

曾泳泓 成礼智 周敏 著

数字信号处理 的并行算法

国防科技大学出版社

* 国家自然科学基金资助项目 *

数字信号处理的并行算法

Parallel Algorithms for Digital Signal Processing

曾泳泓 成礼智 周 敏 著

国防科技大学出版社

长沙

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理的并行算法/曾泳泓等著. —长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 6

ISBN 7-81024-517-1

I. 数… II. 曾… III. 数字信号-信号处理-并行算法
IV. TP307.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 23220 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

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

责任编辑:卢天颢 责任校对:黄八一

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:9.5 字数:238 千

1999 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—2000 册

*

定价:14.00 元

数字信号处理

内容简介

本书论述了利用大规模并行计算机或网络机群系统进行实时信号处理的并行算法和并行软件设计问题,内容包括:并行计算概论,离散傅里叶变换的并行算法,离散余弦变换与离散 W 变换的并行算法,小波分析的并行算法,数字图像处理的并行算法,基于结构的并行神经网络算法,素性测试与大整数分解。本书得到了国家自然科学基金项目资助,比较全面地体现了国内外的研究成果。

本书可供从事信号处理或并行计算研究和应用的科技和工程人员参考,也可作为相关专业硕士研究生或博士研究生的教材和参考书。

前 言

并行处理正在计算机领域乃至整个科技领域掀起一场革命。目前高性能计算机发展的一个重要方向是采用大规模并行处理(Massively Parallel Processing, MPP), 这种计算机可拥有成千上万个处理单元, 采用分布式存储和消息传递机制, 其峰值速度最高的已达到每秒 3.9 万亿次浮点运算。这种高性能计算机无疑是实时信号处理和其他许多大型问题处理的理想工具, 利用并行计算机进行实时信号处理成了当前国际上的研究热点。然而, 要用好并行计算机尤其是 MPP 机, 其难度远大于用好串行计算机, 一个关键的问题是要设计出合适的并行算法。事实上, 若算法不适合并行机, 实际的计算速度可能远远低于计算机的峰值速度, 这意味着大量的计算资源浪费了。尤其是对 MPP 机, 实际的计算速度可能只有峰值速度的五分之一, 甚至更低。已有的各种快速算法在并行机上不一定也是快速的, 必须重新设计并行算法。除了并行计算机外, 高速局域计算机网(LAN)或工作站机群也是实时信号处理的一个好的工具。随着具有每秒传输十亿个比特以上能力的高速 ATM 网络的形成, LAN 的这种作用将进一步加强。由于已有了标准化的消息传递界面(MPI, 1994 年制定了国际标准)及并行编程工具如 PVM(Parallel Virtual Machine), 设计计算机网络上的并行算法同设计 MPP 机的并行算法类似, 只是要进一步减少通信量, 增大并行粒度。

早在 20 世纪 80 年代末, 美国政府就提出了“高性能计算计划”(HPCP), 其中的一个主要问题是研究适合新型高性能计算机的并行算法。在美国, 高性能计算机已在信号处理领域得到了广泛

应用,如用CM 系统进行图像处理;利用网络进行公开密钥体制的研究等等。我国“八五”、“九五”期间都将“大规模科学与工程计算”列入了国家攀登计划项目,国家科技部正在制定的我国基础研究重大项目中,也将并行算法研究作为其重要内容。国内外近年来在信号处理的并行算法研究方面已经取得了很多成果,但有关这方面的专著尚不多,尤其是国内还没有这方面的专著出版。随着“银河系列”、“曙光系列”、“神州系列”以及各种进口大规模并行机的广泛使用,迫切需要出版一本这方面的著作,以指导应用高性能计算机的信号处理研究。

本书的重点是论述数字信号处理中具有普遍性的基本问题的并行算法。首先介绍了并行计算的一些基本问题和概念,如并行计算机、并行算法、并行计算模型、并行编程等,并综述了并行计算的现状和发展趋势。目的是使没有专门学习过并行计算的读者尽快掌握并行计算的基本概念和理论,但即使是对研究过并行计算的人员而言,仔细阅读这一部分仍然是很有帮助的。然后对数字信号处理中的基本问题:离散 Fourier 变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)、离散 W 变换、离散卷积的并行算法作了详细论述。小波分析的应用在信号处理中掀起了一场革命,本书对它的并行算法做了专门论述。上述问题是整个信号处理的基础,在信号处理的各个方面都有应用。数字图像处理在信号处理中应用最广泛,而且由于要求处理的数据量大、实时性强,它始终是信号处理关注的焦点,本书对它进行了专门论述。神经网络作为信号处理的一个较新的领域,它和并行处理的思想是一脉相承的,大规模并行处理是人的大脑的固有特点,因此本书特别论述了并行神经网络算法。计算机网络正在全球范围内掀起一场革命,网络上信息的安全性是目前关注的热点,公开密钥体制是网络信息加密的一种比较理想的方式。整数分解和素性测试作为公开密钥体制 RSA 和其他密码体系的理论基础,近年来已成为国际上的研究热点。毫无疑问,数论

在信号处理中的应用将越来越广。因此本书也论述了整数分解和素性测试的并行算法。

本书作者长期从事信号处理的快速算法和并行算法研究,承担了国家自然科学基金、国家“863”计划项目、国防“九五”预研等课题,书中包含许多作者的研究成果。信号处理的内容是非常广泛的,遗憾的是本书只能论述其中的几个关键问题。本书的第一至第四章由曾泳泓执笔,第五、六章由成礼智执笔,第七章由周敏执笔,最后由曾泳泓统稿。本书得到了国家自然科学基金项目“离散变换与小波分析的分布式并行算法”的资助。

本书的完成得到了蒋增荣教授的鼓励与帮助,部分内容得到了李晓梅教授的指导。博士研究生吴建平、张理论以及硕士研究生何丽君参与了部分内容的讨论以及程序调试工作。国防科技大学《并行与分布式处理》国家重点实验室、数学技术实验室、中国科学院软件所并行软件研究开发中心提供了实验条件。在此一并致谢。

本书可供从事信号处理或并行计算研究和应用的科技和工程人员参考,也可作为相关专业硕士研究生或博士研究生的教材和参考书。

Parallel Algorithms for Digital Signal Processing

Preface

Parallel processing is setting off a revolution in computer area and even the whole scientific and technical area. At present, massively parallel processing (MPP) is the direction of high performance computing. MPP system can own thousands upon thousands process units, adopt distributed memory and message passing architecture, and the top peak-speed of it had come up to 3.9 Tera FLOPS. It is undoubted that such a high performance computer is the ideal tool of real-time signal processing and many other intractable problems. In recent years, real-time signal processing with parallel computers has become the research wave in the world. However, the difficulties of using parallel computers, especially MPP computers, are far beyond that of sequential computers. A key problem is designing suitable parallel algorithms. In fact, the actual computing speed may far lower than the peak speed if algorithms are not suitable for parallel computers, this means that a large amount of computing resources would be wasted. In particular, the actual computing speed of a MPP computer may only one fifth of its peak speed, and even lower. Since known fast algorithms are not definitely fast on parallel computer, algorithms must be redesigned for parallelism. Besides parallel computer, high speed local area network (LAN) or workstation cluster is also a good tool for real-time signal processing. Owing to the standard Message Passing Interface (MPI) and parallel programming tools, such as

Parallel Virtual Machine (PVM), designing parallel algorithms on network is similar to that on MPP computer, only need further decreasing the amount of communication, increasing parallel granularity.

Early at the end of the 1980s, the government of the United States proposed the “High Performance Computing Project” (HPCP). One of the key problems in the project is looking for parallel algorithms suitable to up-to-date high performance computer. In America, high performance computer has found wide application in signal processing area, such as image processing using CM system, the research of public key system using networks, etc. In China, “Large Scale Scientific and Engineering Computing” has been high on the list of National Scale Project, and parallel algorithm research is also regarded as parts of the key basic research programs which was just made by the Ministry of Science and Technology. In recent years, the study of parallel algorithms in signal processing has yielded many good results, but there are few related books. Along with the wide application of YH series, SG series, SZ series and other imported parallel computers, it urgently needs a book to guiding the research of signal processing with high performance computer.

The major parts of this book are parallel algorithms of basic problems in digital signal processing. First, some basic problems and conceptions of parallel computing are introduced, such as parallel computer, parallel algorithm, parallel computing model, parallel programming, etc. Meanwhile, a summing-up about the state and the developing tendency of parallel computing is made. Its purpose is to enable the reader who does not specialize in parallel computing

to grasp the basic conceptions and the theories of parallel computing. It is also helpful for those who have known parallel computing very well. Next, a detailed description of parallel algorithms of basic problems in digital signal processing is given, including discrete Fourier transform (DFT), discrete cosine transform (DCT), discrete W transform (DWT), and discrete convolution. Since the application of wavelet analysis started a revolution in signal processing area, its parallel algorithm is then especially discussed. The foregoing problems are the fundament of the whole signal processing area, and can be applied to all branches of signal processing. Digital image processing has found widest application in signal processing area, and it is always a focus in the area since the demanded volume of processing data is very large. A special discussion of it is given. As a relatively new area in signal processing, the idea of neural network can be traced to the same origin of parallel processing. Large scale parallel processing is a intrinsic characteristic of person's cerebrum, so parallel algorithms of neural network are discussed especially. Computer network started a revolution in the world. The security of messages on networks is a focus today, and public key system is a relatively ideal way for network message enciphering. As the theoretical fundament of public key system RSA and other cryptosystems, factorization and primality has become a research wave in the world today. Undoubtedly, the application of number theory in signal processing will be wider and wider. So, parallel algorithms of factorization and primality are also discussed.

The author has engaged in the study of fast algorithms and parallel algorithms of signal processing for a long period of time, and has completed many research tasks granted by the national na-

ture science fundation, national 863 project, national defence project etc. Some reasearch achivements of the author are included in the book. Chapter one to four are written by Yong Hong Zeng, chapter five and six by Li Zhi Cheng, and chapter 7 by Min Zhou. This book is supported by the national nature science fundation.

This book will be of special interest to those who are engaged in the area of signal processing or parallel computing. It can also be used as a textbook or a reference book for Masteral or Doctoral graduate students.

We would like to express our acknowledgement to prof. Zeng Rong Jiang for his encouragement and assistant. Particular thanks are also due to prof. Xiao Mei Li who offered helpful advice on the part of the manuscript.

We are indebted to the people, including Doctoral graduate students J. P. Wu and L. L. Zhang, graduate student L. J. He for their participating in the discussion and program debugging for the book. And further thanks are due to State Key Laboratory of Parallel and Distributed Processing, Mathematics Technology Laboratory of National University of Defense Technology, and RDCPS of The Chinese Academy of Sciences, for providing kind conditions of experiment.

Y. H. Zeng
L. Z. Cheng
M. Zhou

目 录

第一章 并行计算概论

1.1 并行计算机	(1)
1.1.1 SIMD 计算机	(1)
1.1.2 MIMD 计算机	(2)
1.2 并行算法	(6)
1.2.1 并行算法的基本概念	(7)
1.2.2 并行算法的分类	(12)
1.2.3 并行算法研究的基本方法	(13)
1.3 并行计算模型	(15)
1.4 并行程序设计	(21)
1.4.1 并行程序设计模型	(21)
1.4.2 并行程序设计环境	(23)
1.4.3 自动并行化编译系统	(31)
1.5 国内外高性能计算研究现状与展望	(31)
1.5.1 国内外高性能计算研究现状	(31)
1.5.2 国内外高性能计算发展趋势	(35)

第二章 离散傅里叶变换的并行算法

2.1 离散傅里叶变换及其快速算法	(40)
2.1.1 一维 DFT 的快速算法	(41)

2.1.2 二维及多维 DFT 的快速算法	(45)
2.2 并行快速傅里叶变换	(52)
2.2.1 MIMD 并行算法	(52)
2.2.2 向量并行算法	(54)
2.3 二维及多维 DFT 的并行算法	(56)
2.3.1 并行行列算法	(57)
2.3.2 并行矩阵转置	(58)
2.3.3 通信和计算的重叠	(62)
2.4 并行多项式变换算法	(62)
2.5 一维 DFT 的分裂并行算法	(67)

第三章 离散余弦变换与离散 W 变换的并行算法

3.1 离散余弦变换及其快速算法	(73)
3.1.1 DCT 同 DFT 的关系	(75)
3.1.2 DCT 的直接分解算法	(76)
3.1.3 任意长度一维 DCT 的直接分解算法	(78)
3.1.4 二维及多维离散余弦变换	(85)
3.2 DCT 的并行算法	(87)
3.2.1 一维 DCT 的分裂并行算法	(87)
3.2.2 二维及多维 DCT 的并行算法	(90)
3.3 离散 W 变换及其快速算法	(96)
3.3.1 DWT 同 DFT 的关系	(97)
3.3.2 DWT 的直接分解算法	(98)
3.3.3 二维及多维 DWT	(105)
3.4 离散 W 变换的并行算法	(114)
3.4.1 一维 DWT 的并行算法	(114)
3.4.2 多维 DWT 的并行算法	(116)
3.5 离散 W 变换的卷积定理	(116)

第四章 小波分析的并行算法

4.1	小波变换导论	(124)
4.1.1	连续小波变换	(124)
4.1.2	二进小波变换	(125)
4.1.3	小波级数	(126)
4.1.4	多尺度分析和离散小波变换	(128)
4.1.5	高维多尺度分析和 Mallat 算法	(132)
4.1.6	小波包算法	(135)
4.2	小波函数值的计算	(135)
4.2.1	叠代方法	(136)
4.2.2	零上方法	(137)
4.2.3	快速小波函数的计算	(140)
4.3	小波变换的计算	(146)
4.3.1	有限长度离散小波的计算	(147)
4.3.2	离散小波变换计算的傅里叶变换方法	(151)
4.3.3	小波级数和连续小波变换的计算	(153)
4.4	小波包最优基选取的并行算法	(155)
4.4.1	小波包和最优基	(155)
4.4.2	并行小波包分解和最优基选取	(157)
4.5	离散小波变换的并行算法	(160)
4.5.1	一维离散小波变换的并行算法	(160)
4.5.2	二维离散小波变换的并行算法	(162)
4.5.3	逆离散小波变换的并行算法	(164)
4.5.4	算法的并行实现	(166)
4.6	注记和说明	(168)

第五章 数字图像处理中的并行算法

5.1 简介	(171)
5.2 直方图的并行算法	(172)
5.3 并行边缘检测技术及其相关算法	(177)
5.3.1 边缘检测算子	(179)
5.3.2 基于小波的多方向、多尺度并行边缘检测技术	(184)
5.3.3 Hough 变换及其并行算法	(191)
5.4 二维区域分割的一种并行算法	(197)
5.4.1 深度与方向的不连续性	(198)
5.4.2 扩散平滑	(199)
5.4.3 边界处理	(200)
5.4.4 曲率图像的计算	(201)
5.4.5 零阈值取法	(202)
5.4.6 输出数据与分类	(202)
5.4.7 并行算法的实现	(202)

第六章 基于代数结构的并行神经网络算法

6.1 人工神经网络	(206)
6.1.1 人工神经元与神经网络	(206)
6.1.2 连接模型	(208)
6.1.3 学习与回溯阶段	(209)
6.2 神经网络有监督学习算法	(209)
6.2.1 感知机与 Adaline 模型	(210)
6.2.2 前馈网络	(212)
6.2.3 递归神经网络	(215)
6.2.4 反向传播学习	(218)

6.2.5	其他有监督学习算法	(221)
6.3	神经网络中无监督的学习算法——Kohonen 图	(223)
6.3.1	Kohonen 图的构造	(223)
6.3.2	传播激活规则	(223)
6.3.3	训练 Kohonen 自组织特征图	(225)
6.4	用于无监督学习算法的模型化并行	(226)
6.4.1	Petri 网	(226)
6.4.2	并行实现方式	(227)
6.5	有监督学习的代数分治	(231)
6.5.1	并行矩阵乘积	(232)
6.5.2	处理器网络、结构与布局	(235)
6.5.3	反向传播并行算法	(237)
6.5.4	并行 Hopfield 网络算法	(239)
6.6	并行 Kohonen 图算法	(240)
6.6.1	一种简明的并行算法	(240)
6.6.2	负载平衡的改进	(241)

第七章 素性测试和大整数分解

7.1	引言	(244)
7.1.1	公钥密码体制	(244)
7.1.2	素性测试	(245)
7.1.3	大整数分解	(246)
7.2	概率素性测试法	(248)
7.2.1	并行费马素性测试法	(248)
7.2.2	并行 Solovay-Strassen 素性测试法	(251)
7.2.3	并行 Miller-Rabin 素性测试法	(253)
7.3	确定性素性测试法	(258)
7.3.1	Jacobi 和素性测试	(258)
7.3.2	椭圆曲线素性测试法	(261)

7.4	大整数分解的分解基算法	(262)
7.4.1	Kraitichik 格式	(262)
7.4.2	并行分解基算法	(263)
7.4.3	分解基算法的启发式时间复杂性估计	(266)
7.5	二次筛因子分解法及其并行处理	(270)
7.5.1	单个多项式的二次筛法	(270)
7.5.2	多个多项式的二次筛法	(271)
7.6	数域筛法及其并行处理	(276)
7.7	椭圆曲线因子分解法	(280)