

脳の感覚運動変換メカニズムの解明に関する研究開発 (082108003)

Research and development on sensori-motor transformation of human brain

研究代表者

福田浩士 広島市立大学大学院情報科学研究科

Hiroshi Fukuda Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

研究分担者

小田垣雅人[†]

Masato Odagaki[†]

[†]広島市立大学大学院情報科学研究科

[†]Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

研究期間 平成 20 年度～平成 22 年度

概要

本研究では、人間の運動制御における情報処理メカニズムを解明するために、高密度脳電図(EEG)・脳磁図(MEG)を用いた脳活動計測・解析システム、経頭蓋磁気刺激(TMS)を用いた大脳皮質への標的刺激システムを開発した。開発した脳活動計測・解析システムを用いて運動制御に関連した脳活動を観測し、標的刺激システムで運動に第1次運動野に標的刺激することでヒトの運動制御メカニズムをシステムティックに解析した。さらに、第1次運動野の TMS 刺激部位と手指の運動に関与する骨格筋の神経結合を調べ、両者を対応付けるための神経回路モデルを開発した。

Abstract

In the present study, we developed systems for measuring and analyzing brain activity using high density electroencephalography (EEG and MEG) and for stimulating cerebral cortex using transcranial magnetic stimulation (TMS). Using the systems, we observed brain activity related to motor control and analyzed brain mechanism of motor control systematically. Furthermore, we developed a neural network model which estimated the cortical site stimulated by TMS using muscle activity in finger movement.

1. まえがき

近年、ブレイン・コンピュータ・インタフェース(BCI)の研究開発が世界的に活発になっている。BCI は脳と外界が情報を直接入出力することを可能とする技術であり、以下の相互的な機能をもつ。

(1) 脳が外部環境を検出・処理し、その処理情報の脳内表現をコンピュータ上の表現に変換してロボットなどの機械を操作する。

(2) コンピュータが外部環境を検出・処理し、コンピュータ上の情報表現を脳内表現に変換することで脳の機能を制御する。

このような BCI を開発するには、脳の情報処理メカニズムの解明が不可欠である。

現在、様々な脳活動イメージング技術の発達により、脳の部位一機能対応が明らかになってきている。しかしながら、脳活動の計測データから部位と機能の関係を推測するだけでは脳の情報処理メカニズムはブラックボックスのまま、BCI の開発にはつながらない。BCI に応用するためには、脳機能のダイナミックな情報を再現できるほど、脳機能のメカニズムを理解しなければならない。

そこで本研究課題では、人間の視覚誘導性到達運動における感覚を運動に変換するメカニズムに焦点を絞り、(1)高密度脳電図(EEG)・脳磁図(MEG)および経頭蓋磁気刺激(TMS)を用いた脳活動計測・解析システムの開発、(2)そのシステムを用いた運動計測実験、(3)神経計算モデルによる脳の情報処理の計算機シミュレーションを通して解明することを目的とした。

2. 研究内容及び成果

2.1 高密度 EEG および MEG を用いた脳活動計測・解析シ

ステムの開発とそれを用いた運動計測実験

高密度 MEG の計測データと頭部 MR 画像を用いて時空間分解能が高い電流源推定法を開発した。電流源推定には脳神経細胞の配向性を考慮した推定法を用いた。従来の電流源推定法では電流源の強度の他に 3 次元的位置、向きを推定する必要があるが、提案法は被験者頭部の MR 画像から電流源候補の位置と法線方向を抽出するため、電流源の推定パラメータが強度だけになる利点がある。この手法を用いて両手体性感覚誘発電位 SEP や聴覚誘発電位 AEP のような複数の電流源を推定できた。

高密度 EEG を用いた脳活動計測・解析システムでは、電極間の EEG コヒーレンスを解析することで運動制御に特有の神経結合を解析する手法を導入した。

この計測・解析システムを用いて、次のような運動制御タスクにおける運動および脳活動計測実験を行った。左右の人差し指で交互に速くタッピングする場合、随意的な交互タッピングが維持できず無意識的な同時タッピングが生じる。この発生メカニズムを解明するために、高速両手交互タッピング中の EEG を計測し、随意的な交互タッピングが維持されているときの脳活動と無意識的な同時タッピングが生じているときの脳活動を比較した。その結果、随意的な交互タッピングを維持するためには、利き手と反対側の大脳皮質半球における、補足運動野と第1次運動野の間及び運動前野と頭頂連合野の間の情報伝達が重要であることが示唆された。また、MEG を用いて同じ運動タスクにおける脳活動を計測し、解析した結果、同様の結果が得られた。

2.2 TMS を用いた大脳皮質への標的刺激システムの開発とそれを用いた運動計測実験

TMS の刺激コイルを取り付けた多関節アーム先端の位

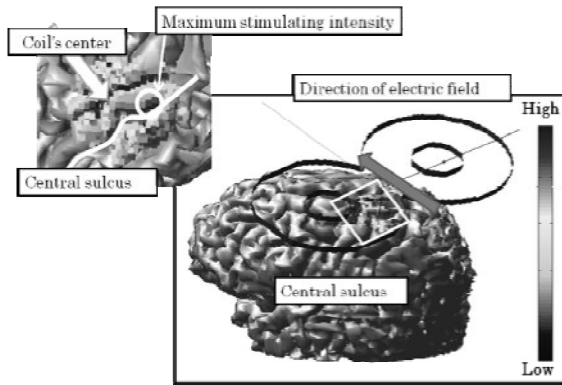


図 1: TMS の刺激部位推定結果の例

置と向きを頭部の MR 画像に統合するシステムを開発した。本システムでは、刺激部位推定は脳神経細胞の配向性と刺激興奮特性との関連性を踏まえた手法を用いた。短母指外転筋に最も大きく運動誘発電位(MEP)が観測された場合の刺激部位推定結果を図 1 に示す。刺激強度の最大値が、第 1 次運動野が位置している大脳皮質の中心前回と推定されたため、十分な推定結果が得られたと考えられる。

TMS による標的的刺激システムを用いた運動計測実験では、力覚デバイスにより手指先端の伸展方向に外力を負荷したときの第 1 次運動野への磁気刺激の影響を調べた。その結果は、TMS の影響は脳のフィードバック制御メカニズムで説明できることを示唆していた。

2.3 神経計算モデルを用いた計算機シミュレーション

神経計算モデルの開発では、人差し指の力生成タスクにおけるフィードフォワード制御を対象として、第 1 次運動野の刺激部位と力生成に関与する骨格筋の神経結合を調べ、両者を対応付けるための神経回路モデルを開発した。まず、TMS の刺激コイル位置を変えて M1 を磁気刺激したときの、人差し指の力とその生成に関与する骨格筋の MEP を計測し、神経回路モデルを用いて MEP と指力がどこの部位の刺激によって誘発されたのかを判別した。その結果、約 90% の正答率で刺激部位を推定することができた(図 3)。

この神経回路モデルを基礎とすることで、所望の指力を生成するための脳活動を誘発することができる脳操作型の BCI の創出が期待できると考えられる。

3. むすび

本研究課題では、人間の視覚誘導性到達運動における感覚を運動に変換するメカニズムに焦点を絞り、(1)高密度脳電図(EEG)・脳磁図(MEG)および経頭蓋磁気刺激(TMS)を用いた脳活動計測・解析システムの開発、(2)そのシステムを用いた運動計測実験、(3)神経計算モデルによる脳の情報処理の計算機シミュレーションを通してその解明にアプローチした。その結果、精度の高い脳活動計測・解析システムを実現した。また、そのシステムを用いた運動計測実験を通して、手指の交互タッピングの運動制御のために重要な脳部位間の連関を見出した。指力、筋活動から TMS の刺激部位を推定する神経回路モデルを開発した。

今後は、これらの計測・解析システムと神経回路モデルを発展させることで、新しい BCI の創出を目指す。

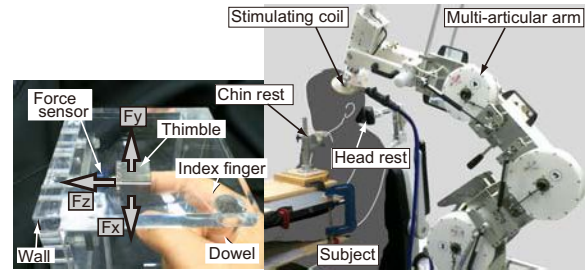


図 2: TMS を用いた脳標的的刺激システム

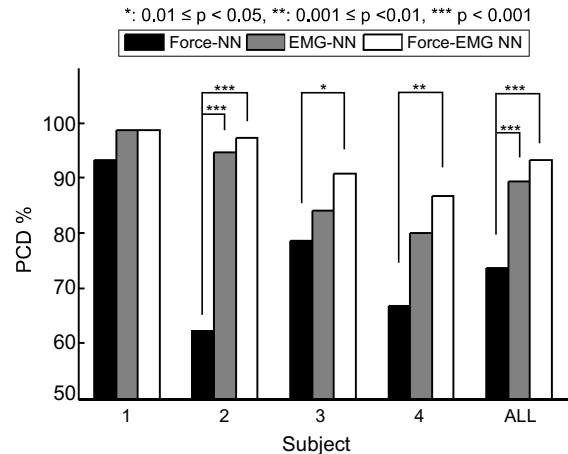


図 3: 神経回路モデルによる刺激部位判別の正答率

【誌上発表リスト】

- [1] Hiroshi Fukuda, Masato Odagaki, Osamu Hiwaki, Atsushi Kodabashi, Toshiro Fujimoto, "Estimation Method on Multiple Sources of MEG Based on the Columnar Structure of the Cerebral Cortex", IEEE Transactions on Magnetics Vol.44 No.11 pp4425-4432 (Nov. 2008)
- [2] Masato Odagaki, Sanae Ohishi, Hiroshi Fukuda, Osamu Hiwaki, "Suppression of Electromyogram of Hand Muscle Elicited by Transcranial Magnetic Stimulation over the Primary Motor Cortex", IEEE Transaction on Magnetics Vol.44 No.11 pp4545-4548 (Nov. 2008)
- [3] Hiroshi Fukuda, Masato Odagaki, Osamu Hiwaki, "Identification of Stimulated Sites Using Artificial Neural Networks Based on Transcranial Magnetic Stimulation-Elicited Motor Evoked Potentials", 電気学会論文誌 C Vol.120 No.12 pp2204-2209 (2010 年 12 月 1 日)

【受賞リスト】

- [1] 福田浩士、小田垣雅人、樋脇治、生体医工学シンポジウム 2008 ベストリサーチアワード、「両手指の連打タッピング運動における高密度脳電位計測」、2008 年 9 月 19 日
- [2] Hiroshi Fukuda, Young Investigator's Award of IEEE West Japan Chapter of Engineering in Medicine and Biology, "A minimum norm method for estimating current source distribution of MEG based on orientation of pyramidal cell in cerebral cortex", 2009 年 11 月 28 日