JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	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
Author(s)	日高，昇平
Citation	第15回身体知研究会予稿集，SIG-SKL-15：9-15
Issue Date	2013-03-02
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/11478
Rights	日高昇平，第15回身体知研究会予稿集，2013，pp.9-15．Copyright (C) 日高昇平．
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

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

Dynamical Invariance Hypothesis: As a Superordinate Principle Upon Motor Control Optimality Theory

日高　昇平[1]

Shohei Hidaka[1]

[1] 北陸先端科学技術大学院大学

[1]Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: 本研究では、ある種の最適化としての身体運動の計算理論を再考する。その上で、既存の理論の限界を指摘し、その問題を解消する新たな計算理論を提案する。本研究で提案する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。この仮説を検討するため、５種類の身体運動の力学的性質の分析を行った。その結果、力学的不変量仮説の予測するとおり、身体の一部だけを使う局所的な動きであっても、その他の身体部位において類似の力学的性質が見られた。この結果は局所的な運動の最適化では説明できず、身体運動を全身の協調によって構成されるある種の力学系とみなせる事を示唆する。

身体運動の計算理論

Marr(1982)の初期視覚系に関する計算理論の提案以来、視覚のみならず様々な分野において、認知処理過程をある種の最適化による不良設定問題の解消とみなすパラダイムが確立してきた。身体運動もその例外ではなく、ある種の拘束条件を満たす最適化問題により運動制御および目標軌道生成が議論されてきた。本稿では、身体運動の計算理論について再考し、これまでの理論的パラダイムを超える新たな計算理論について考察していきたい。以降ではまず Marr の計算処理過程の水準を簡潔に振り返り、その運動制御の分野での応用について述べる。次に、Marr 以来およそ 30 年にわたって支配的なパラダイムである「計算理論＝最適化」に代わる仮説として、非線形力学の理論を基礎とする力学的不変量仮説について述べる。本研究では、実際の運動データの分析を行い、力学的不変量仮説の経験的に検討した。最後に、仮説の予測・可能性を交えて、今後の研究について考察する。

Marr(1982)は初期視覚をある種の計算処理とみなし、その計算機構を計算理論、アルゴリズムと表現、ハードウェア実装の3水準に分ける事を提唱している。計算理論の水準は、計算の目的を記述する最上位の水準であり、計算処理の入力と出力を数理的に表現する。アルゴリズムと表現の水準では、計算理論で記述される入力から出力を与える具体的な計算手続き(アルゴリズム)を同定する。ハードウェア実装の水準では、脳(神経生理的機構)や電子計算機などの物理的な機構において、どのようにアルゴリズムが実現されるか議論する。この3つの水準において、一般に、1つの計算理論に対して複数のアルゴリズムと表現が、また1つのアルゴリズムと表現に対して複数のハードウェアでの実行が可能である。また、一方で、人の認知を対象とする研究では、脳によるハードウェア実装により、可能なアルゴリズムと表現は制限され、また実時間での実行可能性などの点から、アルゴリズムは計算理論水準の仮説を制限する。このような3水準間の双方向の包含関係、実効的な要請により、計算処理としての認知過程の理解を深めていく必要がある(川人, 1996)。

Marr (1982)によれば、初期視覚の計算理論は、2 次元的な情報(網膜像)から3 次元の形態を推定する事である。3 次元の構造はある 2 次元像に一意に投影できる(順問題)。しかし、2 次元上のパタンから元の 3 次元像へ(逆問題)は一意に定まらない。これは、逆問題の解が複数(あるいは無数)に存在する不良設定問題の一種である。このような不良設定問題を解く一つの方法として、ある種の制約を仮定した上で、その制約を満たす解を求める事が提案されている(Poggio, Torre, & Koch, 1985; Marr, 1982; 川人, 1996)。これは、標準正則化理論と言われる制約付き最適化とみなせる(Tikhonov & Arsenin, 1977)。このような最適化としての視覚の計算理論の具体例として、両眼視の統合による奥行きの再構成や、陰影による 3 次元構造の推定などがある(Marr, 1982)。このような計算理論は、神経生理的な知見とも合致する事から、大脳皮質の初期視覚野がある種の最適化を行っていると考えられている(Olshausen & Field, 1996)。

初期視覚の計算処理に関する最適化理論の成功は、当然ながら、他の認知処理の説明についても大きな影響を与えてきた。身体運動の計算処理過程もこの例外ではなく、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(間接角、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の自由度がそれよりも大きいために、視覚系と本質的に同種の不良設定問題になる。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、間接まわりのトルクを最小化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)。

力学的不変量仮説

すでに紹介したように、Marr(1982)以来、初期視覚系のみならず様々な分野において、認知処理過程をある種の最適化による不良設定問題の解消とみなすパラダイムが確立してきた。しかし、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、自己と他者の身体間で変換を行う必要があるが、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)。

これに対し、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は、非線形力学系を基礎とし、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を身体運動とみなす(Hidaka, 2012; Hidaka & Fujinami, under review)。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、その不変的性質(アトラクタの位相構造)を認識する事に当たる。

従来の研究と比較して、本研究の理論的な新規性は、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、それと同相な位相的構造(座標変換に不変な性質)を扱う点にある(図 1)。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。具体的には、記号力学系(Lind & Marcus, 1995)と呼ばれる理論体系を用いて、身体運動を力学的な位相構造を分析・記述する。近年、力学方程式が陽に与えられていない経験的な時系列に対して、記号力学系を推定する方法が提案されている(Buhl & Kennel, 2005; Hidaka & Yu, 2010)。この技術を用いる事で、力学系間の位相的類似性を計算する事が可能である

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。以下、この4点についてより詳しく説明する。

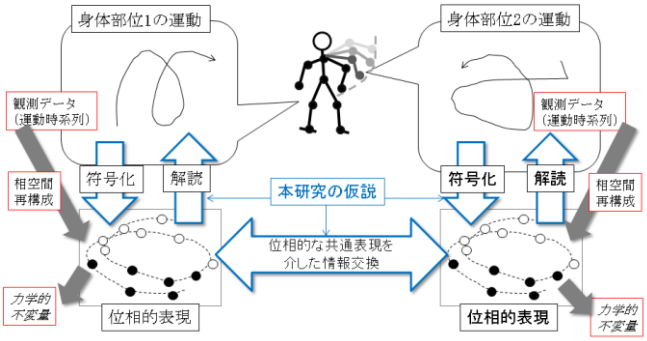

図１：身体運動の座標不変な記述と、複数身体部位間の動的相互作用

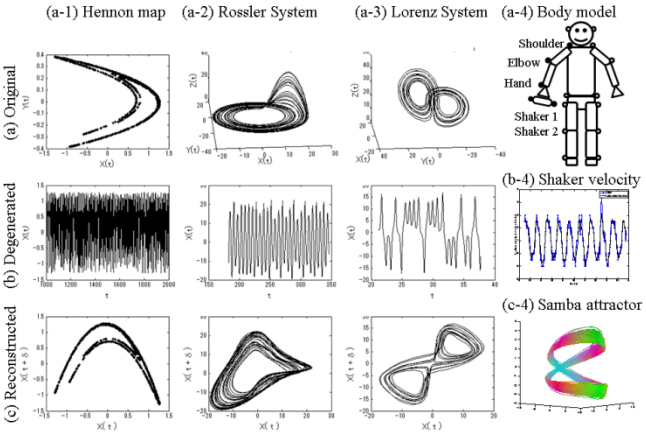

図２:アトラクタの再構成(a)Henon 写像, (b)Rossler 系, (c)Lorenz 系, (d)人の楽器演奏運動(Hidaka & Fujinami, under review)

(1)身体運動～力学系

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。これは、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

の間の相互作用を、それらの系の状態とその状態遷移の系列として捉える事である。この考えでは、少なく見積もっても数百、あるいは個々の神経細胞の活動まで記述すれば、ある時点の身体は無数の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。ある相空間上の軌跡として描かれた身体運動は、生理的・心理的機構のため取り得ない状態も含むので、その相空間の全てを隈なく通過するわけではない。むしろ、ほとんどの軌道は、相空間上のある特定の部分空間のみを通過し、その部分空間の集合はその力学系のアトラクタに対応する。ある力学系におけるアトラクタは、十分に長い時間が経った後で、かつ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として定義される。力学系では、相空間そのものよりも、その中に埋め込まれたアトラクタ (身体運動の状態集合)の性質を分析する。従って、潜在的な状態空間が数百あるいは無数にあったとしても、実効的にアトラクタの次元が低い場合は、相空間の次元によらず、その性質を分析する事は可能である。

(2) 不変量の計算

ここまでの議論では、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事を前提に話を進めたが、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(i.e., 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。元のある高次元空間上の軌道が、不完全な観測により低次元空間への射影された場合、多くの場合、その軌道を調べるには不都合な特異点(軌道の交差点。この点では軌道の方向が不定となる)が発生する。従って、この軌道の“もつれ”をほどくのが埋め込みである。

アトラクタ再構成の具体例を図 2 に示す。図 2 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 2 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+δ)}を2次元空間とみなして埋め込んだのが図 2 下段である。一般に、十分に高い次元を持つ空間への埋め込みにより、特異点がなくなる。Takens (1981)は、任意の k 次元アトラクタは(2k+1)次元の時間遅れ座標により十分に埋め込まれることを示した。

この埋め込み操作によって再構成されたアトラクタは、距離的な構造など他の幾何学的性質の保存は保証されていない。従って、アトラクタの位相的な構造のみが得られる。一方、アトラクタの位相構造の分析から、そのアトラクタ次元やリヤプノフ指数といった重要な性質を特定することが可能である(Kantz & Schreiber, 1997)。このような性質は、理論上は任意の滑らかな非線形変換によらず計算できるため、(任意の滑らかな非線形変換に対する)不変量と呼ばれる。この不変量の構造をうまく利用することで、異なる2つの空間の対応付け(変換)を陽にする事なく、その2つの空間の緩い対応付けを行う事が出来る。ここで、緩い対応付けとは、数学的には同相写像(あるいはその近似)を意味している。つまり、異なる2つの空間上の距離を対応付けすることにはあまり意味がないので(e.g., 作業空間上での cm と肘角度 rad のスケールを含んだ対応付け)、距離的な構造を特定せず、位相的な構造のみに着目した対応付け問題を考える事になる。

(3) 不良設定性の解消

こうしてアトラクタ間の同相写像が得られる場合、それによって Marr や川人の主張する意味での不良設定性は解消される。なぜなら、第一に同相写像の計算結果が任意の滑らかな非線形変換に不変であり、また相空間の対応付けではなく、アトラクタの対応付けに問題が帰着しているためである。相空間はアトラクタが埋め込まれている限り、任意の次元でよく、そのため埋め込み空間自体の対応付けにもあまり意味が無い。この観点では、不良設定問題は2つの相空間の対応付け問題であり、それはアトラクタの性質を知る上で必要がないため、そもそもそういった問題が生じない。従って不良設定問題は、対応付け問題を「解かない」事によって解消され、むしろ焦点は座標不変なアトラクタの性質の分析に移る。

(4) 運動制御の最適化理論との関係

一方、本仮説は運動制御の最適化理論と対立しているわけではない。むしろ、既存の最適化理論の必要性をうまく取り込んだ形で、より上位の説明を与える事になる。つまり、前述の不変量の計算には、運動制御(変換)におけるある種の滑らかさが保証されている必要があるためである。既に述べたように、任意の「滑らかな」非線形変換に不変な量を計算する事が本仮説の要点である。逆に言えば、もし運動制御がある滑らかではない変換を含む場合、変換後の情報から不変量を計算できる保証はない。従って、本仮説に従えば、最適化理論で保証されるある種の滑らかさ制約は、それ自体が最上位の計算理論ではなく、不変量の計算にそれが必要であるためであると言える。

(5) 仮説の予測

複数の身体部位の協調により成立する多関接運動において、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るのに対し、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。例えば、主に右手を使ってノックをする場合、下半身は

それを支えているだけであり、最適化理論の立場からは、右手の運動をあえてコストのかかる計算をしてまで、下半身をノック運動に協調的に参加させる事は予測できない。また、川人(1996)は力学系による運動の説明は、歩行、水泳などの周期的、自動的な運動に対しては有効である事を認めつつ、しかし到達運動など随意的な運動に対しては有効な説明ではないとの見解を示している。これに対し、本研究で提示する仮説は、周期的でない運動に対しても、力学的性質は運動の表現に本質的であると考える。従って、力学的不変量仮説を経験的に検証するために、複数の部位を用いて行う周期的・非周期的な身体運動の分析をおこなった。

力学的不変量仮説の検討

二つの仮説の予測を検討するために、本研究では日常の 5 種類の動作について全身 15 箇所の運動を計測した Ma らのデータベースの分析を行った。Ma ら(2006)は 31 人の参加者を対象として、歩行、ノック、持ち上げ、投げ、またそれらの複合動作の 5 種類の動作の運動を計測し、それをオープンアクセスのデータとして公開している。分析の対象とした 5 種の運動のうち、歩行、ノックは周期的であり、持ち上げ、投げ、複合動作は非周期的な運動である。ただし、歩行または複合動作以外では、各試行中、個別の動作が静止状態をはさんで複数回繰り返されているので、複数の繰り返し動作全体としては周期的である。図 3(a)は Ma のデータベースで計測された 15 点の身体部位で、図 3(b)は運動時系列の一例としてノック、持ち上げ、投げの動作をそれぞれ 5 回繰り返しているときの右腕・肘・肩関節の角度の時間変化を示している。データ計測の際には、運動の前に4つの文章を読み、その文章に従った感情状態で運動をすることが求められた。4つの文はそれぞれ、幸せ(happy),怒り(angry)、悲しみ(sad)、中立(neutral)な感情を喚起する文脈を提示し、それらの文脈による動作の変化がデータ取得時の一つの目的でもあった(教示文の詳細は Ma et al. (2006)を参照)。各実験参加者は、5 種類の動作、4 種類の感情的文脈をそれぞれ2試行繰り返し、計40試行の運動計測を行った。

この分析では、力学的不変量仮説が予測するように、異なる複数の身体部位間において同相なアトラクタが見られるか調べた。身体は物理的に結合しているため、物理的に近接した部位間は、直接的に互いの振動などの影響を受ける。こういった単純に物理的近接性によって運動の性質が類似する可能性を棄却するため、物理的に離れており、かつ機構の対照性(e.g., 左手・右手)を持たない部位間の力学的同相性を調べる。実際の計測では、ノック、持ち上げ、投げの動作では右手を主に動かす運動を実験参加者が行った。従って、対称性を持つ左手や物理的に近接する頭部を含む上半身を除き、下半身の運動と、運動の中心である右手部の位相的類似性を分析した。

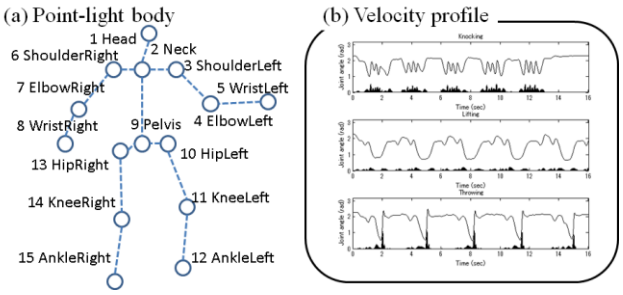

図 3: (a)身体上のマーカの配置, (b) 運動時系列の一例としてノック、持ち上げ、投げの動作をそれぞれ 5 回繰り返しているときの右腕・肘・肩関節の角度の時間変化

分析手続き

15箇所それぞれの身体部位に取り付けられたマーカの運動ごとに、その運動速度ベクトル(3次元)を10点の時間遅れ座標系(30 次元)に埋め込み、相空間の再構成を行った。再構成されたアトラクタに対し、記号的最近傍法(Buhl & Kennel, 2005)を用いて、身体部位ごとに記号力学系を推定した。この結果、再構成されたアトラクタの各点には、その状態が記号列(e.g., “0110110…”など)として与えられており、もし2つの位相的に同一なアトラクタがあれば、理論上同一の記号列が出現すると考えられる。従って、この記号列の出現確率分布の相関係数を、アトラクタの位相的類似性と定義する。分析を行った 15 の身体部位をそれぞれ Head, Neck, ShoulderLeft, ElbowLeft, WristLeft, ShoulderRight, ElbowRight, WristRight, Pelvis, HipLeft, KneeLeft, AnkleLeft, HipRight, KneeRight, AnkleRight と表記する(図 3).

結果・考察

まず遅延座標系への埋め込みにより再構成されたアトラクタの一例として、図 4 に投げ動作時の各部の動きからアトラクタを示す。図 4 の各パネルには右上部3箇所(ShoulderRight, ElbowRight, WristRight), 左足部2箇所(KneeLeft, AnkleLeft), 右足部2箇所(KneeRight, AnkleRight)のそれぞれの動きから再構成されたアトラクタを示している。投げ動作時は右腕を主に使っており、そのため、右腕3箇所に複数の投げ動作に一貫した特徴的なパタンが表れている。一方、投げ動作時に主な動作部位ではない右膝にも、右肘と類似のパタンが一貫して見られた。次に、図 5 に周期的な運動の例として歩行時の動きから再構成されたアトラクタを示す。歩行動作では主に両足部の動作が中心的であると考えられ、実際に、両足部には一貫した周期的なアトラクタが見られた。さらに、両足部と類似の構造を持ったアトラクタは右手首にも見られた。これらの例は、非周期的・周期的な運動の物理的に離れた身体部位間で類似の位相構造を持つアトラクタの存在を示唆している。

次に、以上の観察に見られたアトラクタの位相的類似性を定量的に評価するために、記号力学系の推定を行い、記号列の出現確率分布の相関係数を求めた。仮に同一の位相構造を持つアトラクタの場合、この相関係数は1になる。従って、こ

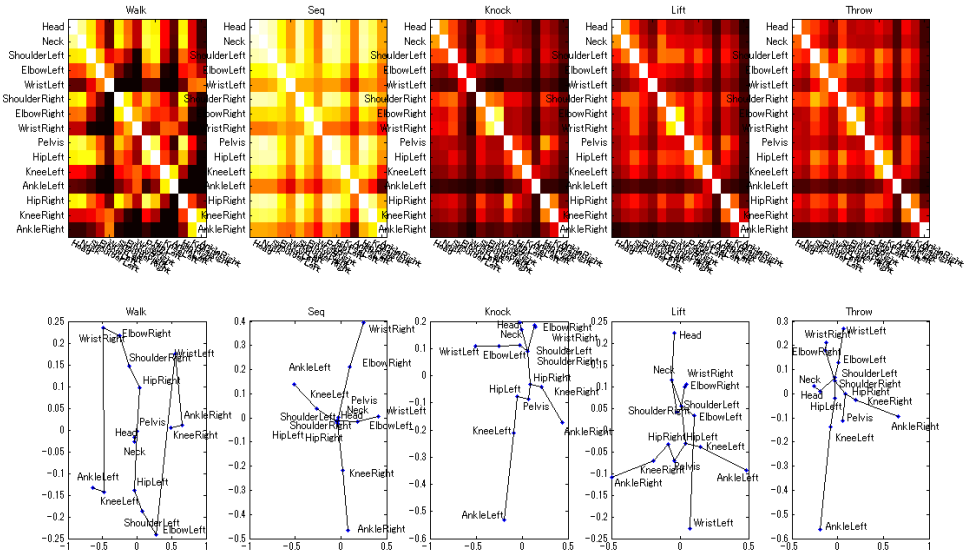

図 6: 5 つの運動(歩行，ノック、持ち上げ、投げ、複合動作(Seq)における位相的類似性(上段)およびその多次元尺度構成法による可視化(下段)。

の相関係数の高さをアトラクタの位相的類似性として定義する。歩行、ノック、持ち上げ、投げ、複合動作の5種類のそれぞれについて、31名のデータの平均的な相関係数行列を図 6 に示す。図 6 上段は、ヒートマップにより相関係数行列を表しており、相関係数 0 から 1 が、黒、赤、黄色、白に対応している。図 6 下段は身体部位 i,j 間の相関係数 C_{ij} に対し、擬似距離を $Dij=(1-C_{ij})^{1/2}$ を定義したときに得られる多次元尺度法による身体部位間の類似性の 2 次元的可視化を表している。これらの 2 次元表現では、各点が身体部位を、また点間の距離が相関行列により定義された点間の距離を近似している。また、視覚的に類似性を見るために、与えられた擬似距離 *Dij* に対する 15 身体部位間の最小全域木を線分で表している。

図 6 上段の相関行列から見て取れるように、歩行、手の動作(ノック、持ち上げ、投げ)、と複合動作の身体の類似性のパタンは大きく異なっている。歩行動作では、右手部と左足部、左手部と右足部がそれぞれ類似しているが、それらの間は大きく異なっており、胴体部(頭部、腰、肩)を中間につながっている(図 6 下段)。複合動作では、胴体部を中心に、四肢がそれぞれ胴体部への物理的な近さに従って(e.g., 右肘、右手首、左膝、左かかとの順に)放射状に最小全域木を構成している。一方、ノック、持ち上げ、投げ動作では、ほぼ人体の物理的な結合に一致したような最小全域木が見られ、一部の身体部位を除いて、全体的に類似性が高い。これらの位相的類似性のパタンは、頭部(Head, Neck)，右腕部 (ShoulderRight, ElbowRight, WristRight)，左腕部 (ShoulderLeft, ElbowLeft, WristLeft)，腰部(Pelvis, HipLeft, HipRight)，左足部(KneeLeft, AnkleLeft)，右足部(KneeRight, AnkleRight)の6つに身体部位をグループ化した上で、各部と右腕部との平均相関係数としてまとめた(図 7)。ただし右腕部と右腕部との相関では同じ身体部位間の相関係数(=1)は除いて平均を計算した。図 7 は、手の3動作(ノック、持ち上げ、投げ)がいずれも右腕を中心とし

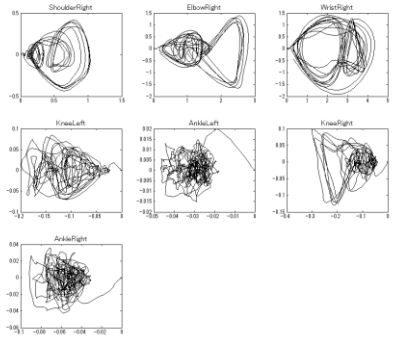

図 4: 投げ動作における各身体部位の速度から再構成された相空間

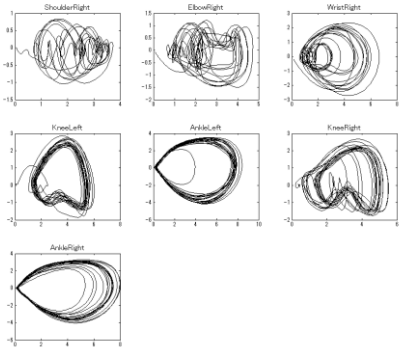

図 5: 歩行動作における各身体部位の速度から再構成された相空間

て類似の位相構造が見られる一方で、他の身体部位でも有意に0より大きい相関係数が見られる事を示している($p<0.05$)。さらに、複合動作では、ほとんど全ての身体部位で高い相関係数が見られ、ほとんど全身の動きが類似のアトラクタとして記述的出来る事が示唆された($p<0.01$)。一方、歩行では、右腕部に対し、左腕部と右足部は0より有意に異なる相関係数を示さず、右腕とこれらの身体部位は異なる位相的構造である事を示唆している。

以上の結果をまとめると、位相的構造が、運動の種類に固有のパタンで、しかしいずれも位相的類似性の連続的な分布を持っている事を示している。個別の動作ごとに見ると、(1)歩行では、2つの位相構造(右手-左足、左手-右足)が見れる事、(2)手による動作ではほぼ身体の結合に従った連続的な位相構造の変化が見られる事、また(3)複合動作では全体的にどの身体部位から再構成されたアトラクタも位相的類似性が高く、胴から四肢の端点に向かった放射状の位相的変化が見られる事を示している。以上の結果は、少なくとも以下の二つの点で重要である。第一に、非周期的・随意的な運動(投げ、持ち上げ、複合動作)においても、物理的に離れた身体部位間(右腕と右足など)で、一定の類似性をもったアトラクタの位相的構造が見られた。この結果は、力学的不変量仮説の予測を支持している。第二に、周期的な運動(e.g., 歩行)であっても、一つの力学的な性質で記述できない可能性が示唆された。これは、歩行において、右腕-左足、左腕-右足が類似する一方で、これらの間の位相的類似性が低かった事で、位相的に異なる複数の振動子の結合的系である可能性があるためである。

この力学的類似性は、単純に身体が物理的に結合しているために起こる随伴的な振動などによるものとは、以下の2点で考えにくい。1点目は、歩行動作において、複数の実験参加者の間で一貫して、左手部-右足部と右手部-左足部で位相的に異なるアトラクタが見られた点である。もし身体部位間の物理的な結合による随伴性のみによれば、歩行に限らず全ての動作で共通の位相的構造の身体上の分布が予想される。しかし、歩行、手の動作、複合動作それぞれで大きく異なった分布が見られた。2点目として、特に歩行において、右手首と左かかとなど、物理的には最も遠い身体部位間でより位相的に類似なアトラクタが見られた点が挙げられる(図 4)。以上の事から本分析結果は、力学的不変量仮説を支持すると考えられる。

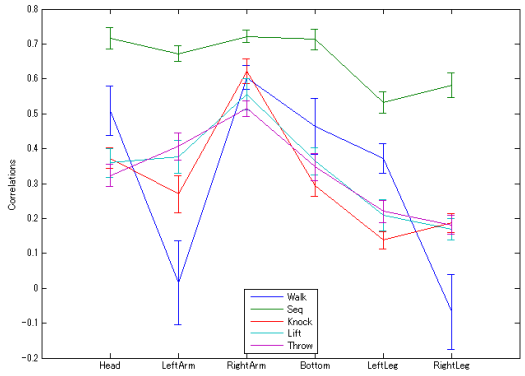

図 7: 各運動時における頭部、左腕部、右腕部、腰部、左足部、右足部と右腕部との平均相関係数

総合討議

本研究では、身体運動の制御・生成における計算理論を再考し、その不良設定性についての疑問を出発点として、新たな計算理論の提案を行った。本研究で提案する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。滑らかさなどのある種の最適化を中心に据える最適化理論に対し、力学的不変量仮説の計算論的な利点の一つは、不良設定性が本質的に存在しない点である。そのため、力学的不変量仮説は、自然な身体動作における複数の身体部位間の協調を通じて、複数の異なる身体部位間で類似の性質を持った力学系の存在を予測する。一方、最適化理論では、物理的に、あるいは身体機構的に異なる身体部位間において、その間の運動表象の変換には多大な計算論的コストがある事を予測する。そのため、例えば、右腕の持ち上げ動作などの局所的な運動では、あえて使う必要のない下半身の運動は抑えるべきであると考えられる。従って、これらの計算理論的な予測は、特に協調的な運動の必要性が最小化される局所的な運動において異なる身体部位間で同質の力学的性質が見られるかを分析する事によって検討された。仮設の予測を踏まえ、周期的・非周期的な5種類の運動を収録したモーションデータベース(Ma et al., 2006)を分析した。その結果、位相的類似なアトラクタの身体上の分布は運動の種類によりそれぞれ固有であるものの、いずれの場合も、異なる身体部位間において、一定の力学的な類似性が見られた。

本研究で提案した力学的不変量仮説は、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、その必要条件として含むより上位の理論と位置づけられる。特に、力学的不変量仮説の一つの計算論的な利点は、座標不変性であり、これは運動を行為者とその観察者の両方を統一的に議論できる可能性を与える。運動の行為者・観察者の間で共通する枠組みで身体運動を捉えることにより、模倣を始めとする社会的認知・学習への理論的応用も期待できる。身体模倣、あるいは広義の共感について、古くはデカルトが他者理解における“common sense”の必要性を論じ、また従来の認知科学的研究においても、“多種感覚器共通表現”を仮定する概念モデルの提案など(Metzoff & Moore, 1997)が行われ、またその神経基盤の同定など(Iacoboni et al, 2001)が認知神経科学の中心的な話題となっている。しかし、具体的に計算可能な数理的な水準でこれを説明するモデルは確立されていない(Breazeal & Scassellati, 2001; Wolpert, Doya, & Kawato, 2003)。本研究の発展は、こうした一連の社会的認知の研究に関して、これらの知見を統合する理論的枠組みに関する示唆を与える事が期待できる。

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。本研究の一部は人工知能財団、科学研究費補助金(2330009)、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] Buhl, M. and Kennel, M. B. (2005). Statistically relaxing to generating partitions for observed time-series data., Phys. Rev. E 71, 046213.

[3] Hidaka, S. (2012) Identifying Kinematic Cues for Action Style Recognition. In *Proceedings of The Thirty Fourth Annual Meeting of Cognitive Science Society*, 1679-1684.

[4] Hidaka, S., & Yu, C. (2010). Spatio-temporal symbolization of multidimensional time series. In ICDM workshops (p. 249-256).

[5] Hidaka, S. & Fujinami, T. (under review). Topological Similarity of Motor Coordination in Rhythmic Movements., In Proceedings of The Thirty Fifth Annual Meeting of Cognitive Science Society.

[6] Kantz, H., & Schreiber, T. (1997). Nonlinear time series analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

[7] Lind, D. & Marcus, B. (1995). *An introduction to symbolic dynamics and coding*. Cambridge University Press.

[8] Ma, Y., Paterson, H. M., Pollick, F. E. (2006). A motion capture library for the study of identity, gender, and emotion perception from biological motion, *Behavior Research Methods*, *38*, 1, 134-141.

[9] Marr, D. (1982). Vision. W.H.Freeman & Co Ltd.

[10] Metlzoff, A. N. & Moore, M. K. (1977). Imitation of Facial and Manual Gestures by Human Neonates, Science, 198, 75-78.

[11] Olshausen, B. A. & Field, D. J. (1996). Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images.

[12] Poggio, T., Torre, V. & Koch, C. (1985). Computational vision and regularization theory. *Nature*, 317, 314-319.

[13] 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.

[14] Tikhonov, A. N.; V. Y. Arsenin (1977). *Solution of Ill-posed Problems*. Washington: Winston & Sons.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 川人光男(1996). 脳の計算理論. 産業図書.