

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 宮崎 真

論文題目：Time-dependent property of the human movement variability

(ヒトの動作変動の時間的特性)

一定の出力を繰り返そうとしても、ヒトの動作は絶えず変動し続けている。あるシステムの出力の変動特性を調べることは、そのシステムの動作メカニズムを知る上で有効な手法であるが、標準偏差や変動係数や相関係数といった変動を表す古典的統計指標においては、変動の経時的変化は無視されている。これに対し、最近発展してきたフラクタル解析により、変動の時系列プロファイルから意味のある情報を抽出することが可能になった。本論文は、この方法を用いてヒトの動作における変動の時間的特性を解析することによってヒトの正確な随意運動制御のメカニズムを考察した一連の研究をまとめたものである。

本論文は、上記のテーマに関する過去の研究状況及び解析法を第1章で詳述し、申請者が行った5つの研究の結果を第2章から第6章に、それらのデータに基づくメカニズム解明のための解析を第7章に、そして総括論議を第8章に加えて構成されている。

第2章(研究1)に報告された実験では、被験者は、肘屈曲伸展動作によって画面上のカーソルを操作し、できるだけ素早く且つ正確にカーソルを標的内に定位する「急速標的到達動作課題」を行った。動作キネマティクスの試行間変動についてフラクタル解析を行った結果、動作の最初期に発現する最高加速度の変動にはスペクトル指数 $\beta=0.3$ のフラクタル相関が確認されたが、そのフラクタル相関は最高速度時点では減弱し($\beta=0.2$)、動作終着点では消失に至り、ホワイトノイズ化した($\beta=0$)。

第3章(研究2)の実験では、課題動作は実験1と同じであるが、腕を標的位置に停止させずに標的を通過させ、通過後任意の位置で停止させた。研究1と同様の解析の結果、同じく最高加速度の変動にフラクタル相関が認められた($\beta=0.54$)が、そのフラクタル相関は、研究1とは異なり動作軌道が進行しても消失せず、むしろ増大した($\beta=0.67-0.75$)。

ターゲットによる終着点の制約を受けない動作にみられたこの結果は、標的到達動作軌道進行にともなうフラクタル相関消失現象が標的へ向けて動作軌道が調整されていく過程の表れであるという研究1の解釈を強く支持するものであった。

第4章(研究3)及び第5章(研究4)は、第2、3章の課題動作に関わる筋活動の変動に関するフラクタル解析の結果である。動作を開始させる主働筋活動指標としての筋電図積分値の変動、および動作を減速停止させる拮抗筋筋電図積分値の変動に $\beta=0.2-0.3$ のフラクタル相関が確認された。筋電活動は α 運動ニューロンから筋への入力を反映する

ものであることから、2、3章で報告された標的到達動作の初期キネマティクス変動におけるフラクタル相関の起原は中枢神経系活動にあることが明かとなった。一方、これらの筋電図のフラクタル相関は研究2で得られた最高加速度変動のフラクタル相関より有意に弱かった。この結果は、筋活動から運動発現までの過程に介在する筋骨格系ダイナミクスがフラクタル相関を増大させている可能性を示唆するものであった。

しかし、この結果は、筋電活動開始停止時刻計測上のノイズに起因するアーチファクトである可能性もある。その点の検証実験が第6章(研究5)に報告されている。すなわち、被験者にとって至適な振幅とリズムの肘伸展屈曲繰り返し動作を行わせた。この動作は筋電成分が単相でかつ開始停止が明確であるため測定ノイズが小さい。その結果、研究4と同様、筋電図変動の β 値(0.3-0.4)は動作キネマティクス変動の β 値(0.5-0.9)より有意に小さかったことから、筋骨格系ダイナミクスのフラクタル相関増大への貢献が確認された。

第7章(研究6)では、研究1~4のデータに、申請者が創案した周波数帯域分離変動説明率分析を適用し、研究1で観察された標的到達動作軌道進行に伴うフラクタル相関消失現象のメカニズムを考察した。その結果、標的到達動作においては、最高加速度変動による動作最終位置変動の説明率は、高周波数成分より低周波数成分の方が低く、また最高加速度変動による拮抗筋筋電図積分値変動の説明率は、高周波数成分より低周波数成分の方が高いことが明かとなった。つまり、動作初期から動作終着点までの間に、動作初期キネマティクスの長期変動成分の方が拮抗筋による強い補償調整を受けていることが明かとなった。急速標的通過動作のデータにはこのような特徴は認められなかった。

第8章(総括論議)では、以上の結果を先行研究と比較しつつ総合的考察を行っている。

本研究の成果は以下のようにまとめられる。(1)セルフペースタッピング、立位姿勢維持などの自動性の強い動作(先行研究)だけでなく、標的到達動作(本研究)という随意性の強い(自動性の低い)動作でも開始直後の比較的自動的な出力の変動には、フラクタル相関が存在する。(2)動作のフラクタル相関の起原は中枢神経系ダイナミクスにある。(3)筋電活動から運動出力への変換過程に介在する筋骨格系ダイナミクスがフラクタル相関を増大させる。(4)標的到達動作という自動的でない意図的動作であるヒトの定位動作制御システムにおいては、動作出力誤差の長期トレンドに対する予測的調整が機能して最終停止位置のフラクタル相関が消失する。(5)この随意動作特有の調整機構は、従来考えられて来た動作出力誤差に対する逐一調整よりも最終動作状態の安定度達成に大きな貢献をしている。

これらの成果はすべて申請者のオリジナルな発見であり、学術業績として極めて有意義であると認められる。よって、本審査委員会は、本論文は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。