

京都大学	博士 (工学)	氏名	岩村 慎太郎
論文題目	Cable path optimization methods with cascade structures for industrial robot arms using physical simulators (物理シミュレータを活用した産業用ロボットアームのためのカスケード構造を有するケーブル経路最適化手法に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>産業用ロボットアームには、電気や空気などを供給するための外部ケーブルが装備されているが、ケーブルの経路設計には技術者の労力と作業時間が必要となる。ケーブル経路設計は、ロボットアームのモーションを妨げず、さらにモーションによるケーブルの破損を回避することを目的として実施される。技術者はモーションを観察しながら、ケーブルを固定するガイド位置・姿勢およびガイド間のケーブル長の調整（ケーブル経路設計）と実装テストを繰り返す。これら一連の試行錯誤は精神的にも体力的も負担が大きい一方で、作業遅延が生産ラインの開始時期を遅延させうるという意味で時間的制約にもさらされている。</p> <p>本研究では、与えられたロボットアームのモーションに対して最適なケーブル経路の設計について議論する。ここでは、ロボットアームのモーションを、ピックアンドプレイス作業のようにエンドエフェクターが物体に対して上方のみからアクセスする単純モーションと組立または検査作業のようにエンドエフェクターが物体に対して多方向からアクセスする複雑モーションに大別する。熟練者のケーブル経路設計を観察した結果、次のことが分かった。単純モーションに対する経路設計では、基本的に一つのリンクに一つのガイドが装着される。一方、複雑モーションに対する経路設計では、一つのリンクに複数のガイドが装着される場合が散見される。</p> <p>本論文では、上述の熟練者の設計技術に着想を得て、与えられた単純モーションと複雑モーションの両方に対して自動的にケーブル経路設計を行う最適化手法を提案する。まず、単純モーションを対象として、全体ケーブルをガイド位置で区切った部分ケーブルに分解して、部分ケーブル長とその両端のガイドの位置・姿勢をパラメータベクタ (PV) として定義する。また、ケーブルの伸長、曲げ半径、衝突に関するストレス制約条件、配線作業者のケーブル取り付け誤差などの外乱を考慮したケーブル長に関する頑健性制約条件を設定する。与えられたモーションに対してケーブル形状の物理シミュレーションを行い、これらの制約条件を満たす PV を部分ケーブルごとに選出し、部分ケーブル間の隣接条件を満たす PV の組み合わせから全体ケーブルの最適経路を求める。次に、ロボットの運動中にケーブルストレスが発生しやすいロボット姿勢を難姿勢と定義して、難姿勢に対してストレス制約と頑健性制約を満たす PV 候補を絞り込むことで最適化における計算時間を削減する。さらに、複雑なモーションに対応するため上述の手法に加えて、1つのリンクに複数ガイドを配置する経路最適化手法を提案する。また、ガイド数の増加に起因する解探索空間の拡大による計算時間の増大を低減するために、ガイドに接続された部分ケーブルの初期形状を求める計算の高速化を提案する。最後に、物理シミュレーション精度の検証実験、非熟練者と提案手法によって得られたケーブル経路設計の比較実験、得られたケーブル経路の最適解を実機に適用する実証実験を行っている。本論文は5章からなり、各章の要旨は以下の通りである。</p> <p>第1章は序論であり、ロボットアームに装備されるケーブル経路設計の課題について述べ、ケーブル経路最適化手法の研究意義を説明している。続いて、ケーブル経路最適化を実現するために必要となるケーブル形状の物理シミュレーション技術およびロボ</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	岩村 慎太郎
<p>ットモーション最適化に関する従来手法について概観している。</p> <p>第2章では、単純モーションに対するケーブル経路の自動設計手法を提案している。まず、ケーブル長とその両端のガイドの位置・姿勢で構成される PV 集合に基づいて、与えられたロボットモーションに対するケーブル形状の物理シミュレーションを行い、ケーブルに関するストレス制約およびケーブル長に対する頑健性制約を満たす PV 集合を抽出するモーションテストを実施する。次に、隣接条件を満たす部分ケーブルを結合することで最短かつストレス制約と頑健性制約を満たす全体ケーブルの最適解を導出した。さらに、物理シミュレーション精度の検証実験、非熟練者と提案手法により得られたケーブル経路の比較実験、最適ケーブル経路を実機に適用する実証実験により提案手法の妥当性・有用性を示した。しかし、モーションテストは多大な計算時間を要したため、計算負荷の軽減が課題となった。</p> <p>第3章では、第2章で課題となった計算負荷の軽減のための解決策を提案している。まず、モーションに含まれる部分ケーブルにストレスが掛かりやすいロボット姿勢を難姿勢と定義する。難姿勢に対して部分ケーブル形状の物理シミュレーションを行い、ストレス制約および頑強性制約を満たす PV 集合を抽出するアタッチメントテストを導入した。これにより提案手法はアタッチメントテストおよびモーションテストからなるカスケード構造を有することとなる。シミュレーションおよび実験を通して、本章で提案した手法により第2章における手法と同等の最適解が得られ、大幅な計算負荷軽減が達成されることを明らかにした。また、得られたケーブル経路の最適解を実機に適用する実証実験を行い、その有効性を検証した。</p> <p>第4章では、複雑モーションに対応できるケーブル経路の自動設計手法を提案している。第2章および第3章で述べた手法は単純モーションを想定しており、複雑モーションを対象としたケーブル経路の最適化への適用が困難であった。そこで、熟練技術者の経路設計に着想を得て、一つのリンクに複数ガイドを装着することで、複雑モーションに対応できるケーブル経路の最適化を実現した。一般に、ガイド数が増加すると解探索空間が拡大するために計算負荷が大きくなる。第3章で提案した手法では、ガイド間を接続する部分ケーブルの初期形状の計算に多大な時間を要していた。そこで、エルミート曲線および rotation minimizing frame (RMF) を用いて、高速に初期形状を計算する手法を提案した。本章で提案した手法によって複雑モーションに対してもケーブル経路が最適化できること、大幅な計算負荷の削減が可能であることをシミュレーションにより示した。さらに、得られたケーブル経路の最適解を実機に適用する実証実験を行い、その有効性を検証した。</p> <p>第5章は結論であり、本論文のまとめと今後の課題について述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、産業用ロボットアームの与えられたモーションに対するケーブル経路の最適化手法を確立するため、モーションを単純モーションと複雑モーションに分け、それぞれに対応した物理シミュレーションを活用し、最適なケーブル経路を自動設計する手法とその実機への適用の結果をまとめたものであり、主な成果は以下の通りである。

1. 単純モーションを対象に全体ケーブルをガイド位置で区切った部分ケーブルの長さの部分ケーブルの両端のガイドの位置・姿勢をパラメータベクタ (PV) と定義し、ケーブル経路最適化問題を、PV 値を最適化する問題として定式化した。次にケーブルの伸長・曲げ半径・衝突に関するストレス制約条件およびガイド配置の不確実性を考慮した頑健性制約条件を設定し、物理シミュレーションを活用したモーションテストを実行することにより、最短かつストレス制約と頑健性制約を満たす全体ケーブルの最適 PV を求め、最適なケーブル経路を導出した。さらに、得られたケーブル経路の最適解を実機に適用し、提案手法の有効性を検証した。
2. ケーブルにストレスが掛かりやすいロボットの姿勢を難姿勢と定義し、単純モーションに対するケーブル経路最適化において、難姿勢を考慮した計算負荷軽減化手法を提案した。まず、難姿勢に対して部分ケーブル形状の物理シミュレーションを行い、次にストレス制約および頑強性制約を満たす PV 集合を抽出するアタッチメントテストを導入し、最適解の候補の絞り込みを実現した。アタッチメントテストおよびモーションテストからなるカスケード構造を有する最適化手法により、大幅な計算負荷軽減が達成されることをシミュレーションにより明らかにした。さらに、実機実験により提案手法の有効性を検証した。
3. 単純モーションに対する最適化手法を複雑モーションに対して適用するため、熟練者の作業から着想を得て、一つのリンクに複数のガイドを装着する選択肢を追加し、最適化問題を拡張した。また、ガイド数増加に伴い増加する計算負荷を緩和するために、エルミート曲線および rotation minimizing frame を用いたケーブルの高速初期形状計算手法を提案した。提案手法により複雑モーションに対してもケーブル経路の最適化が実現できることをシミュレーションにより示した。さらに、得られたケーブル経路の最適解を実機に適用する実証実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

以上要するに、本論文は産業用ロボットアームのケーブル経路設計の自動化について有用な知見を与えたものであり、その成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。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。また、令和5年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。