

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420347

研究課題名(和文) 多次元信号復元のための事例に基づく非分離冗長重複変換の設計と実現

研究課題名(英文) Learning-Based Design and Implementation of Non-separable Oversampled Lapped Transforms for Multidimensional Signal Restoration

研究代表者

村松 正吾 (Muramatsu, Shogo)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：30295472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、冗長性、非分離性、重複性、対称性、局所性、タイト性を有する多次元変換を提案し、理論解析、設計、実現、および応用展開を行った。まず、既存の非分離重複直交変換を冗長構成に拡張し、その性質を明らかにした。また、事例に基づく学習設計法を提案し、有効性を示した。さらに、GPGPU/FPGA実装をとおして実時間処理の可能性を示した。他に、画像/ボリュームデータの復元処理に応用し提案法の有効性を確認した。複素画像復元処理への応用展開の準備として複素係数型への拡張も行った。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed a multidimensional transform with the redundant, non-separable, overlapped, symmetric, compact-supported and tight property. We also conducted the theoretical analysis, design, implementation, and application development. First, we extended the existing non-separable lapped orthogonal transform to redundant configuration and clarify its properties. As well, we proposed an example-based learning design method and showed its effectiveness. In addition, we showed the possibility of real-time processing through GPGPU/FPGA implementation. Besides, it was applied to image/volumetric data restoration and validity was confirmed. We also extended the proposed transform to complex coefficient type as preparation for application development to complex image restoration processing.

研究分野：信号処理

キーワード：冗長変換 スペース表現 ボリュームデータ復元 辞書学習 GPGPU実装 確率的勾配降下法 タイトフレーム 画像処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 非分離変換について

静止画像符号化方式 JPEG や JPEG2000 で採用されている離散コサイン変換 (DCT) や離散ウェーブレット変換 (DWT) は、水平方向と垂直方向を分離して、または分離したものと等価な処理を行う。この様な可分離変換は、視覚的に重要な斜めエッジや斜めテクスチャに対して変換係数を分散させ、画像近似表現の品質向上を妨げてしまう。この限界を超えるべく、2000 年以降、ウェーブレット解析を進展させたスパース表現が注目され、その実現手段として非分離変換の研究が盛んに行われた。我々も対称性、重複性、直交性、局在性を有する指向性重複直交変換 (DirLOT) などを提案し、画像復元応用をとおしてその有効性を確認していた [1, 2]。

(2) 冗長変換について

また、変換係数を原画像の画素数よりも多く与える冗長変換も同時に注目されていた。冗長変換は、画像表現に無数の解を与えることから、最適化技術との組み合わせにより、より良いスパース表現を与えることが知られている。我々も、先の DirLOT の混成構成などの冗長化を行い、その有効性を確認していた。しかしながら、この様な冗長変換の構築法は、冗長度が整数倍に限られ、2 倍以上に設定する必要があった。この特徴は省メモリ実現が望まれる組み込み機器や並列処理への応用の妨げとなっていた。

(3) 非分離冗長重複変換 (NSOLT) の提案

そこで、我々は、帯域分割数 P と間引き率 M で冗長度 $R = P/M \geq 1$ を任意の有理数倍に設定できる多次元フィルタバンクの一実現法、非分離冗長重複変換 (NSOLT) を提案した。NSOLT は、対称性、重複性、局在性を同時に満たすほか、画像内の斜め成分に適した指向性を有することができる。さらに、パーセバルタイト性を構造的に課すことができ、ツリー構成にも容易に適用できた。

(4) 非分離冗長重複変換 (NSOLT) の課題

しかしながら、研究開始当初においては、NSOLT の設計仕様の与え方や最適化手法の検討が不十分であった。また、実時間実現や高次元信号処理への拡張の課題も残されていた。

(5) 他の類似手法

冗長変換 (辞書) の設計手法として K-SVD など事例に基づく辞書学習法が提案されていた。K-SVD は、教師画像のパッチ群に対してスパース表現に適した要素画像 (アトム) を選択、更新を繰り返して辞書を設計する [3]。この手法は構造的な制約が少なく、事例に対する優れた辞書を設計できる。一方、設計パラメータ数が多いほか、重複性、対称性、タイト性、ツリー構成の実現などに課題があった。

2. 研究の目的

1. で述べた課題を明らかにする必要があった。そこで本研究では、事例に基づく辞書学習の考えを NSOLT の設計に導入することを目的とした。NSOLT はラティス構成により与えられる。この構成を辞書の構造的制約として利用し、辞書を学習設計し、その有効性を確認することとした。また、高速実現や画像復元応用の品質も評価することとした。

NSOLT の設計と実現、応用に関して本研究で明らかにしようとした内容を以下にまとめる。

- 事例に基づく効果的な設計法
- 高速実現法とその処理性能
- 画像およびボリュームデータ復元性能

(1) NSOLT の設計に関しては、典型的な辞書学習法において必要となるスパース近似ステップと辞書更新ステップの効果的かつ効率的な実現が課題となった。適切な目的関数の設定と最適化手法の選定が必要となったため、本研究ではこれら課題の解決を目的とした。

(2) NSOLT の実現に関しては、FPGA 上および GPGPU 上での効率的な実装が課題となった。NSOLT とその実装対象となるプラットフォームの特徴を活かした高速実現法の開発およびそれらの性能を明らかにすることを目的とした。

(3) NSOLT の応用に関しては、画像復元に適用した際の性能を明らかにすることとした。適切なスパース正則化の設定と復元アルゴリズムの選定、および実画像、実ボリュームデータを利用した性能評価を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、2. で述べた目的を達成するために、NSOLT の設計と実現、画像復元応用の評価を行った。NSOLT の事例に基づく設計法を提案し、実時間実現のための FPGA 転置バッファ実装および周波数領域高並列 GPGPU 実装を行った。また、NSOLT を画像および三次元ボリュームデータの復元処理に適用した。

(1) NSOLT の設計については、任意の次元数でラティス構成が導出できることを理論的に説明した。また、事例に基づく学習法を提案した。図 1 に事例に基づく学習設計の概要を示す。図中の \mathbf{x}_i は学習用の事例画像、 \mathbf{y}_i は変換係数ベクトル、 Θ は設計パラメータ、 \mathbf{D}_0 はパラメータ Θ で特徴づけられる NSOLT 辞書、 $\hat{\mathbf{D}}$ は結果として得られる NSOLT 辞書を示す。スパース近似ステップでは辞書 \mathbf{D}_0 を固定し、少ない非零係数で事例画像 \mathbf{x}_i を近似し、その誤差が小さくなるよう変換係数 \mathbf{y}_i の最適化を行う。本研究では、繰返しハード閾値 (IHT) アルゴリズムを採用した。また、辞書更新ステップで

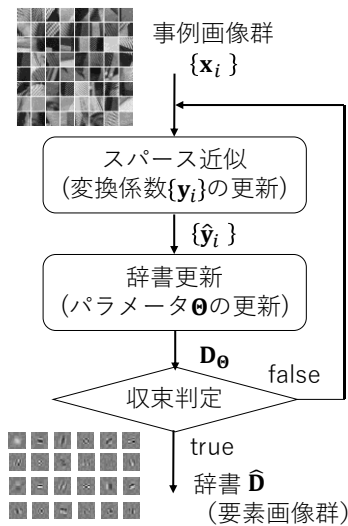


図1 事例に基づく辞書学習の概要

は変換係数 \hat{y}_i を固定して NSOLT ラティス構成による構造的制約の下、事例画像とスパース近似画像の誤差が最小となるように D_θ の設計パラメータを最適化する。本研究では、まず、遺伝的アルゴリズムと準ニュートン法の組合せで最適化を行った。次に、目的関数の解析的勾配を導出し、確率的勾配降下法との併用で設計を効率化した。MathWorks 社の数値シミュレーターMATLAB を利用し、設計アルゴリズムの実装と性能評価を行った。

(2) NSOLT の実現については、FPGA 実装とGPGPU 実装の二つの方法で高速化を検討した。図2に NSOLT のラティス構成の一例を示す。要素画像(アトム)が非分離でありながら、ポリフェーズ領域で水平と垂直の処理に分けられる特徴をもつ。このことから、FPGA 実装においてはメモリアクセスを減らすために転置バッファを利用する構成を提案した。また、GPGPU 実装においては、要素画像群による畳込み演算を周波数領域表現へと変換し、高速フーリエ変換(FFT)と周波数積による高並列実装を行った。FPGA、GPGPU 共に速度等による性能評価を行った。

(3) NSOLT の応用については、画像および三次元ボリュームデータを対象とした画像復元を行った。画像復元として、ノイズ除去、ボケ除去、欠損修復、超解像を行った。図3に画像復元モデルの一例を示す。線形観測過程 P と加法性白色ガウスノイズ w により劣化を受けた観測画像 x から未知の原画像 u を推定する問題を扱った。スパース制約の下、原画像 u を与える変換係数 y を推定する問題に帰着させた。事例に基づく学習設計で得られた NSOLT を辞書 D として利用し、繰り返しソフト閾値(IST)アルゴリズムを最適化アルゴリズムとして採用し、復元処理とその性能評価を行った。

4. 研究成果

本研究では、3. で述べた方法により、NSOLT の設計、実現、画像復元応用の提案とこれらの性能評価を行った。研究成果については、適宜、国内外にて成果発表を行った。また、設計および実現のプログラムを一部公開し、多次元信号・画像処理の発展に貢献した。

(1) 設計

図1に示す辞書学習法により設計した NSOLT の要素画像群の例を図4に示す。NSOLT の設計法については、学術論文 "Multidimensional Nonseparable Oversampled Lapped Transforms: Theory and Design," IEEE Trans. on Signal Process. として [雑誌論文①] にまとめている。一部の条件で設計を効率化した手法についても [学会発表⑥] [学会発表⑩] として国内外で発表した。結果として、高性能な辞書設計が可能となった。図4は、目的関数の解析的勾配と確率的勾配降下法を利用した設計例で、標準画像 *barbara* を事例としている。

(2) 実現

図5に GPGPU 上での NSOLT のラティス構成 (Lattice) と周波数領域並列構成 (PFB) の処理速度比較の一例を示す [学会発表④]。入力データの総数の増加に応じて PFB の方が Lattice よりも速度が向上する様子を確認で

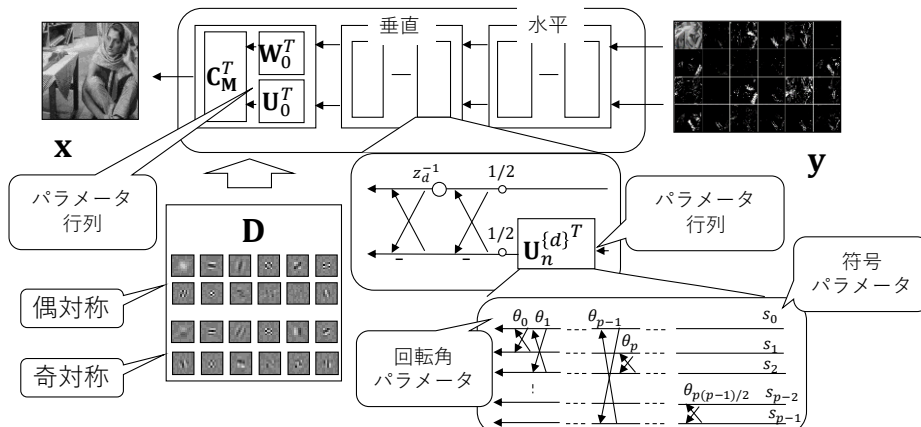


図2 NSOLT のラティス構成 ($x = Dy$)

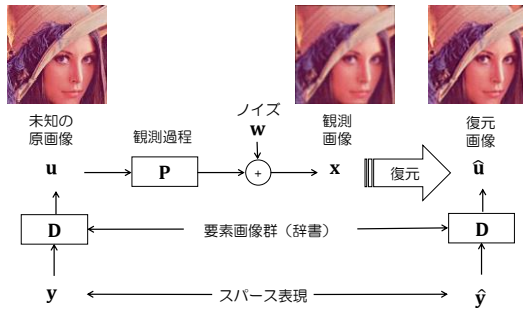


図3 画像復元モデルの例

$$(\hat{y} = \arg \min_y \frac{1}{2} \|x - PDy\|_2^2 + \lambda \|y\|_1)$$

きた。FPGA 実装に関しては、ITC-CSCC2016 など国内外で学会発表を行った [学会発表⑧]。

(3) 応用

辞書学習設計により得られた NSOLT の有効性を確認するため、同変換をノイズ除去、ボケ除去、超解像、画像修復など画像復元処理に適用した。古典的手法や非間引きハール変換との比較をとおして提案法の有効性を確認した。図6に NSOLT と IST によるボケ除去の例を示す。NSOLT を利用した3次元ボリューム復元応用についても、信号処理シンポジウムや APSIPA ASC2015 など国内外の学会にて成果発表を行った [学会発表⑩]。

(4) 展開

本研究により、NSOLT の設計、実現、応用の発展に一定の成果を得ることができた。なお、ツリー構成の効率的設計法や大きなサイズのデータに対する分割処理、ストリーミング実装、最適化アルゴリズムの洗練化など現時点でも多く課題が残る。今後は、テキストチャ分析や三次元ボリュームデータ復元の実応用へと展開するほか、ミリ波レーダ画像のような複素画像を対象とする複素係数 NSOLT の設計、



図4 12×12画素の24種の要素画像群。画像 *barbara* に対して学習。[学会発表⑥] Fig.3 より抜粋。© 2016 IEEE. Reprinted, with permission, from S. Muramatsu, M. Ishii and Z. Chen, "Efficient parameter optimization for example-based design of nonseparable oversampled lapped transform," 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Phoenix, AZ, 2016, pp. 3618-3622. doi: 10.1109/ICIP.2016.7533034

実現、応用に展開する予定である。

(5) 国内外における位置づけとインパクト

非分離性、重複性、対称性、局所性、タイト性を有する多次元冗長変換は他に例がない。国内外において、本研究が唯一の成果である。本研究で扱う画像のスパース表現は、復元処理や特徴抽出において有効に利用される。一部の最適化アルゴリズムでは、タイト性が計算を簡便にする利点がある。

本研究の基盤となる [雑誌論文①] は、信号処理分野において最も権威のある学術誌 IEEE Trans. on Signal Process. に掲載された。IEEE Xplore によれば、2016年11月の公開から現時点まで、200件を超える PDF ダウンロード数が認められる。NSOLT の複素数拡張についても、画像処理分野において権威のある国際会議 ICIP2017 に採択された。これらの事から、本研究プロジェクト全体の成果は、国内外において先端かつ有益な内容であり、画像処理分野の発展に貢献できたといえる。

(6) 今後の展望

提案法である NSOLT は、画像復元にとって望ましい性質を有する唯一無二の変換である。

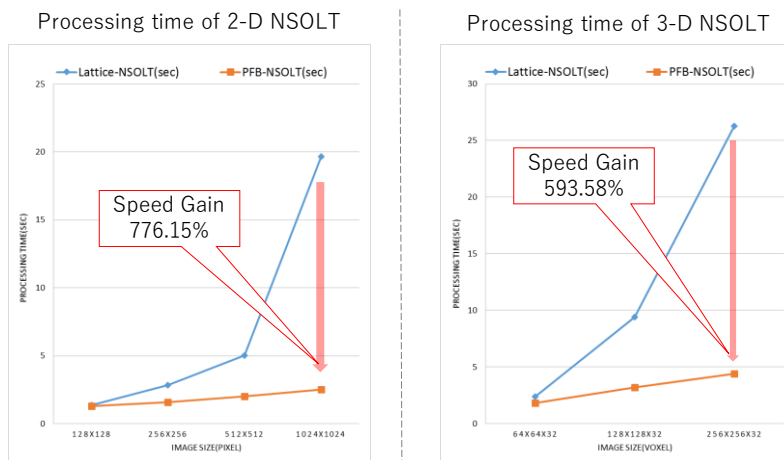


図5 GPGPU(NVIDIA Tesla C 2075)上でのラティス構成 (Lattice)NSOLT と周波数領域並列構成(PFB)NSOLT の速度比較。左は二次元変換、右は三次元変換 [学会発表④]。



(a) 原画像



(b) 観測画像

PSNR: 23.84 dB



(c) 復元画像

PSNR: 27.21 dB

図6 NSOLTとISTによるボケ除去の例

提案変換は柔軟な構成を持つため、状況に応じた設定が可能で、三次元以上の多次元拡張も可能である。なお、非線形拡張やランダム性、時系列性の仮定も重要な課題である。NSOLTの畳込みニューラルネットワーク(CNN)との類似性も興味深い。認識応用についても検討をすすめ、CNNと比べた際の構造的制約の意義を明らかにすることや確率的な解析、時系列データの扱いも重要な課題である。

<引用文献>

- [1] S. Muramatsu, D. Han, T. Kobayashi and H. Kikuchi, Directional Lapped Orthogonal Transform: Theory and Design, in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, no. 5, pp. 2434-2448, May 2012. doi: 10.1109/TIP.2011.2182055
- [2] N. Aizawa, S. Muramatsu and M. Yukawa, Image Restoration with Multiple DirLOTs, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, vol. E96.A, pp. 1954, 2013, doi: 10.1587/transfun.E96.A.1954
- [3] R. Rubinstein, M. Zibulevsky and M. Elad, "Double Sparsity: Learning Sparse Dictionaries for Sparse Signal Approximation," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 3, pp. 1553-1564, March 2010. doi: 10.1109/TSP.2009.2036477

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Shogo Muramatsu, Kosuke Furuya and Naotaka Yuki: Multidimensional

Nonseparable Oversampled Lapped Transforms: Theory and Design, IEEE Trans. on Signal Process., Vol. 65, No. 5, pp. 1251-1264, DOI: 10.1109/TSP.2016.2633240, March 2017, 査読有

- ② Kosuke Furuya, Shintaro Hara, Kenta Seino and Shogo Muramatsu: Boundary Operation of 2-D Non-separable Oversampled Lapped Transforms, APSIPA Trans. on Signal and Information Process., Vol. 5, pp. 1-9, DOI: 10.1017/ATSIP.2016.3, April 2016, 査読有
- ③ Chen Zhiyu and Shogo Muramatsu: Multi-focus Image Fusion based on Multiple Directional LOTs, IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E98-A, No. 11, pp. 2360-2365, DOI: 10.1587/transfun.E98.A.2360, Nov. 2015, 査読有
- ④ Chen Zhiyu and Shogo Muramatsu: SURE-LET Poisson Denoising with Multiple Directional LOTs, IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E98-A, No. 8, pp. 1820-1828, DOI: 10.1587/transfun.E98.A.1820, Aug. 2015, 査読有
- ⑤ 村松 正吾: 冗長変換とその画像復元応用 日本画像学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 290-300, DOI: 10.11370/isj.53.290, 2014年8月, 査読有

[学会発表] (計25件)

- ① Genki Fujii and Shogo Muramatsu: Adaptive Learning Rate Control for Nonseparable Oversampled Lapped Transform Design, Proc. of ITC-CSCC, 3 July 2017, Busan (Korea), 査読有
- ② 藤井 元暉, 村松 正吾: 確率的勾配降下法による非分離冗長重複変換設計の学習率制御の検討, 信学技報, 信号処理, 名工大(名古屋), 2017年5月26日, 査読無
- ③ 長山 知司, 村松 正吾, 山田 寛喜, 杉山 裕一: 複素非分離冗長重複変換を用いたレーダ画像ノイズ除去の検討, 信学技報, 信号処理, 2017年3月1日, 沖縄産業支援センター(那覇), 査読無
- ④ Kota Horiuchi and Shogo Muramatsu: Fast Convolution Technique for Non-separable Oversampled Lapped Transforms, Proc. of APSIPA Annual Summit and Conf., Jeju (Korea), 15 Dec. 2016, 査読有
- ⑤ 今井 啓太, 村松 正吾: 重複加算法による非分離冗長重複変換の組み込み実装, 電子情報通信学会信越支部大会, 長岡技科大(長岡), 2016年10月8日, 査読無
- ⑥ Shogo Muramatsu, Masaki Ishii and Zhiyu Chen: Efficient Parameter

- Optimization for Example-based Design of Nonseparable Oversampled Lapped Transform, Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Process., pp.3618-3622, Phoenix (USA), 28 Sep. 2016, 査読有
- ⑦ 長山 知司, 村松 正吾: 複素非分離冗長重複変換の設計, 信学技報, 信号処理, 千葉工大 (習志野), 2016年8月26日, 査読無
- ⑧ Keita Imai and Shogo Muramatsu: Embedded Implementation Model of 2-D Non-separable Oversampled Lapped Transforms for Video Processing, Proc. of ITC-CSCC, Okinawa Pref. Municipal Center (Naha), 11 July 2016, 査読有
- ⑨ Zhiyu Chen and Shogo Muramatsu: Multi-focus Pixel-based Image Fusion in Dual Domain, Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Process., pp.1736-1740, Shanghai (China), 24 Mar. 2016, 査読有
- ⑩ Shogo Muramatsu, Samuel Choi and Takumi Kawamura: 3-D OCT Data Denoising with Non-separable Oversampled Lapped Transform, Proc. of APSIPA Annual Summit and Conf., pp.901-906, Hong Kong (China), 17 Dec. 2015, 査読有
- ⑪ 村松 正吾, 石井 雅基: 非分離冗長重複変換の事例学習設計における効果的辞書更新, 第30回信号処理シンポジウム, スパリゾートハワイアンズ (いわき), 2015年11月4日, 査読無
- ⑫ 堀内 洸汰, 村松 正吾: 多次元非分離冗長重複変換のFFT領域並列高速化, 第30回信号処理シンポジウム, スパリゾートハワイアンズ (いわき), 2015年11月4日, 査読無
- ⑬ 押木 友裕, 村松 正吾, 鈴木 孝昌, 村田 光由, 追立 俊朗: ピンホールカメラを用いた平板金属加工検査システムのための学習辞書による画像ボケ除去, 第30回信号処理シンポジウム, スパリゾートハワイアンズ (いわき), 2015年11月4日, 査読無
- ⑭ 押木友裕, 村松 正吾, 鈴木孝昌, 村田 光由, 追立俊朗: ピンホールカメラを用いた平板金属加工検査システムとボケ除去に関する検討, 電子情報通信学会信越支部大会, 新潟工大 (柏崎), 2015年10月3日, 査読無
- ⑮ 川村拓海, 村松 正吾, 崔森悦: 部分的間引き非分離冗長重複変換によるOCTデータノイズ除去, 電子情報通信学会信越支部大会, 新潟工大 (柏崎), 2015年10月3日, 査読無
- ⑯ 堀内洸汰, 村松 正吾: 周波数領域実装による非分離冗長重複変換の並列高速化, 電子情報通信学会信越支部大会, 新潟工大 (柏崎), 2015年10月3日, 査読無
- ⑰ 川村 拓海, 若杉 翔, 陳 智雨, 村松 正吾, 崔 森悦: 三次元OCTデータノイズ除去への非分離冗長重複変換応用の検討, 信学技報, 信号処理, 三重大学 (津), 2015年5月15日, 査読無
- ⑱ 若杉 翔, 村松 正吾: MSISTに基づく非分離冗長重複変換を利用した画像復元, 信学技報, 信号処理, ホテルミヤヒラ (石垣), 2015年3月3日, 査読無
- ⑲ 情野 健太, 古屋 幸祐, 村松 正吾: 非分離冗長重複変換のHW/SW協調実装における演算精度の検討, 信学技報, 信号処理, ホテルミヤヒラ (石垣), 2015年3月3日, 査読無
- ⑳ Kenta Seino, Kosuke Furuya, Shogo Muramatsu: "Transposition-based Architecture of 2-D Non-separable Oversampled Lapped Transforms, Proc. of APSIPA Annual Summit and Conf., Siem Reap (Cambodia), 10 Dec. 2014, 査読有
- ㉑ 村松 正吾, 古屋 幸祐, 結城 尚貴: ボリュームデータスパース表現のための三次元非分離冗長重複変換, 第29回SIPシンポジウム, pp.1-6, ビナリオ嵯峨嵐山 (京都), 2014年11月11日, 査読無
- ㉒ 金 昌吉, 村松 正吾: 事例学習による非分離冗長重複変換を利用した画像ノイズ除去, 電子情報通信学会信越支部大会, 信州大 (長野), 2014年10月4日, 査読無
- ㉓ 結城 尚貴, 金 昌吉, 村松 正吾: 非分離冗長重複変換を利用した顔画像に基づく辞書学習, 映メ技報, メディア工学, 岩松旅館 (仙台), 2014年8月20日, 査読無
- ㉔ 古屋 幸祐, 情野 健太, 村松 正吾: 組込みビジョンに向けた非分離冗長重複変換の実装に関する検討, サマーセミナー2014, 岩松旅館, 映メ技報, メディア工学, 岩松旅館 (仙台), 2014年8月20日, 査読無
- ㉕ Shogo Muramatsu: "Structured Dictionary Learning with 2-D Non-separable Oversampled Lapped Transform," Proc. of 2014 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Process., Florence (Italy), pp.2643-2647, 7 May 2014, 査読有
- [その他]
ホームページ等
- ① 非分離冗長重複変換 HP
<http://msiplab.eng.niigata-u.ac.jp/projects/imagetransform>
- ② MathWorks社 SaivDr Package HP
<http://www.mathworks.co.jp/matlabcentral/fileexchange/45084-saivdr-package>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村松 正吾 (MURAMATSU, Shogo)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 30295472