
運動－視覚神経ダイナミクスの非侵襲計測技術による「操作感」の評価

Measurements of visuomotor neural dynamics using noninvasive brain imaging techniques

1071001

研究者代表 独立行政法人産業技術総合研究所 研究グループ長 岩木 直

[研究の目的]

人と機械の間のインターフェイス設計に関して多くの研究が行われてきたが、主観的な操作の容易さ(操作感)を感じる背景にある脳内の認知機構の理解は進んでいない。本研究では、簡易 VR 環境に対する被験者の働きかけと、それに対する視覚へのフィードバックを例に、VR 環境の操作感が脳内の運動-視覚連関の中でどのように処理・認知されるのか、脳波・脳磁界計測(EEG/MEG)、機能的MRI(fMRI)および行動学的計測を用いて可視化する。

[研究の内容・成果]

運動-感覚連関は、自己運動の結果生じる環境変化の正しい知覚に重要な役割を果たしており、環境への積極的な働きかけと環境から感覚入力へのフィードバックとの時間・空間的整合性は、環境情報の認知に大きな影響を与える。これらことは、**human-computer interface** の「操作感」の知覚機構の解明には、運動-感覚連関の神経ダイナミクスを明らかにすることが重要であることを意味する。また、運動とそれに対する感覚フィードバックに含まれる時間的要素が、「操作感」の知覚に大きな影響を与えるという事実は、上記の脳活動の生じる脳部位や活動の増減以上に、運動-感覚連関を構成する脳部位間の相互作用あるいは因果関係がより重要で

あることを示唆している。本研究では、とくに「操作感」への寄与の大きい運動と視覚の連関(運動-視覚連関)を扱う。

人-機械インターフェイスの操作から得られる「現実感」(あるいは「操作感」)の知覚機構に関して、これまで主に心拍数・血圧などの生理指標に基づいた定量的な評価の試みがなされてきた。これらの生理指標の「操作感」の受容による変化は、主に自律神経機能のゆらぎ、すなわち人体の恒常性に対する影響として解釈される。これらの変化は、人の外界に対する働きかけおよびそれに対する環境からのフィードバックが脳内で認知・解釈された結果生じた二次的なもので、脳神経活動に基づいた運動の制御や刺激の知覚・認知過程、あるいは運動と感覚機構の相互作用をも含めた現実感あるいは操作感の受容を、直接計測することは不可能であった。本研究では、心理物理学的計測や心拍数などの二次的生理指標の計測のみならず、先端的な複数の非侵襲脳機能計測技術を用いることにより、根元的な生理指標である脳神経活動の評価を通して、VR 環境における被験者の行動とそれに対する環境からの視覚フィードバックの整合性が、脳神経活動にどのような影響を与えるのかを検証する。

1. MEG/fMRI 環境で利用可能な簡易印一た



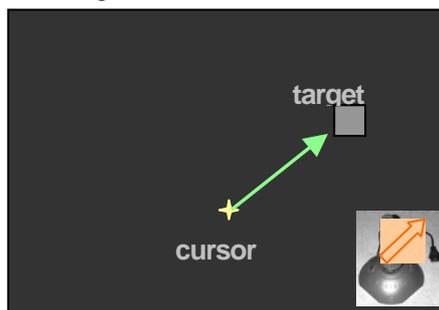
図1 MEG/fMRI コンパチブルな簡易実験環境

一フェイスと実験課題の構築

非磁性材料と光センサを用いたジョイスティック(以下, JS), 光ファイバケーブルを用いて, MRI スキャナおよびMEG システム中で使用可能な簡易ヒューマン-コンピュータ・インターフェースを作成した. この実験システムでは, MEG システムのもつ, 高い時間的精度 (ms オーダ)を最大限に活用するため, 被験者の JS 操作に応じて, 視覚フィードバックをフレーム(リフレッシュレート 60Hz)ごとに制御することを可能にし, MEG/ fMRI 実験のための十分な性能を持つことを確認した.

この実験システムを用い, JS の操作によって, ターゲットに向かってカーソルを追従させるターゲット追跡課題を作成した.

(A) Congruent condition



(B) Incongruent condition

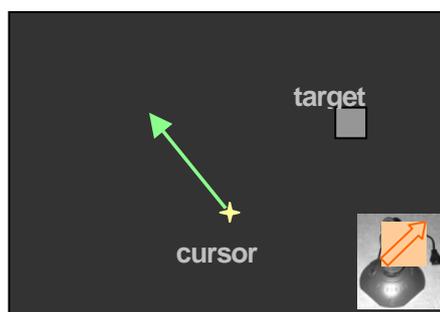


図2 2次元ターゲット追跡実験

2. MEG 実験結果

MEG 装置中で, 2次元ターゲット追跡実験を遂行中の被験者の, MEG による脳活動計測を行った. 被験者に, JS を操作してスクリーン上に現れるターゲットに向かってカーソルを動かす課題を課した.

カーソルは,

(A) 被験者の意図した方向 (congruent 条件),
あるいは

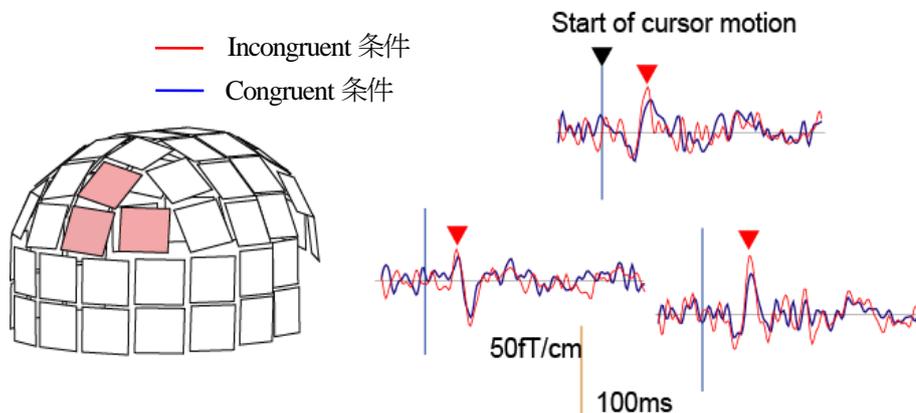


図3 2次元ターゲット追跡実験で得られた MEG 信号. 頭頂-後頭部のセンサで, 条件間(congruent-incongruent)の差が観測された.

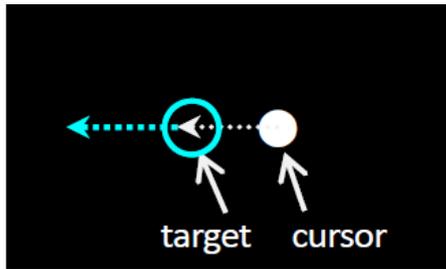


図4 4次元ターゲット追跡実験

(B) 被験者の意図した方向とは異なる (90° , 180° , 270°) 方向 (incongruent 条件) に動くこととした(図 2). 右利き被験者 3 名がカーソル移動操作を行っている最中の MEG 信号を, 全頭型 MEG システム(Neuroimag-122™, Elekta-Neuromag, Finland)を用いて計測(アナログ帯域通過フィルタ $0.03 - 100$ Hz, サンプリング周波数 600 Hz, 試行回数 各条件 50 回以上)すると同時に, 被験者右腕から筋電図(EMG)を計測した.

この結果, 被験者の JS 操作とそれともなう視覚的フィードバックの onset に同期して, 潜時 $200 - 300$ ms で, 視空間処理に関わる頭頂-後頭部の MEG センサに, 被験者の意図とカーソル移動との mismatches を反映していると思われる脳活動の差が観測された(図 3).

3. fMRI 実験結果

MRI スキャナ中で, 1 次元ターゲット追跡実験を遂行中の被験者の脳活動の計測を行った. 被験者は, JS を操作してスクリーン上を左右に移動するターゲットを追従する課題を課した(図 4). カーソルは,

- (a) 被験者の意図した方向に動く (congruent 条件), あるいは
- (b) 被験者の意図した方向と関係なく, あらかじめ他の被験者によって遂行され, 記録された速度変化で動く (incongruent 条件) こととし, (a)(b)条件および rest 条件をランダムな順序で各 18 秒間のブロックで呈示した. また, fMRI 実験終了直後に, MRI スキャナ外

で同じ 1 次元ターゲット追跡課題を課し, 各ブロックで被験者の JS 操作がどの程度画面上のカーソルの動きに反映されていたか, $0 \sim 100$ の数値による主観的評価(subjective rating)報告課題を課した. 画面上でのターゲットとカーソルの位置は逐次記録し, 各条件におけるターゲットのターゲット追従成績 (ターゲットとカーソルの平均距離) を計算した. 本報告までにデータ取得を行った被験者数は 7 名である.

得られた fMRI データは SPM (Statistical Parametric Mapping)ソフトウェアを用いて, 脳活動分布解析を行った. 各計測セッションにおける先頭イメージに整列(co-register)した後, 6 mm の Gaussian kernel を用いた空間的に平滑化した. 脳活動強度の統計検定を行うため,

- (i) 各視覚刺激条件のブロック呈示時間をモデル化した boxcar 関数に hemodynamic response function (HRF) を畳み込んだ (convolve)した時系列波形,, および
- (ii) fMRI 実験直後に得られた, 各ブロックの主観的評価値に hemodynamic response function (HRF) を convolve した時系列波形

を regressor とする general linear model (GLM)を用いて, 各条件(a)/(b)間の脳活動強度差および, のマップ(fMRI 脳活動マップ)を作成した.

ターゲット追従成績(ターゲットとカーソルの平均距離) と主観的評価値との間には, 有意な相関が観測された ($r = -0.2623$, $p < 0.005$ in congruent 条件; $r = -0.2169$, $p < 0.01$ in incongruent 条件). また, fMRI データの統計解析結果では,

1. congruent および incongruent 条件間では, 有意な脳活動の差は観測されなかった.
2. 一方, 右半球の頭頂-側頭接合部 (temporo- parietal junction: TPJ) の活動が, 被験者の操作の自己主体感 (agency) を反映する主観評価値の变

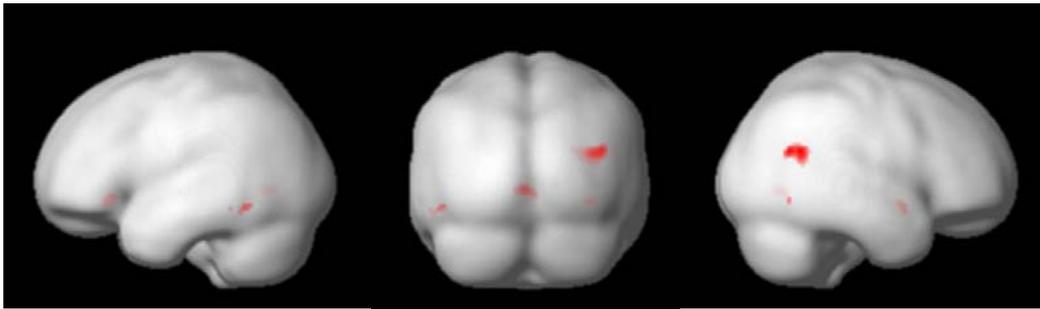


図51 次元ターゲット追跡 fMRI 実験で、被験者の操作の自己主体感 (agency) を反映する主観評定値の変化と有意な相関が観測された部位 (TPJ)。

化と有意な相関をもつことが示された (図5)。

4. 考察

これまでに得られた成果は、被験者の不—マン—コンピュータ—インターフェース操作における自己主体感 (「操作感」) が右半球頭頂部から側頭部にかけての神経回路、とくに頭頂—側頭接合部 (TPJ) の神経活動強度で特徴づけられることを示している。

この部位は、これまでの fMRI を用いた研究によって、体の一部 (body parts: 手指等) に対する自己主体感 (sense of agency) の受容に深く関連していることが明らかにされており [1], 本研究の結果は、それがさらにコンピュータ—インターフェースの操作に対する自己主体感にまで拡張できる可能性を示唆している。

5. これまでに得られた結果のまとめ

MEG および MRI スキャナ内で利用可能な簡易 VR システムを用いて、ヒューマン—コンピュータ—インターフェースの操作に対する自己主体感が、右半球の頭頂および側頭部の脳活動に符号化されていることを示唆する結果を得た。この成果は、これまで body parts の運動の自己主体感に関して得られている知見が、コンピュータ—インターフェースの操作感にも拡張できる可能性があることを示唆している。

[1] Decety J and Lamm C. *Neuroscientist*,

13: 580-593, 2007.

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、「操作感」の受容に、運動—視覚—連関の一部を構成する、TPJ の活動が密接に関連することを示した。

我々は現在、fMRI および MEG データから、脳内の複数の活動部位間の神経活動の相互作用 (脳機能連関) を評価するための技術の開発を進めている。今後さらに、本実験課題に関しても、fMRI データと MEG データの統合解析を行い、TPJ と他の部位 (主に高次視覚野や上頭頂葉) との間の機能連関を明らかにするための研究を展開する。

[成果の発表, 論文等]

1. Iwaki S., BOnmassar B., Belliveau JW., Dynamic cortical activity during the perception of 3-D object shape from 2-D motion, *Biomagnetism*, 118-120, 2008.
2. Kashiwagi M., Iwaki S., Narumi Y., Suzuki S., Parietal dysfunction in developmental coordination disorder children: An fMRI study, *Neuroreport*, In Press.
3. Iwaki S., Takano K., Kansaku K., Neural activity in the parieto-temporal area is correlated with the subjective sense of agency during hand movements of visual target tracking, Society for Neuroscience 2009 (SFN2009) Meeting 発表予定.