 32 - 78.
- ZHOU M, SUN S D. Genetic algorithms: theory and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 32 - 78.
- [8] 罗小平, 韦巍. 一种基于生物免疫遗传学的新优化方法 [J]. 电子学报, 2003, 31(1): 59 - 62.
- LUO X P, WEI W. A new optimization method on immunogenetics [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 59 - 62.
- [9] 马臻, 张毅坤, 梁荣, 等. 基于免疫遗传算法的构件化软件测试用例生成 [J]. 计算机工程, 2006, 32(23): 64 - 67.
- MA Z, ZHANG Y K, LIANG R, et al. Test case generation for component-based software based on immune genetic algorithm [J]. Computer Engineering, 2006, 32(23): 64 - 67.
- [10] 杜海峰, 公茂果, 刘若辰, 等. 自适应混沌克隆进化规划算法 [J]. 中国科学: E 辑, 2005, 35(8): 817 - 829.
- DU H F, GONG M G, LIU R C, et al. Adaptive chaos clonal evolutionary programming algorithm [J]. Science in China Series F-Information Sciences, 2005, 35(8): 817 - 829.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法 - 理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- WANG X P, CAO L M. Genetic algorithms: theory application and software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004.

SIGA: A Novel Self-adaptive Immune Genetic Algorithm

QIAO Shao-jie^{1,2}, TANG Chang-jie¹, DAI Shu-cheng¹, LI Chuan¹, CHEN Yu¹, QIU Jiang-tao¹, LIU Qi-hong¹

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Computing, National University of Singapore, 117590 Singapore)

Abstract: This paper proposed a novel self-adaptive genetic algorithm SIGA (Self-adaptive Immune Genetic Algorithm) based on immunity to overcome the shortage of traditional genetic algorithms that the converging speed is slow and the solution is a local optimum. The algorithm improved the genetic operators and proposed self-adaptive crossover and mutation operators in case of keeping individual diversity and avoiding prematurity; proposed an immune selection algorithm based on selection probability of similarity and vector distance in order to keep individual diversity and improve the level of fitness. The results of the experiments indicate that SIGA can improve the converging speed by three to ninety times, enhance the precision which reaches to 10^{-3} , and avoid prematurity to some extent compared with traditional genetic algorithms and immune algorithms.

Key words: self-adaptive; immune genetic algorithm; immune selection; prematurity