

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282162

研究課題名(和文)BMIを用いたペダリング型下肢運動リハビリテーションシステムの構築と有用性の検討

研究課題名(英文)Development and feasibility study of a BMI assisted pedaling system for rehabilitation of neurologically paralyzed lower extremities

研究代表者

満洲 邦彦(Mabuchi, Kunihiro)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：50192349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、神経原性下肢麻痺患者を対象とし、患者が麻痺足を動かそうとする意図をBMI技術を用いて実時間予測し、患肢を固定したペダリング装置をモータやFESで強制的に回転させる事により、患肢も意図通り動かしてやるというリハビリ装置の構築とその有用性の検討を行ったもので、健康人と脊髄損傷患者を被験者として脳波α、β帯域のERDにより動作意図を実時間検出し装置の駆動を行った。装置の臨床効果に関してはまだ検証を要するが、脊髄損傷患者が、ペダル漕ぎ、及び静止状態をイメージした際の判別正答率は、症例によるが、健康な被験者のそれと同等の良好な成績(約70%)が得られており、その有用性が示されたと考えている。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop and demonstrate the feasibility of a BMI-assisted rehabilitation system for spinal cord injury (SCI) patients. The system detects the patient's desire to move his or her paralyzed legs without delay on the basis of his or her brain activity and make his or her feet that are fixed to the pedals of the system rotate by using a motor and/or functional electrical stimulation. An experiment was conducted in which both healthy subjects and a SCI patient used the system. The system detected the motor intention from the ERD of the alpha and beta bands of the subjects' EEG without delay. Although the S/N ratio was not high when dry electrodes were used, and the rehabilitation effect of the system needs further study, the discrimination for the SCI patient between his imagining pedaling and keeping a static state showed comparable accuracy compared to that of the healthy subjects (depending on the case but around 70%), demonstrating good feasibility of the system.

研究分野：医用・生体工学

キーワード：ブレインマシンインタフェースシステム リハビリテーション 医療・福祉 脳・神経 生物・生体工学 生体・生命情報学

## 1. 研究開始当初の背景

脳や脊髄の損傷など、中枢神経系の傷害に関しては、一般に再生が生じないため、予後は不良と言われてきたが、近年、脊髄損傷などの患者さんの体を支えてやり、外力で強制的に歩行パターンをとらせる事によってリハビリ効果を促進しようとする Lokomat などの歩行トレーニングマシンが開発され、効果が有ることが報告されている。このように、患者さんの足を左右協調的にかつ強制的に動かしてやる事によって回復を図ろうと言う試みは、この他にも、エルゴメータ形式の「バイク」があり、また、足漕ぎ式の車椅子で、片麻痺の患者さんを対象に、健側の足でペダルを回させ、患側の足はペダルに固定しておく事によって、同期させて一緒に強制的に動かしてやるシステムも試みられ、患肢の回復が促進されるという報告がなされており、また、麻痺が両側性の場合でも、両足をそれぞれペダルに固定し、両肢を強制的・受動的に協調させて動かしてやると、患肢の回復が促進されるという報告がなされている。これらの装置が機能回復を促進させる機序に関しては、肢が受動的にせよ、動かされる事によって生じる感覚（体性感覚や固有感覚）系の信号が脊髄に入力される事によって傷害された部位より下位の神経のネットワークが刺激されて、central pattern generator (CPG) などを介して歩行パターンに近い運動神経活動が反射出力され、また、このネットワーク自体も強化されると言うもので、その結果、脊髄の運動系、感覚系の伝導路が完全に傷害されているのでなければ、回復が促進される、と説明されている。ただ、これらの装置では、肢を意図とは無関係に単に動かすのみであるので、傷害された部位の上位と下位の間での結合の強化は生じにくい、この時、患者さんが肢を動かそうとした時に同期して足を動かしてやり、感覚入力や反射性運動出力を生じさせ、傷害部位を隔てた両者が同時に活性化するようにしてやれば、傷害されている脊髄レベルの上位（中枢側）と下位（末梢側）の間でも、結合強度の強化や、これまでは用いられてなかった神経系路が代用される事によって、伝導路の積極的な回復を望む事が出来るのではないかとするのが我々の考えである。我々

が、現在、主たる研究テーマとしている Brain-machine Interface (BMI) システムは、同じく近年、急速に発展してきた技術で、神経系の活動を計測する事によって、生体が何をしようとしているかを読み取り（デコーディング）その情報に応じて外部機器を動かすと言うものであり、これまで、もっぱら、生体の失われた機能を代替する技術として用いられてきたが、近年、機能回復に対する応用が注目されており、我々はこの BMI 技術を応用する事によって、患者さんの「足を動かそう」という意図を脳の活動情報から時間遅れなく予測し、これと足を強制的に動かしてやるタイミングを同期させ、高位の中枢と末梢とを、適切な時間遅れをもって、連動して発火させる事によって、両者の間の神経の結合を強化させよう事を期待して、この BMI 技術を応用し、脊髄損傷などの下肢麻痺の患者さんが麻痺足を動かそうとする際の意図を外骨格型のアシスト装置や機能的電気刺激を用いて、患肢を患者さんの意図通りに（強制的に）動かしてやるというペダリング型の下肢運動リハビリ装置の開発とその有用性の検討を行った。

## 2. 研究の目的

我々は、すでに上記の BMI 足漕ぎ車椅子の可能性に関する基礎研究とそのプロトタイプ構築も試み、脳波を用いた健常な被験者による実験で、システムが良好に作動する事を確認しているが、本研究では、これ等の基礎研究に基づき、ヒトを対象とした臨床用のシステムを作成し、実際に肢麻痺の患者さんに適用してその有用性に関する評価を行うとともに、その有用性の検討と研究成果の社会への還元を目指すものであり、同時に動物実験で、リハビリ効果が生じる機序と、リハビリ効果が得られるための条件、および、感覚フィードバックがリハビリ効果に与える影響などに関しても検討を加えることを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、外骨格型のアシスト装置及び機能的電気刺激を用いて、患肢を患者さんの意図通りに（強制的に）動かしてやるというペダリング型のリハビリ装置の構築を行い、これを実際の患者さんに対して適用した際の有用性を検討する事を目的としている。

(1) 疑似歩行装置として、ペダルの回転装置の他に、図1に示したクランク型の疑似歩行装置の開発について行う。これまでに製作してきたペダル型の装置は実際の患者さんによる感想として恐怖を感じるがあるという意見があったことから、本研究期間ではできるだけ使用者に恐怖を与えず、リズムカルな運動刺激を足に行うことができる装置としてクランク型の装置を製作する。この装置は子供向け玩具のペダルカーと同様の構造をしており、モータによってクランクシャフトを回転させることにより足を前後にリズムカルに駆動させることができる。

さらに、脳波を用いた動作企図の識別性能を向上させるための信号処理手法についても検討する。これまで、複数の特徴量の重み付き線形和をしきい値処理することによって動作状態を判別していたが、この時、しきい値を2つ用意することにより短時間での判断の入れ替わりを減少させることを目指す。加えて、識別に用いる特徴量を敢えて減少させることでロバストな性能を得られると考え、11正則化の利用による特徴量削減を行った識別器の構成についても検討する。

(2) モータによる回転ではなく、機能的電気刺激(FES)による筋肉の収縮により足(ペダル)の強制回転を行わせる機構の開発について行った。モータによる足の強制回転ではなく、FESにより足の筋肉を収縮させ、その力によりペダル(クランク)を回転させるシステムについて検討するため、ドロップフッ

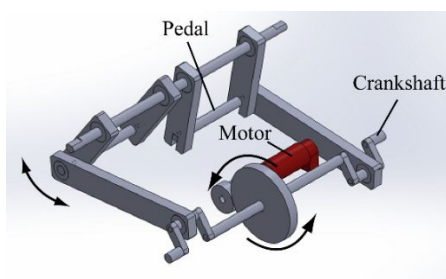


図1 クランク型疑似歩行装置のコンセプト

トを防止するためのシステムを利用することとし、モータによる足の強制回転とタイミングを同期させ、FESを併用する形で作動させる。この時、クランク装置に傾斜センサを取り付け、傾きデータとクランク装置によって実現される歩容の関係を学習することで、適切なタイミングで電気刺激を行うことができる。

(3) 電極として、ペースト等を必要としないドライ アクティブ電極を用いた脳波計測系の構築を目指す。脳波の計測は通常、導電性ペーストを直接頭皮に塗り、その上からさら電極を設置することによって行う。本研究では、導電性ペーストを必要とせず、頭皮に直接設置するだけで安定した脳波計測を可能とするドライ アクティブ電極の形状・構造の改善と、電極固定用のヘッドキャップについて検討を進める。

(4) ペダリング動作をイメージする際の脳活動について調査するため、これまでの脳波(EEG)に加えて近赤外スペクトロスコピー装置を用いた脳活動の計測を行った。この装置は脳波と異なり脳表情の血流に含まれる酸化/脱酸化ヘモグロビン量の変化を推定するものであり、頭皮上から脳活動のマップを求めることができる可能性がある。リズムカルな視覚刺激・聴覚刺激を加え、このリズムカルな刺激によるイメージング効率の上昇に対する効果等についての検討を行う。この時、健常人での繰り返し計測の結果と下肢麻痺の患者の結果を比較する。また、視覚刺激によるコマンドの増加を目指した視覚誘発電位(steady state visual evoked potential, SSVEP)の利用についても検討する。



図2 利用する FES 装置 (ウォークエイド, 帝人ファーマ)

#### 4. 研究の成果

(1) 図1に示したコンセプトに従って新たに製作したクランク型装置を図3に示す。このシステムはモータによってクランクを回転させ、リンクを用いて1秒間に1周期程度の速さで直線に近い動作を繰り返し行わせることができる。この装置の使用によって、恐怖感を与える危険性がある大腿部の上下動を減少させつつ、足のリズムカルな運動を実現することができた。この装置は初め、遊星ギアと平歯車による動力伝達を行っていたが、小型化・静音性向上のためにハーモニックドライブへと変更した。

次に脳波からの動作企図の識別性能を向上させる手法について検討を行い、2つのしきい値により誤識別を低減させる手法を提案した。例として、動作企図時に出力が1に近づき、停止企図時に出力が0に近づく識別器を考える。識別器の出力が図4のような場合、従来は図5(a)のように識別器出力が中央値  $T = 0.5$  よりも大きいか小さいかによって動作状態を判断していた。これに対し本研究では誤識別低減のため、電子回路におけるシュミットトリガ回路と同様に2つのしきい値 ( $T_h, T_l$ ) を設定し、状態の変化する方向によって異なるしきい値を利用することとする。時刻  $t$  における識別器の出力を  $y_t$ 、識別されるクラスを  $C_t = \{-1, 1\}$  とすると、この時クラス  $C_t$  は以下のように表される。

$$C_t = \begin{cases} 1 & y_t \geq T_h \\ -1 & y_t \leq T_l \\ C_{t-1} & T_l < y_t < T_h \end{cases}$$

この2段階のしきい値処理を  $T_h = 0.8$ ,  $T_l = 0.2$  として図4の識別器出力に適用した結果を図5(b)に示す。図より、しきい値を1つだけとする場合に比べ、突発的なノイズを

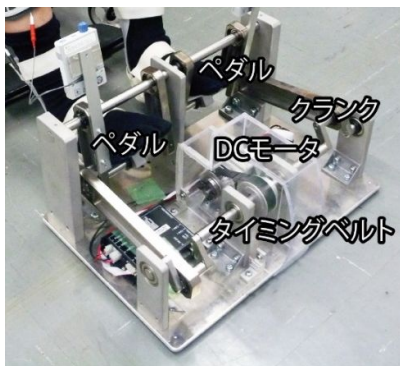


図3 製作したクランク型装置

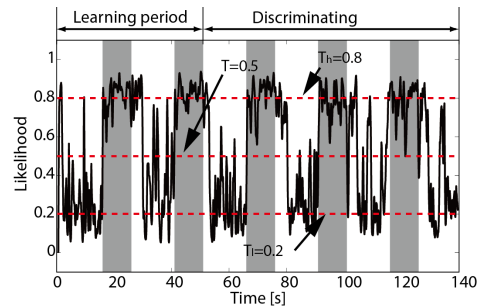
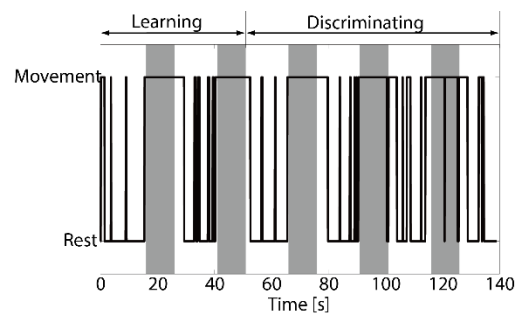
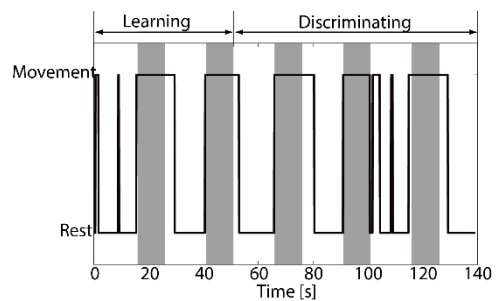


図4 脳波からの動作企図識別に関する線形識別器出力の一例



(a) 1つのしきい値 ( $T = 0.5$ )



(b) 2つのしきい値 ( $T_h = 0.8, T_l = 0.2$ )

図5 線形識別器の出力からしきい値処理により得られた運動企図識別結果

減少させることができていることが確認できる。

また、動作識別に際して最も特徴的な強度変化を起こしている帯域や位置が個人ごとに微妙に異なることを利用して、識別に用いる周波数帯域を自動で選択できる手法を提案した。この手法は、スパース推定の一種である  $l_1$  正則化を利用したものであり、比較的少ない計算時間でスパースな識別器を構成することができる。



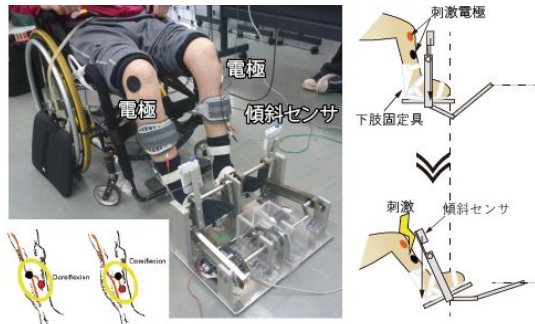


図6 患者さんへのFES装置の装着実験

(2)次に、制作した装置にFES装置を取り付け、適切なタイミングで電気刺激を行うことができるシステムを製作した。クランク型装置に加えて、FES装置を患者さんの足に貼り付けたようすを図6に示す。ここでは、腓骨神経を皮膚上から刺激することで足首を曲げる動作を強制的に行わせることができた。

また、この時にFES装置から発生した電気刺激が頭皮上で計測した脳波信号にノイズとして混入する問題が生じたが、これらの信号は複数の電極に高い相関をもって混入するため、主成分分析(PCA)を用いて第1主成分を選択的に除去後、信号の再構成を行うことによって除去できることを確認した。以上より、FES装置と外部運動刺激装置を用いた患者さんの運動企図のリアルタイム実現は可能であることを確認した。

(3)脳波計測を乾式(ドライ)で行うため、図7に示す情報通信研究機構(NICT)の成瀬康氏らが開発した小型無線脳波計(polymate mini, ap108)を使用した検討を行った。ただし、この脳波計に使用されている電極を使用した際、頭皮上に痛みを生じるなどしたため、痛みを少なくしつつ安定した脳波計測が可能な電極固定用ヘッドマウントと剣山型接触子の製作を行った。図8に製作したヘッドマウントと接触子を示す。図8左のヘッドマウントは運動に関連する頭頂部付近に脳波計測用の接触子を固定するとともに、図7に示した脳波計本体についても後頭部に設置することが可能となっている。また接触子については、ヘッドマウントとの接合部にバネを設けることで頭皮と接触させる際に片当たりすることを防止し、脳波計測時の痛みを低減する構造となっている。

これまでの成果をもとに、患者さんの足漕

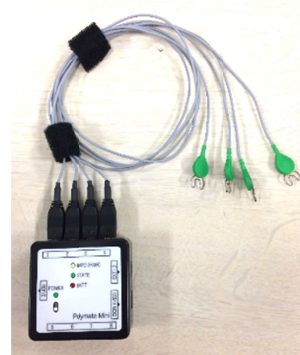


図7 小型無線脳波計(polymate mini)

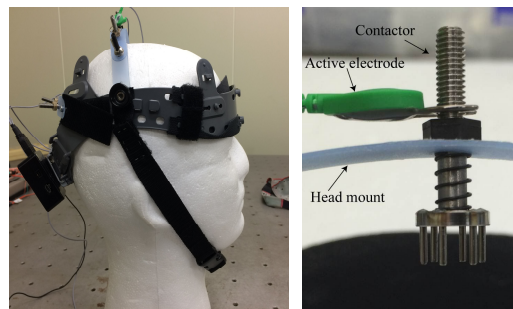


図8 製作したヘッドマウントと接触子

ぎ動作企図を脳波から読み取り、動作企図に応じて足を回転させることができる車いすシステムを製作した。本システムでは、無線型の脳波計と製作したヘッドマウントおよび接触子を用いて頭皮上の複数の電極から計測された18 Hz - 28 Hz 付近の波帯域の強度を計測し、その強度変化から動作企図を読み取る。図9に患者さんでのリアルタイムで車いすを動作させた実験の様子を示す。このとき、時間ベースで考えるとおよそ70%程度の確率で動作企図を実現できた。



図9 本研究で得られた成果から試作したBMI下肢リハビリテーションシステムと実際の下肢麻痺患者さんによる動作確認実験の様子

## 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 3 件)

- . Shintaro Nakatani, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, and Kunihiko Mabuchi, “Near-Infrared Spectroscopy Measurement for Brain Activity Analysis during Ergometer Pedal Exercise,” SICE J. Control, 査読有, vol. 7, no. 6, 2014, pp. 327–331,. DOI: 10.9746/jcmsi.7.327  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/7/6/7\\_327/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/7/6/7_327/pdf)
- . Yuhei Nishida, Shintaro Nakatani, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, Kunihiko Mabuchi, “Improvement of Pedaling Motion Classification Using Spatio-temporal Filtering for BCI Rehabilitation System”, ICIC Express Letter, 査読有, Vol.8, No.4, 2014, pp.1064-1066, DOI:なし
- . 深山 理, 横田将亮, 中西良介, 満洲邦彦, “車体型 BMI ラットカーの持続的制御に向けた神経活動改変の試み”, 生体医工学, 査読有, Vol. 52, No. Supplement, 2014, <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jsmbe/52/Supplement/contents/-char/ja/>, DOI:なし

[学会発表](計 21 件中主な物 4 件を記載)

- Shintaro Nakatani, Motoki Murakami, Nozomu Araki, Kazunori Sakurama, Shin-Ichiro Nishida and Kunihiko Mabuchi, “Frequency-Band and Electrode-Channel Selection for Motion Discrimination from Electroencephalography using l1-Constrained Least Squares,” Conference: 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics., 2017. (accepted), 2017/10/05-08, (Banff, Canada)
- Osamu Fukayama, Shintaro Hara, Itsuro Saito, Yusuke Abe, Kunihiko Mabuchi, “Active Noise Reduction with the Wiener Filter for Vagal Nerve Recording of a Goat with an Implanted Artificial Heart Device”, The 47th ISICIE Intl. Symp. on Stochastic Systems Theory and its Applications, 2015/12/05, Waikiki Beach Marriot (Honolulu, USA)
- Motoki Murakami, Shintaro Nakatani, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, and Kunihiko Mabuchi, “Motion Discrimination from EEG Using Logistic Regression and Schmitt-Trigger-Type Threshold,” 2015 IEEE

International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015/10/11, City Univ. of HongKong (HongKong, China)

[その他]

受賞(学会発表)

中谷真太郎, “麻痺患者の運動企図に応じた足漕ぎ車いす動作のためのウェアラブル脳波計の利用検討”, 第 24 回人間工学会システム大会奨励賞, 2015 年 3 月 11 日. 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

満洲 邦彦 (MABUCHI, Kunihiko)  
東京大学・大学院情報理工学(系)研究科・教授  
研究者番号: 50192349

(2) 研究分担者

荒木 望 (ARAKI, Nozomu)  
兵庫県立大学・(大学院)工学研究科・助教  
研究者番号: 10453151

深山 理 (FUKAYAMA, Osamu)  
東京大学・大学院情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号: 30508205

中谷 真太郎 (NAKATANI, Shintaro)  
鳥取大学・(大学院)工学研究科・助教  
研究者番号: 10781700

(4) 研究協力者

井尻 蓮 (IJIRI Ren)  
小西 康夫 (KONISHI Yasuo)  
村上 元気 (MURAKAMI Motoki)  
木太久 賢悟 (KIDAKU Kengo)  
成瀬 康 (NARUSE Yasushi)  
星野 隆行 (HOSHINO Takayuki)  
高橋 直紀 (TAKAHASHI Naoki)  
石橋 和磨 (ISHIBASHI Kazuma)  
中島 涼輔 (NAKAJIMA Ryosuke)  
王 正宇 (WANG Chengyu)  
西田 裕平 (NISHIDA Yuhei)