

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18033

研究課題名（和文）身体運動の協調における他者の行動予測に関する認知モデルの構築

研究課題名（英文）Establishing of cognitive model for anticipating others' behaviors in coordinated group behavior

研究代表者

市川 淳（Ichikawa, Jun）

静岡大学・情報学部・助教

研究者番号：90807942

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、集団目標を共有した複雑で動的な3者の協調運動における調整、及び認知情報処理のモデル化である。主な成果としてトップダウン処理であるルールベースのシミュレーションから、協調に重要な適宜介入し他者を助けて状況の改善を図るレジリエントな役割が、他者の運動情報を含むタスクパフォーマンスを参照した上で調整を行うことが示唆された。パフォーマンスから他者の行動を予測しているかもしれない。本研究は、協調運動に関連する認知情報処理の構成論的な理解につながり、ボトムアップ処理に対応する強化学習等と組み合わせることで、より人らしいモデルの実現が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまでの認知科学や神経科学では十分に議論されなかった集団目標を共有した3者の協調運動を理解する上で基盤となる知見を提供した。このような協調運動を議論するスポーツ科学や生物集団行動学との接続が実現し、情報処理の観点から協調運動を検討する新たな領域を開拓した点で学術的意義があると言える。また、高いパフォーマンスに関連するレジリエントな役割、及びその役割がどのように遂行されるかを解明したことで「集団」と「個」に関する発展的な議論が期待される。リーダー・フォロワーとは異なる性質をもつ役割の重要性を提案したことは社会的意義が大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to understand and model the adjustment and cognitive processing involved in complex and dynamically planned coordination, such as nonverbal behavior with sharing a group goal by a triad. The results of rule-based simulation suggested that, for motor coordination, the resilient role-who moderately intervenes in other roles and improves situations-uses information on task performance to adjust. Performance reflects others' motor information, such as their operating procedures and forces; the player may anticipate their behaviors. This study contributes to enhancing the fundamental and constructive understanding of cognitive processing related to coordination. In the future, a human-like model could be provided by combining it with a bottom-up one like reinforcement learning.

研究分野：認知科学

キーワード：協調 インタラクション 集団運動 役割分担 調整 モデリング

1. 研究開始当初の背景

人は、単独では困難なタスクを他者と遂行できる、あるいは単独よりも高いタスクパフォーマンスを達成できる場合がある[1]. 本稿では、そのような他者との相互作用(インタラクション)を「協調」と定義する. 他者との協調に関する研究は、認知科学や神経科学等で分野を横断して幅広く行われている(例えば[2-4]). 神経科学では主に、集団目標を共有しない協調が検討されている. 先行研究では、運動から他者の状態を取得してお互いに最適な方略をとることで、個人レベルにおいて高いパフォーマンスを達成できることが示唆されている[3,4]. 他方で、認知科学では問題解決や学習の枠組みから、集団目標を共有した協調が検討されている. 思考に重きを置き、規則発見や数学のタスクを用いてペアの発話を分析し、役割の分担・交代を通じた他者視点の取得が問題解決や多様な方略の発見につながることを明らかにした[5,6]. これらの知見を総合的に踏まえると、集団目標を共有した協調運動には、他者の役割に基づいて自身の動きを調整することが重要であると考えられる. しかし、メカニズムの説明やモデル化が難しい3者以上による複雑で、時系列で計測される動的なインタラクション[7,8]の運動調整過程は十分に理解されていない. その理由の1つに、個人の動きの自由度が大きいため、調整過程が一意に定まらないことが挙げられる[9]. ゆえに、統制がとれた集団運動、具体的には集団目標が明確でタスクのルールから動きがある程度のコントロールされていることが望ましい[10].

そこで、本研究のアプローチとして上記の条件を満たすタスクを導入する. ここでは、3人1組で各自がリールを回して糸の張力を変え、3本の糸につながる1本のペンを動かして1辺30cm、幅2cmの正三角形の辺をなぞる課題[2,11]を使用する. なぞり課題では、主導でペンを動かす糸を「張る」役割、スムーズにペンが動くように応じる「緩める」役割、そして2つの役割に適宜介入してペンの移動のタイムロスが生じない程度に軌道修正する「適度に張る」役割への分担が求められ、次の辺をなぞる際に役割を反時計回りに交替する(図1). 過去に実施した行動実験では、繰り返しなぞり課題を行わせてペンの位置や各自の張力を計測した. 6組18名のデータに対して辺やグループ間の変動を踏まえた線形混合モデルによる回帰分析を行ったところ、「適度に張る」役割が小さなペンの逸脱を維持しつつ、素早く辺をなぞる高いパフォーマンスに関連することを確認した. なぞり課題の仕様上、「張る」役割と「緩める」役割だけでは辺上をなぞることができない. ゆえに「適度に張る」役割が、他2つの役割を助けて状況の改善を図り、全体の協調が実現することが示唆された[2]. このレジリエンスは、なぞり課題だけでなくスポーツや軍隊、システムマネジメントにおいても求められている[1,12].

上記の先行研究[2]は、集団目標を共有した複雑で動的な協調運動で鍵となる役割を議論した. しかし、レジリエントな役割がどのような情報資源を利用して運動調整しているか等については未だ理解されていない. そこで、本研究では、なぞり課題の「適度に張る」役割に着目し、調整やその背後にある情報処理を検討するためにシミュレーションを導入する.

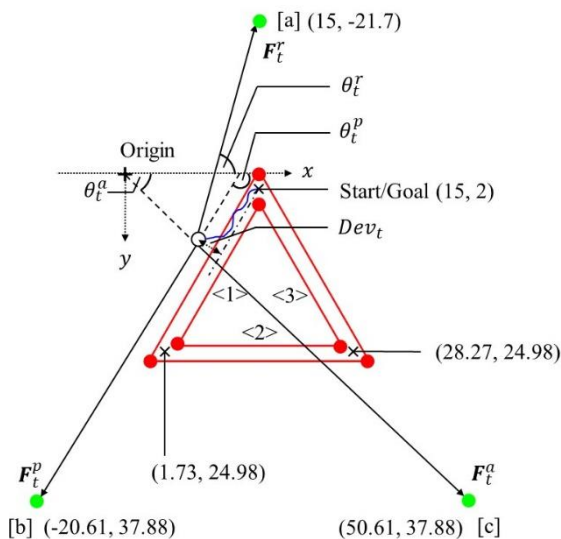


図1: なぞり課題の模式図. 辺<1>をなぞる場合、[b]が「張る」役割、[a]が「緩める」役割、[c]が「適度に張る」役割の担当が求められる. 丸括弧の数値は2次元の座標を表す.

2. 研究の目的

本研究では、なぞり課題を用いて不均一な役割を運動方程式で定式化する. そして、シミュレーションを行い、レジリエントな「適度に張る」役割の運動調整や情報処理に必要な最低限の構成をモデル化する点を目的とする. 行動実験[2]だけでは説明が難しい調整過程の理解に寄与することが期待される.

3. 研究の方法

現在時刻 t における3つの役割による張力の合成(N)を式(1)に示す.

$$F_t = F_t^p + F_t^r + F_t^a, \quad (1)$$

F_t^p は「張る」役割、 F_t^r は「緩める」役割、 F_t^a は「適度に張る」役割の張力を表す. Keep It Simple Stupid (KISS)の原則[13]に沿って、可能な限り単純な構成で各役割の遂行に関するルールを設定した. 「張る」役割は、視覚運動遅延時間分前のペンの位置と辺の幅の中央線との距離から算出される逸脱量(cm)から張力が線形回帰される. 逸脱量は正の値で辺の外側、負の値

で内側にペンが逸れることを示す。この操作は、他者 2 人の運動情報が含まれるタスクパフォーマンスを利用してペンを手元へ引き寄せることを意味する。また、線形回帰の切片と傾きの値は行動実験[2]のデータを再分析して決定した。次に「緩める」役割はなぞり課題の仕様上、原則張力を発生させない。しかし、逸脱量の絶対値が閾値(0.5 cm)を超えてペンが逸れそうになった場合は何かしらのリール操作を行うことが考えられ、張力がわずかに発生するランダムノイズとみなす。そして、レジリエントな「適度に張る」役割は、逸脱量が閾値(0.5 cm)を超えるまで張力を発生させない。しかし、閾値を超えてペンが外側へ逸れそうになった場合は、「張る」役割と同様に逸脱量から張力が線形回帰され、軌道修正が行われる。加えて、さらにペンが逸れて 1 cm を超えた場合はある一定量の張力で軌道を修正する。一定量とは、行動実験から検出された張力の局所的なピーク値の平均とわずかなランダムノイズとの和である。線形回帰のような他者の運動情報を踏まえて調整するリール操作とは異なり、軌道修正が明確であることに伴う自己視点に基づく操作と言える。

各役割で張力の大きさが決まると、 x 成分と y 成分に分解される。そして、 F_t を求めてペンの質量(0.085 kg)との商から加速度が算出され、加速度を 2 階積分することで次の時刻 (0.05 秒後)におけるペンの位置が決まる。これを繰り返しペンと正三角形の頂点との距離が閾値 (辺<1>と辺<2> : 1 cm ; 辺<3> : 2 cm) 以内であればゴールに到達したとみなし、役割を反時計回りに交替させて次の辺をなぞる。本研究では、行動実験のグループ数と同じ回数分のシミュレーション($N = 6$)を実施し、3 辺全てをなぞれた場合に各辺におけるペンの平均逸脱量をパフォーマンスとして算出した。

4. 研究成果

提案モデルでは全てのシミュレーションで 3 辺全てをなぞることができた。なぞり課題の遂行に必要な最低限の構成を有していると考えられる。タスクパフォーマンスを図 2 に示す。各辺でペンの逸脱量についてマン・ホイットニーの U 検定とボンフェローニ補正を実施し、行動実験[2]と比較した。結果、注目すべき点として、辺<2>では行動実験との間に 5%水準で逸脱量の有意差は確認されなかった($Z = 0.00, n.s.$)。提案モデルは、ペンの移動軌跡を一部の辺で再現したと言える。パフォーマンスである逸脱量には他者 2 人の運動情報が含まれる。スポーツ科学において、サッカーの 3 者のパス回しを再現したシミュレーションでは、他者との距離に基づく社会的な作用、運動情報がある運動パターンを維持する協調に重要であることが示唆されている[14]。さらに、神経科学では運動から他者の状態を取得して最適な方略をとることが示されている[3,4]。今回の知見はこれらと整合性があるだろう。「適度に張る」役割では、パフォーマンスから他者のサブゴールを推定する、あるいはリール操作を予測しているかもしれない。

本研究の新規性や学術的な貢献として、行動実験の結果[2]を補完したこと、そして集団目標を共有した 3 者の協調運動に関する基盤となる知見を提供したことが挙げられる。後者は、認知科学や神経科学では十分に議論されていない。リーダー・フォロワーとは異なる性質を有するレジリエントな役割、その役割がどのように遂行されるかを明らかにすることで「集団」と「個」に関する発展的な議論が期待される。一方で、協調運動には集団目標やタスクの制約、役割からトップダウンに対応するだけでなく、状況に応じて柔軟に対処するボトムアップな側面もある[15]。今後は、全ての辺でペンの移動軌跡を再現できるように、ルールベースのトップダウン処理にボトムアップ型の強化学習を加えたようなモデルの構築を本格的に進める。後者の情報処理を組み込むことで、より人らしいレジリエントな役割のモデルが実現すると考えられる。また、新型コロナウイルスの感染拡大により、十分な検証が難しかった人を対象にした提案モデルの評価実験も検討している。参加者とエージェントがなぞり課題を行い、人同士と同じように協調できるかを検証する。

さらに、なぞり課題に限らず、レジリエンスが全体の協調運動に与える影響を、より現実的なタスクから検討する社会実装も不可欠である。リーダー・フォロワーとは異なる、具体的に言えば、インタラクションに主要に従事するメンバー以外に焦点をあて、これらとの関係を議論することで、協調に関する更なる理解が進むと考えられる。社会的な意義は非常に大きいと言えるだろう。

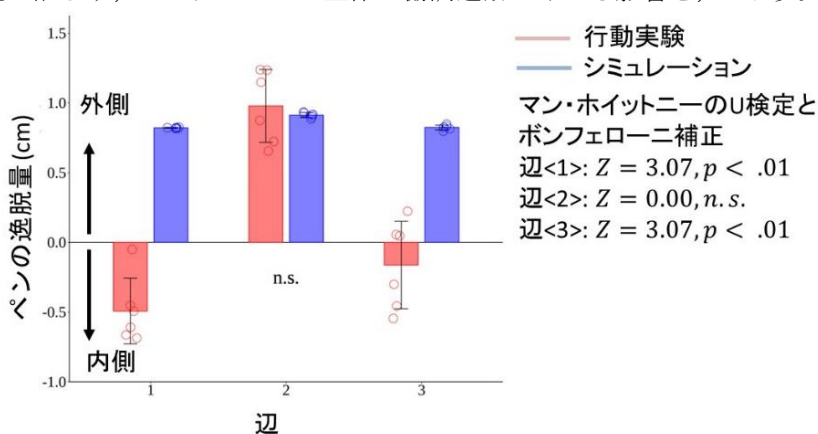


図2: タスクパフォーマンスとしてのペンの逸脱量。エラーバーは標準偏差である。

参考文献

- [1] Fujii, K., Yokoyama, K., Koyama, T., Rikukawa, A., Yamada, H., & Yamamoto, Y. (2016). Resilient help to switch and overlap hierarchical subsystems in a small human group. *Scientific Report*, Vol. 6 (23911). <https://doi.org/10.1038/srep23911>
- [2] Ichikawa, J., & Fujii, K. (2022). Analysis of group behavior based on sharing heterogeneous roles in a triad using a coordinated drawing task. *Frontiers in Psychology*, Vol. 2, 890205. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.890205>
- [3] Takagi, A., Hirashima, M., Nozaki, D., & Burdet, E. (2019). Individuals physically interacting in a group rapidly coordinate their movement by estimating the collective goal. *eLife*, Vol. 8, e4228. <https://doi.org/10.7554/eLife.4228>
- [4] Takagi, A., Ganesh, G., Yoshioka, T., Kawato, M., & Burdet, E. (2017). Physically interacting individuals estimate the partner's goal to enhance their movements. *Nature Human Behaviour*, Vol. 1, 0054. <https://doi.org/10.1038/s41562-017-0054>
- [5] 林 勇吾・三輪 和久・森田 純哉 (2007). 異なる視点に基づく協同問題解決に関する実験的検討. *認知科学*, Vol. 14, No. 4, pp. 604-619.
- [6] Shirouzu, H., Miyake, N., & Masukawa, H. (2002). Cognitively active externalization for situated reflection. *Cognitive Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 469-501.
- [7] Yokoyama, K., & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, Vol. 7, No. 10, e1002181. <https://doi.org/10.271/journal.pcbi.1002181>
- [8] Braun, D. A., Ortega, P. A., & Wolpert, D. M. (2009). Nash equilibria in multi-agent motor interactions. *PLOS Computational Biology*, Vol. 5, No. 8, e1000468. <https://doi.org/10.271/journal.pcbi.1000468>
- [9] Kelso, S. J. A. (2021). Unifying large- and small-scale theories of coordination. *Entropy*, Vol. 23, No. 5, 537. <https://doi.org/10.3390/e23050537>
- [10] 市川 淳・藤井 慶輔(2020). 協調に関する議論に向けたアプローチの提案－集団運動からみる他者の行動予測と適応－. *認知科学*, Vol. 27, No. 3, pp. 377-385.
- [11] 丸野 俊一 (1991). 社会的相互交渉による手続き的知識の改善と“自己－他者”視点の分化・獲得. *発達心理学研究*, Vol. 1, No. 2, pp. 116-127.
- [12] Bowers, C., Kreutzer, C., Cannon-Bowers, J., & Lamb, J. (2017). Team resilience as a second-order emergent state: A theoretical model and research directions. *Frontiers in Psychology*, Vol. 8, 260. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.0260>
- [13] Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. New Jersey: Princeton University Press.
- [14] Yokoyama, K., Shima, H., Fujii, K., Tabuchi, N., & Yamamoto, Y. (2018). Social forces for team coordination in ball possession game. *Physical Review E*, Vol. 97, 022410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.022410>
- [15] Steiner, S., Macquet, A. C., & Seiler, R. (2017). An integrative perspective on interpersonal coordination in interactive team sports. *Frontiers in Psychology*, Vol. 8, 1440. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01440>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 市川 淳, 喜古 泰一, 秋吉 政徳	4. 巻 34
2. 論文標題 Kinect を用いた仮想エージェントとの同期運動が身体活動の印象に与える影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌）	6. 最初と最後の頁 663-668
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3156/jsoft.34.3_663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ichikawa, J., & Fujii, K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Analysis of group behavior based on sharing heterogeneous roles in a triad using a coordinated drawing task	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2022.890205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 市川 淳, 大倉 光輝, 秋吉 政徳	4. 巻 -
2. 論文標題 発話の基本周波数に対するエージェントの汎用的な非言語同調が印象評価に与える影響の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌A【掲載決定】	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ichikawa, J., & Fujii, K.
2. 発表標題 Study on heterogeneous roles in coordinated behavior of a triad using force-based models
3. 学会等名 44th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci 2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川 淳, 藤井 慶輔
2. 発表標題 数理モデルを用いた三者の運動協調における不均一な役割の検討
3. 学会等名 日本認知科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川 淳
2. 発表標題 行動実験と計算機シミュレーションを組み合わせた三者の運動協調に関する検討
3. 学会等名 日本認知科学会第38回大会オーガナイズドセッション「行動実験と計算機シミュレーションの接続 - 認知的インタラクションフレームワークの構築に向けて - 」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川 淳
2. 発表標題 協調的集団運動を例とする頑健性と妥当性を両立した他者モデルに関する考察
3. 学会等名 日本認知科学会第39回大会オーガナイズドセッション「認知的インタラクションフレームワークに基づいた工学的有効性と科学的妥当性を両立する他者モデル」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市川 淳, 筒井 和詩, 藤井 慶輔
2. 発表標題 深層強化学習とルールベースを用いた3者の協調運動におけるレジリエントな役割の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎2023年3月研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤井 慶輔 (Fujii Keisuke) (70747401)	名古屋大学大学院・情報学研究科・准教授 (13901)	
研究協力者	筒井 和詩 (Kazushi Tsutsui) (30898458)	名古屋大学大学院・情報学研究科・特任助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------