

平成22年5月26日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19700135  
 研究課題名（和文）SATプランニングとスケジューリングの高度化・高速化に関する研究  
 研究課題名（英文）A Study of Advanced and Effective SAT Planning and Scheduling  
 研究代表者  
 鍋島 英知（NABESHIMA HIDETOMO）  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
 研究者番号：10334848

研究成果の概要（和文）：命題論理の充足可能性問題（satisfiability problem; SAT 問題）を利用した SAT プランニングや SAT スケジューリングなどの問題解決手法では、一般に複数の SAT 問題を解く必要がある。これら複数の SAT 問題を効率良く解くために、我々は、探索過程で得られる補題・仮説・モデルを再利用する PC クラスタ向け分散協調 SAT ソルバ SatCube を開発した。また、SAT プランニングの適用範囲拡大のため順序符号化法に基づく拡張の検討と、SAT スケジューリングに対する各種の高速化技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：Propositional satisfiability (SAT) problems and its high performance solvers are used for solving various problems, such as planning and scheduling, which are encoded into SAT instances. Generally, SAT encoding approaches need to solve multiple SAT instances. In order to solve such multiple SAT instances, we have developed a distributed and cooperative SAT solver SatCube, which reuse lemmas, hypotheses and models during the search process and can solve multiple SAT instances efficiently. We have studied SAT planning to extend the application area based on ordered encoding, and proposed various speed-up techniques for SAT scheduling.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	0	1,600,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	510,000	3,810,000

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：充足可能性問題，プランニング，スケジューリング，分散協調

## 1. 研究開始当初の背景

命題論理の充足可能性問題 (satisfiability problem; SAT 問題) を解く SAT ソルバは、近年劇的な性能向上を果たしている。Chaff や MiniSat などの最新のソルバは数十万変数からなる SAT 問題を実用的な時間内で解くことが可能である。この SAT ソルバの性能向上を利用して、プランニングやスケジューリング等の問題に対し、それを直接解くのではなく、いったん SAT 問題に変換してから SAT ソルバにより解く手法 (ここでは SAT 符号化手法と呼ぶ) が活発に研究されている。例えば、プランニングの研究分野においては、SAT 符号化手法に基づく SAT プランナが過去 2 回の国際プランニング大会 (IPC04, IPC06) の古典的な STRIPS 形式のプランニング部門において優勝している。またスケジューリングの研究分野においては、オープンショップスケジューリング問題に対する SAT 符号化手法が、それまで最適値が不明であった 3 つの問題を解くという成果を示している。このように SAT ソルバを利用した問題解決手法は大きな可能性を秘めているといえる。

## 2. 研究の目的

SAT ソルバを利用した問題解決手法では、どのように SAT 問題へと符号化するのが重要となる。これまでの研究において、Crawford と Baker により提案されたジョブショップ・スケジューリング問題に対する SAT 符号化手法が、整数値の制約を含む問題の符号化に対して非常に効率的であるという知見を得ている。そこで本研究では、この Crawford らによる符号化を基に、古典的プランニングを拡張した (1) SAT プランニングの高度化と (2) SAT スケジューリングの高速化に取り組む。また、基盤推論エンジンとなる SAT ソルバの高速化のために、(3) 符号化に特化した SAT ソルバの開発と、SAT による問題解決手法のための (4) 分散協調 SAT システムの開発を行う。以下では各目的に対する研究方法について説明する。

## 3. 研究の方法

### (1) SAT プランニングの高度化に関する研究

SAT プランニングは、先に述べたように STRIPS 形式のプランニング問題において大きな成果を示しているが、近年のプランニング研究では、より実用的な応用を目指して、アクションの実行時間を考慮したプランニングや、数値の導入 (例えばロボットが 1 m 移動するのに一定の電力が必要など)、できる限り満たすことが望ましい弱制約の導入など、より高度な問題を定式化し、プランを求める研究が盛んに行われている。このような STRIPS 形式よりも豊かな表現力を持ったプランニング問題に関する研究では、その多

くが専用の探索アルゴリズムに基づく手法を用いており、SAT を利用したプランナに関する研究はあまり進められていない。そこで我々は、Crawford らによる符号化手法を応用し、古典的な STRIPS 形式のプランニング問題だけでなく、より高度なプランニング問題を SAT 変換する手法を開発することで、高速なプランニングシステムの構築を目指す。

### (2) SAT スケジューリングの高速化

これまでの予備的な調査によって、上述の Crawford 符号化には、いくつか冗長な点があることが分かっている。その冗長性を取り除いて試験的に評価したところ、SAT 問題の解決時間を安定して改善できることを確認している。本課題では、さらに効率の良い簡潔な符号化手法について検討を行う。

また、SAT プランニング手法が大きく成功した要因の 1 つに、プランニング問題を直接 SAT に変換するのではなく、いったん粗く探索した後に変換するという 2 段階の探索手法が挙げられる。SAT スケジューリングにおいても、SAT プランニングと同様に粗い探索を行うための中間形式について模索する。

### (3) 高速 SAT ソルバの開発

SAT プランニングや SAT スケジューリングなどの SAT 符号化手法によって生成される SAT 問題には、ランダムに生成された SAT 問題にはない特有の構造が表れる。この構造を利用して、SAT ソルバの基本的戦略である DPLL 手続きにおける変数選択ヒューリスティクスに対し、符号化に特化したバイアスかけることによって SAT ソルバの効率向上が図れる可能性があり、その検討を行う。

一方、近年の CPU においては、シンプルな CPU コアを複数搭載するマルチコア化が大きな技術動向となっており、今後、CPU コア単体の性能向上はあまり期待できなくなりつつある。従って、これからのソフトウェア開発においては、ハードウェアの技術革新による性能向上に頼るだけでなく、並列プログラミングの活用によるソフトウェア側の努力が求められている。本研究で実装する SAT ソルバにおいても、この技術動向を反映して、複数の SAT ソルバスレッドによって 1 つの SAT 問題を協調的に解く手法の開発・実装を行う。共有メモリ環境の利点を生かし、SAT ソルバスレッド間での補題の高速な交換や SAT 問題の分割などを行い、高速な SAT ソルバの開発を試みる。

### (4) 分散協調 SAT システムの開発

SAT プランニングや SAT スケジューリングなどの SAT を利用した問題解決手法では、一般的に元の問題から複数の SAT 問題が生成され、充足可能な SAT 問題に出会うまで各 SAT

問題を順次解く必要がある(図1).

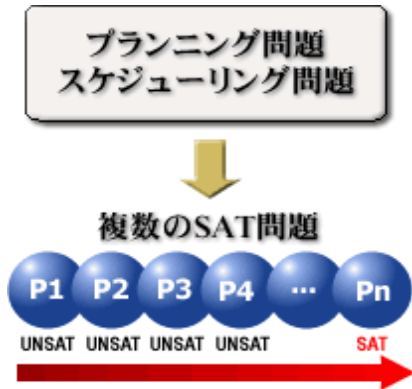


図1. SAT 符号化手法

これら複数の SAT 問題は、それぞれの充足可能性にかかわらず独立して生成することが可能である。従って、これらの SAT 問題をあらかじめ生成しておき、分散環境下で並行に解くことは効率化のための自然な解法である。そこで本研究では、これまでに開発してきた補題再利用技術を拡張し、複数の SAT 問題を複数の計算機上で協調しながら解く分散協調 SAT システムの構築を行う。分散 SAT ソルバに関する研究はこれまでもいくつか行われているが、本研究では複数の SAT 問題を分散環境下で効率良く解くことに主眼を置く点が大きく異なる。

#### 4. 研究成果

##### (1) SAT プランニングの高度化に関する研究

数値制約を含むプランニング問題に対して、Hoffmann らの手法を基に、順序符号化法を組み合わせる手法の検討を行った。Hoffmann らの手法では、数値変数がある1つの値をとることを1つの命題変数に対応づける直接符号化に基づくが、我々の提案する手法では数値の特定の範囲を1つの命題に対応づける順序符号化法を利用する。実装と評価は今後の課題であるが、これまでの順序符号化法に対する各種の成果より、プランニング問題においても高速化されることが期待できる。また SAT 符号化後のサイズも、直接符号化と比較して小さくなるため、従来よりも大規模な問題を扱うことができると考えられる。

##### (2) SAT スケジューリングの高速化

SATスケジューリングでは、すべてのジョブが完了する最短時間を求めるために、複数の SAT問題を解く必要がある。これを高速化するために、これまで SAT ソルバが学習する補題を各問題間で共有・再利用する手法を提案してきたが、本研究ではそれに加えて、

- 緩和問題に相当するSAT問題を解くことで、最適値の存在する範囲を推定する手法

- SAT 問題を充足するモデルを再利用する手法
  - SAT 問題における仮説(全ジョブ終了時間に関する仮説)を再利用する手法
- を考案し、その評価を行った。その結果、従来手法と比較して大きく高速化できることを確認した(図2)

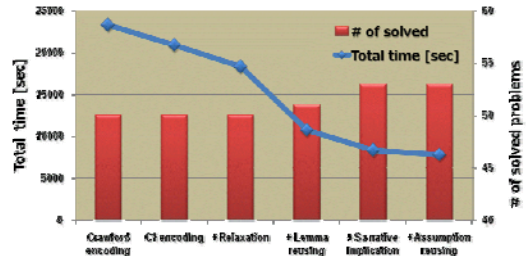


図2. 性能向上の推移

また、これまで未解決であったジョブショップ・スケジューリング問題 6 問に対して、順序符号化法と大規模計算クラスタを利用することで、2 問の最適値決定と、4 問の下界更新、1 問の上界更新に成功した。最適値決定に成功した 2 問の問題は 20 年以上も未解決であった問題である。また 2SPP (two-dimensional strip packing problem) における 38 問のベンチマーク問題に対しても、順序符号化法に基づく SAT 変換により、1 問の未解決問題を含んだ 29 問の最適値の決定に成功している。

##### (3) 高速 SAT ソルバの開発

符号化に特化した SAT ソルバとして、順序符号化法において大量に生成される長さ 2 の節に対して、それらの節における単位伝搬をソルバ内部でシミュレートすることで、処理の高速化とメモリ使用量の低減を図ったソルバを開発した。スケジューリング問題に対して実験した結果、約 1.3 倍程度高速化できることを確認した。

一般に、SAT 問題にはしばしばシンメトリーが含まれる。シンメトリー関係にある変数は、それを同一視することで探索の重複を避けることができるため、高速化にとって重要である。そこで Ashish により提案されたシンメトリー情報を利用した多分木探索技術を最新の SAT ソルバ MiniSat に導入したソルバ SymMini を試作した。240 問のベンチマーク問題に対する評価実験の結果、シンメトリー情報を利用することで大幅に高速化できることを確認した。

また、複数の CPU コアを搭載した PC が普及傾向にあることを踏まえ、最新の逐次型 SAT ソルバを基にマルチコア環境向け並列 SAT ソルバの試作を行った。従来のマルチコア環境向けの並列 SAT ソルバの多くは、複

数の SAT ソルバスレッドを並行して実行し、学習節の交換等により性能の改善を図っている。我々は、単に複数の SAT ソルバスレッドを並列に実行するのではなく、アルゴリズムの中でも処理時間が最もかかる単位節発見と真偽値伝搬処理の並列化について検討を行った。その結果、最新の逐次型 SAT ソルバを基に並列化することは細やかな排他処理を必要とするためオーバーヘッドが大きく非常に困難であり、データ構造の抜本的な見直しが必要になることが分かった。

現在主流の SAT ソルバは DPLL 手続きに基づいているが、極小集合被覆を列挙するアルゴリズムをベースに、最新の SAT ソルバにおける各種の高速化技術の導入することで、CNF/DNF 変換を効率的に行う手法の検討を行った。この手法の簡易版は、一階述語論理の結論発見システム SOLAR において、大規模な仮説発見問題から仮説を高速に列挙するために用いられ、数十倍以上の大きな速度の向上をもたらしている。

#### (4) 分散協調 SAT システムの開発

SAT プランニングや SAT スケジューリングなど、SAT を用いた問題解決手法では、一般的に複数の SAT 問題を解く必要がある。我々が開発した SAT ソルバ SatCube は、これら複数の SAT 問題を効率良くするための分散協調 SAT システムである。SatCube は、MPI (Message Passing Interface) ベースの分散協調システムであり、複数の CPU コアを搭載した 1 台の PC や、それらの PC が複数集まった PC クラスタ上で動作する。システムの構築にあたっては、各 SAT 問題をどのように PC に割り当てるのかを決定する割当戦略の検討、SAT 問題の高速な分割方法の確立、探索失敗の記録である学習節の共有と再利用、複数の探索戦略の並列実行、冗長な部分 SAT 問題の検出などの手法を考案し、実装を行った。7 台の PC を用いた予備的な評価実験の結果、約 5 倍の速度向上が得られることを確認した。

最新の SAT ソルバにおいては従来型の単純な網羅的問題分割では探索空間が重複し、PC の台数増加とともに性能向上の鈍化が見られた。これを改善するため、複数の異なるリテラルに適切な真偽値を割り当て、適度な規模の部分問題に分割する手法を考案した。評価実験によって、従来手法よりも効率良く求解可能になることを確認した。

本システムは、SAT を用いた問題解決手法において幅広く利用可能であり、今後ソフトウェアの整備とスケーラビリティの検証と改善を進める予定である。

#### 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 8 件)

- ① 鍋島英知, 宋剛秀: 高速SATソルバーの原理, 人工知能学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 68-76, 2010, 査読無.
- ② 岩沼宏治, 鍋島英知: SMT: 個別理論を取り扱う SAT 技術, 人工知能学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 86-95, 2010, 査読無.
- ③ 鍋島英知: SAT によるプランニングとスケジューリング, 人工知能学会誌, Vol. 25, No. 1, pp. 114-121, 2010, 査読無.
- ④ Hidetomo Nabeshima, Koji Iwanuma, Katsumi Inoue and Oliver Ray: SOLAR: An Automated Deduction System for Consequence Finding, AI Communications, Vol. 23, No. 2-3, pp. 183-203, 2010, 査読有.
- ⑤ Katsumi Inoue, Taisuke Sato, Masakazu Ishihata, Yoshitaka Kameya, and Hidetomo Nabeshima. Evaluating Abductive Hypotheses using an EM Algorithm on BDDs. Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-09), pp. 810-815, 2009, 査読有.
- ⑥ Miyuki Koshimura, Hidetomo Nabeshima, Hiroshi Fujita and Ryuzo Hasegawa. Minimal Model Generation with Respect to an Atom Set, Proceedings of the 7th International Workshop on First-Order Theorem Proving (FTP 2009), pp. 49-59, Oslo, Norway, July 6-7, 2009, 査読有.
- ⑦ Takehide Soh, Katsumi Inoue, Naoyuki Tamura, Mutsunori Banbara, and Hidetomo Nabeshima. A SAT-based Method for Solving the Two-dimensional Strip Packing Problem. Proceedings of the 15th International RCRA workshop (RCRA 2008): Experimental Evaluation of Algorithms for Solving Problems with Combinatorial Explosion, Vol. 451, pp. 25-39, 2008, 査読有.
- ⑧ Hidetomo Nabeshima, Koji Iwanuma, and Katsumi Inoue. A Complete Pruning Methods and a Practical Search Strategy for SOL, Proceedings of the LPAR 2008 Workshops on Knowledge Exchange: Automated Provers and Proof Assistants and The 7th International Workshop on the Implementation of Logics (IWIL 2008), pp. 113-122, Vol. 418, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 越村三幸, 鍋島英知, 藤田博, 長谷川隆三: SAT変換による未解決ジョブショップ・スケジューリング問題への挑戦, ス

ケジューリング・シンポジウム 2009 講演  
論文集, pp.209-213, 岡山大学,  
2009.9.17.

- ② 高見明秀, 鍋島英知, 岩沼宏治, 並列分散型SATソルバにおける探索空間の分割手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE-SS-444, pp.23-28, 佐賀大学, 2009.3.2.
- ③ 高見明秀, 鍋島英知, 岩沼宏治: マルチコア環境に向けた高速並列SATソルバの開発, 第6回情報科学技術フォーラム, F-45, pp.447-450, 中京大学, 2007.9.7.
- ④ 高見明秀, 鍋島英知, 岩沼宏治: マルチコア環境向け並列SATソルバの開発, 電子情報通信学会技術研究報告 AI2007-2, pp.7-12, 機会振興会館, 2007.5.24.

[図書] (計 1 件)

- ① 松原 仁, 他, ナノオプトニクスエナジー, ロボット情報学ハンドブック, pp.392-400, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鍋島 英知 (NABESHIMA HIDETOMO)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号: 10334848

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし