

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 9日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700783

研究課題名（和文）特徴的動作局面の同期が二肢協調動作制御に及ぼす影響

研究課題名（英文）Timing of salient phases of joint movements affect multi-limb coordination

研究代表者

村岡 哲郎 (MURAOKA TETSURO)

日本大学・経済学部・准教授

研究者番号：30398929

研究成果の概要（和文）：指を曲げる、指を伸ばすという表現はそれぞれの動作を同等に扱っているが、我々の脳はそれら動作を同等に扱っていない可能性がある。腕の様々な動作について調べた結果、指の曲げ伸ばしと前腕を捻る動作において一方の動作を特徴的とみなしていることがわかった。そうした特徴的動作局面を持つ動作を左右の腕で周期的に行う時、左右の腕でいつのまにか同時に特徴的動作を行ってしまう傾向があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：We use the phrases of “finger extension” and “finger extension” with considering that they are on the same level of description. However, our brain may not handle those movements equally. The results of the present study showed that finger flexion and forearm pronation were considered to be more salient. In addition, when moving two joints cyclically, the salient phase in joint movements tend to occur coincidentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康,スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：協調動作

1. 研究開始当初の背景

二肢を協調させて動作させる時、それら肢の相対的動作方向は動作の安定性に強く影響する(Swinnen, Nat Rev Neurosci, 2002)。例えば、手掌を下向き、あるいは上向きにして示指を水平面上で内転・外転させる時、両手の手掌向きの組合せ（=活動する筋の組合せ）によらず逆方向（鏡像）動作が最も安定して遂行可能であり、同方向（平行）動作は動作速度が高まると逆方向動作へと移行してしまう (Mechsner et al., Nature, 2001)。このように肢の相対的動作方向が動作の安定性に強く影響する結果は、両手関節屈曲-伸展、手関節足関節屈曲-伸展など他の関節動作においても得られている。ただし、両手示指の

屈曲-伸展動作は例外で、両手をどのような位置にしようとも両手示指を同時に屈曲あるいは伸展する動作が最も安定し、両手示指の相対的動作方向は動作の安定性にほとんど影響しない (Riek et al., J Hum Mov Stud, 1992)。

協調させる関節動作の組合せが変われば、動作安定性が相対的動作方向で決まるのか、あるいは、方向によらず決まった関節動作の組合せで決まるのかが変わる。これらを統一的に解釈するために、「(二肢) 協調動作は特定の知覚的目標を指向する」という仮説が提案されている (Mechsner et al., 既出)。すなわち、A) 肢の相対的動作方向（対称あるいは同方向）という知覚的目標を指向する、ま

たは、B) 特徴的動作局面 (示指屈曲-伸展の場合には伸展) を同時に動作させるという知覚的目標を指向するとしている。示指屈曲-伸展のどちらが特徴的 (salient) であるかは、手指屈曲-伸展動作とメトロノーム音との協調の安定性から知ることが出来る。メトロノーム音は音という特徴的イベントと無音から成る。このメトロノーム音と手指屈曲-伸展動作を協調させる時、屈曲と音を同期させる時には安定して動作遂行可能であるが、伸展と音を同期させる場合には音のテンポが速まると屈曲と音を同期させる動作に移行する (Carson, Exp Brain Res, 1996)。

前述した仮説に従えば、ある二肢協調動作の安定性が A (方向) あるいは B (動作) のどちらに依存するかは、二肢それぞれの動作が特徴的動作局面とそうでない動作局面に分けられるか否かに依存する。しかし、これまでのところ、特徴的動作局面を持つ動作としては示指屈曲以外明らかとなっておらず、特徴的動作局面を持つ動作が何であり、どの動作がそうでないかは不明である。そのため、前述した仮説の検証は不十分なままである。

本研究は、様々な動作について、特徴的動作局面を持つか否か、それは不変であるか否か、不変でないならば協調動作は特徴的動作を同期させることを指向するのかが否かを明らかにするもので、(二肢) 協調動作は特定 (特徴的動作局面を同時に動作させるという) の知覚的目標を指向するという仮説を検証できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上肢関節の様々な動作について、特徴的動作局面を持つか否かを明らかにし、特徴的動作局面の有無が二肢協調動作の安定性とどのような関係にあるかを明らかにすることである。具体的には、示指屈曲-伸展、示指内転-外転、手首屈曲-伸展、手首撓屈-尺屈、橈尺関節 (前腕) 回内-回外、肘関節屈曲-伸展の 6 動作を対象に特徴的動作局面の有無を明らかにし (研究 1)、左右で同じ関節動作を行った時の協調動作の安定性と特徴的動作局面の有無の関係 (研究 2)、左右で異なる関節動作を行った時の協調動作の安定性と特徴的動作局面の有無の関係 (研究 3) を調べる実験を行った。

3. 研究の方法

(1) 上肢関節動作における特徴的動作局面の有無

被験者は健康な成人男性 6 名とした。被験者は座位姿勢をとり、右手で示指屈曲-伸展、示指内転-外転、手首屈曲-伸展、手首撓屈-尺屈、橈尺関節 (前腕) 回内-回外、肘関節屈曲-伸展の 6 動作を行った。示指動作においては手、手首動作においては前腕、橈尺関

節および肘関節の動作においては上腕をそれぞれ台に固定して動作を行った。動作は、橈尺関節 (前腕) 回内-回外については鉛直軸まわりの動作とし、その他の 5 動作については水平面上において肢が左右に動くような関節動作となるように上肢の各関節位置を調整した。動作させる関節以外の関節が動かないよう示指動作では MP 関節より近位の関節を、手首動作では指関節をプラスチックの棒あるいは板で固定した。

関節角度の測定にはゴニオメータを用い、1 kHz で記録した。スピーカーを被験者の後方 0.5 m の位置に置き、8 秒ごとに 0.25 Hz だけ周波数の増加する音を 1.75 Hz から 3.75 Hz (9 つの周波数) となるまで鳴らした。1.75 Hz の音のスタート前に 3 回の 1 Hz のテスト音を鳴らし、1 試行は 74 秒とした。

被験者は、出来るだけ正確に指示された音と動作の同期パターンを維持するよう指示された。ただし、同期パターンが崩れた時には、動作を止める事無く最もやりやすいと感じる同期パターンで動作を続けるようにも指示された。

音と動作の同期パターンは、各関節動作における動作のいずれかの切り返し位置と音を同期させるというものである。例えば、示指屈曲-伸展の場合には、最も屈曲した時点と音を合わせる同期パターンと、最も伸展した時点と音を合わせる同期パターンとなる。各動作において 2 つの同期パターンを交互に各 3 試行、合計 6 試行を行った。同期パターンの順序は被験者間でカウンターバランスをとった。6 種の関節動作の順序は被験者間でランダムとし、各関節動作において測定を始める前には、各同期パターンで 1 試行のテスト試行を行わせた。試行間には 30 秒から 60 秒の休息をとり、関節動作が変わる時には 2 分から 5 分の休憩を挟んだ。

同期パターンの安定性は、動作切り返し点と音の時間ズレから算出した位相差により定量した。連続する 3 サイクルの位相差が全て 90 度以上となった時、相転移が生じたと判断し、その 3 サイクルの最初のサイクルのメトロノーム音までの時間を相転移時間 (Tt) とした。

各関節動作について、二つの同期パターンにおける Tt の差の検定には対応のある t 検定を用い、Bonferroni-Holm の方法により調整した後、 $p < 0.05$ を有意水準とした。

(2) 両上肢同一関節動作の安定性に特徴的動作局面の有無が与える影響

被験者は健康な成人男性 7 名とした。被験者は座位姿勢をとり、両手で手首撓屈-尺屈または橈尺関節 (前腕) 回内-回外を行った。手首撓屈-尺屈については、動作は水平面上

で行い、左手は手掌が下向きとなるように前腕を台に固定し、右手は手掌が上向きまたは下向きとなるように前腕を台に固定した。従って、両手で同時に同一関節動作を行う時、右手手掌が下向きの時には両手動作は鏡像動作となり、右手手掌が上向きの時には非鏡像（平行）動作となる。橈尺関節（前腕）回内-回外については、動作は鉛直軸まわりに行い、左手は前腕が鉛直上向きになるように上腕を台に乗せ、右手は同様に上腕を台に乗せるまたは鉛直下向きになるように上腕を椅子背もたれに押し当てた姿勢をとった。従って、両手で同時に同一動作を行う時、右手が鉛直上向きの時には両手動作は鏡像動作となり、右手が鉛直下向きの時には非鏡像（同一回転方向）動作となる。

被験者は、出来るだけ正確に指示された協調パターンを維持するよう指示された。ただし、その協調パターンが崩れた時には、動作を止める事無く最もやりやすいと感じる協調パターンで動作を続けるようにも指示された。協調パターンは前述の鏡像と非鏡像の2パターンである。手首および橈尺関節のそれぞれについて、2種の右上肢姿勢で2パターンの協調動作、合計4種のタスクを各3試行、合計12試行をランダムな順序で行った。なお、手首動作の測定を先に行い、次に、橈尺関節の動作の測定を行った。動作速度は2 Hzとし、右手が25サイクル終わるまで動作を続けさせた。各試行前に測定者が2 Hzの手首屈曲伸張動作を見せ、2 Hzの動作速度を被験者に確認させた。各関節動作において測定を始める前には、各タスクで1~5試行のテスト試行を行わせ、指示された協調パターンを4サイクル程度続けられるように練習をさせた。試行間には30秒から60秒の休息をとり、関節動作が変わる時には2分から5分の休憩を挟んだ。関節角度の測定にはゴニオメータを用い、1 kHzで記録した。

協調動作の安定性は、各関節角度から算出した位相差により定量した (Muraoka et al., *Neurosci Res*, 2013)。1サイクルの平均位相差が90度以上となった時、そのサイクルで相転移が生じたと判断した。20サイクルまたは相転移以前のサイクルまでの位相差の標準偏差 (ΦSD) を算出し、協調動作安定性の指標とした。

各関節動作について、タスク間の ΦSD の差の検定には反復測定2元配置分散分析 (2

×2、動作×方向) を用いた。動作の水準は (同時に) 同一動作と異なる動作、方向の水準は鏡像動作方向と非鏡像動作方向である。Bonferroni-Holmの方法により調整した後、 $p < 0.05$ を有意水準とした。

(3) 両上肢の異なる関節動作の安定性に特徴的動作局面の有無が与える影響

被験者は健常な成人男性7名とした。実験の内容は実験(2)と左手動作以外は同一とした。左手動作については、示指屈曲-伸展を水平面上で行う動作とし、示指屈曲をした時に示指が正中に近づき、示指伸展の時に正中から離れるような姿勢をとった。従って、左手示指屈曲に合わせて右手首撓屈を行う時、右手手掌が下向きの時には両手動作は鏡像動作方向となり、右手手掌が上向きの時には非鏡像（平行）動作方向となる。また、左手示指屈曲に合わせて右手首橈尺関節（前腕）回内を行う時、右手が鉛直上向きの時には両手動作は鏡像動作方向となり、右手が鉛直下向きの時には非鏡像（同一回転）動作方向となる。

4. 研究成果

(1)

二つの同期パターンにおける Tt に有意差が認められたのは、示指屈曲-伸展 ($p < 0.05$) と橈尺関節（前腕）回内-回外 ($p < 0.01$) の2動作であった (図1, 2)。

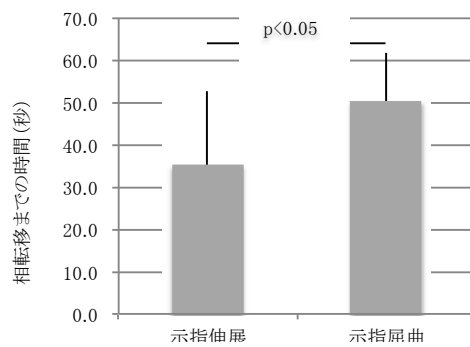


図1 示指伸展-屈曲と音との同期パターンが相転移するまでの時間

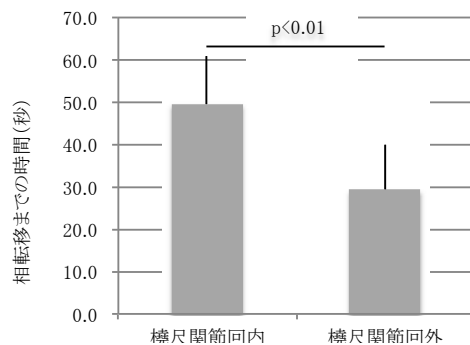


図2 橈尺関節回内-回外と音との同期パターンが相転移するまでの時間

示指屈曲-伸展において屈曲を、橈尺関節（前腕）回内-回外において回内を音と同期させる時に動作と音の協調関係がより安定するという結果は先行研究（Carson et al., *Exp Brain Res*, 2000; Kelso et al., *Nature*, 1998; Lagarde and Kelso, *Exp Brain Res*, 2006）と同様である。また、新たに、示指内転-外転、手首屈曲-伸展、肘関節屈曲-伸展は特徴的動作局面を持たないことが示された。Carson et al. (*PLoS One*, 2009)は手首屈曲-伸展においては外力（重力等）でアシストされる方向の動作と音との協調がより安定することを示した。しかし、本研究のように特定の方向に外力でアシストされない場合には、特定方向の動作あるいは特定の動作において音との協調がより安定するということは見られなかった。本研究で対象とした6動作のうち、左右肢で周期的協調動作をさせた場合に安定性が方向に依存するのは、示指内転-外転（Mechsner, 既出）、手首屈曲-伸展（Carson et al., *J Mot Behav*, 1995）、手首撓屈-尺屈（Li et al., *Exp Brain Res*, 2004）であり、動作に依存するのは示指屈曲-伸展である。橈尺関節（前腕）回内-回外については明らかとなっておらず、肘関節屈曲-伸展については方向と動作を分離出来ない。

(2)

橈尺関節（前腕）回内-回外においては、動作方向によらず左右同一動作を行う時により安定することが示された（図3）。すなわち、動作の主効果のみ有意であった（ $p < 0.01$ ）。

一方、手首撓屈-尺屈においては、開眼で

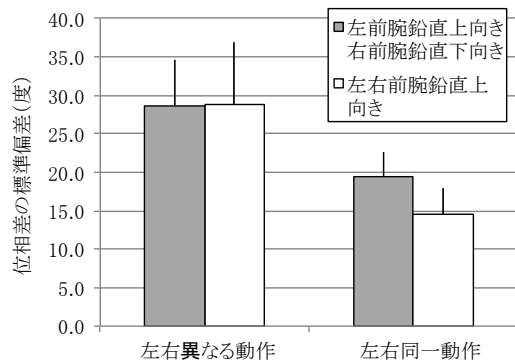


図3 両手橈尺関節回内-回外協調動作における動作位相差の標準偏差

行われた先行研究同様、鏡像動作方向となる協調動作がより安定して遂行可能であることが示された（図4）。すなわち、方向の主効果のみ有意であった（ $p < 0.05$ ）。

研究1の結果と合わせて考えると、特徴的動作局面を持つとされた動作については、動作の方向によらず左右で同一動作を行う（特徴的動作局面を同期させる）時に協調動作が安定し、一方、特徴的動作局面を持たないとされた動作については、左右肢の相対的動作

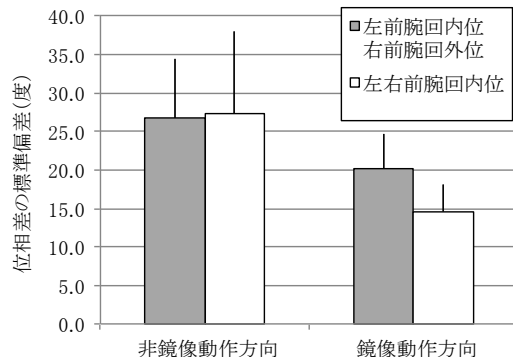


図4 両手首撓屈-尺屈協調動作における動作位相差の標準偏差

方向が鏡像方向となる時に協調動作が安定することが示された。

(3)

左示指屈曲-伸展と橈尺関節（前腕）回内-回外の協調動作においては、動作方向によらず左右肢の特徴的動作局面を同時にした動作が安定することが示された（図5）。すなわち、動作の主効果のみ有意であった（ $p < 0.01$ ）。

一方、左示指屈曲-伸展と右手首撓屈-尺屈

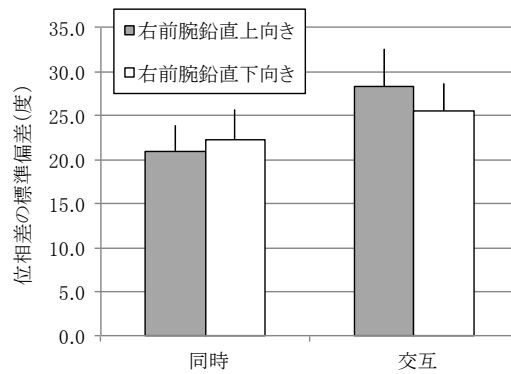


図5 左示指屈曲伸展-右橈尺関節回内回外協調動作における動作位相差の標準偏差

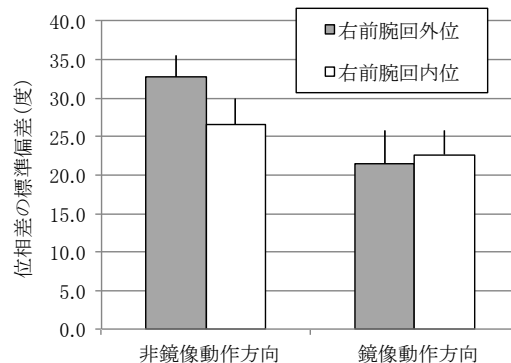


図6 左示指屈曲伸展-右手首撓屈尺屈協調動作における動作位相差の標準偏差

の協調動作においては、動作の組合せによらず鏡像動作方向となる協調動作が安定して遂行可能であることが示された（図6）。すなわち、方向の主効果のみ有意であった（ $p < 0.01$ ）。

以上、研究1-3の結果から、二肢協調動作

においては、特徴的動作局面の有無に依存して、特徴的動作局面の同期もしくは特定の相対的動作方向が指向されることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村岡 哲郎 (MURAOKA TETSURO)

日本大学・経済学部・准教授

研究者番号：30398929