

## 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

鳴海 紘也<sup>\*†‡</sup> Fang Qin<sup>\*§</sup> Siyuan Liu<sup>¶</sup> Huai-Yu Cheng<sup>¶</sup> Jianzhe Gu<sup>†</sup>  
川原 圭博<sup>‡</sup> Mohammad Islam<sup>¶</sup> Lining Yao<sup>†</sup>

**概要.** 自然界には、傷ついても機械的・電氣的な損傷（骨や神経の損傷など）を自己修復する例が存在する。本稿ではこのような自己修復機能を日常のインタフェースに付与することを目的として、Self-healing UIを提案する。これは、切断しても断面を接触させておくだけで自律的に機械的強度を回復できる自己修復エラストマ Polyborosiloxane (PBS) を利用した柔らかいインタフェースである。また、導体として多層カーボンナノチューブ (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) を分散させて複合素材 (MWCNTs-PBS) とすることで、機械的な故障と電氣的な故障の両方を修復できる。本稿では、インタラクションに向けた実用上の観点から、絶縁性の PBS と導電性の MWCNTs-PBS を組み合わせたハイブリッドなシステムを提案した。さらに、システムの自己修復機能・柔軟性・センシング機能を利用して、ユーザの求める機能に応じて形状と数を変化させるコントローラ型デバイスを実装した。

## 1 はじめに

自然界には、トカゲの尻尾や接ぎ木、人間の肌など、再生能力・修復能力を持つシステムが多数存在する。本稿では、機械的信頼性と導電性を自己修復できるエラストマを素材として用いることによって、生体システムが持つ自己修復機能を日常のインタフェースに付与することを目指す。

本研究の貢献は以下のようにまとめられる：

- Human-Computer Interaction (HCI) での利用に向けて、自己修復機能を持ち、機械的特性と電氣的特性が調整可能な柔らかいインタフェースを提案した
- 提案システムの機械的・電氣的特性を計測した
- 素材の導電性・弾力・自己修復機能を利用したセンシング手法を提案・実装した
- 自己修復・変形・切断など、柔らかい自己修復素材に特有の性質を積極的に利用して、コントローラ型デバイスを実装した

なお、素材の作製方法などの詳細な説明やその他のアプリケーション事例は [7] に掲載予定なので、適宜参照してほしい。

Copyright is held by the author(s).

\* Authors contributed equally.

† Human-Computer Interaction Institute, Carnegie Mellon University

‡ 東京大学

§ Electrical and Computing Engineering, Carnegie Mellon University

¶ Materials Science and Engineering, Carnegie Mellon University

## 2 自己修復素材の分類

従来のポリマーの多くは不可逆的な共有結合により架橋しており、強い結合を持つ一方で、一度壊れてしまうと架橋し直すのが難しい。そこで、架橋構造を可逆的に修復できるポリマーがこれまでに複数研究されてきた。HCIでの利用を考えるために、ここでは自己修復素材の代表的な2つの分類を示す。

**外在的な修復と内在的な修復.** 最も早く注目された自己修復の方式は、予めポリマーの中に修復を促す薬品を封入した微小なカプセルを埋め込んでおき、破壊が起きた断面から薬品を流出させることで修復を行うというものである。これは外在的な (= extrinsic) 修復と呼ばれる [11]。しかしこのような手法は、同じ場所が複数回壊れた場合に繰り返し修復できないという欠点がある。対照的に、水素結合や配位結合など、動的な架橋を利用した内在的 (= intrinsic) な修復 [5] は繰り返しの修復が可能であるため、日常での使用により適していると考えられる。

**非自律的な修復と自律的な修復.** 自己修復素材の中には、修復を開始するために光や熱など外部からの刺激が必要な非自律的 (non-autonomous) な修復をするもの [2] と、外的な刺激が無くとも自律的 (autonomous) に修復できるものが存在する。前者の非自律的な修復は、自己修復のタイミングを制御できる利点を持つ一方で、修復に特殊な環境が必要になりうるという欠点を持つ。非自律的な自己修復素材の最も身近な例は、Fused Deposition Modeling (FDM) に用いられる熱可塑性樹脂などである。この素材は、加熱刺激によりガラス転移し、すでに積層された部材と融着することができる。逆に後者の自律的な修復を用いる場合、自然状態で修復が行え

る利点を持つ一方で、修復のタイミングを制御できないという欠点が存在する。自律的な自己修復素材の最も身近な例は、おしめやスライムなどに用いられるハイドロゲル [10] である。しかし、ハイドロゲルのような溶媒を含む素材を使うと、時間経過に伴って素材が乾き、性質が大きく変わることがある。

### 3 HCI に向けた自己修復素材

自己修復素材を HCI に利用する場合、以下の要件を考慮する必要があると考えられる：

1. 薬品による化学変化・熱・光などの外的な刺激を使わず (=自律的) に、かつ、外部から素材を補給することなく何度でも繰り返し (= 内在的に) 修復すること。これは、日常的な利用を想定した場合、自己修復の実現のために特別な環境を準備できない場合が多いと考えられるためである
2. アプリケーションに応じて機械的特性と導電性を調整可能であること
3. 時間経過で劣化しない安定な素材であること
4. 簡単かつ低コストで作製可能であること
5. 生体親和性があること

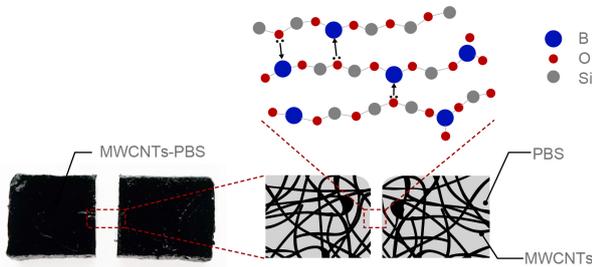


図 1. MWCNTs-PBS の構造。酸素とホウ素が動的な共有結合 (= 配位結合) を作るため、一度破壊されても接触させるだけで繰り返し架橋が行える。MWCNTs は PBS の内部でネットワークを構成し、導電性と機械的強度を担保する。

これらを踏まえて本稿では、自己修復素材 Polyborosiloxane (PBS) を使用することとした [5, 12]. PBS は上記の条件を満たす：(1) まず、図 1 上に表示するように、PBS は配位結合と呼ばれる動的な共有結合によって架橋するため、室温で外部からの刺激なしに繰り返し修復する [5]; (2) また、内部に分散させる多層カーボンナノチューブ (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) の比率により、図 1 下に示すネットワーク構造を調整し、導電性と機械的強度を変更できる；(3) さらに、時間経過で容易に乾燥・劣化するハイドロゲルなどとは異なり、長期にわたって安定である；(4) 混合プロセスのみを

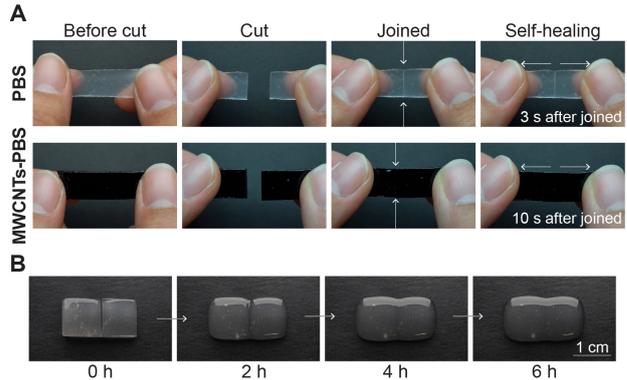


図 2. PBS の自己修復機能. (A) 導電性のない PBS と、導電性のある MWCNTs-PBS が接続後数秒で自己修復を開始する様子. (B) PBS を 6 時間かけて修復した様子.

利用して作製できるため [12], 簡単かつ低コストである；(5) 生体適合材料の Polydimethylsiloxane (PDMS) とホウ酸から合成されるので使用時の安全性が高い。

なお、PBS 及び導電性を付与した PBS の研究自体は過去にも存在する [5, 12] が、本研究では、HCI での活用を前提として、PBS と MWCNTs を分散した PBS (MWCNTs-PBS) とのハイブリッドシステムやそのファブリケーション手法、アプリケーションなどを提案した。図 2 には、PBS と MWCNTs-PBS がそれぞれ数秒以内に機械的修復を始める様子と、6 時間かけて修復する様子を示す。

### 4 特性評価

この章では、PBS と MWCNTs-PBS が切断・再接触の前後で電気的・機械的修復を行っていることを定量的に評価する。本章の実験ではそれぞれの計測に  $n=5$  のサンプルを用いた。プロットは平均値を示す。

#### 4.1 電気的特性

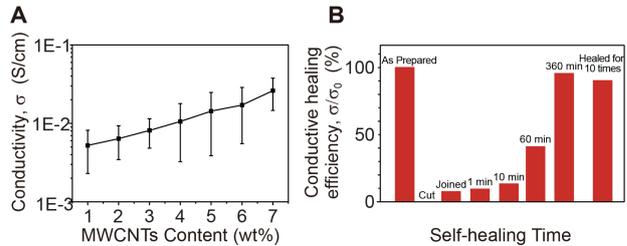


図 3. MWCNTs-PBS の電気的特性. (A) MWCNTs の質量比に対する導電率. (B) 電気的な修復速度.  $\sigma_0$  は作製直後のサンプルの導電率.

インタフェースとして利用するための適切な MWCNTs の混合比を決定するために、まず、MWCNTs の混合比に対する素材の導電率を計測した (図 3A)。実験サンプルの最大・最小値を示すエラーバーが一部被っているものの、MWCNTs の量に対して導電率が単調増加する傾向が見られる。後述する 3 つのセンサとして利用することを考慮して、以降の実験では常に 4wt% のサンプルを用いた。

次に、電氣的な修復速度を調査した。図 3B は、作製直後のサンプルの導電率を  $\sigma_0$  としたとき、サンプルを切断して再接触させた際に導電率が時間経過に対してどのように変化するかを示している。これを見ると、再接触させてから導電率は単調に増加し、6 時間後には最初の値の 96% まで修復している。さらに、同じサンプルの切断・再接触を 10 回繰り返した際にも、導電率は最初の値の 90% を維持している。導電率が 10% 下がった原因としては、手作業による再接触の際の位置ずれやほこりの混入などが考えられる。

以上の結果から、MWCNTs-PBS の導電率調整と電氣的自己修復が可能であることが示された。

#### 4.2 PBS と MWCNTs-PBS の機械的特性

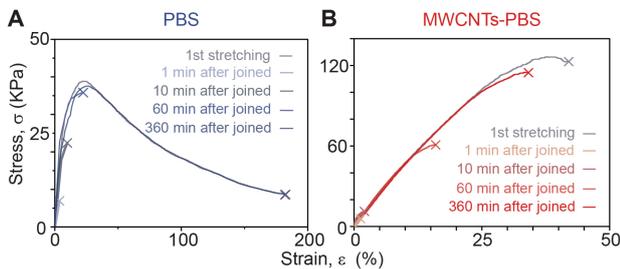


図 4. (A) PBS と (B) MWCNTs-PBS の機械的  
自己修復特性。×印はサンプルが破断した点を示す。

機械的な自己修復の特性を調べるために、歪み  $\varepsilon = 0 - 200\%$  に対する応力  $\sigma$  [kPa] を調べる引張試験を実施した。PBS と MWCNTs の結果を図 4A,B にそれぞれ示す。

まず図 4A の 1st stretching を見ると、PBS は  $\varepsilon < 5\%$  において弾性領域を示すことがわかる。その後サンプルは  $\varepsilon = 180\%$  まで伸長して破断した。次に、サンプルを予め切断・再接触させてから 1, 10, 60, 360 分待ち、再び機械特性を計測した。その結果、時間経過に従って破断する点が初期値に近づき、6 時間後にはほぼ最初のプロットと重なることがわかった。

図 4B の MWCNTs-PBS の場合、弾性領域は  $\varepsilon < 8\%$  に増加している。また、MWCNTs のネットワークが存在することにより、素材のヤング率が大きくなっている (=素材が丈夫になっている) ことがわかる。さらに、PBS と同様、時間経過に従って機械

的特性が修復している。その一方で、切断・再接触から 6 時間経過しても、プロットは初期値と完全に重なっていない。ここから、MWCNTs-PBS は内部の MWCNTs ネットワークが PBS の移動を制限することによって、純粋な PBS ほどは速く修復しないことが考えられる。

#### 5 ハイブリッドシステム

前章の電氣的・機械的な特性評価の結果を踏まえると、日常的なインタフェースを作るという実用上の観点において個々の素材を別々に使うだけでは不十分であり、2 つの素材の欠点を補い合う必要があると考えられる。そのため本稿では、PBS と MWCNTs-PBS のハイブリッドシステムを提案する。

自己修復の速度。PBS は導電性が無いものの、自己修復が速い。一方 MWCNTs-PBS は導電性があるものの、自己修復は PBS に比べて遅い。そのため、PBS と MWCNTs-PBS を組み合わせることによって、再接続の直後でも機械的な自己修復を PBS が担い、電氣的な接続を MWCNTs-PBS が担うことができる。

機械的強度。PBS は自己修復が速いものの、重力などにより素材が流れ、形状が徐々に変わっていく「クリープ」という現象を示す (図 5)。これは長期的な利用を前提としたデバイスでは致命的である。一方、MWCNTs-PBS の場合、内部の MWCNTs ネットワークが PBS を支えるため、クリープはほとんど見られない。そこで MWCNTs-PBS を PBS の基材や壁材として利用することによって、高速な自己修復と形状・強度の維持を両立することができる。

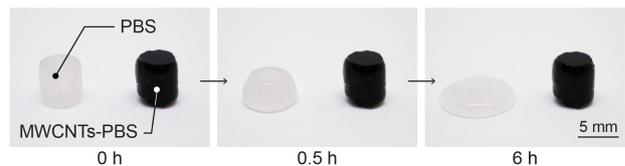


図 5. クリープの比較。PBS は 6 時間で大きく形状を  
変えるが、MWCNTs-PBS はほぼ変形しない。

#### 6 ファブリケーション

##### 6.1 素材の作製

PBS および MWCNTs-PBS の作製は、[12] に記載されている手法を改良した。なお、以下に示した素材の作製法に関する詳細な説明や図、改良点などは [7] に記載されている。

**PBS.** ホウ酸 1.0 g (B6768; Sigma) を 10 mL のメタノールに入れ、マグネチックスターラで 1 時間攪拌する。その後 10 g の PDMS (silanol terminated, 35-45 cSt; Gelest) を足し、更に 3 時間マグネチックスターラで攪拌する。混合が終了したら、マグネツ

トの回転を止めて、安定した場所で1時間程度放置する。すると、液体が2層に分かれるので、沈殿している側をピペットで取る。これが硬化前のPBS溶液である。ペトリ皿や型に移して60°Cのオーブンで24時間加熱すると、PBS溶液が硬化し、最終的なPBSとなる。

**MWCNTs-PBS.** 硬化前のPBS溶液にMWCNTs (Baytubes C 150 HP) を足し、超音波ホモジナイザー (Fisher Scientific Sonic Dismembrator Model 500) の出力100 Wで1時間の分散処理を行う。分散を終えた硬化前のMWCNTs-PBSを真空チャンバーに数分間置き、気泡を除去する。その後、素材をペトリ皿や型に流し入れて整形する。60°Cのオーブンで24時間加熱すると硬化して、最終的なMWCNTs-PBSとなる。

## 6.2 素材の整形

本稿では、まずPBSとMWCNTs-PBSをシート状に作製し、その後シートを所望の形状に切断してデバイスを作製した。シートの切断には、レーザーカッターで所望の形状に整形したアクリルの型、もしくはドラッグナイフを搭載したCNCマシン (12'x12' CNC Machine; Zen Toolworks, D2 drag knife; Donek) を用いた。

## 7 センシング手法

この章では、MWCNTs-PBSを使った3つのセンシング手法 (タッチ・圧力・切断) を提案する。図6に各手法の原理と実際の様子を示す。ここで、圧力センシングと切断センシングの2つは同じ回路構成で実現していることに注意する。実装にはArduino Mega 2560 Rev 3を利用した。

**タッチセンシング.** タッチセンシングは従来と同様の静電容量方式で実現している。人体が近づくことでMWCNTs-PBSとの間に存在する容量値が増加し、1次Low Pass Filter (LPF) の時定数が変わる。そして入力した矩形波の波形がLPFの影響で遅れることを読み取る。実装にはArduinoのCapacitive Sensing Libraryを用いた。

**圧力センシング.** 直列に配置されたMWCNTsと抵抗器の両端にVcc (= 5 V) を印加し、抵抗器の電圧を計測する。圧力が加わると、MWCNTs-PBSが変形し抵抗値が上がる。その結果抵抗器にかかる電圧が下がる。前述の特性評価の結果から、センサの変形が8%以内の弾性領域であれば、圧力を除いた後にセンサは元の形状に戻る。

**切断センシング.** 圧力センシングと同様の回路で行う。MWCNTs-PBSが切断されることにより抵抗値が無限大になると、抵抗器での電圧値は0 Vとなる。この手法は非常に単純であるが、素材が自己修復するという特性を活かすことで、繰り返し切断をセンシングできる点が独特である。

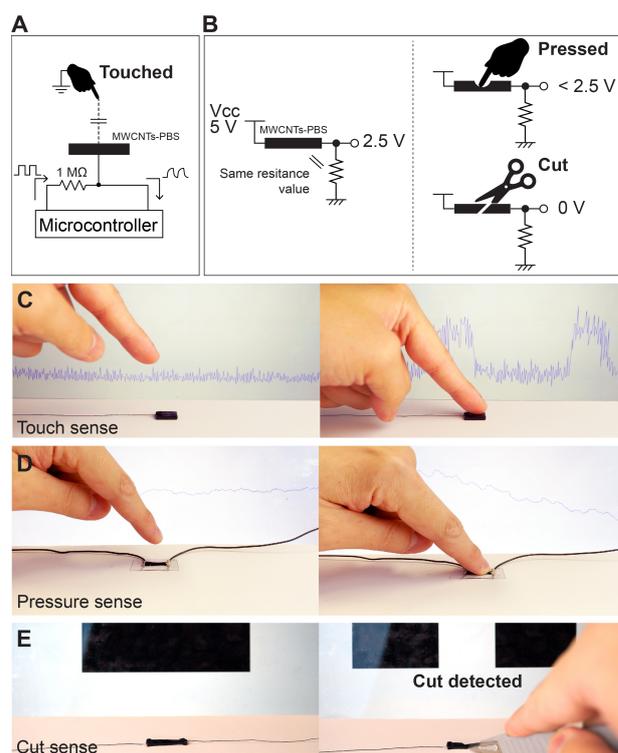


図 6. 3つのセンシング手法. (A, B) それぞれの動作原理. (C, D, E) タッチセンシング・圧力センシング・切断センシングの実際の様子. センサの背後にあるディスプレイで読み取り値を表示している。

## 8 アプリケーション

本章では、ここまで示した素材の自己修復機能・柔軟性・センシング機能を利用した応用として、ユーザの用途に応じて形状や個数、機能を変化させられるコントローラ型デバイスを作製した。図7A,Bに、それぞれコントローラの形状と内部構造を示す。1つのコントローラには7つのMWCNTs-PBSセンサが搭載されており、6つのタッチセンサと1つの圧力/切断センサとして動作する。

まず、図7Cに通常状態のコントローラを示す。この状態では普通のリモコンのようにタッチ・スライド・押し込みなどの動作が可能である。次に、図7Dにはロングモードを示す。ピアノの鍵盤など、通常よりも多くのキーを必要とする状況において、2つのコントローラを接触・融着させることで長い1つのコントローラを作ることができる。図7Eは腕輪モードである。腕輪型のタッチスライダなどが必要な時、手首にデバイスを巻き付けて両端を接触・融着させることによって、従来のデバイスにはない大きな形状変化と接着剤不要の一体接続が可能となる。図7Fはカットモードである。多人数での使用が求められる際には、カッターでデバイスを分割することで、1つのコントローラを2つにすることができ

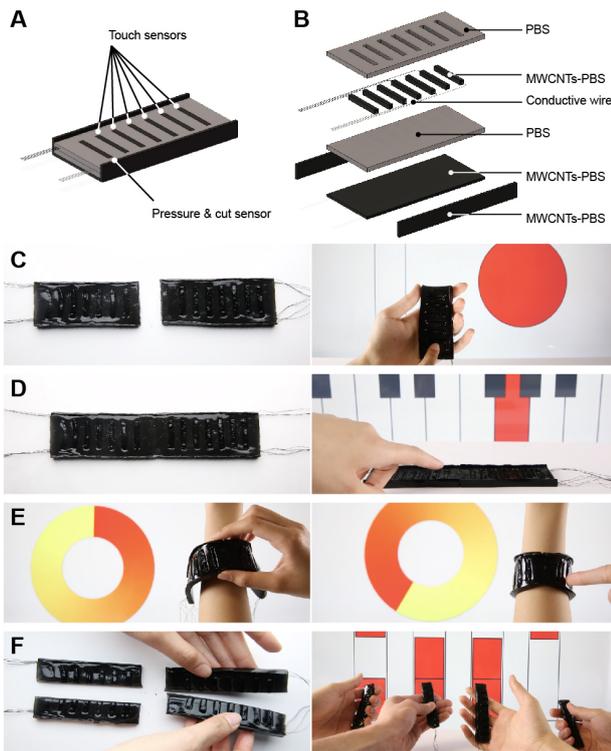


図 7. 必要な機能に応じて形状や個数を変化させることができるコントローラ型デバイス。6つのタッチセンサと1つの圧力/切断センサを搭載している。

る。いずれのモードでも、使用後には切断と自己修復によって元のモードに戻すことができる。

特に図 7F の例から、自己修復の機能を積極的に利用する（＝わざと壊す）ことで、独特のタンジブルで直感的なインタフェースが実現できることが分かる。もちろん、意図しない破壊があった際にも単純に破壊面を接続するだけで修理できる。

## 9 議論と結論

### 9.1 デバイスの安全性について

ここでは、作製プロセスと使用時の2点について、Self-healing UIの安全性について議論する。端的に言う、Self-healing UIは肌に触れての使用が可能であり、素手で触ったり、ハサミやカッター、素手で素材を切断したりして構わない。一方、素材の作成時にはMWCNTsが飛散する可能性があるため、必ず手袋・白衣・ドラフトチャンバー・適切な廃棄方法などを準備し、所属機関の提示するトレーニングを受けた人間が作業を行う必要がある。以下、その根拠について述べる。

**MWCNTsの安全性.** MWCNTsを使用するには、吸引しないように注意する必要がある。アスペクト比の高いナノ粒子の吸引は、呼吸器に悪影響を及ぼし、発がん性のリスクがある。本稿で使用し

ているMWCNTsの肺への許容吸引限界値は約0.05 mg/m<sup>3</sup>である [9]。

しかし、実際に作製プロセスで用いるMWCNTsの粉末は、半径1 mm程度の小さな球状に整形されているため、重く、通常空中に飛散することはない。また、一度MWCNTsがPBSの中に閉じ込められてしまえば、ポリマーとMWCNTsとの強い相互作用によって切ったりちぎったりしたとしても構造体からMWCNTsが飛散する可能性は低い ([8] の図 S1 (e) を参照)。そのため、Self-healing UIが肌に触れたからといって、MWCNTsが皮下の細胞に触れることはない。実際にMWCNTsは車のタイヤや船の部品、フィルターなど様々な現場ですでに使用されており、安全な使用が可能であることが実証されている [3]。

とはいえ、作製プロセスにおいて誤って吸引してしまうリスクが存在するのは事実であるため、必ずデータシートを参照した上で、適切な設備を利用して実験する必要がある。

**PBSの安全性.** PBSはPDMSとホウ酸から合成される。PDMSは医療応用最もよく使われるシリコンの1つであり、生体適合性の高さで知られている [1, 6]。また、ホウ酸はコンタクトレンズの洗浄液などにも使用されており、細胞毒性は低い [4]。PBSはSilly Putty [5] というおもちゃとして利用されることもある。

**MWCNTs-PBSに対する過剰な熱.** 硬化後のMWCNTs-PBSは安全に使用できると述べたが、数百度を超える熱を与えないように注意する必要がある。過剰な熱はPBSの自己修復機能を破壊するだけでなく、MWCNTsを閉じ込めていたPBSを溶解・蒸発させてしまう可能性がある。そのため本稿では、シートの切断にレーザカッターは使わず、熱の発生しない型抜きとドラッグナイフを選択した。

### 9.2 その他の自己修復素材の利用

本稿では、自己修復エラストマを使って柔らかいインタフェースを実現したが、実際には硬い素材が求められる場面もある。例えば、PBSに絶縁性のナノ粒子を分散させて適切に粘弾性を調整すれば、絶縁性で、かつクリープの生じない複合素材が実現できる可能性がある。また、近年、ある程度硬く、常温で自己修復するポリマーが報告された [13] ため、硬い素材も利用できるようになる可能性がある。また、時には光や熱など、なんらかの刺激をトリガとして非自律的に自己修復を誘発したい場面もある。例えば、前述のようにFDM方式の3Dプリンタに使われる熱可塑性樹脂は熱をトリガとした自己修復素材とみなせるため、トリガを持つ自己修復素材として利用できる可能性がある。

### 9.3 配線

本稿で提案したコントローラのアプリケーションでは、PBSおよびMWCNTs-PBSは自己修復するものの、センサをマイコンにつないでいる配線は自己修復しない。使い心地に関しては無線化したマイコンを埋めるなどの処理である程度改善できるものの、自己修復を前提とするため、配線を切らないような取り回しに予め注意しておく必要がある。例えばコントローラの場合には、デバイスを縦に二分割しても配線が壊れないような配置になっている。なお、本稿では配線が柔軟性を阻害しないように、36 AWGの極細配線(UAA3607; Micron Meters)を使用した。

## 10 結論

本稿では、傷ついても自己修復する柔らかいインタフェースを提案した。具体的には、HCIに求められる要件からPBSとMWCNTs-PBSを素材として選定し、これらのハイブリッドシステムを提案した。さらに、インタフェースの自己修復機能・柔軟性・センシング機能を利用して、ユーザの求める機能に応じて形状と数を変化させるコントローラ型デバイスを実装した。本稿およびマテリアル・サイエンスの知見を利用した研究が、HCIのツールとして新たなインタラクションを実現することを願う。

## 謝辞

本研究は、the Carnegie Mellon University Manufacturing Futures Initiative (MFI) (the Richard King Mellon Foundation); Carnegie Bosch Institute Research Awards; Commonwealth of Pennsylvania (Department of Community and Economic Development); JST ACT-I (グラント番号: JPMJPR18UN)の支援を受けたものである。また、研究の実施にあたりサポートをしてくれたHumphrey Yang, John Antanitis, Guanyun Wang, Michael Rivera, Danli Luo, Gierad Laput, Jack FormanおよびMorphing Matter Labのメンバーに感謝する。

## 参考文献

- [1] G. Bartalena, Y. Loosli, T. Zambelli, and J. G. Snedeker. Biomaterial surface modifications can dominate cell-substrate mechanics: the impact of PDMS plasma treatment on a quantitative assay of cell stiffness. *Soft Matter*, 8:673–681, 2012.
- [2] M. Burnworth, L. Tang, J. R. Kumpfer, A. J. Duncan, F. L. Beyer, G. L. Fiore, S. J. Rowan, and C. Weder. Optically healable supramolecular polymers. *Nature*, 472(7343):334, 2011.
- [3] M. F. L. De Volder, S. H. Tawfik, R. H. Baughman, and A. J. Hart. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. *Science*, 339(6119):535–539, 2013.
- [4] D. M. Lehmann, M. E. Cavet, and M. E. Richardson. Nonclinical safety evaluation of boric acid and a novel borate-buffered contact lens multi-purpose solution, Biotrue multi-purpose solution. *Contact Lens and Anterior Eye*, 33:S24 – S32, 2010.
- [5] Z. Liu, S. J. Picken, and N. A. M. Besseling. Polyborosiloxanes (PBSs), Synthetic Kinetics, and Characterization. *Macromolecules*, 47(14):4531–4537, 2014.
- [6] A. Mata, A. J. Fleischman, and S. Roy. Characterization of Polydimethylsiloxane (PDMS) Properties for Biomedical Micro/Nanosystems. *Biomedical Microdevices*, 7(4):281–293, Dec 2005.
- [7] K. Narumi, F. Qin, S. Liu, P. Cheng, J. Gu, Y. Kawahara, M. Islam, and L. Yao. Self-healing UI: Mechanically and Electrically Self-healing Materials for Sensing and Actuation Interfaces. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, To appear in Sept. 2019.
- [8] Y. Oh and M. F. Islam. Preformed Nanoporous Carbon Nanotube Scaffold-Based Multifunctional Polymer Composites. *ACS Nano*, 9(4):4103–4110, 2015.
- [9] J. Pauluhn. Multi-walled carbon nanotubes (Baytubes®): Approach for derivation of occupational exposure limit. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 57(1):78 – 89, 2010.
- [10] L. Shi, P. Ding, Y. Wang, Y. Zhang, D. Ossipov, and J. Hilborn. Self-Healing Polymeric Hydrogel Formed by MetalLigand Coordination Assembly: Design, Fabrication, and Biomedical Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 40(7):1800837, 2019.
- [11] S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. Kessler, S. Sriram, E. Brown, and S. Viswanathan. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409(6822):794, 2001.
- [12] T. Wu and B. Chen. Synthesis of Multiwalled Carbon Nanotube-Reinforced Polyborosiloxane Nanocomposites with Mechanically Adaptive and Self-Healing Capabilities for Flexible Conductors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(36):24071–24078, 2016.
- [13] Y. Yanagisawa, Y. Nan, K. Okuro, and T. Aida. Mechanically robust, readily repairable polymers via tailored noncovalent cross-linking. *Science*, 359(6371):72–76, 2018.