

学位被授与者氏名	名切 大 (Dai Nakiri)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 1 6 号
学位授与年月日	平成 2 1 年 3 月 2 0 日
論文題目	円筒状弾性要素を搭載した腱駆動マニピュレータの運動学数値解法
論文題目 (英訳または和訳)	Numerical Analysis of Kinematics of Tendon Manipulator equipped with Cylindrical Elastic Element for joint stiffness control
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻准教授 木野 仁 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 河村 良行 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻准教授 大山 和宏 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 横田 将生
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>人間などを含む脊椎動物の構造は筋肉・腱・骨から成り立っており筋骨格構造と呼ばれる。この構造のメカニズムは筋肉を収縮し、腱を引張ることにより、関節を駆動させる。この構造の特徴として、関節剛性の変化が挙げられる。関節剛性とは、関節が外力に対して回転し易いか、回転し難いかを表した指標である。人間などの脊椎動物は、筋肉に力を入れると、筋肉中に内力が生じ、関節が硬くなる (関節剛性が高い)。筋肉の力を抜くと、筋肉中の内力は小さくなり、関節が柔らかくなる (関節剛性が低い)。この関節剛性を変化させることは、我々の生活の中で重要なことである。例えば頭上から物が落ちてきた時、人間は関節剛性を高くし、頭部を守る。子供などに触れる時は、関節剛性を低くし、優しく接触する。この様に、人間は生活の様々な場面に合わせて関節剛性を変化させている。</p> <p>人とロボットの接触や、共同作業を行う際、安全性や作業効率の点からロボットにも関節剛性の制御が必要と考えられている。そこで我々は、Cylindrical Elastic Element (円筒状弾性要素; 以下 CEE) を搭載した腱駆動マニピュレータの提案を行う。腱駆動マニピュレータは、筋骨格構造を模倣したシステムであり、筋肉の代わりにアクチュエータを、腱の代わりにワイヤを用いている。このワイヤをアクチュエータで巻き取ることにより関節を駆動させる。CEE の形状は板バネを丸めたもの、もしくは円筒状の弾性物体である。関節剛性を変化させる場合には、この CEE を腱駆動マニピュレータのワイヤ経路上に設置し、ワイヤ内力 (張力) を変化させる。このワイヤ内力の大きさに伴い CEE が楕円形に変形することにより、ワイヤの方向を変化させ、システムの関節剛性を変化させることができる。CEE を用いたシステムは、軽量・低摩擦・低コスト・メンテナンスが容易など多くの利点が存在する。</p> <p>しかしながら、CEE が円筒状弾性物体であるため、ワイヤ内力 (張力) により CEE がどのように変形するのかが複雑であり、明らかにされていなかった。そのため、CEE を搭載した腱駆動マニピュレータの場合、任意の関節角度、任意の関節剛性の制御は困難であった。そこで、本論文では CEE の形状解析を行うことにより、提案するシステムの運動学の導出を数値的アプローチから行う。</p> <p>第 2 章では、CEE の特徴と CEE を搭載した腱駆動マニピュレータについて説明を行う。また、腱駆動システムでは、常にワイヤ内力が発生しているため、摩擦が生じやすい構造となっている。そのため、CEE の低摩擦性は有用的な特徴として挙げられているが、定量的に測定はされていなかった。そこで、CEE の静止摩擦の測定を行い、従来の関節剛性可変機構と比較することにより低摩擦性を検証する。を示した。</p> <p>次に、運動学の導出のために、CEE のモデル化を第 3 章で行う。モデル化の手法は幾つか存在するが、本論文ではリンクモデルを用いた 3 種類のモデルを提案する。さらに、3 つのモデルの中から、モデル精度及び計算コストを考慮した有用的なモデルを選出する。</p> <p>第 4 章では、選定した有用的なモデルを用いて、CEE を搭載した 1 リンク腱駆動マニピュレータの順運動学の導出を行う。本論文での順運動学とは入力ワイヤ長さより、</p>

マニピュレータの関節角度を求めることを意味している。提案しているシステムではワイヤ内力による CEE の形状が明らかにならなかったため、順運動学の導出は困難である。そこで、順運動学を求めるために、CEE の形状解析を行う。最小作用の原理より、物体の形状はひずみエネルギーが最小となる形状になることが知られている。したがって、この CEE もワイヤの拘束を受けながら、ポテンシャルエネルギー（ひずみエネルギー）が最小となる形状になると考えられる。そこで本論文では、繰り返し演算による数値的解法を用いて CEE の形状を求める。CEE の形状を推定することにより、関節角度を算出することが可能となる。提案している順運動学の検証のために、実際の実験装置で関節角度の測定を行っており、その結果と比較を行う。

次章では、先述した順運動学を拡張して、関節剛性の算出方法の確立を行う。順運動学では、ポテンシャルエネルギーを用いて関節角度の算出を行ったが、このポテンシャルエネルギーを利用して数値的に関節剛性の推定も可能である。本章では、仮想的な外力に対するポテンシャルエネルギーの変化を推定し、その変化量より関節剛性を算出する。本手法より推定した関節剛性と実験装置で測定した関節剛性と比較を行っており、その結果について報告する。

第 6 章では、逆運動学の導出を行う。本論文で述べる逆運動学とは、目標関節角度・関節剛性からワイヤ長さを求めることを意味している。逆運動学もポテンシャルエネルギーを用いてワイヤ長さ求める。逆運動学の確立のため、モーメントのつり合い及び、関節剛性に関するポテンシャルエネルギーの条件を設定する。その条件を満たす CEE の形状（ポテンシャルエネルギー）を繰り返し演算を使用して求めることにより、ワイヤ長さの算出を行う。提案をする逆運動学は実験による測定値と比較することにより、その有用性の確認を行う。

論文内容の要旨
(英文)

Vertebrate animals such as humans consist of muscles, tendons and skeletons, and it is so-called the musculoskeletal structure. Since the muscles are connected with the skeletons by the tendons, pulling the tendons by actuation of the muscles can move the joint. One of the most remarkable points is that this mechanism can change the joint stiffness depending on the internal force of the muscles. The joint stiffness is a physical quantity indicating the movability of a joint against external torque. If a human has tense muscles in the arm, the joints are inflexible (large stiffness) owing to generating large internal force. In contrast, the relaxing muscles result in the decrease of the internal force, hence the joint becomes flexible (small stiffness). The important point is that humans can change the joint stiffness according to the situation. For example, when an object falls to the human's head, the human will protect the head by large joint stiffness. If a human touches a child, the joint stiffness will become small enough not to hurt them.

In the environments where a human and a robot work collaboratively or a robot cares for a human, the robot needs to change the joint stiffness for safe and dexterous motions. Although general robots (which are installed actuators on the joints) can vary the joint stiffness by the software, that robots can be out of control under the influence of time lags, sensory noises and some disturbance. To overcome such difficulties, I propose a tendon-driven manipulator equipped with Cylindrical Elastic Elements (CEE). The tendon-driven manipulator is similar to the musculoskeletal structure in that actuators and wires are used in place of the muscles and the tendons. Pulling the wire by the actuator, this manipulator therefore can drive the joints. The CEE is made of a cylindrical flexible object or rolling of a blade spring. For the control of joint stiffness, CEEs are inserted into the routes of wires in a tendon-driven manipulator. Since the CEE can transmit wire tension by transforming itself into an elliptic shape, the variation of wire directions based on the deformation can change joint stiffness depending on

internal forces among wires. This system offers many advantages such as light weight, low friction, low cost and so on.

However, it is very difficult to derive the kinematics of the proposed system because the deformation of the CEE depending on the internal force is not clear. In order to overcome this problem, this thesis presents the framework to approximately solve the kinematics of a tendon manipulator equipped with CEEs.

In the second chapter, I explain the characteristics of a CEE and a tendon-driven manipulator equipped with CEEs. Especially the friction characteristics of the CEE are unveiled because the tendon-driven system is strongly affected by the friction. The static friction of the system using CEEs is compared with that of the system using idle pulleys.

In order to derive the kinematics, approximate models of a CEE are proposed in the third chapter. In earlier studies, although there were a lot of approximate modeling types for such a flexible object, this thesis proposes three multi-linkage models. From the viewpoint of the trade-off between model accuracy and calculation cost, the approximate models are evaluated through the comparison between experimental results and simulation results.

In the fourth chapter, I investigate the forward kinematics of a one-link tendon-driven manipulator equipped with two CEEs. In this thesis, the forward kinematics is defined as calculating a joint angle of the manipulator from wire lengths. In order to derive the forward kinematics, the deformation of a CEE is analyzed by using the selected approximate model. To analyze the deformation, I employ to minimize the potential energy of the system based on the principle of least action. From the deformation analysis, I demonstrate the forward kinematics solving method to numerically compute the joint angle from the wire lengths.

In the next chapter, expanding the forward kinematics, I discuss a calculation method of the joint stiffness. In the generality, the joint stiffness is obtained from a relation between the external torque and a joint angle variation depending on this torque. Noticing that the torque is associated with the variation of the CEEs' potential energy, the joint stiffness can be computed from the potential energy variation depending on virtual external force.

In the sixth chapter, a numerical solving method of inverse kinematics is discussed. In this thesis, the inverse kinematics is defined as calculating wire lengths from the joint angle and the joint stiffness. To numerically solve the inverse kinematics, I point out two conditions of the potential energy related to the joint stiffness and the equilibrium of force. From the conditions, the inverse kinematics can be numerically solved, and the usefulness of the proposed inverse kinematics is demonstrated.

Finally the last chapter concludes the numerically solving framework of kinematics of the tendon-driven manipulator equipped with CEEs.

論文審査結果

<学位論文審査の結果>

本研究では、人間の筋骨格構造を模した腱駆動ロボットに本論文で提案する円筒状弾性要素を搭載することで、ロボットの関節剛性を状況に応じて変化できることを主張している。円筒状弾性要素は、腱駆動ロボットのワイヤ内力を変化させることで、円筒状弾性要素の形状変化に伴うワイヤの方向変化により、関節剛性を変化させる。本要素はシンプル・軽量・低摩擦・低コストなどの多くのメリットが存在する。本システムを利用して腱駆動ロボットの関節角度・関節剛性制御を行う際には、これらとアクチュエータによるワイヤ巻取り量との関係（順運動学・逆運動学）を求めておく必要がある。しかしながら、円筒状弾性要素は、ワイヤの変位に伴い大きく変形する。一般にこのようなシステムにおける関節角度とワイヤ巻取り量は不静定問題と呼ばれ、解析的に解を得ることが出来ない。そこで、本研究では、円筒

状弾性要素を多リンクモデルで近似することを提案し、いくつかのモデルに対し実験に基づく評価を行った。実験結果からは提案する近似モデルが計算速度・精度の両面からきわめて有用なモデルであることが分かる。また、このモデルを利用し、順運動学の数値的解法を提案している。本論文では、ワイヤ端がインボリュート曲線に拘束されることに着目し、解析力学に基づくエネルギー最小化問題に帰着させ、非線形計画法を用いて解くことを提案している。また、これを拡張し、関節剛性とワイヤ巻取り量との関係を数値的に算出する方法を提案し、実験により有用性を確認した。本論文で取り扱う円筒状弾性要素を用いた腱駆動ロボットの運動学導出に関するフレームワークの構築は、過去の研究では全く行われておらず、独創性・新規性・学術性が評価される。

<学位論文公聴会>

日時、場所：平成21年1月29日 16:30より、D棟2階D25教室
出席者数：44名（主査・副査含む）

学位論文公聴会では、研究の背景と目的、円筒状弾性要素のモデル化と評価、運動学計算が不静定問題となることの指摘、順運動学の数値的解法、逆運動学の数値的解法、実験値と計算値の比較が提示され、最後に結論となった。申請者の発表の後、以下のような質問と意見が述べられた。

- (1) モデル化におけるパラメータ同定の方法について
- (2) 振動抑制の方法について
- (3) 円筒状弾性要素を搭載した腱駆動ロボットの設計方法について
- (4) 腱駆動ロボットの関節剛性調整要素における他研究との比較について
- (5) インボリュート曲線の拘束条件における物理的な意味
- (6) 提案する運動学解法と摩擦問題との関連性
- (7) 円筒状弾性要素に関する他研究との比較
- (8) 本研究の今後の方向性

これらの質問や意見に対して、学位審査主査および副査から一部コメントがあったが、申請者は一通り適切な回答を行うことができた。

<最終試験>

学位論文公聴会後に行われた最終試験では、インピーダンス制御に関するプレゼンテーションを行い、ロボット制御工学分野の学識を試験した。さらに、本研究に対する英語プレゼンテーションを行った。英語プレゼンテーションでは、質疑応答に対して英語で適切な回答を行うことができた。また、申請者は国際会議での口頭発表も経験しており、研究活動に必要な十分な語学能力を有していると判断した。

<総合判定>

学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。

以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。

主な研究業績

<学術論文>

- 1 「腱駆動ロボットの関節剛性可変機構に用いるベルト状プーリの静止摩擦測定方法の提案及び、静止摩擦特性の実験的検証」,
日本機械学会論文集 C編, Vol.73, No.732, pp2312-2319, (2007)
著者：木野 仁, 名切 大, 中村 豪
- 2 「ベルト状プーリの近似モデルを用いた1リンク腱駆動ロボットの順運動学」,

日本機械学会論文集 C編, Vol. 74, No. 743, pp1834-1840, (2008)

著者：名切 大, 中村 豪, 木野 仁

<査読付き国際学会発表>

1 “Deformation Analysis of Belt-formed Pulley to Adjust Joint Stiffness of Tendon Robot”,

IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 168, (2007)

Authors: Dai Nakiri, Tsuyoshi Nakamura, Hitoshi Kino

2 “Approximative Approach of Forward Kinematics for One-link Manipulator using

Belt-formed Pulley”,

IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, FA1-2, (2008)

Authors: Dai Nakiri, Tsuyoshi Nakamura, Hitoshi Kino

<査読付き国内学会発表>

1 「腱駆動ロボットの関節剛性調整に用いるベルト状プーリの形状解析：第2報」,
第12回 ロボティクスシンポジウム, 5D2, (2007)

著者：名切 大, 中村 豪, 木野 仁

<査読なし国内学会発表>

1 「ベルト状プーリの摩擦特性解析」,

第6回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 1G4-3, (2006)

著者：木野 仁, 名切 大, 中村 豪

2 「腱駆動ロボットの関節剛性調整機構に用いるベルト状プーリの特性解析」,

日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 1P1-B04, (2006)

著者：木野 仁, 名切 大, 中村 豪

3 「腱駆動ロボットの関節剛性調整に用いるベルト状プーリの形状解析：第1報」,
第24回日本ロボット学会学術講演会, 3A17, (2006)

著者：木野 仁, 中村 豪, 名切 大

4 「腱駆動ロボットの関節剛性調整に用いるベルト状プーリの形状解析：第3報」,
第25回日本ロボット学会学術講演会, 3M16, (2007)

著者：名切 大, 中村 豪, 木野 仁

5 「腱駆動ロボットの関節剛性調整に用いるベルト状プーリの形状解析：第4報
近似モデルを用いた関節剛性の算出」,

日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 2A1-H03, (2008)

著者：名切 大, 中村 豪, 木野 仁

6 「Tensegrity構造ロボットにおける狭所移動方法の考察」,

第9回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 3H1-2, (2008)

著者：木野 仁, 岸川 博美, 名切 大