

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月12日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01539

研究課題名(和文)福祉機器制御のための生体順応型sEMG計測法

研究課題名(英文)An Adaptable sEMG Measurement Method for Control of Welfare Machines

研究代表者

姜 銀来 (JIANG, YINLAI)

電気通信大学・脳・医工学研究センター・准教授

研究者番号：70508340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：sEMG (Surface Electromyography, 表面筋電図)は皮膚表面に付けた電極で計測した筋肉の活動電位の複合である。行動意図を反映しているため、福祉機器の制御信号として研究されている。本研究は、実用性の高いsEMGの計測と解析法を開発するために、電極と計測法と多チャンネルsEMGの選択法との3つの課題に取り組んだ。まず、導電性高分子材料と導電性シリコンゴムを用いて、柔軟で装着し易い乾式電極を開発した。次に、計測法の開発では、生体電気特性とsEMGの質との関係を明らかにした。最後に、多チャンネルの筋電計測システムを開発し、健康者と切断者の実験により有用性が検証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究で開発した筋電電極および筋電の計測回路は、ヒトの生体電気特性を考慮し、その特性にある程度適応できるようになっている。電極と回路開発の方法論は、筋電計測はもとより、脳波、眼電、など他の生体電気計測にも適用できる。

社会的意義：本研究の筋電電極と計測法は、障がい者にとって従来の物より使用し易い。また、個人特性を考慮したため汎用性も高い。筋電義手などの福祉機器を制御し易く、障がい者の自立生活の向上に役に立てる。

研究成果の概要(英文)：sEMG (Surface Electromyography) is the electric activity of groups of muscles measured with electrodes on the skin surface. Since it reflects motion intentions, sEMG has been studied as a signal to control welfare machines. This study investigated the electrodes, measurement method, and selection of multi-channel sEMG signals. Soft and wearable sEMG electrodes were developed with conductive polymers and conductive silicon. The relation between bioelectric characteristics and the quality of sEMG was elucidated. And a multi-channel sEMG measurement system was developed and validated with healthy subjects and amputees.

研究分野：生体医工学、ロボット工学

キーワード：筋電計測 筋電義手 導電性シリコン 生体インピーダンス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ある行動を行おうとする時、脳からの指令信号が神経筋接合部に伝わり、筋収縮をもたらす活動電位が発生し筋膜上を伝播する。sEMG は皮膚表面に付けた電極で計測した活動電位の複合であり、行動意図を反映しているため、福祉機器の制御信号として広く研究されている。整った実験環境で得られた sEMG より多数の行動意図が識別できる報告が多く挙げられたものの、実用環境においても安定性と使用性の高い sEMG 計測法はまだ確立されていない。福祉機器の利用者自身による sEMG 計測が難しく、得られる信号は不安定で S/N 比が低く、ほとんど ON/OFF スイッチとしてしか利用されていない現状にある。複数筋肉の筋電の ON/OFF の組み合わせと、多自由度筋電義手の動作と対応付けるコマンド方式の制御法が提案されているが、複数回の筋収縮で一つの動作パターンを表現することとなり、筋電制御の最大のメリットである直感性が失われてしまい、使いこなせるには長期間の訓練が要される。

実用環境でも、多自由度の福祉機器の制御に利用できる sEMG を計測するには、下記の課題を総合的・徹底的に解決する必要がある。

- (1). 電極の装着性と生体適合性の課題：肢体に不自由を持ち、筋生理の知識がない障がい者や高齢者でも一人で使えるため、装着性が高く求められる。皮膚との接触インピーダンス (IMP) を抑えて微弱な筋電信号が流れやすいように、電極の生体適合性が要求される。
- (2). 生体電気特性の不均衡と個人差の課題：障がい者は、生体電気特性の個人差が大きく、計測部位による電極間の不均衡が強く、誰にでも使える sEMG 計測法の開発が難題である。
- (3). 時変性と不安定性への対応の課題：電磁外乱、体の動き、外力などで安定的な計測が保証されない生活環境では、sEMG 信号の遷移や使用不能になった場合の対応が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、導電性高分子材料を用いた電極、個人差と不均衡を考慮した sEMG 導出法、sEMG の広域計測と選択法との3つの方面から、sEMG 制御の実用化を妨げる課題を解決することで、容易に使える sEMG 計測法の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

- (1). 生体適合性の良い高分子材料を用いた柔軟な sEMG 電極の開発と最適化  
電極の課題を解決するには、生体適合性の良い導電性高分子材料と導電性シリコンゴムを用いて、柔軟で装着し易い乾式電極を新たに開発する。材料の柔軟性により、電極と皮膚と密着し易く接触抵抗が抑えられる。リング状の伸縮バンド電極を配置することで、片手でも容易に装着できるようにする。
- (2). 生体電気特性の個人差と不均衡を補整できる導出法の開発  
導出法においては、生体電気特性の個人差と不均衡を補整できる回路の開発にチャレンジする。従来の導出法では、生体電気特性を整えるため、皮膚の油分や角質を落とす皮膚前処理を行うが、障がい者にとってそれは非常に難しい上、効果に限界がある。本研究は、生体の信号源 IMP 不均衡による影響を調査し、それに基づいた高 S/N 比の sEMG 計測回路を開発する。
- (3). 多チャンネル sEMG 計測と有効な sEMG 信号の選択。  
筋生理の知識を持たない福祉機器の利用者でも、電極位置の微調整をせずに sEMG 信号を計測できるようにする。特定の筋部位からの sEMG を狙う従来の電極装着法とは違い、本研究は、多チャンネル sEMG を計測することで電極位置を細かく調整する必要を無くし、ソフト的に信号の特徴量に基づいて信号の質を評価し有効なチャンネルの自動的に選択できるようにする。

以上の研究項目の遂行により、日常生活環境における筋電制御の課題を解決する生体順応型 sEMG 計測法を構築し、肢体不自由者・欠損者自身でも利用できる筋電制御法を開発する。

### 4. 研究成果

高分子材料を用いて柔軟な筋電電極を開発と基本性能の評価を行った。電極材料には導電性高分子材料 (ポリピロール, PPy) をコーティングした分裂繊維で作られた不織布と、導電性シリコンゴムを用いた。

ポリピロール不織布を用いた電極を図1に示す。ポリピロール不織布を伸縮バンドの内側に固定することで、繰り返し利用できる柔軟な乾式電極となる。この3チャンネルの筋電電極バンドは、切断者でも片手で容易に装着できるため、実用性が高い。電極の特性を定量的に調べるために、ポリピロール電極と従来の湿式電極 (電解ペーストのある Ag/AgCl 電極) と比較した。2種類の筋電電極を同じ筋繊維の筋電信号を配置し、2種類の電極で計測された信号の周波数成分は相関が高かった。さらに、2種類の電極で計測した筋電より5種類の動作を識別した正解率にも有意な差がなかったため、ポリピロール電極の有用性が確認できた。

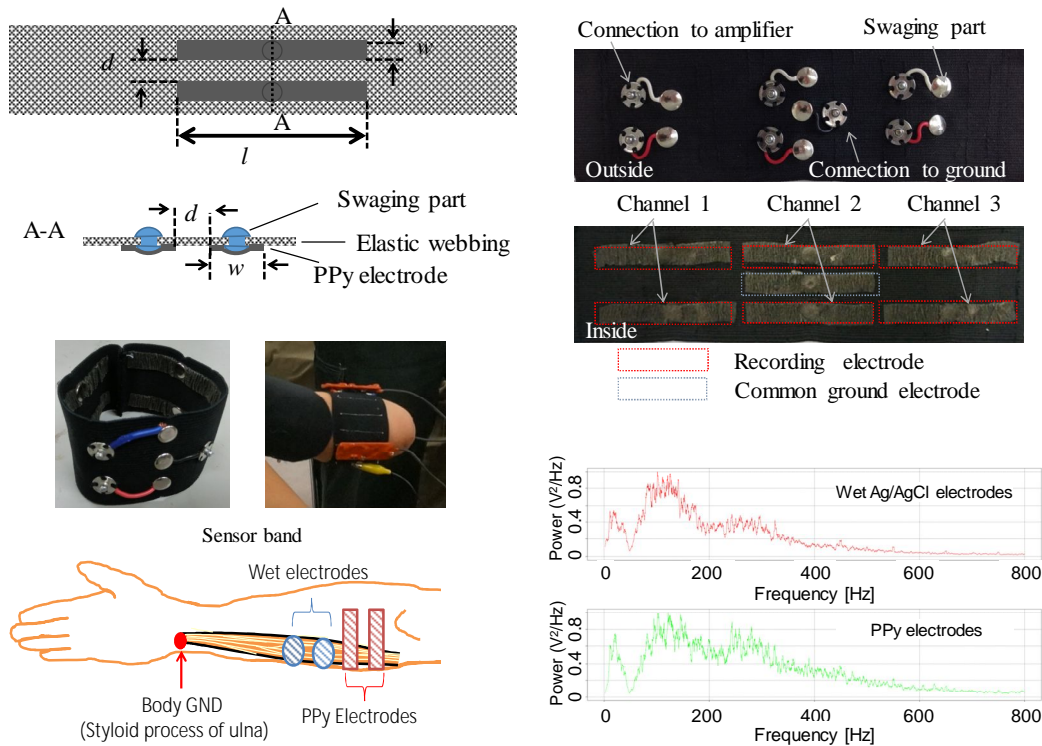


図 1. 導電性高分子材料（ポリピロール）を用いた筋電電極．設計図（左上），3チャンネルのセンサーバンド（右上），被験者装着の様子（左中），比較実験の設定（左下），信号周波数成分の結果（右下）

導電性シリコンゴム材料を用いた電極開発は図 2 に示す．二液性の絶縁シリコンに導電性カーボンブラックを混入することで，シリコンゴムに導電性を付与した．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．ポリピロール不織布を用いた電極と同様，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．また，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．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．電極の導電性が高いほど良いことではなく，最適濃度が 2~3% の間にあることが分かった．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．

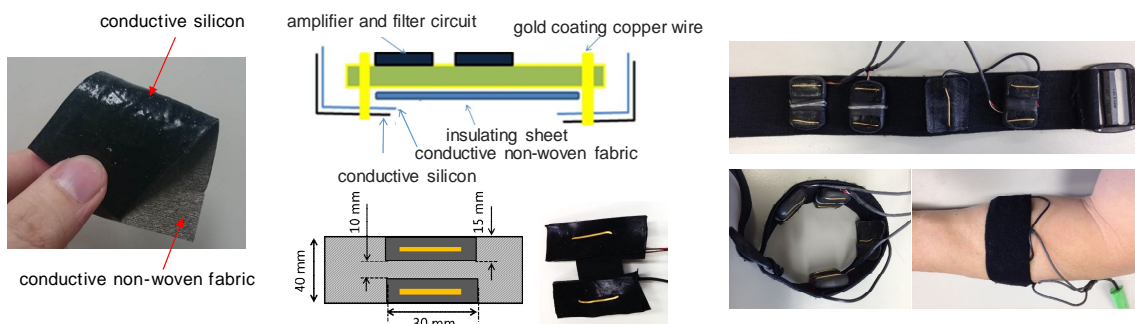


図 2. 導電性シリコンゴムを用いた筋電電極．導電性不織布に塗布した導電性シリコンゴム（左），筋電電極の設計（中），3チャンネルのセンサーバンド（右）．

筋電信号計測回路において，信号源インピーダンスの影響を調べるために，小型インピーダンス計測装置を開発し，筋電とインピーダンスとの同時計測を実現した（図 3 左）．可変抵抗 R1 と R2 を調整することで，筋電信号に 3 レベルのノイズ（図 3 右）を混入し，それぞれのレベルにおける信号源インピーダンスを計測した．表 1 に示した結果より，信号源インピーダンスの大きさと位相角の差は筋電信号の SN 比と高く関連することが判る．信号源インピーダンスの差に基づいた電極配置の探索，及び筋電信号の評価が可能となった．また，インピーダンスと筋電信号との両方を利用したマルチモーダルな識別方法の構築も可能となった．また，生体インピーダンスによる電極接触状況を判断する機能を開発した．筋電計測の参考電極が外れた状態や，電極の接触面積が少ない状態などを高い正解率で判断できることが確認された．

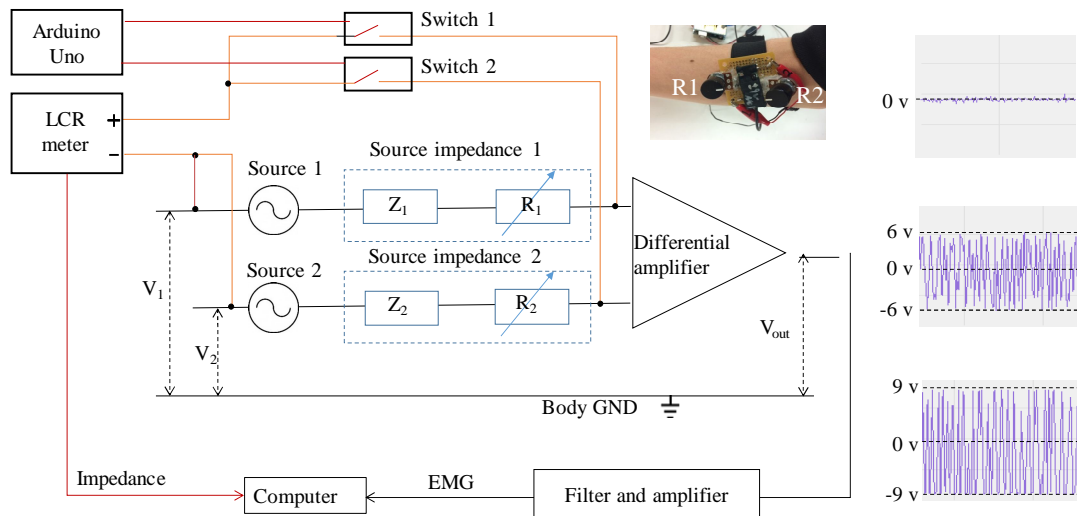


図 3. 筋電とインピーダンスの同時計測回路．筋電とインピーダンスを計測するスイッチング回路（左），ノイズ混入の 3 レベル（右）．

表 1. 3 レベルのノイズにおける信号源インピーダンスの差

	Noise level 1		Noise level 2		Noise level 3	
	Magnitude ( $\Omega$ )	Phase angle (degree)	Magnitude ( $\Omega$ )	Phase angle (degree)	Magnitude ( $\Omega$ )	Phase angle (degree)
1	1300	0.6	5300	6.4	18300	21.5
2	3000	0.2	6600	7.4	21700	22.9
3	3700	0.7	7500	5.5	12700	20.4
4	200	3.0	7200	4.8	16500	22.4
5	1400	4.1	7500	5.5	11800	40.3
6	600	0.4	9400	12.0	19000	40.8
7	1100	1.0	8300	11.6	28800	39.9
8	1600	0.5	9500	12.0	29600	41.1
9	1200	0.3	8700	12.2	24300	41.8
10	1500	0.6	8800	11.8	29800	40.5
Mean	1560	1.2	7880	8.9	21250	33.2
SD	1047	1.3	1320	3.2	6734	9.8

信号源インピーダンスと筋電信号の SN 比との関連に基づいて，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．

筋電信号の解析において，筋電信号の経時的変化に対応するために群知能を利用した新しい筋電識別法を構築した．筋電義手の制御に想定される 7 動作（安静，握り，開き，掌屈，背屈，手首の回内，回外）を用いた評価実験を行った結果，パラメータの最適化により，筋電義手を制御するための筋電信号を高精度で識別できることが確認された．

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計5件)

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.

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.

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.

Yinlai Jiang, Isao Hayashi, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Analysis of Time-Series Data Using Sliding Window based SVD for Motion Evaluation, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.21, No.7, pp.1240-1250, 2017, 査読有.

DOI: 10.20965/jaciii.2017.p1240

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)

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.

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.

Wenyang Li, Peng Chen, Dianchun Bai, Xiaoxiao Zhu, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, Design of a 2 Motor 2 Degrees-of-Freedom Coupled Tendon-driven Joint Module, 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.943-948, Oct. 2018.

Xiaobei Jing, Xu Yong, Tian Lan, Guanglin Li, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, Development of Tendon Driven Under-Actuated Mechanism Applied in an EMG Prosthetic Hand with Three Major Grasps for Daily Life, 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Madrid, Spain, pp.2774-2779, Oct. 2018.

李文揚, 陳鵬, 矢吹佳子, 姜銀来, 横井浩史, 東郷俊太, ワイヤ干渉駆動関節モジュールの分類と比較, 第36回日本ロボット学会学術講演会, 1A3-02, 2018年9月.

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.

Peng Chen, Wenyang Li, Yinlai Jiang, Dianchun Bai, Xiaoxiao Zhu, Shunta Togo, and Hiroshi Yokoi, Safety Control for Robotic Arm in Narrow Space Based on Distance Sensor, 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.66-70, Aug. 2018.

Akane Fujimoto, Naoya Matsumoto, Yinlai Jiang, Shunta Togo, Seiichi Teshigawara and Hiroshi Yokoi, Gait Analysis based Speed Control of Walking Assistive Robot, 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.88-92, Aug. 2018.

Yuki Kuroda, Shunta Togo, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, EMG Classification by Using Swarm Intelligence for Myoelectric Prosthetic Hand, 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.452-457, Aug. 2018.

Wenyang Li, Peng Chen, Yinlai Jiang, Dianchun Bai, Shunta Togo, and Hiroshi Yokoi, Structure Design of a Tendon-driven Robotic Arm Considering Safety and Durability,

2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.71-76, Aug. 2018.

Tomohiro Shimizu, Wenyang Li, Peng Chen, Yinlai Jiang, Shunta Togo, and Hiroshi Yokoi, Toward Automatic Tuning of Tendon-driven Mechanisms: Vibration based Detection of Tendon Tension, 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.389-394, Aug. 2018.

Takuma Harada, Shunta Togo, Yinlai Jiang, and Hiroshi Yokoi, Development of Myoelectric Prosthetic Hand Control System Using Mobile Terminal, 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp.551-556, Aug. 2018.

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.

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

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

〔図書〕(計2件)

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.

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 Huayang 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/ykclub/>

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: 横井 浩史

ローマ字氏名: YOKOI HIROSHI

所属研究機関名: 電気通信大学

部局名: 大学院情報理工学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90271634

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。