

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400199

研究課題名(和文) N分木離散ウェーブレット変換とスパース表現を用いた信号源分離

研究課題名(英文) Source separation using N-tree discrete wavelet transform and sparse representation

研究代表者

守本 晃 (MORIMOTO, Akira)

大阪教育大学・教育学部・教授

研究者番号：50239688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：N分木離散ウェーブレット変換を定義し、変換・逆変換および前処理・後処理のアルゴリズムを開発した。双直交ウェーブレット関数など実装できるウェーブレットの種類を増やした。N重の冗長性を持つ変換の利点を生かし、画像・音声の電子透かしを埋め込めることを確認した。この変換が音声・画像分離問題の解法に使えることを示した。回転と平行移動を伴った元画像の重ね合わせを分離する問題を考え、回転角度の推定方法のアイデアを提案した。

研究成果の概要(英文)：We proposed an N-tree discrete wavelet transform. We implemented the transform and its inversion algorithm with many types of wavelet functions such as biorthogonal wavelets. We designed a preprocessor and a postprocessor of the transform. Using the advantages of N times redundancy, we applied it to digital watermarking to sounds or images. We showed that the transform can be used to solve blind source separation problems of sounds or images. We proposed ideas to estimate the rotation angles of some original image from mixtures of rotated and translated original images.

研究分野：応用数学 ウェーブレット解析

キーワード：信号源分離 ウェーブレット N分木離散ウェーブレット変換 分数べきヒルベルト変換 時間スケール解析 双直交ウェーブレット 画像分離 スパース表現

### 1. 研究開始当初の背景

(1) パーティ会場では、いろいろな話し声や音楽や食器の音などの様々な音声信号が混在している。そのような複雑に重なり合った音の中から、我々は特定の音声信号のみを選択的に聞き分けることができる。この聴覚上の能力は、1953年に実験心理学者の C. Cherry によりカクテルパーティ効果と名付けられた。工学的には、複数のセンサーでとらえた観測信号から元信号を推定する逆問題であり、ブラインド信号源分離問題とよばれている。ブラインド信号源分離問題を解くための優れた道具として独立成分分析がある。我々は、独立成分分析を使わずに、ウェーブレット解析を用いてこの問題に対処することにより、ウェーブレットについての新たな知見を得ることを目的に研究を続けている(論文⑬、⑭など)。

(2) 前回の科研費(C) 23540135では、画像分離問題に焦点を当てて、図1のような元画像の平行移動を伴った重ね合わせを観測し、それらを図2のように分離する問題の解法を通して、ウェーブレット解析を眺め、連続マルチウェーブレット変換などを提案した(論文⑫など)。

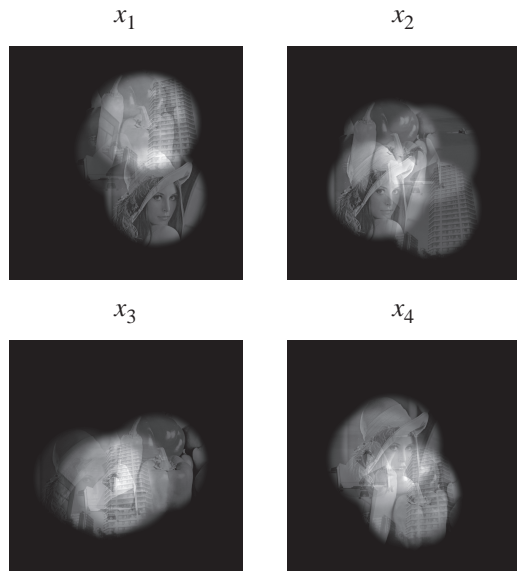


図1: 観測画像

(3) 同時に、論文⑨にまとめた、正規直交ウェーブレット関数の分数べきヒルベルト変換を自然に生成する正規直交スケーリング関数の理論を研究していた。この結果を離散ウェーブレット変換に応用すると、論文⑩でまとめた、 $N$ 分木離散ウェーブレット変

換・逆変換を構成することができ、それを画像の電子透かし等に応用した。

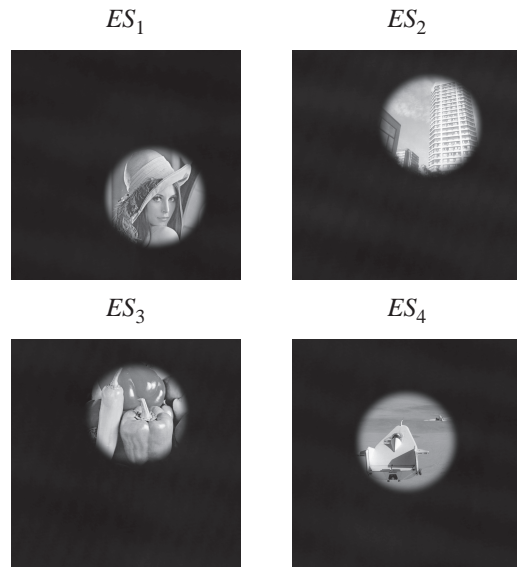


図2: 分離画像

### 2. 研究の目的

$N$ 分木離散ウェーブレット変換・逆変換を信号源分離問題の解法に使ってみて、性能評価・改善点などを調べることが研究目的である。3年の研究期間内に明らかにすることとして、次の3点を設定した。

(i) Meyer 以外のウェーブレット関数(双直交ウェーブレット関数など)を用いた  $N$ 分木離散ウェーブレット変換・逆変換のアルゴリズムおよびプログラムを完成させる。必要ならば、前処理・後処理を設計する。ノイズ除去・特徴抽出・電子透かしなどに応用し性能を他の方法と比較する。

(ii) 音声信号・画像の分離問題に適した  $N$ 分木離散ウェーブレット変換(正規直交または双直交ウェーブレット関数)を探し、それを用いて混合モデルの各パラメータを推定する。

(iii) 解析に適したウェーブレット関数が複数種類見つければ、フレームに対するスパース表現を応用し、観測信号の数が信号源の数より少ない場合の信号源分離問題に手を付ける。

### 3. 研究の方法

研究代表者の守本晃は分担者の総括を行う。この研究は応用(数値実験)とそれを支える理論の二つに大別できる。応用は守本晃が責任者となって分担し、 $N$ 分木離散ウェーブレット変換・逆変換の MATLAB ツールボックス化を行う。理論はウェーブレット解析を

専門としている芦野隆一が責任者となって担当し、連携研究者の萬代武史がそれを補佐する。応用と理論を相互にフィードバックさせて、信号源分離問題を解くアルゴリズムに必要なアイデア、 $N$  分木離散ウェーブレット変換による空間スケール解析の特徴を明らかにすることにより、ウェーブレット解析についての新たな知見を得る。

#### 4. 研究成果

(1) 研究の目的 (i) に関する成果は以下の通りである。正規直交ウェーブレット関数の分数べきヒルベルト変換を自然に生成する正規直交スケーリング関数の理論は論文 ⑨ であり、論文 ⑭, ⑮ および発表 [8], [11] ではその対応を双直交ウェーブレット関数にまで広げた。それらを元に、 $N$  分木離散ウェーブレット変換・逆変換を構成し、論文 ⑩ と発表 [9], [10] で提案した。数値計算言語 MATLAB に、Cohen-Daubechies-Feauveau (CDF) 双直交ウェーブレット関数で分解・再構成のそれぞれのウェーブレット関数が近い概形を持つものを CDF 6 から CDF 50 まで追加し、それらを用いる  $N$  分木離散ウェーブレット変換・逆変換を組み込んだ。 $N$  分木離散ウェーブレット変換は信号を  $N$  重に観察するために、 $N$  重にする前処理とそれらを元の信号に戻すための後処理が必要であり、1 次元信号と 2 次元画像の場合に前処理・後処理を作成した。信号を  $N$  重に処理するために発生する冗長性を利用して、画像や音声に電子透かしを埋め込むことができることを確認した (論文 ⑤, ⑥ および発表 [4], [5])。

(2) 研究の目的 (ii) に関する成果は以下の通りである。 $N$  分木離散ウェーブレット変換は、信号を近似とよぶ低周波数成分と詳細とよぶ高周波数成分の 2 成分に分けることができる。近似と詳細はシフト不変 (時不変) に近い性質を持つので、時間遅れを含む音声信号を分離する問題や平行移動を含む元画像の重ね合わせを分離する問題に適用できる。平行移動を含む画像分離問題に対する成果を、論文 ①, ③, ⑦ および 発表 [3], [6], [7] で報告した。また、平行移動を含まない画像分離問題に対しては論文 ⑯ で提案したガウスの消去法を用いる「マルチステージ・ブラインド信号源分離法」でも使えることを確認した (発表 [3])。

(3) 研究の目的 (iii) に付いては、以下の理由で良い結果が得られなかった。画像分離問題で、前回の科研費 (C) 23540135 で行った、周波数空間で円環を動径方向に自由に刻める円環分割マルチウェーブレット変換を用いた場合と、研究成果 (2) の周波数空間をオクターブ (2 倍) 毎に分解するだけである  $N$  分木離散ウェーブレット変換を用いた場合を比較すると、 $N$  分木離散ウェーブレット変換を用いた場合はより少数の元画像の重ね合わせしか分離できなかった。つまり、信号源分離問題に用いるには周波数解像度が悪すぎるということが判明した。同じ理由に加えて、 $N$  倍冗長な変換なので、スパース表現も巧くできなかった。

(4) 最終年度には、図 3 のような、回転・平行移動を加えた元画像の重ね合わせを分離する画像分離問題について考察し、発表 [1], [2] で回転角度を求める方法についてのアイデアを提案した。

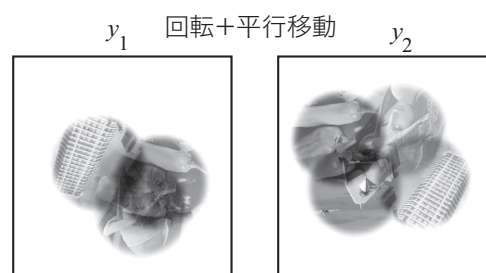


図 3: 回転・平行移動入りの観測画像

(5) その他の研究成果として、流通経済大学の井川信子教授と行った、他覚的聴覚検査に関する共同研究がある。他覚的聴覚検査とは、聞こえているかどうかを音刺激後の脳波を用いて判定する方法で、意思表示のできない乳幼児に対してや詐称を防ぐために行われる検査方法である。背景雑音から脳波を浮かび上がらせるために、2000 回位の音刺激後脳波の平均を取る必要から検査時間がかかる。我々は、CDF 双直交ウェーブレットによる定常ウェーブレット変換を使い、他覚的聴覚検査を高速化する研究を行った。論文 ②, ④, ⑧, ⑭ がその成果である。

(6) 以下の研究集会の開催補助費として用いた。統計数理研究所・数学協働プログラム・ワークショップ「ウェーブレット理論と工学への応用」を平成 26, 27, 28 年に大阪教育大学天王寺キャンパスで開催した。予稿集は、<https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/>

~morimoto/WSPRO/index.html からダウンロードできる。国際会議 Information 2015 で Special Workshop on Applicable Mathematics と国際会議 ISAAC 2015 で OS 21: WAVELET THEORY AND ITS RELATED TOPICS をオーガナイズした。日本応用数理学会ウェブサイト研究部会セミナーを 6 回開催した。 <https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~morimoto/seminar-wavelet/WS.html>

#### 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 ( 30 ) 件

① R. Ashino, T. Mandai, and A. Morimoto, Image Source Separation Based on  $N$ -tree Discrete Wavelet Transforms, in New Trends in Analysis and Interdisciplinary Applications, Selected Contributions of the tenth ISAAC Congress, Macau 2015, P. Dang, M. Ku, T. Qian, L.G. Rodino (Eds.), Birkhauser Mathematics, 査読有, 2017, 595–601.

DOI:10.1007/978-3-319-48812-7\_75

② N. Ikawa, A. Morimoto, and R. Ashino, A Model of Relationship Between Waveform-Averaging and Slow Auditory Brainstem Response by Using Discrete Stationary Wavelet Analysis, in New Trends in Analysis and Interdisciplinary Applications, Selected Contributions of the 10th ISAAC Congress, Macau 2015, P. Dang, M. Ku, T. Qian, L.G. Rodino (Eds.), Birkhauser Mathematics, 査読有, 2017, 581–587.

DOI:10.1007/978-3-319-48812-7\_73

③ R. Ashino, T. Mandai, and A. Morimoto, Continuous Multiwavelet Transform for Blind Signal Separation, In Pseudo-Differential Operators: Groups, Geometry and Application, M.W. Wong and H. Zhu (Eds.), Springer International Publishing AG, 査読有, 2017, 219–239.

DOI:10.1007/978-3-319-47512-7\_12

④ N. Ikawa, A. Morimoto, and R. Ashino, Optimum wavelet filter estimating peak latencies of auditory brainstem response waveform, Proceedings of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and

Pattern Recognition, 査読有, 2016, 189–194.  
DOI:10.1109/ICWAPR.2016.7731642

⑤ A. Morimoto, Audio Watermarking Based on  $N$ -tree Discrete Wavelet Transform, Proceedings of the Seventh International Conference on Information, 査読有, 2015, 57–60.

⑥ Y. Ishida, K. Ikebe, A. Morimoto, and M. Tatsumi, Digital audio watermarking method based on wavelet transform, Proceedings of the 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, 2015, 89–92.

DOI:10.1109/ICWAPR.2015.7295931

⑦ A. Morimoto, R. Ashino, and T. Mandai, Image separation using  $N$ -tree wavelet transforms, Proceedings of the 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, 2015, 93–98.

DOI:10.1109/ICWAPR.2015.7295932

⑧ N. Ikawa, A. Morimoto, and R. Ashino, A phase synchronization model between auditory brainstem response and electroencephalogram using the reconstructed waveform of multi-resolution discrete stationary wavelet analysis, Proceedings of the 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, 2015, 111–116.

DOI:10.1109/ICWAPR.2015.7295935

⑨ R. Ashino, T. Mandai, and A. Morimoto, Scaling functions generating fractional Hilbert transforms of a wavelet function, J. Math. Soc. Japan, 査読有, Vol. 67, No. 3, 2015, 1275–1294.

DOI:10.2969/jmsj/06731275

⑩ 守本晃・芦野隆一・池邊和馬・辰巳基・萬代武史,  $N$  分木離散ウェブサイト変換について, 数理解析研究所講究録, 査読無, Vol.1928, 2015, 1–27.

<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1928-01.pdf>

⑪ A. Morimoto, R. Ashino, K. Ikebe, M. Tatsumi, and T. Mandai, Fractional Hilbert Transforms of Biorthogonal Wavelets, Proceedings of the twelfth

International Conference on Information Technology: New Generations, 査読有, 2015, 347–352.

DOI:10.1109/ITNG.2015.62

⑫ R. Ashino, T. Mandai, and A. Morimoto, An Estimation Method of Shift Parameters in Image Separation Problem, in Current Trends in Analysis and Its Applications: Proceedings of the ninth ISAAC Congress, Mityushev, Vladimir, Ruzhansky, Michael V. (Eds.), 査読有, 2015, 467–473.

DOI:10.1007/978-3-319-12577-0\_52

⑬ 芦野隆一, ウェーブレット理論と工学への応用, 数学, 査読有, Vol.66, 2014, 90–95.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/sugaku/66/1/66\\_0661090/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sugaku/66/1/66_0661090/_article/-char/ja/)

⑭ N. Ikawa, A. Morimoto, and R. Ashino, The detection of the relation of the stimulus intensity-latency of auditory brainstem response using optimal wavelet analysis, Proceedings of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, 2014, 127–133.

DOI:10.1109/ICWAPR.2014.6961303

⑮ A. Morimoto, R. Ashino, K. Ikebe, T. Mandai, and M. Tatsumi, Filter coefficients of the fractional Hilbert transforms of biorthogonal wavelets, Proceedings of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, 2014, 134–139.

DOI:10.1109/ICWAPR.2014.6961304

⑯ R. Ashino, T. Mandai, and A. Morimoto, Multistage blind source separations by wavelet analysis, Int. J. Wavelets Multiresolut. Inf. Process., 査読有, Vol.12, 2014, 1–25.

DOI:10.1142/S0219691314600042

〔学会発表〕計(31)件

① 守本晃・芦野隆一・萬代 武史, (招待講演)画像分離における画像の回転角度の検出について, 日本応用数学会 2017 年 研究部会連合発表会, 2017 年 3 月 7 日, 電気通信大学.

② 守本晃・芦野隆一・萬代武史, ウェーブレット解析に基づいた画像分離について, 応用数学会 2016 年度年会, 2016 年 9 月 14 日, 北九州国際会議場, 小倉.

③ 守本晃・芦野隆一・萬代 武史, (基調講演)ウェーブレット解析と画像分離, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 2016 年 7 月 19 日, 工学院大学.

④ A. Morimoto, Audio Watermarking Based on  $N$ -tree Discrete Wavelet Transform, The Seventh International Conference on Information, 2015 年 11 月 27 日, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

⑤ 守本晃・芦野隆一・石田理人・萬代武史,  $N$  分木離散ウェーブレット変換を用いた音声信号の電子透かしについて, 応用数学会 2015 年度年会, 2015 年 9 月 11 日, 金沢大学角間キャンパス.

⑥ A. Morimoto, Image source separation based on  $N$ -tree discrete wavelet transforms, the 10-th International ISAAC Congress, 2015 年 8 月 7 日, University of Macau, in Macao, China.

⑦ A. Morimoto, R. Ashino, and T. Mandai, Image separation using  $N$ -tree wavelet transforms, the 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2015 年 7 月 13 日, Holiday Inn Guangzhou Shifu, Guangzhou, China.

⑧ A. Morimoto, R. Ashino, K. Ikebe, M. Tatsumi, and T. Mandai, Fractional Hilbert Transforms of Biorthogonal Wavelets, the twelfth International Conference on Information Technology: New Generations, 2015 年 4 月 14 日, The Flamingo Hotel, Las Vegas, Nevada, USA.

⑨ 守本晃・芦野隆一・萬代 武史,  $N$  分木離散ウェーブレット変換と画像分離法, 第 11 回日本応用数学会 研究部会連合発表会, 2015 年 3 月 7 日, 明治大学中野キャンパス.

⑩ 守本晃・芦野隆一・池邊和馬・辰巳基・萬代武史,  $N$  分木離散ウェーブレット変換について, 第 7 回ウェーブレット変換およびその応用に関するワークショップ, 2014 年 10 月 2 日, 豊橋技術科学大学.

⑪ A. Morimoto, R. Ashino, K. Ikebe, T. Mandai, and M. Tatsumi, Filter coefficients of the fractional Hilbert transforms of biorthogonal wavelets, the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2014 年 7 月 15 日, Lanzhou, China.

〔図書〕計(2)件

① 山田道夫・萬代武史・芦野隆一, 応用のためのウェブレット, シリーズ応用数理 5 巻, 共立出版, 2016.

〔その他〕

① 守本晃のホームページ

<https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~morimoto/>

② 大阪教育大学教員総覧(守本晃)

<http://kenkyu-web.bur.osaka-kyoiku.ac.jp/Profiles/2/0000184/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

守本 晃 (MORIMOTO, Akira)  
大阪教育大学・教育学部・教授  
研究者番号: 50239688

### (2) 研究分担者

芦野 隆一 (ASHINO, Ryuichi)  
大阪教育大学・教育学部・教授  
研究者番号: 80249490

### (3) 連携研究者

萬代 武史 (MANDAI, Takeshi)  
大阪電気通信大学・工学部・教授  
研究者番号: 10181843