

大局的な身体協応が達成する体肢間振り子協応

Inter-limb pendulum coordination achieved by global coordination

谷貝 祐介 (早稲田大学大学院人間科学研究科)¹ 三嶋 博之 (早稲田大学人間科学学術院)²

三浦 哲都 (早稲田大学人間科学学術院)³ 古山 宣洋 (早稲田大学人間科学学術院)⁴

従来の体肢間協応研究では、課題達成に直接かかわる“局所”部位の協応を、身体の一部を固定するなどの実験統制により、“姿勢”と切り離して研究してきた。しかしながら、実践的な運動をより良く理解するためには、“局所”の課題達成を、“姿勢”を含む全身の“大局的な”協応構造から捉える必要がある。本研究では、左右の振り子を音に合わせて動かす課題を二つの条件で行った：immobile 条件（前腕を固定し局所部位のみで行う条件）、mobile 条件（身体を解放し部位間を連動できる条件）。これらの条件下で、左右振り子の位相モードや課題周波数に応じて、どのような協応構造が出現するのか、局所の課題達成と大局的な協応はどのように関係しているのか、について探索的に比較検討した。分析の結果、身体が解放された mobile 条件では状況に依存した課題特定の協応構造が創発し、大局的な協応を妨げることによって課題達成度も低下する可能性が示唆された。

Keywords: 身体協応, 力学系アプローチ, 振り子協応課題

1 はじめに

楽器演奏やダンスをはじめとした音楽パフォーマンスでは、音に合わせて身体をタイミングよく動かすことと同時に、全身の姿勢を維持することが求められる。前者の能力については、力学系アプローチを用いて数多くのことが明らかにされてきた (e.g., Haken et al., 1985)。これらの研究の多くは、身体の一部を固定するなどの実験統制により、局所部位とその他の身体部位の機械的な相互作用が起きにくいデザインを採用してきた (Bardy, et al., 2002)。

確かに、一連の研究によって、“身体をタイミングよく動かすこと”に関する理解は飛躍的に進歩した。しかしながら、より実践的な運動を視野に入れた場合には、局所の運動は姿勢と不可分であるため (Hamaoui, et al., 2011)、“身体をタイミングよく動かすこと”と“姿勢維持”がどのような関係になっているのかを検討することが重要である。本研究ではこうした着想から、これまで局所の運動課題として扱われてきた振り子協応課題を、姿勢を含む大局的な協応課題として捉えなおし、条件に応じて創発する協応構造を探索することとした。具体的には、immobile 条件（前腕を固定し局所部位のみで行う条件）、mobile 条件（身体を解放し全身を連動できる条件）の二つの実験条件を設定し、これらの条件下で、位相モードや周波数に応じてどのような協応構造が出現するのか、大局的な協応と局所の課題達成はどのように関係しているのか、について探索的に比較検討した。

2 方法

2.1 実験参加者

18名の大学生・大学院生が実験に参加した。参加者はすべて右利きの男性であった(平均年齢= 23.3歳, SD=1.27歳, 平均身長= 171.43cm, SD= 7.36cm)。

2.2 課題

両手を用いた振り子協応課題を採用した。参加者は、座位姿勢で、左右の手で把持した振り子を、ヘッドフォンから呈示されたメトロノーム音に合わせて動かした。その際、mobility 要因として、前腕を台に固定し、手首のみを使って振り子を動かす immobile 条件と、台を用いず空中で振り子を動かす mobile 条件を設定した。参加者は、上記2水準に加え、課題周波数 (1.5 Hz から 0.2 Hz ずつ 2.5 Hz まで、計 6 水準)、位相モード (同位相、逆位相) の組み合わせ全 24 通りを実験条件とした課題を遂行した。各条件の持続時間は振り子運動の 30 周期分に相当するものであった (1.5 Hz では 20 秒間、2.5 Hz では 12 秒間)。

2.3 手続き

参加者は、提示されたメトロノーム音に対して、なるべく正確に、連続的に振り子を動かすことを教示された。その際、同位相モードでは、メトロノーム音に対し、両振り子を最も身体に近い位置で合わせるように、逆位相モードでは、メトロノーム音に対し、右振り子が身体に最も近い

1 Yusuke Yagai (Waseda university, Graduate school of human sciences): yagai.yusuke@gmail.com

2 Hiroyuki Mishima (Waseda university, Faculty of human sciences): mishima@waseda.jp

3 Akito Miura (Waseda university, Faculty of human sciences): akito.miura@waseda.jp

4 Nobuhiro Furuyama (Waseda university, Faculty of human sciences): furuyama@waseda.jp

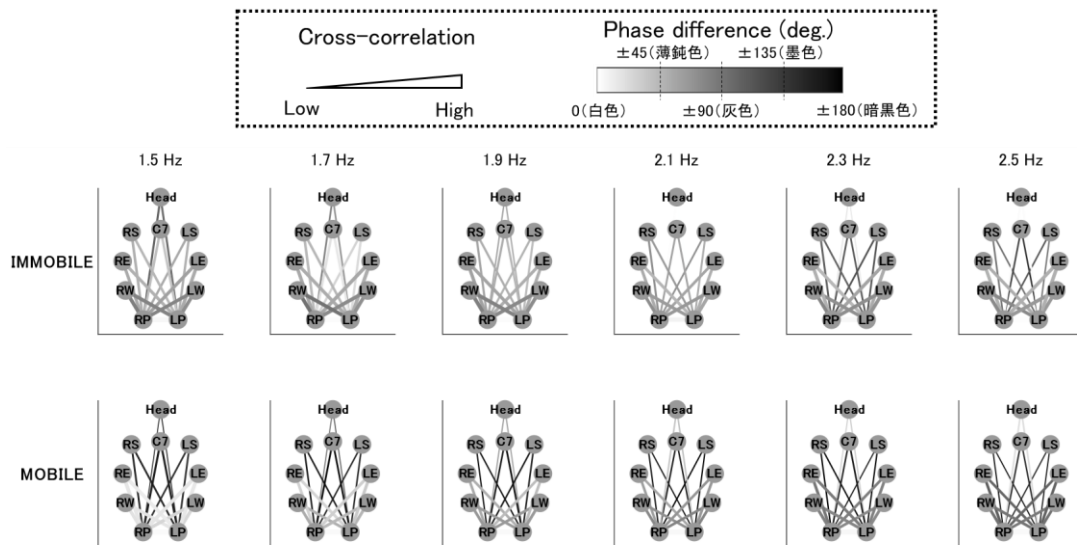


Figure 1 大局的な協応構造の可視化（同位相）

位置で、左振り子が最も遠い位置で合わせるように動かすことを教示された。前腕固定の有無にかかわらず、前腕を地面と水平に保つよう教示された。また、参加者間の姿勢統制のため、課題遂行中には壁に貼付された注視点（姿勢を正した状態の目線の高さに相当する）を注視するよう教示された。本研究の実験手続きは、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」により承認されたものである（2017-140）。

2.4 データ分析

課題時の3次元動作データ（左右振り子、左右手首関節、左右肘関節、左右肩峰、第7頸椎（C7）、頭頂部）を、モーションキャプチャシステム（OptiTrack, Natural Point社）を用い計測した。本研究では、3次元データのうち、振り子の周期性が最もよくあらわれる前後方向のデータを用いて分析を行った。まず、最初の10周期のデータを除く、20周期分のデータを抽出した。その後、バンドパスフィルタ（Butter-worth 特性、0.1Hz-10Hz、双方向）を適用してノイズを除去し、z-score化によって振幅を正規化した。この処理を施したデータを用いて、大局的な協応構造の分析、課題達成度の分析を実行した。

大局的な協応構造の分析では、音に合わせる局所（i.e. 左右の振り子）を基点として、その他の部位との関係性を分析した。本研究では、部位間の関係性の指標として、運動類似度（相互相関）、位相差（相対位相）を算出した。運動類似度（相互相関）は、部位間の相互相関のFirst peak value（振り子運動の前後1周期分を計算範囲とし、その範囲内での相関の最大値）を採用した。位相差（相対位相）について、まず各部位の位置データから、ヒルベルト変換によって位相情報を抽出し、その逆正接を求めることで、位相角に変換した。その後、振り子の位相角（ θ_{RP} , θ_{LP} ）

から、その他の部位の位相角を減算し、相対位相を求めた。運動類似度と位相差は、計18組（右9組、左9組）求めた。本稿では、得られたデータの傾向を探索するため、18名分の結果を平均化し、身体配置を模した図形の上にプロットした（Fig.1 & Fig.2）。線の太さで運動類似度を、線の色で位相差を表現した。なお、本稿では紙幅の都合により、両指標のうち、位相差に主な焦点を当てて議論する。

課題達成度の分析では、左右の振り子の位相安定性を分析した。左右振り子の相対位相（計算方法は前述の通りである）を求めたのち、phase shiftの絶対値、SD ϕ を求めた。phase shiftの絶対値は、課題で求められた位相モード（同位相=0度、逆位相=180度）からの逸脱度を表しており、SD ϕ は位相差の不安定性を表す。要因の効果を検討するため、角度データの2要因分散分析に対応するHarrison-Kanji test（Harrison & Kanji, 1988）を、位相モード毎に適用した（Mobility×Frequency）。下位検定には、Watson-Williams testを用いた（p値補正はHolm法）。

3 結果

3.1 大局的な協応構造

Fig.1には、同位相の結果を示した。以下には、振り子とその他の部位の位相差に着目し、mobile/immobile条件の違いを課題周波数との組み合わせで記述する。

まず、振り子（RP, LP）に対する手首（RW, LW）・肘（RE, LE）の位相差に注目すると、immobile条件（上段）では、およそ90-60度付近（灰色から薄鈍色）の位相差であるのに対し、mobile条件（下段）では、周波数の増加に伴い、0-90度付近（白から灰色）の幅で位相差が変化していることが確認できる。次に、振り子に対して肩（RS, LS）・C7の位相差について、immobile条件では45-90度付近（薄鈍色から灰色）の変化幅であったのに対し、mobile

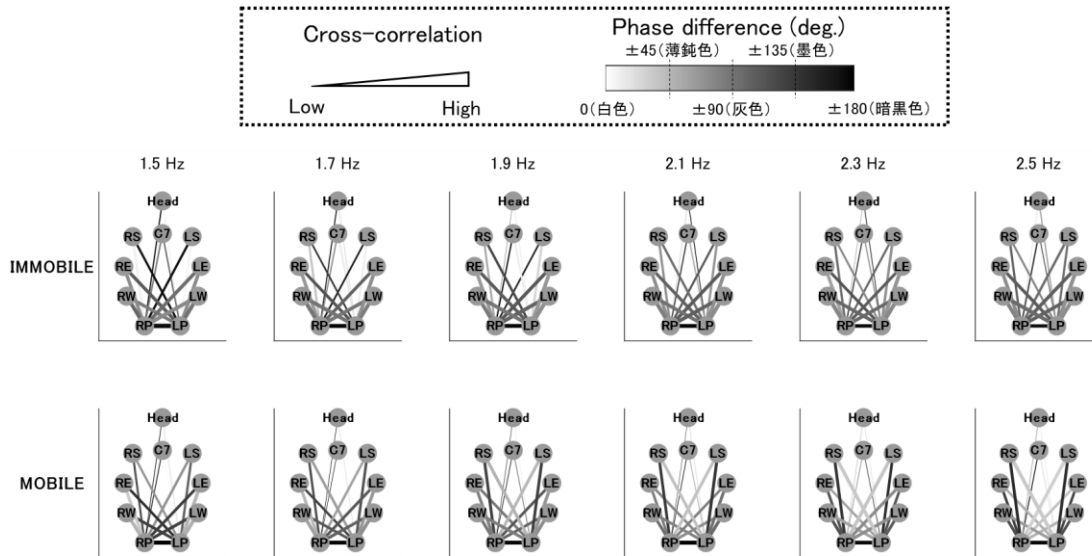


Figure 2 大局的な協応構造の可視化（逆位相）

条件では、周波数に関わらず一貫して 180 度付近（暗黒色）の位相差であった。また、頭部（Head）との位相差については、周波数の増加に伴って、同位相（0 度、白色）に近づくことが確認された。これらの結果から、同位相における mobile 条件の特徴として、振り子に近い部位（手首・肘）では周波数に応じて位相差が変化するが、振り子から遠い肩や C7（二関節以上の隔りがある）では、周波数に関わらず一貫したパターンを示すことが確認された。ただし、頭部については、周波数の増大に伴い、振り子運動への参与の仕方が変化することも確認された。

Fig.2 には逆位相の結果を示した。まず、振り子に対する手首や肘の位相差について、immobile 条件（上段）では、周波数に関わらず 80-90 度付近（灰色）の位相差であったのに対し、mobile 条件（下段）では変化の幅が大きくなり、振り子に対して同側と対側で変化のパターンが異なることが確認できる。具体的には、振り子に対して同側（例：右振り子に対して右手首）では、45-130 度（薄鈍色から墨色）、対側（例：右振り子に対して左手首）では、130-45 度（墨色から薄鈍色）に変化した。

次に、振り子に対する肩との位相差について、immobile 条件では、低速条件の時には 0 度付近の位相差となったが、周波数の増大に伴って、振り子に対して近位の部位の位相差と近似した位相差を示した。mobile 条件では、振り子に対して同側と対側とで異なるパターンが確認された。具体的には、周波数の増加に伴い、同側では 130 度付近（墨色）、対側では 45 度付近（薄鈍色）に変化した。

振り子に対する頭部と C7 との位相差については、結果を適切に解釈するために例外的に運動類似度（相互相関）に言及する。当該部位は、振り子との相関が著しく低い（線が細い）ことが確認できることから、他部位と比較して周期性が低かったことが推察される。そのため、当該部位に関しては、他部位の位相差と同等に扱うことはできないことに留意しなければならない。

3.2 課題達成度

Harrison-Kanji test の結果、同位相モードについて、phase shift の絶対値は、Mobility・Frequency 要因ともに主効果が有意であった（Mobility: $F(1, 204) = 4.527, p = 0.035$; Frequency: $F(5, 204) = 2.527, p = 0.03$ ）。多重比較の結果、mobility 要因では、immobile 条件の方が mobile 条件よりも逸脱度が大きいことが示され、Frequency 要因ではいずれの組み合わせも有意でなかった（adjusted $p < .05$ ）。また、SD ϕ についても、Mobility・Frequency 要因ともに主効果が有意であった（Mobility: $F(1, 204) = 9.586, p = 0.002$; Frequency: $F(5, 204) = 13.227, p < .001$ ）。多重比較の結果、mobility 要因では、immobile 条件の方が mobile 条件よりも SD ϕ が大きいことが示され、Frequency 要因では低速条件の方が高速条件よりも SD ϕ が小さいことが示された（adjusted $p < .05$ ）。

逆位相モードについて、phase shift の絶対値は、Frequency 要因のみ主効果が有意となり（ $F(5, 204) = 3.912, p = 0.002$ ）、低速条件の方が高速条件よりも逸脱度が低いことが示された（adjusted $p < .05$ ）。SD ϕ についても同様に、Frequency 要因にのみ主効果が認められ、周波数の増大に伴って不安定性も増大することが示された。

4 考察

本研究では、これまで局所部位の関係性にのみ着目されてきた振り子協応課題を、姿勢の制御を含む大局的な協応課題と捉えなおし、分析してきた。本節ではまず、身体が解放されることによって何が起るのかについて、結果の統合的な解釈を踏まえ議論する。最後に、これからヒトの運動をより良い形で理解するための視座を展望する。

4.1 身体が解放されることによって何が起るのか

身体が解放された mobile 条件の特徴は、位相モードや課題周波数に応じた特有の構造が創発することであった。

同位相条件 (Fig.1, 下段) では、振り子から遠い部位 (肩や C7) の位相差は、周波数に関わらず一貫して 180 度付近に維持されながら、振り子に近い部位 (手首や肘) との位相差は周波数に応じて変化した。また、頭部との位相差は、低速 (1.5 Hz) では肩や C7 と同様に 180 度付近であったのに対し、高速 (2.5 Hz) では 0 度に近づいた。すなわち、高速条件では、体幹部 (肩や C7) と頭部が分節化した。同位相条件では、両手で把持した振り子を同時に動かすため、身体が解放されている場合には、身体の前後方向に生じる質量の偏りに対処する運動が必要となる。振り子から遠い部位との位相差が周波数に一貫して 180 度付近に保たれていたことは、こうした課題としての要請に、大局的な構造の形成によって対処した結果であると解釈できる。さらに、頭部の参与の仕方が変化していたことは、周波数の増大に伴う身体の剛性の増大に対処するためであったことが推察される (この点については Hamaoui et al., 2011 の研究が示唆的である)。

逆位相条件 (Fig.2, 下段) では、振り子に対して同側の部位と対側の部位で異なるパターンが観測された。具体的には、振り子に対して同側の部位では、周波数の増大に伴って、より逆位相に近づき、対側の部位では、より同位相に近づいた。これは、回旋運動の創発と解釈できる。逆位相では、左右の振り子を、肩幅分離れた位置で交互に動かすことにより、身体には体幹を軸とした回転力が働くことが推測される。また、この回転力は周波数の増大に伴って大きくなると考えられる。そのため、高速条件で姿勢を維持するためには、この回転力に対処する運動が必要となる。高速条件における回旋運動の創発は、こうした課題の性質と対応している可能性がある。

身体を解放すると、同位相・逆位相それぞれの課題の要求に応じた大局的な協応構造が創発することが示された。一方、同位相では immobile 条件の課題達成度が有意に低く、逆位相では mobility の両群に有意な差は認められなかった。これらのことを合わせて考えると、少なくとも同位相では、前腕を固定することで大局的な協応が阻害され、さらにそのことによって振り子協応課題の達成度が低くなったと考えられる。

同位相では、二つの振り子を同時に、同方向に身体から離したり、近づけたりするように動かすのに対して、逆位相では、二つの振り子を、身体を中心に逆方向へ動かすことが課題となっていた。同位相では、両手の振り子から同時に同方向への力が身体に加わるため、振り子からの力は、身体の質量中心を支持基底面から外すような前後方向の外乱として働いたと考えられる。同位相では、この外乱を補償するために創発する全身の協応構造が、課題達成に対して有利に働いた可能性がある。一方、逆位相では、振り子の逆方向の運動によって、身体を回旋させるような力が働く。上半身の回旋運動では、身体の質量中心が支持基底面を外れるように大きく動揺することはないと考えられ

る。そのため、身体の固定が、課題達成に影響を与えなかった可能性がある。

4.2 ヒトの運動のより良い理解に向けて

これまでの振り子協応課題は、他部位とのメカニカルな相互作用を抑制するため、前腕を固定した状態で実施されてきた。このような条件下では、課題周波数などが制御変数となって、左右振り子の秩序が二振動子モデルから予測できることが示されている (e.g., Haken et al., 1985)。本研究では、より実践的な身体運動を視野に入れ、身体を解放した状態で振り子協応課題を実施した。その結果、課題特定の協応構造の創発が観測され、局所の課題達成との関係も示唆された。

観測されたパターンのうち、最も示唆的であったのは、振り子に対する体幹部 (肩や C7) や頭部の大局的な構造が、局所の状態 (i.e., 左右振り子の位相モード) に依存して変化したことである。見方を変えれば、身体を解放した場合には、局所では二振動子モデルの法則が保たれつつも、大局的な構造は課題特定的に変化する、と言える。また、こうした大局的な構造の形成が課題達成に影響を与える可能性も示唆された。これらを踏まえると、従来の二振動子モデルを、大局的な構造から捉えなおす意義は十分にあり。近年、従来の二振動子モデルのスケールを超えるための試みが、理論的・実証的に展開されている (Beek et al., 2002)。こうした流れの中で、環境との相互作用を経て課題特定的に創発する大局的な構造と、局所の課題達成の対応関係を特定することで、ヒトの運動がより良い形で理解されるはずである。

引用文献

- Bardy, B. G., Oullier, O., Bootsma, R. J., & Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 499–514. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.3.499>
- Beek, P. J., Peper, C. E., & Daffertshofer, A. (2002). Modeling Rhythmic Interlimb Coordination: Beyond the Haken–Kelso–Bunz Model. *Brain and Cognition*, 48(1), 149–165. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1310>
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347–356. <https://doi.org/10.1007/BF00336922>
- Hamaoui, A., Friant, Y., & Le Bozec, S. (2011). Does increased muscular tension along the torso impair postural equilibrium in a standing posture? *Gait & Posture*, 34(4), 457–461. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.06.017>
- Harrison, D., & Kanji, G. K. (1988). The development of analysis of variance for circular data. *Journal of Applied Statistics*, 15(2), 197–223. <https://doi.org/10.1080/02664768800000026>