

## (論文内容の要旨)

詰め込み問題とは、与えられた図形を容器の中に図形同士の重複がないように配置する問題である。図形の種類、配置の制約、容器の形状などにより様々なバリエーションがあり、情報の可視化やロボットの動作計画などとも関連があり、広く応用のある重要な問題である。本論文では、固定角度の回転を許す非凸多角形の詰め込み問題、および、自由回転(任意の角度の回転)を許す2、3次元の非凸図形の詰め込み問題に対する汎用的なフレームワークを提案し、その実験結果をまとめている。

第1章は序論であり、詰め込み問題の研究背景を述べた後、詰め込み問題と関連のある問題や研究を紹介する。

第2章では、詰め込み問題の中でも、近年盛んに研究が行われている自由回転を許さない2次元の非凸多角形の詰め込み問題に関する近似解法を提案する。図形同士の衝突と、図形の容器からの突出をペナルティとして、そのペナルティの総和を最小化する制約なし非線形計画問題を定式化し、それに準ニュートン法を適用することで、図形を徐々に動かして配置を改善する局所探索アルゴリズムを実現する。また、ミンコフスキー差を利用して配置の隙間に図形を移動させるアルゴリズムも提案し、両者を組合せて反復局所探索法というメタ戦略に基づくアルゴリズムを構築する。ベンチマーク問題例を用いた計算実験を通じて、提案手法が他の手法に匹敵する結果を挙げ、特に配置する図形の数が多い場合に提案手法が有利であることを示す。全部で15問あるベンチマーク問題例のうち8問に対して最善解を更新した。

第3章では、2次元と3次元の詰め込み問題に対する汎用的なフレームワークとして、Multi-sphere scheme を提案する。このフレームワークは、容器内に物体を、物体同士が互いに衝突せず、また、物体が容器から突出しないように配置するためのものである。なお、容器内に配置する物体については任意の形状をとることを許す。Multi-sphere scheme では、与えられた図形をまず球の集合で近似した後に、球集合の配置を求める。これは、図形を球で近似することで、図形の衝突判定や貫通深度といった基本的な計算が容易になり、また計算誤差にも強くなる性質を利用している。本論文では、Multi-sphere scheme の球集合の配置を求める部分を紹介する。第2章と同様に、物体同士の衝突と図形の容器からの突出にペナルティを与え、ペナルティの総和を最小化する制約なし非線形計画問題を定式化し、それに準ニュートン法を適用することで、球集合を徐々に動かして配置を改善する局所探索アルゴリズムを提案する。この局所探索アルゴリズムでは、図形の移動方法を柔軟に設定ができ、例として、平行移動、移動方向の指定の平行移動、平行移動と自由回転の実現の仕方を示す。そして、それら3種類の移動方法をそれぞれ、駅名ラベル配置、道路名ラベル配置、突起付き球配置という可視化の問題へ適用した計算結果を示す。また、平行移動と自由回転を許す詰め込み問題のための手法として、物体をランダムに交換する摂動と組合せた反復局所探索法のアルゴリズムも提案し、2次元の非凸多角形と3次元のタンパク質を、それぞれ長方形と立方体に配置する問題へ適用した計算結果も示す。

また、Multi-sphere scheme のための、物体同士の衝突判定を行う高速なアルゴリズムを提案する。まず、球集合の衝突判定を行うアルゴリズムを提案し、球の半径の最大値と最小値の比率が定数の場合に、この計算量が最適であることを示す。そして、このアルゴリズムを実験の問題例の状況に即して単純化したものを実装した結果を示す。

第4章は結論であり、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題について述べている。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、二次元あるいは三次元物体の詰め込み問題に対して準ニュートン法を利用した発見的解法を開発し、計算実験を通じてその有効性を確認したものであり、得られた結果は以下のとおりである。

1. 本論文では、まず、二次元の非凸多角形のストリップパッキング問題に対し、多角形同士の貫通深度の二乗和を準ニュートン法で最小化する分離操作と、No-fit polygonに基づく多角形の交換操作を併用する反復局所探索のアルゴリズムを提案している。詳細な計算実験により、各種パラメータがアルゴリズムに与える影響を考察している。提案手法は従来法に比べて安定して良質の解を発見し、特にいくつかのベンチマーク問題例に対してこれまで知られていた最善解を更新した点で評価できる。

2. 上記のアルゴリズムの設計は、二次元の多角形に対し離散的な回転角度のみを許すという問題設定を効果的に利用したものであり、三次元の物体や、任意の回転角度を許す自由回転を扱うことができない。本論文では、次に、三次元物体や自由回転などの問題設定を広く扱える一般的な解法の枠組みとして、球の物体を、円や球の集合で近似して物体の配置を求めるMulti-sphere schemeを提案している。そして、この枠組みの主要な構成要素として、球同士の貫通深度の二乗和を準ニュートン法により最小化する局所最適化アルゴリズムを開発している。特に、このアルゴリズムの計算時間のボトルネックとなる球同士の衝突判定ルーチンには、スラブ分割と平面走査法に基づいて開発した高速アルゴリズムを用いている。この衝突判定アルゴリズムの時間計算量は妥当な仮定のもとで理論的に最適であることを証明し、計算実験を通して実際に局所最適化アルゴリズムの高速化に著しく寄与することを示している。

3. Multi-sphere schemeには、物体の可動範囲、可動方向に関する拘束条件を問題設定に組み入れ易い特徴があり、本論文では、最後に、この特徴を活かしたMulti-sphere schemeの応用例として、ラベルの重なり除去問題に対するアルゴリズムを設計した。ラベルの重なり除去問題とは、二次元と三次元のラベルの初期配置を、平行移動、特定の方向への平行移動、平行移動と自由回転といった移動の制約を考慮に入れて、ラベル同士の衝突を取り除く問題である。計算実験を通じて、設計したラベルの重なり除去アルゴリズムの有用性を示している。

以上のように、本論文は、詰め込み問題に対する一般的なアルゴリズムの枠組みの提案および、特定の問題に特化した解法の開発とその高性能な実装を行ったものであり、得られた成果は学術上および応用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月26日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。