

左右視野で移動する物体を認知する能力の定量
Quantification of Visual Perceptual Abilities for
Moving Objects in Left and Right Visual Fields

令和4年度グローバル社会文化研究センター
研究プロジェクトA 研究成果報告

研究期間：令和4年4月1日～令和6年3月31日

村岡哲郎
竹下大介

March, 2026

はじめに

両手で顔を洗う、左手に茶わんを持ち右手に持った箸を使ってご飯を食べる、歯を磨きながら健康のための踵あげ運動を行なう、両手を使って靴ひもを結ぶといったように、人は日常的に複数肢を同時に操作している。また、スポーツや楽器演奏においては継続的な訓練を通じて得られる極めて巧みな複数肢の同時動作を驚異的な正確さで遂行している。そうした複数肢の協調的動作について研究が盛んに行なわれるようになったのは1970年代後半からで、著名な研究としては1979年サイエンス誌に発表されたKelso et al.の研究「On the nature of human interlimb coordination」などがある。以後、運動学、心理学、神経科学、解剖学等、様々なアプローチから複数肢協調動作の制御メカニズムについての研究が行なわれたきた。そのなかで大きな議論を巻き起こした研究のひとつとして2001年ネイチャー誌に発表されたMechsner et al.の研究「Perceptual basis of bimanual coordination」がある。当時行なわれていた複数肢協調動作についての研究では二肢の周期的なリズムカル動作を実験動作として主に用いられ、それらの研究では各肢動作の位相差が指標として用いられていた。例えば、手掌を下にして水平面において左右示指を同時に内転/外転させる時と交互に内転/外転させる時、位相差はそれぞれ 0° 、 180° であり、これらの位相差の動作はそれほど練習しなくてもその他の位相差、例えば 90° よりもはるかに安定して行うことが出来る。そして、動作速度を速くした時には逆位相から同位相への相転移が見られるが、その逆は見られない。こうした現象について、二肢協調動作は神経筋的制約と知覚・認知的制約の両方を受けていると解釈されていた。これに対してMechsnerらは、二肢協調動作における制約は純粹に知覚的なものであると主張し、大きな論争が巻き起こった。

二肢協調動作における制約についての明確なコンセンサスは得られていないが、少なくとも知覚・認知的制約の影響力が大きいことは多くの研究者が認めているところである。Mechsner et al. (2001)においても、視覚フィードバックを操作することにより難しい位相差の動作を安定かつ容易に遂行可能な同位相動作を行なっているかのような状況を作り出すことで、難しい位相差の動作が実際に容易かつ安定して遂行可能となることを示している。このように、どのような二肢協調動作を行っているかではなく、どのように意図した二肢協調動作を行っているか（行なっている二肢協調動作をどのように知覚・認知しているか）が重要であるのだが、二肢協調動作を知覚・認知する能力の研究についての研究は十分に進んではいない。

本研究の目的と構成

本研究は、そうした二肢協調動作に関する知覚・認知能力として空間認知能力に着目し、空間認知能力が複数肢協調に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。次の2つの章により本研究は構成される。

第1章（竹下大介）では、空間認知能力の定量法開発を行なった。複数肢協調動作の研究でよく用いられる両手協調動作を念頭におき、左右視野で円運動をする視覚目標の位相差認知を定量した。

第2章（村岡哲郎）では、第1章の結果を踏まえ、空間認知能力と協調的動作の遂行能力の関係性を明らかにする実験を行なった。

目次

はじめに		1
第1章 左右視野で移動する物体を認知する能力の定量	竹下大介	4
第2章 視覚認知能力と協調的動作遂行能力との関係	村岡哲郎	15

第1章 左右視野で移動する物体を認知する能力の定量

竹下 大介

1. 序論

人は複数の肢を同時に巧みに操り目的を果たすための行動をとっている。例えば、いままさに私は両手指でパソコンのキーボードを叩きながら文章を打ち込んでいるが、左右の指が同じタイミングでキーボードを叩くことなく目的の文字を入力するための系列順序動作をスムーズに行っている。つぎに昼休みに学食で昼食をとる場面を考えてみる。トレーに載せた食事がこぼれることのないよう、両手を協調させてトレーの水平を保ちながら移動している。多少人とぶつかることがあろうとも、両手を含めた四肢での補償的動作（および予測制御）によりすぐさまトレーのバランスは保たれ、食事がこぼれることはない。食後のコーヒーを用意する際には、右手でコーヒーサーバーを持ち、左手に持ったマグにコーヒーを注ぐ。それぞれの重量が変化しても適切な相対位置を保ったままコーヒーは注がれていく。この繊細な動作は、おそらく歩きながらでも、両手を低くしたり高くしたりと動かしてみても出来る。このように目的遂行のために柔軟に制御される複数肢の協調的動作は、日常経験から判断して、それほど複雑でない動作ならば何でも容易に出来ると結論づけたとしても、異論はないように思われる。

それでは、複雑でない協調動作ならば本当に容易にできるのかどうか、ごく単純な動作を使って確かめてみる。まず、右手前腕を回内位で水平になるように保ち、右手示指から小指の4本をびたりと揃え、その指先で空中の水平面上に円を描くように手首を時計回りに1秒間に0.5~1回転くらいのゆっくりとした速度で回す。この動作は誰しもが容易くできる。では次に、右足指先でも同じように空中の水平面上に円を描くように膝から下（実際には膝関節と股関節による動作）を時計回りにゆっくりと動かしてみる。これも容易くできるであろう。ここからが本題の協調動作となる。まずはこれらの上肢と下肢の動作を同時に出来るかどうか確かめてみる。実際に試してみればすぐにわかるが、一肢で動作させる時とほとんど同じ感覚で二肢を同時に操作することが可能である。やはり複雑でない協調動作ならば容易に出来るという結論で間違いないのであろうか。念のため少しアレンジした協調動作でも試してみる。下肢動作はそのまま上肢動作の回転方向を反時計回りに変えてみる。この上肢動作も時計回りの動作と同様に簡単に行えるので、上肢と下肢の動作を組み合わせた協調動作として試してみても容易にできると予想することが妥当かもしれない。では、動作の結果はどうなるか。驚くべきことに、この協調動作は極めて難しい。な

んとか実行しようと試みても、一方の肢を動かせなくなってしまうたり、円軌道を描けなくなってしまうたり、いつのまにか上肢と下肢を同方向に動かしてしまったりする。またここで、上肢と下肢を同じ方向に動かしていた時のことを注意深く振り返ってみると、こちらの協調動作についてもいくつか特徴的な動かし方をしていたことに気づく。まず、上肢と下肢を同じ速度で動かしていた。そして、上肢と下肢の指先は、時計の同じ数値を指し示すように空間的にも同じ動きとなっていた。もちろん、異なる速度や異なる位置となるように意図的に上下肢を動かすこともできるが、最も楽な感じで上下肢を同じ方向に動かす時には、ほとんどの場合、同じ速度と位置が選ばれている。

このように、ごく単純な上下肢の動作を組み合わせた協調動作であっても、必ずしも容易ではないことがわかる。また容易に感じられた協調動作であったとしても、知らず知らずのうちに特定の協調パターンのみで動作を行っていたりする。複数肢を同時に操作する複数肢協調動作において各肢の動作に干渉が生じることについては、100年以上前から知られていることが報告されている (Altschuler and Ramachandran, 2006; Carson and Kelso, 2004)。複数肢協調動作について盛んに研究が行なわれるようになったのは1970年代後半に Kelso らが重要な研究をサイエンス誌に発表 (Kelso et al., 1979) した頃からとなる。複数肢協調動作についての研究では主にリズムミクな周期動作、例えば左右の示指を水平面上で内転と外転を繰り返す動作などが用いられてきた。こうした動作において測定指標として用いられるのは位相差で、左右示指動作の周期局面が全く同じである時には位相差は 0° となり、ちょうど真逆の周期局面をとる時 (例：一方が内転する時に他方は外転する)には位相は 180° となる。位相差 0° や 180° で複数肢協調動作を行なうことは、その他の位相差 (例：位相差 90°) で行なうことと比較すると容易い。もっとも安定して遂行可能となるのは位相差 0° で、比較的安定して遂行可能な位相差 180° の動作であっても、動作速度が速くなると位相差 0° の動作に相転移することが知られている (Muraoka et al., 2016; Shea et al., 2015; Swinnen, 2002)。

特定の位相差における協調動作が容易かつ安定して遂行可能となる要因として最初に考えられたのは神経筋的制約であった (Muraoka et al., 2016; Shea et al., 2016; Swinnen, 2002)。最も安定する位相差 0° においては同名筋や相同筋が同時に活動することで動作が行なわれていたことからそのように考えられた。実際、ある肢動作が他方の同名筋や相同筋の神経活動に影響し、四肢の同名筋や相同筋の同時活動を促進する肢間神経ネットワークが存在することが示されている (Carson et al., 2004; Kennedy et al., 2015; Muraoka et al., 2015; Wang et al., 2021)。しかし、これが主たる制約足り得ないことは、それら筋が全くの逆位相で活動する位相差 180° の動作もまた、 90° などといった 0° と 180° 以外の位相差と比較すれば容易かつ安定して遂行可能な動作であることを考えれば、容易に理解できる。

次に考えられたのは知覚・認知の要因である。Mechsner et al. (2001)は“The symmetry tendency in bimanual movements is independent of muscular and motoric constraints and is thus purely perceptual in nature”という主張をした。“purely”という強い主張のために多くの反論を受けてきたが、Mechsnerらの主張する協調動作における知覚・認知的制約の重要性は様々な研究により確かめられている (Muraoka et al., 2013; Zheng et al., 2021)。例えば、Kovacs et al. (2010)は、両肘関節屈曲伸展動作を用いた協調動作において、左右の肘関節角度を統合した視覚フィードバックをモニターに映しながら動作を行わせた。このとき、位相差 0° や 180° は直線としてフィードバックされ、その中間の位相である 90° は円、位相差 30° や 60° は楕円としてフィードバックされる。通常これら中間の位相差での協調動作は全く出来ないか、出来たとしても不安定となる。しかし、前述した視覚フィードバックを手掛かりとして協調動作を行う場合、驚くべきことに、安定して協調動作遂行が可能となる。そして視覚フィードバックがなければそのような安定した協調動作遂行は不可能となるし、また、動作させる手の動きが見えてもうまく協調動作は行なえない。このように、動作をどのように知覚・認知しているかが複数肢を協調して動作させる際に重要となる。

協調動作における知覚・認知の重要性が明らかとなる一方、個人の知覚・認知能力についての研究は十分されていない。外部刺激に合わせたタッピングや両手でのタッピングを用いた研究から、非音楽家に対する音楽家の優位性や統合的認知の重要性が示唆されているが (Repp and Su, 2013)、一般 (非音楽家) の個人間の知覚・認知能力の差違については明らかとされていない点が多い。そこで、本研究では複数肢協調に重要と考えられる知覚・認知能力のうち、複数物体の空間情報を知覚・認知する能力の定量を試みる実験を行なう。

2. 方法

運動障害、神経筋疾患、視覚疾患の既往歴がない成人男女 13 名（男性 5 名、女性 8 名；平均年齢 20 ± 1 歳）が本実験に参加した。実験前に、全参加者は研究の目的と手順について十分な説明を受けた。実験はヘルシンキ宣言に準拠して実施された。

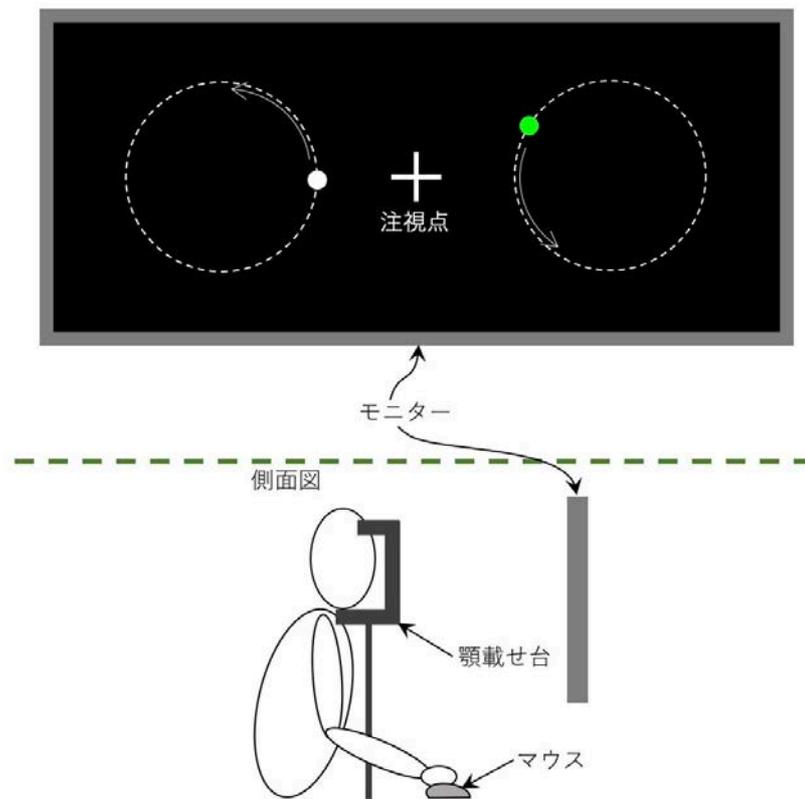
参加者は楽な姿勢で椅子に座り、頭部を顎載せ台に乗せて 24 インチフル HD モニター（ASUS 社製、ROG SWIFT PG248Q, リフレッシュレート 144 Hz）から 35cm の位置に固定した（図 1 A）。参加者が任意のタイミングでテンキーのエンターキーを押すことで位相差判断の各試行は開始された。試行開始後、モニター上にはまず十字の注視点のみが表示された。事前に、参加者は課題中に注視点を注視し続けることが指示された。試行開始後（各試行開始時を 0 秒とする）、左右視野それぞれには円軌道を描く視覚目標がランダムな順序（左視野の視覚目標が先または後）およびランダムなタイミング（先に提示される視覚目標は 0.50~0.65 秒、後の視覚目標は 1.35~1.50 秒）で提示された。視覚目標は、提示開始時には背景色と同じ黒色（R,G,B = 0,0,0）であり、0.5 秒かけて左の視覚目標は白色（R,G,B = 255,255,255）、右の視覚目標はライム色（R,G,B = 0,255,0）と変化した。左右の視覚目標は角速度 $180^\circ/\text{s}$ で左回りに円軌道を描き、円軌道の中心は視角 20° の位置とした。また、円軌道の最内は視角 15° 、最外は視角 25° となるように視覚目標の軌道半径（ r ）を決定した。ただし、視覚目標が描く円軌道の中心位置は、試行ごとに $\pm r/3$ の範囲内のランダムな値（左右視覚目標それぞれについて上下と左右それぞれにランダムな値）の分だけ変化させた。左右視野それぞれで視覚目標が円軌道を描く様子を少なくとも 5 秒（2.5 周）観察したのち、それぞれの視覚目標はランダムな順序（左視野の視覚目標が先または後）およびランダムなタイミング（先に消失し始める視覚目標は 7.00~7.15 秒、後の視覚目標は 7.85~8.00 秒）で 0.5 秒かけて背景色と同じ黒色に変化した。その後、画面中央に白線で半径 r の円が提示され、円の左には左視野に提示されていた白色の視覚目標、円の右には右視野に提示されていたライム色の視覚目標が提示された。参加者は円周上を左クリックすることで白色の視覚目標を、右クリックすることでライム色の視覚目標を円周上に移動することができ、二つの視覚目標が円軌道を描いていた時と同じ位相差となる相対位置にクリック操作で回答するよう指示された。クリック操作は何度でもやり直しができる設定とした。回答する際、どのような位相差であったかが分からなくなってしまう場合には回答をしなくてもよいことも指示された。なお、上述した視覚目標提示開始や消失のランダム化、円軌道位置のランダム化は、開始時や終了時等の特定タイミングにおける視覚目標位置に基づく位相差の推定を防ぐ目的で行なった。

実験は、練習セッションと本番セッションから構成された。参加者はまず練習セッショ

ンを行ない、試行の流れや回答方法について説明を受け、実際に練習として位相差 0° , 90° , 180° , 270° を各 2 試行以上、合計 8 試行以上行なった。その際、各試行での回答後には正解の位相差が開示され、また、練習セッションの位相差が本番セッションに含まれるか否かは不明であることが告げられた。練習セッションの後、1 セット 32 試行として 3 セットから構成される本番セッションを行なった。セット間には 1 分以上の休息をとった。1 セットは 4 つのサブセットで構成され、各サブセットでは左右視覚目標の位相差が 22.5° , 67.5° , 112.5° , 157.5° , 202.5° , 247.5° , 292.5° , 337.5° となる 8 条件が各 1 回ずつランダムな順序で用いられた。

8 つの位相差条件は、左右どちらの視覚目標が先行しているかどうかを区別しないことで $\pm 22.5^{\circ}$, $\pm 67.5^{\circ}$, $\pm 112.5^{\circ}$, $\pm 157.5^{\circ}$ の 4 つの位相差条件にまとめて分析した。各試行で回答された位相差と実際に提示された位相差との差の絶対値を位相差誤差角度として算出し、位相差知覚・認知の正確性の指標とした。また、各試行で回答された位相差と実際に提示された位相差とのベクトルの差分を算出し、各条件での平均ベクトル長（誤差ベクトル長）を位相差知覚・認知の安定性の指標とした。それぞれの指標における条件間の差の検定については対応のある一元配置分散分析および事後検定として Tukey HSD を用いた。統計的有意水準は 5% 未満とした。

A



B

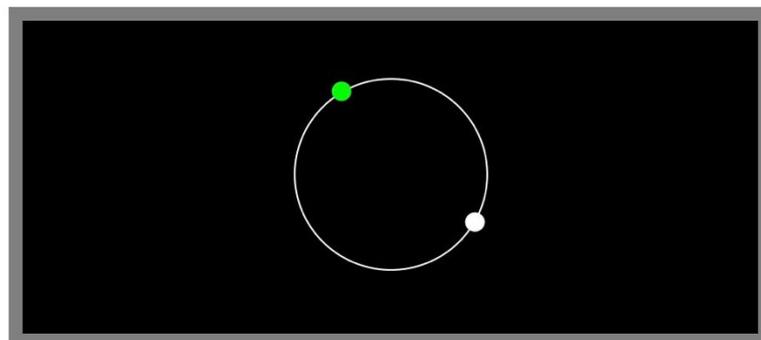


図1 位相差判断課題の実験設定

参加者はモニターの注視点に視線を合わせながら、モニター上で円軌道（破線と矢印はモニター上には示されない）を描く2つの視覚刺激の相対位置を把握する（A）。1つの円周上（実線でモニター上に表示される）で左右の視覚刺激の相対位置をマウス操作回答する（B）。

3. 結果と考察

モニター上の左右視野において円軌道を描く視覚刺激が異なる位相差条件で移動する際に知覚・認知される位相差について、誤差角度と誤差ベクトル長という二つの指標を算出した。誤差角度は、 $\pm 22.5^\circ$ 条件でもっとも小さく $20.4^\circ \pm 4.0^\circ$ であり、 $\pm 112.5^\circ$ 条件でもっとも大きく $45.7^\circ \pm 13.9^\circ$ であった (図 2A)。 $\pm 67.5^\circ$ 条件の誤差角度は $31.3^\circ \pm 8.6^\circ$ であり、 $\pm 157.5^\circ$ 条件の誤差角度 ($34.2^\circ \pm 12.0^\circ$) との間には有意な差は認められなかった。 $\pm 67.5^\circ$ 条件および $\pm 157.5^\circ$ 条件の誤差角度はともに $\pm 22.5^\circ$ 条件および $\pm 112.5^\circ$ 条件とは有意な差が認められた。誤差ベクトル長についての条件間の違い (図 2B) は、 $\pm 22.5^\circ$ 条件でもっとも大きく 0.965 ± 0.032 であり、 $\pm 112.5^\circ$ 条件でもっとも小さく 0.795 ± 0.111 であった。 $\pm 67.5^\circ$ 条件の誤差ベクトル長は 0.883 ± 0.050 であり、 $\pm 157.5^\circ$ 条件の誤差ベクトル長 (0.917 ± 0.049) との間には有意な差は認められなかった。 $\pm 67.5^\circ$ 条件の誤差ベクトル長が $\pm 22.5^\circ$ 条件および $\pm 112.5^\circ$ 条件との間に有意な差を示した一方、 $\pm 157.5^\circ$ 条件の誤差ベクトル長は $\pm 22.5^\circ$ 条件との間には有意な差を示さず、 $\pm 112.5^\circ$ 条件との間には有意な差を示した。

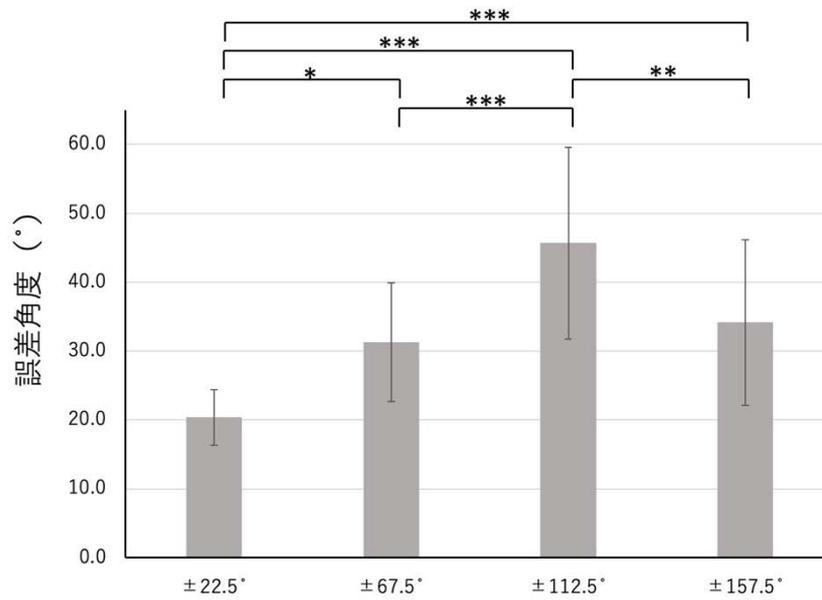
本研究結果から、同位相 (位相差 0°) に近い条件である $\pm 22.5^\circ$ 条件において最も正確かつ安定した位相差の知覚・認知が行なわれたことが示された。これは直線上を振動する2つの視覚刺激の位相差に関わる知覚・認知が同位相において最もよいという先行研究の結果と一致 (Bingham et al., 2001) し、同位相の二肢協調動作が最も正確かつ安定して遂行可能であるという先行研究の知見 (Maes et al., 2017; Swinnen, 2002) とも矛盾しない。また、逆位相 (位相差 180°) に近い条件である $\pm 157.5^\circ$ 条件については、誤差角度は $\pm 67.5^\circ$ 条件との間に有意な差がないものの、知覚・認知される位相差の安定性を反映する指標である誤差ベクトル長は $\pm 67.5^\circ$ 条件と $\pm 22.5^\circ$ 条件との間に有意な差が認められる一方で $\pm 157.5^\circ$ 条件と $\pm 22.5^\circ$ 条件との間には有意な差が認められなかった。これらは、二肢協調動作において動作遂行の安定性と正確性が、同位相 > 逆位相 > その他の位相、となることを反映していたのだと解釈することができる。

次に、誤差角度の結果をみると、最も正確である $\pm 22.5^\circ$ 条件において 20.4° であった。Salesse et al. (2005)は両上肢 (手関節) を用いた協調動作において同位相の誤差角度は $3^\circ \sim 5^\circ$ と報告しており、また、Nomura et al. (2016)は両示指の回内回外を用いた協調動作における誤差角度を 9.2° と報告しているように、左右同名筋を用いた協調動作における同位相での正確性は本研究における知覚・認知による位相差判断の結果よりも高い。一方で、上下肢 (手関節と足関節) を用いた二肢協調動作では $15^\circ \sim 25^\circ$ の範囲の結果が報告されており (Baldissera and Cavallari, 2002; Debaere et al., 2001; Muraoka et al., 2013; Salesse et

al., 2005), 異なる肢を用いる場合には正確性は低下し, 本研究結果と同程度となっている. 二肢協調動作は視覚情報がなくても遂行可能であるが, 視覚を遮断すると協調動作正確性は低下する (Debaere et al., 2001; Salesse et al., 2005) というように視覚情報が協調動作遂行において重要な役割を果たしている. 本研究結果で示された誤差角度は十分小さい値とはいえないが, 通常の二肢協調動作における動作の誤差角度の範囲内であり, そうした視覚情報は体性感覚や皮膚感覚など他の情報とともに協調動作遂行に利用されていると考えられることができるだろう. 以上のことから, 本研究で用いた方法は二肢協調動作における空間認知能力を評価する方法となりうることが示唆された.

最後に, 本研究で用いた実験設定の問題点について述べる. 視覚刺激の位相差として, 本研究では, 22.5° , 67.5° , 112.5° , 157.5° , 202.5° , 247.5° , 292.5° , 337.5° の 8 条件を用いた. 0° や 180° を実験条件として用いなかった理由は, 予備実験において様々な位相差を試した際, 0° ~ 15° の位相差を全て 0° と回答する参加者がいたためである. 0° や 180° は回答しやすい値である. ゆえに, 実際に位相差 0° や 180° と知覚・認知をしてそのように回答しているのか, 単に回答しやすいから 0° や 180° と回答しているのかがはっきりしないため, 本研究では 0° や 180° を実験条件として用いなかった. しかしそのようにした結果, 二肢協調動作において安定かつ正確な動作が可能である同位相と逆位相という二つの位相差から少し離れた位相差を実験条件として用いることになり, そのためか, 特に $\pm 157.5^\circ$ 条件は不安定であるはずの $\pm 67.5^\circ$ 条件との間に明確というほどの違いが示されなかった. これについては, 今後の研究で改善すべき点であると思われる. 次に, 例えば左視野の視覚刺激が右視野の視覚刺激より 22.5° 先行している位相差条件の時, 回答する際に"右"視野の視覚刺激が"左"視野の視覚刺激より 22.5° 先行していたというように, 左右視覚刺激を取り違えて逆に回答してしまうと位相差判断の誤差は大きくなる. 取り違いによる位相差角度の誤差の程度は $\pm 22.5^\circ$ 条件と $\pm 157.5^\circ$ 条件よりも $\pm 67.5^\circ$ 条件と $\pm 112.5^\circ$ 条件で大きくなると予想できる. 一方, 取り違いは近い位相を移動する方が生じやすいと考えることも妥当であり, その場合は取り違いの発生頻度自体は $\pm 22.5^\circ$ 条件の方が他の条件よりも高くなる. 本研究で実際に取り違いが生じたかどうかは不明であるが, 生じた可能性は否定できず, また, 生じた場合に視覚刺激の位相差とその知覚・認知判断の関係にどのように影響したかも不明である. 本研究においては, 位相差判断の際, わからなくなってしまったら回答しなくてよいと参加者に指示をし, 全体で 4.6% (1248 試行中 58 試行) の試行で無回答が選択された. この手順により取り違いの可能性は減少していると期待できるが, 今後の研究ではさらなる工夫が必要かもしれない.

A



B

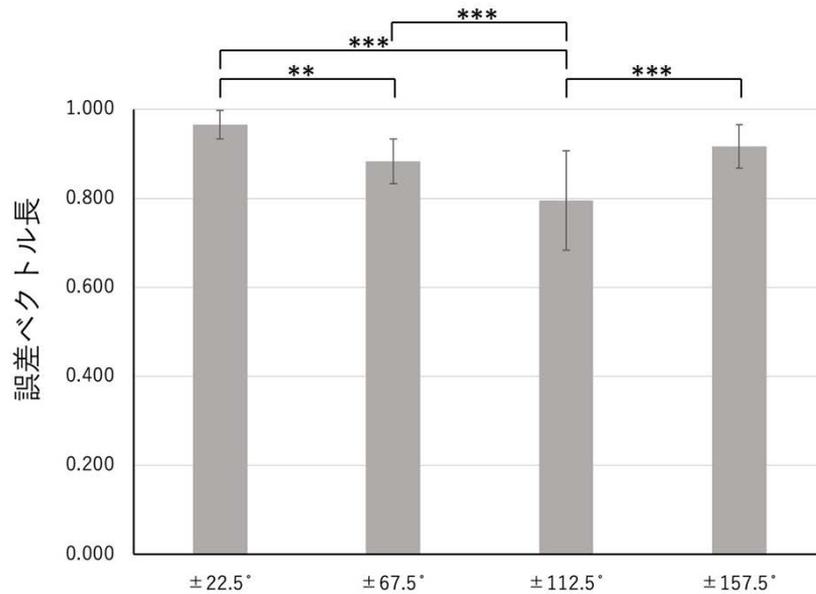


図2 視覚刺激の位相差と知覚・認知された位相差の誤差

提示された視覚刺激の位相差 ($\pm 22.5^\circ \sim \pm 157.5^\circ$) と知覚・認知された位相差の誤差ベクトル長 (A) および誤差角度 (B) との関係。 $\pm 22.5^\circ$ は同位相に近く、 $\pm 157.5^\circ$ は逆位相に近い条件。

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p = 0.00$

4. 参考文献

Altschuler EL, Ramachandran VS (2006) Can you do this? Extremely difficult interbodypart coordination tasks and implications for central limitations on control of coordination. *Perception* 35:281-283.

Baldissera F, Cavallari P (2002) Impairment in the control of coupled cyclic movements of ipsilateral hand and foot after total callosotomy. *Acta Psychol (Amst)* 110:289-304.

Bingham GP, Zaal FTJM, Shull JA, Collins DR (2001) The effect of frequency on the visual perception of relative phase and phase variability of two oscillating objects. *Exp Brain Res* 136:543-552.

Carson RG, Kelso JA (2004) Governing coordination: behavioural principles and neural correlates. *Exp Brain Res* 154:267-274.

Carson RG, Riek S, Mackey DC, Meichenbaum DP, Willms K, Forner M, Byblow WD (2004) Excitability changes in human forearm corticospinal projections and spinal reflex pathways during rhythmic voluntary movement of the opposite limb. *Journal of Physiology-London* 560:929-940.

Debaere F, Van Assche D, Kiekens C, Verschueren SMP, Swinnen SP (2001) Coordination of upper and lower limb segments: deficits on the ipsilesional side after unilateral stroke. *Exp Brain Res* 141:519-529.

Kelso JA, Southard DL, Goodman D (1979) On the nature of human interlimb coordination. *Science* 203:1029-1031.

Kennedy DM, Boyle JB, Rhee J, Shea CH (2015) Rhythmical bimanual force production: homologous and non-homologous muscles. *Exp Brain Res* 233:181-195.

Kovacs AJ, Buchanan JJ, Shea CH (2010) Impossible is nothing: 5:3 and 4:3 multi-frequency bimanual coordination. *Exp Brain Res* 201:249-259.

Maes C, Gooijers J, Orban de Xivry JJ, Swinnen SP, Boisgontier MP (2017) Two hands, one brain, and aging. *Neurosci Biobehav Rev* 75:234-256.

Mechsner F, Kerzel D, Knoblich G, Prinz W (2001) Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature* 414:69-73.

Muraoka T, Nakagawa K, Kato K, Qi W, Kanosue K (2016) Interlimb coordination from a psychological perspective. *J Physical Fit Sports Med* 5 (5), 349-359.

Muraoka T, Sakamoto M, Mizuguchi N, Nakagawa K, Kanosue K (2015) Corticospinal excitability modulation in resting digit muscles during cyclical movement of the digits of the ipsilateral limb. *Frontiers in human neuroscience* 9:607.

Nomura Y, Jono Y, Tani K, Chujo Y, Hiraoka K (2016) Corticospinal Modulations during Bimanual Movement with Different Relative Phases. *Frontiers in human neuroscience* 10:95.

Repp BH, Su YH (2013) Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006-2012). *Psychon Bull Rev* 20:403-452.

Salesse R, Oullier O, Temprado JJ (2005) Plane of motion mediates the coalition of constraints in rhythmic bimanual coordination. *J Mot Behav* 37:454-464.

Salesse R, Temprado JJ (2005) The effect of visuo-motor transformations on hand-foot coordination: evidence in favor of the incongruency hypothesis. *Acta Psychol (Amst)* 119:143-157.

Shea CH, Buchanan JJ, Kennedy DM (2016) Perception and action influences on discrete and reciprocal bimanual coordination. *Psychonomic bulletin & review* 23:361-386.

Swinnen SP (2002) Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions. *Nat Rev Neurosci* 3:348-359.

Wang Y, Neto OP, Davis MM, Kennedy DM (2021) The effect of inherent and incidental constraints on bimanual and social coordination. *Exp Brain Res* 239:2089-2105.

Zheng Y, Kanosue K, Muraoka T (2021) Stability of bimanual finger tapping coordination is constrained by salient phases. *Neurosci Res* 163:1-9.

第2章 視覚認知能力と協調的動作遂行能力との関係

村岡 哲郎

1. 序論

リズム的な周期的動作を二肢で行なう二肢協調動作においては、逆位相動作の速度を徐々に上昇させると同位相動作に変化するという相転移が生じる (Kelso, 1981). そして、この相転移については、動作速度を徐々に低下させるときには生じないというように履歴現象が認められ、また、この相転移が生じる直前には二肢の位相差の変動が上昇するという臨界揺らぎもみられる。こうした特徴的現象について、Haken et al. (1985)は力学系モデルにより自己組織化現象として説明した。この自己組織化現象と同様あるいは矛盾しない実験結果は、Kelso や Haken が対象とした両手指の動作だけでなく、様々な肢や関節の組み合わせの二肢協調動作 (Baldissera et al., 2006; Muraoka et al., 2013; Pickavance et al., 2018; Zheng et al., 2018) や、二人で協調動作を行なったり (Fine et al., 2013; Kovacs et al., 2020; Muraoka et al., 2015; Schmidt et al., 1990)、光や音といった外部刺激に合わせて協調動作を行なう際においても生じることが報告されている (Buekers et al., 2000; Kelso et al., 2001; Hajnal et al., 2009; Wilson et al., 2005)。二人の人の間や人と外部刺激の間には明らかに神経筋のつながりはない。それにも関わらず、対人や対外部刺激の協調動作においても二肢協調動作と類似した現象がみられることから、二肢協調動作における知覚・認知的制約の重要性は理解できる。

二肢を同時に周期的に動作させる場合、例えば、ひじ掛け椅子に座った姿勢で手首を掌屈-背屈させながら足関節を底屈-背屈させる時、最も楽に行なえる動作は同じテンポで手足を同方向に動かす動作となる (Baldissera et al., 1982)。この同方向動作が最も行ないやすいという現象は、同方向動作が手首の掌屈と足首の底屈の組み合わせで同方向動作となる前腕回内位においても、同方向動作が手首の掌屈と足首の背屈の組み合わせで同方向動作となる前腕回外位においても見られることから、特定の関節動作や筋活動ではなく、二肢の動作方向がどのような関係にあるかという動作の知覚・認知に依存して見られる現象である。次に、同じようにひじ掛け椅子に座った姿勢で、手足関節の代わりに指の屈曲-伸展動作を行なった場合にはどうなるであろうか。前腕が回内位の場合は手首足首による二肢協調動作と同様、同方向動作が最も楽に、安定して行なえる動作となる (Muraoka et al., 2015)。しかし、前腕を回外位にした場合、手足指を同時に屈曲する逆方向動作と手足指を交互に屈曲させる同方向動作の動作安定性が同程度になり、手足指を用いた二肢協調動作

においては動作方向と動作組み合わせの両方が協調動作の安定性を決める要因であることが示された。これは知覚・認知的制約と神経筋的制約の両方が同程度の影響力を持ったことを示した結果だろうか。もしそうであれば、二人の人の間で手指と足指の協調動作を行った場合には、知覚・認知的制約の影響のみをうけ、動作方向という要因のみで協調動作の安定性が決まることとなる。しかし二人の人の間で手指と足指の協調動作を行った結果は、手足指を同時に屈曲する同方向および逆方向動作、そして手足指を交互に屈曲する同方向動作と比較して、手足指を交互に屈曲する逆方向動作は不安定であることが示された。これは手指や足指の屈曲動作を握るという機能をおこなう動作と知覚・認知することで、方向または機能という知覚・認知的制約を受けていたと説明することが出来る (Muraoka et al., 2015)。このように、ひとつの動作をどのように知覚・認知するかが二肢協調動作において重要であるかについてこれまでの研究で明らかとされているが、その知覚・認知能力の個人差が二肢協調動作という身体活動にどのように影響するかは十分に検証されていない。

二肢協調動作の制御において、目的とする二肢動作の位相差の誤差補正が重要であることが Nakagawa et al. (2013) により示されている。そして、この誤差補正においては、二肢の位相差という空間情報を正しく知覚・認知することが必須となる。そこで本研究では、知覚・認知能力として、前章で示した複数物体の空間情報を知覚・認知する能力と視覚運動協調課題遂行能力との関係性について個人差に着目しながら明らかとすることを目的として実験を行う。

2. 方法

運動障害、神経筋疾患、視覚疾患の既往歴がない成人男女 15 名（男性 6 名、女性 9 名；平均年齢 20 ± 1 歳）が本実験に参加した。実験前に、全参加者は研究の目的と手順について十分な説明を受けた。実験はヘルシンキ宣言に準拠して実施された。

実験は 2 つのパートから構成され、1 つ目のパートは第 1 章の実験と全て同一手法の視覚認知課題であり、2 つ目のパートはモニター上で円軌道を描く視覚目標に対して、指示された片手動作を行う視覚運動課題であった。視覚運動課題では、参加者は楽な姿勢で椅子に座り、頭部を顎載せ台に乗せて 24 インチフル HD モニター (ASUS 社製, ROG SWIFT PG248Q, リフレッシュレート 144 Hz) から 35cm の位置に固定した (図 3A)。顎乗せ台の右側方は遮蔽板で覆われ、動作する右腕が課題中に見えないようにした。回転板は机上の動作させやすい位置に置かれた。回転板は板上の直径 4.5 cm のつまみを持って動作させた。つまみの位置は回転板の中心から 3.5 cm の位置とした。つまみの位置は回転板のポテンショメーター (分解能 0.088°) で計測し、AD コンバーター (ADInstruments 社製, PowerLab 16/30) を介してパソコンに 250 Hz で取り込み保存した。モニタ上に設置した光度センサの信号を回転板の角度情報と同様にパソコンに取り込むことで視覚刺激位置と回転板位置のデータを同期した。

参加者が任意のタイミングでテンキーのエンターキーを押すことで視覚運動課題の各試行は開始された。試行開始後、モニター上にはまず視覚運動課題でおこなう位相差条件についての指示および十字の注視点が表示された。事前に、参加者は課題中に注視点を注視し続けることが指示された。注視点が表示された 1.5 秒後、左視野には視覚目標が定められた位置 (円軌道上の最も下方の位置) に提示された。背景色は黒色 (R,G,B = 0,0,0) で視覚目標は白色 (R,G,B = 255,255,255) で表示された。視覚目標は左回りで円を描き、その円軌道の中心は視角 20° の位置とし、円軌道の最内は視角 15° 、最外は視角 25° となるように視覚目標の軌道半径を決定した。視覚目標は角加速度 $40^\circ/s^2$ でゆっくりと速度を上げ、4.5 秒かけて角速度 $180^\circ/s$ に達した後はその角速度を維持したまま円軌道を描き、一定速度で円軌道を 20.25 周描いた時点で消失した。視覚目標が円軌道を描く間、参加者は指示された位相差で視覚目標に協調させて回転板を操作することが求められた。視覚目標が消失した後、試行終了の合図がモニタ上に表示された。

視覚運動課題実験は、練習セッションと本番セッションから構成された。参加者はまず練習セッションを行ない、試行の流れについて説明を受け、実際に練習として位相差 -90° , 0° , $+90^\circ$, 180° を各 1~3 試行行なった。視覚目標の提示が始まる位置は円軌道上の常に同

じ位置であるため、目標とする位相差に応じて課題開始時の回転板位置を調整するよう参加者は指示された。練習セッションの後、1セット4試行として5セットから構成される本番セッションを行なった。セット間には1分以上の休息をとった。各セットでは左視野の視覚目標に対して位相差が -90° , 0° , $+90^\circ$, 180° となる4条件が各1回ずつランダムな順序で提示された。

視覚認知課題においては、8つの位相差条件を同位相（同位相に近い位相）、逆位相（逆位相に近い位相）、中間位相の3つの位相差条件にまとめて算出し、代表値として用いた。各試行で回答された位相差と実際に提示された位相差との差の絶対値を位相差誤差角度として算出した。視覚運動課題においては、4つの位相差条件を同位相、逆位相、中間位相の3つの位相差条件にまとめて算出し、代表値として用いた。各試行について視覚目標が一定速度に達した後の20サイクルにおける誤差角度の絶対値のベクトル平均値を算出した。各被験者について3つの位相差条件における視覚認知課題と視覚運動課題における誤差角度の組み合わせをつくり、全被験者、全条件のデータをまとめ、視覚認知課題と視覚運動課題における誤差角度の関係についてピアソンの積率相関係数で検定した。統計的有意水準は5%未満とした。

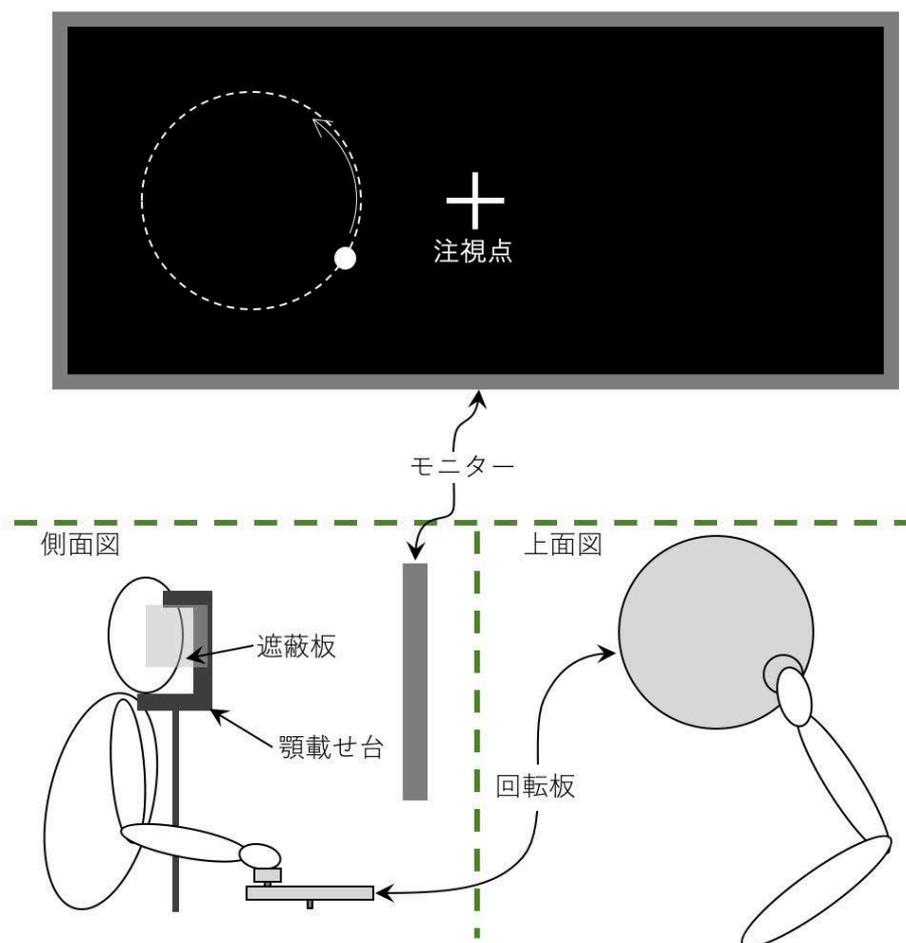


図3 視覚運動課題の実験設定

参加者はモニターの注視点に視線を合わせながら，机の上に置かれた回転板を右手で操作する．遮蔽板により右手動作は見えない．白丸の視覚目標を示す矢印とその軌道を示す破線の円はモニター上には表示されない．

3. 結果と考察

モニター上の左右視野において円軌道を描く視覚刺激が異なる位相差条件で移動する際に知覚・認知される位相差について、その誤差角度は、同位相 ($\pm 22.5^\circ$) で $21.6^\circ \pm 6.5^\circ$ であり、中間位相 ($\pm 67.5^\circ, \pm 112.5^\circ$) では $40.1^\circ \pm 10.6^\circ$ 、逆位相 ($\pm 157.5^\circ$) では $39.2^\circ \pm 17.7^\circ$ であった。これら誤差角度の値の範囲および条件による誤差角度の違いは前章の結果と同様であった。モニター上の左視野において円軌道を描く視覚刺激に対して右腕で円を描く視覚運動課題における誤差角度は、同位相 (0°) で $25.6^\circ \pm 7.5^\circ$ であり、中間位相 ($\pm 90^\circ$) では $34.2^\circ \pm 7.6^\circ$ 、逆位相 (180°) では $43.3^\circ \pm 13.9^\circ$ であった。視覚運動課題においても同位相で最も正確に課題遂行が可能となっていることが示されたが、逆位相よりも中間位相において誤差角度が小さいことは通常の二肢協調動作とは異なる結果であった。Wilson et al. (2005) はモニター上を左右に動くドットに対して、ジョイスティック操作により制御するドットを指定された位相差で動かす視覚運動課題をおこない、位相差 90° と 180° では誤差角度に大きな差がないことを示しており、こちらも通常の二肢協調動作とは異なる結果である。彼らの研究における位相差 180° は、視覚目標のドットと手運動で制御するドットがちょうど折り返すタイミングを合わせるという視覚運動協調であり、こうした折り返しのような特徴的な局面のタイミングを合わせることは比較的制御が容易である (Zheng et al., 2018; Zheng et al., 2021)。一方、本研究における位相差 180° では円軌道を採用しているためにそうした特徴的な局面はなく、より難しい協調になっていたと考えられる。こうした難易度の違いが本研究結果と Wilson らの研究結果との違いを生み出していたと推察される。

身体動作を含まない視覚認知課題における誤差角度と視覚情報に合わせて身体動作を行う視覚運動課題における誤差角度の関係をみると、有意な相関関係が認められた (図 4)。つまり、複数物体の空間認知能力が高い人ほど、視覚情報に協調させた身体活動をうまく行えることが示唆されたと言える。知覚・認知能力と協調動作遂行能力との関係についてはこれまでいくつかの研究がなされてきた (Casile and Giese, 2006; Leach et al., 2021; Maslovat et al., 2010; Snapp-Childs et al., 2015; Wilson et al., 2010)。その中で、参加者の個人差に着目した研究は二つあった。一つは Casile and Giese (2006) による研究で、通常自発的には実行できない位相差での両腕協調動作を対象として、言語的・触覚的指示のみにより、つまり両腕動作に関する視覚的情報のないまま、参加者にトレーニングをさせた時の知覚・認知能力と協調動作遂行能力との関係が調べられた。その結果、視覚的情報のない運動トレーニングは、両腕協調動作のパフォーマンスだけでなくその動作の視覚認知精度も向上させ、知覚・認知能力と協調動作遂行能力の間には有意な相関関係が認められることが示された。また、もう一つの研究である Snapp-Childs et al. (2015) の報告に

よると、腕動作に合わせてモニタ上のドットが動く実験装置を用い、両腕による位相差 90° での両腕協調動作とモニタ上をコンピューター制御で動くドットに対して位相差 90° で片腕動作を行う視覚運動課題の2つのいずれかをトレーニングすると、トレーニングの種類によらず知覚・認知能力と協調動作遂行能力との間には有意な相関関係が認められた。本研究結果もまた知覚・認知能力と協調動作遂行能力との間に有意な相関関係を示したことから、これら先行研究結果を支持したと言えるが、Casile and Giese (2006) は、運動トレーニング前やトレーニングをしていない位相差での協調動作についてはそうした相関関係は認められないことも報告している。彼らの研究の大きな特徴は行っている動作に関する視覚情報がない点である。本研究では視覚運動課題中に腕動作は見えないものの、回転板とモニタ上の視覚刺激の正しい協調関係は容易に視覚的にイメージできる。ゆえに、協調動作の視覚的運動表象がないもしくは拙い状況下では、知覚・認知能力と協調動作遂行能力との間の結びつきはないもしくは非常に弱く、協調動作の視覚的運動表象がきちんとある状況においては知覚・認知能力と協調動作遂行能力との間に強い結びつきがあることが推察できる。そしてこの強い結びつきについては、協調動作の視覚的運動表象がある状況において、より精緻な知覚・認知能力により協調動作遂行能力が高まることが視覚認知のみのトレーニングをおこなった研究結果 (Wilson et al., 2010) からも示されている。

本研究の結果、視覚情報に協調させた身体動作遂行には空間認知能力が関連することが示された。加齢等に伴って様々な知覚・認知能力が低下することは、身体動作の協調能力にも影響するというを示唆していると言える。逆に言えば、知覚・認知能力向上を目的としたトレーニングを行うことで、日常的な協調動作をスムーズにおこなえることにつながるかも知れない。視覚運動協調遂行能力と空間認知能力の間にみられた関連性は、協調動作の視覚的運動表象が構築されている場合にのみ生じると推察された。この点については、視覚的運動表象構築が困難な協調動作課題を用いて今後の研究で確かめていく必要がある。

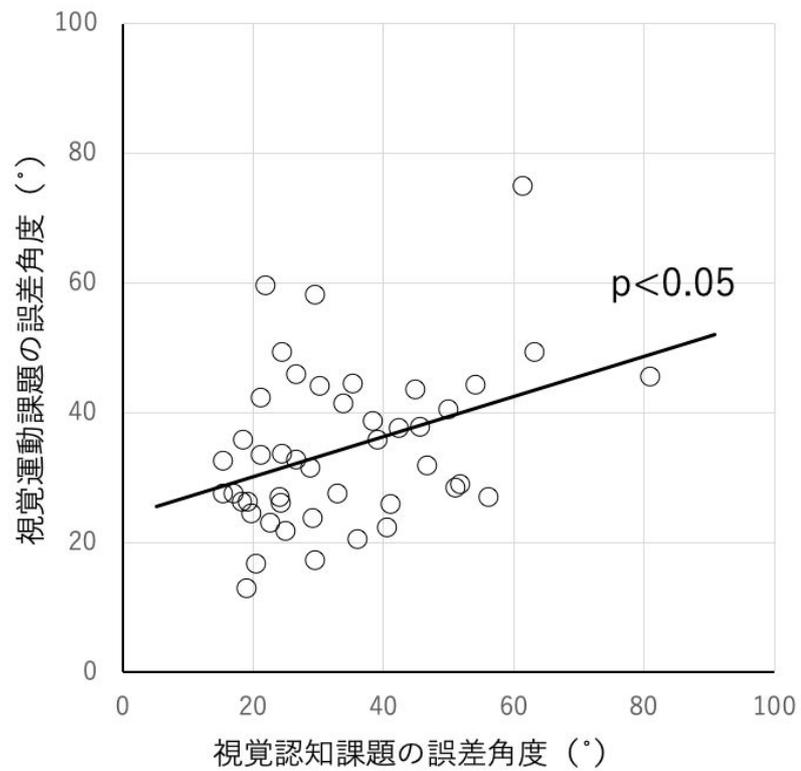


図4 視覚運動課題と視覚認知課題の誤差角度の関係

同位相（付近）、逆位相（付近）、それらの中間位相の3条件それぞれにおける各個人の視覚運動課題および視覚認知課題の誤差角度には有意な正の相関関係が認められる（相関係数 0.38, $n = 45$ ）。

4. 参考文献

Baldissera F, Cavallari P, Civaschi P (1982) Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neurosci Lett* 34:95-100.

Baldissera FG, Cavallari P, Esposti R (2006) Synchrony of hand-foot coupled movements: is it attained by mutual feedback entrainment or by independent linkage of each limb to a common rhythm generator? *BMC Neurosci* 7:70.

Buekers MJ, Bogaerts HP, Swinnen SP, Helsen WF (2000) The synchronization of human arm movements to external events. *Neurosci Lett* 290:181-184.

Casile A, Giese MA (2006) Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Curr Biol* 16:69-74.

Fine JM, Gibbons CT, Amazeen EL (2013) Congruency effects in interpersonal coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 39:1541-1556.

Hajnal A, Richardson MJ, Harrison SJ, Schmidt RC (2009) Location but not amount of stimulus occlusion influences the stability of visuo-motor coordination. *Exp Brain Res* 199:89-93.

Haken H, Kelso JA, Bunz H (1985) A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol Cybern* 51:347-356.

Kelso JA, Fink PW, DeLaplain CR, Carson RG (2001) Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics. *Proc Biol Sci* 268:1207-1213.

Kelso, JA (1981) Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes. *J Mot Behavior* 13(4):226-261.

Kovacs AJ, Wang YY, Kennedy DM (2020) Accessing interpersonal and intrapersonal coordination dynamics. *Exp Brain Res* 238:17-27.

Leach D, Kolokotroni Z, Wilson AD (2021) Perceptual information supports transfer of learning in coordinated rhythmic movement. *Psychol Res* 85:1167-1182.

Maslovat D, Hodges NJ, Krigolson OE, Handy TC (2010) Observational practice benefits are limited to perceptual improvements in the acquisition of a novel coordination skill. *Exp Brain Res* 204:119-130.

Muraoka T, Ishida Y, Obu T, Crawshaw L, Kanosue K (2013) Ipsilateral wrist-ankle movements in the sagittal plane encoded in extrinsic reference frame. *Neurosci Res* 75:289-294.

Muraoka T, Watanabe Y, Kanosue K (2015) Intra- and inter-person coordinated movements of fingers and toes. In: *Sports Performance* (Kanosue K, Nagami T, Tsuchiya J, eds), pp. 37-48. Springer Japan.

Nakagawa K, Muraoka T, Kanosue K (2013) Factors that determine directional constraint in ipsilateral hand-foot coordinated movements. *Physiol Rep* 1:e00108.

Pickavance J, Azmoodeh A, Wilson AD (2018) The effects of feedback format, and egocentric & allocentric relative phase on coordination stability. *Hum Mov Sci* 59:143-152.

Schmidt RC, Carello C, Turvey MT (1990) Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 16:227-247.

Snapp-Childs W, Wilson AD, Bingham GP (2015) Transfer of learning between unimanual and bimanual rhythmic movement coordination: transfer is a function of the task dynamic. *Exp Brain Res* 233:2225-2238.

Wilson AD, Collins DR, Bingham GP (2005) Perceptual coupling in rhythmic movement coordination: stable perception leads to stable action. *Exp Brain Res* 164:517-528.

Wilson AD, Snapp-Childs W, Bingham GP (2010) Perceptual learning immediately yields new stable motor coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 36:1508-1514.

Zheng Y, Kanosue K, Muraoka T (2021) Stability of bimanual finger tapping coordination is constrained by salient phases. *Neurosci Res* 163:1-9.

Zheng Y, Muraoka T, Nakagawa K, Kato K, Kanosue K (2018) Effect of salient points in movements on the constraints in bimanual coordination. *Exp Brain Res* 236:1461-1470.

日本大学経済学部グローバル社会文化研究センター
ワーキング・ペーパー・シリーズ No.2025-01

2026年3月1日 発行

発行元 日本大学経済学部グローバル社会文化研究センター
〒101-8360 東京都千代田区神田三崎町1-3-2

TEL 03-3219-3309 / FAX 03-3219-3329

URL : <https://www.eco.nihon-u.ac.jp/research/cgs/>