

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月29日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700163

研究課題名（和文） 圧縮センシングの手法によるパターン認識の効率化、頑健化および秘匿化に関する研究

研究課題名（英文） Research on designing efficient, robust and ciphered pattern recognition schemes using compressed sensing techniques

研究代表者

酒井 智弥（SAKAI TOMOYA）

長崎大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30345003

研究成果の概要（和文）：圧縮センシングと呼ばれる計測技術の手法をパターン情報処理に活かすことで、高効率で頑健かつ安全なパターン認識を実現した。パターンを圧縮したまま認識する技術や、そのような認識処理に適した効率的な圧縮・暗号化技術を開発し、顔や物体の認識、画像の照合、肺音解析等に応用した。

研究成果の概要（英文）：Introducing compressed sensing techniques to pattern information processing, the present study achieved pattern recognition with improved efficiency, robustness and security. The developed techniques of efficient pattern compression and robust recognition for the compressed patterns were examined in the applications such as face recognition, object recognition, image matching and computer-aided lung sound analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：パターン認識、ランダム射影、多重ラベリング

1. 研究開始当初の背景

爆発的にデータが増大し続ける情報社会では、大量のパターンを効率的かつ秘匿化したまま安全に認識処理する技術が重要となると考えられる。例えば Web 上の大量の文書や画像、監視カメラ映像、その他センサネットワークから常時送られるデータ等、すべてを人が見て処理することは非現実的となっている。それゆえ、大規模データを対象とする検索・分類、識別等の認識技術の開発は急務とされてきた。また、生体認証データや

医用データ、人の行動記録のように、パターンを計測したデータの中には保護すべき個人情報が含まれることがある。ゆえに、パターン認識処理は大規模化に対応できるスケーラビリティのみならず、処理工程の秘匿化による安全性の確保も重要な課題となることが予想される。

しかしながら、パターンの計測および大規模データの転送・蓄積のための圧縮・暗号化の研究は、パターン認識の研究とは深く関連せずに発展してきた。例えば、カメラや画像

圧縮技術の多くは、人が見るために画像の品質を考慮して設計されている。一方、画像認識技術は、高い認識率や撮像環境の変化に対する頑健性等を目指して研究開発されている。その結果、現状の画像認識は非合理的な工程を避けられない。すなわち、図1に示すように、人に提示するために画像はJPEG/MPEG等で圧縮されているが、認識処理のために元の画像へと解凍展開した後、改めて解像度変換や特徴抽出をする。圧縮や認識の個々の技術が高度であっても、このような処理のカスケードは大量のパターン認識にとって明らかに効率が悪いだけでなく、全工程における秘匿性の確保も容易ではない。

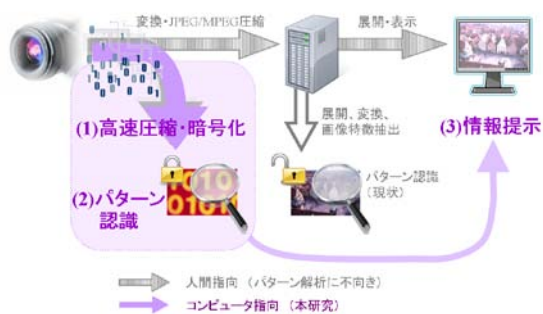


図1 パターンの計測から情報提示・認識処理までの工程、および本研究の構成 (画像の場合)

2. 研究の目的

本研究では、「パターン認識」を「圧縮・暗号化」と融合させ、高効率で頑健かつ安全なパターン認識を具体化することを目的とする。そのため、以下の3点を包括的に研究開発する。

- (i) パターン認識を前提とした圧縮・暗号化：パターンの計測時または計測直後に、計測データを認識処理に適した小規模データへ変換し、計測から認識までの工程を簡略化、低コスト化すると共に、秘匿化を実現する。
- (ii) 圧縮・暗号化されたデータを前提としたパターン認識：(i)の方法で圧縮・暗号化されたデータを展開・復号することなくパターンの分類、検索、識別等を達成する。
- (iii) 展開・復号による情報提示：人への情報提示や既存技術との互換性のため、必要に応じて元のパターンを復元する。またはノイズ除去や修復、信号源分離等の情報処理を行ったパターンを復元する。

本研究は、「圧縮センシング (compressed sensing)」の手法をパターン情報処理に活かし、パターンを圧縮・暗号化したまま認識する技術や、そのような認識処理に適した効率的な圧縮・暗号化技術を開発するものである。圧縮センシングは、不完全な信号の計測から完全な信号を復元する信号処理の技術であ

る。ランダムで不完全な計測によって得られた少量のデータを圧縮・暗号化されたパターンと見なした場合、情報を補って完全なパターンを復元することは展開・復号に相当する。圧縮センシングは計測を効率化・頑健化する革新的な技術として近年注目されており、パターン計測技術の進化に伴い、必要とされるパターン認識技術も大きく変貌することが予想される。本研究では、圧縮センシングの手法によるパターン認識技術を開発し、画像認識 (顔認証、物体認識)、画像の自動分類・検索、画像や信号の修復・加工等への応用を試み、性能と実用性を検証する。

3. 研究の方法

(1) パターン認識のための高効率な圧縮・暗号化技術の開発

本研究ではランダム射影を圧縮・暗号化の手法として採用する。ランダム射影は、圧縮センシングにおける乱数を用いた不完全計測に相当する演算であり、計測対象のパターンの性質に依存しない汎用の次元圧縮手法とされる。暗号としては情報理論的安全性を持つと考えられる。この演算処理によってパターンをスクランブル化し、かつ少量のデータへ線形変換する。パターンの認識処理や展開・復号の工程においても、ランダム射影とその随伴作用に相当する演算の反復を必要とする。そこで、これらの処理を効率化するランダム射影の算法を設計・改良し、装置実装および性能評価する。

(2) 圧縮・暗号化したパターンの自動分類・検索の開発

ランダム射影で圧縮・暗号化したパターンを、展開・復号することなく分類・検索する技術を実現する。ランダム射影による次元圧縮を応用した高速なクラスタリング (自動分類) におけるパターンの類似度計算を効率化する。大規模・高次元なデータの分類・検索、およびその応用として、画像・動画画像分割、画像の位置あわせ等に利用し、性能を評価する。

(3) パターン認識の効率化と頑健化

先行研究では、パターンのスパース表現を利用した顔認識手法が考案され、既存技術を凌ぐ高い頑健性が示されている。この研究を発展させると、複数の圧縮パターンに共通してスパース正則化を施すことで、更なる効率化と頑健化、認識率の向上が見込める。本研究では、開発した高効率な圧縮・暗号化技術をスパース正則化の算法に組み込む。また、この圧縮パターンの認識手法の実証研究として、顔画像認識を例に性能の詳細を解明する。

(4) 多重ラベリング識別器の開発

複数の概念 (クラス) の組合せによって

パターンを認識するための多重ラベリング識別器を開発する。パターンのスパース表現によって部分空間を少数の部分空間に分解し、複数の対象に複数のラベルを付与する多対多識別を実現する。また、正則化におけるスパース性に構造を持たせることが可能であり、構造を機械学習することで、識別器の適応化による頑健性の向上が期待できる。そのような識別器の設計・改良と、画像による物体認識への応用を試みる。

4. 研究成果

(1) パターン認識のための高効率な圧縮・暗号化技術の開発

スペクトラム拡散と高速巡回畳み込みによってランダム射影を飛躍的に高速化および省メモリ化する算法を考案し（図2）、これを実装した。ランダム行列の確保が不要であるため、擬似乱数生成にかかる時間および計算に必要なメモリは数百～数千分の一にまで削減された。パターンの射影にかかる時間も十分の一程度に低減された。このシンプルな算法によっても、通常のランダム射影と全く同様に、射影後のパターン間の類似性が保証される。ランダム行列の随伴作用に相当する演算も同様にスペクトラム拡散と高速巡回畳み込みで実現できた。これらの演算の効率化は、本研究におけるパターンの圧縮・暗号化および認識処理や展開・復号の工程に大きく貢献した。

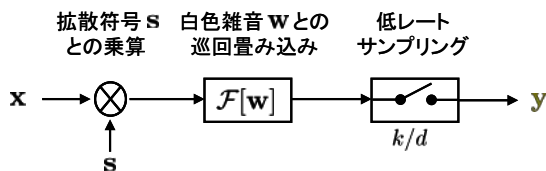


図2 高効率ランダム射影。高次元ベクトル x から効率的に低次元ベクトル y を得る。

(2) 圧縮・暗号化したパターンの自動分類・検索の開発

①高効率ランダム射影を利用したデータの効率的な分類： 高効率ランダム射影によるパターンの低次元化で類似度計算を効率化した。計算された類似度はランダム射影の数理によって精度が保証されている。また、この数理に基づきデータ数を削減することもできた。これらの効率化により、線形分離不可能な複雑な関係にあるデータの分類を実現するスペクトラルクラスタリングの計算を大幅に省力化することに成功した。

②効率的なスペクトラルクラスタリングの応用： 大規模計算を要する画像分割や動画のショット分割、物体の動きの分類への応用を可能にした。画像分割の例を図3に示す。画像中の物体を検出する画像分割において画素間の類似性を総当りで評価することを回避するため、予め過分割した小領域と画素間の類似性を評価する手法を考案した。この手法は類似度行列の次元圧縮の一種と見なすことができ、画像分割の品質を損なうことなく計算量の削減を達成することを確認した。



図3 効率化したスペクトラルクラスタリングを利用した画像分割の例。

③圧縮したパターンの検索と応用： 大規模計算を必要とする医用画像の領域抽出やレジストレーション（画像の照合・位置合わせ）を効率化した。様々な拡大縮小・回転を施した画像のランダム射影を検索対象とすることで、レジストレーションの問題を画像検索の問題に置き換えることができる。画素数が多い画像についてこのような問題の置き換えをすることは計算量的に非実用的であるが、本研究のランダム射影によって現実的な計算量に抑えることができた。

(3) パターン認識の効率化と頑健化

高効率ランダム射影で圧縮した学習パターンを辞書とするスパース正則化により、効率的かつノイズに対して頑健なパターン識別器を設計した。スパース正則化は、テストパターンを簡潔に合成できる少数の学習パターンを特定する効果があるため、いかなる学習パターンとも相関の低いノイズやデータの欠損に対して頑健である。顔画像認識による実験的な評価では、画像の明暗と同等の強さのノイズで劣化した場合でも、ノイズなしの場合とほぼ同等の認識率が得られることを確認した。圧縮センシングに利用されるスパース正則化の算法は、信号計測時の圧縮作用素とその随伴作用素を内包するものが多い。ゆえに、学習フェーズでは高効率ランダム射影で学習パターンを圧縮し、認識フェーズでも同様にテストパターンを圧縮計測することで、効率的かつ圧縮センシングと親和性の高いパターン認識技術を実現したといえる。

(4) 多重ラベリング識別器の開発

①テストパターンが同時に複数のクラスに属するときをそれらを特定する多重ラベリングの機能を実現した。一般物体認識にこの多重ラベリング手法を応用することで、画像中に混在する複数の物体を同時に認識できる可能性を示唆した。例えば、一般物体認識の先行研究を参考に、画像から複数の不変特徴量(SIFT等)を抽出し、特徴の出現頻度分布を量子化したベクトルで表現する。スパース正則化によってこの頻度分布を分解することで(図4)、画像中に混在する複数の物体を同時に認識できる(図5)。

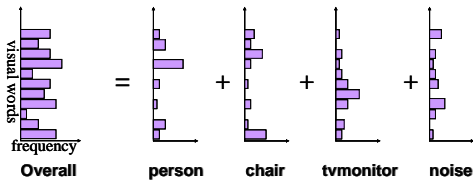


図4 特徴の出現頻度分布の分解。



図5 多重ラベリングによる複数物体認識の例。中段は上段の画像の正解ラベル、下段は本研究の手法で推定されたラベル。

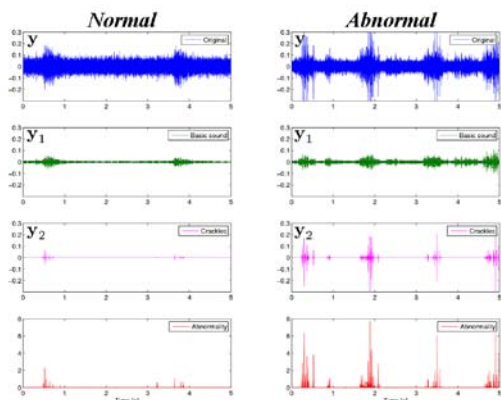


図6 肺音信号の分離。左：正常な呼吸音、右：異常音を含む肺音の低品質な信号。最上段：信号の波形、第2段：抽出した呼吸音、第3段：異常音として抽出された構成音、下段：異常度。

②スパース正則化に基づく多重ラベリング識別器の頑健性を考察し、応用範囲の拡大を試みた。特に、肺音信号からその正

常・異常な成分を頑健に分離する信号処理と、分離信号のパターン認識による診断支援の可能性を検討した。肺音は様々な種類の正常音と異常音の混合であり、かつ、高品質な信号の記録が困難であることから、そのパターン認識は極めて挑戦的な課題と考えられてきた。本研究では、圧縮センシングの手法に基づくことにより、そのような肺音信号に対しても頑健かつ効率的に高品質な構成音を抽出できることを示した(図6)。また、肺音を簡潔に表現できる基底を用意できれば、混合した複数の正常音・異常音を同時に認識できることを指摘した。特に断続性ラ音と呼ばれるパルス状の異常音の検出について、低いSN比の条件下においても高い適合率と再現率を同時に達成できることを実験的に確認した(図7)。

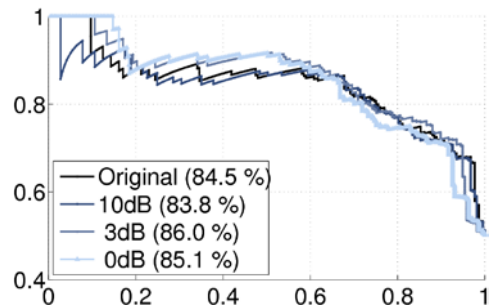


図7 適合率・再現率曲線。異常音の誤検出・検出漏れが起き難く、ノイズの影響も受け難いことを示している。

● 研究の総括と今後の展望

本研究の目的として掲げた(i)~(iii)の取り組みを通して得られた主な知見が3点挙げられる。ひとつは、ランダム射影に代表される計測時の圧縮は、後に続くパターンの解析と親和性が高く、多くの既存手法を効率化する可能性を多く秘めていることである。前述の(1)~(4)で挙げた研究成果はその具体例である。ふたつ目の知見は、パターン認識が本質的に組合せ最適化問題に帰着する点である。画像中に混在する複数の物体の認識や、肺音を構成する様々な正常音・異常音の識別は、組合せ最適化問題に帰着するパターン認識の典型的な例であり、入力のパターンに対して最も相応しい分類先をひとつ判定する従来の技術では解決が困難な応用問題である。圧縮センシングにおける信号復元の数理は、組合せ最適化問題の解法を提供しており、その性能を理論的に保証している。その数理に基づけば、既知の概念の組合せによって認識対象を簡潔に説明する新しいパターン認識が可能となる。本研究の延長線上にはこのような「組合せ論的パターン認識」

がある。これに関して研究代表者は今後も研究を継続する予定であり、例えば肺音のパターン認識のように、大きな研究成果を期待できるテーマも発見できている。みつつ目の知見は、圧縮センシングの要素技術は信号処理とパターン認識の両研究分野の重要な接点になっていることである。本研究で得られた成果と知見を活かし、今後も両研究分野の相乗的な発展に貢献したい。

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 18 件)

- ① Tomoya Sakai, Madoka Kato, Sueharu Miyahara and Senya Kiyasu, Robust detection of adventitious lung sounds in electronic auscultation signals, ICPR 2012 Proceedings, pp. 1993-1996, 2012. (査読有)
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6460549
- ② Hayao Itoh, Shuang Lu, Tomoya Sakai and Atsushi Imiya, Interpolation of reference images in sparse dictionary for global image registration, Lecture Notes in Computer Science, ISVC 2012, Revised Selected Papers, Part II, pp. 657-667, 2012. (査読有)
DOI:10.1007/978-3-642-33191-6_65
- ③ Tomoya Sakai, Haruka Satomoto, Senya Kiyasu and Sueharu Miyahara, Sparse representation-based extraction of pulmonary sound components from low-quality auscultation signals, ICASSP 2012 Proceedings, pp. 509-512, 2012. (査読有)
DOI:10.1109/ICASSP.2012.6287928
- ④ Tomoya Sakai, Hayato Itoh and Atsushi Imiya, Multi-label classification for image annotation via sparse similarity voting, Lecture Notes in Computer Science, ACCV 2010 Workshops, Revised Selected Papers, Part II, vol. 6469, pp. 344-353, 2011. (査読有)
DOI:10.1007/978-3-642-22819-3_35
- ⑤ Tomoya Sakai and Atsushi Imiya, Practical Algorithms of Spectral Clustering: toward Large-Scale Vision-Based Motion Analysis. Machine Learning for Vision-based Motion Analysis, Advances in Pattern Recognition, pp. 3-26, 2011. (査読有)
DOI:10.1007/978-0-85729-057-1_1

[学会発表] (計 14 件)

- ① 小松祐太, 酒井智弥, 組合せ最適化に基づく未学習クラスの識別と顔画像認識における評価, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2012年5月24日, 中京大学豊田キャンパス.
- ② 田中 智貴, 酒井 智弥, 事前過分割を利用した高効率スペクトラルクラスターリングによる医用画像分割, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2012年5月24日, 中京大学豊田キャンパス.
- ③ 酒井智弥, 組合せ最適化問題としてのパターン認識と信号処理, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, 2011年9月13日, 北海道大学.
- ④ 酒井智弥, スパース正則化に基づく多重ラベリング: 複数物体認識への応用に向けて, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), 2010年7月29日, 釧路市感光国際交流センター.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 智弥 (SAKAI TOMOYA)

長崎大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30345003