

# 次元クラスタリング： 身体情報のフラクタル次元に基づく認知過程の分析

## Dimensional Clustering: Analyzing Cognitive Processes by Fractal Dimension of Bodily Dynamics

日高 昇平<sup>†</sup>, カシャップ ニラジ<sup>†</sup>, ブアテッド ワニパット<sup>†</sup>, 藤波 努<sup>†</sup>  
Shohei Hidaka, Neeraj Kashyap, Wannipat Buated, Tsutomu Fujinami

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology  
shhidaka@jaist.ac.jp

### Abstract

The present study aims for establishing a methodology which characterizes cognitive properties reflected in 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 current experimental datasets suggests that statistical properties of the estimated clusters are likely to reflect the degree cognitive load of the tasks.

**Keywords** — Fractal dimension, Dimensional clustering, Embodied cognition

### 1. 身体運動から認知過程を探る

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。例えば、多くの実験でヒトの行動の文脈依存性があるため、その効果を緩和するために、複数の種類の試行をランダムな順序で提示する。

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[3]。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の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[1]。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 [2]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、外的な力が加わった場合、あるいは読書などの力学的作用がなく認知的処理のみが異なる場合、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。

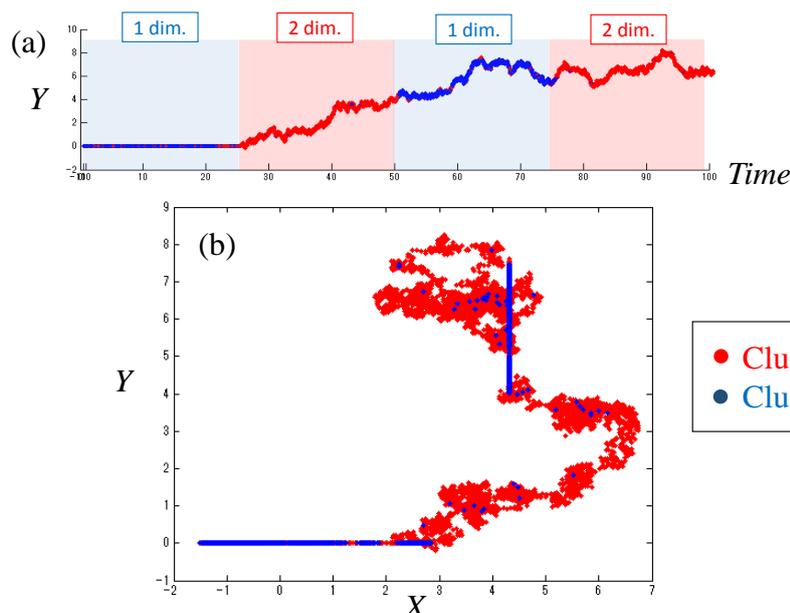


図1: 1次元/2次元ランダムウォークの混合データに対する次元クラスタリングの結果例. (a)Y軸上の時系列, (b) 2次元上のランダムウォークの各点の色は2つのクラスタを表す.

## 2. シミュレーション

次元クラスタリング法の検証のため, 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する次元の違いを正しく推定できることが示された.

## 3. 実験

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,

静止して座位, 読書しての座位, 逆順に読書しながらの座位を行った. 計測時間は各条件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.

## 4. 分析結果

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,

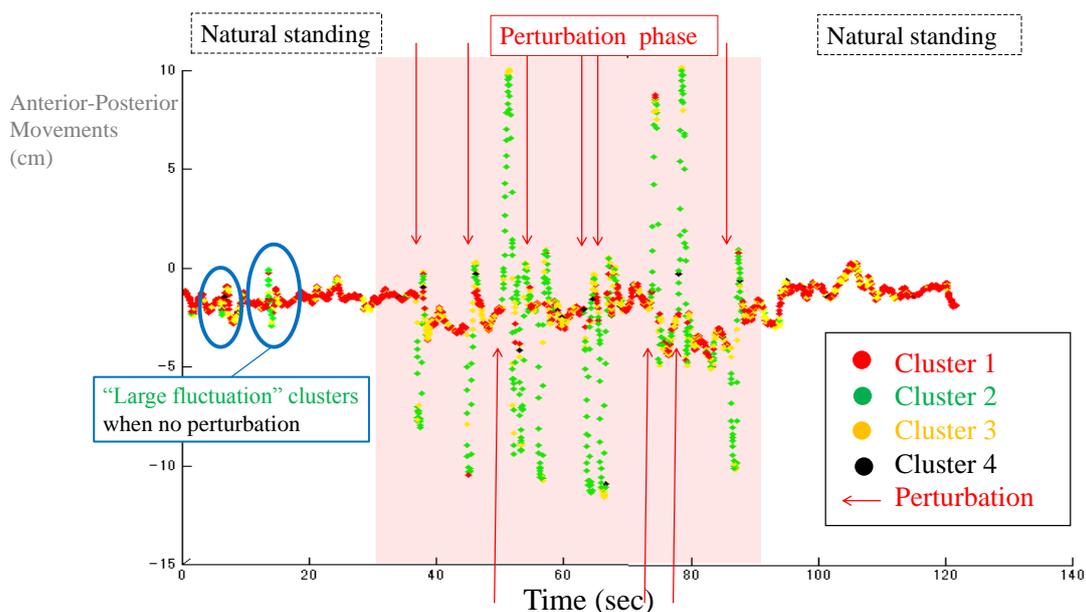


図 2：外乱条件で得られた重心軌跡(前後方向)の分析結果の例. 4 つのクラスタが推定され, 外乱のある場合にクラスタ 2(緑)のみが顕著に同定された.

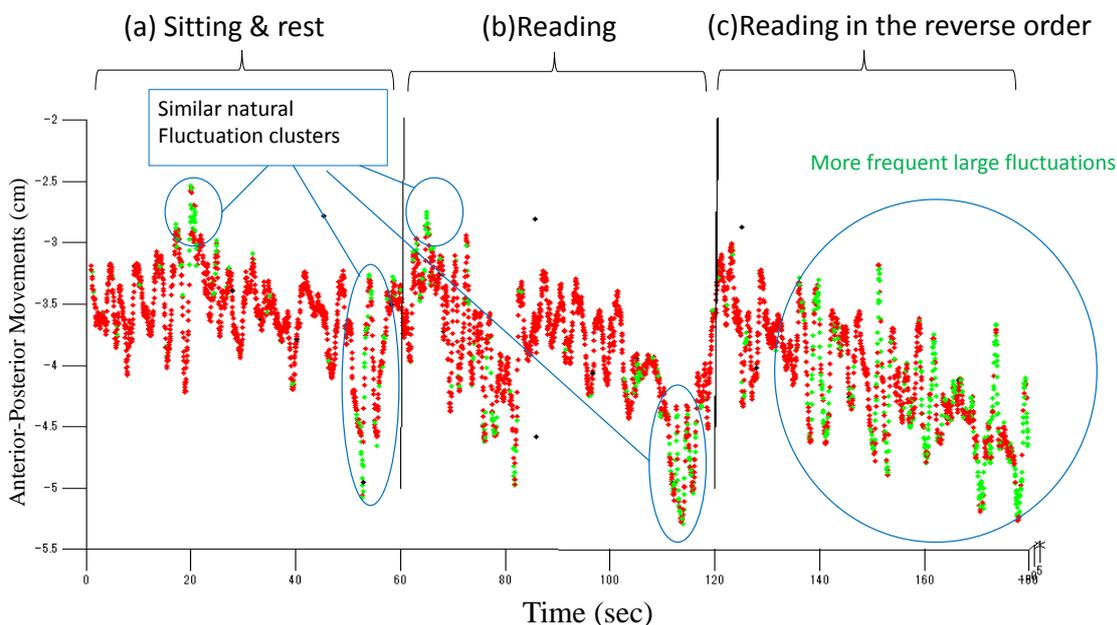


図 3：(a)座位静止時, (b)座位読書時, (c)逆順に座位読書時の重心軌跡(前後方向)の次元クラスタリングの結果. 緑色の点は, 外乱時に特徴的な次元成分を反映する.

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.

これを踏まえ, 座位姿勢において静止時, 読書時, そして逆順に読書を各 1 分間連続して計

3 分間の計測を行った(図 3). 被験者は, その間には姿勢を変えないよう教示された. 座位姿勢時にも静止(図 3a), 読書(図 3b)の条件いずれでも, 図 2 の立位姿勢と類似の外乱に特徴的な次

元(緑のデータ点)が見られた。一方,他の2条件と異なり,逆順読書の条件では,より高頻度に外乱関連の次元(緑)が見られた(図 3c)。

## 5. 議論

以上の結果をまとめると, (1)さまざまな身体的な条件下で類似の点次元分布が見られ, (2)外乱実験などとあわせることで,特定の次元を持つ成分の特徴づけが可能であり, (3)読書などの一見身体と直接関連しない高次の認知過程に対する条件差も敏感に検出可能である事が示唆された。今後の研究は,さらに広い範囲で認知科学的研究における次元クラスタリングの応用可能性を調べる。

## 謝辞

本研究はニューロクリアティブ研究会, 科学研究費補助金基盤研究 B(No. 23300099)および科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(No. 25560297)の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Grassberger, P., & Procaccia, I. (1983). “Characterization of strange attractors.” *Physical review letters*, 50(5), 346-349.
- [2] Hidaka, S. & Kashyap, N. (2013). “On the Estimation of Pointwise Dimension.” , eprint arXiv:1312.2298.
- [3] Riley, M. A., Van Orden, G. C. (2005). “Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences.” , National Science Foundation.