

機関番号：21602

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500209

研究課題名 (和文) 複数の源信号のスパースフレーム表現を用いたブラインド信号分離処理とその応用の研究

研究課題名 (英文) Blind source separation based on simultaneous learning of the sparse frame representations for multi sources from their mixtures

研究代表者

丁 数学 (Shuxue Ding)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：80372829

研究成果の概要 (和文)：

すべての言葉が辞書の単語のいくつかで構成されるように、信号や画像などについても特別な「単語」で効率的な表現ができる。辞書の中に大量な単語と比べ、一つのことを構成するのに数少ない単語だけで十分であるので、これらの単語を辞書の単語とのマッピングは「スパース (sparse)」と言う。構成された言葉はスパースコーディングとも言う。同じように、信号や画像などの辞書 (Dictionary) があれば、少ない単語 (Word、原子) で信号や画像を表現することでスパースコーディングとも言われる。このような辞書では単語の長さより単語の数は多い、すなわち、**Over-complete** であるので、信号を表現するためのフレームとも言う。本研究の目的としては信号組のスパース表現について有効な方法を発見し、それでブラインド信号分離処理を行うことである。

スパース表現でブラインド信号分離処理の1つの方法として、任意の辞書と源信号の初期推定値から、源信号が既知と仮定して混合行列について推定を更新すると混合行列が既知と仮定して源信号についての推定を更新するという2つのステップ、の繰り返しによって行う。この中、フレームの最適化は非常に重要かつ難しい問題であり、有効な方法がまだ少なかった。このために、我々は、**Adaptive non-orthogonal sparsifying transform** と言う方法を提案し、その有効性を確認した。この方法ではフレームとスパース行列の乗算での結果を目標信号に近似する。他の拘束がなければこのような条件を満たすフレームと行列はたくさんであるが、その中に最もスパースな行列、そして、それと対応するフレームを探り、我々の結果となる。特徴として、フレームの中の成分はエネルギーによって順列される。

従来の殆どの方法では上記の2つのステップで行ったが、収束が遅いと計算量が重いという欠点もある。これらの問題を解決するため、本研究では **Nonnegative Matrix Factorization (NMF)** を用いて源信号と混合行列を同時に推定することができる方法についても研究した。しかしながら、**NMF** を直接に使うと結果の非唯一性によって必ずしも目標のスパースなフレーム表現を得ることができない。どうやってこの非唯一な解から我々が必要となる唯一な解を選ぶことが重要である。このため、我々はさまざまな形で拘束された **NMF** を行った。源信号がスパースであれば、源信号はスパースとなるための拘束条件を加えて、**Sparse NMF** を提案し、その有効性を確認した。この方法で、**S-measure** という信号に関する新しいスパースの度量を提案し、それが最小となることとの同時に **NMF** を行った。もう1つの方法として、源信号はスパースとなるため、直接に源信号に関する拘束条件ではなく、特別な辞書を選べることで実現することも可能ということがわかった。いわゆる、拘束条件は辞書に関するものである。利点として、信号より辞書の長さは短いので、拘束に関する計算量の低減につながれた。辞書のすべての単語でわたされる空間の体積が最大であれば、その辞書と対応する源信号はスパースであるので、この体積の最大化で **NMF** を行うことは我々の方法でした。

以上の方法の有効性を確認し、**Blind Spectral Unmixing** や画像のブラインド信号分離と雑音の低減、**Beamforming**、**Direction of Arrival** の推定などに応用の研究も行った。

研究成果の概要 (英文)：

Just as that any sentence can be constructed by several words in a dictionary, any signal or image can be either represented by several “words” in a “dictionary”. Comparing with the large number of

words in the dictionary, a sentence is usually be constructed by only very few words, so that these words are mapped into the dictionary sparsely. Then constructed sentence may be called as sparse coding with the dictionary. Similarly, with a dictionary for signal or image, one can represent any signal or image, and this can also be termed as sparse coding. Usually, there more words in the dictionary than the length of the words, i.e., the dictionary is over-complete, the dictionary has a structure of frame (a mathematical concept). The motivation of this research is to find more effective methods for finding this sparse representation, and then apply them to blind source separation (BSS).

BSS by using the sparse representation usually includes repeated two steps, once it is given an arbitrary initialization of the estimated dictionary. In the first step, for a given dictionary the sparse representation by the dictionary is conducted. In the second step, the dictionary is learned in part and the corresponding sparse representation is modified, while the other parts of sparse representation are kept. In these two steps, the dictionary learning is more important and there still very few effective methods for it. For this purpose, we worked out a method that is termed as adaptive non-orthogonal sparsifying transform. In this method, we take the multiplication of the frame and a sparse matrix as the source signal estimation. Though there may be many possible solutions, we choose the sparsest one as our result. As a feature of the method, the words in the dictionary are ordered by their energy, rather than randomly ordered as in the usual dictionary.

In the above method, the dictionary learning and source estimation may converge very slowly and the computation is also very consuming. For solving these problems, we also worked out a method in which the dictionary and the sources are simultaneously estimated, by invoking the nonnegative matrix factorization (NMF). There are many nonnegative signals, such as image, in applications. However, usually, the result of NMF is not unique and not all of them are sparse. For solving this problem, we worked out a sparse NMF method, in which we select a sparse solution from the non unique solutions by a constraint. We propose a measure for measuring the sparsity of source signals and use its minimization as the constraint. As an alternative method, we also proposed to use a constraint on the dictionary, rather than on the sources, since the sources are usually very long and a constraint on them will be computation consuming. We found that the maximization of space spanned by the words in the dictionary is a good constraint.

Evaluations showed that our methods are efficient. Then we applied them to blind spectral unmixing, BSS or denoising of images, beamforming and direction of arrival estimation.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

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：確率的情報処理、ブラインド信号分離処理、信号のスパース表現

#### 1. 研究開始当初の背景

今まで様々な信号強調と雑音の除去、分離に関する方法研究されており、数多く研究が応用にも至って来た。しかし、これらの方法は IT 社会の中で生まれた高度な情報処理の要求を満たしていない。例えば、ブラインド信号分離処理の方法は幅広く研究されたが、マルチパスの環境で複数の源信号を含む、いわゆる、畳み込み混合場合のブラインド信号分離についてはまだ十分実用的な技術に至っていない。もう1つの例として、散乱のある環境で撮ったぼけた画像や写真から、その

真のイメージを推定する研究も数多くなされてきたが、まだ十分実用的ではない状態である。

今までの信号処理では時間（もしくは空間）領域と Transform-Domain（例えば、周波数と Wavelet 領域など）で処理する方法が多い。周波数領域では、冗長のない周波数成分、いわゆる、“ベース (bases)” で信号表現することに対し、Wavelet 領域では、冗長のある信号成分、いわゆる、“フレーム (frames)” を適用している。フレーム領域での信号処理の利点としては、(1) 適切なフレームを使

うことによって、数少ないフレームの組み合わせで信号を表現すること（これを **sparse** 表現、また表現の **sparsity** と言う）が可能なので、この **sparsity** を前提とする新しい信号処理手段を組み込みことができる。（2）フレーム領域で **sparse** 表現ができるので、処理量を減らすとともに信号処理の速度の向上をもたらす。（3）フレームを用いることで、その領域に冗長度を持たせ信号処理に柔軟かつ拡張性を持たせることができる。信号強調や雑音の除去など信号処理をベース領域で行うことよりもフレーム領域で行う方はもっと精度が高いことは最近の研究でわかってきた。しかしながら、このような方法で上記の問題をある程度解決することができるが、また十分ではない。（注：文献の中よく「フレーム」と言う述語で一定長さの信号を表すが、本提案のフレームの意味と異なる。また、ここの「**sparse**」という概念が信号の統計特性の1つであり、従来の **sparse** 行列の概念と異なる）

このような問題を解決するため、我々は、信号処理においてフレームを応用する視点で研究するが、さらにフレームに柔軟性と拡張性を与えることを提案する。まず、従来の汎用と固定なフレーム（例えば、**Wavelet**）に対して、我々は対象の信号に対して、最適かつ可変なフレームを生成する方法とそれに適した信号処理技術を研究する。ここで「最適」であるとは、ある信号を最も数が少ないフレームの線形組み合わせ（すなわち、**sparse**、**sparsity**）で信号再構成する際、元の信号との誤差が最少であるという意味である。このフレームは多数の1次元の要素の組、すなわち、ベクトルで構成される。そして、複数の未知な源信号で混合された観測信号のみから（いわゆる、ブラインド）それぞれの源信号と対応する複数のフレームを学習する方法を研究する。このため、任意に選択された初期フレームから最適フレームを求める学習や最適化などのアルゴリズムも提供する。更に、それらのアルゴリズムを用いて、フレーム領域でのブラインド信号分離と信号回復を行う。

信号の **sparse** 表現について国内の理研・脳科学研究センターの甘利教授と **Cichocki** 教授のグループ（本研究の代表者もこのセンターの非常勤研究員としてこの研究に参加している）と国外のいくつかのグループ（米国、**Stanford University** の **Donoho** 教授のグループと **Siemens Corporate Research** の **Balan** 教授のグループなど）で研究されたが、今までの研究ではフレーム領域を用いず、信号そのもの（時間、もしくは空間領域）に対する **sparse** 表現を用いている。この表現は信号の局部情報しか扱わないことに対して、本研究ではフレーム表現によって信号の大

規模な構造を扱うことも可能になるので、上記のフレームの利点を得られる。

一方、**Israel**、**The Technion Israel Institute of Technology** の **Bled** 教授らのグループと **Zibulevsky** 博士のグループの研究ではフレームの表現も行ったが、フレームを構成するための条件としての単一の信号かつ加法性フレームが必要であるため、加法性ノイズの除去など簡単な信号処理にしか応用できなかった。また、彼らが使ったフレームでは直交性など人為的な構造も仮定されていたため、使用される信号処理に強い制限を与え、応用が画像のノイズ除去に限られた。これは信号の時間的な **sparsity** と言う。これに対して、我々は、複数の源信号に対してそれぞれのフレームを導入し、複数の源信号を渡す（いわゆる、空間的な）**sparsity** も考慮するで、時間—空間的 **sparsity** で信号処理を研究する。また、これらフレームに直交性など人為的な構造を仮定しない。こうすることによって、複数の信号を **sparse** 表現できるため、ブラインド信号分離処理などの高度な信号処理を実現することが可能である。さらに、我々は、畳み込み混合に対応ができるフレームも導入することによって、畳み込み混合場合のブラインド音源分離処理からぼやけた画像や写真よりその真のイメージを推定することまで幅広い高度な信号処理ができるようになる。

## 2. 研究の目的

（1）信号のフレーム表現と信号の特性の関連性について調査する。つまり、異なる特性の信号と対応する最適なフレームの特徴を把握する。さらに、これらのフレーム領域において信号の **sparsity** とする特性について研究する。また、畳み込み混合された複数の信号がこのフレーム領域でどのように表現されるのかについても調査する。これは、次の信号処理段階にとって極めて重要である。

（2）複数の未知な源信号で混合された観測信号のみからそれぞれの源信号と対応する最適なフレームを構成する方法を研究する。信号を再構成する際観測信号との誤差及びフレームでの表現の **sparsity** でコスト関数を特定し、このコスト数に基づいてフレームを最適化する学習アルゴリズムを作成する。

（3）上記のフレーム領域での信号処理を研究する。本研究では特に、ブラインド信号分離と信号回復、強調に関する有効な方法を模索する。これらの目的に応じてコスト関数を設定し、それを最適化するための学習アルゴリズムの作成し、有効性を評価する。

（4）以上の研究をまとめた技術の応用研究を行う。特に、畳み込み混合場合のブラインド音源分離処理と散乱のある環境で撮った画像より真の源信号を推定することについて

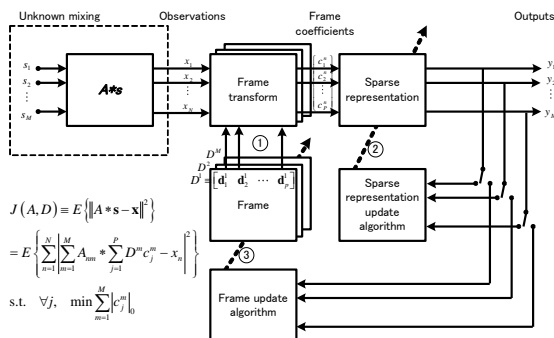
て研究する。具体的な応用としては、実環境での複数音源信号のブラインド信号分離と、赤外線画像から人体内部の発熱点の推定（トモグラフィの一種）を実現するつもりである。

### 3. 研究の方法

本研究の最終の目標として下記のブロック図のような信号処理を行う。ただし、下図の中、 $k$  ( $=1, 2, \dots, L$ ) は信号のサンプルの番号、 $L$  は信号の長さである。 $T$  は転置操作を示す。実線は信号の流れを示すが、点線は制御線を示す。1つのフレームに  $P$  個の要素あるが、sparse ということ少数の係数しか非零である。また、sparsity のため、要素の数  $P$  が信号の長さ  $L$  より多いと言う条件が必要である。

主に 3 の処理が含まれている：

- (1) 出力信号（または、源信号）毎にと対応専用フレームで変換する部分（下図中の①）。
- (2) Sparse 表現の適応によるブラインド信号分離処理する部分（下図中の②）。
- (3) 各専用フレームの適応部分（下図中の③）。



上図の中での各符号の意味は下記のようになる：

$s \equiv [s_1(k) \ s_2(k) \ \dots \ s_M(k)]^T$  :  $M$  個の未知な源信号；

$A$  : 混合行列（瞬時性混合の場合は行列成分が実数であり、畳み込み混合の場合は行列成分が FIR フィルタである）；

$x \equiv [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$  :  $N$  個の観測信号；

$[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_M]^T$  : 出力（源信号の推定値）；

$D^m \equiv [d_1^m \ d_2^m \ \dots \ d_P^m]^T$  :  $m$  番源信号のためのフレーム（ $P$  個の要素がある）；

$[c_1^m \ c_2^m \ \dots \ c_P^m]^T$  :  $n$  番観測信号をフレーム変換するとき各要素に対する係数。

上記の目標を実現するため具体的に下記の研究ステップで行った。

#### (1) 問題の定式化と方法論の研究

・当初我々はフレームを導入せず複数信号間の sparsity、いわゆる、空間的 sparsity を研究した。これに対して、ほかの研究グループでは単一の信号に対してフレーム変換を導入し、その領域での sparsity、いわゆる、時間的 sparsity を研究した。本研究では源信号毎にフレームを導入し、その上の時間-空間的な sparsity を研究するため、これに適した問題の定式化およびこの問題の解法の方法論を研究することが必要である。具体的には、各出力とそれぞれ対応する専用フレームを指定し、これで表現される複数の信号を時間領域で再構成をし、混合行列で混合することで各観測信号の推定値を得る。これらの推定値と実際の観測値の平均 2 乗誤差とフレーム領域での sparsity でコスト関数を構成し、フレームと混合行列に関する最適化の問題とする。そして、上記の図で示されるようにフレームに関する最適化と混合行列の推定に関する最適化で構成する 2 段階の最適化の繰り返しが一番効率的な方法となる。我々はこの定式化と最適化の可能性についてすでに確認した。

われわれは、上記の 2 段階最適化を分解し、それぞれ研究することにより、研究を進めていく。これは、A) 混合行列が既知であることを仮定し、純粋なフレームの最適化を図る段階（下記の (2) と (3)）と、B) 最適なフレームが既知であることを仮定し、純粋な混合行列の最適化を図る段階である。（下記の (4)）。そのあとは 2 段階の研究を合成する（下記の (5) 以降）。

#### (2) 信号のフレーム表現と信号の種類の関連性についての調査

・純粋なフレームの最適化では混合行列が既知と仮定しフレームの学習で最適化を図り、フレーム領域での信号表現の変化と特性を調べる。特に、この領域での信号の sparsity について重点的に研究する。そして、異なる種類の信号と対応する最適なフレームの特徴を把握する。また、標準なフレーム、例えば、Gabor フレームとの比較研究も重要な理論研究である。

#### (3) 混合行列が既知とするフレームの最適化研究

・任意なフレームの初期値を指定し、上記の最適なフレームまで学習アルゴリズムを研究する。従来の研究ではすでに単一の信号に対して直行性のあるフレームの最適化について行った。本提案では複数信号、かつ、フレームの直行性という人為的な仮定としないフレームの研究を行う。複数の信号のフレームを最適化するときコスト関数は総合的に 1 つしかないので、従来の方法の単純拡張ではない。直行性が不要なフレームの可能性について、我々は、まず、1 つの源信号

に対するフレームの最適化を行ない、混合信号からこの最適フレームで表現された源信号を取り除くことによって、扱う問題の次元を1減らす。これを繰り返してすべての源信号に対するフレームの最適化を図る。

(4) 最適なフレームが既知を仮定して信号処理研究

・純粋な混合行列の最適化研究として、最適なフレームが既知と仮定し混合行列の学習で最適化を図り、信号の強調やブラインド信号分離処理を研究する。これについて[1]で示す我々の研究を拡張した方法で行う予定である。関連研究との主な違いは、[1]の中では変換をフーリエ変換による周波数領域で行っていることに対して、ここは最適なフレーム変換で行う。

(5) フレームの最適化と信号処理の合成

・(3)で研究されたフレームの最適化アルゴリズムと(4)の段階で研究された信号処理アルゴリズムを合成し、目標の信号処理システムを作成する。Matlabでこのシステムを作成する予定である。

・パフォーマンスの評価や様々な評価により信号処理システムの最適化を図るための調整を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 複数の源信号のスパースフレーム表現を用いたブラインド信号分離処理について問題の定式化と方法論の研究を行った

ブラインド信号分離処理の出力信号とそれぞれ対応する専用なフレームを指定し、これで表現される複数の信号を時間領域で再構成をし、混合行列で混合することで各観測信号の推定値を得る。これらの推定値と実際の観測値の平均2乗誤差とフレーム領域でのsparsityでコスト関数を構成し、フレームと混合行列に関する最適化の問題とする。そして、フレームに関する最適化と混合行列の推定に関する最適化で構成する2段階の最適化の繰り返しが効率な方法となる。我々はこの定式化と最適化の可能性について確認した。また、この定式化でブラインド信号分離処理の新しいアルゴリズムも研究し、シミュレーションで分離効果を確認した。

(2) 複数の源信号のスパースフレーム表現による混合行列と源信号の同時推定について研究を行った

従来の殆ど方法では2つのステップ、すなわち、源信号が既知と仮定して混合行列について推定を更新すると混合行列が既知と仮定して源信号について推定を更新するということ、の繰り返しによって行う。それと異なると、本研究では源信号と混合行列を同時に推定について研究した。この方法は画像などのように非負な源信号であれば有力な方法となることを研究によってわかった。この

方法は Sparse Nonnegative Matrix Factorization (NMF) とも言う。この方法で、S-measure という信号に関する新しいスパースの度量を提案し、それが最小となることと同時にNMFを行う。研究成果をまとめた論文は学術雑誌で発表した[1]。

(3) 拘束のある非負行列分解法による複数の源信号のスパースフレーム表現の研究を行った

(2)と同じ目的でNMFを用いて源信号と混合行列を同時に推定する方法に関する研究である。しかしながら、NMFを直接に使うと結果の非唯一性によって必ずしもスパースなフレーム表現を得ることができない。この問題を解決するため、我々は従来のNMFにスパースとなるための拘束条件を加えて、Sparse NMFを提案し、その有効性を確認した。源信号はスパースとなるため、直接に源信号に関する拘束条件ではなく、特別なフレームを選べることで実現することも可能ということがわかった。いわゆる、拘束条件は信号ではなく辞書に関するものである。辞書のすべての単語でわたされる空間の体積が最大であれば、その辞書と対応する源信号はスパースであるので、この体積の最大化でNMFを行うことは我々の方法でした。研究成果をまとめた論文は雑誌で発表された[3, 8]。

(4) スパースフレーム表現による混合行列と源信号の同時推定の応用研究を行った

(1)で研究された混合行列と源信号の同時推定法をブラインド信号分離処理(BSS)に応用し、その優れた性能を確認することができた。この時、スパースとなるための拘束条件としては混合行列の体積の最大化を提案した。研究成果をまとめた論文は雑誌で発表された[2]。

(5) 信号の表現のために最適なフレームの学習と源信号の推定について研究を行った

信号の表現のために最適なフレームの学習方法として、我々は Adaptive non-orthogonal sparsifying transform という方法を提案し、その有効性を確認した。この方法では目標信号をフレームとスパース行列の乗算として特定とする。他の拘束がなければこのような条件を満たすフレームと行列が無限個もあるが、その中に最もスパースな行列、そして、それと対応するフレームを探り、我々の結果となる。特徴として、フレームの中の成分はエネルギーによって順列される。研究成果をまとめた論文は国際会議で発表された[9]。

(6) ブラインド信号分離の実時間処理[6, 12]やBeamformingとDoAをスパースの逆問題、いわゆる、稠密問題として本課題と関連する方法での研究も行った[4, 5, 7, 10, 11, 13]。

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7件)

- [1] Zuyuan Yang, Guoxu Zhou, Shengli Xie, Shuxue Ding, Jun-Mei Yang, and Jun Zhang, Blind Spectral Unmixing Based on Sparse Nonnegative Matrix Factorization, *IEEE Transactions on Image Processing*, **Vol. 20, No. 4**, pp. 1112-1125 (Apr. 2011).
- [2] Zuyuan Yang, Guoxu Zhou, Shuxue Ding and Shengli Xie, Nonnegative Blind Source Separation by Iterative Volume Maximization with Fully Nonnegativity Constraints, *ICIC Express Letters*, **Vol. 4, No. 6(B)**, pp. 2329-2334 (Dec. 2010).
- [3] Zuyuan Yang, Shuxue Ding, and Shengli Xie, Blind Source Separation by Fully Nonnegative Constrained Iterative Volume Maximization, *IEEE Signal Processing Letter*, **Vol. 17, No. 9**, pp. 799-802 (Sep. 2010).
- [4] Wenlong Liu and Shuxue Ding, Performance Analysis of the Iterative Decision Method for Optimal Multiuser Detection, *ICIC Express Letters*, **Vol.3, No.3 (B)**, pp. 615-620 (Sep. 2009).
- [5] Wenlong Liu and Shuxue Ding, The Diagonal Loading Beamformers for the PAM Communication Systems, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **Vol. 5, No. 9**, pp. 2907-2916 (Sep. 2009).
- [6] Takahiro Haneda and Shuxue Ding, Pseudo Online Independent Component Analysis for Dynamical Mixing Using Gradient-Optimization, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, **Vol.13, No.3**, pp.275-283 (May 2009).
- [7] Wenlong Liu and Shuxue Ding, An Efficient Method to Determine the Diagonal Loading Factor Using the Constant Modulus Feature, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **Vol.56, No.12**, pp.6102-6106 (Dec. 2008).

[学会発表] (計6件)

- [8] Zuyuan Yang, Guoxu Zhou, Shuxue Ding, and Shengli Xie, Blind Source

Separation by Nonnegative Matrix Factorization with Minimum-Volume Constraint, *Proc. 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP2010, Dalian, China, August 12-15, 2010)*, pp. 117-119 (2010).

- [9] Zunyi Tang, Zuyuan Yang, and Shuxue Ding, Sparse Representations of Images Via Overcomplete Dictionary Learned by Adaptive Non-Orthogonal Sparsifying Transform, *Proc. The 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS 2010, November 1-3, 2010, Shenyang, China)*, pp. 120-123 (2010).
- [10] Wenlong Liu, Qian Liu, Jianfeng Li, Minglu Jin, and Shuxue Ding, An Iterative Algorithm for Joint Beamforming and DoA Estimation, *Proc. The 19th Intelligent System Symposium (Fan 2009) and The 1st International Workshop on Aware Computing (IWAC09, Sep. 17-18, 2009)*, pp.674-678 (2009).
- [11] Zunyi Tang, Wenlong Liu and Shuxue Ding, An Invariant Pattern Recognition System Using the Bayesian Inference on Hierarchical Sequences with Pre-Processing, *Proc. Japan-China Joint Workshop on Frontier of Computer Science & Technology (FCST 2008, Nagasaki, Japan, Dec. 27-28, 2008)*, pp.208-213 (2008).
- [12] Takahiro Haneda and Shuxue Ding, A Robust Gradient-Descent Algorithm for On-Line Independent Component Analysis Based on Negentropy Maximization, *Proc. Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2008, IEEE sponsored, Nagoya, Japan, Sep. 17-21, 2008)*, pp. 870-875 (2008)
- [13] Wenlong Liu and Shuxue Ding, A “Decision and Re-solving” Beamformer for the PAM Communication System, *Proc. International Conference on Innovative Computing, Information and Control 2008 (ICICIC-08, IEEE sponsored, Dalian, China, Jun. 18-20, 2008)*, IEEE Computer Society, pp.352-355 (2008).

〔図書〕（計0件）

〔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

丁 数学 (Shuxue Ding)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：80372829

### (2) 研究分担者

奥山 祐市 (Yuichi Okuyama)

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：90404897

### (3) 連携研究者

アンジェイ チホツキ (Andrzej Cichocki)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター

研究者番号：40415071