

令和元年6月26日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01380

研究課題名(和文) 数理的手法により生成された膜面皮膚センサを用いた上腕欠損者用電動義手の開発

研究課題名(英文) Development of an electric upper limb prosthesis using file surface skin sensor considered by mathematical method

研究代表者

森 貴彦 (Takahiko, Mori)

湘南工科大学・工学部・准教授

研究者番号：20332025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：全体を通じて、極微小なひずみ信号から安定的な電圧値を出すための高感度調整技術の確立、多点同時計測の実現とそれを処理可能な回路の試作、柔軟変形物に貼付できるひずみセンサと評価用治具システムの試作、計測データの可視化と機械学習を行った。

その過程で皮膚センサはその伸長方向または縮小方向に依存した電圧変化経路を辿るヒステリシスを持つことを発見した。また、皮膚センサ信号に基づく形状変形の可視化を行い、機械学習を行うための定量的な入力情報を付与できることを示した。さらに、複数の皮膚センサ信号に基づいた機械学習を行った結果、複数の皮膚センサ信号を同時に用いた義手の操作が可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
センサ形成技術の基礎ができると共に皮膚変形量を視覚的に捉えることができるようになる。皮膚・骨・皮下組織が複雑に集まっている肩関節の皮膚変形を計測できれば、人体の他部位への転用や皮膚に様々な特徴を持つ患者に対する適用が可能になる。

研究成果の概要(英文)： Establishment of high sensitivity adjustment technology to obtain stable strain voltage from very small strain signals, realization of multipoint simultaneous measurement and trial manufacture of circuit that can process it, strain sensor that can be attached to flexible deformation, and trial manufacture of Jig for evaluation of the system, visualization of measurement data and machine learning were performed.

In the process, the skin sensor was found to have a hysteresis that follows a voltage change path depending on its extension direction or reduction direction. We also showed that shape deformation can be visualized based on skin sensor signals, and that quantitative input information for machine learning can be given. Furthermore, as a result of performing machine learning based on multiple skin sensor signals, it was shown that it is possible to operate the prosthesis using multiple skin sensor signals simultaneously.

研究分野：制御工学

キーワード：生体医工学 生体情報・計測 皮膚センサ 電動義手

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、人間機械協調分野や医療福祉分野において、先天性上肢四肢欠損症患者および後天性上肢切断者のような上肢（前腕または上腕）欠損者を対象に電動義手の研究開発が国内外で行われている。例えば、ドイツのオットーボック社製ミケランジェロハンド、吉川らの動作識別法や横井らの運動機能再建、イクシー株式会社の handiii がある。これらに共通するコア技術は、人間の意思や意図などの操作情報が含まれ皮膚表面で計測可能な筋電信号を利用した生体計測技術である。しかし、筋電信号を利用した生体計測技術は、誤認識による誤動作がある程度の確率で発生してしまう。筋電信号は制御が難しく不安定であり、数か月にも及ぶ訓練時間が必要であることが、電動義手の普及を妨げている最大の要因である。筋電信号を利用した電動義手は、技術的限界があり、電動義手の普及のための技術革新が求められている現状がある。

### 2. 研究の目的

上腕欠損者用電動義手に関わる上記の課題に対して3つの目的を設定し、解決を図る。

#### (1) 数理的アプローチに基づく膜面皮膚センサの生成

複数枚（4～6枚）の薄くて伸縮性のある薄膜皮膚センサを皮膚表面運動に追従可能な曲面状に配置した膜面皮膚センサ（複数の薄膜皮膚センサで構成された薄膜皮膚センサシート）を生成する。膜面とは、主にトラス状に配置された線材により形成される3次元等張力曲面のことであり、膜面皮膚センサにおいては、トラスの各辺が1つの薄膜皮膚センサである。本研究では、実用志向の観点からマイコンのアナログ入力数の制限内で実現できる薄膜皮膚センサ数を使用し、1つの薄膜皮膚センサを形成する。

#### (2) 曲面展開による特徴量の抽出および肩関節運動と特徴量間の機械学習

上記の数理的アプローチに基づいて曲面形状の変形を効率良く計測できるように複数の方向に配置された3次元の膜面皮膚センサは、2次元平面の集合体であるため容易に1つの2次元平面情報へ対応付け可能である。そこで、まず、各薄膜センサの出力電圧値（伸縮量）を方向と大きさの二値情報を持つ平面ベクトルとして扱い、2次元マップを形成する。形成した2次元マップの中で複数のベクトル和を求めることで、膜面皮膚センサ全体の動きを1つのベクトルに集約し、そのベクトルを特徴量として抽出する。次に、3種類6パターンの肩関節運動（拳上と下制、上方回旋と下方回旋、外転と内転）に対応付けした6つの教師信号（値の異なる定数）に従って、一定時間、被験者が肩関節運動を行う。与えた教師信号と抽出された特徴量に対して、現在最も優秀なパターン識別能力を持つ機械学習アルゴリズムを適用し、2つの肩関節運動を義手開閉動作に関連付けする。

#### (3) 筋電センサと膜面皮膚センサを併用した計測制御回路の製作と電動義手の製作

下記2系統の計測制御システムを1つマスター-スレーブシステムに統合する。

- ・肩関節運動によって発生する膜面皮膚センサ出力値を用いた義手ハンドの開閉動作
- ・上腕筋収縮によって発生する筋電センサ出力値を用いた義手肘関節の屈曲・伸展動作

統合システムでは、予測機能を付加して操作遅延をなくす為の機械学習アルゴリズムを実装した筋電信号計測制御回路を主とし、膜面皮膚センサ出力信号計測制御回路を従とする。また、上記の統合システムの製作と並行して、上腕欠損者用電動義手の5指ハンド、肘関節、肘関節と切断肢を接続するソケットを製作し、臨床研究協力機関において臨床実験を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 平成28年度は、長短2種類の皮膚センサ4～6枚で構成される膜面皮膚センサ構造の等張力曲面数理解析を実施し、生体曲面被覆可能な典型的な組み合わせの選択、膜面皮膚センサの製作、計測システムの構築と肩関節動作時の実測を行う。

(2) 平成29年度は、実測値を2次元平面情報へ対応付け（特徴量の抽出）し、対応付けされた膜面の数理解析により形状最適度を定量化する。そして、機械学習アルゴリズムを用いて肩関節運動と特徴量の相関を求め、特徴量抽出手法と機械学習の妥当性を評価する。

(3) 平成30年度では、筋電センサ計測制御回路の製作、膜面皮膚センサ計測制御回路の製作、2つの計測制御回路の統合、上腕欠損者用電動義手ハードウェアの製作、健常者による動作確認実験、上腕欠損者による臨床実験を行う。

### 4. 研究成果

全体を通じて、極微小なひずみ信号から安定的な電圧値を出すための高感度調整技術の確立、多点同時計測の実現とそれを処理可能な回路の試作、柔軟変形物に貼付できるひずみセンサと評価用治具システムの試作、計測データの可視化と機械学習を行った。

平成28年度は、まず、株式会社 Xenoma から提供頂いた複数の薄膜ひずみゲージで構成した膜面皮膚センサシートを、肩関節よりも複雑な部位を持つ上肢欠損者に装着して、皮膚変形の計測が可能であることを検証した（図1(a)～(b)）。しかし、膜面皮膚センサシートに使用した薄膜ひずみゲージは、時間経過による劣化が早く、また伸長状態しか計測ができず、さらに伸長状態を基点にして伸縮した場合、内部抵抗値に激しい非線形性（ヒステリシス）が発生することが判明した。これはメカニカルな構成方法やプログラミングを工夫しても解決不可避な課題であった。そこで、株式会社 Xenoma が提供する薄膜ひずみゲージの使用を断念せざるを得ず、

市販のひずみゲージを用いて皮膚センサシートを製作することとなった。なお、膜面皮膚センサ構造の等張力曲面数理解析および生体曲面被覆可能な典型的な組み合わせの選択は、薄膜ひずみゲージのもつ課題への取り組みおよび皮膚センサシートの変更検討に時間を大幅に要したため、実施することができなかった。



図 1 (a) 上肢欠損者に装着した膜面皮膚センサシート 図 1 (b) 皮膚変形の計測検証

つぎに、市販のひずみゲージを用いて皮膚センサシートに対応した計測システムの構築を行った。新たな計測システムにおいては、計測アンプ（差動増幅器）を従来の 2 個から 3 個へ増やしたことで増幅率の飛躍的な向上を実現させることができた。また、DA 変換器を 2 個へ増やしたことで増幅率の向上を伴って飽和現象を完全に抑制するためにアナログ素子の基準電圧を正確に制御することが可能になり、安定な計測が可能になった（図 2(a)～(c)）。また、膜面皮膚センサ構造の選択においては、皮膚変形の皮膚センサに対する伝搬影響を見るため、皮膚センサを一定面積内に規則的に配置することを決定した。

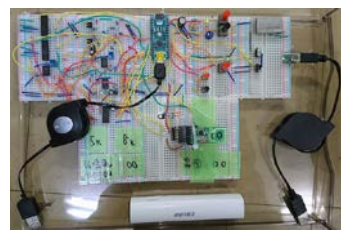
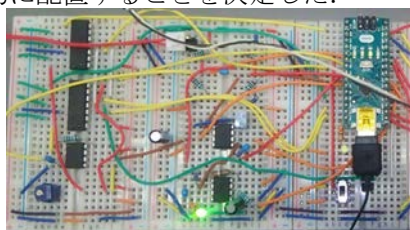


図 2(a) アンプ 2 個の回路 図 2(b) アンプ 3 個の回路 図 2(c) 計測アンプと DA 変換器を 2 個に増設した計測システム

平成 29 年度では、まず、平成 28 年度に決定した皮膚センサの配置に基づいて、連続的に曲率を変化できる評価用治具システムを試作した（図 3(a)～(c)）。つぎに、デジタルカメラを用いて皮膚センサを貼ったプラスチック基材の変化と上記の新たな計測可能なシステムを用いて皮膚センサ出力値を同時に計測した（図 3(d)～(e)）。さらに、プラスチック基材のモーシオンキャプチャを基に画像解析を行い、プラスチック基材の曲率変化を解析して計算した（図 3(f)～(g)）。計算の結果、プラスチック基材の曲率変化は、その伸長方向または縮小方向に依存せずばばないことが確かめられた。

一方、機械学習アルゴリズムとして Google のオープンソース TensorFlow の環境を構築した。しかし、評価用治具システムの試作と TensorFlow の環境構築に想定以上の時間を要したため、数理解析により形状最適度を定量化および関節運動と特徴量の相関を求めるには至らなかった。

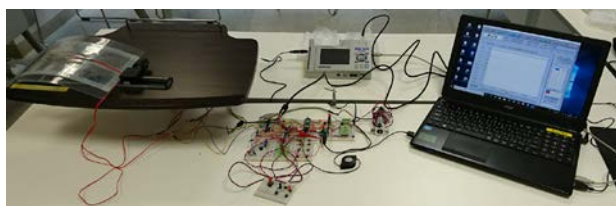


図 3(a) 基材に貼った皮膚センサシート 図 3(b) 評価用治具システム（全体）

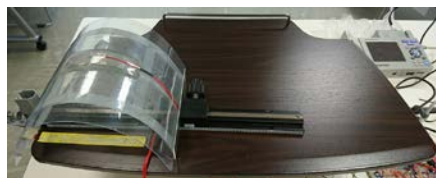


図 3(c) プラスチック基材および皮膚センサの計測実験

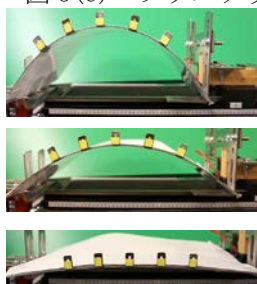


図 3(d) モーションキャプチャ

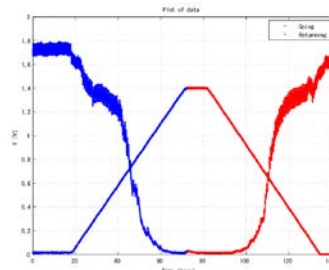


図 3(e) 変位とセンサ出力



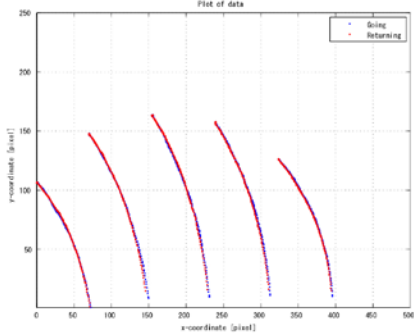


図 3(f) 基材の画像解析結果

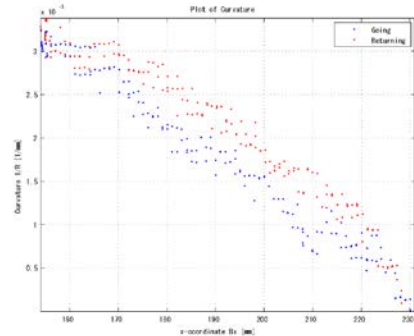


図 3(g) 基材の曲率変化

最終年度では、まずその前年度に試作した評価用治具システムを用いて得たデータを解析した。なお、CAE 解析ソフトウェアを用いて皮膚センサを貼ったプラスチック基材の弾性解析を行い、評価対象として理想的なひずみ分布データが得られていることを確認した (図 4)。

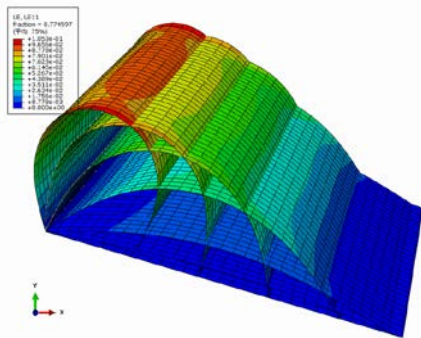


図 4 皮膚センサを貼ったプラスチック基材の弾性解析結果 (ひずみ分布)

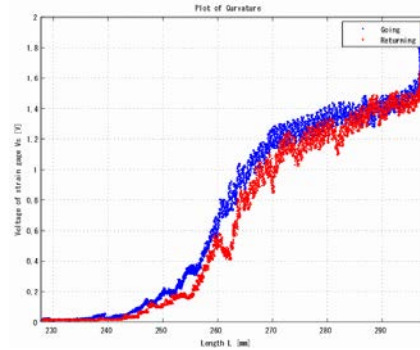


図 5 変位-センサ応答

皮膚センサの出力電圧を計測した結果、皮膚センサはその伸長方向または縮小方向に依存した電圧変化経路を辿るヒステリシスを持つことを発見した (図 5)。このことは電圧情報だけでは曲率を一意に決定ができないことを意味し、そのままでは電動義手の動作と対応付けが困難となる課題が判明した。すなわち、得られた知見を基に綿密なデータ解析を行うことが喫緊の課題となりその課題解決が重要と判断し、当初計画を変更して新たな義手の製作を見送った。

上記課題の対策として複数のセンサ出力電圧の時間変化を基に曲率計算し、各曲率半径が作り出す曲線同士の曲線近似を用いれば、個々のセンサが持つヒステリシスの影響を軽減することができる考えた。そこで、計測制御装置と制御系設計ツールを用いて (図 6)、皮膚センサ信号を 3 種類計測した (図 7(a)~(c))。

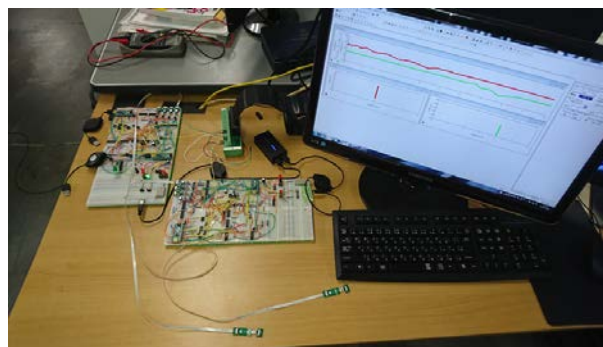


図 6 計測制御装置と制御系設計ツール

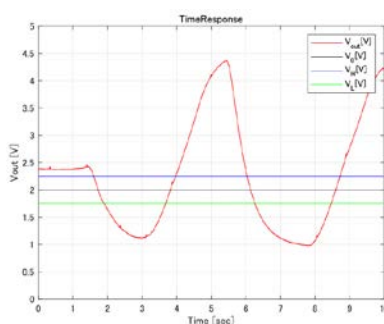


図 7(a) センサ 1 の応答

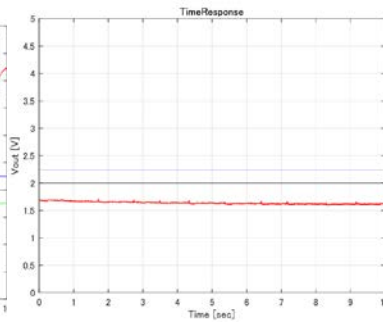


図 7(b) センサ 2 の応答

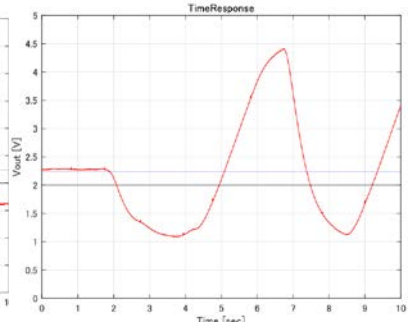


図 7(c) センサ 3 の応答

なお、上述の計測制御装置と制御系設計ツールを用いた計測を実施するにあたり、平成 28 年度に試作した計測システム（図 2(c)）に対して増幅率の調整をメカニカルなポテンシオメータから電子的なデジタルポテンシオメータに変更することで、増幅率のキャリブレーション（調整）を正確に行うことができる計測システムを試作した（図 8）。この研究成果を第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門にて発表している。また、皮膚センサについても同様に、平成 29 年度に使用した皮膚センサ（図 3(a)）に対してサイズを小型化することで、計測範囲の密度を高めることができる皮膚センサを試作して計測に使用した（図 9）。

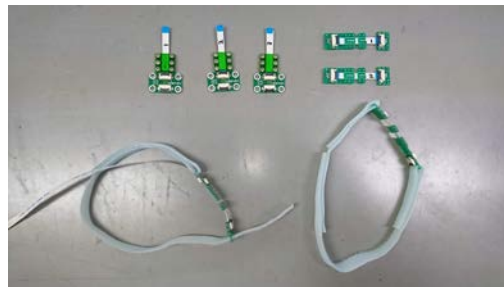
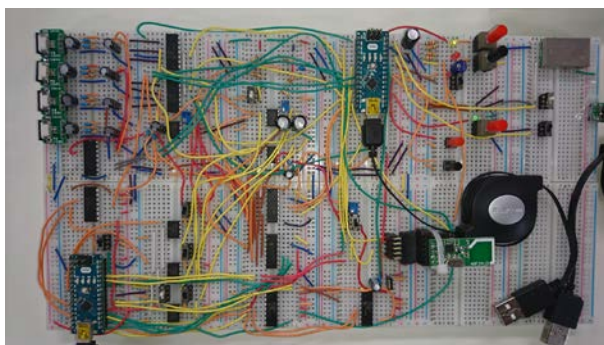


図 8 デジタルポテンシオメータを用いた計測システム

図 9 小型化した皮膚センサ

各センサの配置に対応した皮膚センサ信号変化にマッピングを行った後（図 10）、形状変形（各センサの曲率変化すなわち曲率半径の時間変化）の可視化を行った（図 11(a)~(c)）。その結果は、肩関節のような複雑な部位でも高度な曲線近似が実現できれば、これを新たな特徴量として機械学習を行うための定量的な入力情報を付与できることを示した。



図 10 各センサ（センサ 1~3）の配置に対応した皮膚センサ信号変化

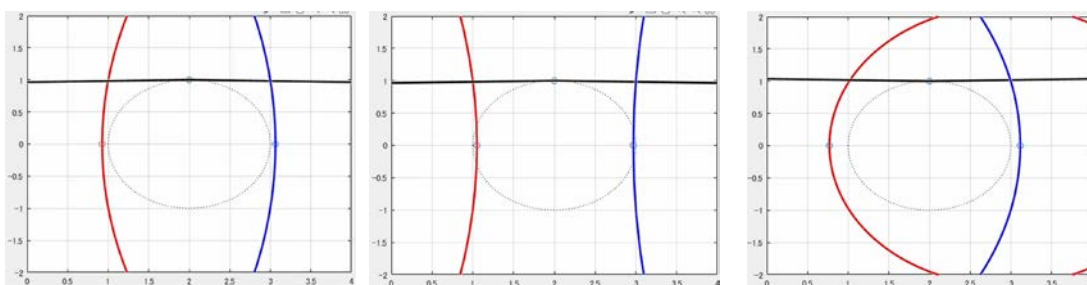


図 11 各センサの曲率変化 ((a):初期, (b):中間, (c):最終)

さらに、複数の皮膚センサ信号と教師データとのニューラルネットワークによる機械学習を行った。学習の結果、比較的高い正答率が得られたため、特徴量抽出を適正な入力情報と学習パラメータ調整次第では複数の皮膚センサ信号を同時に用いた義手の操作が可能であることが示された（図 12）。

```

C:\Users\morilab\Anaconda3\envs\DeepLearning\python.exe
C:/Users/morilab/PycharmProjects/ml_test/test_bool.py
process : 200 / 1000
process : 400 / 1000
process : 600 / 1000
process : 800 / 1000
process : 1000 / 1000
Learning Completed!
Execution Time : 0:00:00.443590

認識精度 : 98.8011988011988 %
0の出力の数 : 488
1の出力の数 : 513

Process finished with exit code 0
    
```

図 12 ニューラルネットワークによる機械学習結果

最後に、筋電センサ計測制御回路の試作を行い、複雑な部位として肘を計測対象に健常者による動作確認実験を実施した。実験の結果、電動義手に使用予定のモータの方向制御が可能であることが確かめられた。しかし、腕を大きく運動させなければ筋電が発生しないため、感度の改善が課題であることが判明したため、2つの計測制御回路の統合を断念した(図 13(a), (b))。



図 13(a) 健常者の肘に貼った筋電センサ



図 13(b) 試作した筋電センサ計測制御回路

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 森貴彦, 清水如代, 「皮膚変形計測制御技術の提案と電動義手への応用」, 電子情報通信学会 IEICE 会誌, Vol. 102, No. 7 (解説として 2019. 6. 30 投稿予定)

[学会発表] (計 3 件)

- ② 森貴彦, 「皮膚センシング技術を用いた電動義手の定量評価」, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 1P2-C02 (2018. 6)
- ③ 関口 賢, 森貴彦, 「デジタルポテンショメータを用いた皮膚センシング回路の増幅率キャリブレーション」, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演論文集, 1A3-13 (2018. 12)
- ④ 関口 賢, 森貴彦, 「機械学習を取り組んだ皮膚変形の計測法」, 電子情報通信学会回路とシステム研究会 (CAS) (2019. 7. 31 発表予定)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：渡邊 尚彦

ローマ字氏名：Naohiko Watanabe

所属研究機関名：岐阜工業高等専門学校

部局名：環境都市工学科

職名：講師

研究者番号 (8 桁)：50550034

研究分担者氏名：岩瀬 将美

ローマ字氏名：Masami Iwase

所属研究機関名：東京電機大学

部局名：未来科学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：50339074

### (2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。