

氏名	秋月 拓磨
所属機関	豊橋技術科学大学
研究題目	運動スキル分析のための運動時系列の記号化に関する研究

### 1. 研究の目的

近年、ユビキタスセンサやウェアラブルセンサを用いて人の日常行動を計測・分析する行動センシングの研究がすすんでいる。人の行動理解を目的としたこれらの研究では、身体に取り付けたセンサから得られる時系列データについて、データに内在する個人の特徴を分析することが中心課題のひとつとなっている。たとえば、動作のクセや熟練度の違いをセンサデータに基づき定量的に分析できれば、技能レベルの定量評価や個人にあわせた技能教育プログラムの開発に寄与できる。しかし、これらのデータは身体動作に由来するゆらぎやノイズを含み、かつ非線形ダイナミクスが支配的なため従来の信号解析技術の適用が困難である。この問題に対して、申請者らは最近、力学系理論におけるアトラクタの概念を用いた時系列データ解析法を提案した。今後は、解析の対象動作を拡大し、実際のデータに適用することで起こりうる問題を洗い出す必要がある。そこで本研究では、研究基盤の構築にむけたアルゴリズムの改良と分析をすすめることを目的とし、身体動作の個人性評価手法の確立をめざす。

### 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

前述の目的の下、本研究ではモーションキャプチャデータなどの運動時系列データに内在する個人性を定量評価する方法を構築するとともに、歩行運動の解析を通して、提案手法の技能教育への応用可能性を検証した。

#### (研究手法)

独自提案する時系列データ解析法（以下、アトラクタ解析法）は、図1に示すように、運動時系列を相空間（位相空間）上に展開し、そこに描かれる曲線軌道を身体各部の協調動作のパターンとして利用する。

本研究では、まず(1)アトラクタ解析法の解析コードの整備とその妥当性検証を行う。具体的には、時系列データ間の類似性を係数間距離で評価するために、いろいろな距離尺度を導入しながら、差異の物理的意味を数値シミュレーションにより比較・検証する。検証には上肢・下肢動作を模した力学モデル（振り子モデルや受動歩行モデル）から生成した時系列データに、ガウスノイズを加えたものを用いる。また、力学モデルにおける物理パラメータの違いを個人差（体格や柔軟性の違い）、ガウスノイズを動作の揺らぎ、とそれぞれ捉えて、これらの条件を変えながら各データの係数間距離がどのように変化するかを系統的に調べ、距離の物理的意味付けを行う。

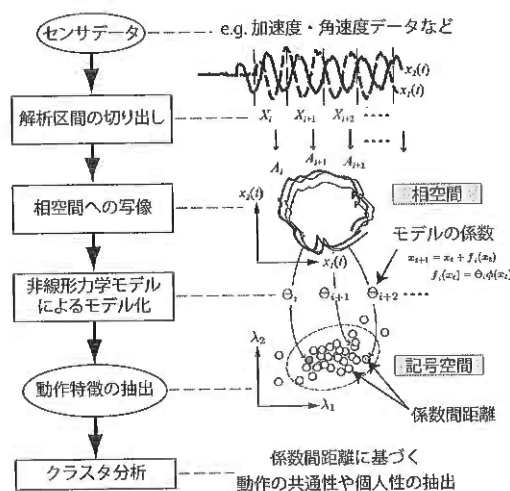


図1: 軌道アトラクタを用いた時系列データからの動作特徴抽出の流れ。

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

次に (2) 係数間距離に基づく身体動作データのクラスタリングを行う。実際の身体動作データに対してアトラクタ解析法を適用し、係数間距離が定義された空間内に種々のクラスタリング手法を適用することで動作解析を行う。この際、相空間の次元数(運動の記述に必要な状態変数の数)の選択方法を併せて検討する。特に歩行動作に焦点を当て、空間内のパターン分布の位置と広がりを評価することで個人識別を行う。

### (研究成果)

#### (1) 解析コードの開発とその妥当性評価:

アトラクタ解析に必要な基本的なプログラムを開発し、その妥当性および有効性を検証した。具体的には、図2の振り子運動を対象とし、振り子の長さや摩擦係数を変化させたとき、記号空間上でもそれらの変化を説明できるかを数値実験により検証した。ここで、振り子の長さ ( $L = \{0.725, 0.308\}$  [m])、および回転軸の粘性摩擦係数 ( $c = \{0.6, 0.08\}$ ) の2つの物理パラメータを変化させた。加えて、 $\{L, c\}$ 、および振り子の初期値にそれぞれ平均0、標準偏差 $\sigma$ のガウスノイズを加えた。このとき、図2を人の腕振り動作に見立てると、粘性摩擦係数 $c$ は身体の個人差(身体差;たとえば、関節の柔軟性)を、長さ $L$ は身体の動かし方の違い(運動差;たとえば、腕振りにおいて肘を伸展させる場合と屈曲させる場合)を、そして、初期値の変化は試行ごとに動作の開始点がゆらぐ様子をそれぞれ反映している。図2の振り子モデルから生成した時系列データに対するアトラクタ解析の結果を図3に示す。

図3の記号空間では、長さ $L$ と粘性摩擦係数 $c$ の4種の組み合わせに対応して4つのクラスタが形成された。ただし、図3aは従来研究で広く用いられているスライディングウィンドウ(滑走窓)法により得られた特徴量を用いて結果で、クラスタ間の距離が非常に近く、一部のクラスタは重なり合っている。一方、図3bは提案手法であるアトラクタ解析を用いた結果で、図3aの結果と比べてクラスタ間の分離度がより高いことがわかる。すなわち、提案手法は、従来手法と比べて同じ腕振り動作に対しても運動状態の違いをより鋭敏に検出できることを示唆している。

#### (2) 係数間距離に基づく身体動作データのクラスタリング:

次に提案手法を実際の運動データに適用するとともに、動作特徴の抽出および個人識別への応用検証を行った。対象動作には歩行動作を取り上げた。歩行動作は、日常生活の中でもっとも基本的な動作のひとつであり、特別な訓練や習熟を必要としない。加えて、同じ「歩く」という動作でも人それぞれに固有の動き方やクセがある。

歩行動作は、約15mの平坦な直線区間を自然な歩行速度で歩くよう被験者に指示し、その間の動作を図4に示す装着型センサ(加速度・角速度センサ)を用いて計測した。実験に参加し

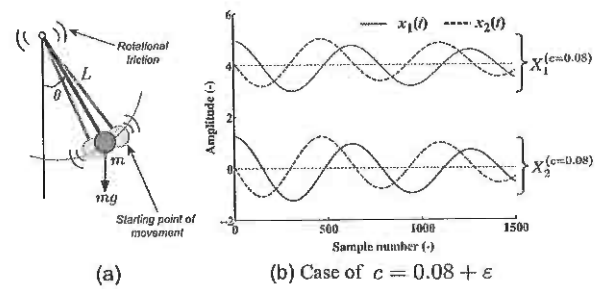


図2: ゆらぎを含む単振り子の運動例。

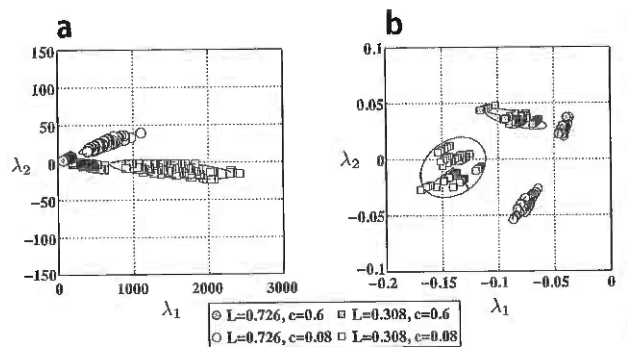


図3: 図2の振り子運動を記号空間上で表現した例。aはスライディングウィンドウ法、bは提案手法を用いた結果。

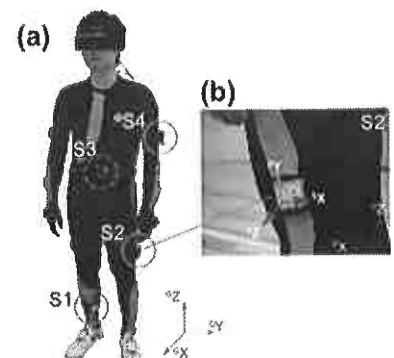


図4: 装着型センサによる歩行動作計測。

た被験者は男性 10 名，女性 3 名の計 13 名 ( $24.3 \pm 4.2$  歳) で，実験に際しては事前に説明を行い，収集したデータの学術目的での利用，および公開について同意を得た。

収集したデータから，図 5a に示すセンサ S2 (左大腿) の加速度  $a_y$  と角速度  $\omega_z$  を用いて，図 5b の軌道アトラクタを構成した。なお，図 5 の状態変数は経験的に選択した結果であるが，身体動作における関節間の相関関係をもとに変数を自動決定する方法を併せて検証している。図 5 の各軌道に対して，提案手法を用いて記号空間を構成したところ，図 6 に示すように記号空間上で各被験者を識別できることがわかる。また，データの自動抽出や相空間の次元数選択の課題はあるものの，歩行データに対しても提案手法を適用できることを示した。

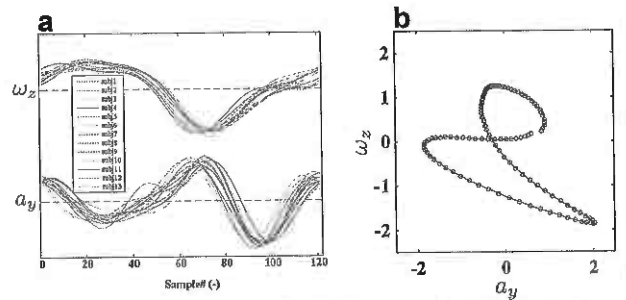


図 5 : a 歩行データ (1 周期・13 人分) とその b 相平面への展開例。

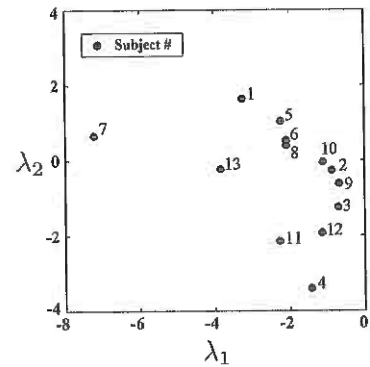


図 6 : 図 5 の歩行データ (13 人分) に対する記号空間の構成例。

### 3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、身体動作にみられる個人のクセやスタイルといった個人の特徴をセンサデータに基づき定量評価することを目的として、力学系理論におけるアトラクタの概念を用いた時系列データ解析法の基礎構築を行った。具体的には、軌道アトラクタを用いて運動時系列から離散のシンボル系列を抽出し、生成されたシンボルの物理的意味を考察した。その結果、記号空間上で物理パラメータの変化に応じてクラスタを見いだすことができた。すなわち、生成したシンボルを使って運動状態（物理パラメータ）の違い、あるいは運動の類似性を判別できることを確認した。このことは、動作の個人性を分析する際に、動作を個人のスタイルごとに分類するとともに、その違いが何に由来するのか（年齢や性別、身体の柔軟性といった身体特性など）という特徴抽出において、提案手法の有効性を示唆するものである。ただし、これらの成果は初歩的な力学モデルを対象とした基礎検証の結果であることから、応用検証のための検証用実データ（歩行動作データ）の収集、および収集したデータに対する提案手法の適用を試みた。その結果、提案手法を実データに適用する場合、今後つぎの点を解決する必要がある：

- 1) 相空間の次元数（運動の記述に必要な状態変数の数）の選択
- 2) 構成された記号空間の妥当性の検証

このうち、1) は身体動作における関節間の相関関係に基づき、たとえば、主成分分析（PCA）を用いることで運動データの次元削減が可能である。また、相空間の次元数はPCAの結果から累積寄与率を基準に自動決定することが考えられる。ただし、4次元以上の高次元の相空間上では、運動データの描く軌道を確認することが難しいため、本研究のように着目したい変数を経験的に選択したり、あるいはカオス時系列解析におけるアトラクタ構成法や統計的指標に基づく選択が必要となる。

また、2) は構成された記号空間内でシンボル群の分布を評価する方法が考えられる。具体的には、空間内のシンボル群に対してクラスタリングを行い、各クラスタの位置と広がり进行评估することで個人識別を行うとともに、各軸の大きさを因子分析して個人性の主因子を明らかにする方法である。

以上の結果より、軌道アトラクタを用いた時系列データ解析法が、身体動作の特徴抽出に有効であることを示した。また、データの自動抽出や相空間の次元数選択の課題はあるものの、歩行データに対しても提案手法は十分適用可能であることがわかった。今後は本研究の成果をもとに、技能レベルの定量評価法の構築、および個人にあわせた技能教育プログラム開発の課題にそれぞれ継続して取り組む。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

本研究の達成によって、身体動作における個人差や熟練度をセンサデータに基づき客観的に把握することができ、その結果、技能レベルの定量評価や個人にあわせた技能教育プログラムの開発に寄与できる。たとえば、熟練者と学習者のデータを比較することで、学習者の熟達がどの程度すすんだかを客観的に把握できる。また、その結果をより詳細に解析することで、熟練者と学習者の動作にどのような違いがあるかを知ることができ、それらの知見を元に熟達に必要なコツの指摘や学習者にあわせた教育プログラムの提案に繋がる。これらの点から本研究の成果は、スポーツにおけるコーチングや、リハビリテーションにおける訓練指導、また、産業における熟練技能の伝承など、これまで多大な時間と労力を要していた技能教育の現場において、その最適化と効率化に寄与できる可能性がある。

##### 4. 2. 学術的価値

従来の統計的パターン識別や機械学習による動作認識とは異なり、提案手法は、空間的な変動(振幅の変化)のみならず、時間的な変動(位相差)も考慮してデータ間の類似度を比較できる。これは先にも述べたように、熟練者のデータと訓練者のデータがどの程度似ているのか、またその違いがどこにあるか、ということを見出すための時系列データマイニングのツールを提供できることを意味する。このことから、提案手法は技能教育の分野だけでなく、スポーツ科学やスキルサイエンスの分野など、同種のデータ解析を必要とする諸分野での応用展開を期待できる。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

###### 【学術雑誌】

- [1] T. Akiduki, A. Uchida, Z. Zhang, T. Imamura and H. Takahashi, Extraction of Human Gait Feature from Acceleration Data, ICIC Express Letters, Part B Applications, Vol. 7, No. 3, pp. 649-656, 2016.

###### 【国際会議発表(査読付き)】○は登壇者

- [2] Y. Kon, Y. Omae, K. Sakai, ○H. Takahashi, T. Akiduki, C. Miyaji, Y. Sakurai, N. Ezak, K. Nakai, Toward Classification of Swimming Style by using Underwater Wireless Accelerometer Data, The 19th Int. Sympo. on Wearable Computers (ISWC 2015, September 7-11, Osaka), pp. 85-88, 2015.
- [3] ○T. Akiduki, A. Uchida, Z. Zhang, T. Imamura and H. Takahashi, Extraction of Human Gait Feature from Acceleration Data, The 10th Int. Conf. on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2015, August 20-22, Dalian, China), 2015.

###### 【国内会議発表】○は登壇者

- [4] ○秋月拓磨, 章忠, 今村孝, 高橋弘毅, 軌道アトラクタを用いた運動時系列の記号化: 歩行運動への適用, 第58回自動制御連合講演会(11月14-15日, 神戸), Paper ID: 1D1-5, 2015
- [5] ○大前佑斗, 昆慶久, 酒井一樹, 高橋弘毅, 秋月拓磨, 宮地力, 櫻井義久, 江崎修央, 中井一文, データ駆動型アプローチによる競泳コーチング支援環境の構築, 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス(10月30日-11月1日, 草津), Paper ID: A-14, 2015
- [6] ○昆慶久, 大前佑斗, 酒井一樹, 高橋弘毅, 秋月拓磨, 宮地力, 櫻井義久, 江崎修央, 中井一文, 泳動作指導システム開発に向けた泳法判別, 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス(10月30日-11月1日, 草津), Paper ID: A-15, 2015
- [7] ○神尾郁好, 高橋弘毅, 秋月拓磨, 中田夏樹, 章忠, 身体動作における個人特徴の抽出とその物理的意味の考察, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(5月17-19日, 京都), Paper ID: 1P1-G05, 2015
- [8] ○昆慶久, 高橋弘毅, 秋月拓磨, 宮地力, 櫻井義久, 松本知佳, 江崎修央, 水中無線加速度センサデータを用いた泳法の判別, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(5月17-19日, 京都), Paper ID: 1P1-G04, 2015