京都工芸繊維大学

氏　　　名	たぐち　りょうたろう 田口　諒太郎
学位(専攻分野)	博　士　(工学)
学位記番号	博　１１７４　号
学位授与の日付	令和 7 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　設計工学専攻
学位論文題目	Researches on Development and Control of Vacuum-Driven Soft Actuators with Rib-Reinforced Structure （リブ補強構造を有する真空駆動ソフトアクチュエータの開発と制御に関する研究）
審査委員	(主査)教授　澤田　祐一 教授　増田　新 教授　射場　大輔

論文内容の要旨

本論文はシリコン製の本体と内部補強を担う樹脂製リブによって構成されるリブ補強負圧駆動ソフトアクチュエータの開発とその応用について記載した 6 章から構成される論文である．第 1 章は序論，第 2 章はリブ補強負圧駆動アクチュエータの構造及び圧力差や角度の定義について，第 3 章は曲げアクチュエータの基本的特性を用いた力フィードバック制御とソフトロボットハンドについて，第 4 章は CSR ブリッジセンサーの開発と曲げアクチュエータへの埋め込みによる角度制御と接触検知について，5 章では直動アクチュエータから構成されるパラレルリンクテンドンマニピュレータと TOF カメラを搭載したソフトロボットハンドによる自律的な把持システムについて，最後の第 6 章は結論となっている．

産業用ロボットはこれまで金属製の堅牢な部品で構成され、高速かつ高精度な制御で製造工程や工場の自動化を支えてきた．その一方で，柔軟もしくは形状に僅かな個体差が発生するワークの把持や人と同じ空間での作業に課題がある．これらの問題を解決するため，人との接触を考慮した協調ロボットが開発されているが，安全性を確保するためにロボット自体の出力が制限されている．そこで本論文では，作業者だけでなく製品の安全性を確保するために，破裂の危険性を回避した負圧駆動によるシリコン製のソフトアクチュエータ及び自律的な把持を行うソフトロボットシステムを開発した.

リブ補強型真空駆動アクチュエータは，リブ構造で補強された柔らかいシリコンボディの内部が真空に変化することで屈曲や収縮が発生する．屈曲アクチュエータに対して圧力-力特性を利用することで，力測定が不可能な状態での PID 力制御を確立した．さらに屈曲アクチュエータを 3 個搭載したソフトロボットハンドに力制御を導入することで，紙風船をつぶすことなく把持する（3 章）．屈曲アクチュエータは導電性ゴム（CSR）を可変抵抗とするブリッジ回路が構成された CSR ブリッジセンサーが埋め込まれることで，角度制御と接触検知を実現している（4 章）．さらに直動アクチュエータをパラレルリンクテンドンマニピュレータのロッドとして使用し，TOF カメラを搭載したソフトロボットハンドと組み合わせることで，自律把持を実現した．この把持システムでは, TOF カメラによるワークの認識、マニピュレータによるロボットハンドの位置制御、

CSR ブリッジセンサからの接触検出信号に基づくワークの把持を行う．また、システムは接触検知信号に基づく再把持処理によって位置制御における参照入力の修正を実行し，より確実で安全な把持を達成した．

論文審査の結果の要旨

本論文では，シリコンゴムを主材料として負圧駆動型の屈曲型ソフトアクチュエータおよび直動型ソフトアクチュエータの基本構造とその動作原理を確立し，アクチュエータ自身の基本的な力学特性を明らかにした上でその力学特性を考慮した制御方法と応用について示した．

ソフトアクチュエータの基本構造として，シリコン製の本体と内部補強を担う樹脂製リブによって外部のベローズ構造が大気圧による圧壊を阻止し，薄膜でできているベローズ部分と厚みを持ちながらも屈曲可能なベース部分の剛性の違いにより内圧を下げたときに屈曲することを明らかにした．屈曲時の力学的特性が線形ではないとこと実験により明らかにし，内圧とアクチュエータの先端で発生できる屈曲力との関係が多項式による関数で近似できることを利用して，その関数を用いた力フィードバック制御を提案し，その有効性も実験により示した．

また, 屈曲角を計測できる埋め込みセンサ (CSR ブリッジセンサ) を導電性ゴムにより製作し，これを屈曲型ソフトアクチュエータに埋め込むことで，アクチュエータの屈曲角度を計測しながら動作させることに成功した. 一方, 屈曲角と内圧との間にも相関関係があることを明らかにし，この関係から内圧より屈曲角を算出できる関数を導いた．CSR ブリッジセンサから得られた屈曲角と内圧から算出された屈曲角との差分情報から，屈曲型アクチュエータの先端が物体に接触したことを検出できる接触検知機構を考案し，実際に有効であることを示した．

開発されたセンサ埋め込み型屈曲アクチュエータによる把持機構を製作し，これと組み合わせた，直動型ソフトアクチュエータにより，その把持機構を移動させるマニピュレーションシステムを構築した．これは，ソフトアクチュエータのみで構成した物体把持システムであり，埋め込まれた屈曲角センサと把持機構に搭載された TOF カメラにより，物体の自動把持および移動システムが構築できることを最終的に示した．

本研究で提案された負圧駆動型ソフトアクチュエータを用いて，物体を自動的に把持および接触検知機構によりより確実な把持が可能であることを示した．負圧駆動型ソフトアクチュエータは，構造材が柔らかくかつ構造材が破れたとしても空気が噴出することが無いため，食品や衣類などのデリケートな物体の把持に適しており，そのような分野において注目されている．

本論文は，下記 2 編の査読付き論文および査読付き国際会議論文に基づいており，既に公表されている．また，2 編とも本申請者が筆頭著者である．

査読付き論文：

R. Taguchi and Y. Sawada, “Contact detection in a rib-reinforced vacuum driven actuator with an embedded CSR bridge sensor, ” Advanced Robotics, Vol.38(11), pp.745-757, 2024, https://doi.org/10.1080/01691864.2024.2353152

査読付き国際会議論文：

R. Taguchi and Y. Sawada, “Design and Grasping Control of Rib-Reinforced Bending Soft Actuators by Vacuum Driven,” 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, pp.406-411, 2021,
DOI: 10.23919/ICCAS52745.2021.9649861