

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13717

研究課題名（和文）機械式発話ロボットのためのソフトチューブ式ワイヤ駆動による柔軟舌機構の開発

研究課題名（英文）Development of a soft tongue mechanism by using a wire-pulling mechanism with embedded soft tubes for a utterance robot

研究代表者

遠藤 信綱（Endo, Nobutsuna）

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：30535844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：機械式発話ロボットの柔軟舌機構を構成するために、柔軟物と親和性のある駆動機構として、ソフトチューブ埋込式ワイヤ駆動手法を提案し、その実機製作、変形モデリング、耐久性評価試験、動作性能および変形モデルの評価試験を行った。本手法の適用により耐久性が大幅に向上した。50%までの収縮および90度までの湾曲が可能であることを確認した。変形モデルと実機との誤差は概ね10%程度、最大で15%程度であることを確認した。柔軟物変形計測のための誘電エラストマセンサを開発した。複数の誘電層材料により製作し、応答速度やヒステリシスを評価した。これを柔軟物に複数個取り付け、湾曲変形の曲げ方向を判別できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、「柔軟物を駆動する機構をどのように構成するか」というロボット工学的・機構設計学的「問い」に対し、ヒト口腔サイズという極めて狭小なサイズ制約下においても適用可能な柔軟物駆動手法を提案しており、機械力学・制御工学・材料力学を総合するソフトロボティクス設計論の構築に寄与する。さらに本研究の成果は、発話再現だけではなく、咀嚼・嚥下・吸啜などの口腔周辺系の物理モデリングや、舌を失った人のための人工舌の補綴技術の構築に繋がる。

研究成果の概要（英文）：To construct a soft tongue mechanism for a mechanical utterance robot, I proposed a soft-tube embedded wire-driven method as a drive mechanism that has affinity with a soft object. I fabricated the actual mechanism, performed deformation modeling, durability evaluation tests, and evaluation tests of its motion performance and deformation model. The durability was greatly improved by the application of this method. It was confirmed that the actual mechanism could contract up to 50% and bend up to 90 degrees. The error between the deformation model and the actual device was mechanism to be approximately 10%, with a maximum error of 15%. A dielectric elastomer sensor was developed for measuring deformation of a soft object. The sensor was fabricated using multiple dielectric layer materials, and its response speed and hysteresis were evaluated. I attached several of these sensors to a soft objects and confirmed that they can determine the bending direction of curved deformation.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ソフトロボティクス ソフトメカニクス ワイヤ駆動機構 舌 発話ロボット 柔軟センサ 誘電エラストマ

1. 研究開始当初の背景

ヒト口腔系・喉頭系における運動機能として、発話、咀嚼、嚥下、吸啜などが挙げられる。口腔系(咽頭から上顎・口蓋・舌・下顎・歯・口唇)および喉頭系(声帯・喉頭蓋周辺)の運動を解析することは、これらの器官のほとんどが身体内部に存在し、身体外部から全域を直接視認することが不可能であるため、四肢や体幹・頭部の運動解析に比べて困難である。MRIやX線造影による観察方法はあるが、静止状態での構造の計測か、短時間での大局的な位置姿勢の変化しか追えず、長時間の運動状態の観察や各部位にかかる力の計測は不可能である。計算機シミュレーションによって再現するアプローチも存在するが、各器官の生体における機械的特性の非線形性により、十分な包括的シミュレーションモデルを構築するには至っていない。

実世界における物理モデルとして再現、すなわちロボット工学によって機械的に再現するアプローチとして、代表的な発話ロボット Waseda Talker シリーズが挙げられる。その舌機構は、日本語五母音の発話時舌形状を静的に MRI で計測したものを要求仕様の基にしており、また、駆動機構はスライダクランク機構を組み合わせた機構の先に柔軟材料による舌表面の皮を被せたものである。よって、子音発話時の大きな曲率を持つ舌形状・運動の再現には不向きである。そもそもヒト舌は内部に骨格を持たない、筋肉(舌筋)の集合体である。一部の舌筋群の収縮により他の舌筋群が伸長する仕組みで、ヒト舌は複雑かつ柔軟な変形運動を可能としている。このようなヒト舌の柔軟構造と変形運動を再現するために、申請者は、柔軟舌構造をワイヤ引張駆動する機構が適していると考えた。

ワイヤ引張駆動による舌の変形としての先行研究は、発話ロボット Anton が唯一である。ヒト舌程度の柔らかさを再現するために、柔軟シリコン樹脂で舌を成形し、内舌筋の一つである上縦舌筋の運動を1本のワイヤで再現している。ワイヤを柔軟シリコン樹脂中に単に埋め込むだけでは樹脂がワイヤによって切り裂かれてしまう。Anton ではワイヤに数個のビーズを取り付けることで、ワイヤが樹脂を切り裂かずに、ワイヤ引張運動を舌変形運動に変換している。しかし、いくつものビーズ付ワイヤを舌成形時に埋め込むことが困難であるので、多自由度化はできていない。

申請者は、機械式発話ロボット Lingua の舌機構開発において、多自由度剛体リンク機構では、ヒト舌サイズの十分な変形量を達成可能な柔軟舌駆動は非常に困難である、ということを確認した。そこで、周方向繊維強化型柔軟空気圧アクチュエータの組み合わせによる柔軟舌機構 ZETS を開発したが、その応答性や、製作の難しさにより、十分ではないと考えた。申請者が以前、人間形ソフトハンドにて用いていたワイヤ引張機構は、柔軟物内でワイヤが柔軟材料自体を切り裂かないように硬いチューブを埋め込んでいるが、離散的な変形であり、連続的な変形を実現できない。キーとなるのは、ワイヤが柔軟物を切り裂かないで、柔軟物を変形駆動させる仕組みである。そこで、ワイヤを屈曲可能なチューブで覆いワイヤの引張動力を伝達する機構を、屈曲・伸縮なチューブにより構成すれば、柔軟舌内に埋め込んでも切り裂きが発生しないのでは、と考えた。

2. 研究の目的

本研究は、ヒト口腔系・喉頭系の物理モデルとしての機械式発話ロボットに搭載する、ヒト舌と同等の変形運動が可能な柔軟舌機構の実現を目的とする。この目的実現のために本研究では、解決が必要な「柔軟物を駆動する機構をどのように構成するか」というロボット工学的・機構設計学的「問い」に対し、本申請者独自のソフトチューブ埋込式ワイヤ駆動という創造的な手法を適用することで、柔軟物と親和性のある駆動機構による柔軟舌機構を開発する。これを機械式発話ロボットに搭載することで、ヒト口腔系・喉頭系の発話機能を再現する物理モデルを構築する。

3. 研究の方法

上記の目的のために、下記の課題を実施する。

(1) ソフトチューブ埋込式ワイヤ駆動機構の実機製作、変形モデリング、評価試験

本研究では、ワイヤ引張駆動機構を柔軟舌に組み込む方法として、ソフトチューブ埋込方式を提案している(図1, 2)。これにより、ワイヤが柔軟舌を切り裂かずに、多自由度の変形運動が可能な柔軟舌を実現できる。また、成形時にソフトチューブを固定して埋め込むことが可能なので、Anton の方式に比べ製作も容易である。

この提案手法による収縮・湾曲変形が可能な2自由度の柔軟機構を製作する。提案手法を用いない場合に対して、繰返し動作における機構の耐久性がどの程度向上するかを評価する。変形モデルを立式し、実機の変形量との比較を行うことで、その変形モデルを評価する。

(2) 柔軟物変形計測のための誘電エラストマセンサの製作、評価試験

提案手法の応用対象である柔軟舌は連続体であり、制御自由度に対して超冗長自由度系なので、ワイヤ変位だけでは正確な舌変形形状の推定は難しい。そこで誘電エラストマを用いた変形形状計測センサを開発し、評価する。

4. 研究成果

(1) ソフトチューブ埋込式ワイヤ駆動機構の実機製作, 変形モデリング, 評価試験

図3に示す収縮・湾曲変形が可能な2自由度の柔軟機構を製作した。図4に示すように50%までの収縮および90度までの湾曲が可能であることを確認した。提案手法を用いない場合は繰り返し動作の耐久回数が200回に満たなかったが、提案手法を用いた場合は2000回以上となり、10倍もの耐久性向上が確認された。区分曲率一定仮定の下に、図5に示す円弧状の変形モデルによるワイヤ引張量と中心弧長・曲率および端点位置の関係式を導出した。実機の変形状態を画像処理により計測する実験システムを構築し、片方のワイヤのみを引っ張った場合(図6)と、両方のワイヤを引っ張った場合(図7)における、変形モデルと実機の変形量を比較した。誤差は概ね10%程度、最大で15%程度であることを確認した。

これらの成果を、査読付き国際会議および査読付き国際学術誌において発表した。前者の国際会議においてBest Research Paper Award Finalistを受賞したことから、本研究の成果は国際的に高く評価されたといえる。

(2) 柔軟物変形計測のための誘電エラストマセンサの製作, 評価試験

図8に示す構造の誘電エラストマセンサを開発した。複数の誘電層材料(VHB4905, Suave-00, Suave-08)により製作し、応答速度やヒステリシスを評価した。既存の誘電エラストマセンサでよく使用されているVHB4905と比較して、本研究で独自に用いているSuaveシリーズは、その高い比誘電率により、感度に優れたセンサを構成できることが確認された(図9)。変形速度に対するセンサの応答速度について、VHB4905およびSuave-00では変形速度の増加に対して応答波形が崩れていくが、Suave-08ではその現象が見られないことが確認された(図10)。また、変形速度の増加に対してどの誘電層材料においてもヒステリシスが增大していくが、Suave-08ではその増大の程度が小さいことが確認された(図11)。開発した誘電エラストマセンサを直方体形状の柔軟物に複数個取り付け、湾曲変形の曲げ方向の判別できることを確認した(図12)。

これらの成果を、2つの国内学術講演会、1つの国際ワークショップで発表した。

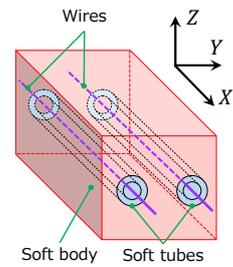


図1 ソフトチューブ埋込式ワイヤ駆動機構の模式図

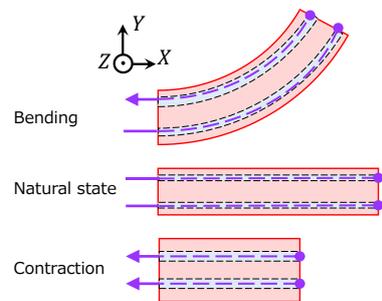


図2 ワイヤ2本の引張量の組合せによる収縮・湾曲変形

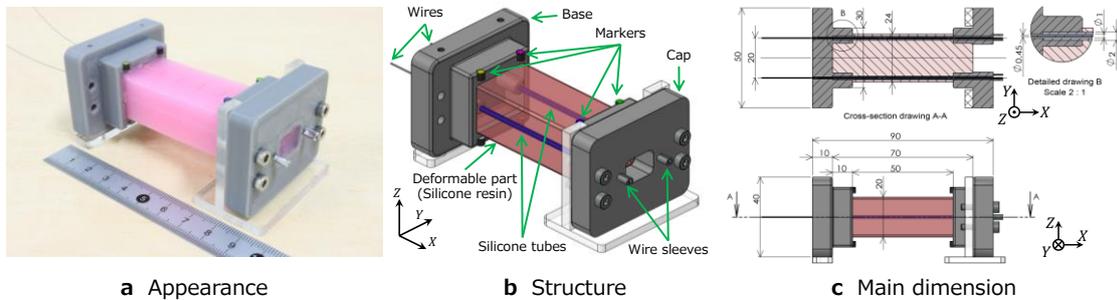


図3 製作した柔軟機構

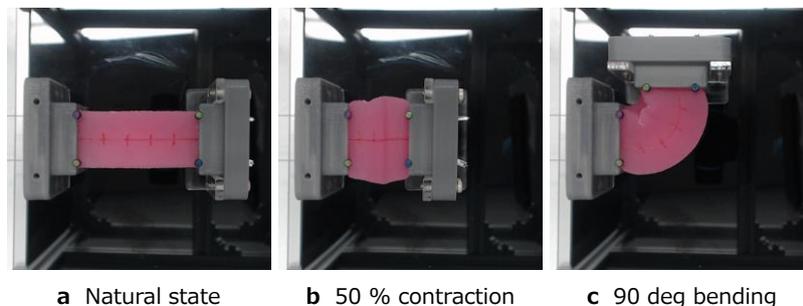


図4 柔軟機構の収縮・湾曲変形

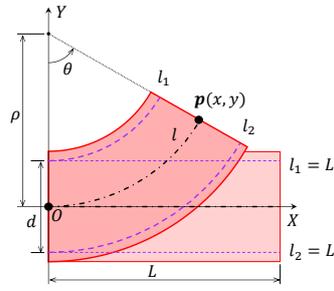


図5 変形モデル

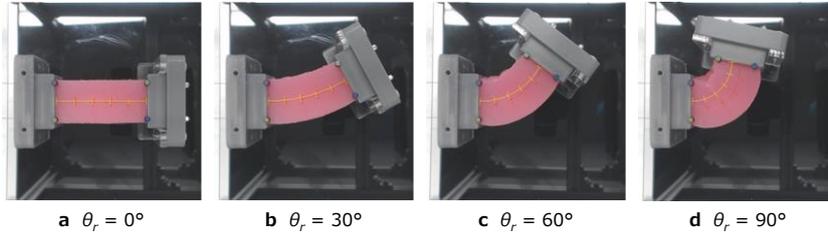


図6 片方のワイヤのみを引っ張った場合の変形. 黄線は変形モデルによる理論線である

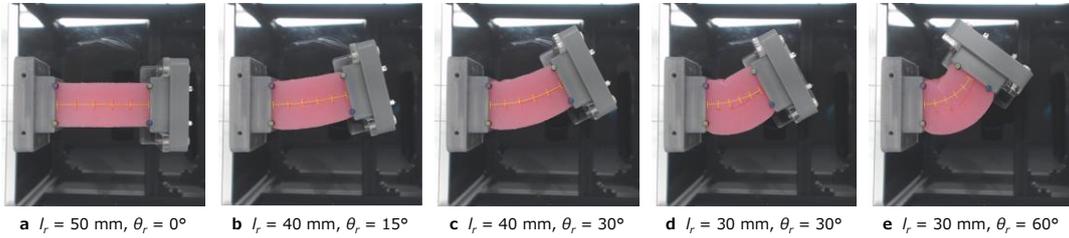


図7 両方のワイヤのみを引っ張った場合の変形. 黄線は変形モデルによる理論線である

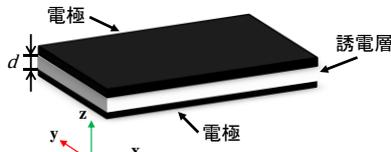


図8 誘電エラストマセンサの構造

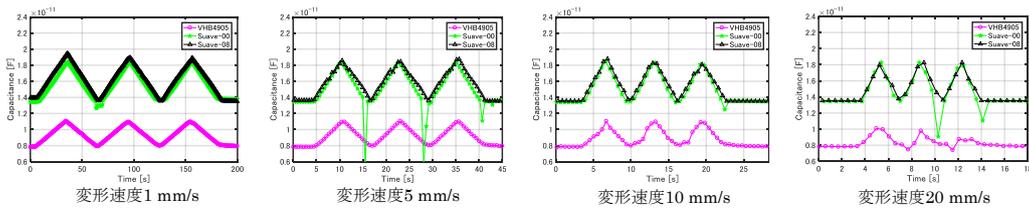


図9 誘電層材料による感度の違い

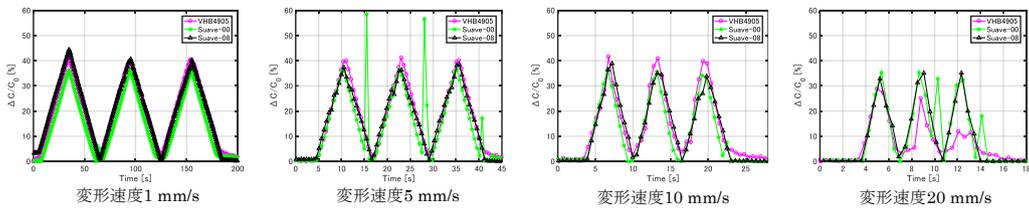


図10 誘電層材料による応答波形の違い

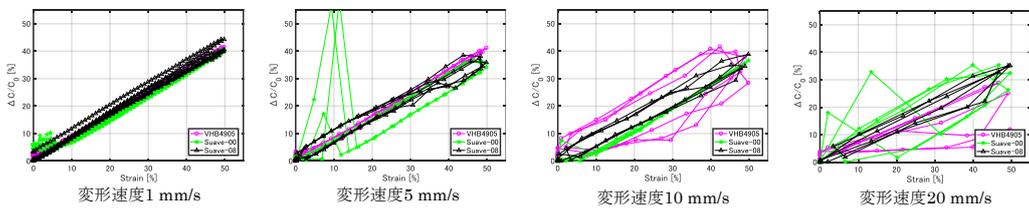
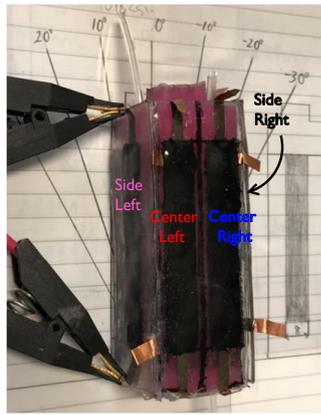
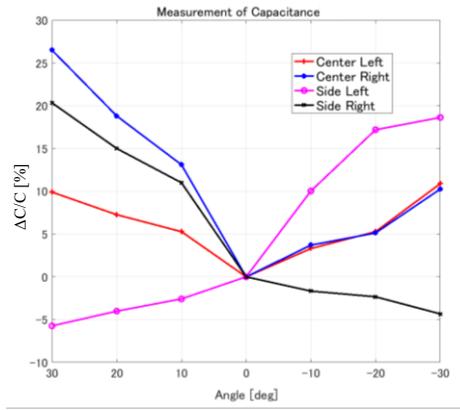


図11 誘電層材料によるヒステリシスの違い



測定の様子



曲げ変形角度と静電容量の変化率

図 12 柔軟物の湾曲変形のセンシング

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nobutsuna Endo	4. 巻 8
2. 論文標題 Deformation model and experimental evaluation of a contractable and bendable wire-pulling mechanism with embedded soft tubes for a robotic tongue	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-021-00193-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nobutsuna Endo, Yuta Kizaki, and Norihiro Kamamichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Flexible Pneumatic Bending Actuator for a Robotic Tongue	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 894 ~ 902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p0894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Nobutsuna Endo
2. 発表標題 Wire-Pulling Mechanism with Embedded Soft Tubes for Robot Tongue
3. 学会等名 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木崎裕太, 遠藤信綱, 釜道紀浩
2. 発表標題 舌機構のための柔軟空気圧湾曲アクチュエータ - 変位と曲率の同時制御 -
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Morita, Yuta Kizaki, Nobutsuna Endo, Norihiro Kamamichi
2. 発表標題 Dielectric elastomer sensor for shape measurement of soft robots
3. 学会等名 Japan-China Joint Workshop on Recent Advances on Active Soft Materials 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森田和希, 遠藤信綱, 釜道紀浩
2. 発表標題 誘電体エラストマーセンサにおける誘電層材料の比較検証
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木崎裕太, 遠藤信綱, 釜道紀浩
2. 発表標題 舌機構のための柔軟空気圧湾曲アクチュエータ-応答特性の基礎検証-
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木崎裕太, 遠藤信綱, 釜道紀浩
2. 発表標題 舌機構のための柔軟空気圧湾曲アクチュエータ-材料の硬さによる特性変化の検証-
3. 学会等名 第19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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森田和希, 遠藤信綱, 釜道紀浩
2. 発表標題 ソフトロボットの形状測定のための誘電体エラストマーセンサ：センサ配置の基礎検証
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤信綱
2. 発表標題 ソフトマテリアルを用いた機械式発話ロボット
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門ソフトマテリアル応用部会主催講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関