

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25330024

研究課題名(和文) 配置問題に対する高性能アルゴリズムの開発とその応用

研究課題名(英文) Development and Application of Algorithms for Packing Problems

研究代表者

今堀 慎治 (IMAHORI, Shinji)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90396789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：配置問題とは、いくつかの対象物を互いに重ならないように、与えられた領域内に配置する問題であり、多くの分野に応用を持つ代表的な生産計画問題の1つである。本研究では、様々な配置問題に対する実用的高性能アルゴリズムの開発を目指し研究を実施した。研究成果として、まず長方形配置問題に対する基本アルゴリズムを設計し、この手法を活用したレクトリニア図形配置問題に対する複数の構築型解法を提案した。さらにこの手法を、多角形配置問題に応用することに成功した。また、実社会に現れる直方体配置問題に対するアルゴリズムの設計や、配置アルゴリズムの他問題への応用を行い、数値実験による評価を行った。

研究成果の概要(英文)：Packing problem is a problem to place items into one/some large area. There are many applications in the world such as production, LSI design and container loading. In this research, we design many practical heuristic algorithms for this problem. We first design an algorithm for enumerating BL positions for rectangles. With this algorithm, three construction heuristic algorithms for the rectilinear packing problems were proposed. We also propose a practical algorithm for bitmap shapes.

We design some heuristic algorithms for a practical container loading problem, and we apply algorithms for packing problems to other optimization problems.

研究分野：数理情報学

キーワード：数理情報 アルゴリズム 数理工学 組合せ最適化 配置問題

1. 研究開始当初の背景

配置問題とは、いくつかの対象物を互いに重ならないように、与えられた領域内に配置する問題であり、多くの分野に応用を持つ代表的な生産計画問題の1つである。この問題は、対象物や領域の次元、形状、配置制約、目的関数等により非常に多くの種類の問題を含んでいる。たとえば、鉄鋼・ガラス・繊維などの素材産業における、2次元の大きな母材から長方形や複雑な形状の小さい製品を多数切り出す問題、大規模集積回路を設計する問題、倉庫やトラックの効率的な運用のための、3次元形状を詰め込む問題は、すべて実用上重要な配置問題である。大多数の配置問題はNP困難問題に分類されるため、問題の規模が大きい場合、厳密な最適解を求めることが極めて困難であることが認知されている。

厳密な最適解を得ることが難しいという計算量理論の結果と、社会に現れる実問題としての高い重要性から、配置問題に対する有力なアプローチとして、最適性の保証はないが、良質の解を出来るだけ効率良く求めようとする枠組みであるメタ戦略が有力である。実際、配置問題に関する研究集会(EUROの研究グループが主催するESICUP Meetingが代表的である)においても、メタ戦略に基づく実用的近似アルゴリズムが多数発表されている。また、日本国内における配置問題に対する研究成果の一つである、図形の配置という幾何的な問題を、順列対表現に代表される、組合せ的な問題に変換して扱う手法は、世界中に広まっている。

配置問題に対する従来研究の多くは、過分に単純化された問題を対象としたアルゴリズムを設計し、人工的に作られたベンチマーク問題を用いた数値実験によって性能評価するなど、配置問題の実用上の重要性を考慮すると不十分な点があった。また、主に企業で実施される研究では、実社会で生じる具体的な応用問題に対する解法を設計し、実データを用いてアルゴリズムの性能評価を行うものもあったが、これらの研究の多くは配置問題に対する統一的な知見に基づく研究成果ではなく、職人技の結晶と言うべきものであった。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3つの取り組みを通して、様々な配置問題に対する実用的高性能アルゴリズムを開発する。

(1) 基本アルゴリズムの設計と高性能化

これまでに提案されてきた配置問題に対する実用的な高性能アルゴリズムは、構築型解法、配置改善型解法、組合せ表現探索型解法に分類することができる。これらの手法は、それぞれに長所と短所があり、実問題に対する高精度な解を発見するためには、これらの手法の状況に応じた使い分けが重要と考えられる。このため、それぞれのタイプの代表

的かつ高性能なアルゴリズムを構築し、様々な状況におけるアルゴリズムの性能比較を行う。ただし、この段階のアルゴリズムは最終成果物ではないため、汎用性・頑健性の確保も必要である。

(2) 実社会に現れる配置問題への適用

前項で開発した基本アルゴリズムをもとに、実社会に現れる配置問題に対するアルゴリズムを設計し、実データを用いた性能評価を行う。ここで、現実には現れる配置問題は多数あり、それぞれに対して十分な検討・開発の時間を取ることはできない点に注意が必要である。

(3) 配置アルゴリズムの他問題への応用

本研究では、配置問題に対するメタ戦略に基づく高性能アルゴリズムを開発するが、他の問題を解く際にこれらの成果が利用可能なことも考えられる。配置アルゴリズムのこの種の応用についても提案する。

3. 研究の方法

様々な配置問題に対する高性能アルゴリズムを開発するためには、異なるタイプの高性能基本アルゴリズムを複数開発し、これらを場面に応じて使い分けことが重要である。まず、これまでに実施した研究を基盤として、配置問題に対する構築型解法、組合せ表現探索型解法、配置改善型解法をそれぞれ個別に設計する。ここで、配置問題には様々なバリエーションがあり、アルゴリズム設計において共通化できる部分と個別に対応が必要となる部分がある点に注意が必要である。次に、これらの解法を様々な状況において比較することで、状況に応じた適切な解法の選択を可能とする知見を得る。この知見をもとに、実社会に現れる様々な配置問題に対する高性能アルゴリズムを開発し、数値実験を通して評価を行う。

4. 研究成果

(1) 長方形配置問題に対するアルゴリズム

配置問題の中でも最も基本的な問題として、複数の小さい長方形を1つもしくは複数の大きい長方形(容器)に配置する問題(長方形配置問題と呼ばれる)がある。この問題に対する構築型解法の多くは、長方形を1つずつ配置する際に、配置場所から下にも左にも動くことのできない、「BL(Bottom Left)安定」と呼ばれる位置に配置する。このため、いくつかの長方形が配置された容器に対して、新たに配置する長方形のためのBL安定な点を列挙する手法が必要とされており、これまでにそのような手法が複数提案されてきた。

我々は、論文[9](主な発表論文等の項目を参照;以下同様)において、BL安定な点を高速に列挙する手法を提案した。この手法は、容器内に置かれた長方形に関する仮定が不

要であり、幅広い構築型解法、ならびに配置改善型の解法においても利用できるという特徴がある。また、提案手法は、長方形配置問題のみではなく、後述するレクトリニア図形配置問題や、3次元の直方体配置問題に対する構築型解法設計の際にも利用できる。論文[9]では、アルゴリズムと適切なデータ構造の提案、計算量の理論的解析、ならびに計算機実験による評価を通して、提案手法の有用性を示した。

(2) レクトリニア図形配置問題に対するアルゴリズム

レクトリニア図形とは、垂直もしくは水平な線分のみからなる2次元図形（例えば、アルファベットのTやLのような形状）である。このような図形をできるだけ密に配置する問題（レクリニア図形配置問題）に対して、3種類の構築型解法を提案した。

まず、論文[7]において、長方形配置問題に対する代表的な構築型解法である、「Bottom Left法」と「Best Fit法」を拡張した手法をそれぞれ提案し、それらの効率的な実現方法を提示した。アルゴリズムの効率的な実現のため、前項(1)で説明したBL安定な座標を列挙する手法を利用し、またデータ構造の工夫による高速化を施している。

次に、論文[6]において、論文[7]で提案した2つの手法の特徴を再解析し、これらの手法を含む新しいアルゴリズムを提案した。提案手法に含まれるパラメータの設定によって、論文[6]の両手法と同様の動作となるとともに、問題データに応じた適切なパラメータの設定方法を提案することで、様々な問題例に対して、質の高い図形配置を得ることに成功した。図1に、レクトリニア図形配置図の一例を示す。

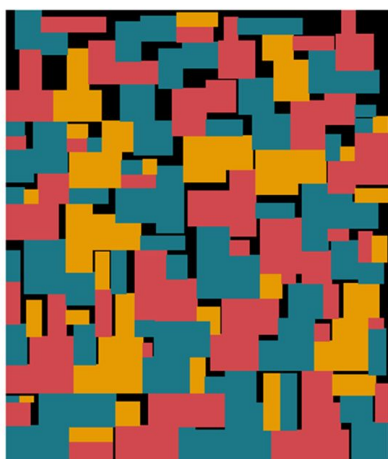


図1 レクトリニア図形の配置図

(3) ビットマップ表現された多角形配置問題に対するアルゴリズム

長方形配置問題やレクトリニア図形配置問題と比べて、さらに一般的な形状を扱う問題として多角形配置問題がある。この問題を

考える上で、図形の表現方法と重なりを検出方法が重要となるが、論文[1]において、多角形をビットマップとして表現し、前述のレクトリニア図形配置問題に対するアルゴリズムを活用することで、効率的な重なり検出手法を提案した。図形配置アルゴリズムとしての計算時間は、図形の数およびビットマップ表現の際の近似度（解像度）に依存するが、理論解析ならびに数値実験により、実用性を確認することができた。特に、図形の数が多い大規模問題に対して、既存手法と比べて大幅な効率化を実現した。図2に、ビットマップ表現で保存された多角形の配置図を示す。

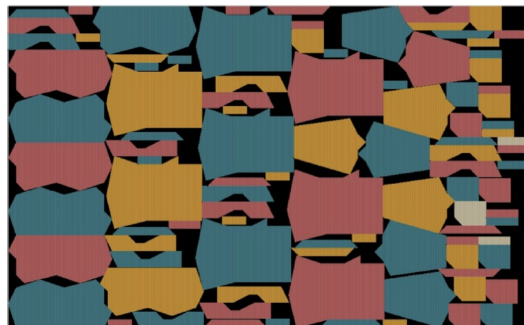


図2 多角形の配置図

(4) 実社会に現れるコンテナローディング問題に対するアルゴリズム

コンテナローディング問題とは、3次元の直方体形状をした複数の荷物を、直方体形状のコンテナに配置する問題であり、トラックや船での輸送、倉庫での荷物保管などの際に現れる問題である。論文[4]では、フランスのルノー社が提供したベンチマーク問題に対する図形配置アルゴリズムの設計と、数値実験による性能評価をおこなった。この論文で扱った問題の特徴として、標準的なベンチマーク問題と比べて多くの複雑な制約条件を考慮する必要がある点があげられる。

提案したアルゴリズムは、配置問題および集合被覆問題に対する既存の最適化アルゴリズムをベースに、この問題に適用するための改良を加えたものであり、本研究の目的欄で述べた、実社会に現れる配置問題に対するアルゴリズム提案の一例と言える。図3に直方体の配置図の一例を示す。

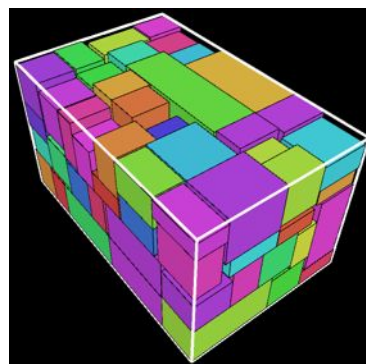


図3 直方体の配置図

(5) 1次元ナップサック問題に対するアルゴリズムの設計とその応用

配置問題においてもっとも単純な1次元の詰め込み問題に対するアルゴリズムの設計と、他問題への応用を行った。

論文[5]および論文[8]において、食品袋詰め問題と呼ばれる問題に対する動的計画法に基づくアルゴリズムの設計を行い、数値実験による評価を行った。この問題は、1次元ナップサック問題と類似の問題を繰り返し解く構造となっており、動的計画部分の高速化により、全体のアルゴリズムの所要時間を大幅に抑えることができる。

また、論文[3]では、自動ピッキングシステムに関するスケジューリング問題に対するアルゴリズム設計を行ったが、アルゴリズムの内部で、グラフ・ネットワーク最適化を解く部分と、割当て問題を解く部分があり、後者は1次元パッキング問題に対するある御リズムの応用といえる。このように、一見、配置問題とは関連のない問題に対しても、配置問題に対するアルゴリズムやその設計における知見を活用することができた。

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9件)

Y. Hu, S. Fukatsu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "Efficient Overlap Detection and Construction Algorithms for the Bitmap Shape Packing Problem," Journal of the Operations Research Society of Japan, 査読有, 61 (2018) 132-150

S. Imahori, S. Kawade, Y. Yamakata: "Escher-Like Tilings with Weights," in Revised Selected Papers of JCDCGG 2015, Lecture Notes in Computer Science, 査読有, 9943 (2016) 132-142

S. Imahori, Y. Hase: "Graph-Based Heuristics for Operational Planning and Scheduling Problem in Automatic Picking System," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 10 (2016) JAMDSM0039 1-9

H. Iwasawa, Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "A Heuristic Algorithm for the Container Loading Problem with Complex Loading Constraints," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 10 (2016) JAMDSM0041 1-12

S. Imahori, Y. Karuno, K. Tateishi: "Pseudo-Polynomial Time Algorithms for

Combinatorial Food Mixture Packing Problems," Journal of Industrial and Management Optimization, 査読有, 12 (2016) 1057-1073

Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, T. Uno, M. Yagiura: "A Partition-Based Heuristic Algorithm for the Rectilinear Block Packing Problem," Journal of the Operations Research Society of Japan, 査読有, 59 (2016) 110-129

Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "Efficient Implementations of Construction Heuristics for the Rectilinear Block Packing Problem," Computers and Operations Research, 査読有, 53 (2015) 206-222

S. Imahori, Y. Karuno, K. Tateishi: "Dynamic Programming Algorithms for Producing Food Mixture Packages by Automatic Combination Weighers," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 8 (2014) JAMDSM0065 1-11

S. Imahori, Y. Chien, Y. Tanaka, M. Yagiura: "Enumerating Bottom-Left Stable Positions for Rectangle Placements with Overlap," Journal of the Operations Research Society of Japan, 査読有, 57 (2014) 45-61

[学会発表](計10件)

K. Matsushita, Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "A New Solution Representation for the Rectilinear Block Packing Problem," The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2016).

S. Imahori, S. Kawade, Y. Yamakata: "Escher-Like Tilings with Weights," 18th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry and Graphs (2015)

Y. Hase, S. Imahori: "Graph-Based Heuristics for Operational Planning and Scheduling Problem in Automatic Picking System," International Symposium on Scheduling 2015, 169-174

H. Iwasawa, Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "A Heuristic Algorithm for the Container Loading Problem of Challenge Renault/ESICUP," International Symposium on Scheduling 2015, 236-241

K. Matsushita, Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "An Exact Algorithm with Successively Strengthened Lower Bounds for the Rectilinear Block Packing Problem," International Symposium on Scheduling 2015, 242-247

M. Milano, S. Imahori, M. Sasaki, M. Yagiura: "The Strip Packing Problem with Soft Rectangles: Experimental Analysis of Heuristic Algorithms," International Symposium on Scheduling 2015, 248-252

S. Fukatsu, Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "An Efficient Method for Checking Overlaps and Construction Algorithms for the Bitmap Shape Packing Problem," The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2014).

S. Imahori, S. Kawade, S. Sakai: "Local Search Algorithms for Escherization," 16th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry and Graphs (2013), 88-89

S. Imahori, Y. Karuno: "Pseudo-Polynomial Time Algorithms for Food Mixture Packing by Automatic Combination Weighers," International Symposium on Scheduling 2013, 59-64

Y. Hu, H. Hashimoto, S. Imahori, M. Yagiura: "Efficient Construction Heuristic Algorithms for the Rectilinear Block Packing Problem," International Symposium on Scheduling 2013, 80-85

これらの発表論文の他に、海外における学会発表（予稿なし）、国内における学会発表が複数ある。これらを含む全体のリストは、以下のウェブサイトを参照のこと。

<https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-25330024/>

<http://www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/imahori-lab/imahori/publication.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今堀 慎治 (IMAHORI, Shinji)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90396789

(3) 連携研究者

柳浦 睦憲 (YAGIURA, Mutsunori)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：10263120

橋本 英樹 (HASHIMOTO, Hideki)

東京海洋大・学術研究院・准教授

研究者番号：70548114

梅谷 俊治 (UMETANI, Shunji)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80367820