

早稲田大学審査学位論文  
博士（スポーツ科学）  
概要書

Determinants of directional constraint in  
rhythmic interlimb coordinated movements

周期的な複数肢協調運動の  
運動方向による制約の発現因子

2014年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

中川 剣人

NAKAGAWA, Kento

研究指導教員： 彼末 一之 教授

### 【第1章】序論

ヒトは多くの場面で体の複数の部位を協調しながら動かして目的の動作を達成する。これまで複数肢協調運動の研究の多くは両手協調運動を用いており、手と足の協調運動の研究は少ない。スポーツ場面では、両手だけではなく、手足を協調させることが多く、手足協調運動のメカニズムを研究することは重要である。矢状面上に手足を周期的に動かすとき、同方向に動かすことが逆方向に動かすことに比べて安定している。本研究では、この「方向の制約」を発現させる要因を検討することを目的とした。

### 【第2章】同側手足協調運動における方向の制約の発現要因

同側手足（右手と右足）の周期的な運動をモデルに、方向の制約を発現させる要因として、「遠心性過程での相互作用」、「求心性信号の相互作用」、「誤差修正」の三種類の要因を検討した。受動的に動く右足に合わせて右手を動かす課題のパフォーマンスを解析したところ、方向の制約が見られた。そこで、「遠心性過程での相互作用」は方向の制約の発現には関与しないと考えられる。また、受動的に動く右足には注意を向けずに右手を動かす課題では、方向の制約が見られなかった。このことより、「求心性信号の相互作用」は方向の制約の発現には関与せず、「誤差修正」を行うことが方向の制約を発現する要因であることが示唆された。

### 【第3章】同側手足協調運動のイメージにおける方向の制約

第2章より「誤差修正」が方向の制約を発現する重要な要因であることが示唆されたことから、認知過程で方向の制約が発現することが予想される。そこで、純粹に認知過程のみで方向の制約が発現するかを検討した。課題は、動作由来の感覚信号の処理を行わない運動イメージを用いた。同側手足をモデルに、①二肢とも随意的に動かす課題、②一肢は随意的に動かし、もう一肢は運動イメージで協調させる課題、③二肢とも運動イメージの課題を行った。課題の評価指標として、10サイクル完了する時間を計測した。いずれの課題においても、逆方向動作より同方向動作の方が遂行時間が長かった。つまり、運動イメージにおいても方向の制約が見られた。このことより、方向の制約は、認知過程において発現することが示唆された。運動イメージ中では、動作由来の感覚信号を用いることができないため、脳からの遠心性コピーの処理によって方向の制約が発現すると考えられる。

### 【第4章】二肢の組み合わせの違いによる方向の制約の強さの違いを生む要因

矢状面上の二肢協調運動の方向の制約の強さは、二肢の組み合わせの違いによって変化

する。すなわち、同側手足の組み合わせでは最も強く、対側手足（右手と左足）では中程度、両手では最も弱い。本章では、この「組み合わせ効果」を生む要因について検証を行った。実験では、前述した三種類の組み合わせを用いて、それぞれ二肢とも随意的に動かす課題、受動的に動く一肢に合わせてもう一肢を動かす課題を行った。前者の課題では、組み合わせによって方向の制約の強さが異なり、両手の組み合わせでは方向の制約が見られなかった。一方、後者の課題では、組み合わせによる方向の制約の強さの違いは見られず、いずれの組み合わせも方向の制約が見られた。後者の課題では、いずれの組み合わせも同様に誤差修正を要求される一方、前者の課題では組み合わせによって制御様式が異なるため、組み合わせ効果が発現したと考えられる。つまり、誤差修正を行うことにより、方向の制約が発現することは、どの肢の組み合わせにも当てはまると思われる。また、「組み合わせ効果」の発現要因は、二肢の組み合わせによって制御様式が異なることによると考えられる。

#### 【第5章】肢間の機能的結合を生む要因と方向の制約への貢献

足関節を周期的に動かすと、安静状態の手関節筋の神経活動が同方向動作を促進するような変動を起こすことが知られている。この手足間の「機能的結合」は、方向の制約の神経基盤の一つとされている。本章では、その詳細なメカニズムを検討することを目的とした。実験1では、右足の①随意運動、②運動イメージ、③受動運動に対して注意を向ける、④受動運動に対して注意を向けない、の4課題を行い、それぞれ背屈時、底屈時に磁気刺激を行い、前腕筋の筋電図上に得られる運動誘発電位（MEP）の振幅値から、皮質脊髄路の興奮性を計測した。その結果、いずれの課題も足の動作に対応したMEPの変動が起こった。運動イメージでも機能的結合が発現したことから、運動プログラミング過程で機能的結合が作られることが示唆された。また、二種類の受動運動課題ともに機能的結合が発現したことから、求心性信号による干渉効果も別に存在することが予想される。実験2では、安静状態の前腕に対して同側あるいは対側の足を随意的に動かし、その際の機能的結合を磁気刺激装置によって調べた。その結果、いずれの場合も機能的結合が発生し、その程度に差はなかった。これは、同側手足と対側手足における協調運動の方向の制約の強さの違いとは対応しない。よって、機能的結合は方向の制約に対する必要条件ではないことが示唆された。

#### 【第6章】総括論議

二肢を動かす際、認知過程で二肢の動きに関する信号を比較処理することが方向の制約の発現の決定因子であることが実験結果より推測された。また、このことは動作周波数が比較的速い場合に当てはまるものが補足データより明らかになった。