

# 身体接触下の共同行為における協調はどのように組織化されるのか — 力学的相互作用に基づく検討 —

## The Organization of Coordination in Physically Coupled Joint Action — A Force Interaction Approach —

松岡（初田）響子<sup>†</sup>, 清水 大地<sup>†</sup>

Kyoko Matsuoka-Hatsuda, Daichi Shimizu

<sup>†</sup> 神戸大学人間発達環境学研究科

Kobe University, Graduate School of Human Development and Environment

kyoko.htsd@gmail.com

### 概要

本研究は、身体接触による力学的結合を伴う共同行為における協調ダイナミクスを検討した。ラテンダンス熟達者 8 ペアを対象に、接触の有無を操作した条件下でルンバ動作を実施し、モーションキャプチャデータに C<sup>2</sup>RQA を適用した。その結果、協調構造は動作フェーズおよび身体部位に応じて変化し、リード／フォロー関係は協調の方向性に応じて先行する主体が異なる傾向を示した。以上より、身体接触下の協調は接点における力学的相互作用により組織化されることが示唆された。

キーワード：共同行為，個人間協調，力学的結合，交差再帰定量化解析（CRQA），ラテンダンス

### 1. 序論

ヒトの社会活動の多くは他者との共同行為が基盤となっている。共同行為（joint action）とは、複数の個体が相互に行動を調整しながら課題を遂行する過程を指し（Sebanz et al., 2006; Knoblich et al., 2011），その成立には他者の行動に対する継続的な適応が不可欠である。従来の研究では、視覚や聴覚といった知覚情報を介した協調が主に検討されてきた。例えば、視覚的観察による運動同期や（Schmidt et al., 1990; Richardson et al., 2007），リズム情報に基づく協調（Keller et al., 2014）などが報告されており、行動の時間的一致や同期が協調の主要な指標として扱われてきた。一方で、現実の共同行為には身体接触による力学的結合を伴う相互作用も多く存在する（例：手を繋ぎ歩く、抱っこする、二人三脚など）。このような状況では、協調は知覚情報だけでなく、接触を介して伝達される力学的情報にも依存する。実際、物体の共同操作や身体的補助に関する研究では、力のやり取りが運動の調整を支えることが示されている（Reed & Peshkin, 2008; Ganesh et al., 2014; Sawers & Ting, 2014）。しかし、これらの研究の多くは単純な課題に限定されており、全身運動を伴う複雑な相互作用における協調のダイナミクスは十分に明らかにされていない。

身体接触による力学的結合を伴う共同行為の重要な特徴は、個体間が与え合う力の関係によって相互作用

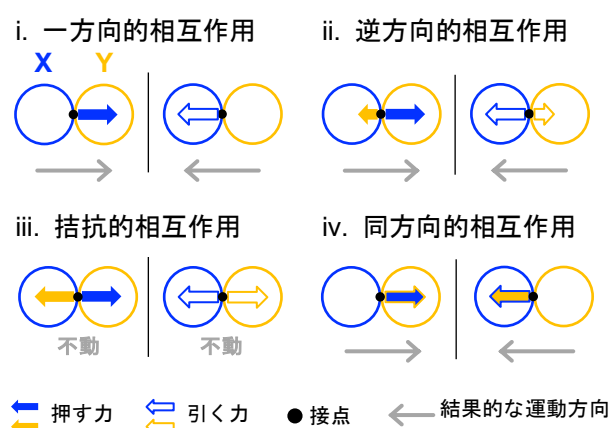


図1 力学的相互作用パターン概念図

註. XおよびYは相互作用する2者を表す。矢印（青：X，橙：Y）は接点において各個人が相手に対して生成する作用力を示し、灰色の矢印および文字は、相互作用の結果として生じる2者の移動方向を示す。本図ではXがより大きな力を加える場合のみを示しているが、Yがより大きな力を加える場合も対称的に成立する。

の構造が規定される点にある。具体的には、接触点における相手を押す力と引く力の組み合わせにより、様々な力学的関係が成立する。この力学的関係は4パターンに整理されると考えられる（図1）。整理にあたり、今回は相手に対して与えている力（作用）のみに焦点を当て、反作用については（実際には生じているが）議論に含めない。（i）一方向的相互作用：一方のみが力を加え、他方は受動的に加えられた力方向に動くパターン、（ii）逆方向的作用：互いに反対方向の力を加え、力の大きい方に動くパターン、（iii）拮抗的相互作用：同程度の力がかかるパターン（ほとんどの場合は運動が生じない）、（iv）同方向的相互作用：一方の押す力と他方の引く力が同方向に加わり動くパターン。ここで、これらの異なる力関係が同様の運動結果を生じ得、運動の観察のみから相互作用の構造を一意に推定することは困難であることに留意されたい。したがって、身体接触下の協調は、運動の同期ではなく、力の相互作用の組織化として再構造化して捉える必要がある。

さらに、協調の成立には他者の行動予測も重要な役

割を果たす。ヒトは相手の行動を予測しながら自身の行動を調整することが知られており (Sebanz & Knoblich, 2009; Keller, 2014), とりわけ身体接触による力学的結合を伴う相互作用では, 接点を通じて伝わる力が相手の運動に直接影響を及ぼし合うため, 力の方向や大きさに関する予測の誤差が運動に直結する。そのため, 接点における力の状態に関する予測可能性が協調の安定性により強く関与すると考えられる。

本研究では, 身体接触による力学的結合を伴う共同行為のモデルとしてラテンダンスに着目する。ラテンダンスは, 2 者間で接触を維持しながら全身運動を協調させる課題であり, 力のやり取りと運動調整が密接に結びついている。また, 同一課題での接触の有無を操作可能であるため, 力学的結合の影響を実験的に検討できる利点を持つ。以上を踏まえ, 本研究ではラテンダンス熟達者を対象に, 身体接触および協調経験の有無 (予測可能性) を操作し, 交差再帰定量化解析 (CRQA: Cross-Recurrence Quantification Analysis) (Marwan et al., 2007; Zbilut & Webber, 1998) を用いて協調ダイナミクスを分析する。これにより, 身体接触下の共同行為における協調がどのような力学的相互作用の構造に基づき組織化されるかを明らかにすることを目的とする。

## 2. 方法

**参加者** ラテンダンス熟達者 8 ペア (16 名) を対象に実験を行った。参加者は全員, 国内ダンス競技の A 級 (最上位級) 選手または指導資格保持者であり, 高度なダンススキルを有していた。平均年齢は  $35.88 \pm 9.17$  歳,

平均ダンス経験年数は  $12.94 \pm 6.90$  年であった。全参加者は実験前に同意書に署名し, 本研究は神戸大学倫理審査委員会の承認を得て実施された。

**機材** 動作計測には光学式モーションキャプチャシステム (OptiTrack) を用いた (サンプリング周波数 120Hz)。同時にビデオカメラ 3 台による録画も行った。

**課題** 接触部位の統制が比較的容易なルンバ種目を用い, 基本動作 (予備歩, Open Hip Twist, Hockey Stick) から構成される約 10 秒のダンスシークエンスを 100BPM のダンス用のリズム音源に合わせて実施した (図 2)。実験は「接触あり/接触なし」および相手との協調経験「既知/未知」を要因とする  $2 \times 2$  の被験者内デザインにより行い, 計 4 条件を設定した。「接触あり条件」では, 片手の接触 (男性の左手と女性の右手) を維持し, 「接触なし条件」では, 接触あり条件をできるだけ再現しつつも接触を避けるよう求めた。各条件は 5 試行ずつ実施した。なお紙面の都合上, 本稿では既知条件における接触の効果に焦点化して報告する。

**分析** 分析は, 上半身および両者の動作が対応する足 (男性の左足—女性の右足, その逆) を対象とした。上半身は頭部と上肢を除く上半身のマーカーの中心位置により定義し, 足はつま先と踵の midpoint とした。なお, ルンバでは 1 小節に 3 歩のステップを伴うため, 1 小節に 2 歩動作する「活動足」, 1 歩動作する「非活動足」に分類した。データの欠損点についてはスプライン補間し, 対象部位の速度時系列を算出した。動作は 1 小

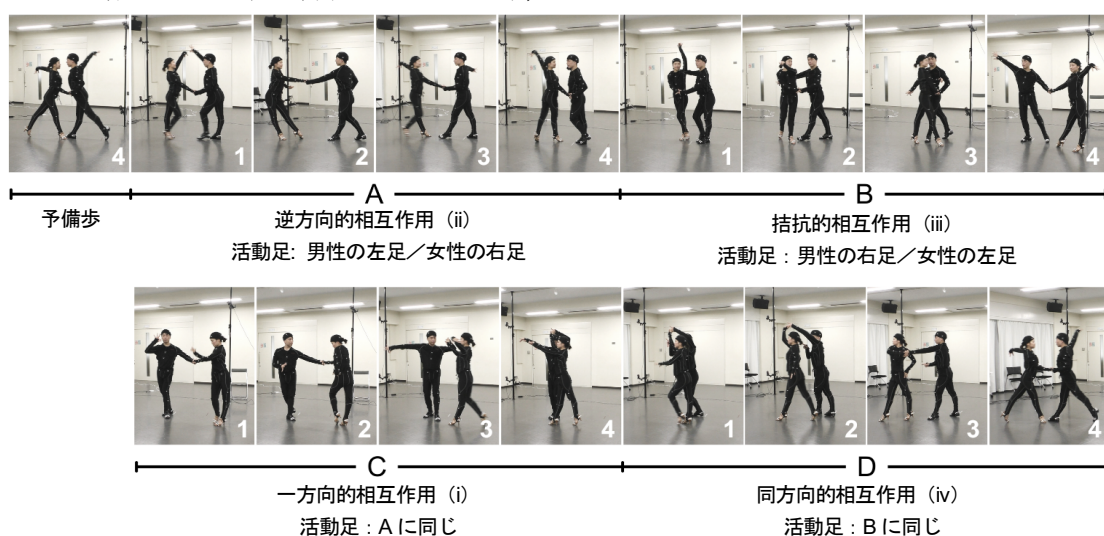


図 2 実験課題の連続写真と各フェーズの詳細

註. A-D のフェーズはルンバの各小節に対応し, 各区間は約 1 小節 (約 2.39 秒) である。各フェーズの下には, 接触条件において主に含まれる力学的相互作用パターンを示している (i-iv は図 1 に対応)。写真中の白字は音楽のカウントを表す。

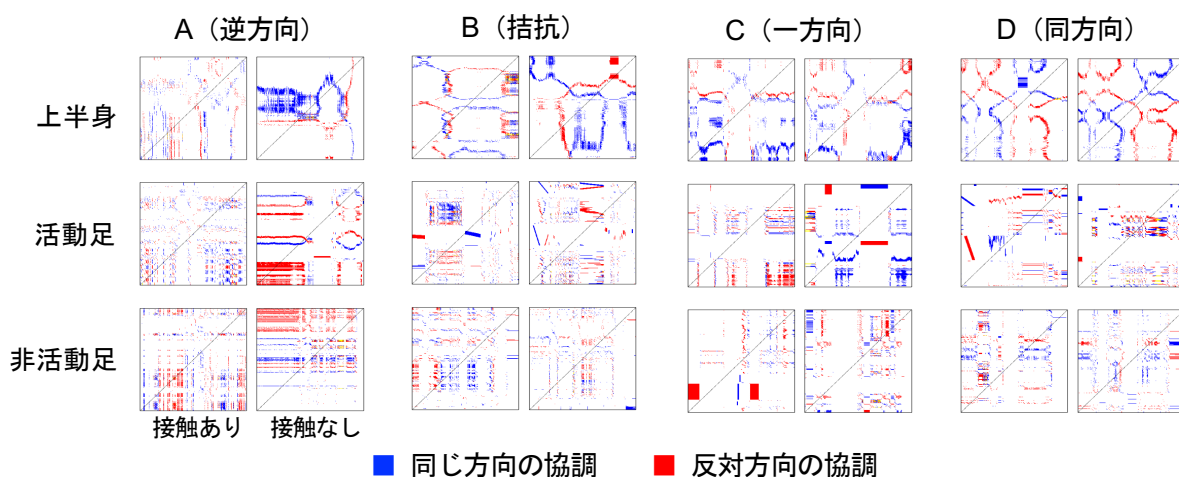


図3 各フェーズのC²RP

註. 各C²RPにおける対角線はパートナー間の同時性同期の基準を示す. 対角線の上側および下側における逸脱は, それぞれ男性主導および女性主導の時間的關係を反映する.

節ごとに4フェーズ(A-D)に分割した(図2). 各フェーズはそれぞれ異なる力学的相互作用を特徴とし, 図1の4パターンに対応する. これにより, 力学的相互作用パターンによる協調構造の違いを検討した.

個人間協調の定量化には各部位間の速度時系列を用いて, CRQAを発展させた拡張版CRQA(C²RQA)を適用し(Shimizu & Okada, 2025), 同方向および反対方向の協調パターンをそれぞれ分析した. 本分析は協調パターンの違いを捉えるために実施し, 反対方向の協調については女性の速度データの正負を反転することで定義した. これにより, 補完的な運動を含む協調構造の把握を可能とした. 加えて, リード/フォロワー関係の指標として, 再帰行列の対角線より上側(男性先行)と下側(女性先行)の領域の再帰率の差を算出した. C²RQAでは全データにおける最適パラメータを固定し(embed = 2, delay = 2, radius = 0.17), 再帰率(RR), 平均線長(L), エントロピー(ENTR)を算出した.

統計解析は各フェーズ・各身体部位について実施した. C²RQA指標はlogit変換後, 各CRQA指標を従属変数, 協調パターン(同方向/逆方向)と接触の有無を固定効果, 参加者および試行をネストしたランダム効果とする線形混合モデルにより分析した(lme4(Bates et al., 2015), lmerTest(Kuznetsova et al., 2017)). 解析にはR(version 4.5.2)を用いた.

### 3. 結果

#### 3.1 交差再帰パターンの視覚的観察

C²RPから, 協調パターンは動作フェーズおよび身体部位に応じて変化することが観察された(図3). 再帰構

造は全体として疎で断続的であり, 協調は常に持続するのではなく, 時間的に局所的に生起していた. また, 対角線周辺に非対称な分布が見られ, 完全な同期だけでなく短い時間遅れを伴う協調が存在することが示唆された. また, 対角線の上側と下側で再帰が非対称である様子が観察された.

#### 3.2 再帰構造の定量的評価

C²RQAの主要指標(RR, L, ENTR)について, 各フェーズ・身体部位において協調方向と接触の有無を固定効果とする線形混合モデルを構築した. 効果はフェーズA(逆方向相互作用)に集中し, 上半身・活動足で同じ方向の協調が反対方向より高い再帰率・時間構造を示した(RR 上半身:  $\beta = -1.00, p = .004$ /活動足:  $\beta = -1.50, p = .002$ , L 活動足:  $\beta = -2.56, p < .001$ , ENTR 上半身:  $\beta = -0.28, p < .001$ ). 同様の傾向はB・Dの一部でも認められた(B 上半身 RR:  $\beta = -1.72, p < .001$ ). 接触の効果は主に非活動足(支持側の足)に現れ, その符号はフェーズにより一様でなかった. すなわち協調方向は体幹・活動足に, 接触は支持側の足に効果を及ぼし, いずれも力学的相互作用に依存した.

リード/フォロワー関係では, RRの上下差分が0と異なるかを線形混合モデルで検討した. 同じ方向の協調では上半身で女性先行(A:  $p = .008$ , B:  $p = .002$ ), 逆方向では活動足で男性先行が認められた(A:  $p = .001$ ). 接触による先行方向の有意な効果は認められなかった.

### 4. 考察

本研究の結果は, 身体接触による力学的結合を伴う

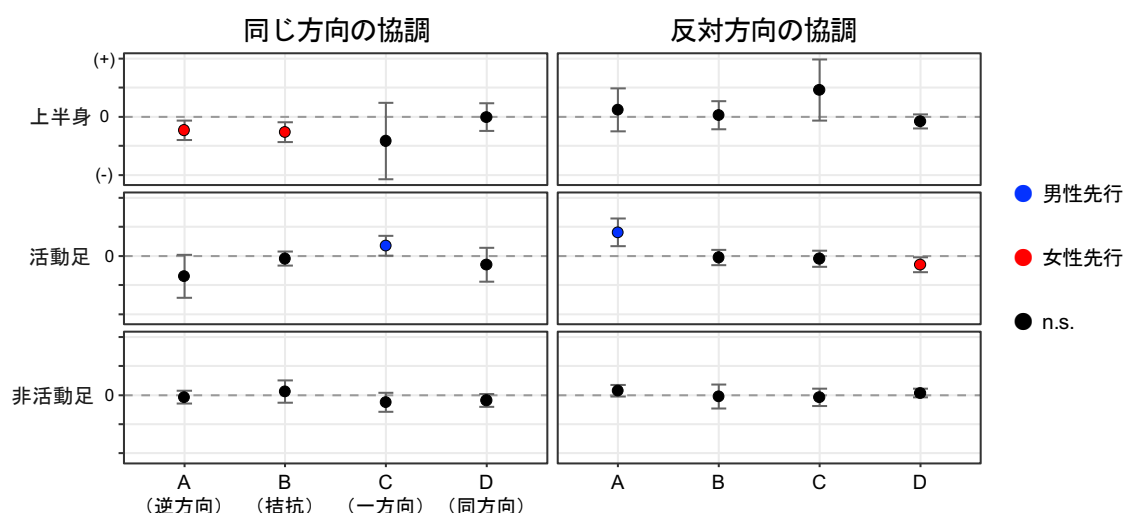


図4 協調方向別の先行主体

註. 縦軸はC<sup>2</sup>RPの対角線より上側（男性先行）と下側（女性先行）の再帰率（RR）の差を示し、正なら男性が、負なら女性がリードしていることを表す。プロットは推定値、エラーバーは95%信頼区間を示す。接触効果は認められなかったため両条件をまとめて推定した。

共同行為における協調のパターンが一樣ではなく、動作フェーズおよび身体部位に応じて異なる構造をとることを示している。協調方向の効果は逆方向的相互作用（A）に集中し、上半身および活動足において同じ方向の協調がより高い再帰率・時間構造を示した。また、上半身と足部で異なる協調パターンが見られたことから、身体部位ごとに異なる役割が存在する可能性が示唆される。特に上半身は接触点に近く力の伝達に直接関与するため、協調構造に強く反映されると考えられる。ただし本研究のフェーズ区分は各小節の代表的な力学的相互作用に基づくものであり、実際には4パターンがより短い時間スケールで連続的に推移していると考えられる。接触の効果は主として非活動足に現れ、その符号は動作フェーズにより一樣でなく、接触の影響が力学的文脈に依存することを示唆する。

加えて、リード／フォロワー関係は協調の方向性に応じて先行主体が異なる傾向を示した（図4）。同じ方向の協調では上半身で女性が、反対方向の協調では活動足で男性が先行した。熟達者においてリード／フォロワーは固定的な時間的先行ではなく、力学的文脈に応じて変化する相互調整として組織化されている可能性がある。ただし本分析は探索的であり、効果は限定的なため解釈には慎重を要する。

## 5. 結論

本研究は、身体接触による力学的結合を伴う共同行為における個人間協調が、単なる同期ではなく、個体間の

力の相互作用に応じて動的に成立することを示した。協調構造は動作フェーズおよび身体部位に応じて変化し、協調方向および接触の効果は動作フェーズに依存した。また、リード／フォロワー関係は協調の方向性に応じて先行主体が異なる傾向を示し、固定的な役割ではなく力学的文脈に応じた相互調整として形成される可能性が示された。ただし本研究では接触点の圧力を計測していないため、運動指標と力学的相互作用の直接的な対応づけには至っていない。圧力計測を含む力学的検証が今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2148 の支援を受けたものです。

## 主要参考文献

- Reed, K. B., & Peshkin, M. A. (2008). Physical collaboration of human-human and human-robot teams. *IEEE Transactions on Haptics*, 1(2), 108–120.
- Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5–6), 237–329.
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: What, when, and where. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 353–367.
- Shimizu, D., & Okada, T. (2025). Method for Quantification of the Process of Collaborative Creativity: Visualization of the Dynamics by C2RQA. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 47.