

論文内容要旨 (和文)

平成26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 富樫 淳輝



論文題目 弾性腱を用いたマリオネット型腱駆動ロボットアームに関する研究

今、農業や介護分野で働き手の不足が指摘されている。また高齢者の一人暮らし世帯も増えており、日常生活の補助を行うサービスの需要も高まる傾向にある。これらの問題の解決策の一つとして、ロボットの導入が考えられる。このような状況の中、人間と接触を伴う作業や未知の環境で作業を安全に実行するロボットの開発が求められている。そこで弾性腱を用いたマリオネット型腱駆動ロボットアームを提案する。

弾性腱を用いたマリオネット型の腱駆動ロボットアームは他のロボットアームと比べ、腱巻取り機構とアームが独立しているために構造の単純化及び軽量化が容易に行え、それに伴って製作コストの削減も容易である。弾性腱の選択の自由度も高く、低い関節剛性や接触作業の実現も容易であるという特徴を持つ。一方で、弾性腱が持つ伸びの非線形性や低い減衰特性により高精度な制御、高い関節剛性の実現は不向きである。しかしながら、提案するロボットアームが想定する作業環境は、前述したように一般家庭における生活支援や農業・介護分野での人間の補助である。そのような環境で要求される作業は産業用ロボットにおける精密な位置決めのような高い精度は不要である場合が多いと考えられ、弾性腱を用いたマリオネット型腱駆動ロボットアームの意義は十分にあると考える。

提案するロボットアームに高精度の位置決めや力制御は求めていないものの、実作業へ応用するためにはある程度の精度は必要である。そこで静力学の関係に基づき、オープンループ制御で弾性腱駆動ロボットアームに位置制御と力制御を行わせる。位置制御の実験では初期姿勢と目標姿勢を与えることで手先位置を制御し、力制御では、ロボットアームをある姿勢で固定し手先に作用する力を制御する。その結果、おおよそその目的を満足する結果を得られることを確認したが、改善の余地も見られた。そこでセンサからの情報をフィードバックした単純な積分補償を制御器に加えることで、精度の向上を試みた。上記と同様の実験を行った結果、制御精度の改善が見られることを確認した。また、外部カメラを用いることでロボットアーム本体のセンサレス化を図り、その場合の制御精度を確かめる実験も行った。その結果、内界センサを用いた場合より精度が劣るものの、オープンループ制御と比べると精度が向上することを確認した。

通常のロボットアームは減速比の高いモータによって各関節が駆動される。そのためリンク構造の運動による慣性力の影響は大きく顕れず、モータの回転軸周りのダイナミクスが支配的となる。しかし提案するロボットアームは剛性の低さゆえに、リンク構造の運動による慣性力、遠心力およびコリオリ力の非線形力の影響が直接的に現れる。そのため安定性の解析は理論的な興味のみでなく、実用上も重要と考えられる。そこで提案するロボットアームの運動方程式を導き、力学的エネルギーをリアプノフ関数として用いて解析した。さらに摩擦が作用しない条件下でのエネルギー保存則をもとに、手先位置の漸近安定性は関節の粘性摩擦または腱の粘性抵抗によって与えられることを示し、運動力学的には従来のロボットアームと等価であることを示した。

また剛性の低いロボットの位置決め制御においては、重力の影響が大きく現れる。そこで重力による位置誤差を補正する必要がある。本論文では手先部に作用する未知の荷重を補償するため、ロボットが未知の荷重を把持して手先が静定した後の静力学に基づく負荷の推定方法およびそれに基づく重力補償方法を試みた。実験の結果、補償操作を繰り返すことで腱の非線形性の影響を低減し、誤差を低減できることを確認した。

最後に本ロボットを用いて実作業を想定した考察及び実験を行った。より実用的な制御法として位置と力のハイブリット制御を水平面を拘束条件とした作業環境での実験で検証した。一方で実作業環境での作業環境における拘束条件は水平面のように単純なものに限定されない。そこで一般的な拘束条件での接触作業を想定した制御法を提案した。作業環境と接触をより容易とするため、寄生的自由度を持つ関節構造の提案も行った。具体的な作業例としてクランク回し作業、箱の牽引作業、接触者に対する協調動作を行わせ、それぞれ実現可能であることを確認した。本ロボットアームに適するインタフェースの一つとしてキネクトによるモーションキャプチャ操作を提案し、スイッチ押し作業、作業環境の拘束条件の取得実験を行い、有用性を確認した。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成29年 2月 10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

副査 井上 健司

副査 妻木 勇一

副査



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 機械システム工学専攻 氏名 富樫 淳輝		
論文題目	弾性腱を用いたマリオネット型腱駆動ロボットアームに関する研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成29年 1月28日～ 平成29年 2月 8日
論文公聴会	平成29年 2月 8日	場 所	工学部 6号館 315教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成29年 2月 8日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

本論文は弾性腱を巻き取る方式で駆動する柔軟なロボットアームの機構および制御手法に関するものであり、その内容は以下のとおりである。

はじめにロボットアームを駆動するための、新規な弾性腱の巻き取り装置の機構を提案し、ロボットアームへの適用可能性について検討している。腱を巻き取り駆動する方式のロボットアームの利点および目的について述べ、小型、軽量、低コストで用途に合わせて設計変更が容易なロボットアームとして、マリオネット型の腱レイアウトによるロボットアームを提案および試作した。生活支援ロボットや農業用ロボットなどの多様な応用現場に合わせたカスタマイズが可能となるように、低コストで入手可能な腱の素材として、天然ゴムチューブ、合成ゴムチューブおよびバンジーケーブルを用いた場合の制御性をテストし各素材の応用上の性質を明らかにした。試作ロボットには伸びと張力の間の線形性が比較的良好な天然ゴムチューブを採用している。

つぎに試作したロボットアームに位置制御および力制御の基本的な制御系により性能評価を行っている。大幅に低剛性な腱に起因する大きな位置決め誤差を補償するための、外部カメラの画像を用いた重力補償方法を提案し評価している。力制御においては、手先が固定された場合の単純な力制御および拘束面に手先を押し付けながら面上をなでるハイブリッド制御を適用し、それぞれの実験において、オープンループでの簡易な制御による制御性および力センサを利用することによる精度の改善を示し、各場合のメリットおよびデメリットについて議論している。

さらに、提案するマリオネット型の弾性腱駆動ロボットの運動制御について、一般的な運動方程式、平衡点の漸近安定性について、腱が線形バネと仮定した単純化したモデルにもとづいて示した。腱の非線形性に起因する位置決め誤差の補償を簡便な重力推定にもとづき行う一手法を示し、誤差を低減できる腱の非線形性についての条件を示している。最後に、実際の応用を想定した操作インタフェース、ロボットが手探りして拘束条件を獲得し、それに基づく力制御の実験結果を示し応用可能性を示している。

以上のように、本論文は通常の産業用ロボットに比べ大幅に簡易なロボットアーム構造および運動制御について、独自の視点から提案および解析を行ったものとなっている。本論文で提案したロボットアームについて、1報の国際会議での発表が行われ、1報の査読付き学術論文誌に掲載されている。以上により本論文を博士(工学)の学位論文審査基準を満たしているものと判断し合格と判定した。

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

論文公聴会において、論文内容の発表および質疑応答を行った。関連する研究とそれに対する本論文の位置づけ、本論文に関連するロボットの機構および制御手法に関する質問が出された。各質問に対して適切な回答が行われ、博士(工学)の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断し、合格と判定した。