

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山下 淳

山下 淳（やました あつし） 提出の本論文は「移動ロボット群による大型物体操作・搬送計画」と題し、全7章からなる。本論文では、複雑な環境において小型・複数の移動ロボットが大型の物体を協調して搬送するシステムのための動作計画手法を構築した。これにより、移動ロボット群によって、高効率かつ確実な搬送作業の達成が可能となった。

第1章および第2章では、移動ロボット群による大型物体協調搬送・協調物体操作の必要性、従来研究および本論文での目的を述べている。複雑な環境において、移動ロボット群によって大型物体を搬送するためには、障害物を回避しながら物体を目的地まで移動させるための移動ロボット群の動作を決定する必要がある。従来研究では、予め与えられた目標軌道を追従するための制御手法や、2次元平面内で障害物を回避するための経路を求める動作計画手法のみの議論に終始している。しかし、背の低い天井やドアの部分など3次元的な障害物を考慮すると、物体の姿勢を3次元的に変化させるための物体操作が必要となるため、物体操作を伴う搬送経路計画手法を構築する必要がある。本論文では、3次元的な障害物を考慮し、（1）高次元空間での障害物回避経路計画手法の構築、（2）力学的安定性を考慮した移動ロボット群による物体操作計画手法の構築、（3）障害物回避問題と物体操作問題の統合的解決法の構築を行うことを述べている。

第3章では、移動ロボット群による大型物体搬送作業の定式化を行い、動作計画手法の構成を決定している。まず、移動ロボットが搬送および操作を行うために必要となる機能の設計を行っている。移動ロボットは固定型マニピュレータと比較して位置決め精度が悪いため、移動ロボットの位置決め誤差を補償する物体操作機構を提案した。また、性質の異なった物体経路計画問題と物体操作計画問題を含む動作計画手法を構築するため、これらを問題分割法により部分問題として分離して考え、それぞれを構築した後に整合性をもって統合するアプローチを採用した。その結果、大域的搬送経路計画器と局所的物体操作計画器からなる2段階の動作計画手法が必要であることを述べている。

第4章では、搬送作業の達成に要する時間を評価指標とし、搬送経路を最適化する大域的搬送経路計画器を構築している。3次元環境において、目標状態まで対象物を搬送できる対象物とロボット群の動作を決定するためには、高次元の計画問題を解決する必要がある。そこで、作業のモデル化（抽象化）を行い、離散的表現を

用いて環境を効率的に表現することにより、解の探索空間を構成した。また、探索空間内での解を探索するために、物体の搬送や操作の困難さをコストとして表現し、ポテンシャルをヒューリスティクスとして用いることで、効率的に最適解を探索することが可能な手法を構築した。作業環境や条件を変動させた条件でシミュレーションを行った結果、最適解を高速に発見可能であることが示された。

第5章では、移動ロボットの位置決め精度と可動範囲を考慮し、安定した操作を実現するための局所的物体操作計画器を構築している。まず、移動誤差が大きく可動範囲に制限があることをパラメータ表現することにより明示的に動作計画に導入し、安定的に操作可能な接触位置の条件を求める。計算量を低減するため、安定性が保たれる状態から特徴的な状態を抽出してグラフ表現を行いた後にグラフ探索を行うことで、使用するロボットの性能に応じた安定余裕を有する物体操作手法を計画できる手法を構築した。条件やロボットの性能を変動させた条件でシミュレーションを行った結果、状況に応じた最適解を求めるとともに、実機実験結果により、センサ情報を用いずとも動作計画結果をそのまま適用するだけで安定した操作が実現できることが示された。

第6章では、第4章および第5章で提案した手法を統合し、動作計画手法の評価を行っている。局所的物体操作計画の結果のうち、物体操作に必要な時間と空間を評価指標として大域的搬送経路計画で用いることで、作業時間最短となる動作計画を行うことができた。統合した動作計画手法を用いることにより、数時間のオーダーで解を求めることが可能であり、計算量を低減しつつ最適な解が得られる計画手法であることが示された。また、物体を搬送・操作するための機構を有した全方向移動ロボット群システムを構築し、実機実験によっても動作計画手法の有効性が示された。

第7章では、結論として、複雑環境において移動ロボット群によって大型物体の搬送作業を行うための動作計画手法が確立されたことが述べられている。本論文で構築した手法は、移動ロボットの特性を考慮した搬送動作を効率的に計画することができ、移動ロボット群での作業への適応が可能となった。

以上を要約するに、本研究により、今後予想される多数台の小型ロボットを用い、複雑な環境で多様な物体を搬送するための動作計画手法を構築し、実環境での動作を実証したことから、この論文は精密機械工学のみならず、工学全体の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格と認められる。