

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ワイヤ駆動型連続体ロボットの作業領域および静的安定性を考慮した機構設計に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	塩谷峻太
Author(English)	Ryota Shioya
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12898号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:武田 行生,菅原 雄介,岩附 信行,岡田 昌史,遠藤 玄
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12898号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	機械系	系	申請学位（専攻分野）：	博士	（工学）
Department of, Graduate major in	エンジニアリングデザイン	コース	Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名：	塩谷 峻太		審査員主査：	武田 行生	
Student's Name			Chief Examiner		

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

連続体ロボットは、1 本または複数の細長い形状の弾性要素とその駆動要素から構成され、高いコンプライアンスを内在するとともに、複雑な 3 次元形状を生成可能な特徴を有している。連続体ロボットにはその内在するコンプライアンスを最大限に活用することより、狭隘な環境における配線工事や動力を一切必要とせずに目標追従軌跡を提示可能なリハビリテーション装置など、新たなアプリケーションの可能性を秘めている。しかし、これらを実現するためには、従来研究において多くの技術課題が依然として未開拓である現状を打破しなければならない。本論文では、連続体ロボットの作業領域および静的安定性に基づく機構設計の基本指針を構築することを目的として、まず、平面 1 セグメントワイヤ駆動型連続体ロボットを対象として、姿勢角の作業領域を簡素な構造により拡大する機構設計を可能とする。次に所望の静的安定性をロボットに発揮させるために選択すべき操作量を決定可能とする。さらに実機の静的安定性を定量的かつ高精度に評価可能な手法を開発するとともに、この手法に基づき準零剛性を実現する操作量を高精度に決定可能とする。本論文は以下の全 6 章よりなる。

第 1 章「緒論」では、まず、連続体ロボットについて述べるとともに、その潜在的なアプリケーションについて考察している。そして、開拓すべき技術課題について論じて、研究目的を設定している。さらに、従来研究もとに本研究の位置づけを明確にしている。

第 2 章「静力学」では、まず、本論文で扱う連続体ロボットとして、1 本の弾性ロッドと並列に配置された複数のワイヤおよびディスクから成る 3 自由度のロボットを示すとともに、そのモデル化の条件を述べている。そして、静力学解析のための定式化および手順を示している。

第 3 章「姿勢角の作業領域を拡大する機構設計」では、姿勢角の作業領域を簡素な構造により拡大する機構設計を提案している。まず、エンドディスクの様々な位置における姿勢角の作業領域の拡大には、弾性ロッドを変曲点の存在を含めた様々な長さの形状にさせることが有効であり、これを簡素な構造により実現するためには、弾性ロッドの支配方程式を解く際に膨大な計算量を要することからワイヤ配置についての解析的な検討が肝要であり、また軸方向に大きな内力が発生している変曲点のある弾性ロッドの形状においてもその長さを変化できる小型の駆動機構が必要であると論じている。そして、アクチュエータの数がロボットの自由度と等しい条件の下、弾性ロッドを変曲点が 1 個ある形状において静力学的平衡状態にさせるための必要条件に着目して、姿勢角の作業領域の拡大を図るワイヤ配置を 5 通り解析的に導出している。また、弾性送りねじおよびナットから成る駆動機構を提案し、これを実際に製作して実験装置に適用している。さらに、姿勢角の作業領域を算出した結果および製作した実験機を用いてコンフィギュレーションを測定した結果により、提案した機構設計が姿勢角の作業領域の大

幅な拡大に有効であることを確認している。

第4章「安定性解析」では、所望の静的安定性をロボットに発揮させるためには、ロボットを静力学的平衡状態にさせるための操作量を適切に選択することが肝要であると指摘し、操作量の選択がロボットの静的安定性に及ぼす影響を明らかにしている。まず、マニピュレーション運用における不安定な静力学的平衡状態の回避、準零剛性の実現における中立な静力学的平衡状態の実現などの例を挙げて、アプリケーションに応じて所望の静的安定を発揮させる必要があると論じている。そして、ロボットの操作量を弾性ロッドの長さとか各ワイヤ張力の大きさとした場合と各ワイヤ長さとした場合を対象とし、後者においてロボットに課せられる不等式の拘束条件に基づいてコンフィギュレーションを表すパラメータを選択して、ロボットが静的安定となるための十分条件式をそれぞれ具体的に提示している。さらに、それぞれの十分条件式に基づく静的安定性解析の結果により、所望の静的安定性に応じて選択すべき操作量を示している。

第5章「実測値に基づく安定性評価手法」では、所望の静的安定性を実機に的確に発揮させるためには、連続体ロボットの種々のパラメータが静的安定性に及ぼす感度が高いことなどから、実機においてその静的安定性の度合いを数値化可能とすることが必要であると論じ、ロボットの静的安定性を実測値に基づき不安定側も含めて定量的かつ高精度に評価する手法を提示するとともに、この手法を準零剛性を実現する操作量の決定に適用している。本手法では、ロボットが静力学的平衡状態にあるときの微小変位と微小変位させるのに外力がした仕事との関係を実測して静的安定性の評価値を算出するが、この実測において、操作量を適切に選択することにより不安定側も含めて定量的評価を可能としている。さらに実測値に含まれる計測誤差の影響を低減するために、適切な方向の微小変位を実験的に決定する手順を示し、その微小変位を実機に与えることを提案している。そして、本手法によって実機の静的安定性を評価した結果により、安定だけでなく不安定側も含めて定量化でき、かつ静的安定性評価の再現性が高いことを示している。また、提案手法を適用して操作量と静的安定性評価との関係を得ることにより、準零剛性を実現する操作量を高精度に決定できることを確認している。

第6章「結論」では、本論文で得られた成果と今後の展望について述べている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)

Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース :	機械	系
Department of, Graduate major in	エンジニアリングデザイン	コース
学生氏名 :	塩谷 峻太	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野) :	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	

審査員主査 :	武田 行生
Chief Examiner	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The objective of this thesis is to propose a fundamental methodology for mechanism design of continuum robots focusing on workspace and static stability. A planar 3-DOF one-segment continuum robot consisting of a variable-length elastic rod, cables, and disks was targeted.

Mechanism design that expands the orientation workspace with a simple structure was proposed. The effectiveness of realizing elastic rod shapes of different lengths with inflection points for the expansion of the orientation workspace was discussed. To achieve this with a simple structure, five cable arrangements were analytically derived by focusing on the moments acting on the elastic rod deformed into a shape with one inflection point, and a flexible feed screw driving mechanism was proposed. The effectiveness of this mechanism design in the significant expansion of the orientation workspace was presented through numerical analysis and experimental measurements.

The appropriate selection of manipulated variables according to the desired static stability depending on the application was discussed. The necessity for robots to exhibit the desired static stability was described, with examples that, while unstable static equilibrium must be avoided for manipulation, neutral static equilibrium is essential to achieve quasi-zero stiffness. Two types of selection for manipulated variables were considered: elastic rod length with either cable tension or cable length. For each case, a specific sufficient condition for the robot in a static equilibrium to be stable was derived. The appropriate selection of manipulated variables for the desired static stability was identified based on the results of static stability analysis under the derived condition.

To accurately exhibit the desired static stability in an actual robot, a method was presented that can quantitatively and accurately assess the static stability, including unstable equilibrium, based on actual measurements. This method was based on the selection of the manipulated variables enabling the measurement of robot parameters in unstable equilibrium and the determination of experimental conditions to reduce the effect of measurement error. Stability assessment results by this method showed that the static stability of both stable and unstable equilibrium was successfully quantified, with high repeatability. Finally, by applying this method, manipulated variables that achieve quasi-zero stiffness were successfully determined with high accuracy.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).