

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700037

 研究課題名（和文） 先進的言語機能によるスケルトン並列プログラミングの  
 実用化に関する研究

 研究課題名（英文） Application of advanced language features to skeletal  
 parallel programming for its practical use

研究代表者

松崎 公紀（MATSUZAKI KIMINORI）

高知工科大学・工学部・准教授

研究者番号：30401243

研究成果の概要（和文）：

本研究では、理論と実践の両方について研究を行い、主に次の成果を得た。まず、理論については、木構造データに対する並列計算のための新しいモデル化を行った。また、MapReduce プログラミングモデルを関数プログラミングの観点から定式化を行った。実装については、2011 に策定された C++ 言語の新しい機能のうち、その 2 つを並列スケルトンライブラリで利用できるようにした。また、テンプレートメタプログラミング手法についても検討を行った。

研究成果の概要（英文）：

We have studied in both theory and practice and obtained the following results. In theory, we developed a new model for parallel computing on tree structures and formalized the MapReduce programming model in terms of functional programming. In practice, we improved our parallel skeleton library so that users can utilize two new features of the new C++ standard, and made a study for the template meta-programming techniques.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	910,000	210,000	1,120,000
2011 年度	1,300,000	300,000	1,600,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,110,000	780,000	3,890,000

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：並列プログラミング，スケルトン並列プログラミング，C++，メタプログラミング，MapReduce，正規表現

## 1. 研究開始当初の背景

並列性によって性能を向上させるハードウェア環境が近年急速に普及してきている。マルチコア CPU を持つ計算機やそれらをネットワークで接続したクラスター、GPGPU (General Purpose computing on GPU) など、ハードウェア環境の構成は多岐にわたり、またいずれもより複雑化している。一方、それ

らの環境を利用するためのソフトウェアの開発は、多くの場合、既存の逐次プログラミングの延長で行われている。計算資源の分配、プロセッサ間通信、同期などを明示的に指定する必要があり、一般のプログラマにとって複雑で困難なものである。よって、並列プログラムを容易にかつ系統的に開発するための手法が必要とされている。

スケルトン並列プログラミング (Skeletal Parallel Programming) は、「並列スケルトン」と呼ばれる並列計算のための計算パターンを組み合わせてプログラムを作成する手法である。ユーザは用意された並列スケルトンを組み合わせれば良く、並列性をそれほど意識することなく並列プログラムを作成できる。並列スケルトンの適切な実装が与えられることにより、記述の容易さとプログラムの性能の両方を達成することができる。また、パターンとして抽象化された並列スケルトンがプログラム最適化に適していることも、スケルトン並列プログラミングの特徴である。

これまで、スケルトン並列プログラミングの理論に関して多くの研究がなされてきた。しかしながら、十分に実用化されているとは言えないのが現状である。Google 社の **MapReduce** は大きな成功をおさめたフレームワークであるが、ハードウェア・アプリケーションの両方について非常に特化したものである。スケルトン並列プログラミングの実用化のための提言もあるが、より一般的な枠組みで実用的なレベルに到達しているものは申請者が知る限りではまだ存在しない。

## 2. 研究の目的

スケルトン並列プログラミングを実用化する上で重要だと考える課題は次の2点である。

- (1) 高い自由度を持つ並列スケルトンの定式化
- (2) プログラミング言語のサポートによる記述性と性能の両立

そこで本研究では、これらの2点を中心に研究開発を行う。具体的な研究内容の詳細を以下に示す。

### (1) 高い自由度を持つ並列スケルトンの定式化

スケルトン並列プログラミングの研究は、規則的なデータ構造であるリスト (1次元配列) から始まり、その後、行列や木構造へと拡張されてきた。しかし、実際のプログラムは、必ずしもそのような規則的な計算パターンだけで捉えることができるとは限らない。例えば、インデックス空間が複雑にネストしたループによる計算や逐次的処理と並列化可能な処理が混在した計算などは、既存の並列スケルトンの枠組みではうまく扱えていない。一方、**MapReduce** はこれらの成果とはほぼ独立にデザインされたフレームワークである。そこで、これまでのスケルトン並列プログラミングの研究、もしくは、**MapReduce** に対して、自由度の高さを目標として定式化を行う。

### (2) プログラミング言語のサポートによる記述性と性能の両立

実用的なスケルトン並列プログラミングに必要な機能・能力をプログラミング言語の観点からまとめ、それをもとに並列スケルトンライブラリを実現する。スケルトン並列プログラミングのアイデアは関数プログラミングと関連するところが多く、実際いくつかの最適化手法などが関数プログラミングの研究から取り入れられてきた。一方で、最新の C++ 標準 C++11 (C++0x) や **Fortress** と呼ばれる新しい言語などでは、手続き型言語に関数型言語的な機能や特長が積極的に取り入れられている。これらの技術を応用して、記述がしやすく、最適化能力の高い並列スケルトンライブラリを実現する。

## 3. 研究の方法

本研究では、応用例、理論、実現の3つの観点から研究に取り組む。具体的な研究方法を下記に示す。

### (1) 応用例を通じた問題点の確認

実際に使われる応用例を、研究代表者らが開発している並列スケルトンライブラリ「助っ人」や **MapReduce** フレームワークを用いて実現し、スケルトン並列プログラミングの問題点を明確にする。特に、「助っ人」の融合変換による最適化機能が有効に働くかどうかの確認をするため、**MPI** を用いた手実装との比較を行うことも検討する。

### (2) 関数プログラミングによる定式化

理論の観点からは、関数プログラミングの考え方を利用して並列木スケルトンおよび **MapReduce** フレームワークの定式化を行う。特に、**MapReduce** の定式化においては、データ並列言語 **NESL** を参考にして、ネストしたデータ構造に対する並列処理の観点から定式化に取り組む。

### (3) 最新言語を用いたライブラリの実現

実現の観点からは、研究期間中に策定された最新の C++ 標準 (C++11) や **Fortress** 言語などの新しい言語の機能を用いて、記述性に優れる並列スケルトンライブラリの構築を行う。ここで作成した並列スケルトンライブラリ等は、オープンソースとして広く公開する。

本研究は基本的には申請者一人で行う。ただし、並列スケルトンの定式化やライブラリ設計においては、他の研究者による評価や意見が有益である。したがって、これまで共同研究を行ってきた研究グループにおいて1~2ヶ月に1回行っているミーティング等の機会を利用し、研究を進めていく。

#### 4. 研究成果

研究の方法において述べた、3つの観点

(1) 応用例を通じた問題点の確認

(2) 関数プログラミングによる定式化

(3) 最新言語を用いたライブラリの実現に分類して研究成果を示す。

(1) 既存のライブラリを用いた応用例を通じた問題点の確認

まず、スケルトン並列プログラミングをより実用的な問題に適用していくための課題や問題点を把握するため、BiCGStab法と呼ばれる数値計算アルゴリズムに対して、SkeTo 並列スケルトンライブラリを用いた開発を行った。対象アプリケーションが3次元シミュレーションを行うものであったことから、本質的にネストしたループによる処理を扱った。この問題に対して2つの方法で並列スケルトンを適用し、それらの方法で得られたプログラムに対して、我々が開発してきた最適化機能の適用可能性や、プログラム開発のしやすさなどの調査を行った。この成果は国際ワークショップなどで発表した。[学会発表7(2010)] [招待講演, 学会発表3(2011)]

次に、広く利用されるようになったMapReduce フレームワークに関連して大きく2つの研究を行った。1つ目の成果は、順序に意味のあるリスト構造に対してMapReduceを適用してプログラミングする手法を与えたことである。この結果は、国際会議EuroParにて発表した[学会発表5(2011)]。2つ目の成果は、単純なgrepプログラムだけでなく、より複雑な正規表現のマッチング計算もMapReduce フレームワークで実現できることを示した点である。この結果は、情報処理学会論文誌プログラミングに採録されている[雑誌論文1(2011)]。これらの成果を応用することにより、データに依存関係のあるより複雑な処理を系統的にMapReduceを用いて実現することにつながる。

(2) 並列スケルトンの関数プログラミングによる定式化

並列計算の理論的研究について、まず、木構造データに対する並列計算の理論的定式化について2つの成果を得た。1つ目の成果は、既存のTree Contractionアルゴリズムを薔薇木向けに改良したアルゴリズムの提案である。この成果は[雑誌論文2(2011)]に採録されている。2つ目の成果は、二分木上の並列計算に対して、平衡木に基づく新しい定式化を提案したことである。この成果は、

国際会議ICFP2011にて発表した[学会発表4(2011)]。これらの成果は、木構造データに対する並列計算の理論的根拠を与えるものである。

また、MapReduce/Hadoopに対して関数プログラミングの考え方に基づく新しい定式化を行ってきた。MapReduceはもともとGoogleによって提案されたプログラミングフレームワークであるが、その後オープンソースによる類似実装としてHadoopが提案されており、Hadoopでは中間のShuffle/Sortフェーズの動きをより詳細に指定できる。この拡張された点について考察を行い、これまでに示されている関数プログラミングによる定式化の拡張を行った。この内容は、論文投稿のためまとめている段階である。

(3) 最新C++言語標準を用いた並列スケルトンライブラリの実現

研究代表者を含む研究グループでは、関数プログラミングの考え方を軸に、スケルトン並列プログラミングについて研究を行ってきた。特に、融合変換による最適化について深く研究を行ってきたことが他と異なる。この融合変換による最適化機能について、C++のテンプレートプログラミング技術、もしくは、新しい言語Fortressにより実現する方法を示した。前者については[雑誌論文4(2010)]に採録されている。後者については国際会議EuroPar[学会発表8(2010)]にて発表した。

次に、C++言語の最新標準であるC++11の機能を並列スケルトンライブラリへ適用する方法について検討・実装を行った。C++11の新機能のうち、ライブラリのユーザの視点で有効であると判断された、無名関数(ラムダ式)とautoによる型推論の2つについて、それを用いたプログラミングを可能とするよう並列スケルトンライブラリ「助っ人」の改良・開発を行った。これらの機能は、現在公開準備中である最新版に含まれている。

さらに、C++の拡張機能を提供するboostライブラリで提供されているboost::protoを用いたライブラリ開発について検討した。boost::protoは、融合変換を実現するために用いている式テンプレートをより書き易くすると期待されるものである。ここでは、boost::protoを用いて、融合変換機能の一部の実装を試みた。その結果、単純なmap/map融合部分の実装に成功したが、現時点ではすべてをboost::protoで実現することは適切ではないという結論を得た。この成果は、[学会発表1(2013)]にて発表した。

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 5 件)

- [1] 松崎公紀, 江本健斗, 劉雨: “正規表現マッチングの並列化とその Hadoop による評価,” 情報処理学会論文誌 プログラミング, Vol. 4, pp.1–11, 2011. 査読有
- [2] A. Morihata and K. Matsuzaki: “A Practical Tree Contraction Algorithm for Parallel Skeletons on Trees of Unbounded Degree,” *Procedia of Computer Science*, Vol. 4, pp. 7–16, 2011. 査読有
- [3] 松崎公紀, 山際伸一: “高知工科大学における HPC 基盤の導入と将来展望 –ハードウェア性能とソフトウェア生産性の追求–,” 高知工科大学紀要, Vol. 8, pp. 57–72, 2011. 査読無
- [4] K. Matsuzaki and K. Emoto: “Implementing Fusion-Equipped Parallel Skeletons by Expression Templates,” *21st International Workshop on Implementation and Application of Functional Languages, IFL 2009, Revised Selected Papers, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 6041, pp. 72–89, 2010. 査読有
- [5] 松崎公紀: “並列性忘却プログラミングの研究推進に向けて,” 高知工科大学紀要, Vol. 7, No. 1, pp. 91–100, 2010. 査読無

[学会発表] (計 8 件)

- [1] 松崎公紀, 江本健斗: “boost::proto を用いた融合変換機能付きライブラリの構築,” 情報処理学会第 93 回プログラミング研究会, 国立情報学研究所 (東京), 2013 年 2 月 28 日.
- [2] 川村高之, 松崎公紀: “m-bridge による分割を適用した木構造処理の Hadoop 上での評価,” 日本ソフトウェア科学会第 29 回大会, 法政大学小金井キャンパス (東京), 2012 年 8 月 22 日.
- [3] 松崎公紀, “スケルトン並列プログラミングからのソフトウェア自動チューニングへの期待 –並列スケルトンを用いた BiCGStab 法アプリケーション実装のケーススタディを通じて–,” 第 3 回自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム, 東京大学 (東京), 2011 年 12 月 5 日. 招待講演
- [4] A. Morihata and K. Matsuzaki, “Balanced Trees Inhabiting in Functional

Parallel Programming,” *16th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP’11)*, 国立情報学研究所 (東京), 2011 年 9 月 19 日.

- [5] Y. Liu, Z. Hu and K. Matsuzaki, “Towards Systematic Parallel Programming over MapReduce,” *17th International European Conference on Parallel and Distributed Computing (EuroPar 2011)*, Bordeaux (フランス), 2011 年 9 月 1 日
- [6] L. Gesbert, Z. Hu, F. Loulergue, K. Matsuzaki, and J. Tesson: “Systematic Development of Correct Bulk Synchronous Parallel Programs,” *11th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCaT 2010)*, Wuhan (中国), 2010 年 12 月 10 日.
- [7] K. Matsuzaki and K. Emoto: “Lessons from Implementing the BiCGStab Method with SkeTo Library,” *4th International Workshop on High-level Parallel Programming and Applications*. Baltimore (MD, 米国), 2010 年 9 月 25 日.
- [8] K. Emoto, Z. Hu, K. Kakehi, K. Matsuzaki, and M. Takeichi: “Generators-of-generators Library with Optimization Capabilities in Fortress,” *16th International European Conference on Parallel and Distributed Computing (EuroPar 2011)*, Ischia (イタリア), 2010 年 9 月 1 日.

[その他]

- [1] 松崎 公紀 (研究代表者) ホームページ <http://www.info.kochi-tech.ac.jp/kmatsu/index.html>
- [2] 助っ人プロジェクトホームページ <http://sketo.ipl-lab.org/>

6. 研究組織

- (1)研究代表者  
松崎 公紀 (MATSUZAKI KIMINORI)  
高知工科大学・工学部・准教授  
研究者番号: 30401243
- (2)研究分担者  
該当なし
- (3)連携研究者  
該当なし