

科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18300057

研究課題名（和文）：信号空間の構造に基づいた学習理論の構築とその応用

研究課題名（英文）：Machine learning theory based on structure of signal space and its application

研究代表者

山下 幸彦（YAMASHITA YUKIHIKO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：90220350

研究成果の概要：

パターン認識などの知的情報処理の精度にブレークスルーをもたらす非線形な信号空間の構造の利用に関して、Riemann 多様体を使って信号空間の構造を表現する Mahalanobis 計量，カーネル法を拡張した非対称カーネル法，構造が時間と共に変化していく場合における学習法，多様体上で最適化問題を解くためのアルゴリズム，分散構造を用いたブラインド信号抽出法に関して研究を行い，新たな知見を得た。さらにその成果をパターン認識，脳信号処理などの様々な問題に適用し，その有効性を確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2008年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：信号空間の構造，Mahalanobis 計量，幾何学的局所等方独立，非対称カーネル法，共変量シフト，コミッティ機械，ブラインド信号抽出，多様体

1. 研究開始当初の背景

情報処理において中心的な役割を果たす計算機は，ユーザがあらかじめプログラムを作成しなければ動作しない。また，複雑な処理を行なうためには高度な知識が要求される。そのため，コンピュータを使

える人と使えない人の格差，即ちデジタルデバイドが拡大し，世界的に大きな問題となっている。コンピュータが自ら学習し，知的に信号を処理することができれば，計算機はより使いやすくなり，また応用範囲も飛躍的に広がるのが期待できる。例

えば、高度な学習機能により、既に実用化されつつある文字・音声認識や生体認証の精度を、更に向上させることができると期待される。また、人間の脳波でコンピュータを操作する脳コンピュータインタフェース(以下、BCI)などの次世代の入力装置や、アルツハイマーのような脳の病気の自動診断、高速移動体の高速無線通信、超高自由度ヒューマノイドロボットの制御則の自動獲得など、魅力的なアプリケーションも実現可能になる。このような期待を受け、学習・知的信号処理の高度化は情報処理における最も重要な問題として、集中的に研究されていた。

しかしながら、現在の計算機による学習・知的信号処理能力は、残念ながらまだ十分とは言えない。例えば、郵便番号が5桁から7桁になった理由は、手書漢字の認識精度が不十分なため、漢字を読む必要がないようにするためである。また、BCI、病気の自動診断、高速移動体の無線通信速度向上、ロボット制御則の自動獲得なども、積極的に研究は行なわれているが、まだ実用段階には至っていない。高精度化に対する壁のようなものがあり、全く異なるアプローチによって学習・知的信号処理を実現しても、最終的な精度に大きな差がないことも多かった。このような現状を打破するためには、学習・知的信号処理の理論に大きなブレークスルーが必要とされていた。

このような状況の下、我々は、人間の汎化能力が学習機械よりも高い理由は、物理的な制約などによる強固な信号空間の構造を、積極的に利用しているからではないかとの仮説を立てた。人間は原始的な生物から進化する数億年の間に、信号空間の構造を利用した学習法を獲得したものと考えられる。換言すれば、現在の学習機械の汎化能力が人間に及ばない理由は、信号空間の構造を表現する方法やそれを推定する方法が不十分なためであると考えられる。また、BCIにおける脳の状態や高速移動体の無線通信など、信号空間の構造が時と共に変化していく場合もある。このような場面にも対応できる学習法があれば、更に汎化能力を高めることができると期待される。

このように信号空間の構造の推定や、それを利用した学習・知的信号処理は非常に重要であるにもかかわらず、そのような研究はほとんど行われていなかった。

2. 研究の目的

(1) 信号空間の構造を推定するための手法を開発する。現実的な信号空間の構造は非線形なものになる

と考えられる。このような信号空間の構造を表現するために、Riemann 多様体を積極的に利用すると共に、既存の非線形構造を表現するための手法を拡張し、さらに広い範囲の非線形構造を表現できるようにする。そして、信号空間の構造を推定し、開発した表現法によって具体的に表すための理論を構築する。さらに、推定アルゴリズムを考える上で重要となる、多様体上における最適化理論や平均などの演算に関しても研究を行う。

(2) 信号空間の非線形な構造利用した学習・知的信号処理理論を構築する。そして、その理論に基づく具体的な学習・知的信号処理アルゴリズムを開発する。さらに、現実の場面では、信号空間の構造が時間と共に変化していく場合も多いため、そのような変化に対応できる学習理論を構築する。また、信号空間の構造を用いたブラインド信号抽出理論を構築する。

(3) 上記研究で得られた理論を、パターン認識、BCIなどの脳信号処理、ロボット制御など具体的な問題に適用し、構築した理論を評価する。

3. 研究の方法

(1) Mahalanobis 距離は、信号の確率的構造を信号空間の距離情報として表現する方法である。しかしながら、Mahalanobis 距離は、信号の分散・共分散行列の逆行列で内積を正規化しただけであるため、信号の非正規な確率的構造を導入することはできない。そこで、正規分布を多様体上に拡張するために導入した、幾何学的局所等方独立方程式を用いる。この方程式は、Euclid 空間では通常正規分布を、正の定曲率空間である超球面では von Mises-Fisher 分布を、負の定曲率空間である Lobachevskij 空間では Maxwell-Juttner 分布(相対論的 Maxwell 分布)を与える。von Mises-Fisher 分布と Maxwell-Juttner 分布は、それぞれの空間での正規分布と考えられているものであるため、幾何学的局所等方独立方程式は、多様体上の正規分布を統一的に表すことができるものと考えられる。本研究では、与えられた確率密度関数を、幾何学的局所等方独立方程式の解とする計量を求めることによって、信号空間の幾何学的構造を定める。

(2) カーネル法は、信号を非線形写像によって写像し、写像した空間での内積を考えることによって、も

との空間に非線形な構造を導入するものである。そして、カーネル法によって学習機械を実現するときは、非線形写像そのものではなく、非線形写像されたものどうしの内積となるカーネル関数を与える。計算が実現できない可能性がある非線形写像でなく、カーネル関数の値を計算することによって、現実的な計算速度で学習および識別を行うことを可能にする。しかしながら、カーネル法を実現できるカーネル関数は、対称で正定値なものに限られていた。より自由に非線形構造を信号空間に導入できるようにするため、非対称なカーネル関数を扱うことができる非対称カーネル理論を構築する。そして、この理論に基づき、広範囲な非線形構造を導入した学習アルゴリズムを開発する。

(3) 一般的な教師付き学習では、学習したい対象が属する空間は一定であり、時間変化を伴わないと仮定している。そしてこの仮定のもと、様々な学習アルゴリズムが開発され、その理論的な性質が論じられてきた。しかし、近年の機械学習の応用場面では、環境が時間変化しないという大前提が満たされないことが多い。例えば、脳データの解析においては、人間の脳の非定常性のため、今日の脳波のパターンは昨日のそれと異なる傾向を有する。また、環境は一定であっても、学習に内在する条件が変化する場合も数学的には環境の変化と等価な扱いをすることができる。例えばロボット制御では、ロボットが学習によって自らの行動パターンを更新することにより、所望の行動が達成できるようになる。このような学習プロセスにおいて、ロボットの行動パターンの更新は、信号空間の構造が時間と共に変化する場合として定式化することができる。このように信号空間の構造が変化する場合でも、構造が変わらない部分を積極的に利用し、学習を精度良く効率的に行うための手法を開発する。

(4) 多様体を用いて、信号空間構造の推定や学習機械の実現を行うためには、多様体上における最適化アルゴリズムを実現する必要がある。さらに、多様体上の信号における平均を考えることは、信号空間の構造を理解するために非常に重要であるため、平均計算に関して研究を行う。扱う多様体として、初めは行列が生成する単純な多様体とする。そして、順次、グラスマン多様体、Riemann 多様体とその範囲を広げていく。

(5) ブラインド信号抽出とは、大きな雑音を含んだ多チャンネル信号を使って、目的とする信号を抽出するものである。ブラインド信号抽出は、BCIのような脳信号処理をはじめとして、計測分野において応用範囲が広く、極めて重要なものである。本研究では、信号空間の構造を用いて、精度の高いブラインド信号抽出法を開発する。さらに脳信号処理に応用し、目的とする信号の抽出、信号発生源の同定を行う。

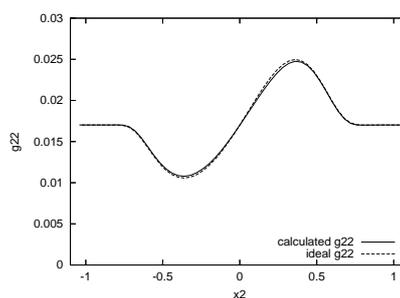
4. 研究成果

(1) 幾何学的局所等方独立方程式は、Riemann 計量 $g_{\mu\nu}$ 、その行列式を g 共変微分 ∇_μ 、確率密度関数 p 、あるスカラー l に対して、

$$\nabla_\mu \nabla_\nu \log \frac{p}{\sqrt{g}} = l g_{\mu\nu}$$

で与えられる。この方程式は、計量を与えたときに確率密度関数 p を与えるものである。Mahalanobis 計量の理論では、これを逆に利用する。Euclid 空間、超球面、あるいは、Lobachevskij 空間に、正規分布、von Mises-Fisher 分布、あるいは Maxwell-Juttner 分布があり、それが座標変換によって、ある与えられた確率密度関数 p となると、 p に対する Mahalanobis 計量を、その座標変換によって与えられる計量として定義した。

本研究では、Euclid 空間からの座標変換を考え、与えた座標変換によって得られる確率密度関数から、その座標変換によって与えられる計量を、Mahalanobis 計量方程式のニュートン法による数値的解析を用いて求めた。



上図は、具体的に求めた計量の 22 成分の理論値と計算値を示したものである。本実験によって、確率密度関数が与えられれば、精度よく Mahalanobis 計量を求めることができることが確認された。さらに、標本点から Mahalanobis 計量方程式を解くために適した確率密度関数を推定するための手法を開発した。Mahalanobis 計量方程式には、 $\log p$ の 2 次微分が現

れるため、 $\log p$ の 3 次微分が小さいという条件を導入している。

今後は、局所等方独立方程式の時空間信号への拡張、Mahalanobis 計量のさらなる効率的な計算法と、幾何学的局所等方独立方程式のもとになった局所独立の確率密度関数比による特徴付けに基づく、局所独立構造の抽出法の開発を行うことが必要である。

(2) カーネル関数は、非線形写像 Φ に対して、 $\Phi(x)$ と $\Phi(y)$ の内積

$$k(x, y) = \langle \Phi(x), \Phi(y) \rangle$$

によって定義される。しかしながら、カーネル法では、 Φ は与えずに、上式を満たす Φ が存在する $k(x, y)$ を用いて、学習理論を構成する。非対称カーネル法では、2 つ非線形写像 Φ_1 と Φ_2 に対して、

$$k(x, y) = \langle \Phi_1(x), \Phi_2(y) \rangle$$

$$k_1(x, y) = \langle \Phi_1(x), \Phi_1(y) \rangle$$

の 2 つのカーネル関数を使うことによって実現する。この研究では、逆に $k(x, y)$ 、 $k_1(x, y)$ が与えられときに、 Φ_1 と Φ_2 が存在する $k(x, y)$ 、 $k_1(x, y)$ の条件を求めた。このように拡張することによって、カーネル法よりも柔軟に信号空間の構造を設定できることを示した。また、非対称カーネルを効率的に利用するために、部分空間制約を課したサポートベクトルマシン、カーネル Fisher 判別法などを定義した。そして、部分空間制約サポートベクトルマシンを、通常のカーネル法にも適用し、適切な部分空間制約を設定することにより、サポートベクトルマシンよりも認識率が向上することを確認した。また、信号空間の性質に柔軟に対応する制約付きの近似による特徴抽出法や抑制付きカーネル部分空間法を提案し、実問題に対する有効性を示した。

また、カーネル法で正則化を用いる場合、その距離構造が非線形写像で写像した先の空間で決まってしまう。この問題を解決するために、原信号空間の距離構造も取り入れることができる正則化法を開発した。そして、新たに開発したカーネル Wiener フィルタによるパターン認識法に、この正則化法を適用した。この手法の有効性を確かめるために、13 種類の標準データセットを使った計算機実験を行った。その結果、カーネル Wiener フィルタは、サポートベクトルマシンよりも 12 種類で、AdaBoost 回帰よりも 11 種類のデータセットで高い認識率を得た。

非対称カーネル法によって、表現できる非線形構造は広まったが、それを学習問題に適用すると、過

学習のためにテストデータに対する認識率があまり向上しない場合が存在した。今後は、広まった非線形構造の表現の範囲を適切に活用する手段を、開発することが重要である。

(3) 信号空間の構造が時間と共に変化する場合の機械学習手法の開発を行った。具体的には、まず、信号空間の構造が時間と共に変化する場合でも、一致性と呼ばれる統計的な最適性を有するパラメータ学習法を提案した。しかし、単純に一致性を持つ学習法は、統計的有効性の立場からは好ましくない性質を持っていることが明らかになった。そこで、一致性と有効性をバランスよく達成する新たなパラメータ学習法を開発した。

この新たな学習法では、一致性と有効性のバランスをとるための超パラメータの値を適切に決定する必要がある。そこで、次にモデル選択の研究に取り組んだ。赤池の情報量規準や交差確認法などの従来の汎化誤差推定法（モデル選択規準）は、信号空間の構造に時間変化が伴わない場合に対して提案された手法であり、その条件が満たされる場合のみ、これらの手法の妥当性が示される。本プロジェクトで取り組んでいる信号空間の構造が時間と共に変化する場面では、これらのモデル選択手法は適切な振る舞いをしないことが、理論的にも実験的にも知られている。この問題に対処すべく、我々は交差確認法を信号空間の構造が時間と共に変化する場合に対応できるように拡張した。そして、その新手法の妥当性を理論的に証明した。

上記で説明したパラメータ学習とモデル選択の新手法では、変化前の環境におけるデータ生成分布と、変化後の環境におけるデータ生成分布の比（確率密度比）が重要な役割を担っている。しかしこの確率密度比は一般には未知であるため、データから適切に推定する必要がある。この問題に対する単純なアプローチは、二つのデータ生成分布を個別に推定しその比を取ることである。しかしそのような 2 段階のアプローチは推定誤差が大きく、実用的でない。そこで、我々は確率密度比を直接推定するための新たな理論的枠組みを構築し、実用的なアルゴリズムを開発した。また、このアルゴリズムの数理統計的な性質を明らかにした。

このようにして、信号空間の構造が時間と共に変化する場合に適応することのできる機械学習の要素技術を確立した。そして、これらの手法の有効性を、大規模な計算機実験により実証した。更に、これら

の手法を，脳波データ解析，ロボット制御，自然言語処理，音声認識，半導体露光装置の位置あわせなどの実問題に適用し，従来の手法を上回る性能が得られることを確認した。

今後，信号空間の構造が変化する場合に，確率密度比をより正確に求める手法を開発することによって，応用範囲をさらに広めていくことが重要である。

(4) まず，行列が生成する空間に関して研究を着手した。その中で，直交行列の幾何学的な構造を利用した同時対角化の手法を開発し，理論的な解析を試みた。直交群上における行列の最適化問題について，測地線上の最急降下法だけでなく，共役勾配法などの高速アルゴリズムを用いた解法を明らかにした。さらに，不動点法を利用した最適化の方法を，特に主成分分析，マイナー成分分析における適応アルゴリズムに適用した。不動点法に関しては，シミュレーションによる実証および収束性を解析した。その結果を，同時対角化および同時ブロック対角化の問題に適用した。さらに，この考え方をリーマン多様体に拡張し，多様体上の元に対する「平均」演算手法を開発した。この結果によって，コミティ機械のようなアンサンブル学習を，学習パラメータが多様体上で動く場合に適用することが可能となった。具体的には，直交群，特殊直交群，対称行列の多様体で平均演算を定義し，そのアルゴリズムを開発した。さらに，その収束性について理論的証明を与えた。また，このアルゴリズムの考え方を，一般化固有値問題に適用し，その高速適応アルゴリズムを開発した。これを用いて，固有値解法より低いオーダーの計算量で，一般化固有ベクトルを追跡できるアルゴリズムを開発した。

今後，多様体上のより効率的な最適化アルゴリズムを開発するために，準ニュートン法を適用すること，グラスマン多様体上での平均操作などを研究していくことが重要である。

(5) 雑音が大きい多チャンネル信号空間から目的とする信号の抽出に関して，信号の共分散構造を使い，交互最小2乗法と信号対雑音比最大化基準による加重平均法を組み合わせたブラインド信号抽出法を開発した。この技術を応用することによって，脳波計からより精度の高い脳信号を抽出し，その強度分布を求めることを可能にした。そして，時空間混合モデルのパラメータを推定するアルゴリズムを新たに開発した。さらに推定したパラメータから求められ

る時空間逆フィルタにより，原信号を抽出するブラインド信号抽出法を開発した。これにより，高精度な信号抽出/特徴抽出を可能にした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

① S. Fiori and T. Tanaka, Learning averages over the Lie group of symmetric positive-definite matrices, Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, in press, 2009, 査読有

② S. Fiori and T. Tanaka, Learning-machines-committee averages over the unitary group of matrices, Proceedings of IEEE International Conference on Circuits and Systems, in press, 2009, 査読有

③ Y. Tsuboi, H. Kashima, S. Hido, S. Bickel, and M. Sugiyama, Direct density ratio estimation for large-scale covariate shift adaptation, IPSJ Journal, 50, 1–19, 2009, 査読有

④ H. Yoshino and Y. Yamashita, Pattern recognition by kernel Wiener filter, Proceedings of Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications, 7–12, 2008, 査読有

⑤ S. Joken, N. Inoue, and Y. Yamashita, Numerical analysis of Mahalanobis metric in vector space, Proceedings of 19th International Conference on Pattern Recognition, CD-ROM, 2008, 査読有

⑥ Y. Washizawa, Y. Yamashita, T. Tanaka, and A. Cichocki, Blind global source extraction from noisy observations, Proceedings of 2008 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, -, 184–187, 2008, 査読有

⑦ M. Sugiyama and N. Rubens, A batch ensemble approach to active learning with model selection, Neural Networks, 21, 1278–1286, 2008, 査読有

⑧ M. Sugiyama, S. Nakajima, H. Kashima, von P. Bnau, and M. Kawanabe, Direct importance estimation with model selection and its application

to covariate shift adaptation, Advances in Neural Information Processing Systems, 20, 2008, 査読有

⑨ Y. Washizawa and A. Cichocki, Sparse blind identification and separation by using adaptive K-orthodrome clustering, Neurocomputing, 71, 2321–2329, 2008, 査読有

⑩ T. Tanaka and D.P. Mandic, Complex empirical mode decomposition, IEEE Signal Processing Letters, 14, 101–104, 2007, 査読有

⑪ Y. Washizawa, Y. Yamashita, T. Tanaka, and A. Cichocki, Extraction of steady state visually evoked potential signal and estimation of distribution map from EEG data, Proceedings of 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, –, 5449–5452, 2007, 査読有

⑫ Y. Washizawa and Y. Yamashita, Kernel projection classifiers with suppressing features of other classes, Neural Computation, 18, 1932–1950, 2006, 査読有

⑬ N. Koide and Y. Yamashita, Asymmetric kernel method and its application to Fisher’s discriminant, Proceedings of 18th International Conference on Pattern Recognition, 2, 820–824, 2006, 査読有

⑭ Y. Washizawa and Y. Yamashita, Non-linear Wiener filter in reproducing kernel Hilbert space, Proceedings of 18th International Conference on Pattern Recognition, –, 967–970, 2006, 査読有

⑮ Y. Yamashita, M. Numakami, and N. Inoue, Maxwell normal distribution in a Manifold and Mahalanobis metric, Structural, Syntactic and Statistical Pattern Recognition –, 604–612, 2006, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

① 山下幸彦, 重み付き相関行列による局所部分空間法, 部分空間法研究会 2008, 2008.7.28, 軽井沢

② 鷺沢嘉一, 抑制付きカーネル部分空間法, 部分空間法研究会 2008, 2008.7.28, 軽井沢

[図書] (計 1 件)

① J. Quionero-Candela, M. Sugiyama, A. Schwaighofer, and N.D. Lawrence, MIT Press, Dataset Shift in Machine Learning, 2009, 229

[産業財産権]

出願状況 (計 2 件)

①

名称: 信号処理装置, 信号処理手法, ならびに, プログラム

発明者: 鷺沢 嘉一, 田中 聡久, アンジェイ チホツキ, 山下 幸彦

権利者: 理化学研究所

種類: 特許

番号: 特願 2007-136306

出願年月日: 平成 19 年 5 月 23 日

国内外の別: 国内

②

名称: 分類装置, 分類方法, ならびに, プログラム

発明者: 鷺沢 嘉一

権利者: 理化学研究所

種類: 特許

番号: 特願 2007-195623

出願年月日: 平成 19 年 7 月 27 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 幸彦 (YAMASHITA YUKIHIKO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 9 0 2 2 0 3 5 0

(2) 研究分担者

杉山 将 (SUGIYAMA MASASHI)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 9 0 3 3 4 5 1 5

田中 聡久 (TANAKA TOSHIHISA)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号: 7 0 3 6 0 5 8 4

鷺沢 嘉一 (WASHIZAWA YOSHIKAZU)

独立行政法人理化学研究所・脳信号処理研究チーム・研究員

研究者番号: 1 0 4 1 9 8 8 0