

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360201

研究課題名（和文）脳波（EEG）と機能的電気刺激（FES）による運動機能再建手法の開発

研究課題名（英文）Development of motor recovery method by electroencephalograph(EEG) and functional electric stimulation

研究代表者

伊藤 宏司（ITO KOJI）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：30023310

研究成果の概要（和文）：

脳卒中等による運動機能障害に対して、随意運動の反復により脳神経回路を再建/強化させる運動学習手法が注目を集めている。本研究では、脳卒中障害の運動機能回復を運動学習の側面から捉え、脳波(EEG)と機能的電気刺激(FES)を組み合わせて、運動意図を反映できるリハビリテーションシステムの構築および検証を行った。本手法により、随意的な運動を模倣した運動指令-感覚フィードバックの閉ループが脳内に形成されることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

Stroke is a leading cause of adult disability which induces functional deficits in motor control. Motor learning is considered as the basic principle for rehabilitation, but there are few systems which focus on motor learning for severely paralyzed patients. We developed a BCI rehabilitation system which used electroencephalogram (EEG) of motor intention (event related desynchronization: ERD) to control functional electrical stimulation (FES) of sensory feedbacks. It was demonstrated that the proposed system (EEG - FES system) accelerated motor recovery by dynamically variable FES amplitude.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：運動制御システム

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：電気刺激、脳波、脳・神経、リハビリテーション、医療・福祉

## 1. 研究開始当初の背景

脳卒中、交通事故、スポーツ傷害等により生じる機能障害は、脊髄損傷と脳部位損傷に大別される。脊髄損傷は、神経線維が脊髄レベルで切断あるいは損傷を受けることによって生じる。この場合、運動制御に関与している上位レベルの大脳皮質、小脳、並びに駆

動系である下位の筋骨格系は健常である。この脊髄損傷患者に対する運動機能再建の手法として、機能的電気刺激(Functional Electrical Stimulation: FES)が応用され、数多くの研究が報告されている。たとえば、下肢麻痺患者に対しては立位や歩行運動、上肢麻痺患者に対してはリーチングや把持動

作の再建が試みられてきた。その際、患者の運動意図は、下肢麻痺あるいは片麻痺の場合は残存する健常部位の動き、両麻痺の場合は、首、頭部、眼球、まばたき等から推測されてきた。

一方、脳部位損傷では、どの部位にダメージを受けるかによって、運動、感覚、言語、記憶等にさまざまな機能障害が残る。これらに対する根本的な治療法は残念ながら現状ではまだ見いだされていない。脳部位損傷による運動麻痺の場合、理学療法士による強制的な四肢運動や歩行訓練などのリハビリテーションが主たる手法として用いられており、機能的電気刺激による機能回復はまだ試みられていない。

しかしながら、近年、脳科学、特に、fMRI、近赤外光(NIRS)、PET等の脳イメージング技術の発達により、機能障害と脳部位の関係がかなり精密に特定できるようになってきた。このため、脳の損傷部位をこれらの手法で特定した後、直接的には、埋め込み電極による脳内電気刺激、脳表面からの磁気刺激が、間接的には、末梢神経の電気刺激により、損傷部位の周辺部に新たなニューロン活動を発現させ、機能回復につなげようとする試みが見られるようになってきた。

## 2. 研究の目的

図1に示すように、運動野は、運動前野、補足運動野、大脳基底核を中心として生成される運動イメージ・プランを受けて、小脳との機能連携のもと、筋への運動指令を脳幹・脊髄系へ出力する。その際、運動前野を中心として生起される運動イメージ・プランと自己受容体性感覚からのフィードバック信号が同時に運動野に入力されることが運動学習に必須であることが明らかにされている。

しかしながら、運動野損傷患者は運動指令を出力できないため、感覚フィードバックも得られない。本研究では、脳波(EEG)により運動前野・補足運動野・運動野近傍に生起される患者の運動イメージ(意図)を抽出し、そのタイミングに合わせて機能的電気刺激(FES)により当該筋群を駆動させ、体性感覚フィードバックを生起させる。運動意図と感覚フィードバックを同期させ、これを繰り返すことで、運動野損傷部位周辺に運動指令生成のためのニューロン回路を再構築させること目指した。

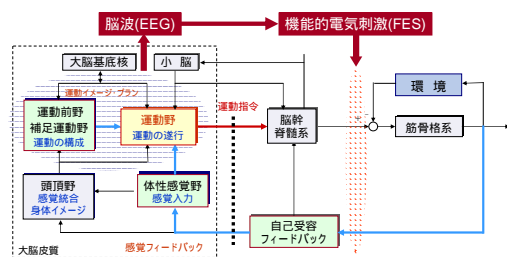


図1 運動制御機構と脳波・機能的電気刺激による運動機能回復

## 3. 研究の方法

### (1)はじめに

本研究では、脳卒中中の運動機能回復を運動学習の側面で捉え、脳波(EEG)と機能的電気刺激(FES)を組み合わせ、運動意図を反映できるリハビリテーションシステムの構築および検証を行った(図2)。運動意図情報として事象関連脱同期(ERD)を使用し、関連する基礎研究を実施するとともに、さらに、提案システム(EEG-FESシステム)を実際に脳卒中患者に適用した際の訓練効果を検証した。

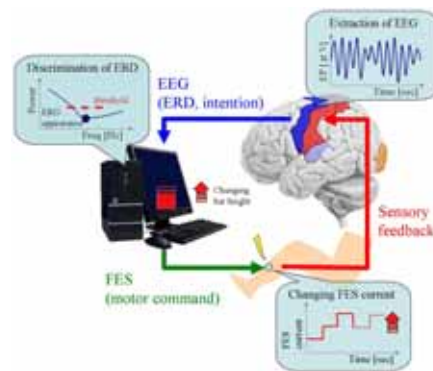


図2. EEG-FESシステムの概略

### (2) 実験条件

1名の脳卒中患者(男性、年齢=55歳、発症後30カ月経過)で実験を行った。被験者は脳幹部に梗塞があり、左半身にマヒが生じている。訓練は、足首の背屈運動に重要な前脛骨筋を対象としているが、事前評価ではほとんど筋駆動をできない(SIAS, foot-pat test: 0/5)。

タスクはマヒ側前脛骨筋運動に伴うERD抽出の有無を、図2に示すように画面上的barの高さおよび前脛骨筋に添付したFESの出力値変更により、患者に500msecずつ更新し提示した。1回1分間のタスクを計20回行わせた。EEG-FESシステムによる訓練の前後に、足首の背屈運動を繰り返しCue提示に合わせて行わせ(計30試行)、訓練前後の評価として用いた。

### (3) 実験結果

図3(a)は訓練前の脚動作のうち10回分を提示したものであり、図3(b)は訓練後を示している。訓練前は、前脛骨筋を動かそうとした結果、膝関節が動いてしまっているが、訓練後では足首背屈運動を実現できていることがわかる。図3(c)、(d)は訓練前後の1試行の前脛骨筋EMGを示しており、5秒から10秒までの間に動作するように指示した。図3(d)に示すように、訓練後に筋活動の改善が見られた。全30試行分のEMGを全波整流平滑化後、6秒から9秒間の動作中最大EMGを

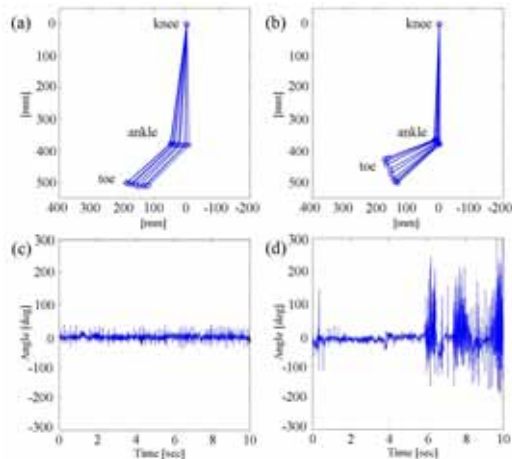


図3. 訓練前後の動作, EMG解析 : (a)訓練前脚動作, (b)訓練後脚動作, (c)訓練前EMG(1試行), (d)訓練後EMG(1試行)

用い定量化して筋活動を評価したところ, 訓練前後において有意差( $p < 0.05$ )のあることが示された.

#### 4. 研究成果

(1) 脳卒中患者に提案システム (EEG-FES システム) を適用したところ, 1日20分程度の訓練にも関わらず, 全く動かすことができなかったマヒ側前頸骨筋に有意な改善が見られた. 回復メカニズムの詳細はまだ解明できていないが, 運動指令とそれに伴う感覚フィードバックを組み合わせることにより, 脳内において運動学習による神経可塑性を進行させたと推測され, 提案システムの有用性が示唆された.

(2) さらに, 提案再建手法の改善に資するため, 運動意図の判別に用いている脳波の事象関連脱同期(ERD)の発現機序を詳細に調べた. 事象関連脱同期(ERD)の発現には個人差があり, 随意的に発現できるようになるには数ヶ月のトレーニングを要する場合もある. リハビリテーション現場では, 一日あたりの時間に制度上の制限があり, 前段階のトレーニングに長時間を費やす手法は普及しにくい.

機能的電気刺激(FES)による体性感覚フィードバックに加えて, 視覚・聴覚等の他の感覚情報を適切に統合することによって一人称的な運動イメージ(身体スキーマ)を抱きやすくする手法を実験的に解析した. その結果, 特に事象関連脱同期(ERD)の発現が視覚情報に強く影響されることを見いだした. このことは, 反復運動の様子を受動的に観察させながら, それに合わせて機能的電気刺激(FES)等で体性感覚フィードバックを与え, 運動イメージ・プランと同期させる手法が運動機能

再建手法として有効である可能性を示唆している.

#### 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8件)

- 1) Manabu Gouko and Koji Ito: Environmental modeling and identification based on changes in sensory information, Trans. on Computational Science VIII, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6260, pp.3-19, 2011, 査読有.
- 2) 野澤孝之, 近藤敏之: 近赤外分光法(NIRS)による共生情報システムの評価とデザイン, 計測と制御, Vol.49, pp.868-873, 2010, 査読有.
- 3) Takayuki Nozawa, Toshiyuki Kondo: Autonomous adaptive agent with intrinsic motivation for sustainable HAI, Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2, pp.167-178, 2010, 査読有.
- 4) 井部鮎子, 郷古学, 伊藤宏司: 表面筋電位を用いた前腕義手の複合動作識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.45, pp.717-723, 2009, 査読有.
- 5) 高橋光, 郷古学, 伊藤宏司: 運動想起フィードバック訓練による事象関連脱同期(ERD)出現の検証, システム制御情報学会論文集, Vol.22, pp.199-205, 2009, 査読有.
- 6) Takayuki Nozawa, Toshiyuki Kondo: Construction of reversible lattice molecular automata, International Journal of Modern Physics C, Vol.20, pp.901-929, 2009, 査読有.
- 7) Takayuki Nozawa, Toshiyuki Kondo: A comparison of artifact reduction methods for real-time analysis of fNIRS data, Lecture Notes in Computer Science 5618, pp.413-422, 2009, 査読有.
- 8) Seimei Abe, Takayuki Nozawa, Toshiyuki Kondo: A Proposal of EMG-based Training Support System for Basketball Dribbling, Lecture Notes in Computer Science 5617, pp.459-465, 2009, 査読有.

[学会発表](計12件)

- 1) Yuma Sasaki, Toshiyuki Kondo: A proposal of EMG-based teleoperation interface for distance mobility, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2011.10.10, Anchorage, USA.
- 2) Hiroshi Yamaguchi, Toshiyuki Kondo: Analysis of motor skill for throwing darts:

- measurement of release timing, Proceedings of SICE Annual Conference, 2011.9.16, 早稲田大学 (東京都)
- 3) Mitsuru Takahashi, Kotaro Takeda, Yohei Otaka, Rieko Osu, Takashi Hanakawa, Manabu Gouko and Koji Ito: Case study of EEG-FES system for stroke rehabilitation, Proceedings of the 4th International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, 2010.6.14, Prague, Czech Republic.
  - 4) Naoki Tomi, Manabu Gouko and Koji Ito: Combined mechanisms of internal model control and impedance control during reaching movements under complex force fields, Proceedings of the 4th International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, 2010.6.14, Prague, Czech Republic.
  - 5) Toshiyuki Kondo, Kazuto Nakamura, Takayuki Nozawa: Motor Learning by Attentive Observation, Proceedings of the 4th International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, 2010.6.14, Prague, Czech Republic.
  - 6) Takeshi Sakurada, Hiroaki Gomi, Koji Ito: Multiple Interactions between Hemispheres of the Brain Modulating Coupling of Bilateral Movements, Proceedings of IEEE International Conference on EMBS, 2009.9.5, Minneapolis, USA.
  - 7) Muhamma N. Anwar, Naoki Tomi, Manabu Gouko and Koji Ito: Influence of Motor Imagery on Learning under Complex External Dynamics, Proceedings of IEEE International Conference on EMBS, Proceedings of IEEE International Conference on EMBS, 2009.9.5, Minneapolis, USA.
  - 8) Koji Ito: Adaptive Motor Behaviors through Dynamic Interactions among the Body, Brain and Environment, Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2009.6.26, 国立京都国際会館 (京都府)
  - 9) Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko and Koji Ito: Fundamental research about electroencephalogram (EEG) - functional electrical stimulation (FES) rehabilitation system, Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2009.6.24, 国立京都国際会館 (京都府)
  - 10) Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko and Koji Ito: Functional electrical stimulation (FES) effects for event related desynchronization (ERD) on foot motor area, Proceedings of

IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME), 2009.4.9, Phoenix, USA .

- 11) Mitsuru Takahashi, Manabu Gouko and Koji Ito: Muscular sensation induce event related desynchronization (ERD) on foot motor area, Proceedings of IMEKO World Congress, 2009.9.9, Lisbon, Portugal .
- 12) Toshiyuki Kondo, Kazuto Nakamura, Takayuki Nozawa: The effect of motivated observation on human motor learning, Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobiligence, 2009.11.19, 淡路夢舞台国際会議場 (兵庫県)

〔図書〕(計2件)

- 1) 伊藤宏司: ニューロダイナミクス, 共立出版, 2010, 225p .
- 2) 伊藤宏司・近藤敏之編著: シリーズ移動知, 第3巻 環境適応 - 内部表現と予測のメカニズム, オーム社, 2010, 267p .

#### 6 . 研究組織

##### (1)研究代表者

伊藤 宏司 ( ITO KOJI )  
立命館大学・総合理工学研究機構・教授  
研究者番号 : 30023310

##### (2)研究分担者

近藤 敏之 ( KONDO TOSHIYUKI )  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号 : 60323820

永井 清 ( NAGAI KIYOSHI )  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 40198289

##### (3)連携研究者

高草木 薫 ( TAKAKUSAKI KAORU )  
旭川医科大学・医学部・准教授  
研究者番号 : 10206732

郷古 学 ( GOUKO MANABU )  
東京工業大学・総合理工学研究科・助教  
研究者番号 : 30447560