

論文の内容の要旨

論文題目 「Design and Development of Novel Wire-driven Continuum Robot Arm with Passive Sliding Disc Mechanism: Kinematic Analyses and Experiments」

(受動スライドディスク機構を有するワイヤ駆動型連続体ロボットアームの設計および開発：運動学解析および実験)

学位申請者: YESHMUKHAMETOV AZAMAT

キーワード : 連続体ロボット ワイヤ駆動 張力調整機構 運動学 シミュレーション

本研究では、象の鼻や軟体動物（蛸やイカ）の足等で実現される動作に着目し、剛性と器用さ、そして高可搬重量を実現可能な柔軟なロボットアームの設計および開発を目的としている。

近年、剛性材料から構成される従来型のロボット（硬いロボット）と対照的に、生体にヒントを得て高いコンプライアンスを有するロボット（ソフトロボット）が注目を集めている。ソフトロボットは、人間の近くで作業をする場合の安全性や柔軟性、そしてパイプ内部や倒壊した被災現場での搜索作業など狭所作業への適合性等、従来のロボットにない機能を有している。なかでも、1自由度または2自由度を有する比較的単純なセグメントを多数連結・積層させた構造を有するロボットを連続体マニピュレータ（Continuum Manipulator）または連続体ロボットアーム（Continuum Robot Arm）と呼ぶ。連続体マニピュレータでは、一般的にモータ等のアクチュエータを関節付近に装着することはせず、土台付近にアクチュエータを配備しワイヤにて各関節を駆動する手法が用いられる。そのような特殊構造ゆえにアームの位置・形状制御には特段の注意を要する。このようなロボットで十分な可搬重量を実現できれば、高齢化と労働力不足が課題となっている農業分野において、果実や野菜の収穫作業等を助ける自動化技術としても大きな期待が寄せられる。

本研究で取り組む連続体マニピュレータで新規性を有する大きな特徴は2点ある。1つ目はアームを構成するセグメントの構造にある。ワイヤ駆動方式では、積層された多数のセグメントを貫く複数本のワイヤの押し引きによりアームの全体形状が決められるが、各ワイヤの変位量および使用する多数のコイルバネの変形量の関係からバックリングやワイヤ脱落の問題が頻出する。これらの問題に対し、本研究ではセグメントの背骨部分にアームの湾曲に影響を与えない軸方向への直動変位を可能にすることで、局所的なバックリ

ング現象の発生を防止すると共に、アーム全体でより均等かつ自然な湾曲形状の創出に貢献している。これについては、直動変位を許す場合と許さない場合について、運動学的なシミュレーション解析による比較検証を行い、前者の有効性を確認している。2つ目の特徴は、ワイヤ張力調整機構の導入にある。開発された連続体ロボットアームは4個のモータでワイヤの緩急を調整しアーム形状を制御しているが、前述の通り、ワイヤの緩みや脱落が発生しロボットの保守性を著しく低下させる原因となる。その問題を解決する手段として、本論文では2通りのワイヤ張力調整機構を提案している。ひとつは受動素子（ばね）のみを用いたパッシブ調整機構、もうひとつはばね変位をセンサで検出することで能動的に張力を制御するアクティブ調整機構でありいずれも有効性が確認された。また、本研究で開発した連続体ロボットアームを用いて、可搬重量の検証実験を行うと共に農作業への適用（トマトの摘み取り作業）を仮定した検証実験も行っている。

本論文は6章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序章である。本章では研究の目的と背景について述べる。本研究で扱う連続体マニピュレータに関する従来研究とそれらの課題について詳細に言及する。さらに、論文の構成と各章の概要について説明している。

第2章は、本研究で提案する連続体ロボットアームの設計的な特徴について述べる。セグメントの背骨部分に直動変位を許容する構造と駆動ワイヤの張力調整機構について詳述している。さらに試作したロボットの動作基礎実験を通じて、提案する構造・機構の有用性を検証している。

第3章は、提案する連続体ロボットアームの運動学および動力学（力とモーメントの釣り合い式）を導出し、運動学的なシミュレーション結果について述べている。第2章で述べたセグメント構造の有効性を検証するため、直動変位を許容しないケースとの比較も行っている。

第4章は、連続体ロボットアームの制御システムについて述べるとともに、第2章で述べたワイヤ張力調整機構の有効性を検証する実験結果について詳細に述べている。特に、張力調整機構がロボットの動作の円滑性に大きな影響を与えること、そして能動的な調整機構によって可搬重量の増加や動作のさらなる円滑化が実現できることを検証している。

第5章は提案する連続体ロボットアームの応用事例として、農作業（トマトの摘み取り作業）を前提とした検証実験について述べる。

第6章は結論である。本章では第2章から第5章を総括するとともに本論文における主たる成果についてまとめている。

以上のことより、本論文は、連続体ロボットアームに機能上有用な設計的手法を提案し、シミュレーションによる運動学解析および試作機による検証実験を通じてその有効性を確認した。将来的に、農作業の自動化を始め人に優しいロボットとして社会に貢献すると考えられる。