

1-3, 8

自适应蚁群算法*

张纪会

(东北大学控制仿真中心·沈阳, 110006)

高齐圣

徐心和

(青岛化工学院计算机系·青岛, 266042) (东北大学控制仿真中心·沈阳, 110006)

0224

摘要: 蚁群算法是由意大利学者 M. Dorigo 等人首先提出的一种新型的模拟进化算法, 初步的研究已经表明该算法具有许多优良的性质, 为求解复杂的组合优化问题提供了一种新思路。此方法已经引起了众多学者的研究兴趣, 但同时也存在着一些缺点, 如需要较长的计算时间、容易出现停滞现象等。目前国内对此研究尚少, 为此, 本文对蚁群算法的研究现状作一综述, 希望能够对相关研究起到一定的启发作用。

关键词: 蚁群算法; 强化学习; 旅行商问题

文献标识码: A

组合优化问题

A Self-Adaptive Ant Colony Algorithm

ZHANG Jihui

(Control & Simulation Center, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

GAO Qisheng

(Department of Computer, Qingdao Institute of Chemical Technology · Qingdao, 266042, P. R. China)

XU Xinhe

(Control & Simulation Center, Northeastern University · Shenyang, 110006, P. R. China)

Abstract: Ant colony algorithm is a novel simulated evolutionary algorithm which is proposed first by Italian scholars M. Dorigo, A. Colomi, and V. Maniezzo. Preliminary study has shown that it has many promising futures. It provides a possible way for complicated combinatorial optimization problems, so it interests many scholars. Unfortunately, however it has some shortcomings such as needing much time and easier occurring of stagnation behaviour. In view of the deficiency of research of ant colony algorithm at home, this paper presents a brief review on the research state of ant colony algorithm with hope to be helpful to the corresponding research work.

Key words: ant colony algorithm; reinforcement learning; traveling salesman problem

1 引言(Introduction)

本世纪 50 年代中期创立了仿生学, 人们从生物进化的机理中受到启发, 提出了许多用以解决复杂优化问题的新方法, 如遗传算法、进化规划、进化策略等。蚁群算法是最近几年才提出的一种新型的模拟进化算法, 由意大利学者 M. Dorigo 等人首先提出^[1-3], 他们称之为蚁群系统(ant colony system), 并用该方法求解旅行商问题(TSP)^[3]、指派问题(assignment problem)^[1,4]、job-shop 调度问题^[1,3], 取得了一系列较好的实验结果。受其影响, 蚁群系统模型逐渐引起了其他研究者的注意, 并用该算法来解决一些实际问题^[5,6]。虽然对此方法的研究刚刚起步, 但是这些初步研究已显示出蚁群算法在求解复杂优化问题(特别是离散优化问题)方面的一些优越性, 证明它是一种很有发展前景的方法。鉴于目前国内尚缺乏这一方面的研究, 本文对蚁群算法原理及其研

究现状作一综述, 希望能够对相关研究有所启发。

2 基本蚁群算法(Basic ant colony algorithm)

2.1 基本蚁群算法的原理(Principle of BACA)

人工蚁群算法是受到人们对自然界中真实的蚁群集体行为的研究成果的启发而提出的一种基于种群的模拟进化算法, 属于随机搜索算法。由意大利学者 M. Dorigo 等人首先提出^[1]。M. Dorigo 等人首次提出该方法时, 充分利用了蚁群搜索食物的过程与著名的旅行商问题(TSP)之间的相似性, 通过人工模拟蚂蚁搜索食物的过程(即: 通过个体之间的信息交流与相互协作最终找到从蚁穴到食物源的最短路径)来求解 TSP, 为了区别于真实蚂蚁群体系统, 我们称这种算法为“人工蚁群算法”。

象蚂蚁这类群居昆虫, 虽然单个蚂蚁的行为极其简单, 但由这样的单个简单的个体所组成的蚁群群体却表现出极其复杂的行为, 能够完成复杂的任务。不仅如此, 蚂蚁还能够适应环境的变化, 如: 在蚁群运动路线上突然出现障碍物时,

* 基金项目: 863/CIMS 主题(863-511-9508-004)资助项目

收稿日期: 1997-12-1; 收修改稿日期: 1999-6-2

蚂蚁能够很快地重新找到最优路径. 蚁群是如何完成这些复杂的任务的呢? 人们经过大量研究发现, 蚂蚁个体之间是通过一种称之为外激素(pheromone)的物质进行信息传递. 从而能相互协作, 完成复杂的任务. 蚁群之所以表现出复杂有序的行为, 个体之间的信息交流与相互协作起着重要的作用. 蚂蚁在运动过程中, 能够在它所经过的路径上留下该种物质, 而且蚂蚁在运动过程中能够感知这种物质的存在及其强度, 并以此指导自己的运动方向, 蚂蚁倾向于朝着该物质强度高的方向移动. 因此, 由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈现象: 某一路径上走过的蚂蚁越多, 则后来者选择该路径的概率就越大. 蚂蚁个体之间就是通过这种信息的交流达到搜索食物的目的^[7].

2.2 基本蚁群系统模型及其实现(Model and implementation)

为了便于理解, 我们以求解平面上 n 个城市的 TSP 问题 ($0, 1, \dots, n-1$ 表示城市序号) 为例说明蚁群系统模型. 对于其它问题, 可以对此模型稍作修改便可应用^[6]. 为模拟实际蚂蚁的行为, 首先引进如下记号: 设 m 是蚁群中蚂蚁的数量, $d_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示城市 i 和城市 j 之间的距离, $b_i(t)$ 表示 t 时刻位于城市 i 的蚂蚁的个数, $m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$. $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻在 ij 连线上残留的信息量. 初始时刻, 各条路径上信息量相等, 设 $\tau_{ij}(0) = C$ (C 为常数). 蚂蚁 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 在运动过程中, 根据各条路径上的信息量决定转移方向, $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 由位置 i 转移到位置 j 的概率,

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^k(t) \eta_{ij}^k(t)}{\sum_{j \in \text{allowed}_k} \tau_{ij}^k(t) \eta_{ij}^k(t)}, & j \in \text{allowed}_k, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\text{allowed}_k = \{0, 1, \dots, n-1\} - \text{tabu}_k$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的城市. 与实际蚁群不同, 人工蚁群系统具有记忆功能, tabu_k ($k = 1, 2, \dots, m$) 用以记录蚂蚁 k 当前所走过的城市. 集合 tabu_k 随着进化过程作动态调整. 随着时间的推移, 以前留下的信息逐渐消逝. 用参数 $1 - \rho$ 表示信息消逝程度. 经过 n 个时刻, 蚂蚁完成一次循环, 各路径上信息量要根据下式作调整:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k. \quad (3)$$

$\Delta\tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 ij 上的信息量, $\Delta\tau_{ij}$ 表示本次循环中路径 ij 上的信息量的增量.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } ij, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (4)$$

其中, Q 是常数, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路径的长度. 在初始时刻, $\tau_{ij}(0) = C(\text{const})$, $\Delta\tau_{ij} = 0$ ($i, j = 0, 1, \dots, n-1$). α, β 分别表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息及启发式因子在蚂蚁选择路径中所起的不同作用. η_{ij} 表示由城

市 i 转移到城市 j 的期望程度, 可根据某种启发式算法具体确定. 根据具体算法的不同, $\tau_{ij}(t)$, $\Delta\tau_{ij}(t)$ 及 $p_{ij}^k(t)$ 的表达形式可以不同, 要根据具体问题而定. M. Dorigo 曾给出三种不同模型, 分别称之为 ant-cycle system, ant-quantity system, ant-density system^[7]. 它们的差别在于表达式 (4) 的不同. 在 ant-quantity system 模型中:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在时刻 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过 } ij, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (5)$$

在 ant-density system 模型中:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在时刻 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过 } ij, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (6)$$

它们的区别在于: 后两种模型中, 利用的是局部信息, 而前者利用的是整体信息. 在求解 TSP 问题时, 性能较好. 因而通常采用它作为基本模型. 参数 $Q, C, \alpha, \beta, \rho$ 可以用实验方法确定其最优组合. 算法的实现过程可参见文献 [15, 16] 中的描述, 这里省略.

3 基本蚁群算法的优点与不足之处 (Virtues vs weakness of BACA)

为了说明基本蚁群系统的优点与不足, 文献 [16] 给出用基本蚁群算法求解 Oliver30 TSP 的典型实验结果, 从这些结果可看出蚁群算法具有如下优点:

- 1) 较强的鲁棒性: 对基本蚁群算法模型稍加修改, 便可以应用于其它问题;
- 2) 分布式计算: 蚁群算法是一种基于种群的进化算法, 具有本质并行性, 易于并行实现;
- 3) 易于与其它方法结合: 蚁群算法很容易与多种启发式算法结合, 以改善算法的性能.

众多研究已经证明蚁群算法具有很强的发现较好解的能力, 这是因为该算法不仅利用了正反馈原理, 在一定程度上可以加快进化过程, 而且是一种本质并行的算法, 不同个体 (agent) 之间不断进行信息交流和传递, 从而能够相互协作, 有利于发现较好解. 蚁群算法可以解释为一种特殊的强化学习 (RL; reinforcement learning) 算法^[9]. 公式 (1) 反映了蚁群算法与 Q-学习算法之间的联系. 其中, τ_{ij} 相当于 Q-学习中的 Q 值, 表示学习所得到的经验. η 由某种启发式算法确定, 如何将这两者结合起来, 是提高蚁群算法效率的关键问题. 虽然蚁群算法有许多优点, 但是, 这种算法也存在一些缺陷, 如: 与其它方法相比, 该算法一般需要较长的搜索时间, 蚁群算法的复杂度可以反映这一点; 而且该方法容易出现停滞现象 (stagnation behaviour), 即搜索进行到一定程度后, 所有个体所发现的解完全一致, 不能对解空间进一步进行搜索, 不利于发现更好的解. 对于这两个问题, 已经引起了许多研究者的注意, 并提出了若干改善方法, 如 M. Dorigo 提出的 Ant-Q system^[11], Thomas 等人提出的 Max-Min ant system^[12].

4 蚁群算法研究现状 (Research status on ACS)

作为一种新型的进化算法,提出不久后便引起了人们的关注,针对其不足之处,人们作了一些有效的研究,下面对此作一简述。

M. Dorigo 等人^[1-3,7,8]提出基本蚁群算法后不久,又提出一种更一般的蚁群算法,并称之为 Ant-Q system^[10,11]。在该算法中,个体 k 的移动规则为

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} \{ [AQ(r, u)]^\alpha [HE(r, u)]^\beta \}, & \text{if } q \leq q_0, \\ \text{依概率 } p_y^k \text{ 选择 } s, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

AQ 值按照如下规则进行更新

$$AQ(r, s) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot AQ(r, s) + \alpha \cdot (\Delta AQ(r, s) + \gamma \cdot \max_{u \in \text{allowed}_k} AQ(s, u)). \quad (8)$$

式(7)、(8)进一步揭示了 Ant-Q system 与强化学习算法的联系。文献[10]研究了 Ant-Q system 的性质,并研究了参数 α 、 β 、 q_0 对算法性能的影响。实验结果表明,与基本蚁群算法相比, Ant-Q system 更具有—般性,而且更有利于全局搜索。

为了克服基本蚁群算法的不足,人们对其作了若干改进。文献[11,12]提出 MMAS(Max-Min ant system),其基本思想是仅让每一代中的最好个体所走路径上的信息量作调整,以加快收敛速度,这样便容易出现停滞现象。为了避免这一点,用 λ -分支因子^[7]作为衡量群体多样性的一个指标,当 λ -分支因子低于某一数值时,便对各个路径上的信息量作动态调整,以期避免过早出现停滞现象。但是 λ -分支因子计算起来比较复杂,而且对它的界限不容易把握,不便于应用。此外还有 M. Dorigo 等提出的 Ant-Q system^[11]。文献[14]将蚁群算法与两交换方法有机结合,结果表明该方法可以大大提高基本蚁群算法的搜索效率。文献[15]通过引入遗忘因子,可以做到对过去知识的慢慢遗忘,因而能够强化后来学习得到知识,不致过早出现停滞现象,有利于发现更好的解。所有这些研究,都在一定程度上提高了基本蚁群算法的效率。

5 自适应蚁群算法(Adaptive ACS)

通过对蚁群算法的分析不难发现:蚁群算法的主要依据是信息正反馈原理和某种启发式算法的有机结合,这种算法在构造解的过程中,利用随机选择策略,这种选择策略使得进化速度较慢,正反馈原理旨在强化性能较好的解,却容易出现停滞现象。这是造成蚁群算法的不足之处的根本原因。因而我们从选择策略方面进行修改,我们采用确定性选择和随机选择相结合的选择策略,并且在搜索过程中动态地调整作确定性选择的概率。当进化到一定代数后,进化方向已经基本确定,这时对路径上信息量作动态调整,缩小最好和最差路径上的信息量的差距,并且适当加大随机选择的概率,以利于对解空间的更完全搜索,从而可以有效地克服基本蚁群算法的两个不足。我们的方法属于自适应方法,此算法按照下式确定蚂蚁 k 由 i 转多到的下一城市 s

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} \{ \tau_{iu}^\alpha(t) \eta_{iu}^\beta(t) \}, & \text{if } r \leq p_0, \\ \text{依概率 } p_y^k(t) \text{ 选择 } s, & \text{else.} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $p_0 \in (0, 1)$, r 是 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数,当进化方

向基本确定后用简单的放大(或缩小)方法调整每一路径上的信息量。对于这一算法,我们做过大量实验(由于篇幅所限,这里不给出具体实验结果,有关实验结果将另文发表)。实验表明由于采用自适应选择和动态调整策略,算法的性能明显得到改善,该方法不仅能够加快收敛速度,节省搜索时间,而且能够克服停滞行为的过早出现,有利于发现更好的解。这对于求解大规模优化问题是十分有利的。

6 蚁群算法的应用(Application of ACS)

蚁群算法已经在若干领域获得了成功的应用。其中最成功的应用是在组合优化问题中的应用,其典型代表有 TSP, QAP(quadratic assignment problem), job-shop 调度等。文献[1, 3, 7, 12]用蚁群算法求解 TSP 问题,结果表明该方法优于其它方法。文献[1, 4]研究了指派问题的蚁群算法求解效果。蚁群算法在 job-shop 调度问题中的应用也得到了初步研究^[1,3]。利用 job-shop 的析取图模型与 TSP 问题的相似性,可用蚁群算法求解 job-shop 调度问题,并取得了一系列较好的实验结果。D. Costa 等^[6]在 M. Dorigo 等人研究成果的基础上,提出了一种求解指派类型问题的一般模型,并用来研究着色问题。G. Bilchev 等^[5]研究了求解连续空间优化问题的蚁群系统模型,并用来解决某些实际工程设计问题。但是蚁群算法在求解连续优化问题方面的优越性相对要弱一些。虽然对此方法的研究刚刚起步,但是这些初步研究已显示出蚁群算法在求解算杂优化问题(特别是离散优化问题)方面的一些优越性。

7 结论(Conclusions)

蚁群算法是一种新型的模拟进化算法,其研究刚刚开始,远未象 GA, SA 等算法那样形成系统的分析方法和坚实的数学基础,有许多问题有待进一步研究,如算法的收敛性、理论依据等。但可以想象,随着研究的深入,蚁群算法也将同其它模拟进化算法一样,获得越来越多的应用。

参考文献(References)

- [1] Colomi A, Dorigo M and Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[A]. In: Proc. of 1st European Conf. Artificial Life[C]. Paris, France: Elsevier, 1991, 134 - 142
- [2] Colomi A, Dorigo M and Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm[A]. In: Proc. of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN)[C]. France: Elsevier, 1992, 509 - 520
- [3] Colomi A, Dorigo M and Maniezzo V, et al. Ant system for job shop scheduling[J]. Belgian J. of Operations Research Statistics and computer science, 1994, 34(1): 39 - 53
- [4] Maniezzo V, Colomi A and Dorigo M. The ant system applied to the quadratic assignment problem[R]. Technical Report, IRIDIA, 94/28, Univ. Libre De Bruxelles, Belgium, 1994
- [5] Bilchev G and Parmee I C. Searching heavily constrained design spaces [A]. In: Proc. of 22nd Int. Conf. Computer Aided Design'95[C]. Yalta, Ukraine, 1995, 230 - 235

(下转第 8 页)

- 与应用, 1997, 14(2): 878-882
- [42] 谢胜利, 张剑, 韦岗. 非线性系统的迭代学习控制方法[J]. 中山大学学报, 1998, 32(1): 30-33
- [43] Xie S L, Tian S P. Tracking control learning algorithms for nonlinear systems[A]. Proceedings of IEEE Hongkong Symposium on Robotics Control'99[C], Hongkong, 1999, 1: 79-84
- [44] Xie Zhendong, Xie Shengli. Iterative learning control for uncertain distributed parameter systems[A]. Proceedings of International Conference Systems Science and Systems Engineering'98[C], Beijing, 1998, 644-649
- [45] 谢胜利, 谢振东, 韦岗. 非线性学习控制理论及其在机器人系统上的应用[A]. 中国控制会议文集[C]. 北京: 国防大学出版社, 1998, 957-961
- [46] Xie Z D, Tian C J. A learning algorithm for target tracking control of a class of terminal restricted robot manipulators with flexible-joints[A]. Proceedings of IEEE Hongkong Symposium on Robotics Control'99[C], Hongkong, 1999, 1: 175-180
- [47] 谢胜利. 非线性系统迭代学习控制理论及应用[R]. 华南理工大学博士后研究报告, 1997
- [48] Pi Daoying and Sun Youxian. On the convergence of open-closed loop P-type iterative learning control scheme for nonlinear discrete system[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(2): 157-161
- [49] Sun Mingxuan. Robustness of higher-order P-type learning control[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(1): 12-24
- [50] Ishihara T K A and Takeda H. A discrete-time design of robust iterative learning controllers[J]. IEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1992, 22(1): 74-84

本文作者简介

谢振东 1966年生, 华南理工大学控制理论与控制工程博士生. 在非线系统稳定性、迭代学习控制、变结构控制方面发表论文近10篇, 曾获省级优秀教学成果奖和自然科学奖. 目前感兴趣的方向是非线性系统的迭代学习控制理论及应用

谢胜利 1958年生, 控制理论与控制工程博士, 电子与通信博士后, 华南理工大学无线电与自动控制研究所教授. 一直从事非线性系统的稳定性理论、振动性理论、变结构控制、迭代学习控制及自适应回波信号消除领域的教学与科研工作, 在国内外学术刊物上发表论文近70篇, 出版专著(国家九五重点图书)一部. 目前感兴趣的领域为非线性系统迭代学习控制理论, 自适应多回路信号消除理论, 数学预测及应用等.

刘永清 1930年生, 华南理工大学电子与信息学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为复杂系统及系统工程.

(上接第3页)

- [6] Costa D, Hertz A and Dubois O. Imbedding of a sequential algorithm within an evolutionary algorithm for coloring problem in graphs[J]. J. of heuristics, 1989, 20(1): 105-128
- [7] Dorigo M, Maniezzo V and Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 28-41
- [8] Dorigo M, Maniezzo V and Colomi A. Ant system: an autocatalytic optimizing process[R]. Technical Report 91-016, Politecnico di Milano, 1991
- [9] Watkins C. Learning with delayed rewards [D]. England: Psychology Department, University of Cambridge, 1989
- [10] Dorigo M and Luca M. A study of some properties of ant-Q[A]. In: H M Voigt, W Ebeling and I Rechenberg, et al eds. Proc of 4th Int. Conf. on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN) [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 656-665
- [11] Luca M, Gambardella and Dorigo M. Ant-Q: an reinforcement learning approach to the traveling salesman problem[A]. In: Proc. of 12th Machine Learning Conf. [C]. France: Morgan Kaufmann, 1995, 252-260
- [12] Thomas stützle and Holger Hoos. Max-min ant system and local search for combinatorial optimization problems[A]. In: Proc of 2nd Int. Conf. on Metaheuristics [C]. Wien: Springer-Verlag, 1997
- [13] Stützle T and Hoos H. Improvements on the ant system: introducing max-min ant system[A]. In: Proc. Int. Conf. Artificial Neural Network and Genetic Algorithm [C]. Wien: Springer-Verlag, 1997
- [14] 张纪会, 徐心和. 带遗忘因子的蚁群算法[J]. 系统仿真学报, 2000, (2)
- [15] 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 2000, (1)
- [16] 张纪会, 徐心和. 一种新型的模拟进化算法——蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, (3): 84-87

本文作者简介

张纪会 1969年生, 博士. 主要研究方向为: 离散事件动态系统, 智能调度, 智能计算, 混合系统等

高齐圣 1966年生, 博士, 副教授. 主要研究方向为: 智能优化, 智能管理等.

徐心和 1940年生, 东北大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为离散事件动态系统, 计算机控制与仿真, 混合系统等.