

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22700005

研究課題名(和文)高性能並列メタ戦略アルゴリズムの開発

研究課題名(英文)Development of high-performance parallel metaheuristic algorithms

研究代表者

今堀 慎治 (Imahori, Shinji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90396789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：メタ戦略アルゴリズムの性能と計算速度を飛躍的に高めることを目的として研究を実施した。研究のポイントとなるアイデアは、メタ戦略と既存の最適化手法(数理計画・動的計画・分枝限定法)の融合による高性能化と、提案アルゴリズムの高度な並列計算環境における運用である。とくに組合せ最適化問題に対する実用的解法の開発を主眼におき、メタ戦略の高性能化と高速化のそれぞれを実現する手法について、基礎研究を中心に研究を進めてきた。実社会において重要な課題である、図形配置問題、スケジューリング問題、ネットワーク設計最適化問題のそれぞれに対して、高速・高性能なメタ戦略アルゴリズムの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to improve metaheuristic algorithms with respect to speed and solution quality. We design hybrid metaheuristic algorithms, which are based on metaheuristic algorithms and several mathematical programming techniques including dynamic programming and branch-and-bound method. We treat many combinatorial optimization problems including cutting and packing problem, scheduling problem and network design optimization problem. For each problem, we could develop high performance metaheuristic algorithms.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：数理情報学 情報学基礎 組合せ最適化 メタ戦略

1. 研究開始当初の背景

社会や産業で解決を求められている問題の多くが組合せ最適化問題であり、その大半は非常に難しい(NP困難である)ことが知られている。これに加えて、情報技術の飛躍的な発展に伴い、解くべき問題の規模は増大の一途をたどっており、厳密な最適解を常に追求することは現実的とは言えない。このような背景の下、最適解を求める保証は持たないが、短時間で比較的良質な近似解を見出すことのできるメタ戦略の有用性が広く認知され、高速で高性能なメタ戦略アルゴリズムを開発することが重要な課題となっている。

メタ戦略アルゴリズムの性能向上を狙った技法に、数理計画・動的計画・分枝限定法などの手法とメタ戦略を組み合わせたハイブリッドメタ戦略がある。申請者はこれまでに、配置問題(長方形配置問題、多角形配置問題)に対するハイブリッドメタ戦略の提案を行った。また、巡回セールスマン問題の一般化である配送計画問題に対して、動的計画法・グラフ理論をメタ戦略に組み込んだハイブリッドメタ戦略アルゴリズムの開発を行ってきた。本研究ではこれらの研究で得た知見に基づき、より広範な組合せ最適化問題に適用可能な、高性能メタ戦略アルゴリズムを開発する。

アルゴリズムの実用性を評価する上で、計算時間(計算量)は最も重要な指標であり、ソフトウェアとハードウェアの両面から高速化の取り組みが行われてきた。これまではハードウェアの計算速度が指数的に向上し、あらゆるアルゴリズムが計算機性能向上の恩恵を受けてきた。しかし、計算機(単体の)性能向上の限界が近付いており、今後は計算機クラスターやグリッドコンピュータに代表される、高度な並列計算環境を活用できるアルゴリズムの開発が重要となる。一般的にメタ戦略アルゴリズムは並列計算との親和性は高く、単純な並列メタ戦略は1990年頃から提案されてきた。しかし、本研究で対象とする複雑なハイブリッドメタ戦略を効率的に並列化する手法は確立されておらず、本研究において、次世代の計算資源を十分に活用することのできる高性能並列メタ戦略アルゴリズムの開発を行う。

2. 研究の目的

本研究は、難しい組合せ最適化問題に対する実用的なアルゴリズムの開発を目的とし、その実現のためメタ戦略アルゴリズムの性能と計算効率を向上させる手法の研究を行う。申請者らは従来研究において、メタ戦略と数理計画・動的計画等を融合することによる高性能アルゴリズムの開発に取り組み、代表的な組合せ最適化問題である配置問題・配送計画問題に対するハイブリッドメタ戦略アルゴリズムを提案した。本研究では、以下の3つの取り組みを通して、組合せ最適化問題に対する実用的な解法としての「高性能並

列メタ戦略アルゴリズム」の提案を行う。

1. メタ戦略と既存の最適化手法の融合による高性能化

数理計画・動的計画・分枝限定法などの最適化手法とメタ戦略を融合することにより、アルゴリズム性能の向上を実現し、その理論的裏打ちを確保する。申請者らはこれまでに、配置問題・配送計画問題に対して一定の研究成果を挙げているが、スケジューリング問題・ネットワーク設計問題等の重要で大規模な問題に対するアルゴリズムの開発を行うことで、メタ戦略と既存最適化手法の融合という枠組み(ハイブリッドメタ戦略)の有用性と汎用性を示す。

2. 高度な並列計算環境におけるメタ戦略の効率的な運用

計算機クラスターやグリッドコンピュータなどの高度並列計算環境に関する研究が進み、実際に利用可能な計算資源として整備が進められている。また、標準的なパソコンにも複数のCPUコアが搭載されるようになった。このような現況において、並列計算環境の持つ性能を十分に発揮させることのできるアルゴリズムの開発は重要な課題である。本研究では、共有メモリ環境と分散環境のそれぞれに対し、効率的に実行可能な並列メタ戦略アルゴリズムの設計を行う。特に、問題の適応的な分割と、計算によって得られる知識の共有と活用を中心に研究を行う。

3. 高性能並列メタ戦略アルゴリズムの開発

1でメタ戦略アルゴリズムの高性能化、2で並列計算環境を活用した高速化の検討を行った上で、これらを同時に実現する方法を提案する。前者は標準的なメタ戦略アルゴリズムと比べ複雑な構造を有するアルゴリズムの設計となり、後者は並列化可能な機能への制限となることから、全てのハイブリッドメタ戦略アルゴリズムを並列計算へ拡張することは困難となることが予想される。上の2つの取り組みの中で、様々な視点からの高性能化・高速化の可能性を探り、共存が可能な手法を組み合わせ、高性能並列メタ戦略アルゴリズムの提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、組合せ最適化問題に対する実用的解法の開発にあたり、まずメタ戦略の高性能化と高速化のそれぞれを実現する手法を提案し、続いて提案手法の融合による高性能並列メタ戦略アルゴリズムの開発を行う。以下に具体的な研究の方法を述べる。

メタ戦略の高性能化に関しては、まず、センサネットワークやインターネットの基盤ネットワークの効率的な設計・運用をモデル化したネットワーク設計問題に対して、ハイブリッドメタ戦略アルゴリズムの提案を行う。本問題に関する調査・検討は従来研究においてすでに行っており、数理計画法をメタ戦略と組み合わせることによる高性能アル

ゴリズムの構築が可能と予想している。本研究においてアルゴリズムの提案・実装を行い、計算実験を通じてその有用性を検証する。

次に、申請者が従来研究において開発した配置問題に対するメタ戦略及びハイブリッドメタ戦略アルゴリズムの並列化に取り組む。開発済アルゴリズムは、メタ戦略（反復局所探索法）と動的計画法を組み合わせたハイブリッドメタ戦略であり、a)複数の局所探索の並列化、b)動的計画法の子問題への分割の2つの視点を中心に並列化の取り組みを行う。

上記の課題への取り組みに続いて、社会や産業からの要請の強い、スケジューリング問題に対するハイブリッドメタ戦略アルゴリズムの開発を行う。申請者は従来研究において、スポーツスケジューリング問題に対する精度保証付き近似解法の開発を行ってきた。この研究で得た知見をもとに、スポーツスケジューリング問題を含むタイムテーブル問題に対するハイブリッドメタ戦略を提案する。具体的には、分枝限定法とメタ戦略の融合による効率的解法の設計を中心に、アルゴリズム設計方針を検討する。また、生産スケジューリング問題に対して、動的計画法を組み込んだメタ戦略の提案も行う。

メタ戦略の高速化に関しては、従来研究で扱った配送計画問題及び本研究でハイブリッドメタ戦略を開発する2つの問題（ネットワーク設計問題・スケジューリング問題）に対して、並列メタ戦略アルゴリズムの提案を行う。小規模な共有メモリ環境における並列化の研究、ならびに大規模な分散環境を活用することのできるアルゴリズムの特徴を精査し、それに基づく解法の提案を行う。配送計画問題に対しては、複数の解を組み合わせることによる新たな解の生成に注目して研究を進める。ネットワーク設計問題に関し、特に大規模なネットワークが与えられる場合に、問題の適応的な分割法についての検討を行う。スケジューリング問題に対しては、非常に巨大な解空間となることが知られており、解空間の効果的な分割法に関する研究を行う。

上記の2つ方向性の研究をあわせることにより、高性能並列メタ戦略の開発を行う。高性能化と並列化の両立を念頭において、

・ の研究を進めるが、全ての組合せが効果的なアルゴリズム設計につながるとは限らない。本研究において、高性能化・高速化につながる多方向からの取り組みを行い、共存可能な手法についてアルゴリズムの提案・実装・計算実験を行う。

4. 研究成果

本研究で実施した研究内容の概略は次項のとおりである。詳細については、発表論文等を参照いただきたい。

）高性能並列メタ戦略アルゴリズムの基礎となるアルゴリズムの設計ならびに解析

スポーツスケジューリング問題や図形配置問題などに対して効率的アルゴリズムの設計を行った。提案アルゴリズムの評価にあたっては、理論解析を行うとともに、数値実験による検証を行った。これらのアルゴリズムをもとに、より効率的で実用的なアルゴリズムの設計が期待される。取り扱った問題に対する研究成果は以下の通りである。

・ 配置問題に対するアルゴリズム開発：配置問題とは、入力として与えられた図形の集合を、ある領域にできるだけ密に配置する問題である。本研究では、長方形、多角形、直方体およびレクトリニア図形のそれぞれに対して、高速かつ高性能に動作する実用的解法を設計した。

・ スポーツスケジューリング問題に対する近似解法設計：移動距離を考慮したリーグ戦スケジュール設計問題に対して、理論的な精度保証をもつ近似アルゴリズムの設計を行った。

）メタ戦略と既存の最適化手法の融合による高性能化

センサネットワークの効率的な設計・運用をモデル化したネットワーク設計問題に対して、数理計画と局所探索を併用したハイブリッドアルゴリズムの提案を行った。数理計画手法として数理計画法やラグランジュ緩和法を用い、これらの手法と局所探索を組み合わせることにより高性能なアルゴリズムの構築に成功した。提案手法を実在するネットワークをもとに作成されたベンチマーク問題などによって評価することで、実用性の検証も行った。

このほかに、実社会に現れるナップサック問題に対する実用的なアルゴリズムの開発など、実際に役立つアルゴリズムを開発することに成功した。

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8件)

R. Miyashiro, T. Matsui, S. Imahori: An Approximation Algorithm for the Traveling Tournament Problem, *Annals of Operations Research* 194 (2012) 317-324

Y. Tanaka, S. Imahori, M. Sasaki, M. Yagiura: An LP-Based Heuristic Algorithm for the Node Capacitated In-Tree Packing Problem, *Computers & Operations Research* 39 (2012) 637-646
S. Imahori, Y. Miyamoto, H. Hashimoto, Y. Kobayashi, M. Sasaki, M. Yagiura: The Complexity of the Node Capacitated In-Tree Packing Problem, *Networks* 59 (2012) 13-21

Y. Tanaka, S. Imahori, M. Yagiura: Lagrangian-Based Column Generation

for the Node Capacitated In-Tree Packing Problem, Journal of the Operations Research Society of Japan 54 (2011) 219-236

D. Yamaguchi, S. Imahori, R. Miyashiro, T. Matsui: An Improved Approximation Algorithm for the Traveling Tournament Problem, Algorithmica 61 (2011) 1077-1091

S. Imahori, Y. Karuno, H. Nagamochi, X. Wang: Kansei Engineering, Humans and Computers: Efficient Dynamic Programming Algorithms for Combinatorial Food Packing Problems, International Journal of Biometrics 3 (2011) 228-245

J. Cardinal, E. Demaine, M. Demaine, S. Imahori, T. Ito, M. Kiyomi, S. Langerman, R. Uehara, T. Uno: Algorithmic Folding Complexity, Graphs and Combinatorics 27 (2011) 341-351

Md.B. Haider, S. Imahori, K. Sugihara: Success Guaranteed Routing in Almost Delaunay Planar Nets for Wireless Sensor Communication, International Journal of Sensor Networks 9 (2011) 69-75

[学会発表](計17件)

S. Imahori, Y. Karuno, R. Nishizaki, Y. Yoshimoto: Duplex and Quasi-Duplex Operations in Automated Food Packing Systems, 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 810-815 (査読有)

S. Imahori, S. Sakai: A Local-Search Based Algorithm for the Escherization Problem, The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2012), 151-155 (査読有)

Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: A New Construction Heuristic Algorithm for the Rectilinear Block Packing Problem: A Bridge between the Best-Fit and Bottom-Left Algorithms, The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2012), 182-186 (査読有)

S. Imahori: Balanced Round-Robin Tournament with Court Shortage, IFORS 2011

H. Kawashima, Y. Tanaka, S. Imahori, M. Yagiura: Two Efficient Construction Algorithms for the Three-Dimensional Strip Packing Problem, 8th ESICUP Meeting 2011

S. Imahori, Y. Chien, Y. Tanaka,

M. Yagiura: An Efficient Algorithm for Enumerating Bottom-Left Stable Positions and Its Applications, EURO 2010

今堀慎治, 王超: 可変長方形配置問題に対する高速アルゴリズム, 日本オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会, 2013年3月

田中勇真, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 頂点容量制約付き有向全域木パッキング問題に対するラグランジュ緩和に基づく列生成法, 情報処理学会第74回全国大会, 2012年3月

今堀慎治: 組合せ最適化とメタ戦略, 第1回協定講座シンポジウム「計算アルゴリズムと化学・生物学の融合」, 2012年2月

川島大貴, 田中勇真, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 3次元パッキング問題に対するbest-fit法の効率的実現法, 第10回情報科学技術フォーラム, 2011年9月, 講演論文集(第1分冊), pp. 29-36 (査読有)

小木曾由明, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 複雑な個数制約の付いた一般化割当問題について, RIMS研究集会「最適化手法の深化と広がり」, 2011年7月, 数理解析研究所講究録1773, pp. 218-230

田中勇真, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 頂点容量付き有向全域木パッキング問題に対するラグランジュ緩和ヒューリスティック, RIMS研究集会「最適化手法の深化と広がり」, 2011年7月, 数理解析研究所講究録1773, pp. 231-238

S. Imahori, Y. Chien, Y. Tanaka, M. Yagiura: Enumerating bottom-left stable positions for rectangles with overlap, 第9回情報科学技術フォーラム, 2010年9月, 講演論文集(第1分冊), pp. 25-30 (査読有)

川島大貴, 田中勇真, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 3次元箱詰め問題に対する構築型解法の効率的実現法, 第9回情報科学技術フォーラム, 2010年9月, 講演論文集(第1分冊), pp. 31-38 (査読有)

今堀慎治, 簡于耀, 田中勇真, 柳浦睦憲: Bottom-Left安定性の効率的な列挙法とその応用, RIMS研究集会「最適化モデルとアルゴリズムの新展開」, 2010年7月, 数理解析研究所講究録1726, pp. 39-49

川島大貴, 田中勇真, 今堀慎治, 柳浦睦憲: 3次元パッキングに対する効率的なbottom-left法, RIMS研究集会「最適化モデルとアルゴリズムの新展開」, 2010年7月, 数理解析研究所講究録1726, pp. 50-61

小島義弘, 山本有作, 今堀慎治, 張紹良: ある在庫管理問題に対する分枝限定法の応用, RIMS研究集会「最適化モデ

ルとアルゴリズムの新展開」, 2010 年 7
月, 数理解析研究所講究録 1726, pp.
184-198

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今堀 慎治 (IMAHORI, Shinji)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90396789