

博士論文審査報告書

論文題目

初期設計段階における多関節ロボットアームの
最適な関節数，リンク長，軌道に関する研究

Research on Optimum Number of Joints, Length
of Links and Trajectory for Multi-Jointed Robot
Arm at Initial Design Stage

申請者

金	亨俊
Hyeongjun	KIM

総合機械工学専攻 最適デザイン研究

2015 年 2 月

近年、各種の産業にロボットアームが導入され、人間では困難な作業の代替、高度な精密作業などを行う一方で、単純作業の多くの繰り返しなどが行われ、生産品質や生産効率の向上、生産コストの低減などが図られている。それらの目標を達成するためにロボットアームの性能として軌道の正確性や反復作業の迅速性などが重要な要素として要求され、加えて生産コストの低減も大きな課題とされている。したがってロボットアームの軌道の最適化や制御によって正確性や反復性を高めるとともに材料の選択、形状最適化などによりロボットアームを軽量化したり、駆動方式を工夫したりして消費エネルギーを減少させる試みや研究が数多く行われてきている。このような研究は関節数やアーム長が固定された既存のロボットアームの有効活用を前提としていることが多いために、ロボットアームの関節数やリンク長を決める初期設計の段階における基礎的な研究はほとんどなされていないのが現状である。さらに比較的単純な作業をするロボットアームの場合は、主として費用の関係で初期設計の際に決められた作業が可能な最小限の関節数を選択し、リンク長の寸法などについても深い考察がないまま設計が行われてきた。その理由としては、関節数が増加することによりアクチュエーターの数も増えて初期の設備費用が高価になり、また関節数が作業空間の次元を超える時に発生する冗長自由度のために駆動制御が複雑になることなどが考えられる。しかしながら一方では、この冗長自由度を有効活用することによって障害物回避、特異姿勢回避など操作性の改善、関節トルクや加速度など動特性の改善のような効果があることが多くの研究により指摘されている。

そこで本研究では初期の設計段階における最適な関節数やリンク長に関する汎用的な設計方法を提示し、それに基づいて設計されたロボットアームが実用的にも有効なことを示すことを目的としている。そのためにロボットアーム関節数、リンク長に大きな影響を与えると考えられる以下の問題に着目している。

(Ⅰ) 冗長自由度の問題、(Ⅱ) 軌道の問題、(Ⅲ) アクチュエーターや駆動方式の問題、(Ⅳ) 後続の設計段階で生じるさまざまな目標にも適応できる汎用性のある設計法の開発の問題。

本論文では、上記(Ⅰ)の問題に関しては冗長自由度を設計変数に採用する。

(Ⅱ)に関しては軌道そのものを設計変数に考慮する。(Ⅲ)アクチュエーターの種類や駆動方式に関しては簡易的に扱う方法を考慮する。(Ⅳ)の問題に関しては最適化問題のモデル化と汎用性のある解法を提示する。

などの基本方針を示し、それに基づき研究を進めている。

具体的には冗長自由度を活用するために各関節の角度も設計変数として、さらに始点から終点までのSpline曲線のコントロールポイントを設計変数として軌道そのものを最適化して最適軌道を求める方法を採用している。アクチュエーターとしてはダイレクト駆動方式としてその数に相当する質量を考え、系の動力学や最適設計問題の目的関数に反映させている。また最適な関節数、リンク長、軌道を

評価する目的関数は種々考えられるが、本論文では一般的で大局的な目的関数の一つである消費エネルギーおよび特異点や障害物などの回避も考えて可操作性の二つを考え、多目的最適設計問題を定式化して遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて最適化問題を解いている。研究では多関節剛体ロボットアームの平面運動の場合についてまず研究を展開し、一部検証のモデル実験も行い、解析結果と比較を試みて検討している。さらに3次元空間のロボットアームの運動についても解析を拡張して検討をしている。さらにこれらの研究で得られた成果が実用上も有効なことも併せて示している。

本論文は全6章から構成されており、以下に各章で得られた成果をまとめる。

第1章の序論では、ロボットアームの関節数やリンク長、軌道の関係についての研究背景や関連する従来の研究とそれらの課題を述べた後に本論文の目的、研究対象、研究方法について説明している。大きな研究目的として初期設計段階における実用性を考慮した汎用性のあるロボットアームの関節数やリンク長の最適設計方法の提示とその有効性を示すことを挙げている。ロボットアームの最適な関節数やリンク長を求めるために冗長自由度との関係、軌道との関係、目的関数との関係を明確し、冗長自由度の利点に注目した汎用性のある設計方法を提示する基本方針を示している。

第2章では、多関節ロボットアームについて、最適な関節数、リンク長などの最適化を行うための後続の章で使用する基礎的な解析方法について説明している。多関節ロボットアームのモデル化や最適化問題の定式化を行う際に実用化を目指した汎用性のある設計方法を提示するためには、設計変数、制約条件、目的関数の選択とその適切なモデル化が必要であることを述べている。

第3章では、本論文の中心となる第4章の準備的な研究として、多関節ロボットアームの平面内運動を対象とし、いくつかの平面内の代表的な軌道を表す指定された固定軌道に対する研究を行っている。多関節ロボットアームが指定された軌道を通った際、冗長自由度による関節トルクや加速度など動特性の改善に着目し、消費エネルギーを最小化する最適化を行い、最適な関節数やリンク長を求める。この際にアクチュエーターはダイレクト駆動方式と考え、その質量を考慮して動力学と消費エネルギーの算出に反映させる簡易な方法を採用している。さらにロボットアームの関節数、リンク長と軌道への影響を把握するため効果量の概念を導入し、その傾向を考察するとともに実際に使用されているロボットの作業において実用性も高いことについても言及している。

第4章では、本論文の主要な研究内容である軌道による関節数やリンク長への直接的な影響を避けるために第3章の設計方法を拡張し、平面内の軌道自体も変化するものとして軌道も設計に含める最適化問題を考えて汎用性のある手法を提案している。またその有効性を検討するモデル検証実験も行い、提案した手法

の有効性を実用面からも検証している．前章では，想定した軌道をロボットアームに与え，その軌道に沿う際の最適の関節数，リンク長を求めたが，本章では，軌道も未知として設計変数に含めた最適化を行っている．また前章の結果では，関節角度が 0 となり，特異姿勢となる結果も見られたが，本章ではその問題を防ぐための目的関数を設定し，多目的最適化を行っている．具体的にはロボットアームの最適な関節数，リンク長に加えて軌道も同時に最適化するためにまず始点と終点の間を Spline 補間を用いて軌道を計画してその目標点を設計変数として設定している．また特異点の回避も考慮して可操作性の最大化および消費エネルギーを最小化する最適化問題の定式化手法を提案している．最適化問題を定式化し，MOGA (Multi-Object Genetic Algorithm) により多目的最適化を行い，複数の Pareto 解から一つの解を選択する方法を提示している．さらにモデル実験による最適化の結果を検証している．また実際ロボット作業を想定し，実用面でも本章で得られる成果が活用できることを示している．

第 5 章では，第 3 章，第 4 章が平面内のロボットアームの運動を対象としたことに対して，通常のロボット作業で多く見られる三次元空間内のロボットアームの運動を対象として平面内の手法を三次元空間内に拡張した汎用性のある最適設計手法を提案し，その成果を検討している．対象を三次元の運動としたために座標変換に関する複雑な計算が飛躍的に増えることを述べている．そのために第 4 章のモデル化を直接採用すると膨大な計算時間を要することになり実用的ではないことを指摘している．効率的な最適化を行うために，目的関数は消費エネルギーの一つに限定し，可操作性を目的関数に採る代わりに特異姿勢になることを防止するための制約条件を設定した最適化問題を提案して解を求め，得られた成果が実用面でも資することを示している．

第 6 章では，得られたさまざまな成果に基づいて本論文の結論としている．最後に，本研究に関連する今後の研究の展望を述べている．

以上要するに，本論文は，これまでほとんど研究がなされていない多関節剛体ロボットアームの初期設計段階において最適な関節数やリンク長を決定できる汎用性のある最適設計手法を提示したもので，今後のロボットアームの開発ならびに設計に大きく寄与するものである．したがって本論文の成果は，ロボット工学の発展ならびに産業用ロボットの開発に貢献すること誠に大である．

よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める．

2015 年 2 月

審査員（主査）	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	山川 宏
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	菅野重樹
	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	宮下朋之
	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	上杉 繁