

運動情報の可視化表現

Visualization of Kinematical Information

今村 健一郎*1*2
Kenichiro IMAMURA

仰木 裕嗣*1
Yuji OHGI

*1 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

*2 日本学術振興会特別研究員 (DC1)
Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

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

身体知とは身体が覚えこんだ技能やコツのことであり、暗黙知とも呼ばれる [Polanyi 83]。知識構築のためには、五感により受信される情報の存在が必須である。対して、身体知の構築のためには受信される情報を受けた後に、脳から身体そして外部へと発信する情報が重要になる。脳～身体～外部へと発信する情報の形態は伝わる媒介（脳、神経、筋、骨など）によって変化する。例えば、脳、神経、筋を伝った電気信号は、筋の伸縮により関節を通じて骨を動かす、運動情報へと変換されると考えられる。すなわち、これ以降で述べる運動情報はキネマティクス情報と同義とする。筆者は、中枢神経系で発揮した電位情報が運動情報に変換されるまでのプロトコル、あるいは運動情報によりもたらされる外環境の変化までを含めたプロトコルが身体知ではないかと考えている。古川ら [古川 05] は、同様の概念を「動作一貫性制約条件」と定義している。いずれにしても、受信する情報が形式知であり、発信する情報のプロトコルを身体知と呼ぶのではなからうか。まさに「What」ではなく「How」の追求といえる。

上記概念を踏まえて、本研究では、「運動情報流れの関係性を可視化する」という課題に取り組む。この課題に取り組む意義は四点ある。一つ目は、運動情報が、身体と環境との境目にあるということである。身体知が知識である以上は、知（本質）、造（獲得）、伝（伝承）、創（創出）という役割を果たす必要がある。そのためには、外環境との関わりについて考える必要があり、運動情報のレベルで考察することが適切といえよう。二つ目は、情報の流れに着目するという点である。身体知が情報を流す際のプロトコルという考えに則ると、身体知の評価は情報の流れから評価できるという考え方が素直に思える。三点目は、関係性に着目するという点である。情報の流れの解析方針である。情報の流れを理解するためには、絶対的な流れそのものを理解する方法と相対的な変化のみを理解する方法が考えられる。本研究では、後者の立場をとる。相対的な理解とは、言い換えれば関係性を把握することであり、身体部位間の運動情報の関係性や他者の運動情報との関係性などを理解できる可能性がある。四つ目は、可視化という表現方法である。運動情報流れの関係性をすんなりと理解するためには、「一目でわかる」ような可視化表現が有効である。以上を踏まえて、本発表では、運動情報流れの関係性を色で表現することで一見

して情報を把握する可能性について検討した。

2. 運動情報の取得

2.1 対象試技

本研究は運動情報の可視化を目的とするため、その意義が理解しやすいように全身を使ったダイナミックな運動が適していると考えられる。また協調関係や安定度合い、再現性などの運動情報の関係性の理解のしやすさを考慮すると周期運動が適しているだろう。サッカーのボールリフティングは下肢をメインに運動が行われ、足とボールのインタラクションが行われる。またボールの挙動を確認する必要があるため頭部を安定にした状態で目で追うという運動が含まれ、体幹の安定性を得るために上肢の動きもある全身運動である。また、熟練者になると左右交互の足でほぼ周期的に運動が行われるため、ダイナミックな周期特性を持つ運動と言えよう。以上の理由から今回の実験では、ボールリフティングを対象試技とした。

2.2 計測及びデータ処理

Motion Analysis 社製 MAC3D System を用いて、ボールリフティング時の身体運動を三次元計測した。今回は運動情報に着目するためリフティングのパフォーマンスについては言及するつもりはない。そのためボールの挙動についての計測は行わなかった。被験者はサッカー経験 10 年、フットサル経験 4 年の中級者 1 名とした。両足を使ったボールリフティングを連続して行うことに支障はない者であった。計測後にデータ処理を行い、関節中心点座標を算出するまでの概略を図 1 に示した。本研究では、図 1 中の右図に示されている関節中心点と体節リンクのモデルを元に運動特徴量を算出した。

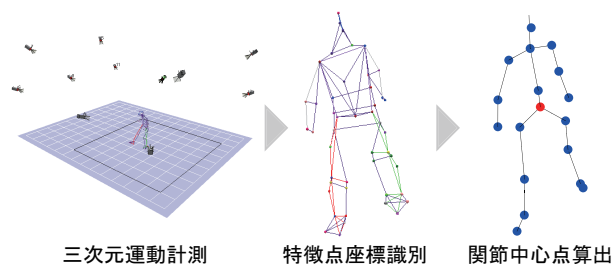


図 1: 計測から後処理までの概略図

連絡先: 今村健一郎, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科, 神奈川県藤沢市遠藤 5322, imkn0926@sfc.keio.ac.jp

3. 運動情報特徴量

3.1 「姿勢」と「運動流れ」

身体運動が行われる際の運動情報として、体節リンクベクトルと骨盤中心に対する関節中心点の速度を採用した(図2)。身体運動は姿勢制御と速度制御のバランスが重要だと考えられる。動作の型を追求するような運動においては姿勢制御の比重が大きく、滑らかに動くなどの流れを追及するような運動においては速度制御がより重要になると考えられる。

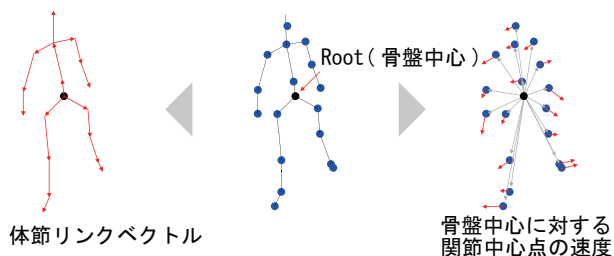


図2: 姿勢と運動流れの定量的解釈

3.2 「大きさ」と「方向」

運動情報に限らずベクトル表現される情報には「大きさ」と「方向」の2種類の特徴量が含まれる。通常のベクトル演算と同様に、「大きさ」は絶対値で表現され、「方向」は基準軸ベクトルとの内積計算により算出される。以降では、ベクトル情報間の相対関係を比較する方法として大きさ変化と方向変化に着目する。

3.3 特徴量

以上を踏まえ、本研究では、姿勢と流れそれぞれの大きさと方向を運動情報の特徴量として検討する。ただし、姿勢ベクトルの大きさはリンク長と同義であり、身体固有の値であるため特徴量には適さない。本研究では、図3に示す三種類を運動情報特徴量とした。

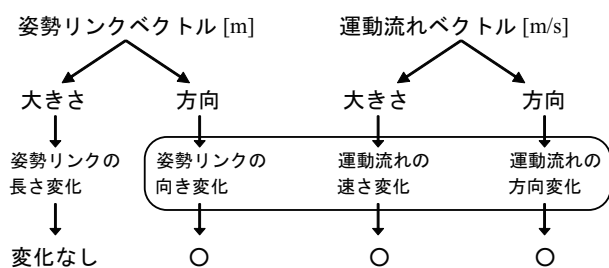


図3: 運動情報の特徴量三種類

4. 時系列相関行列

本節では、式(1)、(2)に示すベクトル関数 $F(t)$ と $G(t)$ を仮定して手法を概説していく。

$$F(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad (1)$$

$$G(t) = (u(t), v(t), w(t)) \quad (2)$$

4.1 「大きさ」相関値

ベクトル関数 $F(t), G(t)$ の大きさの相関値を定義する。以降、大きさの相関値を $AbsCorr$ (AbsoluteCorrelation) として、値域と定義式を式(3)に示す。

$$0 \leq AbsCorr(t) = \frac{\min[|F(t)|, |G(t)|]}{\max[|F(t)|, |G(t)|]} \leq 1 \quad (3)$$

時刻 t における $F(t)$ と $G(t)$ の値のうち、大きい方を分母に小さい方を分子にすることで、値はスカラー値になり $0 \sim 1$ の範囲で変化する。相関が高いと 1 付近の値をとり、相関が低いと 0 付近の値となる。

4.2 「方向」相関値

ベクトル関数 $F(t), G(t)$ の方向の相関値を定義する。以降、方向の相関値を $DirCorr$ (DirectionCorrelation) として、値域と定義式を式(4)に示す。

$$-1 \leq DirCorr(t) = \frac{F(t) \cdot G(t)}{|F(t)| * |G(t)|} \leq 1 \quad (4)$$

式中の“ \cdot ”は内積を示し、“ $*$ ”は掛け算を示すものとする。 $F(t), G(t)$ の単位ベクトルの内積であり、両ベクトルの為す角度を余弦 (Cos) で示したスカラー値になる。値域は $-1 \sim 1$ の範囲である。全く相関がない場合が 0 付近の値をとる。方向、向きともほぼ同等の場合に正の相関が高く 1 付近の値をとり、方向は似ているが向きが真逆である場合に負の相関が高く -1 付近の値となる。

4.3 相関行列

前項では、 F, G という2種類の一変数ベクトル関数を仮定して、相関値に関する説明を行った。実際の身体運動では変数が多数存在する場合がほとんどなので、多変数のベクトル関数を取り扱う必要がある。ここでは多変数ベクトル関数のリストとして行列 A と B を仮定し、相関行列の算出手順及び可視化方法を示す。行列 A, B をそれぞれ、式(5)、(6)に定義する。実際に比較する特徴量の個数は同じであるため、今回も行列 A, B の変数は同数 n とした。括弧外の上付き添え字 T は転置を示す。

$$A = (F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t))^T \quad (5)$$

$$B = (G_1(t), G_2(t), \dots, G_n(t))^T \quad (6)$$

A と B の「大きさ」と「方向」に関する相関行列の定義を考える。いわゆる自己相関・相互相関行列は、相関を計算する二種データ間の時間をずらして全時刻の相関値を算出する。その相関値群の平均値を算出し、平均値を n の関数とするというやり方で結果的に時系列データのように見えるが、正確な意味の時系列データではない。従って今回は、同時刻のデータ間の相関値を計算した値をそのまま行列の値とする。この方法によれば時々刻々の時系列データが算出可能となる。式中の $AC[p, q]$ と $DC[p, q]$ は、それぞれ p と q の $AbsCorr, DirCorr$ を表し、 $AbsM(t)$ と $DirM(t)$ は F と G の相関行列を表すものとする。

$$AbsM(t) = \begin{pmatrix} AC[F_1(t), G_1(t)] & \dots & AC[F_1(t), G_n(t)] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AC[F_n(t), G_1(t)] & \dots & AC[F_n(t), G_n(t)] \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$DirM(t) = \begin{pmatrix} DC[F_1(t), G_1(t)] & \dots & DC[F_1(t), G_n(t)] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DC[F_n(t), G_1(t)] & \dots & DC[F_n(t), G_n(t)] \end{pmatrix} \quad (8)$$

本研究では「姿勢リンクの向き変化」,「運動流れの速さ変化」,「運動流れの方向変化」の三種類の相関行列を検討していく。

5. 関係性の可視化

5.1 配色定義

大きさ相関値と方向相関値で値域が異なるため、配色はそれぞれ定義する。大きさ相関値は0から1の間で白から黒へと連続的に変化するグレースケール値を割り当て、方向相関値は温度の色相としてよく使われる配色を使用した。それぞれの配色を図4に示す。

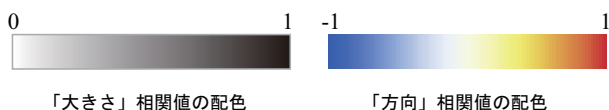


図4: 相関値に対応する配色定義

5.2 RCM (Relational Color Matrix)

配色定義を基に相関行列を可視化することで生成される図5に示すような行列をRCM (Relational Color Matrix) と定義する。実際のデータを基に時系列相関行列を可視化するとRCMが時系列変化していく様を観察することができる。関係性を一目で把握するという目的に沿った可視化表現方法の可能性がある。

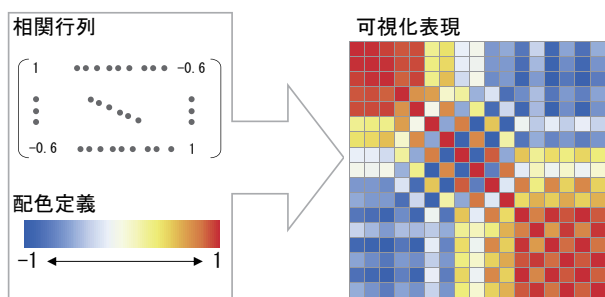


図5: Relational Color Matrix の生成 ~ 「方向」相関の場合 ~

6. ボールリフティングのRCM

6.1 RCMの構成

連続して左右足交互にボールを突いている際の運動情報を解析対象とする。左, 右, 左の順に蹴った時区間を周期とした。今回は28周期分のデータについて検証した。

運動中の体節間相互関係を把握するために、姿勢リンク及び関節中心点相対速度それぞれ特徴量17種類の総当りをRCMで表現した。姿勢リンクおよび関節中心点17種は行及び列の1番目から順に体幹部3種(頭部, 胸郭部, 腹腰部), 右上肢3種(右肩, 右上腕, 右前腕), 左上肢3種(左肩, 左上腕, 左前腕), 右下肢4種(右股関節, 右大腿部, 右下腿部, 右足部), 左下肢4種(左股関節, 左大腿部, 左下腿部, 左足部)とした。

6.2 周期平均RCMの観察

RCMは姿勢リンクの向き変化, 運動流れの速さ変化と方向変化の3種類とえられる。それぞれのRCMは 17×17 の対称行列であるため、意味のある次元は上三角行列(あるいは下三角行列)の153($= (17 \times 17 - 17) / 2 + 17$)個である。姿勢の向き変化を表す153次元, 運動流れの速さ変化を表す153次元, 運動流れの方向変化を表す153次元の計459次元が時系列コマ数分存在している。このデータを数値のままヒトが把握することはほぼ不可能であるが、RCMに置き換えれば直感的な理解が可能である。以下の解析では、周期ごとの各身体部位間の協調特性を比較して、運動中に各部位間が姿勢および速度をどの程度協調させながら運動しているかを把握する。図6に10周期目の周期平均RCMを示す。

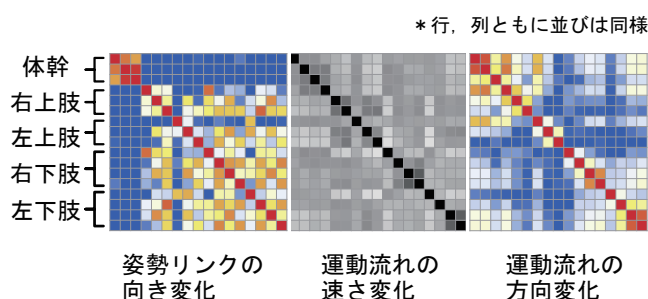


図6: ボールリフティング時のRCM (左足 右足 左足)

28周期のそれぞれの周期平均RCMを観察すると、「姿勢リンクの向き変化」及び「運動流れの速さ変化」の周期平均RCMは、全周期でほぼ同様の色模様が確認できた。詳細に見ると細かい差は見られるものの28試技分を並べてみる限り大きな差は確認できなかった。「運動流れの方向変化」の周期平均RCMでは、試技ごとに上肢及び下肢の運動流れで色模様が大きく変動していることが確認できる。特に12周期目では、他の周期と比較して顕著に色模様が異なる(図7)。

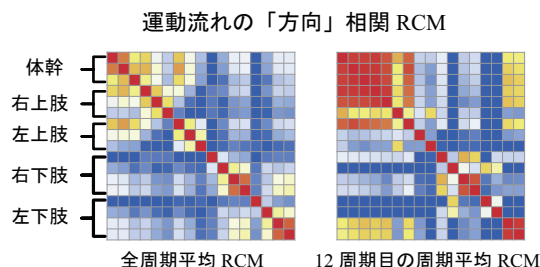


図7: 全周期と28周期目の運動流れ方向RCM比較

6.3 協調特性指数と協調安定指数

周期平均RCMの上三角行列成分153次元の平均値は、周期全体における全身の協調度合いを表す値である。この値を運動の「協調特性指数」と定義する。また周期平均RCMの上三角行列全成分の標準偏差は、協調関係の安定度合いを示す指標になり得る。この値を運動の「協調安定指数」と定義する。前項にて12周期目の運動流れ方向RCMが他と顕著に異なる色模

様であった．その様子を定量的に検証するために、各周期の運動流れ方向の協調特性指数及び安定指数を図 8、9 に示す．

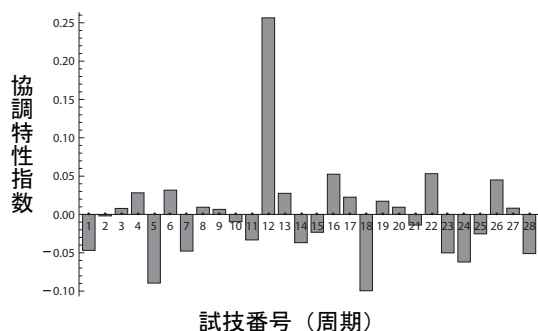


図 8: 協調特性指数 (運動流れの方向変化)

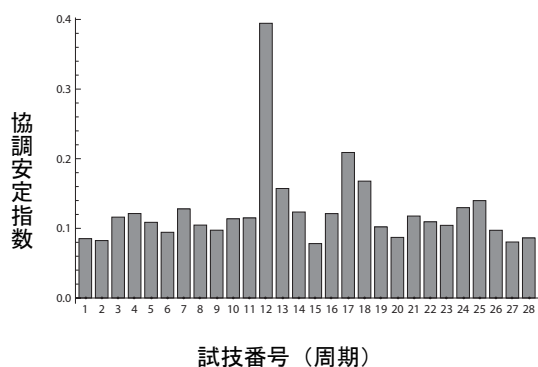


図 9: 協調安定指数 (運動流れの方向変化)

上図から明らかなように、12 周期目は協調特性指標が高くかつ協調安定性指数も高い．しかし、この理由は必ずしもパフォーマンスが良いという理由には結びつかない．12 周期目を観察すると、ボールが足元に入りすぎたために、体幹を前に前傾させながらつま先でボールを突くような細かい動きであった．指数からは協調度合いが高いという情報しか得られないが、RCM を一目見るだけで、体幹と右上肢の体幹近位（肩、上腕）及び左下肢の末端部位（下腿と足部）が高い相関値で協調しながら運動している様が理解できる（図 7 参照）．

7. 展望

本研究では、情報を圧縮せずに一目で理解するということを目的として RCM を作成した．結果欄では触れていないが、RCM を見ると明らかに他と異なる色模様であるにも関わらず、平均値や標準偏差で算出した協調特性指数や協調安定指数に反映されていない情報もあった．裏を返せば、平均値や標準偏差を求めることで埋もれてしまった情報が直感的に理解できる可能性を RCM は秘めているということになる．自己相関・相互相関行列を用いた身体運動解析に関する運動は、これまでも行われている [山根 05], [中田 05]．画像処理と理解に関する分野では、なるべく数が少なく多くの情報量を含んだ特徴量を算出するための方法論が数多く提案されており、選ばれた特徴量を用いて機械的に学習させることで精度良くパターンを認識

できる識別器の開発が目下の目標となっている [川嶋 06]．この理由は、自動的に識別、認識、学習をさせることが目的のためである．しかし、人間の場合は認識、学習を行うこと自体が目的になっていることもある．身体知を獲得するための支援方法は、学習を自動化するためではない．運動情報の可視化は、まさに学習支援ツールに成り得る．一目で全ての情報を見ることができると、その意味・理解は学習者に委ねるという立場の研究といえる．多くの試技をとり、直感的に関係性を理解することが今後まず行うべき課題である．

8. 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）による援助に基づき行った．

9. 参考文献

参考文献

- [Polanyi 83] Polanyi, M.: *The Tacit Dimension*, Peter Smith, Gloucester, Mass(1983).
- [古川 05] 古川康一, 植野研.: AI とスキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol.20, No.5, pp.510-517 (2005).
- [山根 05] 山根亮, 尺長健ら.: 動作データの時系列相関行列による舞踊動作解析, 画像の認識・理解論文特集, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-D- , No.8, pp.1652-1661 (2005).
- [中田 05] 中田亨.: 身体運動の時間分節化と行動認識: 部位の動作相関分析による方法, 計測自動制御学会, 第 32 回知能システムシンポジウム資料, pp.449-453, (2005).
- [川嶋 06] 川嶋宏章, 西村拓一.: コンピュータビジョンにおける時系列パターン認識, 情報処理学会研究報告, Vol.2006, No.51, pp.197-206 (2006).