

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560507

研究課題名(和文) マイクロ振動デバイス開発を促進する高感度3次元振動モード可視化システム

研究課題名(英文) High sensitive three-dimensional vibration mode visualization systems accelerating microvibration device developments

研究代表者

渡部 泰明 (Watanabe, Yasuaki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：60175130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：圧電デバイスは、情報通信機器を始めとして多くの電子機器に使用されている。その設計では、その主モードとスプリアモードの結合回避が重要である。実験的な検証により、解析結果からは得られないスプリアモードに関する情報を得ることができる。しかしながらこれらの測定法は、被測定デバイス表面を機械的に走査することで得られたデータから振動分布を再構成するものであり、光学系の精密な調整や走査のための測定時間が必要となる。

本研究ではレーザスペckル法に、ウェーブレット変換を用いたノイズ除去機構を導入しその効果を検証した。

研究成果の概要(英文)： The piezoelectric device is used in much electronic equipment including an information and communication apparatus. FEM (finite element method) is usually used for the design, and it becomes the convincing means to measure the vibration mode of the piezoelectric device produced experimentally in design inspection experimentally. By experimental inspection, I can get the information about the spurious mode which is not provided from an analysis result.

In this laboratory, you suggest the laser speckle method visualizing a vibration mode at high speed using interference light (speckle) and an image processing technology of the air-light to produce when you irradiated the coherent light such as the laser beam to piezoelectric device appearance handled coarsely. In addition, the measurement of the vibration distribution is possible very in a short time because I do not need mechanical scanning.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：計測システム

キーワード：レーザスペckル 圧電振動子 ウェーブレット変換

1. 研究開始当初の背景

圧電デバイスは、情報通信機器を始めとして多くの電子機器に使用されている。その設計には通常 FEM (有限要素法) が用いられ、設計検証には試作された圧電デバイスの振動モードを実験的に計測することが有力な手段となる。解析結果と実験結果の比較を行うことで、設計の信頼性を保証することができる。また、圧電デバイスの設計では、その主モードとスプリアモードの結合回避が重要である。実験的な検証により、解析結果からは得られないスプリアモードに関する情報を得ることができる。

当初、マイクロ振動デバイス開発を中心に作業を進めたが、東日本大震災の影響もあり、高い周波数に素子が手に入らなくなり、ノイズ除去機構を導入することが重要であることを確認したため、急遽ウェーブレット変換を用いた方向へシフトした。

2. 研究の目的

マイクロ振動デバイス開発を中心に作業を進めたが、上述の理由によりウェーブレット変換を用いた方向へシフトした。

3. 研究の方法

ウェーブレット変換を用いたノイズ除去機構を導入しその効果を検証した。ウェーブレット変換は短時間フーリエ変換のような時間-周波数解析手法の一種であり、信号処理や画像処理の分野において広く用いられる手法である。現在のシステムにおいてはデバイス非駆動時にも測定環境によるノイズが存在しており、このノイズが振動モード測定の精度を低下させる。そのため振動分布画像から測定環境によるノイズを除去することで、より精度の高い測定結果を得られることが期待できる。従来のシステムとノイズ除去機構を導入したシステムによる AT カット水晶振動子の主振動の測定を通して、その有用性を検証した。

図 1 に測定に用いるシステムのブロック図を示す。レーザー光を被測定デバイス表面に照射し、スペックルを発生させる。Network Analyzer でデバイスの共振周波数を測定し、Function Generator でデバイスを駆動する。デバイス駆動中は振動により光路差が変化するため、スペックルの輝度もそれに伴って変化する。CCD カメラにより振動中の 2 状態のスペックル画像を撮影し、2 画像の輝度の相関係数を計算することで振動分布を得る。この方法では面内振動、面外振動どちらも測定可能である。

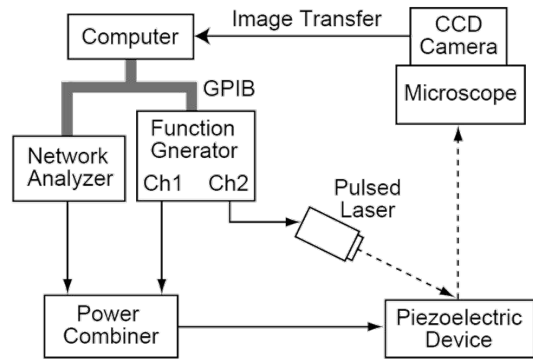


図 1: システムブロック図

システムに使用したレーザーは、公称波長 655nm の赤色レーザーであり、コリメータレンズにより出力光を平行化している。また、CCD カメラは 16 bit の輝度分解能を有している。

画像データは 2 次元の離散データとして与えられるものとし、画像データ  $f(m,n)$  をレベル 0 のスケーリング係数  $s_{m,n}^{(0)}$  とみなす。まず、横軸方向に離散ウェーブレット変換を行い、その係数に対して縦軸方向に離散ウェーブレット変換を行う。レベル  $j$  のスケーリング係数  $s_{m,n}^{(j)}$  に対して離散ウェーブレット変換を行うと、図 2 のように以下の 4 つの成分に分解される。

$$s_{m,n}^{(j+1)} = \sum_l \sum_k \overline{p_{k-2m}} \overline{q_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}$$

$$w_{m,n}^{(j+1,h)} = \sum_l \sum_k \overline{p_{k-2m}} \overline{q_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}$$

$$w_{m,n}^{(j+1,v)} = \sum_l \sum_k \overline{q_{k-2m}} \overline{p_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}$$

$$w_{m,n}^{(j+1,d)} = \sum_l \sum_k \overline{q_{k-2m}} \overline{q_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}$$

ここで、 $w_{m,n}^{(j+1)}$  はウェーブレット展開係数を示し、 $p_k$  および  $q_k$  は Daubechies の数列により与えられる定数を示す。これら 4 つの係数は展開前の信号データ  $s_{m,n}^{(j)}$  に対し、 $w_{m,n}^{(j+1,h)}$  は高周波水平成分、 $w_{m,n}^{(j+1,v)}$  は高周波垂直成分、 $w_{m,n}^{(j+1,d)}$  は高周波対角成分を示す。

す。また  $s_{m,n}^{(j+1)}$  は展開前の信号データ  $s_{m,n}^{(j)}$  よりも解像度の低下した低周波成分にあたる。このうち  $s_{m,n}^{(j+1)}$  の成分のみをさらに 4 つの成分に分解することをレベル  $J$  まで繰り返す。

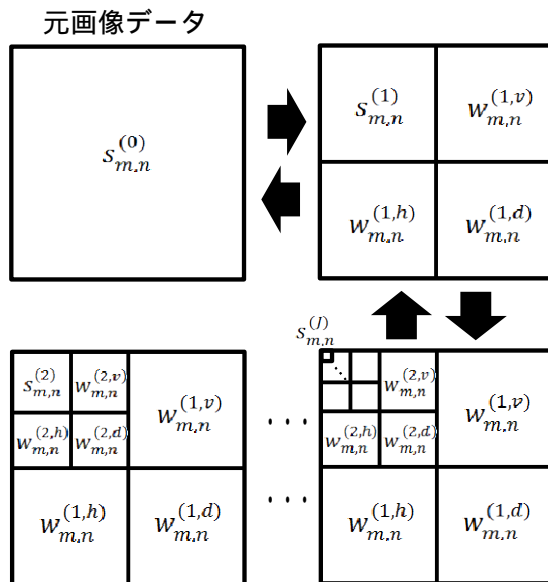


図 3: ウェーブレット変換の概要

一般的に信号の特徴は、少数の展開係数で表現可能であるとされる。そこでノイズ除去を行う際は絶対値の小さい展開係数をノイズとみなし、ある閾値よりも小さい展開係数を 0 として以下の式により信号の再構成を行う。

$$s_{m,n}^{(j)} = \sum_k \sum_l \left[ p_{m-2k} p_{n-2l} s_{k,l}^{(j+1)} + p_{m-2k} q_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,h)} + q_{m-2k} p_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,v)} + q_{m-2k} q_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,d)} \right]$$

これにより、ノイズ成分を除去した展開係数で信号の再構成を行うことができる。

ウェーブレット変換を用いたノイズ除去機構の有用性を検証するため、ノイズ除去機構導入前と導入後の測定結果の比較を行った。実験には公称周波数 9.85 MHz の表面実装型方形 AT カット水晶振動子 (3225 タイプ) を用い、駆動電力 0 dBm における主振動

を測定対象とした。AT カット水晶振動子の主振動は、エネルギー閉じ込め現象により電極中心部分に生じる厚み滑り振動であり、その振動分布は電極中央を原点とした余弦関数になることが一般的に知られている。

図 4 (a) はノイズ除去機構導入前の測定結果であり、水晶振動子の電極部分を写したものである。結果はグレースケールで示しており、白い個所程振動変位が大きいことを示す。図 4 (b) はウェーブレット変換を用いたノイズ除去機構を導入して測定した結果である。図 4 (a) と (b) を比較すると、ノイズ除去機構を導入したことでノイズが軽減され、振動部の輪郭や振動の強弱がより鮮明になる。

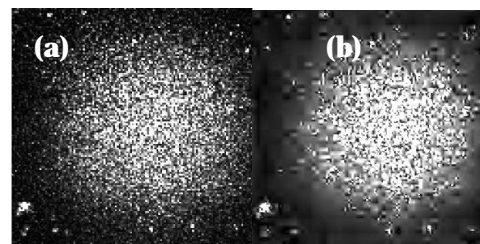


図 4: ノイズ除去機構導入による効果の検証。(a) ノイズ除去機構導入前、(b) ノイズ除去機構導入後の画像。

図 5 は公称周波数 39.2375 MHz の AT カット水晶振動子と、公称周波数 518 kHz の DT カット水晶振動子をノイズ除去機構を導入したシステムにより測定した結果である。このようにレーザースペックル法では AT カットの主振動だけでなく、複雑な振動モードも容易に可視化することができる。

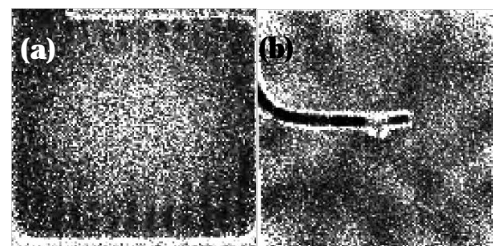


図 5: (a) 公称周波数 39.2375 MHz の AT カット水晶振動子の 39.2258 MHz での測定結果と (b) 公称周波数 518 kHz の DT カット水晶振動子の 1.25 MHz での測定結果。DT カットの主モードは輪郭振動であるため、電極中央部に導線を繋いでいる。(a) は主モードの厚み滑り振動と高次の屈曲振動が結合していると考えられる。(b) は高次輪郭振動である。

#### 4. 研究成果

圧電デバイスの振動モードを高速で可視化するレーザスペックル法にウェーブレット変換を用いたノイズ除去機構を導入し AT カット水晶振動子の測定を通してノイズ除去機構の有用性及び、ノイズ除去における閾値決定法について検討した。

ノイズ除去機構を導入したことでノイズが軽減され、振動部の輪郭や振動の強弱が鮮明になることを確認した。またノイズ除去における閾値決定については素子が非駆動時に得られるノイズ情報から閾値を算出し、複数の閾値をウェーブレット展開係数ごとに適用する方法を提案した。この手法では主モードのノイズ除去においては適切な結果が得られたものの、インハーモニックモードのノイズ除去では十分にノイズ除去を行うことができなかった。

今回の検証では閾値決定において、素子が非駆動時に発生するノイズしか考慮されていない。今後は測定時にスペックルが疎な領域により発生するノイズを考慮した閾値決定法を提案する予定である。またこのノイズはノイズ除去機構で完全に除去することは困難であるため、実験的にスペックルをより多く発生させる手法の検討も同時に行っていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Y.Watanabe, et al. Precision Test Fixture for Measuring Equivalent Circuit Parameters of GHz Surface-Mounted Quartz Crystal Units, JJAP ,51(07) 07GC09-1-07GC09-2 2012/7 【査読有】

T.Ishii, Y.Watanabe, Y.Yano, S.Goka, T.Sato, H.Sekimoto, Mode Shape Visualization System for High-stability Quartz Resonators in High and Continuously Changing Temperature, AST,115-117,2011/6 【査読有】

〔学会発表〕(計6件)

山岸直生,望月敬太,渡部泰明,レーザースペックル法を用いた圧電振動デバイス振動変位測定システムの高感度化,EMシンポジウム,東京理科大(神楽坂) 2013/5

鈴木瞭,坂元克明,渡部泰明,ベース接地形発振回路への狭帯域フィルタ導入によるQ値の改善,EMシンポジウム,東京理科大(神楽坂),2013/5

村瀬重善,渡部泰明,NMOS-Colpitts水晶発振器における-R算出法,電気学会,東京電機大(千住),2013/9

鈴木瞭,坂元克明,渡部泰明,2つの水晶振動子を用いた発振回路のQ値改善,電気学会,東京電機大(千住),2013/9

望月敬太,小林甫,渡部泰明,振動モード可視化システムへのウェーブレット変換の導入,光領域および精密周波数発生回路技術調査専門委員会,伊豆高原(日本電波工業会議室)2013/10

望月敬太,小林甫,渡部泰明,圧電デバイスの振動モード可視化システムへのウェーブレット変換の導入,圧電材料・デバイスシンポジウム2014,東北大学(青葉記念会館),2014/1

〔図書〕(計1件)

渡部泰明他,電気学会125年史,一般社団法人電気学会,2013.441-450

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕(計0件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 泰明(WATANABE, Yasuaki)  
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号:60175130