

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 4月 1日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560418

研究課題名（和文） 革新的寄生的離散ウェーブレット変換による高速・実時間異常信号検出法の創出

研究課題名（英文） Abnormal Signal Detection in High-speed and Real-time by using Innovative Parasitic Discrete Wavelet Transform

研究代表者

章 忠 (ZHANG ZHONG)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50254579

研究成果の概要（和文）：

従来、信号解析手法として、周波数解析手法が多用されており、その中でも非定常信号解析への有効性から、ウェーブレット変換（WT）が注目されている。本研究では、研究代表者らが新たに提案した可変フィルタバンド離散 WT において、以下の2点を研究目的とした。(1) 解析対象が持つ特定の周波数帯域で、意図しない信号強度の減衰が生じるエネルギー損失問題の改善、(2) 信号処理設計を支援する処理閾値設定手法の構築。これにより提案手法の精度向上を達成するとともに、その効果を胎児心電図解析や、自動車の走行ノイズ音の解析に応用し、評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

Until now, as the method of analyzing signal, a lot of frequency analysis methods have been used. The wavelet transform which has effectiveness in analysis for non-stationary signals is focused. This research aims to improve the following 2 points in Variable Filter Band Discrete Wavelet Transform (VFB-DWT) which is proposed by author: (1) solving the energy loss problem which makes reducing of signal power at the specific frequency band in an analytical signal through the analysis process of the VFB-DWT, (2) constructing the assistance method to determine the appropriate threshold value of VFB-DWT. Finally, improvement of analysis accuracy has been achieved through this research, and its effectiveness has been confirmed through the application in fetal cardiac signals analysis and in-vehicle road noise analysis.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：アルゴリズム，計測工学，信号処理，異常診断，実時間処理

1. 研究開始当初の背景

稼働中の原子力発電所や運行中の飛行機などにおいて、稼働・運行と同時に異常状態を実時間で検出することは非常に難しい。この理由は、異常が生じる初期段階では、その予兆現象が変動的で、かつ非定常（現象の再現性が低い）な性質が強いためである。そのため、初期段階の異常検出には、短時間で瞬時的に生じる現象を正確に捉える技術が要求される。本研究ではこの問題に対して、初期段階の非定常な異常信号の発生時刻と強さを高速(5.0×10^{-7} [s]以内)、且つ高信頼性(目的信号の検出誤差 -20 [dB])に検出する手法を開発する。これは研究代表者が考案・開発した寄生的離散ウェーブレット変換と、それによる高速ウェーブレット瞬時相関の各理論を用いて実現できる。

研究代表者らは目的信号の抽出やノイズ除去に対して有効な手法として、寄生的離散ウェーブレット変換を発展させた、可変フィルタバンド離散ウェーブレット変換 (Variable Filter Band Discrete Wavelet Transform, VFB-DWT) を提案してきた。

VFB-DWT は、特に目的信号検出に対して効果を発揮する、実信号マザーウェーブレット (Real-signal Mother Wavelet, RMW) を可変バンドフィルタ (Variable Band Filter, VBF) で近似する手法である。また VBF は、解析対象信号に応じたフィルタバンドを、その周波数情報に対する閾値処理により作成することで有効性を高めている。加えて、従来の離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transform, DWT) に付与・併用することが可能であるため、様々なノイズが存在する信号に対しても有効な処理を行うことができる。

2. 研究の目的

研究代表者らが提案する VFB-DWT の解析精度向上および適用範囲拡大のためには、大別して二つの課題を克服する必要がある。

1つ目は、解析処理上の精度低下に関する課題である。VFB-DWT では、目的信号の周波数成分がナイキスト周波数 f_N 付近に存在する際、その周波数成分の強度が減少することで信号抽出精度が低下する問題が明らかになっている。また、VBF 作成時に行う一つの閾値処理では、目的信号成分とノイズ成分を分離することが困難となる。

2つ目は、VFB-DWT の設計手法に関する問題である。非定常信号解析の性質上、解析処理によって抽出や除去の対象となる信号の周波数情報がいまいな場合が多い。すなわち、周波数領域において、必要・不必要を判断する閾値の決定が難しく、設計難易度をあげる要因となっている。

本研究では、これら二つの課題を解決する計算アルゴリズムを提案し、信号分離精度の

向上を目的とする。そして、これら提案手法の有効性を、胎児心電図解析への適用を通して検証する。

3. 研究の方法

(1) エネルギー損失問題の概要と改善
VFB-DWT を用いた特定信号の抽出では、従来適用してきた異常信号の有無のみの確認とは異なり、信号の再構成や、帯域通過型ウェーブレットセット (BP-WS) や帯域除去型ウェーブレットセット (BR-WS) の用いた処理を行う。しかし、これらを VFB-DWT の設計に統合した結果、特定の周波数帯域の信号情報が低下・欠落する問題が生じた。これが本研究で対象とするエネルギー損失問題である。図1 にエネルギー損失が生じた解析例を示す。ただし、 f_N はナイキスト周波数であり、解析例はインパルス信号から $f_N=2$ 付近の周波数帯を VFB-DWT により抽出したものである。本来は、抽出したい周波数帯域は、図2のように領域が欠けることなく抽出されることが理想である。しかし、エネルギー損失が生じた結果、周辺領域を含め所望の信号周波数帯域を抽出できないことがわかる。

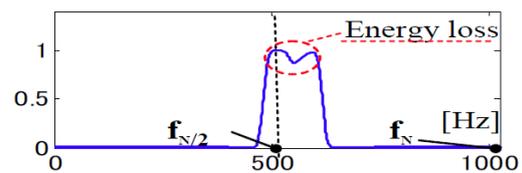


図1：エネルギー損失の発生例

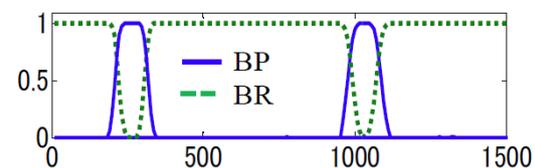


図2：エネルギー損失のない理想的な抽出例

この原因を解析した結果、エネルギー損失問題はDWT特有のダウンサンプリングによるエイリアシングが原因であることが確認できた。つまり、処理中にエイリアシングが発生する分解方法を、冗長性のある分解方法に変換し適用することで、この問題は改善可能であるといえる。そこで、冗長性のある分解を可能とするフィルタの設計手法を提案し、数値実験によりその効果を検証した。

(2) 閾値設定問題の概要と改善

VBF では、事前に一つの閾値を解析対象信号の周波数情報に適用することで、通過域と阻止域が構成可能である。一方で、抽出対象の目的信号は、周波数領域によってその強度が異なることに加え、それと同程度の強度を持つノイズが存在する場合がある。本研究で

は、このような状況に該当する信号処理事例として、胎児心電診断における母体と胎児の心電成分の分離を対象とする。その場合、単一の閾値設定法では目的信号の一部を阻止してしまう可能性がある。例えば、図3に示す胎児心電のノイズ除去において、左図にあるように、ノイズをすべて除去する閾値を設定した場合、右図のように0-200[Hz]にある胎児心電成分を一部阻止するBP-WSが作成され、胎児心電の波形が崩れた解析結果が得られることになる。

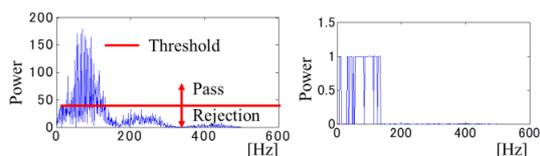


図3 胎児心電に対するBP-WSの設計例

この問題を改善するために、本研究では複数の閾値処理によるVBF作成手法を提案した。閾値適用例を図4に示す。胎児心電図は主に胎児の心電と、ノイズとなる母体の心電等で構成されており、低周波側に胎児心電を構成する成分が含まれている。そのため、高周波数帯域は広く、低周波数帯域は細かく閾値を設定できるようにすることが望ましい。そこで、DWTの分解レベルに応じて、閾値を変更できるように改良を行った。図4左図は分解レベル-3にて閾値処理を適用した例であり、その閾値範囲は各ウェーブレット係数が持つ周波数バンドに対応するために、オクターヴバンドとした。これにより、閾値設定処理の自由度が増し、容易に胎児心電とノイズとを分離する閾値を設定することが可能となった。その結果、図4右図に示すように、従来では高周波数帯域のノイズを除去するための閾値設定で削られていた胎児心電の成分をすべて抽出可能になった。

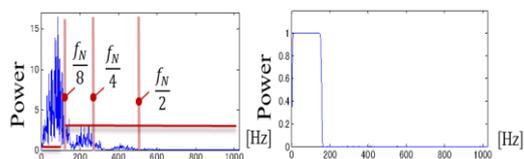


図4 提案手法による複数閾値設定

4. 研究成果

3. で示した信号処理性能の改善策を適用し、実際に胎児心電図解析に適用した。また、その効果を検証する方法として、情報エントロピーを用いた定量評価法を導入し、ノイズ除去性能の評価を行った。

ここで用いる情報エントロピーは、情報科

学の分野で多用される理論であり、現象の不確かさを示す指標である。すべての時間にノイズを含む信号の場合、エントロピーは、目的信号成分に対してノイズ成分が多いほど高くなり、少ないほど小さくなる性質を持つ。そのため、信号処理の前後で、目的信号成分がどの程度含まれているかを表す指標となりうる。これまで、VFB-DWTによる信号処理性能の有効性を定量的に評価する手法は提案されていない。本研究においては、情報エントロピーを用いて、信号成分の偏りを定量的に示すことでそのノイズ除去性能の評価を達成する点で有意義な結果得られた。

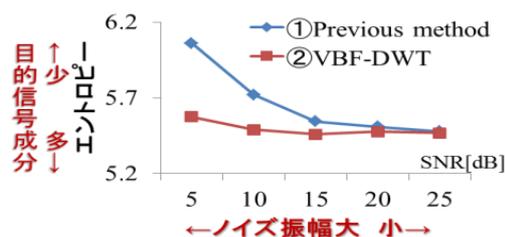


図5 ノイズ除去前の情報エントロピー

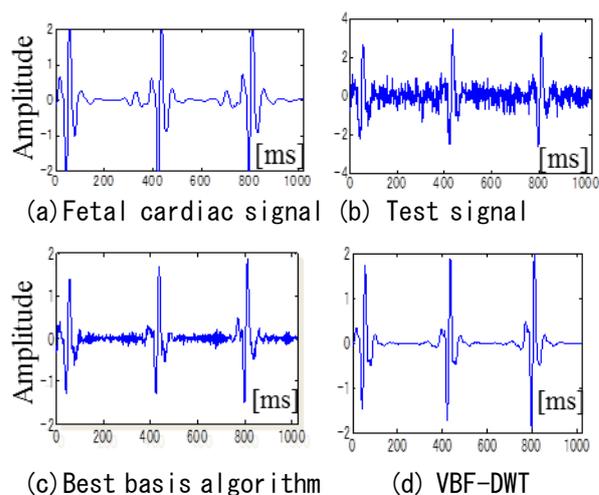


図6 供試信号とノイズ除去結果

以下に、VFB-DWTのノイズ除去性能を評価する数値実験として、VFB-DWTと従来手法である最良基底アルゴリズムとの比較実験の結果を示す。供試信号として、胎児心電に振幅の異なるホワイトノイズを加えたものを用いる。ここで用いたノイズ除去式はSoft-thresholdingである。最良基底アルゴリズムでは事前に信号抽出を行わないがVFB-DWTではノイズ除去前に信号抽出を行うことで情報エントロピーの低減が期待できる。これがノイズ除去結果にどのように影響を与えるかを確認する。

実験の結果を図5, 6に示す。図5は各

手法中に得られる信号のノイズ除去前のエントロピーであり、加えるノイズの振幅の大小によるエントロピーの変化を示している。また、図6(a)は供試信号中の胎児心電、図6(b)はSNR=5[dB]となるノイズを加えた供試信号である。図6(c)は最良基底アルゴリズム、図6(d)はVFB-DWTをそれぞれ用いてノイズ除去を行った結果である。図6(c)の最良基底アルゴリズムでは完全にノイズが除去できておらず、信号抽出を行っていないため、図5のエントロピーは高いことが確認できる。一方で、図6(d)のVFB-DWTでは胎児心電成分とノイズ成分を高精度に分離できていることが確認できる。また、図5では目的信号成分を予め抽出し、ノイズ成分を除去していることで、加えるノイズの振幅が大きい場合でも、エントロピーが小さい値で安定していることが確認できる。この結果より、VFB-DWTが持つ信号抽出能力によって、ノイズ除去前に予めエントロピーを減少させることが、ノイズ除去に有効であることが確認できた。

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9件)

- ① Zhong Zhang, Yasudake Aoki, Hiroshi Toda, Takashi Imamura and Tetsuo Miyake, Real World Source Separation by Combining ICA and VD-CDWT in Time-Frequency Domain, International Journal of innovative Computing Information and Control, 査読有, Vol.9 No.4, 2012, pp.1737-1757
- ② 石井 秀明, 足高正善, 章 忠, 今村 孝, ステアリングシステムの音源探査技術の開発(リアルタイム解析の実用化), 日本設備管理学会誌, 査読有, Vol.24 No.3, 2012, pp.112-119
- ③ H. Ishi, Z. Zhang and T. Imamura, Identification of Electric Power Steering System Rattle Noise Source While Driving on a Belgian Road Using a Wavelet Transform, Innovative Computing, Information and Control Express letters, 査読有, Vol. 6, Num. 4, 2012, pp.1005-1012
- ④ Z. Zhang, J. Ohtaki, H. Toda, T. Imamura, T. Miyake and Y. Ishikawa, A Study of Abnormal Signal Extraction by Using Parasitic Discrete Wavelet Transform, Innovative Computing, Information and Control Express letters, 査読有, Vol. 6, Num. 4, 2012, pp.999-1004
- ⑤ 石井 秀明, 植村 広, 章 忠, 今村 孝, ステアリングシステムの音源探査技術の開発, -悪路走行時におけるラトル音の解析-,

日本設備管理学会誌, 査読有, Vol.23 No.4 2012, pp.184-190

- ⑥ 戸田 浩, 章 忠, 今村 孝, 完全シフト不変性を実現する実数型タイトウェーブレット・フレーム, 日本応用数理学会論文誌, 査読有, Vol.21, No.4, 2011, pp.255-288
- ⑦ 章 忠, 齋木典保, 今村 孝, 三宅哲夫, 戸田 浩, 泉 光宏, 楠原 功, 南口昌弘, イオン電流を用いた時間-周波数解析によるノッキング検出, 日本機械学会論文集B編, 査読有, Vol.77, No.782, 2011, pp.1994-2003
- ⑧ 石井秀明, 植村 広, 章 忠, 今村 孝, ステアリングシステムの音源探査技術の開発, 計測自動制御学会産業論文集, 査読有, Vol.10, No.9, 2011, pp.73-80
- ⑨ 戸田浩, 章 忠, 今村 孝, 完全シフト不変定理を基礎に高速フーリエ変換を用いて構築する正規直交複素数ウェーブレット変換, 日本応用数理学会論文誌, 査読有, Vol.21, No.1, 2011, pp.1-24.

[学会発表] (計19件)

- ① Takeshi KATO, Zhong ZHANG, Hiroshi TODA, Takashi IMAMURA, and Tetsuo MIYAKE, A Novel Design Method for Directional Selection of 2-Dimensional Complex Wavelet Packet Transform, Proc. of the 2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR2012, Xi'an, 15-18 July, 2012), pp.417-423
- ② Zhong ZHANG, Jin OHTAKI, Hiroshi TODA, Takashi IMAMURA, Variable-Filter-Band Discrete Wavelet Transform: Improving Energy Loss problem, Proc. of the 2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR2012, Xi'an, 15-18 July, 2012), pp.403-409
- ③ Zhong ZHANG, Hiroshi TODA, Takashi IMAMURA and Tetsuo MIYAKE, A Novel Variable-Filter-Band Discrete Wavelet Transform, Proc. of the 2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR2012, Xi'an, 15-18 July, 2012), pp.371-377
- ④ Hiroshi TODA, Zhong ZHANG, Takashi IMAMURA, Perfect-Translation-Invariant 3-Dilation Complex Discrete Wavelet Transform Based on 3-Dilation Orthogonal Basis, Proc. of the 2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR2012, Xi'an, 15-18 July, 2012), pp.352-358
- ⑤ 加藤毅, 章 忠, 戸田浩, 今村孝, 三宅哲夫, 2次元複素数離散ウェーブレット変換の方向選択性の設計とその応用, 第40回可視

化情報シンポジウム, (2012. 05. 24-25), pp. 203-208

⑥ Zhong Zhang, Hiroshi Toda, Takashi Imamura, Tetsuo Miyake, A New Variable-Band Filter Design Method for the Discrete Wavelet Transform, Proc. of the 2012 Ninth International Conference on Information Technology: New Generations (INTG2012, Las Vegas, 16-18 April, 2012), pp. 629-634

⑦大滝 仁, 章 忠, 戸田 浩, 今村 孝, 三宅 哲夫, 石川 康宏, 寄生的離散ウェーブレット変換のエネルギー損失の改善とその応用, 第 54 回自動制御連合講演会, (2011. 11. 19-20), pp. 1319-1323

⑧長松 隆, 藤野 高行, 五福 明夫, 章 忠, 実信号マザーウェーブレットを用いたボンブ異常兆候検出手法, 第 54 回自動制御連合講演会, (2011. 11. 19-20), pp. 1309-1313

⑨戸田 浩, 章 忠, 今村 孝, 完全シフト不変定理を基礎とする離散ウェーブレット変換, 第 54 回自動制御連合講演会, (2011. 11. 19-20), pp. 1278-1283

⑩戸田浩, 章 忠, 今村 孝, 完全シフト不変性を実現する実数値関数ウェーブレットフレーム, 日本応用数理学会 2011 年度 年会, (2011. 09. 14-16), pp. 43-44

⑪章 忠, 大滝仁, 今村 孝, 三宅哲夫, 戸田 浩, 寄生的離散ウェーブレット変換とその問題点, H23 年度数学・数理化学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ: ウェーブレット理論と工学への応用, プロシーディングス, (2011. 9. 12-13), pp. 21-49

⑫章 忠, 戸田 浩, シフト不変複素数離散ウェーブレット変換, 可視化情報, vol. 31, Suppl. No. 1, (2011. 7. 18-19), pp. 445-448

⑬ Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Takashi Imamura, The Wide Designed Discrete Wavelet Transforms Based on the Perfect Translation Invariance Theorem, Proc. of the 2011 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2011, Guilin, 10-13 July, 2011), pp. 260-265

⑭ Zhong Zhang, Takeshi Kato, Hiroshi Toda, Takashi Imamura, Tetsuo Miyake, A Study of Direction Selection Properties of the 2-Dimensional Complex Wavelet Packet Transform, Proc. of the 2011 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2011, Guilin, 10-13 July, 2011), pp. 266-271

⑮大滝仁, 章 忠, 戸田浩, 今村孝, 三宅 哲夫, 石川康宏, 寄生的離散ウェーブレット変換による異常信号抽出報に関する検討, 日本機械学会東海支部第 60 期総会講演会, (2011. 03. 14-15), pp. 109-110

⑯石川康宏, 堀畑 聡, 堀米仁志, 戸田浩, 章 忠, 第 3 世代の Wavelet と独立成分分析による心電図・心磁図の解析, 第 21 回体表心臓微小電位研究会 (2011. 02. 26)

⑰堀畑 聡, 石川康宏, 堀米仁志, 戸田浩, 章 忠, シフト不変複素数離散ウェーブレット変換と ICA による胎児 MCG 信号の抽出, 第四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, (2010. 09. 27-28), S2-4. pdf

⑱ Z. ZHANG, N. SAIKI, H. TODA, T. IMAMURA and T. MIYAKE, Parasitic Decrease Wavelet Transform and its Application on denoising, Proc. of International Conference of Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2010, July 11-14, 2010, China), pp. 345-350

⑲ H. TODA, Z. ZHANG, T. IMAMURA, The General Perfect Translation Invariance Theorem and its Application for an Orthogonal Complex Wavelet Basis on the Hardy Space, Proc. of International Conference of Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2010, July 11-14, 2010, China), pp. 364-369

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 車載装置の振動解析及び振動源の特定を行う方法及び装置

発明者: 石井秀明, 梅村 広, 章 忠

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2011-79505

出願年月日: 平成 23 年 3 月

国内外の別: 国内

名称: Signal Detection Device, Signal Detection Method, and Method of Manufacturing Signal Detection Device

発明者: Zhong Zhang, Tetsuo Miyake, Takashi Imamura

権利者: 同上

種類: 特許

番号: Pub. No. US 2011/0213578 A1

出願年月日: 平成 23 年 9 月

国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

<http://is.me.tut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

章 忠 (ZHONG ZHANG)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50254579

(2) 研究分担者

今村 孝 (TAKASHI IMAMURA)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10422809