

リズム運動の次元：不変量による協調運動の分析

Characterizing Rhythmic Coordination in Human Movements with Invariances

日高 昇平¹

Shohei Hidaka¹

¹ 北陸先端科学技術大学院大学

¹Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: 本研究では、身体運動をある種の力学系とみなし、その不変的構造の重要性を指摘する力学的不変量仮説(日高, 2013)の立場から、人の複雑なリズム運動の解析を行った。力学的不変量仮説では、身体運動を本質的にある種の力学系とみなし、その座標不変な性質の推定が主たる運動の計算処理であるとする。この観点からは、力学系の不変量の一つであるアトラクターのハウスドルフ次元は、運動の特徴付けとして重要な役割を果たすことが予測される。これを検討するため、人のリズム運動時の速度データの時系列解析を行った。その結果、複数の演奏者や運動速度条件に関わらず、リズム運動を行う手先や楽器部に特徴的な次元が推定された。この結果は、人の運動の特徴付けに不変量が有効であることを示唆し、力学的不変量仮説を支持する新たな知見であるとみなせる。

1. 身体運動の計算論

川人(1996)は、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を提案している。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。例えば、到達運動時の手の先端のある軌道は各時点で3次元であるが、肩・肘・手首など少なくとも身体には7自由度があり、冗長であるため動力学的な変数は一意に定まらない。従って、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。具体的には、関節まわりのトルクを最小化することを制約とするトルク最小原理、筋緊張最小原理や運動指令最小原理などを提案し、動力学的に滑らかな軌道の生成を身体運動の計算理論として提案している(Uno, Kawato, Suzuki, 1989; Flash & Hogan, 1985)。

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。さらに、運動の観察学習を行うには、

視覚と運動の表現あるいは自己と他者の身体表現の間で変換を行う必要がある(Wolpert, Doya, & Kawato, 2003)。従って、制御理論に基づく従来のロボット工学的手法では、模倣的な行動の学習は困難であると考えられている(Breazeal & Scassellati, 2001)。

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, 2013; Shaw et al., 1996)。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(「コッ」)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、その不変的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。(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、異なる座標系の間に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を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)により身体の不具合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)。

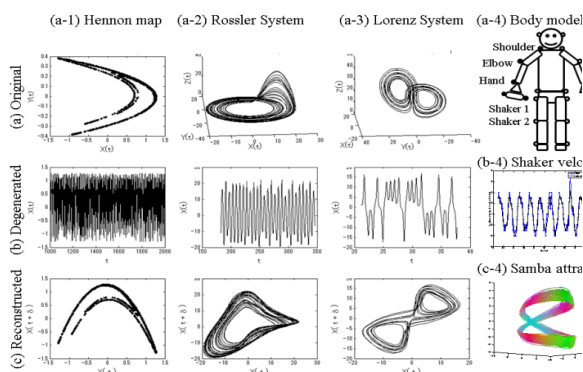


図 1: アトラクタの再構成 (a)Henon 写像, (b)Rossler 系, (c)Lorenz 系, (d)楽器演奏運動

2. 力学的不変量による運動表現

2.1 力学的不変量

本仮説では、身体運動の時間発展を記述する体系として、非線形力学系の理論を採用する。つまり、身体運動を、末梢・中枢神経系、筋骨格系、そして身体の置かれた環境との間の相互作用として捉え、その状態の系列として記述する。ある時点の身体はある次元で表現された状態空間(相空間)のある一状態(一点)として、また一連の身体運動は点を結んだ軌跡として捉えられる。こうした身体運動を力学系として捉える立場では、軌道のアトラクタの構造を分析する。アトラクタとは十分に長い時間で見て軌道がその近傍に無限に回帰するような部分空間の集合である。

理想的には、運動を記述するのに十分な神経、身体、環境の状態が得られる。しかし、実際にはこの仮定はほとんどの場合成り立たない。つまり、我々の観測できる状態は限られており、また本来は観測対象でないものの影響(ノイズ)が含まれる。特に、身体運動の記述に本来必要な要因の観測が失われている場合、これを観測データから再構成を行うのが実践的な時系列分析における常套手段となっている。相空間再構成の一つの方法は、時間遅れ座標への埋め込みである(Takens, 1981)。埋め込みとは縮退した軌道(つまり、軌道の交差などの特異点の存在する相空間)をある高次元空間へ写像する事で、特異点の無い滑らかな軌道に変換する操作である。

アトラクタ再構成の具体例を図1に示す。図1の上段にはアトラクタの例として、左からエノン写像、レスラー系、ローレンツ系を、中段にはその1次元写像を、下段には、その1次元時系列の時間遅れによる2次元埋め込み空間を示している。上段のアトラクタの例はいずれも2または3次元の相空間に描かれ、アトラクタ次元はいずれも1より大きい。従って、これらの1次元射影(図1中段)は一般に縮退している。この縮退した1次元時系列 $X(t)$ に対し、適当な時間遅れ δ を用いて $(X(t), X(t+\delta))$ を2次元空間とみなして埋め込んだのが図1下段である。

2.2 力学的不変量仮説に基づく予測

複数の身体部位の協調により成立する多間接運動において、異なる部位が異なる動力学的な自由度を持っている(図1)。そのため、最適化理論では、異なる部位間の変換も一つの不良設定問題となる。一方、本研究で提案する力学的不変量に基づく計算理論では、異なる身体部位であっても、それらが同一力学系に含まれている場合(i.e., 複数身体部位の協調的運動)、それらの表面上の自由度とはほとんど無関係に、同一の位相的性質を持ったアトラクタによって記述できる。つまり、最適化理論によれば、同じ自由度でない空間の間の直接の対応付けが困難であると考えのに対し、本仮説ではそれが問題にならないどころか、むしろ同じ性質を持つ可能性も示唆する。この点で、両仮説は決定的に異なる。従って、二つの仮説は、ある局所的な身体部位のみに着目した運動では、ほとんど違いがないが、特に、複数の身体部位をうまく協調する事が求められる複雑な運動の際にその違いが顕著となると予測される。具体的に、本研究で分析を行うサンバ演奏などを含むリズム運動では、運動の中心となる楽器部(リズムを規定する運動)と、それに関連する他の部分は、同等の自由度を持つものと予想される。従って、運動中の各身体部位の自由度を分析することで、複雑なリズム運動における力学的不変量仮説を検討する。

2.3 ハウスドルフ測度・次元およびその推定

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

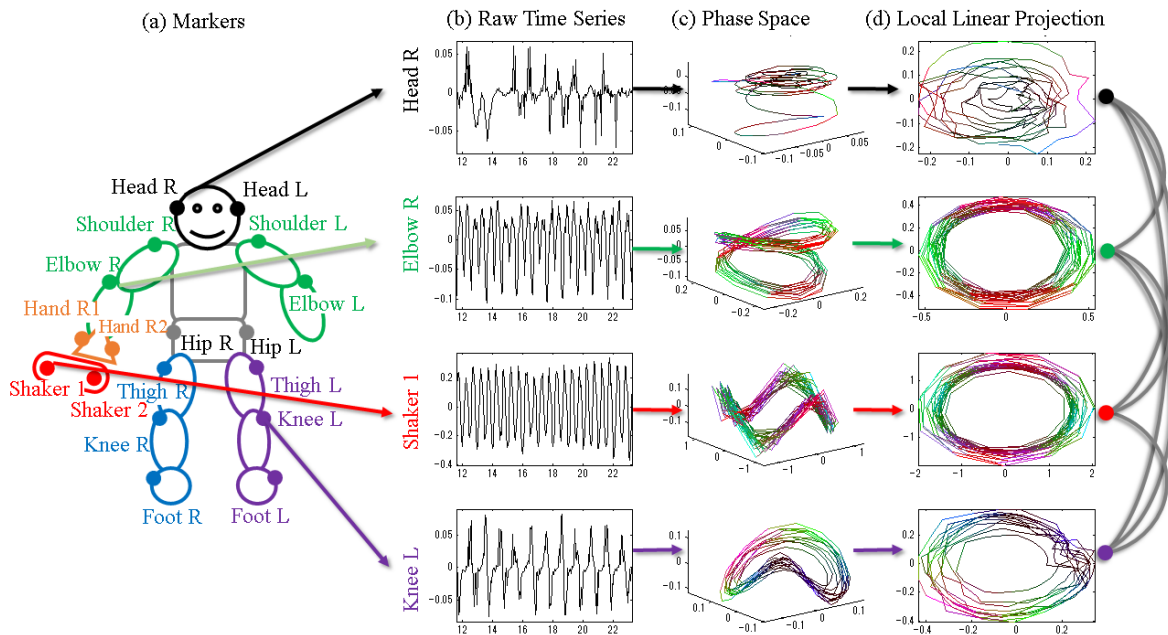


図 2: 実験データおよび分析手続き (a) 18 マーカーの位置, (b) 運動速度, (c) 高次元位相空間, (d) 位相空間の 2 次元局所線形写像。各マーカーの運動速度またはアトラクタ (d) の間の位相同期分析を行った。

一と呼ばれる。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 (フラクタルおよびストレンジアトラクターの定義は複数ある。詳しくは Cutler (1993) などを参照)。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。

ハウスドルフ測度の定義には、極限および任意の有限開被覆上の最小化が含まれているため、一般の集合に対して、これを厳密に計算することは困難である (Cutler, 1993)。そのため、従来の非線形力学系の研究においては、ハウスドルフ測度の下限を与えるものとして、相関次元 (Grassberger & Procaccia, 1983) などの効率的に計算可能な量の分析が行われてきた。ただし、相関次元およびその一般化である一般化相関次元は、本来は計算を簡便化し、実用性を持つものとして提案されたが、実際には、様々な応用上の問題点が指摘されている (総説として Theiler, 1990; Kantz & Schreiber, 1997 などを参照)。例えば、相関次元はハウスドルフ次元と一致する特殊な場合を除けば滑らかな座標変換 (Bi-Lipschitz map) に対して“不変ではない” (Ott, Withers, & Yorke, 1984)。従って、本研究の目的に沿って力学的不変量を分析するためには、相関次元は不十分である。

従って、我々は新たなハウスドルフ点次元の推定法の開発を行った (Hidaka & Kashyap, in preparation)。この推定法では、推定すべきハウスドルフ点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 (Alhor's condition)、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。こうした仮定に基づき、点次元の集合全体での測度 (次元分布) を階層ベ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 (分布) と呼ぶ。理論上、上記のポアソン過程によるサンプリングなどの仮定が成立する場合、 n -最近傍次元は、ハウスドルフ次元分布に一致し (almost surely)、また、その平均次元は一般化相関次元 ($q=n$) に一致する。従って、十分に密で、上記の仮定を満たす独立なデータが与えられた場合、 n -最近傍次元分布は、任意の滑らかな座標変換に対する不変性を持つ。実際に、著者らの行った数値実験においても、推定された n -最近傍次元の非線形変換やノイズに対する頑健性が確認されている。従って、 n -最近傍次元により、力学系としての不変量の性質を分析した。

3. 力学的不変量仮説の検討

3.1 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 (Matsumura

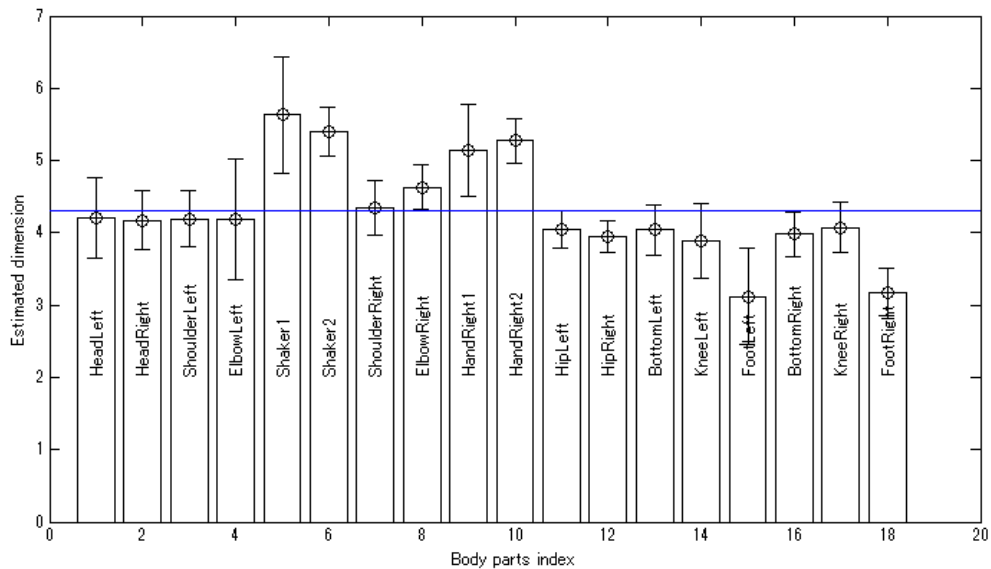


図 3: 18 の身体部位ごとの平均のアトラクタ次元(それぞれ 5 演奏者・5 運動条件の平均)

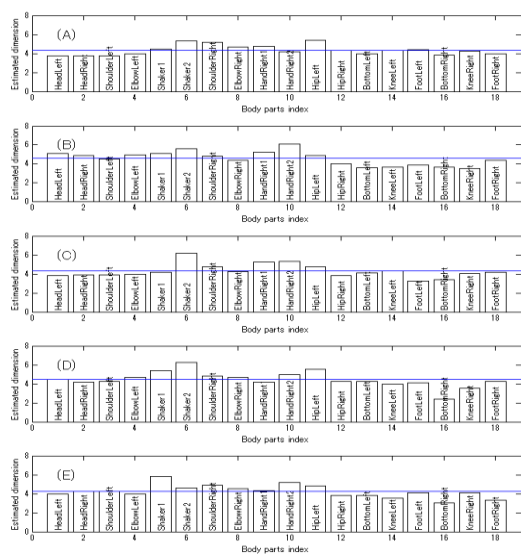


図 4: 各演奏者・身体部位の平均アトラクタ次元

et al., 2011; Yamamoto, Ishikawa, & Fujinami, 2006; Yamamoto & Fujinami, 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 2(a))によって、86.1Hz のサンプリングレートで計測された(図 1a-4)。

3.2 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 2(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 2(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ているため、埋め込み座標上で非線形ノイズ処理(Sauer, 1992; Kostelich & Schreiber, 1993)を行った。ノイズ処理前と後の時系列の一例として、図 1(b-4)にある代表的な演奏者(A)の楽器の動きを示している。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 2-最近傍次元の推定を行った。最近傍次元の推定法の詳細は Hidaka & Kashyap (in preparation)を参照のこと。

4. 結果・考察

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 2)。そのアトラクタの最近傍

次元の推定結果を図3に示す。図3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、演奏の中である楽器、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4)。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、リズム運動における力学的不変量の分析を行った。具体的には、Hausdorff次元分布および一般化相関次元(Hentschel & Procaccia, 1983)と同等の量分布をより高い精度で計算する方法(Hidaka & Kashyap, in preparation)を用いて、各演奏者、各運動速度条件のそれぞれで全身18箇所の運動についてアトラクター次元の推定を行った。この結果、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ーンを特徴付けていると考えられる。

この結果は、サンバ演奏とはどのようなものかドメイン固有の知識を持つ演奏者の立場からは、“自明”な結果である。つまり、明らかにサンバ演奏時には楽器の運動が中心的な役割を果たしており、また、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っているのか、は必ずしも自明ではない。本研究の解析結果の示していることは、サンバ演奏者の持つ直観や経験則が正しいことを裏付けている。つまり、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。

最後に、ここで得られたアトラクター次元の意味について、現時点で著者の持つ推測を交えて考察してみたい。理論的に、同じ系に含まれる部分要素から推定されるアトラクターは、理論的には観察方法によらず同一の不変量を持つ。したがって第一に、次元の解釈として、異なる次元を持つ身体部位間は、同じ系(強い相互作用を持つ系)にあるとは考えにくい。したがって、本研究で対象としたサンバ演奏という文脈では、楽器より有意に低い次元をもつ部位は、楽器との協調性・相互作用が弱かったのではないかと推測できる。次に、もう一つのより踏み込んだ(必ずしも正しくはない)解釈としては、同じ次元を持つ身体部位は、同じ系の一部である可能性がある(これは「同じ系⇒同じ次元」の逆なので、論理的には必ずしも成り立たない事に注意)。この意味で、サンバ演奏時には、楽器・その持ち手と、腰部の動きが強い相互作用をもち、同一の系の一部としてみなせる可能性を示している。また、一般にアトラクター次元は、その系の複雑性の一側面を表す指標である。理論上、アトラクター次元は、アトラクター多様体上の局所的な座標系の(アトラクター上の測度の意味で)平均的な次元を意味する(Cutler, 1992)。この意味で、楽器部および腰部の運動における相対的に高い次元は、他の部分に比べて、より複雑な動きであるといえる。今後の研究では、より詳細な分析により、この比較的高い次元が見られる各部での相互作用や、またアトラクター分類などの研究を進めることを計画している。

本研究で採用した力学的不変量仮説(Hidaka & Fujinami, 2013; 日高, 2013)は、Marr(1982)以来、認知科学、認知神経科学の分野で支配的な考えであった最適化による計算理論を越えて、力学系に基づく運動表現を中心に据えるものである。本研究の結果は、この仮説を支持する経験的な知見の一つとみなせる。この観点からは、今後、サンバ運動以外の特に非周期的な運動を調べる事で、この仮説の一般化可能な範囲を調べる事が重要である。

謝辞

本論文の執筆に多くのご助言をいただいた藤波努先生に感謝申し上げます。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

- [1] Breazeal, C. & Scassellati, B. (2002). Robots that imitate humans., Trends in Cognitive Sciences, 6 (11), 481-487.
- [2] Cutler, C. D. (1993). A Review of The Theory and Estimation of Fractal Dimension. Tong, H. (Ed.). (1993). *Dimension estimation and models* (Vol. 1). World Scientific.
- [3] Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The journal of Neuroscience*, 5(7), 1688-1703.
- [4] Grassberger, P., & Procaccia, I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 9(1), 189-208.
- [5] Hausdorff, F. (1918). Dimension und äußeres Maß. *Mathematische Annalen*, 79(1-2), 157-179.
- [6] Hentschel, H. G. E., & Procaccia, I. (1983). The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 8(3), 435-444.
- [7] Hidaka, S. (2012) Identifying Kinematic Cues for Action Style Recognition. In *Proceedings of The Thirty Fourth Annual Meeting of Cognitive Science Society*, 1679-1684.
- [8] Hidaka, S. & Fujinami, T. (2013). Topological Similarity of Motor Coordination in Rhythmic Movements., In *Proceedings of The Thirty Fifth Annual Meeting of Cognitive Science Society*.
- [9] Hidaka, S. & Kashyap, N. R. (in preparation). Estimating Hausdorff Dimension Distribution Through Nearest Neighborhood.
- [1 0] Kantz, H., & Schreiber, T. (1997). *Nonlinear time series analysis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [1 1] Kostelich, E. J., & Schreiber, T. (1993). Noise reduction in chaotic time-series data: a survey of common methods. *Physical Review E*, 48(3), 1752.
- [1 2] Matsumura, K., Yamamoto, T., & Fujinami, T. (2011). The role of body movement in learning to play the shaker to a samba rhythm: An exploratory study. *Research Studies in Music Education*, 33(1), 31-45.
- [1 3] Marr, D. (1982). *Vision*. W.H.Freeman & Co Ltd.
- [1 4] Ott, E., Withers, W. D., & Yorke, J. A. (1984). Is the dimension of chaotic attractors invariant under coordinate changes?. *Journal of Statistical Physics*, 36(5-6), 687-697.
- [1 5] Sauer, T. (1992). A noise reduction method for signals from nonlinear systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 58(1), 193-201.
- [1 6] Shaw, R. E., Flascher, O. M., & Mace, W. M. (1996). Dimensions of event perception. *Handbook of perception and action*, 1, 345-395.
- [1 7] Takens, F. (1981). 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.
- [1 8] Theiler, J. (1990). Estimating fractal dimension. *JOSA A*, 7(6), 1055-1073.
- [1 9] Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement – minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.
- [2 0] Turvey, M. T. (1998). Dynamics of effortful touch and interlimb coordination. *Journal*
- [2 1] Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 358, 593-602.
- [2 2] Yamamoto, T., & Fujinami, T. (2008). Hierarchical organization of the coordinative structure of the skill of clay kneading. *Human Movement Science*, 27(5), 812-822.
- [2 3] Yamamoto, Y., Ishikawa, K., & Fujinami, T. (2006). Developmental stages of musical skill of samba. *Journal of biomechanics*, 39, S555.
- [2 4] 川人光男(1996). 脳の計算理論. 産業図書.
- [2 5] 日高昇平 (2013). 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.