

国 家 “ 九 五 ” 重 点 图 书

STW LJSCS

神 经 网 络 技 术 丛 书

Shenjing Wangluo Jishu Congshu

进化计算

■ JINHUA JISUAN

■ 王正志 薄 涛 / 著

■ 国防科技大学出版社

国家“九五”重点图书

神经网络技术丛书

进化计算

王正志 薄 涛 著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

进化计算/王正志,薄涛著.—长沙:国防科技大学出版社,
2000.11

ISBN 7-81024-635-6

I .进… II .①王…②薄… III .遗传算法 IV .O242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 25544 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdebs@public.cs.hn.cn

责任编辑:张 静 责任校对:罗 青

新华书店总店北京发行所经销

宁乡县印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:15.375 字数:386 千
2000 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—3000 册

*

定价:28.00 元

内容简介

本书详细阐述了进化计算的基本原理,系统而全面地介绍了遗传算法和进化算法,对这两类方法进行了深入的比较,并且给出了将这两类方法统一起来的进化计算框架。对进化计算中的模式定理、算法收敛性、动态编码、种群规模、停止规则等基本问题进行了定量的数学分析。专门介绍了两类新型的遗传算法:MGA 和 LLGA。最后系统介绍了进化计算的实用方法与应用技术,包括带约束的函数优化、组合优化、机器人规划和机器学习,全面地论述了密西根方法和匹兹堡方法。

本书可供自动化、计算机、信息处理、应用数学等专业的科技人员参考,也可作为相应专业的研究生和高年级本科生的教材。

前 言

自从第一台数字计算机诞生至今已经过去了半个多世纪。计算机的出现给人类的生产和生活带来了巨大的影响。在这半个多世纪里,科学技术获得了飞速的发展,这与计算机技术的发展不无关系。21 世纪,人类将比过去任何时候都更加依赖计算机,因此,如何更好地利用计算机来解决问题已经成为了一个根本性的问题。尽管人们已经可以让计算机完成一些过去无法想象的任务,但仍然有许多复杂的实际问题得不到很好的解决,例如人工智能模拟、非线性优化、图像识别等等。这些问题所具有的一个共同特点就是它们都是高度非线性的,人们对其内部机理并不是很清楚。对于这些问题,人们做出了巨大的努力,但总的来说,效果并不能令人满意。在这种情况下,许多学者都认识到常规方法是无法解决这些问题的,要解决好这些问题需要一些具有自组织、自适应能力的大规模并行算法。另一方面,自然界的各种生物(包括人类)都具有各种复杂的结构,并能够产生非常复杂的行为,因此,模拟生物或各种自然现象就成为了一种研究方向。这些研究导致了一些新方法的出现,如神经网络、进化计算等等。它们都具有一定的自组织、自适应性,而且尤其重要的是,它们都是高度并行的算法。这些方法的出现,为利用计算机解决复杂问题带来了希望。

自然界中存在各种各样的生物,这些生物与自然环境相互作用,表现出了复杂的行为。即使是这些生物中最低级的形态——病毒,其结构也是如此复杂,以至于人们很难完全了解其构成细节。达尔文的生物进化学说告诉我们,自然界中丰富多彩的生物是自然选择和进化的结果,现代分子生物学的发展也为这一学说提供了直接的证据,所有的生物都具有遗传物质——DNA 和

RNA。进化使得生物能够更好地适应自然环境,最复杂的生物就是由简单的生物经历了漫长的岁月后逐渐进化而来。虽然进化的结果非常复杂,但进化的过程却很简单:繁殖、变异、竞争、选择。

生物是解决问题的能手。正是在自然界的启示下,一些学者希望通过模拟自然界的生物进化过程来解决问题,这就导致了进化计算这一学科的诞生。自然选择消除了软件设计中的最大障碍:需要事先描述问题的全部特点,并说明针对问题的特点,程序应采取的措施。利用进化机理,人们可以“培育”程序,去解决那些结构尚不清楚的问题。进化计算是一种通用的问题求解方法,它采用某种编码技术来表示各种复杂的结构,并将每个编码称为一个个体。算法维持一个一定数目的编码集合,称为种群,并通过对种群中的每个个体进行某些遗传操作来模拟进化过程,最终获得一些具有较高性能指标的编码。进化计算中常用的遗传操作有变异、交叉、选择等等。其中变异是模拟自然界中生物遗传物质的变异,交叉则是模拟有性生殖过程中的染色体交换过程,选择则是模拟自然界的优胜劣汰过程。

进化计算的研究起源于 20 世纪 50 年代末,成熟于 80 年代。在 60 年代中叶,Holland 提出遗传算法,Rechenberg 和 Schwefel 提出进化策略,Fogel 提出了进化规划,形成三大主流板块。这三种方法具有共同的本质,分别强调了自然进化中的不同方面:遗传算法强调染色体的操作,进化策略强调个体级的行为变化,而进化规划则强调种群级上的行为变化。现在学术界把遗传算法、进化策略和进化规划通称为进化计算。

遗传算法、进化策略、进化规划在利用生物进化机制提高计算机求解问题能力的目标和基本思路是一致的,但是具体做法上则有所差别,甚至对于一些基本问题有着根本观点上的分歧。

在 Holland 提出的遗传算法中,把要被进化的对象用二值串表示,很像生物体中的基因。所以遗传算法被认为是采用还原主义

的观点和自下而上的途径。这样二值串中具有各种建筑块,由于存在各种各样结构的建筑块,遗传算法可以方便地处理各种各样的非线性问题。利用建筑块的概念可以证明,繁殖和选择对于建筑块的优化具有隐含并行性。遗传算法的隐含并行性使得它能利用较少的串来搜索、发掘和效验空间中的大量区域。

然而当我们进行函数的数值优化时,如果把数值表示成二值串,各位所代表的实际值则以二的幂次方减小。所以更为合理的方案是采用实数表示,我们也可以定义实数种群中的交叉繁殖和变异。但在这样的表示中,难以直观表示出基因的结构,更难以体现出建筑块的存在。所以在这种表示中将更为重视变异的作用。

Holland 在遗传算法中则更多地强调交叉繁殖的作用,而把变异看做是第二位的。Holland 认为:进化是一个运行在染色体上的过程,而不是运行在它们所编码的生命体上的过程,繁殖过程是进化发生的地点。

而 Fogel 则认为,实际上并没有发生进化的单一地点。因为进化是由四个操作组成的连续过程:繁殖、变异、竞争和选择。要弄清进化的基石究竟是遗传繁殖还是编码结构,是错误地表达了这个过程。实际上,染色体、基因、密码子和核酸都不是进化优化的受惠者。所以 Fogel 认为,把进化建模成遗传机制的简单过程是不适当的。普遍存在的进化收敛现象(不管完全不同的形态和基因背景,独立地产生了令人吃惊的相似的表现型性状)表明,适应性的度量只可能归因于表现型。进化主要是一个行为适应的过程,而不是基因适应的过程。抽象出的研究兴趣点应该是生物体的相继代之间的行为联系,而不是遗传联系。塑造自适应特征的进化原动力是选择。选择不仅作用在个体基因上,而且作用在整个全局性的表现型上,表现型决定于生物体的全部基因的配套和它们与环境的相互作用。Fogel 更为强调变异的作用,认为对于了解进化来说,弄清自然选择如何处理变异与弄清如何发生遗传变异相

比,前者更为重要。

Fogel 的进化规划不考虑基因,而只考虑表现型,因而是一种由上而下的方法。由上到下的方法只强调整体系统性能,由此发现复杂形势中的最优行为。Fogel 认为,只有自然界的证据才能表明系统是不是由下而上优化的。如果是由下而上优化的话,个体编码段必须成为信息上互相分离的完整基因的集合,各自地进行自己最优幸存的最大化。但是在另一方面,如果选择的物理机制是由上而下优化的话,这样只有整体系统的性能被评估,低层编码决不会直接影响整体系统性能,而只会间接影响整体系统性能,其结果将完全不同于由下而上优化的情况。行为将变成高度集成的特别完美的功能器官,而底层基因将变成交织的、叠置的、重复编码的混色纱。在自然界我们只看到后面的这种情况(由上而下优化)。

Holland 认为,生物进化并不是要产生出独来独往的一个超人,而是要产生出彼此互存互依的物种。所以使用遗传算法的目的不仅仅是为了寻找函数的优化值,也不仅仅是为了控制个别规划或策略的演化,而是要去控制由许多规则构成的分类体系这个“有机体”的演化。竞争的压力并不能孤立地筛选出最合适的规则,但是却能引起大系统的进化。如果按照每条规则产生的正确行动的数目对其评分的话,只会有利于演化出个别超级规则,而不利于找到一组相互之间发生有效作用的规则。为了能够搜索到一组相互作用的规则,应该改变步骤,引入信度分配机制。即强迫这些规则去争夺对行动的控制权,每条满足条件的规则都要与其他满足条件的规则进行竞争,并且由其中最有力的规则来确定系统在某种情况下的行动。如果系统的行动成功了,获胜的规则将被加强,反之,它们将被削弱。Holland 提出的分类器,Koza 提出的遗传编程都是研究规则集演化的良好框架。

而 Fogel 认为,不需要隔离出基因结构,因而在进化规划中没

有信度分配的算法。对于行为特征高度集成的任何系统和在基因型与表现型之间的关系是由基因多态性和多基因性表征时,也没有可行的信度分配算法。Fogel 认为,信度分配在生物进化中是一个不存在的问题,它是人们构造出来的。已有的一些信度分配算法,对于某些应用也许是有用的。但是对于成功的优化来说,并不需要这些方法,这些方法一般导致亚优的性能。Fogel 利用有限自动机进行进化规划,也提供了研究规则集演化的有效框架。

由此看来,学术界对于进化计算中的一些基本问题存在着认识上的根本分歧。本书兼容并蓄,对于进化计算中的这两大流派都作了较为详细的介绍。

学术界对于进化计算中的一些基本问题存在着认识上的如此分歧,主要原因是,至今我们对于生物基因的内部结构以及它们影响生物表现行为特征的机制了解太少。在这种形势下,有人主张,既然不了解,那就绕过去。我们认为,这也可以算是一种处理问题的实用方法。另一个原因是,Holland 使用结构简单的二值串作为基因的表示,尚不足以表示出生物基因内部的复杂机制,也没有充分反映出求解问题的内部机制的特征。我们认为,由于遗传算法既考虑了表现型又考虑了底层的基因型,遗传算法的发展潜力应该更大一些。虽然我们目前尚不了解生物基因的内部结构,但由于我们并不是要去解决真正的生物问题,而是要去解决工程中的问题,我们可以针对具体的工程问题,设法提出有效的数据结构,作为遗传算法的基因,进行进化求解。所以现在有人提出“遗传算法 + 数据结构 = 进化计算”,这是非常有道理的。

近年来的研究表明,进化理论不仅是生物学的统一理论,而且进化可以作为所有智能过程的统一描述。不管学习是由个体、物种,还是由社会群体实现的,每个智能体都采用了功能上等价的繁殖、变异、竞争和选择。每个系统具有产生新行为的变异性单元和存储知识的储蓄库。学习是通过某些形式的随机搜索和用于了解

环境的学习系统实现的。学习系统不断进化调节它的行为,以在很宽范围内达到所需的要求。智能不是进化的最终结果,而是被编织成过程本身。智能和进化是不能分开的。

进化计算创建于 20 世纪 60 年代。到了 70 年代,进化计算潜在的求解复杂问题的能力开始引起了学者们的关注,一些先行学者开始投入到对进化算法的研究中。但是那个时代的计算机计算速度慢,价格昂贵,所以,计算量较大的进化计算没有引起人们的广泛关注。从 80 年代开始,随着计算机技术的发展和进化计算的深入研究,进化计算被广泛地应用于许多不同的领域,取得了良好的效果,并由此掀起了研究进化计算的热潮。

进化计算已有许多实际应用。20 世纪 80 年代,Goldberg 用遗传算法学会控制天然气输气管道系统。美国通用电器公司和 Rensselaer 综合技术学院的一组研究人员成功地将遗传算法用到高涵道比的喷气发动机的涡轮设计中。涡轮设计涉及到至少 100 个变量,原来的设计法是借助于一个专家系统引导设计人员找出合理的修正,这种专家系统运用基于经验的推理规则能预测改变一两个变量造成的影响。但是,只有同时改变许多变量,才能进一步改进设计的结果,这里遗传算法得到了用武之地。1992 年在巴塞罗那举行奥运会,其后举行的伤残运动会由于 10% 的运动员被重新确定伤残等级,赛程表需要实时地重新安排,AIS 人工智能公司采用遗传算法解决了此项难题(1988 年汉城奥运会职员用传统人工智能方法需要通宵达旦,才能重新安排赛程)。Davis 用遗传算法进行 VLSI 电路布线。美国西方通信公司采用遗传算法进行光缆布线,节省费用 1 亿美元。

到 20 世纪 90 年代,可以说已经没有哪个领域不使用进化计算了。但是在目前进化计算中,还存在着明显的隐患:理论分析没有能够及时跟上。所以我们在本书中注意了对于进化计算的理论分析的介绍。

在本书中,我们按照惯例将进化计算划分为两大类:遗传算法和进化算法。进化算法中包括进化规划和进化策略。这两大类算法的主要区别在于:后者一般不使用交叉操作,而遗传算法一般都使用交叉操作。在实际应用中,这两大类方法互相借鉴,具有相互融合的趋势。

在本书中,我们主要讲述遗传算法的理论和应用,并以一定的篇幅介绍了进化算法。本书可分为四个部分。第一部分介绍进化算法的生物进化论基础,为第一章;第二部分为遗传算法,包括第二章至第八章,这一部分主要介绍遗传算法的理论和应用方法;第三部分为进化规划和进化策略,包括第九章和第十章,这一部分主要介绍进化算法的应用方法和基本理论,并建立了进化算法的理论框架;第四部分为进化计算的应用实例,包括第十一章和第十二章,这一部分比较详细地介绍了进化计算在两个领域中的应用:机器学习和机器人轨迹规划。

感谢国防科技大学自动控制系和机器人实验室同仁所给予的热情支持和帮助。感谢张光铎博士、周宗潭博士、李强博士、周红建博士、彭雄宏博士生、邴苏丹博士生等所做的研究工作。感谢国防科技大学出版社对本书出版的关心,特别感谢张静编辑的辛勤劳动。

感谢著者的家庭成员在著者从事研究和撰写本书过程中所给予的关心和支持。

国防科技大学自动控制系

王正志 薄 涛

2000年8月

目 录

第一章 生物进化与新达尔文主义	(1)
1.1 进化论	(1)
1.2 繁殖	(5)
1.3 变异	(6)
1.4 竞争	(8)
1.5 选择	(11)
1.6 进化优化受益者	(14)
1.7 适应与拓扑	(19)
1.8 总结	(25)
第二章 遗传算法的起源及搜索策略	(26)
2.1 遗传算法的起源	(26)
2.1.1 GA 的定义	(27)
2.1.2 GA 应用的例子	(30)
2.2 求解优化问题的搜索方法与搜索策略	(37)
2.2.1 搜索方法的分类	(37)
2.2.2 搜索方法的搜索策略	(38)
第三章 遗传算法的基本理论	(42)
3.1 模式定理	(42)
3.1.1 模式的定义	(42)
3.1.2 模式定理	(43)
3.1.3 建筑块假说	(47)
3.1.4 内在并行性	(48)

3.2 双臂赌机问题	(50)
3.2.1 双臂赌机问题及分析	(51)
3.2.2 模式定理的意义	(58)
3.2.3 k 臂赌机问题的局限性	(59)
第四章 遗传算法的收敛性分析	(61)
4.1 收敛性的各种定义	(61)
4.1.1 渐近收敛	(61)
4.1.2 概率意义下的收敛	(62)
4.2 基于压缩映射原理的收敛性分析	(62)
4.2.1 压缩映射原理	(63)
4.2.2 cmGA 及其收敛性分析	(64)
4.3 基于有限 Markov 链的收敛性分析	(66)
4.3.1 有关有限 Markov 链的预备知识	(67)
4.3.2 Markov 链分析方法回顾	(69)
4.3.3 GA 的收敛性分析	(70)
4.4 动力学模型	(75)
4.4.1 Vose 模型	(76)
4.4.2 Bertoni 模型	(78)
4.5 停止准则	(81)
第五章 遗传算法的改进	(96)
5.1 遗传算法的局限性	(96)
5.2 强方法与弱方法	(99)
5.3 二进制编码方案与浮点数编码方案	(101)
5.4 选择压力分析	(107)
5.4.1 选择算子的修改	(108)
5.4.2 适值函数的尺度变换	(117)
5.5 局部微调	(119)
5.6 动态编码	(127)
5.6.1 随机平均法	(127)

5.6.2	Delta 编码与动态参数编码	(130)
5.7	欺骗问题与链接问题	(133)
5.8	种群规模分析	(136)
5.8.1	基于初始建筑块数目的种群规模分析	(136)
5.8.2	基于建筑块决策的种群规模分析	(137)
5.8.3	基于赌徒输光问题的种群规模分析	(147)
5.9	建筑块混合与控制图	(154)
5.10	上位效应	(160)
5.10.1	上位效应概念	(160)
5.10.2	线性假设引入	(160)
5.10.3	上位效应要素	(161)
第六章 mGA 与 LLGA		(163)
6.1	mGA	(164)
6.1.1	mGA 的编码方案	(164)
6.1.2	mGA 的遗传算子	(165)
6.1.3	mGA 的算法流程	(168)
6.1.4	fmGA	(170)
6.2	LLGA	(177)
6.2.1	LLGA 的编码方案	(178)
6.2.2	遗传算子	(181)
6.2.3	链接度与随机链接度	(183)
6.2.4	LLGA 的算法流程	(185)
6.2.5	压缩内含子	(186)
第七章 约束条件的处理		(188)
7.1	线性约束条件	(190)
7.1.1	问题的简化	(190)
7.1.2	表示方案	(191)
7.1.3	遗传算子	(191)
7.1.4	初始化种群	(194)

7.1.5	应用 GENOCOP 的一个实例	(195)
7.1.6	GENOCOP 的进一步改进	(197)
7.2	非线性约束条件	(200)
7.2.1	问题的一般形式	(200)
7.2.2	GENOCOP II 的算法流程	(200)
7.2.3	应用 GENOCOP II 的实例	(203)
7.3	GENOCOP III 简介	(208)
第八章	组合优化问题	(212)
8.1	旅行商(TSP)问题	(212)
8.1.1	近邻表示	(213)
8.1.2	序表示	(216)
8.1.3	路径表示	(218)
8.1.4	边表示	(224)
8.1.5	其他表示方案	(227)
8.1.6	其他搜索策略	(243)
8.1.7	算法性能度量	(244)
8.2	调度问题	(245)
8.2.1	作业调度问题	(246)
8.2.2	时间表问题	(250)
第九章	进化策略和进化规划	(252)
9.1	进化算法的早期研究	(252)
9.2	进化策略	(258)
9.3	进化规划	(262)
9.4	进化算法的收敛性分析	(269)
9.4.1	进化算法的描述	(270)
9.4.2	用有限 Markov 理论分析进化算法	(271)
9.4.3	进化算法的收敛速率	(274)
第十章	进化计算框架	(285)

10.1	进化算法和遗传算法之间的哲学差别	(285)
10.2	交叉算子与变异算子的比较	(287)
10.3	进化计算框架	(296)
10.3.1	表示法	(297)
10.3.2	进化算子	(298)
10.3.3	算法定义	(300)
10.3.4	gfmGA 的形式化定义	(302)
第十一章 遗传机器学习		(311)
11.1	遗传机器学习概述	(311)
11.1.1	遗传机器学习系统的结构	(312)
11.1.2	匹兹堡方法与密西根方法	(314)
11.1.3	产生式系统体系结构	(316)
11.2	机器学习方法一:参数调节	(319)
11.3	机器学习方法二:改变数据结构	(327)
11.4	密西根方法:分类器系统	(334)
11.4.1	分类器系统概述	(335)
11.4.2	信度分配机制——斗链式算法	(338)
11.4.3	分类器重组机制——遗传算法	(343)
11.4.4	分类器的运行	(343)
11.5	分类器实例	(345)
11.5.1	ANIMATE 分类器系统	(345)
11.5.2	煤气管道操作分类器系统	(349)
11.5.3	新型战斗机驾驶规则学习	(352)
11.6	匹兹堡方法:学习系统	(368)
11.6.1	学习系统概述	(370)
11.6.2	规则集合的重组	(372)
11.6.3	LS-I 的性能	(374)
11.7	组织学习方法	(374)
11.7.1	组织的增长	(375)
11.7.2	自主组织学习	(384)

11.8 囚徒窘境问题	(400)
11.8.1 Axelrod 竞赛	(402)
11.8.2 Fogel 有限状态机	(403)
第十二章 机器人轨迹规划	(419)
12.1 机器人系统	(419)
12.2 机器人仿真模型	(422)
12.3 机器人轨迹规划方法	(423)
12.3.1 轨迹规划表示	(423)
12.3.2 轨迹规划方法	(427)
12.3.3 Lamarck 效应和子目标回报	(431)
12.4 机器人轨迹规划的应用	(436)
12.4.1 MR-501 特性	(436)
12.4.2 机器人轨迹规划系统设计	(437)
12.4.3 机器人规划的性能	(443)
附录 A 有限状态自动机	(451)
附录 B 产生式系统	(454)
参考文献	(460)