

## 論文の内容の要旨

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)

氏名 宮崎 真

### はじめに

たとえ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。あるシステムの振舞の“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。これまで多くの研究者がヒトの動作の“変動”を研究してきた。これらの研究では変動係数や相関係数といった古典的統計指標が用いられてきた。そこでは、“変動”の時間的側面は無視されている。1990年代以降、フラクタル解析等の数学的手法の発展より、“変動”の時系列プロファイルから意味ある情報が抽出可能になった。本研究では、ヒトの動作における変動の時間的特性を調べ、それをもとにヒトの動作制御系の機能メカニズムを考察していく。

### < 1 > 急速標的到達動作における動作キネマティクス変動の時間特性

被験者は、肘屈曲-伸展により画面上のカーソルを操作し、急速標的到達動作課題を行った(動作振幅 31.5°, 標的幅 3°)。被験者は、ピープ音に素早く反応し、スタート地点からなるべく早く且つなるべく正確にカーソルを標的内に定位することが求められた(300 試行, 試行間隔 3 秒)。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、最高加速度の変動にフラクタル相関が確認された。その相関強度を示すスペクトル指数 $\beta$ の値は 0.31 であった。しかし、そのフラクタル相関は最高速度では減弱し( $\beta=0.2$ )、動作

終着点では消失に至り、ホワイトノイズ化した ( $\beta=0$ )。同様の結果が位置軌道の進行過程にも認められた。筆者は、この現象を標的へ向けて動作軌道が調整されていく過程の表れと推測した。

## <2> 急速標的通過動作における動作キネマティクス変動の時間特性

次に急速標的通過動作を実験課題として施行した。被験者は、ピープ音に素早く反応し、スタート地点からなるべく早くカーソルを標的 (距離 15°) を通過させることが求められた (300 試行, 試行間隔 3 秒)。なお、標的通過後カーソルが消えるように設定され、最終動作位置については一切の制約がなされなかった。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、<1>と同様に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、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上記<1>の推測を強く支持するものである。

## <3> 急速標的到達動作における動作関連筋電活動変動の時間特性

急速標的到達動作中の動作関連筋電活動の変動についてフラクタル解析を行った。動作を開始させる主動筋活動成分である AG1 積分値の変動 ( $\beta=0.2$ )、および動作を減速-静止させる拮抗筋活動成分である ANT 積分値の変動 ( $\beta=0.3$ ) にフラクタル相関が確認された。筋電活動は  $\alpha$  運動ニューロンから筋への入力を反映するものであり、この結果は、標的到達動作の初期キネマティクス変動にみられたフラクタル相関の起原が中枢神経系活動にあることを示す。

## <4> 急速標的通過動作における動作関連筋電活動変動の時間特性

急速標的通過動作中の動作関連筋電活動の変動についてフラクタル解析を行った。<3>と同様に AG1 積分値の変動 ( $\beta=0.36$ ) および ANT 積分値の変動 ( $\beta=0.26$ ) にフラクタル相関が確認された。そして、これらのフラクタル相関は最高加速度、最高減速度の変動におけるフラクタル相関よりも有意に弱いものであった。この結果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示唆された。一方、<3>の標的到達動作では、筋電活動とキネマティクスとでフラクタル相関強度の差に有意性は認められなかったが、これは、動作軌道の定常化のための拮抗筋間協応が生じているためと推測した。

## <5> 制約のない繰り返し動作における動作関連筋電活動変動の時間特性

<4>では、筋電変動のフラクタル相関の強度は動作キネマティクス変動のフラクタル相

関強度に比べ有意に低いことが観察された。その要因としては筋電活動成分間の干渉による測定上のノイズが関係している可能性も考えられる。そこで、被験者の至適な振幅、リズムによる肘伸展-屈曲繰り返し動作を実験課題として施行した(8分間)。この動作では、伸展-屈曲の各加速フェイズに関連した筋電成分が単相であるため測定上ノイズの影響が低い。その結果、動作キネマティクスの各パラメーターの変動における $\beta$ 値が0.5-0.9であったのに対して、関連する筋電図の各パラメータの変動における $\beta$ 値は0.3-0.4で、それぞれ間に有意な差が認められた。この結果から、筋骨格系ダイナミクスがフラクタル相関増大に貢献しているという推測が支持された。

## <6> 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のメカニズムの解析

<1>で観察された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のメカニズムを調べるために、周波数帯域分離変動説明率分析を標的到達動作課題と標的通過動作課題で得られたデータに行った。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、高周波数成分に比べ、低周波数成分の方が低い値を示した。つまり、短期変動成分に比べ、長期変動成分の方が動作初期キネマティクスから動作終着点までの変動残存率が低いことを意味する。また、最高加速度変動によるANT積分値変動の説明率は、高周波数成分に比べ低周波数成分の方が高い値を示した。つまり、動作初期キネマティクス変動のうち、短期変動成分によりも長期変動成分の方が強い減速調整を受けていることを意味する。この初期キネマティクスの長期変動成分に対する強い補償調整は、周期パワースペクトル表記上、初期キネマティクス変動に比べて、動作終着点変動で低周波成分パワーを相対的に減衰させる。その結果、初期キネマティクス変動で観察されたフラクタル相関が動作終着点変動ではホワイトノイズと評価されるフラットパターンとなったと考えられる。一方、同様の分析結果は急速標的通過動作のデータには認められなかった。

## 総合的考察

従来の研究で、リズムタッピング(Yamada 1994, Chen et al. 1997)、歩行(Hausdorff 1995, 1996)、立位姿勢維持(Duarte 2000)、等の比較的自動的な動作変動においてフラクタル相関が観察されてきた。本研究では、随意性の強い間欠的標的到達動作の初期キネマティクス変動にフラクタル相関を確認した。上述の研究のほとんどでは、動作におけるフラクタル相関の生成メカニズムについて中枢神経系活動に関連させて議論がなされてきたが、実際に動作中の中枢神経系データを記録していなかった。本研究では、上肢の動作中の動作関連筋電活動の変動にフラクタル相関を観察し、動作のフラクタル相関の起原が中枢神経系ダイナミクスにあることを確認した。さらに動作キネマティクス変動との比較から、筋骨格系ダイナミクスが筋電活動から運動出力への変換過程でフラクタル相関を増大させている可能性を示した。つまり、ヒトの動作における強いフラクタル相関は中枢神経系と筋骨格系のダイナミクスの複合によって生じていると考えられる。

標的到達動作の初期キネマティクスに観察されたフラクタル相関は動作軌道の進行にともなって減弱していき動作終着点では消失にいたることも確認された。この現象は、終着点の制約を受けない動作には起らないことから動作軌道調整の結果によることが確認された。そして、周波数帯域分離変動説明率分析の結果、標的到達動作軌道進行にともなうフラクタル相関消失の背景として、初期キネマティクス変動における短期成分よりも長期成分に対して強い補償調整が働いていることが示された。この結果から、動作出力誤差の長期トレンドに対する予測的調整がヒトの定位動作制御システムにおいて機能していること、そして、それが従来考えられてきた動作出力誤差に対する逐一調整よりも最終動作状態達成に大きく貢献していることが明らかとなった。