

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25750251

研究課題名(和文) ヒトの心理・習熟状態を察して自律学習する上肢BMIリハビリ機器の開発研究

研究課題名(英文) Development of adaptive rehabilitation system using user-state estimation for upper limb disorder

研究代表者

加藤 龍 (Kato, Ryu)

横浜国立大学・工学(系)研究科(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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複雑な上肢の身体機能を再建するBMI(Brain Machine Interface)リハビリ機器の操作を容易に習得できるシステムの実現を目的として、使用者の内部状態(心理状態・習熟状態(操作能力))のモデル化、使用者の能力推定に基づく自律学習型運動意図推定手法、身体機能代償・回復のための機械補助・神経刺激型リハビリロボット(義手・手指補助器・電気刺激)を実現した。

研究成果の概要(英文)：This project realized an easy-to-use BMI rehabilitation system for upper limb disorder. This rehabilitation system consists of three research components：(1)User model creation on psychological state and operation skill (2)motion estimation using user model-based online learning (3) Three type of rehabilitation robots: EMG prosthetic hand, hand powered exoskeleton and FES system for paralyzed-limb control.

研究分野：福祉・介護用ロボット

キーワード：リハビリテーションロボット

## 1. 研究開始当初の背景

近年、生体計測・情報処理技術が進展し、脳の構造と機能が明らかになるにつれ、中枢や末梢に直接情報を入出力する方法、いわゆる Brain Machine Interface (BMI) 技術が注目を集めるようになった。BMI 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。

BMI リハビリでは、欠損した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、脳卒中や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が考えられる。日本や米国、欧州が中心となって大規模の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では、これまで上肢機能障害で失われた運動機能を代償する上肢筋電義手や手指パワーアシストロボットや麻痺回復のための表面電気刺激装置の開発を進めてきた。開発したロボットは、日常的に患者が装着することを考え小型軽量であり、患者に装着し一体となって多種の手指・上腕運動を補助する。

その一方で、上肢機能障害(切断や麻痺)は、下肢に比べより多くの運動自由度の再建が求められるが、患者が上記の複雑な運動自由度を持つ BMI リハビリ機器を使いこなすためには、制御するのに十分な情報量を持つ生体信号を随意的に生じさせるようになることが必要となる。しかしそれには多くの訓練時間を要し、かつ患者がどのような運動自由度が制御可能かを判断する専門的な知識を必要とするのが現状である。ゆえに作業療法士などのシステム運用者が患者の能力を見誤り過度な操作自由度を教示してしまうことで運動意図の推定が困難になったり、逆に能力の過小評価により単純な操作自由度の訓練を不必要に行ったりするなど患者に煩雑な訓練を強いることとなり、リハビリへの意欲の低下を生み、ひいては回復効果の低下につながるといった非常に深刻な問題が生じている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、多くの運動自由度を有する複雑な上肢機能を再建する BMI リハビリ機器を、使用者の生体情報からその心理状態や習熟状態を読み取りながら、その操作を容易に習得できる上肢リハビリテーションシステムの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 使用者の内部状態のモデル化

症状に応じた自動的な制御入力の手法選択手法の検討

リハビリ機器への習熟状態の評価のための非侵襲生体信号特徴に基づく評価指標の構築

リハビリ機器で出力される運動と患者の意図との整合性を自律的に判断するための運動・心理状態(快・不快、緊張・弛緩)・生理指標対応の調査とモデル化

### (2) 使用者の能力推定に基づく自律学習型運動意図推定手法の構築

心理状態に基づく強化学習を用いた訓練データの動的な管理手法と自律型オンライン学習手法の構築

習熟状態を考慮した生体信号からの運動意図推定手法の構築

### (3) 機能代償・回復のための機械補助・神経刺激型リハビリロボットの開発と医学系研究室との連携による上肢機能障害者への臨床試験と実用化に向けた検討

ワイヤ駆動型外骨格型上肢パワーアシスト機構(機能回復)及び脱臼を許容し複雑な扱いを受けても故障しないすべり関節を有する骨格機構を併用した上肢義手(機能代償)の開発

麻痺筋群と感覚フィードバックのための多点表面電気刺激装置の開発

## 4. 研究成果

### (1) 使用者の内部状態のモデル化

症状に応じた自動的な制御入力の手法選択手法の検討

症状に応じて自動的に制御入力の手法を選択を行うために、症状と計測可能な制御入力との体系化を実施した。特に手指麻痺を対象とし、麻痺グレード(Brunnstrom stage)に応じて1) スイッチ 2) 健側指角度(マスタースレーブ制御) 3) 患側筋電トリガー 4) 患側筋電周波数成分(パターン認識)といった制御入力を選択する手法を構築した。

リハビリ機器への操作習熟状態の評価指標の検討

習熟とは、「運動パターンの模索と安定収束化」という運動学習の知見から「制御入力の特徴が構成する特徴空間上でのクラス内分散が小さく・クラス間分散が大きくなる」と定義し、クラス内分散・クラス間分散比を習熟度として定義する。ここで運動パターンとしてリハビリ機器を使用した操作者から計測される筋電特徴とし、リハビリ機器により再建される異なる運動で計測される筋電特徴間距離と繰り返し運動における特徴量の分散値を算出し、習熟度とした。リハビリ機器として筋電義手を採用し、10種の把持姿勢をニューラルネットワークをベースとしたパターン認識手法で識別を実施し、そのときの習熟度と認識率に相関があることを確認した。

使用者の心理状態の推定手法の検討

本研究では、まず運動意図と異なる出力が認知されるときに検出される脳波(エラー関連陰性電位: Error Related Potential)に着目し、これにより使用者の心理状態の推定を試みた。単純課題としてマウスによるディスプレイ上のターゲットトラッキングを課題とし、マウスポインタに複数種の回転変換行列を施した条件でマウス操作と異なるカーソル運動とのズレをERPとの関連を調査した。その結果、10試行実施した第1試行のFzの波でERPが観測されたがそれ以外での観測が見られなかった。これは運動意図と異なる運動が現れた所見では反応があり推定が可能であるが、それ以外は推定できないことを意味する。また、体動の影響が大きく、脳波からは心理状態の推定が難しいという結論を得た。

次に、脳波を除く非侵襲生体信号(眼電、心電、NIRS、皮膚電位、唾液アミラーゼ)を同時に計測するシステムを複数台のクライアントPCとそれを統合するPCサーバを構築し、多自由度筋電義手使用時の生体信号計測解析を実施した。前腕切断者に筋電義手を装着してもらい、握る、開くなど10種の手指運動パターンをシーケンシャルに行ってもらったタスクを実施し、ランダムで任意の手指運動が発現させ、そのときの各種生体信号特徴を解析した。その結果、異なる運動が生じた筋電義手を注視する行為が眼電特徴(交流眼電振幅量)から推定可能であり、また驚きなどによる精神性発汗を示す皮膚電位(SPR, SPL)にも有意な特徴差がみられた。また、眼電特徴には物体注視の度合いが推定できることが明らかとなり、集中度合などの心理状態の推定に用いることが可能であった。

## (2) 使用者の能力推定に基づく自律学習型運動意図推定手法の構築

まず、初期訓練データ群に基づいて設計された推定器の推定結果が意図通りか否かを判断するため、前述の心理状態の評価基準に基づき、意図通りであれば推定結果と同じ運動の訓練データの適応度を増加させ、意図通りでないときには、入力された信号特徴に最も類似した訓練データの適応度を減少させ、適応度が一定値以下になったときに削除されるような訓練データの動的な管理手法を構築した。その結果、修正されるごとに推定器を再学習することにより徐々に意図を反映した推定器となると考えていたが、運動意図推定手法に用いる識別関数の性能が悪い、もしくは、操作者が識別関数にあった制御入力を意図的に出力しようとする不自然な操作力で操作する(筋収縮力を高め、筋電特徴の分離性を高めるなど)行動が見られ、心理状態評価のばらつきが大きく、頻繁に訓練データの修正が行われ、関数パラメータの収束が見られなかった。そこで、まずは自然な操作感で計測される筋電信号から運動意図通りの推定が安定的に可能となる2種の推定手法の構

築を試みた。

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

自然な操作感で操作するときの筋活動は非常に微弱であり不安定である。そこでプリシェイピング(準備動作)時の信号強度の低い筋電から基本4種の把持動作(Precision grip, Power grasp, Sphere grasp, Lateral pinch)を識別する方法を確立した。その結果、把持のプリシェイピング時に生じる伸筋筋電ピーク時の動作ごとの筋電特徴差が一番大きく、識別率85%以上の識別性能を示した。また、ハンドと物体の距離を計測する距離センサを用いた把持タイミングの推定手法を確立し、従来手法に比べ提案手法は積分筋電強度が1/5以下で同等の識別能力が実現でき、複数センサを併用することで不自然な操作力を発揮しなくても自然な把持イメージで操作が可能となった。

選択的線形回帰モデルを用いた表面筋電位からの把持姿勢識別及び把持力推定

従来、表面筋電特徴から複数の把持姿勢と発揮力を同時に推定することは困難であった。そこで、と別アプローチとして、1つの把持姿勢において様々な把持力で計測した筋電周波数特徴を線形回帰モデルでモデル化し、ある筋電特徴がシステムに入力されたとき、予め複数の把持姿勢で得られた回帰モデルの中から一番近いモデルを選択することで把持姿勢を識別し、選択モデルから把持力を推定する方法論を提案した。これにより、従来手法に比べ、0-60%MVCの把持力においても90%以上の高い識別率で基本3種(Precision grip, Power grasp, Lateral pinch)の把持姿勢の識別が可能となった。

## (3) 機能代償・回復のための機械補助・神経刺激型リハビリロボットの開発と医学系研究室との連携による上肢機能障害者への臨床試験と実用化に向けた検討

超弾性材を用いた人工靭帯機構を有する指関節と筋電義手用五指ハンド開発

過大な力がかかると脱臼して破損を防ぐ義手指関節を改良し、関節剛性を高めつつ自動回復機能を有する超弾性合金を用いた指関節を実現した。関節部側面に超弾性合金を設置し、過大な力がかかると合金が座屈し、超弾性合金の形状記憶効果を利用して回復させる。義手にかかる想定外力を基に、座屈荷重と最大ひずみ量から超男性合金の寸法を決定した。この関節を用いた5指型ロボットハンドを開発し、日常生活で使用する把持に十分耐えられる剛性を持ちつつ、過大な力がかかっても(金属ハンマーで強打)座屈し、力を逃して破損を防ぐフォースリミッターの実現を可能にした。

多点刺激システム表面電気刺激装置の開発

これまで開発してきた 4ch 表面電気刺激装置の出力を 5×5 マトリクス電極に出力する多段リレーを用いた多点刺激システムを開発した。またリハビリに必要な運動を最大限引き起こす刺激位置を自動探索するアルゴリズムを開発し、隣り合う 2 つの電極の組み合わせを X, Y 方向に走査し、その時四肢の発生運動量を計測することで、解剖学を熟した医療従事者でも電極配置の探索に長い時間がかかっていたが、電気刺激システム未経験者でも約 200 秒以内で運動量を最大化する電極位置が決定可能となった。また、同様な手法で自動的にモーターポイントの探索が可能となった。

#### 伸縮ベースを用いたパワーアシストハンドの開発

手指麻痺において手指が曲がったまま拘縮する事が多く、外骨格型のパワーアシストハンドにおいて身体への締結点多いバンドタイプや手袋型のグローブタイプの装着性は著しく悪い。そこで本研究では、指背面からフックを指先に引っ掛けるだけで装着可能な伸縮ベースを用いたワイヤ駆動型手指アシスト装置を新たに開発した。使節背面に位置する 3 つのベース部材をスライダと弾性体とヒンジで構成された伸縮性関節で繋いだ機構を開発し、ワイヤ駆動により指を引き起こす。5 名の麻痺患者において屈曲拘縮した手に対しても従来手法に比べて 40%以上の時間短縮した素早い装着が可能となった。これにより手指リハビリ機器が容易に使用できるようになったといえる。

以上(1)-(3)が研究成果である。しかし計画していた自律学習型運動意図推定手法のオンライン学習部の一部が未実現となった。今後、安定して使用者の心理状態を推定可能なマーカの探索とそれを用いた適応学習系の構築を行っていく予定である。

#### 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 5 件)

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*, 査読有、8、417、2014、1-9

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*, 査読有、4、2014、97-105

加藤龍、横井浩史、人の精密な手指機能を再建する五指型筋電義手、*精密工学会誌*、査読無、80 巻、3 号、2014、259-264

横井浩史、加藤龍、森下壮一郎、中村達弘、手指リハビリテーション用 FM 干渉型

電気刺激、*Medical Science Digest*、査読無、Vol.39、No.2、2014、56-57

久保田雅史、山村修、神澤朋子、五十嵐千秋、松尾英明、成瀬廣亮、嶋田誠一郎、

加藤龍、横井浩史、内田研造、馬場久敏、急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激治療が歩容及び内側感覚運動皮質のヘモグロビン濃度へ及ぼす即自的効果、*理学療法学*、査読有、41 巻、1 号、

2013、13-20

##### [学会発表](計 13 件)

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, The 7th Annual IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, 2015 年 5 月 11 ~ 12 日、Boston Massachusetts(USA)

鈴木大輝、山田洋、脇田航、山野井佑介、横井浩史、加藤龍、自然な操作感実現のための手指のプリシェイピング時の表面筋電位と物理センサを用いた筋電義手の制御法、日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会、2015 年 3 月 20-21 日、横浜国立大学(神奈川県)

脇田航、山田洋、鈴木大輝、山野井佑介、加藤龍、多自由度筋電義手の把持速度制御のための眼電図を用いた物体注視度の推定、関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演、2015 年 3 月 20 日、横浜国立大学(神奈川県)

山田洋、鈴木大輝、山野井佑介、脇田航、加藤龍、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、関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演、2015 年 3 月 20 日、横浜国立大学(神奈川県)

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(JSEK2014)、2014 年 9 月 6 日、横浜国立大学(神奈川県)

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(JSEK2014)、2014 年 9 月 6 日、横浜国立大学(神奈川県)

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 (JSEK2014)、2014 年 9 月 6 日、横浜国立大学(神奈川県)

佐藤佑樹、大平美里、加藤龍、横井浩史、効果的な筋活動を促す電極配置再可能に於ける気刺激装の開発、第 15 回日本電気生理運動学会大会 (JSEK2014)、2014 年 9 月 6 日、横浜国立大学(神奈川県)

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 (JSEK2014)、2014 年 9 月 6 日、横浜国立大学(神奈川県)

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、2014 年 9 月 4 日、九州産業大学(福岡県)

星川英、加藤龍、森下壮一郎、中村達弘、關達也、姜銀来、横井浩史、基本 3 種の把持姿勢をとる 2 自由度筋電義手の指形状に応じた機能の評価、第 30 回ファジィシステムシンポジウム、2014 年 9 月 2 日、高知城ホール(高知県)

加藤龍、人の精密な手指機能を代替する 5 指型筋電義手の開発、第 22 回テクノスト研究会、2014 年 7 月 18 日、独立行政法人理化学研究所(東京都)

山野井佑介、鈴木大輝、加藤龍、横井浩史、選択的線形回帰モデルを用いた表面筋電位からの把持姿勢識別及び把持力推定、第 92 回パターン計測部会研究会、2014 年 5 月 8 日東京電機大学(東京都)

〔図書〕(計 1 件)

横井浩史、加藤龍、中村達弘、森下壮一郎、朝倉書店、福祉技術ハンドブック - 健康な暮らしを支えるために(分担執筆) 2013, 8

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

科研費成果の社会還元

加藤龍、サイボーグを作ろう～世界最先端 人と機械の融合マシン技術 シーズン IV(横浜国立大学)、参加者数 高校生 16 名、中学生 1 名、平成 26 年度 日本学術振興会 研究成果の社会還元・普及事業 ひらめき ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～ KAKENHI, 2014 年 8 月 7-8 日

加藤龍、サイボーグを作ろう～世界最先端 人と機械の融合マシン技術 シーズン III(電気通信大学)、参加者数高校生 20 名、平成 25 年度 日本学術振興会 研究成果の社会還元・普及事業 ひらめき ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～ KAKENHI, 2013 年 8 月 1-2 日  
加藤龍、サイボーグ技術とその福祉応用～人に適応する機械とは～、第 3 回サイエンスカフェ、2014 年 12 月 10 日、神奈川県立光陵高等学校(神奈川県)

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

特になし。

(3) 連携研究者

特になし。