

矢状面上の二肢協調動作のパフォーマンスを決定する要因

身体運動科学領域

5009A060-9 中川 剣人

研究指導教員： 彼末 一之 教授

【序論】

ヒトが二肢を周期的に矢状面上に動かすとき、二肢を同時に同方向に動かす動作（同位相：位相差=0°）は安定し、同時に逆方向に動かす動作（逆位相：位相差=180°）は不安定であることが示されている。このような協調動作の方向特異性は何が要因となって発現するのかは明らかになっていない。二肢の協調動作が単独肢のみを制御する場合と異なるのは、運動指令を二肢に送ること、体性感覚情報が二肢から送られることである。本研究では、協調動作の方向特異性を発現する要因を明らかにするため、運動指令と体性感覚情報の数に着眼して実験を行った。

【実験 1】

協調動作はそれぞれの肢の動作を行う神経制御システム同士を単純に足し合わせたものでなく、それぞれ相互に関連しながら働く。そのため、単独肢動作では方向特異性が出現せず、協調動作では現れるのは、「複数の運動指令を送るため」かもしれない。実験 1 では、この問題を検討するため、同側二肢の矢状面上協調動作をモデルに、上肢下肢ともに能動的に協調させる動作（active）と、受動的に動く下肢に上肢を能動的に協調させる動作（passive）を比較した。被験者は座位で右手関節の屈曲・伸展動作、右足関節の底屈・背屈動作を同時に行った。タスクは、ACT-OPP（能動+能動、逆位相）、ACT-ISO（能動+能動、同位相）、PAS-OPP（受動+能動、逆位相）、PAS-ISO（受動+能動、同位相）の 4 種類とした。それぞれの動作周期は 2.5Hz とした。手関節と足関節の関節角度変位から位相差を算出し、パフォーマンスを定量化した。その結果、active タスクも passive

タスクも同様に同位相より逆位相の方がパフォーマンスは低かった（図 1）。ここから、運動指令の数の違いは方向特異性に影響しないことが示唆された。passive タスクでは、足関節の体性感覚情報を基に手関節動作を行うので、足関節からの体性感覚情報が手関節動作に何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられた。このことを検討するために、実験 2 を行った。

【実験 2】

実験 2 では、他肢からの体性感覚情報の存在が能動動作に与える影響を検討することを目的とした。実験 1 と同様に、被験者は座位で同側の手関節と足関節を周期的に矢状面上に動かした。このとき、足関節は受動的に動いており、被験者は足からの体性感覚情報を無視してメトロノーム音に合わせて手関節を動かした。二肢が逆位相に動くタスク（OPP）、同位相に動くタスク（ISO）、受動的な足関節動作は無い状態で手関節のみを動かすタスク（HAND）において、手関節の動作の安定性（SD-H）を算出した。その結果、いずれのタスクも手関節動作の安定性に有意差はなく、方向特異性は見られなかった（図 2）。よって、足関節からの体性感覚情報は手関節の動作に影響しない。実験 1 の受動動作に合わせる動作と実験 2 の受動動作を含む動作では、運動制御過程において足関節からの体性感覚フィードバックを利用するかしないかの違いがある。同側二肢の協調動作において、方向特異性が発現する要因は、「二肢からの体性感覚情報を利用して運動制御を行うこと」であることが考えられる。

【実験 3】

同側二肢をモデルにした実験 1、2 によって得

られた、二肢からの体性感覚情報を利用して運動制御を行うことが方向特異性の出現する要因であるという知見をより一般化するために、実験3では二肢の組み合わせを変え、方向特異性の程度が小さいとされている矢上面状の周期的両手関節協調動作をモデルに扱った。タスクは実験1と同様の4種類を行った。その結果、activeタスクでは、方向特異性は見られたが、その程度は小さかった。一方、passiveタスクでは動作方向による差が大きく、方向特異性が顕著に現れた（図3）。

【総括論議】

実験1、2と視覚刺激との協調動作に関する先行研究から、協調動作の方向特異性を発現するのは、「空間情報（体性感覚に限らない）を二つ利用する」という知覚的な要因であることが示唆される。しかし、実験3のactiveタスクにおいて方向特異性の程度が小さかったのは、両側矢上面状の逆位相動作は、歩行や走行のように、生得的でオープンループに自動化された運動制御プログラムがあり、体性感覚フィードバックの貢献度が小さいためである可能性が考えられる。一方、実験3のpassiveタスクでは、方向特異性が顕著に現れた。このタスクでは、体性感覚フィードバックに依存した運動をしなくてはならない。よって、同側二肢、両側二肢の方向特異性を包括的に説明し得る可能性として、「一肢、二肢や同側、両側に関わらず、空間情報を含む二つの感覚を比較しなくてはならないような運動では方向特異性が強く現れる」ことが予想される。

【結論】

矢上面状の二肢協調動作における方向特異性を発現する要因は、複数肢に運動指令を送ることや体性感覚による干渉でもないことから、空間情報を含む二つの感覚を比較することであるという可能性が示唆された。

Experiment 1

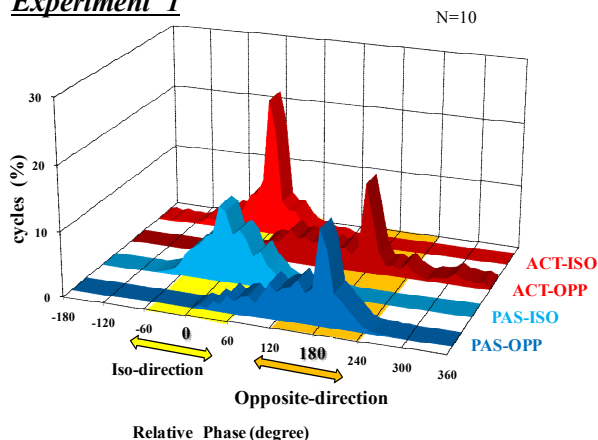


図1. 実験1における位相差分布

縦軸が全サイクル数に占めるサイクル数の割合、横軸が位相差を示す。薄い赤色がACT-ISO、濃い赤色がACT-OPP、薄い青色がPAS-ISO、濃い青色がPAS-OPPを表す。同位相タスクでは位相差が $0 \pm 60^\circ$ （黄色）、逆位相タスクでは位相差が $180 \pm 60^\circ$ （オレンジ色）の範囲内が成功サイクルである。

Experiment 2

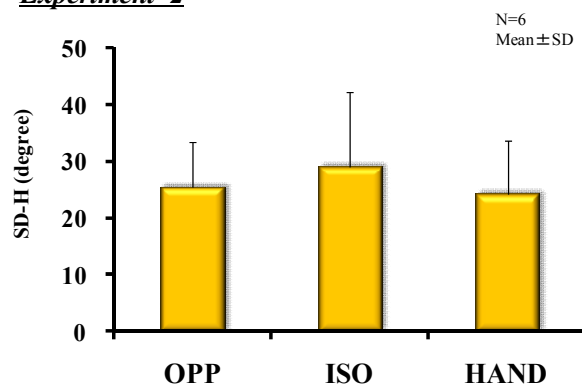


図2. 実験2の手関節動作の安定性

縦軸が手関節動作の安定性（手関節動作と音信号との位相差の標準偏差）、横軸がタスクの種類を示す。

Experiment 3

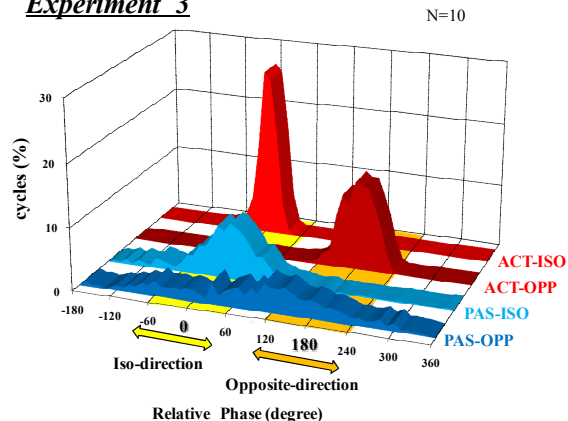


図3. 実験3の位相差分布

縦軸が全サイクル数に占めるサイクル数の割合、横軸が位相差を示す。薄い赤色がACT-ISO、濃い赤色がACT-OPP、薄い青色がPAS-ISO、濃い青色がPAS-OPPを表す。同位相タスクでは位相差が $0 \pm 60^\circ$ 、逆位相タスクでは位相差が $180 \pm 60^\circ$ の範囲内が成功サイクルである。