

中島 由晴[○], 早野 誠治, 斎藤 兆古(法政大学)

堀井 清之(白百合女子大学)

Nondestructive Testing of Electric Circuits

by Means of Dynamic Image Cognition

Yoshiharu NAKAJIMA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

The principal purpose of our research project is to cognize a distinct circuit element, for example resistance, capacitance, inductance, diode, transistor and so on, by measuring an electromagnetic field distribution around an electric/electronic device along with the dynamic image cognition methodology.

In the present paper, we have tried to cognize an electrical resistance by one point time domain magnetic field measurement as the first step of our extraordinary research project. To extract the characteristics of a time domain signal, we employ the equivalent characteristic value approach. After that we employ the 3D Lissajous diagram methodology. Apply least square means to a system of ill-posed equations reveals each of the electrical resistances.

Keywords: Magnetic field distribution, Nondestructive testing, Dynamic image cognition

1. まえがき

近年, パーソナルコンピューターや携帯電話などの精密機器だけでなく, 冷蔵庫や炊飯器などの家電製品にもマイクロコンピューターを搭載した電子回路が組み込まれるようになってきている。この様なデジタル制御回路は, その有用性から, 今後, より多くの電気・電子機器へ組み込まれるであろう。

他方, マイクロコンピューターを搭載した電子回路の大きな問題点は, 電気・電子機器の異常動作や故障がハード・ソフトウェア的な問題点の何れに起因するのかの診断である。仮に, ハードウェア的な問題点がマイクロコンピューターの動作を司る単一の部品の場合, 最初からマイクロコンピューター構成部品中の1回路素子を特定化することは比較的困難である。また, 予め製品の検査工程で全ての電気・電子機器を構成する素子個々の健全性を評価することは不可能である。

以上のような社会的状況を鑑み, 筆者らは動作中の電気・電子機器周辺磁界分布を測定することで電気・電子機器中の個々の部品の健全性を評価可能とする計算機支援型非破壊検査装置の開発を提案し, 本論文では, その第1段階として, 電気回路素子上の時間領域磁界測定によ

る電気回路素子の識別を試みる。

電気回路素子上で測定された時間領域磁界から個々の素子特有な特徴を抽出する手段として, 筆者らはセンサーの時間領域情報の特性を双曲線関数の指数値として抽出する方法を採用する¹⁾。

この指数値は初期値問題の固有値へ対応するため, 本論文では等価固有値(Equivalent Characteristic Value, 以下 ECV と略記)と呼ぶこととする。仮に与えられた信号が初期値問題の解として記述される関数であれば, 信号を生成する系の固有値を信号から推定する一方法が ECV 法である。ECV は, 信号が双曲線関数の指数部を計算可能な最小離散化点数, 3点毎に計算可能である。

さらに, 本論文では1次元時系列信号を3次元画像へ変換する手段として3次元リサージュ図形法を採用する²⁾。

この3次元リサージュ図形法は従来のリサージュ図形と異なり, 同一座標値を取る軌跡に対してヒストグラムの加算を行うため, 従来のリサージュ図において削除されていた軌跡の重複情報も評価する事が可能となる。

2. 時系列磁界データと ECV

2.1 時系列磁界データの測定法

空間中の時系列磁界データを測定する方法として、今回はサーチコイルを使用する方法を採用した。磁束 Φ が時間的に変化する空間に巻数 n 、面積 A のサーチコイルを磁束 Φ が直角に入る向きに配置すると、コイルには、(1)式に示すような Φ の時間変化に比例した電圧 e が発生する。

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

この電圧 e は、複素角周波数を $j\omega$ とすれば、 $j\omega\Phi = j\omega A \mu_0 H$ の関係から、磁界 H に対応する。

本論文では、平面状被検査対象電気回路を仮定し、振幅 5V、周波数 100kHz の正弦波交流電流を通電した場合の磁界測定を行う。磁界測定は被検査対象電気回路と平行な面 11cm×11cm を被検査回路上 1cm で、1cm 間隔で 11×11 点において行った。尚、簡単のため、平面状被検査対象電気回路を構成する素子は電気抵抗のみとキャパシタンスのみとした。

Fig. 1 は電気抵抗、キャパシタンスそれぞれの直上と電気素子が存在しない 3 点のサーチコイル誘起電圧波形を示す。

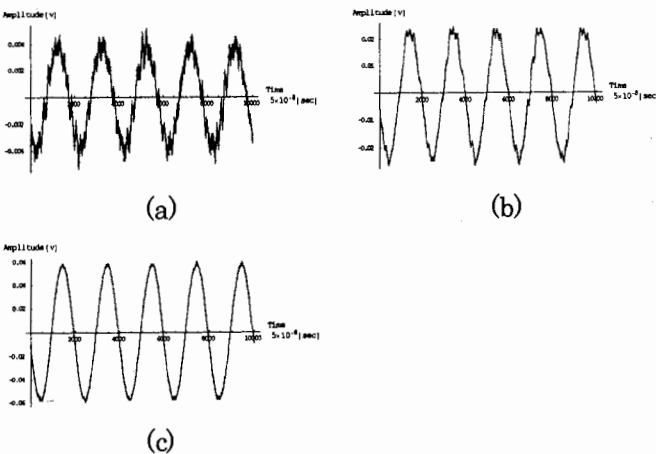


Fig. 1 Induced Voltage Waveforms
(a) Above an electrical resistance
(b) Above an electrical capacitance
(c) Above no electric elements

2.2 等価固有値 (Equivalent Characteristic Value)

2.2.1 電気回路の ECV

電気抵抗 R とインダクタンス L が直列に接続された電気回路へ直流電圧 V が印加された場合、出力電流は Fig. 2 のように時間変化する。

Fig. 2 の任意の時点 $n\Delta t$ における電流 $i_{n\Delta t}$ は(2)式で表現できるから、

$$i_{n\Delta t} = i_{(n+1)\Delta t} + [i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}] e^{-\lambda\Delta t} \quad (2)$$

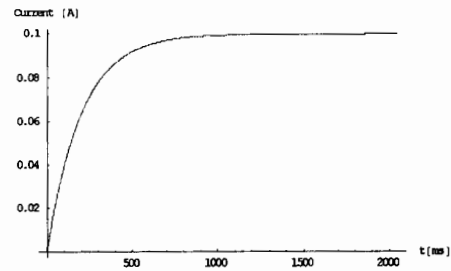


Fig. 2 Transient Current of a R-L Series Circuit

R - L 直列回路の等価固有値 ECV λ は(3)式で与えられる。

Fig. 2 の電流波形に(3)式を適用して得られる ECV を Fig. 3 に示す。明らかに、線形なシステムから得られる ECV は一定値の実数である。

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{i_{n\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}}{i_{(n-1)\Delta t} - i_{(n+1)\Delta t}} \right] \quad (3)$$

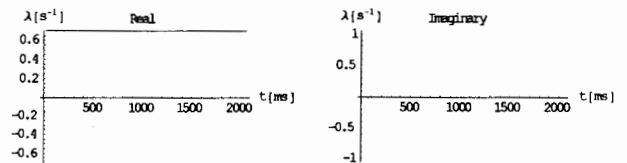


Fig. 3 Equivalent Characteristic Values by Applying Eq.(3) to the Output Current in Fig. 2
Left: Real part Right: Imaginary part

2.2.2 加算平均 ECV

直流電圧の入力に対する応答から、ECV は正確に計算される。しかし、Fig. 4 に示す交流入力に対する応答信号からは、Fig. 5 に示すように信号の時間変化率が小さい部分で数値誤差に起因するノイズが生ずる。このノイズを削減するため、Fig. 6 に示すように ECV を加算平均処理する。Fig. 6 から明らかなように、実数部の ECV 値は Fig. 3 と同じ ECV 値へ収束する。他方、虚数部は交流入力角周波数へ対応する ECV 値へ収束する。

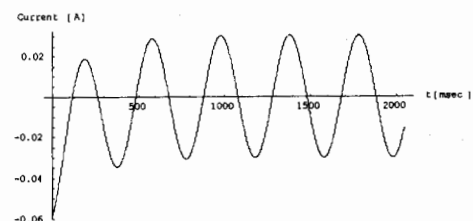


Fig. 4 Transient Current of a R-L Series Circuit when Impressing a Sinusoidal Voltage

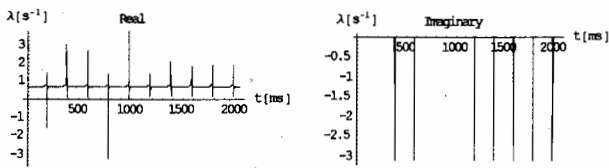


Fig. 5 Equivalent Characteristic Values by Applying Eq.(3) to the Current in Fig. 4
Left: Real part Right: Imaginary part

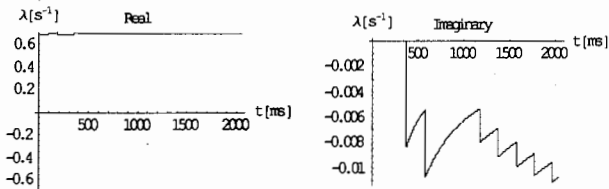


Fig. 6 Averaged ECV Values of that in Fig. 4
Left: Real part Right: Imaginary part

Fig. 7 は Fig. 1 に示されている電圧波形の加算平均 ECV の実数部の値である。前述したように時間領域信号に対する ECV 値で、実数部は系の固有値へ対応し、他方、虚数部は入力信号へ関係する ECV 値へ対応する。すなわち、ECV 値の実数部は電子回路素子の物理情報を抽出する。

Fig. 7 から、それぞれの ECV 値は明らかに異なる値へ収束する。

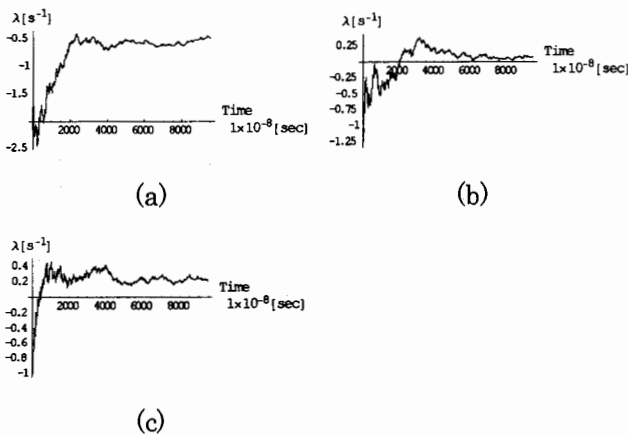


Fig. 7 Averaged ECVs of the Output Signals in Fig.1

- (a) Above an electrical resistance
- (b) Above an electrical capacitance
- (c) Above no electric elements

2.3. ECVの可視化

2.3.1 リサージュ図形

リサージュ図形とは時間軸を共通とする 2 信号を用い、 x 軸に 1 信号、 y 軸に 1 信号をとり、同一時間における両者の関係を表す図である。

Fig. 8 に具体的な例を示す。Fig. 8 で、(a)、(b)及び(c)は、それぞれ同一周波数で同一位相の信号、 x 軸と y 軸へ対す

る信号の周波数比が 1:2、さらに 1:3 の場合に描かれるリサージュ図形である。よって、リサージュ図は 2 信号の位相や周波数の関係を可視化する一方法である。

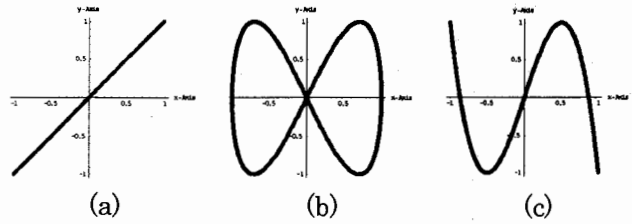


Fig. 8 Examples of the Lissajous Diagram

- (a) Same frequency and phase
- (b) Frequency ratio 1:2
- (c) Frequency ratio 1:3

2.3.2 3次元リサージュ図形

従来のリサージュ図は重複する軌跡情報を削除する。しかし、従来のリサージュ図で、重複する軌跡情報の重複度を z 軸方向にヒストグラムの手法で勘案すれば、リサージュ図は重複する軌跡情報を包含している 3 次元リサージュ図となる²⁾。3次元リサージュ図の例として、Fig. 8 に示した従来のリサージュ図を 3次元リサージュ図とした結果を Fig. 9 に示す。

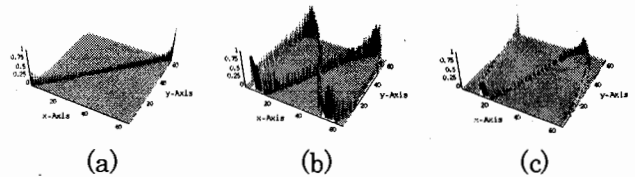


Fig. 9 3D Lissajous Diagram of the Lissajous Diagrams in Fig. 8

- (a) Same frequency and phase
- (b) Frequency ratio 1:2
- (c) Frequency ratio 1:3

Fig. 10 は、Fig. 1 の電圧波形から抽出した ECV 値の実数部 (Fig. 7 参照) を x 軸、実数部を時間積分した値を y 軸へとした場合の 3次元リサージュ図を示す。

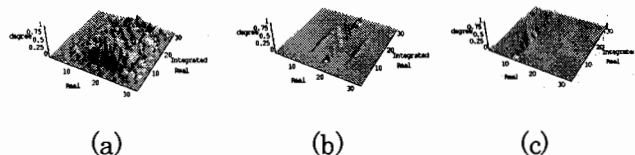


Fig. 10 3D Lissajous Diagram

- (a) Above an electrical resistance
- (b) Above an electrical capacitance
- (c) Above no electric elements

3. 画像認識手法による電子回路部品認識

本論文で採用した画像認識手法とは線形システム方程式の解を導くことに基づく方法である。しかしながら、得られる線形システム方程式は不適切なシステム方程式で

あるため、ここでは最小自乗法を用いて近似解を導く。

換言すれば、本論文で採用した画像認識手法は、あらかじめ用意した画像データをデータベースとし、その中から誤差ノルムが最小となる解要素を最小自乗法により求める方法である。

3.1 システム方程式

3次元リサージュ図は、それぞれ 32×32 画素からなるため、1次元配列に並べ替えると、 $32 \times 32 = 1024$ 次のベクトルとなる。このようにして得られる n 個の固有パターンベクトル $c_i, i=1, 2, \dots, n$ を使って、(4)式から n 行 32×32 列の長方システム行列 C が構成できる。

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (4)$$

いま、任意の3次元リサージュ図を1次元配列へ並べ替えて得られる入力ベクトルを Y とすれば、解くべき線形システム方程式は(5)式で与えられる。

$$Y = C \cdot X \quad (5)$$

(5)式で解ベクトル X の要素を

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \quad (6)$$

とすれば、最大値を取る要素が識別された3次元リサージュ図と仮定する。

3.2 最小自乗解

(5)式のシステム方程式は n 個の未知数に対し、 32×32 個の式の数であり、 $32 \times 32 > n$ とすれば、全ての式を同時に満足する解は特別な場合を除いて存在しない。このため、誤差ベクトルのノルム

$$\varepsilon = \|Y - CX\| \quad (7)$$

を最小にする解ベクトル、すなわち、最小自乗法による解ベクトルを(8)式から計算する。

$$X = (C^T C)^{-1} C^T Y \quad (8)$$

3.3 電子回路部品認識

3.2節で述べた画像認識手法を用いて Fig. 10 の3次元リサージュ図形から 16 個のデータベースを生成し、電子回路構成部品の識別を行った。その結果の 1 例を

Fig. 11 に示す。12 番のデータベースが電気抵抗のデータベースで、14 番のデータベースがキャパシタンスである。従って、磁界の測定点が 1 点であっても、ECV 法と 3 次元リサージュ法の併用で、基本電気回路素子の存在が認識可能であることがわかる。

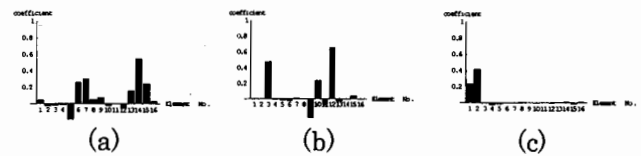


Fig. 11 Elements of a Solution Vector

- (a) Above an electrical resistance
- (b) Above an electrical capacitance
- (c) Above no electric elements

4. まとめ

マイクロコンピュータを搭載した電気・電子機器の大きな問題点は、電気・電子機器の異常動作や故障がハード・ソフトウェア的な問題の何れに起因するのかの診断である。仮に、ハードウェア的な問題点がマイクロコンピュータの動作を司る単一の部品の場合、最初からマイクロコンピュータ構成部品中の1回路素子を特定化することは比較的困難である。また、予め製品の検査工程で全ての電気・電子機器を構成する素子個々の健全性を評価することは不可能である。

筆者らはこのような社会的状況を鑑み、動作中の電気・電子機器周辺磁界分布を測定することで電気・電子機器中の個々の部品の健全性を評価可能とする計算機支援型非破壊検査装置の開発を提案し、本論文では、その第1段階として、電気回路素子上の時間領域磁界測定による電気回路素子の識別を試みた。

その結果、磁界の測定点が1点であっても、ECV法と3次元リサージュ法の併用で、抵抗の存在が認識可能であることが判明した。

参考文献

- 1) 茂田幸康, 早野誠治, 斎藤兆古: ウェーブレット変換による信号処理の一方法, 可視化情報, Vol. 20, Suppl. No. 1 (2000) pp. 273-276.
- 2) 妹尾勇, 早野誠治, 斎藤兆古, 堀井清之: 時間領域信号の三次元可視化画像への変換とその応用, 可視化情報, Vol. 21, Suppl. No. 1 (2001) pp. 239-242.