

点次元推定法によるリズム運動の分析

Characterizing Rhythmic Movements by Pointwise Dimensions

日高 昇平*¹
Shohei Hidaka

Kashyap, Neeraj *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 investigate human rhythmical movements by treating them as dynamical systems. We hypothesize that differences in motor controls are reflected by dynamical invariants such as fractal dimensions of the attractors in bodily movements. Our analysis characterizes dynamical coordinations among body parts and musical instruments across different conditions and subjects. It suggests that fractal dimensions characterizes human complex movements.

1. 身体運動の計算論

身体運動の計算理論として、筋骨格系の動力学的な滑らかさを制約とする最適制御理論が提案されている[川人 1996]。川人によれば、身体運動の主要な計算理論は、筋骨格系の動力学的空間(関節角、筋肉の出力・収縮など)と、運動の目標が与えられる作業空間(実 3 次元空間)上の対応づけの問題である。作業空間上の端点の軌跡が 3 次元上の点列であるのに対し、それを実現する身体自由度がそれよりも大きいために、本質的に不良設定問題(解が一意ではない)になる。川人らは目標軌道の生成および、その実現のための運動制御をある種の最適化による不良設定性の解消が必要であるとした[Uno 1989]。

この運動制御の最適化理論の一つの問題点は、フィードバックのある大自由度の身体に適用する際に、運動の逆モデルの計算コストが膨大になりえる点である。特に複数の身体部位を協調して行う複雑な動作の場合、その数に応じて無数の組み合わせの変換が必要になる[Wolpert 2003]。

本研究では、身体運動の生成と理解を統一的に説明する枠組みの提案を行い、その実証的な検討を行う。提案する理論的枠組みでは、身体運動を神経・筋・骨格からなる大自由度系の適切な制御により構成された、低次元のアトラクタとみなす[Turvey 1998, Hidaka 2012, Hidaka & Fujinami, 2013a]。この枠組みにおいて、身体運動の学習は、特定のアトラクタを安定的に制御するために、軌道が通るべき特定の相空間の領域(「コツ」)を探索・発見し、それを実現することに当たる。また、身体技能の理解は身

体運動の知覚から、そのアトラクタを再構成し、その不変性の性質を認識することに相当する。

本研究では運動の表現として、再構成された相空間そのものではなく、アトラクタの位相的構造(座標変換に不変な性質)を扱う。相空間を直接計算しないため、無数に存在しうる座標の取り方によらず、複数の身体部位や、運動の実行系と知覚系などの違いを超えた表現が可能になる。提案する仮説の要点は以下のとおりである。(1) 身体運動は神経系・筋骨格系・環境の相互作用の時間発展として記述できる。つまり、身体運動をある種の力学系とみなす。

(2) ある運動に固有な力学系の性質は、座標によらない不変量によって記述でき、またそれが運動制御に本質的であるとすると。(3) 不変量の計算は本質的に座標系のとり方によらないため、異なる座標系間の対応付けの問題が本質的に無くなる。(4) 不変量の計算には、いくつかの条件が必要であり、その一つは身体運動が滑らかである事によって十分に満たされる。従って、不変量の計算は、従来の滑らかさ制約による最適化理論の一つの条件に含むより上位の計算理論とみなせる。上記の要点(1)は、仮説の中心的な前提、(2)は(1)の前提から可能となり、(3)により身体不良設定問題を最適化をせずに解消できる。要点(4)は、本仮説が既存の計算理論のパラダイムに直接対立せず、むしろそれを取り入れた上位の計算理論である事を含意する(仮説の詳細については[日高 2013]を参照のこと)。

2. 力学的不変量仮説の検討

2.1 リズム運動のデータ収集

提案仮説の予測を検討するために、本研究ではサンバ演

連絡先: 日高昇平, 〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1,
shhidaka@jaist.ac.jp

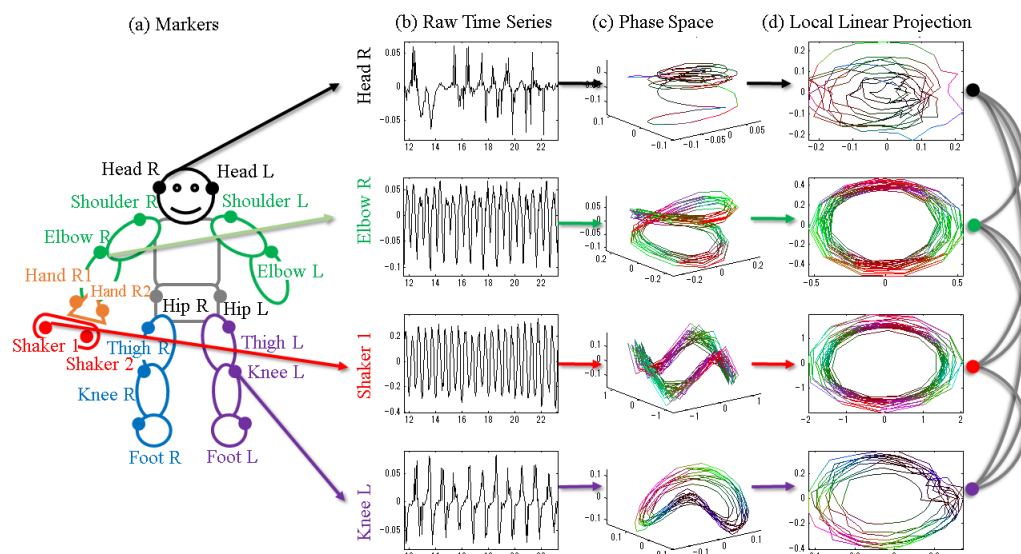


図 1: 実験および分析手続き (a) 18 マーカーの位置, (b) 運動速度, (c) 高次元位相空間, (d) 位相空間の 2 次元局所線形写像。各マーカーの運動速度またはアトラクタ (d) の間の位相同期分析を行っ

奏における振りの動作について全身 18 箇所の運動を計測したデータを再分析した [Yamamoto 2008]。先行研究では、リズム運動の熟達度の違いを分析するためにデータの収集が行われた。実験では 5 人の演奏者を対象として、サンバの基本的なリズムで楽器 (シェイカー) を振る動作をモーションキャプチャ装置によって計測した。各演奏者は 5 つの異なる運動速度条件をメトロノームによって与えられた (60, 75, 90, 105, 120 BPM (beats per minute), 各条件の平均の演奏時間は約 97.4 秒)。演奏中の動作は、全身 16 箇所および楽器 2 箇所に取り付けられたマーカー (図 1(a)) によって、86.1Hz のサンプリングレートで計測された。

2.2 分析手続き

分析では、ノイズ除去のため、運動開始直後のデータ (250 データ点、5.91 秒相当) を除き、46.05Hz のレートで各条件 3190 データ点の運動速度の時系列 (74.1 秒間) を用いた (図 1(b) に代表的な例を示す)。各マーカーの時系列ごとに、46 ミリ秒の遅れにより 31 次元の遅延座標系への埋め込み [Takens 1981] を行った (図 1(c) に位相空間の 3 次元主成分写像を示す)。元のデータは計測上のデジタル化の影響でノイズが含まれるため、埋め込み座標上で非線形ノイズ処理 [Sauer 1992] を行った。こうして得られた 31 次元の遅延座標系上の 3220 点を状態空間の遷移とみなし、アトラクタの次元推定を行った。

2.3 点次元および推定法

アトラクタが、自己相似性をもつフラクタル集合によって表現できるとき、特にストレンジアトラクターと呼ばれる。フラクタル集合の一つの特徴は、ルベグ測度ゼロ、つまり非整数次元を持つことである。従って、一般にフラクタル集合の“大きさ”は、ルベグ測度によっては捉えられず、それを一般化したハウスドルフ測度 [Hausdorff 1918] によって捉えられる。ある距離空間上の集合に含まれる点の近傍に対し、縮退しないハウスドルフ測度を与える指数はただ一つ存在し、その指数をハウスドルフ次元 (点次元) と呼ぶ。

本研究では、Hidaka らの開発した点次元の推定法を用いて分析を行った [Hidaka 2013b]。この推定法では、推定すべきハウスドルフ次元および測度のスケール (密度) が、各点の近傍で定義され、この測度に応じたポアソン過程によって、 n 番目の最近傍点が与えられると仮定する。この仮定に基づき、点次元の集合全体での測度 (次元分布) を階層バイズモデルの事後分布として推定する。 n -最近傍距離のデータからハウスドルフ次元分布を推定するため、こうして推定された次元を n -最近傍次元と呼ぶ。2-最近傍次元を、力学系としての不変量の性質を分析した。

4. 結果・考察

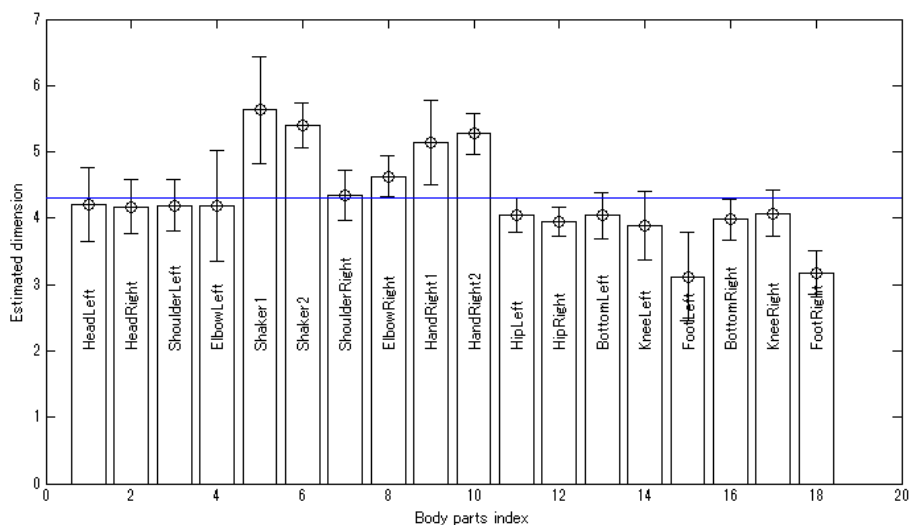


図 2: 18 の身体部位ごとの平均のアトラクタ次元(それぞれ 5 演奏者・5 運動条件の平均)

5 人の演奏者、各 5 つのテンポのそれぞれの組み合わせにつき、18 の運動計測を行った位置の速度データのそれぞれにたいしアトラクタの再構成を行った(図 1)。そのアトラクタの最近傍次元の推定結果を図 2 に示す。図 2 は、各身体部位について 5 演奏者・5 条件の平均次元(エラーバーは標準偏差)を示している。この結果は、演奏中である楽器、それを持つ右手を除いて、他の多くは 4 次元程度の次元を持っており、楽器やそれに直接関連する身体部位では 5 次元以上の比較的高い次元を持つ事を示している。また、この結果は、5 演奏者間でも一貫しており、演奏者ごとの平均次元でも類似した結果が得られた(図 3)。加えて、演奏者ごとの結果では、個人差はあるものの腰の一部(HipLeft)にも楽器部と同程度の高い次元が見られた。従って、身体全体における最近傍次元の分布は、演奏条件や演奏者によらず、サンバ演奏と言う運動の種類に固有のものである可能性が示唆される。

サンバ演奏の運動の性質上、楽器や楽器をもつ手が特徴的な次元を持つ事が期待され、実際に、より高い最近傍次元を持つ事がわかる。一方、楽器とは物理的には距離のある腰部でも、楽器部と同様の高い最近傍次元が推定された。これは、単純に楽器に直接繋がっている身体部だけではなく、腰の動きがリズム運動を構成するのに本質的であることを示唆している。この結果は、演奏者の観点からは、“自然である”と解釈ができる。つまり、従来より、経験的に実践家の間では、サンバ演奏などのリズム運動には、下半身、特に腰部の動きが重要であることは指摘されていた。従って、その意味では、ごく当然の結果であるとも言

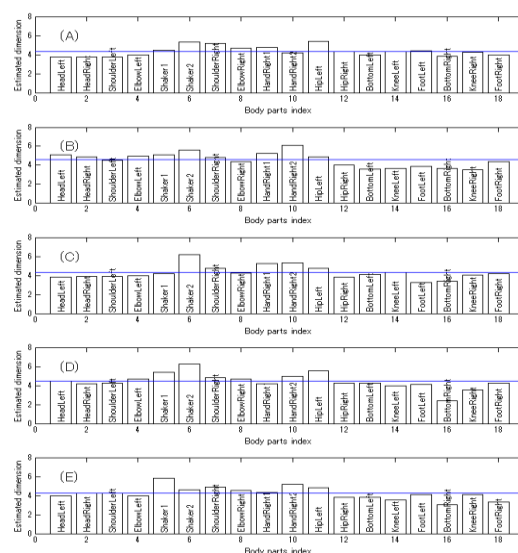


図 3: 各演奏者・身体部位の平均アトラクタ次元

える。しかし、なぜ“腰の動き”がリズム運動に必須なのか、実践家の直観以上にそれを裏付ける知見は現在のところ乏しいといわざるを得ない。この意味で、演奏者の直観を裏付ける形で、腰の動きの特性を、アトラクターの次元として定量化できることを示した点は重要であると考えられる。

5.総合討議

本研究で採用した力学的不変量仮説では、身体運動の主たる計算過程は、その力学的性質の推定であるとする。この

仮説の立場からは、特に運動の特徴付けのひとつとして、力学的な不変量が有効であることが予想される。従って、一つの事例としてサンバ演奏を対象とし、リズム運動の点次元を力学的不変量として分析した。その結果、事前に予想されたとおり、サンバ演奏の中心である楽器およびその持ち手において特徴的な比較的高い次元が見られた。さらに、これに加え、腰部でも、楽器部とほぼ同程度の高い次元が見られた。こうして推定されたアトラクター次元は、複数の演奏者および条件で一貫しており、サンバ演奏におけるリズム運動に固有のパタンを特徴付けていると考えられる。

ダンスを起源とするサンバでは、腰の動きの重要性は古くから指摘されてきた経験則である。一方、実践者の立場ではなく、サンバの運動に対する事前知識を前提とせず、それを解析する研究者の立場からは、演奏者の内観を越えて、腰の動きが実際に演奏に特徴的な構造を持つことは必ずしも自明ではない。本研究の解析結果は、腰の動きはどの被験者でも一貫して、他の体の部分と異なり、むしろ楽器の演奏と同程度の次元を持つ事を定量的に示し、サンバ演奏者の持つ直観や経験則を裏付けている。この結果は、アトラクター次元の解析により、運動の種類の判別や、ある運動時に重要な身体部位を定量的に特定できる可能性を提示している点で興味深い。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤 B: 2330009, 挑戦的萌芽研究: 25560297)、NPO 法人ニューロクリアティブ研究会の助成による。

参考文献

- [Cutler 1993] Cutler, C. D. A Review of The Theory and Estimation of Fractal Dimension. Tong, H. (Ed.). *Dimension estimation and models* (Vol. 1). World Scientific, 1993.
- [Hausdorff 1918] Hausdorff, F. Dimension und äußeres Maß. *Mathematische Annalen*, 79(1-2), 157-179, 1918.
- [Hidaka 2012] Hidaka, S. Identifying Kinematic Cues for Action Style Recognition. In *Proceedings of The Thirty Fourth Annual Meeting of Cognitive Science Society*, 1679-1684, 2012.
- [Hidaka 2013a] Hidaka, S. & Fujinami, T. Topological Similarity of Motor Coordination in Rhythmic Movements., In *Proceedings of The Thirty Fifth Annual Meeting of Cognitive Science Society*, 2013.
- [Hidaka 2013b] Hidaka, S. & Kashyap, N. R. On Estimation of Pointwise Dimension, 2013.
- [Kantz 1997] Kantz, H., & Schreiber, T. *Nonlinear time series analysis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [Sauer 1992] Sauer, T. A noise reduction method for signals from nonlinear systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 58(1), 193-201, 1992.
- [Takens 1981] Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence., In D. A. Rand and L.-S. Young. *Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics*, vol. 898. Springer-Verlag. pp. 366-381, 1981.
- [Uno 1989] Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement – minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101, 1989.
- [Turvey 1998] Turvey, M. T. Dynamics of effortful touch and interlimb coordination. *Journal of biomechanics*, 31(10), 873-882., 1998.
- [Wolpert 2003] Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 358, 593-602, 2003.
- [Yamamoto 2008] Yamamoto, T., & Fujinami, T. Hierarchical organization of the coordinative structure of the skill of clay kneading. *Human Movement Science*, 27(5), 812-822, 2008.
- [川人 1996] 川人光男. 脳の計算理論. 産業図書, 1996.
- [日高 2003] 日高昇平. 力学的不変量仮説: 運動制御の最適化理論の上位原理として., 第 15 回身体知研究会予稿集, 9-15, 2013.