

文章编号: 1001-0920(2007)03-0241-06

蚁群算法硬件实现的研究进展

段海滨¹, 王道波², 于秀芬³

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 3. 中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要: 蚁群算法是优化领域中新出现的一种启发式仿生类智能进化算法, 该算法采用分布式并行计算和正反馈机制。首先综述了蚁群算法及其硬件实现的研究进展, 并讨论了蚁群算法硬件的主要特点; 然后, 着重介绍了基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的蚁群算法硬件实现方案, 简要阐述了蚁群算法在软硬件划分领域的应用进展; 最后, 展望了蚁群算法硬件实现领域未来的研究方向和内容。

关键词: 蚁群算法; 硬件实现; 仿生硬件; 现场可编程门阵列 (FPGA); 基于群体-蚁群优化

中图分类号: TP13; TP18

文献标识码: A

Survey for hardware realization of ant colony algorithm

DUAN Hai-bin¹, WANG Dao-bo², YU Xiufen³

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: DUAN Hai-bin, E-mail: hbduan@buaa.edu.cn)

Abstract: Ant colony algorithm (ACA) is a novel category of bionic meta-heuristic algorithm, in which parallel computation and positive feedback mechanism are adopted. The development of ACA and its hardware realization are reviewed. The main characteristics of ACA are discussed, and the detailed scheme for field programmable gate array (FPGA)-based hardware realization of ACA is proposed. The development of hardware/software partitioning, which is based on ACA, is also reviewed. Some remarks on the further research contents and directions in this domain are presented.

Key words: Ant colony algorithm (ACA); Hardware realization; Bio-inspired hardware; Field programmable gate array (FPGA); Population-based ant colony optimization (P-ACO)

1 引言

蚁群算法 (ACA) 是由意大利学者 Dorigo 等^[1] 于 20 世纪 90 年代初通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径行为而提出的一种基于种群的启发式仿生类并行智能进化算法。从公开发表的论文看, 我国最先研究蚁群算法的是东北大学张纪会博士与徐心和教授^[2]。蚁群算法最早成功地应用于解决著名的旅行商问题 (TSP)。它采用了正反馈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^[3-16], 但搜索时间长、易陷入局部最优解是其明显的缺点。1998 年在布鲁塞尔召开了第一届蚁群优化国际研

讨会, 以后每两年召开一次, 历届会议的论文集均由著名的《Lecture Notes in Computer Science》(SCI Index) 结集出版。进入 21 世纪, 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了报道^[17, 18], 《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。如今, 在国内外许多学术期刊和会议上, 蚁群算法已成为一个备受关注的研究热点和前沿性课题。

尽管蚁群算法的严格理论基础尚未奠定, 国内

收稿日期: 2005-10-17; 修回日期: 2006-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60604009); 航空科学基金项目 (2006ZC51039); 北京航空航天大学“蓝天新秀”基金项目。

作者简介: 段海滨 (1976—), 男, 山东东营人, 博士, 从事智能计算、计算机控制与仿真等研究; 王道波 (1957—), 男, 南京人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、无人机控制与仿真等研究。

外的有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,由离散域范围内的研究逐渐扩展到连续域范围内的研究^[19],而且在蚁群算法的硬件实现这一新的研究方向上也取得了很多突破性进展,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。

蚁群算法的硬件实现是仿生硬件(BHW)领域的一个分支,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复杂群体行为的系统,首先需要构造具有单只蚂蚁功能的智能体. Isaacs等^[20]将遗传算法和蚁群算法结合,提出一种嵌入式硬件随机数据发生器设计的新思路,但他们只是做了离线仿真,并没有在硬件上给予实现.忻斌健等^[21]提出一种将归类结构方法与现场可编程门阵列(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. Scheuermann等^[22, 23]在深入分析将蚁群算法映射到FPGA难点的基础上,提出了一种基于群体-蚁群优化(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^[24, 25]提出了遗传算法与蚁群算法动态融合的软硬件划分算法(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能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。

蚁群算法的硬件实现是当今仿生硬件研究领域的一个新内容,也是一个研究难点.本文首先介绍了蚁群算法硬件的主要特点;然后讨论并阐述了基于FPGA的蚁群算法硬件实现方案和基于改进蚁群算法的软硬件划分问题;最后对其存在的主要问题和今后进一步的研究方向作了展望。

2 蚁群算法硬件的主要特点

同其他仿生硬件一样^[26-29],蚁群算法硬件的主要特点如下:

1) 硬件自组织.基于蚁群进化机理的蚁群算法硬件无需人员干预,可实现硬件的自组织、自动化设计,能通过硬件自身的在线进化过程来获得具备预期功能的电路和系统结构。

2) 硬件自适应.蚁群算法硬件通过电路结构和参数的在线自适应调整,可有效解决如因元件逐步

老化、环境改变而引起电路性能变化的问题,也可组成高速并行信息处理的自适应硬件系统。

3) 硬件自修复.目前电子系统的结构越来越复杂,系统集成化是必然趋势.若高度集成化的嵌入式电子系统(如片上系统(SoC))在运行中出现故障,传统的容错与系统功能恢复方法难以实现,而且这种板级部件冗余容错系统结构复杂,其重构算法繁琐,硬件体积较大,成本较高,容错能力与系统可靠性有限;而蚁群算法硬件可在很大程度上弥补上述不足。

4) 执行速度快.蚁群算法硬件自适应的结果是新的硬件结构自身,因此,与其他基于软件的自适应系统相比,蚁群算法硬件能得到显著的加速,而这一优点正是实时系统所需要的。

3 基于FPGA的蚁群算法硬件实现

3.1 将蚁群算法映射到FPGA的难点

蚁群算法的硬件实现必须考虑其目标结构的限制,这些限制主要侧重于数量、种类以及存储器、寄存器、I/O资源的分布等方面。

一种比较直接的实现方式是将信息素矩阵映射到FPGA上.对于静态分布矩阵上的每一个元素而言,该设计包含所有的信息处理和存储资源^[30].每只蚂蚁都占据矩阵中与其所作决策相对应的某一行,显然,这种实现方式会随着问题规模的增大而使其所需空间急剧增加.在用蚁群算法设计FPGA时,其技术难点主要体现在以下3个方面:

1) 所用的信息量和随机数需要用浮点表示,而这种表示并不是通过细粒度可编程逻辑实现的;

2) 启发式信息的挥发和聚集需要乘运算,然而,FPGA上可行的计算资源并不能非常有效地支持乘运算电路,目前仅有少量的FPGA有专门进行乘运算的模块,但这些模块的应用受到了其体积的限制;

3) 蚁群算法中必须根据状态转移概率进行状态选择,即

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{z \in S} \tau_{iz}^\alpha \eta_{iz}^\beta}, \quad \forall j \in S, \quad (1)$$

这样就必须计算上式中分子项中的乘积,因此就需要有 n 个电路.而信息素矩阵中的每一行均对应一个电路,因而大大增加了计算所需的空间复杂度和时间复杂度。

基于上述难点,这里引入了P-ACO算法。

3.2 P-ACO算法

3.2.1 P-ACO算法描述^[31]

P-ACO算法便于硬件实现的最明显之处在于

只将本次迭代中少量且最重要的信息传递到下次迭代,而基本蚁群算法是将完整的信息素矩阵传递到下次迭代。

用一个 $n \times k$ 维的群矩阵 $Q = [q_{ij}]$ 存放 P-ACO 算法中的群体,群矩阵 Q 包含着前 k 次迭代中的最优解,且其中每一列均包含一个解。当采用精英策略后, $j = 0$ 列包含着迄今为止所有迭代中所发现的最好解,而其余列则包含前 $k - 1$ 次迭代中所发现的相对最好解。

蚂蚁在某次迭代中完成解的构造之后, P-ACO 算法即更新群体,而非更新信息素矩阵。假如群 P 中已包含 k 个解,用当前迭代后的最优解替代 P 中最早的解,即在群体模式中保持 $|P| = k$ 。这意味着群矩阵 Q 中的某一列 $j \in \{1, 2, \dots, k - 1\}$ 将受到影响。若当前解优于最好解,列 $j = 0$ 将被新解替代。值得注意的是,群矩阵 Q 中的列 $j \in \{1, 2, \dots, k - 1\}$ 与 FIFO- 序列极为相似。因此,序列中的每一个解直接影响到 $k - 1$ 次后续迭代中蚂蚁的决策。

P-ACO 算法中,蚂蚁用于构造可行解的信息素矩阵 q_{ij} 由群矩阵决定,且有

$$q_{ij} = q_{init} + \Delta q_{ij}, \quad \forall i, j \in [0, n - 1]. \quad (2)$$

式中: q_{init} 为初始值; Δq_{ij} 表示解 i 在 P 中的数目,且有 $\Delta q_{ij} = \Delta q_{ij} + \Delta q_{ij}$, 或根据群矩阵 Q , 有 $\Delta q_{ij} = | \{ h : q_{ih} = j \} |$ 。

信息素更新可按照下述规则进行:

1) 进入到群体的解 i 对应一个正的更新

$$\Delta q_{ij} = \Delta q_{ij} + \Delta q_{ij}, \quad \forall i, j \in [0, n - 1]; \quad (3)$$

2) 离开群体的解 i 对应一个负的更新

$$\Delta q_{ij} = \Delta q_{ij} - \Delta q_{ij}, \quad \forall i, j \in [0, n - 1]. \quad (4)$$

3.2.2 P-ACO 算法影射到 FPGA 的优点

尽管蚁群算法需要用浮点来表示信息量,而在 P-ACO 算法中,信息素保存于群体之中, FPGA 的实现仅受限于管理一个 $n \times k$ 维矩阵的解群,而这一点实现起来并不困难。

对于基本蚁群算法中的每只蚂蚁而言,必须计算其状态转移概率。在序列机上,该运算需要乘、加运算的时间复杂度为 $O(n)$ 步,但当通过采用硬件并行方式,其所需乘、加运算的时间复杂度降为 $O(\log n)$ 步。

在 P-ACO 算法中,蚂蚁是根据 $k + 1$ 个可能的离散信息量进行决策的,一行中至少有 $n - k$ 个离散信息量是相同的,决策所需时间降为 $O(k)$,文献 [32] 所给出 k 的取值范围是 $1 \leq k \leq 8$ 。对于一个规模为 n 的问题,这意味着蚂蚁构造一个解需要 $O(nk)$ 个时间单位;相比较而言,在一个采用基本蚁群算法的顺序处理器中,每只蚂蚁需要 $O(n^2)$ 个时间单位才能构造一个解。在 FPGA 上 m 只并行蚂蚁产生 m 个解的时间为 $O(nk)$,而采用基本蚁群算法的顺序处理器所需要的时间为 $O(mn^2)$ 。

3.2.3 P-ACO 算法在 FPGA 上的实现

下面以单机总误时排序问题 (SMTTP)^[33] 为例,对 P-ACO 算法的硬件实现的总体结构和各实现模块进行阐述。

(1) 总体结构

基于 P-ACO 算法的 FPGA 设计结构如图 1 所示。由图可见,该结构主要包括 3 个基本模块,即群体模块、发生器模块和评价模块。为了清楚说明该设计结构,这里没有包括控制模块。群体模块包括群矩阵 $Q = [q_{ij}]_{n \times k}$, 该矩阵由 $j = 0$ 列的精英解和 $j \in \{1, 2, \dots, k - 1\}$ 列中的 FIFO- 序列构成。对于 SMTTP 而言,每一个 q_{ij} 对应一个计划内的工作数目。群体模块负责将群矩阵中第 i 行的 $q_{ih} (h \in \{0, 1, \dots, k - 1\})$ 传送到发生器模块,当迭代结束时,群体模块可从评价模块中接收最优解,然后将其加入到序列中。发生器模块可使 m 个解发生器同时工作,其中一个解发生器对应一只蚂蚁,所有的解均由解发生器传送到评价模块中的 m 个并行评价框内。 m 个解的评价结果将集中于比较框中,由此来确定当前迭代中的最好解。如果所得最好解优于当前最好解,则将当前最好解置换。

(2) 发生器模块

发生器模块包含 m 个相同的解发生器,每一个解发生器模拟一只蚂蚁,利用 P-ACO 算法机制构造解的行为。解发生器包含 3 个基本单元,即 S- 阵列、匹配缓冲区和选择器。

(3) 评价模块

评价模块用来评价由解发生器所产生解的质

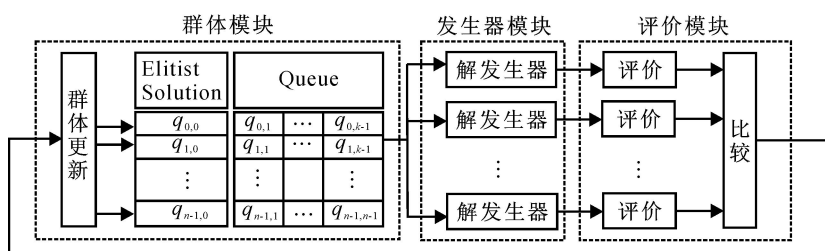


图 1 基于 P-ACO 算法的 FPGA 设计结构

量,该模块的核心即为比较模块.每一个需要用PACO算法解决的优化问题均需特定的评价模块,该评价模块包含特定问题的评价参数,并可计算来自解发生器的目标函数值.

(4) 群体模块

群体模块为群矩阵提供存储功能.群体模块从评价模块中接收到最好解的解发生器标志,而解传送单元负责将各自的最好解传送到存储单元,同时计算所传送解的写地址.

4 软硬件划分问题

软硬件划分问题是软硬件协同设计系统中的一个关键环节,其基本任务是在满足某些约束条件下,将系统功能行为最优地分配到一定的软硬件系统结构上.在许多工程应用中,常把划分作为软硬件综合的一部分.

Gupta等^[34]设计了一种软硬件划分算法用于自动化设计空间探索过程.此后,人们研究了各具特色的划分算法,其中应用效果较好的典型算法有启发式算法^[35],如爬山法^[36]、遗传算法^[37]、模拟退火算法^[38]、禁忌搜索算法^[39]等,这些算法通过定义启发信息指导搜索过程逐步向最优解收敛.另外,较有特色的GCLP/IBS算法^[40]通过定义软硬件极端节点、软硬件排斥节点和普通节点来体现进程节点在硬件和软件上执行时所表现出的性能特征,但该算法对目标系统结构的依赖性较大.文献^[41]提出了应用蚁群算法求解软硬件系统任务双路划分问题的方法,试图在满足面积约束的条件下优化时间性能.与前述方法相比,该方法在求解时间和寻优精度上取得了更好的结果.但单纯的蚁群算法在运行初期缺乏信息素,这限制了算法搜索效率的进一步提高.

文献^[42]将蚁群算法与遗传算法反复交叉,利用蚁群算法不断生成种群个体,进行同步时序电路的初始化,这种优化方法能尽可能多地初始化触发器,但每次种群进化都要经历几代,其运行效率较低.

针对面向嵌入式系统和SoC的软硬件双路划分问题,文献^[24, 25]通过对DCG3A的实验表明,与已有的基于遗传操作的软硬件划分算法和基于蚁群优化的软硬件划分算法相比,DCG3A的运行效率提高了约一倍,而且划分问题规模越大,改进效果越明显.其基本思想如下:

1) 首先利用遗传算法快速随机的群体性和全局搜索能力生成划分问题的初始解,并将其转化为初始信息素分布,然后利用蚁群算法的正反馈、高效收敛等优势寻求最优划分解;

2) 遗传算法迭代过程中统计子代群体的进化

率,在给定的遗传迭代次数范围内,如果在连续的若干次迭代中,子代群体的进化率都低于预先设定的最小进化率,则终止遗传算法过程,进入蚁群算法,并确保遗传算法和蚁群算法在最佳时机融合.

实际上,在嵌入式系统与SoC软硬件划分中,其他性能指标(如功耗)的约束与优化也是非常重要的,DCG3A同样适用于求解这类划分问题.另外,对于具有强实时性需求的嵌入式系统与SoC软硬件划分问题,需要多个嵌入式处理器协同工作,这时除了运用DCG3A进行划分求解外,还需要在划分中考虑嵌入式处理器之间的任务分配与负载平衡问题.

5 结论与展望

仿生硬件是并行计算环境下的产物,蚁群算法的硬件实现是仿生硬件研究领域新出现的一个子分支^[10, 19, 43].虽然蚁群算法的硬件实现技术已取得了明显进展,但还存在以下主要问题需要进一步解决:

1) 目前已开发的蚁群算法仿生硬件实现所能处理电路的规模和复杂程度远远比不上常规电路综合方法.对于规模较大、功能较复杂的电路,蚁群算法仿生硬件的进化时间显得太长或在要求的时间内很难找到解,这是制约其推广应用的主要问题,今后应加强对这一问题的工程化研究.

2) 对于蚁群算法仿生硬件产品的可靠性、可测试性、普适性以及鲁棒性问题也需要进一步研究.虽然蚁群算法硬件不需要对硬件的结构有很深入的了解,只需根据其外部特性便可用蚁群算法进行自动寻优.但是,还需要进一步对蚁群算法仿生硬件进行理论分析与建模,因为有些问题(如模式识别等)仅凭借对系统外部特性的不完备测试是很难保证蚁群算法仿生硬件系统的可靠性的.

3) 应研制开发可批量工程应用的蚁群算法仿生硬件芯片,以进一步推进蚁群算法硬件产品的商业化进程.

4) 研制蚁群算法的仿生硬件开发平台,建立蚁群算法仿生硬件产品的技术规范等,都是今后蚁群算法硬件实现方面不可忽视的研究内容.

参考文献(References)

- [1] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Distributed optimization by ant colonies [C]. Proc of the 1st European Conf on Artificial Life. Paris, 1991: 134-142.
- [2] 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.
(Zhang J H, Xu X H. A new evolutionary algorithm — Ant colony algorithm [J]. System Engineering Theory and Practice, 1999, 19(3): 84-87.)

- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans on SMC —Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [4] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans on Evol Compu, 1997, 1(1): 53-66.
- [5] Katja V, Ann N. Colonies of learning automata [J]. IEEE Trans on SMC —Part B, 2002, 32(6): 772-780.
- [6] Gambardella L M, Taillard É D, Dorigo M. Ant colonies for the quadratic assignment problem[J]. J of the Operational Research Society, 1999, 50(2): 167-176.
- [7] Dorigo M, Caro G D, Gambardella L M. Ant algorithms for discrete optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 137-172.
- [8] James M, Marcus R. Anti-pheromone as a tool for better exploration of search space[C]. Proc of the 3rd Int Workshop on Ant Algorithms. Brussels, 2002: 100-110.
- [9] Gambardella L M, Dorigo M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies[C]. Proc of the IEEE Conf on Evol Compu. Nagoya, 1996: 622-627.
- [10] 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. (Duan H B, Wang D B, Zhu J Q, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application[J]. Control and Decision, 2004, 19(12): 1321-1326.)
- [11] 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. (Duan H B, Wang D B. A novel improved ant colony algorithm with fast global optimization and its simulation[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 241-244.)
- [12] 段海滨, 王道波, 于秀芬, 等. 基于云模型理论的蚁群算法改进研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1): 115-119. (Duan H B, Wang D B, Yu X F. Improvement of ant colony algorithm based on cloud models theory[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1): 115-119.)
- [13] Duan H B, Wang D B, Zhu J Q. Novel method based on ant colony optimization algorithm for solving ill-conditioned linear systems of equations[J]. J of System Engineering and Electronics, 2005, 16(3): 606-610.
- [14] Duan H B, Wang D B, Zhu J Q. Parameter identification of LuGre friction model for flight simulation servo system based on ant colony algorithm [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 21(3): 179-183.
- [15] Duan H B, Wang D B, Yu X F. Research on the optimum configuration strategy for the adjustable parameters in ant colony algorithm [J]. J of Communication and Computer, 2005, 2(9): 32-35.
- [16] Duan H B, Wang D B, Yu X F. Novel approach to nonlinear PID controller parameter optimization using ant colony optimization algorithm [J]. J of Bionics Engineering, 2006, 3(2): 73-78.
- [17] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behavior [J]. Nature, 2000, 406(6): 39-42.
- [18] Michael J B K, Jean-Bernard B, Laurent K. Ant-like task and recruitment in cooperative robots[J]. Nature, 2000, 406(31): 992-995.
- [19] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (Duan H B. Ant colony algorithms: Theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [20] Isaacs J C, Watkins R K, Foo S Y. Evolving ant colony systems in hardware for random number generation[C]. Proc of the 2002 Congress on Evol Compu. Honolulu, 2002: 1450-1455.
- [21] 忻斌健, 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法的研究现状和应用及蚂蚁智能体的硬件实现[J]. 同济大学学报, 2002, 30(1): 82-87. (Xin B J, Wang L, Wu Q D. Research and applications of ant colony system algorithm and its hardware realization[J]. J of Tongji University, 2002, 30(1): 82-87.)
- [22] Scheuermann B, So K, Guntch M, et al. FPGA implementation of population-based ant colony optimization [J]. Applied Soft Computing, 2004, 4(4): 303-322.
- [23] Scheuermann B, Guntch M, Middendorf M, et al. Time-scattered heuristic for the hardware implementation of population-based ACO[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3172: 250-261.
- [24] Xiong Z H, Chen J H, Li S K. Hardware/software partitioning for platform-based design method [C]. Proc of the 2005 Asia and South Pacific Design Automation Conf. Shanghai, 2005, 2: 691-696.
- [25] 熊志辉, 李思昆, 陈吉华. 遗传算法与蚂蚁算法动态融合的软硬件划分[J]. 软件学报, 2005, 16(4): 503-512. (Xiong Z H, Li S K, Chen J H. Hardware/software partitioning based on dynamic combination of genetic algorithm and ant algorithm[J]. J of Software, 2005, 16(4): 503-512.)
- [26] Back T, Hammel U, Schwefel H P. Evolutionary computation: Comments on the history and current state[J]. IEEE Trans on Evol Compu, 1997, 1(1): 3-17.

- [27] Yao X, Higuichi T. Promises and challenges of evolvable hardware[J]. IEEE Trans on SMC — Part C, 1999, 29(1): 87-97.
- [28] Andy T, Eduardo S, Dario F, et al. POEtic tissue: An integrated architecture for bio-inspired hardware [C]. Proc of the 5th Int Conf on Evolvable Systems: From Biology to Hardware. Trondheim, 2003: 129-140.
- [29] Guntsch M, Middendorf M, Scheuermann B, et al. Population based ant colony optimization on FPGA [C]. Proc of the 2002 IEEE Int Conf on Field-programmable Technology. Hong Kong, 2002: 125-132.
- [30] Merkle D, Middendorf M. Fast ant colony optimization on runtime reconfigurable processor arrays[J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2002, 3(4): 345-361.
- [31] Guntsch M, Middendorf M. Applying population based ACO to dynamic optimization problems [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2463: 111-122.
- [32] Guntsch M, Middendorf M. A population based approach for ACO [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2279: 72-81.
- [33] Du J Z, Leung Joseph Y T. Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard [J]. Mathematics of Operations Research, 1990, 15(3): 483-485.
- [34] Gupta R K, Micheli G D. System-level synthesis using re-programmable components [C]. Proc of the European Conf on Design Automation. Hamburg, 1992: 2-7.
- [35] Kastner R. Synthesis techniques and optimizations for reconfigurable systems [D]. Los Angeles: University of California, 2002.
- [36] Ernst R, Henkel J, Benner T. Hardware-software co-synthesis for microcontrollers [J]. IEEE Design and Test of Computers, 1993, 10(4): 64-75.
- [37] Saha D, Mitra R S, Basu A. Hardware software partitioning using genetic algorithm [C]. Proc of the 10th Int Conf on VLSI Design. Hyderabad, 1997: 155-160.
- [38] Peng Z, Kuchcinski K. An algorithm for partitioning of application specific systems [C]. Proc of the European Conf on Design Automation. Paris, 1993: 316-321.
- [39] Else P, Peng Z, Kuchcinski K, et al. System level hardware/software partitioning based on simulated annealing and tabu search [J]. Design Automation of Embedded Systems, 1997, 2(1): 5-32.
- [40] Kalavade A, Lee E A. The extended partitioning problem: Hardware/software mapping, scheduling, and implementation-bin selection [J]. Design Automation of Embedded Systems, 1997, 2(1): 125-163.
- [41] Wang G, Gong W R, Kastner R. A new approach for task level computational resource bi-partitioning [C]. Proc of the Int Conf on Parallel and Distributed Computing and Systems. California, 2003: 434-444.
- [42] 李智, 许川佩, 莫玮, 等. 基于蚂蚁算法和遗传算法的同步时序电路初始化 [J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1276-1280.
(Li Z, Xu C P, Mo W, et al. Initialization for synchronous sequential circuits based on ant algorithm and genetic algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1276-1280.)
- [43] Mostafa A E B, Sait S M, Sarif B A B, et al. A modified ant colony algorithm for evolutionary design of digital circuits [C]. Proc of the 2003 Congress on Evol Compu. Canberra, 2003, 1: 708-715.

下 期 要 目

- 混杂系统的预测控制 邹媛媛, 等
- 视频序列中面向人的多目标跟踪算法 常发亮, 等
- 一种可抵御 RS 统计分析的图像信息隐藏方案 罗向阳, 等
- 在线信誉系统中的信任模型构建研究 朱艳春, 等
- 非线性交互粒子滤波算法 吕娜, 冯祖仁
- 具有时变时滞的离散切换系统基于观测器的 H 控制 宋政一, 赵军
- 基于模糊自适应 PID 的铸轧机结晶器液位控制系统 曹光明, 等