

運動指令の違いが同側二肢協調動作の安定性に与える影響

The influence of difference in the motor commands
on the stability of coordinated movements of ipsilateral limbs

中川 剣人 (早稲田大学大学院スポーツ科学研究科)
小穴 幸子 (早稲田大学スポーツ科学学術院)
坂本 将基 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

田代 哲朗 (早稲田大学大学院スポーツ科学研究科)
村岡 哲郎 (日本大学経済学部)
彼末 一之 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

序論

ヒトは、多肢・多関節を協調させることによって、日常生活に要する多様な動きや移動を可能にする。速く走る、跳びながら物を取る、目標点を狙って投げるなど、スポーツにおける高度な動作は、さらに複雑で正確な協調動作を必要とする。このような協調動作は中枢神経系によって制御されていることから、身体動作の神経制御メカニズムを解明することは、スポーツパフォーマンスを向上させる重要な課題であると考えられる。

協調動作の研究は、二肢を用いた検討を中心に試みられてきた。ヒトが同側二肢(手首と足首、肘と膝など)を矢状面上で周期的に協調させて動かす時には、二肢を同時に同方向に動かす動作(同位相)は安定で、逆方向に動かす動作(逆位相)は不安定であることが明らかにされている。また、この研究では、前腕が回内位(掌が下向き)のときと回外位(掌が上向き)のときとを比較した結果、同側手足の協調動作の安定性は、手関節の姿勢の変化により動員される筋の組み合わせには影響されないという結果を得た(Baldissera et al., 1982; Carson et al., 1995)。なお、ここでいう安定・不安定とは、求められている動作を遂行している際、異なる動作への転移をしにくい、しやすいかと定義づけられる。

これらの研究の多くは手関節・足関節とも能動的に動かしたときを対象としている。しかし、実際の日常生活やスポーツにおける協調動作では、自己の身体を能動的に動かして協調させるだけではない。外部からの様々な刺激や力によって自己の身体が受動的に動かされ、それに協調して能動的に動く場合もある。たとえば、格闘技では相手によって崩された姿勢を立て直すといった動作が要求される。また、馬術競技では、リズムカルな馬の動きによって変化させられる下肢の動きに上肢を協調させる必要がある。

協調動作は、それぞれの部位、関節の動作を行う神経制御システムを単純に足し合わせたものではなく、それぞれの神経制御システムが相互に関連しながら働く(Swinen, 2002)。そのため、一肢のみならば自在に動作を遂行できるが、特に逆方向動作において、複数肢を組み合わせると不安定になるのは脳が複数の運動指令(一方は上方向に、一方は下方向に、といったように)を送らなければならないからかもしれない。本研究ではこの問題を検討するために、①上肢を能動的、下肢を受動的に動かす動作と②上下肢とも能動的に動かす協調動作を比較する。受動動作のある協調動作では上肢のみに運動指令が送られ、一肢のみを操ることになる。上肢・下肢ともに能動的に動かす協調動作では、二肢に運動指令が送られる。ここでは「受動的に動かされた下肢に上肢を協調させる運動では運動指令は一つなので、上肢・下肢ともに能動的に動かす協調動作よりも安定性が増す」という仮説を立てた。

方法

1. 被験者

被験者は健康な男性7名・女性3名の計10名(年齢22～57歳)である。実験に先立ち被験者には実験の目的や手順を十分に説明し、同意を得た上で行った。

2. 実験装置

実験は、肘掛け付きの椅子を用いて行った。被験者は椅子に座り、右前腕をゴムバンドで肘掛けに回内位に固定した。足は矢状面上に足関節の底屈・背屈運動が可能な板付きの三脚(EI Camagne 535, Velbon社)に固定した。

手関節および足関節の関節角度変化は、ゴニオメータ(SG150, Biometrics社)を用いて測定した。また、タスク中の筋活動を調べるため、長橈側手根伸筋(extensor carpi

radialis longus：以下、ECR），橈側手根屈筋（flexor carpi radialis：以下、FCR），前脛骨筋（tibialis anterior：以下、TA），ヒラメ筋（soleus：以下、Sol）の筋電図（electromyography：以下、EMG）を表面電極誘導法により導出した。導出した関節角度変位およびEMGの信号はA/D変換装置（ML880 Powerlab 16/30, ADInstruments）を介してサンプリング周波数1kHzで取得し、コンピュータに記録し、それぞれフィルタ処理（low-pass filter 10Hz, band-pass filter 5-500Hz）を行った。

3. 運動課題（以後タスク）

被験者は閉眼の状態、右手関節の周期的な屈曲・伸展動作および右足関節の周期的な底屈・背屈動作を1試行につき20サイクル行った。動作周期は2.5Hzとした。タスク間では、足関節受動動作の有無（active, passive）、動作の方向（in-phase, anti-phase）、といった要素の組み合わせを変えて、計4種類のタスクを行った。なお、ここでいうin-phaseとは手と足を同方向（手を上方向に動かすときは足も上方向）に動かすことであり、anti-phaseとは手と足を逆方向（手を上方向に動かすときは足は下方向）に動かすことである。

① active, in-phase

被験者はメトロノームの音に合わせて、手足を能動的に同方向へ屈曲・伸展させる。

② passive, in-phase

験者がヘッドホンから流れるメトロノームの音に合わせて、被験者の足に固定された板を上下させる。被験者はその足の動きに合わせて手を同方向へ屈曲・伸展させる。このとき、被験者にはメトロノームの音は聞こえない。

③ active, anti-phase

被験者はメトロノームの音に合わせて、手足を能動的に逆方向へ屈曲・伸展させる。

④ passive, anti-phase

験者がヘッドホンから流れるメトロノームの音に合わせて、被験者の足に固定された板を上下させる。被験者はその足の動きに合わせて手を逆方向へ屈曲・伸展させる。このとき、被験者にはメトロノームの音は聞こえない。

4. 実験手順

被験者は実験を行う前にタスクで使用する速さのメトロノームの音を聞き、音に合わせて手足を動かす練習を数回行った。

被験者は動かしやすい関節角度範囲で手関節・足関節を動かした。また、能動的に足関節を動かすタスクにおいては、メトロノームの音が鳴り始めたら被験者の任意のタイミングで手関節・足関節を動かすように指示さ

れた。受動的に足関節を動かされるタスクにおいても、足関節が動かされ始めたのち被験者の任意のタイミングで手関節を動かすように指示された（図1）。

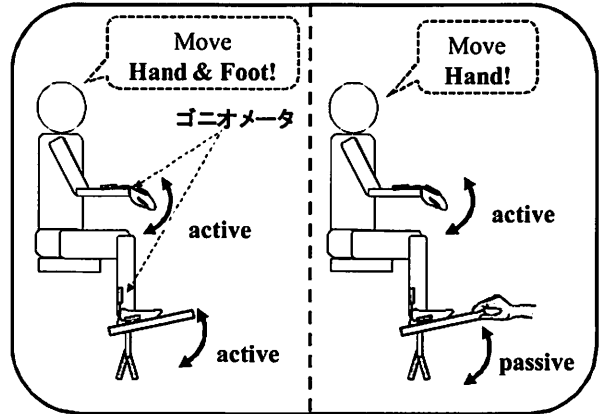


図1 実験タスク模式図

左がactiveタスク（手・足ともに能動的動作）、右がpassiveタスク（手を能動的、足は第三者の力による受動的動作）である。手関節と足関節にゴニオメータを取り付けている。

実験は、4種類のタスクを計10セット行った。初めの3セットは練習試行であることを被験者に伝え、あとの7セットを解析対象とした。ただし、1セット内のタスクの順序はランダムとした。なお、2～3セットおきに十分な休憩をはさんだ。

5. 解析

・位相差

手と足の関節角度変位がそれぞれ最初に（1番目）最大になるある時点と、各関節角度が次に最大になる時点（2番目）になる時点を決し、それらの2点間（1番目と2番目）を1サイクル（ 360° ： $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ）と定義した。1サイクルを二等分する中間時点（ 0° ）を各関節

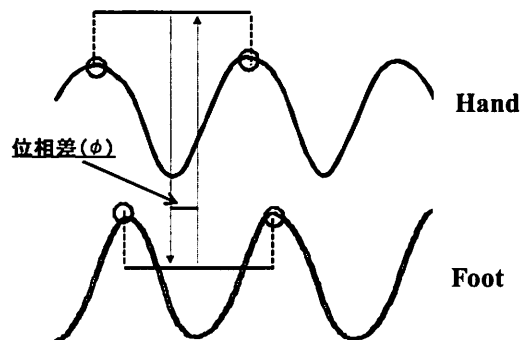


図2 手関節動作と足関節動作の位相差の算出方法

手関節、足関節角度変位のそれぞれ隣り合う頂点の時点を決し、それらの2点間を1サイクルと定義した。1サイクルを二等分する中間地点（ 0° ）を各関節において計算し、手関節を基準として足関節の中間地点の差を位相差（ ϕ ）として算出した。

角度において計算し、手関節を基準として足関節の中間時点の差を位相差(ϕ)として算出した(図2)。同様の方法で以降2サイクル目、3サイクル目、…、20サイクル目まで算出した。

・タスク成功率

協調動作を開始してから10サイクル目までに、タスクで求められる位相差(同位相で 0° 、逆位相では 180°)から 60° 以上離れた場合には、その試行は失敗試行とした。その他の試行は成功試行としてタスクごとに成功率を算出した。

・平均動作周期

協調動作の1サイクルごとに手関節および足関節の動作周期を算出し、18サイクル分の動作周期を平均した値を、その試行の平均動作周期とした。

・手関節および足関節の平均動作角度

協調動作の1サイクルごとに手関節および足関節の動作角度を算出し、18サイクル分の動作角度を平均した値を、その試行の平均動作角度とした。

試行中に位相が著しくずれて、位相差が $-180^\circ < \phi < 180^\circ$ (同方向のタスクのとき) および $0^\circ < \phi < 360^\circ$ (逆方向のタスクのとき) の範囲外となった場合は、そのサイクルの1サイクル前までの、動作周期、動作角度を算出し、それ以降のサイクルは除外した。協調動作開始から10サイクルまでに位相差が $-180^\circ < \phi < 180^\circ$ (同方向のタスクのとき) および $0^\circ < \phi < 360^\circ$ (逆方向のタスクのとき) の範囲外となった場合は、その試行は動作周期、動作角度の統計処理から除外した。

・EMG

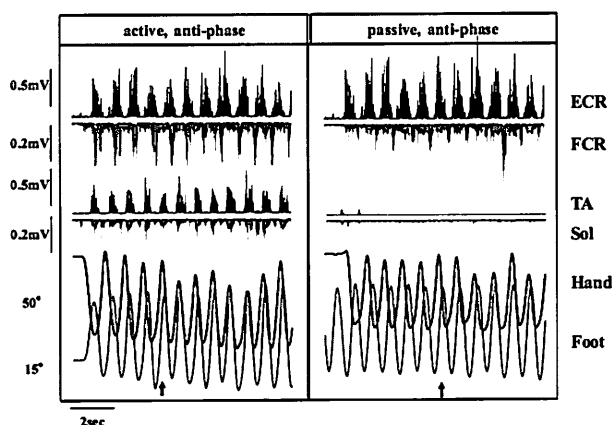


図3 EMGと関節角度変位の典型例

左がactive, anti-phaseタスク、右がpassive, anti-phaseタスクの例。上からECR, FCR, TA, SolのEMG番号、手関節、足関節の角度変位の生データを表している。それぞれの信号の大きさの基準となるバーを左側に示した。passiveタスクでは、脚のEMG信号が出ていないことが伺える。

上矢印は同方向動作に移った時点を示している。

EMGの信号はすべての試行を解析対象とし、TAとSolを対象とした。協調動作開始から20サイクル目までのTA, Solそれぞれの実効値(root mean square: 以下、RMSと略す)を算出し、下肢受動動作中の下肢筋活動の指標とした(図3)。

6. 統計

各試行において、動作周期、動作角度を算出し、それぞれの被験者について各タスクで動作周期、動作角度の平均値を算出した。各タスク間の成功率の差は、二元配置の分散分析(被験者内計画、 2×2 : 受動動作の有無 $\times$ 動作方向)により解析した。動作周期、動作角度とEMGのRMSについては、activeタスクとpassiveタスク間でそれぞれの方向で対応のあるt検定を行った。また、TAとSolのEMGのRMSについて、passiveタスク時と安静時の比較を対応のあるt検定を用いて行った。統計処理の有意水準は5%未満とした。

結果

協調動作開始から10サイクルまでに位相差が $-180^\circ < \phi < 180^\circ$ (同方向のタスクのとき) および $0^\circ < \phi < 360^\circ$ (逆方向のタスクのとき) の範囲外となった試行は38試行(全267試行の14.2%)あり、これらは動作周期、動作角度の統計処理から除外した。

・下肢EMGのRMS

in-phase, anti-phaseともにactiveタスクよりpassiveタスクで有意に小さかった。また、passiveタスクにおいて、安静時と比較してTAのEMGのRMSには有意差がなかったが、Solではpassiveタスク時が有意に大きかった。

・協調動作における動作周期

手関節の動作周期(平均値 $\pm$ 標準偏差)は、active, anti-phaseが $2.48 \pm 0.1\text{Hz}$ 、active, in-phaseが $2.51 \pm 0.04\text{Hz}$ であり、passive, anti-phaseが $2.49 \pm 0.1\text{Hz}$ 、passive, in-phaseが $2.54 \pm 0.02\text{Hz}$ であった。いずれのタスク間にも有意差は見られなかった。

足関節の動作周期(平均値 $\pm$ 標準偏差)は、active, anti-phaseが $2.52 \pm 0.1\text{Hz}$ 、active, in-phaseが $2.54 \pm 0.03\text{Hz}$ であり、passive, anti-phaseが $2.51 \pm 0.01\text{Hz}$ 、passive, in-phaseが $2.51 \pm 0.02\text{Hz}$ であった。いずれのタスク間にも有意差は見られなかった。

・協調動作における手関節、足関節の動作角度

手関節の動作角度(平均値 $\pm$ 標準偏差)は、active, anti-phaseが $90.1 \pm 16.1^\circ$ 、active, in-phaseが $76.2 \pm 20^\circ$ であり、passive, anti-phaseが $87.1 \pm 10.9^\circ$ 、passive, in-phase

が $79.9 \pm 18.3^\circ$ であった。いずれのタスク間にも有意差は見られなかった。

足関節の動作角度(平均値 $\pm$ 標準偏差)は、active, anti-phaseが $34.6 \pm 2.5^\circ$ 、active, in-phaseが $31.6 \pm 9.9^\circ$ であり、passive, anti-phaseが $32.9 \pm 9.2^\circ$ 、passive, in-phaseが $32.3 \pm 8.9^\circ$ であった。いずれのタスク間にも有意差は見られなかった。

・タスク成功率

タスク成功率(平均値 $\pm$ 標準偏差)は、active, anti-phaseが $23.8 \pm 30.1\%$ 、active, in-phaseが $66.7 \pm 32.3\%$ であり、passive, anti-phaseが $27.1 \pm 32.6\%$ 、passive, in-phaseが $53.1 \pm 24.7\%$ であった。動作方向に有意な主効果が認められたが、受動動作の有無には有意な主効果が認められず、交互作用も認められなかった。

考察

本研究では脳の運動関連領域から筋に送られる運動指令の違いが協調動作に与える影響を検証するため、①上肢・下肢ともに能動的に動かす協調動作と、②受動的に動く下肢に上肢を協調させる運動、を比較した。統計処理から除外した試行は全体試行の14.2%あったが、これらの試行の多くは1サイクル目から全く協調動作になっておらず、周期的な協調動作を検討した本研究の趣旨から反するので、これらを除外することは妥当といえる。

1. 設定条件の確認

passiveタスクでは、重力と反対方向に働くTAのEMGが安静時と同様だったことから、TAは能動的な収縮をしていないことが考えられる。passiveタスクにおいてSolのEMGは安静時より大きかった。これは、下肢の動きに同期して背屈時に周期的に単発的な筋収縮が現れており、受動的に動かされたことで生じた伸張反射によるものであると考えられる。つまり、passiveタスクでは上位脳が運動指令を与えているのは手関節のみで、足関節には能動的な動きはなかったと言える。さらに、activeタスクの筋活動は、TA、Solいずれにおいてもpassiveタスクより大きかったことから、activeタスクでは能動的な足関節の動きはあったと言える。また、手関節および足関節の動作周期、動作角度ともタスク間で有意差が見られなかったので、運動指令の違い、動作方向の要因は手関節、足関節の動作周期、動作角度に影響していなかったと言える。

2. タスクの遂行

activeタスクとpassiveタスクは、上位脳が運動指令を手・足関節に送るか、手関節のみに送るかという点で異なる。しかし、タスク成功率において両タスク間に有意

差がない。この結果は、同側二肢の協調動作の安定性に運動指令の違いは影響しないことを示唆する。また、activeタスク、passiveタスクに関わらず、同方向動作より逆方向動作が難しかったことから、協調動作の安定性には、動作方向が強く影響していることが改めて示された(Baldissera et al 1982)。つまり、「受動的に動かされた下肢に上肢を協調させる運動では、運動指令は一つなので、上肢・下肢ともに能動的に動かす協調動作よりも安定性が増す」という仮説は支持されなかった。

3. 同側二肢協調動作のメカニズム

同側二肢の協調動作では、同方向より逆方向動作が難しいという知見のメカニズムを電気生理学的に調べた研究は多く存在する。例えば、足関節の能動的な周期的底背屈サイクル運動中に、回内位にて安静状態の同側手関節筋からH反射を記録した研究によると(Baldissera et al., 1998)、足関節底屈時には手関節屈曲筋のH反射が、逆に、足関節背屈時には手関節伸筋のH反射が増大した。また、足関節の動作を伴わない等尺性筋収縮でも、足関節底屈筋の収縮に対応して手関節屈曲筋のH反射が、また、足関節背屈筋の収縮に対応して手関節伸筋のH反射が増大した(Cerri et al., 2003)。さらに、経頭蓋磁気刺激法とH反射を組み合わせた実験の結果から、Baldisseraらは足関節を能動的に動かしたときの手関節筋のH反射の変動には大脳皮質が関係すると報告した(Baldissera et al., 2002)。つまり、足関節の筋活動はそれによって生じる足関節の動作と同じ方向に手関節を動かす筋群を支配する皮質脊髄路の興奮性を高めるので、同側二肢の能動的な協調動作においては同方向動作が安定し、逆方向動作は不安定になるのであろう。

しかし、これらのことは、足関節筋が能動的に収縮していることが前提なので、受動動作時にも、手関節の動作が乱れるという本研究のpassiveタスクの動作様相のメカニズムは説明できない。passiveタスクは閉眼で行っているため、足関節からの体性感覚情報に依存して手関節の動作を行うことになる。一つの可能性として、足関節からの体性感覚情報が手関節の動作に何らかの影響を及ぼしているのかもしれない。Swinnenらは、同側二肢の能動的協調動作中に対側の下肢を受動的に動かすと、協調動作の安定性が低下することを明らかにし、体性感覚情報の流入が協調動作に影響を与えるとした。それは特に逆方向動作に顕著に見られる(Swinnen et al., 1995; Deborah et al., 2001)。また、求心路を遮断された患者では、逆方向の協調動作が出来ないという報告(Sainburg et al., 1993)からも、体性感覚情報は協調動作遂行に重要と考えられる。さらに、「上肢」の受動的な動作による体性感覚情報は「下肢」のH反射に影響する(Hiraoka and

Nagata, 1999). 本研究は下肢から上肢への影響を検討しているが、同様のメカニズムが存在することが予想される。このことは今後検討する必要がある。

体性感覚情報が協調動作の遂行において重要という可能性は、Cerriらの筋収縮が重要という主張とは異なる。しかし、両実験で用いた動作速度の違いを考慮に入れる必要がある。Cerriらの実験は、足関節を1.66Hzの動作周期で動かすというもので、本研究で用いた2.5Hzの動作周期とは異なる。動作速度を上げると、異なるメカニズムが働き、筋収縮、つまり遠心性の運動指令よりも動作由来の求心性の体性感覚情報が運動関連中枢に影響を及ぼすことがあるのかもしれない。これを支持する報告として、上肢の受動的なペダリング運動の際に下肢からH反射を記録した研究(Hiraoka and Nagata, 1999)があり、それによると上肢の受動動作速度を上げると、下肢からのH反射が増大するとされる。これは、随意運動に影響を与える要因は筋収縮ではなく求心性の情報であることを示唆する。しかし、この研究は、一肢の動作の位相に対応する他肢の運動関連中枢の興奮性の変動を解明したものではないので、passiveタスクにおいても同方向が安定し、逆方向が不安定になるという現象は説明できない。これは今後の検討課題である。

4. 結論

本研究では、受動的に同側二肢が動く場合、足関節の動きが受動的、能動的に関わらず、同方向動作が容易で、逆方向動作が難しいという知見が得られた。よって、「受動的に動かされた下肢に上肢を協調させる運動では、運動指令は一つなので、上肢・下肢ともに能動的に動かす協調動作よりも安定性が増す」という仮説は支持されなかった。また、この現象の神経科学的メカニズムは不明である。しかし、本研究の結果は、協調動作における体性感覚情報の重要性を再確認するとともに、運動指令の違いより体性感覚情報が協調動作遂行に影響を及ぼすという新たな可能性を提供するものである。

文献

- Baldissera, F., Borroni P., Cavallari, P., and Cerri, G. (2002) Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot. *Exp. Brain. Res.*, 118: 427-430.
- Baldissera, F., Cavallari, P., and Civaschi, P. (1982) Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neurosci. Lett.*, 34(1): 95-100.
- Baldissera, F., Cavallari, P., and Leocani, L. (1998) Cyclic modulation of the H-reflex in a wrist flexor during rhythmic flexion-extension movements of the ipsilateral foot. *Exp. Brain. Res.*, 118: 427-430.
- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., and Elliott, D. (1995) Phase-transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *J. Mot. Behav.*, 27: 211-224.
- Cerri, G., Borroni, P., and Baldissera, F. (2003) Cyclic H-reflex modulation in resting forearm related to contractions of foot movers, not to foot movement. *J. Neurophysiol.*, 90: 81-88.
- Deborah, J. S., Yong, L., Maarten, S., Filiep, D., and Swinnen, S. P. (2001) Proprioceptive regulation of interlimb behavior: interference between passive movement and active coordination dynamics. *Exp. Brain. Res.*, 140: 411-419.
- Hiraoka, K., and Nagata, A. (1999) A modulation of the soleus H-reflex with different velocities of passive movement of the arm. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 39: 21-26.
- Sainburg, R. L., Poizner, H., and Ghez, C. (1993) Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. *J. Neurophysiol.*, 70: 2136-2147.
- Swinnen, S. P. (2002) Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions. *Nat. Rev. Neurosci.*, 3: 348-359.
- Swinnen, S. P., Dounskaia, N., Verschueren, S., Serrin, D.J., and Daelman, A. (1995) Relative phase destabilization during interlimb coordination: the disruptive role of kinesthetic afferences induced by passive movement. *Exp. Brain. Res.*, 105: 439-454.

連絡責任者

住所：埼玉県所沢市堀之内135-1

フロンティアリサーチセンター 108

スポーツ神経科学研究室

氏名：中川 剣人

メールアドレス：t-t-t.w.sword22@toki.waseda.jp