

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26242061

研究課題名(和文) 身体への融合を脳内に誘発する福祉ロボットの制御技術に関する研究

研究課題名(英文) Research of a Control Method of Rehabilitation Robot to Induce Embodiment in the Brain

研究代表者

藤江 正克 (Fujie, Masakatsu)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：20339716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：少子高齢化が進む現代社会において、身体機能を支援するロボット技術が期待されている。従来の福祉ロボットは、特定部位の支援のみを行うため他の部位に代償として負荷をかけるという問題がある。ロボットが操作者の身体の一部として機能することにより全身の各部位への負荷が少ない福祉ロボットの早期の社会実現を目指し、主な応用先は四肢の代わりに義肢を選定した。本研究は、使用者が脳内でロボットを自身の身体の一部として知覚可能なロボットの制御手法の開発を目的とし、課題を(A)身体化を脳内に誘発可能な制御、(B)身体化を知覚可能な義肢の実装、(C)身体化による全身協調動作の評価、の3つに分けて実施した。

研究成果の概要(英文)：Rehabilitation robot technology for assisting the body function has been expected in the super-aged society in Japan. The conventional robot has a problem that causes compensatory movement in other part of the body by assisting specific part of the body. We choose a prosthesis to substitute limbs as an application destination to aim for early social realization of the rehabilitation robot. This robot can provide less load on parts of the whole body by working as a part of the operator's body. In this research, the goal is to develop a control method of the rehabilitation robot to induce embodiment in the brain. We categorized the task and carried out to reach this goal as follows: (A) Control strategy to induce embodiment in the brain, (B) Installation of the prosthesis that can perceive embodiment, (C) Evaluation of whole-body cooperative movement caused by embodiment.

研究分野：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：福祉ロボット ヒューマンインタフェース 生体情報・計測 認知モデル

# 様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

少子高齢化の進む現代社会において、医療・福祉・看護・生活支援サービス等の幅広い分野でロボット技術による支援が期待されている。従来の福祉ロボットは、上肢や下肢等、特定の疾患部位の支援のみを考慮して開発されてきたため、他の部位に代償として負荷をかけるという問題点がある。全身の各部位に負荷の少ないロボット支援を実現するためには、ロボット・人間を一体化させた一個体として全身に協調させて制御するロボットが必要である。ロボットが操作者の身体の一部として機能し、協調性を高めるためには、人間の認知機能に合わせた制御により、ロボットが人間の身体へ融合するような感覚を脳内に誘発可能なハード・ソフトウェア技術が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、全身における神経筋骨格・運動系に認知機能を加えた制御を目指し、使用者が脳内でロボットを自身の身体の一部として知覚可能な制御技術の開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、「道具の身体化」という脳内の認知モデルをロボットの制御技術に活用する身体化技術を開発した。身体化技術の構築を行う上で、理論的考察のみならず実証を重視しており、ハード・ソフトウェアの設計開発を行った後に実証実験による評価を行った。したがって、研究課題を制御・実装・評価の3点に分けて実施した。

- (1) 身体化を脳内に誘発可能な制御
- (2) 身体化を知覚可能な義肢の実装
- (3) 身体化による全身協調動作の評価

上記3点の課題に基づき、身体の一部として知覚可能な福祉ロボットの早期の社会実現を目指して、主な応用先は四肢の代わりを為す義肢を選定した。

## 4. 研究成果

使用者にロボットを身体の一部として知覚することを促進する制御手法構築に向けて行った研究の成果を、制御・実装・評価に分けた研究課題ごとに記載する。最後に本研究を実施したことにより得られた成果をもとに今後の展望を述べる。

### (1) 身体化を脳内に誘発可能な制御

本研究において対象とする義肢の中でも電動義手に関する制御手法に関して、主に2つの手法を提案した。1つめは筋収縮に基づく前腕皮膚表面における筋隆起位置変化を用いた意図する動作量の推定手法である。筋隆起位置は、筋収縮による筋肉の機械的な変形に基づき筋附着方向に沿って皮膚表面上で変化する。本研究では、前腕切断者の意図する手関節角度に対する断端の筋隆起位置を計測(図1)することで、両者の関係を明らかにし、筋隆起

位置が意図する手関節角度の推定に有用であるという結果を得た。2つめは図2に示す断端の表面筋電位信号を用いた筋電パターン識別手法である。切断者の意図する手指動作のパターンに対し、表面筋電位から高精度のパターン識別手法を構築した。識別された筋電パターンの時系列情報を蓄積することにより識別精度を向上した。

以上2つの制御手法において、前腕切断者が意図する動作量の推定と動作パターンの識別に関する手法を検討した。結果として、操作者が身体に装着したロボットを身体の一部として、意図した動作に応じて操作可能とする制御手法が実現可能となる。

### (2) 身体化を知覚可能な義肢の実装

ロボットを装着する操作者にとって身体の一部として知覚可能な義肢を開発するため、低自由度の義手、義手操作のための筋電センサ、義手の表面に装着するグローブを開発した。また、3Dプリンタを使用して部品を作製する義手の開発に伴い、3Dプリントによる造形物の評価手法を提案した。低自由度の義手は、日常生活動作において使用頻度の高い握力・精密・把握把持の3種の基本把持機能を有した電動義手(図3)である。上肢切断者が装着可能とするため、前腕部のソケットとともに筋電信号計測用のセンサを開発した。開発したセンサは、電極部に導電性ポリマーを使用することで、伸縮可能な筋電センサバンドを作製し、ソケット内で装着可能とした。

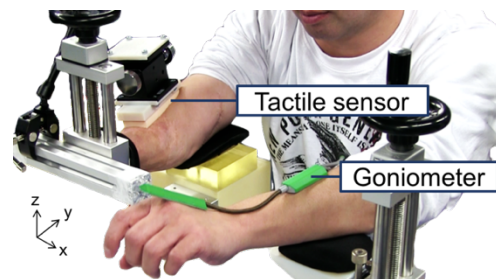


図1 前腕切断者における筋隆起の計測

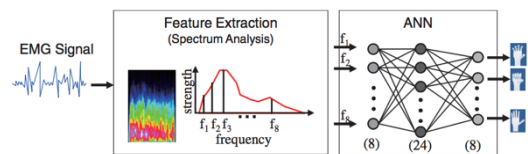


図2 筋電信号に基づく動作パターン識別



図3 簡易型筋電義手



図4 筋電義手用グローブ

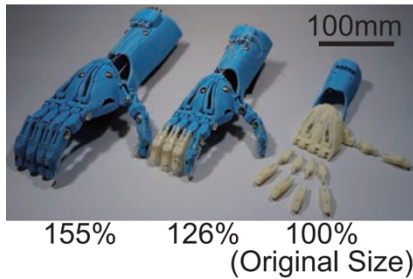


図5 3D プリント義手部品の製作

また、義手を用いて日常生活動作を行う際の操作性評価を行うため、これまでの義手の可動域を制限してしまうポリ塩化ビニルに対し、エラストマー製の義手用手袋を作成した(図4)。最後に、3Dプリンタによって造形した義手の部品の強度試験を行う評価手法を検討した。3Dプリンタを用いた部品の作製は安価にカスタマイズが可能であり、ユーザに合わせたオーダーメイドの部品を作成可能である。しかし、完成した部品の強度試験が行われていないため、日常生活での使用可能性については未知数である。そこで、オープンソースとして公開されている小児用義手を対象とし、サイズを変えた場合の、部品ごとの引張強度試験を行った(図5)。結果として、プリント時の部品の積層方向を考慮した部品の設計が必要であることがわかった。

### (3) 身体化による全身協調動作の評価

身体化は体内の感覚である体性感覚と体外の感覚である視覚や触覚との整合性に寄ってもたらされるため、本研究では感覚の整合性を合わせやすい一次操作系と感覚の整合性が合わせにくい二次操作系に分別して検証を行った。

一次操作系としては、電動義手の操作における評価として、以下の2つの評価を行った。1つめは非切断者において上肢の特定の自由度を拘束した際に他の自由度に生じる代償動作の評価である。非切断者において手関節・肘関節・肩関節をそれぞれ拘束具により固定した状態で手先位置の細かい制御が必要な書字動作を行った際の、各上肢部位の3次元位置座標を計測した。計測結果から、各部位の座標から書字タスク時の躍度を計算することで、拘束部位に応じた代償動作を評価可能であることがわかった。また、上肢切断者において(2)において開発した簡易型筋電義手を用いて日常生活タスクにおける操作性評価を行った

(図6)。物を掴む・投げる・運ぶなどの動作に対し、事前に学習させた基本把持動作を切断者の表面筋電位に基づき高精度に識別することで意図通りの動作を出力可能であることがわかった。二次操作系として、間接的に操作時の情報が人間にフィードバックされるマスタ・スレーブ方式である手術支援ロボットにおいて操作時の脳活動情報をNIRSにより計測した(図7)。スレーブ側における視覚とマスタ側における体性感覚の一致度合いを動作の処理を司る頭頂間溝の脳活動計測により評価を行った。手術支援ロボットの鉗子の表示位置を変えた際に、最も脳活動が賦活する条件があることを明らかにし、ロボット設計に必要なパラメータの決定に頭頂間溝の計測が有用であることがわかった。

本研究では、使用者が脳内でロボットを自身の身体の一部として知覚可能な制御技術の開発を目的とした。主に電動義手を対象として制御・実装・評価の3つの課題に分けて研究を実施し、ロボットの身体化技術に必要なハード・ソフトウェアの開発を行った。本研究は、欠損した身体の一部の機能を補填する技術である電動義手に焦点を当てて取り組むことで、実際の使用者である切断者における臨床評価に至っており、理論的考察のみならず実社会に直接還元可能な技術の開発を行ったため複数件の特許出願に至った。これらの成果により、今後は義肢のみならず、操作を有するあらゆるロボット技術への適用を行っていく。操作者がロボットを操作する際に身体の一部として知覚可能なロボットの設計指標や制御手法ならびに評価手法を用い、自動車の自動運転技術や原子力発電所内で操作するロボットへの応用を行う。

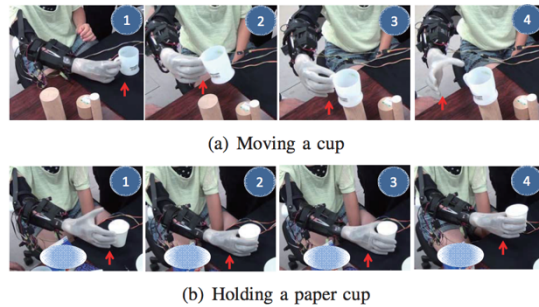


図6 上肢切断者における義手操作性評価

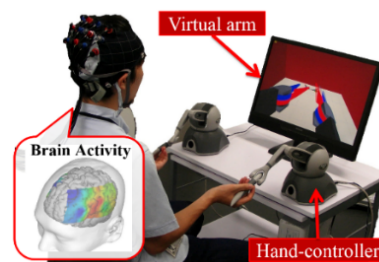


図7 脳活動計測に基づく手術支援ロボットの操作性評価

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- [1] Shunta Togo, Toshinori Yoshioka, Hiroshi Imamizu, “Control strategy of hand movement depends on target redundancy”, Scientific Reports, 有, Vol. 7, No. 45722, 2017
- [2] 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, 有, Vol. 11, No. 33, 2017
- [3] 矢吹佳子, 棚橋一将, 星川英, 中村達弘, 姜銀来, 加藤龍, 横井浩史, “エラストマーゲルを用いた筋電義手のための装飾手袋の開発”, 日本義肢装具学会誌, 有, 第 32 卷 3 号, 177-185, 2016
- [4] 粕谷昌宏, 加藤龍, 高木岳彦, 伊藤寿美夫, 高山真一郎, 横井浩史, “身体を拡張する筋電義手: “障害”を再定義するテクノロジーの実現を目指して”, 情報管理, 有, Vol. 58, No. 12, 887-899, 2016
- [5] 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”, 生体医工学誌, 有, Vol. 53, No. 4, 217-224, 2015
- [6] 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, 有, Vol. 27, No. 6, 885-897, 2015
- [7] Soishiro Morishita, Keita Sato, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Tadashi Isa, Ryu Kato, Tatsuhiko Nakamura and Hiroshi Yokoi, “Brain-Machine Interface to Control a Prosthetic Arm with Monkey ECoGs during Periodic Movements”, Frontiers in Neuroscience, 有, Vol. 8, No. 417, 1-9, 2014
- [8] 中島康貴, 渡辺峰生, 井上淳, 川村和也, 藤江正克, “理学療法士の介助動作を規範とする歩行訓練ロボットののためのハンドリング動作の力学モデルの構築”, バイオメカニズム, 有, 22 卷, 237-248, 2014

[学会発表] (計 50 件)

- [1] Akira Kato, Yuya Matsumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, “Joint Angle Estimation using the Distribution of the Muscle Bulge on the Forearm Skin Surface of an Upper Limb Amputee”, IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC 2016), Sep. 9-14, Budapest, Hungary, 2016
- [2] Akira Kato, Yuya Matsumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, “Wrist Joint Angle Estimation by Means of Muscle

Bulge based on Deformation of the Forearm Skin Surface”, World Automation Congress (WAC 2016), Jul. 31-Aug. 4, Wyndham Grand Rio Mar Beach Resort & Spa, Puerto Rico, 2016

- [3] Akira Kato, Yuya Matsumoto, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Shigeki Sugano, “Distribution of the Muscle Bulge of an Upper Limb Amputee for Joint Angle Estimation”, Cybathlon Symposium, Oct. 6, Kloten, Switzerland, 2016
- [4] 南雲春乃, 加藤陽, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, “義手操作能力評価に向けた書字動作時の躍度による遠位動作評価手法の構築”, 第 37 回バイオメカニズム学術講演会, Nov. 12-13, 富山, 2016
- [5] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 藤江正克, 菅野重樹, “筋隆起形状変化に基づく手関節角度推定に対する角度変化幅の影響”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, Jun. 8-11, 横浜, 2016
- [6] 中島康貴, 劉思佳, 呂筱薇, 曹暘, 松本侑也, 二瓶美里, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, “視線計測に基づいた移動支援器 Tread-Walk の操作性の評価”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2016 (LIFE 2016), Sep. 4-6, 宮城, 2016
- [7] 高嶋淳, 庄司瞳, 相川孝訓, 中村隆, 手嶋吉法, 井上剛伸, 硯川潤, “福祉機器のための熱溶解積層法 3D プリンタによる造形物の評価手法の検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, Jun. 8-11, 横浜, 2016
- [8] Hesong Ye, Xiang Feng, Yoshiko Yabuki, Shunta Togo, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, “Force-magnification mechanism with artificial tendon sheath for myoelectric prosthetic hand for children”, The 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO2016), Dec. 3-7, Qingdao, China, 2016
- [9] Yuta Murai, Suguru Hoshikawa, Shintaro Sakoda, Yoshiko Yabuki, Masahiro Ishihara, Tatsuhiko Nakamura, Takehiko Takagi, Shinichiro Takayama, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, “Development of a Myoelectric Hand Incorporating a Residual Thumb for Transmetacarpal Amputees”, The 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), July 3-7, Shanghai, China, 2016
- [10] Akira Kato, Yuya Matsumoto, Yo Kobayashi, Shigeki Sugano, Masakatsu G. Fujie, “Estimating a Joint Angle by Means of Muscle Bulge Movement Along Longitudinal Direction of the Forearm”, The 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO2015), Dec. 7-9, Zhuhai, China, 2015

- [11] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 菅野重樹, 藤江正克, “前腕皮膚表面形状変化に基づく筋隆起計測位置の決定による手関節角度の推定”, 第3回看護理工学会学術集会, Oct. 10-11, 京都, 2015
- [12] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 菅野重樹, 藤江正克, “前腕長手方向への筋隆起位置変化に基づく手関節角度の推定”, 日本機械学会 2015 年度年次大会 (JSME 2015), Sep. 13-16, 札幌, 2015
- [13] 三浦智, 高澤純一, 川村和也, 小林洋, 中島康貴, 藤江正克, “直感的なロボット手術を目指した仮想アームのタッチング操作時における脳波計測”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2015), May 17-19, 京都, 2015
- [14] Yasutaka Nakashima, Kazuya Takizawa, Yuya Matsumoto, Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Foot Pressure and Posture Information-Based Visual Feedback System for Well-Balanced Gait in Older People”, The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), Nov. 9-12, Yokohama, Japan, 2015
- [15] Yasutaka Nakashima, Yoshikazu Ogaya, Misato Nihei, Takeshi Ando, Yuki Yokoo, Satoshi Miura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Development of Turning Algorithm based on Grasping Force of the Handle”, The 2015 JSME / RMD International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM 2015), Dec. 5-8, Tokyo, Japan, 2015
- [16] 中島康貴, 滝澤和弥, 松本侑也, 三浦智, 小林洋, 藤江正克, “足圧と姿勢情報の視覚バイオフィードバックを用いた高齢者の歩行時バランス能力訓練装置の開発”, 日本機械学会 2015 年度年次大会 (JSME 2015), Sep. 13-16, 札幌, 2015
- [17] 中村有志, 石渡利奈, 相川孝訓, 井上剛伸, “国内における義足の研究動向”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2015 (LIFE 2015), Sep. 7-9, 福岡, 2015
- [18] 白銀暁, 高嶋淳, 佐藤春彦, 中村美緒, 井上剛伸, “実用性の高い運動計測手法の開発に向けた開発支援ワークショップの実践”, 第30回リハ工学カンファレンス in おきなわ, Nov. 13-15, 沖縄, 2015
- [19] 高嶋淳, 庄司瞳, 相川孝訓, 中村隆, 手嶋吉法, 井上剛伸, 硯川潤, “3D プリンタ時代における福祉機器のパラメトリック設計の検討”, 第16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会 (SI 2015), Dec. 14-16, 名古屋, 2015
- [20] 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, Nov. 1-4, Busan, Korea, 2015
- [21] Yinlai Jiang, Shintaro Sakoda, Masami Togane, Soichiro Morishita, Hiroshi Yokoi, “One-handed Wearable sEMG Sensor for Myoelectric Control of Prosthetic Hands”, The International Conference on Wearable Sensor and Robot (ICWSR2015), Oct. 16-18, Hangzhou, China, 2015
- [22] 加藤陽, 松本侑也, 小林洋, 藤江正克, “筋隆起位置変化に基づく関節角度の推定”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 in Toyama, May, 25-29, 富山, 2014
- [23] 鈴木智裕, 三浦智, 小林洋, 藤江正克, “片麻痺患者のタイピング支援に向けた立体的なキー配置による運指距離の低減”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2014), Sep. 24-26, 北海道, 2014
- [24] 高澤純一, 三浦智, 小林洋, 藤江正克, “促通反復療法の支援を目的とした脳内の事象関連脱同期における確率分布モデルの導出”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2014), Sep. 24-26, 北海道, 2014
- [25] Yasutaka Nakashima, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Evaluation of Treadmill Velocity Control Based on User’s Intention of Acceleration or Deceleration”, World Automation Congress (WAC) 2014, 14th International Symposium on Robotics and Applications (ISORA 2014), Aug. 3-7, Kona, USA, 2014
- [26] 中島康貴, 望月孝太, 三浦智, 松本侑也, 小林洋, 渡邊慎一, 西則彦, 飯島浩, 藤江正克, “手指巧緻性の定量化に向けた筆記動作の因子分析”, 第32回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2014), Sep. 4-6, 福岡, 2014
- [27] 高嶋淳, 中村有志, 硯川潤, 井上剛伸, “触面圧力低減を目指した体圧分布に基づく三次元曲面造形手法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 in Toyama, May, 25-29, 富山, 2014
- [28] Tatsuya Seki, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, “Approximate Model for Interactive-tendon Driven Mechanism of a Multiple-DoFs Myoelectric Prosthetic Hand”, The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE-ROBIO2014), Dec. 5-10, Bali, Indonesia, 2014
- [29] 矢吹佳子, 星川英, 雍旭, 景暁バイ, 中村達弘, 棚橋一将, 石原正博, 關達也, 加藤龍, 横井浩史, “エラストマーゲルを用いた筋電義手のための装飾用グローブの開発”, 第30回日本義肢装具学会学術大会, Oct. 18-19, 岡山, 2014
- [30] Xu Yong, Xiaobei Jing, Yinlai Jiang, Hiroshi Yokoi, and Ryu Kato, “Tendon Drive Finger

Mechanisms for an EMG Prosthetic Hand with Two Motors”, The 2014 7th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics (BEMI), Oct. 14-16, Dalian, China, 2014

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

(他、20件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計4件)

[1]

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：特願第 029981 号

出願年月日：2017年2月21日

国内外の別：国内

[2]

名称：ロボットの制御装置

発明者：藤江正克，小林洋，加藤陽，松本侑也，築根まり子，武岡真司，藤枝俊宣，山岸健人，鉄佑磨

権利者：早稲田大学

種類：特許

番号：特願第 234149 号

出願年月日：2015年11月30日

国内外の別：国内

[3]

名称：電動義手のためのベルトドライブ倍力サーボ機構

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：特願第 165296 号

出願年月日：2015年8月24日

国内外の別：国内

[4]

名称：ロボットの動作指令装置

発明者：藤江正克，小林洋，中島康貴，松本侑也，加藤陽

権利者：早稲田大学

種類：特許

番号：特願第 223083 号

出願年月日：2014年10月31日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

[1] 横井浩史研究室

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤江 正克 (FUJIE Masakatsu)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：20339716

(2)研究分担者

井上 剛伸 (INOUE Takenobu)

国立障害者リハビリテーションセンター・

福祉機器開発部・研究部長

研究者番号：40360680

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

小林 洋 (KOBAYASHI Yo)

早稲田大学・次世代ロボット研究機構・主任研究員

研究者番号：50424817

中島 康貴 (NAKASHIMA Yasutaka)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：00632176