

氏名	おがわ けん じ 小川 健 二
学位(専攻分野)	博士(情報学)
学位記番号	情博第238号
学位授与の日付	平成19年1月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	情報学研究科知能情報学専攻
学位論文題目	ヒト運動制御における予測制御機構に関わる神経基盤の解明：fMRI 研究
論文調査委員	(主査) 教授 乾 敏郎 教授 片井 修 助教授 齋木 潤

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、ヒトの巧みで正確な運動を実現するための予測制御機構に関わる神経基盤の解明を行った。実験ではコンピュータマウス操作を対象とし、その際のカーソルの視覚フィードバック情報に実験的操作を加え、マウス操作時の脳活動を核磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging; fMRI)で計測した。

第1章では、ヒト運動制御の特徴を述べ、生体に固有の遅延を補償するためのヒトの運動予測制御モデルについて概説した。さらに先行研究から運動の状態推定機構との関連が示唆される脳部位について概説するとともに、本論文での研究対象について述べた。

第2章では、運動中の効果器(カーソル)の視覚フィードバックに遅延を導入することにより、視覚フィードバック遅延を補償するための予測制御に関わる神経基盤の特定を行った。fMRI結果から、右側の頭頂間溝(intraparietal sulcus; IPS)の活動が、運動誤差と正の相関を示した。また視覚フィードバックに遅延がある状況で、右側の頭頂側頭接合部(temporo-parietal junction; TPJ)の活動が運動パフォーマンスと正の相関を示した。このことから右IPSが自己運動のオンラインの誤差評価に、右TPJが視覚フィードバック遅延を補償するような状態推定に関連することが示唆された。

第3章では、運動中の効果器の視覚フィードバックに遮断と再呈示という操作を加えることにより、第2章で見られた脳部位への視覚フィードバック情報、およびそれに基づいたオンラインの運動修正(視覚フィードバック制御)の影響について検討した。行動データから、視覚フィードバック遮断中には運動誤差の増加が見られ、呈示後にはオンラインの運動修正が見られた。fMRI結果から、視覚フィードバック呈示後の運動誤差と第2章で見られた右IPSの活動とに正の相関が見られ、右IPSの誤差評価がオンラインの視覚フィードバック制御に関連する点が明らかとなった。また同じく第2章で見られた右TPJの活動が視覚フィードバック呈示後に見られたことから、右TPJが内的予測と視覚フィードバックとの統合に関連する点が示唆された。さらに視覚フィードバック遮断中の運動パフォーマンスと前補足運動野(pre-supplementary motor area; pre-SMA)の活動に正の相関が見られ、pre-SMAが視覚情報の得られない際の内的な視覚運動イメージ化に関わる点が示唆された。

第4章では、第2章および第3章で用いた自己運動と、外部運動との推定における神経基盤の違いについて、第3章で用いた視覚遮断条件により検討した。また新たに統制条件として視覚遮断がない条件を加えることで、視覚フィードバック遮断中に活動増加する脳部位の特定を行った。fMRI結果から、自己運動と外部運動に共通して視覚遮断中にpre-SMAの活動が見られ、pre-SMAが遮断対象の動作主に関わらない視覚運動イメージ化に関連することが示唆された。また自己運動と外部運動の視覚フィードバック遮断中には、それぞれ左下頭頂小葉(inferior parietal lobule; IPL)と右上/下頭頂小葉(superior parietal lobule; SPL/IPL)の活動が見られ、左IPLが運動指令の遠心性コピー、および自己受容感覚を利用した自己運動の内的な推定に、右SPL/IPLが過去の視空間情報を用いた外部運動の推定にそれぞれ関連する点が示唆された。さらに過去の症例研究における後部頭頂皮質の側性との関連について考察した。

最後に第5章では、総合考察として、第2章から第4章までの一連の実験結果に対する統括を行い、本研究から明らかとなった状態予測制御を構成する神経基盤について考察した。また、今後の研究展望についても記した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ヒト運動制御における脳内の予測制御機構について、行動データ分析、および核磁気共鳴画像法（fMRI）により研究した成果をまとめたものである。得られた主要な研究成果は次の通りである。

- 1) コンピュータマウスを用いた曲線のトレーシング運動中に、カーソルの視覚フィードバックに遅延を導入した。行動データおよびfMRI結果から後部頭頂皮質の右頭頂間溝（IPS）が視覚的な運動誤差評価に、頭頂側頭接合部（TPJ）が遅延を補償する予測制御に関連することを明らかにした。
- 2) 同じくトレーシング運動中のカーソルの視覚フィードバックに遮断と再提示という操作を加えた。結果から前補足運動野（pre-SMA）が視覚情報の得られない際の内的な運動予測に、右IPSが視覚フィードバック情報に基づいたオンライン制御に、さらに右TPJが視覚情報と内的予測との統合に関連する点を明らかにした。
- 3) 視覚トラッキング運動中に、自己運動（マウスカーソル）と外部運動（ターゲット）に対して視覚遮断を加えた。結果から後部頭頂皮質の右上/下頭頂小葉（SPL/IPL）、左下頭頂小葉（IPL）がそれぞれ自己運動と外部運動の内的推定機構に関連する点を示した。

本論文は、過去の症例研究等から示唆されてきた後部頭頂皮質（PPC）と予測制御機構との関連について詳細に検討を加え、PPCの下部領域（subdivision）が予測制御機構における異なる機能的役割を担っている点を明らかにした点が評価できる。本研究では、行動実験、制御モデル、および脳機能イメージングを有機的に統合した手法を用いることによって、脳内の予測制御機構の解明に大きく貢献することができた。また本研究は、コンピュータディスプレイでのマウス操作という仮想空間上での運動特性について検討することで、ヒトに対して効果的なインタフェース開発のための基礎実験という側面からも評価できる。

ヒトの認知機能は、自らの身体あるいは道具を効果器として用いた運動による、外部環境との動的なインタラクションの中で生成されるものである。本論文は、脳内の内的予測と外的情報（感覚フィードバック）との相互作用の中で生成されるダイナミックな状態推定機構を明らかにしたものであり。脳の動的な認知機構の解明に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成18年11月1日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。