

研究終了報告書

「双方向 ソフトデバイスによる機械システム制御を用いた柔軟アクチュエーションシステムの開発」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：太田 裕貴

1. 研究のねらい

ゴム材料といった柔らかい有機材料(ソフトマテリアル)を使用した柔軟センサと、それを用いたスマートシステムの最先端研究が数多く報告されている。これらソフトマテリアルを利用したフレキシブル・ストレッチャブル(伸縮)センサといった Input の研究は 1990 年代から盛んに行われてきた。一方で、Output に対応するソフトマテリアルによるアクチュエータの研究は 2011 年ごろから加速度的に増加している。ソフトアクチュエータの応用は、軍事、緊急時救援、リハビリ、淡水・海水中の利用、超軟材料の輸送などの用途で期待されている。現在、多くのソフトアクチュエータの材料にはシリコーンゴム樹脂が使用され、その動力には高圧空気が使用されている。そのため、現段階のソフトアクチュエータには、①関節部がなく多点の動作が困難、②空気圧を導入するためのポンプが大型である、③スタンドアロンで動作するためのフィードバック制御システムがないという欠点を有している。実際のリハビリ用の人体機構の補助デバイスやロボティクスでの使用を考慮する上で、以上の3点を克服することは必要不可欠である。

そこで本研究では、従来のソフトアクチュエータに携帯性・制御機構を付加するために、①液体金属を用いたソフトマテリアルからなるスタンドアロン型の体積膨張・曲げアクチュエータの開発、②ソフトマテリアルによる伸縮・曲げセンサとソフトアクチュエータによるフィードバック制御機構、③ Solid-state electronics(固体電子工学)による制御システムを実装し、スタンドアロンで動作するソフトアクチュエーションシステムを開発することを目的とする。このシステムのデモンストレーションとして、手のリハビリテーションで利用するためのスタンドアロンで動作する超柔軟リハビリテーショングローブを開発する。本課題が実現することでソフトマテリアルを用いたアクチュエーション制御に新たな展開を望むことができるだけでなく、ソフトアクチュエータによる新しい人-機械インターフェースを実現できる。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の目標を達成するために三つの段階にそれぞれ取り組んだ。第 I ステージにある硬軟一体パッケージと液体金属による配線構造を用いた温度システムの構築を行った。その結果、液体金属によるミランダ配線技術を確立し、温度システムの実装を実現した。このシステムは、ひじ部位などの進展による変形対して高いロバストネスがあり、安定した温度計測を可能にした。さらに、このデバイスを足部に装着して階段などの運動を行ったとしても安定した温度の計測を可能にした。さらに、第二ステージに当たる低温揮発性液体を利用したシリコンゴム材料による電気駆動型体積拡張アクチュエータの検討を行った。実際には Ecoflex シリコン樹脂材料の中に低温揮発液体を封入することで 45°C 程度での体積膨張を行うことができる構造体を実現した。そのアクチュエータ内部に硬軟構造を利用した温度センサと伸縮センサを実装することで温度と伸縮の同時計測を行った。その結果、温度センサと伸びセンサを実装した熱膨張性アクチュエータを実現した。しかしながら、低温揮発液体を使用したアクチュエータ及びエタノールの混合することによる膨張型アクチュエータは気化したエタノールや低温揮発液体がアクチュエータから漏れ出ることによって再現率が低下するなど多くの課題を多く抱えてた。そこで本研究では化学反応によるアクチュエータを用いることにより再現性の高いアクチュエータを実現した。実際にはマイクロ流体技術を融合することにより、スタンドアロンで動作するソフトアクチュエータを実現した。更に前述の伸縮センサ情報を転送するシステムと長距離給電技術を用いることでアクチュエーションもセンシングもバッテリーレスで行うことができるアクチュエータを開発した。

(2) 詳細

本研究はソフトセンサ・アクチュエータからなる入出力を用い制御可能なスタンドアロン型のソフトアクチュエーションシステムを実現することを最終目標としている。そのために三つのステージにおいて、それぞれ目標を定めた。

ステージ I 硬軟一体パッケージの基礎加工方法の確立とシリコン材料によるアクチュエータの開発

(目標)硬いエポキシと柔らかいゴム材料のパターンによる硬軟一体パッケージの実現

SU-8 をパターンしフッ素加工を施したガラス板に、PDMS (Polydimethylsiloxane) と Eco-Flex 00-50 をパターンし硬化させた。硬化後、PVA (Polyvinyl Alcohol) を製膜した PEN (polyethylene terephthalate) フィルムと Eco-Flex 00-50 で接着した。SU-8 によりできたくぼみにエポキシ樹脂をスクリーン印刷でパターンし硬化させた。エポキシ樹脂, PDMS,

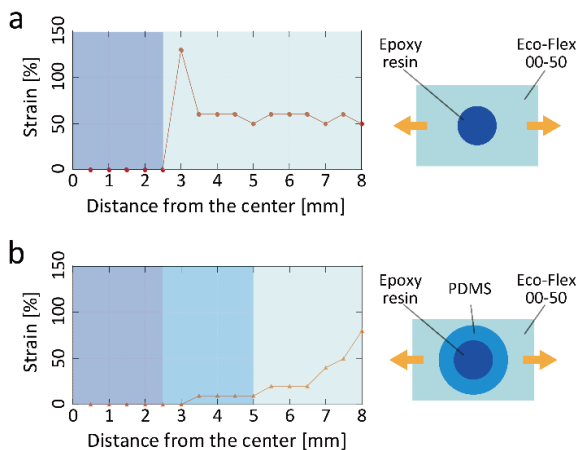


Fig. 1 硬軟構造をもった基板の引張. a. 二層構造、b. 三層構造

、Eco-Flex 00-50 で順に封入を行い、純水により PVA シートを溶かし硬軟パターンを得た。その結果が Fig. 1 となる。Fig. 1b にあるようにエポキシ、PDMS、Ecoflex の三層からなる基板の際大きくひずみを避けることができた。更に、その基板を用いて温度計測デバイスを実現した。ひざに装着し伸縮させたときの温度測定結果を示す。また、10 回ひざでの伸縮を繰り返した時の温度測定の変化を示す。これより、繰り返しの伸縮や運動時でも動作が安定していることがわかる。また、デバイスは全体ひずみが 50 % となるまでは動作することを確認した。

(目標)化学反応アクチュエータの実現

本研究申請時当初はエタノールを利用した体積膨張型曲げアクチュエータを提案していたが酸化エタノールの漏れることで再現性が非常に低く、反応も非常に遅かった。柔らかいシリコン材料を基材としている以上、この問題を除くことができない。そのため、新たな機構を開発した

(Fig. 2)。マイクロ流路システム内で酸化マンガンと過酸化水素による化学反応によって発生した気体を用いて駆動する。このマイクロ流路システムはマイクロ流体ダイオードを用いたフィンガーポンプによって駆動し、外部システムを要しない。応用を検討するためソフトグリッパーを作製した。このグリッパーを用いてスポンジキューブを掴むことができた(Fig. 3)。動作させた後、排気装置を押して酸素を排出することによってグリッパー内の圧力を開放し、コルクを移動させた。

ステージⅡ：ソフトマテリアルによる伸縮センサとソフトアクチュエーターからなるフィードバック制御システムのインテグレーション

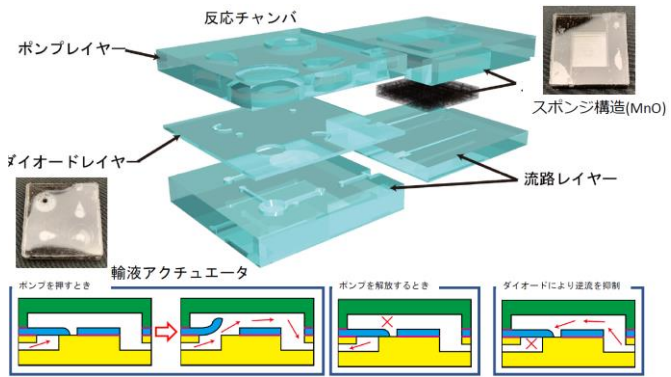


Fig. 2 液体ダイオードの構造

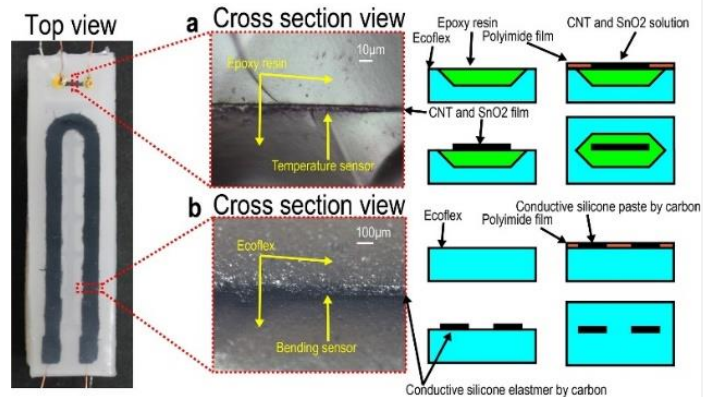


Fig. 3 化学アクチュエータによるグリッパー

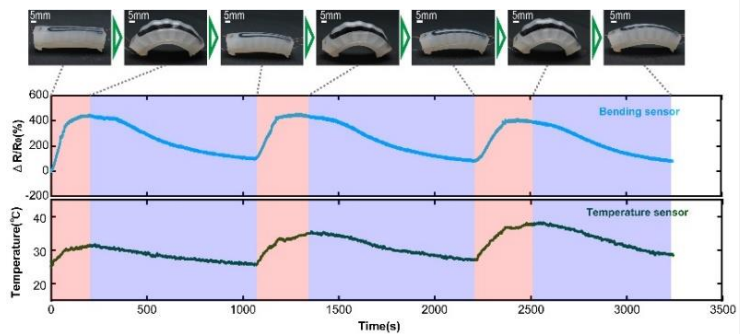


Fig. 4 曲げセンサと温度センサ。a. 温度センサ, b. 曲げセンサ

(目標)ソフトフィードバック制御システムのインテグレーションを実現

本研究で使用する曲げセンサ及び温度センサの構成を Fig. 4 に示す。曲げセンサは柔軟シリコーンである Ecoflex を基剤とし、カーボンを混練することで導電性を確保したものを使用している。温度センサは単層 CNT 及び酸化スズからなるナノ粒子フィルムによって作製した。この温度センサは伸縮性を持たず、伸長時の破断を抑制するために硬質なエポキシ樹脂で保護している。それぞれ温度センサと曲げセンサの抵抗変化率を示している

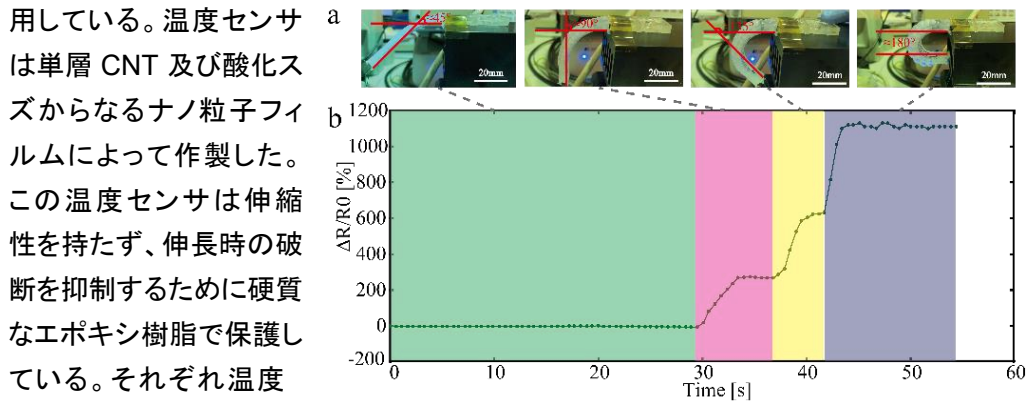


Fig. 5 化学反応アクチュエータ上での曲げセンサの信号変

る。温度センサの抵抗比は温度に対して線形に減少した。対して曲げセンサの抵抗値は湾曲角度に従って線形に増加した。曲げセンサと温度センサの性能を観察するために、定温条件下で空気を圧入したこの結果より、本温度センサはシステムの変形を検出することなく温度のみを独立で検出可能できた。

このセンサを用いて実際に熱膨張実験を行った。デバイス内部に高揮発性の液体(Novec)を導入し、温度変化によってデバイスが変形する様子を観測した。結果を Fig. 5 に示す。これより、本デバイスは温度変化によって適切に変形することでイモムシと同様の歩行を行え、その際に各センサが動作していた。

更に本曲げセンサと化学反応型のソフトアクチュエータを組み合わせた結果が Fig. 7 である。Fig. 7 から分かるように、今回実験に用いたサンプルは、三回の輸液でソフト曲げアクチュエータが 180° 近くまで曲がっており、それを曲げセンサで検出できていた。これにより化学反応を動力源とする小型ソフトアクチュエータシステムの作製が可能であることが示された。



Fig. 6 リハビリテーショングローブ

ステージⅢ: 超柔軟リハビリテーショングローブ

(目標) スタンドアローンで動作するソフトセンサ・アクチュエータからなるアクチュエーションシステムの実現

ソフトセンサ・アクチュエータからなる入出力を用い形態変化に立脚した機械システム制御を実現する。その上で単点制御から多点動作・制御できる自律型ソフトアクチュエーションシステムことが目標であった。しかしながら、本研究ではソフトアクチュエータのメカニズムそのものを変更し、スタンドアローンで動作するソフトセンサ・アクチュエータからなるアクチュエーションシステムを目標とした。そのデモンストレーションとしてスタンドアローンで動作するリハビリテーショングローブを作製した(Fig. 6)。センシング・アクチュエーションをバッテリーレス

にするために長距離非接触給電をセンシングシステムに導入した(Fig. 7)。その結果、化学反応で駆動するアクチュエータの曲げの角度をソフトセンサで検出することができた(Fig. 7)。以上から、最終目標であるバッテリーレスかつスタンドアロンで動作するアクチュエーションシステムを実現した。

・他の研究者や産業界との連携

本研究課題を通じて、アクチュエータに関する研究では東京大学川原圭博教授との連携を行うことができた。またそのほかの要素技術開発では大阪府立大学竹井邦晴教授と傾斜センサの検討で、南山大学野田聡人准教授とは非接触給電技術において連携をすることができた。またスマートデバイスに応用する際には GMO ペパボ株式会社との連携をすることができた。以上から国内を軸に産学の連携に拡大することができた。

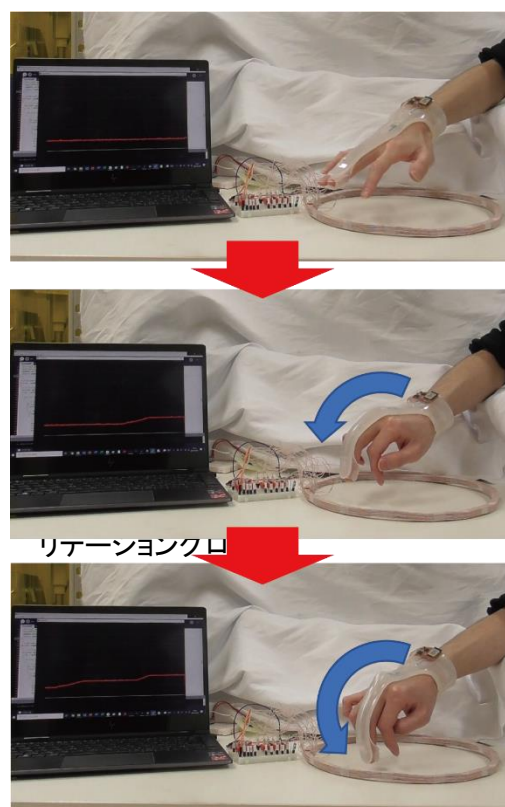


Fig. 7 曲げセンサーが実装したリハビリテーショングローブ

3. 今後の展開

今回の研究結果により、大きく二つの展開を考えている。研究前半に行ったスタンドアロンのストレッチャブルデバイスに関して、構築の基盤技術をもとに企業とともに次世代スマートデバイスの研究開発に取り組むことを考えている。ストレッチャブルデバイスは人体と密着性が高く、人体から SN 比の高い信号を得ることができる。そのため次世代のウェアラブルデバイスとして期待されている。その一方で、キラーアプリを実現できていない。今後は、ストレッチャブルデバイスの利点を生かしたグローブ型のデバイスでの展開を考えている。本領域におけるデバイスはこれまで困難であった人体で複雑な形状を有する部位(手等)の情報を得ることが可能である。今後企業との共同研究を通じて社会へ実装する上で必要とされるデザイン性・ロバスト性・機能性を詳細に詰めて社会に提供できるようなキラーアプリを開発していくことを検討している。研究開発を3年間で行い、その後2年程度で社会実装を期待している。

もう一つは液体金属を用いたソフトロボットの制御機構の実現である。液体金属は、そのほかの導電性材料に比べて柔らかくかつ変形に対する安定性も高い。そのため、大変形を起こし柔らかいソフトロボットに対して相性が良い。しかしながら、ソフトロボット自体が、まだ発展途上にあり研究段階にある。ロボティクス分野において、本研究で行ったセンサの実装技術や、液体金属による縦横無尽なコネクション(例えばロボット関節部における全方位的な導電性)等、まだ応用とし

て可能性と余地を有している。そのため、本分野に関しては国内外におけるコミュニティ(例えば新学術領域研究 ソフトロボット学の創生)に参画することによって、ソフトロボット及びソフトアクチュエータ分野におけるニーズをくみ取りつつ本技術の普及を目指していきたいと思っている。近い社会実装を目指して、液体金属の特性に関する原点に立ち戻り、ロボットアクチュエーターを開発製造している企業との連携を模索することで社会実装を加速させる。ソフトロボット・アクチュエーターの社会実装には、当該分野の社会への浸透も勘案すると 10 年以上の時間が必要であると考えられる。

4. 自己評価

研究目的のソフトセンサとソフトアクチュエータからなるスタンドアロン型のソフトロボットを実現した。当初の予定とは異なってしまったが化学反応型のアクチュエータとマイクロ流体の融合した研究はこれまでなく世界初の試みである。現在、論文に向けて結果をまとめている。また、派生研究で分量の論文の執筆ができた。しかしながら、当初の予定にあった最終目的の一部である多点型制御及び完全自立型ソフトアクチュエータは実現できておらず、その点に関しては今後の課題となる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 10 件

1. R. Matsuda, S. Zihao, U. Kamoto, H. Ota, “Liquid-Based Digital Readable Tilt Sensor.”, *Advanced Materials Technologies*, 2100490, 2021.

カーボンのナノ粒子による液体材料を用いることで、01(ゼロイチ)、つまりはデジタルで検出できる傾斜センサを開発した。従来、傾斜センサはアナログ出力及び交流での検出を主にしており、信号の検出方法に問題点を抱えていた。それを機能性液体とマイクロファブリケーションを利用することでデジタル信号での検出にした。また、そのデモンストレーションとしてアクチュエータ及びウェアラブルデバイスを実現した。

2. G. Inamori, U. Kamoto, F. Nakamura, Y. Isoda, A. Uozumim, R. Matsuda, M. Shimamura, Y. Okubo, S. Ito, H. Ota, “Neonatal Wearable Device for Colorimetry-based Real-time Detection of Jaundice with Simultaneous Sensing of Vitals.” *Science Advances*, 7(10), eab3793, 2021.

本論文では、本研究で開発した柔軟なインターフェースをもちいて新生児用のウェアラブルデバイスを開発した。実際には、新生児のおでこから脈拍、血中酸素飽和度、黄疸を経時的に計測できるデバイスである。メカニズムの基礎から臨床での検討まで一貫して行った。実際に新生児を用いて検討もしており、デバイスの有用性を実証した。

3. M. Takaya, R. Matsuda, G. Inamori, U. Kamoto, Y. Isoda, D. Tachibana, F. Nakamura, O. Fuchiwaki, Y. Okubo, H. Ota, “Transformable electrocardiograph using robust liquid-solid hetero-connector.”, *ACS Sensors*, 6(1), 212-219, 2021

本論文では、液体金属による伸縮可能電極を、その制御システムを本研究で開発した硬軟一体構造上に構築することで、伸縮電極を用いたウェアラブル心電計を実現した。本研究はウェアラブル心電計の問題点である胸のサイズもしくは場所による心電図の違いを克服し、患者に応じた変形をするウェアラブル心電計を提供した。

(2) 特許出願

該当なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. K. Murakami, R. Tochinal, D. Tachibana, Y. Isano, R. Matsuda, F. Nakamura, Y. Kurotaki, Y. Isoda, M. Yamane, Y. Sugita, J. Fukuda, K. Ueno, N. Miki, O. Fuchiwaki, H. Ota, "Direct wiring of liquid metal on ultrasoft substrate using a polyvinyl alcohol lift-off method.", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(5), pp. 7241-7251, 2022.
2. D. Tachibana, K. Murakami, T. Kozaki, R. Matsuda, Y. Isoda, F. Nakamura, Y. Isano, K. Ueno, O. Fuchiwaki, H. Ota, "Ultrafast and Highly Deformable Electromagnetic Hydrogel Actuators Assembled from Liquid Metal Gel Fiber.", *Advanced Intelligent Systems*, 2100212, 2022.
3. N. Ochirkhuyag, R. Matsuda, Z. Song, F. Nakamura, T. Endo, H. Ota, "Liquid metal-based nanocomposite materials: Fabrication technology and applications", *Nanoscale*, 4(13), 2113-2135, 2021.
4. R. Matsuda, S. Mizuguchi, F. Nakamura, T. Endo, Y. Isoda, G. Inamori, H. Ota, "Highly Stretchable Sensing Array for Independent Detection of Pressure and Strain Exploiting Structural and Resistive Control." *Scientific Reports*, 10, 12666, 2020.
5. K. Matsubara, D. Tachibana, R. Matsuda, H. Onoe, O. Fuchiwaki, H. Ota, "Hydrogel actuator with a built-in stimulator using liquid metal for local control.", *Advanced Intelligent Systems*, 2000008, 2020.
6. T. Kozaki, S. Saito, Y. Otsuki, R. Matsuda, Y. Isoda, T. Endo, F. Nakamura, T. Araki, T. Furukawa, S. Maruo, M. Watanabe, K. Ueno, H. Ota, "Liquid-state Optoelectronics Using Liquid Metal", *Advanced Electronic Materials*, 1901135, 2020.
7. D. Tachibana, K. Matsubara, R. Matsuda, T. Furukawa, S. Maruo, Y. Tanaka, O. Fuchiwaki, H. Ota, "3D Helical Micromixer Fabricated by Micro Lost - Wax Casting.", *Advanced Materials Technologies*, 5(1), 1900794, 2019

1. 2022年 1月 総務省SCOPE研究開発奨励賞、総務省
2. 2021年11月 貢献表彰 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門
3. 2020年12月 優秀研究・黎明賞, 第7回サイボウニクス研究会
4. 2020年 4月 文部科学大臣表彰 若手科学者賞、文部科学省
5. 2019年11月 大学・高専テクニカルアカデミー研究発表 最優秀賞、IIFES2019
6. 2019年11月 若手優秀講演表彰、日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門