

研究報告書

「印刷できる生体模倣型ソフトロボットシステムの構築」

研究期間：2018年4月～2020年3月

研究者番号：50183

研究者：鳴海 紘也

1. 研究のねらい

人間とコンピュータとのやりとりを仲介するシステムはインタフェースと呼ばれ、古くは文字入力によるインタフェース、その後アイコンや図形などを利用するグラフィカル・ユーザ・インタフェース、近年ではスマートフォンに用いられるタッチ・インタフェースが普及するなど、時代とともに進化を遂げてきた。とりわけ、昨今のインタフェースの研究分野では、人間の入力やコンピュータの出力を現実の物体の形状変化によって仲介する形状変化インタフェースの研究が盛んに行われ、注目を集めている。それぞれに利点と欠点はあるが、インタフェースの進化は徐々に情報的な形態から物理的な形態に向かってきていると言える。

本研究では、近年発展めざましいデジタルファブリケーション技術を利用することによって、物理的な形態の1つの究極系とも言える自律的な生体機能を参考に、神経系・筋肉・自己修復機能を持つ新しいインタフェースの実装を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、デジタルファブリケーションの手法を用いることによって、動く・感じる・傷が治るなど生体の機能を持つ柔らかいロボットや形状変化インタフェースを実現する。

より具体的には、機械的に繰り返し破壊されても、界面を接続するだけで強度が回復する自己修復ポリマーPolyborosiloxane (PBS)を利用することで、機械的な修復機能を実現した。また、ポリマー内部に導電材料である Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)を分散させることにより複合素材 MWCNTs-PBS とし、機械的な修復に加えて電気的な修復機能も同時に実装した。さらに MWCNTs がポリマー内部に分散することで、導電性だけでなく粘弾性を改善し、液体のように流れる状態からゴムのように柔軟性のある状態、また固体のように弾性のある状態を調整できるようにした。

この複合素材をシート状に加工し、CNCにより制御したナイフで所望の形状の平面に切り、その後複数のシート同士を積み上げることによって立体のデバイスを構築した。シート同士の界面が自己修復するという特性を活かせるため、3D プリントのような複雑なデジタルファブリケーション手法を用いるよりも、2D の手法が適している。

自己修復する導電素材の選定とファブリケーション手法の確立を経て、本研究ではさらに動き・感じ・傷が治るインタフェースデバイス (Self-healing UI) を作製した。まず、修復する導電素材を利用し、タッチ検知・圧力検知・切断検知の手法を実装した。そして動き・感じ・傷が治ることをデザインに応用した5つのアプリケーションを実装した。これらの研究成果はユーザ・インタフェースのトップ会議である UIST [研究成果 1] 等で発表された。

(2) 詳細

素材の選定と機能

概要に示したとおり, ACT-I 研究期間
は, 研究課題「印刷できる生体模倣型ソ
フトロボットシステムの構築」を実施した.
具体的には, 生体模倣機能のうち, 神経
(電気回路によるセンサ・配線)と筋肉(ア
クチュエータ)に加え, 機械的・電氣的な
自己修復機能を持つやわらかいインタフ
ェースを実現した.

まず, インタフェース実現のために使用
する素材として, 外部からの刺激や素材
の供給なしに繰り返し機械的な損傷を修
復できる素材 Polyborosiloxane (PBS)に着
目した. また, PBS に対して Multi-walled
Carbon Nanotubes (MWCNTs)を分散し,
導電性と機械的な弾性を付与した複合
素材 MWCNTs-PBS を作製した(図 1). こ
れら絶縁性の PBS と導電性の MWCNTs-PBS を組み合わせて使用することにより, 導電性と
機械的特性を調整可能なハイブリッドシステムとした. 図2に示すとおり, PBSとMWCNTs-PBS
は接続後数秒で軽い引っ張りに耐える程度の機械的修復を開始し, 6 時間後には機械的強度
がほぼ 100%回復する.

素材からデバイスを作製する方法とし
て, 3D プリンタやレーザカッタを用いる
手法なども検討したが, 最終的には
CNC ドラッグナイフを用いたファブリケー
ション(図 3)を提案した. これは, 素材を
予めシート状に作製しておき, 入力した
2 次元のデータに基づいてナイフで目標
形状に切断, その後シート同士を 3 次元
に積み上げる方法である. この手法の
利点は, 素材自体の自己修復機能を積
極的に利用することによって, 図 4 に示
すように, シート同士を積み上げるだけ
で接着剤なしに連続した 3D 形状を実現
できることである. 電氣的な配線の接続
にも自己修復を利用でき, 制御が難しい 3D プリントなどの手法に比べて優位性がある.

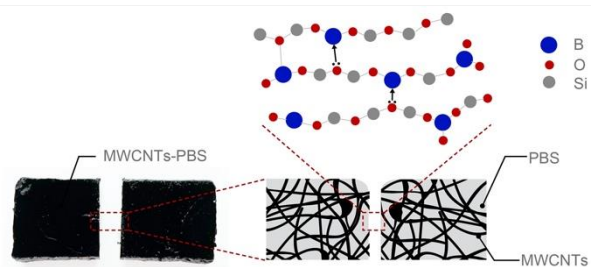


図 1: MWCNTs-PBS の写真と構造図, 分子構造

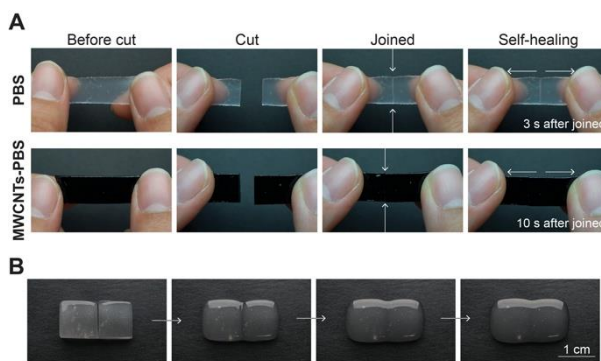


図 2: PBS と MWCNTs-PBS の機械的修復プロセス

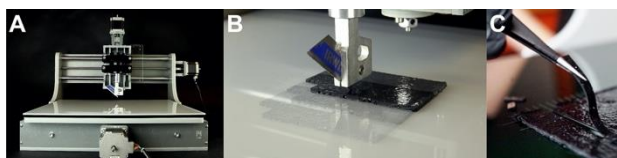


図 3: CNC ドラッグナイフによるシートの成形

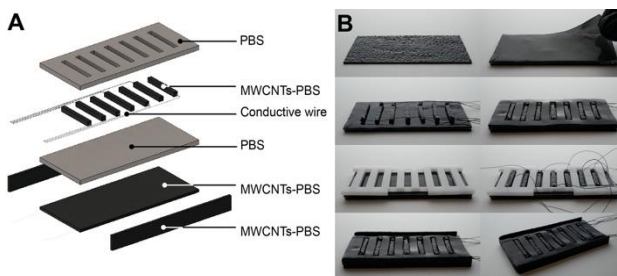


図 4: シートの積み上げによるデバイスの作製

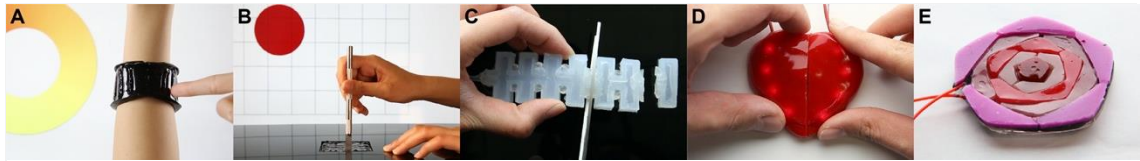


図 4: アプリケーション事例

最後に、デバイスをインタラクションに応用する事例を示すべく、図 5 に示す 5 つのアプリケーションを提案した。まず、図 5A および図 6 では、ユーザの使用法に合わせ、つなぐ、曲げる、切るなどの方法で大きく変形するコントローラを示した。図 5B には、自分自身の切断を検知し、その後修復するセンサアレイを示した。素材が柔軟であるため肌の上などに追従させての使用を想定している。図 5C および図 7 では、ハサミで切り、つなぎ替えることで動作のモードを再構成できるアクチュエータを提案した。図 5D は心理的な結びつきを物理的な修復で表現する治るペンダントであり、図 5E は複数の色のパズルが時間経過で 1 つの連続形状になる溶けるパズルである。

これらのアプリケーションは、素材の「相」として固体（再構成）・エラストマ（変形・追従）・液体（治る・溶ける）の特性を広く利用している。単純に「治る」という次元を超え、従来の「単一の相だけに縛られたインタフェース」に対して幅広い相を利用できるインタラクションを提案できたと考える。

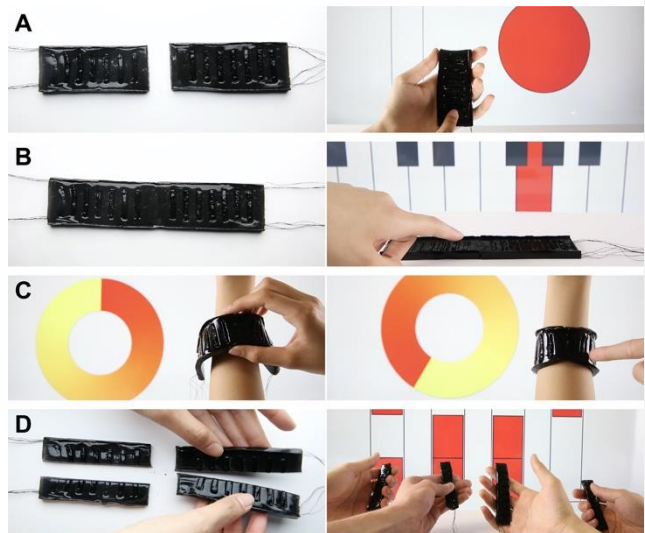


図 6: 目的に応じて接続、変形、切断するコントローラ

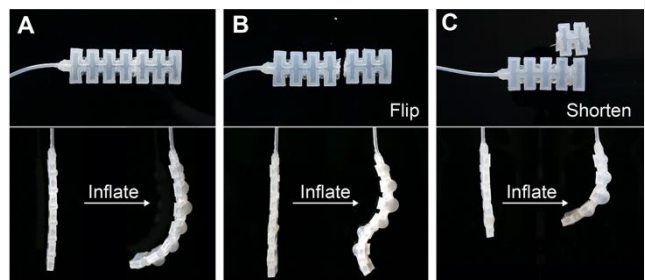


図 7: 曲げの方向と長さを再構成できるアクチュエータ

本内容は、国内のインタフェースに関する会議 WISS にて最優秀論文賞を受賞した [発表文献 2] 他、トップカンファレンスの UIST でも発表することができた [発表文献 1, 3]。また、本研究者は博士課程に在籍する学生であるが、本研究課題に関連する博士課程の研究活動について、国内外で東京大学総長賞などの複数の賞を受賞した [発表文献 4, 5, 6]。

インタフェースを作る際には、既存のコンポーネントの組み合わせによる実現が基本であったことから、調整できるパラメータは概ね電氣的・機械的なものに限られていた。今回の研究では、マテリアル研究者と蜜に連携し素材レベルから研究を行ったため、レオロジー（物体の硬さや流れ）や自己修復機能のレベルから議論ができた。このように、本格的な HCI とマテリアルの共同研究は過去の UIST を振り返っても初めての試みであり、コミュニティの未来にとって重要な仕事をしたと自負している。

3. 今後の展開

本研究課題では、生体模倣的な機能として、神経にあたる電気回路とセンサ、筋肉にあたるアクチュエータ、皮膚など複数の器官が持つ自己修復機能を同時に実現したが、今後は別の生体模倣的な機能にも着目していく予定である。例えば、昆虫が幼虫から蛹、そして成虫に変化する変態のような、プログラムされた形態変化を身の回りのデバイスなどに実装したいと考えている。

物理インタフェースが自律的な生体機能を獲得していくことによって、人間やコンピュータが道具としてそれら进行操作しなくとも、ある程度自律的に人間や環境と共生していくような未来を目指している。

4. 自己評価

● 研究目的の達成状況

当初は、最終的なアウトプットとしてロボットやロボティクスの分野の論文が適当だと考えていたが、研究を進めるうちに形状変化インタフェースの文脈でのアウトプットの方が適当だと感じた。そのため、課題名はロボットであるものの最終的にはインタフェースの学会への投稿につながった。それによって、インタフェースの分野に初めて本格的なマテリアルの知見を導入できたなど、当初の想定よりも良い結果を達成できたと考えている。

● 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

本研究者は、研究費を利用してカーネギーメロン大学に滞在し、そこで材料科学者とヒューマン・コンピュータ・インタラクションの研究者と連携して本課題を進めた。そのため、研究費の執行は主に滞在費と素材を作製するための装置の購入に充てられ、当初の予算を予定通りに執行した。

● 研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果(今後の見込みも重視してください。)

本研究は、俯瞰的な視点で見た場合、材料科学の分野で最新の素材を現実的な人間スケールのインタフェースに落とし込み、その新しい利用法を探る作業であったとも言える。その意味で、より基礎的な学術分野での成果と実世界での利用を目指す産業の橋渡しをする研究であったとも言える。今後も新たな基礎技術を迅速に捉え、その技術をただ使うだけではなくさらに新しい知見に活かしていく予定である。

● 研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題は、ソフトロボティクス、材料科学、インタフェース、デザインなどの分野を横断した内容であり、本研究以外には実現不可能であったと確信する。前述の通り、インタフェースのトップ学会である UIST にはじめて本格的な材料科学の知見を持ち込むなど、専門分野内でも非常に独創的かつ挑戦的な内容であった。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(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)

学会発表

1. Koya Narumi*, Fang Qin*, Siyuan Liu, Huai-Yu Cheng, Jianzhe Gu, Yoshihiro Kawahara, Mohammad Islam, and Lining Yao, “Self-healing UI: Mechanically and Electrically Self-healing Materials for Sensing and Actuation Interfaces.” In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST)*, pp.293–306, Oct. 2019 (* authors contributed equally).

研究会

2. 鳴海紘也*, Fang Qin*, Siyuan Liu, Huai-Yu Cheng, Jianzhe Gu, 川原圭博, Mohammad Islam, Lining Yao, “Self-healing UI: 機械的かつ電氣的に自己修復するセンシングインタフェース.” 第27回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS), pp.55–60, Sept. 2019 (* authors contributed equally). **最優秀論文賞** (16 件中 1 件).

デモ

3. Koya Narumi*, Fang Qin*, Siyuan Liu, Huai-Yu Cheng, Jianzhe Gu, Yoshihiro Kawahara, Mohammad Islam, and Lining Yao, “Demonstration of Self-healing UI: Mechanically and Electrically Self-healing Materials for Sensing and Actuation Interfaces.” In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST)*, Oct. 2019 (* authors contributed equally).

その他の関連する受賞

4. **UbiComp Gaetano Outstanding Student Award Finalist** (5 outstanding students per year). Koya Narumi, “Animating Daily Objects and Environments.” In *Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp)*, Sept. 9, 2019.
5. **東京大学総長賞**. 鳴海紘也, “物体の相変化に着目した形状変化インタフェースに関する研究,” Mar. 19, 2020.
6. **東京大学情報理工学系研究科 研究科長賞**. 鳴海紘也, “物体の相変化に着目した形状変化インタフェースに関する研究,” Mar. 23, 2020.