

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：22303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11906

研究課題名（和文）能動義手制御のための触覚センシングシステムの開発研究

研究課題名（英文）Development of Haptic Sensing System for Control of Hand Protheses

研究代表者

王 鋒（Wang, Feng）

前橋工科大学・工学部・教授

研究者番号：80323046

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、事故や病気などの原因で上肢の一部を欠損している上肢切断者の生活の質を向上するために、上肢切断者に装着する電動義手を制御するための新たなヒューマン-マシン・インタフェースを開発したものである。

ポリフッ化ビニリデンPVDFを利用して触覚センサを開発し、2枚の触覚センサだけを利用して、使用者の前腕筋の収縮に伴い前腕表面の形状やテンション変化等の触覚性状信号を取得し、さらに機械学習を利用してこちらの触覚性状信号から使用者の6種類の運動意思をリアルタイム的に識別する方法を構築した。検証実験より本システムは新規使用者に対しても8割超の正解率でリアルタイム的な運動意思識別が可能と確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上肢切断者のQOLを向上するために、様々な義手は開発された。特に近年様々な高性能電動義手が開発され、巧みな動作の実現が可能となっている。しかしながら、国内に上肢切断者の約8割が電動義手の使用を希望しているにも関わらず、実際の普及率は1割未満で極めて低い。経済的などの原因以外に、義手使用者の運動意思の読み取りは、電動義手普及の技術的なボトルネックとなり、便利有効な方法は求められている。

本研究ではごく少数のセンサを利用することで複数種類の運動意図を識別でき、義手使用者の意思通り自由自在に電動義手を動作させることが期待でき、電動義手の普及におけるボトルネックを突破することが期待できる。

研究成果の概要（英文）： Aiming at improvement of the QoL of upper-extremity amputees, this study was about development of a new human-machine interface for the real-time control of a powered prosthetic hand.

In this study, a tactile sensor was first developed using Polyvinylidene Difluoride (PVDF) film to detect the tactile feature on human body surface. Two tactile sensors were used to detect the tactile feature on the forearm caused by intended hand motions. Machine learning was applied to classify hand motion intentions using detected tactile feature patterns. Motion intention classification methods were further compared and studied, and support vector machine was chosen for real-time classification of motion intention. The experimental results showed that average classification accuracy for the 6 types of motion was over 80% for experiment participants who were with simple training lasting for only minutes. This verified the efficacy of the proposed system.

研究分野：生体医工学

キーワード：ヒューマン-マシンイン・タフェース 義手 触覚 センシング 運動意思識別 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

事故や病気で上肢の一部を欠損している上肢切断者の QOL 向上に貢献するために、古くから装飾性義手、作業用義手、体内力源能動義手、体外力源能動義手といった様々な義手は開発された。その中、体外力源能動義手の一種である電動義手は、モータによって所望する動作を実現するため発揮可能な把持力が大きいという利点がある。特に近年ロボット技術の発展とともに、様々なロボットハンドのような高性能電動義手が開発され、巧妙な動作を実現することが可能となっている。

義手使用者の運動意思を読み取ることは電動義手を制御して動作させる第一歩である。現在使用されている電動義手のほとんどは、表面筋電位(筋電)を利用して運動意思を読み取り義手を制御するものである。そのため、筋電義手は電動義手の代名詞にもなっている。筋電義手の研究では、6 動作の実時間動作識別や、複合動作の識別、関節角推定が可能であることが報告されている。

しかしながら、2013 年の厚生労働省調査では上肢切断者は国内に 8 万人以上いると言われており、その 76.0%が電動義手の使用を希望しているにも関わらず、実際の普及率はわずか 2.30%に留まって極端に低い。

電動義手の普及率が極端に低い理由として、経済的な原因以外に、運動意思読み取りに利用する筋電は、筋電計測用の電極の装着に難しく手間がかかったり、皮膚表面の発汗による電極のインピーダンスの変化や、筋疲労による筋電の変化があるために長期的な使用に安定的な運動意思の読み取りが困難であったりすることが挙げられる。また、義肢装具士は義手使用者一人一人のための筋電計測・運動意思読み取りシステムの調整と、義手使用者は実際に使用できる前に長時間の練習などの必要があることが普及の課題となっている。

筋電の代わりに、他の生体信号を利用して運動意思の読み取り研究も行われてきた。例えば、上肢動作によって生じる皮膚表面の筋隆起変化に着目し、10 個程度のフォトフレクタによって手首や前腕の凹凸変化を計測し、手のジェスチャの識別や手関節角度の推定が報告されている。しかし、動作識別や関節角度推定のために多くのセンサが必要であることや、フォトフレクタの構造上センサが大きくなりやすいことが課題となる。

断端の筋の収縮に起きる筋音を検出して利用する方法や、義手ソケット内の圧力分布を利用する方法なども報告されている。これらの方法は、複数チャンネルの筋電センサ、加速度センサ、あるいは数十個の圧力センサを利用して、数種類の動作の識別が成功している。しかしながら、大量のセンサの使用によって、計測システムと識別システムが複雑化になっている。

近年、手術で使用者の神経に直接電極を接続し、使用者の神経信号を利用して運動意思を読み取る義手を制御する成果も報告されたが、侵襲的な方法で使用者の負担が大きいというデメリットがあって、実用までまだ遠い。

したがって、義手使用者の運動意思の読み取りは、電動義手使用の普及のボトルネックであり、それについての新たな便利有効な方法は重要な課題になる。

### 2. 研究の目的

本研究では、以上のことを鑑み、能動性義手を制御するために、使用者の運動意思を読み取る新たなヒューマンマシンインタフェースを開発するものである。具体的には、申請者の今まで生体組織の硬さを評価する触覚センサに関する研究の知見をもとに、残存断端の筋の動きによって断端表面の形状や硬さなどの触覚性状の変化に着目し、新たに装着簡単でかつ長時間使用可能な触覚センシングシステムを開発し、それを利用して、義手使用者の運動意思を読み取り、電動義手に伝達してそれを制御する新しいヒューマン・マシン・インタフェースを開発研究する。このようなごく少数のセンサを利用することで複数種類の運動意図を識別でき、義手使用者の意思通り自由自在に能動義手を動作させることは、本研究の最終目的である。

### 3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下のように 3 段階を分けて研究を進めてきた。

第 1 段階ではまずは今までの触覚センサ研究の知見を元に、触覚センサ構造を設計して試作、センサのハードウェアを構築する。そのうえ、センサを健常の研究参加者の前腕に貼り付け、図 1 に示した義手研究に代表的な 6 動作(右から左へ:握り、開き、回内、回外、屈曲、伸展)に対して、前腕の表

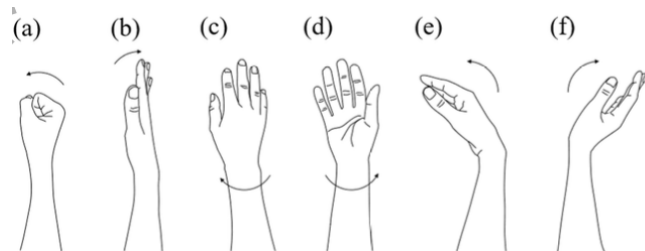


Fig. 1 Six types of target motion.

(a) Grasp, (b) Open, (c) Pronation, (d) Supination, (e) Palmar flexion, (f) Dorsiflexion.

面触覚性状のデータ収集を行った。計測された触覚性状信号から、運動意思を表す特徴量を検討して、さらにオフラインで誤差逆伝搬ニューラルネットワーク BPNN を用いてこれらの特徴量を識別し、最適な装着部位、センサ枚数等を検討しながら、システムの有効性を確立した。そのうえ、健全な新規実験協力者を動員し、本システムの有効性を確認した。

第2段階では、センサの改良改善を行いつつ、さらに識別正解率、応答性、学習データなどの視点から、運動意思識別の方法の比較研究を行って、実装する運動意思識別方法を確立した。比較した識別方法は、誤差逆伝播法ニューラルネットワーク(BPNN)、k-近傍法(k-NN)、サポートベクターマシン(SVM)の3種類であった。

第3段階では、今までの成果をまとめ、リアルタイム的な運動意思識別のハードウェアおよびソフトウェアを実装し、新規実験協力者を動員してリアルタイム的な運動意思識別実験を行い、本システムの有効性を確認した。また、システムの問題点を絞り出し、改善策を検討し、さらにシステム的发展方向を探る。

#### 4. 研究成果

本研究の第1段階では、まず図1のような皮膚表面の触覚性状を計測するための触覚センサを開発した。触覚センサは、20 mm × 40 mm に加工した厚さ 122 μm、表面銀電極の PVDF フィルムに、両面テープを用いて厚さ 0.4 mm アクリルシートに貼り付け、セロハンテープで外周全体を覆った構造となっている。

このセンサを用いて、上記6動作に対して、取得した前腕表面触覚性状信号の一例を図3に示す。これらの信号波形から、各動作のパターンが異なることを確認した。そのパターンから運動意思識別の特徴を検討した。逆伝播ニューラルネットワーク BPNN を用いて運動意思の識別を行ったと同時に、運動意思識別に最適なセンサ枚数、装着場所等を検討した結果、2枚のセンサを利用して、それぞれ橈側手根伸筋と橈側手根屈筋の部位に装着することで、識別正解率が最も高いと分かった。

新規実験協力者に対して検証実験の結果、各動作の識別正解率に差があるものの、6動作の総平均識別正解率は 89.7% であった。熟練の研究参加者に対して、6動作の識別正解率は 96% を超え、全く経験のない新規実験協力者に対しても、正解率は 85% 以上の識別正解率が確認できた。

第2段階では、運動意思識別の方法の比較研究を行って、以下の結果が得られた。

各動作 40 試行分の学習によって、動作検出後 0.5s までの時系列データで識別を行うと BPNN、k-NN、SVM のどの識別器を用いても全ての実験参加者で 89% 以上の正解率となった。このことから、BPNN、k-NN、SVM の全ての識別器で対象 6 動作が識別可能であることを示した。

識別器の応答性については、BPNN、k-NN、SVM の全ての識別器で動作検出後 300 ms 未満の時系列データで正解率が収束しており、PVDF フィルムを用いた触覚センサによって、迅速な動作識別が可能であることが示された。識別器ごとに収束時間を比較すると、SVM は全実験参加者について動作検出後 100 ms 未満の時系列データで正解率が収束しており、他の識別器に比べて有意に優れた応答性を示した。

識別器が必要とする学習データ数について検討したところ、SVM は全実験参加者について各対象動作 9 試行分の学習データで収束することが示された。これは、使用者の練習時間を大幅に減少することが可能と示唆した。

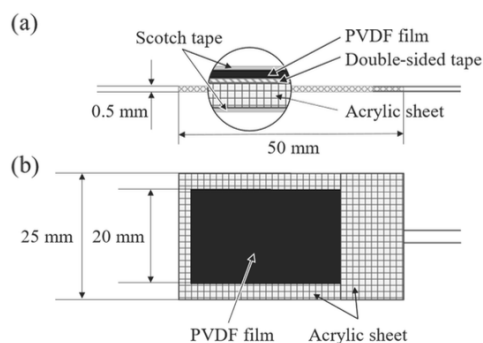


Fig. 2 Tactile sensor using PVDF film for measuring forearm tactile feature.

(a) Side view (partially enlarged view), (b) Top view.

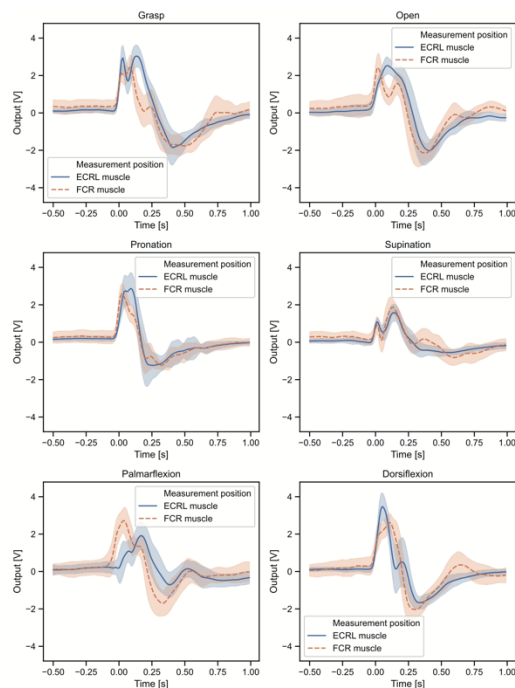


Fig. 3 An example of the additive average waveforms of tactile sensor output for each motion

識別器ごとの正解率を比較すると、SVM は平均正解率 90.4%と高い正解率で識別が可能であり、BPNN、k-NN に対して有意に正解率が高いことが示された。

以上のことから、本研究では実用化に向けたパラメータを決定したうえで、運動意思識別器に SVM を採用すべきだと結論付けた。さらに SVM は他の識別器に比べて計算量が少ないため、マイコンにての実装が可能だと考えられる。

第3段階では、まず図4に示すリアルタイム的な運動意思識別システムを構築した。ハードウェアの部分、センサ周辺のチャージアンプとローパスフィルタといったシグナルコンディショニング回路を、市販の大型装置から小型の試作回路に変わった。またシグナルコンディショニング回路を通過した計測信号は Arduino で A/D 変換される。Arduino で、デジタルノッチフィルタを通過してから Raspberry Pi に USB シリアル通信で送信する。Raspberry Pi では計測信号が閾値を超えたとき動作を検出する。動作検出されたとき、計測信号から特徴ベクトルを構成し、SVM によって識別を行うことで手の動作を判別する。このシステムは、動作検出から 100ms で識別が完了する。

構築したシステムを用いて、全く実験に初めて参加の実験協力者 4 名を含めて 20 代から 60 代の男女 6 名の実験参加者に対して、リアルタイム的な運動意思識別実験を行った。

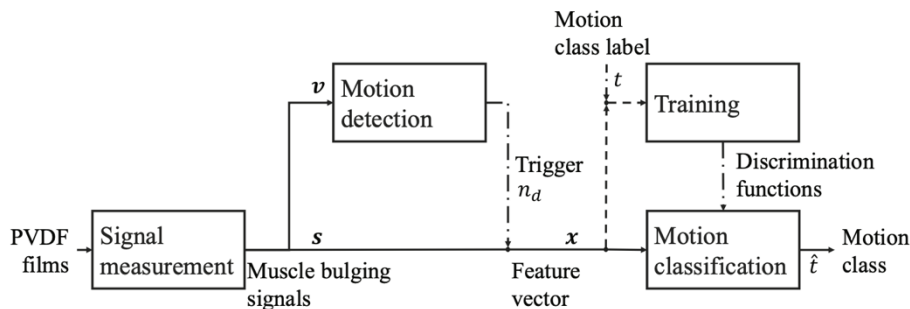


Fig.4 Motion Classification System Structure

まず、実験参加者は 2s ごとに鳴る音による合図で、対象 6 動作を 10 回ずつ繰り返して行いデータセットを作製した。機械学習が完了した後、実験参加者はランダムに提示された動作を任意のタイミングで対象動作を 5 回ずつ行い、識別結果を画面に提示した。

各動作 10 回だけ行なったデータを教師データとして機械学習してリアルタイム的な運動意思識別の結果、実験参加者平均正解率は 82.8%となった。また、最も正解率の低い参加者でも、正解率は 70.0% であった。動作ごとの正解率では、屈曲以外の参加者平均正解率は 80.0%以上である。この正解率は、表面触覚性状を利用することで使用者の簡単な訓練だけで使用者の意図する動作をリアルタイム識別できることを示した。また、本システムは性別や年齢に関わらず使用可能であると言える。実験参加者は、識別結果が表示に時間遅れを感じなかった。以上のことから、本研究で提案した触覚センシングシステムを利用して義手使用者の運動意思をリアルタイム的な識別が可能であることを確認した。

しかし、リアルタイム的な運動意思識別実験においては、一部の実験協力者に対して屈曲の正解率は他の動作に比べて著しく正解率が低い結果となった。正解率が低くなりやすい動作に関しては、使用者の訓練回数を増やして、また運動意思識別の機械学習回数も増やす必要があると考えられる。

運動意思識別の曖昧さ回避と使用時の把持物の落下事故の防止等を考慮し、これらの対策を検討する必要がある。また、基本の 6 動作以外の動作や、連続動作、複合動作などの識別も必要、さらに手全体の運動だけではなく、各手指の運動に関する識別も必要であり、これらの研究は現在継続進めている。

研究をさらに続けて進めると、ごく少数のセンサを利用することで複数種類の運動意図を識別でき、義手使用者の意思通り自由自在に能動義手を動作させることが期待でき、電動義手の普及におけるボトルネックを突破することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岩井隼人、王鋒	4. 巻 31
2. 論文標題 電動義手制御のための前腕表面触覚性状センシングシステム	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩井隼人、王鋒	4. 巻 143
2. 論文標題 筋隆起を利用した電動義手制御のための動作識別手法の比較研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 遠山凜也、王鋒
2. 発表標題 義手制御のための各指の動作認識に関する研究
3. 学会等名 2022年度（第13回）電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関山拓真、王鋒
2. 発表標題 義手触覚フィードバック手法に関する研究
3. 学会等名 2022年度（第13回）電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩井隼人、王鋒
2. 発表標題 電動義手制御のための前腕表面触覚性状センシングシステム
3. 学会等名 第31回MAGDAコンファレンス in 鹿児島
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田颯平,小松将大,王 鋒
2. 発表標題 義手制御用センシングシステムの改良について
3. 学会等名 2021年度(第12回) 電気学会東京支部群馬支所・栃木支所合 同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松将大,太田颯平,王 鋒
2. 発表標題 能動義手の動作識別性能向上に関する研究
3. 学会等名 2021年度(第12回) 電気学会東京支部群馬支所・栃木支所合 同研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江部 正純、岩井 隼人、王 鋒
2. 発表標題 能動義手制御のための触覚センシングシステムに関する研究
3. 学会等名 2020年度(第11回) 電気学会東京支部栃木・群馬支所共同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 隼人、江部 正純、王 鋒
2. 発表標題 能動義手制御のための動作判別アルゴリズムに関する研究
3. 学会等名 2020年度（第11回）電気学会東京支部栃木・群馬支所共同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石岡 彩花、王 鋒
2. 発表標題 生体軟組織の硬さ評価用触覚センサの研究開発
3. 学会等名 2020年度（第11回）電気学会東京支部栃木・群馬支所共同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>第12回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会に学生が優秀発表賞を受賞  <a href="https://www.maebashi-it.ac.jp/department/sle/info/prize/post_35.html">https://www.maebashi-it.ac.jp/department/sle/info/prize/post_35.html</a>          電気学会研究会に学生が優秀発表賞を受賞  <a href="https://www.maebashi-it.ac.jp/department/sle/info/prize/2021.html">https://www.maebashi-it.ac.jp/department/sle/info/prize/2021.html</a></p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------