

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14944

研究課題名（和文）織物構造アクチュエータの効率的製造を可能にする織機の開発

研究課題名（英文）Development of a weaving machine that enables semi-automatic fabrication of textile structural actuators

研究代表者

堀井 辰衛 (Horii, Tatsuhiro)

東京工業大学・生命理工学院・研究員

研究者番号：90839226

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：近年、PVCゲルの様な誘電ゲルや誘電エラストマーを用いたソフトアクチュエータの低電圧駆動化や効率的製造手法の開発に関する研究が数多く報告されており、人工筋肉や触覚提示デバイスへの応用が期待されている。本研究では織物型PVCゲルアクチュエータの半自動生産を可能にする織機的设计を実施した。

その後、触覚提示デバイスへ適用可能かつ皮膚貼付可能な積層型誘電エラストマーアクチュエータ（DEA）の作製評価と、皮膚へ貼付可能な静電容量型薄膜歪みセンサを開発した。センサを無線ユニットと組み合わせることによりリアルタイムで身体動作（指の屈伸、嚥下）を測定することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日常生活や作業、運動時の身体動作を長期、即時計測し、その情報を離れた人間の感覚器官に伝達可能な触覚デバイスを開発すれば、特殊技術の教示や疾病の早期発見への貢献が期待できる。しかし、従来のセンサ、触覚デバイスは重く硬質であるため、皮膚の変形等を捉えるのが困難である。柔軟な触覚デバイスの報告は数多くあるが、生体組織との間の機械特性の差により自然な体の動きを妨げやすい。すなわち、生体組織に対して曲げ剛性が低く、伸縮性に富んだデバイスが重要である。このような触覚デバイスを創生することで、自然な身体動作を即時検出し、身体動作情報を伝達するような新たなシステムやヘルスケアモニタリングへの貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, numerous studies have been reported on the development of low-voltage drive and efficient manufacturing methods for soft actuators using dielectric gels and dielectric elastomers such as PVC gel, which are expected to be applied to artificial muscles and tactile sensation presentation devices. In this study, we designed a weaving machine that enables semi-automatic production of woven PVC gel actuators.

Subsequently, we evaluated the fabrication of a laminated dielectric elastomer actuator (DEA) that can be applied to tactile presentation devices and can be applied to the skin, and developed a capacitive thin-film strain sensor that can be applied to the skin. By combining the sensor with a wireless unit, it became possible to measure body movements (finger flexion and extension, swallowing) in real-time.

研究分野：高分子化学、高分子機能、高分子物性

キーワード：誘電エラストマーアクチュエータ グラビアコート ナノシート 歪みセンサ ワイヤレス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間の身体は、日常生活や運動中などにおいて数えきれないほどの複雑な動作を処理している。加えて、その身体動作の大半は無意識で行われていることが多い。そのような身体動作を長期、リアルタイムで計測し、その情報を離れた人間の感覚器官に伝達可能な触覚デバイスを開発できれば、スポーツや手術などの特殊技術の教示やトレーニング、または疾病の早期発見への貢献が期待できる。しかし、従来のスマートウォッチや触覚提示デバイスは重く硬質であるため、装着時の違和感を生み出すのみならず、対象となる複雑な変形を捉えることができないといった問題を抱えている。生体に貼付可能な柔軟な触覚提示アクチュエータやセンサの報告は数多くあるが、センサの機械的特性と生体組織の間に常に差が存在するため装着者に不快感を与え、自然な体の動きを妨げる可能性がある。すなわち、生体組織に対してヤング率が低く、破断点での引張りずみが多い材料や構造選択をすることが戦略的に必須である(表皮:約1MPa, 75%)。このような触覚デバイスを創生することで、自然かつ不規則、不随意的な身体動作を的確に検出し、仮想現実や遠隔操作技術を組み合わせることで身体動作情報を伝達するような新たなシステムを開拓し、臨床検査や日常のヘルスケアモニタリングなどに貢献できると考えられる。

2. 研究の目的

本課題に申請時は、高性能な織物構造アクチュエータ製造システムを構築するのに必要な因子と最適な構造条件を明確にすることであった。そのため、令和1年度、2年度にはアクチュエータの効率的製造を可能にする織機を構成する部品の設計・作製を目的とした。

令和3年度以降は、申請者の所属変更に伴い実験環境が大きく変化したことも起因して、触覚提示デバイスに利用可能な皮膚貼付可能なアクチュエータの作製・評価、触覚検知可能な薄膜型歪みセンサの開発を目標とした。

3. 研究の方法

(令和1、2年度) 信州大学繊維学部の橋本研究室所有の3D-CADソフト「SolidWorks」を用いて経系の奇数系と偶数系をそれぞれ反対の方向に、同じ距離だけ、同時に上げ下げが可能な綜統の構造を設計した。さらにその構造を3Dプリンタで造形した。その後、本基金で購入した3D-CADソフト「Auto cad」で設計を改良した。

(令和3、4年度)

(1) 導電性超薄膜の作製

グラビアコート法を用いて、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)をポリ(スチレン-*b*-ブタジエン-*b*-スチレン)(SBS)超薄膜(ナノシート)上に塗布し、柔軟性や皮膚貼付性に優れたSWCNT-SBSナノシートを作製した。

(2) 積層型アクチュエータの作製と評価

剛性の異なる3種類の基材(ガラス、Ecoflex 00-30、ウレタン製モデル皮膚)上にSWCNT-SBSナノシート(電極)と、皮膚に匹敵するヤング率(約100kPa)を有するシリコンエラストマー(Ecoflex 00-30)を誘電層として交互積層し、10層積層型の誘電エラストマーアクチュエータを作製した。500V~2100Vの電圧をアクチュエータの電極間に印加、除去した際の膜厚方向の変位量をレーザー変位計を用いて性能を評価した。

(3) 静電容量型薄膜歪みセンサの作製

Ecoflex00-30(誘電層)を二枚のSWCNT-SBSナノシート(電極)で挟み込むことで静電容量型歪みセンサを作製した。引張試験にセンサを取り付け、センサの長軸方向に100%伸長、または元のサイズに回復させた際の静電容量の変化を測定することでセンサ感度を評価した。また、繰り返し伸長回復させた際のセンサ感度も評価した。最終的に指関節や喉などの皮膚上に貼付し、無線ユニットとセンサを組み合わせることで喉や指関節上におけるセンサの貼付性と性能を評価した。

4. 研究成果

(令和1、2年度) 信州大学繊維学部の橋本研究室所有の3D-CADソフト「SolidWorks」を用いて、経系の奇数系と偶数系をそれぞれ反対の方向に、同じ距離だけ、同時に上げ下げが可能な綜統を構成する小部品の設計を行った。設計した部品を具体化するため、3Dプリンタを用いて小部品のうち1種類を作製した。結果としては、プリンタの精度に対する小部品のサイズが小さく、精細な完成品を得ることができなかった。そのため、CADソフトを用いて織機の綜統の枠の設計と小部品の構造改良をした。令和1年度では、綜統の小部品の回転部品まで一体型として設計・造形を試みたため、3Dプリンタでの造形が困難であった。そこで令和2年度では、別造形または市販品の回転部品を後から装着できるような構造を設計した。枠部分に関しては、枠の上下端

面に前述の小部品とワイヤーを組み合わせた部品を組み込めるような（間隔をある程度自由に変更可能）スリットを持つ構造を設計した。

（令和 3、4 年度）

（1）皮膚へ貼付可能な積層型誘電エラストマーアクチュエータ（DEA）（文献[1]を引用）

SWCNT の層厚が 20 nm の SWCNT-SBS ナノシート（膜厚：101 nm）は、SBS ナノシート（ヤング率：70.5 MPa）と同等のヤング率（80.9 MPa）を示した。この SWCNT-SBS ナノシートを電極として、剛性の異なる 3 種類の基材（ガラス、Ecoflex 00-30、ウレタン製皮膚モデル）上に 10 層積層の積層型 DEA を作製した。この 10 層積層型 DEA の曲げ剛性は 105 nN・m と表皮（厚み：100 μm、曲げ剛性：1.10×10⁴ nN・m）よりも柔軟であり、人差し指上に貼付可能なことがわかった（図 1(a)）。この DEA に 2100V の電圧を印加すると、Ecoflex 00-30 基板上の DEA はガラス基板上と比較して 2 倍以上の変位歪み量（ガラス：1.7%、Ecoflex 00-30：4.9%）を示した。将来的に、DEA の膜厚構成を最適化することで、駆動電圧の更なる低下や触覚提示（ハプティクス）デバイスへと展開することが可能と考えられる。

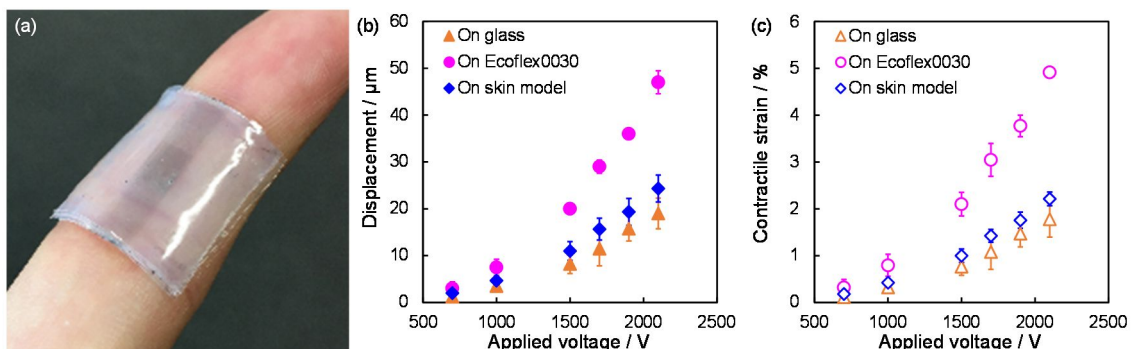


図 1 (a)人差し指上に貼付した 10 層積層型アクチュエータの写真。(b)10 層積層型アクチュエータに電圧を印加した際の膜厚方向の変位量、(c)変位量をアクチュエータの厚みで割ることで算出した歪み。（文献[1]を改変して引用。）

（2）静電容量型薄膜歪みセンサ

センサの静電容量変化は、0～100%の範囲（生体組織の変形範囲）で引張りずみの増加に伴って非線形に増加した。さらに、DE 層の厚みが 260μm から 40μm に減少すると、感度は 0.64 から 1.13 に増加することがわかった。当該センサを皮膚や血管モデルに貼付し、無線センシングユニットと組み合わせることで、指の屈伸運動、血管モデルの拡張、喉の嚥下運動などに応じて、静電容量値が変化することがわかった（図 2(b,c)）。当該センサは生体組織に接着剤や固定具なしで貼付可能であり、無線ユニットと組み合わせることで身体動作による生体組織の変形をリアルタイムでモニタリングできることが明らかになった。

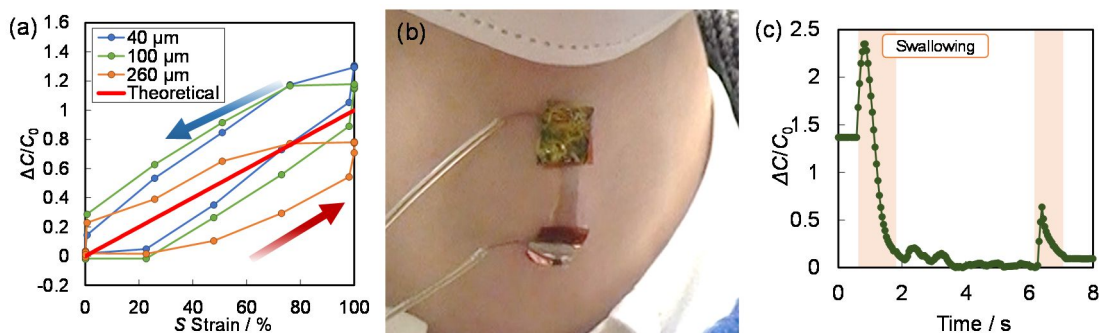


図 2 (a)誘電層の膜厚が異なる 3 種類のセンサの印加ひずみに対する静電容量変化率。(b)のどぼとけ周辺に貼付したセンサ（誘電層厚み：40 μm）の写真。(c)(b)の状態での嚥下した際のセンサの静電容量変化。このセンサは無線ユニットと組み合わせることで、歪みを静電容量の変化として検知し、ソフトウェアを用いてリアルタイムでグラフ化が可能である。

文献

[1] T. Horii, K. Okada, and T. Fujie, “Ultra-thin and conformable electrodes composed of single-walled carbon nanotube networks for skin-contact dielectric elastomer actuators,” *Adv. Electron. Mater.*, 2200165 (2022).

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 Ito Marimo, Horii Tatsuhiro, Fujie Toshinori	4. 巻 8
2. 論文標題 Polymer Nanosheet Interfaced Bioelectrode for Skin Inert sEMG Measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2100213 ~ 2100213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202100213	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 Horii Tatsuhiro, Okada Kei, Fujie Toshinori	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra Thin and Conformable Electrodes Composed of Single Walled Carbon Nanotube Networks for Skin Contact Dielectric Elastomer Actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2200165 ~ 2200165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202200165	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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 堀井辰衛、岡田慧、藤枝俊宣
2. 発表標題 皮膚への高い追従性を有する導電性超薄膜の誘電エラストマーアクチュエータへの応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuhiro Horii, Kei Okada, Marimo Ito, Toshinori Fujie
2. 発表標題 A Stretchable and Water Vapor Permeable Bio-Electrode with Carbon Nanotube Fibrous Network
3. 学会等名 Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀井辰衛、岡田慧、藤枝俊宣
2. 発表標題 導電性超薄膜から成る皮膚へ貼付可能な伸縮性電極の 誘電エラストマーアクチュエータへの応用
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuhiko Horii, Toshinori Fujie
2. 発表標題 Ultra-thin Compliant Electrodes with Free-Standing Towards Skin-Contact Dielectric Elastomer Actuators
3. 学会等名 Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuhiko Horii, Kei Okada and Toshinori Fujie
2. 発表標題 Ultra-Thin and Conductive Films Composed of Single-Walled Carbon Nanotubes for Dielectric Elastomer Actuators
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 導電性ナノ薄膜とそれを用いた誘電エラストマーアクチュエータ	発明者 藤枝 俊宣 , 堀井 辰衛	権利者 国立大学法人東 京工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-126376	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------