

蚁群算法的研究进展评述*

段海滨^① 王道波^② 于秀芬^③

① 博士,北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京 100083

② 教授,南京航空航天大学自动化学院,南京 210016

③ 助理研究员,中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080

* 航空基础科学基金资助项目(01C52015);“333”工程基金(JS200204)重点资助项目

关键词 蚁群算法 信息素 正反馈 模型改进

蚁群算法是近几年优化领域中新出现的一种启发式仿生类并行智能进化系统,该算法采用分布式并行计算和正反馈机制,易于与其他方法结合,目前已经在众多组合优化领域中得到广泛应用。本文在介绍回顾蚁群算法发展历史的基础上,简要评述了部分具有代表性的蚁群算法改进模型及其应用情况,最后对蚁群算法在今后的研究方向作了展望。

1 引言

蚁群算法(ant colony algorithm)是由意大利学者 Dorigo 等人^[1,2]于 20 世纪 90 年代初期通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径的行为而提出的一种基于种群的启发式仿生进化系统。蚁群算法包含两个基本阶段:适应阶段和协作阶段。在适应阶段,各候选解根据积累的信息不断调整自身结构。在协作阶段,候选解之间通过信息交流,以期望产生性能更好的解,这类似于学习自动机的学习机制。蚁群算法最早成功应用于解决著名的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP),该算法采用了分布式正反馈并行计算机制,易于与其他方法结合,而且具有较强的鲁棒性^[3-5]。

本文回顾了蚁群算法的发展历史,然后列举了部分具有代表性的蚁群算法改进模型及其应用情况,最后对蚁群算法在今后的研究方向作了简要评述。

2 历史的回顾

自 1991 年意大利学者 Dorigo 等人提出蚁群算法后的近五年时间里,并没有在国际学术界引起广泛关注,自然这段时期在蚁群算法理论及其应用上也没有取得突破性进展。到了 1996 年,Dorigo 等人在 *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B* 上发表了“Ant system: optimization by a colony of cooperating agents”一文^[3],在这篇文章中,Dorigo 等不仅更加

系统地阐述了蚁群算法的基本原理和数学模型,还将其与遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、爬山法等进行了仿真实验比较,并把单纯地解决对称 TSP 拓展到解决非对称 TSP、指派问题(quadratic assignment problem, QAP)以及车间作业调度问题(job-shop scheduling problem, JSP),且对蚁群算法中初始化参数对其性能的影响作了初步探讨,这是蚁群算法发展史上的又一篇奠基性文章。从目前公开发表的蚁群算法相关论文看,其中 70% 以上的论文将这篇文章或 1991 年 Dorigo 等人在首届欧洲人工生命会议上发表的“Distributed optimization by ant colonies”一文列为参考文献。自 1996 年之后的五年时间里,蚁群算法逐渐引起了世界许多国家研究者的关注,其应用领域得到了迅速拓宽,这期间也有大量有价值的研究成果陆续发表。

对蚁群算法不断高涨的研究热情导致了 1998 年 10 月 15 日至 10 月 16 日在比利时布鲁塞尔召开了第一届蚁群算法国际研讨会(ANTS'98),会议由创始人 Dorigo 负责组织。第一届就吸引了来自世界各地的 50 多位蚁群算法研究者,随后每隔两年都要在布鲁塞尔召开一次蚁群算法国际研讨会,历届会议的论文集均由著名的 *Lecture Notes in Computer Science* (SCI Index) 结集出版。2000 年,Dorigo 和 Bonabeau 等人^[6]在国际顶级学术刊物 *Nature* 上发表了蚁群算法的研究综述,从而把这一领域的研究推向了国际学术的最前沿。鉴于 Dorigo 在蚁群算法研究领域的杰出贡献,2003 年 11 月欧盟委员会特别授予他“居里夫人杰出成就奖(Marie Curie Excellence Award)”。

进入 21 世纪后的最近几年,*Nature* 曾多次对蚁群

算法的研究成果进行报道^[6,7], *Future Generation Computer Systems* (Vol. 16, No. 8) 和 *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (Vol. 6, No. 4) 分别于 2000 年和 2002 年出版了蚁群算法特刊。如今, 在国内外许多学术期刊和会议上, 蚁群算法已经成为一个备受关注的研究热点和前沿性课题。

Gutjahr 于 1999 年撰写技术报告^[8]和 2000 年发表的学术论文^[9]在蚁群算法发展史上有着特殊的作用, 因为这两篇文章首次对蚁群算法的收敛性进行了证明。Gutjahr 将蚁群算法的行为简化为在一幅代表所求问题的有向图上的行走过程, 进而从有向图论的角度对一种改进蚁群算法——图搜索蚂蚁系统 (graph-based ant system, GBAS) 的收敛性进行了理论分析, 证明了在一些合理的假设条件下, 他所提出的 GBAS 能以一定的概率收敛到所求问题的最优解。

随着对蚁群算法研究的不断深入, 人们已开始关注蚁群算法的硬件实现这一新的研究方向。蚁群算法的硬件实现是仿生硬件领域内的一个分支, 也是蚁群算法发展的高级阶段。Isaacs 等人^[10]将遗传算法和蚁群算法结合, 提出了一种嵌入式硬件随机数据发生器设计的新思路, 但是他们只是做了离线仿真, 并没有在硬件上给予实现。Scheuermann 等人^[11]在深入分析了将蚁群算法映射到 FPGA 难点的基础上, 提出了一种基于群体-蚁群优化 (population-based ant colony optimization, P-ACO) 算法的仿生硬件实现方案, 并详细给出了 P-ACO 算法 FPGA 硬件总体结构中各主要模块的实现过程。

我国在蚁群算法领域的研究起步较晚, 从公开发表的论文 (以投稿日期为标准) 看, 国内最先研究蚁群算法的是东北大学控制仿真研究中心的张纪会博士与徐心和教授 (1997 年 10 月)^[12]。在国内蚁群算法的众多研究者中, 值得一提的是当时年仅 17 岁高二学生陈烨于 2001 年在《计算机工程》(Vol. 27, No. 12) 上发表了“带杂交算子的蚁群算法”一文^[13], 并基于 Visual Basic 开发了一个功能齐全、界面友好的“蚁群算法实验室”, 引起了国内广大蚁群算法研究者的极大关注, 正如《计算机工程》的“编者按”所言: “一个高中生能写出如此论文实属不易”。

回顾蚁群算法自创立以来十多年的发展历程, 目前人们对蚁群算法的研究已由当初单一的 TSP 领域渗透到了多个应用领域, 由解决一维静态优化问题发展到解决多维动态组合优化问题, 由离散域范围内研究逐渐拓展到了连续域范围内研究, 而且在蚁群算法的硬件实现上取得了突破性进展, 同时在蚁群算法的模型改进及与其他仿生优化算法的融合方面也取得了相当丰富的研

究成果, 从而使这种新兴的仿生优化算法展现出前所未有的勃勃生机, 并已经成为一种完全可与遗传算法相媲美的仿生优化算法。

3 蚁群算法的模型改进及其应用

任何事物都具有两面性, 蚁群算法作为一种新兴的仿生优化算法也不例外。蚁群算法固然具有采用分布式并行计算机制、易于与其他方法结合、具有较强的鲁棒性等优点, 但搜索时间长、易陷于局部最优解是其最为突出的缺点。针对这些缺陷, 近些年来众多国内外学者在蚁群算法的改进方面做了大量的研究工作, 这些改进有一个共同的目的, 那就是在合理时间复杂度的限制条件下, 尽可能提高蚁群算法在一定空间复杂度下的寻优能力, 从而改善蚁群算法的全局收敛性, 并拓宽蚁群算法的应用领域^[14]。下面将分别从离散域、连续域及硬件实现等方面分别对蚁群算法的模型改进作评述。

3.1 离散域蚁群算法的模型改进

Dorigo 等人在基本蚁群算法的基础上提出了一种称之为 Ant-Q System 的蚁群算法, 该算法仅让每次循环中最短路径上的信息量作更新, 且仅让信息量最大的路径以较大的概率被选中, 以充分利用学习机制, 强化最优信息的反馈; 德国学者 Stützle 和 Hoos 提出了另一种改进的蚁群算法——最大最小蚂蚁系统 (MAX-MIN ant system, 缩写为 MMAS), MMAS 限定了信息量允许值的上下限, 并在算法中采用了轨迹平滑机制。初始时 MMAS 将所有路径弧段上的信息量设为最大值 τ_{\max} , 每次迭代后, 按挥发系数 ρ 减小信息量, 只有最佳路径上的弧段才允许增加其信息量; 同时为了避免发生早熟现象, 该算法将各条路径可能的信息量限制在区间 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 之内, 这样可以有效地避免某条路径上的信息量远大于其他路径, 使得所有的蚂蚁都集中到同一条路径上, 从而使算法不再扩散。直到今天, MMAS 仍然是解决 TSP、QAP 等离散域优化问题的最好蚁群算法模型之一, 很多对蚁群算法的改进策略都渗透着 MMAS 的思想。吴庆洪等从遗传算法中变异算子的作用得到启发, 在蚁群算法中采用了逆转变异机制, 进而提出了一种具有变异特征的蚁群算法, 这是国内学者对蚁群算法所作的最早改进 (1997 年 11 月)。

3.2 连续域蚁群算法的模型改进

在离散域组合优化问题中, 蚁群算法的信息量留存、增减和最优解的选取都是通过离散的点状分布求解

方式来进行的;而在连续域优化问题的求解中,其解空间是一种区域性的表示方式,而不是以离散的点集来表示的。

Bilchev 等人最早提出了一种连续蚁群算法,求解问题时先使用遗传算法对解空间进行全局搜索,然后利用蚁群算法对所得结果进行局部优化;高尚等人提出了一种基于网格划分策略的连续域蚁群算法,该算法与网格划分法的不同之处在于前者利用了每一点的信息,而后者仅利用了最小值的信息;Wang 等人将离散域蚁群算法中的“信息量留存”过程拓展为连续域中的“信息量分布函数”,并定义了应用于连续函数寻优问题的改进蚁群算法;Li 等人在借鉴遗传算法求解连续域优化问题编码方法、精英策略以及混合算法中的区域搜索思想的基础上,提出了一种用于连续域优化问题求解的自适应蚁群算法;段海滨等人提出了一种基于网格划分策略的自适应连续域蚁群算法;陈峻等人将所求问题解的每一分量的可能值组成一个动态的候选组,并记录候选组中每一可能值的信息量,进而提出了一种基于交叉变异操作的连续域蚁群算法;杨勇等提出了一种用于求解连续域优化问题的嵌入确定性搜索蚁群算法,该算法在全局搜索过程中,利用信息素强度和启发式函数确定蚂蚁移动方向,而在局部搜索过程中嵌入了确定性搜索,以改善寻优性能,加快收敛速度;Dré 等人提出了一种基于密集非递阶的连续交互式蚁群算法(continuous interacting ant colony algorithm, CIACA),该算法通过修改信息素的留存方式和行走规则,并运用信息素交流和直接通讯两种方式来指导蚂蚁寻优;Pourtakdoust 等人提出了一种仅依赖信息素的连续域蚁群算法;张勇德等人提出了一种用于求解带有约束条件的多目标函数优化问题的连续域蚁群算法,该算法将信息素交流和基于全局最优经验指导这两种寻优方式相结合,将当前发现的所有非支配解保存起来,进而用这些解来指导蚂蚁朝着分布较为稀疏的区域进行寻优,以保证解的分布性能,并提高了算法的收敛速度;Wen 等提出了一种结合遗传优化的动态窗口蚁群算法,该算法对于多变量强非线性的大规模复杂多阶段决策问题具有优良的求解性能。

3.3 蚁群算法硬件实现的模型改进

随着对蚁群算法研究的不断深入,人们已开始关注蚁群算法的硬件实现这一新的研究方向。蚁群算法的硬件实现是仿生硬件领域内的一个分支,也是蚁群算法发展的高级阶段。若要用硬件实现类似蚁群这一表现出复杂群体行为的系统,首先就得构造具有单只蚂蚁功能的智能体。

Isaacs 等人将遗传算法和蚁群算法结合,提出了一种嵌入式硬件随机数据发生器设计的新思路,但是他们只是做了离线仿真,并没有在硬件上实现。忻斌健等人提出了一种将归类结构(subsumption architecture)方法与现场可编程门阵列(field programmable gate array, 缩写为 FPGA)设计相结合的蚂蚁智能体硬件实现设想,归类结构是一种行为控制法,它将自动控制的问题按任务而不是按功能进行分解,主张构造面向任务的专用模块,直接与传感器和执行器相连,其工作方式为并行的;Schuermann 等人在深入分析了将蚁群算法映射到 FPGA 难点的基础上,提出了一种基于群体-蚁群优化(Population-based ant colony optimization, 缩写为 P-ACO)算法的仿生硬件实现方案,并详细给出了 P-ACO 算法 FPGA 硬件总体结构中各主要模块的实现过程;Xiong 等人提出了遗传算法与蚁群算法动态融合的软硬件划分算法(dynamic combination of genetic algorithm and ant algorithm, 缩写为 DCG3A),其基本思想是利用遗传算法群体性、全局随机搜索等优势生成初始划分,并将其转化为蚁群算法所需的初始信息量分布。实验表明 DCG3A 可非常有效地解决嵌入式系统的软硬件划分问题,且划分问题规模越大,其优势越明显。

4 结束语

蚁群算法创立十多年来,无论在算法理论还是在算法应用方面都取得了许多突破性研究进展。作为一个前沿性的热点研究领域,蚁群算法已引起越来越多国内外研究者的关注,近五年内其研究人员和研究成果均成几何级数增长。初步统计结果表明,2000 年蚁群算法的相关学术论文还不足 200 篇;而截至 2005 年 11 月,蚁群算法的相关学术论文已经超过了 1 800 篇,其应用范围几乎涉及到各个优化领域,而且还出现了蚁群算法仿生硬件,可见这种新兴的仿生优化算法已经显示出强大的生命力和广阔的发展前景。

尽管人们对蚁群算法的研究时间不长,在这一领域还有一些问题需要进一步研究和解决,但是理论研究和实际应用表明它是一种很有前途的仿生优化算法。随着人类认识的进步和社会发展的加速,仿生智能及最优化系统理论将越来越成为科学认识和工程实践的有力工具,因此,关于蚁群算法理论及其应用的研究必将是一个长期的研究课题。相信随着人们对仿生智能系统理论及应用研究的不断深入,蚁群算法这一新兴的仿生优化算法必将展现出更加广阔、更加引人注目的发展前景。

(2005 年 11 月 23 日收到)

- 1 COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V, et al. Distributed optimization by ant colonies[C]. Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, 1991; 134-142.
- 2 DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms [D]. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- 3 DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[C]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26 (1); 29-1.
- 4 段海滨,王道波,朱家强等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(12); 1321-1326, 1340.
- 5 段海滨,王道波. 一种快速全局优化的改进蚁群算法及仿真[J]. 信息与控制, 2004, 33 (2); 241-244.
- 6 BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Inspiration for optimization from social insect behavior[J]. Nature, 2000, 406 (6); 39-42.
- 7 MICHAEL J B K, JEAN-BERNARD B, LAURENT K. Ant-like task and recruitment in cooperative robots[J]. Nature, 2000, 406 (31); 992-995.
- 8 GUTJAHR W J A. generalized convergence result for the graph based ant system[R]. Technical Report 99-09, Dept. of Statistics and Decision Support Systems, University of Vienna, Austria, 1999.
- 9 GUTJAHR W J. A graph - based ant system and its convergence[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8); 873-888.
- 10 ISAACS J C, WATKINS R K, FOO S Y. Evolving ant colony systems in hardware for random number generation[C]. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002; 1450-1455.
- 11 SCHEUERMANN B, SO K, GUNTSCHE M, et al. FPGA implementation of population-based ant colony optimization[J]. Applied Soft Computing, 2004, 4(4); 303-322.
- 12 张纪会,徐心和. 一种新的进化算法——蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(3); 84-87.
- 13 陈焯. 带杂交算子的蚁群算法[J]. 计算机工程, 2001, 27(12); 74-76, 176.
- 14 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

Review on Research Progress in Ant Colony Algorithm

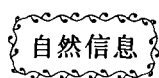
Duan Hai-bin^① Wang Dao-bo^② Yu Xiu-fen^③

① Doctor, Lecture, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083

② Professor, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

③ Associate researcher, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Key words ant colony algorithm, pheromone, positive feedback, model improvement



早期宇宙中的一个大而老的星系

2005年12月20日出版的 *Astro-physical Journal* 上刊登了以美国空间望远镜科研所 Bahram Mobasher 为首的团队在哈勃空间望远镜拍摄到一超深空视场内发现的一大而老星系的信息。Mobasher 等人估计这一被命名为 HUDF-JD2 的星系, 在我们观测到它时是其在宇宙诞生 8 亿年后的形象, 该星系在这么早的岁月里, 以恒星计已积累起了约 8 倍于我们银河系现在的质量, 然后像是突然地停止了新恒星的形成, 表现为一个巨大且早熟的老年星系。

HUDF-JD2 的巨大个头和快速老化特征令天文学家们吃惊, 因为大量的观测资料证明大星系是众多各类小天体长时期吞食合并的产物, 但 HUDF-JD2 的

暗红色暗示其老年恒星是在宇宙大爆炸后约 5 亿年时开始形成并在其后的 3 亿年当宇宙年龄为 82 亿年左右时(现在年龄 137 亿年)达到成年状态。此宇宙年龄对应于红移值为 6.5 的遥远深空天区。

HUDF-JD2 很暗淡, 地基望远镜难于收集到足够的光线以获得高质量的光谱; 这就是说难于直接测得其红移值。Mobasher 等人利用哈勃空间望远镜、施必泽空间望远镜和位于智利的甚大望远镜在不同的红外波段测量其亮度。

该星系是如此之遥远, 甚至已见不到其可见光波段的影像, 这可能是因为宇宙膨胀将其发出的可见光红移到光谱的红外部分以及其大部分光线在传播途中被中性氢所吸收。Mario Livio 认为 HUDF-JD2 还可能是一个被宇宙中浓重的尘埃所阻挡着的低红移值星系, 但他认为他们已彻底的探究排除了这种可能。

英国诺丁汉大学的 Christopher J. Conselice 说: “如果此星系的红移值被确证大于 6, 那将是件有趣的事, 但对其性质仍有疑问, 还希望得到其更多的观测数据和观测到类似的星系”。他还认为, 仅一个成熟的早型星系不足以否定现行的星系形成学说, 迄今只有一个这样的例子, 虽然稀少但也能从星系形成的模型中复制出来。

HUDF-JD2 并不是恒星形成比理论预期快的唯一的早型星系。英国的 Andrew Bunker 等人在相当红移值的天区已发现较小的成熟星系, 它们的恒星正是在宇宙诞生几亿年后出生的。由法国 Olivier Le Fevre 领导小组用超大望远镜发现了在火爆炸后 15 至 45 亿年间众多恒星形成的星系, 这一观测事实也表明早期宇宙中恒星的快速形成。

[许 杲 Sky & Telescope 111 (Jan 2006), 18]