

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ルネル バホイ グェタ

ルネル バホイ グェタ提出の本論文は「Minimal Time and Compact Designs for a Redundant Manipulator System with Multiple-Goal Tasks (多点巡回作業を行う冗長マニピュレータシステムの作業時間並びに作業領域の最小化設計)」と題し、全8章より構成される。

この論文は、冗長自由度マニピュレータシステムの大規模/複雑動作最適化問題を扱っている。最適化に際して、作業完了時間とワークセルサイズという二種類の評価関数を扱っている。作業完了時間を短縮することは、無駄な時間を減らし生産性向上の観点から重要である。ワークセルサイズのコンパクト化は、製造現場における作業領域の効率利用の観点から重要である。

第1章において、ロボット研究の現状と背景、特に生産現場におけるものについて議論している。様々な統計データにより、ロボットが生産現場に広く受け入れられ、様々なアプリケーションに適用されていることを述べている。作業完了時間の最小化とワークセルサイズの最小化という二つの指標が実用的な観点から重要であることを主張している。それら二つの問題に対する提案手法の概要を示している。提案手法について、設計に要する時間の考慮、いくつかの作業への適応可能性、二つの評価関数の考慮、という観点から議論している。

第2章において、作業完了時間の最小化とワークセルサイズの最小化の観点から問題の定式化をしている。この章では、二つの問題に対する入力パラメータ、仮定、評価関数、設計変数について述べている。定式化において、冗長マニピュレータシステムとして、6自由度マニピュレータと1自由度回転テーブルからなるシステムを用いている。

第3章において、問題の複雑さと、作業時間最小化に関する提案手法について述べている。運動学的冗長性、複数ゴールの存在、障害物回避の必要性、評価関数を解析的に記述することの困難さにより当該問題が複雑になっていることについて述べている。従来の問題設定と比較して、この論文における問題設定が複雑であることを議論している。

第4章において、プログラミングベースによる、ゴール巡回順決定並びにマニピュレータと回転テーブルの協調制御則について述べている。プログラミングベース設計は、マニピュレータと回転テーブルの設置位置が固定された設定時の最適化手法として優れている。ゴール巡回順決定問題については、実用的な観点からユークリッド距離に基づくクラスタリング法を用いた方法を提案している。協調制御則は、グラフ探索ベースのものを提案している。当該問題においては、ゴール巡回順を繰り返し解法により決定しているため、その中で呼び出される協調制御則を高速に解くことが必須である。更に、実用的な解を得るためには、適切なアルゴリズムの組み合わせが重要であることをシミュレーションにより示している。その組み合わせは、ダイクストラ(Dijkstra)法とNN(nearest neighbor)法を組み合わせた方法であり、それぞれ単独で用いるより優位な結果をもたらすことを示している。設計に要する時間と解の質との間のトレードオフについて議論している。

第5章において、補助リンク設計法という設計手法を提案している。ここで補助リンクとはマニピュレータの設置位置とマニピュレータ手先に付加するツールアタッチメントを意味する。ここで“補助”という言葉は、ロボットアーム全体を設計するのではなく通常のマニピュレータに付け加える部分つまり補助リンクの部分の設計をする、という意味で用いている。マニピュレータ設置位置設計は、マニピュレータに仮想的なリンクを追加する問題ととらえることができるが、ツールアタッチメント設計はマニピュレータ先端と手先効果器の間に本当のリンクを追加設計するものである。マニピュレータ設置位置設計をすることで、そうでない場合と比較して良好な結果が得られることをシミュレーションにより示した。更に、ツールアタッチメント設計により、ワークセル形状をできるだけ変更することなく良好な解が得られることを示した。また、それらの両方を統合した補助リンク設計により、上記の二つの特徴を兼ね備えた設計が可能となることを示している。

第6章において、ワークセル領域のコンパクト化(最小化)問題について議論し、解析を行った。提案手法は、マニピュレータ設置位置設計とゴール巡回順決定、協調制御の三者を統合したものである。作業完了時間最小化を目指した協調制御則とワークセル領域の最小化を目指した協調制御則の二種類を提案した。さまざま

な作業完了時間制約のもとでの提案手法，特に協調制御則の評価をシミュレーションにより行った。結果として，ワークセル領域のコンパクト化の観点から提案手法の妥当性を示した。また，二つ提案した協調制御則のどちらが優れているかについては，制約条件として与えられる作業完了時間の大小に依存することを示した。すなわち，制約が厳しい場合（作業完了時間が短い場合）には，作業完了時間を重視した協調制御則が優れており，逆に制約が緩い場合（作業完了時間が長い場合）には，ワークセル領域最小化を重視した協調則が優れていることを示している。

第7章において，作業完了時間最小化とワークセル領域最小化について考察を行っている。本論文のコントリビューションと，提案手法の他の問題への適用可能性，拡張性について議論している。

第8章において，結論と今後の展望について述べている。作業完了時間最小化とワークセル領域最小化という二種類の評価関数に対して，類似した構造を有する設計法を提案した。マニピュレータ設置位置設計，ツールアタッチメント設計，ゴール巡回順設計，協調制御則設計の四種類を統合した方法を提案し，他手法に対する有効性を示した。シミュレーション結果により，マニピュレータ設置位置とツールアタッチメント形状が重要な設計パラメータであることがわかった。提案設計則は，さまざまな種類の作業に適用可能であり，作業完了時間最小化とワークセル領域最小化について有効である。

以上を要するに，本論文では，マニピュレータ設置位置とツールアタッチメント形状という，従来工場環境においてはアドホックに設計してきた対象を，数学的枠組みのもとで設計問題として定式化した。多数点到達作業に対するプログラミングベース設計とハードウェアベース設計を統合した手法を定量的に評価した。さらに，ワークセル領域最小化の観点から協調制御則の新しい理解の方法を提示した。これによって，本論文は産業用ロボットの動作設計に寄与するところが大きく，生産システムの改善に対し有用であると考えられ，重要なものであると言える。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。