

博 士 論 文 概 要

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

2014 年 12 月

近年の産業用ロボットアームは、モジュール化が行われ、どのような作業でも適用できるように設計を行っている。そのためロボットアームは軌道の正確性や反復性が重要な性能として要求され、生産コストを低減することも重要な目標として要求される。従って、ロボットアームの軌道最適化より正確性や反復性を高め、また形状最適化によりロボットアームを軽量化して消費エネルギーを減少させる研究が数多く行われてきた。しかし、このような研究は既存のロボットアームの性能を改善するためには有意義であるが、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とは異なる。また、比較的単純な作業をする平面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ただ決められた作業が可能な最小限の関節数を選択し、リンク長の寸法についても深い考察がないまま設計が行われて来た。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の数も増えて初期設備費用が高くなり、ロボットアームは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制御が複雑になることが考えられる。しかし、この冗長自由度を有効に使うことにより障害物回避、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利点があることが多くの研究により明確になっている。しかしそれに関わらず、初期設計の段階でロボットアームの適切な関節数やリンク長などに関してほとんど考慮されていないことが現状である。

一方、自然界の生物を観察してみると、まず人間の腕は 7 つの自由度を持ち、3 次元空間内の 6 自由度より自由度が 1 つ余る冗長自由度を持っていることが分かる。人間はこの冗長自由度をうまく利用することにより障害物を避けて目標点まで届けるなどの状況に合わせる運動ができ、怪我をして自由度を 1 つ失っても最低限の運動が確保できる特徴がある。他に人間と生物学的に似ている類人猿の腕は、人間と異なる生態系に適切な固有の比率を持つ。これらの比率の理由については明らかではないが、経験や長い間の進化によって何らかの意味で周囲の環境に対して腕の形や長さが適応した結果と推測される。人間はこの二つの特徴を駆使して目標とする所まで直観的に腕を動かす。つまり、ロボットアームの最適な軌道は、関節数・リンク長と緊密な関係があり、作業環境（タスク、空間、障害物等）により最適な固有の設計が存在するのではないかと考えられる。

しかし、従来の研究ではロボットアームを設計する際、関節数やリンク長を決める根本的な問題、またこのパラメータの変化により発生する影響に関する議論が行われていない。まして、それらの決定には軌道が大きな関連を持つが、併せて議論した研究はほとんどない。

そこで本研究では実用性を考慮して初期の設計段階におけ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有効なことを示すことを目的とする。そのためにはロボットアーム関節数、リンク長、軌道がそれぞれ与える影響を明らかにする。最適な決定を行うためには (I) 3 関節以上の場合に

発生する冗長自由度の問題，（Ⅱ）軌道計画方法の問題，（Ⅲ）さまざまな目標にも適応できる総合的な目的関数の設定問題が解決しなければならない課題だと考えられる．そのため本論文では，多関節の剛性アームを対象としてその始点から終点までの平面内の二次元運動や三次元空間内の運動を考え，上記に述べた冗長自由度の利点である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に注目し，最適化問題を定式化する方法を提案し，GA（Genetic Algorithm）を用いて解を求める．その際に，（Ⅰ）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する．（Ⅱ）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場合を研究の中心とするが，その準備段階として代表的な固定軌道の場合に対する研究も考える．（Ⅲ）最適軌道を評価する評価指導は種々考えられるが，本論文では一般的な評価指標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も考える．また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研究を展開し，解析が主体の研究と並行して一部モデル実験も行い，比較を試みる．また 3 次元空間の運動についても解析を拡張して検討をする．さらに得られた成果が実用上も有効なことを示す．

本論文は全 6 章になっており，その構成について以下に示す．

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する．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設計方法の提示とその有効性を示すことを挙げる．そのためにロボットアームの最適な関節数やリンク長，軌道を求めるため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解決方法を示す．

第 2 章では，多関節ロボットアームについての最適な関節数，リンク長，軌道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する．剛体多関節ロボットアームを対象として遺伝子アルゴリズム（GA）による最適化を行うためには，適用の対象となっているロボットアームのモデル化，最適化問題の定式化のための最適化モデルの定義が必要となる．その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．したがって，本章では多関節ロボットアームのモデル化，最適化モデル計画，GA の適用の三つに分けて実際最適化を行うために使われる理論を説明する．

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想定した固定軌道に対する研究を行う．多関節ロボットアームがその軌道を通った際，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。最後にロボットアームの構造（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する。

第 4 章では、本論文の主要な研究内容である固定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含める最適化問題を考えて汎用性のある手法を提案する。またその有効性を検討するモデル実験も行い、提案した手法の有効性を実用面からも検証する。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う。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となったが、本章ではその問題を防ぐための目的関数を設定し、多目的最適化を行う。具体的には、多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、まず始点と終点以外の目標点を設計変数として設定し、Spline 補間を用いて軌道を計画する。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する。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 Pareto 解のなか一つの解を選択する方法を提示した。またモデル実験による最適化の結果を検証する。最後に実際ロボット作業を想定し、その面でも本章で得られる成果が活用できることを示す。

第 5 章では、第 3, 4 章が平面内の物体を対象とした最適化を行ったことに対して、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を対象として平面内の手法を発展させた最適化を行い、更なる汎用性のある手法を提案し、その成果を検討する。また対象が三次元に増えたため座標変換に関する複雑な計算が飛躍的に増える。このために前章（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。したがって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する。その代わり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、得られる成果が実用面でも資することを示す。

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する。さらに今後の展望について述べる。最後に、本研究に関連する今後の研究の展望を示す。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏 名 金 亨俊 印

(2015 年 2 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○ 多関節ロボットアームの関節数，リンク長，軌道の多目的最適化に関する研究，計測自動制御学会論文集，51 巻 4 号（2015 年 4 月号掲載決定），金亨俊，山川宏</p> <p>○ Multi-Objective Optimization For Number of Joints and Lengths of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of International Conference on Innovative Engineering Systems (ICIES2012)</i>, Dec. 2012, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa</p> <p>○ Research on Optimal Number and Length of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (2012)</i>, Sep. 2012, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa</p> <p>○ Research on Optimal Number and Length of Multi-Jointed Robot Arm, <i>Proc. of 9th World Congress On Structural and Multidisciplinary Optimization 2011</i>, Jun. 2010, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa</p>
講演	<p>3 次元空間内の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，第 57 回回自動制御連合講演会，2014 年 11 月，金亨俊，山川宏</p> <p>Optimization of Trajectory, Number of Joints and Shape of Links for Multi-Jointed Robot Arm, <i>The 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems 2014</i>, May 2014, Hyeongjun Kim, Hiroshi Yamakawa</p> <p>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，第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2013，2013 年 12 月，金亨俊，山川宏</p> <p>ロボットアームの運動と最適な関節数とリンク長に関する研究，第 54 回自動制御連合講演会，2011 年 11 月，金亨俊，山川宏</p> <p>ロボットアームの最適な関節数とリンク長に関する研究，第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2013，2010 年 12 月，金亨俊，山川宏</p>