GROVE：導電繊維編み込み手袋を用いた手形状計測手法

高田 崚介 * 志築 文太郎 † 高橋 伸 †

概要. 導電繊維が編み込まれた手袋を用いて手形状を計測する手法を示す．我々は，手形状として指の曲げおよび指同士の接触の計測を行った．本手法にて，指の曲げ計測には導電繊維の抵抗値の変化を用いる．また，指同士の接触計測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．我々は評価実験により，指の関節の角度と導電繊維の抵抗値の関係を調査した．さらに導電繊維の抵抗値と曲げセンサの抵抗値の比較を行った．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 4 指のどの節に親指が接触したか，機械学習を用いて認識し，その認識精度を実験により評価した．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，信号が伝播されることを確認した．

1 はじめに

手の形状や動きをリアルタイムに計測できれば，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．従来，この手形状計測には，主にセンサを搭載した手袋（データグローブ）[3]，カメラ [7]，ならびに筋電位 [13] が用いられてきた．データグローブは，カメラを用いた手形状計測手法に比べて，設置場所や，オクルージョンの問題を持たず，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計測できる．しかし，手袋に複数のセンサを搭載する必要があるため，重い，指の運動の阻害，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計測手法である「GROVE」を開発している [14, 15]．指の曲げ計測には，指を曲げた際に導電繊維同士が手袋表面にて接触し，短絡することによって抵抗値が減少する性質を用いる．今回，我々は複数の交流信号の伝搬を用いて，指同士の接触および接触位置を計測するという拡張を行った．また，この導電繊維の抵抗値変化の特性を評価するために本手法および曲げセンサを用いた抵抗値変化の比較，ならびに指同士の接触位置の計測精度の評価を行ったため，本稿にて報告する．

2 関連研究

従来から様々な手形状計測手法が開発されてきた．

Copyright is held by the author(s).

* 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
† 筑波大学システム情報系

2.1 カメラを用いた手形状計測

カメラを用いた手形状計測手法はユーザが何も装着せずに手形状計測を行える点において魅力的である．Leap Motion [7] は 2 台の赤外線カメラおよび赤外線照射 LED を用いて手形状の計測を行っている．ただしこの手法には，カメラに手が映るように設置する必要があるため，外出先にて利用する際，肩や耳にカメラを設置する必要がある [5, 12]．

また，身体に装着したカメラを用いる手法も提案されている．Digits [6] は手首に装着したカメラを用いて，手形状を計測する手法である．Niikura らの手法 [9] も手首に装着したカメラに映る指形状を計測している．ただし，カメラを用いた手法全般には，手が障害物に隠れると計測できないオクルージョンの問題がある．データグローブの場合，これらの問題が起こらず，外出先でも容易に利用可能である．

2.2 データグローブのための手形状計測

データグローブを用いた指の曲げ計測を行う手法には，ひずみゲージ方式 [3]，圧電素子方式 [2]，光ファイバ方式 [1] などがある．本手法は，導電繊維の抵抗値変化を用いている点において，ひずみゲージ方式に似ているが，導体の引張による抵抗値変化の計測ではなく，手袋表面の繊維同士の短絡による抵抗値変化を用いている点において異なる．

電気的接点を搭載したデータグローブを用いて親指が他の指のどの節に触れたかを計測する手法がある [8, 10]． 本手法は同様の接触の認識に，交流信号の伝搬を用いて行っている点で異なる．また本手法は接触の認識に加えて指の曲げの計測を行える．

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のふたつを計測できる手形状計測手法である．本手法の原理を示す．

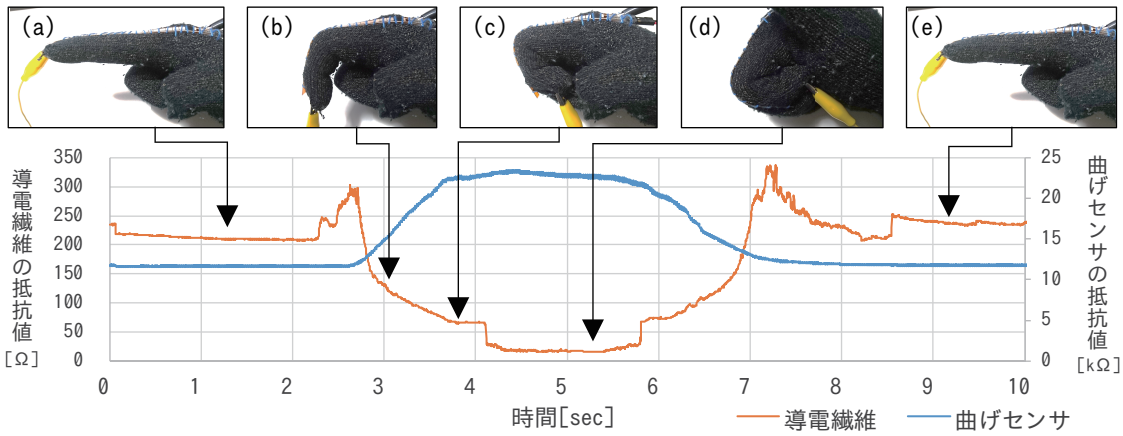


図 1. 指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

3.1 導電繊維を用いた指の曲げ計測

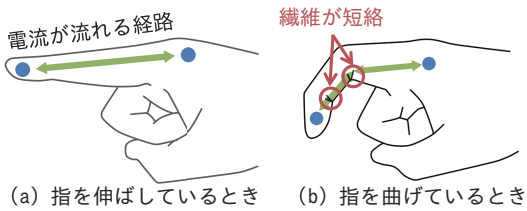


図 2. 指の曲げ計測の原理

導電繊維を用いた指の曲げ計測手法の原理を述べる．手袋を装着したまま指を曲げた際の，導電繊維および比較用に手袋に搭載したひずみゲージ方式の曲げセンサの抵抗値変化を図 1 に示す．図 1 上部の写真 a–e はグラフの各点における指の姿勢を示す．図 1 にて，指を曲げた際に曲げセンサは抵抗値が増加し，導電繊維は抵抗値が減少している．これは，図 2b に示す様に，指を曲げた際に関節部にて，手袋表面の導電繊維同士が接触し，電流が流れる経路が短くなるためである．また図 1c の様に指を曲げた際に前後の波形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平と接触し，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 1a → 図 1b）および曲げた状態から伸ばした場合（図 1d → 図 1e）において，一時的に抵抗値が高くなる．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部における短絡の程度の変化が少なく，指の背側の電流の経路が伸びることによる抵抗値変化の影響の方が大きいためである．この抵抗値の上昇について調べるため，手袋の指の部分を引っ張ったところ，抵抗値が上昇することを確認した．

3.2 指同士の接触の計測

指同士の接触の計測手法を述べる．GROVE では，図 3a 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．このとき指同士が接触すると，図 3b 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フーリエ解析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計測できる．

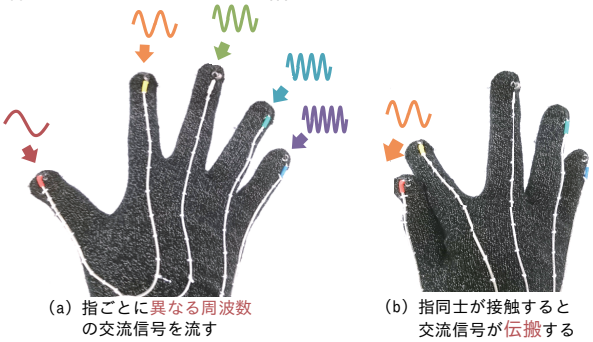


図 3. 指同士の接触計測の原理

図 4 に GROVE における手形状計測用回路を示す．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モジュール，信号増幅用のオペアンプ，指の曲げ計測用の分圧回路，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がセンサ値を PC へ送信する頻度が 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 5 に示す．図 5(a) のように手を開いて，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る．図 5(b) のように親指と人差し指の末節を接触させると，人差し指の 35 Hz のパワーが増加した．次に図 5(c) のように人差し指の中節部に接触させると m図 5(b) より

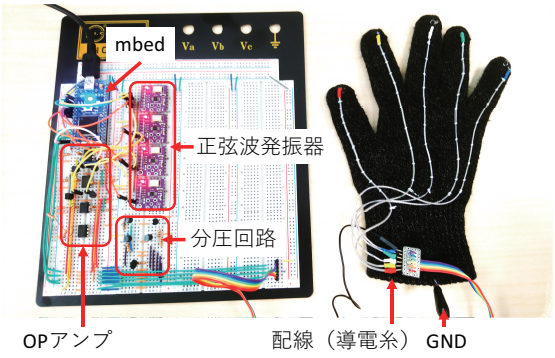


図 4. 手形状計測用回路

も 35 Hz のパワーが減少した．また図 5(d) のように小指の末節に接触させると 110 Hz のパワーが増加した．これらのことから，指の接触位置によって変化する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計測可能であることがわかる．

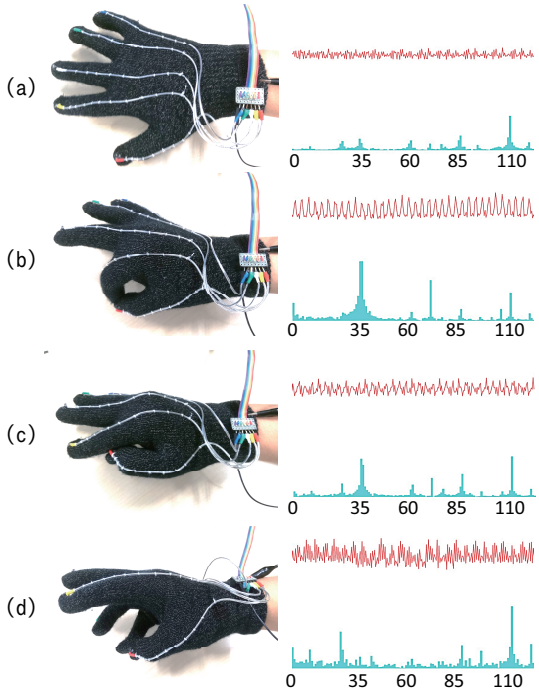


図 5. 指同士が接触した際の応答波形（赤線）および周波数スペクトル（青線）

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可することにより，両手の接触や，複数のユーザの手同士が握手等によって接触したかどうかを計測できることを示唆している．

4 実験

本手法における指の曲げおよび指同士の接触計測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 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 指の曲げ計測手法の評価

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 23.17 歳，男性，右利き）を実験協力者とした．

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との比較を行うために，図 6 示す手袋および図 7 に示す実験治具を製作した．

図 6 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計測するために各関節（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 を面ファスナーを用いて貼り付けた．

次に図 7 に示す実験治具について説明する．図 7 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図 6 の手袋を装着し，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 回ずつ行うよう依頼した．その際，人差し指の先端が手の平に接触しないよう指示した．また，指の曲げ動作を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．各動作毎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 Web カメラ（Logicool 社，HD Pro Webcam C920）を用いて，カメラの映像から図 8 のようにカラーマーカの重心位置の計測ならびに各関節の角度の計測を行った．

4.1.2 結果および考察

各被験者ごとの，指を曲げた際の導電繊維ならびに曲げセンサの抵抗値の散布図を図 9 に示す．図 9 の散布図において赤色の実線は近似直線を示している．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角度が散布しているのは，カラーマーカである LED が角度によってカメラに映る形状が変わることにより，重心位置がぶれたためである．

これらの散布図より，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

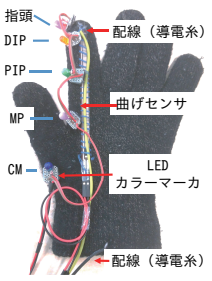


図 6. 実験用手袋

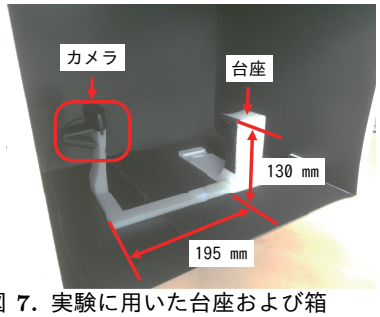


図 7. 実験に用いた台座および箱

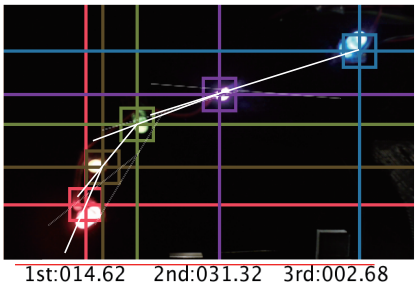


図 8. カラーマーカによる関節角度計測画面

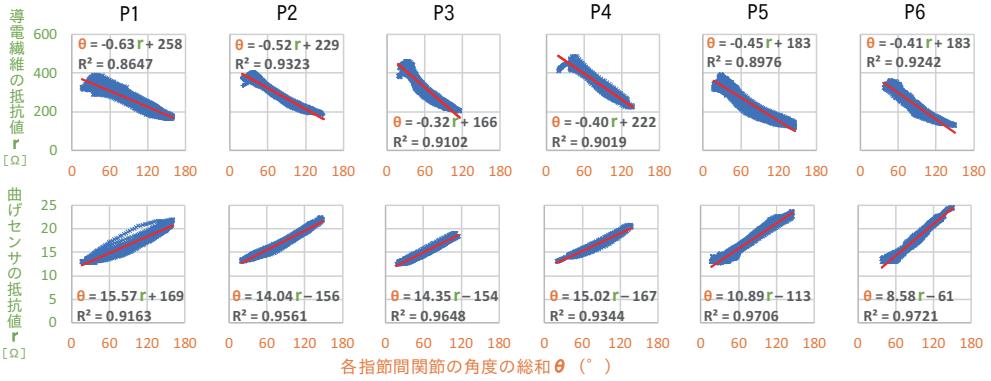


図 9. 指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

値が減少していることがわかる．以上の結果より，導電繊維を用いることにより，指の曲げ度合を計測可能であることがわかる．

また図 9 より，導電繊維は指を曲げ始めた際に，一度抵抗値が上昇していることがわかる．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．

4.2 片手における指同士の接触計測手法の評価

指同士の接触を交流信号の伝播を用いて計測する手法の精度を評価する実験を行った．前節と同じ，研究室内の大学生および大学院生 6 名を実験協力者として実験を行った．

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，PC 上にて入力信号の高速フーリエ変換（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，結果のデータを入力とした機械学習を用いて接触位置認識を行った．機械学習には LIBSVM [4] を用いた．

実験協力者は図 4 の手袋を右手に装着した．実験協力者は実験者に指示された，各関節の手の平側に親指を用いて接触した（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）．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 つの節を順に親指で接触した．その後，手のひらに親指で接触した後，最後に手を開いた．この計 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．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認識モデを生成した．

その後，評価のために 10 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），接触位置認識を行い，認識された部位の記録を行った．結果として，6 名 ×10 セッション ×14 試行 = 840 試行分の接触位置認識を行った．

4.2.2 結果および考察

表 1 に認識結果の混同行列を示す．接触した位置の認識精度は平均 75.00%であった．また触れた指の認識のみに限定すると，人差し指が 95.66%，中指が 94.44%，薬指が 94.44%，小指が 84.44%の精度（平均 92.22%）にて認識できた．

表 1 の誤認識の内訳は，同じ指における節同士の誤認識の合計が 55.71%，応答波形の振幅が低くなる基節，手のひら，非接触間の誤認識の合計が 40.95%，他の指との誤認識の合計が 0.48%，指の末節および中節と非接触などその他の誤認識の合計が 2.85%であった．このことから，指に印加する交流信号の振幅を増幅することにより，SN 比が向上し，認識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認識が少ないことから，印加する周波数が適切だったことがわかる．

表 1. 各指の節に接触時における認識結果の混同行列

触れた部位		認識された部位 人差し指 末節	人差し指 中節	人差し指 基節	中指 末節	中指 中節	中指 基節	薬指 末節	薬指 中節	薬指 基節	小指 末節	小指 中節	小指 基節	手のひら	非接触
人差し指	末節	91.67%	8.33%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中節	3.33%	93.33%	1.67%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67%
	基節	0.00	8.33%	81.67%	0.00	0.00	3.33%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67%	0.00
中指	末節	0.00	0.00	0.00	81.67%	15.00%	1.67%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67%
	中節	0.00	0.00	0.00	0.00	96.67%	3.33%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	基節	0.00	0.00	15.00%	0.00	18.33%	61.67%	0.00	0.00	1.67%	0.00	0.00	0.00	3.33%	0.00
薬指	末節	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.67%	15.00%	3.33%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中節	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67%	91.67%	6.67%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	基節	0.00	0.00	3.33%	0.00	0.00	5.00%	0.00	8.33%	73.33%	0.00	0.00	1.67%	6.67%	1.67%
小指	末節	0.00	0.00	1.67%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00%	43.33%	1.67%	1.67%	1.67%
	中節	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.33%	80.00%	13.33%	3.33%	0.00
	基節	0.00	0.00	1.67%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67%	0.00	10.00%	53.33%	28.33%	0.00
手のひら		0.00	0.00	8.33%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.33%	0.00	0.00	46.67%	41.67%
非接触		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00%	95.00%

4.3 両手における指同士の接触計測手法の観測

電源が独立した 2 枚の手袋が接触した際に，片方の手袋の信号の伝搬をもう一方の手袋を用いて計測可能かどうかを調査した．

まず，Digilent 社の Analog Discovery を用いて右手の手袋の人差し指に 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のプローブを装着した．この時，オシロスコープと電源を独立させるために，Analog Discovery をバッテリ駆動のノート PC に接続した．この状態にて両手の指を接触した際の応答波形の観測を行った．結果を図 10 に示す．

図 10a は右手の中指と左手の人差し指の末節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より 20kHz のパワーが高くなっていることから，右手の中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 10b のように右手の人差し指と左手の人差し指の末節同士を接触させたところ，10kHz のスペクトルが上昇した．最後に，図 10c 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基節から末節に向かって動かしたところ，10kHz のスペクトルが減少した．

観測結果より，手同士の接触ならびに接触している指の認識ができることがわかる．また 4.2 節と同様に指の接触位置が計測できることがわかる．

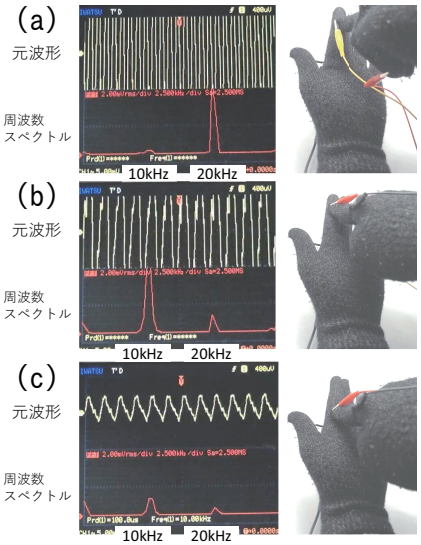


図 10. 両手の指が接触した際の応答波形（右手の人差し指に 10kHz，中指に 20kHz の信号を印加）

5 応用例

5.1 電話

外出先にて，ハンズフリーヘッドセットを利用している際に電話をかけたい場合がある．この場合にて GROVE を用いたデータグローブを装着している場合，3.2 節にて述べた指の接触および接触位置計測により，指の節を押下することにより，節ごとに割り当てられた数字を入力することができる．その後，3.1 節にて述べた曲げ計測により手を握った状態から親指および小指のみを立てる「電話ジェスチャ」を用いて電話の発信を行うことができる．

5.2 把持物体認識

4.3 節にて示したように，GROVE を用いることにより電気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 11 のように竹刀のような柄もの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計測できる．そのためスポーツ選手の動作分析に利用することができる．

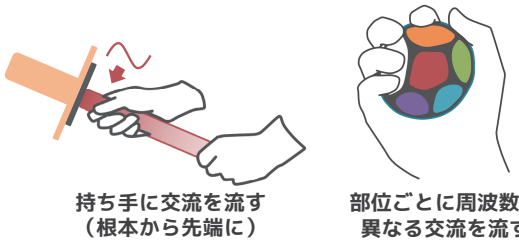


図 11. GROVE を利用した把持物体認識

6 議論

3.1 節にて述べた指の曲げ計測手法を利用したデータグローブを 2 基製作した．重量は手袋＋導線のみ

で 25.84g，回路やバッテリ込で 65.99g 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 2 回洗濯したところ，問題なく手形状の認識が可能であることが分かった．

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 [11]．本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．

4.2 節にて，直流成分を除いたパワースペクトルを学習データとして用いた．これは今回はプロトタイピングであるため，実装の簡易化のために行ったが，今後は各指ごとの周波数成分のパワーのみを学習データとして用いることにより認識精度が向上する可能性がある．

7 まとめ

本稿にて手袋に編み込まれた導電繊維を用いて手形状を計測する手法である GROVE を示した．手形状の内，指の曲げ計測には導電繊維の抵抗値の変化を用い，指同士の接触計測には各指ごと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および関節角度計測を用いて評価した．その結果，GROVE を用いた場合指を曲げると，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示された．

また GROVE の指の接触計測手法にて，人指し指–小指の 4 指のどの節に接触したか機械学習を用いて認識した際の精度を評価した．その結果，平均 75.00%の精度にて認識できた．また，どの指に接触したかという認識に限定した場合は平均 92.22%の精度にて認識できた．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，信号が伝播されることを確認した．

今後は，交流信号を印加する指を時分割にて切り替える，6 節の議論にて述べた掃引信号を用いる等により，高精度に指や他の手袋との接触を計測できるかどうか調査する．

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/`（2017 年 10 月 22 日閲覧）.

[2] S. Bhattacharya, S. Khan, T. Sil, B. Bepari, and S. Bhaumik. IPMC Based Data Glove for Finger Motion Capturing. In *Proc. of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, AIR '15, pp. 51:1–51:6, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[3] CaptoGlove LLC. CaptoGlove. `https://www.captoglove.com/`（2017 年 10 月 22 日閲覧）.

[4] C.-C. Chang and C.-J. Lin. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 2(3):27:1–27:27, May 2011.

[5] C. Harrison, H. Benko, and W. Andrew D. OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In *Proc. of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[6] D. Kim, O. Hilliges, S. Izadi, A. D. Butler, J. Chen, I. Oikonomidis, and P. Olivier. Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere using a Wrist-worn Gloveless Sensor. In *Proc. of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[7] Leap Motion Inc. Leap Motion. `https://www.leapmotion.com/`（2017 年 10 月 22 日閲覧）.

[8] S. Miller, A. Smith, S. Bahram, and R. S. Amant. A Glove for Tapping and Discrete 1D/2D Input. In *Proc. of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '12, pp. 101–104, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[9] T. Niikura, Y. Watanabe, and M. Ishikawa. Anywhere Surface Touch: Utilizing Any Surface as an Input Area. In *Proc. of the 5th Augmented Human International Conference*, AH '14, pp. 39:1–39:8, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[10] A. Peshock, J. Duvall, and L. E. Dunne. Argot: A Wearable One-handed Keyboard Glove. In *Proc. of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program*, ISWC '14 Adjunct, pp. 87–92, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[11] M. Sato, I. Poupyrev, and C. Harrison. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. In *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[12] E. Tamaki, T. Miyaki, and J. Rekimoto. Brainy Hand: An Ear-worn Hand Gesture Interaction Device. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pp. 4255–4260, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[13] Thalmic Labs Inc. Myo Gesture Control Armband. `https://www.myo.com/`（2017 年 10 月 22 日閲覧）.

[14] 高田 崚介. 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, インタラクション 2015, pp. 944–945. 情報処理学会, 2015.

[15] 高田 崚介. 導電繊維編み込み手袋を用いた指の曲げ計測手法. 情報処理学会（編）, 情報処理学会研究報告. HCI 研究会報告, p. 6. 情報処理学会, 2015.