

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 門田 宏

論文題目 : Spatiotemporal pattern formation in synchronized human movements

(ヒトの同期動作における時空間パターンの形成)

本論文は、巧みな身体運動を構成する重要な要素の一つであるタイミング動作に関する研究を、第1章に先行研究のレビュー、第2章から6章に研究結果を、第7章に総括論議を加えてまとめたものである。

タイミング動作は自分の動作を外界の状況にあわせて特定の時刻に出力を行う動作であり、その動作は自己と外界の協同作用によって形成されている。本論文では、まずタイミング同期動作の状態を調べるためにタイミング誤差がどのような時系列パターンを形成しているのか (Chapter 2)、そして外乱に対してどのような過程を経て再び同期状態に戻るのか (Chapter 3) という観点から検討を行い、次いでタイミング誤差を構成する重要な要素の一つである感覚フィードバックについて検討を行っている (Chapter 4)。さらにまた、タイミング動作を形成する付加的要素として、キネマティクス (Chapter 5) および力 (Chapter 6) についてそれぞれ時系列パターンおよび脳活動から検討を行っている。

研究1 (Chapter 2) では、まず、タイミング同期動作においてタイミング誤差がどのような時系列パターンを形成し、またその時系列パターンが動作速度という制御パラメータによってどのように変化するかを検討した。被験者に、1~4 Hz の7種類の一定時間間隔の音刺激にタイミングを合わせて繰り返し電鍵を叩かせた結果、動作速度が遅い時 (1と1.5 Hz) のタイミング誤差の時系列パターンは短期相関を示したが、動作速度が速くなる (2-4 Hz) と $1/f$ 型の長期相関を示すようになることが明らかになった。このことから動作速度の変化に伴いタイミング動作を実行する運動システムの状態が変わることが示唆される。

研究2 (Chapter 3) では、連続刺激音の途中に一過性に刺激間隔の短くなる外乱を与え、タイミング同期動作の安定性・柔軟性を検討した。その結果、外乱の有無の検出は、刺激間隔に対する外乱の大きさの比率を手がかりに行われることが明らかとなった。また、外乱から元の状態へ戻るまでのタップ回数と動作周波数の関係は、1.5 Hz を最小値とする V 字型を示した。これらの結果から動作速度が 1.5-2 Hz 前後でタイミング動作の振る舞いが変わり、動作速度が速くなるにつれて外乱による誤差の影響を強く受けることが明らかになった。

研究3 (Chapter 4) では、タイミング誤差を規定する要素の一つと考えられる感覚フィードバックの影響について、遅延聴覚フィードバック課題を用いて検討を行った。被験者は同期刺激音が鳴る時刻に対して、ボタンを押す時刻を合わせる触覚/運動感覚同期課題 (T) と、被験者がボタンを押してから一定時間遅れて与えられるブザー音の時刻を合わせる聴覚同期課題 (A) を行った。その結果、速い動作では遅い動作に比べて同期手掛りとしての聴覚フィードバックへのカップリングが強くなることが明らかとなった。

研究4 (Chapter 5) では、タイミング動作のキネマティクスについて検討を行った。ゴニオメーターにより動作中の種々の時刻における MP 関節の角度を求め、それぞれの角度の系列データについて時系列解析を行った。動作速度が 3Hz 以上に速くなると、最終点到達時刻の指角度の長期相関が他の時刻より高くなっていた。このことからタイミングをとる手がかり情報が生成される動作終了時刻のキネマティクスは、動作中にはない何らかの機能的な意義をもっていると考えられる。また、タイミング誤差と指角度やタッピング強度には相関関係がみられなかったことから、タイミング要素とキネマティクスや力などの筋出力 (動作) 要素は基本的には分離していることが示唆された。

研究5 (Chapter 6) では、実際の多くの身体運動ではタイミングと力の両方の同時制御が必要であることを考慮し、これらの制御に関わる脳部位について fMRI を用いて検討を行った。被験者はオシロスコープ上の種々の位置を種々の速度で移動するターゲットにタイミングを合わせて、握力に連動するカーソルを操作し、ターゲットをキャッチする課題を行った。その結果、頭頂葉、小脳に課題特異的な活動が見られた。これらの部位は特に視覚指標に合わせてタイミングと力の両方を調節するという複雑な制御に関与している部位だと考えられる。

以上の研究から、タイミング誤差は 1.5-2Hz の前後で時系列パターンと外乱に対する応答に変化が見られ、動作速度が速くなると、前の動作の影響を引きずるようになり、聴覚フィードバックへの依存度が大きくなること、キネマティクスの時系列パターンは 3Hz 以上で動作終了時の角度において時系列相関が高くなること、視覚指標に対してタイミングと力を合わせる複雑な調節には小脳と後頭頂葉が関与していることが明らかとなった。

このように、ヒトのタイミング同期動作は、動作速度の増大に伴い前の動作の影響を強く受け、先行動作に拘束されたパターンを形成することが明らかになった。

本論文の一部はすでに、国際学術誌に公表されるなど、本論文を構成するすべての研究のオリジナリティーは極めて高いものであり、ヒトの随意運動制御研究に対して重要な貢献をなすものである。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。