

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560423

研究課題名（和文）

複素数離散ウェーブレット変換による革新的金属めっき表面欠陥検出手法の開発

研究課題名（英文） Development of Innovative Method for Defect Detection on Metallic Surface using Complex Discrete Wavelet Transform

研究代表者

章 忠（ZHANG ZHONG）

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：50254579

## 研究成果の概要：

本研究では、完全シフト不変性を有する複素数離散ウェーブレット変換の設計手法を確立するとともに、金属めっき製品における表面欠陥検出技術への応用確立を目的として研究を行った。特に、完全シフト不変性の実現は、従来のウェーブレット変換において未踏の技術であったところを、複素数直交ウェーブレットとそのスケーリング関数の設計により実現する手法を開発した。また、これによって得られる解析結果の安定性に着目し、熟練検査工と同等に、めっき表面のわずかな傷をも検出する応用技術を開発した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 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：センシング情報処理、ウェーブレット変換、欠陥検出

## 1. 研究開始当初の背景

研究の学術的背景

(1) 生産ラインにおいて、金属めっき、特にクロムめっき表面のカメラによる自動欠陥検査は、鏡面反射光が強く、有用なランダム反射光を検出しにくいいため、非常に困難であり、実用化技術はまだ見うけられない。

(2) 金属めっき表面欠陥検査には、表面の反射光の中から強い鏡面反射光と弱いランダム反射光を分離する必要がある。申請者らはすでに金属表面に適用できる反射モデルを

開発し、鏡面反射光とランダム反射光を分離する手法を提案した。ところが、この手法は多数の画像が必要となり、その手法も最適化されていない。

(3) 一方、欠陥検出には、最新の信号・画像解析ツールである離散ウェーブレット変換(DWT)が広く応用され、有用性が示されている。しかし、DWTは解析信号・画像の微小な位置変化に対してウェーブレット係数が変動し、結果に深刻な影響を与えてきた。これに対し、複素数離散ウェーブレット変換

(CDWT)は、最も有効で実用的な手法の一つである。申請者らの研究は従来不可能とされてきたすべての周波数領域におけるCDWTを、世界で初めて実現し、ウェーブレット係数の最大変動率を8.4%に抑え著しい改善を施した。さらにこのCDWTを繊維表面検査技術に適用し、小さな擦り傷や染めムラなどの検出に成功し、実用化してきた。

(4)ところが、CDWTにおいても、ウェーブレット係数の変動率をゼロにできなかった。しかも、特にクロムめっき表面の欠陥検出においては、検出に利用するランダム反射光が弱く、微細なウェーブレット係数の変動も解析結果に大きな影響を与えることとなる。従って、欠陥検出には完全なシフト不変性の実現が必要である。しかし、従来理論でも、完全なシフト不変CDWTの実現は不可能で、その原因の理論的解明も、国内外の研究課題となっている。

## 2. 研究の目的

背景で述べたように、金属表面欠陥検査に対して、完全シフト不変なCDWTの構築と金属めっき表面の反射モデルの確立が非常に重要であり、この実現により、従来困難とされてきためっき表面欠陥検査の自動化を実現することが可能となる。

申請者らは試行錯誤的な予備実験を行った結果、(双)直交ウェーブレットおよびそのスケーリング関数をうまく設計すれば、完全なシフト不変性を実現する可能性があるという知見を世界で始めて得るに至っている。しかし、その理論的な解釈およびこのようなウェーブレットの設計法がまだ確立できていない。

以上の問題点を解決し、完全なシフト不変CDWTを実現することは十分可能であることから、本研究の目的をCDWTの完全シフト不変の実現とその設計法確立、ならびに、金属表面反射モデルを構築し、欠陥検査システムを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1)表面検査装置の導入

本研究では、まず図1のような検査装置を導入した。本装置は、検査対象物体を外部光から遮断した状態で表面検査を行うものである。本装置には、カメラや光源を取り付けたアームがあり、装置中央の検査対象物の周囲をステップモータにより回転移動する機構となっている。これにより、任意のカメラ・光源位置関係が設定可能である。

### (2) 反射モデルの最適化

申請者らはすでに金属表面に適用できる反射モデルを開発し鏡面反射光とランダム

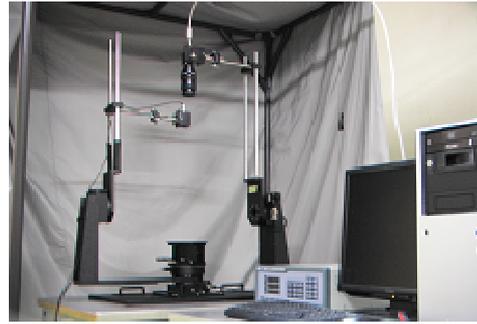


図1 導入した検査装置

反射光を分離する手法を提案していた。ところが、反射モデルのパラメータを定めるためには多数の画像が必要となり、最適化されていない。本研究では最適化手法や前項の装置を利用した画像取得により、少ない画像で欠陥とエッジの区別ができるように反射モデルの最適化等を行う。

### (3) 複素数離散ウェーブレット変換理論の明確化と完全シフト不変なウェーブレット設計法の開発

申請者らはこれまでに、CDWTの理論を検討してきた。特に、その豊富な開発経験から、多様で試行錯誤的な予備実験が自由に行える環境があり、そこから(双)直交ウェーブレットおよびそのスケーリング関数をうまく設計すれば完全シフト不変性を実現する可能性がある、という知見を世界で始めて得ている。これをまず理論的に明確にする。

その上で、双直交ウェーブレットの構成法を提案し、補間法を工夫することにより、従来不可能とされたすべての周波数領域におけるCDWTを、世界で初めて実現した。そして、任意の直交ウェーブレットからHilbert変換ペアを作成する手法を開発し、完全シフト不変なウェーブレット設計の指針が得られた。本研究では、得られた指針に従って完全シフト不変なウェーブレット設計法を開発する。

### (4) CDWTによる金属めっき表面欠陥検出手法の開発と、検査システムの構築

表面反射モデルの最適化により、少ない画像で欠陥とエッジがはっきり区別でき、また完全なシフト不変CDWTの実現により画像の微細な変化を捉えることができる。そして従来のDWTに使用できないパターンマッチングを用いて欠陥とエッジを区別でき欠陥検出が可能である。これらの技術を活用し、金属めっき表面欠陥検出手法を開発して検査システムを構築する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 完全シフト不変ウェーブレット変換の構築

成果論文 [1] では複素数離散ウェーブレット変換におけるシフト不変性条件を証明し、論文 [2] では任意の直交ウェーブレットをもとにした Hilbert 変換ペアの複素数ウェーブレットの設計法を提案した。さらに、論文 [3] ではそれを用いた複素数離散ウェーブレット変換の計算法を提案し、それぞれ報告した。これにより複素数離散ウェーブレット変換において、利用できる複素数ウェーブレットの種類を飛躍的に増加させることができた。しかし任意の直交ウェーブレットをもとにした Hilbert 変換ペアの複素数ウェーブレットの設計法では、完全なシフト不変性を実現する複素数ウェーブレットの設計には、至らなかった。すなわち、インパルス信号を時間軸方向に1サンプルずつシフトさせた時の、各レベル（各周波数帯域）におけるエネルギー変動率を、完全にゼロに抑えることはできなかった。これまで設計した複素数ウェーブレットの中で、最も精度の高いシフト不変性を持つものは、RI-0-Spline ウェーブレット（これは Chui の3次0 Spline ウェーブレットをもとに設計した複素数ウェーブレット）であるが、上記のインパルスのシフトに対するエネルギー変動率は1.82%であり、完全にゼロではなかった。

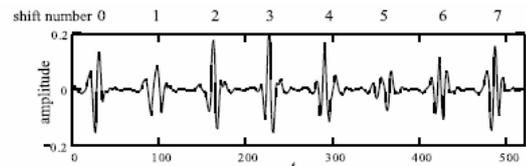
そこでより高い精度の処理のために、この変動率を理論的に完全にゼロに抑えること、すなわち完全シフト不変性を実現する複素数ウェーブレットの設計法を模索してきた。これについては、Meyer ウェーブレットを基礎とした、その設計法を確立し、論文 [4] にまとめた。

具体的には、「スケーリング関数の実数部と虚数部の形状が完全に一致し1/2サンプルずれた状態である時に CDWT において完全なシフト不変性を実現される」という Hilbert 変換ペア複素数ウェーブレットの完全シフト不変性条件を示すとともに、直交ウェーブレットの Meyer ウェーブレットの性質、すなわち Meyer ウェーブレットのスケーリング関数を時間方向に任意に平行移動させたものは新たな直交ウェーブレットのスケーリング関数となる性質に着目した手法を開発した。これにより Meyer ウェーブレットのスケーリング関数を基本とした完全シフト不変性 (Perfect Translation Invariance, PTI) を有する複素数ウェーブレットの設計方法を提案した。またこの PTI 複素数ウェーブレットの形状には、さまざまなバリエーションが存在することを確認した。

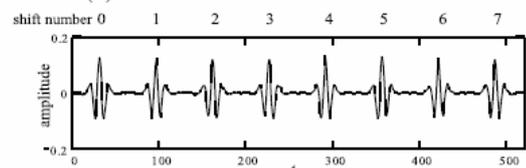
提案した PTI 複素数ウェーブレットについ

ては、インパルス変動に対するインパルス応答エネルギー変動を観察する方法により、その性能を評価した。図 2(a) は、Daubechies 6 ウェーブレットを用いた従来の DWT における分解レベル-3 の結果である。ここでは、インパルス信号を1サンプルずつ変動させて DWT を実行し、分解レベル-3 のウェーブレット係数のみを残す。そして他の係数はすべて0として逆変換した波形を、インパルス信号の変動準に並べたものである。また図 2(b) は DWT に代わって CDWT を適用し、同様のインパルス応答波形の変動の様子を示したものである。このようにシフト変動が生じた場合、分解レベル-1 ~ -4 のインパルス応答波形のエネルギー変動は図 2(c), (d) のように変化する。このうち、CDWT は DWT に比べて安定しているが、その変動率は最大 7.5% であり、完全に0にはならない。

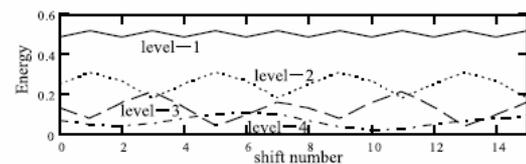
一方、図 3 には本研究で開発した PTI 複素数ウェーブレット変換による結果を示す。この結果、図示のようにエネルギー変動率は最大でも 0.0001% となり、図 2 に示した CDWT の結果 (7.5%) と比べても非常に小さく、計算誤差による変動の範囲内と評価できる結果が得られた。



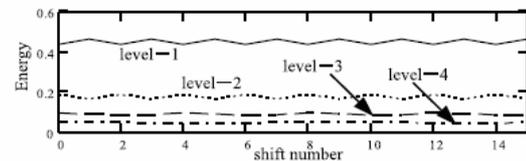
(a) The DWT's waves of the level -3



(b) The CDWT's waves of the level -3



(c) The DWT's fluctuations of energy: 69.6%



(d) The CDWT's fluctuations of energy: 7.5%

図 2 分解レベル-3 におけるインパルス信号のシフト変動に対するインパルス応答波形

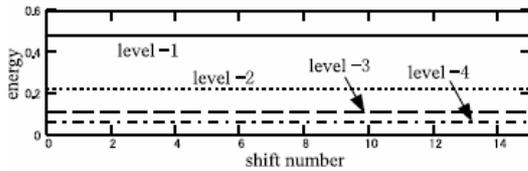


図3 提案するPTI複素数ウェーブレット変換によるインパルス変動に対するインパルス応答エネルギー変動結果

この設計法により、幅広い形状を持った、完全シフト不変性の複素数ウェーブレットの設計が可能となり、設計可能な形状を1種類に限定することなく、あらゆる形状のものが、連続可変的に設計可能である。例えば実数部と虚数部は、対称、反対称のペアのみならず、非対称も含めて、さまざまな形状のものが無限に設計可能で、それらのすべてが完全シフト不変性を実現できていることを確認した。

これにより、種々の解析においてその変動量が微小な現象であっても安定解析可能なツールの開発ができた。

## (2) 欠陥検出システムの実装

図1に示した装置では、光源位置の設定自由度に冗長性がある。この光源位置設定に関する幾何学的条件を明らかにすることで、(3)に示す欠陥検出において、カメラ位置設定軸との干渉を回避するとともに、最適な光源位置移動経路の算出を可能とした。

上記の結果にもとづき、図1に示す装置に欠陥検出システムを実装した。本手法では、ある固定のカメラ位置において異なる光源方向の多数の画像を取得する。そして、金属表面反射モデルにより3つの異なる方向光源から得られた基本画像を用いて新たな画像1枚を構成し、鏡面反射光を削除する。さらに鏡面反射が削除された画像に対して、図4に示すように複素数離散ウェーブレット変換により分解処理を施し、4つの画像RR、RI、IR、IIを得る。ただし、画像RRは横と縦とも複素数ウェーブレットの実部により処理した画像、画像RIは横が複素数ウェーブレットの実部、縦が複素数ウェーブレットの虚部により処理した画像、画像IRは横が複素数ウェーブレットの虚部、縦が複素数ウェーブレットの実部により処理した画像、画像IIは横と縦とも複素数ウェーブレットの虚部により処理した画像である。

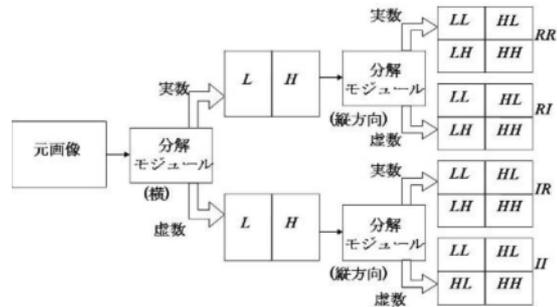


図4 複素数離散ウェーブレット変換の分解アルゴリズム

特に上記の分解アルゴリズムに、(1)に示した完全シフト不変CDWTを適用することで、原画像の情報量が少ない場合でも解析精度を安定化できた。

ここで得られた4つの画像を式(1)により1つの画像に変換したあと、ノイズ除去や鮮鋭化などの処理を経て、逆複素数離散ウェーブレットにより画像を再構成する。

$$d_{x,y}^j = \sqrt{(d_{RR}^j)^2 + (d_{RI}^j)^2 + (d_{IR}^j)^2 + (d_{II}^j)^2} \quad (1)$$

このように処理した欠陥なしの画像と欠陥ありの画像とのパターンマッチングを行い、欠陥検出を行うことが可能となる。

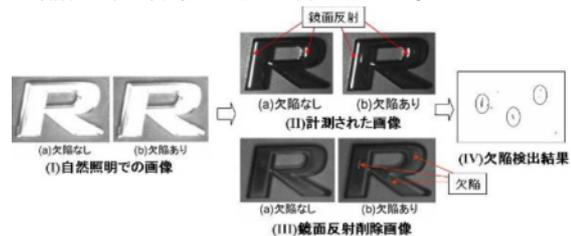


図5 クロムめっき表面の欠陥検出の例

図5に示すのはクロムめっき表面の欠陥検出の例である。ただし、図5の(1)は従来の自然照明の場合に得られたクロムめっき表面の画像であり、(II)は図2に示した計測システムにより得られた画像、(III)は(II)の画像に対して表面反射モデルを用いて鏡面反射光を削除した画像、(IV)は(III)の画像に対して複素数離散ウェーブレット変換によりノイズ除去や欠陥の鮮鋭化などの処理を行い、そしてパターンマッチング処理して得られた欠陥画像である。また(b)に示した欠陥ありの傷は3箇所、幅約0.01mm、長さ約3mmである。図5に示すように、従来の自然照明での画像について、欠陥なしと欠陥ありの表面の区別はきわめて困難であるが、本技術を用いて、表面反射モデルにより鏡面反射を削除すると欠陥なしと欠陥ありとの違いははっきり現れる。そして、複素数離散ウェーブレット変換によりノイズ除去や欠陥の鮮鋭化などの処理を行い、パターンマッチング処理して欠陥を検出した。すなわち、本技術により鏡面反射の強いク

ロムめっき表面の欠陥を自動的に検出することができた。

#### 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5件)

章 忠、戸田 浩、シフト不変な複素数離散ウェーブレット変換 第1報:複素数離散ウェーブレット変換の理論と原理、Journal of Signal Processing 「信号処理」, Vol.11、No.5、387-400、2007、査読有

戸田 浩、章 忠、シフト不変な複素数離散ウェーブレット変換 第2報:直交ウェーブレットを基にした複素数ウェーブレット設計法の一提案、Journal of Signal Processing 「信号処理」, Vol.11、No.5、401-412、2007、査読有

戸田 浩、章 忠、シフト不変な複素数離散ウェーブレット変換 第3報:新たな複素数離散ウェーブレット変換の計算法、Journal of Signal Processing 「信号処理」, Vol.11、No.5、413-424、2007、査読有

戸田 浩、章 忠、完全シフト不変性を実現する複素数離散ウェーブレット変換、「信号処理」, Vol.12、No.3、155-166、2008、査読有

Z.Zhang、S.Q.Ren、T.Miyake、H.Fujiwara、T.Imamura、Processing Reflections on Metallic Surfaces Using a Special Random Sampling Method、International Journal of Innovative Computing、Information and Control、Vol.4、No.7、1595-1606、2008、査読有

##### [学会発表](計5件)

戸田 浩、章 忠、Perfect Translation Invariance with a Wide Range of Shapes of Hilbert Transform Pairs of Complex Wavelets、the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition、2007.11.2、Beijing、China

戸田 浩、章 忠、完全シフト不変性を実現する複素数離散ウェーブレット変換、第一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、2007.10.24、愛知県豊橋市

S.Q.Ren、Z.Zhang、T.Miyake、H.Fujiwara and T.Imamura、Inspection of Smooth Metallic Surface Using Complex Discrete Wavelet Transform、International Conference on Innovative Computing、Information

and Control 2008、2008.6.17、Dalian、China

Hiroshi Toda、Zhong Zhang、VARIABLE-DENSITY COMPLEX DISCRETE WAVELET TRANSFORM BASED ON PERFECT TRANSLATION INVARIANCE、the 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition、2008.8.30、Hong Kong、China

戸田 浩、章 忠、ウェーブレットの時間周波数密度を可変可能にする完全シフト不変・複素数離散ウェーブレット変換、第二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、2008.09.17、愛知県豊橋市

##### [図書](計0件)

##### [産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 信号検出装置、信号検出方法及び信号検出装置の製造法

発明者: 章 忠

権利者: 豊橋技術科学大学

種類: 特願

番号: 2008-262688

出願年月日: 2008.10.09

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

##### [その他]

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

章 忠 (ZHANG ZHONG)

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 50254579

##### (2)研究分担者

三宅 哲夫 (MIYAKE TETSUO)

豊橋技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 60239366

今村 孝 (IMAMURA TAKASHI)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号: 10422809

##### (3)連携研究者

戸田 浩 (TODA HIROSHI)

豊橋技術科学大学・メディア科学リサーチセンター・客員准教授

藤原 久永 (FUJIWARA HISANAGA)

岡山県工業技術センター・応用電子グループ・グループ長