

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11603

研究課題名(和文)人工知能による抽象戦略ボードゲームのデザイン

研究課題名(英文)Artificial intelligence-based game design for abstract strategy board games

研究代表者

藤田 修(Fujita, Osamu)

大阪教育大学・教育学部・教授

研究者番号：10324881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：囲碁のような抽象戦略ゲームを新規に考案するゲームデザインにおいて、人工知能を活用するため、ゲームの数理モデルを構築する手法について研究を行った。  
まず、経路選択の優劣を競うゲームを例題として、経路データの生成・分析に有用な確率モデルの構築法を研究する過程で、混合分布モデルに適した合成確率密度関数を導き、その有用性を計算機シミュレーションで明らかにした。  
次に、ゲーム木などのグラフの特性を分析するため、複雑なデータの集合間距離関数を用いた分析手法を考案し、各種ネットワークの特性評価への応用を進めた。また、新作ゲームのプロトタイプを開発し、WEB上のアプリとして公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たに導入した確率密度関数は、AIによるゲームデザインへの応用のみならず、実社会における地理情報システムや経路選択・分析の数理モデルなど広範囲の分野で利用可能である。また、複雑なデータの分析のために導入した距離関数は、大規模なネットワークの特性分析やビッグデータの統計的特性分析などにも応用可能である。今後、教育分野でゲームやAIを活用した主体的学習の支援システムを構築する際に有用となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This project investigates new ways to create mathematical models that enable AI to design abstract strategy games, such as chess and Go.

First, for a game in which players compete for route selection, a flat-topped probability density function has been introduced to construct a probabilistic model for generating and analyzing route data. The most appropriate function is based on a hyperbolic function and has been shown theoretically and experimentally to be useful for improving goodness of fit and making a mixture model as simple as possible. Second, a distance function of complex data sets has been developed for analyzing graph characteristics and the relationship between game fun and game tree complexity. Third, an original prototype game was developed in ActionScript and released as a web application.

研究分野：情報学

キーワード：人工知能 抽象戦略ゲーム ゲームデザイン 経路データ 確率モデル 確率密度分布関数 グラフ  
集合間距離関数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

(1) Google が開発した AI (AlphaGo) が最強プロ棋士に勝利した結果、AI が人間と同等以上の棋力を有し、抽象戦略ゲームのデザインの自動化にも利用可能であることが示された。

(2) 研究実施者にレーザー発生器と反射鏡を駒とする新作ボードゲーム考案の経験があった。

(3) 研究実施者が GPS の測位データに関する確率モデルを利用した経路データ分析システムの開発経験を有していた。また、群平均に基づく集合間距離関数を考案し、グラフ特性分析などへの応用を研究していた。

### 2. 研究の目的

(1) 抽象戦略ゲームのデザインにおいて、AI (人工知能) を利用してゲームの難易度や面白さを調整することが可能な数理モデルを構築する。

(2) 例題として取り上げたゲームの勝敗を左右する戦略として重要な経路選択の数理モデルの一つとして、経路データの生成・分析に利用可能な確率モデルを作成する。

(3) ゲーム木の特性分析のため、複雑なデータを定量的に比較可能な距離関数を導入し、大規模ネットワークの統計的分析への応用を図る。

### 3. 研究の方法

(1) 具体的な例題として独自に考案した新作ボードゲームについて、ボード形状、駒の種類・初期配置・動作規則・機能、プレイヤーの人数・手番・操作・勝敗規則など、設定の選択肢を複数用意して、ゲーム進行を計算機でシミュレーションする。集積したデータの統計的特性に基づいて、ゲームの難易度や面白さとの関係性を数理的に分析する。ただし、現状では実用的な AI の構築には大量の良質な学習データと膨大な学習計算を必要とすることが予想されるが、計算機資源が不足しているため、具体的な AI プレイヤーの実装は急がず、汎用性の高い理論的検討に重点をおいて、各種要素技術の開発を行う。

(2) 上記の要素技術のひとつとして、経路データの確率モデルの構築に適した確率密度関数を理論的に評価するとともに、性能評価用データを用意して計算機シミュレーションを行い、数値実験的に性能を検証する。

(3) 複雑なデータを複合的な集合で表現し、群平均に基づく集合間距離関数を適用して各種データの違いを統計的に比較・分析を行う。

### 4. 研究成果

(1) 例題として考案した新作ボードゲームは、盤面上のレーザー発生器と反射鏡をプレイヤーが規則に従って操作して、相手のレーザー発生器の側面や背面にビームを当てるゲームである (図 1)。プレイヤーは 1 手で自分のレーザー発生器またはそのビームが当たっている反射鏡のみを回転または隣接枠へ平行移動できる。このゲームを WEB ブラウザー上で動作するアプリとして作成した (<http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~fuji/koushu/LBeam.html>)。ただし、当初、Flash ActionScript を利用して作成したが、Flash Player のサポートが 2020 年末に終了されたため、現在、他の言語に移植中である。

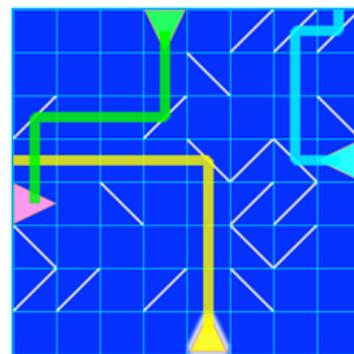


図 1

(2) 上記のボードゲームでは経路選択の良し悪しが勝敗を左右する。経路選択の重要性については離散的データに限定されたゲームに限らず、3次元の連続実空間や高次元空間における各種の AI 応用においても研究価値が高い。そのため、経路データの収集・分析に適した確率モデルの構築に利用可能な確率密度関数として、最頻値の周辺が平坦な形状をした単峰分布 (図 2) を網羅的に調査した。

まず、一般化された関数形として以下 4 つのタイプに分類した。Type A) 一様分布  $U(a, b)$  とベル型分布関数  $F(x)$  の複合分布の確率密度関数:  $c \cdot (F(x-a) -$

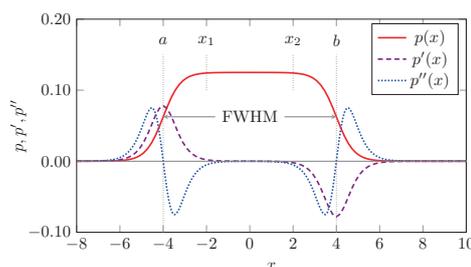


図 2

$F(x-b)$ 、Type B) シグモイド関数  $F(x)$  と  $(1-G(x))$  の積：  
 $c \cdot F(x-a) \cdot (1-G(x-b))$ 、Type C) U字型関数  $g(x)$  と定数の  
 和の逆数： $c/(g(x)+h)$ 、Type D) ベル型分布密度関数の最  
 頻値近傍の平坦化： $c \cdot \Psi(\alpha \cdot f(x))$ 。次に、これらの関数  $F$ 、  
 $G$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $\Psi$  に種々の初等関数を代入して、関数形と形状パ  
 ラメータの単純化、微分・積分の容易性等を評価した。

(4) パラメータ  $m=(a+b)/2$  と  $r=(b-a)/2$  の最尤推定にお  
 いて最適な確率密度関数 PDF は

$$p_{AL}(x) = \frac{1}{2r} \left( \frac{\sinh\left(\frac{r}{s}\right)}{\cosh\left(\frac{x-m}{s}\right) + \cosh\left(\frac{r}{s}\right)} \right)$$

累積分布関数 CDF は

$$P_{AL}(x) = \frac{1}{2} + \frac{s}{r} \operatorname{artanh} \left( \tanh \left( \frac{x-m}{2s} \right) \tanh \left( \frac{r}{2s} \right) \right)$$

で表されることを明らかにした。この PDF の形状はパラメ  
 ータ  $r$  と  $s$  に依存し、尖度は

$$\kappa_{pAL} = \frac{9}{5} + \frac{12}{5 \left( 1 + \left( \frac{r}{\pi s} \right)^2 \right)}$$

と表され、この値の範囲は 1.8~4.2 となる (図 3)。  
 この PDF を用いて、正規分布や正規分布の一樣混合分布を  
 近似するパラメータも示した。

(5) この PDF を非対称形状へ一般化すると

$$p_{BL}(x) = \frac{c}{\left( 1 + \exp\left(\frac{a-x}{s}\right) \right) \left( 1 + \exp\left(\frac{x-b}{t}\right) \right)}$$

また、 $n$ 次元ベクトル空間のマハラノビス距離

$$d_M(\mathbf{x}, \mathbf{m}, \Sigma) = \left( (\mathbf{x} - \mathbf{m})^\top \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}) \right)^{1/2}$$

を利用して多変数関数へ一般化すると次式が得られる。

$$p_{CL}(\mathbf{x}) = \frac{\Gamma(n/2 + 1)}{\pi^{n/2} r^n |\Sigma|^{1/2}} \left[ \frac{\sinh(r^n t)}{\cosh(d_M(\mathbf{x}, \mathbf{m}, \Sigma)^n t) + \cosh(r^n t)} \right]$$

(6) 与えられたデータに対する確率モデルとして、これらの  
 PDF を適用して、パラメータの最尤推定値を容易に求めるこ  
 とができる (図 4)。

また、多様な分布データについても、混合分布モデルを仮  
 定し、一般化 EM 法を用いて最尤推定を行い、赤池情報量基  
 準 AIC において最適なモデルを選定することができる (図  
 5)。これらの結果をまとめた論文をプレプリントサーバ  
 arXiv に登録・公開した (文献①)。

この手法は特定の領域でほとんど一様に分布するデータ  
 を適切な確率モデルとして、生成・分析することができるの  
 で、様々な分野での応用が期待される。

(7) 経路データを離散的な記号列で表現する場合、また、  
 ゲームの進展をゲーム木で表現する場合、グラフなどの形式でデータ  
 を表現して、その比較・分析を行う必要がある。数理モデルとして  
 は集合を基本要素とすることから、集合間距離 (文献②)

$$f(A, B) = \frac{1}{|A \cup B| |A|} \sum_{a \in A} \sum_{b \in B \setminus A} d(a, b) + \frac{1}{|A \cup B| |B|} \sum_{a \in A \setminus B} \sum_{b \in B} d(a, b)$$

を利用して、グラフの複雑度などの特徴を分析する手法を理論的かつ  
 実験的に研究している。

<引用文献>

① Osamu Fujita, Flat-topped Probability Density Functions for Mixture Models,  
 arXiv:2203.17027, <https://arxiv.org/abs/2203.17027>, 2022.

② Osamu Fujita, Metrics based on average distance between sets, Japan Journal of  
 Industrial and Applied Mathematics, Vol. 30, pp. 1-19, 2013.

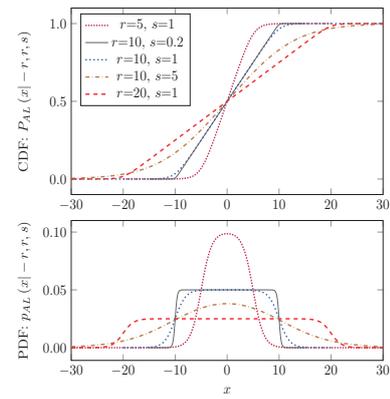


図 3

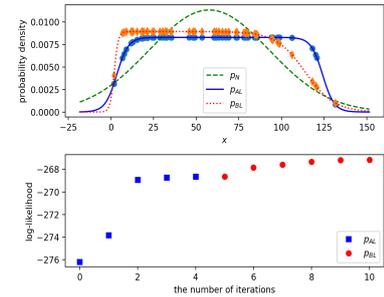


図 4

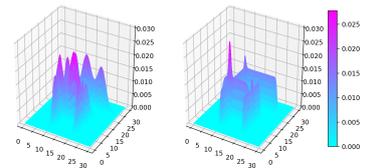
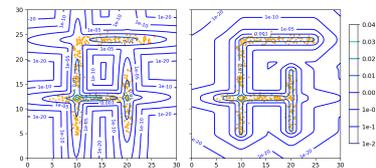


図 5

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Osamu Fujita	4. 巻 2203.17027
2. 論文標題 Flat-topped Probability Density Functions for Mixture Models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2203.17027	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

LBeam <a href="http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~fuji/koushu/LBeam.html">http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~fuji/koushu/LBeam.html</a>
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------