

令和 2 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00322

研究課題名(和文) 高次スペクトル特徴量の学習的な選択による信号認識機構の開発

研究課題名(英文) Signal Recognition Mechanisms by Selecting Higher-Order Spectral Features Through Learning

研究代表者

亀山 啓輔 (Kameyama, Keisuke)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40242309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：信号の高次スペクトル特徴はパワースペクトルにはない非線形な信号特徴を抽出することができるが、高次元かつスパースで計算量も大きいため信号分類などへの応用が容易ではない。本研究では局所高次モーメントスペクトル(LHOMS)カーネル関数とニューラルネットワークの勾配学習を併用することでその問題を解決することを目指した。主な成果としてLHOMSカーネル法を改良した画像特徴抽出を虹彩認証に応用し、従来法に比べノイズに頑健な認証が可能となることを示した。また、画像認識のための畳み込みニューラルネットワークの学習に際して、パラメータの確率密度分布を継承する転移学習法を提案し、学習の効率化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、画像や音などのメディア信号の認識に際して用いる特徴量として、高次スペクトル特徴量の抽出とニューラルネットワークを用いた分類学習に関する新たな知見を提供するものである。提案手法は生体認証や画像認識の問題に適用され、それぞれその有効性を示している。メディア信号の学習に基づく自動認識や分類はその重要性がますます増大しており、本研究の成果はそれらを行う手段として新たな選択肢を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：Higher-Order Spectral features of signals provide nonlinear signal features unavailable in power spectra. However, their high-dimensionality, sparseness and high computational cost were obstacles for general use for signal classification. In this work, we attempted to solve this issue by joint use of Local Higher-Order Moment Spectrum (LHOMS) kernel functions and gradient based learning of neural networks. A modified image feature extraction method by LHOMS kernel was applied to iris authentication. It was found that the method allows authentication robust to additive noise to the iris image. Also, a novel method for inheriting the probability density of parameters in transfer learning of convolutional neural networks was introduced. The novel transfer learning improved the training efficiency when compared with the existing methods.

研究分野：パターン認識，適応的な信号処理，ニューラルネットワーク

キーワード：高次スペクトル 信号認識 ニューラルネットワーク 学習

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

高次スペクトルは、パワースペクトルでは検出できない非線形な信号特徴を引き出すことができる反面、特徴量次元が次数とともに指数関数オーダーで増大する、自然画像信号、音声、楽音の高次スペクトルは一般にスパースであるという扱いにくさがあり、勾配法等を用いた精密な特徴抽出を難しくしていた。しかしながら、主として特徴量の疎性が原因となり、勾配消失などの問題にも直面するなど、勾配法に基づく学習は必ずしも効率的なものではなかった。このため、広大でスパースな高次スペクトル特徴空間における適切な学習による特徴抽出方式の開発が求められていた。

## 2. 研究の目的

実施者は、上記の問題を解決するため、局所高次モーメントスペクトル(LHOMS)カーネルによる特徴抽出とニューラルネットワークを用いた勾配学習の併用で解決できると考えた。本提案は LHOMS カーネル関数とニューラルネットワークによる勾配学習を併用した信号認識機構を開発することを目標とし、その実現により、従来活用されてこなかった非線形な信号特徴を用いた精密な信号や画像の分類を可能とすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

実施者が提案し、サポートベクトルマシン(SVM)と組み合わせることにより画像分類に応用してきた局所高次モーメントスペクトル (LHOMS) カーネルに応用目的に合わせた改良を加えて用いることや、認識・分類を担当するニューラルネットワークの学習の効率化を図ることで、それらを組み合わせた高次統計量特徴量を用いた学習的な信号認識手法の高度化を図った。

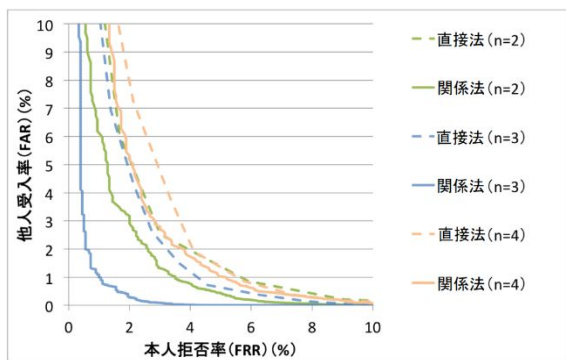
## 4. 研究成果

### 4.1 高次統計特徴量の虹彩認証への応用

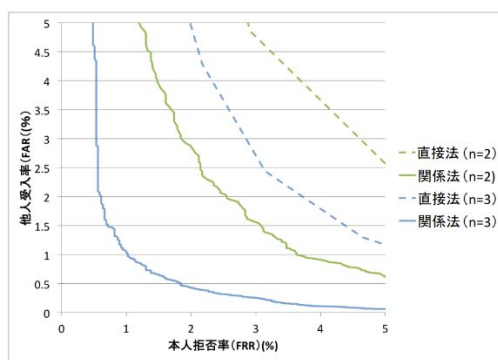
虹彩を用いた個人認証では、虹彩の局所的なテクスチャ特徴を数値化して連結することで「虹彩コード」と呼ばれる 2 進コードを生成して照合し、認証を行う。従来、テクスチャの特徴化には Gabor フィルタ等が用いられてきたが、本研究では局所的な高次モーメントスペクトル特徴量を用い、次数( $n$ )による認証精度の違いとノイズに対する頑健性を評価した。さらに、局所特徴を直接求める「直接法」と、2 か所の局所特徴の関係性を LHOMS カーネルで計算する「関係法」の比較を行った。関係法のカーネル計算においては、特定の空間周波数の組に関する LHOMS 特徴量のエルミート積を用いて計算量を削減することも行った。

次数  $n$  を変えて直接法と関係法を比較した実験では、次数  $n=3$  のときの関係法が最も低い等エラー率(EER)値を達成した。また、従来用いられてきた Gabor フィルタ特徴に關係法を適用した場合でも認証精度を改善できることを確認し、高次統計特徴量およびカーネル法を応用した虹彩コード生成法が認証精度の向上に貢献することを明らかにした。

また、ノイズを含む虹彩画像を用いた認証実験も行った。その結果、ノイズを含む画像に対してもスペクトル次数  $n=3$  のときの関係法が最も低い EER 値を与えることが示された。また、ノイズを変動させても FAR-FRR 曲線へ影響がないことから、関係法はノイズの強度に影響をうけにくいことが確認された。更に前実験同様に、Gabor フィルタ特徴に対して關係法を適用した場合にも認証精度を向上させることを確認した。これにより、関係法を用いた虹彩コード生成によりノイズに対する頑健性が向上することが確認された。



(a)



(b)

図 1. (a)次数  $n=2,3,4$  の特徴量を直接 / 間接法で用いた場合の FAR-FRR 曲線。

(b)SNR=0dB のノイズが加わった場合の FAR-FRR 曲線。

#### 4.2 畳み込みニューラルネットワークの転移学習におけるパラメータ密度関数の継承

画像をはじめとするメディア信号の高次統計特徴量等の特徴量を用いた学習的分類において、近年のニューラルネットワークの利用による性能向上は目覚ましいものがある。特に、特徴抽出フィルタと分類器を併せ持つ構造の畳み込みニューラルネットワーク(CNN)は、一般画像認識や生体認証にも関連の深い顔認識への応用において、優れた性能を示している。しかし、画像分類のためのCNNは一般的に多くの層からなる「深い」ネットワークで構成されており、学習により調整すべきパラメータの数は膨大なものとなる。パラメータを最適化する学習のプロセスには一般に多くの計算量と長い時間を要し、その効率化が課題となっている。この問題を解決するために、fine tuning などの転移学習手法が知られているが、新たに学習させるネットワーク(新ネット)の構造が、既に類似した別問題を学習済みのネットワーク(旧ネット)の構造に強く依存するなどの制約がある。本研究では新ネットに課す制約をより少なくしつつ、効率的な転移学習を実現する手法を提案した。

提案法では、旧ネットのCNNのフィルタパラメータベクトルを確率的に発生する確率変数とみることで、その確率密度関数をモデリングし、新ネットにはそこからランダムに発生させた初期パラメータベクトルを与えて学習を開始することとした。モデリングとそこからの初期値の生成は、対応する畳み込み層ごとに行うこととした。これにより、新ネットは旧ネットのフィルタ数によらない自由な構造を選択することができる。旧ネットのフィルタパラメータのモデリングの方法としては、以下の3種類の方法を提案した。

- 手法1. 旧ネットのある層のフィルタ群の全てのチャンネルのパラメータベクトルをそれぞれ集めて単一のモデルを生成し、新ネットの対応する層の全てのチャンネルのフィルタパラメータをそれぞれ生成する方法。
- 手法2. 旧ネットのある層のフィルタ群について、チャンネルごとに分けてモデルを生成し、チャンネルを1つランダムに選んだ後に新ネットの対応する層の特定のチャンネルのフィルタパラメータを生成する方法。
- 手法3. 旧ネットの2つのフィルタ層(前層と後層)間の関係性が継承されるよう新ネットの初期パラメータを決定する方法。旧ネットの前層のフィルタ群のパラメータベクトルをクラスタ分類し、クラスタごとに接続されている後層のチャンネルのパラメータベクトルを集めてモデリングを行う(クラスタ対応モデル)。新ネットの前層のパラメータベクトルを上記クラスタに従って分類し、クラスタ対応モデルに従って後層のチャンネルのフィルタパラメータを生成する。

実験では、顔画像の分類を学習済みの旧ネットを準備し、別の顔データセットの学習を新ネットで行うことを試みた。確率密度関数のモデリングにはカーネル密度関数推定法(KDE)を用い、学習回数に対する検証セットの正解率の上昇の速さを評価基準とした。

新ネットと旧ネットが同一の構造を持つ場合の結果を図2に示す。学習済みの旧ネットをそのまま追加学習させる場合(Transfer)に次いで、提案法3、提案法2の順に効率的に学習が行われていることがわかる。また、両ネットの構造が異なる場合(図3)には、提案法3が最も効率的に学習した。

以上より、ネットワーク構造の異なる場合においても効率的な転移・継承が可能となる学習法を示すことができたといえる。

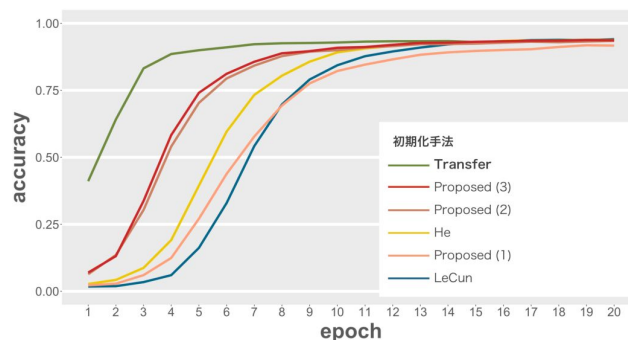


図2. 新旧同一構造のネットワークの場合の転移・継承方法ごとの新ネットの学習の進捗

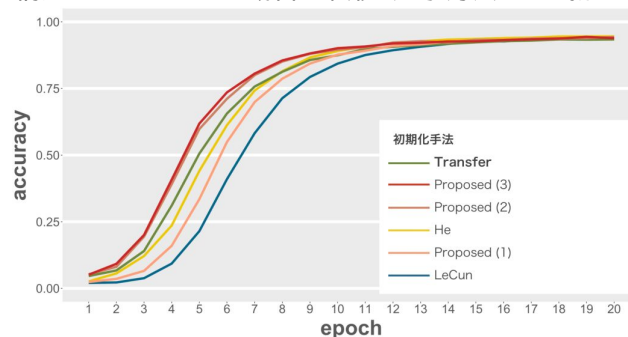


図3. 新ネットと旧ネットの構造が異なる場合の転移・継承方法ごとの新ネットの学習の進捗

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shota Utsumi and Keisuke Kameyama	4. 巻 11303
2. 論文標題 Parallel Cooperative Ensemble Learning by Adaptive Data Weighting and Error-Correcting Output Codes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 673-683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-04182-3_59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keisuke Horiuchi and Keisuke Kameyama	4. 巻 1
2. 論文標題 Parameter Density Inheritance Using Kernel Density Estimation for Efficient CNN Learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology	6. 最初と最後の頁 308-313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ISSPIT.2018.8642618	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Houssein Chatbri, Kevin McGuinness, Suzanne Little, Jiang Zhou, Keisuke Kameyama, Paul Kwan and Noel O'Connor	4. 巻 1
2. 論文標題 Automatic MOOC video classification using transcript features and convolutional neural networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACM Multimedia 2017 - MultiEdTech Workshop	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3132390.3132393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 内海翔太, 亀山啓輔
2. 発表標題 並列的なアンサンブル学習におけるデータの重みを用いた相補的な弱学習器の構成
3. 学会等名 電子情報通信学会IBISML研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀内圭佑, 亀山啓輔
2. 発表標題 カーネル密度関数推定を用いたパラメータ密度の継承によるCNNの学習効率化
3. 学会等名 電子情報通信学会IBISML研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内海翔太, 亀山啓輔
2. 発表標題 アンサンブル学習における弱学習器間の相互性指標に基づく学習法の修正に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会IBISML研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相澤美晴, 亀山啓輔
2. 発表標題 局所スペクトル特徴量とその関係演算を用いた虹彩認証
3. 学会等名 電子情報通信学会バイオメトリクス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 内海翔太, 亀山啓輔
2. 発表標題 層状ニューラルネットワーク2クラス分類器の組み合わせによる多クラス分類器に関する考察
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 相澤美晴, 亀山啓輔
2. 発表標題 局所高次スペクトル特徴量の関係演算による虹彩コード生成
3. 学会等名 バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Miharu Aizawa, Keisuke Kameyama
2. 発表標題 Iris Authentication using Local Spectral Features and their Relational Operations
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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