

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420387

研究課題名(和文) 可変フィルタバンド離散ウェーブレット変換の実現による革新的信号・画像処理法の創製

研究課題名(英文) Creation of innovative signal and image processing method by realization of variable filter band discrete wavelet transform

研究代表者

章 忠 (Zhang, Zhong)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50254579

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)：離散ウェーブレット変換(DWT)は計算の高速性、信号の完全再構成などの素晴らしい特性を持ち、広い分野に応用される。しかしDWTに使用されるマザーウェーブレットはオクターブバンドの特性を持ち、必ずしも信号に合う最適基底とならずノイズ削除などに深刻な影響を与える。また画像処理では方向選択性が乏しい。本研究では、信号に合う最適直交基底の構成法を考案し新たな可変フィルタバンドの離散ウェーブレット変換(VFB-DWT)を提案した。そしてVFB-DWTを2D/3Dに拡張し自由な方向選択性を実現して新たな信号・画像処理方法を創製した。さらに本手法を胎児心電抽出、3D腫瘍輪郭抽出などへ応用し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Discrete wavelet transform (DWT) has excellent characteristics, such as high calculation speed, perfect reconstruction, and has been applied wide field. However, the mother wavelet has the characteristics of the octave band, and it does not necessarily become the optimum basis. Therefore, it exerts a serious influence on data compression, noise deletion and the like. Also, image processing using it has poor direction selectivity. In this research, we propose a new variable filter band discrete wavelet transform (VFB - DWT) by devising the optimal orthogonal base construction method suitable for the signal while preserving the splendor of the conventional DWT. In addition, VFB-DWT was expanded to 2D / 3D DWT to realize free direction selectivity, signal and image processing method was created. Furthermore, we applied this method to extraction of fetal electrocardiogram, defect detection of semiconductor circuits, contour extraction of 3D masses, and confirmed its effectiveness.

研究分野：計測工学

キーワード：ウェーブレット変換 胎児心電 腫瘍 半導体 欠陥検出

1. 研究開始当初の背景

非定常信号処理や画像処理において、離散ウェーブレット変換(DWT)は従来の短時間フーリエ変換や Wigner-Ville 分布などの手法より優れた特性を持っている。しかし DWT の高速計算アルゴリズムにはダウンサンプリングの操作があり、それにより DWT のシフト不変性が欠如する。また DWT に使用されるマザーウェーブレット(MW)はオクターブバンドの特性を持つため、必ずしも信号に合う最適基底とならずデータ圧縮やノイズ削除などの効率に影響を与える。さらに 2D/3D の画像解析には MW に対応するフィルタによる DWT の方向選択性が乏しい。1D の胎児心電については、母体の騒音や心脈などの影響が大きく通常のバンドパスフィルタや従来の離散ウェーブレット変換で胎児心電をノイズから分離することは非常に困難である。また電子集積回路基板の 2D 画像における汚れや欠陥の検出、または心血管の 3D-CT 画像における血管の異常検出は、方向成分の解析が非常に重要となっている。方向選択性の乏しい DWT はこれらのニーズに対して十分な結果が得られにくい。申請者は十数年来、ウェーブレット変換及び異常検出に関する研究に取り組み、科研(C)H19-20 年にて完全シフト不変な複素数離散ウェーブレット変換を世界で初めて実現し、科研(C)H22-24 年にて革新的な寄生的離散ウェーブレット変換の開発に成功した。本研究ではこれらの研究成果を元にして信号に合う最適直交基底の構成法を考案し、それをを用いるノイズ削除や信号抽出などに強い新たな可変フィルタバンドの離散ウェーブレット変換を提案する。そして可変バンドフィルタ(VBF)を 2D/3D の離散ウェーブレット変換に拡張し自由な方向選択性を実現して新たな信号・画像処理法を創製する。

2. 研究の目的

離散ウェーブレット変換(DWT)は計算の高速性、信号の完全再構成などの素晴らしい特性を持ち、信号・画像処理のみならず、広い分野に応用される。しかし DWT に使用されるマザーウェーブレットはオクターブバンドの特性を持ち、必ずしも信号に合う最適基底とならずデータ圧縮やノイズ削除などに深刻な影響を与える。またそれをを用いる画像処理では方向選択性が乏しい。本研究では、従来の DWT の素晴らしさを保持しながら信号に合う最適直交基底の構成法を考案し新たな可変フィルタバンドの離散ウェーブレット変換(VFB-DWT)を提案する。さらに VFB-DWT を 2D/3D の離散ウェーブレット変換に拡張し自由な方向選択性を実現して新たな信号・画像処理方法を創製する。この手法は計測科学・情報科学などの幅広い研究領域でこれまでに試みたことのない学術的アプローチである。

3. 研究の方法

(1)VFB-DWT の最適直交基底の構成法を開発 VBF は解析対象信号の周波数特性に従って設計される。しかしこの VBF から構成される基底系は直交基底系ではない。本研究では申請者から提案した完全シフト不変離散ウェーブレットの理論を活かして新たな最適直交基底の構成法を創出し、その問題を克服する。

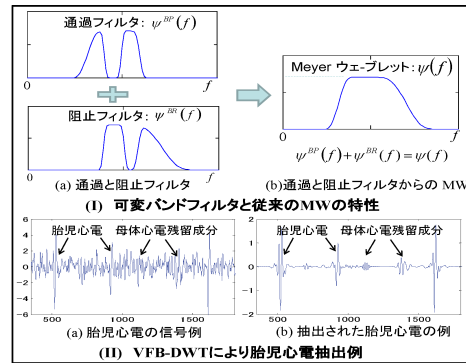


図 1 VBF の最適直交基底の構成法

図 1 には提案する新たな VBF の最適直交基底構成法の概略図を示す。ただし図の(I)は提案の VBF の最適直交基底構成法の概要、(II)は胎児心電の抽出の例である。図 1 (I)(a)に示すように、本申請で完全シフト不変複素数離散ウェーブレット変換の理論を元に提案する VBF は 2つの部分、通過フィルタと阻止フィルタにより構成される。その設計は、まずバンドパスフィルタ  $H^{BP}(f)$ の通過領域は解析信号の周波数特性を元に設計し、減衰領域は Meyer 直交ウェーブレット  $\psi(f)$ を元に設計する。次に通過フィルタ  $\psi^{BP}(f)$ は  $\psi^{BP}(f) = H^{BP}(f) \psi(f)$  を満足するように設計し、阻止フィルタ  $\psi^{BR}(f)$ は  $\psi^{BR}(f) = \psi(f) - \psi^{BP}(f)$  のように設計する。この提案で設計される通過フィルタは解析信号に合う最適基底となり、それと阻止フィルタを合わせるものは図 1 (I)(b)に示すような Meyer 直交ウェーブレット  $\psi(f)$ となるため、直交基底を構成すると考えられる。図 1 (II)(b)には(a)に示す信号から試作の VBF により胎児心電を抽出した例で、今後研究が計画通り進めば提案手法の実現により良い結果を得ることが期待できる。そして提案手法により構成された基底関数について、完全再構成理論と情報エントロピーに基づきその合理性と直交性を評価し設計手法を完成させる。最後に VFB-DWT を胎児心電などの 1D 信号に応用しその有効性を確認する。

(2) VBF による自由な方向選択性の創製

DWT に使用される MW はバンドパスフィルタ(BPF)の特性を持つ。DWT の方向選択性は 2 次元の周波数平面上における各分解レベルでの BPF 位置に依存する。しかし DWT は高速計算アルゴリズムによる BPF 位置が固定のため、自由な方向選択性を持たない。本研究ではウェーブレット変換理論を活用し 2 次元の周波数平面上に VBF のバンド幅と位置を自由に設

計できる手法を開発し、自由な方向選択性を実現する。

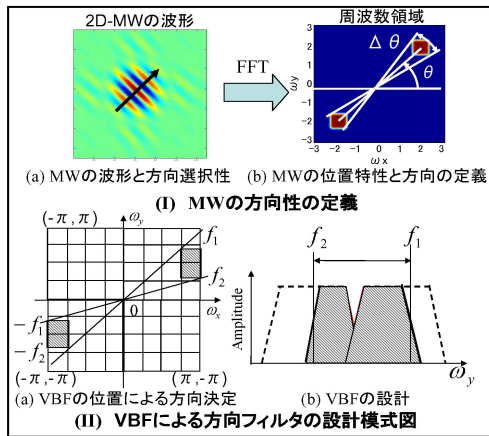


図2 2次元 VBF 設計法

図2には2次元 VBF 設計法の概念図を示す。ただし図2(1)には MW の方向選択性の定義、(II)には提案の VBF による方向フィルタの設計法の概念図を示す。図2(1)に示すように、MW の波形の進行方向は MW の周波数成分の2次元周波数平面上での位置(赤四角の位置)に対応している。申請者はこの研究成果に基づいて図2(1)(b)の方向定義を考え、図2(II)に示すような自由な方向選択性を持つ VBF フィルタの設計法を提案する。この方法はまず図2(II)(a)のように2次元周波数平面上で検出したい方向成分の位置を定め、カットオフ周波数  $f_1$  と  $f_2$  で表す。次に従来のバンドパスフィルタの領域(破線領域)からカットオフ周波数  $f_1$  と  $f_2$  のロー・ハイパスフィルタにより灰色領域を切り出して VBF の通過フィルタの領域とし、残った領域を阻止フィルタの領域とする。よって方向成分の位置をカットオフ周波数  $f_1$  と  $f_2$  で定めれば、自由に2次元 VBF を設計できる。

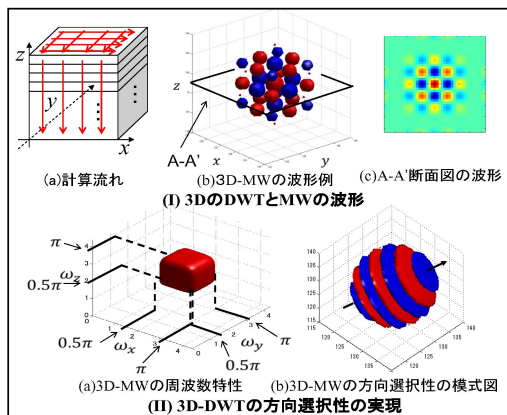


図3 3次元 VBF 設計法

(3) 3次元方向選択性の実現 現在複素数離散ウェーブレット変換は6方向の方向選択性を持つ。しかし従来の方向成分を計算する式の原理は曖昧で、3Dの計算式は存在しない。本研究では方向選択性の原理を解明し、3Dの方向成分抽出法を創製して自由な3Dの方向

選択性を実現する。図3には3次元 VBF 設計法の概念図を示す。ただし図3(I)には3Dの計算流れと MW の波形、(II)にはその周波数特性と提案の VBF による方向フィルタの概念図を示す。MW の3D形状において赤色は正のピーク、青色は負のピークを表している。まず方向選択性の原理を解明し、3D方向成分の計算式を導出する。次にそれに基づいて3Dの方向成分抽出法を創製する。そして VBF 理論を3Dへ拡張し自由な3Dの方向選択性を実現する。

#### 4. 研究成果

(1) 信号に合う最適基底の構成法を考案し、それをを用いる新たな可変フィルタバンドの離散ウェーブレット変換(VFB-DWT)を提案した。さらに胎児心電抽出を例にし、VBFの構成法と VBF-DWTの有効性を検証した。得られたおもな結果は以下の通りである。胎児心電成分のみが存在する周波数帯域を選択して可変バンドフィルタ(VBF)を構成する手法は目的信号に合う最適基底を構成するに有効であった。また可変バンドフィルタ(VBF)を用いる VBF-DWTにウェーブレット縮退法を適用し胎児心電の抽出に成功した。そして胎児心電抽出においてウェーブレット変換の基底系の良さを評価するために、情報エントロピーを指標とした評価方法を提案し、VBF-DWTとWPTの違いを評価できてその有効性を確認した。最後に胎児心電、母体心電およびホワイトノイズによる合成信号およびICAにより分離された心電信号を用いて検証した結果、VBF-DWTのVBFによる基底系がBBAにより選出されたWPTの基底系より胎児心電に適用し、より良い基底系となることが確認できた。

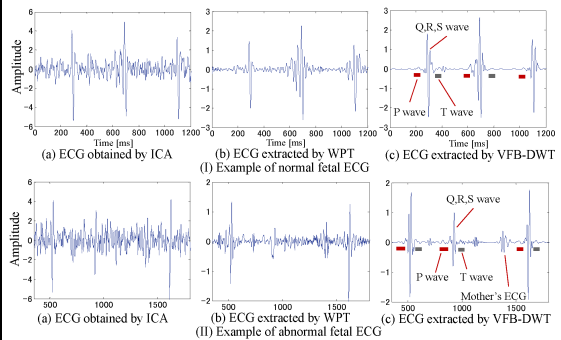


図4 胎児心電の抽出例

図4には胎児心電計測データの例と胎児心電の抽出結果を示す。ただし、図4の(I)は正常の胎児心電を含む場合であり、(II)は異常の胎児心電を含む場合である。また図4の(a)は計測データ、(b)はウェーブレットパケットにより分離された胎児心電、(c)はVFB-DWTにより分離された胎児心電である。図4の(I)と(II)の(b)については、WPTにより抽出された胎児心電にノイズが存在し、P波の位置が明確ではない。特に、図4の(II)(b)においては、胎児の鼓動(Q,R,S波)

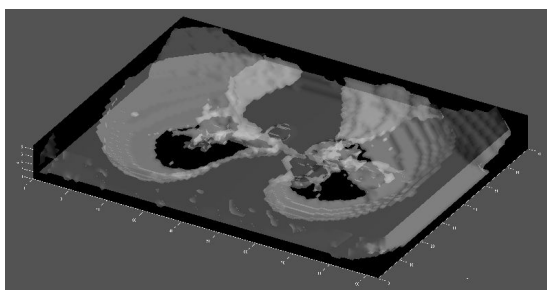
も見出しにくく、診断に有効であるとは言い難い。これに対して、図4の(I)と(II)の(c)においてVFB-DWTによる胎児心電の抽出結果では、どちらも全体に細かいノイズが残留することなく、それぞれの波形を確認することができる。これらの結果により、VFB-DWTの方がWPTより胎児心電抽出に有効であることがわかる。これはVBFによる最適基底系が胎児心電の抽出性能の向上につながったためだと考えられる。

(2) 2次元のマザーウェーブレット(MW)の特徴としては、MWの波形の進行方向がMWの周波数成分の2次元周波数平面上での位置に対応している。この研究成果に基づいて2次元MWの方向の定義を考え、自由な方向選択性を持つVBFフィルタの設計法を提案した。この方法はまず2次元周波数平面上で検出したい方向成分の位置を定め、カットオフ周波数 $f_1$ と $f_2$ で表す。次に従来のバンドパスフィルタの領域からカットオフ周波数 $f_1$ と $f_2$ のロー・ハイパスフィルタにより目的領域を切り出してVBFの通過フィルタの領域とし、残った領域を阻止フィルタの領域とする。よって方向成分の位置をカットオフ周波数 $f_1$ と $f_2$ で定めれば、自由に2次元VBFを設計できる。そして対角方向におけるフィルタの適用指針を提案し、複合Layerへの適用を試みた。さらに提案手法を半導体回路の欠陥検査に応用し、図5に示した結果が得られ、その有効性を確認した。



図5 半導体回路の欠陥検出の例

(3) 各周波数領域のウェーブレット、およびウェーブレット・パケット関数から方向選択性が得られる原理について検討し、方向選択性の検出方向・角度範囲を定量評価する手法を提案した。結果として、ヒルベルト変換ペアのウェーブレットから実数部が $\cos$ 、虚数部が $\sin$ 関数で近似され、特定方向のウェーブレットが構成されることが確認された。また、周波数によって、ウェーブレットの方向が一意に決定されることがわかり、その関係を基にした評価手法がウェーブレットの検出する方向、角度範囲を正確に計算できることが確認された。そして以上から得られた知見をもとに、3D-複素数離散ウェーブレット



6 3D-CDWTによる腫瘍部位抽出の例ト変換(3D-CDWT)における方向選択性の計算式を導出した。図6に示すのは3D-複素数離散ウェーブレット変換の方向選択性を利用して、腫瘍部位の輪郭を3次元画像での抽出例である。図6から、腫瘍部位の輪郭を検出できることが確認された。

## 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12件)

Zhong Zhang, Hideaki Ishii, Takashi Imamura, and Tetsuo Miyake, "Development of Real-time Abnormal Sound Diagnosis System Using Fast Wavelet Instantaneous Correction", ICIC Express Letters, Part B: Applications, Vol.5, No.1, pp.201-206, 2014

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Takashi Imamura, Perfect Translation Invariant Variable Density Complex Discrete Wavelet Transform, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.11, No.4, pp.1-32, 2014.

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Takashi Imamura, Practical Design of Perfect Translation Invariant Real-Valued Discrete Wavelet Transform", International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.11, No.4, pp.1-27, 2014.

Zhong Zhang, Hiroshi Toda, Takashi Imamura and Tetsuo Miyake, A New Variable Filter Band Discrete Wavelet Transform: Theory and Principle, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.11, No.4, pp. 1-21, 2014.

Zhong Zhang, Jin Ohtaki, Hiroshi Toda, Takashi Imamura and Tetsuo Miyake, A New Variable Filter Band Discrete Wavelet Transform: Application, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.11, No.4, pp. 1-21, 2014.

Takashi Nagamatsu, Yuki Jou, Akio Gofuku, Takayuki Fujino, and Zhong Zhang, Diagnostic Agent using Parasitic Discrete Wavelet Transform for the Hybrid Diagnostic Agent System for the Fast-breeder Reactor "Monju", E-Journal of Advanced Maintenance Vol.

6, No.3, pp.71-85, 2014.

章 忠, 大滝 仁, 戸田 浩, 三宅哲夫, 石川康宏, 新たな可変バンドフィルタを用いる離散ウェーブレット変換(新たな離散ウェーブレット変換の胎児心電抽出への応用), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.822, pp.1-14, 2015.

章 忠, 大滝 仁, 戸田 浩, 三宅 哲夫, 石川 康宏, 新たな可変バンドフィルタを用いる離散ウェーブレット変換(新たな離散ウェーブレット変換の胎児心電抽出への応用), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.822, pp.1-14, 2015.

加藤毅, 章 忠, 戸田浩, 今村孝, 三宅哲夫, 石川康宏, 複素数ウェーブレット変換を基にした新たな方向性ウェーブレット変換の提案と医用画像認識への応用, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826, pp.1-18, 2015.

白砂絹和, 章 忠, 戸田浩, 三宅哲夫, Gabor Wavelet を用いた近似タイトウェーブレットフレームの設計, Journal of Signal Processing [信号処理], Vol.12, No.1, pp.41-53, 2016.

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Orthonormal wavelet basis with arbitrary real dilation factor, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.14, No.3, pp. 1-33, 2016.

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Orthonormal Basis of wavelets with Customizable frequency Bands, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Vol.14, No.6, pp. 1-31, 2016.

[学会発表](計20件)

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, Study of Arbitrary Real Dilation Factor of Orthonormal Wavelet Basis, Proc. of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2014), pp.140-145, 2014.

Takeshi Kato, Zhong Zhang, Hiroshi Toda, Takashi Imamura, Tetsuo Miyake, The Novel Directional Selection based on Complex Discrete Wavelet Transform, Proc. of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2014), pp.164-169, 2014.

Zhong Zhang, Kosuke Shimasue, Hiroshi Toda, Tetsuo Miyake, Achieving Complex Discrete Wavelet Transform by Lifting Scheme using Meyer Wavelet, Proc. of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2014), pp.170-175,

2014.

戸田 浩, 章 忠, 「幅広い時間周波数解析を可能にする任意実数ダイレーションファクター正規直交ウェーブレット基底」, 第42回可視化情報シンポジウム, pp.269-272, 2014.

嶋末 昂祐, 章 忠, 戸田 浩, 三宅 哲夫, 「Meyer ウェーブレットを用いたリフティングスキームによる複素数離散ウェーブレット変換」, 第42回可視化情報シンポジウム, pp.273-276, 2014.

白砂 絹和, 章 忠, 三宅 哲夫, 戸田 浩, Gabor Wavelet を用いたウェーブレット解析の離散化, 第42回可視化情報シンポジウム, pp.277-280, 2014.

加藤 毅, 章 忠, 戸田 浩, 今村 孝, 三宅 哲夫, 「方向選択性に着目した複素数離散ウェーブレット変換の設計」, 第42回可視化情報シンポジウム, pp.281-286, 2014.

加藤 毅, 章 忠, 戸田 浩, 今村 孝, 三宅 哲夫, 石川 康宏, 「方向性ウェーブレット変換の提案と医用画像処理応用」, 第193回情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, pp.1-8, 2014.

Zhong Zhang, Ikki Sawamura, Hiroshi Toda, Takuma Akiduki and Tetsuo Miyake, A New Approach to Diagnose Sleep Apnea Syndrome Using a Continuous Wavelet Transform, Proc. of the 2015 Inter. Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2015), pp.128-132, 2014.

Miyori Shirasuna, Zhong Zhang, Hiroshi Toda and Tetsuo Miyake, APPROXIMATE TIGHT WAVELET FRAME USING GABOR WAVELET, Proceedings of the 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2015), pp.105-110, 2014.

Zhong Zhang, Junji Suzuki, Tetsuo Miyake, Hiroaki Kondou and Kentarou Enastu, STUDY ON WATER LEAK DETECTION USING WAVELET INSTANTANEOUS CROSS CORRELATION, Proc. of the 2015 Inter. Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2015), pp.133-137, 2014.

Hiroshi Toda, Zhong Zhang, A NEW TYPE OF ORTHONORMAL WAVELET BASIS HAVING CUSTOMIZABLE FREQUENCY BANDS, Proc. of the 2015 Inter. Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2015), pp.99-114, 2014.

澤村一輝, 章 忠, 戸田 浩, 三宅 哲夫, 白砂 絹和, 連続 wavelet 変換を用いた無呼吸症候群診断手法の提案, 第43回可視化情報シンポジウム講演論文集,

2015 Vol.35 Suppl. No.1, pp.25-28.  
CHONG HUEI SHAN, 章 忠, 戸田 浩, 三宅 哲夫, 堀畑 聡, 丹羽 秀夫, 2次元複素数離散ウェーブレット変換による医用画像を使用した上咽頭粘膜病変の抽出, 第43回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2015 Vol.35 Suppl. No.1, pp.29-32.  
鈴木隼爾, 章 忠, 三宅 哲夫, 近藤博昭, 江夏建太朗, ウェーブレット瞬時相互相関法を用いた漏水検出の方法, 第43回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2015 Vol.35 Suppl. No.1, pp.21-24.  
白砂絹和, 章 忠, 戸田 浩, 三宅哲夫, Gabor Wavelet を用いた近似タイトウェーブレットフレームの設計, 第43回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2015 Vol.35 Suppl. No.1, pp.15-18.  
(基調講演) 戸田 浩, 章 忠, 自由自在に周波数帯域を設計できる正規直交ウェーブレット基底の研究, 第43回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2015 Vol.35 Suppl. No.1, pp.9-14.  
Zhong Zhang, Junji Suzuki Takuma Akiduki, Tetsuo Miyake, Consideration of Composing Method of the Optimized Real-Signal Mother Wavelet, Proc. of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR2016), pp.107-113, 2016.  
Zhong Zhang, Ohzora Hamada, Hiroshi Toda, Takuma Akiduki, Tetsuo Miyake, Bridge floor cracks detection by using the 2 Dimensional Complex Discrete Wavelet Packet Transform, Proc. of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR2016), pp.225--229, 2016.  
Hideo Niwa, Zhong Zhang, Chong Huei Shan, Satoshi Horihata, Yasuhide Makiyama, iagnosis of extra-laryngeal manifestation of LPRD, 120th Annual Meeting of American Academy of Otolaryngology (AAO HNSF 2016, Sept.18-21, 2016, San Diego, USA ), p.1, 2016.

〔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