

平成22年 5月17日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19500020
 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開発研究
 研究課題名（英文） Development of Multi-Context Reasoning Infrastructural Systems for Algebraic Software
 研究代表者
 栗原 正仁（KURIHARA MASAHIRO）
 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）：項書換え系という代数的ソフトウェアの分野において、本研究では多くの問題を効率よく解く新しい推論基盤システムの開発に成功した。それらの問題には、プログラムが必ず実行を停止して唯一の解を出力するように変換する完備化問題およびプログラムが満たす重要な性質を証明する帰納的定理自動証明が含まれる。鍵となる技術は、ノードという特殊なデータ構造と経験的探索を使って複数処理の並列実行を高性能に模擬する多重文脈型推論である。

研究成果の概要（英文）：In the field of algebraic computer software called the term rewriting systems, this project has successfully developed a new infrastructural reasoning system which solves a lot of problems efficiently. The problems include the completion problems for transforming programs into those which always terminate and output the unique solution. Also included is the automated inductive theorem proving for proving crucial properties to be satisfied by programs. The key technology is the multi-context reasoning which allows very efficient simulation of parallel execution of multiple processes using the special data structure called nodes and heuristic search.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2009年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

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： ソフトウェア学，システム工学，ディペンダブル・コンピューティング，人工知能，項書換え系

1. 研究開始当初の背景

高度な推論システムの多くは、利用者に対して、問題分野の専門知識や直観・洞察に基

づいた補助的な情報を、実行に先立ってヒントとしてシステムに入力させている。そのようなヒントは、数値データの場合はパラメー

タと呼ばれることが多いが、本研究では論理的な離散構造データを想定して「文脈」という言葉で呼ぶ。多くの推論システムは、利用者の与えた単一の文脈を重要なヒントとして探索や推論をうまく制御し、望む結果を効率良く得ている。これが「高度」であることのトリックであるともいえる。

しかし、実際には、利用者にとって適切な文脈を1つだけ提供することは、多くの場合、困難である。可能な文脈を当てずっぽうに1つずつ入力し、失敗したら他の文脈を試みるような逐次的な処理では、膨大な文脈数に比例する計算時間を必要とする問題点がある。また、推論システムには半アルゴリズムであるものも多いので、必ずしも停止するとは限らず、別の文脈を試みる機会を決して訪れないかもしれない。これを回避するには、文脈ごとに1つの計算プロセスを生成し、それらを並列に実行すればよいが、やはり文脈数に比例した多数のプロセスを必要とする。

このような問題の解決策の一つとして、プログラムが必ず実行を停止して唯一の解を出力するように変換する完備化問題のために本研究代表者が開発した「多重完備化」がある。これは、「複数の文脈」をまとめて効率よく処理して一般の「完備化」を行うシステムであり、各文脈に対応する多数のプロセスで行われる計算や推論の構造を分析し、類似した文脈をもつプロセス間で共通する多数の計算・推論を1つのプロセス内でまとめて行うものである。

本研究は、上記の背景のもと、「多重完備化」を他の推論問題にも適用できるように拡張した「多重文脈型推論」のための基盤システムを開発し、「完備化」の機能の一層の拡張とともに、「帰納的定理証明」等の問題にも応用しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究の一般的な目的は、ソフトウェア工学の基礎分野における推論システムに対して多重文脈型推論システムを設計・実装し、専門知識や直観・洞察に依存する文脈の入力から利用者を解放することにより、論理的なユーザインタフェースを抜本的に改善し、専門性の低い一般技術者が推論システムを気軽に活用できる道を切り開くことにある。特に、数式や書換え規則を対象として構成される代数系の計算モデル（項書換え系）に関わる推論システムのクラスに焦点をしばり、このクラスの様々な推論システムの機能と文脈の関わりを分析し、多くのシステムから共通して使うことのできる多重文脈型推論基盤システムを研究開発することを目的とする。

具体的には、下記の3つの目的に分けられる。

(1) これまでの多重完備化システムの機能と文脈の関わりを分析し、多くのシステムから共通して使うことのできる多重文脈型推論システムの基盤を開発する。

(2) 多重文脈型推論システムに基づき、従来の「多重完備化システム」の機能の拡張を行うとともに性能を改善する。

(3) 多重文脈型推論システムを、これまで適用されたことのない「帰納的定理証明」等の問題にも応用する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、つぎのような研究方法によって研究を実施した。

(1) 先行研究において開発してきた多重完備化システムの構造を整理し、他の推論システムにおいても利用可能となるようなアーキテクチャを整備した。具体的には、先行研究の多重完備化システムに加えて、それ以外の推論システムのうち、「停止性検証」および「帰納的定理証明」に着目し、基本的な推論手続きを分析して、多重文脈型推論システムとして設計した。

(2) 停止性検証については、実行時に等式を左右のいずれに向き付けるかの判断に依存した文脈を導入し、そのように動的に生成される文脈の表現と処理方法を設計した。また、再帰的経路順序に基づくこれまでの停止性判定法に加えて、多項式解釈に基づく簡約順序や依存対に基づく検証手法を導入した。それらは、命題論理の充足可能性判定問題（SAT）に帰着される「制約充足問題」として取り扱うこととした。

(3) 多重完備化システムに、停止性検証に関する上記の工夫を組み込んで、その機能を拡張した。完備化においては、停止性検証の手法が性能に大きな影響を与えるため、これによって多重完備化システムの性能は大きく変化することとなる。

(4) 帰納的定理証明については、(2)の停止性検証で導入した文脈に加えて、推論規則の適用箇所を限定する決定を文脈にとらえ、多重文脈型帰納的定理証明システムとして設計した。

(5) 上記の(3)で開発した多重完備化システムおよび(4)で開発した多重文脈型帰納的定理証明システムの評価を行うために、よく知られた問題集を用いたベンチマークテストを実施し、その有効性を検討した。

4. 研究成果

研究成果としては、「研究目的」の節で示した(1)~(3)にそれぞれ対応して、以下に示す(1)~(3)の3つの成果が得られた。

(1) 多重文脈型推論基盤システムの開発

先行研究の多重完備化システム MKB の機能と文脈の関わりを分析し、それを一般化して、多くのシステムから共通して使うことを意図した多重文脈型推論基盤システム MKB00L を開発した。このシステムでは、停止性の証明を行う際に用いる簡約順序をブール制約で表現可能であれば良いとする抽象化に成功している。たとえば、良く知られるステータス付き再帰的経路順序は、その特殊ケースとして位置付けられる。

実装においては、制約の連言を二分決定木 (BDD) によって表現することにより、論理式の処理の高速化を達成している。良く知られた問題集合を用いた包括的な評価実験により、多くの問題について、MKB00L は MKB よりも効率が良いことを実証した。

本研究成果は、2008 年の国際会議 (学会発表⑩参照) において公表した際、口頭発表を行った学生 (共著者) が優秀学生賞を受賞した。

(2) 制約ベース多重完備化システムの開発

多重文脈型推論基盤システム MKB00L をさらに発展させ、従来の多重完備化システム MKB の機能の拡張を行うとともに性能を改善した。この研究成果の大きな特徴は、MKB の機能の一部に含まれる停止性検証について、実行時に等式を左右のいずれに付き付けるかの判断に依存した文脈を導入し、そのように動的に生成される文脈の表現と処理方法を推論システムとして設計し、「制約ベース多重完備化システム」(MKBcs) という新しい発想に基づくシステムとして結実させたことにある。

MKBcs は、停止性検証の部分に任意の停止性証明器を使用可能となっている点も大きな特徴の一つであり、停止性検証技術の今後の発展に応じて、本技術自体が追従できるといって非常に柔軟な構造になっている。

また、MKBcs を特定の停止性証明器に関してカスタマイズして一層の高速化を図るために、再帰的経路順序に基づくこれまでの停止性判定法に加えて、多項式解釈に基づく簡約順序や依存対に基づく検証手法を導入し、それらを命題論理の充足可能性判定問題 (SAT) に帰着される「制約充足問題」として取り扱うシステム MKBdp を開発した。

包括的な計算機実験に基づき、このシステムと競合する先行研究システムである Slothrop と性能を比較したところ、利用者の入力するヒューリスティクスが正しい場

合には Slothrop の性能が高いが、本研究で想定するような一般的な場合には、多くの場合、MKBcs の性能の方が勝ることがわかった。

以上の研究成果を取りまとめた論文は、電子情報通信学会英文論文誌の「コンピュータサイエンスの基礎」特集号において公表されている (雑誌論文③参照)。

なお、その後、国際的な連携により一層高性能なシステムの実現を行うために、世界最高水準の停止性検証器を開発しているインスブルック大学 (オーストリア) のチームとの共同開発を行った。理論及び設計に関する主導は日本側が行い、停止性検証器との接合をオーストリア側が行った。こうして完成したシステム MKBtt およびその最適化版は、自動推論および項書換え系の分野で最も権威ある国際会議の 1 つである IJCAR および RTA において、システム記述論文およびシステムデモンストレーションとして採択された (学会発表⑥および①参照)。

(3) 多重文脈型帰納的定理証明システムの開発

多重文脈型推論システムを、これまで適用されなかった「帰納的定理証明」の問題に応用することに成功した。その理論的基礎は「書換え帰納法」と呼ばれる技術であるが、それを多重文脈型とすることによって、利用者に対して、簡約順序などの適切な文脈を事前に入力させなくても、システムが自動的に適切な文脈を探索して、帰納的定理の証明を行うことができるシステム MRIt を開発した。

帰納的定理証明においては、場合によっては、利用者が適切な「補題 (補助定理)」を提供しなければ証明に成功しないことがある。しかし、MRIt においては、補題なしで証明に成功するような文脈を自動的に見つけることがあった。また、帰納的定理証明においては、証明すべき命題を「帰納法の仮定」を参照する命題に帰着させる処理を見出す必要があるが、MRIt は自動的にそのような処理を行う適切な文脈を探索することができた。

このような機能をもつ多重文脈型帰納的定理証明システムを開発した例は、世界的にも例がなく、本研究が初めてである。この分野でよく知られた問題集合を用いた実験においては、利用者からの文脈の入力なしで、半分以上の問題を自動的に解くことができた。解くことができた問題に関しての計算時間は、実用上問題のない数秒以内である。解けなかった問題に対する対策が今後の課題として残された。

以上の研究成果を取りまとめた論文は、電子情報通信学会英文論文誌の「フォーマルアプローチ」特集号において公表される (雑誌論文①参照)。

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)

- ①Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: Multi-context rewriting induction with termination checkers, IEICE Transactions on Information and Systems (Special Section on Formal Approach), 査読有, Vol.E93-D, No.5, 2010 (採録決定)
- ②Masataka Mizusawa, Masahito Kurihara: Hardness measures for gridworld benchmarks and performance analysis of real-time heuristic search algorithms, Journal of Heuristics, 査読有, Vol. 16, pp.23-36, 2010
- ③Haruhiko Sato, Masahito Kurihara, Sarah Winkler, Aart Middeldorp: Constraint-based multi-completion procedures for term rewriting systems, IEICE Transactions on Information and Systems (Special Section on Foundation of Computer Science), 査読有, Vol.E92-D, No.2, pp.220-234, 2009

[学会発表] (計12件)

- ①Sarah Winkler, Haruhiko Sato, Aart Middeldorp, and Masahito Kurihara: Optimizing mkbTT, International Conference on Rewriting Techniques and Applications, 2010年7月11日, エジンバラ大学 (英国エジンバラ市)
- ②Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: Design and Implementation of Multi-Context Rewriting Induction, IAENG International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2010年3月17日, ロイヤルガーデンホテル (香港)
- ③Masahito Kurihara and Haruhiko Sato: Multi-Context Rewriting Induction, International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation Information Technology Based on Knowledge Discovery and Knowledge Federation, 2010年1月19日, 北海道大学学術交流会館 (札幌)
- ④Shoichi Yokoyama, Haruhiko Sato, Masahito Kurihara: User-friendly GUI in software model checking, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2009年10月12日, ハイアット・リージェンシーホテル (米国サンアントニオ市)
- ⑤Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: Implementation and performance eval-

uation of multi-completion with termination checking, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2008年10月12日, サンテック国際会議展示場 (シンガポール)

- ⑥Haruhiko Sato, Sarah Winkler, Masahito Kurihara and Aart Middeldorp: Multi-completion with termination tools, International Joint Conference on Automated Reasoning, 2008年8月10日, メキユアホテル (豪州シドニー市)
- ⑦Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: Design and Implementation of Multi-completion procedures with termination checking, International Conference on Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science, 2008年7月7日, インペリアル・スワンホテル (米国オーランド市)
- ⑧Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: Multi-completion procedures for term rewriting systems with modern termination checking, International Conference on Computing, Communications and Control, 2008年6月29日, ローゼンセンター (米国オーランド市)
- ⑨Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: Multi-completion procedures for term rewriting systems based on constraint system, Proc. International Conference on Information Technology and Applications, 2008年6月23日, ヒルトンホテル (豪州ケアンズ市)
- ⑩Haruhiko Sato and Masahito Kurihara: MKBOOL: A multi-completion system for boolean constrained reduction orders, IAENG International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2008年3月19日, リーガル・カオルーンホテル (香港)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 正仁 (KURIHARA MASAHIITO)
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

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: