

并行与分布计算技术丛书

# 并行编译方法

Methods of Parallel  
Compilation

沈志幸 胡子昂 廖耀科 吴海平 赵克佳 卢幸彤 著

清华大学出版社

并行与分布计算技术丛书

# 并行编译方法

## Methods of Parallel Compilation

沈志宇 胡子昂 廖湘科 著  
吴海平 赵克佳 卢宇彤

国防工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

并行编译方法/沈志宇等著. - 北京:国防工业出版社,  
2000.7

(并行与分布计算技术丛书)

ISBN 7-118-02209-8

I. 并… II. 沈… III. 并行程序:编译程序-程序设计  
IV. TP314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 68365 号

JS484/20

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$  299 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:26.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主任委员    | 怀国模 |     |     |     |
| 主任委员      | 黄 宁 |     |     |     |
| 副主任委员     | 殷鹤龄 | 高景德 | 陈芳允 | 曾 铎 |
| 秘书长       | 崔士义 |     |     |     |
| 委 员       | 于景元 | 王小谟 | 尤子平 | 冯允成 |
| (以姓氏笔划为序) | 刘 仁 | 朱森元 | 朵英贤 | 宋家树 |
|           | 杨星豪 | 吴有生 | 何庆芝 | 何国伟 |
|           | 何新贵 | 张立同 | 张汝果 | 张均武 |
|           | 张涵信 | 陈火旺 | 范学虹 | 柯有安 |
|           | 侯正明 | 莫梧生 | 崔尔杰 |     |

## 并行与分布计算技术丛书编委会

主 编 卢锡城

副 主 编 周兴铭 汪成为 李国杰

主 审 陈火旺

编委委员 施伯乐 康继昌 尤晋元 康立山

沈隆均 李晓梅 朱传琪 王志英

杨学军 杨晓东 李思昆 王怀民

常务秘书 肖 政



# 总 序

并行与分布计算技术是实现高性能计算的重要技术途径。高性能计算机技术是现代科学研究、工程技术开发和大规模数据处理的关键支撑技术。没有高性能计算机,大量复杂问题的计算和事务处理就无法在合理的时间内完成。利用高性能计算机还可以解决一些仅靠理论及实验方法无法解决的问题,分析处理靠传统技术无法应付的海量数据,例如核爆炸模拟、宇宙的形成及演变过程研究、中长期天气预报、石油地质勘探、数字地球和大规模事务处理等。人类对高性能计算能力的需求永无止境。计算速度、存储容量、通信带宽是衡量高性能计算能力的重要技术指标。一些推动人类文明和社会信息化的重大挑战性问题需要百万亿次每秒、千万亿次每秒以上的计算速度,需要万亿字节以上的存储容量和万亿位每秒以上的通信能力。人们已经认识到,高性能计算与网络通信技术是战略技术,是科技创新体系的基础技术,是反映一个国家综合实力的重要标志之一。

由于种种因素的制约及使用计算机方式的改变,在单台计算机系统的性能与功能难以满足应用需求的情况下,由多个计算节点经专门设计的互联网络紧密耦合而构成的大规模并行处理计算机系统,以及由多个自主的高性能计算节点经计算机网络连接组成的分布处理环境,将成为高性能计算机领域的两大重要研究方向。并行计算和分布计算是既有区别又联系密切的两个概念,前者重在发掘计算过程中的并行性,后者则重在有效组织管理各类异构资源,挖掘功能上的并发性。随着基于先进计算机网络的分布并行计算概念的发展,并行计算与分布计算在很多应用领域正面临共同的追求目标和技术挑战,如高效、实用的计算模型、计算方法、并行机制等。

90年代以来,随着高性能计算和网络计算技术的普及,并行与分布计算技术正渗透到现代社会的各个领域,用户通过高性能网络使用各类计算资源提供的服务已成为信息化社会中计算机应用的一种重要形式。事实上,各类基于并行与分布计算的应用系统正在工业、交通、金融、科研、政府、国防等部门支撑着现代社会的高效运行。

20多年来,我国科技人员依靠自己的力量,勇于开拓,奋勇拼搏,研制成功了多种型号序列的高性能计算机系统。国防科学技术大学计算机学院是我国研制高性能计算机系统的重要基地,多种巨型计算机的研制成功及推广应用,打破了国外对我国的技术封锁,缩短了我国同发达国家技术水平上的差距,为推动我国高性能计算机及并行与分布计算技术的发展作出了重要贡献。

为促进并行与分布计算技术领域的研究,国防工业出版社组织国防科技大学计算机学院有关专家、教授撰著了本套丛书。本丛书以并行与分布计算机系统组成为纲,结合作者多年科研与工程实践以及当前研究的热点问题,涵盖了计算机系统结构、计算机网络、系统软件、应用软件、计算方法等多方面内容。本丛书由以下9本专著组成:《并行计算机体系结构技术》论述并行计算机研究和设计的理论及工程问题;《先进计算机网络技术》论

述高性能网络计算的各种关键技术;《并行操作系统原理与技术》论述并行操作系统的机制、基本原理和主要实现技术;《并行编译方法》论述并行编译系统理论、编译器的设计方法;《分布计算——网络化软件新技术》论述分布计算技术的基本概念和关键技术;《分布式数据库技术》论述统一逻辑分布式数据库技术;《数字系统并行 CAD 技术》论述数字系统并行 CAD 的理论和设计;《可扩展并行算法的设计与分析》论述可扩展并行算法的设计与分析的理论和设计方法;《并行与分布式可视化技术与应用》论述并行与分布式可视化的各种技术及其应用。本丛书既介绍了当前国际上该领域的最新技术发展,又汇集了作者多年的研究成果和工程经验。丛书注重可读性,适合从事该领域工作和学习的科技人员、高等院校高年级学生及研究生作为工作和学习的参考书。

本丛书被列入“九五国家重点图书选题规划”,并获得国防科技出版基金的资助。愿本丛书的出版能为并行与分布计算技术研究园地增添一朵花絮,为以后的研究工作提供有价值的参考。因时间和精力所限,书中不足之处,恳请读者指正。

并行与分布计算技术丛书编委会



# 前 言

本书论述了并行编译系统设计和实现的方法。并行编译系统是并行计算机的系统软件中十分重要的一部分,是充分发挥并行计算机性能、实现超级计算的关键。二十余年来,并行编译系统的理论和技术有了很大发展,并行编译系统在各种并行计算机上得到了成功的应用,国防科技大学计算机学院在银河系列巨型机研制过程中也相继研制成功了向量编译系统、共享存储器并行机并行编译系统和分布存储器并行机并行编译系统,这些系统都具有当时国内领先水平和国际先进水平。

本书既介绍了近年来在并行编译技术方面的研究和实践的成果,也介绍了国内外在这一领域的研究进展。第1章概括介绍并行编译系统设计和实现的理论与技术;第2章简要介绍并行程序设计语言基础,以便于后续各章讨论并行编译技术;第3章讨论依赖关系分析技术,包括依赖关系的概念、精确分析算法和近似分析算法;第4章论述程序并行化技术,包括向量化技术和并行化技术;第5章研究并行编译技术,特别是分布存储器并行机的并行编译技术;第6章探讨并行运行库技术,重点也是分布存储器并行机的并行运行库技术。

本书注重系统性,内容包括并行编译技术的主要方面;注重理论性,力求介绍清楚并行编译技术的理论和算法;注重实践性,主要介绍已经在并行编译系统中成功应用的技术。本书的读者对象是并行计算机的研制和应用人员,特别是并行编译系统、并行程序设计语言和并行程序设计理论和技术的研究人员与相应专业的研究生。本书可以作为并行编译理论和技术方面的科技参考书或教材。读者应当具有线性代数、图论、编译原理、并行程序设计语言和并行计算机等方面的基本知识。

我们谨对中国工程院院士、国防科技大学陈火旺教授表示衷心的感谢,我们是在他的指教下踏入并行编译技术研究这一领域的,多年来一直得到他的关心和指导。我们还要对吴健安、陈立杰、朱传琪教授等表示感谢,对国防科技大学计算机学院的专家和领导,以及软件工程教研室的同行们表示感谢。

本书第1章由沈志宇撰写,第2章由吴海平、胡子昂、卢宇彤撰写,第3、4章由沈志宇、赵克佳撰写,第5章由吴海平、赵克佳、沈志宇和胡子昂撰写,第6章由廖湘科、卢宇彤撰写。何连跃和吴志滨同志也参与了本书的编写工作,全书由沈志宇统稿。我们希望本书能为促进我国并行计算机的研制与应用水平的提高,特别是并行编译技术研究的发展贡献一份力量。但由于学识和水平有限,书中难免有不妥之处,诚恳地欢迎读者批评指正。

## 内 容 简 介

本书论述并行编译系统设计和实现的方法。概述并行处理与并行编译系统的功能、结构,简要介绍并行程序设计语言,重点论述并行编译方法,包括依赖关系分析、程序并行化、并行编译和并行运行库技术。

本书的读者对象是并行计算机的研制和应用人员,特别是研究并行编译系统和并行程序设计语言的科技人员和相应专业的研究生。

This book discusses the methods for designing and implementing parallel compiler. The function and structure of parallel processing and parallel compiler are introduced. Parallel programming languages are presented in brief. The emphasis is on parallel compilation methods, including dependence analysis, program parallelization, parallel compiling and parallel run-time library.

This book is suitable for the researchers and users of parallel computers, especially researchers and graduate students in the filed of parallel compiler and parallel programming language.

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 并行处理与并行编译系统 .....        | 1  |
| 1.1 并行处理 .....               | 1  |
| 1.1.1 并行体系结构 .....           | 1  |
| 1.1.2 并行软件系统 .....           | 3  |
| 1.1.3 并行程序设计 .....           | 4  |
| 1.2 并行编译系统 .....             | 5  |
| 1.2.1 功能 .....               | 6  |
| 1.2.2 结构 .....               | 7  |
| 1.2.3 编译方法 .....             | 8  |
| 1.2.4 发展趋势 .....             | 10 |
| 第2章 并行程序设计语言 .....           | 13 |
| 2.1 向量语言 .....               | 14 |
| 2.1.1 向量数据结构 .....           | 14 |
| 2.1.2 向量操作 .....             | 15 |
| 2.1.3 向量化指导命令 .....          | 17 |
| 2.2 共享存储器并行机并行语言 .....       | 18 |
| 2.2.1 多任务机制 .....            | 18 |
| 2.2.2 PCF Fortran 并行语言 ..... | 20 |
| 2.3 分布存储器并行机数据并行语言 .....     | 21 |
| 2.3.1 并行数据结构 .....           | 22 |
| 2.3.2 并行任务 .....             | 24 |
| 2.3.3 同步通信 .....             | 25 |
| 2.4 消息传递并行程序设计机制 .....       | 25 |
| 2.4.1 MPI 支持的并行模式 .....      | 26 |
| 2.4.2 基本函数 .....             | 27 |
| 2.4.3 通信函数 .....             | 27 |
| 2.4.4 组和通信器的管理 .....         | 28 |
| 2.4.5 通用数据类型 .....           | 29 |
| 2.4.6 应用程序拓扑 .....           | 30 |
| 第3章 依赖关系分析 .....             | 31 |
| 3.1 依赖关系概念 .....             | 31 |
| 3.1.1 基础知识 .....             | 31 |
| 3.1.2 控制依赖关系 .....           | 34 |
| 3.1.3 数据依赖关系 .....           | 38 |
| 3.2 数据依赖关系分析 .....           | 42 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 3.2.1 依赖关系问题 .....         | 42        |
| 3.2.2 依赖关系测试 .....         | 44        |
| 3.3 单层循环中的依赖关系测试 .....     | 46        |
| 3.3.1 精确测试算法 .....         | 47        |
| 3.3.2 近似测试算法 .....         | 52        |
| 3.4 嵌套循环中的依赖关系测试 .....     | 56        |
| 3.4.1 嵌套循环中的依赖关系 .....     | 57        |
| 3.4.2 广义 gcd 测试 .....      | 60        |
| 3.4.3 边界法测试算法 .....        | 63        |
| 3.4.4 消去法测试算法 .....        | 70        |
| <b>第 4 章 程序并行化技术</b> ..... | <b>75</b> |
| 4.1 程序向量化和并行化 .....        | 76        |
| 4.1.1 向量化 .....            | 77        |
| 4.1.2 并行化 .....            | 79        |
| 4.2 简单变换 .....             | 81        |
| 4.2.1 归约变量替换 .....         | 82        |
| 4.2.2 递归下标消除 .....         | 82        |
| 4.2.3 标量和数组扩张 .....        | 82        |
| 4.2.4 标量和数组私有化 .....       | 83        |
| 4.2.5 语句重排 .....           | 85        |
| 4.2.6 语句分裂和循环分裂 .....      | 85        |
| 4.2.7 循环展开 .....           | 86        |
| 4.2.8 循环联合 .....           | 87        |
| 4.2.9 模式匹配 .....           | 88        |
| 4.2.10 循环多版本 .....         | 88        |
| 4.2.11 非循环代码并行化 .....      | 88        |
| 4.3 循环分布 .....             | 89        |
| 4.4 循环合并 .....             | 91        |
| 4.5 循环分段和循环分块 .....        | 92        |
| 4.6 循环散布 .....             | 94        |
| 4.7 循环结合 .....             | 95        |
| 4.8 循环置换 .....             | 97        |
| 4.8.1 循环置换方法 .....         | 98        |
| 4.8.2 用循环置换实现并行化 .....     | 103       |
| 4.8.3 循环上下界计算 .....        | 104       |
| 4.9 幺模变换 .....             | 105       |
| 4.9.1 初等变换 .....           | 106       |
| 4.9.2 内层循环并行化 .....        | 109       |
| 4.9.3 外层循环并行化 .....        | 113       |
| 4.9.4 循环上下界计算 .....        | 115       |
| 4.10 余数变换 .....            | 116       |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 4.10.1 单层循环变换 .....        | 117        |
| 4.10.2 GCD 变换 .....        | 121        |
| 4.10.3 梯阵变换 .....          | 124        |
| 4.10.4 圈收缩 .....           | 127        |
| <b>第 5 章 并行编译技术 .....</b>  | <b>130</b> |
| 5.1 向量语言编译技术 .....         | 130        |
| 5.1.1 向量语法处理 .....         | 130        |
| 5.1.2 向量结构优化 .....         | 131        |
| 5.2 共享存储器并行机并行编译技术 .....   | 132        |
| 5.2.1 预编译 .....            | 132        |
| 5.2.2 可再入的目标代码 .....       | 133        |
| 5.3 处理机分配 .....            | 135        |
| 5.3.1 处理机分配问题 .....        | 135        |
| 5.3.2 处理机分配算法 .....        | 136        |
| 5.4 分布数据的地址计算 .....        | 139        |
| 5.4.1 分布数据的地址计算问题 .....    | 140        |
| 5.4.2 分布数组的地址计算 .....      | 140        |
| 5.4.3 分布数组的映射函数 .....      | 145        |
| 5.5 并行循环迭代分布 .....         | 146        |
| 5.5.1 并行循环迭代分布问题 .....     | 146        |
| 5.5.2 并行循环迭代分布算法 .....     | 147        |
| 5.6 通信优化 .....             | 153        |
| 5.6.1 通信优化问题 .....         | 153        |
| 5.6.2 减少通信 .....           | 154        |
| 5.6.3 隐藏通信 .....           | 156        |
| 5.6.4 通信并行化 .....          | 157        |
| <b>第 6 章 并行运行库技术 .....</b> | <b>158</b> |
| 6.1 并行任务控制机制 .....         | 158        |
| 6.1.1 任务调度 .....           | 159        |
| 6.1.2 负载平衡 .....           | 161        |
| 6.2 同步互斥机制 .....           | 163        |
| 6.2.1 锁与临界区 .....          | 163        |
| 6.2.2 事件与障碍 .....          | 167        |
| 6.3 通信机制 .....             | 168        |
| 6.3.1 共享变量通信 .....         | 168        |
| 6.3.2 点-点通信 .....          | 170        |
| 6.3.3 全局通信 .....           | 173        |
| 6.4 共享存储器并行机并行运行库 .....    | 184        |
| 6.4.1 宏任务并行机制 .....        | 184        |
| 6.4.2 编译器和操作系统的支持 .....    | 185        |
| 6.4.3 宏任务库的实现 .....        | 185        |
| 6.5 分布存储器并行机并行运行库 .....    | 187        |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 6.5.1 | MPICH 总体结构 .....          | 188 |
| 6.5.2 | MPICH 关键数据对象分析 .....      | 188 |
| 6.5.3 | 抽象设备接口 .....              | 189 |
| 6.5.4 | 通道接口 .....                | 191 |
| 6.5.5 | 分布共享存储器并行机上的 MPI 实现 ..... | 193 |
| 参考文献  | .....                     | 199 |

# CONTENTS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1 Parallel Processing and Parallel Compiler</b>         | 1  |
| 1.1 Parallel Processing                                            | 1  |
| 1.1.1 Parallel Architecture                                        | 1  |
| 1.1.2 Parallel Software                                            | 3  |
| 1.1.3 Parallel Programming                                         | 4  |
| 1.2 Parallel Compiler                                              | 5  |
| 1.2.1 Function                                                     | 6  |
| 1.2.2 Structure                                                    | 7  |
| 1.2.3 Compilation Methods                                          | 8  |
| 1.2.4 Tendency                                                     | 10 |
| <b>Chapter 2 Parallel Programming Language</b>                     | 13 |
| 2.1 Vector Language                                                | 14 |
| 2.1.1 Vector Data Structure                                        | 14 |
| 2.1.2 Vector Operation                                             | 15 |
| 2.1.3 Vectorizing Direction Command                                | 17 |
| 2.2 Parallel Language for Shared Memory Parallel Machine           | 18 |
| 2.2.1 Multitasking                                                 | 18 |
| 2.2.2 PCF Fortran                                                  | 20 |
| 2.3 Data Parallel Language for Distributed Memory Parallel Machine | 21 |
| 2.3.1 Parallel Data Structure                                      | 22 |
| 2.3.2 Parallel Task                                                | 24 |
| 2.3.3 Synchronization and Communication                            | 25 |
| 2.4 Message Passing Parallel Programming                           | 25 |
| 2.4.1 Parallel Programming Model of MPI                            | 26 |
| 2.4.2 Basic Function                                               | 27 |
| 2.4.3 Communication Function                                       | 27 |
| 2.4.4 Management of Group and Communicator                         | 28 |
| 2.4.5 General Data Type                                            | 29 |
| 2.4.6 Application Program Topology                                 | 30 |
| <b>Chapter 3 Dependence Analysis</b>                               | 31 |
| 3.1 Dependence Concept                                             | 31 |
| 3.1.1 Elementary Knowledge                                         | 31 |
| 3.1.2 Control Dependence                                           | 34 |
| 3.1.3 Data Dependence                                              | 38 |
| 3.2 Data Dependence Analysis                                       | 42 |



|                  |                                           |           |
|------------------|-------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1            | Dependence Problem                        | 42        |
| 3.2.2            | Dependence Test                           | 44        |
| 3.3              | Dependence Test in Single Loop            | 46        |
| 3.3.1            | Exact Algorithm                           | 47        |
| 3.3.2            | Approximate Algorithm                     | 52        |
| 3.4              | Dependence Test in Nested Loop            | 56        |
| 3.4.1            | Dependence in Nested Loop                 | 57        |
| 3.4.2            | Generalized gcd Test                      | 60        |
| 3.4.3            | Bounds Test Algorithm                     | 63        |
| 3.4.4            | Elimination Test Algorithm                | 70        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Program Parallelization</b>            | <b>75</b> |
| 4.1              | Program Vectorization and Parallelization | 76        |
| 4.1.1            | Vectorization                             | 77        |
| 4.1.2            | Parallelization                           | 79        |
| 4.2              | Simple Transformation                     | 81        |
| 4.2.1            | Induction Variable Substitution           | 82        |
| 4.2.2            | Recurrence Index Elimination              | 82        |
| 4.2.3            | Scalar and Array Expansion                | 82        |
| 4.2.4            | Scalar and Array Privatization            | 83        |
| 4.2.5            | Statement Reordering                      | 85        |
| 4.2.6            | Statement and Loop Splitting              | 85        |
| 4.2.7            | Loop Unrolling                            | 86        |
| 4.2.8            | Loop Collapsing                           | 87        |
| 4.2.9            | Pattern Matching                          | 88        |
| 4.2.10           | Multi-version Loops                       | 88        |
| 4.2.11           | Statement Block Parallelization           | 88        |
| 4.3              | Loop Distribution                         | 89        |
| 4.4              | Loop Fusion                               | 91        |
| 4.5              | Strip Mining and Loop Tiling              | 92        |
| 4.6              | Loop Spreading                            | 94        |
| 4.7              | Loop Coalescing                           | 95        |
| 4.8              | Loop Permutation                          | 97        |
| 4.8.1            | Loop Permutation Method                   | 98        |
| 4.8.2            | Parallelization by Permutation            | 103       |
| 4.8.3            | Computation of Loop Limits                | 104       |
| 4.9              | Unimodular Transformation                 | 105       |
| 4.9.1            | Elementary Transformation                 | 106       |
| 4.9.2            | Inner Loop Parallelization                | 109       |
| 4.9.3            | Outer Loop Parallelization                | 113       |
| 4.9.4            | Computation of Loop Limits                | 115       |
| 4.10             | Remainder Transformation                  | 116       |

|                  |                                                                 |            |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 4.10.1           | Single Loop Transformation .....                                | 117        |
| 4.10.2           | GCD Transformation .....                                        | 121        |
| 4.10.3           | Echelon Transformation .....                                    | 124        |
| 4.10.4           | Cycle Shrinking .....                                           | 127        |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Parallel Compilation Techniques .....</b>                    | <b>130</b> |
| 5.1              | Vector Language Compilation Techniques .....                    | 130        |
| 5.1.1            | Vector Syntax Analysis .....                                    | 130        |
| 5.1.2            | Vector Optimization .....                                       | 131        |
| 5.2              | Parallel Compilation Techniques for Shared Memory Machine ..... | 132        |
| 5.2.1            | Pre-compiling .....                                             | 132        |
| 5.2.2            | Reenterable Code .....                                          | 133        |
| 5.3              | Processor Assignment .....                                      | 135        |
| 5.3.1            | Processor Assignment Problem .....                              | 135        |
| 5.3.2            | Processor Assignment Algorithm .....                            | 136        |
| 5.4              | Address Calculation of Distributed Data .....                   | 139        |
| 5.4.1            | Address Calculation Problem of Distributed Data .....           | 140        |
| 5.4.2            | Address Calculation of Distributed Array .....                  | 140        |
| 5.4.3            | Mapping Function of Distributed Array .....                     | 145        |
| 5.5              | Parallel Loop Distribution .....                                | 146        |
| 5.5.1            | Parallel Loop Distribution Problem .....                        | 146        |
| 5.5.2            | Parallel Loop Distribution Algorithm .....                      | 147        |
| 5.6              | Communication Opetimization .....                               | 153        |
| 5.6.1            | Communication Opetimization Problem .....                       | 153        |
| 5.6.2            | Communication Reducing .....                                    | 154        |
| 5.6.3            | Communication Hiding .....                                      | 156        |
| 5.6.4            | Communication Parallelization .....                             | 157        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>Parallel Run-time Library .....</b>                          | <b>158</b> |
| 6.1              | Parallel Task Control Mechanism .....                           | 158        |
| 6.1.1            | Task Scheduling .....                                           | 159        |
| 6.1.2            | Load Banlancing .....                                           | 161        |
| 6.2              | Synchronization and Mutual-exclusion Mechanism .....            | 163        |
| 6.2.1            | Lock and Critical Section .....                                 | 163        |
| 6.2.2            | Event and Barrier .....                                         | 167        |
| 6.3              | Communication Mechanism .....                                   | 168        |
| 6.3.1            | Shared Variable Communication .....                             | 168        |
| 6.3.2            | Point-to-point Communication .....                              | 170        |
| 6.3.3            | Collective Communication .....                                  | 173        |
| 6.4              | Parallel Run-time Library for Shared Memory Machine .....       | 184        |
| 6.4.1            | Macrotasking Parallel Mechanism .....                           | 184        |
| 6.4.2            | Support of Compiler and Operating System .....                  | 185        |
| 6.4.3            | Implimenting of Macrotasking Library .....                      | 185        |
| 6.5              | Parallel Run-time Library for Distributed Memory Machine .....  | 187        |