

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：32687

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18013

研究課題名（和文）集団スポーツのフォーメーション形成に対するドロネーネットワーク法の確立

研究課題名（英文）Establishing the Delaunay method for formation structure in team sports

研究代表者

成塚 拓真（Narizuka, Takuma）

立正大学・データサイエンス学部・専任講師

研究者番号：60803616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：集団スポーツのフォーメーション定量化手法であるドロネーネットワーク法を出発点とし、分析手法の拡張および様々な対象への応用に取り組んだ。サッカーに対しては、階層的クラスタリングを用いて複数の試合で現れるフォーメーションを統一的に分類できる手法を提案した。また、最小到達時間に基づくスペース評価の枠組みを提案した。Vicsek model に対しては、ドロネーネットワーク法を用いて隣接時間分布の特徴を抽出し、ランダムな状態から群れを形成する過程における統計則を見出した。以上に加え、フェンシングや卓球における選手の姿勢をフォーメーションと捉え、試合映像から選手の姿勢を抽出するシステムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サッカーにおいてトラッキングデータが普及する中、スポーツの現場では新たな解析手法が必要とされている。本研究では集団スポーツのフォーメーション解析手法であるドロネーネットワーク法を発展させるとともに、新たに最小到達時間に基づくスペース評価手法を提案した。これにより、サッカーにおいてあいだだったフォーメーションとスペースという概念が数学的に定量化され、今後、戦術分析、選手・チーム評価、戦況の可視化など幅広い応用が期待される。また、ドロネーネットワーク法はスポーツだけでなくアクティブマターの解析にも有効なことが分かったため、これまで統計物理が苦手とした少数多体系一般を扱う手法として今後期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a Delaunay method for formation structure in team sports and applied it to various systems. For soccer games, we proposed an algorithm that can cluster formations over multiple games. We also proposed a fundamental framework for space evaluation based on minimum arrival time. For the Vicsek model, we used the Delaunay method to characterize lifetime distributions of adjacency relationships. We showed that the shape of the distribution changes depending on the difference in the collective behavior of particles. Furthermore, we developed a system to extract players' postures in fencing and table tennis games.

研究分野：スポーツ統計科学，統計物理学

キーワード：フォーメーション ドロネーネットワーク 最小到達時間 スペース評価 運動モデル 集団スポーツ
Vicsek model 姿勢解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1 . 研究開始当初の背景

近年、様々なスポーツ競技においてイベントデータやトラッキングデータなどの詳細なデータが取得可能となり、データに基づく戦術分析が勝敗を左右するようになった。これに伴い、統計科学を基盤としたスポーツデータ解析手法の需要が国内外で高まっている。実際、野球においては、統計学に基づくセイバーメトリクス¹の体系が確立しており、出塁率や長打率等に基づく定量的な試合分析が行われている。

一方、サッカーなどの集団スポーツでは、選手同士の直接的な相互作用やパス回し等の複雑な振る舞いが見られるため、空間統計やネットワーク解析などを用いた新たな解析手法が模索されている。中でも、フォーメーションの解析は集団スポーツにおいて戦術上重要であるにも関わらず、選手同士の隣接関係をどのように定量化するかという難しい問題を含むため、手法が確立していない。実際、これまでに各選手のヒートマップから選手同士の相対位置を推定する手法が提案されている(Bialkowski et. al, IEEE International Conference on Data Mining, 2014), スポーツの現場では 4-4-2 などの単純化された表記が用いられているのが現状である。

本研究は以上のような背景を踏まえ、集団スポーツにおけるフォーメーション解析手法を確立することを目的として開始した。

2 . 研究の目的

集団スポーツのフォーメーションを特徴づける手法として、ドロネーネットワーク法がある(成塚・山崎, 統計数理, 2017)。これは、各個体の位置を母点としたドロネー三角形分割によって得られるネットワークをフォーメーションと見なす手法である。ドロネーネットワーク法は提案段階の手法であるため、本研究ではドロネーネットワーク法の確立を目指し、以下の2つのテーマに取り組むことを当初の目的とした：(1)ドロネーネットワーク法の理論的基盤を構築し、集団スポーツのフォーメーション変化の解析・戦術分析に応用する。(2)ドロネーネットワーク法を生物集団や数値モデルに適用し、様々な集団運動パターンの分類を試みる。

3 . 研究の方法

研究開始当初の目的に従い、まずは以下の (1), (2) に取り組んだ。

(1) サッカーのフォーメーション解析：ドロネーネットワーク法の応用として、階層的クラスタリングを用いたフォーメーション分類手法がこれまでに提案されている(成塚・山崎, 統計数理, 2017)。この分類手法は複数の試合で現れるフォーメーションの分類には適用できないため、サッカーを対象に、試合をまたいだフォーメーション分類手法を提案した。具体的には、Bialkowski らによって提案された role representation と階層的クラスタリングを組み合わせたアルゴリズムを提案した。なお、本研究には、データスタジアム(株)から提供を受けた2016年度J1リーグのトラッキングデータを用いた。

(2) Vicsek model の解析：ドロネーネットワーク法は少数多体系一般の解析に適用可能である。そこで、生物集団の標準的なモデルとして知られる Vicsek model に対してドロネーネットワーク法を適用した。具体的には、ドロネーネットワークによって個体同士の隣接関係を定義し、累積隣接時間分布 $P(\tau)$ が集団運動の変化とどのように関係するかを定量的に調べた。

研究開始後の進捗状況を考慮し、以下の(3), (4)にも取り組んだ。

(3) 対戦型スポーツの姿勢解析：人間の姿勢を関節同士の隣接関係と捉え、サッカーのフォーメーション解析で発展させた手法をフェンシングの解析に応用した。本研究には、公益社団法人日本フェンシング協会から提供を受けた2018年ワールドグランプリの試合映像を用いた。

また、2台のカメラ映像から3次元座標を推定するシステムを構築し、卓球の試合分析に適用した。本研究では、日本ペイントホールディングス(株)および一般社団法人Tリーグから提供を受けた2020年度Tリーグの試合映像を用いた。

(4) サッカーのスペース評価：ドロネーネットワークは数学的にはボロノイ領域の隣接関係として定義される。ボロノイ領域は、サッカーにおいて選手の支配領域を特徴づけるために用いられてきたが、試合分析への応用には至っていない。そこで、ボロノイ領域を出発点とし、サッカーにおけるスペースという概念の定量化に取り組んだ。本研究には、データスタジアム(株)から提供を受けたJリーグのトラッキングデータを用いた。

4 . 研究成果

(1) サッカーのフォーメーション解析

本研究では、複数のサッカーの試合に対し、各時刻から得られたドロネーネットワーク(フォーメーション)をクラスターに分類するアルゴリズムとその解析手法を提案した。本アルゴリズム

ムは以下のように3つのステップから成る。

まず、ステップ I では、試合別、チーム別に試合全体でのヒートマップ（平均フォーメーション）を求める。今回、2016 年度 J1 リーグの 18 チーム、各 5 試合の平均フォーメーションを求めた結果、“442”、“414”、“433”、“541”、“343” という 5 種類のパターンに分類できることが分かった。ここで、各平均フォーメーションにおいて、選手は背番号ではなく 1~10 までの通し番号で区別されるので、これを隣接行列の要素番号に対応付ける。これを “role representation” と呼ぶ。

次に、ステップ II では、同じ平均フォーメーションごとに、階層的クラスタリングを用いてドロネーネットワークをクラスターに分類する。このとき、クラスター数をパラメータとすることで、フォーメーションの粗視化度合いをコントロールすることができる。特定のクラスター数に対し、クラスター同士の違いは 2 選手の相対位置の違いに対応している。例えば、ベガルタ仙台の 5 試合（いずれも平均フォーメーションは “442”）を解析すると、選手 2 と 3、選手 5 と 6 が位置を入れ替えていることが分かった。

最後にステップ III では、階層的クラスタリングで得られたクラスターをノードとする遷移ネットワークを構築する。実際にベガルタ仙台の 5 試合から得られた遷移ネットワークを調べると、以下の典型的な遷移パターンが抽出された：

選手 5 と 6 の位置が異なる C1~C5、C9~C15 という 2 つのコミュニティが存在する。

C6 は 2 つのコミュニティをつなぐパターンである。

C7、C8 はイレギュラーなパターンである。

2 つのコミュニティは共に選手 2 と 3 が位置を入れ替えたパターンを含む。

また、試合中のクラスター遷移を時系列として表すと、2 つのコミュニティを移り変わるような遷移（選手 5 と 6 の位置の入れ替え）は数十分の時間スケールで生じているのに対し、選手 2 と 3 の位置の入れ替えはより頻繁に起こっていることが分かった。以上は解析対象としたベガルタ仙台の戦術的な特徴を反映していると考えられる。このように、本解析手法を用いることで、フォーメーションを軸にしたチームスタイルの特徴づけを行うことができる。

(2) Vicsek model の解析

Vicsek model における隣接関係の持続時間分布に着目した。隣接関係はドロネーネットワークおよびユークリッド距離の 2 通りで定めた。Vicsek model にはノイズの強さと相互作用半径という 2 種類のパラメータが存在する。このうち、相互作用半径をパラメータとして隣接時間分布を調べた結果、相互作用半径の増加に伴って指数分布から指数 $3/2$ のベキ分布へと分布形状が変化することを発見した。このような隣接時間分布の質的变化は、ランダムな振る舞いをする個体がしだいに群れを形成する過程に対応している。また、指数分布からベキ分布への変化はポロノイ辺の長さ、および 個体間距離に対する First Passage Time の問題として理解できることを示した。特に、隣接時間分布のベキ指数が非整数ブラウン運動におけるハースト指数に対応付くことを数値シミュレーションと理論的な考察によって明らかにした。

(3) 対戦型スポーツの姿勢解析

フェンシングの試合映像（日本フェンシング協会から提供された 2018 年ワールドグランプリの試合映像）に対して OpenPose（Deep Learning に基づくフリーの姿勢解析ライブラリ）を適用し、試合中の選手の姿勢を抽出した。抽出された選手の姿勢は人体の 25 個の特徴点から構成されるが、今回は下半身を構成する 5 個の特徴点から関節角度ベクトルを定義し、選手の姿勢を定量化した。次に、この関節角度ベクトルに選手の進行方向を考慮した量を特徴ベクトルとし、サッカーのフォーメーション解析で用いた手法を姿勢解析に適用した。その結果、フェンシングの試合中に現れる典型的な姿勢を様々な解像度で抽出できることが分かった。また、サッカーのフォーメーション解析と同様に遷移ネットワークを作成した結果、中心部、周辺部、およびその中間に配置された 3 種類のクラスター群が存在していることが分かった。これらはそれぞれ、攻撃を仕掛けた後に出現する姿勢、試合中繰り返し出現する基本の姿勢、攻撃を仕掛ける場面上において出現する姿勢と解釈できる。

次に、3 次元での姿勢解析を見据え、3 次元座標推定システムの構築に取り組んだ。これは、複数台のカメラ映像から OpenPose を用いて抽出した関節座標を、DLT 法（Direct Linear Transformation Method）を用いて 3 次元実空間座標に復元するシステムである。本システムは未だ開発段階であるが、卓球の試合映像（2020 年度 T リーグの試合映像）に対してうまく動作することを確認した。今後フェンシングや卓球を足がかりに、様々な対戦型スポーツの姿勢解析に応用する予定である。

(4) サッカーのスペース評価

これまで、サッカーにおけるスペース評価はポロノイ領域によるフィールドの分割が主流であったが、領域内部が一様に扱われるという問題があり実用的ではなかった。そこで、チーム内で位置 \vec{x} に最も速く到達できる選手の移動時間を最小到達時間と定義し、これによってフィールドを重み付けする手法を提案した。具体的には、時刻 t における攻撃側と守備側の位置 \vec{x} への最小到達時間を $\tau_{df}(\vec{x}, t)$ 、 $\tau_{of}(\vec{x}, t)$ とし、これらを用いて以下の直交変数を定義した：

$$z_1(\vec{x}, t) = \frac{\tau_{df}(\vec{x}, t) - \tau_{of}(\vec{x}, t)}{\sqrt{2}}, z_2(\vec{x}, t) = \frac{\tau_{df}(\vec{x}, t) + \tau_{of}(\vec{x}, t)}{\sqrt{2}}$$

直交変数 $z_1(\vec{x}, t)$, $z_2(\vec{x}, t)$ はそれぞれ位置 \vec{x} の安全度と空白度を表す変数と見なせる。これらを用いると、位置 \vec{x} の持つ価値を2つの量で重み付けして評価することができる。これはポロノイ領域によるフィールドの分割よりも詳細にスペースを定量化できる新たな手法である。

なお、選手の移動時間を計算するためのモデルは運動モデルと呼ばれる。これまでに運動方程式や機械学習に基づく様々なタイプの運動モデルが提案されているが、その妥当性は十分に検証されてこなかった。そこで、全力疾走時の運動モデルとしてよく用いられる Fujimura の運動モデルに着目し、その妥当性をトラッキングデータを用いて検証した。その結果、Fujimura の運動モデルは妥当な到達領域を予測できる一方、運動能力係数の観点からは限界も示唆された。

サッカーのスペース評価の研究は、提案した枠組みを出発点として、より実践的な方向へと発展させる予定である。

なお、(1), (3), (4)の研究成果は、日本統計学会スポーツデータサイエンス分科会及び情報・システム研究機構統計数理研究所が主催する「スポーツデータ解析コンペティション」において得られたものである。「情報システム研究機構・統計数理研究所・医療健康データ科学研究センター」、「データスタジアム株式会社」、「公益社団法人・日本フェンシング協会」、「日本ペイントホールディングス株式会社」、「一般社団法人Tリーグ」に深謝する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamamoto Ken, Narizuka Takuma	4. 巻 103
2. 論文標題 Preferential model for the evolution of pass networks in ball sports	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.103.032302	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 -
1. 著者名 Narizuka Takuma, Yamazaki Yoshihiro, Takizawa Kenta	4. 巻 11
2. 論文標題 Space evaluation in football games via field weighting based on tracking data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5509
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-84939-7	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 Narizuka Takuma, Yamazaki Yoshihiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Clustering algorithm for formations in football games	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-48623-1	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 Narizuka Takuma, Yamazaki Yoshihiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Lifetime distributions for adjacency relationships in a Vicsek model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.100.032603	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 -

1. 著者名 成塚拓真, 山崎義弘	4. 巻 63
2. 論文標題 対戦型集団スポーツの数理 サッカーを題材に	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 614-620
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Ken, Narizuka Takuma	4. 巻 98
2. 論文標題 Examination of Markov-chain approximation in football games based on time evolution of ball-passing networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.052314	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 -

1. 著者名 成塚拓真, 山崎義弘	4. 巻 423
2. 論文標題 映像に基づく姿勢データベース構築と時系列解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 統計数理研究所共同研究リポート	6. 最初と最後の頁 109-114
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 無
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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 瀧澤健太, 坂本郁也, 山崎義弘, 山本健, 成塚拓真
2. 発表標題 サッカーにおける選手の視覚情報の推定とパス分析への応用
3. 学会等名 第11回スポーツデータ解析コンペティション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香川溪一郎, 成塚拓真, 山本健, 山崎義弘
2. 発表標題 卓球の試合全体に対する3次元座標推定
3. 学会等名 第11回スポーツデータ解析コンペティション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成塚拓真, 山崎義弘, 瀧澤健太
2. 発表標題 運動モデルによる最小到達時間の定量化とスペースの評価
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧澤健太, 藤野沢哉, 成塚拓真, 山崎義弘
2. 発表標題 トラッキングデータに基づく運動モデルの妥当性の検証
3. 学会等名 第10回スポーツデータ解析コンペティション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成塚拓真, 瀧澤健太, 山崎義弘
2. 発表標題 運動モデルによる最小到達時間の定量化とサッカーのスペース評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成塚拓真, 瀧澤健太, 山崎義弘
2. 発表標題 運動モデルによる最小到達時間の定量化とサッカーのスペース評価
3. 学会等名 2020年度 統数研共同研究集会「社会物理学の新展開」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧澤健太, 成塚拓真, 山崎義弘
2. 発表標題 サッカーのトラッキングデータに基づく運動モデルの検証
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Narizuka Takuma, Yamazaki Yoshihiro
2. 発表標題 Characterization of the formation structure in team sports using Delaunay triangulation
3. 学会等名 DSSV2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成塚拓真
2. 発表標題 ドローンネットワーク法に基づく対戦型スポーツのフォーメーション解析
3. 学会等名 中山財団第26回研究成果発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成塚拓真, 瀧澤健太, 山崎義弘
2. 発表標題 運動モデルによる最小到達時間の定量化とスペースの評価
3. 学会等名 第9回スポーツデータ解析コンペティション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Narizuka Takuma, Yamazaki Yoshihiro
2. 発表標題 Burstiness for adjacency relationships in a Vicsek model
3. 学会等名 NetSci-X 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成塚拓真, 瀧澤健太, 山崎義弘
2. 発表標題 Vicsekモデルにおける隣接時間分布の統計則
3. 学会等名 日本物理学会2020年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuma Narizuka, Yoshihiro Yamazaki
2. 発表標題 Characterization of the formation structure in team sports by using Delaunay triangulation
3. 学会等名 Netsci 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成塚拓真, 山崎義弘
2. 発表標題 Vicsekモデルにおける隣接時間分布のバースト性について
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Narizuka, Yoshihiro Yamazaki
2. 発表標題 Burstiness in adjacency relationships of Vicsek model
3. 学会等名 APEF2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成塚拓真, 山崎義弘
2. 発表標題 映像に基づく姿勢のデータベース構築と時系列解析
3. 学会等名 第8回スポーツデータ解析コンペティション
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成塚拓真, 山崎義弘
2. 発表標題 Vicsekモデルにおける隣接時間分布のバースト性について
3. 学会等名 統計数理研究所共同研究会「社会物理学の新展開」
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 (分担執筆)成塚拓真	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 156
3. 書名 複雑系叢書－複雑系としての経済・社会	

〔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	山崎 義弘 (Yamazaki Yoshihiro) (10349227)	早稲田大学 (32689)	
研究協力者	山本 健 (Yamamoto Ken) (00634693)	琉球大学 (18001)	
研究協力者	瀧澤 健太 (Takizawa Kenta)	中央大学 (32641)	
研究協力者	香川 溪一郎 (Kagawa Keiichiro)	早稲田大学 (32689)	

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
---------	---------