

論文内容要旨（和文）

2019年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 邵 超



論 文 題 目 柔らかい関節構造と弾性腱駆動によるロボットアームの運動学と制御

概要

本論文は、柔軟な関節構造と弾性腱駆動方式によるロボットアームの制御手法に関するものである。通常、多関節ロボットアームは、関節の回転軸を1自由度とし、その自由度周りの回転角度を精密に制御することで手先の精密な位置決め制御を経由して作業を遂行する。本研究のロボットアームは関節の構造に柔らかさを持たせ、ノミナルな回転軸まわり以外の自由度を持たせることにより、手先の接触を伴うロボット作業を、高度なセンサフィードバックを要することなく、簡単な制御により遂行可能とすることを目的としている。本研究では、関節構造の柔らかさによる自由度を寄生的な自由度と呼ぶことにする。

本研究の目的は、寄生的な自由度が存在する柔軟なロボットアームの運動制御に利用可能な、関節角度への依存度の低いロボットの運動学を構築することである。関節角度は、産業用を中心とするロボットマニピュレータの運動を記述する一般化座標として有用だが、表現できる運動が一般化座標で記述できる範囲に限定される。寄生的な自由度による柔軟な運動を排除しないために、関節角度を用いない運動学が必要と考えられる。さらに、柔軟な関節を持つ弾性腱駆動の2リンクロボットアームを試作し、これを使って簡単な制御により人間の作業形態を模した接触運動による簡単な作業実験を行った。

本論文の内容は以下のとおりである。はじめに、2リンクロボットアームの手先およびアーム平面の姿勢を目標に与え、これに対する駆動腱長さを関節角度を用いずに求めるための運動学を導出した。この運動学では、アームを構

成する2本のリンクの姿勢行列をリンクの中心軸方向およびアーム平面の法線ベクトル方向を方向余弦とする座標系の姿勢行列として求めることを基本とする。駆動腱の取り付け位置がこれにより計算可能となるので、腱の操作量は腱の取り付け点と巻取り点の2点間の距離として計算することができる。次に、手先からの作用力を制御するための、静力学の関係を関節角度を用いることなく表現するために、各リンクへ作用する外力と関節まわりのモーメントの釣り合いを求めた。肘関節まわりのモーメントは、ノミナル自由度の回転軸上への射影により確定させた。

以上の運動学の運用を実際のロボットアーム上で検証するための試作ロボットアームを製作した。試作アームの関節は軽量金属製のチューブに柔らかいスポンジをかぶせた形で構成し、肩3自由度、肘1自由度を有する。駆動腱は金属ワイヤーにバネを挿入して弾性を持たせた。腱は3Dプリントされた巻筒により巻き取る。制御は巻筒の回転量で行った。関節構造を柔軟かつ単純なものとするため、関節内にセンサを組み込まず、外部に設置した深度カメラによるモーションキャプチャにより手先および各リンクの姿勢を検出した。そのために、リンク上の複数点にカラーマーカを取り付けた。試作ロボットアームにより、手先点位置の精度、ロボットアームの姿勢精度、静力学による手先力の出力テストを行った。さらに、日常生活の中での人間的な作業として、コンセントのプラグを抜く作業を行った。コンセントプラグは内部の接点金属からの拘束力に逆らわず、プラグを揺動することが必要とされるが、試作ロボットアームでは関節の柔らかさが手先の過度な力を防ぐことにより、簡便な制御のみで作業を遂行できることを確認した。低剛性に起因する大きな位置決め誤差を補償するための繰り返し補償法を実験的に検証した。

これらの実験結果より、本論文の結論は以下のとおりである。提案した運動学にもとづき、2リンクロボットアームの手先位置およびアームを含む平面姿勢を簡便な腱の巻取りにより制御できる。関節構造の柔らかさと腱の剛性の低さに起因する位置決め誤差が大きく現れる。手先の位置および姿勢の目標値に誤差にもとづく補正を繰り返し与えることで、位置決め誤差の補償が可能である。人間の日常生活のように環境との拘束がモデル化できない作業の遂行を、大幅な剛性の低さを利用して簡便に制御できる可能性を確認した。この単純な作業結果からも分かるように、柔軟関節ロボットアームはまだ他の複雑な作業開発の余地が大きい。

論文内容要旨 (英文)

2019年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 邵 超



論文題目

Kinematics and Control of Elastic Tendon-Driven Robot Arm using Flexible Joints

Abstract

This paper describes a control method for a robot arm with flexible joint structure and elastic tendon drive system. An ordinary multi-joint robot arm has one degree of freedom (DOF) around its rotational axis, by precisely controlling the angle of rotation around that DOF, robotic tasks can be performed via precise positioning control of the hand position. Contrary to this, the purpose of this research is to make the joint structure of the robot arm flexible and to provide extra DOFs other than that around the nominal rotation axis of joints, so that the robot arm can perform robotic tasks that require environmental contacts with the hand just by simple control laws and without depending on advanced sensor feedbacks. In this study, the DOFs due to the flexibility of the joint structure is called the parasitic degree of freedom (PDOF).

The goal of this study is to construct a robot kinematics that can be used for motion control of a flexible robot arm with PDOFs, and that is less dependent on joint variables. The joint angle is useful as a generalized coordinate to describe the motion of robot manipulators mainly for industrial use. However, the rigorous definition of the joint angles can exclude the motion due to the PDOFs. In order not to exclude the flexible motion, kinematics without using joint angles is considered necessary. In addition, we developed a prototype of an elastic tendon-driven two-link robot arm with flexible joints, and conducted simple task experiments with it using contact motions that mimic human behaviors during housework with simple control law.

The contents of this paper are as follows. First, a kinematics equation is derived, without using joint angles, in order to determine the length of the driving tendons for a prototype two-link robot arm, given the target position of the hand and the target posture of the arm plane. Idea of our kinematics is to find the tendon attachment points simply by using the orientation matrices of the link determined by the direction vectors of the link and nominal joint axis. The manipulation length of the tendon can be calculated as the distance between the attachment point and start point of the tendon. Next, to control the applied force

of the hand, the balance of the external forces acting on each link and the balance of the moments around the joint are calculated to express the statics relationship without using the joint angle. The moment around the elbow joint was determined by projecting the nominal DOFs onto the axis of rotation.

A prototype was manufactured to verify the above kinematics on a real robot arm. The joints of the prototype consist of lightweight metal tubes covered with soft sponges. The prototype has three DOFs in the shoulder and one DOF in the elbow. The driving tendon is made of a metal wire with a spring inserted to give it elasticity. The tendon is wound by a 3D-printed winding drum. The control is carried out by the amount of rotation of the winding drum.

In order to make a flexible joint structure, we did not incorporate sensors in the joint, instead we used an external depth camera. For this purpose, color markers were attached to several points on the links.

Using the prototype robot arm, we tested the accuracy of the hand position, the posture accuracy of the robot arm, and the applied force at the hand. In addition, we tested the robot's ability to unplug an electrical outlet as a human-like work in daily life. To achieve the task, the robot needs to apply a sway motion on the outlet, without generating a large constraint force.

In the prototype robot arm, it was confirmed that the flexibility of the joints prevented excessive force on the hand, allowing the robot to perform the task under simple control. Furthermore, an iterative compensation method to improve the large error caused by the low stiffness was experimentally verified.

Through these experiments, we confirmed the application feasibility of the proposed kinematics. Moreover, we demonstrated the applicability of the proposed kinematics-based control method for the robot arm with flexible joints to human-like contact tasks.

The conclusions of this paper are as follows. Based on the proposed kinematics, the hand position of the two-link robot arm and the arm posture can be controlled simply by tendon winding. The position error caused by the low stiffness of the joints and tendons appear large. The error can be compensated by an iterative update of the reference hand position and arm posture. We have confirmed the applicability of the proposed robot to workplaces where precise environments map is not available.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 4 年 2 月 8 日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 水戸部 和久 印
副査 妻木 勇一 印
副査 井上 健司 印
副査 印
副査 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論 文 申 請 者	専攻・分野名 機械システム工学専攻	氏名	邵 超
論 文 題 目	柔らかい関節構造と弾性腱駆動によるロボットアームの運動学と制御		
学位論文審査結果	合 格	論文審査年月日	令和 4 年 1 月 31 日～ 令和 4 年 2 月 8 日
論文公聴会	令和 4 年 2 月 8 日	場 所	オンライン開催
最終試験結果	合 格	最終試験年月日	令和 4 年 2 月 8 日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本論文は、関節構造および駆動する腱に柔軟性をもつロボットアームのメカニズムと制御手法に関するものであり、その目的は大幅に柔らかい新規なロボットハードウェアと相互作用を利用した作業制御の手法である。関節に柔軟性を持たせたロボットの研究では関節軸まわりのコンプライアンスが主に問題とされてきたが、本論文では関節軸自体の変位や振れ回りを含めた柔軟性を問題としている。関節角はロボット工学において運動を表現する一般化座標だが、関節構造自体の柔軟性を関節角で表現することは難しい。そのため、本論文は関節角への依存が少ない運動表現およびそれを利用した制御手法を具体的な問題としている。

はじめに、人間の腕に似た自由度の 2 リンクアームを題材として位置決め制御のために必要な運動学を提案している。各リンクの姿勢行列と手先、肩関節の基準位置によりリンク上の各点座標を特定することで、関節角を頭に使わずに駆動腱長を計算している。次に、提案した運動学を適用するための試作ロボットアームの概要を説明している。試作ロボットアームは関節部を含めた各所にウレタンパイプなどの柔軟材を挿入して構造を柔軟化し、弾性要素を駆動腱に挿入することで位置決め剛性も低くしている。ロボットで通常用いられる精密な伝達要素および精度の高い位置検出センサを組み込まない素朴な関節である。位置計測のセンサに、ロボット外部に設置した深度付きカメラが用いられている。試作されたロボットアームによる基本動作の制御結果および構造などの剛性の低さに起因する位置決め誤差の補正方法が検討され、実験的な議論が述べられている。作業への応用例では、環境相互作用を含む日常的な作業としてコンセントからプラグを抜く作業の実験結果が示された。接触作業の研究で多く提案されている手先拘束の数学モデルが得られないため、腕の揺動だけで強引にコンセントを引き抜く方法がとられ、提案手法の有用性を主張している。洗練された制御方法とは言えないが、人間を模倣する方法と解釈できる。

論文の審査において、研究テーマの新規性・独自性と、自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に、研究背景・目的が述べられた事を確認した。また、学位論文の構成、体裁と論理的な記述、設定した研究テーマに沿った結論が述べられた事を確認し、博士学位論文として合格と判断した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

公聴会実施後に、ロボット工学および機械システムの設計および制御に関する内容を中心に、30 分程度の口頭諮問を行った。質問に関する適切な回答が得られ、論理的な議論が行われたことより合格と判定した。