

個人間相互作用を多重解像度で考える

Investigate Inter Personal Interaction by Multi-Resolution

今村健一郎^{1,2*} 笈康明³ 仰木裕嗣¹
Kenichiro IMAMURA^{1,2} Yasuaki KAKEHI³ Yuji OHGI¹

¹ 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

¹ Graduate School of Media and Governance, Keio University

² 日本学術振興会特別研究員 (DC1)

² Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

³ 慶應義塾大学環境情報学部

³ The Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract: Physical tacit knowledge is the way of acquiring the abilities to move our body by trial and error. Understanding of the relationship between body segments plays a key role in order to encourage learning the physical tacit knowledge. This study utilized the visualization as the tool for understanding its relationship.

1 はじめに

サッカーやバスケットボールなどの対人型のボールゲームでは、プレーヤー個人の華麗なドリブルや巧みなステップワークに魅了されたり、チームとしてのダイナミックかつ流れるようなパス回しに興奮するファンが世界中に存在する。このように第三者的立場で運動を観察したときに体感する「巧みさ」や「華麗さ」といった印象は、どのような要因に起因するのだろうか。著者は、その要因として運動のつながり、関係性という点に着目した。複数で行われるボールゲームでは、個人の能力だけでなく、集団（チーム）としての能力が問われる。図1に示すように、ボールゲームでは、身体部位 個人 集団という異なる層で起こる現象が相互に影響しあうことで成り立っている。この三層のつながりを巧くコントロールできるチームが、人々を魅了するチームだと考えられる。この場合は、身体部位の運動を協調させて個人の運動へと仕立てる「個人内相互作用ネットワーク」と、個人の運動を協調させて集団としての振舞いに仕立てる「個人間相互作用ネットワーク」の二つが重要な関係性ネットワークと考えられる。従来、個人の身体運動解析はスポーツバイオメカニクス等の研究分野で多く行われているが、より詳細に観察していく Analysis (分析) の考え方が多く、身体部位の運動情報を詳細に見て Synthesis (統合) し

ていった研究は数少ない。一方、多人数の集団行動を解析しようという試みは、サッカーやラグビー等で見られるが [1][2]、人間を質点に置き換えて、質点系でグラフ理論の適応や、ポテンシャル場を仮定して、多人数フォーメーションという群としての特性を理解しようという試みであり、個人の身体部位の運動までを加味して考えている研究は少ない。最終目標は、身体部位、個人、集団というスケールの異なる多重層間のつながりを定量表現・理解することである。今回は、その一歩として、集団としては最も少ない二人に関する個人間相互作用について検討した。試技は、一対一の駆け引き（左右方向追従動作）とした。

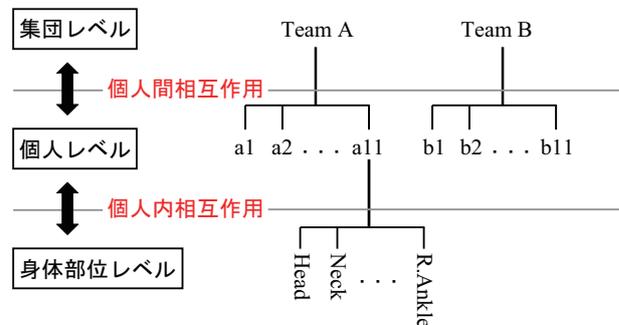


図 1: サッカーにおける空間スケールの三層構造

*連絡先: 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
〒 252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322
E-mail: imkn0926@sfc.keio.ac.jp

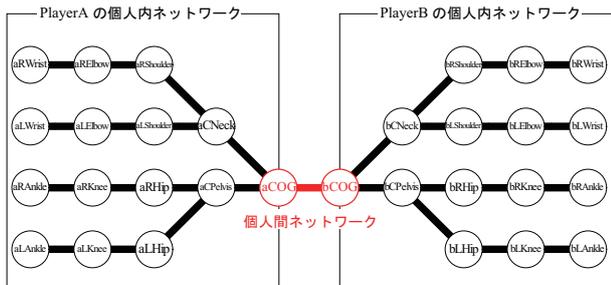


図 2: 個人内/個人間相互作用ネットワークモデル

2 解析方針

相互作用を考えるにあたり、相互作用特徴量 (=相互作用情報を伝播する媒体) を定義する必要がある。本研究では、第三者的立場から観察したときに得られる情報でどこまで相互作用系を理解できるかということに興味があるため、運動情報の大半は、視覚情報として得られるという状況を仮定する。視覚情報は、位置、速度、加速度等が考えられるが、本研究では、運動を姿勢情報の動的変化と考えるため、運動の流れや「いきおい」を表す速度情報を採用する。個人内/個人間相互作用を統合して考えていくために、図2(重心からなる木構造)に示すような木構造のネットワークモデルを利用する。今回は、個人間相互作用ダイナミクスを、両者の重心速度関係から検証する。また、速度関係としては「大きさ関係」と「方向関係」が考えられるが、今回は「方向関係」に着目した。各身体部位や個人の発揮できる速度の大きさには限りがあるため、大きさをどのような方向に制御するかということが重要と考えるためである。

3 計測及びデータ処理

光学式のモーションキャプチャシステム (MotionAnalysis 社製 MAC3DSystem) を用いて一対一駆引きを三次元計測した。今回、対象とした一対一駆引きは、攻者の左右方向の移動運動に対して守者が追従するという動作である。正対した時の互いの距離は、常に3[m]程度離れるようにし、移動範囲は左右に1[m]ずつ、合計2[m]の範囲内での側方移動とした。計測のサンプリングレートは250Hzで行った。計測した三次元座標データは、遮断周波数20Hzの双方向ButterWorth型デジタルフィルターによって平滑化した。なお、遮断周波数は残差分析[3]を用いて決定した。その後、計測したマーカー座標値から、関節中心点15点を特徴点とし、三次元座標を算出した。特徴点15点はそれぞれ、体幹3点(頭頂点、胸郭中心点、骨盤中心点)、左右上

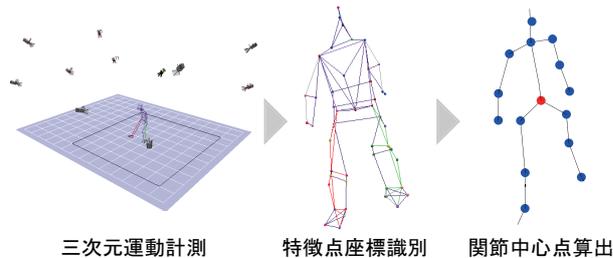


図 3: 計測から関節中心点算出までの概念図

肢各3点(肩峰点、肘関節中心点、手関節中心点)及び、左右下肢各3点(大転子点、膝関節中心点、足関節中心点)とした。本研究では、図3中に示されるような、関節中心点と体節リンクモデルを基に攻者及び守者の関節中心点速度を求めた。被験者はサッカー及びフットサルの経験者2名とし、攻者と守者の立場を入れ替えて2パターンの計測を行った。

4 重心間水平速度相関値の観察

本研究では、個人間相互作用を攻者と守者の重心速度の関係性から考えていくが、まず、二点間の速度関係をどのように解釈すればよいかという事から考える必要がある。今回対象とする1対1は、左右方向への移動に限られているため、攻者は守者の移動方向と逆方向に移動することを目指し、守者は攻者の移動方向と同方向に移動することを目指すことになる。定量的に表現すると、互いの水平速度の相関値(内積)を攻者は1、守者は-1にすることを目指すと考えて良い。水平速度相関値 ($VelCorr$: Correlation of Horizontal Velocity) は、式(1)に示すように定義する。

$$-1 \leq VelCorr(t) = \frac{\mathbf{V}_1(t) \cdot \mathbf{V}_2(t)}{|\mathbf{V}_1(t)| * |\mathbf{V}_2(t)|} \leq 1 \quad (1)$$

この式を用いて、二人の被験者が攻者と守者の立場を入れ替えた試技二パターンの重心間水平速度相関値を観察していく。ちなみに、パターンAを攻者がフェイントに成功した場面が存在する試技とし、パターンBを攻者と守者を入れ替えて計測したもので、フェイントに成功した場面が存在しない試技とする。本章では、一例としてパターンAの相関値時系列波形を図4に示す。この図より、計測開始時に1近辺でのゆらぎがあり、その後は、多くの時間帯で1であることが多く、時々、瞬間的に-1になることがわかる。また、1200~1400フレーム辺りでは、-1の時間帯が長く続いていることがわかる。この一連の流れを現象と照らし合わせてみると、初期のゆらぎは、両者が動き出す前に構えている状態であることがわかる。速度の大きさはほぼ

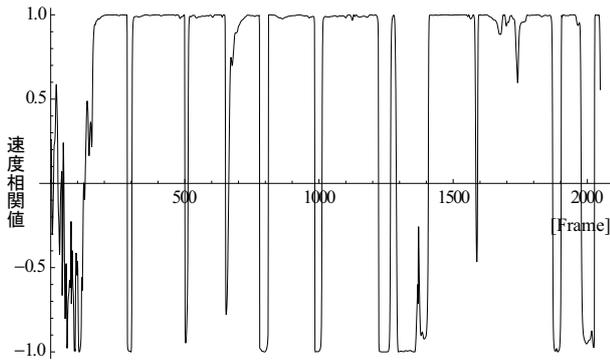


図 4: 重心間水平速度相関値 (パターン A)

0 であり、大きさ関係で見ると非常に安定した定常状態に見えるが、その分、互いの速度方向は定まっておらず、どの方向へも動き出しが可能な緊迫した状態といえよう。駆引きにおける静止状態のにらみ合いの状況、つまり、「不安定なつりあい」の状態が適切に表現できている。その後、1 が多く続く時間帯は、守者が攻者の重心速度の方向と同方向に移動していることを示している。駆引きにおける攻者の戦略は、基本的に守者に追従させておき、ある瞬間に相手を外す（逆方向に動く）ことを狙うため、守者が追従している状態が 1 が長く続いているということに表れている。瞬間的に -1 になるフェーズは、攻者が方向転換してすぐに守者が同方向に移動できていることを示している。攻者が方向転換を行い、相関値が -1 になる瞬間に、守者も方向転換を行い相関値を 1 に戻しているために、-1 のピークが現れている。1200 ~ 1400 フレームの辺りでは、攻者が方向転換を行ってから同方向に守者が方向転換を行うまでに、大きな時間差が見られるということである。この時間帯、攻者は、左 右 左というサイドのフェイントを駆けることで、追従させないことに成功していた。また、位相状態と方向転換の関係で考えると、守者が追従できている段階は、1 が基本の位相状態になっており、攻者が先手で -1 に状態を移すとすぐに守者が 1 に戻すというやりとりが行われているのであるが、守者が追従できずに攻者に外されている段階では、-1 が基本の位相状態になっており、守者が先手で 1 の状態に移すとすぐに攻者が動く方向を変えて -1 の状態に戻すという状況にあると考えられる（図 5 参照）。以上を整理すると、-1 のピークが現れた場合は、攻者が先手の方向転換が行われた瞬間であり、1 のピークが現れた場合は、守者が先手の方向転換が行われた瞬間である。それぞれの現象は、高周波成分として現れるだろう。また、1 の時間帯が長い場合は、守者が追従している時間帯であり、逆に、-1 の時間帯が長い場合は、攻者が守者を外している時間帯である。それぞれの現象は、低周波成分として現れると考えられ

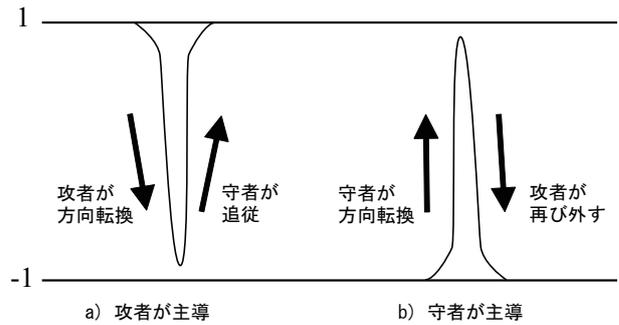


図 5: 主導と追従の関係性

る。以上を踏まえると、速度相関値の波形を周波数成分ごとの時系列データに分解できれば、目まぐるしく方向転換がやりとりされている波形と、結果としての位相の遷移状態に分解することが可能になると考えられる。

5 ウェーブレット多重解像度解析

ここでは、重心間水平速度の相関値を周波数帯域ごとに分解した時系列データを算出し、方向転換による急峻なやりとりと、位相の遷移状態の緩やかな変化を分解する方法として、ウェーブレットによる多重解像度解析について説明していく。

一対一駆引きのような運動は、前後文脈や相手との関わりによって、急に止まったり、突然動き出したりと非正常かつ非周期的な現象である。このような現象の周波数解析には、従来、短時間フーリエ変換を利用した例が数多い。短時間フーリエ変換の周波数分解能は、サンプリング定理に基づくナイキスト周波数 f_n と窓関数の持続時間（時間窓幅） W によってのみ定まる。算出可能な周波数帯 f_s は、 $1/2W < f_s < f_n$ となる。例えば、サンプリング周波数が 250 [Hz] かつ時間窓幅が 1/5 [s] の場合、 $f_n = f_s/2 = 125$ [Hz] で $1/2W = 1/2 \times 1/5 = 2.5$ [Hz] であるため、抽出可能な周波数帯域は 2.5 ~ 125 [Hz] となる。ただし、この方法では、抽出可能な周波数帯域内成分の敏感な変化に対応できない可能性が高く、結局のところ、観察したい周波数帯域を設定しておいて、その帯域に適した窓幅を設定しておかなければならないという問題が残る。この問題を解決する方法は、周波数に応じて窓幅を変更するという考え方である。それを実装したのが、ウェーブレット変換による波形分解である。ウェーブレット変換は、基準となるマザーウェーブレットを定義し、そのスケールを拡大・縮小した波形の組み合わせによりデータを時間周波数平面上に分解する方法である。マザーウェーブレットの拡大・縮小を通じて、それぞれの周波数帯域の

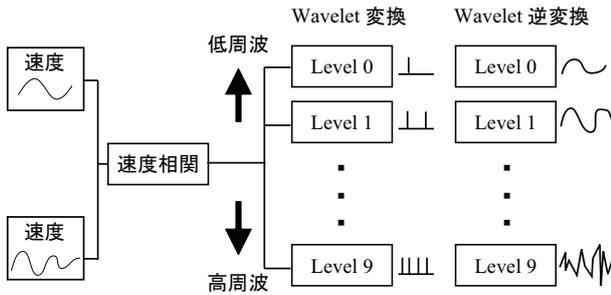


図 6: 多重解像度解析の概略

表 1: WaveletLevel とその対応周波数領域

Level	対応周波数帯域 [HZ]
Level 0	$2.44 \times 10^{-1} \sim 4.88 \times 10^{-1}$
Level 1	$4.88 \times 10^{-1} \sim 9.76 \times 10^{-1}$
Level 2	$9.76 \times 10^{-1} \sim 1.95 \times 10^0$
Level 3	$1.95 \times 10^0 \sim 3.91 \times 10^0$
Level 4	$3.91 \times 10^0 \sim 7.81 \times 10^0$
Level 5	$7.81 \times 10^0 \sim 1.56 \times 10^1$
Level 6	$1.56 \times 10^1 \sim 3.13 \times 10^1$
Level 7	$3.13 \times 10^1 \sim 6.25 \times 10^1$
Level 8	$6.25 \times 10^1 \sim 1.25 \times 10^2$
Level 9	$1.25 \times 10^1 \sim 2.50 \times 10^2$

成分を抽出するのに適した窓が自動的に割り当てられることになる。基準データやフーリエ変換後のデータと異なり、時間分解能または周波数分解能のいずれか一方が厳密にわかるわけではないが、両方がおおよその精度で把握できる。この方法は、人間の動作の関係性を判断するような場合には十分だと考えられる。従って、本研究では、速度相関波形を時間的、周波数的に局在化する方法として、ウェーブレット変換を利用した。また、ウェーブレット変換により得られた時間周波数平面上に局在したスペクトルを、周波数帯ごとにウェーブレット逆変換を通すことで、周波数帯域ごとの波形成分へと分解することができる。この方法は多重解像度解析と呼ばれる方法である。理論の詳細は省くが、ウェーブレットによる多重解像度解析のアルゴリズムの概略を図 6 に示す。

また解析の都合上、データ数は二のべき乗でなければならないという拘束があるため、今回は、解析した駆引き試技では時系列のデータ数 2^{11} 個採取した。マザーウェーブレット関数としては、分解した波形間の正規直交関係を約束するために、四次のドブシー (Daubechies) 関数とした。分解周波数領域は、表 1 に示す 10 段階となる。Level0 が最も低周波で Level9 が最も高周波の成

分を表している。

6 重心間相互作用ダイナミクス

6.1 攻者が成功した試技例 (パターン A)

図 7 にパターン A の重心間水平速度の相関値を多重解像度分解した結果を示す。この図は、横軸を時間、縦軸を周波数帯の各 Level として、水平速度相関値を等値線 (ContourMap) として表したものである。各等値線間の色は、-1 が黒、1 が白とし、間を -1 ~ -0.6, -0.6 ~ -0.2, -0.2 ~ 0.2, 0.2 ~ 0.6, 0.6 ~ 1.0 の 5 段階にわけて表示したものである。各 Level の波形間は単純に線形補間を行い変化を見やすくした。また、図中の白い波形は、同様の水平速度相関値を各レベルごとに示したものである。等値線の色から全体的な傾向を読み取り、白い波形から細かな変化を読み取ることができる。図において、Level7 ~ 9 (15.6Hz ~ 125Hz) の高周波数帯域では、重心間の急峻な変動成分が取り出せており、動作開始時の不安定状態及び駆引きの切り返し局面等が、高周波成分として抽出できていることがわかる。そして、Level0 ~ 3 (0.12Hz ~ 1.95Hz) の低周波数帯域では、1200-1400 フレームあたりで、両者の水平速度相関値が -1 の状態に遷移していることが読み取れる。多重解像度解析を利用することで、駆引き時の方向転換などの細かく激しいやりとりと、大きく攻者に外された守者の様子を分解して定量表現することができた。また、前述したように、+1 方向のピーク (白) は、守者が先手で攻者が対応というフェーズであり、-1 方向のピーク (黒) は、攻者が先手で守者が対応というフェーズであるが、白と黒が交互に現れていることから、必ずしも守者が後手の動きをしているわけではないことがわかる。例えば、1200 フレーム辺りから攻者が守者を外す時間帯になっていくが、その前の時間帯 (1000 フレーム辺り) に、一度色が白に近づいていることがわかる。これは、攻者が守者を外す動作を行う前の時間帯に、一度、守者を引き込んでいることを示している。あえて自分の移動方向に合わせるように仕向けることで、次の方向転換をより効果的な動作に仕立てていると考えられる。

6.2 守者が成功した試技例 (パターン B)

図 8 にパターン B の重心間水平速度相関値の時系列波形を示す。パターン A の波形と比較して気づくことは、攻者が方向転換してから守者が方向転換するまでの時間差、つまり、-1 になってから 1 になるまでの時間差が全体的に長いということである。時間差はおおよそ 200 [ms] 程度であるが、傍から見た印象としても攻者

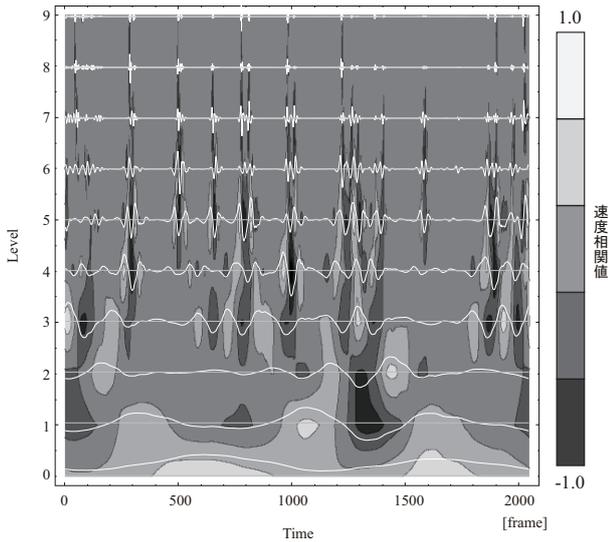


図 7: 重心間水平速度相関値の多重解像度分解 (パターン A)

に外されているという印象はないし、守者自身も対応できているとの印象を抱いていたようだ。攻者の移動方向にすぐさま対応しているわけではないが、決して外されていないわけではない。少し緩く対応していくことで、結果的に攻者に抜かれもしないし、疲労度合いも少ない戦略をとっていると考えられる。図 9 に多重解像度で表現した等値図を示す。等値図を見る限り、方向転換において、Level4 (3.9~7.8Hz 程度) 程度の時間差が最も多いことがわかる。つまり $4[Hz] = 250[ms]$ なので、今回の条件での駆引きにおいては、時間差を $250[ms]$ 以下に抑えることができれば、守者は攻者に抜かれまいと考えられる。また Level4 では、黒と白の模様が目まぐるしく移り変わっていることから、動きの主導を握る者が、攻者と守者で頻りに動き回っていることを示す。このことは、位相の遷移状態を示す低周波の模様が、相関値 0 付近であることに現れている。つまり、どちらがどちらが主導なのかということがはっきりわからず、混沌とした状態で駆引きが行われているということであろう。守者が追従という図式が必ずしも当てはまっていない例と考えられる。

7 考察

今回は、速度相関値を利用して個人間相互作用のダイナミクスを多重解像度で観察する方法を紹介した。この方法の特徴は、高周波数帯域で観察できるような目まぐるしい変化が、結果としての低周波数帯に、どのように影響していくかという変動の様子をひとまとめにして可視化表現した点にある。今回は一対一駆引きの重心

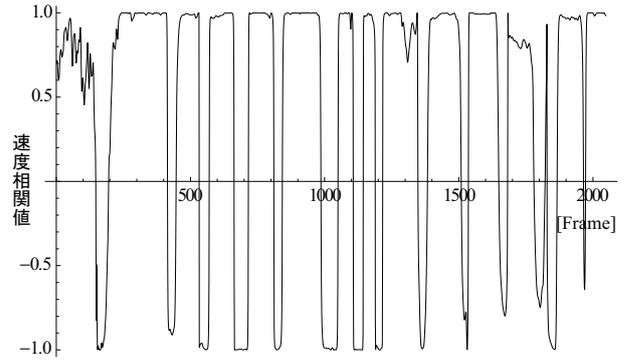


図 8: 重心間水平速度相関値 (パターン B)

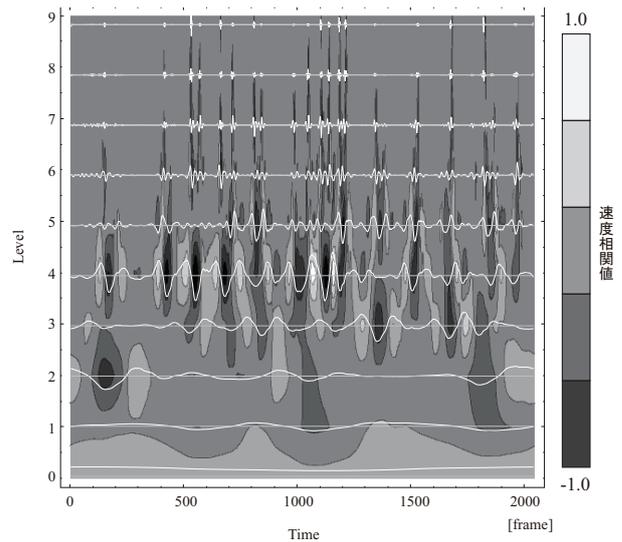


図 9: 重心間水平速度相関値の多重解像度分解 (パターン B)

間相互作用への適応例を示した。高周波数帯域 (Level7~9) を観察することで、両者の方向転換のタイミングが確認できた。そして、高周波数帯域で方向転換により、時間ずれが重畳すると、中周波数帯域 (Level4~6) で検出できるようになる。実際の駆引きの能力は、中周波数帯域を制御する能力にあると筆者は考えている。両者の速度相関波形がこの帯域より高い周波数帯に存在すれば、互いの速度方向が大きくずれずに守者の成功となる。逆に、中周波数帯域より低い周波数帯に影響が出てくれば (この場合だと、-1 が出てくれば)、攻者の成功と言って良いだろう。今後は、冒頭で述べたような個人内・個人間速度相関ネットワークを検討して、身体部位間、個人間の関係性を理解することで、個人及び集団の運動理解及びそれぞれの影響度合いを理解できるような仕組みを考えていきたい。時間的にも空間的にも多重の解像度で考えることでサッカーの現

象包括的に理解できることを目指す。

謝辞

本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費（課題番号：194141）による援助を受け，実施いたしました。

参考文献

- [1] 瀧剛士, 長谷川純一.: ”チームスポーツにおける集団行動解析のための特徴量とその応用”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81, No.8, pp1802-1811, 1998
- [2] 佐々木真一郎, 守田了.: ”フォーメーションマップを用いたサッカーの組織的プレー”, 情報処理学会研究報告 知能と複雑系, Vol.2000, No.55, pp25-32, 2000.
- [3] Winter.D.A, ”Biomechanics and Motor Control of Human Movement 3rdedn”, John Wiley and Sons, New York, 2004.