

平成22年 6月 7日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18300078
 研究課題名（和文） 情報幾何学および情報理論を用いた学習機械の特性解析
 研究課題名（英文） Analysis of Learning Machines with Information Geometry
 and Information Theory
 研究代表者
 池田 和司（IKEDA KAZUSHI）
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
 研究者番号：10262552

研究成果の概要（和文）：幾何学的視点からサポートベクトルマシンなどの学習機械の解析を行った。これにより、計算量の少ないサポートベクトルマシンの提案およびその解析、双対構造を持つ学習機械の解析、自己組織化写像の理論構築がおこなわれた。また、情報理論を応用して強化学習の収束性を明らかにするとともに、パターン認識への応用を図った。これにより、理論的裏づけのある非類似度を提案し、その有効性を示した。さらに、機械学習を人間行動のモデリングへも応用した。

研究成果の概要（英文）：We analyzed some learning machines such as support vector machines from the geometrical viewpoint. As results, we proposed a low-complexity SVM with theoretical background and give an analysis to dual-structured learning machines and self-organizing map. Information theory, on the other hand, revealed convergence properties of reinforcement learning and is applied to pattern recognition problems such as dissimilarity. Machine learning methods are also applied to human modeling such as drivers assist systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,800,000	0	3,800,000
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
総計	11,500,000	2,310,000	13,810,000

研究分野：数理工学

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：機械学習, 情報幾何学, 情報理論, 神経情報処理, パターン認識

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械学習の成長

当時、電子情報通信学会に情報論的学習理論第2種研究会が発足するなど、学習理論・機械学習を取り巻く情勢が大きく変化してい

た。計算機が高性能化・並列処理化などの技術的進歩を遂げるのと並行して、ベイズ統計に基づく計算アルゴリズムも著しく発展を遂げていた。

(2) 情報幾何学の普及

性能のよいアルゴリズムが多数提案されるだけでなく、理論研究も徐々に進みつつあった。特に情報幾何学はアルゴリズムの幾何学的構造を明らかにするツールとして、統計モデルの幾何学だけでなく凸解析などさまざまな分野にその応用範囲を広げつつあった。

(3) 情報理論の応用拡大

また、シャノンに端を発する情報理論も大きく進歩を遂げていた。その理論的基礎が大数の法則にあることから、その原理を他の確率構造を持つ問題にも応用し、強化学習や遺伝的アルゴリズムなどの理論解析がなされていた。また、韓らによる情報スペクトルの理論により、情報理論自体も大きな飛躍を遂げていた。

2. 研究の目的

(1) 幾何学構造を利用した機械学習アルゴリズムの解析

情報幾何学をはじめとした幾何学的手法は、アルゴリズムの本質を明らかにし、その性能を評価する手法として有効である。本研究ではこれを利用し、サポートベクトルマシン (SVM) などの機械学習アルゴリズムの理論解析を行う。

(2) 情報理論を利用した機械学習アルゴリズムの解析

データサイエンスにおいては組み合わせの数が指数的に増加していく情報爆発は常に問題となる。しかしその統計的性質をうまく利用すると、その一部だけを検討すればよいことがわかる。その最たるものがシャノンの符号化理論である。本研究ではこれを拡張し、機械学習やパターン認識のアルゴリズムの開発・解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 学習アルゴリズムの幾何学的構造を明らかにすることで、より優れた学習アルゴリズムの開発および性能の理論解析を行う。

(2) 情報理論の手法、すなわち大数の法則やその拡張に基づくタイプ理論などを利用して、学習アルゴリズムやパターン認識アルゴリズムの解析および開発を行う。

(3) 新しい視点、すなわち従来用いられていない新たなアイデアを導入し、学習アルゴリズムの解析を推進する。

(4) 機械学習アルゴリズムを従来ヒューリスティックで行われていた分野に広く応用することで、機械学習の発展の裾野を広げる。

4. 研究成果

(1) SVM の解がスパースであるという性質を利用し、幾何学的な視点からその必要な例題を抽出することで例題数に比例という少ない計算量を持つアルゴリズムを開発し、その有効性を計算機実験により確認した。このアルゴリズムは追加学習の形式になっており、その性能も例題数無限大の極限において、理論的に与えることができた。

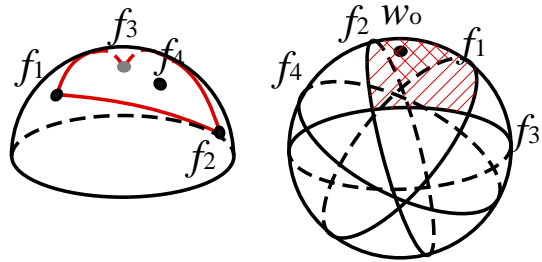


図1 SVMの幾何構造

また、真のモデルが時変であっても追従できる、忘却機能を有するSVMを提案し、その性能解析を行った。この方式は適応フィルタにおけるRLSをベースとしているが、RLSと異なり、真のモデルが時不変であっても、汎化誤差はゼロには収束しないことが実験的にわかり、それを説明する理論が構築された。そのため、汎化誤差がゼロに収束する改良を行いつつある。

さらに、パーセプトロン学習を一般化した準加法的アルゴリズム (パラメータに例題を加算し、パラメータを非線形変換して重みベクトルを生成する) について、情報幾何学の視点からは、パラメータ空間と重みベクトル空間が互いに双対なアファイン座標系となる双対平坦空間を成していることを示した。これにより、真の解に収束するとは限らないことなどが証明された。

その他、神経スパイク時系列から神経細胞の特徴を特定するのに最適な特徴量を、セミパラメトリック推定の情報幾何学を用いて導出した。これは有効性が経験的に知られていた local variation (LV) に理論的な裏づけを与えるのみならず、よりよい特徴量の提案につながっている。この結果は他研究者によってさらに進展がはかられ、その論文はNIPS最優秀論文賞を受賞した。なお、この研究自体も日本神経回路学会研究賞を受賞している。

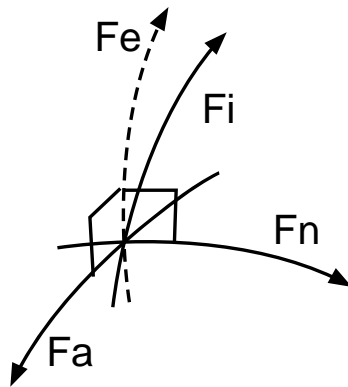


図2 スパイク情報の空間分解

(2) マルチエージェントの強化学習問題をマルコフ決定過程とみなし、エージェント間の情報共有を条件付確率で定義することにより、その性能の限界が相互情報量などの情報理論的量で表されることを導出した。

また、強化学習において従来の理論が定常エルゴードマルコフ決定過程を仮定しているのに対し、それを満たさない場合について情報理論的な視点から検討し、収益の最大化が可能な確率過程のクラスを導出した。

さらに、パターン分離問題における新しい“非類似度”を提案した。これは階層クラスタ分析における標本のラベル(分類値)の階層性をボトムアップ的に推定することを目的としており、標本の母集団が混合モデルである場合には、ある種の情報理論的な妥当性を持っている。実際のデータに対するクラスタ分析の成果として、窓ガラス等のガラス成分データや音声を構成する音素データの階層構造を同定する際に有効であることが計算機実験により示された。さらに、曲線整合問題におけるサンプリング法も開発した。

(3) スモールワールドやスケールフリーなどの性質により近年注目を浴びているネットワーク科学の手法を用い、遺伝的アルゴリズム(GA)のネットワークとしての性質を解析した。遺伝子集団を一つのノードと考え、交差および突然変異というオペレータにより遷移可能なノード同士にエッジがあると考えることにより、GAはネットワークとして記述される。GAが短時間で準最適解を見つけることが可能なのは、ネットワークとして平均最小到達距離が小さいからではないかと考え、平均最小到達距離を導出した。その結果、GAは本質的に層構造をしており、層内の遷移は早い層を超える遷移には時間がか

かることが導かれた。

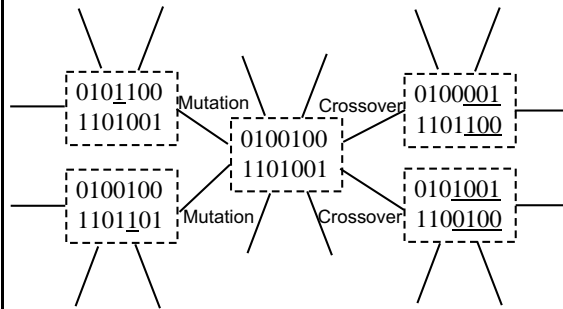


図3 GAが作るネットワーク

また、自己組織化マップ(SOM)の一手法であるモジュラーネットワーク(mn)SOMについて、その学習特性を理論的に導出した。その結果、mn-SOMは本質的には線形補間をしていることが明らかとなり、これは近傍関数などの設定方法に示唆を与えるものとなる。

(4) 自動車のブレーキ警告システムを構築するため、ドライバーのブレーキの履歴をSVMで学習することにより、ブレーキタイミング予測を可能にした。ここでは、データの分布を推定する必要があることから、1クラスSVMを利用した。また、学習データを隠れマルコフモデル(HMM)でモデル化し、異常データを学習データから除去することにも成功した。これにより、学習された警告システムの頑健性が向上した。

センサーネットワークを利用したオフィスログデータに行列因子分解法に基づくデータマイニング手法を適用し、オフィスログから各人を特徴付けることが可能であることを示した。さらに、テンソル因子分解法の応用も試した。

機械学習の手法を音楽情報科学にも応用した。ここでは、音響信号がどの楽器の音かを判断するのではなく、どんな信号を同一楽器と扱うべきかという発想の転換とともに、その幾何学的性質を考察することで、従来選りすぐれた分類性能を示す楽器分類器が構築された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

① K. Ikeda, D. Komazawa, H. Funaya, Statistical Measure for Spiking Neurons

with Refractories, *Frontiers of Electrical and Electronics Engineering in China*, in press.

②M. Takeda, K. Ikeda, T. Furukawa, Some Learning Properties of Modular Network SOMs, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.3, No.1, pp.15-19, 2010.

③K. Iwata, A. Hayashi, A Redundancy-Based Measure of Dissimilarity among Probability Distributions for Hierarchical Clustering Criteria, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.30, pp.76-78, 2008.

④ K. Ikeda, T. Yamasaki, Incremental Support Vector Machines and Their Geometrical Analyses, *Neurocomputing*, Vol.70, No.13-15, pp.2528-2533, 2007.

⑤ K. Iwata, K. Ikeda, H. Sakai, A Statistical Property of Multi-Agent Learning Based on Markov Decision Process, *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol.17, No.4, pp.829-842, 2006.

[学会発表] (計 54 件)

①池田和司, 情報幾何学—双対平坦空間とその応用, 制御理論シンポジウム招待講演, 2009.9.5, 大阪市.

② K. Iwata, An Information-Theoretic Class of Stochastic Decision Process, *Proc. ICONIP*, 2008.11, Auckland, New Zealand.

③K. Ikeda, K. Iwata, Information Geometry and Information Theory in Machine Learning, *Proc. ICONIP*, 2007.11, 北九州市.

④ K. Ikeda, On Geometric Structure of Quasi-Additive Learning Algorithms, *Proc. IJCNN*, 2006.7, Vancouver, Canada.

[図書] (計 4 件)

① K. Ikeda (Chapter), *Encyclopedia of the Science of Learning*, Springer, in press.

② 池田 (文筆), 数理工学事典, 朝倉書店, 印刷中.

③ 池田 (文筆), ハンドブック/知識ベース, 電子情報通信学会, 2010.

④ 元田 他 監訳, 池田 他 訳, ビンヨップ, パターン認識と機械学習, シュプリンガー・ジャパン, 2007.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 和司 (IKEDA KAZUSHI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号 : 1 0 2 6 2 5 5 2

(2) 研究分担者

岩田 一貴 (IWATA KAZUNORI)

広島市立大学・情報科学研究科・助教

研究者番号 : 2 0 4 0 5 4 9 2

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :