

衣服の変形を用いた触覚フィードバック手法

上田 健太郎^{1,a)} 寺田 努^{1,b)} 塚本 昌彦^{1,c)}

概要: 人々が着用している衣服は肌と接触しており、衣服の変形によって様々な触覚が肌に生じる。本論文では、衣服の変形による触覚フィードバック法を提案する。形状記憶合金と圧縮バネからなるアクチュエータの伸縮により、衣服を変形させ、触覚刺激を生成する。長袖のTシャツの前腕、上腕、肩の周径に沿って4つのアクチュエータを装着し、プロトタイプデバイスを実装し、これらの位置でのフィードバック性能を比較するための評価を行った。アクチュエータの収縮パターンの認識評価の結果、15の収縮パターンの認識では前腕での認識率が最も高かったが28%と低かった。そのため、この結果から高い認識率のパターンを4つ抽出し、さらに実験を行い、その結果認識率は向上し、前腕での認識率は85%まで向上した。これらの結果から、各装着位置でのフィードバック性能を議論し、効果的なフィードバック位置を提示する。

1. はじめに

人々が日々身に着ける衣服は、コンピュータを身に付けて使用するウェアラブルコンピューティングとの親和性が高い。Smart clothing や E-textile と呼ばれる小型化したセンサやアクチュエータを統合した衣服の研究領域がウェアラブルコンピューティングの分野で確立され、入力インタフェースやコンテキスト認識などの利用方法が提案されている。Smart clothing のひとつとして、布を変形させ視覚的、触覚的な刺激を着用者に提供する Deformable cloth が研究されており、布の変形による情報出力機能が示唆されている [1], [2], [3]。着用者は布の変形により圧力や接触面積などの肌への触覚刺激の変化を知覚できる。人の皮膚は、振動や圧力、熱など様々な刺激を知覚でき、中でも振動刺激はモバイル、ウェアラブルデバイスの触覚フィードバックに利用されている [4], [5], [6]。しかし、振動フィードバックは提示刺激が瞬間的であり、また振動刺激によってユーザの意識が捕捉されるため、ユーザは刺激を逃したり、長時間の振動刺激に苛立ったりする [7]。一方、圧力フィードバックは知覚できる刺激量が幅広く、即時的なフィードバックだけでなく刺激を提示し続ける持続的なフィードバックもできる。圧力フィードバックを行うリストバンド型や指輪型のデバイスが提案され、手首や指の刺激の知覚能力を調査されている [8], [9], [10], [11], [12]。

本論文では、衣服を変形させて刺激を提示するフィードバック手法を提案する。形状記憶合金と圧縮バネで構成したアクチュエータの伸縮によって衣服を変形させる。形状記憶合金は小型、軽量、柔軟なので衣服への統合が容易であるためアクチュエータに利用した。リストバンド型のフィードバックデバイスである HapticClench は、手首に沿って巻かれた1本の形状記憶合金のアクチュエータを用いて、皮膚にかかる圧力の強さに応じた触覚刺激を提示する [12]。圧力の強さ以外にユーザが区別できる複数の刺激を生成する方法が考えられ、例えば、複数のアクチュエータによる収縮パターンによってもユーザが区別できる刺激を生成できる。提案手法では、複数のアクチュエータの収縮パターンによって刺激を変化させるために4つのアクチュエータを長袖のTシャツの前腕、上腕、肩の部分に沿って装着し、プロトタイプシステムを実装した。プロトタイプシステムはパルス変調 (PWM: Pulse Width Modulation) 方式によって各アクチュエータの伸縮を制御して布を変形させる。プロトタイプを用いて提案手法のフィードバック性能の評価と前腕、上腕、肩での刺激知覚能力の違いの比較のために4つのアクチュエータの収縮パターンによる刺激の認識評価を行った。

本論文は、MoMM2019 にて発表した論文を拡張したものであり、収縮パターンの認識評価結果から抽出したパターンを用いて行った認識評価を追加している [13]。

2. 関連研究

2.1 圧力フィードバック

触覚刺激の中でも、振動は多くのモバイル、ウェアラブル

¹ 神戸大学

^{a)} ueda_kentaro@stu.kobe-u.ac.jp

^{b)} tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

^{c)} tuka@kobe-u.ac.jp

ルデバイスで通知を行うために利用されている。しかし、ユーザの座位姿勢を正すための3つのフィードバック方法を比較したHallerらの研究によると、振動フィードバックはユーザの作業を妨害してしまう[7]。そのため、他の刺激を利用したフィードバック手法が提案されており、中でも手首や指を圧迫する刺激を提示する圧力フィードバックが最近注目されている。Songらの評価結果によると、圧迫感を提示する圧力刺激は振動刺激と同程度の刺激識別率を記録した[14]。PokeRingは、指の周囲を8カ所をリニアアクチュエータによって突くリング型デバイスであり、突く位置の移動パターンによって様々な情報を伝える[8]。Moveletは、ユーザの前腕に沿って移動するプレスレット型デバイスであり、そのデバイスの移動と位置によってフィードバックを行う[9]。Pohlらは、圧縮フィードバックを提案し、手首に圧力を与える空気圧式膨張バンドデバイスを実装した[10]。Chernyshovらは、形状記憶合金ワイヤを用いた圧力フィードバック手法を提案し、形状記憶合金を搭載したリング型デバイスを実装した[11]。Guptaらは、形状記憶合金を用いた圧迫フィードバック手法を提案し、形状記憶合金を搭載したプレスレット型デバイスを実装した[12]。このように、ウェアラブルコンピューティング環境において圧力フィードバックは振動フィードバックの代替として利用できる。これまでに提案されたデバイスは手首や指に装着するアクセサリ型デバイスであり、衣服を使用したフィードバック手法はまだ提案されていない。さらに、手首と指での圧力フィードバックの性能は調査されてきたが、他の身体部位での性能はまだ評価されていない。衣服は人の身体をほとんどを覆っているため、衣服を用いることで身体の様々な位置にフィードバック刺激を提示できる。本論文では、腕に焦点を当て、衣服の変形に対する触覚刺激の知覚感度を評価し、触覚フィードバックを行う身体上の領域を広げることを目的とする。

3. 提案手法

本論文では、衣服の変形を用いたフィードバック手法を提案する。先行研究では、腕や指に密着するリストバンド型や指輪型のデバイスを用いて手首や指の周径に沿って圧力刺激を提示する[8], [9], [10], [11], [12]。衣服を介した同様のアクチュエーションによって、手首以外の他の身体部位へ同様の刺激を提示できる。衣服を利用することで、リストバンド型デバイスを用いたフィードバック手法よりも触覚刺激を提示できる身体領域が広がり、ユーザは刺激提示位置を変更できる。提案手法は、衣服を変形させて身体と衣服の接触面積や密着度を変化させてユーザに情報を伝達する。衣服の機能性と快適性は非常に重要であるため、衣服にアクチュエータを装着する際に衣服の締め付けをきつくしないことが重要である。提案手法では、衣服の変形のためのアクチュエータとして形状記憶合金を使用す

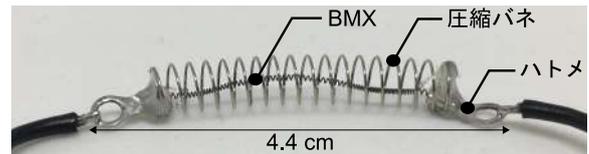


図1 アクチュエータ

る。形状記憶合金は小型、軽量、柔軟なため、衣服に統合しやすい。本論文では、TOKI Corporation製のコイル状のTi-Ni形状記憶合金であるBio Metal heliX (BMX)を用いて、その中でも皮膚に刺激を伝えやすくするために直径と生成する力が最大のBMX150を使用する。BMX150の線材直径は0.15 mm、標準コイル径は0.62 mmで最大40 gfの力を生成できる。BMXは電流を流すと収縮するが、電流を止めても元の長さに伸長しないため、圧縮バネを用いてBMXを元の長さに伸長させる。BMXを圧縮バネの中に通し、BMXとバネで構成されるアクチュエータを実装する。SqueezebackとHapticClenchでは、アクチュエータを手首の周径に沿って装着し、人に身体を掴まれる感覚に似た刺激を提示する圧迫フィードバックを行う[10], [12]。提案手法も同様のフィードバックを行えると想定し、腕と肩の周径に沿ってアクチュエータを装着する。また、HapticClenchでは、1本の形状記憶合金ワイヤを用いて、皮膚に与える圧力の強さに応じた触覚刺激を提示する[12]。収縮するアクチュエータの数と位置が異なる収縮パターンもユーザが区別できる様々な刺激を提示できると考え、Tシャツの袖の周囲に複数のアクチュエータを装着する。

4. 実装

提案手法の実現のためにプロトタイプシステムを実装した。図1にBMX150と圧縮バネで構成されるアクチュエータを示す。1.5 cmに切り取った収縮しているBMX150を3.0 cmに伸ばし、線径0.3 mm、外径5.0 mmの圧縮バネに通し、BMXの両端に金属製のハトメを取り付け、バネとハトメを接着してアクチュエータを実装した。導線をハトメにはんだ付けして回路とアクチュエータをつないだ。次に、4個のアクチュエータを幅1 cm、長さ24 cmの布の帯に取り付けて、アクチュエーターバンドを実装した(図2)。帯には4個のアクチュエータを取り付けるための8個のフックを縫い付けた。アクチュエータを取り付ける2個のフックの間隔は約4 cm、両端の2個のフックは帯の端から1 cm離して縫い付けた。隣接するアクチュエータの間隔は約1.5 cmとなった。

制御回路はマイコンと無線通信モジュールで構成される(図3)。マイコンとしてArduino Pro Miniを用いて、PWMによってTOSHIBA 2SC4935トランジスタを介してアクチュエータに電力を供給する。Arduino Pro Mini



図 2 アクチュエーターバンド

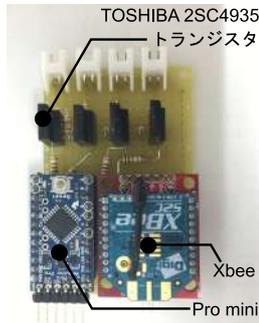


図 3 制御回路

は出力電圧をパルス波のデューティ比を変更して変調する PWM 変調方式によって制御でき、この回路では、PWM のデューティ比を 0 ~ 255 の範囲で設定することで 0 ~ 5 V の範囲の電圧を出力し、アクチュエータに供給する電力を制御する。PWM 制御によって電力損失を減らし、アクチュエータの収縮時間と収縮量を調整する。無線通信モジュールとして Xbee を用いて、PC と通信する。この制御回路では、PWM のデューティ比の値が最大値 255 のときに 7.6Ω の抵抗値のアクチュエータに 2.3 V の電圧を印加する。アクチュエータの収縮の消費電力は、1 個のアクチュエータにつき最大約 0.7 W である。

アクチュエータバンドを長袖の T シャツに装着した。T シャツの素材は綿、サイズは身丈 65 cm、肩幅 45 cm、身幅 50 cm、袖丈 56 cm である。バンドの装着にはスナップボタンを用いた。バンドのフックを縫い付けた面の裏面に 8 個のボタンを縫い付けた。バンドの装着位置は、ユーザの動きを妨げないよう関節を避け、前腕と上腕では肘関節から約 5 cm の位置、肩では肩関節から約 5 cm の位置とした。図 4 は各装着位置にアクチュエータバンドを装着した長袖の T シャツを示している。被験者に合わせてバンドの位置を調整するために、前腕と上腕には 64 個 (8 個 \times 8 列)、肩には 56 個 (8 個 \times 7 列) のボタンを縫い付けた。

5. 評価

実装したプロトタイプシステムを用いて、アクチュエータの収縮パターンの認識評価実験を行った。

5.1 収縮パターン認識

フィードバックシステムには、ユーザに様々な情報を伝えるために、ユーザが区別できる刺激の粒度が求められる。形状記憶合金を用いた触覚フィードバックシステムでは、ユーザの皮膚に与える圧力の強さによって刺激

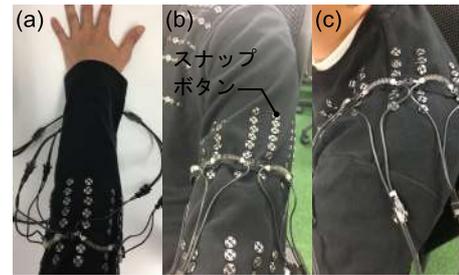


図 4 アクチュエーターバンドを装着した長袖の T シャツ (a) 前腕, (b) 上腕, (c) 肩

の粒度を確保している [11], [12]。本論文で使用する BMX は HapticClench で使われている形状記憶合金よりも短く、生成する圧力も弱い。提案手法では、複数のアクチュエータを用いて、収縮するアクチュエータの数と位置を制御して様々な収縮パターンによる刺激を提示できるため、アクチュエータの収縮パターンによって刺激の粒度を得る。ユーザが知覚できる刺激数を明らかにするために、プロトタイプシステムによる収縮パターンの認識評価を行う。

実験内容

被験者は T シャツの上から長袖の T シャツを着用し、PC がある机の前の椅子に座った。各被験者の腕の長さやアクチュエータバンドの装着位置の周径、肩幅を測定し、アクチュエータバンドの位置を調整した。図 5 にアクチュエータバンドの各装着位置での 4 つのアクチュエータの位置を示す。前腕と上腕では、手の甲を上に向け肘を伸ばした状態で、桡骨側の下側から尺骨側の下側にかけて各アクチュエータの位置を刺激提示位置 1 ~ 4 とした。肩では、胸側から背中側にかけて刺激提示位置 1 ~ 4 とした。被験者は実験内容についての説明を受け、左手を伸ばして手のひらを机の上に置いて実験を開始した。実験手順はまず、アクチュエータが収縮し、収縮パターンを生成し、収縮開始と同時に、PC 画面上に各収縮パターンを表すアイコンを表示した。収縮開始から 4 秒後に PC 画面にアイコンを選択する指示を表示し、被験者は指示を確認すると、右手のマウスを用いて知覚した収縮パターンに対応するアイコンを選択する認識試行を行った。選択後、アクチュエータは 10 秒間伸長し、次の収縮パターンを生成するために収縮を開始した。提案手法による刺激の絶対閾を調査した結果、肩の絶対閾を考慮して、PWM のデューティ比の値を 229 (255 の 90%) に設定してアクチュエータを収縮させた。認識試行は 15 パターンの収縮パターンをランダムに 3 回ずつ提示し、被験者は各バンド装着位置で認識試行を 1 回ずつ行った。図 6(a) に PC 画面上に表示されるアイコンを示す。アイコンは、全アクチュエータが収縮していない刺激を提示しないパターンを含めて 16 個のアイコンで構成された。アイコンの白とピンクの部分は、それぞれアクチュエータの伸張と収縮を表していた。各装着

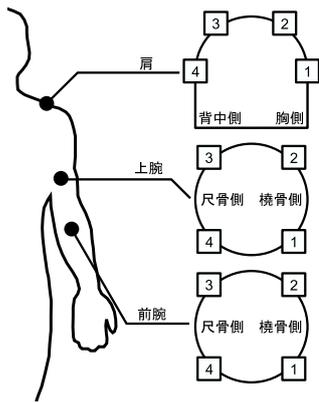


図 5 各装着位置でのアクチュエータ位置

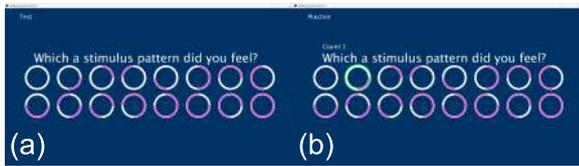


図 6 収縮パターンアイコン (a) 実験中 (b) 練習中

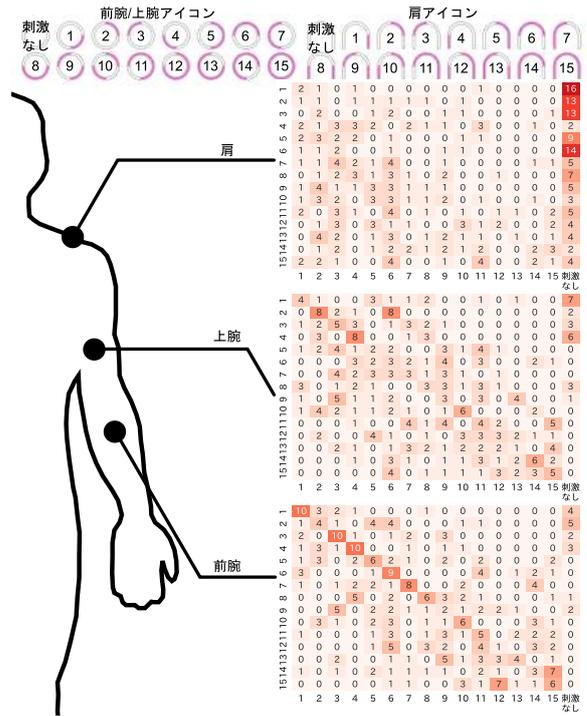


図 7 各収縮パターンの認識結果

位置での実験の前に、収縮パターンと評価手順に慣れるために練習を行った。練習では、各収縮パターンがランダムに1回ずつ提示され、アイコン選択指示は収縮開始から5秒後にPC画面に表示された。練習中は生成された収縮パターンに対応するアイコンを視覚的に明示した(図6(b))。被験者は23から28歳の男性7名である。前腕と上腕のバンド装着位置の周径の平均値はそれぞれ23.58 cm(標準偏差2.31)と23.88 cm(標準偏差1.76)であった。

結果

図7にアクチュエータが生成した各収縮パターンを被験者が認識した回数を示す混合行列を示している。被験者が正しい収縮パターンを認識した回数から認識率を計算した。バンド装着位置の中で、前腕での認識率が最も高いが、約28.6%と低かった。被験者が正しく認識した回数が最も多い収縮パターンはパターン1, 3, 4であった。被験者の中には、パターン1, 2, 3, 4, 8, 9を刺激なしと認識した人もいた。パターン1~8はパターン1~10, パターン15はパターン10~14として認識される傾向があり、パターン9~14の誤認識は広範囲の収縮パターンで起こった。刺激提示位置3と4のアクチュエータの収縮を含むパターンは、刺激提示位置1と2のアクチュエータの収縮を含むパターンよりも高い認識率であった。上腕での認識率は20.3%であった。パターン2と4は最も正しく認識された回数が多かった。パターン1~4はパターン1~8, パターン15はパターン5~14と誤認識される傾向があり、パターン5~10は他の収縮パターンよりも誤認識の範囲が広がった。肩での認識率はバンド装着位置の中で最も低く4.44%であった。収縮パターンが刺激なしと認識された

回数が他の装着位置よりも多く、特にパターン1, 2, 3, 6が刺激なしと誤認されることが多かった。これらのことから、15パターンの収縮パターンは刺激提示に実用的ではないと考えられる。

5.2 抽出した収縮パターン認識

5.1節の結果から、正しい認識回数が多く、連続的な増減を示せるパターン3, 6, 11, 15の4パターンを提示刺激セットとして抽出する。提案手法の利用シーンを想定して、着席と歩行の2状態での4パターンの収縮パターンの認識評価を行う。歩行実験のために、iPad上で実行する評価アプリケーションをSwiftを用いて実装し、回路の無線通信モジュールをBLE Nanoに変更した。

実験内容

5.1節と同様に被験者はTシャツの上から長袖のTシャツを着用して実験を行う。各被験者の腕の長さやアクチュエーターバンドの装着位置の周径、肩幅を測定し、アクチュエーターバンドの位置を調整した。バンド装着位置は5.1節の装着位置と同じである。被験者に実験内容について説明し、着席と歩行の姿勢について指示をして実験を開始した。着席時は左手を伸ばして手のひらを机の上に置き、歩行時はトレッドミルを用いて歩行速度4 km/hで歩行して実験を行った。実験は着席状態での各装着位置での認識試行から始め、その後、歩行状態での認識試行を行った。実験手順はまず、アクチュエータが収縮し、収縮パターンを生成した。収縮開始と同時に各収縮パターンを表すアイコン、収縮開始の4秒後に指示をiPad画面上に表示した。被

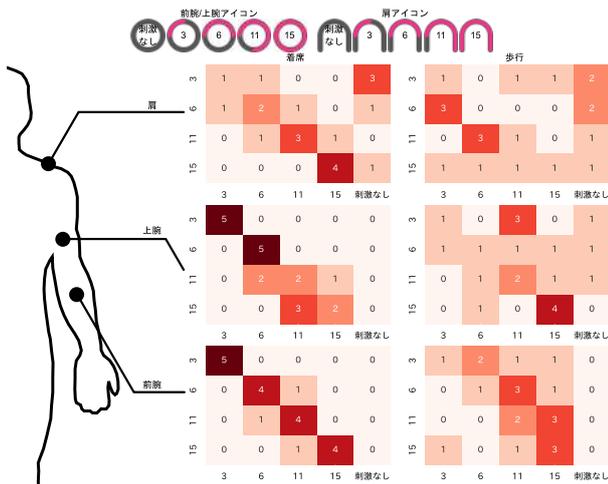


図 8 各収縮パターンの認識結果

験者は指示を確認すると、知覚した収縮パターンに対応するアイコンを右手で選択し、選択後にアクチュエータは 10 秒間伸長し、次の収縮パターンを生成するために収縮を開始した。刺激を知覚しやすくするために、PWM のデューティ比の値は 255 に設定してアクチュエータを収縮させた。認識試行は、4 パターンの各収縮パターンをランダムに 5 回ずつ提示し、被験者は各姿勢において各バンド装着位置につき 1 回ずつ認識試行を行った。iPad 上のアイコンは、全アクチュエータが収縮していない刺激を提示しないパターンを含めて 5 個のアイコンが表示された。各装着位置での実験の前に、収縮パターンと評価手順に慣れるために練習を行った。練習では、各収縮パターンがランダムに 3 回ずつ提示され、アイコン選択指示は収縮開始から 5 秒後に表示された。練習中は生成された収縮パターンに対応するアイコンを視覚的に明示した。被験者は 5.1 節の実験を終えた 28 歳の男性 1 名である。

実験結果

図 8 に各収縮パターンの認識結果の混合行列を示す。被験者が正しい収縮パターンを認識した回数から認識率を計算し、各装着位置での着席時と歩行時の認識率を表 1 に示す。着席時では 5.1 節の結果と同様に、前腕での認識率が最も高く、肩での認識率が最も低かった。さらに 5.1 節の結果より、着席時の 4 収縮パターンの認識率は向上し、特に前腕では 85% の認識率となった。15 パターンの刺激は識別が困難であったが、刺激を 4 パターンに絞ることで精度を向上できた。しかし、歩行時は最も高い上腕での認識率が 40% と低かった。歩行では、歩行による振動や被験者の腕の振りによって袖布と皮膚との接触が断続的に変化して刺激を知覚しづらいと考えられる。

6. 議論

6.1 フィードバック位置

前腕では、収縮パターンの認識率が最高であり、収縮ア

表 1 各装着位置の着席時と歩行時の認識精度

	着席	歩行
肩	50%	15%
上腕	70%	40%
前腕	85%	35%

クチュエータ数が 1 つのパターン 1, 3, 4 の認識率は他の収縮パターンよりも高い。上腕では、認識率は前腕よりも低く、肩では認識率がバンド装着位置の中でも最も低い。

これらの結果から、前腕がフィードバックを行う最適な位置であることが示された。肩は刺激の知覚性能が最も低く、現在のフィードバックシステムには適していない。しかし、肩は腕とは異なり、ユーザの行動によってアクチュエータの身体に対する位置が移動しづらい。これは、収縮するアクチュエータの位置による刺激は知覚しやすい利点である。ユーザの行動の影響は四肢よりも胴体の方が小さいが、四肢の方が刺激知覚能力が高いため、このトレードオフを考慮する必要がある。

6.2 粒度

アクチュエータに使用された BMX の長さは 3.0 cm と短く、ユーザが識別できる圧力の差を生成できないと考え、識別できる刺激を生成するために圧力の強さではなく、アクチュエーターバンドの収縮パターンを利用する。1 つのアクチュエーターバンドの 4 つのアクチュエータによって 15 個の収縮パターンを生成できるが、ユーザの認識率は前腕でも 30% 以下である。そのため、識別可能な刺激を生成するために 15 個の収縮パターンからユーザの認識率が高い収縮パターン 3, 6, 11, 15 の 4 パターンを抽出して、着席と歩行の 2 状態で認識評価を行った。その結果、着席時の前腕での認識率が 85% まで向上した。しかし、歩行時の認識精度は 40% 以下となった。歩行時でも知覚できる刺激を提示するために、現在のプロトタイプシステムより大きく布を変形させる必要がある。そのため、バンド上のアクチュエータの数を減らし、アクチュエータの収縮量を大きくすることを考えている。また、バンド上のアクチュエータの数を減らすことでシステムがユーザに識別可能な様々な強さの圧力を生成の可能性もある。

また、収縮するアクチュエータの数と位置による刺激の認識は精度が低いため、時間的に変化する刺激の検討も行う。複数のアクチュエータによる刺激提示を行うフィードバックシステムでは、時間的に変化する刺激のパターンをフィードバックに利用している。PokeRing では、指や手首の周囲を移動する刺激の移動開始位置や移動方向、刺激数などの認識を評価している [8]。提案手法も 4 つのアクチュエータによる刺激の移動を提示できるため、時間的に変化する刺激をフィードバックに利用できる。しかし、先行研究と異なり、デバイスが皮膚に密着していないので、

ユーザの行動によってアクチュエータの腕に対する位置が移動するため、刺激の移動開始位置などの認識は困難だと想定している。しかし、刺激の移動方向や刺激数などはアクチュエータの位置が移動しても認識できると考えている。

6.3 使用例

提案手法の使用例として、着信電話または電子メールメッセージの通知と予定管理支援について説明する。まず、着信電話または電子メールメッセージの通知では、電話や電子メールを受信すると、提案されたシステムは応答の緊急度に応じてた収縮パターンによって衣服を変形させる。ユーザは通知を受け取り、早急な返信の必要性を認識できる。さらに、複数のアクチュエーターバンドを用いることで、緊急度だけでなく、現在の未応答メッセージ数を伝える。

予定管理支援では、提案手法によって、次の予定までの時間に合った布の変形によって、ユーザに残り時間を通知する。次の予定までの時間の減少に伴い、収縮するアクチュエータ数が増え、ユーザへ提示される刺激量が増える。ユーザに十分な時間が残っている場合は、提案手法が提示する刺激は微弱であり、ユーザの作業を中断しない。次の予定の時間が迫ってくると、刺激が力強くなり、ユーザは作業を中断して次の予定に向かう。会議やプレゼンテーション中では、ユーザに終了時間を同様の方法で伝えることができる。

7. まとめ

本論文では、衣服の変形を利用した触覚フィードバック手法を提案した。形状記憶合金と圧縮バネで構成されたアクチュエータを用いて、その収縮により衣服を変形させる。皮膚に接触している衣服を変形させ、皮膚に触覚刺激を提示する。プロトタイプシステムを実装し、収縮パターンの認識評価実験を実施した。評価の結果、4個のアクチュエータによる15パターンの認識では、前腕での認識率が最も高かったが28%と低かった。そのため、この結果の中で高い認識率であった収縮パターンを4つ抽出し、着席と歩行の2状態における認識評価をさらに行った。その結果、着席時の認識率がすべての装着位置で向上し、特に前腕での認識率は85%となった。しかし、歩行時の認識率はすべての装着位置で40%以下となった。

参考文献

[1] J. Berzowska and M. Coelho: Kukkia and Vilkas: Kinetic Electronic Garments, *Proc. of the 9th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2005)*, pp. 82–85 (Oct. 2005).

[2] A. V. Moere and M. Hoinkis: A Wearable Folding Display for Self-Expression, *Proc. of the 18th Australia conference on Computer-Human Interaction: Design: Ac-*

tivities, Artefacts and Environments (OZCHI 2006), pp. 301–304 (Nov. 2006).

[3] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Input Interface Using Wrinkles on Clothes for Wearable Computing, *Journal of Information Processing*, Vol. 27, pp. 96–105 (Feb. 2019).

[4] S. C. Lee and T. Starner: BuzzWear: Alert Perception in Wearable Tactile Displays on the Wrist, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2010)*, pp. 433–442 (Apr. 2010).

[5] J. R. Cauchard, J. Cheng, T. Pietrzak, and J. A. Landay: ActiVibe: Design and Evaluation of Vibrations for Progress Monitoring, *Proc. of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2016)*, pp. 3261–3271 (May 2016).

[6] Y. C. Liao, Y. L. Chen, J. Y. Lo, R. H. Liang, L. Chan, and B. Y. Chen: EdgeVib: Effective Alphanumeric Character Output Using a Wrist-Worn Tactile Display, *Proc. of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2016)*, pp. 595–601 (Oct. 2016).

[7] M. Haller, C. Richter, P. Brandl, S. Gross, G. Schosleitner, A. Schrempf, H. Nii, M. Sugimoto, and M. Inami: Finding the right way for interrupting people improving their sitting posture, *Proc of the 13th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 2011)*, pp. 1–17 (Sep. 2011).

[8] S. Je, M. Lee, Y. Kim, L. Chan, X. Yang, and Andrea Bianchi: PokeRing: Notifications by Poking Around the Finger, *Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2018)*, No. 542 (Apr. 2018).

[9] D. Dobbstein, E. Stemasov, D. Besserer, I. Stenske, and E. Rukzio: Movelet: a Self-Actuated Movable Bracelet for Positional Haptic Feedback on the User's Forearm, *Proc. of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2018)*, pp. 33–39 (Oct. 2018).

[10] H. Pohl, P. Brandes, H. N. Quang, and M. Rohs: Squeezeback: Pneumatic Compression for Notifications, *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*, pp. 5318–5330 (May 2017).

[11] G. Chernyshov, B. Tag, C. Caremel, F. Cao, G. Liu, and K. Kunze: Shape Memory Alloy Wire Actuators for Soft, Wearable Haptic Devices, *Proc. of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2018)*, pp. 112–119 (Oct. 2018).

[12] A. Gupta, A. A. R. Irudayaraj, and R. Balakrishnan: HapticClench: Investigating Squeeze Sensations using Memory Alloys, *Proc. of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2017)*, pp. 109–117 (Oct. 2017).

[13] K. Ueda, T. Terada, and M. Tsukamoto: Haptic Feedback Method using Deformation of Clothing, *Proc. of the 17th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM 2019)*, pp. 84–93 (Dec. 2019).

[14] S. Song, G. Noh, J. Yoo, I. Oakley, J. Cho, and A. Bianchi: Hot & Tight: Exploring Thermo and Squeeze Cues Recognition on Wrist Wearables, *Proc. of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2015)*, pp. 39–42 (Sept. 2015).