

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249025

研究課題名(和文) 脳の適応を誘導する人・機械・相互適応技術の開拓

研究課題名(英文) Human-machine mutual adaptation technologies that induce brain adaptation

## 研究代表者

横井 浩史 (Yokoi, Hiroshi)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人が自分の手として扱えるような人・機械相互適応型の筋電義手の研究開発を行った。高伸縮性を持つエラストマーゲル材料を用いて、手指表面のテクスチャをリアルに再現した人工皮膚を開発し、導電性シリコンで作った全方位センサを内蔵することで感圧機能を持たせ、機能的電気刺激を用いた感覚フィードバック機能を実現した。ワイヤ干渉駆動機構を用いて、高い把持力および運動自由度と軽量性とを両立した義手用ハンドとアームを開発した。脳波P300を用いた注目箇所の意図推定を行い、脳波による筋電義手制御について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we studied the technologies to develop the myoelectric prosthetic hand to substitute one's own hand by inducing the mutual adaptation between human and machine. A highly stretchable elastomer glove was developed by transcribing the texture of a human hand. Omnidirectional force sensors made of conductive silicon were embedded into the glove to introduce haptic function for sensory feedback. The interactive-tendon-driven mechanism was adopted in the design of robotic hand and arm to balance increasing their forces and functions with reducing their sizes and weights. To control a myoelectric prosthetic hand with electroencephalography (EEG) was also investigated in an experiment in which gaze points on the hand were identified from the P300 EEG response.

研究分野：ロボット工学，福祉医用機械

キーワード：人間機械システム 筋電義手 感覚フィードバック 干渉駆動 全方位センサ 機能的電気刺激

### 1. 研究開始当初の背景

筋電義手は、残存筋群の活動電位を電氣的に計測し、これを用いてロボット手を制御する機械システムである。手の機能を獲得する年齢には制限があり、手の制御を獲得する年齢は、2歳から6歳と言われている。このため筋電義手を使いこなせるには、適切な年齢にトレーニングを行う必要がある。しかしながら、手先を失う事故には、年齢の別はなく、様々な年齢層の方が筋電義手を利用できるような技術環境を整備する必要がある。

一方、感覚の適応には年齢制限がない。これまでの我々の行った触覚フィードバック付の筋電義手開発の研究において、触覚の感覚は、必ずしも手指や腕の位置にフィードバックする必要はなく、腹部の表面にフィードバックしたとしても、数分のトレーニングにより、腹部の感覚を手指の感覚として代用できること、脳の感覚野の反応もまた手先的位置に対応する部位の賦活として計測されることを明らかにしてきた。

### 2. 研究の目的

人が自分の手として扱えるような人・機械相互適応型の筋電義手を開発することが本研究の目的である。人・機械の相互適応の技術は、脳の可塑性を最大限に活用する方法と、人の意図を理解し適応する機械システムの開発がその主題となり、技術の根幹は、年齢によらず脳の再学習を誘発する方法、多元的感覚のフィードバックにより自己所有感を制御する方法、生体の意図信号を用いて機械を制御する方法の3つの方法より成る。これらの方法を構築することにより、成長段階に応じた筋電義手の使い方の教育、年齢を問わず適応できる筋電義手の開発、新しいタイプの知能機械を使いこなす巧緻性を明らかにすることが可能となる。本研究では、拇指の並立対向を含む5指の制御を可能とする感覚フィードバック付の筋電義手の製造と適用を目指す。

### 3. 研究の方法

目的を達成するための研究要素を、A)B)C)の3種類に分類し、実施する。

A) 手先をセンサとして使うための感覚フィードバック

任意のサイズのロボット手の感覚センサを造りだすために、感圧導電性を有する弾性材料を、指先に巻きつけることで全方位感覚センサを作った。センサ情報のフィードバック方法として、電気刺激のパラメータの最適化を検討した。

B) 5指独立動作を可能とする干涉駆動機構、情報処理法、筋電制御装置の開発

高い保持力および運動自由度と、軽量性とを両立するためにワイヤ牽引機構を採用し、パラレルワイヤ型干涉駆動関節機構を考案した。この干涉駆動構造を用いた肩と肘、手首の関節の構築と制御法を開発した。

C) 脳の適応状態の計測、意図推定

脳波 P300 を小型ワイヤレス脳波計で計測し、脳波 P300 に基づいて、被験者が動かしたい指を特定する意図推定法を開発する。また、筋電義手の動作に対する自己所有感に関して、人の操作性を逆転させた時の快不快状態を脳波信号獲得する実験を行う。

### 4. 研究成果

A) 手先をセンサとして使うための感覚フィードバック

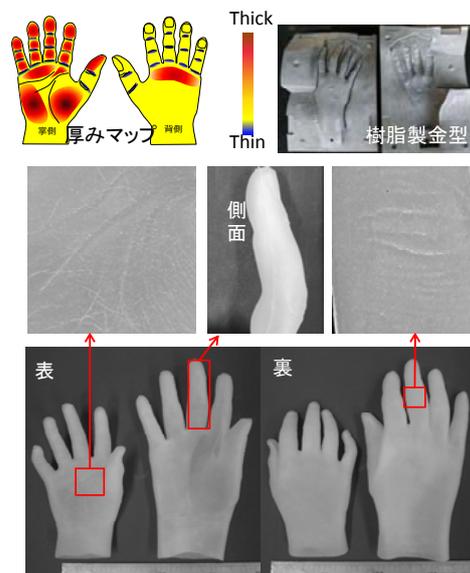


図1 義手用人工皮膚の開発

手指表面のテクスチャを模倣し、高伸縮性を持つエラストマーゲル材料を用いて、指紋、掌紋、しわ、および血管による突起などをリアルに再現した人工皮膚を開発した。ヒトの手を石膏モデルで採型し、その石膏モデルから指紋やしわのテクスチャを再現し、樹脂製金型を作成した。人工皮膚の厚さは、義手の把持性能と動作時の反力を影響するため、安定した把持ができることと、動作時の反力を抑えることを目標に、手の甲側については皺の部分を薄くすることで曲げやすくなるようにしたり、指の中腹よりも指先や母指の付け根を肉厚にしたりするなどして、義手と追従し自然な曲げや掴みを行えるものとした。インジェクション成型によって、内型と外型のクリアランスを調整することで、厚みをコントロールすることを可能とした。

開発した人工皮膚に全方位の感圧センサを内蔵するために、シリコーンゲルとカーボンブラックとを配合した導電性材料を人工皮膚の内側に塗布することで、コスメティック性、伸縮性、導電性を有した人工皮膚を実現した。図2に示すように、義手に感覚フィードバック機能を持たせるため、人工皮膚の内面に導電性のカーボン粒子を配合した導電性シリコンを転写し、義手骨格に導電性不織布電極を取り付けることで装飾性、軽量、薄型、柔軟、省配線な全方位感圧センサを開発

した。提案するセンサは配置方向に対応した選択性のあるセンサであり、それぞれが線形的な圧力特性を示すことを確認した。

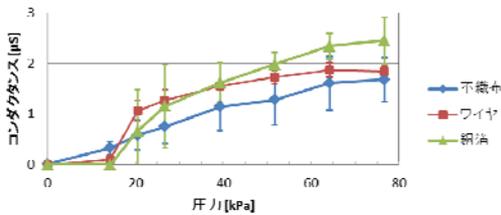
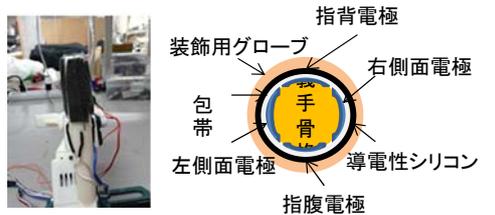


図2 全方位感圧センサ

機能的電気刺激を使った感覚刺激を行うために、電気刺激によって生じる感覚の種類から電気刺激で生じる不快感を定義し、不快感の軽減ができるパラメータの存在が示された。本研究ではラピッドプロトタイピングのためマイコンボードのモジュール mbed NXPLPC1768 を使用し、刺激波形の生成及び振幅の設定を自由にできる基板を開発した。図3に示している小型電気刺激装置の大きさは9.5cm×7cmに高さは5cmとなっている。

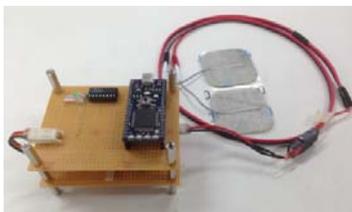


図3 小型電気刺激装置

電気刺激によって生じる不快感の種類を調べるために刺激パラメータを変化させた際に生じる不快感の種類を調査実験を行った。電流制御型のFES装置を用いて、刺激周波数と刺激波形を探索した。ピリピリ感による不快を感じることなく関節駆動が可能になるダイナミックレンジ及び振動感による不快を感じることなく関節駆動が可能になるダイナミックレンジの2つの評価値において、値が大きかったのは2000, 4000[Hz]の周波数であることが示された。よって本研究における探索空間においては2000-4000[Hz]の高周波で関節駆動が可能であり、不快感の軽減ができる電気刺激パラメータの存在が示された。

B) 5指独立動作を可能とする干渉駆動機構、情報処理法、筋電制御装置の開発

従来採用していた拇指の2自由度干渉駆動

関節では関節可動域、駆動出力のさらなる最適化が困難であったため、拇指の内外転と伸展・屈曲機構をそれぞれ独立自由度にて設計することで把持における拇指への外力を部材で支え、かつ拇指球筋部のスペースを有効活用した牽引ワイヤの動力伝達機構を開発した。これにより他の4指と対立する拇指にその役割を果たすために十分な負荷トルクを付与することが可能となった。

高い把持力および運動自由度と、軽量性とを両立するためにワイヤ牽引機構を採用し、平行ワイヤ型干渉駆動関節機構を考案した(図4, 図5)。干渉駆動関節の角度の制御精度を向上させるため、関節独立駆動の場合と干渉駆動の場合のワイヤ牽引量と関節角のモデル、およびモータ回転角とワイヤ牽引量とのモデルを構築した。またモデルにあるパラメータの最適化を行うため、パラメータのキャリブレーションの方法を提案した。このモデルに基づいたオープンループ制御は、関節角度を従来手法より高い精度(85%~91%)で制御できた。

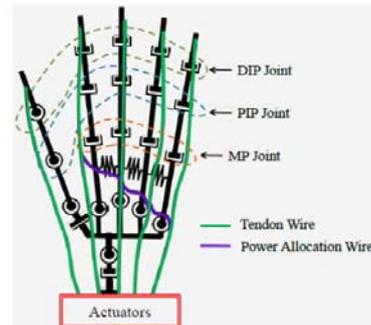


図4 ワイヤ型干渉駆動型ロボットハンド

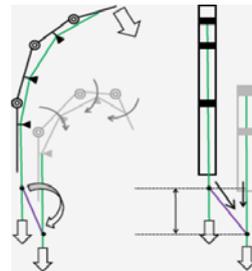


図5 平行ワイヤ型干渉駆動関節機構

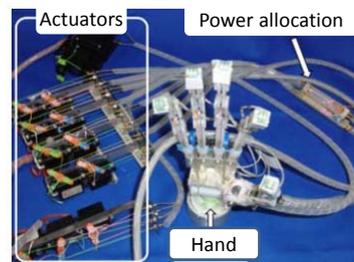


図6 製作したロボットハンド

図6に実際製作したロボットハンドを示した。このハンドは5指を独立に制御できるため、様々な把持姿勢やジェスチャーを行うことができる(図7)。

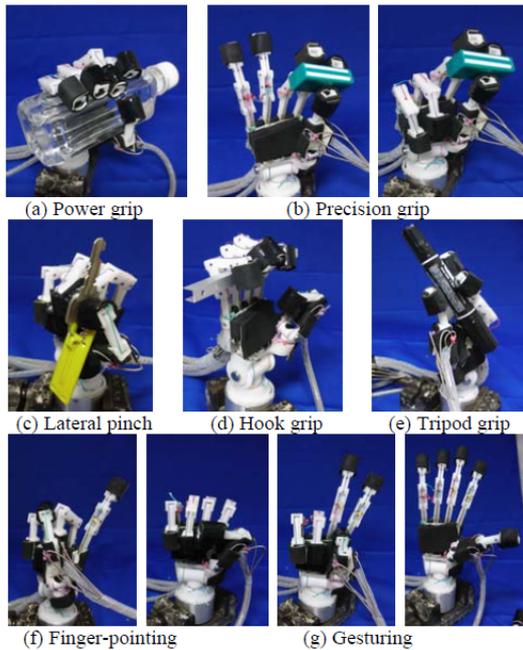


図7 物体把持とジェスチャー

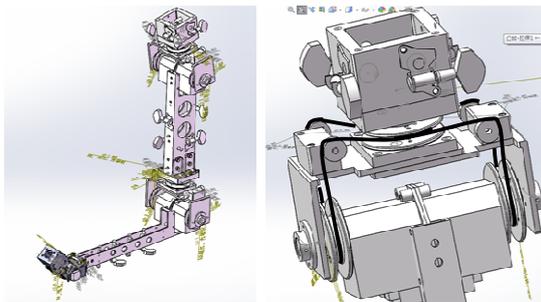


図8 ワイヤ干渉駆動(右)を用いた  
ロボットアーム(左)

ワイヤ干渉駆動を生かして、2自由度の肩、肘、手首の関節を持つロボットアームを開発した(図8)。上腕切断者もロボットアームとハンドを利用できるように、意図推定に利用する信号として、大胸筋と広背筋の筋電に限らず、頭部の生体信号(筋電、眼電、EEG)も併用するシステムを構築した。更に、生体信号から識別できるパターン数が少ない場合でも対象物を操作可能なように、対象物をカメラで自動検知し、逆運動学に基づいてアームとハンドの関節角を推定し、自動的に制御する方法を開発した。

#### C) 脳の適応状態の計測、意図推定

感覚フィードバックの時間進みと遅れの制御を用いた自己所有感の誘導。筋電義手の動作に対する自己所有感に関する基礎実験として、人の操作性を逆転させた時の快不快状態を脳波信号から獲得可能かの検証実験を行った。マウスポインタをターゲット領域に移動させるタスクにおいて、マウスポインタの移動方向を反転させる条件を一定割合で行わせることによって操作の困難さを導

入し、その際の脳波から快不快信号の検出を試みた。その結果、反転させた直後(1[s])に脳波の変化が確認された。

また、脳信号による制御を実現するため、脳波 P300 を用いた注目箇所の意図推定法の開発した。指にランダムに点滅するLEDを取り付け、LED を注目する際に被験者の脳波 P300 を小型ワイヤレス脳波計 Emotive Eoc で計測し、脳波 P300 に基づいて、被験者を動かしたい指を特定する意図推定法を開発した(図9)。意図推定の精度の個人差があるものの、長期間(3ヶ月)の訓練により、90%の精度が得られる可能性が示された。

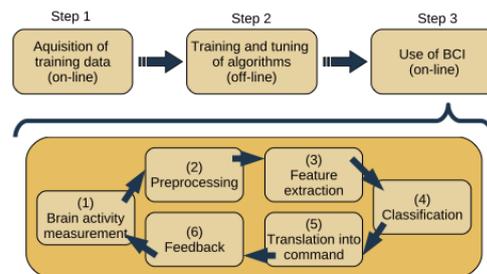


図9 脳波 P300 を用いた注目箇所の意図推定

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

- ① 星川英, 迫田辰太郎, 山野井佑介, 加藤龍, 森下壮一郎, 中村達弘, 關達也, 姜銀来, 横井浩史, 基本把持機能を有する簡易型筋電義手の開発と評価, 知能と情報, Vol. 27, No. 6, pp. 885-897, 2015. (査読有)  
DOI:10.3156/jsoft.27.885
- ② 粕谷昌宏, 加藤龍, 横井浩史, 時系列情報を用いた筋電パターン識別精度向上フィルタの提案, 生体医工学, Vol. 53, No. 3, pp. 217-224, 2015. 10. (査読有)  
DOI:10.11239/jsmbe.53.217
- ③ Soichiro Morishita, Keita Sato, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Tadashi Isa, Ryu Kato, Tatsuhiro Nakamura and Hiroshi Yokoi. Brain-Machine Interface to Control a Prosthetic Arm with Monkey ECoGs during Periodic Movements. Frontiers in Neuroscience, Volume 8, Article 417, 2014(査読有)  
DOI: 10.3389/fnins.2014.00417
- ④ Tatsuya Seki, Tatsuhiro Nakamura, Ryu Kato, Soichiro Morishita, and Hiroshi Yokoi, Development of Five-Finger

Multi-DoF Myoelectric Hands with a Power Allocation Mechanism. Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 4, 97-105, 2014(査読有)

URL: <http://www.davidpublishing.com/show.html?15542>

[学会発表] (計 17 件)

- ① Yinlai Jiang, Shintaro Sakoda, Takeru Togane, Soichiro Morishita, Baoliang Lu, Hiroshi Yokoi, A Highly Usable and Customizable sEMG Sensor for Prosthetic Limb Control Using Polypyrrole-coated Nonwoven Fabric Sheet, IEEE SENSORS2015, pp. 1-4, Busan, Korea, Nov. 2015.
- ② 山野井佑介, 森下壮一郎, 加藤龍, 横井浩史, Bilateral Training を利用した表面筋電位からの把持姿勢識別及び把持力推定手法, 日本ロボット学会学術講演会, 東京, 2015 年 9 月.
- ③ 星川英, 加藤龍, 中村達弘, 關達也, 姜銀来, 横井浩史, 基本的な ADLs を実現させる 2 自由度筋電義手の構造設計, 日本ロボット学会学術講演会, 東京, 2015 年 9 月.
- ④ Daiki Suzuki, Yusuke Yamanoi, Hiroshi Yamada, Ko Wakita, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Grasping-posture classification using myoelectric signal on hand pre-shaping for natural control of myoelectric hand, 2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, Boston, USA, May. 2015.
- ⑤ Yusuke Yamanoi, Soichiro Morishita, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Selective Linear-Regression Model for Hand Posture Discrimination and Grip Force Estimation using Surface Electromyogram Signals, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milano, Italy, Aug. 2015.
- ⑥ Masahiro Kasuya, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Analysis and Optimization of Novel Post-processing Method for Myoelectric Pattern Recognition. International Conference on Rehabilitation Robotics, Singapore, Aug. 2015.
- ⑦ Suguru Hoshigawa, Yinlai Jiang, Ryu Kato, Soichiro Morishita, Tatsuhiro Nakamura, Yoshiko Yabuki, Hiroshi Yokoi, Structure Design for a Two-DoF Myoelectric Prosthetic Hand to Realize Basic Hand Functions in ADLs," 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milano, Italy, Aug. 2015.
- ⑧ Hesong Ye, Shintaro Sakoda, Yinlai Jiang, Soichiro Morishita, Hiroshi Yokoi, Pinch-Force-Magnification Mechanism of Low Degree of Freedom EMG Prosthetic Hand for Children, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milano, Italy, Aug. 2015.
- ⑨ Xiaobei Jing, Xu Yong, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, and Ryu Kato, A low-degree of freedom EMG prosthetic hand with nails and springs to improve grasp ability, Proceedings of the 2014 7th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics : 466-471, Oct. 2014
- ⑩ Xu Yong, Xiaobei Jing, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, and Ryu Kato, Tendon drive finger mechanisms for an EMG prosthetic hand with two motors, Proceedings of the 2014 7th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics : 472-476, Oct. 2014
- ⑪ 山野井佑介, 加藤龍, 横井浩史, 筋電義手による自然な物体把持のための把持姿勢及び把持力推定手法, 第 15 回日本電気生理運動学会大会抄録集, pp. 3-4, 2014.
- ⑫ 鈴木大輝, 山野井佑介, 加藤龍, 横井浩史, プリシェイピング中に計測される表面筋電位を用いた物体の把持姿勢の識別, 第 15 回日本電気生理運動学会大会抄録集, pp. 5-6, 2014
- ⑬ 坂井郁也, 森下壮一郎, 關達也, 渡辺秀典, 西村幸男, 加藤龍, 伊佐正, 横井浩史, 部分最適線形判別析による筋電位からのリーチングタスク中運動状態部分最適線形判別, 第 15 回日本電気生理運動学会大会抄録集, pp. 17-18, 2014
- ⑭ 高澤駿介, 關達也, 加藤龍, 横井浩史, ロボットハンドのすべり関節のための自動回復機能を有する靭帯機構の開発, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1P3-02, 2014
- ⑮ 坂井郁也, 森下壮一郎, 西村幸男, 渡辺秀典, 加藤龍, 梅田達也, 伊佐正, 横井浩史, サル硬膜下電位からのリーチングタスクの状態判別率向上を目指した次元圧縮法, 第 26 回自律分散システム・シンポジウム, 21-26, 2014.
- ⑯ Masahiro Kasuya, Masatoshi Seki, Kazuya Kawamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Hiroshi Yokoi, Robust grip force estimation under electric feedback using muscle stiffness and electromyography for powered prosthetic hand, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation : 93-98, May 2013.
- ⑰ Tatsuya Seki, Tatsuhiro Nakamura, Ryu Kato, Soichiro Morishita and Hiroshi Yokoi, Development of Five-Finger

Multi-DoF Myoelectric Hands with a Power Allocation Mechanism, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2046-2051, May 2013.

[図書] (計4件)

- ① Hiroshi Yokoi, Yuki Sato, Minako Suzuki, Yoshiko Yabuki, Tatsuhro Nakamura, Takashi Mori, Soichiro Morishita, Ryu Kato, Osamu Yamamura, Masafumi Kubota, Tomoko Kamisawa, Chiaki Igarashi, Tadashi Isa, Tatsuya Umeda, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Katsunori Ikoma, and Tamaki Miyamoto, Engineering Approach for Functional Recovery Based on Body Image Adjustment by Using Biofeedback of Electrical Stimulation, Chapter 12 Clinical Systems Neuroscience: pp.203-247, Springer Neuroscience: pp.203-247, Springer Japan, 2015 (分担執筆)
- ② 森下 壮一郎, 横井 浩史, ロボティクスによる上肢運動機能再建のためのBMI, 医歯薬出版株式会社: 99-104, 2014/01
- ③ 横井浩史, 他, 2章 日常生活のサポート技術, 2.2節 移動支援, 2.2.6項 義肢(義手・義足), 電気学会125年史(1888-2013), 一般社団法人電気学会: 471-473, 2013/10 (分担執筆)
- ④ 横井浩史, 加藤龍, 中村達弘, 森下壮一郎, 福祉技術ハンドブックー健康な暮らしを支えるために、朝倉書店: 218-225, 2013/10/24 (分担執筆)

[産業財産権]

○出願状況 (計6件)

名称: 時系列情報を用いた筋電パターン識別方法及び筋電義手

発明者: 粕谷昌宏, 横井浩史, 加藤龍

権利者: 国立大学法人電気通信大学, 株式会社メルティン MMI

種類: 特許

番号: 特願 2015-212840

出願年月日: 2015/10/29

国内外の別: 国内

名称: プローブのホルダー

発明者: 横井浩史, 布山陽介

権利者: 国立大学法人電気通信大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-188245

出願年月日: 2015/09/25

国内外の別: 国内

名称: モータ駆動ハンド

発明者: 横井浩史, 叶鶴松, 姜銀来, 森下壮一郎, 迫田辰太郎

権利者: 国立大学法人電気通信大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-165296

出願年月日: 2015/08/24

国内外の別: 国内

名称: インターフェイス部品, インターフェイス装置, および, アシスト装置

発明者: 横井浩史, 姜銀来, 矢吹佳子, 迫田辰太郎, 棚橋一成, 棚橋一将

権利者: 国立大学法人電気通信大学, 株式会社タナック

種類: 特許

番号: 特願 2015-163683

出願年月日: 2015/08/21

国内外の別: 国内

名称: 掌部残存機能を利用した摘み機構

発明者: 横井浩史, 石原正博

権利者: 国立大学法人電気通信大学, 東名ブレース株式会社

種類: 特許

番号: 特開 2015-146839

出願年月日: 2014/02/04

国内外の別: 国内

名称: 指部残存機能を利用した義指屈伸機構

発明者: 横井浩史, 石原正博

権利者: 国立大学法人電気通信大学, 東名ブレース株式会社

種類: 特許

番号: 特開 2015-146998

出願年月日: 2014/02/08

国内外の別: 国内

[その他]

横井研究室

<http://www.hi.mce.uec.ac.jp/yklab/>

独立行政法人国立成育医療研究センター

<http://www.ncchd.go.jp/index.php>

北海道大学病院

<http://www.huhp.hokudai.ac.jp/>

電気通信大学 下条・明研究室

<http://www.rm.mce.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

高山 真一郎 (TAKAYAMA Sinichiro)

国立研究開発法人国立成育医療研究センター  
臓器・運動器病態外科部・部長

研究者番号: 40138045

生駒 一憲 (IKOMA Katsunori)

北海道大学大学院・教授

研究者番号: 70202918

下条 誠 (SHIMOJO Makoto)

電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授  
研究者番号: 90292474

加藤龍 (KATO Ryu)

横浜国立大学大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 70516905