

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24年5月15日現在

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：平成21年～平成23年
 課題番号：21560441
 研究課題名（和文） 完全並進不変性を有する複素ウェーブレットパケット変換の実現
 研究科題名（英文） Realization of Complex Wavelet Packet Transform with Perfect Translation Invariance
 研究代表者
 中野和司（NAKANO KAZUSHI）
 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
 研究者番号：90136531

研究成果の概要（和文）：

本研究での成果は以下のように纏められる。(1) 章らの提案した完全並進不変複素離散ウェーブレット変換 (PTI-CDWT) をそのままウェーブレットパケットへ拡張できないことを明らかにした。この場合、多重解像度的構成を省けば、構成可能となる。(2) ここでは、多重解像度的構成を行い、近似的構成ではあるが、新たに置換型複素ウェーブレットパケット変換と位相補正型複素ウェーブレットパケット変換を開発した。(3) 提案した近似並進不変複素ウェーブレットパケット変換 (ATI-CWPT) を、線形システムの入出力関係の解析に応用し、線形時変伝達特性解析へのツールとしての基礎を築いた。(4) さらに、提案した ATI-CWPT を、削岩音の異常信号解析、および地中レーダによる埋設物（金属管）の標評問題に適用し、産業応用における有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：

The results of this study are summarized as follows: (1) We showed that the perfect translation invariant Complex Discrete Wavelet Transform (PTI-CDWT) cannot be directly extended to the wavelet packet transform. But, it can be realized without multi-resolution analytical structure. (2) We realized two approximate translation invariant Complex Wavelet Packet Transforms (ATI-CWPTs) with multi-resolution analytical structure. The first is called Substitution-type Complex Wavelet Packet Transform, and the second is the Phase-Compensated Complex Wavelet Packet Transform. (3) We applied these two ATI-CWPTs to analysis of the input-output relation of linear systems. This is a basic tool for analyzing time-variant frequency characteristics of linear systems. (4) We applied our proposed ATI-CWPTs to analysis of extraordinary sound signals in rock drilling and location of buried pipes by using Ground-Penetrating Radar. The effectiveness of our developed transforms was demonstrated in industry applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：信号処理, ウェーブレットパケット

1. 研究開始当初の背景

離散ウェーブレット変換 (DWT) においては、

完全並進不変性を実現する複素離散ウェーブレット変換として、Perfect Translation

Invariant Complex Discrete Wavelet Transform (PTI-CDWT)が提案されている。これは、Hilbert 変換対の複素数のウェーブレットによって並進不変（シフト不変）を可能とする複素離散ウェーブレット変換（CDWT）である。一方、連続ウェーブレット変換は離散ウェーブレット変換に比べ一般に周波数分解能が高いが、連続ウェーブレット変換は積分計算を含むので、実際の適用にあっては離散化を行って計算せざるを得ない。この離散化により連続ウェーブレット変換は、離散時間ステップの整数倍に動かしたときにしか変換値は並進不変とはならなくなる。まとめると、離散ウェーブレット変換は高速計算が可能で、PTI-CDWT を利用すれば並進不変性をもたせることが可能となり、これは実用上大きなメリットを生み出す。これにさらに、PTI-CDWT の周波数分解能を、連続ウェーブレットと同様に高くすることができれば、実用における決定版となる。これを解決する方法の一つにウェーブレットパケット変換（Wavelet Packet Transform: WPT）がある。ウェーブレットパケット変換は離散ウェーブレット変換の一般化である。信号のウェーブレットパケット分解は、離散ウェーブレット変換に対して多重解像度解析（MRA）と似たやり方で実行される。その違いは、ウェーブレットパケット信号分解では各レベルにおいて近似係数と詳細係数両方とも、さらに分解されるということである。多重解像度解析では、分解されるにつれて配置されるウェーブレット係数の数はダウンサンプリングにより減少するが、全体としての情報量は元の信号と同じになるように設計されている。つまりこれは情報論的に冗長性が無い状態である。しかし、この冗長性を排除したために並進不変性が欠如してしまう。例えば、異常信号の検出問題などで並進不変性をもたないまま解析を行うと、その信号の発生時刻（位置）を安定して検出することはできないという大きな問題を生ずる。したがって、ウェーブレットパケット変換において並進不変性を実現できれば、高速処理を保持したままで高い周波数分解能が確保でき、広範な工学応用が可能となる。本研究の目的は、多重解像度解析の一般化であり、並進不変性を実現する複素ウェーブレット（WPT）の構成法を確立し、もってその工学応用に寄与することであ

る。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多重解像度解析の一般化であり、並進不変性を実現する複素ウェーブレット（Perfect Translation Invariant Complex Wavelet Packet Transform, PTI-CWPT）の構成法を確立し、もってその工学応用に寄与することである。以下に具体的に記す。

(1) 完全並進不変複素ウェーブレット変換（PIT-CDWT）のウェーブレットパケットへの拡張：章らの提案した完全並進不変複素離散ウェーブレット変換（PTI-CDWT）をそのままウェーブレットパケットへ拡張した場合、並進不変性が満足されないことを証明する。

(2) 完全並進不変性を実現する複素ウェーブレットパケット変換方法：ウェーブレットパケットの構成可能条件は、分割技法と呼ばれる補題（正規直交関数により張られた空間は、任意のツースケール数列を用いて2つの直交する空間に分割できる）によるものである。この分割技法において注目すべきは、ウェーブレット関数に関係ない任意のツースケール数列を用いても成立するという点である。これより、従来のツースケール数列を用いても、ウェーブレットパケットと同様な変換が行えることがわかる。そこで、従来とは違う新しいツースケール数列に置き換えて、並進不変性を保存した複素ウェーブレットパケットを構成することを考える。

(3) 完全並進不変性を実現する複素ウェーブレットパケット変換方法：複素ウェーブレットパケット変換をした場合、ツースケール数列によって変換された後にさらに変換されるウェーブレットパケット係数は並進不変性が欠如してしまう。これは、ツースケール数列によって変換されたウェーブレットパケット係数は Hilbert 変換対となっているため、このウェーブレットパケット係数を利用して、さらに分解を進めれば位相がずれてしまう。そこで、時間軸方向への水平方向移動のシフトパラメータを使用して、Hilbert 変換対となることによりずれた分だけの位相を元に戻すための新たなツースケール数列を用意することを考える。これにより、位相のずれを補正しながら変換し並進不変性を実現できる。

(4) PIT 複素ウェーブレットパケット変換の

実現とシステム解析応用：本研究で開発される複素ウェーブレット packets 変換に要求される項目は、[1] 多重解像度解析と同等な高速処理、[2] 連続ウェーブレットと同等な周波数分解能、[3] 信号のサンプリング位置による変換係数が不変であること（並進不変性）、[4] 元の信号を逆変換により再構成できること（再構成可能性）である。最後の[4]については、異常信号の検出など信号の解析に用いる場合には必要はない。しかし、信号分離や信号源推定など元の信号を再構成する必要がある場合にはこれが必要となる。提案する PTI-CWPT の応用として、混合信号（音声・電磁波など）の分離問題、特に信号源に対してセンサ数が少ない場合の劣決定問題、さらに線形システムの入出力関係とウェーブレット packets 変換、時変システム、非線形システムの同定手法の開発を考える。

3. 研究の方法

平成 21 年度 (完全並進不変複素離散ウェーブレット変換 (PIT-CDWT) のウェーブレット packets への拡張 (完全並進不変性を実現する置換型不変複素ウェーブレット変換の開発)、およびシステム解析への応用)：まず、章らの提案した完全並進不変複素離散ウェーブレット変換 (PTI-CDWT) をそのままウェーブレット packets へ拡張した場合、並進不変性が満足されないことを証明する。次いで、完全並進不変性を実現する置換型複素ウェーブレット packets 変換を提案する。ウェーブレット packets の構成可能条件は、分割技法と呼ばれる補題によるものである。この分割技法において注目すべきは、ウェーブレット関数に関係ない任意のツースケール数列を用いても成立するという点である。これより、従来のツースケール数列を用いても、ウェーブレット packets と同様な変換が行えることがわかる。ここでは、従来とは違う新しいツースケール数列に置き換えて並進不変性を保存することを考える。この複素ウェーブレット packets を置換型複素ウェーブレット packets と呼ぶことにする。これの具体的な応用として、音声分離の劣決定問題や電磁波の雑音分離問題を取り扱う。

平成 22 年度 (完全並進不変性を実現する位相補正型複素ウェーブレット packets 変換の開発、およびシステム解析への応用)：複素ウ

ェーブレット packets 変換をした場合、ツースケール数列によって変換された後にさらに変換されたウェーブレット packets 係数は並進不変性が欠如している。これは、ツースケール数列によって変換されたウェーブレット packets 係数は Hilbert 変換対となっているため、このウェーブレット packets 係数を利用してさらに分解すれば位相がずれてしまう。そこで、時間軸方向への水平方向移動のシフトパラメータを使用して、Hilbert 変換対となることによりずれた分だけの位相を元に戻すための新たなツースケール数列を 2 つ用意することを考える。これにより位相のずれを補正しながら並進不変性を保持できる。この並進不変性を保存した複素ウェーブレット packets を位相補正型複素ウェーブレット packets と呼ぶことにする。これの具体的な応用として、レーダ画像の位相推定、線形システムの入出力関係とウェーブレット packets 変換、システム入出力間の無駄時間の推定、時変システムおよび非線形システム同定手法開発への応用を考える。

平成 23 年度 (PTI-CWPT の一般的構成法の確立とシステム解析への応用)：提案される 2 つの複素ウェーブレット packets 変換は、どちらも並進不変を満たし実際の計算に適用できる。しかし、置換型複素ウェーブレット packets 変換は完全再構成が可能であるが、ツースケール数列を置き換えるために再計算の必要があり、計算量が増えてしまう問題がある。また、位相補正型複素ウェーブレット packets 変換は 6 つのツースケール数列を用意することにより簡単に変換を行えるが、一部が直交でないため完全に再構成することができない。したがって、再構成が必要な問題に対しては置換型複素ウェーブレット packets 変換が有用であり、再構成が必要でない問題に対しては、簡単に変換計算のできる位相補正型複素ウェーブレット packets 変換が有用である。したがって、最終年度までには、[1]～[4]のすべてを満足する複素ウェーブレット packets 変換の実現可能条件を明らかにし、その具体的な構成法を示す必要がある。これがウェーブレット構成論に寄与することは勿論、工学応用（特にシステムおよび信号解析、信号処理の分野）の観点からも極めて重要である。前年度までに実施された、混合

信号(音声・電磁波など)の分離・検出問題, 劣決定問題, レーダ画像の位相推定, 線形システムの入出力関係とウェーブレットパケット変換, システムの無駄時間推定問題, 時変システム, 非線形システム同定手法の精緻化および総括を行い, 今後に残された問題点を明らかにする.

4. 研究成果

本研究での成果は以下のように纏められる.

(1) 章らの提案した完全並進不変複素離散ウェーブレット変換 (PTI-CDWT) をそのままウェーブレットパケットへ拡張できないことを明らかにした. この場合, 多重解像度的構成を省けば, 構成可能となる. (2) ここでは, 多重解像度的構成を行い, 近似的構成ではあるが, 新たに置換型複素ウェーブレットパケット変換と位相補正型複素ウェーブレットパケット変換を開発した. これらを近似並進不変複素ウェーブレットパケット変換 (ATI-CWPT) とよぶ. (3) 提案した ATI-CWPT を, 線形システムの入出力関係の解析に応用し, 線形時変伝達特性解析へのツールとしての基礎を築いた. また閉ループ系の同定のためのフィルタ設計に応用した. (4) さらに, 開発した ATI-CWPT を, 削岩音の異常信号解析, および地中レーダによる埋設物 (金属管) の標評問題に適用し, 産業応用における有用性を示した.

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 15 件)

学術雑誌

- ① 松井義弘, 木村和彦, 中野和司: FRIT 法の状態フィードバック制御への応用, 電気学会論文誌, 査読有, Vol. 132/Sec C (2012) (in press)
- ② 小林 允, 中野和司: 地中レーダ受信信号のノイズ解析とその除去手法, 電気学会論文誌, 査読有, Vol. 132/Sec D, No. 6 (2012) (in press)
- ③ 小林 允, 中野和司: 地中レーダ受信信号における反射波の強調手法, 電気学会論文誌, 査読有, Vol. 132/Sec D, No. 4 (2012) (in press)
- ④ 澤田賢治, 田中香介, 新 誠一, 熊谷賢治, 米田尚登: 半導体搬送用台車のモデリングとキャリブレーション, 査読有, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 9, pp. 412-419 (2011)
- ⑤ 松井義弘, 木村知彦, 中野和司: 閉ループステップ応答データを用いた機械系の周波数応答推定, 電気学会論文誌, 査読有, Vol. 131/Sec C, No. 4, pp. 751-757 (2011)
- ⑥ KENSUKE HAYASHI and SEIICHI SHIN, ROAD TYPE ESTIMATION BY WAVELET ANALYSIS OF RUNNING TIRE SOUND, Int. J. Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Special Issue on New Theories and Technological Advances of Wavelet Transform, 査読有, Vol. 8, No. 4, pp. 645-657 (2010)
- ⑦ MASAOKI OSAKE, KAZUSHI NAKANO, TETSUYA TABARU and SEIICHI SHIN: Input-Output Relation of Linear Systems By Using Complex Wavelet Packet Transform, Int. J. Wavelets, Multiresolution and Information Processing, Special Issue on New Theories and Technological Advances of Wavelet Transform, 査読有, Vol. 8, No. 4, pp. 521-535 (2010)
- ⑧ Jorge Ivan Medina Martinez, Kazushi Nakano and Kohji Higuchi: New Approach for IIR Adaptive Lattice Filter Structure using Simultaneous Perturbation Algorithm, IEEJ Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol. 130, No. 4/Sec D, pp. 422-429 (2010)
- ⑨ Jorge Ivan Medina Martinez, Kazushi Nakano and Sawut Umerujan: Vibration Suppression Control of a Flexible Arm

using Non-linear Observer with Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, Journal of Artificial Life and Robotics, 査読有, Vol.14, No.4, pp.539-544 (2010)

⑩ Jorge Ivan Medina Martinez, Kazushi Nakano and Kohji Higuchi: Parameter Estimation using a Modified Version of SPSA Algorithm Applied to State Space Models, IEEJ Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol.129, No.12/Sec D, pp.1187-1194 (2009)

⑪ H. Peng, J. Wu, G. Inoussa, Q. Deng and K. Nakano: Nonlinear system modeling and predictive control using the RBF nets-based quiasi-linear ARX model, Control Engineering Practice, 査読有, Vol.11, No.1, pp.59-66 (2009)

解説

⑫ 新 誠一: PSからみたモデルベース開発への適応と考え方と課題, 計装, 査読有, Vol.54, No.10, pp.59-61 (2011)

⑬ 中野和司, 豊田幸裕: 産業プロセスの解析と同定の現状-時系列解析アプローチ, 計測と制御, 査読有, Vol.49, No.7, pp.427-432 (2010)

⑭ 新 誠一, 中野和司: ウェーブレット解析の産業応用のあゆみと展望, 電気学会会誌, 査読有, Vol.129, No.10, pp.664-667 (2009)

⑮ Umerujan Sawut, 中野和司: VSSオブザーバを用いた電子制御スロットルシステムの位置制御, 日本フルードパワーシステム学会, 査読有, Vol.40, No.3, pp.162-166 (2009)

[学会発表] (計19件)

国際会議論文

① T. Uchikado, M. Kobayashi, K. Nakano and S. Shin: Emphasis of GPR Signals Reflected from Buried Pipes Using

Statistical Clustering Techniques, ICWAPR 2012, 査読有, Shaanxi, China (2012) (accepted)

② M. Kobayashi, T. Uchikado and K. Nakano: Wavelet-based Position Detection of Buried Pipes from GPR Signals by Use of Angle Information, ICWAPR 2012, 査読有, Shaanxi, China (2012) (accepted)

③ Shota Hamamatsu, Kenji Sawada, and Seiichi Shin: Multi Function Printer Controlled by Images, Proc. 2010 IRAST International Congress on Computer Applications and Computational Science (CACS 2010), 査読有, Paramount Hotel, Singapore, pp.334-337 (2010.12)

④ Kosuke Tanaka, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Kenji Kumagai, and Naoto Yoneda, Modeling and Calibration of Automatic Guided Vehicle, Proc. SICE 2010, 査読有, pp.2485-2490, Grand Hotel, Taipei, Taiwan ROC (2010.8)

⑤ Toru YAMAMOTO and Seiichi SHIN, VISUALIZATION OF MULTI-CHANNEL VITAL DATA AT ENGINE IDLING BASED ON WAVELET ANALYSIS, Proceedings of the 2010 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 査読有, Qingdao, pp.381-385 (2010.7)

⑥ Jorge Ivan Medina Martinez and Kazushi Nakano: Parameter Estimation in Neural Networks by Improved Version of Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Algorithm, 4B03-5, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 査読有, Fukuoka, pp.4567-4572 (2009.8)

⑦ Tokubai Ki, Kohji HIGUCHI, Kazushi NAKANO, Tatsuyoshi KAJIKAWA, Satoshi YOSHIKAWA, Koji MATSUSHITA and Fumiho

CHINO: Parameter Determining Method of Robust Digital Controller for PWM Power Amplifier, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 査読有, Fukuoka, pp. 4553-4558 (2009.8)

⑧ Toru Yamamoto, Keisuke Hayashi and S. Shin, Visualization of multi-dimensional living body information based on wavelet transformation analysis, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 査読有, Fukuoka, pp.1865-1869 (2009.8)

⑨ Jorge Ivan Medina Martinez, Kazushi Nakano: Vibration Suppression control of a flexible arm using non-linear observer with simultaneous perturbation stochastic approximation, 14th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, 査読有, Beppu (2009.2)

国内会議発表

⑩ 広瀬, 中野: ウェーブレット変換による状態遷移を含む心室細動の識別, 電気学会産業計測制御研究会, 査読有, 横浜国立大学 (2012.3)

⑪ 菅野, 中野: ウェーブレットパケットによる削岩音の解析と地質変化の推定, 電気学会産業応用部門大会, 査読有, 琉球大学 (2011.9)

⑫ 菅野, 中野: ウェーブレットパケットによる削岩音の解析と地質変化のモニタリング, 電気学会産業計測制御研究会, 査読有, 千葉工業大学 (2011.3)

⑬ 小林, 中野: 地中レーダ受信信号における埋設管反射波の強調, 電気学会産業計測制御研究会資料, 査読有, 千葉工業大学 (2011.3)

⑭ 小林, 中野, ほか 5 名: 地中レーダ受信信号における埋設管反射波の検出法, 電気学会産業計測制御研究会資料, 査読有, 慶應義

塾大学 (2010.12) <電気学会産業応用部門優秀論文発表賞>

⑮ 小林, 中野, ほか 4 名: ガボールウェーブレット変換による地中レーダ受信信号の強調について, 電気学会産業計測制御研究会資料, 査読有, 慶應義塾大学 (2009.12)

招待講演

⑯ Seiichi Shin, Industrial Application of Wavelet Analysis, Special Lecture of Department of Industrial and System Engineering, 査読無, Chongwon University, (2009年7月27日)

⑰ 新 誠一, Wavelet 解析と産業応用, 豊橋技術科学大学生産システム工学大学院特別講義Ⅲ, 査読無, 豊橋技術科学大学講義室 A-101, (2009年9月16日)

⑱ Seiichi Shin: Industrial Applications of Wavelet Analysis, Seminar of Department of Electrical and Computer Engineering Faculty of Engineering, 査読無, E502-32, Engineering Block 5, National University of Singapore, (6 Dec. 2010)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 埋設物探査装置
発明者: 中野和司, 小林 允
権利者: 中野和司ほか
種類: 特許
番号: 特願 2010-123940
出願年月日: 2010年5月31日
内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.ljung.ee.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野和司 (NAKANO KAZUSHI)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号: 90136531

(2) 研究分担者

新 誠一 (SHIN SEIICHI)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号: 20134463