

フラクタル次元による立位重心運動の分析

Analyzing Center-of-pressure Trajectories in Still Standing Using Fractal Dimensions

日高 昇平*¹
Shohei Hidaka

Neeraj Kashyap*¹

Wannipat Buated*¹

藤波 努*¹
Tsutomu Fujinami

*¹ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

The present study aims for establishing a methodology which characterizes bodily movements, which can be viewed as results of complex interactions of a high-dimensional system. For segmentation of bodily movements into meaningful states, we propose to use *dimensional clustering* based on fractal dimensions estimated for the time series. The analysis on the center-of-pressure trajectories obtained from standing people suggests that statistical properties of the estimated clusters are likely to reflect the degree of attentive posture control in standing.

1. 力学系としての身体運動の分析

ヒトの認知過程は、それを支える身体と常に相互作用する。そのため、多くの認知心理学的実験では、身体的制約に由来する様々なゆらぎを、「ノイズ」とみなし、これを統制する事が試みられてきた。その一方、多くの研究でヒトの行動および生体時系列から、認知過程を分析する試みが行われている[Riley 2005]。こうした研究では、前述の身体や文脈依存の情報をノイズとみなさず、むしろそのゆらぎを情報とみなし分析する。こうした分析は、認知過程を知る手段として多くの可能性を秘めている。しかし、身体は複雑な相互作用を行う大自由度系であり、データとして与えられる状態空間の軌道を、意味のある要素に分節化する方法論が確立されていない点が一つの問題として挙げられる。

これに対し本研究では、フラクタル次元(点次元)に基づき状態空間上の軌道を自動的に分節化するクラスタリングを提案する。力学系のある種の“同一性”はフラクタル次元で特性づけられる[Grassberger 1983]。つまり、同一の次元をもつ2つの力学系に対し、それらを1対1に対応付ける滑らかな写像が存在する。この性質を定量化する手法として、Hidaka & Kashyap [Hidaka 2013b, Hidaka 2014]は点次元の推定法(次元クラスタリング)を提案している。この点次元は各データ点に推定され、時系列の各時点での次元の変化を定量化できる。また、点次元でクラスタ化された点の集合は、同一の力学的性質を反映するものとみなせる。

本研究では、随意的に統制できない指標の一つとして、立位または座位の重心に着目し、静止時や外的な力が加わった場合を比較することで、次元クラスタリングの有用性を検討した。この実験に先立ち、実験で想定されるデータのシミュレーションおよびその分析を行い、提案手法の技術的な健全性について評価を行った。

2. 次元推定法

Hidaka & Kashyap [Hidaka 2013b, Hidaka 2014]は点次元を推定する新たな手法として、従来の方法論とは異なり、混合分布の統計的推論による方法を提案している。これを以下、点次元

推定法と呼ぶ。点次元 d は、空間上のある点 x の半径 r の近傍の測度 $B(x, r)$ で以下のように定義される次元である:

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \log B(x, r) / \log r$$

この点次元の数学的に厳密な定義は、無限小の極限を要するため、直接計算することはできない。従って、データから何らかの近似・推定をする必要がある。点次元推定法では、データの各点の十分に大きい近傍内において、一定の密度で観察されていない点が分布すると仮定する。この仮定から、密度 λ 、次元 d の空間上の任意の点に対し、 n 番目に近い点までの距離 r は、Weibull-gamma 分布 $P(r | n, d, \lambda)$ [Hidaka 2013a] になる事が示される(Hidaka & Kashyap, 2013)。従って、この分布のパラメータ (d, λ) を n -近傍距離データから推定することで、推定されたパラメータ d を次元とみなすのが Hidaka & Kashyap の次元推定法の基本的なアプローチである。この発展形として、混合 Weibull-gamma 分布を用いることで、データに混合する複数の異なる次元成分(クラスタ)を検出できる。これを次元クラスタリングと呼ぶ。

3. シミュレーション: 次元解析

次元クラスタリングの検証のため、重心が1次元/2次元の切り替えながらランダムに生成される時系列(ウィーナー過程)であると想定した人工データを分析した。生成した10,000点のデータのうち、1-2500点はX軸のみ、2501-5000点は2次元上、5001-7500点はY軸のみ、4番目の7501-10,000点は再度2次元上のランダムウォークである。図1(a)はそのデータのY軸上の時系列、図1(b)は(X,Y)平面を示す。この2次元系列(X,Y)に対し、次元クラスタリングを適用した次元推定の結果を、各点の赤/青色で示している。この結果から、次元クラスタリング法により潜在的次元の違いを正しく推定できることが示された。

4. 実験・手続き

本研究では、5名(男性3名、女性2名)の被験者から、立位および座位時の重心軌跡を足下または座面に置いた圧センサーによって計測し、特定条件下の重心軌道を取得した。課題として、開眼および閉眼しての立位静止、手に物体をもって立位、立位して静止時に外的な力で攪乱を行った。計測時間は各条

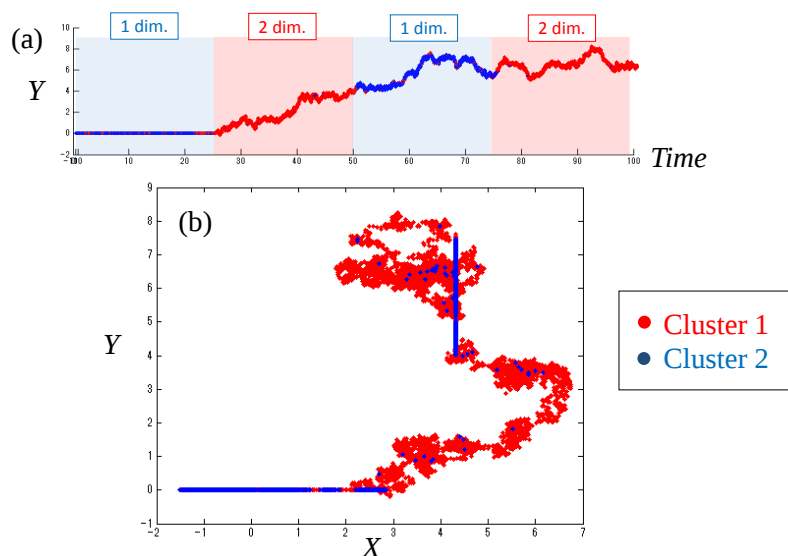


図 1: 1 次元/2 次元ランダムウォークの混合データに対する次元クラスタリングの結果例. (a)Y 軸上の時系列, (b) 2 次元上のランダムウォークの各点の色は 2 つのクラスターを表す.

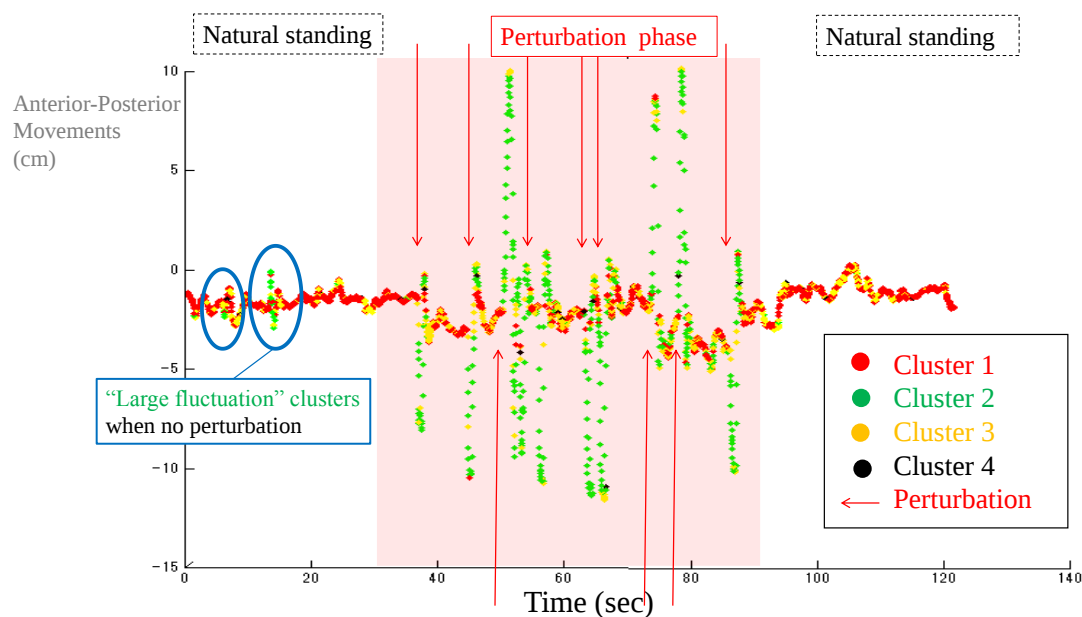


図 2: 外乱条件で得られた重心軌跡(前後方向)の分析結果の例. 4 つのクラスターが推定され, 外乱のある場合にクラスター 2(緑)のみが顕著に同定された.

件 30 秒または 1 分間で, 100Hz のサンプリングレートで, 各試行およそ 3000 または 6000 点の時系列データが得られた.

5. 結果・考察

開眼および閉眼しての立位静止, 手に物体をもって立位の条件で取得された重心時系列を分析した. この結果, 特に姿勢が大きくゆらぐ場合に, 他の時点とは顕著に異なる次元が被験

者に共通して同定された. この点を確認すべく, 立位して静止している被験者を, 実験者が物理的に引っ張る実験を行った(図 2). この実験では 30 秒の自然立位の後, 1 分間の外乱フェーズ(図 1 赤い区間)においてランダムなタイミングで被験者に外的な力を加え, その後再度 30 秒間の自然立位を行った. この分析から, 外乱の瞬間に特徴的な次元(緑)が同定された. 興味深い点

は、外乱なしでも、姿勢が大きくゆらぐ際には類似の次元を示すこと(青の囲い)である。これは、外乱でも内的なゆらぎあっても、重心が大きくゆらぐ場合には、通常(赤いデータ点)とは異なり、類似のメカニズム(緑のデータ点)により姿勢を修正している事が示唆される。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 25560297 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [Grassberger 1983] Grassberger, P., & Procaccia, I.: “Characterization of strange attractors.” *Physical review letters*, 50(5), 346-349.
- [Hidaka 2013a] Hidaka, S.: A Computational Model Associating Learning Process, Word Attributes, and Age of Acquisition. *PLoS ONE* 8(11): e76242.
- [Hidaka 2013b] Hidaka, S. & Kashyap, N.: “On the Estimation of Pointwise Dimension.”, eprint arXiv:1312.2298.
- [Hidaka 2014] Hidaka, S. & Kashyap, N.: The Generalist Approach to Frame Problems, In *Proceedings of The Third Asian Conference on Information Systems*, 318-325.
- [Riley 2005] Riley, M. A., Van Orden, G. C.: “Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences.”, National Science Foundation.