

ETC image processing for PCB inspection by using the wavelet transform

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/11800

学術論文

ウェーブレット変換によるプリント基板検査のための ECT 画像処理

ECT image processing for PCB inspection
by using the wavelet transform

谷口哲樹	(金沢大学)	宮腰貴久	(金沢大学院)
Dariusz KACPRZAK	(金沢大学院)	山田外史	(金沢大学)
岩原正吉	(金沢大学)		

Tetsuki TANIGUCHI Member
Takahisa MIYAGOSHI
Dariusz KACPRZAK Member
Sotoshi YAMADA Member
Masayoshi IWAHARA Member

This paper presents an image processing method utilizing the wavelet transform (WT) for the inspection of printed circuit board (PCB) by using eddy-current testing (ECT) technique. First, undesired components in the ECT image, which degrade the precision of the defect-detection, are removed through two types of filtering operations (based on frequency and amplitude, respectively) utilizing discrete WT. Considering that the ECT measurement is carried out horizontally, the proposed method applies WT only along that direction. Then, to estimate the existence and position of the defect, a correlation-based comparison is made between two images: the one is derived from a reference PCB (nondefect) and the other is from the tested object. The effectiveness compared with conventional approach and problem of the proposed method is investigated through examples of disconnection models.

Key Words: Eddy-current testing, printed circuit board, nondestructive evaluation, wavelet transform, filter bank.

1 まえがき

渦電流探傷法 (ECT) は原子力発電所細管や航空機の翼などの金属構造物の非破壊検査に広く用いられてきた方法であるが、近年その高速かつ非接触であるという利点を生かした新しい応用として、ECTプローブを用いたプリント基板配線 (PCB) の検査法が提案され、配線の厚み不足など様々な種類の欠陥の検出に有効であることが確認されている [1][2]。しかし従来非破壊検査法における検査対象物とは異なり、一般に基板上の導体分布は不均一であるため、得られた画

像信号は欠陥によるもの以外に、配線パターンの変化に応じて様々な変化分を含んでいる。したがって、実際の応用に際しては両者を区別し、欠陥の存在ならびに位置を特定する画像処理技術が必要不可欠である。

この要求に対して、著者らは先に画像の比較に基づく欠陥検出法を与え、その有効性を検証した [3]。ところで、ECT 信号には測定時に生ずる雑音の他、基板表面の凹凸や配線の厚み不均一等に起因する様々な不要成分が含まれ、欠陥の判定に悪影響を与える。しかしながら、同法は不要成分の除去に低域通過フィルタ (LPF) とヒストグラムを使用しており、これらの除去に関して十分であるとは言い難い。

そこで本研究では、広い範囲の不要成分を除去し、

連絡先: 谷口哲樹, 〒920-8667, 金沢市小立野 2-40-20, 金沢大学工学部, email: taniguch@magstar.ec.t.kanazawa-u.ac.jp

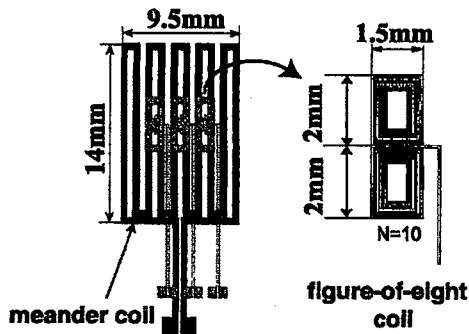


Fig. 1: Configuration of planar type ECT probe.

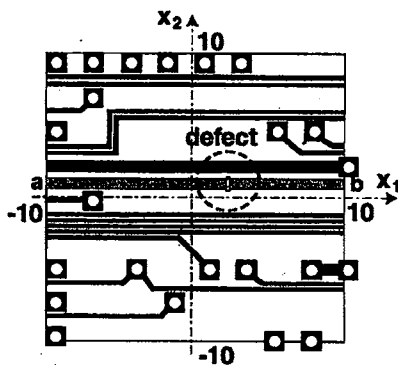


Fig. 2: Printed Circuit board used in this study.

より正確な欠陥判定につなげることを意図して、ウェーブレット変換 (WT) を利用した画像処理法について検討する。非破壊検査画像に対するウェーブレット変換の応用についてはこれまでにいくつかの例が見られるが [4][5], 2次元のウェーブレット変換を使用するものが主体である。これに対し本研究では、欠陥検査がプローブの水平方向の走査に基づくことを考慮して、1次元のウェーブレット変換を画像の水平方向にのみ適用することを考える。

以下 2. では、まず渦電流探傷法によるプリント基板検査法と画像処理の必要性について簡単に述べる。次に、3. でウェーブレット変換を用いた ECT 画像処理法の原理ならびに手順を示す。さらに、4. では断線基板に対する適用例を通して、提案法の有効性ならびに欠点を含む問題点について検討を行う。

2 渦電流探傷技術によるプリント基板検査

本研究で使用する ECT プローブ (Fig.1) は、基板上導体に渦電流を励起するための励磁用ミアンダコイル

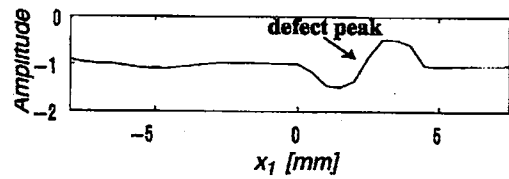


Fig. 3: Defect peak signal (ECT signal measured on line a-b in 2).

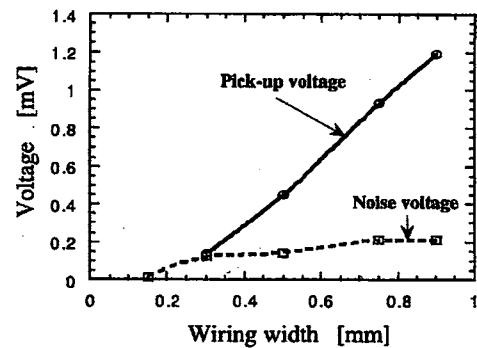


Fig. 4: Relation between width of printed wiring and S/N ratio of ECT output [2]

ル (meander coil) と、渦電流による誘起磁束検出用の 8 の字コイル (figure-of-eight coil) により構成される。8 の字コイルは互いに逆向きに巻かれた 2 つのループにより構成される差動コイルとなっている。このプローブをプリント基板配線 (Fig.2) に沿って水平方向 (x_1) に順次走査することで 2 次元の画像 (ECT 画像) を得ることができる。この画像においては、導体が一般的な部分では両ループを通過する磁束が等しいためほぼ一定の出力電圧が、また、導体パターンに変化 (例えば断線等の欠陥) が見られる箇所では正負一対のピーク信号が観測される。Fig.3 に欠陥が観測される位置 (Fig.2 線分 a-b 上) での ECT 画像の断面特性を示す。この方法を用いれば繊細な対象物であるプリント基板に対し非接触で検査を行うことができるほか、基板の撮影画像の解析等では発見の困難な微小欠陥や配線の厚み不足等の検出も可能となる。

ところで、ECT 画像には欠陥によるもの以外に、ソルダリングポイントなど配線パターンの変化に伴う数多くのピークが観測されるが、これらは同一パターンの基板に共通に存在すると考えられる。一方、欠陥を原因とするピーク (ここではこれを欠陥ピーク信号

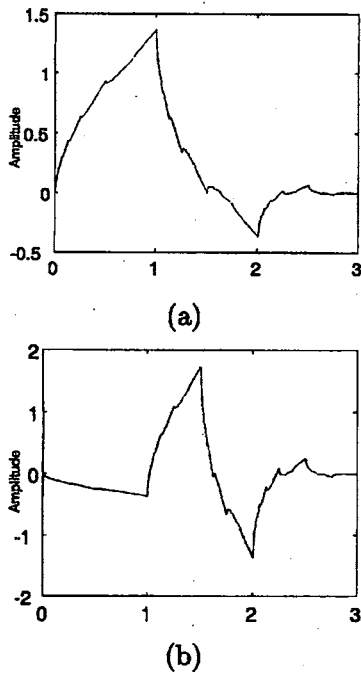


Fig. 5: Daubechies' scaling function and mother wavelet.

と呼ぶことにする)は欠陥の存在する位置以外には存在し得ない。したがって、正常な基板から得られた画像(参照画像)と検査対象から得られた画像(検査画像)を比較し、後者にのみ存在するピークを検出することで、欠陥の有無ならびに位置の推定が可能となる[3]。以下ではウェーブレット変換を利用してこの推定を自動的にかつより正確に行うための画像処理法について述べる。

3 ウェーブレット変換による ECT 画像処理

実際の ECT 信号には測定時に発生する雑音や、基板の凹凸によるプローブのリフトオフ高さの変動などを原因とする様々な不要成分が含まれている。特に、基板配線の幅が狭い場合には、プローブの出力電圧と不要成分との間の S/N 比 (Signal-to-Noise ratio) が低下することが分かっており (Fig.4), 不要成分と実際の欠陥信号の区別が困難な場合、誤った欠陥判定につながる可能性がある。また、画像処理を進める上で信号に含まれるオフセット成分は取り除かれていることが望ましい。しかし、LPF とヒストグラムに基づく従来法における不要成分除去 [3] はオフセットやそ

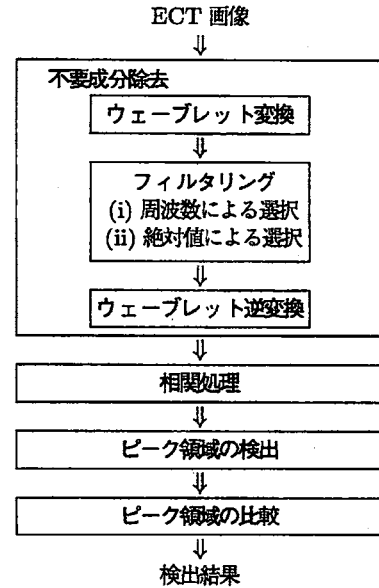


Fig. 6: Procedure of image processing using wavelets.

の変動分など比較的低周波な不要成分の除去については十分とは言えなかった。そこで本研究ではこれらの成分をウェーブレット変換を用いて効率よく除去することを考える。

3.1 ウェーブレット変換

ウェーブレット解析 [6][7] に用いられる基底関数は、スケーリング関数 $\phi(x)$ およびウェーブレット関数 $\psi(x)$ (Fig.5) から次式により生成される。

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \phi(2^{j/2}x - k)$$

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^{j/2}x - k)$$

ここで j は周波数に関するパラメータであり (j が大きいほど高い周波数に相当), k は位置を表している。また、本研究で用いる、離散ウェーブレット変換 (DWT) ならびに逆変換 (IDWT) はこれらの基底を用いて次式により定義される。

$$(DWT) \quad c_{j,k} = \int_R f(x) \overline{\psi_{j,k}(x)} dx$$

$$(IDWT) \quad f(x) = \sum_{j,k \in Z} c_{j,k} \psi_{j,k}(x)$$

この式は信号 $f(x)$ の基底関数 $\{\psi_{j,k}(x)\}$ による級数展開 (ウェーブレット級数) を表している。基底関数

は、フーリエ解析の場合と同様に必要な条件を満たす関数族から目的に合ったものを選択することが可能であるが、ここでは (1) 直交性 (2) 台のコンパクト性 (3) 高い平滑性等を考慮して Daubechies の 2 次基底 [8] を用いることにする。このとき、ウェーブレット係数 (WC) $\{c_{j,k}; j = 1, \dots, -J\}, \{d_{-j,k}\}$ はピラミッドアルゴリズムと呼ばれる以下の漸化式を用いて高速に計算することができる [6]。

初期値

$$c_{0,k} = f(k)$$

分解アルゴリズム

$$c_{j,k} = \sum_{\ell \in Z} p_{2k-\ell} c_{j+1,\ell}$$

$$d_{j,k} = \sum_{\ell \in Z} q_{2k-\ell} c_{j+1,\ell}$$

合成アルゴリズム

$$c_{j+1,k} = \sum_{\ell \in Z} \{p_{k-2\ell} c_{j,\ell} + p_{k-2\ell} d_{j,\ell}\}$$

ここで、 $\{p_k\}, \{q_k\}$ はスケーリング係数 [6] を表す。

3.2 ウェーブレット変換による不要成分除去

Fig.6 に提案法の画像処理手順を示す。最初に、ウェーブレット変換を用いて ECT 画像中の不要成分を除去する。画像中の不要成分には比較的低周波のもの (オフセットやその変動など) から高周波のもの (測定雑音など) まだが含まれる。一方、前節の分解・合成アルゴリズムを用いる場合、ウェーブレット変換はオクターブ分割の完全再構成フィルタバンク (FB: 信号を複数の帯域に分割, または複数の帯域から元の信号を合成するためのフィルタの集合) としての解釈が可能である [9]。このとき上記アルゴリズムはそれぞれ、ツリー構成のフィルタバンクにおける解析 (分割)・合成フィルタバンクに対応する。したがって、欠陥の主要周波数帯域に対応するウェーブレット係数のみを残し、残りを零と置くことで不要成分を除去することができると思われる (Fig.6 (i) 周波数による選択)。ここで、欠陥ピーク信号の周波数は事前の測定もしくは理論的に導出した波形から計算することができる。

しかしこの操作だけでは、両成分の占める帯域の重なりが大きい場合効果が薄いと考えられる。したがってここでは、残留する不要成分に対応する WC は比較的振幅が小さいとの仮定の下、WC 絶対値に関する

閾値処理 [10] を行うことでこれらの除去を試みる。すなわち、絶対値が閾値 A_{min} 以上のウェーブレット係数のみから ECT 画像の再構成を行う (Fig.6 (ii) 振幅による選択)。

一般に画像信号については 2 次元のウェーブレット変換が用いられることが多いが、本研究では、プローブによる基板の走査が水平方向に行われることを考慮して、各ライン毎に上記 1 次元処理を繰り返し適用している。これにより 2 次元の処理に比べて処理量の低減が可能となるだけでなく、信号の不必要な変形等が回避できるものと考えられる。なお、ウェーブレット変換の代わりに欠陥ピーク付近の周波数のみを通す帯域通過フィルタ (BPF) を使用することも考えられるが、単一標準化周波数による処理であるため高い次元を必要とし、非効率である。

3.3 欠陥ピーク信号の検出

不要成分除去後の ECT 画像は以下の手順により処理される。

1. 相関処理: ECT 画像と欠陥ピーク信号 (数値計算による理論的な波形) の相関を取ることで、欠陥に相似な波形を強調して、画像パターンを単純化する。特に欠陥ピークの振幅が相対的に低い場合、周囲の雑音と欠陥を波形により区別することが可能であるため、効果があることが確認されている [3]。
2. 領域検出: ECT 画像に二値化処理 [11] を施して、各ピーク成分に対応する領域 (ピーク領域) を検出する。すなわち、閾値 ϵ (3.2 節における振幅フィルタリングの際の閾値 A_{min} とは異なる) を設け、それ以上の振幅を 1 その他を 0 と置く。振幅 1 の点の連結を辿ることによりピーク領域が検出される。
3. 領域比較: 参照画像と検査画像のピーク領域の対応関係を調べ、検査画像にのみ存在するものを欠陥によるものと認定する。該当ピーク領域の相関最大値を取る点が欠陥の推定位置である。なお、プローブによる検出信号は同一パターンに対するものでも測定条件等により位置のずれや変形が生ずるため、ここでは検出されるピーク領域の形状より画像間に対応するピークが存在するかどうかの判定に重点を置く。

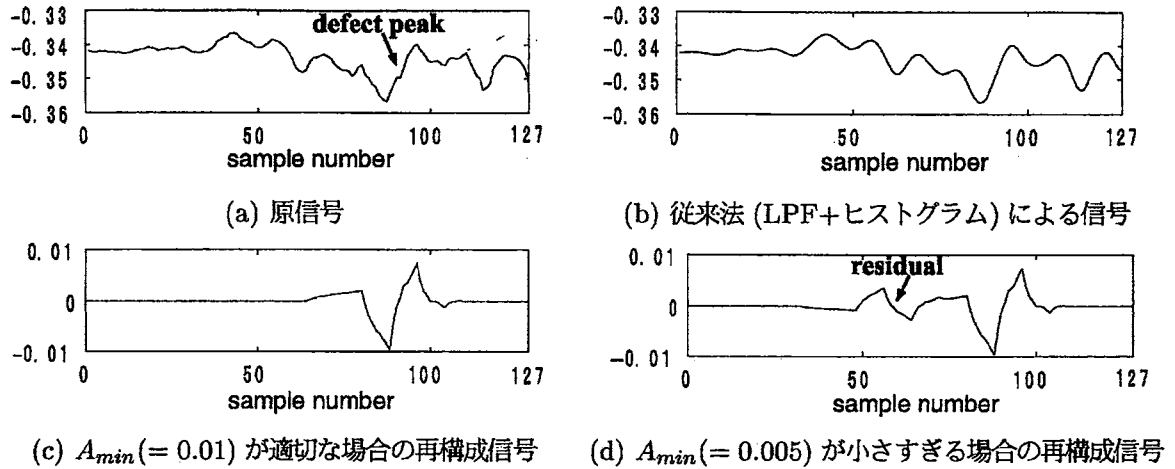
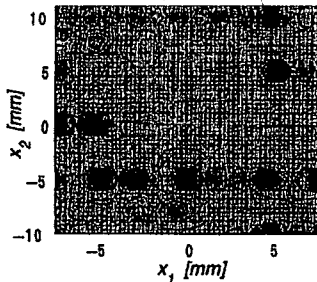
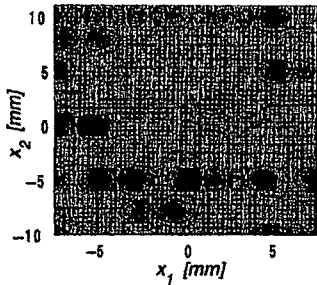


Fig. 7: Influence of threshold level A_{min} in proposed method.

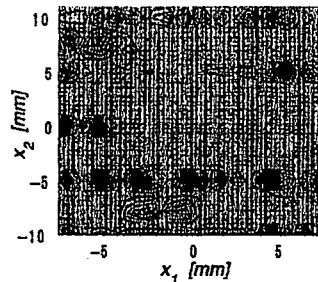


欠陥なし

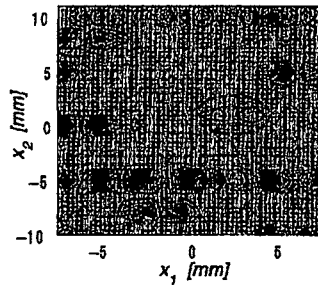


欠陥あり

Fig. 8: ECT images.

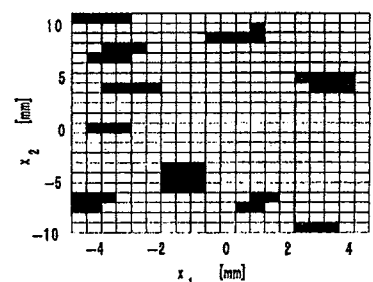


欠陥なし

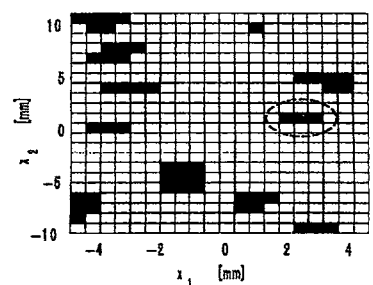


欠陥あり

Fig. 9: ECT images after wavelet processing.



欠陥なし



欠陥あり

Fig. 10: Binarized ECT images ($\epsilon = 0.7$).

4 処理例

本節では、前述の画像処理法を実際の断線モデルに適用し、その効果を確認する。最初に、従来法と提案法の比較を行う。Fig.7はFig.2とは別の、水平方向に単純な直線状配線パターンを持つ基板から得られた1次元信号を示している。この基板から得られた同図

(a)の信号は矢印の位置(サンプル番号90付近)に欠陥ピークが存在するが、不要信号に埋もれているためこれを明瞭に区別することはできない。これは、従来法を用いた場合も同様である(同図(b))。しかし(c)に示すように、提案法を用いた場合欠陥ピークは明確に区別することが可能である。すなわちウェーブレット変換を用いることで、不要信号を効率よく取り除く

ことが可能であり、従来法に比べ欠陥をより明瞭に検出することができる。ただし、 A_{min} の値が小さすぎると、再構成された信号に不要成分が残留してしまい(同図(d)), 逆に大きすぎるとピーク信号が大きく変形され、正しい判定が行われられない可能性がある。このことは、特に配線が細く S/N 比が低い場合に問題となる。したがって、WC 打ち切りの際の閾値の選定手順の確立は今後の重要な検討課題の一つであるといえる。またこの問題に対しては、ピーク領域の検出・比較法を、波形の変形や振幅の変化にある程度柔軟に対応するように改良することも効果があると考えられる。

なお、提案法はその原理上、不要成分と欠陥の主成分が同一周波数帯域を占め、かつ信号の S/N 比が低い場合にはあまり効果が無いと考えられる。

次に、Fig.2 の基板から得られた ECT 画像 (Fig.8) とウェーブレット処理 ($\{c_{j,k}; j = -1, \dots, -5\}$, $\{d_{-5,k}\}$) に分解後、最低域 $\{d_{-5,k}\}$ と最高域 $\{c_{-1,k}\}$ を除去、さらに $A_{min} = 0.3$ 以下のウェーブレット係数除去後再構成) を施した後の画像 (Fig.9) を比較すると、オフセットが除去され、不要成分も減衰していることが分かる。この画像を二値化処理 (閾値: 振幅最大値 1 に対して $\varepsilon = 0.7$) して領域検出を行った結果を Fig.10 に示す。点線で囲まれた領域は検査対象にのみ存在するものであり、この位置に欠陥が存在することを示している。このようにウェーブレット変換を利用することで、ECT 画像中の欠陥の存在ならびに位置を効率よく推定することが可能となる。

5 むすび

本論文では、プリント基板を ECT プロブで走査して得られる画像信号に、ウェーブレット変換を利用した画像処理を施すことで、欠陥の有無ならびに位置をより正確に検出することを試みた。提案法は、2次元の画像信号に対して水平方向にのみウェーブレット変換を適用している点に特徴を有する。この際、不要成分の除去のため、周波数によるものと振幅絶対値に基づくものの2種類のフィルタリングを適用している。処理例を通して、提案法は従来法に比べてより広い範囲の不要成分を除去する事が可能であり、オフセットの除去もより簡単な手順で行うことができることを示した。

しかし、波形の変形等の悪影響をもたらす可能性も否定できないため、適切な基底の選択や係数打ち切

りの閾値の選定法等についてさらに検討を進めていく必要がある。また、本研究では全ての走査ラインに対して同一の処理を施しているが、それぞれの信号形状に応じて最適な処理を行うような手順を組み込むことも有用であると考えられる。

今後は以上の課題に加え、位置 - 周波数をパラメータとするウェーブレット変換の特徴を生かすため、双直交基底を用いたウェーブレット領域での画像の直接比較についても検討する予定である。

(2000年5月2日受付)

参考文献

- [1] S. Yamada, H. Fujiki, M. Iwahara, S. C. Mukhopadhyay and F. P. Dawson, Investigation of printed wiring board testing by using planar coil type ECT probe, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.33, No.5 (1997), pp.3376-3378.
- [2] 宮越貴久, グリウス・カスプラザック, 山田外史, 岩原正吉, ECT 技術によるプリント配線の欠陥検出の可能性, 日本応用磁気学会誌, 23, (1999), pp.1613-1616.
- [3] T. Taniguchi, D. Kacprzak, S. Yamada, M. Iwahara, and T. Miyagoshi, Defect Detection of Printed Circuit Board by Using Eddy-Current Testing Technique and Image Processing, *The 5th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, Des Moines, Iowa, (1999).
- [4] G. Chen, A. Yamaguchi, and K. Miya, A novel signal processing technique for eddy-current testing of steam generator tubes, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.34, No.3 (1998), pp.642-648.
- [5] 川田かよ子, 熊野信太郎, 黒川政秋, 2次元ウェーブレット変換による ECT 信号分析, 第8回 MAGDA コンファレンス, (1999), pp.264-267.
- [6] C. K. Chui, An introduction to wavelets, San Diego, CA: Academic Press, (1992).
- [7] 斉藤兆古, Mathematica によるウェーブレット変換, 朝倉書店, (1996).
- [8] I. Daubechies, Orthonormal bases of compactly supported wavelets, *Comm. Pure and Appl. Math.*, 41, (1988), pp.909-996.
- [9] C. S. Burrus, R. A. Gopinath, and H. Guo, Introduction to wavelets and wavelet transforms: A primer, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, (1997).
- [10] D. L. Donoho, De-noising by soft-thresholding, *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.41, No.3 (1995), pp.613-627.
- [11] J. S. Lim, Two-Dimensional Signal and Image Processing, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, (1989).