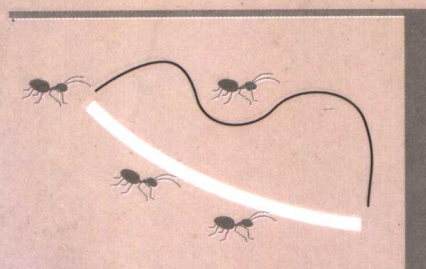


ANT COLONY ALGORITHMS:
THEORY AND APPLICATIONS

Hai-Bin Duan



蚁群算法

原理及其应用

● 段海滨 著



科学出版社
www.sciencep.com

蚁群算法原理及其应用

Ant Colony Algorithms: Theory and Applications

段海滨 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了蚁群算法的原理及其应用,力图概括国内外在这一学术领域的最新研究进展。全书共包括10章,主要内容包括蚁群算法的思想起源、研究现状及机制原理;蚁群算法的复杂度分析;蚁群算法的收敛性证明;蚁群算法参数对其性能的影响;蚁群算法的参数选择原则;离散域和连续域蚁群算法的若干改进策略;蚁群算法在多个优化领域的典型应用;蚁群算法的硬件实现技术;蚁群算法与其他仿生优化算法的比较与融合;蚁群算法的研究展望;最后还在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码和相关网站。

本书内容取材新颖,覆盖面较广,深入浅出,系统性强,注重理论联系实际,力求使读者能较快掌握和应用这一新兴的仿生优化算法。

本书可作为计算机科学、控制科学、人工智能、管理科学等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可供理工科其他专业的师生参考,还可供利用计算机从事智能优化的科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

蚁群算法原理及其应用/段海滨著. —北京:科学出版社,2005.12

ISBN 7-03-016204-8

I. 蚁… II. 段… III. 智能控制-算法 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098539 号

责任编辑:王淑兰 赵卫江/责任校对:栢连海

责任印制:吕春珉/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年12月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年12月第一次印刷 印张:29

印数:1—3 000 字数:552 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62130750 (TB06)

序

仿生优化算法是人工智能研究领域中的一个重要的分支,其中包括模拟生物界中自然选择和遗传机制的遗传算法、模拟蚂蚁群体觅食行为的蚁群算法以及模拟鸟类群体捕食行为的微粒群算法等。

蚁群算法最初由意大利学者 Dorigo M 于 1991 年首次提出,其本质上是一个复杂的智能系统,它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点。如今这一新兴的仿生优化算法已经成为人工智能领域的一个研究热点。目前对其研究已渗透到多个应用领域,并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。如今在国内外许多学术期刊和重要国际会议上,蚁群算法已成为交叉学科中一个非常活跃的前沿性研究问题。

段海滨博士多年来一直从事蚁群算法方面的研究工作,并在该领域有着丰厚的研究积累。该书包含了作者在蚁群算法理论及应用方面的研究成果,同时也吸纳了国内外许多有代表性的研究进展。

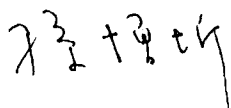
该书在系统研究蚁群算法的机制原理、理论分析及其在离散域和连续域的若干改进策略的基础上,阐述了蚁群算法在多个优化领域的典型应用,探讨了蚁群算法的硬件实现,研究了蚁群算法与其他仿生优化算法的融合策略,展望了蚁群算法的发展方向。

为了便于读者学习和研究,该书在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码及相关的网站资源。因此,该书不仅具有较高的学术价值,而且对工程应用也具有较好的参考价值 and 指导意义。

该书取材新颖,覆盖面广,结构合理。内容阐述深入浅出,条理清晰,注重理论联系实际,具有前瞻性和创新性,较好地体现了在这一研究领域的最新进展。

该书可作为高等院校和科研院所的计算机科学、人工智能、控制科学、管理科学、系统工程、电力电子、机械工程和生命科学等专业的广大师生及科技工作者的学习参考书。

目前国内系统地介绍蚁群算法的专著还比较匮乏,该书的出版在一定程度上弥补了这个不足。相信它的出版将对蚁群算法的发展和应用起到积极的推动作用。



2005 年 10 月

前 言

蚁群算法是一种最新发展的模拟昆虫王国中蚂蚁群体觅食行为的仿生优化算法,该算法采用了正反馈并行自催化机制,具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法结合等优点,在解决许多复杂优化问题方面已经展现出其优异的性能和巨大的发展潜力,近几年吸引了国内外许多学者对其进行了多方面的研究工作。国际著名的顶级学术刊物《Nature》曾多次对蚁群算法的研究成果进行报道,《Future Generation Computer Systems》和《IEEE Transactions on Evolutionary Computation》分别于2000年和2002年出版了蚁群算法特刊,在布鲁塞尔每两年召开一次的蚁群算法国际研讨会进一步促进了这一智能计算领域的学术交流,从而使这种新兴的仿生优化算法展现出勃勃生机,其应用范围完全可与遗传算法相媲美。目前,蚁群算法已成为国际智能计算领域中备受关注的研究热点和前沿性课题。

本书是作者多年来在对蚁群算法理论及其应用所进行的一系列深入研究的基础上撰写而成的,同时吸纳了国内外许多具有代表性的最新研究成果。全书内容取材新颖,覆盖面较广,深入浅出,注重理论联系实际,力图体现国内外在这一学术领域的最新研究进展。本书可作为计算机科学、控制科学、管理科学等专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可供理工科其他专业的师生参考,还可供利用计算机从事智能优化的科技工作者阅读和参考。

全书共包括10章,第1章是引论,主要介绍了蚁群算法的思想起源和研究现状;第2章阐述了基本蚁群算法的机制原理、系统学特征、数学模型及具体实现,并对其复杂度作了深入分析;第3章对蚁群算法的收敛性问题进行了深入研究和理论证明;第4章通过大量的实验数据分析了不同蚁群算法模型中诸多关联参数对其性能的影响,并给出了其主要参数的选择原则;第5章和第6章分别对离散域和连续域蚁群算法的若干改进策略进行了研究;第7章阐述了蚁群算法在多个优化领域的典型应用;第8章介绍了蚁群算法的硬件实现技术;第9章将蚁群算法同目前比较流行的几种仿生优化算法的做了比较,并给出了蚁群算法与这些仿生优化算法的融合策略;第10章展望了蚁群算法的研究方向和发展前景;最后,还在附录部分给出了基本蚁群算法的程序源代码和相关网站资源,并附上了书中出现的中英文词汇对照及缩略语。全书的10章内容(连同附录)基本构成了一个完整的封闭体系。

值此,作者非常感谢王道波教授、高镇洋教授、陈宗基教授、张平教授、周锐教授、郭锁凤教授、温卫东教授、孙久厚教授、夏品奇教授以及朱家强博士

后、罗德林博士在本书撰写过程中所给予的支持和帮助；特别感谢中国人工智能学会副理事长、清华大学智能技术与系统国家重点实验室孙增圻教授在百忙之中认真审阅了书稿，提出了许多宝贵的修改建议，并欣然为本书作序。没有他们的惠教、支持与鼓励，就不可能有本书稿的诞生。另外，在写作过程中参考了大量的最新文献，这里也向这些文献的作者们致以诚挚的谢意！衷心感谢培养我的母校——南京航空航天大学，特别感谢南京航空航天大学研究生院对本书出版的全额资助，也非常感谢北京航空航天大学自动化学院领导和老师们对我的支持和帮助，同时，也感谢科学出版社王淑兰等编辑在本书出版过程中所付出的辛勤劳动！

目前国内系统研究蚁群算法的书籍和资料还十分匮乏，我非常希望能献给大家一本既有理论又重视实践的好书，尽管罄尽全力，但囿于水平，且时间紧促，书中错误和不妥之处在所难免。凡此，恳请各位专家、学者及广大读者不吝指正。

段海滨

2005年8月

ABSTRACT

In ant societies, the activities of the individuals, as well as of the society as a whole, are not regulated by any explicit form of centralized control. On the other hand, adaptive and robust behaviors transcending the behavioral repertoire of the single individual can be easily observed at society level. These complex global behaviors are the result of self-organizing dynamics driven by local interactions and communications among a number of relatively simple individuals. The simultaneous presence of these and other fascinating and unique characteristics have made ant societies an attractive and inspiring model for building new algorithms and new multi-agent systems. In the last decade, ant societies have been taken as a reference for an ever growing body of scientific work.

Among the different works inspired by ant colonies, the ant colony algorithm (ACA) is probably the most successful and popular one. ACA is a novel bio-inspired optimization algorithm, which simulates the foraging behavior of ants for solving various complex combinatorial optimization problems. This book clearly defines ACA and its complexities, and presents both the most significant theoretical achievements and the state-of-the-art of ACA applications, especially the hardware realization of ACA. This book is broadly divided into 10 chapters and is organized as follows.

Chapter 1 starts with a description of the biological characteristics ants. On the basis of the introduction of the idea origins of ACA, the development of ACA is illustrated.

Chapter 2 presents a well-structured definition of basic ACA, and detailed implementation process and complexity analyses of basic ACA are also presented in this chapter.

Chapter 3 is dedicated to discuss the in-depth convergence proofs for specific classes of ACAs.

Chapter 4 presents detailed experimental analyses on the effect of pertinent parameters and ant colony behaviors in ACA, and an effective “three-step” method for optimum configuration of pertinent parameters in ACA is concluded in this chapter.

Chapter 5 is devoted to the explanation of improvement strategies of ACA

in discrete space optimization, and this description takes advantage of the traveling salesman problem (TSP).

Chapter 6 is devoted to the explanation of improvement strategies of ACA in continuous space optimization.

Chapter 7 presents the state-of-the-art of ACA typical applications in various fields. The main application principles, that is, rules of thumb to be followed when attacking a new problem, are identified and discussed in this chapter.

Chapter 8 reports on what is currently known about the hardware realization of ACA.

Chapter 9 presents a systematic comparison and detailed combination of ACA and other bio-inspired optimization algorithms.

Chapter 10 outlines some ongoing and most promising research trends in ACA.

Finally, there are four appendixes, which are programs of basic ACA, web sources about ACA, terminology (Chinese-English) and a piece of poetry extolling ACA.

This book is intended primarily for (1) advanced undergraduate and graduate students in computer science, cybernetics, management science and other related majors; (2) academic and industry researchers in artificial intelligence and computational intelligence; (3) practitioners willing to learn how to implement ACA to solve various combinational optimization problems.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 蚂蚁的生物学特征	2
1.3 蚁群算法的思想起源	8
1.4 蚁群算法的研究进展	11
1.5 本书的体系结构	15
1.6 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 基本蚁群算法原理及其复杂度分析	24
2.1 引言	24
2.2 基本蚁群算法的原理	24
2.3 基本蚁群算法的系统学特征	26
2.4 基本蚁群算法的数学模型	29
2.5 基本蚁群算法的具体实现	36
2.6 基本蚁群算法的复杂度分析	39
2.7 基本蚁群算法的性能评价指标	42
2.8 本章小结	42
参考文献	43
第 3 章 蚁群算法的收敛性研究	45
3.1 引言	45
3.2 图搜索蚂蚁系统 (GBAS) 的收敛性研究	45
3.3 一类改进蚁群算法的收敛性证明	59
3.4 GBAS/tdev 和 GBAS/tdlb 的确定性收敛证明	65
3.5 基本蚁群算法的 A. S. 收敛性研究	72
3.6 一类分布式蚂蚁路由算法的收敛性研究	76
3.7 基于分支路由和 Wiener 过程的蚁群算法收敛性证明	81
3.8 一种简单蚁群算法及其收敛性分析	84
3.9 遗传-蚁群算法的 Markov 收敛性分析	90
3.10 一类广义蚁群算法 (GACA) 的收敛性分析	93
3.11 本章小结	97
参考文献	98

第4章 蚁群算法的实验分析及参数选择原则	100
4.1 引言	100
4.2 蚁群行为和参数对算法性能影响的实验分析	100
4.3 蚁群算法参数最优组合的“三步走”方法	116
4.4 本章小结	117
参考文献	117
第5章 离散域蚁群算法的改进研究	119
5.1 引言	119
5.2 自适应蚁群算法	119
5.3 基于去交叉局部优化策略的蚁群算法	125
5.4 基于信息素扩散的蚁群算法	130
5.5 多态蚁群算法	135
5.6 基于模式学习的小窗口蚁群算法	139
5.7 基于混合行为的蚁群算法	144
5.8 带聚类处理的蚁群算法	148
5.9 基于云模型理论的蚁群算法	153
5.10 具有感觉和知觉特征的蚁群算法	157
5.11 具有随机扰动特性的蚁群算法	166
5.12 基于信息熵的改进蚁群算法	169
5.13 本章小结	172
参考文献	172
第6章 连续域蚁群算法的改进研究	175
6.1 引言	175
6.2 基于网格划分策略的连续域蚁群算法	176
6.3 基于信息量分布函数的连续域蚁群算法	179
6.4 连续域优化问题的自适应蚁群算法	183
6.5 基于交叉变异操作的连续域蚁群算法	187
6.6 嵌入确定性搜索的连续域蚁群算法	190
6.7 基于密集非递阶的连续交互式蚁群算法 (CIACA)	194
6.8 多目标优化问题的连续域蚁群算法	201
6.9 复杂多阶段连续决策问题的动态窗口蚁群算法	205
6.10 本章小结	209
参考文献	209
第7章 蚁群算法的典型应用	212
7.1 引言	212
7.2 车间作业调度问题	212

7.3	网络路由问题	225
7.4	车辆路径问题	238
7.5	机器人领域	249
7.6	电力系统	258
7.7	故障诊断	268
7.8	控制参数优化	272
7.9	系统辨识	282
7.10	聚类分析	290
7.11	数据挖掘	297
7.12	图像处理	302
7.13	航迹规划	306
7.14	空战决策	310
7.15	岩土工程	315
7.16	化学工业	319
7.17	生命科学	323
7.18	布局优化	327
7.19	本章小结	331
	参考文献	332
第8章	蚁群算法的硬件实现	343
8.1	引言	343
8.2	仿生硬件概述	343
8.3	基于FPGA的蚁群算法硬件实现	346
8.4	基于蚁群算法和遗传算法动态融合的软硬件划分	360
8.5	本章小结	371
	参考文献	372
第9章	蚁群算法同其他仿生优化算法的比较与融合	374
9.1	引言	374
9.2	其他几种仿生优化算法的基本原理	374
9.3	蚁群算法与其他仿生优化算法的异同比较	382
9.4	蚁群算法与遗传算法的融合	385
9.5	蚁群算法与人工神经网络的融合	390
9.6	蚁群算法与微粒群算法的融合	398
9.7	蚁群算法与人工免疫算法的融合	402
9.8	本章小结	410
	参考文献	410

第 10 章 展望	414
10.1 引言	414
10.2 蚁群算法的模型改进	414
10.3 蚁群算法的理论分析	415
10.4 蚁群算法的并行实现	416
10.5 蚁群算法的应用领域	417
10.6 蚁群算法的硬件实现	418
10.7 蚁群算法的智能融合	418
10.8 本章小结	419
参考文献	419
附录 A 基本蚁群算法程序	421
A.1 C 语言版	421
A.2 Matlab 语言版	426
A.3 Visual Basic 语言版	432
附录 B 相关网站	439
附录 C 基本术语 (中英文对照) 及缩略语	441
附录 D (词一首) 鹧鸪天·蚁群算法	447

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Biological Characteristics of Ants	2
1.3 Idea Origins of Ant Colony Algorithm(ACA)	8
1.4 Development of ACA	11
1.5 Outline of the Book	15
1.6 Summary	18
References	18
Chapter 2 Principles and Complexity Analysis of Basic ACA	24
2.1 Introduction	24
2.2 Principles of Basic ACA	24
2.3 Systematic Characteristics of Basic ACA	26
2.4 Mathematical Model of Basic ACA	29
2.5 Implementation of Basic ACA	36
2.6 Complexity Analysis of Basic ACA	39
2.7 Performance Criteria of Basic ACA	42
2.8 Summary	42
References	43
Chapter 3 Convergence Proofs for ACAs	45
3.1 Introduction	45
3.2 Convergence Proof for the Graph-based Ant System (GBAS)	45
3.3 Short Convergence Proof for a Class of Improved ACA	59
3.4 Deterministic Convergence Proof for GBAS/tdev and GBAS/tdlb	65
3.5 A. S. Convergence Proof for Basic ACA	72
3.6 Convergence Results for a Class of Distributed Ant Routing Algorithms	76
3.7 Branching Process and Branching Wiener Process based ACA	81
3.8 Convergence Analysis for a simple ACA	84
3.9 Markov Convergence Analysis for the Combination of ACA and Genetic Algorithm (GA)	90

3.10	Convergence Analysis for a Class of Generalized ACA (GACA)	93
3.11	Summary	97
	References	98
Chapter 4	Experimental Analysis of ACA and Optimum Configuration	
	Principles of Pertinent Parameters in ACA	100
4.1	Introduction	100
4.2	Experimental Analysis of the Effect of Pertinent Parameters and Ant Colony Behaviors in ACA	100
4.3	“Three-step” Method for Optimum Configuration of Pertinent Parameters in ACA	116
4.4	Summary	117
	References	117
Chapter 5	Improved ACAs in Discrete Space Optimization	119
5.1	Introduction	119
5.2	Self-adaptive ACA	119
5.3	Cross-removing and Local Optimization Strategies based ACA	125
5.4	Pheromone Diffusion based ACA	130
5.5	Polymorphic ACA	135
5.6	Model-learning based Little-window ACA	139
5.7	Hybrid Behavior based ACA	144
5.8	Improved ACA with Clustering	148
5.9	Cloud Models Theory based ACA	153
5.10	Sensational and Consciousness ACA	157
5.11	Improved ACA with Random Perturbation Behavior	166
5.12	Information Entropy based ACA	169
5.13	Summary	172
	References	172
Chapter 6	Improved ACAs in Continuous Space Optimization	175
6.1	Introduction	175
6.2	Gridding Partition based ACA	176
6.3	Trail Distributed Function based ACA	179
6.4	Self-adaptive ACA for Solving Continuous Space Optimization Problems	183
6.5	Cross and Mutation Operation based ACA	187
6.6	Improved ACA with Embedded Deterministic Searching	190

6.7	Dense Heterarchy Continuous Interacting ACA	194
6.8	Improved ACA for Multiobjective Optimization Problems	201
6.9	Dynamic-window-search ACA for Complex Multistage Decision-making Problems	205
6.10	Summary	209
	References	209
Chapter 7	Typical Applications of ACA	212
7.1	Introduction	212
7.2	Job-shop Scheduling Problem (JSP)	212
7.3	Network Routing Problem	225
7.4	Vehicle Routing Problem (VRP)	238
7.5	Robot Field	249
7.6	Power System	258
7.7	Fault Diagnosis	268
7.8	Parameter Optimization	272
7.9	System Identification	282
7.10	Clustering Analysis	290
7.11	Data Mining	297
7.12	Image Processing	302
7.13	Route Planning	306
7.14	Air-combat Decision-making	310
7.15	Geotechnical Engineering	315
7.16	Chemical Industry	319
7.17	Life Science	323
7.18	Layout Optimization	327
7.19	Summary	331
	References	332
Chapter 8	Hardware Realization of ACA	343
8.1	Introduction	343
8.2	Overview of Bio-inspired Hardware	343
8.3	FPGA Implementation of ACA	346
8.4	Hardware/Software Partitioning based on Dynamic Combination of ACA and GA	360
8.5	Summary	371
	References	372

Chapter 9 Comparison and Combination of ACA and Other Bio-inspired Optimization Algorithms	374
9.1 Introduction	374
9.2 Principles of Several Typical Bio-inspired Optimization Algorithms	374
9.3 Comparison of ACA and Other Bio-inspired Optimization Algorithms	382
9.4 Combination of ACA and GA	385
9.5 Combination of ACA and Artificial Neural Network(ANN)	390
9.6 Combination of ACA and Particle Swarm Optimization(PSO).....	398
9.7 Combination of ACA and Artificial Immune Algorithm(AIA).....	402
9.8 Summary	410
References	410
Chapter 10 Prospects	414
10.1 Introduction	414
10.2 Model Improvement of ACA	414
10.3 Theoretical Analysis of ACA	415
10.4 Parallelization of ACA	416
10.5 Application Fields of ACA	417
10.6 Hardware Realization of ACA	418
10.7 Intelligent Combination of ACA	418
10.8 Summary	419
References	419
Appendix A Programs of Basic ACA	421
A.1 C Language Version	421
A.2 Matlab Language Version	426
A.3 Visual Basic Language Version	432
Appendix B Web Sources about ACA	439
Appendix C Terminology (Chinese-English) and Abbreviations	441
Appendix D (Poetry) Zhe Hu Tian • ACA	447

第1章 绪 论

1.1 引 言

自然界一直是人类创造力的丰富源泉,人类认识事物的能力来源于与自然界的相互作用之中。自然界中的许多自适应优化现象不断给人以启示:生物体和自然生态系统可通过自身的演化就使许多在人类看起来高度复杂的优化问题得到完美的解决。近些年来,一些与经典的数学规划原理截然不同的、试图通过模拟自然生态系统机制以求解复杂优化问题的仿生优化算法相继出现(如遗传算法、蚁群算法、微粒群算法、人工免疫算法、人工鱼群算法、混合蛙跳算法等),大大丰富了现代优化技术,也为那些传统最优化技术难以处理的组合优化问题提供了切实可行的解决方案。伴随着模拟自然与生物机理为特征的仿生优化算法时代的悄然兴起,一些仿生优化算法已在经典 NP-C 问题的求解和实际应用中显示出强大的生命力和进一步发展的潜力。

生物学家通过对蚂蚁的长期观察研究发现,每只蚂蚁的智能并不高,看起来没有集中的指挥,但它们却能协同工作,集中食物,建起坚固漂亮的蚁穴并抚养后代,依靠群体能力发挥出超出个体的智能。蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)是最新发展的一种模拟昆虫王国中蚂蚁群体智能行为的仿生优化算法^[1],它具有较强的鲁棒性、优良的分布式计算机制、易于与其他方法相结合等优点^[2, 3]。尽管蚁群算法的严格理论基础尚未奠定,国内外的相关研究还处于实验探索和初步应用阶段,但是目前人们对蚁群算法的研究已经由当初单一的旅行商问题(traveling salesman problem, 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,由离散域范围内的研究逐渐拓展到了连续域范围内的研究^[4, 5],而且在蚁群算法的硬件实现上也取得了很多突破性的研究进展,从而使这种新兴的仿生优化算法展现出勃勃生机和广阔的发展前景。

本章首先阐述了蚂蚁的社会形态,随后分析了蚂蚁群体“寻找食物”、“任务分配”及“构造墓地”三种社会行为,接下来在总结真实蚂蚁和人工蚂蚁之间异同点的基础上,阐述了蚁群算法的思想起源,紧接着评述了蚁群算法的发展现状,同时列举了部分具有代表性的蚁群算法及其应用情况,最后给出了本书的组织结构以及各章所包括的主要内容。