

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870855

研究課題名(和文) 相空間を用いた身体動作の特徴抽出と運転動作解析への応用

研究課題名(英文) Feature Extraction of Human Motion by using Phase Space and Its Application to Car-Driver's Motion Analysis

研究代表者

秋月 拓磨 (Akiduki, Takuma)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40632922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：身体動作の解析において、対象となる計測データの多くは時系列データの形をしている。これらの時系列データに対して、クラスタリング手法や分類手法など、離散のシンボル系列を対象にした既存のデータ解析アルゴリズムをそのまま適用することは難しい。そこで本研究では、モーションキャプチャデータなどの運動時系列を対象とした記号化手法として、軌道アトラクタを用いた手法を検討するとともに、歩行動作を例に実際の身体動作データへの適用について検証した。その結果、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唆し、その研究基盤を構築するとともに、さらなる研究継続の必要性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we address a time-series analysis method for human motion analysis based on symbolization of sensor data. In our approach, the time series of the periodical signals are expressed by dynamical systems having attractors, which symbolize the time series in state space. For detecting individual characteristics in motion, we discussed differences between our approach and sliding window approach. Then, we conducted computer experiments using the simple pendulum system for investigating the relationship between the physical conditions of motion and the distribution of symbols in the symbol spaces that are designed by two approaches. Moreover, we studied the methodology of application of our approach to actual motion data for clarifying the issues of our approach. These results suggest that symbol space designed by our method can be used to discriminate individual characteristics in motion.

研究分野：計測工学

キーワード：身体動作 軌道アトラクタ 相空間 記号化 個人性 動作特徴

1. 研究開始当初の背景

自動車事故において運転操作の誤りは、死亡事故要因の約1割を占め、漫然運転、わき見運転に次いで多い事故要因となっている。しかし、若年者(24歳以下)や高齢者(75歳以上)では運転操作の誤りによる事故割合が増加し、不適切なハンドル操作やペダル操作による事故が多く発生している。これらの事故は、運転技量の不足や加齢にともなう身体機能の低下が原因の一つであると考えられている。そのため、運転者が自身の運転操作の過程を見なおし、自分の運転技量、あるいは身体機能の変化を客観的に把握することが事故予防に有効である。

一方、センサデバイスの小型・軽量化に伴い、身体装着型センサを用いて、運転中の四肢の動き、すなわち運転動作を計測・分析する手法が近年注目されている。この方法は、車両側へのセンサ追加が不要なことから、小型・軽量で安価なセンサシステムを構築できる、という利点をもつ。また、計測したデータを統計解析することで、不安定な姿勢でのハンドル操作や不自然な手の動きといった、初心運転者特有の潜在的事故誘発動作^[1]を検出できることが報告されている。しかしながら、ペダルやハンドル操作の方法にも冗長性があることから、運転のスタイルや技量、身体機能の違いにより事故誘発動作にも幾つかのパターンが存在していると予想できる。データからこれらのパターンを見出せれば、運転者の身体制御の特徴を捉えることができ、事故誘発動作改善のための着眼点や教習法の検討など、効率的かつ効果的な安全教育の実現につながる。

この問題に関連して、スキルサイエンスやスポーツ科学の分野では、日常動作やスポーツにおける滑らかな運動において、関節点での時間のズレが重要な意味を持つことが指摘されている。このことから、運転動作に内在する運転者の個人性を評価するには、従来手法における身体動作の空間的な変動(振幅の変化)のみならず、時間的な変動(位相差)も考慮する必要があると考えられる。

2. 研究の目的

前述の背景と経緯のもと、申請者はデータに内在する身体動作のダイナミクス(身体各部の時間的な変化)を捉えるために、非線形力学系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するに至った。本手法を、たとえば、運転動作データに対して適用することで、初心運転者や高齢運転者が身体各部をどのように制御しているのかを明らかにし、クセや習熟度の違いといった個人の特徴(個人性)を定量評価できる可能性がある。

そこで本研究では、運転中の身体動作を解析の対象とし、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とともに運転

動作の個人差を身体制御の観点から定量評価する方法を検討する。

3. 研究の方法

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、データを相空間(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。さらに、この軌道を身体動作のダイナミクスに由来したアトラクタの一種と捉えて非線形力学モデルでモデル化し、その係数(モデルパラメータ)を動作特徴量とする。このことによって、身体各部の時間的な変化の特徴を捉えられるだけでなく、多変量の時系列データを記号化でき、種々のクラスタリング手法を用いたデータ解析が可能となる。その結果、動作に共通な特徴(共通性)と個人に特有な特徴(個人性)をデータから抽出し、その定量評価の方法を検討できる。今後、運転動作データへの適用において、相空間の構成法、および係数間の距離尺度を確立することが、必須の解決課題である。また、係数間距離の物理的意味の考察が個人性の定量評価において必要である。

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。

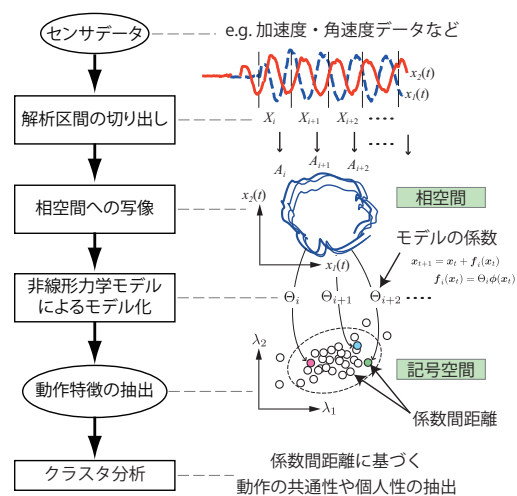


図1: 軌道アトラクタを用いた時系列データからの動作特徴抽出の流れ。

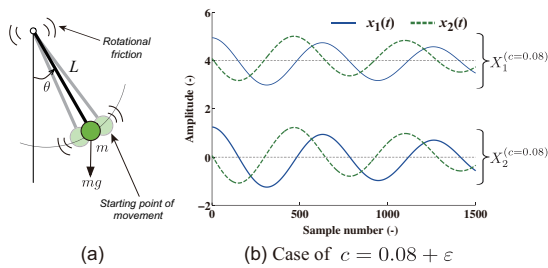


図 2：ゆらぎを含む単振り子の運動例。

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拡がり进行评估することで個人識別を行う。

4. 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、計測対象の運動状態が変化するとき、その様子を記号空間においても物理量の変化と対応づけて説明できるかを数値実験により検証した。本研究では、図 2 の振り子運動を肩関節を支点とする腕の振り動作に模して考えてみる。ここで、振り子の長さ ($L = \{0.725, 0.308\} [\text{m}]$)、および回転軸の粘性摩擦係数 ($c = \{0.6, 0.08\}$) を変化させた。加えて、 L, c の物理パラメータ、および初期値にそれぞれ平均 0、標準偏差 σ のガウスノイズを加えた。すなわち、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と考えることができる。このとき、図 2 の振り子の運動状態は、振り子の角度 $x_1 = \theta(t)$ 、および角速度 $x_2 = d\theta(t)/dt$ を変数とする状態空間上で図 3 のような曲線軌道によって表現される。物理パラメータが同じでも、試行ごとに初期値と物理パラメータがわずかに変化し、その結果、解軌道にもゆらぎが生じる。これらの各軌道を A_i とし、これをアトラクタとするような力学モデルを軌道ごとに求め、そのモデル係数 Θ_i を動作特徴とする。こうして求めた係数の集合 $\{\Theta_i\}$ に対して主成分分析を行うことで、 Θ_i の類似性を反映した低次元の線形空間を求める。また比較のため、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）法による特徴量の変換を、図 3 の時系列データに対して行い、同様に 2 次元の特徴量空間を構成した。以上の結果を図 4

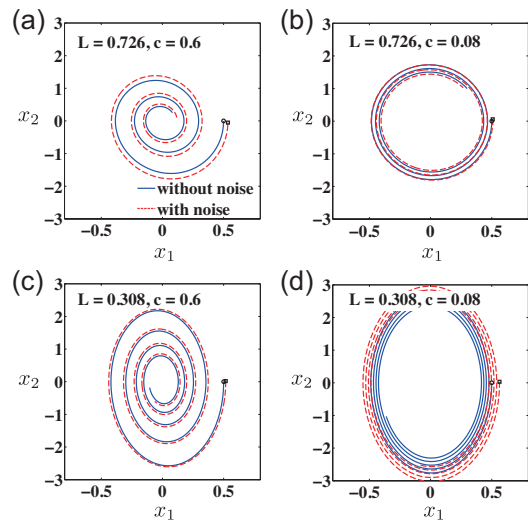


図 3：相平面上での振り子の運動例。

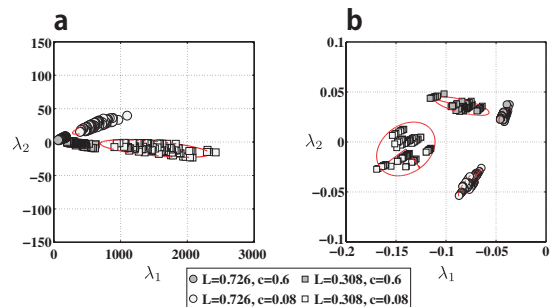


図 4：図 3 の振り子運動を記号空間上で表現した例。a はスライディングウィンドウ法、b は提案手法を用いた結果。

に示す。

図 4 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ていることを確認できる。ただし、a では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おり、a に比べて b の提案手法の方がより高い分離度を示している。このことから、スライディングウィンドウに比べて、軌道アトラクタを用いた方法は、同じ動作であれば、その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一方、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 5 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

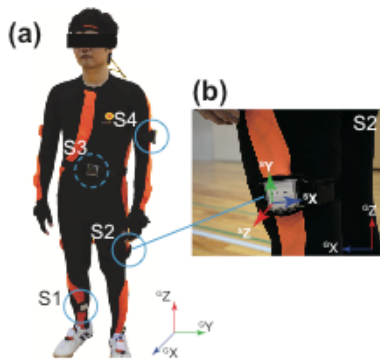


図 5：装着型センサによる歩行動作計測。

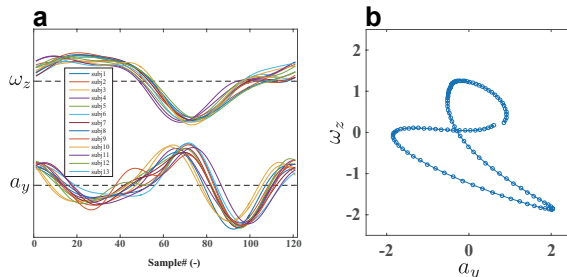


図 6：a 歩行データ（1 周期・13 人分）とその b 相平面への展開例。

に参加した被験者は男性 10 名、女性 3 名の計 13 名 (24.3 ± 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。

収集したデータのうち、図 6a に示すセンサ S2（左大腿）の加速度 a_y と角速度 ω_z を用いて、図 6b の軌道アトラクタを構成した。なお、図 6 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 6 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 7 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。さらに、解析のサンプル数を増加させることによって、抽出したシンボルと個人特徴との関係、とくに被験者内/間での動作の違いを記号空間を利用して定量評価法の検討を今後すすめる必要がある。

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唆し、その研究基盤を構築するとともに、さらなる研究継続の必要性を示した。

<引用文献>

- [1] 多田, 他 6 名: 無線加速度センサを用いた運転者行動の計測・解析手法, 信学論, J91D(4), pp. 1115-1129 (2008)

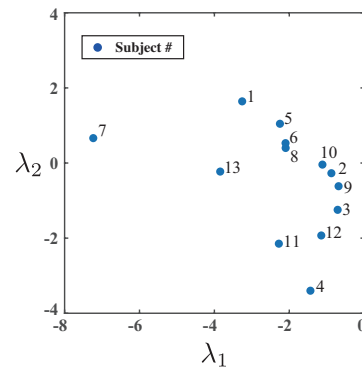


図 7：図 6 の歩行データ（13 人分）に対する記号空間の構成例。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

1. Takuma Akiduki, Akira Uchida, Zhong Zhang, Takashi Imamura and Hiroataka Takahashi: Extraction of Human Gait Feature from Acceleration Data, ICIC Express Letters, Part B Applications, Vol.7, No.3, pp.649—656, 2016（査読有）
2. Yoshihisa Kon, Yuto Omae, Kazuki Sakai, Hiroataka Takahashi, Takuma Akiduki, Chikara Miyaji, Yoshihisa Sakurai, Nobuo Ezak, Kazufumi Nakai: Toward Classification of Swimming Style by using Underwater Wireless Accelerometer Data, Proc. of the 2015 ACM Int. Joint Conf. on UBICOMP/ISWC Adjunct, pp.85—88, 2015, DOI: 10.1145/2800835.2800875（査読有）
3. Takuma Akiduki, Zhong Zhang, Takashi Imamura and Hiroataka Takahashi: Symbolization of Human Motion: Case of Simple Walking Motion, ICIC Express Letters, Part B Applications, Vol.6, No.4, pp.959—965, 2015（査読有）
4. Md Rizal Othman, Zhong Zhang, Takuma Akiduki, Hajime Suzuki, Takashi Imamura and Tetsuo Miyake: Development of A Driver Inattention Detection System Using Dynamic Relational Network, Int. J. of Innovative Computing Information & Control, Vol.10, No.3, pp.1189—1205, 2014（査読有）
5. Takuma Akiduki, Zhong Zhang, Takashi Imamura and Hiroataka Takahashi: Toward Symbolization of Human Motion Data – Time-Series Clustering in Symbol Space–, ICIC Express Letters Part B: Applications, Vol.5, No.2, pp.387—392, 2014（査読有）
6. Takuma Akiduki, Zhong Zhang, Takashi Imamura, Tetsuo Miyake, Hiroataka Takahashi and Michihiro Namba: Toward Symbolization of Human Motion Data -Statistical Analysis in Symbol Space-,

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 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 (2015 年 11 月, 神戸大学)
2. 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 2015 (2015 年 5 月, 京都市)
3. 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, 第 57 回自動制御連合講演会 (2014 年 11 月, 群馬県渋川市)
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からの動作特徴量の抽出, 統計数理研究所共同研究集会「非侵襲生体信号の解析・モデル化技術とその周辺」(2013 年 12 月, 立川市)
5. 秋月拓磨, 章忠, 今村孝, 高橋弘毅, 軌道アトラクタによる運動時系列の記号化手法の検討, 第 56 回自動制御連合講演会 (2013 年 12 月, 新潟大学)

〔その他〕

ホームページ等

<http://is.me.tut.ac.jp/akiduki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋月拓磨 (Akiduki Takuma)
豊橋技術科学大学・工学系研究科・助教
研究者番号: 40632922

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし