

# 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

## Study on Non-uniform Roles in Coordinated Group Behavior with Three Members Using Mathematical Models

市川 淳<sup>†</sup>, 藤井 慶輔<sup>‡</sup>

Jun Ichikawa, Keisuke Fujii

<sup>†</sup> 神奈川大学, <sup>‡</sup> 名古屋大学

Kanagawa University, Nagoya University

j-ichikawa@kanagawa-u.ac.jp

### 概要

本研究では, 数理モデルから三者の運動協調における不均一な役割を検討した. 各自がリールを回して糸の張りを調整し, 3本の糸につながれたペンを動かして正三角形をなぞる課題の役割を運動方程式で定式化したうえで計算機シミュレーションを行った. 結果, 少なくとも三辺をなぞるためには, 集団全体のバランスを保つ役割がペンの逸脱量に応じて張力を調整する必要があり, 課題の成果を示すパフォーマンスから他者の操作に関連する情報を補う可能性が示された.

**キーワード:** 協調 (coordination), 集団運動 (group behavior), インタラクション (interaction), 調整 (adjust), モデリング (modeling)

### 1. はじめに

私たちは他者と活動して集団としての目標を達成する, あるいは問題解決を図ることがある. その共有された目標や問題の達成・解決を導く他者とのインタラクションである協調 [1] は生きるうえでの基盤であり, スポーツ競技のチームワークや演奏が私たちを魅了する代表例として挙げられる [2]. ゆえに, 他者に関する情報をどのように利用して各自が調整を行っているかを検討し, 協調のメカニズムを明らかにすることは人間の情報処理を解明する認知科学にとって重要な取り組みといえる. 本研究では, これらの協調の背後にある調整について検討する.

複数人が齟齬をきたすことなく共有された問題を解決する, もしくは複数人で取り組むことによる学習効果を得るためには, 他者の異なる視点の理解や役割分担に基づく異なる視点間でのインタラクションが重要である (例えば [3, 4, 5]). これは, 1人1人をサブシステムと捉えてサブシステム間での関係を踏まえたインタラクションが行われることで, 集団全体として

の機能が実現する分散化された認知の理論 [6] とも整合性がある. また, スポーツ科学の研究 [7] では, バスケットボールにおける協調した集団のディフェンスが, 危機のレベルに応じた役割の切り替えと重複から構成されることが示されている. 異なる視点の理解や役割分担の基盤には他者の役割の表象や行動のモニタリング, そして予測があると考えられる. これらは, 協調に必要な要素として指摘されている (例えば [2, 8, 9]).

一連の認知科学に関連する先行研究では, 主に二者間のインタラクションから協調が検討されることが多い. その際, 規則発見や数学の課題 [3, 5] を解く際の発話, あるいは Simon 課題 [2] のような呈示された刺激に対してボタンを押す比較的単純な反応を記録し, 分析を行っている. ただ, 先行研究では複雑で動的なインタラクションを対象にした取り組みは数少ない. ここで述べる「複雑」とは, 現象としての解釈や数理モデル化が難しいとされる三者以上による集団を意味する [10]. また, 「動的」とは非言語で, かつボタンを押す/押さないといった離散的な行動の記録ではなく, 連続的に計測される運動データの性質を指す [11]. ゆえに, 三者以上の集団運動を位置データなどから定量的に分析し, 特徴的な集団運動と認知を関連づけることで協調に関する発展的な議論が期待される [12]. 身体性認知科学の視座から, 既存の問題解決や学習の理論の再考, 理論の適用範囲の拡張が考えられる. なお, スポーツ科学や生物学では生物集団の運動自体の特徴やメカニズムを検討した研究があり, 集団運動を均一な個体の力学系から説明を試みている (例えば [7, 13]). しかし, これらは構造化された集団運動に関連する認知を議論することが主要な目的ではない. また近年, 離散的な行動選択に基づく経済行動学のゲーム理論をターゲットの位置までハンドルを動かす

といった運動が求められる課題から検証した研究がある(例えば [11, 14])。しかし, スポーツ競技のチームワークや演奏のような複数人で取り組むことが必須な課題ではなく, 本研究で定義する協調の前提といえる集団として1つの目標を共有していない場合がある。

他方で, 我々は三者で取り組み, 集団として1つの目標を共有した運動協調で重要な役割について検討した [15]。行動実験では, 3人1組で正三角形をなぞる課題 [16] (詳しくは 2.1 節を参照) を繰り返し行わせ, 計測された集団運動の分析から集団全体のバランスを保つ役割が成果を示すパフォーマンスの向上に寄与することを明らかにした。この分析では, 役割とパフォーマンスに関する指標の関係性をモデルフィッティングさせることで統計的に示した。同役割はなぞり課題に限らず, スポーツ競技のチームワークや討論等でも必要とされ, 他者の行動や役割に関する視点の理解が求められると考えられる。この知見は, 先述した規則発見や数学の課題を使用した問題解決や学習の研究で導かれた理論(例えば [3, 4, 5]) が三者の集団運動にも適用できることを示唆する。

しかし, Ichikawa and Fujii (in press) の研究 [15] では, 集団全体のバランスを保つ役割が他者に関する情報を利用してどのように運動を調整しているか等については議論の余地があり得る。具体的には, 役割の背後にある運動調整のパラメータが分からないことが検討事項として挙げられる。そこで本研究では, なぞり課題を使って運動協調で求められる役割を運動方程式で定式化し, 計算機シミュレーションを行った。目的として, 少なくとも三辺をなぞるために集団全体のバランスを保つ役割がどのような調整モデルを必要とするかを検討した。シミュレーションからも運動協調を検討することで, 問題解決や学習の理論と関連したモデルの提案が実現し, 他者とのインタラクションに関する認知科学的な理解が進むことが期待される。

## 2. 方法

### 2.1 なぞり課題

丸野が考案したなぞり課題 [16] について説明する。3人1組で各自がリールを回して糸の張りを調整し, 3本の糸につながれた1本のペンを動かして一辺 30 cm, 幅 2 cm の正三角形を反時計回りになぞることが求められる(図 1)。リールを内側に回すと糸が張られ, 外側に回すとその張りが緩められる。正三角形の幅から逸脱することなく中央を通して素早くペンを動かす高いパフォーマンスを達成するためには役割分担と交代が重要である。各辺で3人がリールを操作して

表 1 図 1 と対応した各辺における操作者の役割。

辺	操作者		
	[1]	[2]	[3]
<1>	緩める	張る	適度に張る
<2>	適度に張る	緩める	張る
<3>	張る	適度に張る	緩める

糸を「張る」, 「緩める」, そして「適度に張る」役割を遂行し, なぞる辺が替わるタイミングで役割を反時計回りに交代する必要がある。

糸を「張る」役割とは, 手元へ引き寄せるようにペンを動かすリール操作である。また, 糸を「緩める」役割とはそのペンがスムーズに動くように対応する操作で, 「適度に張る」役割は「張る」役割と「緩める」役割が遂行されたことで, ペンが正三角形の幅から逸脱しないように, あるいは移動にタイムロスが生じないように集団全体のバランスをとる操作を指す。先行研究 [15] では, この役割が運動協調に寄与することが確認された。図 1 に基づく各辺に対する操作者の役割を表 1 に示す。

### 2.2 行動実験の概要

Ichikawa and Fujii (in press) の行動実験 [15] では, 6組 18 名が参加して分析対象となった。グループには辺の幅から外れることなく, 直線で正三角形をなぞることが目標であることを教示し, 役割の詳細は伝えずリールの操作方法を説明した。制限時間は1試行あたり 90 秒とし, 1セッション 20 分の中でお互いの表情や視線を見ないように会話やジェスチャーをすることなく繰り返し課題を行わせ, 計 3 セッション実施した。セッションの間は 5 分程度の休憩を挟んだ。スタートとゴール, 及びペンを反時計回りに動かすことは全試行で同じであった(図 1)。

また, 3 台の張力センサから各リールにおける糸の張り具合 (N) を 100 Hz の一次元で記録した。リールを内側に回すと糸の張り具合が正の値で記録される一方で, 外側に回すと糸が緩むため, 記録される張力の値は減少する。合わせて, 課題を行っている様子を 1 台のビデオカメラで俯瞰撮影し, 動作解析ソフトからペンの位置 (cm) を 20 Hz の二次元で取得した。



以上のように各役割の張力から  $F_f$  が求まると、式 (7) からペンの加速度  $a_f$  が算出される。  $m$  (kg) はペンの質量である。そして、加速度を二階積分することで次の時間フレーム  $f+1$  のペンの位置を求める。

$$a_f = F_f/m, \quad (7)$$

他方で、ペンの位置と正三角形の各頂点、つまりゴールとの距離が閾値  $D_g$  (cm) 以内であれば、一辺をなぞり終えたとみなし、操作エージェントの役割を反時計回りに交代させてなぞる辺を次に移す。運動方程式による役割の定式化に伴う各パラメータの値を表 2 に示す。張力を線形回帰する際の切片や傾きは、行動実験のデータを分析して求めた。各辺で張力のピーク値、及びピークを記録した時間から視覚運動遅延時間分前のペンの逸脱量を取り出した。そして、外れ値を除いたうえで逸脱量を独立変数、ピーク値を従属変数とし、参加したグループの間や辺の間の変動を考慮した線形混合モデルによる回帰分析を行い、平均的な関係を表す切片や傾きを算出した<sup>2</sup>。ここでは逸脱量を固定効果、グループと辺を変量効果として傾きと切片の両者に変量効果を組み込んだモデルを用いた。

## 2.4 計算機シミュレーションと分析

各役割の張力や調整を数理モデル化したうえで、計算機シミュレーションを行った。本研究では、行動実験 [15] に参加して分析対象となったグループ数と同じ回数分 ( $N = 6$ ) のシミュレーションを実施した。そして、課題の成果を示すパフォーマンスとして、ペンの逸脱量の時間を通した平均  $\overline{Dev}$  を式 (8) と式 (9) から各辺で算出した。  $P_{ver_i} = (x_{P_{ver_i}}, y_{P_{ver_i}})$  と  $P_{ver_{i+1}} = (x_{P_{ver_{i+1}}}, y_{P_{ver_{i+1}}})$  は正三角形の各頂点の位置を示し ( $1 \leq i < 3$ )、頂点同士を結ぶと辺  $\langle i \rangle$  の幅の中央線となる。なお、  $i = 3$  では  $P_{ver_{i+1}} = P_{ver_{(1)}}$  である。そして、  $P_{pen_f} = (x_{P_{pen_f}}, y_{P_{pen_f}})$  は、現在の時間のフレームにおけるペンの位置を表す。  $F$  は一辺をなぞる際の総フレーム数を示す。

$$Dev_f = \frac{1}{\|P_{ver_{i+1}} - P_{ver_i}\|} \begin{pmatrix} P_{ver_{i+1}} - P_{ver_i} \\ P_{pen_f} - P_{ver_i} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\overline{Dev} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F Dev_f, \quad (9)$$

<sup>2</sup>逸脱量が平均  $\pm 2SD$  の範囲に含まれていない場合、対応するピーク値と合わせて外れ値として扱った。

表 2 なぞり課題の計算機シミュレーションにおける各パラメータの値。

パラメータと記号	値
辺の長さ $L$	30 cm
辺の幅 $w$	2 cm
ペンの質量 $m$	0.085 kg
視覚運動遅延時間分のフレーム数 $f_{tau}$	6
「張る」役割のピーク値の平均 $ \overline{F^p} $ ( $SD$ )	0.57 N ( $SD = 0.12$ )
「張る」役割の張力を回帰する際の切片 $\beta_0^p$	0.68
「張る」役割の張力を回帰する際の傾き $\beta_1^p$	0.15
「適度に張る」役割のピーク値の平均 $ \overline{F^a} $ ( $SD$ )	0.59 N ( $SD = 0.15$ )
「適度に張る」役割の張力を回帰する際の切片 $\beta_0^a$	0.59
「適度に張る」役割の張力を回帰する際の傾き $\beta_1^a$	-0.01
「適度に張る」役割の張力の調整を条件分けする際の閾値 $D_a$	1.0 cm
ペンが頂点に到達したとみなす閾値 $D_g$	2 cm

Note. 1 フレームの時間幅は 0.05 秒である。また、ペンを逸脱させることなくなぞる辺を次に移す場合は  $D_g$  を 1.0 cm とした。

さらに、本研究では前節で提案したモデルだけでなく、運動協調において重要な集団全体のバランスを保つ糸を「適度に張る」役割に着目し、以下の最適モデルも用意した。このモデルは式 (10) のように  $F_f^p + F_f^a$  の合成がなぞる辺の幅の中央線が示すベクトルと一致するように最適な  $F_f^a$  が算出される ( $\gamma^\circ$  や  $\lambda^\circ$  は図 1 を参照)。視覚運動遅延時間分前の糸を「張る」役割における張力ベクトルといった他者の操作に関連する情報や辺の幅の中央線における向きといった環境に関する情報から  $|F_f^a|$  が調整される点で提案モデルとは異なる。つまり、提案モデルよりも多くの情報を利用して張力が決まる<sup>3</sup>。糸を「張る」役割と「緩める」役割の張力は提案モデルと同じである。

$$|F_f^a| = \frac{\tan \gamma_{f-f_{tau}}^\circ |F_{f-f_{tau}}^p|}{\sin \lambda_{f-f_{tau}}^\circ - \cos \lambda_{f-f_{tau}}^\circ \tan \gamma_{f-f_{tau}}^\circ}. \quad (10)$$

これらのモデルは MTLAB R2016b で実装した。そ

<sup>3</sup> $f_{tau}$  までの間は  $F_f^p + F_f^a$  の合成がなぞる辺の幅の中央線が示すベクトルと一致するように  $|F_f^a|$  が算出される。

して、少なくとも三辺をなぞれた場合、パフォーマンスを行動実験と比較した。

### 3. 結果

計算機シミュレーションを実施したところ、提案モデルと最適モデルの両者で少なくとも三辺をなぞることはできた。ペンの移動軌跡を図2に示す。(a)と(b)は行動実験[15]で全グループを通して一辺におけるペンの逸脱量が最小値を記録した試行と、なぞる時間が最も短かった試行の軌跡である。(c)と(d)は提案モデルと最適モデルによるシミュレーション1試行分の軌跡を表す。提案モデルはどの辺も外から入り込むような軌跡を描いていることが分かる。他方で、辺<2>は行動実験の軌跡が提案モデルに比較的近く、辺<3>では最適モデルに近いように見える。

そこで、課題の成果を示すパフォーマンスである逸脱量についてモデル要因(行動実験水準、提案水準、最適水準)を参加者間、辺要因(<1>水準、<2>水準、<3>水準)を参加者内とする二要因の分散分析を行った。各条件の逸脱量を図3に示す。結果、各要因の主効果が有意であった(モデル要因: $F(2, 15) = 433.11, p < .001$ ; 辺要因: $F(2, 30) = 4.95, p < .05$ )。合わせて、有意な交互作用も確認された( $F(4, 30) = 63.83, p < .001$ )。本分析では、先述したペンの軌跡に関する特徴を踏まえて、3つのモデルの逸脱量を各辺で比較した。モデル要因の単純主効果を行ったところ、全ての辺において有意であった(辺<1>: $F(2, 15) = 145.77, p < .001$ ; 辺<2>: $F(2, 15) = 261.86, p < .001$ ; 辺<3>: $F(2, 15) = 52.86, p < .001$ )。そして、Bonferroni法による多重比較から、辺<1>では全てのモデルの間で有意差が確認された( $ps < .05$ )。一方で、辺<2>では行動実験と提案モデルの間、辺<3>は行動実験と最適モデルの間で有意差が確認されなかった。つまり、行動実験の逸脱量は辺<2>で提案モデルに近く、辺<3>で最適モデルに近いことが示された。

参考までに、一辺をなぞる時間については行動実験とシミュレーションの間で大きな差があった。行動実験では最も速くなぞったとしても約8秒であったが、シミュレーションでは提案モデルと最適モデルの両者で3秒以内になぞり終えていた。これは、シミュレーションで考慮していなかった要因(例えば、ペンや張力センサとなぞる正三角形が印刷された紙との摩擦)等の影響が考えられる。

### 4. 考察

本研究では、なぞり課題の運動協調で求められる役割を運動方程式で定式化した。そして、計算機シミュレーションを行い、集団全体のバランスを保つ役割における調整モデルについて検討した。結果、提案したモデルでは少なくとも三辺をなぞるために、糸を「適度に張る」役割が課題の成果を示すパフォーマンス(ペンの逸脱量)から自身の張力を調整する必要があることが示された。同役割において、糸を緩め続ける、あるいはある一定の張力を維持し続けるだけではペンが大きく逸れてしまい、正三角形の辺をなぞることはできない。式(6)の $\beta_0^a$ や $\beta_1^a$ に基づく調整が辺上をなぞるうえで不可欠であるといえる。

また、逸脱量は課題を行う際に、他者の操作から影響を受ける認知しやすい情報と考えられる。そして、提案モデルの糸を「適度に張る」役割は最適モデルのように多くの情報から張力を調整しない。さらに、他者に関する情報を利用した運動の調整は、サッカーのパス回しのシミュレーションを行った研究からもその重要性が指摘されている[17]。以上を踏まえると、提案した調整モデルで集団全体のバランスを保つ場合、糸を「張る」役割の操作などに関する情報を逸脱量から補うような、ある情報から必要な情報を予測している可能性がある。他者の動きによって伝わる触覚情報が運動協調において有益であることから[18]、糸を「張る」役割の張力の大きさや向きに関する情報などを予測しているかもしれない。糸を「適度に張る」役割の遂行に他者の操作や役割に関する視点の理解があることが示唆されている[15]。特に、運動協調では全ての情報に注意を向けることは時間的な制約等もあり難しいため、他者視点の理解の基盤には必要な情報の予測と考えられる。調整モデルと関連する認知の特徴が示された可能性がある。

他方で、シミュレーションと行動実験[15]を比較したところ、辺<2>で提案モデルのパフォーマンスが行動実験に近く、辺<3>では最適モデルのパフォーマンスが行動実験に近かった。このことから、行動実験と同程度のパフォーマンスを実現するためには、集団全体のバランスを保つ役割に提案したモデル以外の調整モデルが必要である可能性がある。なお、辺<1>は、各シミュレーションのモデルと行動実験の間でパフォーマンスに差がみられた。行動実験では辺の幅の中央線における内側をペンが移動し続けていたことから(図2の(a)や(b)及び図3を参照)、辺<1>では糸を「適度に張る」役割が先述したような調整を十分に実行していなかったかもしれない。

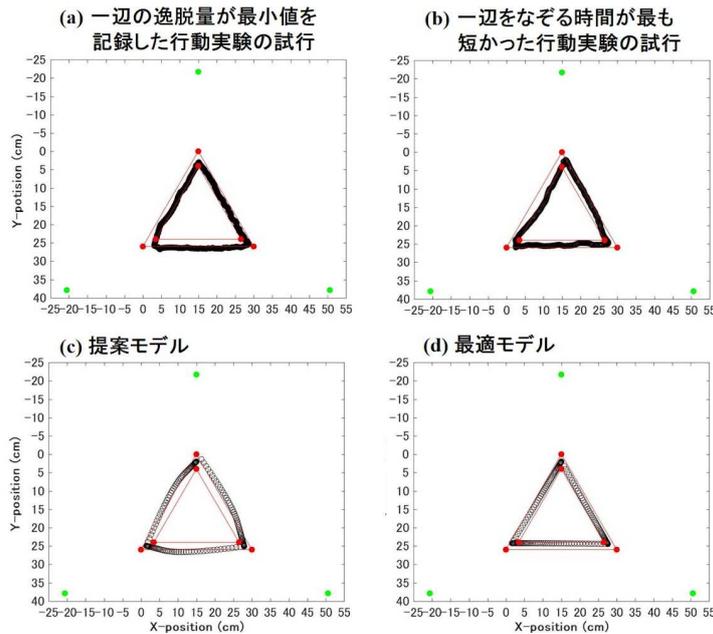


図2 ペンの移動軌跡. (a)と(b)は行動実験 [15] の試行, (c)は提案モデル, (d)は最適モデルの軌跡を示す.

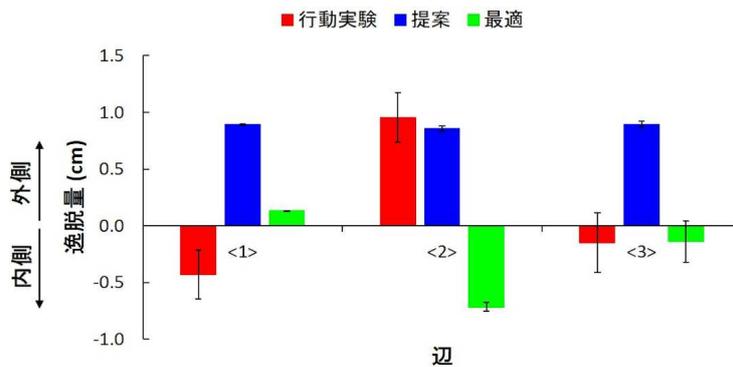


図3 ペンの逸脱量. エラーバーは標準偏差を表す.

ただし、上記の議論についてはいくつかの留意点がある。まず、本研究のモデルでは糸を「緩める」役割の張力を  $F_r = (0, 0)$  とした。なぞり課題の設計上、この役割は他者の操作に関連する情報を利用することなく、ペンがスムーズに動くように対応すればよい。しかし、行動実験では誤操作した場合など少なからず張力が発生するため、今後はノ張力を入れる場合に役割をどのように運動方程式で定式化するか、そしてシミュレーションを行う際に三辺をなぞることができるかを検証する必要がある。さらになぜ、辺<2>や辺<3>でそれぞれ、パフォーマンスが行動実験と同程度になるモデルが異なるかについても検討事項として挙げられる。行動実験ではなぞる辺によって役割を遂行する参加者が代わることから、適用する調整モデルが参加者に依存する可能性がある。参加者は全試行において同じルールで操作していたことから、各辺で全て

の役割を経験させるような行動実験を行い、この点を検討することが求められる。

本研究では、認知科学の問題解決や学習の理論（例えば [3, 4, 5]）と関連づけて、集団全体のバランスを保つ役割が他者の操作に影響を受ける情報を利用して運動を調整する、他者視点の理解の背後にあるモデルを提案した。同役割はなぞり課題に限らずスポーツ競技のチームワークや討論など、様々な場面で求められる。私たちが経験則的に重要であると感じる特定の役割の調整をモデル化し、関連する認知を検討することは認知科学だけでなく、スポーツ科学など他分野の理論に与える影響は大きいと考えられる。今後は、検討事項をクリアして複雑で動的な協調における調整のより構成論的な理解を目指す。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 21K18033 の助成を受けた。

## 文献

- [1] Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological research on joint action: Theory and data, *Psychology of Learning and Motivation*, Vol. 54, pp. 59-101.
- [2] Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: Bodies and minds moving together, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 10, No. 2, pp. 70-76.
- [3] 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行動実験の検討, *認知科学*, Vol. 14, No. 4, pp. 604-619.
- [4] Lombrozo, T. (2006). The structure and function of explanations, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 10, No. 10, pp. 464-470.
- [5] Shirouzu, H., Miyake, N., & Masukawa, H. (2002). Cognitively active externalization for situated reflection, *Cognitive Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 469-501.
- [6] Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge: MIT press.
- [7] 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 Reports*, Vol. 6, 23911, doi: 10.1038/srep
- [8] Bekkering, H., De Bruijn, E. R., Cuijpers, R. H., Newman - Norlund, R., Van Schie, H. T., & Meulenbroek, R. (2009). Joint action: Neurocognitive mechanisms supporting human interaction, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 340-352.
- [9] Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: Just like one's own? *Cognition*, Vol. 88, No. 3, B11-B21.
- [10] Yokoyama, K., & Yamamoto, Y. (2011). Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities, *PLOS Computational Biology*, Vol. 7, No. 10, e1002181, doi:10.1371/journal.pcbi.1002181
- [11] 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, doi:10.1371/journal.pcbi.1000468
- [12] 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.
- [13] Couzin, I. D., Krause, J., James, R., Ruxton, G. D., & Franks, N. R. (2002). Collective memory and spatial sorting in animal groups, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 218, No. 1, pp. 1-12.
- [14] Chackochan, V. T., & Sanguinetti, V. (2019) Incomplete information about the partner affects the development of collaborative strategies in joint action, *PLOS Computational Biology*, Vol. 15, No. 12, e1006385, doi:10.1371/journal.pcbi.1006385
- [15] Ichikawa, J., & Fujii, K. (in press). Understanding others' roles based on perspective taking in coordinated group behavior, *Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci 2021)*.
- [16] 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.
- [17] 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, No. 2, 022410, doi:10.1103/PhysRevE.97.022410
- [18] van der Wel, R. P., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2011). Let the force be with us: dyads exploit haptic coupling for coordination, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 37, No. 5, pp. 1420-1431.