

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5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500022

研究課題名（和文） 代数的ソフトウェア向き多重文脈型推論基盤システムのスケラブルな並列実装と応用

研究課題名（英文） Scalable Parallel Implementation and Application of Multi-Context Reasoning Systems for Algebraic Software

研究代表者

栗原 正仁（KURIHARA MASAHITO）

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：50133707

研究成果の概要（和文）：多重文脈型推論基盤システムを、物理的に並列実行できる枠組みに広げるために、等式や書換え規則の生成・更新処理を含む停止性検証の処理、特にプロセス間のシステム終了（成功）条件の判定処理等の実装を対象として、関数型言語 Erlang を採用して、並列計算機におけるスケラブルな並列実装方式を開発してシステムのパワーを格段に高めた。また、システムを帰納的定理証明等の応用課題に適用して、その可用性を高めた。

研究成果の概要（英文）：In order to extend the multi-context reasoning systems to physically parallel executable frameworks, the processes for termination verification including creation and update of equations and rewrite rules and, in particular, the implementation of the determination of system termination (success) among the processes have been considered and by using a parallel programming language Erlang, a scalable, parallel implementation scheme on parallel computers has been developed to give the systems more power. Also, the systems have been applied to problems such as inductive theorem proving to see their improved usability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：項書換え系、並列化、多重文脈型推論、人工知能、ソフトウェア、代数

1. 研究開始当初の背景

(1) 非決定的な計算プロセスにおける計算開始時点及びそれ以降に遭遇する一連の非決定的選択点において現時点までに行った選択の列を、その計算プロセスの文脈と呼ぶ。単純な計算システムであれば、1つの文脈において「失敗」すれば、計算を「後戻り」さ

せて他の文脈を試みさせればよい。しかし、複雑なシステムは、多くの場合、半アルゴリズムとなっていて、必ずしも「成功」にも「失敗」にも至らず、停止しないで限りなく計算を続行するため、そもそも「後戻り」ができない。したがって、プロセスの分岐による並行計算（又はそれを模擬する逐次計算）が必

要とされるが、素朴な実装を行えば、多くの場合、プロセスの数が指数関数的に膨大となり、現実的なシステムを構築することは困難となる。

(2) このような問題を解決するために、本研究代表者は、その研究の全体構想の中で、類似した文脈をもつプロセス間には、通常、共通する多数の計算・推論があるという経験的な知見に基づき、それら多数の計算・推論を、1つのプロセス内でまとめて行うような推論システムを開発してきていた。それまでの多数の実験結果によると、そのようなシステムでは、平均的な計算量がたとえ指数オーダーになるにしても、指数関数の基数を小さくして、より大きなサイズの問題まで現実的に扱うことができる。1つのプロセス内で多くの並行プロセスの推論を効率良く模擬実行するこのようなシステムを、「多重文脈型」の推論システムと呼んでいる。

(3) 本研究代表者は、ソフトウェア工学の基礎分野において扱われている代数的な基盤の上に構築されたソフトウェアに関する計算・推論の分野（項書換え系）に焦点を絞り、関数記号と変数を用いて構成される項の対「項=項」である等式や、それを左から右（又はその逆）の方向に向き付けた「項→項」の形をした書換え規則に関わる推論（例えば、停止性検証、完備化、定理証明、制約充足等）を取り扱う多重文脈型推論システムの研究開発を進めてきていた。主として完備化と呼ばれる推論システムを扱い、等式を向き付けて停止性が保証される書換え規則を生成する際に、左辺と右辺の項の大小比較に用いる半順序構造を「文脈」としてモデル化している。そして、多数の文脈の中から成功に至る文脈にしばって計算を進めるための計算システムを具体化し、その有効性を実証してきていた。

(4) アイデアの原型は 1999 年に J. of Automated Reasoning において公表した論文に見られる。ここでは s, t を項, $L1, L2, L3$ を文脈の集合とするとき、ノードと呼ばれるデータ構造 $\langle s:t, L1, L2, L3 \rangle$ を導入し、 $L1(L2)$ に属する文脈の下では書換え規則 $s \rightarrow t (t \rightarrow s)$ が、 $L3$ に属する文脈の下では等式 $s=t$ がデータベース中に存在すると解釈し、文脈集合の和・差・積などのメタ操作をベースレベル推論と組み合わせることで、ノード集合に対する推論システムを構築している。

(5) 最初の飛躍的成果は、2004 年に人工知能学会論文誌において公表した。そこでは、文脈をそれ以上分解できない原子的データではなく、構造データとして表現できるようにシステムを変更することにより、文脈集合を、文脈の識別番号を列挙した集合ではなく $f>g$ 等の論理式の組合せとして表現し、それを二分決定グラフ (BDD) によりコンパクト

に実装することを可能とした。さらに、2006 年の電子情報通信学会論文誌 (フォーマルアプローチ特集号) においては、適用可能な停止性のクラスを広げて文脈の数が指数関数的に 10~50 倍に増加しているのに対し、実行時間は 1%程度しか増加しないことを実証している。

(6) 2009 年の電子情報通信学会英文論文誌 (Foundation of Computer Science 特集号) においては、新たな飛躍的成果を公表した。そこでは、考慮すべき文脈の集合を計算の開始時点に与えるのではなく、計算中に遭遇する非決定的選択点において動的に生成・更新できるようにシステムを拡張した。それにより、半順序構造を事前に多数用意せずに、任意の停止性証明器を利用して、計算中に生成される等式の向き付け可能な方向 (左から右、その逆、又はその両方) を文脈集合に動的に追加する処理を可能とし、システムの機能と性能を格段に向上させた。実際、世界最高水準の停止性証明器開発技術をもつインスブルック大学のチームと共同で実装したシステムは、この分野で最も権威ある国際会議の 1 つである「自動推論に関する合同国際会議」(IJCAR) において、査読者から State-of-the-Art なシステムとして高く評価され、「システム開発論文」として採択され、口頭発表とデモンストレーションを行った。

2. 研究の目的

1. で述べた枠組みを帰納的定理の自動証明に応用するとき問題が生じた。帰納的定理とは、自然数や構造データ等の集合に関して成り立つ言明で、通常は数学的帰納法またはその拡張を用いて証明され、ソフトウェアの分野では再帰や反復と直接関係する重要な研究対象であるが、予備実験では種々の問題を現実的な時間内で解けなかった。原因は非決定性の多さである。半順序に加えて、「帰納的パターン」の候補およびそれに帰着させる潜在的な計算経路の数が非常に多いため、膨大な数の文脈が生じていた。この問題を解決するため、これまでの研究成果を発展させることにより、多重文脈型推論システムの性能を、解けなかった問題の多くが現実的な時間で解ける程度まで、格段に強化したいと考えた。

このような背景のもと、そこで認識された問題を解決するために、本研究課題においては、多重文脈型推論システムを、物理的に並列実行される複数プロセスで実行できるような枠組みに広げ、以下の成果を得ることを目的とした。

(1) 並列計算機におけるスケラブルな並列実装方式を開発してシステムのパワーを格段に高めること。

(2) 帰納的定理証明等の応用課題に挑戦して

その可用性を高めること。

3. 研究の方法

(1)本研究代表者らがこれまで開発してきた多重文脈型推論（完備化）システム mkbTT (Multi-context Knuth Bendix completion system with Termination Tools)について、グラフ同型性などを利用して最適化して再実装を行い、研究開発の基盤を構築した。具体的には、これまで停止判定手続きの実装で実績をあげており、世界最高水準の停止性証明器開発技術をもつインスブルック大学のチームと共同で引き続き実装の改善を行い、グラフの同型性や危険対によるフィルタリングにより、探索空間をこれまでより飛躍的に狭めることにより、システム全体を最適に実装した。

(2)実装を行うための並列プログラミング言語として、関数型言語をベースとして並列計算を可能とする Erlang について検討を行うと共に、キーワードプログラミングによる開発の検討も行い、等式や書換え規則の生成・更新処理、停止性検証の処理、及びシステム終了（成功）条件の判定処理等を対象として、スケーラブルな並列実行方式について検討を行い、停止性判定の並列化のために辞書的経路順序法(LPO) (図1)を開発し、Erlangによりシステムを実装し、評価を行った。具体的には、図1のように、LPOの再帰的な定義を論理的な選言に沿って分割し、それぞれの選択肢ごとに並列プロセス（コア）に割当て、OR 並列によりマルチコア CPU で並列実行できるように実装を行った。

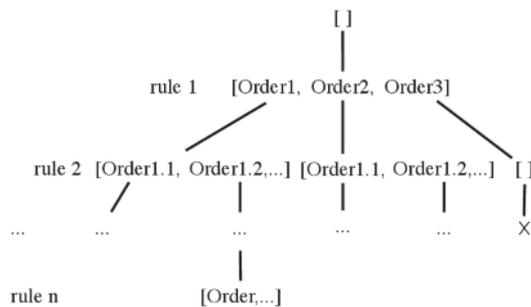


図1 辞書的経路順序法

(3) LPO の定義に基づく上記の実装に加えて、多数の停止性判定を行う機構としてマクロレベル並列化 (図2) を開発し、同様に、Erlang によりシステムを実装し、評価を行った。具体的には、図2のように、完備化手続きなど、この並列性を利用して多数の停止性検証を行う必要のある外部プログラムから、生成した停止性問題を入力ポートと呼ばれるバッファに送信すると、それらの問題1つにつき1つのコアに転送され、そこで停止性の検証が行われることによって、上記のLPO

法よりもマクロなレベルで並列化を行った。したがって、コア間に生じる必要以上の通信遅れがなく、効率の向上に寄与する。

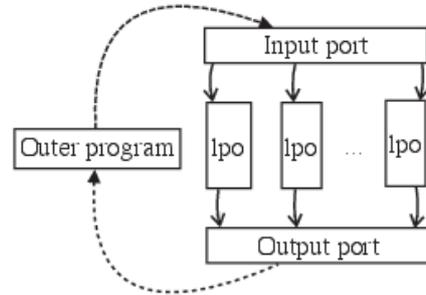


図2 マクロレベル並列化

(4) 多重文脈型の帰納的定理証明システムの理論と実装方式を検討して、MRIt (Multi-context Rewriting Induction with Termination checkers) を開発し、その設計・実装・評価を行った。帰納的定理証明の基礎としては、Redy らの書換え帰納法を採用するとともに、公理として与えられた等式をルールに変換し、どのルールを証明すべき定理のどの部分項に適用するかという選択に対して、多重文脈型推論の技術を適用した。

(5) システムの評価結果を理論的に分析し、システムの改善に向けた基盤として、ツリーオートマトンを用いた手法を検討した。具体的には、帰納的定理証明の過程で生じる種々の項の正規形をツリーオートマトンにより認識する手法を開発し、理論と実装の両面から検討を行った。

4. 研究成果

(1) 最適化された多重文脈型推論システム mkbTT を開発すると共に、システム性能のボトルネックとなる停止性判定の性能を実験により評価するために、2125 題の標準的なテスト問題を使用し、1 CPU が 12 コア (×2 CPU) のワークステーションで並列実行を行う実験をした結果、辞書的経路順序法及びマクロレベル並列化のいずれにおいても、逐次実行よりも飛躍的に性能が向上し、かつコア数が 22 までの範囲でコア数に比例した性能を得たという点で、スケーラブルな実装方式を開発することができ、システムのパワーを格段に高めることができた (図3)。

(2) 帰納的定理証明に関して、Redy らの書換え帰納法に対して多重文脈型推論を適用することにより、多重文脈型書換え帰納定理証明システム MRIt を開発し、多数の帰納的証明を行えることを示し、多重文脈型推論システムの応用可能な課題を拡げ、可用性を高めることができた。

(3) 帰納的定理証明の例題のうち、今回の手法で解けないものについて分析した結果、こ

れは並列化の問題ではなく補題生成（定理発見）の問題であることを見出し，その解決に向けた基盤として，ツリーオートマトンを用いた正規形の認識手法を開発し，今後の研究の発展の方向性を示した。

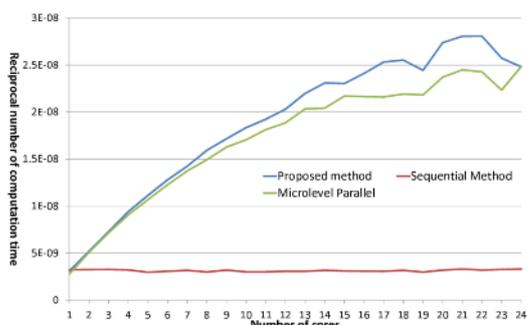


図3 コア数の増加に伴う性能の向上
(青色と緑色が提案手法)

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2件)

- ① Sarah Winkler, Haruhiko Sato, Aart Middeldorp, Masahito Kurihara: Multi-Completion with Termination Tools, Journal of Automated Reasoning, 査読有, Vol. 50, No. 3, 317-354, 2013
- ② Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: Multi-context rewriting induction with termination checkers, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E93-D, No. 5, 942-952, 2010

[学会発表] (計4件)

- ① Rui Ding, Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: Parallelization of termination checker for term rewriting system, The 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1824-1829, 2012年10月15日, Seoul (韓国) COEX 国際会議場
- ② Rui Ding, Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: Parallelization of termination checker of term rewriting systems, The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, 2012年3月15日, 香港 (中国) ロイヤルガーデンホテル
- ③ Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: Multi-context rewriting induction with termination checkers, The 5th International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation

Information Technology Based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation, 2012年1月16日, 札幌, 北海道大学

- ④ Sarah Winkler, Haruhiko Sato, Aart Middeldorp, Masahito Kurihara: Optimizing mkbTT, The 21st International Conference on Rewriting Techniques and Applications, 2010年7月12日, Edinburgh (英国) エジンバラ大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等
<http://kusharo.complex.eng.hokudai.ac.jp/file/satoh.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
栗原 正仁 (KURIHARA MASAHITO)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：50133707

(2) 研究分担者 なし
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
佐藤 晴彦 (SATO HARUHIKO)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：30543178