

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300076

研究課題名(和文)一般化N次元スパースコーディングによる腹部の複数実質臓器統計ボリュームモデリング

研究課題名(英文)Generalized N-Dimensional Sparse Coding and Its Application to Computational Anatomy Models

研究代表者

陳 延偉 (CHEN, YAN WEI)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：60236841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、多くの情報を系統的に集め、情報の簡素化、要約を行う有効な手法としてスパースコーディングという手法が注目されている。本研究では、スパースコーディングを多重線形代数の枠組で拡張させ多次元データ解析に利用できる一般化N次元スパースコーディング法を理論的に開発し、その有効性を示した。また、従来のスパース性に加えて低ランク性を加えたSparse and Low Rank Matrix Decompositionを用いた臓器の局所統計形状モデリング法を提案し、肝硬変症の支援診断に応用し診断精度を95%まで向上させた。

研究成果の概要(英文)：Recently, sparse coding is a hot topic for efficient data representation, and has been widely used in computer vision field. In this project, we proposed a generalized ND sparse coding based on multi-linear algebra, for direct analysis of multi-dimensional data without unfolding process. Experiments results on noise reduction demonstrated that the proposed method can achieve better results compared with the conventional sparse coding. We also proposed a framework for local morphological analysis (local statistical shape models) of 3D organs based on sparse and low rank matrix decomposition and applied our proposed method to computer-aided diagnostics of liver cirrhosis. The local abnormal regions can be detected by estimating the sparse components. The norm of the sparse components can be used as a measure for classification of the normal and abnormal livers. The classification accuracy by our proposed method is improved to 95%.

研究分野：医用画像

キーワード：多重線形 腹部複数臓器 スパース Low-rank 局所解析 ボリューム 医用画像 テンプレートマッ
チング

1. 研究開始当初の背景

医用画像や天体プラズマ画像、リモートセンシング画像などは、空間情報だけではなく、時間情報やスペクトル情報などをもち、さらに、X線、プロトン、電子、ガンマ線など異なる透過性(モダリティ)情報をもつ。このような膨大な高次元データからいかに重要な情報(コアとなる情報)を見つけることは、データ解析またはデータマイニングにおいて重要な課題である。

多くの情報を系統的に集め、情報の簡素化、要約を行う有効な手法として主成分分析(PCA)や判別分析法(LDA)がよく知られている。近年、スパースコーディング[Olshausen and Field (1996)]という手法が注目されている。主成分分析などの統計解析手法と同様、個々の基底が観測データを構成する基本要素成分となるように学習することが目的となるが、結合係数のスパース性の制約により、観測データの中に混在する特徴的なパターンが個々の基底となって表出される特徴がある。音声や画像信号解析等の分野に用いられている。しかし、PCAやスパースコーディングなどの方法はすべて1次元の信号を対象としている。医用画像やハイパースペクトル画像のような多次元データを取り扱う場合、1次元ベクトルに展開する必要があるため計算コストや over fitting などの問題があり、空間固有な幾何学的な構造関係も無視されてしまう。

一方、近年欧米を中心に多視点・多照明顔画像のような多次元データに対し、1次元データに展開せず多重線形代数の枠組で、Tensor のままで取り扱う研究が盛んに研究されるようになってきている。2001年に多重線形SVD法が提案され[Lathauwer, 2001]、それに基づく多視点・多照明・多表情顔画像の解析法(Tensor Face法)が提案された[Vasilescu, 2002]。また、研究代表者はこれまで、多重線形代数を基礎とする、一般化N次元主成分分析法(GND-PCA)を開発し、少数サンプルから汎化能力の高い単一臓器(肝臓)の統計ボリュームモデルを作成することを可能にした[Xu and Chen, 2009]。一方、GND-PCAは医用ボリューム画像の統計モデリングと解析に有効であることを示してきたが、GND-PCAは高次特異値分解(High Order SVD)に基づいて行われたものである。N次元データ(Nth-order Tensor)は、コアテンソルと各モードの固有空間のテンソル積に分解される。そのコアテンソルは多次元データの特徴として用いられるが、大域的な特徴しかない。

2. 研究の目的

本研究では、以下の2点に焦点を絞り、研究を行って来た。

(1) 多重線形理論の枠組で開発した一般化N次元PCA[Xu and Chen, 2009]を発展させ、多次元データをいくつかのスパースなテンソル基底の線形結合として表現できる一般化N次元スパースコーディング法(GND-SC)を開発し、その有効性を示す。

(2) スパースな成分を推定することにより、局所解析を行えるので、病気に寄与する特異成分や病変の部位を推定する。

3. 研究の方法

(1) 一般化N次元スパースコーディング法(GND-SC)(K-CPDとも呼ぶ)

スパースコーディングを多重線形代数の枠組で拡張し、多次元データをいくつかのスパースなテンソル基底の線形結合として表現できる一般化N次元スパースコーディング法(GND-SC)(K-CPDとも呼ぶ)を理論的に開発した[Duan and Chen, 2012]。

$X \in R^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ をN次元データとし、M-th orderのテンソルとして表現する。 D_1, D_2, \dots はテンソル基底関数であり、 y_1, y_2, \dots はそれらの結合係数である。最適な基底Dは学習データ $X_i (i=1, 2, \dots, M)$ を用いて式(1)の評価関数の最小化により求めることができる。Mは学習データの数である。

$$E = \sum_{i=1}^M \left(\left\| X_i - \sum_{j=1}^J y_{ij} D_j \right\|_2^2 + \lambda \|y_{ij}\|_1 \right) \quad (1)$$

ここで、 $\| \cdot \|_2$ と $\| \cdot \|_1$ はそれぞれL2ノルムとL1ノルムである。式(1)右辺の第1項はGND-PCAに用いた評価関数であり、第2項のL1ノルム正則項は結合係数のスパース性を評価する項である。第2項の制約により、観測データの中に混在する特徴的なパターンが個々の基底となって表出される。式(1)の解析解が存在しないので、多重線形代数の枠組で式(1)解く必要がある。本研究では、Multilinear Orthogonal Matching Pursuit (MOMP)法とK-CPD(CANDECOMP/PARAFAC Decomposition)法をそれぞれ開発し、係数yとatom(テンソル基底)の学習を行う。その流れを図1に示す。

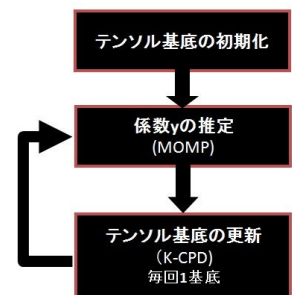


図1 MSMの流れ

Multilinear Orthogonal Matching Pursuit (MOMP)法

本研究では、従来のスパースコーディング法で良く用いられた Orthogonal Matching Pursuit (OMP)法[Mallat, 1993]を多重線形代数の枠組で、Multilinear Orthogonal

Matching Pursuit (MOMP)法に拡張し、テンソル基底 (Atom) が与えられた場合、式(1)コスト関数が最小となる係数ベクトル \mathbf{y} を求める (更新する)。OMP から MOMP への拡張を図 2 に示す。

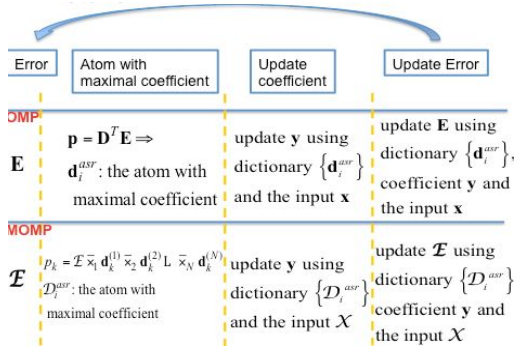


図 2 OMP から MOMP への拡張

. K-CPD (CANDECOMP/PARAFAC

Decomposition)

従来のスパースコーディング法では、基底学習法として K-SVD を用いていた。本研究では、多次元データに対して新たなテンソル基底学習 K-CPD (CANDECOMP/PARAFAC Decomposition) 法を提案する。K-CPD 手法において、 k 番目の基底テンソル(atom)を更新する場合、式(2)に示す残差テンソルを CP Decomposition 法 (CP モデルともいう) [Kolda, 2009] を用いてランク 1 テンソルを求め、 k 番目のテンソル基底を更新する。そのプロセスを $k=1$ から K まで繰り返し、1 番から K 番までのテンソル基底を更新していく。

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}_k \quad (2) \quad \hat{\mathbf{X}}_k = \sum_{i=1}^{k-1} y_i \mathbf{D}_i + \sum_{i=k+1}^K y_i \mathbf{D}_i \quad (3)$$

(2) スパースと低ランク行列分解法による局所肝臓形態解析

スパース性に低ランクという評価基準を加えた手法 (Sparse and Low Rank Matrix Decomposition) を用いて、観測画像を低ランク画像とスパース画像に分解することができる。推定された肝臓の三次元形状 \mathbf{x} のスパース成分を利用して、肝硬変症などによる局所形態変化を特定すると同時に、肝硬変症の支援診断を行う手法を開発した [Deng and Chen, 2014]。

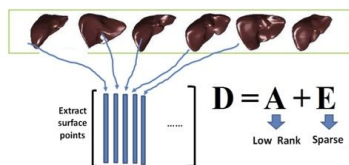


図 3 スパース成分推定による局所解析

図 3 のように解析対象となる肝臓形状ベクトルをそれぞれ $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n$ とし、肝臓形

状群を表す行列 $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n]^T$ すると、式(4)のようにスパースと低ランクという拘束条件のもと、低ランク行列 \mathbf{A} とスパース行列 \mathbf{E} に分解することができる。

$$\min_{\mathbf{A}, \mathbf{E}} \|\mathbf{A}\|_* + \lambda \|\mathbf{E}\|_1, \quad \text{subject to } \mathbf{D} = \mathbf{A} + \mathbf{E}$$

(4)

式(4)の第 1 項である $\|\cdot\|_*$ は nuclear norm であり、低ランク性を表す。第 2 項の 1 次 norm はスパース性を表す。分解された低ランク成分 \mathbf{A} は肝臓の共通形状 (正常形状と考えられる) を表し、スパース成分 \mathbf{E} は、ノイズやはずれ値などを表す成分であるが、肝臓の異常による形態の局所変形と考えられる。その局所変形を解析することによって異常部位の特定と、正常か異常かの分類 (支援診断) ができる。

4. 研究成果

(1) 一般化 N 次元スパースコーディング (K-CPD とも呼ぶ) の有効性

提案手法の有効性を検証するために、画像に含まれているノイズの除去に関する実験を行った [Duan and Chen, 2012]。また、比較実験として従来のスパースコーディング法 (K-SVD 法とも呼ぶ) と DCT を用いた実験も行った。ノイズ除去後の PSNR の比較結果を図 4 に示す。提案した一般化 N 次元スパースコーディング法 (K-CPD とも呼ぶ) が従来のスパースコーディング法 (K-SVD とも呼ぶ) や DCT 手法より優れている事がわかる。

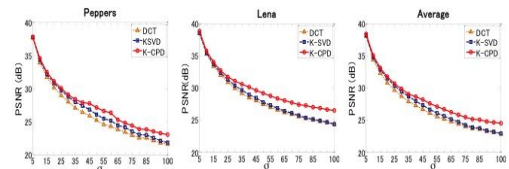


図 4 各手法の比較

(2) スパース成分推定による肝臓形態の局所解析

Sparse and Low Rank Matrix Decomposition 法を肝臓の局所形態変化に適用した。正常肝臓 30 症例、異常肝臓 30 症例の計 60 症例を解析に用いた。推定されたスパース成分を図 5 に示す。前半の 30 列は正常症例であり、後半の 30 列は異常症例である。図 5 に示すように正常肝臓の場合、スパース成分は殆ど 0 であるが、異常肝臓の場合、局所的に非ゼロスパース成分が存在していることがわかる。実際の肝臓形状におけるスパース成分の可視化例を図 6 に示す。肝硬変肝臓のスパース成分は殆ど左葉や右葉に集中していることがわかる。肝硬変症によって、

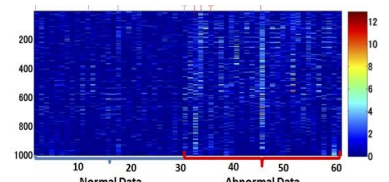


図 5 推定されたスパース成分

右葉の萎縮と左葉の腫大が臨床的に観測されているので、局所解析結果と一致する。また、異常肝臓のスパース成分が正常肝臓のスパース成分より非ゼロの数が多く、値も大きいので、スパース成分のノルムを肝硬変症の診断指標として利用できる。図7に正常肝臓と異常肝臓のL1ノルム(図7(a))とL2ノルム(図7(b))を示す。いずれのノルムにおいて、正常のノルムが小さく、異常のノルムが大きいことがわかる。適切な閾値を設定すれば、正常か異常かの診断支援ができる。識別率は95%もある。

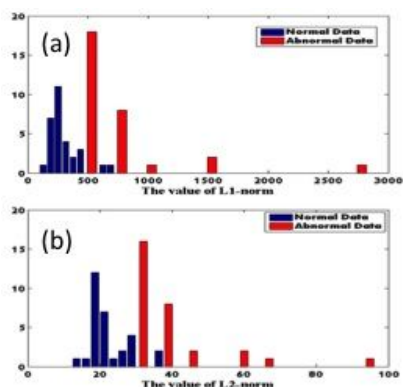


図7 正常と異常のL1ノルム値(a)とL2ノルム値(b)

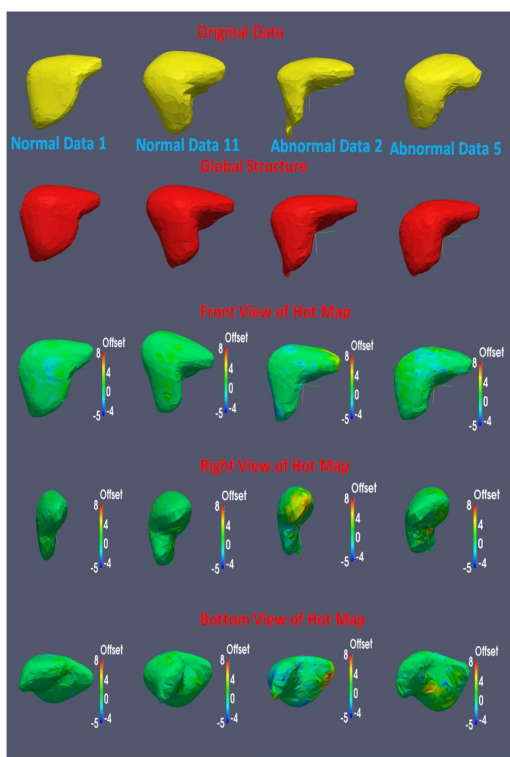


図6 肝臓形状におけるスパース成分の可視化

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17件)

[1]. J.P. Deng, X.-H. Han, Y.W. Chen, G. Xu. Y.

Sato, M. Hori, N. Tomiyama, “Sparse and Low-Rank Matrix Decomposition for Local Morphological Analysis to Diagnose Cirrhosis”, *IEICE transactions on information and systems*, vol. E97-D, No.12, pp.3210-3221, (2014) 査読有

[2]. Satoshi Yamauchi, Koji Satake, Yoshio Yamaji, Yen-Wei Chen and Hiromi Tanaka: “Three-Dimensional Semiautomatic Liver Segmentation Method for Non-Contrast Computed Tomography Based on a Correlation Map of Locoregional Histogram and Probabilistic Atlas,” *Computers in Biology and Medicine*, Vol.55, pp.79-85, (2014) 査読有

[3]. Amir H. Foruzan, Yen-Wei Chen, Masatoshi Hori, Yoshinobu Sato and Noriyuki Tomiyama, “Capturing Large Shape Variations of Liver Using Population-Based Statistical Shape Models,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol.9, No.6, pp.967-977 (2014.4) DOI 10.1007/s11548-014-1000-5 査読有

[4]. Yen-Wei Chen, Amir H. Foruzan, Chunhua Dong, Tomoko Tateyama and Xianhua Han, “Automatic Segmentation of Liver From CT Images Using Probabilistic Atlas and Template Matching,” *Smart Digital Futures 2014*, R. Neves-Silva et al. (Eds.) IOS Press, pp.412-420, (2014) DOI:10.3233/978-1-61499-405-3-412 査読有

[5]. Yen-Wei Chen, Jie Luo, Chunhua Dong, Xianhua Han, Tomoko Tateyama, Akira Furukawa, Shuzo Kanasaki, “Computer-Aided Diagnosis and Quantification of Cirrhotic Livers Based on Morphological Analysis and Machine Learning,” *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Volume 2013, Article ID 264809, 1-8 pages (2013) 査読有

[6]. Kaibori M, Chen YW, Matsui K, Ishizaki M, Tsuda T, Nakatake R, Sakaguchi T, Matsushima H, Miyawaki K, Shindo T, Tateyama T, Kwon AH, “Novel Liver Visualization and Surgical Simulation System,” *J Gastrointest Surg.* Vol.17, pp.1422-1428 (2013). 査読有

[7]. A. H. Foruzan, Y.-W. Chen et al., “Segmentation of Liver in Low-contrast Images Using K-Means Clustering and Geodesic Active Contour Algorithms,” *IEICE Trans.*, Vol.E96-D, pp.798-807 (2013). 査読有

[8]. Junping Deng, Xu Qiao and Yen-Wei Chen: “Statistical Texture Modeling for Medical Volume Using Linear Tensor

- Coding,” *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Volume 2013, Article ID 630902, 1-10 <http://dx.doi.org/10.1155/2013/630902> (2013) 査読有
- [9]. 健山智子, 海堀昌樹, 進藤 典, Amir Hossein Foruzan, 林正倫, 宮脇康介, 津田匠, 松井康輔, 權雅憲, 韓先花, 姜慧研, 陳延偉: “患者に特化した肝臓情報とその脈管分布可視化及び対話かつ直感的な手術支援システムの構築,” *Medical Imaging Technology*, Vol.31, No.3, pp.176-188, (2013) 査読有
- [10]. Guifang Duan, Hongcui Wang, Zhenyu Liu, Junping Deng and Yen-Wei Chen: “K-CPD: Learning of Overcomplete Dictionaries for Tensor Sparse Coding,” *Proc. of 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, pp.493-496 (2012) 査読有
- [11]. Xian-Hua Han and Yen-Wei Chen: “Multilinear Supervised Neighborhood Embedding of a Local Descriptor Tensor for Scene/object Recognition,” *IEEE Trans Image Process*, Vol.21, No.3, pp.1314-1326 (2012).DOI:10.1109/TIP.2011.2168417. 査読有
- 〔学会発表〕(計 49 件)
- [1]. 藤井亮馬, 健山智子, 草水之彦, 田中英俊, 上谷芽衣, Titinunt Kitrungrotsakul, 徐睿, 田中覚, 陳延偉, 「手術支援構築のためのハンスフリー対話による医用画像の可視化操作」, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 立命館大学, 滋賀県草津市, 2015 年 3 月 12 日.
- [2]. 健山智子, 上谷芽衣, 田中英俊, Kitrungrotsakul Titinunt, 林正倫, 古川顕, 金崎周造, 陳延偉, 「球面調和関数による医用画像からの腹部複数臓器形状モデリング」, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 立命館大学, 滋賀県草津市, 2015 年 3 月 11 日.
- [3]. Yuto Kondo, Xian-Hua Han, Xiong Wei and Yen-Wei Chen, “Two-step image hallucination and its application to 3D medical image super-resolution,” *2015 International Conference on Artificial Intelligence and Control Automation*, Phuket Island (Thailand), 2015.17.
- [4]. Chunhua Dong, Yen-Wei Chen, Amir H. Foruzan, Xian-Hua Han and Tomoko Tateyama, “Automatic Segmentation of Spleen based on Anatomical Model and Template Matching,” *2015 International Conference on Artificial Intelligence and Control Automation*, Phuket Island (Thailand), 2015.1.17.
- [5]. M. Uetani, T. Tateyama, S. Kohara, X.H. Han, A. Furukawa, S. Kanasaki, X. Wei and Y.-W. Chen, “Computer-aided Diagnosis of Liver Cirrhosis Based on Multiple Statistical Shape Models,” *2015 International Conference on Artificial Intelligence and Control Automation*, Phuket Island (Thailand), 2015.1.17.
- [6]. H. Tanaka, A. Shiino, T. Tateyama, X.H. Han, X. Wei and Y.-W. Chen, “Construction of probabilistic atlas and its application to detection of lacunar infarcts,” *2015 International Conference on Artificial Intelligence and Control Automation*, Phuket Island (Thailand), 2015.1.17.
- [7]. Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, “High-order Statistics of Weber Local Descriptors for Image Representation,” MPR2014, Beijing, (China), 2014.10.17
- [8]. Mei Uetani, Tomoko Tateyama, Shinya Kohara, Xian-hua Han, Akira Furukawa, Shuzo Kanasaki, Xiong Wei and Yen-Wei Chen, “Statistical Shape Models for Computer-Aided Diagnosis of Liver Cirrhosis,” MPR2014, Beijing, (China), 2014.10.16
- [9]. Junping Deng, Xianhua Han, Gang Xu, Yen-Wei Chen, “Sparse and Low Rank Matrix Decomposition Based Local Morphological Analysis and Its Application to Diagnosis of Cirrhosis Livers”, 22nd International Conference on Pattern Recognition”, Stockholm(Sweden), 2014, 8.27.
- [10]. Riko Kusumoto, Xian-Hua Han and Yen-Wei Chen, “Hybrid Aggregation of Sparse Coded Descriptors for Food Recognition”, 22nd International Conference on Pattern Recognition”, Stockholm(Sweden), 2014, 8.26.
- [11]. Yen-Wei Chen, Amir H. Foruzan, Chunhua Dong, Tomoko Tateyama and Xian-Hua Han, “Automatic Segmentation of Liver From CT Images Using Probabilistic Atlas and Template Matching”, *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services 2014*, Chania (Greece), 2014, 6, 20.
- [12]. Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, “Bayesian-based Saliency Model for Liver Tumor Enhancement”, *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services 2014*, Chania (Greece), 2014, 6, 20.

〔図書〕(計 2 件)

- [1]. Yen-Wei Chen, Lakhmi C. Jain (Eds):
Subspace Methods for Pattern Recognition in Intelligent Environment, Springer, 2014, 195
- [2]. Chien-wen Shen, Sy-Yen Kuo, Kae Dal Kwack, Yen-Wei Chen, Ping-Yu Hsu and Franz Ko (Eds), *Proceedings of 2012 International Conference on New Trends in Information Science, Service Science and Data Mining*, IEEE Press, 2012, 1-1500

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称：画像処理装置、画像処理方法、及びコンピュータプログラム

発明者：瀬尾昌孝、陳延偉

権利者：学校法人立命館

種類：特許

番号：2015 045984

出願年月日：2015 年 03 月 09 日

国内外の別：国内

名称：画像処理装置、画像処理方法、及びコンピュータプログラム

発明者：瀬尾昌孝、陳延偉

権利者：学校法人立命館

種類：特許

番号：2015 046071

出願年月日：2015 年 03 月 09 日

国内外の別：国内

6 . 研究組織

(1)研究代表者

- ・ 陳 延偉(CHEN, YAN WEI)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号：60236841

(2)研究分担者

- ・ 田中 弘美(Tanaka, T, Hiromi)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号：10268154
- ・ 韓 先花(Han, Xian-Hua)
立命館大学立命館グローバルイノベーション研究機構・准教授
研究者番号：60469195
- ・ 佐藤 嘉伸(Sato Yoshinobu)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：70243219
- ・ 古川 顕(Furukawa Akira)
首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
研究者番号：80199421
- ・ 森川 茂廣(Morikawa Shigehiro)
滋賀医科大学・医学部・教授
研究者番号：60220042
- ・ 健山 智子(Tateyama Tomoko)
立命館大学・情報理工学部・助手
研究者番号：90550153