

導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法

高田 峻介 志築 文太郎 高橋 伸

データグローブを構築するための、導電繊維が編み込まれた手袋を用いて手形状を認識する手法を示す。提案手法は、手形状として指の曲げおよび指同士の接触を推定する。指の曲げ推定には、指を曲げた際に手袋表面の導電繊維同士が短絡することによって電気抵抗が減少する現象を用いる。また、指同士の接触推定には、各指ごとに異なる周波数の交流信号を印加し、指同士が接触した際に信号が伝搬する現象を用いる。我々は実験により、指の関節の角度と導電繊維の抵抗値の関係を明らかにした。さらに導電繊維の抵抗値と曲げセンサの抵抗値を比較した。また、それぞれ異なる周波数の交流信号を印加した人指し指-小指のどの指骨に親指が接触したかを機械学習を用いて推定し、実験により触れた位置の推定精度が80.5%であることを明らかにした。さらに電源的に独立した手袋同士の接触についても検証し、信号が伝搬されることを確認した。

We show a hand shape recognition technique using conductive fiber included in a glove for a data glove. This technique estimates the bend of each finger and detects fingers' contact as the hand shape. For estimating the bend, the technique measures the electrical resistance of conductive fiber; the resistance decreases as the finger bends because the surface of the glove short-circuits. For detecting fingers' contact, the technique applies alternating currents of different frequencies on each finger and observes the signal propagation between the fingers. We conducted experiments to clarify the relationship between bend angles and the resistance of conductive fiber. Moreover, we compared the resistance of conductive fiber with that of a bend sensor. We also evaluated the accuracy of fingers' contact detection implemented using machine learning. Finally, we show that the technique also detects the contact of a pair of gloves, which are electrically independent, by observing propagated signals.

1 はじめに

手の形状をリアルタイムに認識できれば、VRゴーグルを用いた没入型コンテンツや、手話認識のための入力インタフェースを構築できる。この手形状認識のためのデバイスとして、主にセンサを搭載した手袋(データグローブ)、カメラ、ならびに筋電位センサが用いられている。これらの中でもデータグローブは、カメラを用いた手形状認識手法に比べて、認識対象が撮影できる場所にカメラを置かなければならない問題や、手が重なり認識対象が撮影できなくなる問

題(オクルージョン)を持たず、また筋電位に基づく手法が苦手とする細かい指の動きを認識できる。しかし、手袋にセンサを搭載する必要があるため、重い、指が曲げづらい、洗濯できない、高コストなどの問題がある。

我々は導電繊維が編み込まれた手袋をセンサの一部として用いることにより、これらの問題を解決可能な手形状認識手法である「GROVE^{†1}」を開発している[29][30]。提案手法は手形状として指の曲げ具合、ならびに指同士の接触および接触位置を推定する。これらの手形状を推定することにより、例えばVRコンテンツにおいては指の曲げ具合を3Dハンドモデルに反映させることができる。また、指の接触位置を用いて文字入力やショートカット操作を行うことができる。

Hand Shape Recognition Technique Using Conductive Fiber

Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi, 筑波大学, University of Tsukuba.

コンピュータソフトウェア, Vol.35, No.3(2018), pp.45-56.

[研究論文] 2018年3月4日受付.

^{†1} 由来は “grow up” + “glove”.

指の曲げ推定には、指を曲げた際に手袋表面の導電繊維同士が接触し、短絡することによって電気抵抗（以下、単に抵抗）が減少する現象を用いる。また、指同士の接触および接触位置の推定には、手袋の指ごとに異なる周波数の交流信号を印加し、指同士が接触した際に交流信号が伝搬する現象を用いる。

我々は、この導電繊維の抵抗変化の特性を調査するために、導電繊維の抵抗値、曲げセンサの抵抗値ならびに指の角度を比較した。次に指同士の接触位置の推定精度を評価した。最後に手同士が接触した際の信号の伝搬を観察した。本稿にて手形状認識原理およびこれらの実験の結果を示す。

2 関連研究

従来より様々な手形状認識手法が開発されてきた。

2.1 カメラを用いた手形状認識

カメラを用いた手形状認識手法はユーザに何も装着させずに手形状認識を行える点において魅力的である。Leap Motion は 2 台の赤外線カメラおよび赤外線照射 LED を用いて手形状を認識している [18]。Tang らは Kinect を用いて手形状を認識している [25]。しかしカメラの撮像範囲外にて手形状を認識できない。

この問題に対し、身体に装着したカメラを用いる手法も提案されている。OmniTouch は肩に装着したカメラを用いて手形状を認識する手法である [11]。Brainy Hand は耳に装着したカメラを用いて手形状を認識する手法である [24]。Digits は手形状を認識できる手首に装着するためのカメラを含むセンサ群である [14]。Niikura らは手首に装着したカメラに映る指形状を認識している [20]。CyclopsRing は手形状を認識できる指に装着するためのカメラである [5]。

これらのカメラを用いた手法全般は、手が障害物に隠れると認識できないオクルージョンの問題を持つ。一方、データグローブはこれらの問題を持たず、例えば両手が重なった場合でも容易に手形状認識が可能である。

2.2 データグローブにおける手形状認識手法

データグローブにおいて用いられている指の曲げ

推定手法には、ひずみゲージ方式 [4]、圧電素子方式 [3]、慣性センサ方式 [13][16]、光ファイバ方式 [1]、静電容量センサ方式 [9]、磁気センサ方式 [8] などがある。提案手法は、ひずみゲージ方式のような導体の伸縮による抵抗変化ではなく、手袋表面の繊維同士の短絡による抵抗変化を用いている点において異なる。

電氣的接点を搭載することによって、親指が他の指のどの指骨に触れたかを推定しているデータグローブもある [19][21]。提案手法は同様の接触の推定に、交流信号の伝搬を用いて行っている点でこれらと異なる。また提案手法は接触の推定に加えて指の曲げを推定できる。

2.3 その他のウェアラブルな手形状認識

ThumbSlide は腕に巻き付けた赤外線フォトリフレクタを用いて計測した筋肉の隆起からハンドジェスチャを認識する手法である [2]。同様の手法は圧力センサを用いても実現されている [7]。ViBand は腕につけたスマートウォッチ内蔵の加速度センサのセンサ値を、高い時間分解能にて計測することによりハンドジェスチャを認識する [17]。Yang らは腕に巻いた電極を用いて、腕内部構造を推定することにより手形状認識を行っている [28]。筋電位を用いて手形状を認識することもできる [15][26]。

これらの手法は手ではなく腕にセンサを取り付けることにより手形状を認識するため、手を用いた作業時に装置が邪魔になりにくいという利点を有するが、指の曲げを推定してはいない。一方、提案手法は指の曲げ具合の推定を行っている点で異なる。

2.4 導電布を用いたセンシング

導電繊維を縫い込むもしくは樹脂を塗布した導電布を用いたセンシング手法がこれまでに提案されてきた。導電布を用いたセンシング手法として、導電布へのタッチ位置を検出する手法 [12][23]、導電繊維を用いて曲げを推定する手法 [10] がある。提案手法はこれらの導電布へのタッチ位置および指の曲げを併せて推定することができる。さらに、これらの手法は特定のパターンにて導電繊維を布に編み込む等の工夫を必要とするが、提案手法は手袋全体が導電性を有する

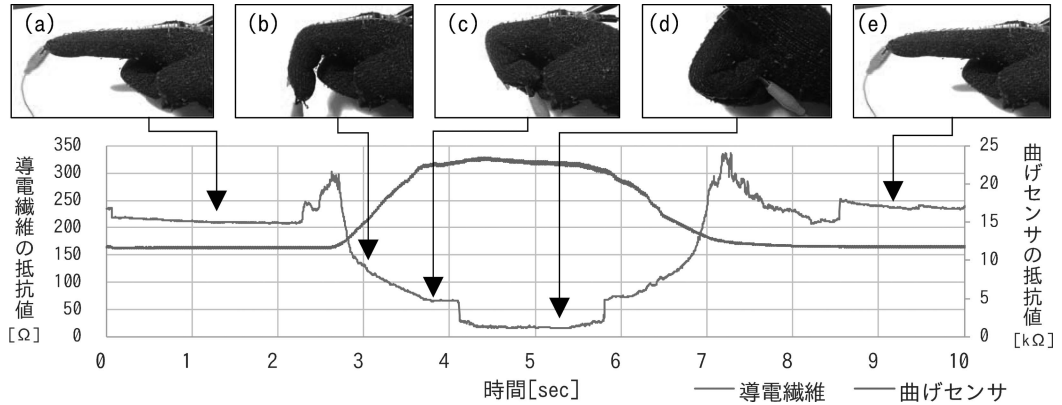


図 1 指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値変化

場合に、各指の先端および手首への配線を行うのみにて構築できる。

Plex は布に塗布された導電樹脂のパターンを用いて、指の曲げおよび布へのタッチ位置を推定する手法 [27] である。しかし、指の曲げおよびタッチ位置推定用のパターンは独立しているため、それぞれのパターンへの配線を必要とする。提案手法は導電布全体が導通するような手袋を用いているため、少ない配線にて同様の認識を可能にしている。

3 提案手法：GROVE

GROVE は導電繊維が編み込まれた手袋 (以降、単に手袋) を用いて、指の曲げおよび指同士の接触を推定する手法である。以下に両者の原理を示す。

3.1 導電繊維を用いた指の曲げ推定

導電繊維を用いた指の曲げ推定手法の原理を述べる。図 1 に手袋を装着したまま指を曲げた際の、人差し指の先端から根本までの導電繊維の抵抗変化および手袋に搭載したひずみゲージ方式の曲げセンサ (SpectraSymbol 社製, SEN-08606) の抵抗変化を示す。図 1 上部の写真 (a)–(e) はグラフの各点における指の曲げ具合を示す。図 1 にて、指を曲げた際に曲げセンサは抵抗値が増加しているのに対し、導電繊維は抵抗値が減少している。これは、図 2 に示すように、指を曲げた際に関節付近にて手袋表面の導電繊維同士が接触することによって、電流が流れる経路が短く

なるためである。また図 1 (c) のように指を曲げた際に前後より大きく抵抗値が減少している。これは指の先端が手のひらと接触することによって、電流が流れる経路が短くなったためである。

また、指を伸ばした状態から曲げた場合 (図 1 (a) → 図 1 (b)) および曲げた状態から伸ばした場合 (図 1 (d) → 図 1 (e)) において、一時的に抵抗値が高くなっている。この現象は指の曲げ伸ばしをゆっくり行った場合にも発生する。これは、曲げ始めおよび終わり時には指の腹側の関節付近における短絡による抵抗変化が少なく、指の背側の電流の経路が伸びることによる抵抗値の変化の方が大きいためである。この抵抗値の上昇を確かめるために、手袋の指の部分を引き張ったところ、抵抗値が上昇した。

3.2 指同士の接触の推定

指同士の接触推定手法の原理を述べる。GROVE では、図 3 (a) のように手袋の各指の先端部にそれぞれ異なる周波数の交流信号を印加する。このとき指同

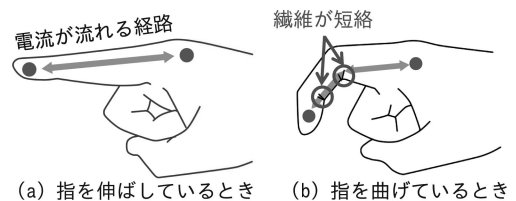


図 2 指の曲げ推定の原理

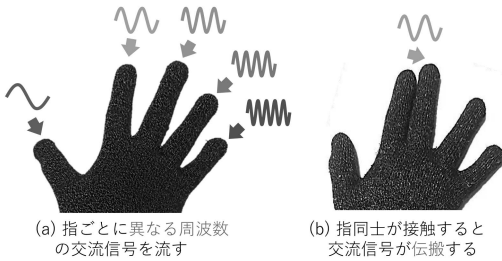


図 3 指同士の接触推定の原理

士が接触すると、図 3 (b) のように導電繊維を通じて交流信号が伝搬するため、伝搬してきた信号の周波数を高速フーリエ変換 (FFT) を用いて解析することによりどの指同士が接触したかを推定できる。

図 4 および図 5 に GROVE における手形状認識回路およびその構成を示す。本回路は各指に異なる周波数の交流信号を印加するための正弦波発振器 (Analog Devices 社, AD9833), 信号増幅用のオペアンプ (LM358), 指の曲げ推定用の分圧回路, 制御および PC との通信用のマイコン (mbed 社, mbed LPC1768) から成る。本回路は、手袋の親指以外の各指の先端に、後にフーリエ解析した際に特徴が出やすい正弦波信号を印加している。周波数はそれぞれ、35 Hz (人差し指), 60 Hz (中指), 85 Hz (薬指), ならびに 110 Hz (小指) とした。これらの周波数はマイコンのサンプリング周波数が 250 Hz であったため、エイリアシングが起きないように半分の 125 Hz 以下とし、かつ互いの周波数成分が干渉しないように選択した。また、手袋の親指部をマイコンのアナログ入力ピンに接続し、手袋の手首部をマイコンのグラウンドに接続した。

図 4 の回路を用いて指同士が接触した際に、親指に伝搬した信号の波形ならびにフーリエ解析後の周波数スペクトルを図 6 に示す。図 6 (a) のように手を開いた状態では、親指をどの指にも接触させていないため、どの周波数のパワーも低いままであった。図 6 (b) のように親指と人差し指の末節骨を接触させると、人差し指の 35 Hz のパワーが増加した。次に図 6 (c) のように人差し指の中節骨に接触させると図 6 (b) よりも 35 Hz のパワーが減少した。また図 6 (d) のよう

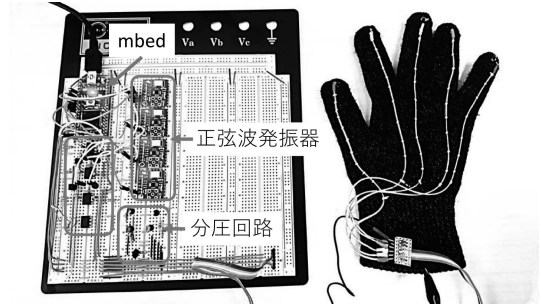


図 4 手形状認識回路

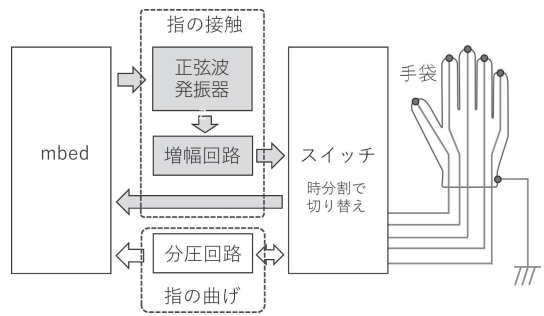


図 5 回路構成

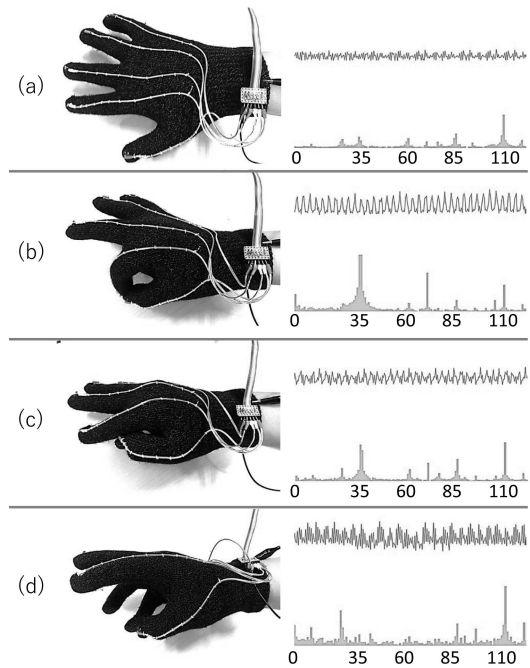


図 6 指同士が接触した際の応答波形 (各段上側) および周波数スペクトル (各段下側)

に小指の末節骨に接触させると 110 Hz のパワーが増加した。これらのことから、親指に伝搬した信号の周波数スペクトルのパワーを解析することにより、どの指に触れているか、ならびに指のどの部分に触れているかが推定可能であることがわかる。

さらにこのことはデータグローブごとに固有の周波数の交流を印加することにより、両手の接触や、他のユーザとの握手等による接触を推定できることを示唆している。

4 実験

提案手法における指の曲げおよび指同士の接触推定手法の精度を評価するために実験を行った。実験には手袋として、Agloves 社製の Agloves Touchscreen Gloves M/L 兼用サイズを用いた。なおこの手袋は、静電容量タッチパネルを手袋を装着したままタッチ操作可能な手袋として市販されている。

4.1 実験 1：指の曲げ推定手法の評価

指を曲げた際の導電繊維の抵抗値の変化を観察する実験を行った。研究室内の大学生および大学院生 6 名 (22–25 歳、平均年齢 23.2 歳、男性、全員が右利き) を実験協力者とした。また各実験協力者の手長 (中指の先端から手と手首の間のしわまでの長さ) は平均 18.20 cm (SD=0.87) であった。

4.1.1 実験内容

指を曲げた際の導電繊維、曲げセンサの抵抗値ならびに指の関節の角度を比較するために、図 7 に示す手袋および図 8 に示す実験治具を製作した。

図 7 の手袋には導電繊維の抵抗値を計測するために、人差し指部分の先端および手首部分に導線を縫い付けた。また比較のために、人差し指に沿うように曲げセンサ (Spectrasymbol 社、FLEX SENSOR, 4.419 インチ) を手袋に糸を用いて縫い付けた。さらにカメラを用いて各指の関節位置を推定するために各関節 (指頭、遠位指節間関節: DIP, 近位指節間関節: PIP, 中手指節間関節: MP, 手根中手関節: CM) に、カラーマーカとして色の異なる LED を面ファスナを用いて貼り付けた。

次に図 8 に示す実験治具について説明する。図 8

の実験治具は、カメラおよび手の位置を固定するための台座、ならびに台座の周囲の光を遮断するための黒色の紙製の箱から成る。

実験協力者には右手に手袋を装着し、実験治具に手を固定した状態にて、指を自然に曲げる動作を 10 回ずつ行ってもらった。その際、人差し指の先端が手のひらに接触しないよう指示した。また、(1) PIP のみ、(2) MP のみ、(3) 指全体、の曲げ動作を行ってもらった。指を曲げる際はゆっくり行うように指示した。さらに、指を曲げている間カラーマーカを隠さないように指示した。各動作ごとに分圧回路およびマイコン (Arduino 社、Arduino Nano) を用いて導電繊維ならびに曲げセンサの抵抗値を計測し、シリアル通信にて PC に送信した。併せてカメラ (Logicool 社、HD Pro Webcam C920, 640 × 480 px, 60 fps) の映像から図 9 のようにカラーマーカの重心位置ならびに各関節の角度を推定した。指の各関節角度推定にゴニオメータ等の角度を計測するための計器ではなくカメラを用いたのは、リアルタイムに指の関節角度を変化させた際の抵抗値の変化を計測することにより、3.1 項にて述べた指の曲げははじめならびに終わり時に一時的に抵抗値が上昇するなど、過渡的な応答も併せて評価するためである。

実験協力者ごとの、PIP のみを曲げた際、MP のみを曲げた際ならびに指全体を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値の散布図を図 10、図 11、図 12 に示す。これらの散布図において赤色の実線は近似直線である。なお導電繊維および曲げセンサの両方にて、同じ抵抗値の際に指の角度が分散しているのは、カメラに映るカラーマーカである LED の形状が、角度によって変わることにより重心位置がぶれたためである。

4.1.2 結果および考察

これらの散布図より、指を曲げた際に導電繊維の抵抗値が減少していることから、提案手法にて指の曲げ具合を推定可能であることがわかる。また、指を曲げた際に曲げセンサは抵抗値が上昇しているのに対し、導電繊維は抵抗値が減少していることがわかる。

図 10 ならびに図 11 より、全ての実験協力者の近似曲線の傾きは PIP のみを曲げた際の方が大きい。こ

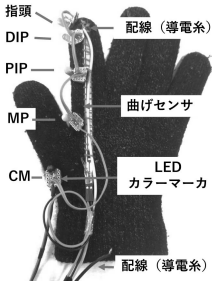


図 7 実験用手袋

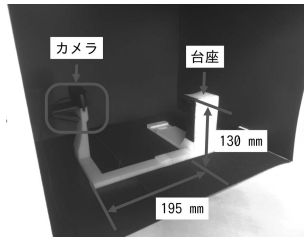


図 8 実験に用いた台座および箱

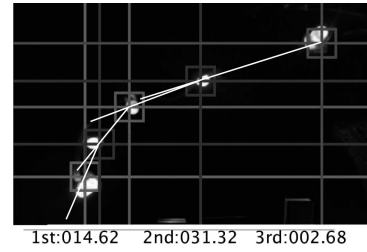


図 9 カラーマーカによる関節角度推定画面

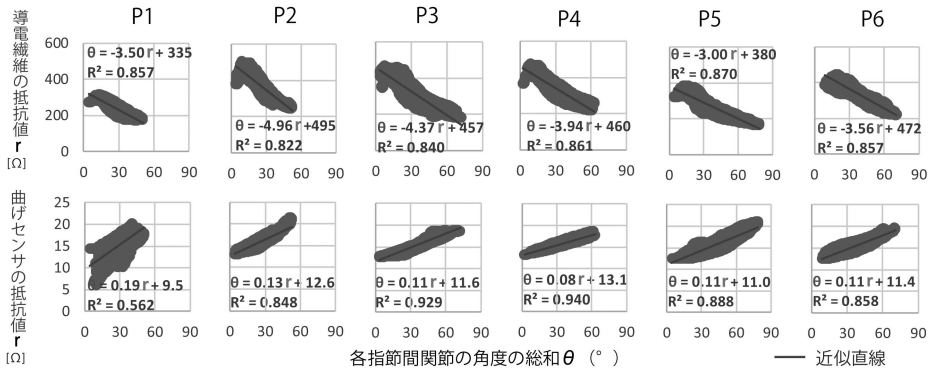


図 10 PIP のみ指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

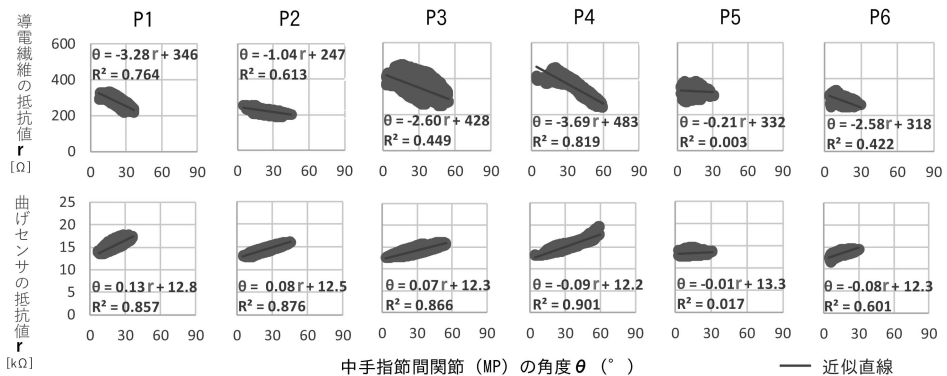


図 11 MP のみ指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

れは図 13 に示すように、MP の場合は指を曲げた際に短絡される部位が手のひら側の一部のみであるのに対し、PIP の場合は関節部全体が短絡されるため、抵抗値変化が大きくなったと考えられる。本実験において、DIP のみ曲げることは難しいため評価を行っ

ていないが、DIP においても PIP と同様のことが言えると考えられる。そのため、提案手法は特に DIP および PIP の曲げ具合を推定していると言える。

図 12 の結果から、指全体の指の各関節の角度と導電繊維の抵抗値の関係は、どの実験協力者も決定係数

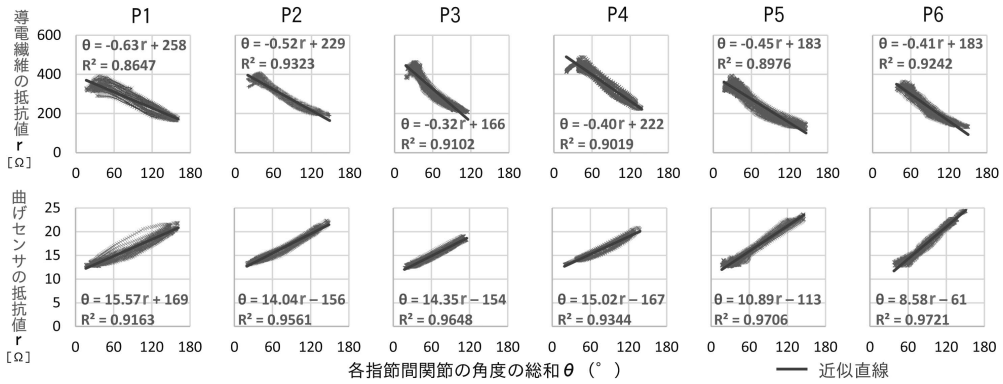


図 12 指全体を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

が $R^2 > 0.8$ であるため、線形性があると言える。しかし、ユーザごとに近似直線の傾きや切片が異なっているため、ユーザごとにキャリブレーションが必要であると考えられる。

図 12 より、実験協力者ごとに導電繊維の抵抗値を入力とし各指節関節の角度の総和を推定する際の標準誤差を、回帰分析により求めた。その結果、P1: 16.10°, P2: 9.62°, P3: 8.18°, P4: 9.74°, P5: 11.90°, P6: 7.96° となった。また、曲げセンサを入力として各指節関節の角度の総和を推定した際の標準誤差を同様に求めた。その結果、P1: 12.73°, P2: 7.75°, P3: 5.12°, P4: 7.94°, P5: 6.37°, P6: 4.83° となった。これらの結果より、提案手法は曲げセンサに比べて、平均 3.13° (SD=1.24°) 推定の際の誤差が大きいことがわかる。これは提案手法において指を曲げた際に布のずれやたわみ方の変化によって導電繊維の短絡箇所的位置や短絡する面積が変わるためと考えられる。この問題を解決するために、一様に導電性を持った導電布等を手袋に用いることにより導電繊維同士の短絡の仕方の変化を減らす手法が考えられる。

4.2 実験 2：片手における指同士の接触推定手法の評価

指同士の接触を交流信号の伝搬を用いて推定する手法の精度を評価する実験を行った。研究室内の実験 1 とは異なる大学生および大学院生 6 名 (22-25 歳, 平均年齢 23.3 歳, 男性, 全員が右利き) を実験協力者として実験を行った。また各実験協力者の手長は平均

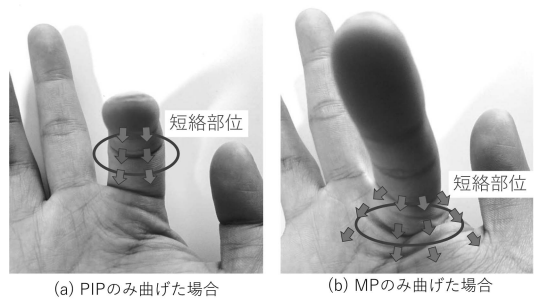


図 13 指を曲げた場合に短絡する部位

17.84 cm (SD=1.34) であった。

4.2.1 実験設計

実験には図 4 の回路および手袋を用いた。回路はシリアル接続にて PC (VAIO Z VJZ131A11N, OS: Windows 10 Pro, CPU: i7-5557U, RAM: 16GB) に接続した。この PC 上にて入力信号の FFT (ウィンドウサイズ 128, 得られる周波数範囲 0-125 Hz, 分解能 0.975 Hz) を行い、結果のデータから印加した信号に対応する周波数のパワーのみを入力とした機械学習を用いて接触位置推定を行った。機械学習には LIBSVM [6] を用いた。

実験協力者は図 4 の手袋を右手に装着してもらった。その後、実験協力者は実験者が指示した、各関節の手のひら側に親指を用いて接触してもらった (実験者に指示されてから、その動作が完了するまでを 1 試行とする)。その際、実験者は PC 画面に映された波形を確認し、指を接触している際に指を離れた状

態と同じ波形である場合は手袋の導電繊維同士の接触がうまくいっていないため、一度親指を離してから再度親指を接触してもらった。また、人差し指-小指の4指の間は開いた状態にて行ってもらった。人差し指-小指の4指の順に、それぞれ指の先端から根本に向けて3箇所指骨を順に親指で接触してもらった。その後、手のひらに親指で接触した後、最後に手を開いてもらった。これらの計14回の試行を1セッションとする。

はじめに2セッション行い、学習データを作成した。この時、1試行あたり、周波数スペクトルを5回記録した。この合計2セッション×14試行×5回=140回分の学習データを用いて推定モデルを生成した。その後、評価のために5セッション行った。この時各試行において、実験協力者が指を接触してから、応答波形が安定するまで待ち(約1秒)、接触位置推定を行い、推定された部位の記録を行った。結果として、6名×5セッション×14試行=420試行分の接触位置推定を行った。

4.2.2 結果および考察

表1に推定結果の混同行列を示す。接触した位置の推定精度は平均80.5%であった。また触れた指の推定のみ限定すると、人差し指が96.7%、中指が97.8%、薬指が90.9%、小指が91.1%の精度(平均93.9%)にて推定できた。

表1の誤推定の内訳は、同じ指における指骨同士の誤推定の合計が56.8%、応答波形の振幅が低くなる基節骨、手のひら、非接触間の誤推定の合計が35.1%、指の末節骨および中節骨と非接触などその他の誤推定の合計が8.1%であった。このことから、指に印加する交流信号の振幅をさらに増幅することにより、SN比が向上し、推定率を向上させることができると考える。また他の指との間の誤推定が0%であった。このことから、印加する周波数が適切だったことがわかる。

4.3 実験3：両手における指同士の接触推定手法の観測

電源が独立した手袋同士が接触した際に、片方の手袋の信号の伝搬をもう一方の手袋を用いて推定可能かどうかを調査した。

まず、ファンクションジェネレータ(Digilent社、Analog Discovery)を用いて、著者1名の右手に装着した手袋の人差し指に10kHz、中指に20kHzの交流信号を印加した。また左手の手袋の人差し指の先端にオシロスコープ(RIGOL TECHNOLOGIES INC., DS1054)のプロープを装着した。この時、オシロスコープと電源を独立させるために、ファンクションジェネレータの電源をバッテリー駆動のノートPCから供給した。この状態にて両手の指を接触させた際の応答波形を図14に示す。

図14(a)は右手の人差し指と左手の人差し指の末節骨同士を接触させた際の応答波形である。応答波形の周波数スペクトルにおいて10kHzのパワーが高くなっていることから、右手の人差し指の交流信号が左手に伝搬していることがわかる。次に、図14(b)のように右手の人差し指を、左手の人差し指に接触させたまま末節骨から基節骨に向かって動かしたところ、10kHzのパワーが減少した。最後に、図14(c)のように右手の中指と左手の人差し指の末節骨同士を接触させたところ、20kHzのパワーが上昇した。

以上の結果より、手同士の接触ならびに接触している指の推定ができることがわかる。また4.2項と同様に指の接触位置が推定できることがわかる。

5 議論

5.1 データグローブの製作

3.1節にて述べた指の曲げ推定手法を利用したデータグローブ(図15)を製作した。重量は手袋+配線のみで25.8g、回路やバッテリー込みで66.0gである。本データグローブを2015年3月より運用しているが断線等は起きていない。本データグローブの回路部分を取り外し、洗濯機を用いて3回洗濯したところ、問題なく指の曲げの推定が可能であることがわかった。

5.2 一時的な抵抗値の上昇について

図12より、指の曲げ角の総和が0-10°付近では抵抗値が上昇し、その後減少することがわかる。今後、この現象を用いて指の曲げ動作の開始および終了時点の検出に利用できる可能性がある。

表 1 指同士の接触位置推定結果の混同行列

| | | 推定された部位 | | | | | | | | | | | 手のひら | 非接触 | | |
|-----------|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 人差し指 | | | 中指 | | | 薬指 | | | 小指 | | | | | |
| | | 末節 | 中節 | 基節 | 末節 | 中節 | 基節 | 末節 | 中節 | 基節 | 末節 | 中節 | 基節 | | | |
| 親指が接触した部位 | 人差し指 | 末節 | 86.67% | 10.00% | 3.33% | | | | | | | | | | | |
| | | 中節 | 10.00% | 83.33% | 6.67% | | | | | | | | | | | |
| | | 基節 | | 13.33% | 76.67% | | | | | | | 3.33% | | | 6.67% | |
| | 中指 | 末節 | | | | 73.33% | 23.33% | 3.33% | | | | | | | | |
| | | 中節 | | | | 6.67% | 93.33% | | | | | | | | | |
| | | 基節 | | | | | | 93.33% | | | | | | | | 6.67% |
| | 薬指 | 末節 | | | | | | 96.67% | | 3.33% | | | | | | |
| | | 中節 | | | | | | 10.00% | 90.00% | | | | | | | |
| | | 基節 | | | 3.33% | | | | 3.33% | 66.67% | | | | 20.00% | | 6.67% |
| | 小指 | 末節 | | | | | | | | | 83.33% | 6.67% | | | 10.00% | |
| | | 中節 | | | | | | | | | 30.00% | 60.00% | 10.00% | | 10.00% | |
| | | 基節 | | | | | | | | 3.33% | | 10.00% | 73.33% | | 10.00% | 3.33% |
| 手のひら | | | | | | | | | | | | | 6.67% | 16.67% | 66.67% | 10.00% |
| 非接触 | | | | | | | | | | | | | | | 16.67% | 83.33% |

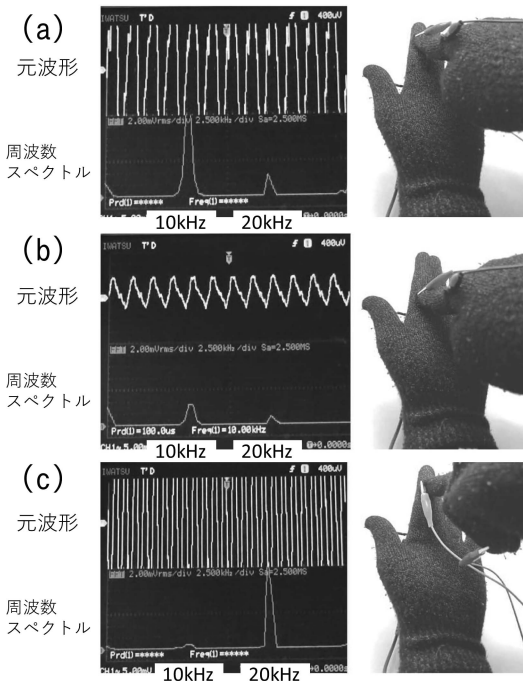


図 14 両手の指が接触した際の応答波形 (右手の人差し指に 10 kHz, 中指に 20 kHz の信号を印加)

5.3 人体への影響

手袋に電流を流すことによる人体への影響について述べる。図 4 に示した本研究の回路にて、各指もしくは手形状によって異なるものの、最大電圧 3.3V の信号が導電繊維に印加される。この時、導電繊維上では最大 120 mA 程度の電流が流れることがあるが、手の抵抗値は導電繊維よりも高く感電することはない。さらに手首が回路のグラウンドに設置されている



図 15 指の曲げ推定用データグローブ

ため、手以外に電流が流れることはない。また、著者が手袋を装着したまま手袋を水道水で濡らし、抵抗値を十分に下げた状態にて人差し指の先端から手首へ電流を流した場合でも感電しないことを確認した。

5.4 把持物体認識

4.3 項にて示したように、GROVE を用いることにより電氣的に独立した物体に交流信号を流すことにより、接触ならびに接触した位置を認識できる。これを例えば図 16 左のように竹刀の持ち手に交流信号を流したり、物体表面の部位ごとに固有の周波数の交流信号を流すことにより、ユーザが把持した物体および把持している位置を認識できる。そのためスポーツ選手の把持物体の握り方の推移等の動作分析に利用することができる。

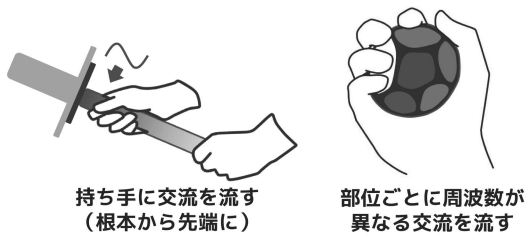


図 16 GROVE を利用した把持物体認識

また、提案手法は手袋に編み込まれた導電繊維が表面に露出していることを利用している。そのため、例えば手袋を装着したまま導電性の物体を把持した場合、把持物体を介して電流の経路が短絡するため、提案手法の計測回路は導電性物体表面の抵抗値を計測することになり、手形状の認識を行うことができない。しかし、導電物体に逐次的に周波数が変化する掃引信号を印加することにより周波数特性を計測し、物体への把持状態等を認識する技術がある[22]。提案手法においても同様に掃引信号を印加することにより、手を用いて触れた物体の周波数特性等から、非電源の導電物体の把持状態を認識できる可能性がある。

5.5 ユーザごとの手形状の違いについて

実験 1 において抵抗値変化は、実験協力者ごとに異なった。これは、実験協力者の手のサイズや手袋の装着の具合によるものと考えられる。本実験においては実験条件を統一するために同サイズの手袋を使用した。実際にはユーザーの手のサイズに合わせた手袋を使用する必要があると考えられる。また、ユーザーごとにキャリブレーションすることにより、この影響を打ち消すことが必須である。

6 アプリケーション例

提案手法は指の曲げ具合、指同士の接触ならびに接触位置といった手形状の推定が可能である。例えば VR ゴーグルを装着する没入型コンテンツにおいて、VR 空間上に存在するオブジェクトを手の指の開閉により把持することにより選択することができる。また、指同士の接触位置推定を用いて指の各指骨をテンキーに見立てた文字入力を行うことにより、オブジェ

クトにラベル付けをするといった操作を行うことができる。

7 まとめ

手袋に編み込まれた導電繊維を用いて手形状を認識する手法である GROVE を示した。手形状のうち、指の曲げ推定には導電繊維の抵抗値の変化を用い、指同士の接触推定には各指ごとに異なる周波数の交流信号を流し、指同士が接触した際に信号が伝搬する現象を用いる。

GROVE において、導電繊維の抵抗値の変化特性を比較するために、曲げセンサの抵抗値ならびにカメラを用いて推定した関節角度を用いて評価した。その結果、導電繊維を用いることにより、指の曲げ度合を推定可能であることがわかった。

また GROVE の指の接触推定手法にて、人指し指-小指の 4 指ごとの 3 箇所の指骨の内、どの指骨に接触したか機械学習を用いて推定した際の精度を評価した。その結果、平均 80.5% の精度にて推定できた。また、どの指に接触したかという推定に限定した場合は平均 93.9% の精度にて推定できた。さらに電源的に独立した手袋同士の接触についても検証し、信号が伝搬されることを確認した。

今後は、マーカを用いたモーションキャプチャによる手形状推定手法と提案手法の比較を行う。また提案手法を用いたデータグローブを長時間装着した際の影響について調査する。

謝辞

本研究は未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 5DT: Virtual Reality Hardware. <http://www.5dt.com/vr-hardware/>(2018 年 5 月 14 日閲覧).
- [2] Aoyama, S., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Thumb-Slide: An Interaction Technique for Smartwatches using a Thumb Slide Movement, *Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 2403-2409.
- [3] Bhattacharya, S., Khan, S., Sil, T., Bepari, B. and Bhaumik, S.: IPMC Based Data Glove for Fin-

- ger Motion Capturing, *Proc. of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, AIR '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 51:1–51:6.
- [4] CaptoGlove LLC.: CaptoGlove. <https://www.captoglove.com/> (2018年5月14日閱覽).
- [5] Chan, L., Chen, Y.-L., Hsieh, C.-H., Liang, R.-H. and Chen, B.-Y.: CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-Aware Interactions Through a Fisheye Ring, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 549–556.
- [6] Chang, C.-C. and Lin, C.-J.: LIBSVM: A Library for Support Vector Machines, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3(2011), pp. 27:1–27:27.
- [7] Dementyev, A. and Paradiso, J. A.: WristFlex: Low-Power Gesture Input with Wrist-Worn Pressure Sensors, *Proc. of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 161–166.
- [8] Dipietro, L., Sabatini, A. M. and Dario, P.: Evaluation of an Instrumented Glove for Hand-Movement Acquisition, *Journal of rehabilitation research and development*, Vol. 40, No. 2(2003), pp. 179–189.
- [9] Dipietro, L., Sabatini, A. M. and Dario, P.: A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications, *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, Vol. 38, No. 4(2008), pp. 461–482.
- [10] Gioberto, G., Coughlin, J., Bibeau, K. and Dunne, L. E.: Detecting Bends and Fabric Folds Using Stitched Sensors, *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 53–56.
- [11] Harrison, C., Benko, H., and Andrew D, W.: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere, *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, New York, NY, USA, ACM, 2011, pp. 441–450.
- [12] Heller, F., Ivanov, S., Wacharamanatham, C. and Borchers, J.: FabriTouch: Exploring Flexible Touch Input on Textiles, *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 59–62.
- [13] Hrabia, C.-E., Wolf, K. and Wilhelm, M.: Whole Hand Modeling using 8 Wearable Sensors: Biomechanics for Hand Pose Prediction, *Proc. of the 4th Augmented Human International Conference*, AH '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 21–28.
- [14] Kim, D., Hilliges, O., Izadi, S., Butler, A. D., Chen, J., Oikonomidis, I. and Olivier, P.: Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-Worn Gloveless Sensor, *Proc. of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 167–176.
- [15] Kim, J., Mastnik, S. and André, E.: EMG-Based Hand Gesture Recognition for Realtime Biosignal Interfacing, *Proc. of the 13th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '08, New York, NY, USA, ACM, 2008, pp. 30–39.
- [16] King, R. C., Atallah, L., Darzi, A. and Yang, G. Z.: An HMM Framework for Optimal Sensor Selection with Applications to BSN Sensor Glove Design, *Proc. of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, EmNets '07, New York, NY, USA, ACM, 2007, pp. 58–62.
- [17] Laput, G., Xiao, R. and Harrison, C.: ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 321–333.
- [18] Leap Motion Inc.: Leap Motion. <https://www.leapmotion.com/> (2018年5月14日閱覽).
- [19] Miller, S., Smith, A., Bahram, S. and Amant, R. S.: A Glove for Tapping and Discrete 1D/2D Input, *Proc. of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 101–104.
- [20] Niikura, T., Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: Anywhere Surface Touch: Utilizing Any Surface as an Input Area, *Proc. of the 5th Augmented Human International Conference*, AH '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 39:1–39:8.
- [21] Peshock, A., Duvall, J. and Dunne, L. E.: Argot: A Wearable One-Handed Keyboard Glove, *Proc. of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program*, ISWC '14 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 87–92.
- [22] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 483–492.
- [23] Schneegass, S. and Voit, A.: GestureSleeve: Using Touch Sensitive Fabrics for Gestural Input on the Forearm for Controlling Smartwatches, *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 108–115.
- [24] Tamaki, E., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Brainy Hand: An Ear-Worn Hand Gesture Interaction Device, *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, New York, NY, USA, ACM, 2009, pp. 4255–4260.
- [25] Tang, A., Lu, K., Wang, Y., Huang, J. and Li, H.: A Real-Time Hand Posture Recognition System Using Deep Neural Networks, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 6,

No. 2(2015), pp. 21:1–21:23.

- [26] Thalmic Labs Inc: Myo Gesture Control Armband. <https://www.myo.com/>(2018年5月14日閲覧).
- [27] Yoon, S. H., Huo, K. and Ramani, K.: Plex: Finger-worn Textile Sensor for Mobile Interaction During Activities, *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, UbiComp '14 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 191–194.
- [28] Zhang, Y. and Harrison, C.: Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition, *Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 167–173.
- [29] 高田峻介: GROVE: 導電繊維を用いた安価なデータグローブの開発, *インタラクション 2015 論文集*, 情報処理学会, 2015, pp. 944–945.
- [30] 高田峻介, 志築文太郎, 高橋伸: 導電繊維編み込み手袋を用いた指の曲げ計測手法, *研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)*, Vol. 2017-HCI-171, No. 25, 情報処理学会, 2017, 6 pages.



高田 峻介

1993年生。2015年神戸市立工業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻修了。筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士後期課程在学中。ヒューマンインタフェースに興味を持ち、現在はセンシング技術とその活用に関する研究を行う。ACM, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各学生会員。2015年度ヒューマ

ンインタフェース学会学術奨励賞, 2016年度情報処理学会 HCI 研究会貢献賞, 2017年度情報処理学会山下記念研究賞など受賞。2017年度未踏スーパークリエイター。



志築文太郎

1971年生。1994年東京工業大学理学部情報学科卒業。2000年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学。博士(理学)。現在、筑波大学大学院システム情報系准教授。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE Computer Society, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



高橋 伸

1991年東京大学理学部情報科学科卒業。1993年同大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。1995年同博士課程中退。博士(理学)。1995年東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻助手。2004年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻講師。現在、同大学システム情報系准教授。ユーザインタフェース・ユビキタスコンピューティングに興味を持つ。ACM, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。