

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
研究期間：2005～2008  
課題番号：17300005  
研究課題名(和文) 構成的手法による構造化並列プログラミングとその支援環境  
研究課題名(英文) A Constructive Approach to Structured Parallel Programming  
and its Environments  
研究代表者  
胡 振江 (HU ZHENJIANG)  
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授  
研究者番号：50292769

研究成果の概要：

本研究は、「構造化並列プログラムの系統的開発手法」、「構造化並列プログラムの最適化手法」、そして「構造化並列プログラムの応用」を中心に、理論と実践の両面で研究を進めてきた。理論面では、構成的アルゴリズム論に基づいて、スケルトン並列プログラミング手法をより一般的に定式化するとともに、並列計算におけるデータの分散・プロセッサ間通信・同期制御等を構造化させ、効率の良い並列プログラムを系統的に開発するための構造化並列プログラミング手法を提案した。また、理論面での検討を加えると同時に、構造化並列プログラミングを支援するソフトウェア開発環境 SkeTo を設計し実現した。そして、数値計算等の実用例を用いてその有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	2,800,000	0	2,800,000
2006 年度	3,000,000	0	3,000,000
2007 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	12,000,000	1,860,000	13,860,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：情報システム、ソフトウェア学、アルゴリズム、ソフトウェア開発効率化・安定化、超高速情報処理

## 1. 研究開始当初の背景

近年、PC ハードウェアの高性能化と低価格化が進み、並列計算機が身近なものとなった。並列計算機に対する知識をあまり持たない者でさえも、様々な並列計算機を利用して並列計算を行いたい人が増え続けている。一方、そのソフトウェアとしての並列プログラムは、プロセッサ間通信、同期、資源の分配な

ど逐次プログラムと比較して考慮すべき点が多く、効率的なプログラムの作成は難しい。また、ある並列計算機環境で開発された並列プログラムは、その環境では効率が良かったにも関わらず、別の環境に移ると実行できなかつたり、効率が急激に落ちたりして、移植性が悪い。

この問題を解決するために有効な方法として期待されているのが、80 年代後半に

Edingburge 大学の Murray Cole 氏によって提案された、スケルトン並列プログラミング (skeleton parallel programming) 手法である。スケルトン並列プログラミングでは、「並列スケルトン」と呼ばれる、並列計算においてよく利用される処理を抽象化したものを組み合わせることで並列プログラミングを行う。この並列スケルトンは様々な並列計算機の上で効率良く実現されるため、移植性に優れ、性能の良い並列プログラムを簡単に作成することが期待でき、また、スケルトン並列プログラムの実行時間などを見積ることも可能になる。現在、世界で 30 チーム以上の研究者が、スケルトン並列プログラミングに関して理論から応用まで幅広く積極的に研究に取り組んでいる。

しかし、これまでのスケルトン並列プログラミング手法に関する研究のほとんどは、ケースバイケースでアドホックである。スケルトンプログラミング手法は実用的な並列計算ソフトウェアの開発に利用されているとはいえない。

## 2. 研究の目的

本研究は、構成的アルゴリズム論に基づいて、スケルトン並列プログラミング手法をより一般的に定式化するとともに、並列計算におけるデータの分散・プロセッサ間通信・同期制御等を構造化させ、効率の良い並列プログラムを系統的に開発するための構造化並列プログラミング手法を提案する。また、理論面での検討を加えると同時に、構造化並列プログラミングを支援するソフトウェア開発環境を設計し実現する。そして、実用例を用いてその有効性を確認していく。

## 3. 研究の方法

本研究は、構成的アルゴリズム論に基づいて、特定の並列計算機環境に依存しない、効率的な並列プログラムを開発するための実用的ソフトウェア環境を構築することを目指して、次の三つの具体的な項目で研究を進めてきた。

### (1) 構成的アルゴリズム論に基づく並列計算の構造化

計算の並列性は大きく分けてデータ並列性 (data parallelism) と制御並列性 (control parallelism) があり、並列性を記述するためにプロセッサ間通信や同期などを考慮しなければならない。データ並列性、制御並列性、そしてプロセッサ間通信の構造化によって、並列プログラムの設計・検証・最適化・実装を容易にする。

### (2) 構造化並列プログラムの設計・最適化

構造化並列プログラムにおいて、データ分散、プロセッサ間通信・同期、そして資源分配などの記述に制限があるので、多くの人々に使ってもらえるような、構造化プログラムの系統的設計法を与える。また、一般の並列プログラムと比較して構造化によるオーバーヘッドがあるので、構造化プログラムに特有の最適化方法を開発する。

### (3) 構造化並列プログラミング環境の実現と性能評価

構造化プログラミングの有効性を示すには、実際の重要な問題を対象にしなければ説得力がないので、数値計算や知識発見のような現実問題に対する並列プログラムの開発を対象にしたい。また、開発に要する労力、開発された並列プログラムの性能などを客観的に評価し、構造化並列プログラミング手法の効果を確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 構造化プログラムの系統的設計法に関する研究成果

構造化並列プログラムの構成に関して、有名な第三準同型定理がある。この定理はある特定の形で定義された逐次プログラムが並列化可能であることを示している。しかし、第三準同型定理はその逐次プログラムに並列処理可能なプログラム定義が存在することを示すのみで、その並列化をどのように自動的に行うかということについては知られていなかった。そこで我々は、第三準同型定理に基づいた自動的な並列化手法を提案した。我々の手法は元の関数の右逆元である右逆関数を用いるものである。その右逆関数を用いることによって、第三準同型定理に基づいた並列化を自動的に行うことができる。また、右逆関数の導出を用いた自動並列化システムの実装を与え、その有効性を示した。本研究成果をプログラミング言語の設計と実装に関して世界で最も権威ある国際会議である ACM PLDI 2007 で発表した。

また、第三準同型定理をリストから木構造へ拡張し、木上の並列プログラムに系統的設計法を与えることができた。本研究成果をトップ国際会議 ACM POPL'09 で発表した。

さらに、第三準同型定理に基づいた、生成と選択による新たな自動並列化手法を提案した。提案手法では、逐次プログラムを元に並

列プログラムの候補を生成し、それらの中から正しい並列プログラムとなっているものを選択する。我々の並列化器は、算術演算と条件式によって定義された再帰関数から、その再帰関数を計算する並列プログラムを自動的に生成することができる。

## (2) 構造化プログラムの最適化手法に関する研究成果

スケルトン並列プログラミングでは、スケルトンという部品を組み合わせて並列プログラムを容易に作成できる。しかし、単純に組み合わせられたスケルトンプログラムは、中間データの作成や通信などのオーバーヘッドを生じ効率が悪いことがある。そのため、連続したスケルトンを融合することでオーバーヘッドを減らす最適化が研究され、実際にある程度の効率向上が得られている。しかし、既存の融合手法は過度に一般的であり、最適化の効果を得にくいクラスが存在する。そのため、対象クラスを絞った最適化を考える必要がある。我々は、科学計算などでよく見られるある要素の近傍要素を必要とする計算に焦点をあてた最適化手法を提案した。まず、対象とする計算を抽象化した標準形を設計した。そして、スケルトンプログラムから標準形への変換規則及び標準形の効率的な実装を与えた。本研究成果をまとめた論文を国際会議 IPJJ, EuroPar で発表した。

## (3) 構造化並列プログラミング環境の実現と性能評価に関する研究成果

実用の観点から、共有キャッシュが存在するようなメモリ階層構造を持つ、マルチコア並列計算機システム上で効率よく動作する並列スケルトンによる構造化並列プログラミングライブラリの実現方法を示した。この並列スケルトンライブラリを用いることで、多くのアルゴリズムに対して共有キャッシュを利用して並列計算を行うようなコードを容易に記述することが可能となる。また、実際に実行可能な並列スケルトンライブラリとして実装し、数値計算や知識発見のような現実問題を解くことで、共有メモリ環境下で共有キャッシュを持った Xeon や Core 2 Quad のようなマルチコアの計算機上で共有キャッシュを効率よく利用するコードが容易に記述可能であることを示した。

また、「リスト上の最大マーク付け問題」を解く並列プログラムの導出手法を提案し実現した。最大マーク付け問題とは、入力として与えられたデータに対し、ある述語を満たし、かつ、重み和が最大となる要素集合を求める問題である。多くの最適化問題は最大マ

ーク付け問題として定式化できることが知られている。リスト上の最大マーク付け問題について、その問題を解くスケルトン並列プログラムを自動的に導出する手法を与え、また、その導出を行うシステムを実装した。さらに、得られたプログラムの台数効果および導出システムにおける最適化の効果について、実験によって確かめた。

さらに、我々の研究してきた構造化並列プログラミング技術である、並列スケルトン、プログラム演算、並列性の自動導出、最適化などを、Fortress 上の容易かつ頑健な並列プログラミングに応用し、プログラム演算に応用した最適化ライブラリを構築した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

① 森畑明昌, 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, 並列プログラムの候補生成と適合性検査による並列化, 情報処理学会論文誌, プログラミング Vol.2(2), 2009. pp.132-143, 査読有

② Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Efficient Implementation of Tree Skeletons on Distributed-Memory Parallel Computers, Scalable Computing: Practice & Experience (SCPE), 2008. 掲載予定、査読有

③ 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, リスト上の最大マーク付け問題を解く並列プログラムの導出, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. SIG3, PR036. 2008. pp. 16-27, 査読有

④ 岩崎英哉, 胡振江, 並列計算パターン (スケルトン) による並列プログラミング, 情報処理学会誌「情報処理」, Vol. 49, No. 12, pp. 1385-1394, 2008, 査読無

⑤ Kento Emoto, Zhenjiang Hu, Kazuhiko Kakehi, Masato Takeichi, A Compositional Framework for Developing Parallel Programs on Two Dimensional Arrays, International Journal of Parallel Programming (IJPP), Volume 35, Number 6, Springer, 2007. pp. 615-658, 査読有

⑥ 野村芳明, 江本健斗, 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, 木スケルトンによるXPathクエリの並列化とその評価, コンピュータソフトウェア, 24(3):51-62, 2007, 査読有

⑦ Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, Parallel Skeletons for Manipulating General Trees, Parallel Computing, Vol. 32, No. 7-8, Elsevier, 2006. pp. 590-603、査読有

⑧ Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Kazuhiko Kakehi, Masato Takeichi, Systematic Derivation of Tree Contraction Algorithms, Parallel Processing Letters, Vol. 15, No. 3, 2005. pp. 321-336、査読有

⑨ 明石 良樹 松崎 公紀, 岩崎 英哉, 篁 一彦, 胡 振江, 最適化機構を持つ C++ 並列スケルトンライブラリ, コンピュータソフトウェア, Vol. 22, No. 3, 2005. pp. 214-222、査読有

⑩ 胡振江, 岩崎英哉, スケルトン並列プログラミング, 情報処理学会誌「情報処理」, Vol. 46, No. 10, 2005年10月. pp. 1158-1163、査読無

[学会発表] (計 14 件)

① Akimasa Morihata, Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, The Third Homomorphism Theorem on Trees: Downward & Upward Lead to Divide-and-Conquer, The 36th Annual ACM SIGPLAN - SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2009), Savannah, Georgia, USA, January 21-23, 2009. pp. 177-185.

② Kento Emoto, Zhenjiang Hu, Kazuhiko Kakehi, Kiminori Matsuzaki, Masato Takeichi, A Generative Matrix Library in Fortress Relieves Programmers' Headache!, 日本ソフトウェア科学会第25回大会, 筑波大学 大学院ビジネス科学研究科(東京キャンパス), 2008年9月10日(水)~12日(金).

③ Akimasa Morihata, Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, The Third Homomorphism Theorem on Trees: Downward & Upward Lead to Divide-and-Conquer, 日本ソフトウェア科学会第25回大会, 筑波大学 大学院ビジネス科学研究科(東京キャンパス), 2008年9月10日(水)~12日(金).

④ Kazutaka Morita, Akimasa Morihata, Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, Automatic Inversion Generates Divide-and-Conquer Parallel Programs, ACM SIGPLAN 2007 Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI 2007), San Diego, CA, USA, June 10-13, 2007.

pp. 146-155.

⑤ 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, リスト上の最大マーク付け問題を解く並列プログラムの導出, 情報処理学会 第66回プログラミング研究会, 名古屋大学 大学院多元数理科学研究科, 2007年10月11日(木)・12日(金)

⑥ 松崎 公紀, 森畑 明昌, 胡 振江, 武市正人, Associativity for Parallel Tree Computation, 日本ソフトウェア科学会第24回大会, 奈良先端科学技術大学院大学, 2007年9月12日(水)~14日(金).

⑦ 江本健斗, 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, 近傍要素を必要とするスケルトンプログラムの最適化, 第9回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ(PPL2007), 石川県加賀市山, 2007年3月8日(木)~10日(土).

⑧ Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, Towards Automatic Parallelization of Tree Reductions in Dynamic Programming, 18th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA 2006), Cambridge, MA, USA, July 30 - August 2, 2006. pp. 39-48.

⑨ Kento Emoto, Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi, Surrounding Theorem: Developing Parallel Programs for Matrix-Convolutions, European Conference on Parallel Computing (EuroPar 2006), Dresden, Germany, August 29 - September 2, 2006. LNCS 4128, Springer. pp. 605-614.

⑩ Kiminori Matsuzaki, Kento Emoto, Hideya Iwasaki, Zhenjiang Hu, A Library of Constructive Skeletons for Sequential Style of Parallel Programming (Invited Paper), First International Conference on Scalable Information Systems (InfoScale 2006), Hong Kong, May 29 - June 1, 2006. Vol. 152 of ACM International Conference Proceeding Series.

⑪ 森田 和孝, 森畑 明昌, 胡 振江, 武市正人, 弱逆関数の自動導出によるプログラムの並列化, 日本ソフトウェア科学会第23回大会, 東京大学, 2006年9月13日(水)~15日(金).

⑫ 篁一彦, 松崎公紀, 森畑明昌, 江本健斗, 胡振江, Parallel Dynamic Programming

using Data-Parallel Skeletons , 日本ソフトウェア科学会第 22 回大会 , 東北大学 青葉山キャンパス, 2005 年 9 月 13 日(火)~15 日(木).

⑬松崎公紀, 明石良樹, 江本健斗, 岩崎英哉, 胡振江, 助っ人: 構成的な並列スケルトンによる並列プログラミングライブラリ, 日本ソフトウェア科学会第 22 回大会, 東北大学 青葉山キャンパス, 2005 年 9 月 13 日(火)~15 日(木).

⑭野村芳明, 江本健斗, 松崎公紀, 胡振江, 武市正人, 木スケルトンによる XPath クエリの並列化とその評価, 日本ソフトウェア科学会第 22 回大会, 東北大学 青葉山キャンパス, 2005 年 9 月 13 日(火)~15 日(木).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

胡 振江 (HU ZHENJIANG)  
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学  
研究系・教授  
研究者番号: 50292769

### (2) 研究分担者

武市 正人 (TAKEICHI MASATO)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授  
研究者番号: 10011165  
2005~2007 年度

笥 一彦 (KAKEHI KAZUHIKO)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任  
講師  
研究者番号: 90345116  
2005 年度

松崎 公紀 (MATSUZAKI KIMINORI)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教  
研究者番号: 30401243  
2006~2007 年度

### (3) 連携研究者

武市 正人 (TAKEICHI MASATO)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授  
研究者番号: 10011165  
2008 年度

松崎 公紀 (MATSUZAKI KIMINORI)  
東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教  
研究者番号: 30401243  
2008 年度