

RNNを備えた二台ロボット間インタラクションの複雑性解析

澤 弘樹* 山田 竜郎† 村田 真悟‡ 森 裕紀‡ 尾形 哲也‡ 菅野 重樹‡

* 早稲田大学理工学術院 創造理工学研究科 総合機械工学専攻

† 早稲田大学理工学術院 基幹理工学研究科 表現工学専攻

‡ 早稲田大学理工学術院

1. はじめに

個体間のインタラクションが示す多様性は、創発現象を引き起こすために社会的な創造活動の起源であるが、多様性の定量的な解析は不十分である。本研究では、インタラクションの多様性の指標に力学系データ解析における統計的複雑性が利用可能であるかを検討する。

近年、順列エントロピー H と統計的複雑性 C からなる $C-H$ 面を利用することで時系列データの複雑性を視覚的に評価できることが示された [1, 2]。この手法はノイズに対して頑健である点で、実世界で動作するインタラクションの解析と相性が良いと考えられる。

本項では、RNNを備えた二台ロボット間のボール遊びインタラクションに複雑性解析として $C-H$ 面を適用した結果を報告する。

2. 時系列データの複雑性解析

時系列データが持つ周期性と乱雑さを識別する指標に、順列によって空間を離散化した際のデータの分布 p のエントロピーである順列エントロピー H が提案されている [3]。

$$H = - \sum_{j=1}^K p_j \ln p_j. \quad (1)$$

ここで、 p_j は順列の総数に等しい K 個の要素からなる離散分布の j 番目の確率である。

しかし、複雑性は単に乱雑さによって決まるわけではなく、また完全な周期性を持っていてもならない。複雑な現象はシステムとしてある程度の秩序が見られる一方で、遠い未来を予測することができない点でこれらの中に位置すると考えられる。

そこでもう一つの指標として、完全にランダムな分布である一様分布 $p_e = \{1/n, \dots, 1/n\}$ からの Jensen Shannon 距離を不均衡性 D として導入する。

$$D = JS[p, p_e]. \quad (2)$$

ここで、 $JS[\cdot]$ は Jensen Shannon 距離を表す。

順列エントロピー H は完全にランダムな事象で最大値をとり、不均衡性 D は周期信号で最大値をとる単調な関数である。そこで、これらの積を統計的複雑性 C として定義することで、その中間で最大値をとる複雑さの尺度が得られる。

$$C = H \cdot D. \quad (3)$$

時系列データから得られた順列エントロピー H を横軸に、統計的複雑性 C を縦軸にとったグラフは $C-H$ 面と呼ばれる。各時系列データは $C-H$ 面上で、周期性、ランダム性、複雑性などの性質ごとに異なる空間に配置される。

Complexity analysis of interaction between two robots using RNN: Hiroki Sawa (Waseda Univ.), Tatsuro Yamada (Waseda Univ.), Shingo Murata (Waseda Univ.), Hiroki Mori (Waseda Univ.), Tetsuya Ogata (Waseda Univ.), and Shigeki Sugano (Waseda Univ.)

3. 数値実験

本研究はロボット間ボール遊びにおけるボールの2次元軌道および、ロボットが持つニューロンの時系列データに $C-H$ 面を適用することが目的である。このため、先行研究では1次元時系列へ適用されていた $C-H$ 面解析を2次元の時系列データへ拡張し、数値実験で妥当性を確かめた。利用したのはそれぞれ以下の式に従う5種類の2次元時系列データである。

$$x_n, y_n \sim N(0, 1). \quad (4)$$

$$x_n = \cos\left(\frac{2\pi n \cdot a}{m}\right), \quad y_n = \sin\left(\frac{2\pi n \cdot b}{m}\right). \quad (5)$$

$$x_n = ax_{n-1}(1 - x_{n-1}), \quad y_n = by_{n-1}(1 - y_{n-1}). \quad (6)$$

$$x_n = 1 - ax_{n-1}^2 + y_{n-1}, \quad y_n = bx_{n-1}. \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_n = a + b(x_{n-1} \cos \theta_{n-1} - y_{n-1} \sin \theta_{n-1}), \\ y_n = b(x_{n-1} \sin \theta_{n-1} - y_{n-1} \cos \theta_{n-1}), \\ \theta_n = \kappa - \frac{\alpha}{1+x_n^2+y_n^2} \end{cases} \quad (8)$$

ここで式4は白色雑音、式5はリサージュ曲線、式6はロジスティック方程式、式7はエノン写像、式8は池田写像を表す。白色雑音はランダム、リサージュ曲線は周期的、残りの3つはカオス的な挙動を示すサンプルである。これらの時系列データに $C-H$ 面を適用したものが以下の図1である。

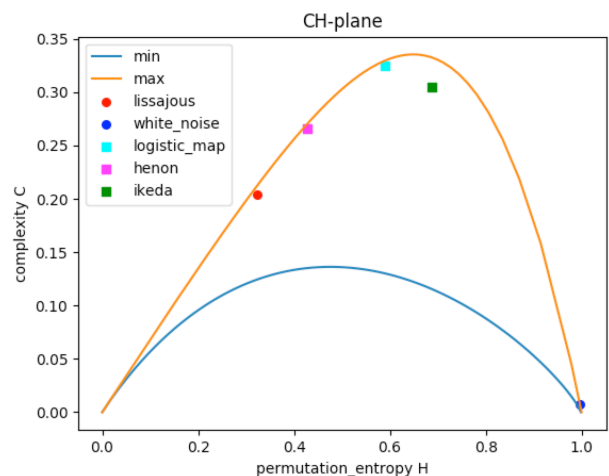


図1: $C-H$ 面。曲線は理論上の最小値と最大値を表す。

2次元時系列データに関して、 $C-H$ 面上で周期的な信号は左下に、ランダムな信号は右下に、カオス的で複雑な信号は中央上方向に配置されることが確認された。

4. ロボット実験

4.1 実験設定

$C-H$ 面をロボット間のボール遊びインタラクション (図2) に適用し、インタラクションの多様性の評価として利用可能であるかを検討する。

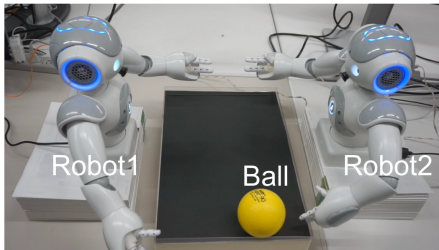


図2: ロボット間ボール遊びインタラクションの実験系。

各ロボットは自身の行動意図に相当する Parametric Bias (PB) を利用した同種の RNN を持ち、以下の4つの行動を学習している [4]。

1. Self-Play: 自分の目の前でボールを左右に転がす。
2. Right: 右から転がって来たボールを右手で返す。
3. Left: 左から転がって来たボールを左手で返す。
4. Attract: 届かない位置にあるボールを要求する。

ここで PB は2次元であり、学習によって行動ごとに1つのベクトルが獲得される。

RNN は現在時刻の右腕の関節角 (4次元)、左腕の関節角 (4次元)、ボールの位置 (2次元) の計10次元と行動の選択に相当する PB を入力とし、次時刻の行動生成とボール位置の予測を行う。

ロボットは RNN により PB に基づいて行動を生成する一方で、予測されたボールの位置と実際の位置の誤差を最小化するように、勾配降下法により PB を修正することで、行動の切り替えを行うことができる。

この実験系では、2台のロボットが持つ RNN のハイパーパラメータを変化させることで異なるインタラクションの振る舞いが見られる。

本研究では、RNN のハイパーパラメータを設定することで以下の2種類の条件を用意し、インタラクションから取得されたボールの軌道および PB の時系列データを $C-H$ 面上で比較した。

- 条件1: 4つの行動の切り替えがスムーズに起こり、インタラクションの多様性が保たれている系。
- 条件2: 1つの行動から他の行動になかなか切り替わらず、インタラクションの多様性が少ない系。

4.2 実験結果

ボールの2次元軌道を $C-H$ 面に適用した結果が図3である。ここで赤が条件1、青が条件2を表す。インタラクションの多様性が保たれていた系のボールの軌道の方が、多様性の少ない系のボールの軌道よりも $C-H$ 面上で右上に配置され、複雑性が高いことが確かめられた。

同様に各ロボットが持つ PB の時系列データを解析した結果が図4である。ここで正方形と正三角形は2台のロボットの区別を表す。2台のロボットの PB は共に、多様性が高い系の方が $C-H$ 面上で右上に配置され、複雑性が高いことが確かめられた。

以上から、インタラクションの多様性の評価に関して、 $C-H$ 面の適用が効果的であることが示唆された。

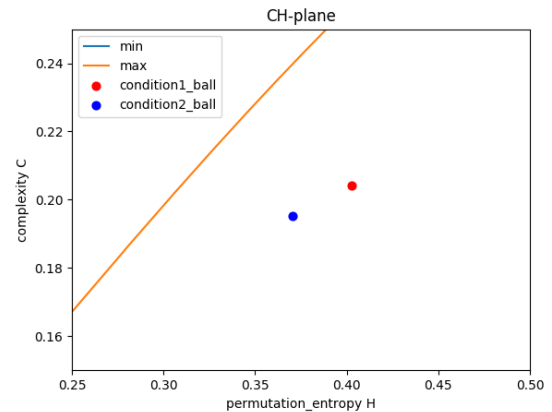


図3: ボールの2次元軌道に $C-H$ 面に適用した結果。

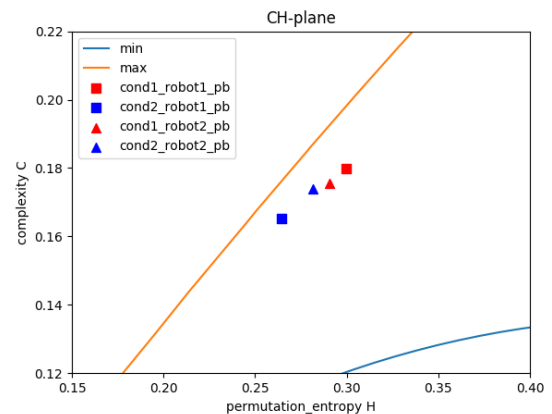


図4: 各ロボットが持つ PB に $C-H$ 面に適用した結果。

5. まとめと展望

本研究では、複雑性解析として順列エントロピーを利用した $C-H$ 面を用いることで、2次元時系列データを視覚的に周期性、複雑性、ランダム性に分類できることを示した。そして、2台ロボット間のボール遊びインタラクションのボール軌道および RNN が持つ PB の解析に $C-H$ 面を適用することで、インタラクションの多様性の評価が効果的に行えることを確認した。

今後はこの結果を参考にし、様々な個体間インタラクションの解析に $C-H$ 面を適用して行く予定である。

謝辞

本研究成果の一部は、文科省科研費 基盤研究 A (研究課題番号: 15H01710), JST, CREST (No: JPMJCR16E2) の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Martin, M. T., A. Plastino, and O. A. Rosso. "Generalized statistical complexity measures: Geometrical and analytical properties." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 369.2 (2006): 439-462.
- [2] Rosso, O. A., et al. "Distinguishing noise from chaos." *Physical review letters* 99.15 (2007): 154102.
- [3] Bandt, Christoph, and Bernd Pompe. "Permutation entropy: a natural complexity measure for time series." *Physical review letters* 88.17 (2002): 174102.
- [4] Chen, Yiwen, et al. "Emergence of interactive behaviors between two robots by prediction error minimization mechanism." *Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*, 2016 Joint IEEE International Conference on. IEEE, 2016.