

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700164

研究課題名(和文)高速結論発見器の実用化に関する研究

研究課題名(英文)A study on a practical consequence finding system

研究代表者

鍋島 英知 (NABESHIMA, Hidetomo)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：10334848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：一階述語論理の結論発見器であるSOLARのスケラビリティ向上のため、SOLタブロー計算法の分轄統治法の考案や、最良優先探索に基づく新しい結論発見器の開発と各種の枝刈り技術の導入、SAT技術に基づく命題論理版結論発見器の試作、その推論エンジンとなるSATソルバーの性能改善等に取り組み、従来のSOLARを超える性能を獲得し、SATソルバーは2011年、2013年のSAT競技会の応用UNSAT部門においてそれぞれ優勝・2位を獲得するなどの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：SOLAR is a first-order consequence finding system. To improve the scalability, we proposed a divide-and-conquer strategy for SOL tableau calculus, developed a new consequence finding system based on best-first search, and introduced various kinds of the pruning techniques for the system. For propositional cases, we developed a prototype of a consequence finding system based on SAT technologies. The new first-order SOLAR system showed superior performance compared to the old one, and the developed SAT solver, called GlueMiniSat, which is used as an inference engine of the propositional system, got 1st and 2nd places of SAT 2011 and 2013 competitions in Applications UNSAT category, respectively.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：結論発見 仮説発見 一階述語論理 命題論理 推論システム 分割統治

1. 研究開始当初の背景

公理集合から自明ではない興味深い結論を導出することを結論発見と呼ぶ。一般に公理集合から導出可能な結論は無限に存在するため、実際の結論発見では、特定の言語バイアスを満たし包摂に関して極小な節(これを特徴節と呼ぶ)を計算する。特徴節計算のための最もよく知られた手続きの1つが SOL 導出である。特徴節の概念は、非単調推論、アブダクション(発想推論)、主項の生成、知識コンパイル、帰納論理プログラミング、マルチエージェントシステム、生物情報科学などを含む、人工知能にとって興味ある種々の推論問題に有用である。

2. 研究の目的

結論発見器 SOLAR は、SOL 導出の効率の良い実装の1つである。しかしながら SOLAR を利用して効率良く興味深い結論を発見するためには、その推論機構に関する専門的知識がしばしば必要となる。例えば、問題の定式化や探索戦略・パラメータの選択によって、求解時間は大きく変化する。SOLAR は、結論発見のための最新の枝刈り技術を数多く実装しているが、それでも問題規模の増大に対して、求解時間が過敏に増大することがある。これらの問題を解決・軽減するため、本研究では SOLAR のスケーラビリティの向上を図る。これにより問題の定式化や探索戦略の選択に対する依存性を緩和し、問題規模の増大に対する応答性能の頑健性を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、SOLAR のスケーラビリティ向上を目的として、以下の4つの課題に取り組んだ。

(1) 分割統治法に基づく並列分散結論発見手続きの実現: SOLAR はトップダウン型の推論手続きである SOL タブロー法の実装であり、バックトラックは本質的に不可避である。もしタブロー中の各ノードに適用可能な推論規則が多数ある場合、基本的にはそのすべての組合せを試みる必要があり、これがしばしば組合せ爆発を生み大きなボトルネックとなる。そこで各ノードを部分タブローに分割し、それらを独立・並列に解き、その後解集合を統合する分割統治法を実現し、スケーラビリティの向上を図る。

(2) トップダウン型推論手続きへの制限資源下での探索戦略の導入: 飽和型定理証明器における優れた探索戦略の1つに LRS (limited resource strategy)がある。LRS では、与えられた時間内には処理しきれないと予測される節を破棄することで、包摂チェックなどの手間を軽減し、結果としてより多くの推論を実現する。この戦略をトップダウン型の結論発見器である SOLAR に適用し、実用的な探索戦略を開発する。

(3) トップダウン型とボトムアップ型推論手続きの融合: トップダウン型の推論手続き

はボトムアップ型と比較して推論順序により強い制約がある。例えば SOL では無数のタブローを導出可能であるが、それらは一定の順序に従って探索されることになる。しかし定理証明器において現在主流のボトムアップ型の飽和型証明器では、ある尺度に基づき最も良いと評価された節を選択し、それに推論規則を適用し探索を進める。そこで SOLAR においても、探索中のタブローを必要に応じて記録しておくことで、探索順序の制限を緩和し、より良いと評価されるタブローを優先して探索できる手法を研究する。

(4) 命題論理版 SOLAR の開発: 近年の SAT ソルバーの劇的な性能向上に伴い、SAT 符号化を利用した問題解決手法が活発に研究されている。SOLAR は一階述語論理の結論発見器であるが、これに SAT ソルバーの高速化技術を導入し、高速な命題論理版結論発見器の実現を図る。

4. 研究成果

(1) SOL タブロー法のための分割統治法を考案し、従来の逐次型 SOLAR に導入し、一階の定理証明問題からすべての反駁を求める評価実験において、大きく求解数を向上できることを示した。結論発見問題においては、部分結論集合同士の統合が必要となるため、部分結論集合をトライにより表現し、統合時に重複する繰り返し計算を抑制することで、統合に必要な計算量が大きく改善できることを示した。

一方で、従来の逐次型 SOLAR はトップダウン型探索を前提とした設計になっており、これにボトムアップ型の戦略、すなわち良い部分問題を優先選択して解く手法を実装することは困難であった。そこで新たに並列分散処理への拡張を前提とした結論発見器の構築を行った。そのために最良優先探索に基づく結論発見手続きを考案し、良いタブローを選択するための様々なヒューリスティクスの評価検討を行った。また単位補題の広範な抽出手法、持ち上げ補題と分岐補題に基づく冗長なタブローの削減手法、タブローの拡張操作の遅延評価技術等を考案・実装し、従来のトップダウン型結論発見システムを上回る性能向上を達成した。

(2) ボトムアップ型推論手続きにおいて定評のある制限資源下での探索戦略をタブローの評価尺度として導入し、一定の性能向上が得られることを示した。

(3) 命題論理版 SOLAR の実現のため、SOL タブロー手続きに、矛盾からの節学習やバックジャンプ法、高速単位伝搬等の手法を導入したソルバーを試作し性能評価を行った。その結果、一階の SOLAR より性能は向上するものの、SAT ソルバーが対象とするような大規模問題ではスケーラビリティの点で難があることが判明した。そこで、SAT ソルバーを直接利用する反駁定理に基づく結論発見手法を考案した。この手法では、年々性能が向上

する SAT ソルバーの高速性を生かすことが可能である。また、SAT ソルバーにおけるインクリメンタル探索や矛盾の原因解析技術を利用した仮説候補の枝刈り手法と、SAT 問題に含まれるシンメトリー情報を抽出し、それに基づく仮説候補の枝刈り手法を考案し、それらを実装した命題版結論発見システムを試作した。評価実験により、種々の枝刈り技術の導入によって性能が改善することを示した。仮説生成や結論発見時の包摂検査の高速化が今後の検討課題である。

(4) 命題論理版結論発見器における推論エンジンとなる SAT ソルバーの性能改善のため、学習節の評価尺度やリスタート戦略を改善し、軽量で動的な簡単化技術を実装した SAT ソルバー GlueMiniSat を開発した。GlueMiniSat は、2011 年の SAT 競技会の応用 UNSAT 部門にて優勝、2013 年の同部門でも 2 位を獲得する成績を収めた。

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)

K. Inoue, A. Doncescu, H. Nabeshima, Completing causal networks by meta-level abduction, Machine Learning, 査読有, Vol.91, Issue 2, pp.239-277, 2013.

H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue, On-The-Fly Lazy Clause Simplification based on Binary Resolvents, Proc. of IEEE 25th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013), 査読有, pp.987-995, 2013.

鍋島 英知, 岩沼 宏治, 井上 克巳, GlueMiniSat2.2.5: 単位伝搬を促す学習節の積極的獲得戦略に基づく高速 SAT ソルバー, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol.29, No.4, pp.146-160, 2012.

K. Inoue, A. Doncescu, H. Nabeshima, Hypothesizing about Causal Networks with Positive and Negative Effects by Meta-level Abduction, Inductive Logic Programming: Revised Papers from the 20th International Conference (ILP '10), 査読有, Vol.6489, pp.114-129, 2011.

岩沼 宏治, 鍋島 英知, 井上 克巳, 一階論理上の等号推論: 理論と実際, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol.28, No.4, pp.282-305, 2011.

[学会発表](計 17 件)

H. Nabeshima, Lazy Extension for SOL tableau calculus, The 5th JFLI-NII-LRI Workshop on Formal Approaches for Modeling and Analyzing

Biological Networks, 2013 年 10 月 9 日, LRI (フランス).

渡辺 大樹, 鍋島 英知, 最新 SAT ソルバーへの充足不能コア抽出手法の実装, 第 27 回人工知能学会全国大会, 2013 年 6 月 5 日, 富山国際会議場 (富山県).

森 淳, 鍋島 英知, 拡張融合法に基づく次世代 SAT ソルバーの試作, 第 27 回人工知能学会全国大会, 2013 年 6 月 5 日, 富山国際会議場 (富山県).

H. Nabeshima, A Best-First Search Strategy for SOL Tableau Calculus, The 4th JFLI-LRI-NII Workshop on Consequence Finding and Satisfiability Testing in Distributed Environments and Systems Biology, 2012 年 11 月 19 日, LRI (フランス)

寄特 勇紀, 鍋島 英知, 結論発見システム SOLAR の分割統治法による高速化, 第 26 回人工知能学会全国大会, 2012 年 6 月 12 日, 山口県教育会館 (山口県).

村松 匠, 鈴木 健士郎, 鍋島 英知, 岩沼 宏治, 高速充足可能性判定器を用いた命題論理の結論発見器の実装, 第 26 回人工知能学会全国大会, 2012 年 6 月 12 日, 山口県教育会館 (山口県).

大橋 弘幸, 鍋島 英知, 学習節評価尺度 LBD に基づく並列 SAT ソルバーの提案, 第 26 回人工知能学会全国大会, 2012 年 6 月 12 日, 山口県教育会館 (山口県).

鍋島 英知, 高速 SAT ソルバーの実装と理論 (招待講演), 第 15 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, 2012 年 3 月 5 日, 御宿東鳳 (福島県).

鈴木 健士郎, 鍋島 英知, 岩沼 宏治, 充足可能性判定器に基づく命題論理の結論発見器の提案, 第 85 回人工知能学会人工知能基本問題研究会, 2012 年 2 月 3 日, KKR 下呂しらさぎ (岐阜県).

村松 匠, 鍋島 英知, SAT ソルバーの探索戦略効率化に向けた合理的尺度の導入検証, 第 85 回人工知能学会人工知能基本問題研究会, 2012 年 2 月 3 日, KKR 下呂しらさぎ (岐阜県).

寄特 勇紀, 鍋島 英知, SOL タブロー計算法の分割統治アルゴリズムの検討, 第 85 回人工知能学会人工知能基本問題研究会, 2012 年 2 月 3 日, KKR 下呂しらさぎ (岐阜県).

金澤 潤二, 鍋島 英知, 局所対称性除去による CDCL ソルバーの効率改善に向けて, 第 84 回人工知能学会人工知能基本問題研究会, 2011 年 12 月 16 日, 慶応義塾大学.

H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue, Scalability Improvement of SOL Tableau Calculus based on a Divide-and-Conquer Strategy, The 3rd LRI-NII Collaborative Meeting on

Distributed Reasoning and Problem Decomposition, 2011年10月31日, LRI (フランス).

金澤 潤二, 鍋島 英知, 局所対称性除去による CDCL ソルバーの効率化手法の検討, 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会, 2011年9月27日, 沖縄産業支援センター(沖縄県).

鈴木 健士郎, 鍋島 英知, SOL タブロー計算法に基づく命題論理の充足可能性判定器の実現, 第 25 回人工知能学会全国大会, 2011年6月3日, いわて県民情報交流センター(岩手県).

村松 匠, 鍋島 英知, ポートフォリオ型戦略の導入による結論発見システム SOLAR の効率改善, 2011年6月2日, いわて県民情報交流センター(岩手県).

寄特 勇紀, 鍋島 英知, 結論発見手続き SOL タブロー計算法の分割統治法に基づく効率化, 第 25 回人工知能学会全国大会, 2011年6月1日, いわて県民情報交流センター(岩手県).

[その他]

ホームページ等

- 結論発見システム SOLAR
<http://solar.nabelab.org/>
- 命題論理の充足可能性判定器 GlueMiniSat
<http://glueminisat.nabelab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鍋島 英知 (NABESHIMA, Hidetomo)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号: 10334848