身体運動の模倣メカニズム解明に向けた力学系同定の試み

Attempts to identify dynamical systems behind physical movements

鳥居拓馬 [1*]　日高昇平 [1]
Takuma Torii[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: For learning actions from observation of others' physical movements, often one need to identify how the movements would be generated by the others. By seeing a physical body as a dynamical system, we set our problem to identify the dynamical system from observation of movements. In our attempts for this problem, similarity of movements are measured in relation to a fractal dimension of movements — an invariant under some types of transformation.

1　行為の模倣

人間の子供は大人の行為を模倣できる [3]．本稿では，行為とはある目的に向けた運動をいい，目的に向けた運動の計画を意図という．したがって，観察からの行為の模倣とは，他者の行為をその目的まで含めて，自分の行為として再現することを意味する．この意味での模倣に向けた第１段階は，目的や意図を所与とせずに，観測された運動のみから，その運動を生成しうる身体運動系（身体と意図を含む）を同定する問題である．本論文では，我々は身体運動系を力学系とみなす立場をとる．この立場では，身体運動系の同定とは仮説的な力学系を同定する問題に言い換えられる．

2　力学系同定

観測された部分的な軌道（運動）から，その軌道を生成する力学系を同定する問題を本論文では考える．運動を生成する身体運動系は一般に観測データ（観測された運動）よりも高い自由度をもつと考えられる．そのため，不完全な観測データから，より高自由度な対象を推定する問題は一般に不良設定問題となる．しかし，力学系の理論では，十分長期的な軌道（運動）が十分高い時間解像度で観測されるなど，観測がいくつかの条件をみたす場合には，部分的な観測データを高次元に埋め込む（アトラクタ再構成）ことによって，本来の力学系の特性が一部は失われないことが知られている．ある種の変換に対して不変な特性を不変量と呼ぶ．力学系の不変量のひとつに「点次元」[1, 2] がある．点次元はアトラクタ（点の集合）の各点ごとにその周辺の局所的な自由度を特徴づける量である．したがって，運動から推定された点次元の類似性に基づいて，力学系の類似性を測ることが考えられる．

本稿では，点次元に基づく類似性の尺度を用い，理論的な力学系を同定する問題を検討する．本稿では予備実験のため，真なる力学系のモデル（運動方程式）を所与とした場合に，観測された運動データから，その運動を生成する際に用いられた力学系の未知なるパラメータを推定する問題を考える．点次元の推定法は [2] で提案されている．

3　点次元に基づく類似性

運動のような時系列データではひとつの運動の中での次元の時間的な変化がみられる．こうした次元の時間的変化は力学系の運動全体での特性を記述すると考えられる．そこで，本稿では，運動の中での次元の時間的変化に基づいた類似性を用いる．

観測された運動データを $X = \{x_i\}_{1 \le i \le T} \in \mathbb{R}^{T \times N}$（$N$ 変数，長さ T）とする．点次元推定 [2] では，各データ点 $x_i \in \mathbb{R}^N$ の X 内での最近傍距離 r_i^X を混合 Weibull-Gamma モデルに当てはめて各点 i の次元を求める．観測データ X に対して推定された m 番目の Weibull-Gamma 分布 P のパラメータを $\Omega_m^X = (d_m^X, \lambda_m^X)$，混合確率を θ_m と記すとき，ある点の尤度は以下である．

$$L(r_i^X) = \sum_m \theta_m^X P(r_i^X | \Omega_m^X) \tag{1}$$

運動データ X での次元の時間変化を記述するため，運

*連絡先： 北陸先端科学技術大学院大学
石川県能美市旭台 1-1
E-mail: {tak.torii,shhidaka}@jaist.ac.jp

動データの各点 x_i をその点の次元を最も表す

$$\begin{aligned} & f(r_i \mid \Omega^X, \theta^X) & (2) \\ & = \arg\max_m \theta_m^X P(r_i^X | \Omega_m^X) & (3) \end{aligned}$$

で記号化する．観測データ $\{x_i\}_{1 \le i \le T}$ は記号系列 $S^{X|X} = \{f(r_i^X \mid \Omega^X, \theta^X)\}_{1 \le i \le T}$ に変換される．

一方で，ある仮説となる力学系から生成された別の運動データ Y をえたとする．観測データ X と区別するため，Y を生成データと呼ぶ．この生成データを，各データ点 y_i の Y 内での最近傍距離 r_i^Y に対して，$S^{Y|X} = \{f(r_i^Y \mid \Omega^X, \theta^X)\}_i$ により記号化する．

これらの記号列 $S^{X|X}$ と $S^{Y|X}$ により，X と Y の類似性を定義する．本稿では，運動の中での次元の時間的変化を取り入れるため，記号系列の１次の状態遷移頻度を用いる．$H_{ab}^{Y|X}$ を $(a = s_i^{Y|X}, b = s_{i+1}^{Y|X})$ の頻度とする．本稿では，X と Y の類似性を，$H_{ab}^{X|X} / \sum_{ab} H_{ab}^{X|X}$ を遷移 (a, b) の真の生起確率としたときに，$H_{ab}^{Y|X}$ を観測する確率（多項分布）により定義する．

4 実験結果

本稿では，理論的な力学系のひとつであるレスラー系を用い，レスラー系の運動方程式を所与とした場合に，運動の観測データからその運動の生成するのに用いられたパラメータを推定できるか検討した．レスラー系は 3 変数 3 パラメータの連続力学系であり，カオス的な振る舞いを示す．以下の実験では，真のパラメータを $a = 0.1$，$b = 0.1$，$c = 18.0$ として，観測データ X を生成した．

実験１では，レスラー系の運動を 3 変数ともすべて観測できたとした場合に（完全観測），未知なるパラメータ c を推定できるか検討した．以下の図 1 は未知なるパラメータ c をさまざまに変化させた複数の生成データ Y に対して，観測データ X との類似性を示している．図から，真の値 $c = 18.0$ 付近では類似性が高い．他方で，別の値においても類似性が高い．

実験２では，レスラー系の運動を 1 変数のみ観測できたとした場合に（不完全観測），アトラクタ再構成により，未知なるパラメータ c を推定できるか検討した．以下の図 2 は未知なるパラメータ c をさまざまに変化させた複数の生成データ Y に対して，観測データ X との類似性を示している．図から，実験１と同様に，真の値 $c = 18.0$ 付近では類似性が高いが，別の値においても類似性が高い．

5 考察

実験１および実験２から，本論文の類似性の尺度は，真なる力学系を一意に推定できないものの，真の値により生成される運動を含めて，観測データと類似した運動を生みだす力学系（パラメータ値）を推定できることが示唆される．また本論文の尺度では，一部の変数しか観測できない場合でも，アトラクタ再構成よって，全変数を観測した場合と定性的に近い類似性の評価がえられた．このことは，力学系の次元というある種の変換に対する不変量に着目することで，部分的な観測からその背後にある真なる力学系を推定できる可能性を示唆する．しかし，本稿では予備実験のため，真なる力学系のモデル（運動方程式）を所与とした場合を考えたが，真なる力学系を既知とするのは現実的ではなく，今後はモデルの探索も含めて検討する必要がある．また，理論的な力学系では運動の目的が定まっていない．このため，行為の模倣に関して，今後は目的ある運動において検討する必要がある．

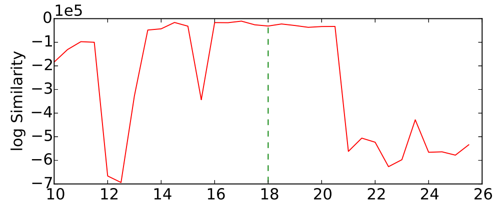

図 1: ３変数すべてを観測できた場合（横軸は c）

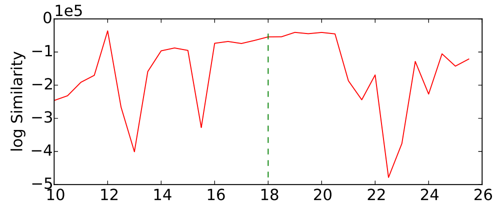

図 2: １変数のみを観測できた場合（横軸は c）

謝辞

本研究は科学研究費補助金 若手研究 A 16H05860 の助成を受けて行われた．

参考文献

[1] Colleen D. Cutler. *A review of the theory and estimation of fractal dimension*, volume 1, pages 1–107. World Scientific, 1993.

[2] Shohei Hidaka and Neeraj Kashyap. On the estimation of pointwise dimension. *ArXiv:1312.2298*, 2013.

[3] Felix Warneken and Michael Tomasello. Altruistic helping in human infants and young chimpanzees. *Science*, 311:1301–1303, 2006.