

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03051

研究課題名(和文) 運動主体感, 身体所有感を増強させる身体機能再建BMIデバイスの開発研究

研究課題名(英文) Development research of BMI device for reconstructing body function that enhances sense of agency and sense of ownership

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、運動主体感, 身体所有感を強く感じられる身体機能再建BMIデバイスの開発とその方法論の構築を目的とする。研究成果は以下のとおりである。(1)感覚フィードバック(FB)付BMI義手においてラバーハンド錯覚に類似した身体所有感を感じることを、触覚FBや体性感覚FBが運動主体感を向上させることを脳活動計測や心理実験を通じて明らかにした。(2)上腕電動義手, 手指伸展支援装置, 麻痺した筋を制御する神経筋電気刺激デバイスを実現し, 身体障害を有する8名による臨床評価により有用性を示した

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim to develop a new BMI device for body-function reconstruction which strongly felt the sense of agency and the sense of ownership, and to construct a methodology. The research results are as follows.
(1)Through brain activity measurement and psychological experiments, we clarified the following two points: a)By applying sensory feedback to the BMI prosthesis, the user feels a sense of ownership of the prosthetic hands, b)Tactile feedback and somatosensory feedback of the BMI prosthesis enhance sense of agency to the prosthesis
(2) We developed upper-limb neuro-prosthetic hand, finger extension support device, neuromuscular electrical stimulation device controlling paralyzed finger. We applied these devices to 8 patients and revealed that these devices are useful for rehabilitation

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：身体所有感 運動主体感 感覚フィードバック Brain Machine Interface

1. 研究開始当初の背景

近年、脳科学やロボット技術の飛躍的な進歩により、ヒトの中枢や末梢に直接情報の入出力を行う Brain Machine Interface (BMI) 技術に注目を集めるようになった。この技術は、高度で自然な外部機器の操作を可能にすると考えられ、肢体不自由者に対するリハビリテーションへの応用が期待されている。

このような BMI のリハビリ応用では、欠損あるいは動かない四肢の運動機能をロボットなどで代替・補助する機能代償的なものと、脊髄損傷などにより脳指令が筋に伝わらない状態であっても、BMI を介して接続するとフィードバックループと神経系の可塑性によって両者の結びつきが強くなり、機能の一部が回復する機能回復的なものに大別できる。前者の先進的研究事例としては、筋力低下した四肢を動かすロボットスーツや、皮質脳波で随意制御可能なロボット義手などが挙げられる。一方、後者では損傷した神経経路を人工的にバイパスする人工神経接続チップや Robot-assisted therapy が代表例である。これら研究は日本や米国、欧州が中心となって大規模な研究展開が始められており、世界中が競い始めた最もホットな分野である。

このような背景の下、申請者ら研究グループもまた、これまで上肢の運動機能を代償する上肢多自由度筋電義手や手指パワーアシストデバイス、麻痺回復のための表面電気刺激装置(FES)の開発を進めてきた。日常的に患者が装着することを考え小型軽量に設計され、多種の手指・上腕運動の代償、補助、回復が可能であるなど十分なりハビリ効果があることを示してきた。

その一方で、従来の BMI デバイスのほとんどが、使用者がいかに随意的に操作できるかに主眼は置かれているが操作に相当な集中が必要であったり、不自然な力の入れ方が必要であったりと自然な操作感とはかけ離れているものも少なくない。身体機能のリハビリにおいて、BMI デバイスもしくはそれによって動かされた四肢に対して、使用者が運動主体感(観察される運動が自分によって引き起こされているという感覚)、ひいては身体所有感(新しい身体が自己のものであるという感覚)を強く感じる(身体認知)がリハビリへのモチベーションや回復効果の観点で重要となる。このような身体認知に関する研究では、ラバーハンド錯覚(自分の手とダミーの手に対して同時に刺激を与えるとダミーの手に触覚が生じる)が有名であるが、心理実験や脳機能解析を通じて、身体に関わる複数の感覚情報が脳内で同時に結合・処理されることで生じることがわかってきた。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、運動主体感、身体所有感を強く感じる身体機能再建 BMI デバイスの開発とその方法論を構築し、ただの使い

やすい道具ではなくより身体に近づいた自然な操作感を実現する次世代を見据えた BMI デバイスの実現を目指す。

3. 研究の方法

目的を達成するための研究方法および到達目標、ランドマークは、以下の4項目に整理される。

[計測/解析] 運動主体感及び身体所有感を増強させる感覚 FB の調査

- 心理実験に基づく触覚 FB 手法と身体認知との関係性の調査
- 触覚 FB 手法と BMI デバイスへの身体認知に関連する脳活動部位の特定と評価方法の構築

[理論構築] 自然な操作感の実現するための BMI システムの設計

- 操作力、脳活動量から推定される自然操作度に基づく強化学習を用いた運動意図推定手法
- 物理センサを用いた使用者の行動・認知予測に基づく反射-小脳系機能の実現
- 操作習熟度と身体認知度に基づいた感覚フィードバック量の決定手法

[研究環境の構築] 身体機能再建 BMI デバイスの開発

- 触覚・体性感覚フィードバックのための柔軟
- 触覚センサ、多点振動電気刺激システムの開発

[臨床評価] 医学系研究室との連携による運動機能障害者への臨床試験と実用化に向けた検討

- 脳機能計測及び運動機能計測によるリハビリ効果の検証

4. 研究成果

(1) 運動主体感、身体所有感を増強させる感覚 Feedback (FB) の調査

- BMI 義手の感覚 FB が運動主体感・身体所有感に与える影響の調査

BMI 義手を対象とし、運動主体感を増強させる触覚および深部感覚 FB で用いる振動刺激パターン(強度変化・刺激位置変化)を、二重課題法により調査した。義手の指先に圧力センサを搭載し、ハンドから得られる触圧の強度を振動子の強度に対応付ける場合と触圧の強度を上腕に配置された振動アレイの空間位置に対応付ける場合で、把持に関する認知的負担に与える影響を、百マス計算を用いた二重課題法と運動主体感に関する主観評価で評価した。

その結果、触覚 FB を付与することで把持に関する認知的な負担が減少し運動主体感が向上した。また、刺激点の増加が認知的負

担を大きくし必ずしも運動主体感の向上に寄与しないことを明らかにした。

さらに、ハンドの開き角に応じて振動子の振動強度を増大させる深部感覚 FB を実装し、前述の触覚の実験条件と同様の検証を行った。その結果、深部感覚 FB を付与することで把持に関する認知的な負担が減少し運動主体感が向上することを確認できた。

また、行為開始に同期した振動刺激（義手が動いたという Onset を返す）は運動主体感を向上させるという他の研究報告があったが、3 種類の操作遅延を持つ筋電義手での検証において運動主体感の向上に寄与しないことを明らかにした。さらに操作力対応付けられた振動刺激は、運動主体感の向上に寄与することを示した。

b) fNIRS を用いた BMI デバイスへの身体認知に関連する脳活動部位の特定と評価方法の構築

特定の脳活動から身体認知度を表すマーカーを探索するため、電通大の協力の下、全脳計測が可能な多チャンネル fNIRS を用いて、感覚 FB を備えた身体機能再建 BMI デバイス（筋電義手）使用中の脳機能解析を実施した。

ハンドの触圧に応じて振動刺激が増加する触覚 FB を有する筋電義手を用いて把持タスクを行うと、ラバーバンド錯覚と同様な錯覚現象が起こること（身体所有感の有無に関する主観評価と相関）、その錯覚の強さと運動前野及び左下頭頂小葉の活性度に高い相関を確認した。

(2) 自然な操作感の実現するための BMI システムの設計

a) 物理センサを併用した運動推定器の情報処理量負荷の低減

BMI デバイスの自然な操作感を実現するため、筋電や脳活動のような生体信号のみを制御信号とするのではなく、加速度センサ・ジャイロセンサなどの物理センサを併用することで、運動推定器の情報処理量負荷の低減する手法の構築を行った。

眼球運動から物体注視時間を予測し、精密な把持操作が必要な場合とそれ以外の BMI 義手の把持速度を切り替えるために、交流増幅型眼電センサの開発とそれを用いた把持速度の制御手法を構築した。眼電振幅が小さい期間を注視時間とし、注視時間の大小で加減速する手法である。これにより、不自然な操作力を伴わず精密な把持が可能となった。また、前腕部の傾きをジャイロで計測し、傾きに応じてリストの回転角を制御する手法を構築した。このとき、手の開閉などの把持動作を筋電から推定する。この結果、自然な手指と手首の複合動作が可能となった。

また、BMI 義手などを自然な操作力で操作する際、操作力が小さく、制御する信号となる生体信号の信号特性が不安定となることが多い。そこで、小さい操作力でも大きな信

号変化を伴う信号の立ち上がり時の過渡状態の筋電特徴から把持の準備動作（プリシェイピング）を推定し、その後の動作は、義手に搭載された加速度センサや圧力センサの足立と有限オートマタ表現された状態遷移モデルで、自動的に判断する反射系を構築した。これにより、従来手法に比べ操作力が 1/2 以下となり同程度の識別精度で手指 5 動作の推定が可能となった。

b) 深層学習を用いた再学習不要な操作習熟に合わせた運動推定手法の検討

熟練度の差等の個人差を含んだ筋電特徴データをビッグデータとみなし、深層学習を用いて推定関数の同定を行った。筋電特徴として周波数成分の時空間データを用い、プーリング層、畳み込み層、全結合層をもつ Convolutional neural network を採用した。その結果、習熟度の異なる筋電特徴データから手指の 8 種の動作推定が識別率 85% 程度での推定が可能であった。今後、熟練度の異なる使用者に対応可能かを引き続き調査する。

c) Targeted Muscle Reinnervation を用いた自然な上腕筋電義手の制御

上肢欠損者を対象に、手指運動に関連する運動神経を上腕の筋群に移行し、上腕部の表面筋電から電動義手を制御する手法を構築した。結果として 4 名の上肢欠損者に対して Targeted Muscle Reinnervation を東海大学医学部整形外科の協力の下実施し、手指運動、手首運動、肘運動に関連する独立した筋電特徴が観察され、不自然な操作をすることなく運動推定が可能であることを示した。また、Neural network を用いたパターン識別手法により、移行後の筋群の筋電位から手指の開閉、手首の回内外、肘の屈伸の自然な義手操作が可能となった。

(3) 身体機能再建 BMI デバイスの開発

a) 触覚・体性感覚フィードバックのための柔軟触覚センサ、多点振動電気刺激システムの開発

ハンドデバイスの触圧を検知するために、導電体を含むスポンジ素材（導電スポンジ）が体積変化により抵抗値が変化することを利用した多点触覚センサを開発した。これにより、安価でやわらかいセンサを実現した。さらに、感覚 FB のための多点刺激を行うための振動子アレイ（8 個×2 列）および 4ch 表面電気刺激装置の設計開発を行った。

b) 機械補助・神経刺激型リハビリロボット（義手、機械アシスト、FES）の開発

b-1) 前輪・上腕電動義手の開発：重量分布が体幹側に集中するようなアクチュエータ配置を有し、総重量 900g と軽い 4 自由度上腕電動義手を開発した。またハンドには、握力把握・精密把握・側面把握が可能となるよう母指対立・並立、他 4 指屈曲伸展が可能と

なる2自由度ハンドを開発した。これにより、日常生活動作の85%をカバーできるハンドを実現した。本研究成果は、厚労省の義肢補装具等完成用部品に指定された。

b-2) 伸縮性外骨格を用いた簡易装着が可能な手指伸展支援装置の開発：屈曲拘縮を伴う麻痺指に対しても簡単に装着可能となるように、スライダ、ヒンジ、弾性体で構成された伸縮ベースを指背面から装着しワイヤ駆動によりベースを回転させることで手指の伸展のアシストを行う。これにより、グローブ型やバンド型固定の従来装置に比べ駆動に必要な補助トルクを確保しながらも装着時間が約1/3となり簡易装着が実現できた。

b-3) 神経・筋電気刺激(NMES)を用いた母指を含む5指の独立制御装置の開発：

母指の対立運動、内外転、屈曲伸展および個々の4指の屈曲伸展が可能な神経・筋電気刺激装置の開発とそれを制御するためのハンドモーションセンサを用いたマスタースレイブコントローラを開発した。母指については、長母指外転筋、母指対立筋、母指内転筋の3か所の刺激強度とモーションセンサで計測した手指角度の学習データから重回帰分析を用いた線形回帰モデルを構築した。モーションセンサを用いて学習データを構築することにより、40秒程度で回帰パラメータの推定が可能となり、従来問題であった刺激パラメータの時間短縮が可能になった。

(4) 医学系研究室との連携による運動機能障害者への臨床試験と実用化に向けた検討

身体機能再建BMIデバイス、特に筋電義手について運動主体感や身体所有感が見られるかまたリハビリ効果がみられるかを明らかにするため前腕・上腕切断者8名についてその臨床評価を行った。その結果、前腕切断2名および上腕切断それぞれ4名について身体所有感・運動主体感の向上や臨床スコア(Box and Block Test)が向上することを確認した。また、その成果の一部は、厚生労働省義肢補装具等完成用部品に指定のためのフィールドテストに利用され実用化に至った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Yamanoi Yusuke, Soichiro Morishita, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Development of myoelectric hand that determines hand posture and estimates grip force simultaneously, *Biomedical Signal Processing and Control*, Elsevier, 査読有, Vol.38, 2017, pp.312-321, doi: 10.1016/j.bspc.2017.06.019

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*、査読有、

第32巻、3号、2016、pp.177-185、doi: 10.11267/jspo.32.177

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(日本知能情報フジ学会誌)*、査読有、Vol.27、No.6、2015、pp.885-897、doi:10.3156/jssoft.27.885
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*、査読有、53巻、4号、2015、pp.217-224、doi: 10.11239/jsmbe.53.217

Ryohei Fukuma, Takufumi Yanagisawa, Shiro Yorifuji, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Masayuki Hirata, Youichi Saitoh, Haruhiko Kishima, Yukiyasu Kamitani, Toshiki Yoshimine, Closed-Loop Control of a Neuroprosthetic Hand by Magnetoencephalographic Signals, *PLoS ONE*, 査読有, Vol.10, No.7, 2015, e0131547, doi:10.1371/journal.pone.0131547

〔学会発表〕(計29件)

Yusuke Yamanoi, Control Method for Myoelectric Hand using Convolutional Neural Network to Simplify Learning of EMG Signals, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, 2017

Chiaki Mizuochi, Real-time cortical adaptation monitoring system for prosthetic rehabilitation based on functional near-infrared spectroscopy, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, 2017

Wataru Nishino, Development of a Myoelectric Prosthesis Simulator using Augmented Reality, 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2017

Yosuke Ogiri, Development of an upper limb neuroprosthesis to voluntarily control elbow and hand, 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2017
Josuke Kawashimo, Development of Easily Wearable Assistive Device with Elastic Exoskeleton for Paralyzed Hand, 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2017

山野井佑介, Convolution Neural Networkを用いた再学習不要な筋電義手の制御手法、計測自動制御学会第23回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校」、2017

相良雄斗、5指ハンドを用いた腹腔鏡下

- 手術支援システムのための外骨格型入力インタフェースの開発、第 35 回ロボット学会学術講演会、2017
- 馮心怡、圧覚フィードバックがマスタースレーブ型手術用 五指ハンドの把持安定性の判断に与える影響の調査、第 35 回日本ロボット学会学術講演会、2017
- 阿久津祐樹、トーションバネによるブレーキ機構を用いた 関節ロック型筋電義手、第 35 回日本ロボット学会学術講演会、2017
- 佐藤駿紀、距離画像センサによる上肢の姿勢推定手法を用いた AR 筋電義手シミュレータの開発、第 35 回日本ロボット学会学術講演会、2017
- 高木岳彦、上腕切断患者に対する Targeted Muscle Reinnervation 神経の選定と再支配、より効率的な多自由度筋電義手操作のために、第 28 回日本抹消神経学会、2017
- Ryu Kato、Brain-muscle Interface: controlling a prosthetic hand", XXI ISEK CONGRESS、2016.
- Misato Kasuya、The cortical adaptation monitoring system for leg press machine with FES induced biofeedback、XXI ISEK CONGRESS、2016
- Yoshiko Yabuki、Development of new Cosmetic Gloves for Myoelectric Prosthetic Hand by using Thermoplastic Styrene Elastomer、The 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems、2016
- Hiroshi Yamada、Investigation of a Cognitive Strain on Hand Grasping Induced by Sensory Feedback for Myoelectric Hand、International Conference of Robotics and Automation 2016、2016
- 西野亘、拡張現実感を用いた筋電義手シミュレータの開発、第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会、2016
- 横河佑一、母指姿勢の制御を可能とする表面電気刺激手法の開発、第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016
- 大桐洋亮、肘と手指を同時制御可能な生体信号制御型電動義手の開発-身体負担が小さく日常生活動作が可能な上肢電動義手の製作-、第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016
- 川下文佑、麻痺手への簡易装着可能な手指運動支援装置の開発、第 34 回日本ロボット学会学術講演会、2016
- 山野井佑介、把持姿勢識別と把持力推定を同時に行う筋電義手の開発、計測自動制御学会 第 22 回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校」、2016
- 21 Masahiro Kasuya、Analysis and Optimization of Novel Post-processing Method for Myoelectric Pattern Recognition、International Conference on Rehabilitation Robotics、2015
- 22 Daiki Suzuki、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、2015
- 23 Suguru Hoshikawa、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、2015
- 24 Yusuke Yamanoi、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、2015
- 25 阿久津祐樹、ワイヤ牽引による関節剛性可変機構を有する筋電義手用ロボットハンドの開発、2016 年度精密工学会春季大会学術講演会、2016
- 26 山田洋、筋電義手の触覚フィードバック方法が把持に関する認知的負担に与える影響の調査、第 33 回日本ロボット学会学術講演会、2015
- 27 山野井佑介、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、2015
- 28 脇田航、多自由度筋電義手のための眼電信号による把持速度制御法、第 33 回日本ロボット学会学術講演会、2015
- 29 星川英、基本的な ADLs を実現させる 2 自由度筋電義手の構造設計、第 33 回日本ロボット学会学術講演会、2015
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
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
- (2) 研究分担者
横井 浩史 (YOKOI, Hiroshi)
電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授
研究者番号：90271634
- 生駒 一憲 (IKOMA, Katsunori)
北海道大学・大学院・教授
研究者番号：70202918
- 山村 修 (YAMAMURA, Osamu)
福井大学・医学部・講師

研究者番号：30436844

(3)連携研究者

高木 岳彦 (TAKAGI, Takehiko)

東海大学・医学部・講師

研究者番号：00348682

(4)研究協力者

なし