

身体環境協調における「ずれ」： 巧みな「もしかめ」における安定した協調パターン Lag Structure in Playing KENDAMA Changes with Tempo: Task-Specific Coordination Patterns in the Dexterous "Moshimake" Trick

伊藤 万利子[†], 三嶋 博之[‡]
Mariko Ito, Hiroyuki Mishima

[†]札幌学院大学心理学部, [‡]早稲田大学人間科学学術院
Sapporo Gakuin University, Waseda University
itomarik@sgu.ac.jp

概要

けん玉の「もしかめ」では、自然な状態では、運動協調の研究において安定した協調パターンと言われる同位相だけではなく、同位相から少し「ずれ」のある協調パターンもみられる。本研究では、運動のテンポを制約するパラダイムを用いて、「もしかめ」において安定した協調パターンを調べた。けん玉熟練者を対象とする実験を行った結果、「もしかめ」の大皿の接触のときには、運動のテンポにかかわらず「ずれ」のある協調パターンが維持された。一方で、中皿の接触のときには、運動のテンポが増すと身体運動が変動的になり、大皿での接触時とは異なる協調パターンが選択されることが明らかになった。

キーワード：巧緻性、ずれの調整、相転移、けん玉

1. はじめに

身体の四肢間、あるいは身体と外部の環境（もの、他者、出来事）を協調させることは、多くの日常行動、スポーツ、わざなどで必要とされるスキルである。このようなスキルは力学系アプローチの運動協調研究で検討されてきた。力学系アプローチの運動協調研究では、身体内、あるいは身体と環境間の協調の状態を、相転移パラダイムを用いて調べてきた。相転移パラダイムとは、検討対象とする運動（通常、周期的な運動）のテンポを増加させて、あまり安定しない協調パターンから、安定した協調パターンへ移行させることにより、その運動で選択される安定した協調パターンが何かを探るものである。このパラダイムにおいて、協調パターンは、ある運動と別の運動の位相差で調べられる。例えば歩行において、脚を一番後ろに引いた状態を0度、脚を一番前に出した状態を180度とするとき、右脚が一番後ろに引いた状態にあって、左脚が一番前に出した状態にあれば、位相差は180度である[1]。これまでの研究から、様々な運動タスクにおいて、安定した協調パターンは同位相であることが明らかになっている。一方で、学習によって、不安定な協調パター

ンだったものがより安定した協調パターンになることも示されている[2]。

力学系アプローチの運動協調研究は、当初は、個人の左右の人差し指の協調パターンを調べるなどの個人の身体の部分を対象とする研究であったが[3][4]、他者との協調[5]、全身の協調[2][6][7][8]が検討されるようになった。これまでの力学系アプローチの運動協調研究では、運動の分析だけではなく、HKBモデルやその拡張版 [9]など、運動のモデル化も行われてきたためか、比較的解析しやすい実験的なタスクが検討されてきた。近年では、より複雑な運動タスクが検討対象となっているが、実世界でも観察されるような自然なタスクの事例をさらに積み重ねる余地があると考えられる。そこで本研究では、力学系アプローチの運動協調研究で検討されてきた多くのタスクよりも巧緻性が要求され、かつ、運動のテンポを制約しない状態では複数の協調パターンが観察される身体環境協調タスクにおいて、安定した協調パターンは何かを調べることにした。

本研究では、実験課題をけん玉の「もしかめ」という技とした。「もしかめ」は、玉と大皿、玉と中皿（図1）の接触が交互に繰り返される技である。接触が繰り返される時、玉とけんを手にもつ全身は、上下方向に周期的に運動しており、膝が屈曲状態にあるときに玉と皿との接触が生じている。

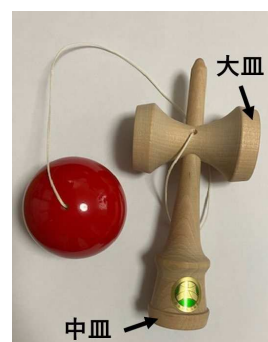


図1 けん玉

自然な（自分で運動のテンポを決められる）状態で「もしかめ」を行う場合、観察レベルでは、玉と皿の接触イベントに対する玉・身体運動という観点から、以下の2つの協調パターンがあるように見える。

- 「ずれ」ありパターン：接触イベントが生じた後に玉と身体運動が極小値をとるといふもの。この協調パターンでは、行為者は下方方向に動きつつ接触時の衝撃を吸収しながら玉を皿にのせているように見える。
- 「ずれ」なしパターン：接触イベントと玉の運動と身体運動の極小値にずれがないもの。この協調パターンでは、玉を弾くような「もしかめ」に見える。

前述のとおり、力学系アプローチの運動協調研究において、安定した運動協調パターンは同位相であることが明らかにされている。しかしながら、もしかめの場合、運動のテンポを制約しない自然な状態では、同位相パターンだけではなく、同位相ではないパターンも観察されるのである。それでは、「もしかめ」の安定した協調パターンとは、この2つのうちのどちらかなのだろうか。あるいは別の協調パターンなのだろうか。本研究では、相転移パラダイムのように運動のテンポを変化させることによって、「もしかめ」における安定した協調パターンを調べた。

2. 方法

実験参加者. けん玉熟練者1名を対象とした。この熟練者は、日本けん玉協会により認定される段位において5段であった。なお、実力レベルでの最高段位は6段である。実験参加者は左利きの男性で、視力や聴覚や運動機能に問題はなかった。インフォームドコンセントにより実験への参加に同意を得た。

装置. 実験では、motion capture system (Optitrack, NaturalPoint, Inc.)を用いて、100Hzで玉の運動と身体運動を計測した。接触が生じたタイミングを計測するために、加速度計(WAA006, ATRpromotion社)を利き手(左手)の甲にとりつけて250Hzで計測をした。「もしかめ」のテンポを制約するため、matlabを用いてメトロノーム音の呈示を行った。

手続き. 実験では、けん玉熟練者に複数の運動のテンポ (beats per minute: bpm) で70秒間「もしかめ」をしてもらった。運動のテンポの水準は、以下の7つのものがあつた；制約なし, bpm85 (1分間に85回のも

しかめ), bpm110 (1分間に110回), bpm135 (1分間に135回), bpm160 (1分間に160回), bpm185 (1分間に185回), bpm210 (1分間に210回)。制約なしの水準以外は、メトロノームの音に合わせて「もしかめ」を行った。「もしかめ」を行う際には、まず、制約なし, bpm85, bpm110, bpm135, bpm160, bpm185, bpm210の順で行い、その後、逆の順番で行った。したがって、各条件につき2回計測を行った。なお、けん玉の段位取得のためには1分間に135回以上の「もしかめ」をすることが必要である。

分析方法. けん玉熟練者には1試行につき70秒間「もしかめ」を行ってもらったが、開始直後はメトロノーム音のテンポに合わせているため、開始10秒から70秒までの1分間の時系列データを解析対象とした。また、試行の途中で「もしかめ」に失敗した場合には、失敗の前後1秒間の時系列を解析対象から除外した。

分析には、玉の上下方向の運動、手の上下方向の運動、膝の上下方向の運動(位置データあるいは角度データ)の時系列データを用いた。接触タイミングは、加速度計の波形から検出した。「もしかめ」における安定した協調パターンを明らかにするため、bpmが増加したときに玉と皿の接触イベントに対して玉・手・膝の運動が極小値をとるタイミングに「ずれ」があるのかを相対位相(位相差)を算出して調べた。相対位相は、時間的なずれを相対位相として扱うため、次のように算出した。まず、大皿あるいは中皿の接触タイミングと玉(あるいは手/膝)の極小値をとるタイミングを減算し、それを運動の1周期の時間で除算し、 360° を乗算した。運動の1周期の時間は、大皿と中皿の接触間のインターバルとした。相対位相が 0° であることは接触イベントと玉の運動あるいは身体運動に「ずれ」がないことを意味する。相対位相が負の値になっていることは、玉と大皿の接触あるいは玉と中皿の接触に引き続いて玉・手・膝の運動が極小値をとっていたことを意味する。

3. 結果

3.1 「もしかめ」の成否

けん玉熟練者は、2回目のbpm185の水準で試行中に3回失敗した。1回目のbpm210のときに4回失敗した。2回目のbpm210のときには6回失敗した。2回目の制約なしの水準では1度失敗した。それ以外の水準ではすべて「もしかめ」に成功した。

3.2 自然な状態での「もしかめ」

けん玉熟練者は、bpmの制約がない水準では、大皿のときも中皿のときも、「ずれ」がある協調パターンで「もしかめ」を行っていた。メトロノーム音による制約がない場合、けん玉熟練者の運動のテンポはほぼbpm135であった。

3.3 玉と皿の接触に対する玉・身体運動の「ずれ」

3.3.1 玉・身体運動の極小値と運動の変化

玉と皿の接触イベントに対して玉・手・膝の運動が極小値をとるタイミングに「ずれ」があるのかを調べるにあたり、玉・身体運動の極小値を検出した。大皿で玉との接触が生じるときには、各運動の極小値はすべて検出できた。しかし、中皿で接触が生じるときには、bpm85, bpm110, bpm135のときとbpm160の玉の運動では極小値が常に検出できたが、bpm160の手と膝の運動とbpm185, bpm210のときには検出できないことがあった。特に、bpm185, bpm210の手と膝の運動の極小値はほとんど検出できず、bpm210の膝の運動については、極小値の検出が1度もできなかった(表1)。

各運動の極小値の検出は、実験時の運動に依存する。実験時には、bpmの増加によって全身の上下運動に関わる膝の運動に顕著な変化がみられたため、ここで述べておく。膝の運動は、bpm85, bpm110, bpm135のときには毎回の接触時に屈曲していたが、bpm160, bpm185, bpm210のときには、玉と大皿との接触が生じるときに屈曲し、玉と中皿との接触が生じるときには伸展するようになった。玉の運動が2周期するあいだに膝の運動は1周期するようになるという変化がみられた。運動のテンポが速くなると、大皿で接触が生じるときに膝の運動は極小値をとるが、中皿で接触が生じるときに膝の運動は極大値をとるようになった。

表1 中皿で接触が生じるときの各運動の極小値の数と中皿で接触が生じた回数。各水準の2試行分のデータ。太字は接触回数より検出数が少ないことを示す。bpm185とbpm210は失敗部分を分析から外してある。

	bpm 85	bpm 110	bpm 135	bpm 160	bpm 185	bpm 210
玉の運動	84	110	134	160	103	104
手の運動	84	110	134	56	2	3
膝の運動	84	110	134	120	6	0
中皿での接触	84	110	134	160	172	168

3.3.2 玉と皿の接触×玉・手・膝の運動の相対位相

玉と皿の接触イベントに対する玉・手・膝の運動の相対位相を算出したところ、玉と大皿の接触が生じるときは、bpmが増加しても、接触に対する玉・手・膝の運動の相対位相は50°~60°付近に維持されていた(図2上)。

玉と中皿の接触が生じるとき、玉・手・膝の運動の極小値が検出される場合は、接触イベントに対する玉・手の運動の相対位相は、bpmの増加に伴い、0°に近づいていた。一方で、中皿での接触と膝の運動の相対位相は、bpmが増加しても0°に近づいていなかった(図2下)。

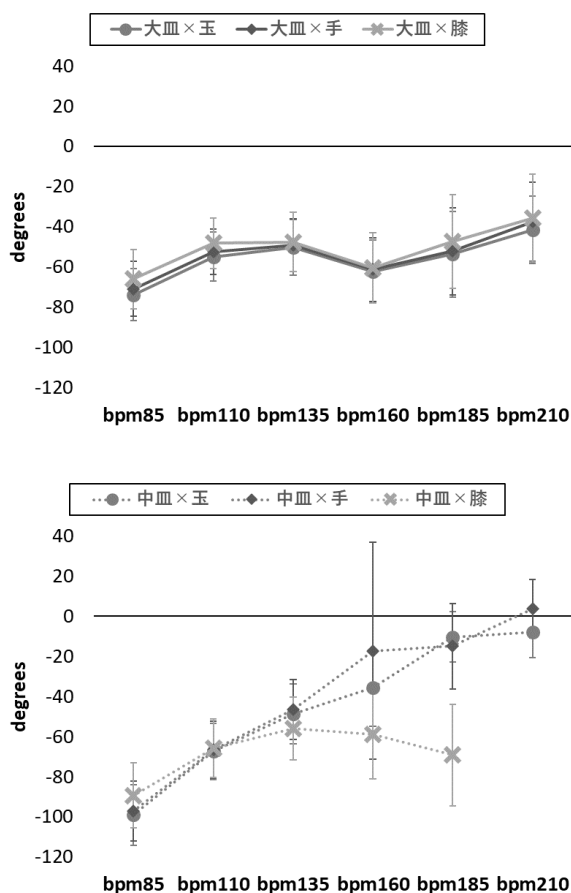


図2 玉と皿の接触に対する玉・手・膝の運動の相対位相。大皿での接触と各運動の相対位相は上側、中皿での接触と各運動の相対位相は下側。図の横軸は運動のテンポ (beats per minute), 縦軸は相対位相 (degrees), エラーバーは標準偏差を示す。bpm210の中皿での接触と膝の運動の相対位相は、膝の運動の極小値が一度も検出されなかったため、データが示されていない。

4. 考察

本研究では、自然な状態で同位相と同位相から少し「ずれ」のある協調パターンがみられるけん玉の「もしかめ」の運動を分析した。運動のテンポを増加させた場合に先行研究と同様に安定した協調パターンは同位相になるのか、「ずれ」のある位相になるのか、あるいは自然な状態では見られない別の協調パターンになるのかを調べた。

本実験に参加したけん玉熟練者の「もしかめ」は、自然な状態では大皿・中皿の接触時とともに、「ずれ」のある協調パターンで行われていた。実験で運動のテンポの制約を課すと、大皿の接触のときには、接触に対する玉・手・膝の運動の相対位相は 50° ～ 60° 付近に維持されており、運動のテンポに関わらず前述の「ずれ」ありパターンが維持された。一方で、中皿の接触のときには、テンポが増加すると、接触イベントに対する玉・手の運動の相対位相は 0° に近づいており、「ずれ」がなくなっていった。しかし、膝の運動については、運動のテンポが増加しても、「ずれ」は維持されていた。bpmの制約がない場合は、大皿で接触が生じるときも中皿で接触が生じるときも「ずれ」パターンが採用されていたが、運動のテンポの増加により、大皿での接触時と中皿での接触時では異なる協調パターンが選択されていた。実験に参加した熟練者の安定した（あるいは今回の課題に特定の）協調パターンは、大皿接触時は「ずれ」ありパターンであり、中皿では先に述べた「ずれ」ありパターンと「ずれ」なしパターンとは少し異なると考えられる。

中皿接触時には、運動のテンポが速くなると、接触に対する玉や手の運動の「ずれ」がなくなるだけでなく、膝の運動が屈曲ではなく伸展した状態になった。

「もしかめ」における協調パターンは、大皿のときにはbpmの増加による影響をあまり受けず安定的であったが、中皿のときにはbpmの増加の影響を受け、変動的であった。運動における一定のばらつきは、柔軟で適応的な方略にみられることが知られている[10]。中皿での変動的な運動が、「もしかめ」実行時の運動テンポの変化への対応になっており、けん玉熟練者の柔軟な（bpmが変化してタスクの難易度が増しても達成可能な）「もしかめ」において重要なものであったと考えられた。

今回の実験では、「もしかめ」における安定した協調パターンを調べた。今回の実験では、けん玉熟練者 1

名を対象としたものであるため、結果として示された協調パターンの選択は、今回の実験に参加したけん玉熟練者の方略であることは言えるが、別の熟練者で同じ結果が得られるとは限らない。また、力学系アプローチの運動協調研究では、同位相が安定的な協調パターンであり、同位相以外の（不安定な）パターンは学習によって安定的になるとされているが、「もしかめ」の場合はそもそも「ずれ」ありパターンが安定的であることも考えられる。しかしながら、これについても今回の実験から結論付けることは難しい。「もしかめ」における安定した協調パターンや「もしかめ」における「ずれ」の意義については、別のけん玉熟練者や異なるスキルレベルの実験参加者を対象とする実験を行うことによって今後検討することが必要だろう。

文献

- [1] 三嶋博之 (2000). エコロジカル・マインド 知性と環境をつなぐ心理学. NHK ブックス
- [2] Miura A, Kudo K, Ohtsuki T, Kanehisa H (2011). Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: a study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, 30, 1260-1271. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21802159>.
- [3] Kelso, J. A. S. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes. *Journal of Motor Behavior*, 13(4), 226-261. DOI: 10.1080/00222895.1981.10735251.
- [4] Kelso, J. A. S. (1984). Phase-transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Experimental Physiology*, 246(6), 1000-1004.
- [5] Schmidt, R. C., & Richardson, M. J. (2008). Dynamics of interpersonal coordination. In A. Fuchs & V. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, behavioral and social dynamics* (pp. 281-308). Heidelberg: Springer-Verlag.
- [6] Miura A, Kudo K, Nakazawa K (2013). Action – perception coordination dynamics of whole-body rhythmic movement in stance: A comparison study of street dancers and non-dancers. *Neuroscience Letter*, 544, 7-162. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2013.04.005>.
- [7] Miyata, K., & Kudo, K. (2014). Mutual Stabilization of Rhythmic Vocalization and Whole-Body Movement. *PLoS ONE* 9(12): e115495. doi:10.1371/journal.pone.0115495
- [8] Miyata, K., Varlet, M., Miura, Kudo, K., & Keller, P. E. (2017). Modulation of individual auditory-motor coordination dynamics through interpersonal visual coupling. *Scientific Reports*, 7, 16220. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16151-5>
- [9] Haken, H., Kelso, J. A. S. and Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347-356. DOI:10.1007/BF00336922.
- [10] Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2009). Movement variability and the use of nonlinear tools: principles to guide physical therapist practice. *Physical Therapy* 89, 267-282.