

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280054

研究課題名(和文) 距離構造に着目した多様体信号理論の構築と生体信号処理への応用

研究課題名(英文) Manifold signal processing theory concerning metric structure and its application to biological signal processing

研究代表者

山下 幸彦 (Yukihiko, Yamashita)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：90220350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：距離構造に着目した多様体信号理論を構築するために、ガウス正規化カーネル関数を使った局所等方独立方程式の解法を確立し、局所等方独立な変化を与える作用素方程式を定義した。そして、少数教師データ時の計量の半教師付き学習法、パターンを部分空間に対応づける方法、そのグラスマン多様体に識別に適した計量を与える方法を開発した。また、確率密度比学習と畳み込みニューラルネットワークと組み合わせた画像異常検出法を開発し、手書き文字認識のために適した距離構造を求め、k近傍法に基づく手法としては最良の認識率を得た。さらに、脳卒中などによる麻痺患者の運動機能の再構築を可能にする運動意図読み取りの性能を向上させた。

研究成果の概要(英文)：For the manifold signal processing theory concerning the metric structure, we constructed a method to solving locally isotropically independence equations by using Gauss normalized kernel functions, and defined an operator equation to express the locally isotropically independent change. We developed a semi-supervised learning method for metrics when the number of training data is not enough. We proposed a method to assign a pattern to a subspace, and a metric suitable to discrimination for the Grassmann manifold. We also developed an anomaly detection method with images by combining the direct estimation for the ration between probability density functions and the convolutional network, and a distance for hand-written character recognition that provides the best recognition rate among those based on k-nearest neighbor method. Furthermore, we improved the performance of recognition of motional intention that enables paretics caused by apoplexy, etc. to reconstruct motor function.

研究分野：パターン認識・画像処理

キーワード：多様体信号処理 局所独立方程式 局所等方独立方程式 計量学習 生体信号処理 ブレイン・コンピュータ・インターフェース

## 1. 研究開始当初の背景

工学的なパターン認識は、様々な場面で実用化されるほどに性能が向上しているが、人間のもつ認識能力には、はるかに及んでいなかった。また、生体信号、特に脳波のような極めて非定常性の高い信号や、変形した画像を扱う場合には、既存のパターン認識技術はまだ実用に耐えるものではなかった。

この問題を解決するためには、信号やその生成モデルが幾何学的な構造を持つ（または近似的に持つ）場合に、その距離構造を正確に再現し、効果的に利用することが必要である。この研究の前に、本研究の代表者および分担者は、平成23年度～25年度科学研究費補助金「拡張カーネル法による信号多様体の時空間表現とその応用」の研究によって、拡張カーネル法の理論の確立、局所独立による多様体上の Mahalanobis 計量の特徴付け、リスクを評価する学習理論、多様体上の平均を計算するコミティマシンの理論、大域信号抽出理論の構築・補強を行った。この研究の中でも、パターンがもつ距離構造が本質的な役割を果たすこと再確認された。

しかしながら、次のような問題が残されていた。局所的パターン間の距離構造の表現モデルのために、拡張カーネル法の適用を試みたが、それが周辺部を表現するために適していないため、精度を高めることができなかった。すなわち、距離構造を表現する数学的方法がまだ不十分である。また、最近傍分類など類似度に基づくパターン認識アルゴリズムにおいては、パターン空間の距離構造を表す計量を適切に決定することが重要であるが、計量学習には一般に多くの教師情報が必要であり、教師データが十分に得られない場合には、低い学習精度しか得られない。機械学習や信号処理では、入力パターンをベクトルや行列形式で表現することが多いが、本質的なパターンの構造を表現することが難しい。文字認識において認識率が高くなる、パターン間の距離構造が不明である。ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) における特徴抽出を効率的に可能にする方法、多チャンネル信号や変動を含むパターンを多様体で表現する方法が不十分である。また、理論ばかりでなく、上記の問題を、現実的な計算量で解決するアルゴリズムが未構築である。

## 2. 研究の目的

(1) ガウス関数によるカーネル関数を使うと、周辺部分で0に収束する。定数項を加算すれば0には収束しないが、方向別に値を設定することが不可能に

なる。これは、実際の計量テンソルの性質とは大きく異なり、特に学習データの周辺部で誤差が生じることになる。この問題を解決するために、重み付きガウス関数の和と単なるガウス関数の比であるガウス正規化カーネル関数 (GN カーネル関数) を、計量のモデルとして用いる理論体系を構築する。

(2) 計量を定める局所等方独立の考え方を時間信号に適用するためには、局所等方独立な変化を定義する必要がある。そのような性質を与える作用素方程式に関して考察する。

(3) 現実の場面では、十分な量の教師データ量が得られない場合がある。このような場合における計量学習アルゴリズムを開発する。また近年、畳み込みニューラルネットワークが画像認識において非常に高い性能を示していたため、畳み込みニューラルネットワークと融合した手法に関して研究する。

(4) 今までベクトルや行列で表されていた入力パターンを部分空間として表現し、部分空間を点と考えるグラスマン多様体によるモデルを確立し、グラスマン多様体上でのパターン認識理論を構築する。

(5) 信号の分散共分散行列は、信号の距離構造を与えるための基本的な概念である。分散共分散行列は半正定値行列であるため、半正定値行列がなす多様体を考え、それを効果的に扱う方法を開発する。

(6) パターン認識に有効な距離構造を経験的に求める。ここでは特に、前処理などによってパターンの変形を吸収し、類似性が高いパターン間の距離を対象として、計算機実験によって認識精度を確認する。

(7) クローズド・ループ BMI により、脳卒中等の麻痺患者から脳波を計測することで運動意図を読み取り、それを麻痺した肢体に電氣的・機械的的刺激を与えることで感覚フィードバックを与えることができる。これによって、脳可塑性を根拠とした運動と感覚のネットワークの再構築化を図り、運動機能の回復をもたらすことが可能になるため、極めて重要である。運動意図の読み取り (デコーディング) の本質は、多チャンネル脳波の分散共分散行列推定であるため、研究項目 (4) の成果を使った高性能のデコーディングアルゴリズムを開発する。

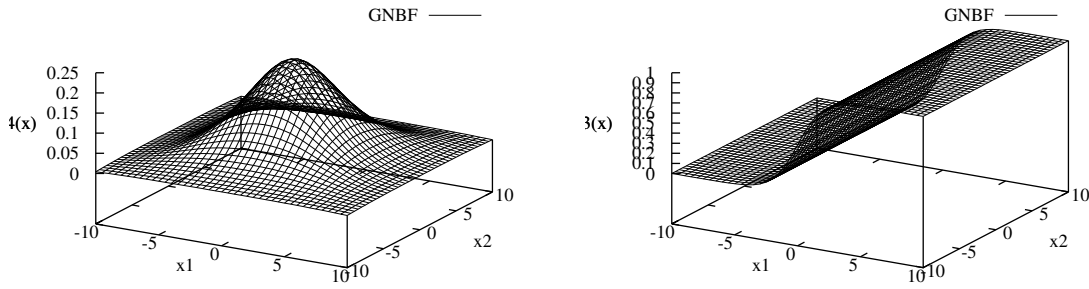


図 1: GN カーネル関数で表現した関数の例 (左: 単峰性関数, 右: シグモイド関数)

### 3. 研究の方法

(1) GN カーネル関数は, 教師データの位置ベクトルを  $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^N$ , 重み係数を  $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ , ガウス関数の指数部の係数  $\gamma$  で表せば,

$$f_{\text{GNBF}}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{a}_i\|^2}}{\sum_{i=1}^N e^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{a}_i\|^2}}$$

で与えられる。例えば,  $N = 5$ ,  $\mathbf{a}_1 = (0, 0)^T$ ,  $\mathbf{a}_2 = (-1, 0)^T$ ,  $\mathbf{a}_3 = (1, 0)^T$ ,  $\mathbf{a}_4 = (0, -1)^T$ ,  $\mathbf{a}_5 = (0, 1)^T$ ,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$ ,  $\gamma = 1/4$  とすれば, 図 1 の左のグラフのようにガウス関数のような単峰性の関数を得られる。一方,  $N = 2$ ,  $\mathbf{a}_1 = (1, 0)^T$ ,  $\mathbf{a}_2 = (-1, 0)^T$ ,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 0$ ,  $\gamma = 1/4$  とすれば, 図 1 の右のグラフのようにシグモイド関数を得られる。また, 教師データの存在領域から遠くなると, 関数値は一番近い教師データの  $\alpha_i$  に収束するため, 方向別に一定値をとる関数を実現することができる。このガウス正規化カーネル関数を使って, 計量テンソル  $g_{\mu\nu}$  を表現し, その行列式  $g$ , 共変微分  $\nabla_\mu$  を使い, 与えられた確率密度関数  $p(\mathbf{x})$  に対する局所独立方程式

$$\nabla_\nu \nabla_\mu \log \frac{p(\mathbf{x})}{\sqrt{g}} = -g_{\mu\nu}$$

を解き, その精度を検討する。

(2) 局所等方独立方程式をもとにして, 多様体上の作用素の局所独立を特徴づける作用素方程式を定義する。そのような性質を持つ作用素  $A$  が求めれば, 関数  $\phi$  の時間変化を表す方程式は, この作用素方程式と  $A$  を使って表される方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi = A\phi$$

になると考えられる。その方程式の解は, ユークリッド空間ではガウス過程になるはずで, それを手がか

りに作用素方程式を求めていく。また, 時間微分が 2 階である場合も考え, それぞれの方程式の解についても考察する。

(3) 教師データ量が不十分な場合に計量学習を行うときに, 類似性情報に加えて, ラベルなしパターン間の非類似性の情報も活用する新しい半教師付き計量学習アルゴリズムを開発する。また, 確率密度関数の比の直接推定と, 畳み込みニューラルネットワークを組み合わせた新しい画像異常検出アルゴリズムを開発する。

(4) 多チャンネル信号や変動を含むパターンを部分空間として表現する方法を提案する。アプリケーションによってパターンの表現方法が異なるが, 動画像のようにシーケンスデータが容易に得られるものや, 人工的に変動を生成できるものはそのデータ集合から固有空間を求めることにより, パターンの持つ本質的な構造を表現する部分空間を生成することができる。そして, 部分空間を点とするグラスマン多様体上の計量としては, 射影計量やビネット・コーシー計量などが用いられるが, これを拡張し, 分布するパターン間の距離を表現する方法を開発する。さらに, 分布に基づいた距離は識別問題における分離を向上させるとは限らないため, 「識別しやすさ」を重視した計量を与える方法を開発する。

(5) Barachant は, 正定値行列をリーマン多様体上の点とみなし, すべての分散共分散行列を多様体の接空間に写像して処理する方法を提案した。この写像により, 線型空間の性質を使って多様な処理が非常に容易になる。この写像を構成するためには, ある基準となる正定値行列の接空間を考えるが, その

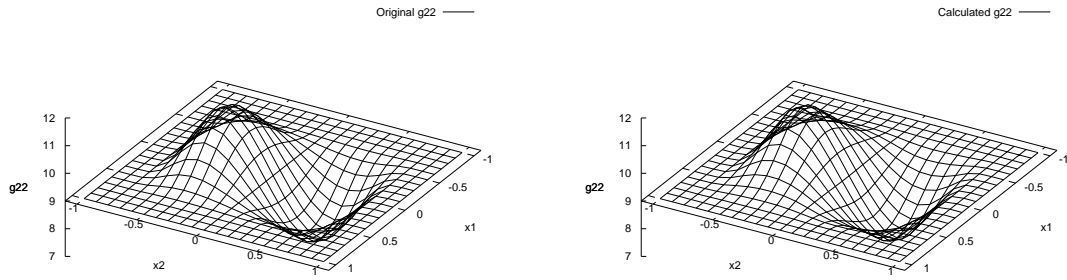


図 2: 局所等方独立方程式の解 ( $g_{22}$ ) (左: 理論値, 右: GN カーネル関数を用いた計算値)

基準となる半正定値行列を求めることが重要である。Barachant は、多様体上の単なる算術平均を基準点にする方法を提案した。これよりも、適切に基準点を選ぶ方法を開発する。また、研究項目 (4) で扱うデータに対して、パターンを分散共分散行列で表現する手法を開発する。さらに、分散共分散行列は正定値行列であることを用いて、その幾何構造を活かしたマルチタスク主成分分析アルゴリズムを開発する。

(6) 正規化処理などによって類似している 2 つのパターンの、局所的性質に基づく点の対応付けを定義し、パターン間の距離を定義する。そして、手書き文字の認識実験を行い、新しく定義した距離の有効性を確かめる。

(7) 例えば、右手、右足に関する随意運動または運動想像 (全く肢体が動かない場合) に対する脳波を EEG1, EEG2 とする。これらの脳波は多チャンネルの時間信号なので、観測信号から経験的な分散共分散行列が得られる。それをそれぞれ  $C_1, C_2$  とする。いまラベルが未知である脳波を観測したとき、それが右手運動なのか、左手運動なのかを判別する問題が、運動関連脳波のデコーディングである。これを機械学習で実現する場合、多数回運動タスクを実施して、 $C_1, C_2$  のそれぞれに対する学習データを収集する。この学習データから特徴を抽出して、教師付き学習を行うことは可能であるが、脳波は非常に不安定で、毎回のタスク実行から得られる脳波の経験的統計量には大きなばらつきが生じている。また、想定する運動部位が 2 つより多い場合、得られた分散共分散行列を効率よく分類できないという問題がある。この問題を解決するために、研究項目 (5) で得られた方法を計算機に実装する。そして、その有効

性を確認するために、公開データおよび、研究分担者の田中 (東京農工大学) らによって新たに取得する脳波を用いて、識別分類実験を実施する。なお、脳波の測定には「東京農工大学 ヒトに関する研究倫理委員会」の承認を得る。

#### 4. 研究成果

(1) GN カーネル関数により、計量テンソルを近似することにより、自然にノイマン境界条件が導入されるため、計算精度を高めることができた。 $g_{22}$  を求めた結果を図に示す。しかしながら、周辺部分の微分量の誤差のために、求めた計量に誤差が生じることがわかった。この誤差はカーネル法でも生じていたものと思われるが、境界条件による誤差が大きかったため、以前の研究では明らかになっていなかったものと思われる。さらに、分母のカーネル関数に関しても重み付き和にした、ガウス有理カーネル関数 (GR カーネル関数)

$$f_{\text{GRBF}}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{a}_i\|^2}}{\sum_{i=1}^N \beta_i e^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{a}_i\|^2}}$$

へ拡張し、パラメータ  $\alpha_i, \beta_i$  に対する基本的な学習法を与えた。

(2) 確率密度関数のための局所等方独立方程式を拡張して、局所等方的な変化を与える作用素に関する作用素方程式を定義した。具体的には、スカラー作用素場 (座標変換に対して形が不変な作用素)  $A$  に対する方程式

$$[dx^\mu, [dx^\mu, A]] = lg^{\mu\nu}$$

として与えた。すなわち、この作用素方程式を満たす  $A$  を局所等方独立な作用素として定義し、この作用素方程式の性質を調べた。

(3) 類似性情報に加えて、ラベルなしパターン間の非類似性の情報も活用する新しい半教師付き計量学習アルゴリズムを開発し、大規模なベンチマーク実験によりその有効性を示した。また、確率密度関数の比の直接推定と、畳み込みニューラルネットワークを組み合わせた新しい画像異常検出アルゴリズムを開発し、その有効性を画像の異常検知シミュレーションにより示した。

(4) ユークリッド空間のマハラノビス距離をグラスマン多様体上に拡張した。「識別しやすさ」を重視した計量として、2クラス問題において、同一ラベルの学習標本同士の距離を小さく、異なるラベルの学習標本間の距離を大きくする計量を求める方法を開発した。

(5) 接空間の基準点を選択するために、データの外れ値を除外した上で算術平均を取る方法(トリム平均)、算術平均ではなくメディアンにする方法、1と2の混合した手法を開発した。

(6) 手書き文字認識に適する距離として、同方向最近点間平均距離(Nearest-neighbor distance of equigradient direction, NNDEGD)、および、曲率重み付き同方向最近点間平均距離(cw-NNDEGD, curvature weighted-NNDEGD)を提案した。MNISTデータベースに対する認識実験を行い、表1の結果を得た。この距離と2次元射影変換の正規化を組み合わせた誤認識率は0.3%と、 $k$ 最近傍法に基づく認識手法としては最良のものであり、パターン認識に有効な距離構造が求めたと考えられる。

(7) 研究項目(4)の結果に基づき、提案した計量をBCIや3次元物体識別問題の公開データへ適用した。その結果、3次元物体識別問題では、従来法のProjection metricやBinet-Cauchy metricを上回る識別性能を示した。また、BCIへの応用では、共空間パターンフィルタなどの特徴抽出と提案した「識別しやすさ」を重視した計量を組み合わせることで、従来法を上回る性能を示した。そして、研究項目(5)の結果に基づき、接空間への写像にトリム平均を用いてサポートベクトルマシン(SVM)で識別する手法を、公開データであるBCI CompetitionのデータセットIV\_IIa(2クラス分類)に対して、運動脳波デコーディングでは広く用いられている共通空間パ

ターン法にトリム平均を用いてサポートベクトルマシンを組み合わせた手法と比較した。それぞれの認識率は、82%と78%で4%の差があった。さらに、トリム平均の諸手法を用いずに、伝統的な方法でCSPを適用する手法と比較して、30%の精度向上を得た。また、独自に取得したデータ(4クラス分類)についても、顕著な性能向上が見られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 23 件)

① M. Ashizawa, H. Sasaki, T. Sakai, and M. Sugiyama, "Least-squares log-density gradient clustering for Riemannian manifolds," Proceedings of 29th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, vol. 54, pp.537-546, Fort Lauderdale, Florida, USA, April 20-22, 2017, 査読有

② Y. Yamashita and T. Wakahara, "Affine-transformation and 2D-projection invariant k-NN classification of handwritten characters via a new matching measure," Pattern Recognition, vol. 52, pp.459-470, April, 2016, 査読有

③ T. Uehara, T. Tanaka, and S. Fiori, "Robust Averaging of Covariance Matrices by Riemannian Geometry for Motor-Imagery Brain-Computer Interfacing," Advances in Cognitive Neurodynamics (V), Springer, Singapore, Jan., 2016, 査読有

④ Y. Washizawa, "Learning subspace classification using subset approximated kernel principal component analysis," IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E99-D, no. 5, pp.1353-1363, May, 2016, 査読有

⑤ T. Ishida, and T. Tanaka, "Efficient construction of dictionaries for kernel adaptive filtering in a dynamic environment," Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.3535-3540, Brisbane, QLD, Australia, April 19-24, 2015, 査読有

⑥ T. Wakahara and Y. Yamashita, "Enhanced GPT correlation for 2D projection transformation invariant template matching," Proceedings of

表 1:  $k$  最近傍法に基づく認識手法の手書き文字データベース MNIST の誤認識率

手法	変形	パターン間距離	誤認識率 (%)
GAT-NNDEGD	アフィン変換	NNDEGD	0.44
GAT-cwNNDEGD	アフィン変換	cwNNDEGD	0.40
GPT-NNDEGD	2D 射影変換	NNDEGD	0.40
GPT-cwNNDEGD	2D 射影変換	cwNNDEGD	0.30
タンジェント距離	なし	タンジェント距離	1.1
Keyser's 法	任意	IDM (タンジェント距離の拡張)	0.52
PPDC	任意	正規化相関	0.57

GAT: Global Affine Transform

GPT: Global Projection Transform

PPDC: Prototype-parallel displacement computation (水上嘉樹らによる)

37th German Conference on Pattern Recognition, pp.435-445, Aachen, Germany, Oct. 7-10, 2015, 査読有

⑦ H. Nam, and M. Sugiyama, "Direct density ratio estimation with convolutional neural networks with application in outlier detection," IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E98-D, no. 5, pp.1073-1079, May, 2015, 査読有

⑧ Y. Yamashita and T. Wakahara, " $k$ -NN Classification of handwritten characters using a new distortion-tolerant matching measure," Proceedings of the 22nd International Conference on Pattern Recognition, pp.262267, Stockholm, Sweden, Aug. 24-28, 2014, 査読有

⑨ G. Niu, B. Dai, M. Yamada, and M. Sugiyama, "Information-theoretic semi-supervised metric learning via entropy regularization," Neural Computation, vol. 26, no. 8, pp.1717-1762, Aug., 2014, 査読有

⑩ Y. Washizawa and S. Hotta, "Mahalanobis distance on extended Grassmann manifolds for variational pattern analysis," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 25, no. 11, pp.1980-1990, Nov., 2014, 査読有

[学会発表] (計 1 件)

① S. Zhang, T. Wakahara, and Y. Yamashita, "GAT correlation matching with a factor of norm normalization," 2016 年電子情報通信学会総合大会情報, no. D-12-3, p.72, 2016.03.15, 福岡市

[図書] (計 0 件)

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 幸彦 (YAMASHITA YUKIHIKO)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・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)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・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・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 7 0 3 6 0 5 8 4

鷺沢 嘉一 (WASHIZAWA YOSHIKAZU)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授  
研究者番号: 1 0 4 1 9 8 8 0