

変形可能なハンカチ型インタフェースの設計

篠田 和宏^{1,a)} チャコン アントニー¹ 雪田 和歌子¹ 横田 知之¹ 染谷 隆夫¹ 矢谷 浩司¹

概要： eTextile 技術は衣服や家具などにインタラクティブな機能をもたらす。本研究ではハンカチというフォームファクタに着目した eTextile インタフェースを提案する。この形状により、ユーザは机の上に広げたり、折りたたんで両手や片手で持ったり、引っ張ったりなど、様々な形に変形させた上でインタラクションが可能となる。このインタフェースを実現するため、導電糸を織り込んだ布と刺繍によりプロトタイプの実装を行った。本稿では、プロトタイプの実装の詳細と、それを用いたインタラクションの例を述べ、今後の研究の方向について議論する。

キーワード： eTextile, ハンカチ, インタフェース

1. はじめに

ウェアラブルやユビキタスへの注目から、既存の布製品にインタラクティブな機能が搭載されようとしている。スマートテキスタイルを用いたインタラクション技術の研究が行われており、タッチなど二次元的なものだけでなく、摺んだり折りたたんだりといった三次元的なものまで、多様なジェスチャを認識できるようになっている。

一方、既存研究ではデバイスの元々の形状が大きく変化しないことを前提に設計されており、布がもつ柔軟な変形可能性を十分に活かしたインタフェース設計は検討されていない。布には変形してもその形状を維持できるという特徴があり、折りたたむなどで別の形状に変化させた上でジェスチャを行うといった新しいインタラクションを実現できる可能性がある。

そこで、本研究ではハンカチという形状に着目し、変形と同時にインタラクションを行うことのできるデバイスを開発した。ハンカチという形状では、広げて置く、小さく折り畳む、片手や両手で持つ、伸ばすなど様々な形とインタラクションが実現できる。

本稿ではまずハンカチで可能なインタラクションのデザインスペースについて議論する。そして、折りたたんで形状を変更してから、伸ばすやタッチなどの様々なジェスチャが可能なハンカチ型のインタフェース(図5)を実装した。本稿では、プロトタイプの実装の詳細と、それを用いたインタラクションの例を述べ、今後の研究の方向について議論する。

2. 関連研究

2.1 変形可能なインタフェース

変形可能なユーザインタフェース (Deformable User Interfaces : DUI) は、タンジブルユーザインタフェースの研究におけるアプローチの1つで、システムに含まれる柔軟な物体を物理的に操作することでユーザがデジタルデータを扱えるようにするものである [5], [7]。DUI は従来の硬いインタフェースに比べて、その変形可能な特性を生か

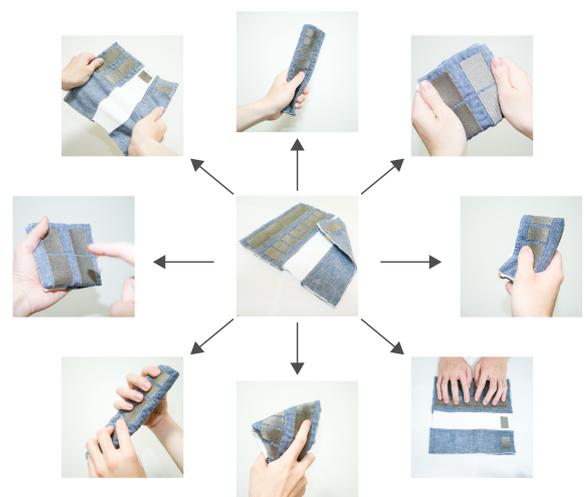


図 1: ハンカチ型インターフェースは折りたたみや伸ばす、タッチなど7つの動作が可能である。本研究では、変形してもその形状を維持できるという布の特性を活かし、変形ジェスチャと入力ジェスチャを組み合わせる様々なインタラクションを可能とするハンカチ型インタフェースを提案する。

¹ 東京大学
a) kazuhiko@iis-lab.org

してより自由度の高い幅広いインタラクションが可能になる。

DUIにおいて、可能なアフォーダンスを決める要因としては、1) センサ、2) 物体を構成する媒体、3) 柔軟な形状を1つ以上含んだ物体の形状、の3つが挙げられる。杉浦らは柔軟な物体の中に組み込むFuwaFuwa [14] というセンサを開発した。これは柔軟な物体の内部にフォトリフレクタを組み込み、綿に照射した赤外線の反射光から綿の密度を計測することによって、物体の柔軟さを保ったまま様々なインタラクションの計測を可能にしている。一方で、ChaconらによるSpinalLog [2] は、導電性のスポンジ状の物体によって作られた柔軟なセンサを剛体の下に配置し、人間の脊椎をシミュレーションすることで理学療法を習得に役立てるためのインタフェースである。また、The skweezee system [15] は導電性の詰め物と分散して配置された柔軟な電極で構成されている。このシステムでは、物体が変形したときのそれぞれの電極間の可変抵抗を測定することで、形状の変化を計測しジェスチャ認識を行っている。

入力する物体の形状に関しては、その物体の持つ次元によって分類することが可能である。例えば紐状の物体であるI/O Braid [8] は一次元である。一方で、導電布 [3], [11], [13] のような面状の物体は二次元である。また、体積のある物体は三次元に分類できる。最初の2つの一次元と二次元の物体は見かけの形状は三次元ではないが、柔軟性が高いため折り畳んだり伸ばしたりといった三次元的な動作が可能である。このような入力オブジェクトには様々な種類のスマート材料が用いられるが、スマートテキスタイルは柔軟性と弾力性、耐久性があることに加えて、製造が容易であることや汎用性などの優れた特徴からよく用いられている。

2.2 スマートテキスタイル

布は何千年も前に登場して以来重要な発明品となっており、衣類など含めて様々な用途に利用できるため、私たちの日常生活の中に広く浸透している。さらに、近年のスマート材料の開発によりその用途はさらに広がっている。ヒューマン・コンピュータ・インタラクションの分野では、特にそれらを用いたインタラクティブな機能の探求がなされており、その過程で研究者は導電糸を利用することが多い。

Parzerらは導電性と抵抗性を備えた新しい糸で抵抗膜方式の圧力センシングを可能にするアプローチであるRESi [10] を考案した。この糸を手縫いや織りこみなど様々な方法で日常的な物体にインタラクティブな機能を搭載することができるようになった。また、Aignerらは一般的な刺繍機を用いて、あらゆる布地に導電糸を刺繍して圧力センサを作成する方法を提案している [1]。また、静電容

量方式を採用した技術の研究も進められており、OlwalらはI/O Braidというセンシングと視覚的なフィードバックが可能でひも状のインタフェースを開発した [8], [9]。これは、導電糸を螺旋状に平行に編み込むことで、近接やタッチ、ひねりを検出することが可能である。

本研究では、編み込まれた伸縮性のある導電糸と刺繍された伸縮性のない導電糸を組み合わせている。伸縮性のある部分で伸びるという変形をセンシングし、伸縮性のない部分でタッチや折りたたみなどのセンシングを行っている。このようにすることで、簡単に多様な動作がセンシング可能になることに加えて、柔軟性と耐久性を両立している。

2.3 スマートテキスタイルでの入力方法

スマートテキスタイルの主な利点の1つは人目につかないユビキタスなインタラクションを可能にすることである [12]。布の表面をタッチするなどの二次元平面上における動作は布における最も基本的なインタラクションである。例えばStrohmeierらは抵抗膜方式と静電容量方式を組み合わせることで、タッチやホバリング、圧力などの入力が可能でzPatch [13]を開発した。これは2つのセンシング方式を組み合わせることで、誤動作を減らし、ジェスチャ認識の精度向上につながることを示している。また、Wuらは表と裏の両方のタッチを検出できるZebraSense [17]を開発した。これまでのアプローチと異なりセンシングに必要な導電糸の本数を最小限にすることで、センサの解像度を高く保ちながらセンサの構造や布地への組み込みをより簡単にしている。

掴んだり、折りたたんだりといった変形ジェスチャの研究も行われており、Hamdanらは指で掴んだり、折りたたんだりすることが可能なGrabics [4]を開発しました。また、Parzerらは布でセンシングできる動作の幅を広げ、ひねるや押す、曲げる、伸ばす、折るなどより多様なジェスチャをセンシング可能なSmartSleeve [11]を製作した。

これまで説明したインタラクションは全て、布の元々の一次元や二次元の形状を扱うものとなっている。しかし、布は変形してもその形状を維持できるという特徴があり、折りたたむなどして新たな形状に変化させることで、新しいインタラクションが可能になりアプリケーションの幅も広がる。本研究ではハンカチ型のインタフェースを実装し、複数の形状と入力ジェスチャの組み合わせを検討することで、新しいインタラクションの可能性を考察する。

2.4 スマートテキスタイルでのインタフェースデザイン

前節で述べたようにスマートテキスタイルで様々な入力が可能になっているが、新しいインタフェースを設計する上ではこれらの入力をどのように活用していくかについても検討していく必要がある。求められるアプリケーションを実現する中で、どのジェスチャが必要かを考えた時に、

布でセンシングすべき要素は位置、方向、圧力の強さの3つである [11]. 導電糸を用いたインタラクティブシステムの多くは、これらの要素の変化を計測して布の元々の状態にユーザが行ったジェスチャを検出する。変形ジェスチャの場合は、ユーザが布から手を離すと元の形状に戻り、そこから別のジェスチャが検出される。ただし、折り畳みなどは布地が変形したままの状態であるため例外となっている。本研究では、先ほどの3つの要素に「現在の形状」を第四の要素を追加している。これにより、スマートテキスタイルによるインタフェースのデザインスペースを効果的に広げることが可能である。

3. ハンカチ型デバイスにおけるインタラクション

3.1 ハンカチ上で可能な動作

まず、ハンカチ1枚のできる動作を定義した。図2は定義した12の動作の一覧を示している。これはブレインストーミングや過去の研究において実現されているインタラクションなどを通して得た。各々の動作の概要は以下のとおりである。

Touch/Drag 指1本で軽く触ったり、布状をなぞるように触る動作。

Press 指1本で押すように強く触る動作。

Pinch 指2本で布に触れて、指の感覚を広げたり閉じたりする動作。

Pick 指2本でつまむ動作。辺に囲まれた領域をのどこかをつまむ、頂点をつまむ、辺をつまむの3つの方法がある。

Stretch ハンカチのどこか2カ所を持って、ハンカチの平面を保ったまま大きくする動作。辺を軸に伸ばす方法と対角線を軸に伸ばす方法がある。

Twist ハンカチのどこか2カ所を持って、ハンカチの平面を保ったまま逆向きの力が働くようにして強く回す動作。持ち方としては、平行な辺の組の midpoint・垂直な辺の組の midpoint・同一の対角線上にある頂点・同一の辺上にある頂点の4つがある。また、それぞれの持ち方で、回転する方向にねじる方法とハンカチが平行四辺形になるようにねじる方法がある。

Swing 頂点を持ってそこを軸に回転する方向に振り回したり、前後に振るといった動作。

Tilt ハンカチを持つ角度を変える動作。

Fold/Unfold ハンカチを折りたたむ、あるいは広げる動作。まず、折りたたみには1/2,1/4,1/8と半分ずつにしていくことが考えられる。それには、辺に平行な軸で折りたたんでいく方法と対角線を軸に折りたたんでいく方法がある。また、1/3に折りたたむ方法があり、断面が"e"になる方法と"s"のようになる方法の2つがある。

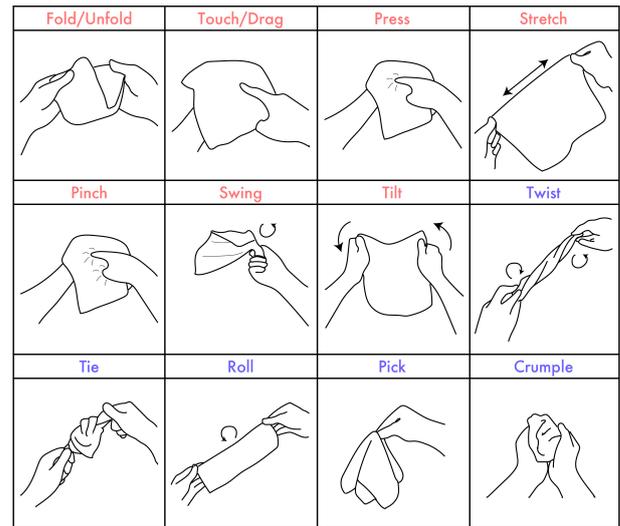


図2: ハンカチ上で可能な動作の一覧。赤字のものは今回のプロトタイプで実装した動作、青字のものは実装していない動作を示している。

Roll 辺などを軸にして丸める動作。辺に平行に巻く方法と対角線方向に巻く方法がある。

Crumple 無造作に丸める動作。

Tie 同一の辺上にある頂点で結ぶ動作と同一の対角線上にある頂点で結ぶ動作。

3.2 複数の動作で可能なインタラクション

次に12の動作から2つを組み合わせて構成されるインタラクションについて述べる。ここでの組み合わせは形状を変化させる動作の後に、その形状のままジェスチャをおこなうというインタラクションとなっている。ここでは全ての組み合わせについては記さず、インタラクションとして成立すると考えた組み合わせのみ述べる。

Fold/Unfold → **Touch/Drag** 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様に指1本で布上を触るインタラクションである。複数回折りたたむと厚さが生まれるため、側面を触るといったインタラクションも可能である。

Fold/Unfold → **Press** 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様に指1本で押すように強く触るインタラクションである。Touch/Dragと同様に、複数回折りたたむと厚さが生まれるため、側面を触るといったインタラクションも可能である。

Fold/Unfold → **Pinch** 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様に二本指でなぞってジェスチャを行うというインタラクションである。

Fold/Unfold → **Pick** 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様につまむというインタラクションである。

Fold/Unfold → **Stretch** 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様に引っ張るといったインタラクションである。

クションである。

Fold/Unfold → Twist 単体動作と同様に折りたたんだ後に、単体動作と同様にねじるというインタラクションである。

Fold/Unfold → Swing ハンカチの対角線を軸に三角におりたたんで端を持って振り回すというインタラクションである。

Roll → Touch/Drag 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様に指1本で布上を触るインタラクションである。

Roll → Press 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様に指1本で押すように強く触るインタラクションである。

Roll → Pinch 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様に二本指でなぞってジェスチャを行うというインタラクションである。

Roll → Pick 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様につまむというインタラクションである。

Roll → Stretch 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様に引っ張るというインタラクションである。

Roll → Twist 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様にねじるというインタラクションである。

Roll → Swing 単体動作と同様に巻いた後に、単体動作と同様に振り回すというインタラクションである。

3.3 他のもものと組み合わせることで可能なインタラクション

また、体や道具など別のもものとハンカチを組み合わせることができるインタラクションとして以下の5つが考えられる。ただし、本研究においては以下のような使用例は考えないこととした。

- 包む：ハンカチで何か別のものを包む。
- 巻きつける：ハンカチを体の部位に巻く。
- 服につける：ハンカチを服に取り付ける、ポケットにしまう。
- 縛る：ハンカチに輪ゴムなどで巻いて縛る。
- 叩く：ハンカチを振って何かものを叩く。

4. プロトタイプ実装

4.1 実装した動作

前章で述べた動作のうち実際に実装したものは図2で赤字となっている7つの動作である。実装しなかったもののうち、Rollは細長く折りたたむという動作に置き換えた。また、CrumpleやTieは自由度の高い変形であり、意味のある使用例に割り当てられなかったので実装しなかった。また、PickやTwistはハードウェアの制約上、今回のプロトタイプでは実装しなかった。

4.2 ハードウェア

プロトタイプのハードウェアは図3に示すような入力層1、入力層2、配線層の3層で構成されており、図4の順番に重ねられている。それぞれの層は伸縮性のある部分と伸縮性のない部分がある。伸縮性のある部分はホールガーメント横編機を用いて伸縮性のある導電糸を編み込んで製作している。伸縮性のない部分は一般的な布地に導電糸(Smart-X, FUJIX Ltd., Kyoto, Japan)で刺繍することで製作している。入力層の刺繍は上糸のみ導電糸を利用しているが、配線層は上糸と下糸の両方で導電糸を利用している。絶縁のためにそれぞれの層の間に通常の布を挿入している。入力層と配線層、及び配線層と回路の接続には導電糸を用いて手縫いで接続している。今回のプロトタイプはマイコンボードとしてAdafruit QT Py (Adafruit Industries, New York, USA)を利用した。配線はマイコンボードと各センサボードとの接続は接続の安定性のために通常の導線で接続しているが、センサから入力層や伸縮部分の電極への接続は配線層に導電糸を刺繍したものを配線として利用している。これは、全てを通常の導線で配線してしまうと折りたたみができなくなるためである。

4.3 センシング

4.3.1 Touch/Drag・Press・Pinch

Touchのセンシングは静電容量方式を採用している。静電容量センサはマイコンボードの静電容量タッチが認識可能なピンとAdafruit MPR121 12-Key Capacitive Touch Sensor Gator Breakout (Adafruit Industries, New York, USA)を使用している。今回のプロトタイプでは入力層1に10カ所と入力層2に4カ所の合計14カ所の電極を刺繍により製作している。Pressもこの静電容量センサの値を利用することで検出している。また、この静電容量センサは同時に複数の電極へのタッチにも対応しているため、DragやPinchも複数の電極にまたがってであれば可能である。

4.3.2 Fold/Unfold

Fold/Unfoldは電極が接触することによって認識している。電極はタッチの認識に用いられるものと共通である。次節で述べるそれぞれの折りたたみパターンに対して、特定の電極のペアが接触しているかどうかで折りたたみ形状を認識している。電極同士の接触はタッチと圧力のセンシングにも用いているAdafruit MPR121 12-Key Capacitive Touch Sensor Gator Breakoutを利用している。また、折りたたみ時の電極の接触を安定させるために磁石を取り付けている。

4.3.3 Stretch

Stretchはホールガーメントで製作した伸縮部分の電極が伸びることによって抵抗値が変化することを利用して検出している。

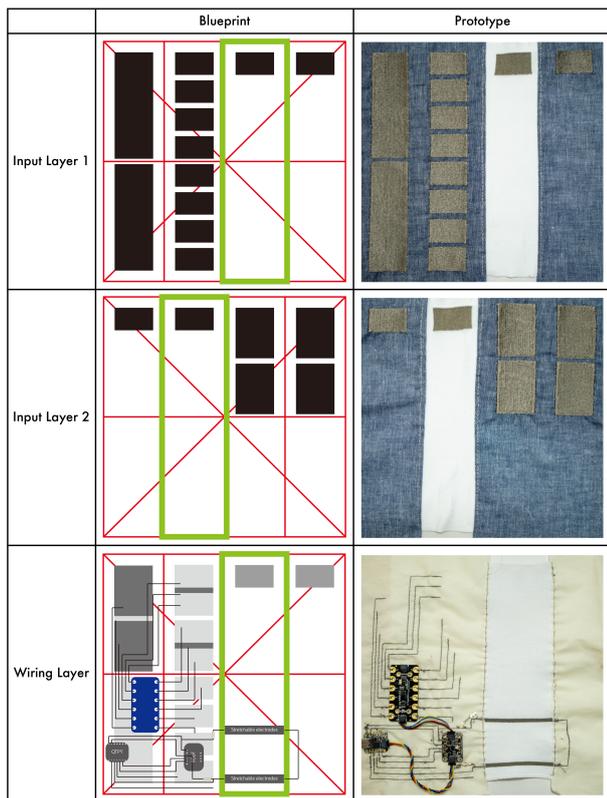


図 3: ハンカチ型インタフェースの設計図とプロトタイプの写真. 設計図の赤い線は折りたたむ軸, 黒い長方形は電極である. 緑色の線で囲まれている部分は伸縮性のある部分で, それ以外は伸縮性のない部分である. 配線層の黒い線は配線, 横向きに配置されている灰色の四角 (QTPY) がマイコンボード, 青色の四角が静電容量センサ, 縦向きに配置されている灰色の四角 (9DoF) が加速度センサである. 左側の写真は設計図に沿って製作したハードウェアを撮影したものである.

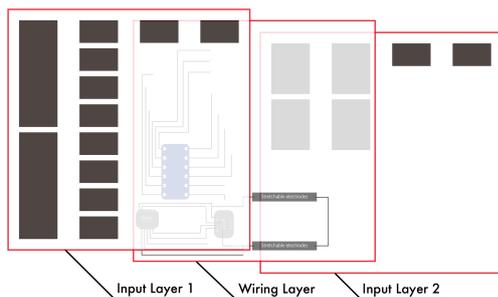


図 4: ハンカチ型デバイスプロトタイプのレイヤ構成. 真ん中の層に配線, 表面に出ている層にタッチ操作を認識するための電極が配置されている.

4.4 Swing・Tilt

Swing と Tilt はハンカチに取り付けられた加速度センサを用いて認識している. 加速度センサは Adafruit LSM6DS33 + LIS3MDL - 9 DoF IMU with Accel / Gyro / Mag - STEMMA QT Qwiic (Adafruit Industries, New York, USA) を用いている.

4.5 ソフトウェア

ソフトウェアの処理の流れとして, まず, 静電容量センサの情報から折りたたみの形状を認識する. 次に, その折りたたみの形状に応じて特定の電極のタッチ・圧力のセンシングを行ったり, 伸ばす・振るのセンシングを行う.

5. インタフェース使用例

今回のプロトタイプでは以下のアプリケーションのような利用が可能となるように実装している. 図 5 はそれぞれのアプリケーションでのハンカチの様子を示している. 各アプリケーションの説明は次の通りである.

- (a) **Unfolded State - Touch/Drag** 机の上などに広げた状態でタッチを行うことで, 座った状態で少し長めの文章を入力するという使用例である. 通常の QWERTY 配列のキーボードを実現するとハードウェアが複雑になってしまうため, 代わりに Li らによる The 1Line keyboard [6] を想定した電極配置になっている.
- (b) **Folded into 1/4 (Square) - Touch/Drag** 1/4 に正方形に折りたたんでタッチを行うことで, 両手は空いているが立っていないといけないうきに文字入力をするという使用例である. プロトタイプでは Wobbrock らによる EdgeWrite [16] を想定した電極配置となっている.
- (c) **Folded into 1/8 - Touch/Drag** 1/8 に折りたたんでタッチを行うことで, 片手しか空いていない場合に片手のみを使ってブラウジングやメディアコントロールなど文字入力が必要のない操作を行う使用例である. 4つの電極を片手の親指でタッチしたりドラッグしたりすることで操作する.
- (d) **Folded into 1/4 (Triangle) - Touch** 1/4 に三角形の形に折りたたんでピストルのように持つことで, シューティングゲームのコントローラとしての使用例である. 人差し指のあたりにある電極が引き金となっている.
- (e) **Folded into 1/4 (Rectangle) - Touch** 1/4 に長方形に細長く折りたたんで, それぞれの指 1 本ずつに対応するように配置した電極をタッチすることで, リコーダのような使用例である.
- (f) **Unfolded State - Stretch** 広げた状態で端を持って引っ張ることで, ストレッチなどを行うときのセンシングに利用する使用例である.
- (g) **Folded into 1/4 (Rectangle) - Swing** 1/4 に長方形に細長く折りたたんで, 釣り竿のように端を持って振ることで, フィッシングゲームのコントローラとしての使用例である.
- (h) **Folded into 1/4 (Square) - Tilt** 1/4 に正方形に折りたたんで, ハンドルのように左右の端を持って

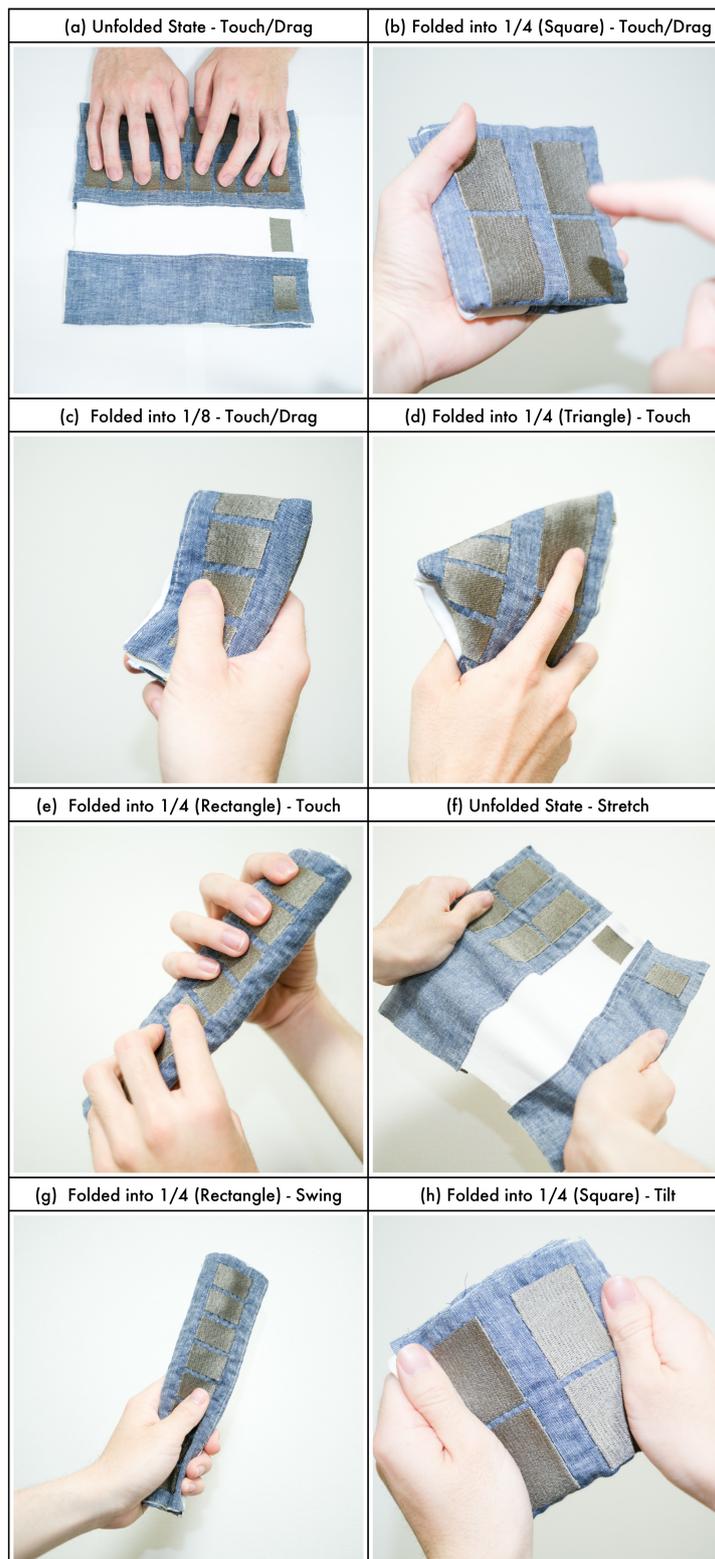


図 5: 現在のプロトタイプで実現されているインタフェース使用例. (a) 広げた状態でキーボードとして使用. (b) 正方形に 1/4 に畳んだ状態で手書き入力パッドとして使用. (c) 1/8 に畳んだ状態で片手で操作できるコントローラとして使用. (d) 三角形の形に 1/4 に畳んだ状態でシューティングゲームのコントローラとして. (e) 長方形に 1/4 に畳んだ状態で楽器 (リコーダ) コントローラと使用. (f) 広げた状態で左右に引っ張り, ストレッチなどのゲームで使用. (g) 長方形に 1/4 に畳み, 振ることでフィッシングゲーム等で使用. (h) 正方形に 1/4 に畳んだ状態で両手で持ち, 傾きを用いたゲームコントローラとして使用.

傾けることで, レースゲームのコントローラとしての使用例である.

6. 今後の課題

現在整理されているハンカチで可能な動作のデザインスペースに関して、更なる検討が必要である。これまで述べたように、形状を変更することによってスマートテキスタイルにおけるインタフェースのデザインスペースを拡張できるが、現時点では折りたたむのみとなっている。そこで、他にハンカチで行うことで意味のある形状を変更する動作がないか深く考察する必要がある。

また、現在のプロトタイプの問題としては以下の3点が挙げられる。

- (1) 図2で示したもののうち実装できていないものがある点。
- (2) 回路と刺繍による配線の接続部分が不安定である点。
- (3) 有線で給電やデータの送信を行っていることで、動作に制限がある点。

まず1つ目に関しては、前述のように Pick と Twist は今回のプロトタイプでは実現できていない。Pick に関しては現状は二本指でのタッチや圧力は検出できるが、それだけでは Press や Pinch と区別がつかないため、何か別のセンシングも加える必要がある。Twist は現時点では伸縮性のない部分にある硬い基板が干渉してねじることができなくなっている。伸縮性の高い部分の面積を大きくしたり、電極配置を工夫したりすることで、回路基板のない部分のみでねじることができると想定される。2つ目に関して、刺繍の配線と回路基板の接続は手縫いにより行っているが、糸のほつれや緩みによってその接触部分が不安定になり、うまくセンシングが行えなくなることがあるという課題がある。これに関しては、薄いフレキシブルな基板などで現状の回路基板の端子の間隔を広げるようなものをつけることなどが解決策として考えられる。3つ目に関して、現時点では有線で常に PC とつながっている必要があるため、一部のインタラクションが実行しづらくなっている。バッテリーや無線での通信を行えるようにすることで有線部分を取り除くことにより、さらなる改良を行えると考えられる。

また、現時点ではジェスチャの認識精度などの評価が行えていないため、上記の課題を解決した上でユーザテストに取り組むことも今後の課題である。

7. おわりに

本研究では、ハンカチで可能な動作のデザインスペースについて検討し、アプリケーションとの組み合わせについて考察した。そして、折りたたみとタッチ、圧力、伸ばす、振るの5つの動作を組み合わせた7つのインタラクションが可能なハンカチ型インタフェースを実装した。最後に、実装から得られた知見や今後の課題について述べた。

謝辞 プロトタイプ制作に当たりご協力を頂いた、パールヨット株式会社、アズマ株式会社に深く感謝申し上げます。本研究、及び本論文にアドバイスを頂いた、東京大学 IIS Lab のみなさまに感謝いたします。また、本研究の一部は IPA 未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] Aigner, R., Pointner, A., Preindl, T., Parzer, P. and Haller, M.: Embroidered resistive pressure sensors: A novel approach for textile interfaces, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13 (2020).
- [2] Chacon, D. A., Velloso, E., Hoang, T. and Wolf, K.: SpinalLog: Visuo-Haptic Feedback in Musculoskeletal Manipulation Training, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 5–14 (2019).
- [3] Gong, J., Wu, Y., Yan, L., Seyed, T. and Yang, X.-D.: Tessutivo: Contextual interactions on interactive fabrics with inductive sensing, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 29–41 (2019).
- [4] Hamdan, N. A.-h., Heller, F., Wacharamanatham, C., Thar, J. and Borchers, J.: Grabrics: A Foldable Two-Dimensional Textile Input Controller, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2497–2503 (2016).
- [5] Ishii, H.: Tangible bits: beyond pixels, *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. xv–xxv (2008).
- [6] Li, F. C. Y., Guy, R. T., Yatani, K. and Truong, K. N.: The Iline Keyboard: A QWERTY Layout in a Single Line, *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 461–470 (2011).
- [7] Murakami, T., Hayashi, K., Oikawa, K. and Nakajima, N.: DO-IT: Deformable objects as input tools, *Conference companion on Human factors in computing systems*, pp. 87–88 (1995).
- [8] Olwal, A., Moeller, J., Priest-Dorman, G., Starner, T. and Carroll, B.: I/O Braid: Scalable touch-sensitive lighted cords using spiraling, repeating sensing textiles and fiber optics, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 485–497 (2018).
- [9] Olwal, A., Starner, T. and Mainini, G.: E-Textile Microinteractions: Augmenting Twist with Flick, Slide and Grasp Gestures for Soft Electronics, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (2020).
- [10] Parzer, P., Perteneder, F., Probst, K., Rendl, C., Leong, J., Schuetz, S., Vogl, A., Schwoedlauer, R., Kaltenbrunner, M., Bauer, S. et al.: RESi: a highly flexible, pressure-sensitive, imperceptible textile interface based on resistive yarns, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface*

- Software and Technology*, pp. 745–756 (2018).
- [11] Parzer, P., Perteneder, F., Probst, K., Rendl, C., Leong, J., Schuetz, S., Vogl, A., Schwoediauer, R., Kaltenbrunner, M., Bauer, S. and Haller, M.: SmartSleeve: Real-Time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, Using a Hybrid Gesture Detection Pipeline, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 565–577 (2017).
 - [12] Poupyrev, I., Gong, N.-W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C. and Robinson, K. E.: *Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale*, p. 4216–4227, Association for Computing Machinery (2016).
 - [13] Strohmeier, P., Knibbe, J., Boring, S. and Hornbæk, K.: ZPatch: Hybrid Resistive/Capacitive ETextile Input, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '18*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 188–198 (2018).
 - [14] Sugiura, Y., Kakehi, G., Withana, A., Lee, C., Sakamoto, D., Sugimoto, M., Inami, M. and Igarashi, T.: Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement, *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 509–516 (2011).
 - [15] Vanderloock, K., Vanden Abeele, V., Suykens, J. A. and Geurts, L.: The skweezee system: enabling the design and the programming of squeeze interactions, *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 521–530 (2013).
 - [16] Wobbrock, J. O., Myers, B. A. and Kembel, J. A.: EdgeWrite: A Stylus-Based Text Entry Method Designed for High Accuracy and Stability of Motion, *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '03*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 61–70 (2003).
 - [17] Wu, T., Fukuhara, S., Gillian, N., Sundara-Rajan, K. and Poupyrev, I.: ZebraSense: A Double-Sided Textile Touch Sensor for Smart Clothing, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 662–674 (2020).