

令和元年6月20日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12951

研究課題名(和文)導電性シリコン表皮を持つ人工ハンド

研究課題名(英文)Artificial hand with conductive silicon on the surface

研究代表者

横井 浩史(YOKOI, HIROSHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90271634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：筋電義手の制御信号として皮膚表面から筋活動情報を計測するために、表面電極が必要である。本研究は、アグリゲーション性の高いカーボンブラックとシリコンを混合することで導電性シリコンを作成し、さらに金属製の不織布に導電性シリコンを塗布することで、電極の材料を開発した。筋電電極は、皮膚と義手ソケットの間に用いられ、外力に影響される可能性があるため、外力の影響を定量的に調べた。センサ全体をシリコンで覆うようにし、汗や水のある環境でも利用可能となった。さらに、義手に感覚機能を付与するために、導電性シリコンを利用した感圧センサを開発し、義手との一体化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究が目指している義手は、全体が柔らかく、人体とのインターフェース部の局所的な面圧が高くなることを防ぎ、重量物も支えられるようになる上に、電気的特性も安定する。また、自分の体の一部のように取り扱うことが可能となる柔軟な義肢装具の開発に意義がある。

社会的意義：筋電義手やパワーアシストスーツなど電動装具に柔軟性と防水性を持たせることで、付けたまま水回りの作業やお風呂に入ることができるようになり、支援できる日常生活の範囲の拡充効果は多大なるものがある。

研究成果の概要(英文)：Surface electrodes are required to measure the EMG (Electromyography) signals for the control of myoelectric prosthetic hands. This study developed conductive silicon by mixing silicon with aggregative carbon black. The conductive silicon was applied to metallic non-woven fabric to create materials for the electrodes. Since the electrodes are supposed to be used between the skin and the socket, the influence of force to the quality of the EMG signal was investigated. The electrodes were encapsulated in insulating silicon to be applicable to circumstances with sweat or water. Furthermore, a pressure-sensitive sensor was developed with the conductive silicon, which can be integrated into the prosthetic hand to provide sensory function.

研究分野：ロボット工学，医用福祉機械

キーワード：導電性シリコン 筋電義手 筋電センサ 感圧センサ

## 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、電動装具の開発は、ロボット工学技術の発展に伴い、発揮力と運動自由度の観点で大きく進歩してきたが、生体信号の計測技術については、旧来の電子回路技術の枠にとどまっているため、金属部品と人体表皮との接触が不可欠とされてきた。しかしながら、金属と皮膚との接触には、イオン化傾向の差が大きいため生じる肌荒れや、体液と電極のイオン電荷の移動速度の差による液間電圧のカオス現象と電氣的ノイズの発生など、人と機械のインターフェースに多くの課題を残してきた。

また、電動装具は人体に対して外部機械を設置することであり、その設置部分の力学的負担が大きく成る。従来は、人体の採型を行い、繊維強化プラスチックなどによるソケットの製作により、密着性を上げることにより面圧を下げ、人体への負担を減らしていたが、それでも片あたりなどの問題で、痛みを発生し十分な重量を支えられないなどの課題を抱えていた。近年では、素材をシリコンに変更することにより、片あたりの少ないソケットとしてシリコンライナーなどの開発が進められているが、この素材は絶縁性材料のため、電動装具のインターフェースとしては使用できない。

### 2. 研究の目的

研究代表者らは、筋電義手の研究開発と実用化のために、導電性シリコンと個性適応型学習制御技術の開発に成功し、ノイズレスの生体信号センサ回路の試作に成功した。本研究は、これらの技術を融合することにより、全体が柔らかい材質で包まれ、筋電計測と制御の機能を有する電動装具技術を開発する。これにより、感覚フィードバックの機能を有し、長期間使用可能で、汗や外力に影響されにくい筋電義手の開発に挑戦することを目的とする。

### 3. 研究の方法

筋電義手は、皮膚表面から筋活動情報を生体電位信号として計測するために、表面電極を必要である。本研究は、これを導電性シリコンにより合成して実現した。導電性シリコンは、アグリゲーション性の高い特殊なカーボン粉末とシリコンを適正な混合比で成形した。さらに導電性を高めるために、金属製の不織布に導電性シリコンを塗布することで、電極の材料を開発した。筋電電極は、皮膚と義手ソケットの間に用いられ、外力に影響される可能性があるため、外力の影響を定量的に調べた。汗や水のある環境でも利用できるようにするため、センサ全体をシリコンで覆うようにした。さらに、義手に感覚機能を付与するために、導電性シリコンを利用した感圧センサを開発し、義手との一体化を実現した。

### 4. 研究成果

導電性シリコンゴム材料を用いた電極開発は図1に示す。二液性の絶縁シリコンに導電性を付与するために、アグリゲーション性の高い導電性カーボンブラックを混入し真空中で攪拌した。導電性シリコンを導電性不織布に塗布し、皮膚との接触面に電極の導電性シリコンと金属線をハイブリッドした電極を作成した。伸縮バンドの内側に固定することで、片手で脱着できる柔軟な乾式電極を作成した。ハイブリッドした電極は、導電性シリコンだけの電極に比べて汗の影響に強いことが実験で示された。導電性シリコンゴム電極の最適化を行うために、カーボンブラックの濃度を変えることで電極の導電性を調整し、導電性と計測された信号のSN比との関係を調べた。筋電信号に基づく運動意図推定のための計測と信号解析のシステムを構築した。

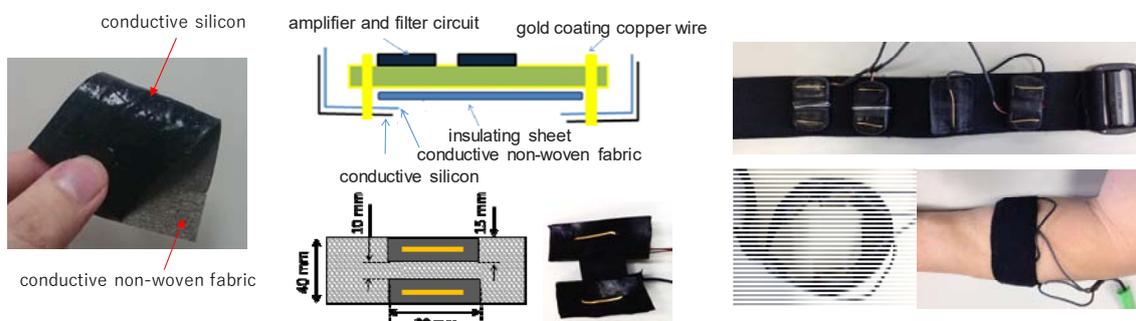


図1. 導電性シリコンゴムを用いた筋電電極。導電性不織布に塗布した導電性シリコンゴム（左）、筋電電極の設計（中）、3チャンネルのセンサーバンド（右）。

信号源インピーダンスと筋電信号のSN比との関連に基づき、日常生活環境でも安定的な筋電信号を計測するために、積層型の筋電計測電極を開発した。カーボンブラックの配合率が異なる導電性シリコンおよび導電性不織布を積層型に成形し、間に挟んだ金メッキ

線をアンプと繋げることで積層型の筋電センサを構成した。皮膚と接触する層の配合率を比較的に低くすることでインピーダンスの変動率を抑え、導電性不織布と接触する層の配合率を高くし信号の減衰を防ぐ。このような積層構造を成すことで、計測される筋電の振幅が増加することが確認された。そこで、金メッキ線と接触するシリコンは高濃度に固定し、肌と接触する部分のカーボンブラックの濃度はどの値が最適なのかを実験により確かめた。実験の結果から、肌と接する導電性シリコンのカーボンブラック濃度を変化させると、筋電の計測特性が変化することが明らかとなった。さらに、重量比 2.6%の導電性シリコンと 4%の導電性シリコンを重ねた積層型電極が最も安定して大きな筋電を計測できることがわかった。

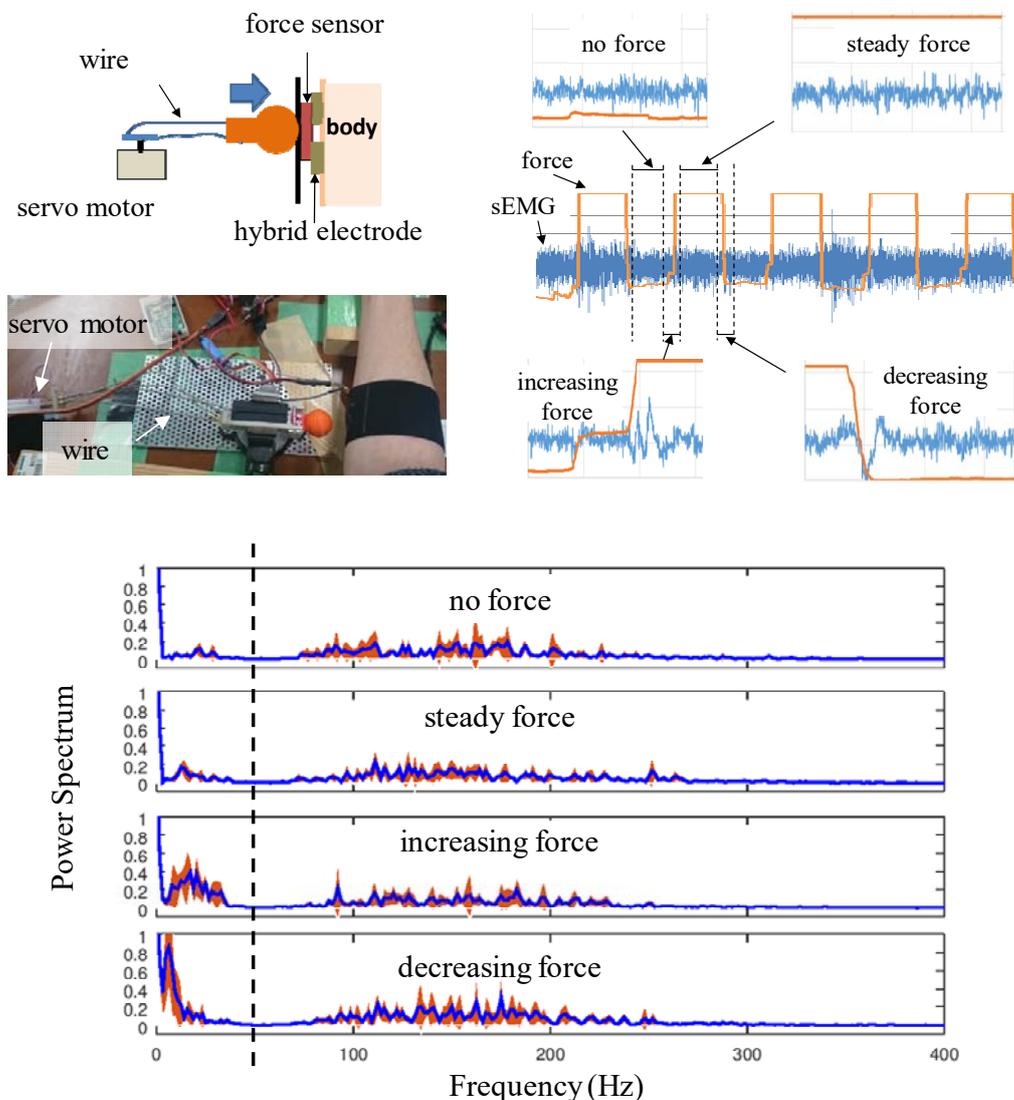


図2. 外力の筋電信号への影響. 実験装置 (左上), データ解析方法 (右上), データ解析結果 (下).

外力の筋電信号への影響を調べた実験は、図2に示す。筋電センサの直上にFSRを配置し、加圧部品をサーボモータのワイヤ牽引駆動により制御した。加圧装置で2秒レスト2秒加圧という動作を5回、計20秒を1セットとし、これを安静状態、筋発揮状態で各5セット行った。計測したデータを圧力なし、加圧の瞬間(立上り)、圧力一定、減圧の瞬間(立下り)の状態について分割、整理しFFTを行い、各状態のパワースペクトルを解析した。外力と筋電の同時計測実験により、特に筋電信号の低周波領域は、外力の影響を受けることが分かった。、20~50[Hz]の周波数帯に圧力によるパワー分布しており、筋電位のパワーは100~400[Hz]付近に分布していることがわかった。

シリコン素材とセンサの融和性を向上させるため、導電性シリコンを用いた感圧センサの構築を行った(図3)。導電性シリコンを用いて、感圧センサの機能を持たせるための構造に造形する技術を開発した。緩衝材によって空間的に絶縁されている導体が圧力により変形・接触し通電することで外力を検知する。ベース素材・導体素材にシリコン

を素材とすることで高い柔軟性を持たせることが可能となり自由局面に計測点を配置することが可能となる。感圧センサは、母指、示指、中指の指腹部に搭載し、外部からの接触力を感知することに成功した。100k $\Omega$ の固定抵抗を用いた分圧回路を作成し、固定抵抗の電圧を計測することで感圧センサとして機能することを確認した。これらのセンサは全てシリコン製であるため、シリコン外皮に直接接着することが可能となった。

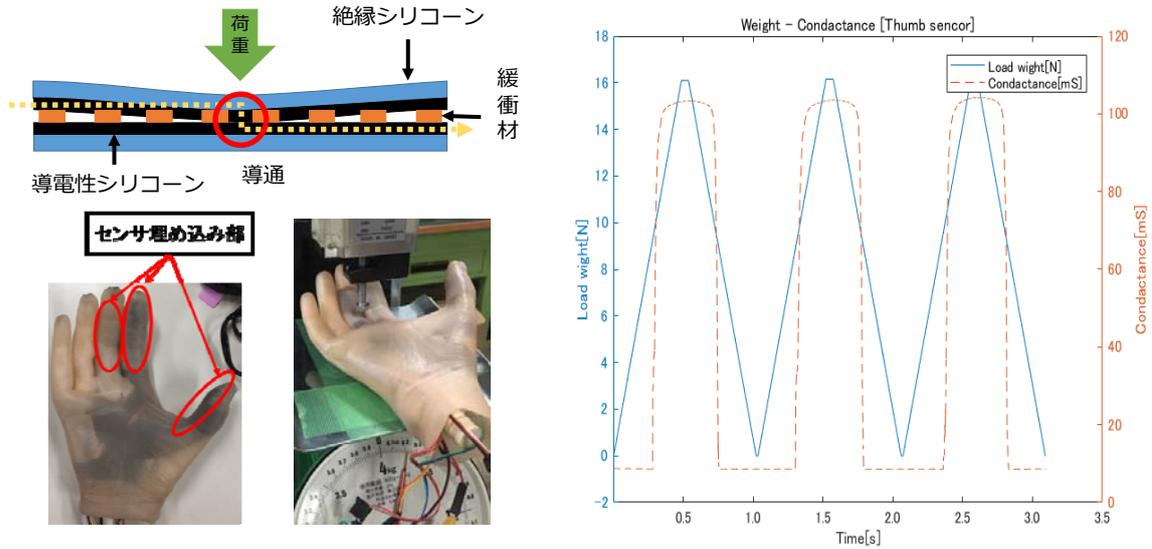


図3. 導電性シリコンを用いた感圧センサの開発。センサの構造（左上），筋電義手への実装と検証実験（左下），実験結果（右）。

また、開発したセンサは全てシリコンで覆われているため、防水性の付与に成功したと言える。実際に水槽内、すなわち水中での筋電の計測にも成功した。開発した柔軟センサを筋電義手システムに搭載し、物体の把持・動作実験を行った結果、センサの密着性が向上したことで、従来センサよりも実験成績が向上した。導電性シリコン材料を電気刺激用電極として応用し、格子状に配置した電極により、任意の電極間に電位を発生させることにより、多チャンネルの電気刺激を用いて前腕部を刺激することで、複雑な手指の運動を誘発することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計7件）

- ① 横井浩史, 東郷俊太, 姜銀来, 矢吹佳子, 村井雄太, 筋電制御システムに関する研究と義手への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.4, pp.19-24, 2019, 査読無
- ② 谷直行, 姜銀来, 東郷俊太, 横井浩史, 握力把握・精密把握における安定把持のための筋電義手用関節屈伸機構の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.2, pp.168-178, 2019, 査読有.  
DOI:10.7210/jrsj.37.168.
- ③ Yutaro Hiyoshi, Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Kenichi Takahana, Soichiro Morishita, Yinlai Jiang, Shunta Togo, Shinichiro Takayama, Hiroshi Yokoi, "Development of a parent wireless assistive interface for myoelectric prosthetic hands for children," Frontiers in Neurorobotics. 12(48), 2018, 査読有.  
DOI: 10.3389/fnbot.2018.00048.
- ④ Wentao Sun, Jinying Zhu, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, Qiang Huang, One-Channel Surface EMG Decomposition for Force Estimation, Frontiers in Neurorobotics, 12:20(vol.12, article 20), 査読有.  
DOI: 10.3389/fnbot.2018.00020.
- ⑤ 粕谷美里, 森下壮一郎, 姜銀来, 杉正夫, 横井浩史: "麻痺者上肢運動再建のための多点表面電極システムを用いた電気刺激における電極パターン探索手法の開発", 生体医工学誌, Vol.55(5), pp.193-204, 2017, 査読有.  
doi: https://doi.org/10.11239/jsmbe.55.193
- ⑥ Yusuke Yamanoi, Soichiro Morishita, Ryu Kato and Hiroshi Yokoi, "Development of myoelectric hand that determines hand posture and estimates grip force simultaneously", Biomedical Signal Processing and Control, Vol.38, pp.312-321, 2017,

査読有.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.06.019>

- ⑦ Yinlai Jiang, Takeru Togane, Baoliang Lu, Hiroshi Yokoi, sEMG Sensor Using Polypyrrole-coated Nonwoven Fabric Sheet for Practical Control of Prosthetic Hand, *Frontiers in Neuroscience*, 11:33, 2017, 査読有.  
doi: 10.3389/fnins.2017.00033

[学会発表] (計 15 件)

- ① Yuankang Shi, Shunta Togo, Yinlai Jiang, and Hiroshi Yokoi, Development of Soft Impedance Balancer for EMG Electrode, The 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, Aug. 2019.
- ② 村井 雄太, 星川 英, 矢吹 佳子, 東郷 俊太, 姜 銀来, 加藤 龍, 横井 浩史, 残存指を活用できる手部筋電義指システムの設計法の構築, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2018, GS-03-04 富山国際会議場, 2018 年 11 月 26 日. (ポスター)
- ③ 粕谷 美里, 桑原 昂士, 東郷 俊太, 姜 銀来, 杉 正夫, 横井 浩史, 二相性のバースト変調矩形波を用いた表面電気刺激による肘関節の発揮トルクの時間的遷移, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2018, GS03-08, 富山国際会議場, 2018 年 11 月 26 日. (ポスター)
- ④ Yasuhiro Mouri, Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Takumi Kato Hideki Ohmae, Yoshihiro Tomita, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, "Development of new flexible dry electrode for myoelectric sensor using conductive silicone," 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, pp.478-482, Shenzhen, China, Oct.25-27, 2018.
- ⑤ Susumu Kimizuka, Yutaro Hiyoshi, Hesong Ye, Shunta Togo, Youhei Tanaka, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, Development of an intuitive operation type shoulder prosthesis hand system using the surface myoelectric potential of trunk, 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, pp.597-602, Oct. 2018.
- ⑥ 君塚 進, 日吉 祐太郎, 叶 鶴松, 田中 洋平, 東郷 俊太, 姜 銀来, 横井 浩史, 体幹部の表面筋電位を用いた直感操作型肩義手システムの開発, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 3P2-04, 2018 年 9 月.
- ⑦ Yinlai Jiang, Yuta Murai, Shunta Togo, Yoshiko Yabuki and Hiroshi Yokoi, Materials for sEMG Sensor Used in Daily Life to Control Prosthetic Hand, The Irago(Interdisciplinary Research and Global Outlook) Conference 2017, Nov. 2017.
- ⑧ 毛利保寛, 矢吹佳子, 東郷俊太, 姜銀来, 横井浩史, "導電性高分子を用いた感覚フィードバックシステムに関する基礎研究", 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, pp171-174, 2017 年 11 月
- ⑨ 君塚進, 日吉祐太郎, 東郷俊太, 田中洋平, 姜銀来, 横井浩史, "両肩離断者のための表面筋電位を用いた電動肩義手の開発", 第 38 回バイオメカニズム学術講演会, pp167-170, 2017 年 11 月
- ⑩ 村井雄太, 矢吹佳子, 高木岳彦, 高山真一郎, 東郷俊太, 姜銀来, 横井浩史, "残存部位を有する手部欠損者用に適合する単自由度筋電義手システム", 第 33 回義肢装具学会全国大会, p126, 東京, 2017.10.
- ⑪ 矢吹佳子, 棚橋一将, 鈴木悠汰, 毛利保寛, 日吉祐太郎, 村井雄太, 東郷俊太, 姜銀来, 横井浩史, "筋電義手用装飾手袋の開発とその評価 —センサ機能を持つ装飾手袋の実現—", 第 33 回義肢装具学会全国大会, p127, 東京, 2017.10.
- ⑫ Yuta Murai, Yoshiko Yabuki, Masahiro Ishihara, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama, Shunta Togo, Jiang Yinlai, Hiroshi Yokoi, "Designs of Tailor-Made Myoelectric Prosthetic Hand for Trans-Metacarpal Amputations with Remaining Fingers and Joint Moving Functions", 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2017), pp119-124, Beijing, China, October 17. 2017
- ⑬ Chiaki Mizuochi, Yoshiko Yabuki, Yasuhiro, Mouri, Shunta Togo, Soichiro Morishita, Yinlai Jiang, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, "Real-time cortical adaptation monitoring system for prosthetic rehabilitation based on functional near-infrared spectroscopy", 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS 2017), pp130-135, Beijing, China, October 17. 2017
- ⑭ Yinlai Jiang, Yuta Murai, Taihei Kuwahara, Shunta Togo, Yoshiko Yabuki, Hiroshi Yokoi, "Conductive Silicon Based sEMG Sensor for Myoelectric Control of Prosthetic Hands: Structure Design and Evaluation", The 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (IEEE RCAR 2017), Okinawa, Japan, 2017.
- ⑮ 君塚 進, 叶 鶴松, 日吉 祐太郎, 谷 直行, 馮 翔, 田中 洋平, 森下 壮一郎, 東郷 俊太, 姜 銀

来, 横井 浩史, "多点計測手法を用いた肩周りの筋群における独立筋活動パターンの解析", 第32回ライフサポート学会大会(LIFE2016), 2A2-B02, 仙台, 9・2016.

〔図書〕(計3件)

- ① 横井 浩史, 矢吹 佳子, 村井 雄太, 雍 旭, 景 曉蓓, 東郷 俊太, 白 殿春, 朱 笑笑, 姜 銀来, "義肢ロボット開発の最新技術と今後の製品化展望", 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発, pp.230-249, (株)技術情報協会, 2018.
- ② 横井浩史, 矢吹佳子, 東郷俊太, 姜銀来, 加藤龍, 杉正夫, 第2章 電気刺激による運動と感覚の再生, 『オーグメンテッド・ヒューマン Augmented Human—AI と人体科学の融合による人機一体, 究極の IF が創る未来』, pp.41-58, NTS(株式会社エヌ・ティー・エス), 2018.
- ③ Yinlai Jiang, Shintaro Sakoda, Masami Togane, Soichiro Morishita, Baoliang Lu, Hiroshi Yokoi, A highly usable and customizable sEMG sensor for prosthetic limb control using polypyrrole-coated nonwoven fabric sheet, In Canjun Yang, G. S. Virk, and Huayong Yang Eds. Wearable Sensors and Robots, pp.105-110, Springer Singapore, 2016.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 信号測定装置, 及び信号測定方法

発明者: 横井浩史, 姜銀来, 東郷俊太, 矢吹佳子, 村井雄太

権利者: 国立大学法人電気通信大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-029981

出願年: 2017 年

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

横井・姜・東郷研究室 <http://www.hi.mce.uec.ac.jp/yklab/>

電気通信大学脳・医工学研究センター <https://www.uec.ac.jp/facilities/research/cnbe/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 姜 銀来

ローマ字氏名: JIANG YINLAI

所属研究機関名: 電気通信大学

部局名: 脳・医工学研究センター

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 70508340

※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。