

協調タッピング運動の組織化と安定性に関与する知覚の働き The role of perception in the organization and the stability of finger tapping movement

児玉 謙太郎[†], 古山 宣洋^{‡†¶}
Kentaro Kodama, Nobuhiro Furuyama

[†]総合研究大学院大学, [‡]国立情報学研究所, [¶]東京工業大学大学院
The Graduate University for Advanced Studies
kodamakentaro@nii.ac.jp

Abstract

In this study, we conducted finger tapping experiment to reveal the role of perception in the organization and the stability of inter-limb coordination. Participants were required to synchronize their tapping movements with metronome sounds in in-phase mode or anti-phase mode. In our experiment, we investigated three factors, intra-/inter- personal, the number of fingers, and phase mode. As result it was revealed that perceptual information such as visual, auditory, and haptic information might effect on the stability of finger tapping movement, it also revealed that if the number of fingers change, the distribution pattern of mean frequency of phase transition might also differ between intra-personal condition and inter-personal condition, because the role of perception change with the number of fingers.

Keywords — Finger Tapping, Perception-Action System, Dynamical Systems Approach

1. はじめに

本研究では、体肢間協調運動の組織化と安定性に関与する知覚の働きを検討するため、個人内および個人間で、左右の手の指1本ずつ(2本指条件)、または2本ずつ(4本指条件)を用いたタッピング運動を、2つのパターン(同位相、逆位相)で同期させることを課題とした実験を実施した。

一般に、体肢間協調運動に関しては、指や脚、振り子を宙で振る運動などで、体肢間の相対位相が0度(同位相)、および180度(逆位相)の運動パターンで運動が安定することが知られている(例えば[1])。また、運動の周波数が増加すると、いずれのパターンでも運動の安定性が低下する一方、逆位相から同位相へのみ運動パターンが変化する相転移現象が、個人内のみならず個人間でも観察されてきた[2]。相転移は行為者の意図に反し

て起こるため、中枢指令型の運動制御モデルでは説明できないとされ、自己組織化の原理を適用した力学系モデルによるアプローチ(Dynamical Systems Approach: DSA)が試みられてきた(例えば[3])。さらに、機械的(触覚的)・神経的な結合が存在しない個人間でも相転移が生じるという事実は、運動の自己組織化が視覚情報だけでつなごうとした緩やかな結合によっても起こることを示唆している。

また、体肢間協調運動に関する研究にはタッピング運動を課題にするものもあり、運動に用いる指の本数として、左右の人差し指2本を用いる2本指条件と、左右の人差し指・中指の4本を用いる4本指条件とがある。4本指個人内タッピング課題について、人差し指(I)同士、中指(M)同士を交互に同期させる、左右対称の運動パターンを同位相(I・I), (M・M)…, 非対称のパターンを逆位相(M・I), (I・M)…とし、運動の周波数を増加させていくと、逆位相から同位相への相転移が生じることが知られている[4]。相転移をもたらす要因については、逆位相パターンでは2つの意味で対称性が保たれていないため、高周波数で運動が不安定となり相転移に至ると説明されてきた([3][4]など)。すなわち、同位相パターンでは、左右の手の相同の筋群が同時に活性化するという神経解剖学的な意味での対称性が保たれている[1]。また、運動する指の見えが空間的・知覚的に左右対称という意味でも対称性が保たれている[4]。逆位相パターンではこれら2つの意味で非対称であるため相転移が起こるとされた。タッピング運動に関して、2本指条件については、個人内

または個人間で、4本指条件については個人内で検討した先行研究はあるものの、筆者らが調べた限り、個人内と個人間との間で運動の安定性を比較検討した研究は存在しない。本研究で個人内条件のみならず個人間条件についても検討する理由は、個人間では協調する体肢間に機械的（触覚的）・神経的な結合は存在せず、知覚情報だけで緩やかにつながった結合しか存在しないため、個人内と個人間の両条件を比較することで運動に関与する知覚の働きを検討できると考えたからである。

2. 実験

目的

本研究では、協調タッピング運動を課題とし、個人内／個人間、指の本数、位相パターンの3つの要因を検討した。知覚的要因という観点では、個人内では運動する体肢同士に機械的（触覚的）・神経的な結合が存在するのに対し、個人間ではそれらの結合は存在せず、相手の体肢を互いに見るという視覚的な結合しか存在しないため、両条件を比較することで体肢間協調運動に関与する視覚の働きを検討できる。また、指の本数が異なれば、運動によって生じる運動感覚という意味での触覚情報や、タップ時に得られる机表面との接触という意味での触覚情報の在り方が異なるため触覚的要因の影響が検討される。さらに、位相パターンについても、同位相か逆位相かで運動に関与する神経系、知覚系の影響が変わってくる。以上の理由から、本実験では、個人内／個人間、指の本数、位相パターンの3つの要因を検討した。

実験参加者

参加者は、20歳から47歳までの健常な男性15名、女性15名、計30名であり、いずれも右利きであった（個人内条件では男女5名ずつ計10名、個人間条件では男女10名ずつ計20名が同性2名で1組となり、男女ペア5組ずつ計10組が参加した）。

実験装置・刺激

図1に実験状況の概略を示す。メトロノーム音

には、一音の長さが約85msのビープ音が用いられた。音量は、実験の始まる前に参加者ごとに不快でない大きさに設定された。メトロノームは、参加者それぞれに対し、PC(MacBook2130/13.3; Apple)で再生され、ヘッドホン(MDR-NC600D; Sony)を通して提示された。指の運動は、ビデオカメラ(TK-C1380; Victor)で撮影され、HDD(HVR-DR-60; Sony)に記録され、メトロノームの音声と映像はビデオカメラ(DSR-PDX 10; Sony)を経由して同期された。

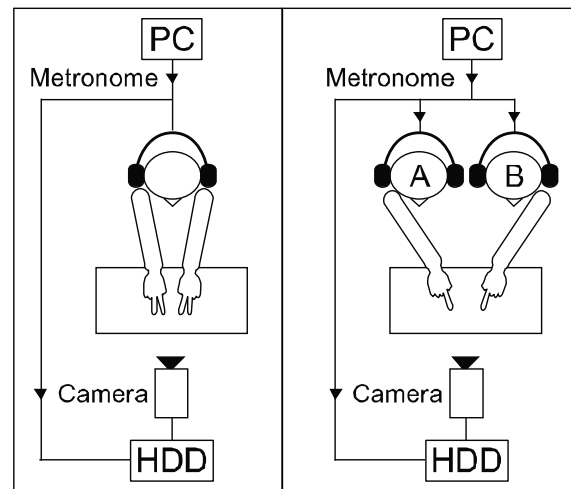


図1 実験状況（左：個人内、右：個人間）

実験計画・手続き

実験計画は、2 {個人内／個人間（個人内、個人間）} × 2 {指の本数（2本指、4本指）} × 2 {位相パターン（同位相、逆位相）} の3要因混合計画であった。指の本数については、両手の人差し指1本ずつ計2本を用いる2本指条件と、両手の人差し指・中指の2本ずつ計4本を用いる4本指条件の2水準が検討された。位相パターンについては、2本指条件では、人差し指同士が同期する同位相パターンと、それらが交互にタップする逆位相パターンの2水準、4本指条件では、人差し指(I)同士、中指(M)同士が同期する同位相パターン(I・I)、(M・M)…と、左手の中指と右手の人差し指、左手の人差し指と右手の中指が同期する逆位相パターン(M・I)、(I・M)…の2水準が検討された（図2）。

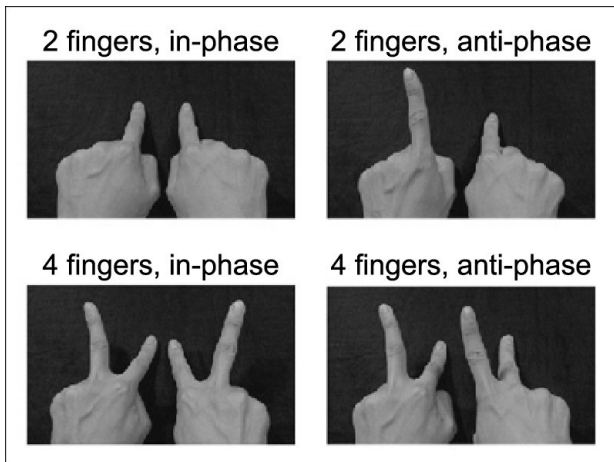


図2 実験条件(左上:2本指同位相, 右上:2本指逆位相, 左下:4本指同位相, 右下:4本指逆位相)

課題は、1 Hz から 3Hz まで 30 秒間かけて、テンポが加速するメトロノーム音に、個人内条件では被験者は自身の左右の手で、個人間条件では被験者 2 名が並んで着座し各自外側の手で、同期してタッピングを行うことである。ただし、いずれの位相パターンにおいても、メトロノームと運動の周期が一致するよう求められた。また、課題を行う際、被験者は指の動きを注視するよう求められた。個人内条件、個人間条件いずれの条件においても、指の本数 (2) × 位相パターン (2) の 4 条件をランダム化したものを 1 ブロックとし、4 回ずつ繰り返し計 16 試行ずつ行われた。

3. 結果

本研究では、タッピング運動の安定性を評価する指標として、相転移の生起回数と相転移に至るまでの時間(Time to Transition)を求め、それぞれ条件ごとに平均値を求め、3 要因の分散分析を行った。先行研究[4]では、指同士が 70ms 以内の時間間隔でタップした場合を同期とみなしているが、本研究では、ビデオカメラで記録したデータを、動画解析ソフト (Frame-DIAS II; DKH) を用い毎秒 60 フィールドでコマ送り再生し視認でタッピング運動の分析を行ったため、4 フィールド分である約 67ms 以内の時間間隔でのタップを同期とみなし、同期タップが 5 回以上、すなわち 4 サイクル以上続いた場

合を相転移とみなした。

3.1. 相転移の生起回数

さらに、試行ごとに相転移の有無を判定し、参加者 (参加者ペア) ごとに相転移の生起回数を求めた。図 3 は、横軸を実験条件 (左から、個人内 2 本指同位相、個人内 2 本指逆位相、個人内 4 本指同位相、個人内 4 本指逆位相、個人間 2 本指同位相、個人間 2 本指逆位相、個人間 4 本指同位相、個人間 4 本指逆位相)、縦軸を相転移の生起回数として条件ごとに比較したものである。2 (個人内/個人間) × 2 (指の本数) × 2 (位相パターン) の 3 要因分散分析を行った結果、指の本数と位相パターンについての主効果が認められ (それぞれ $F(1,9)=43.886, p<.001$, $F(1,9)=113.558, p<.001$)、個人内/個人間と指の本数の間、指の本数と位相パターンの間、および、個人内/個人間と指の本数と位相パターンの間の交互作用が有意であった (それぞれ $F(1,9)=90.686, p<.001$, $F(1,9)=45.474, p<.001$, $F(1,9)=230.211, p<.001$)。以下に、下位検定を行った結果を記す。

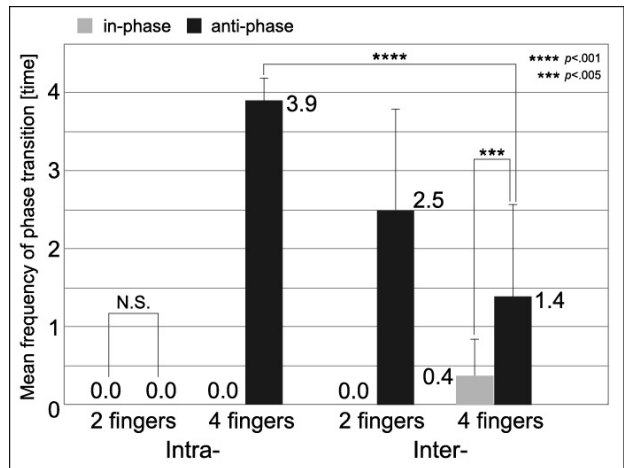


図3 各条件の相転移の生起回数[回]

個人内条件について

個人内については、2 本指条件では、同位相、逆位相ともに相転移の生起回数は 0 回であり、相転移の生起回数に有意差は認められなかった ($F(1,9)=0, N.S.$)。一方、4 本指条件では、同位相で 0 回であったのに対し、逆位相で平均 3.9 回の相転移が観察され、逆位相のほうが同位相より有

意に生起回数が多かった ($F(1,9)=199.839$, $p < .001$).

個人間条件について

個人間については、2本指条件では、同位相で0回であったのに対し、逆位相では平均2.5回の相転移が観察され、逆位相のほうが同位相より有意に相転移の生起回数が多かった ($F(1,9)=82.117$, $p < .001$). 一方、4本指条件では、同位相で平均0.4回、逆位相で平均1.4回の相転移が観察され、逆位相のほうが同位相より有意に相転移の生起回数が多かった ($F(1,9)=13.139$, $p < .001$).

3.2. 相転移に至るまでの時間

また、先行研究[5]と同様に、相転移に至るまでの時間を求めた。相転移が生起しなかった試行については1試行に要する時間である30秒とし、相転移が生起した試行については、試行開始時刻と相転移に至る最初の同期タップの時刻から求め、条件ごとに平均し、分散分析を行った。図4は、横軸を実験条件、縦軸を相転移に至るまでの時間として、条件ごとに比較したものである。

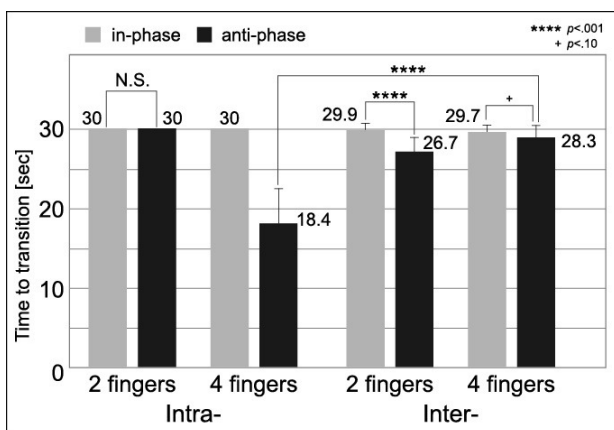


図4 各条件の相転移に至るまでの時間 [秒]

2 (個人内/個人間) × 2 (指の本数) × 2 (位相パターン) の3要因分散分析を行った結果、個人内/個人間、指の本数および位相パターンについての主効果が認められ(それぞれ $F(1,9)=10.049$, $p < .01$, $F(1,9)=39.959$, $p < .001$, $F(1,9)=75.599$, $p < .001$), 個人内/個人間と指の本数の間、個人内/個人間と位相パターンの間、指の本数と位相パ

ターンの間、および、個人内/個人間と指の本数と位相パターンの間の交互作用が有意であった(それぞれ $F(1,9)=66.250$, $p < .001$, $F(1,9)=13.712$, $p < .005$, $F(1,9)=36.774$, $p < .001$, $F(1,9)=66.119$, $p < .001$). 以下に、下位検定を行った結果を記す。

個人内条件について

個人内については、2本指条件では、同位相、逆位相ともに相転移に至るまでの時間は30秒であり、有意差は認められなかった ($F(1,9)=0$, N.S.). 一方、4本指条件では、同位相では30秒であったのに対し、逆位相では平均18.4秒と短く、逆位相のほうが同位相より有意に相転移に至るまでの時間が短かった ($F(1,9)=174.391$, $p < .001$).

個人間条件について

個人間については、2本指条件では、同位相で平均29.9秒であったのに対し、逆位相では平均26.7秒であり、逆位相のほうが同位相より有意に相転移に至るまでの時間が短かった ($F(1,9)=13.105$, $p < .001$). 一方、4本指条件では、同位相で平均29.7秒、逆位相で平均28.3秒であり、逆位相と同位相の間に有意傾向が認められた ($F(1,9)=2.880$, $p < .10$).

4. 考察

個人内条件について

まず個人内条件の結果について考察する。実験の結果、2本指条件について、相転移の生起回数と相転移に至るまでの時間のいずれの分析指標においても、同位相と逆位相の間で有意な差が認められなかった。この結果は、HKBモデル[6]から予測された結果とは一致せず、これまで、個人内・個人間の別を問わず、体肢間協調に関する研究で報告されてきた事実、すなわち同位相のほうが逆位相よりも運動の安定性が高く、運動の周波数がある臨界値を越えて増加すると逆位相から同位相へのみ相転移が生じるという事実[2]とは異なる。この結果について、知覚的要因という観点から考察する。先行研究[1]で行われた実験課題が、指を宙で水平方向に振る運動であったのに対し、本研

究で実施したタッピング課題では、タップ時に机に指先が接触するという意味で、触覚情報が得られる課題となっていた。そのため、不安定と予測された個人内2本指逆位相条件においても、触覚情報が得られたことによって運動が安定化したのではないかと考察される。

一方、4本指条件については、相転移の生起回数と相転移に至るまでの時間のいずれの分析指標からも、同位相のほうが逆位相より運動の安定性が高いことが示された。この結果は、これまでの個人内4本指タッピング運動に関する研究の報告結果[4]と一致する。

個人間条件について

次に個人間条件について考察する。2本指条件では、相転移の生起回数と相転移に至るまでの時間のいずれの分析指標においても、同位相のほうが逆位相より運動の安定性が高く、先行研究の報告結果[2]と一致する。また、個人間逆位相条件で2本指条件と4本指条件を比較すると、4本指条件のほうが2本指条件より運動が安定していたことが明らかとなった。この結果をもたらした聴覚的要因として、2本指条件では、いずれか一方の参加者が常に裏拍(メトロノーム音とビートの間)でタップしなければならなかったことが考えられる。4本指条件では、人差し指か中指のいずれかがメトロノームと常に同期しているため、運動が比較的安定化した可能性が考えられる。

個人内条件と個人間条件の比較

さらに、個人内と個人間を比較すると、2本指逆位相条件について、相転移の生起回数と相転移に至るまでの時間のいずれの分析指標においても、個人間のほうが個人内より運動の安定性が低かったことは、先行研究の報告結果[2]と一致する。一方、4本指逆位相条件について、個人内について、個人間のほうが個人内より運動の安定性が高かったことは、先行研究の報告[2]から予測される結果と一致しない。この結果について、指の本数(振動子の数)が異なると、運動に関与する神経系と知覚系の働きが異なってくる可能性が考えられる。

すなわち、2本指条件については、個人内システムでは、神経的結合および触覚的要因により、逆位相でも運動が安定するが、個人間システムでは、神経的結合が存在せず、相手の指の動きに視覚的に引き込まれる、あるいはメトロノーム音に聴覚的に引き込まれることによって、運動が不安定化した可能性がある。一方、4本指条件については、個人内システムでは、神経的結合が強いため逆位相で運動が不安定化するが、個人間システムでは、腕同士の神経的な結合が存在せず、また、指の動きの見えという視覚的要因より、中指を動かすことによって得られる運動感覚などの触覚的要因が前景化し、逆位相でも運動が安定化した可能性が考えられる。しかし、これらの要因のほか、個人内と個人間とでは、片手であるか両手であるかという要因なども存在するため、今後これらの要因についても検討できればと考えている。

また、データの分析についても、相転移の生起回数や相転移に至るまでの時間だけでなく、指同士の相対位相の標準偏差の時間的な変動や、運動データの時系列解析など、多角的に運動の安定性と知覚と運動の関係を明らかにしていく必要がある(これらの分析結果は他の論文で発表予定)。

臨界周波数と固有周波数

一般に、ヒトの指の固有周波数は4 Hz程度とされている[7]。本研究では、タッピング運動のテンポを、メトロノーム音に合わせるよう教示することによって統制した。その際、メトロノームのテンポは1~3 Hzに設定されていたため、相転移が生起した臨界周波数は、いずれも指の固有周波数以下であるが、相転移に至るまでの時間から求められる臨界周波数は、個人内4本指逆位相条件で平均2.0 Hz、個人間条件でも、平均2.9 Hz程度である。よって、とくに個人間では神経系の結合がないため、メトロノームの音(聴覚情報)や、相手の指の動きを見ること(視覚情報)によって運動の安定性が低下したと考えられる。また、運動の周波数を固有周波数以上まで高くした場合、本研究で安定とされた条件でも、運動が不安定化するかなどについては、今後検討していきたい。

5. まとめ

本研究では、体肢間協調運動の組織化と安定性に関与する知覚の働きを検討するため、協調タッピング実験を行った。その結果、メトロノームという聴覚情報、他者の身体運動の見えという視覚情報、および自身の運動によって生じる触覚情報などの知覚情報の働きが振動子の数の違いによって異なり、さらに、それら知覚的要因が運動の組織化と安定性に及ぼす影響が、個人内システムと個人間システムとで異なってくる可能性が示唆された。しかし、本研究で得られた結果だけでは、具体的にどのような知覚情報が運動の組織化と安定性に影響を与えるのか特定されない。そのため、今後、本研究で示唆された知覚的要因を整理、分離し、より具体的な知覚情報を特定していく必要がある。

参考文献

- [1] Kelso, J. A. S., (1984) "Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination", *American Journal of Physiology - Regulatory*. 15, R1000-R1004.
- [2] Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A. and Amazeen, P. G., (1988) "A comparison of intra-and interpersonal interlimb coordination: Coordination breakdowns and coupling strength", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 24, No. 3, pp. 884-900.
- [3] Kelso, J. A. S., (1995) "Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior", MIT Press.
- [4] Mechsner, F., Kerzel, D., Knoblich, G. & Prinz, W., (2001) "Perceptual basis of bimanual coordination", *Nature*, Vol. 414, pp. 69-73.
- [5] Riek, S. and Woolley, D., (2005) "Hierarchical organisation of neuro-anatomical constraints in interlimb coordination", *Human Movement Science*, Vol. 24, Issues 5-6, pp. 798-814.
- [6] 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.
- [7] Repp, B., (2005) "Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature", *Psychonomic Bulletin & Review*, 12 (6), pp.969-992.