法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

ベクトルカレントビューアによる電流分布の 可視化

HAYANO, Seiji / SAITO, Yoshifuru / 斎藤, 兆古 / 早野, 誠 治 / HIROTA, Akihiro / 廣田, 章博

(出版者 / Publisher)法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University

(巻 / Volume) 16 (開始ページ / Start Page) 65 (終了ページ / End Page) 69 (発行年 / Year) 2003-03-20

(URL) https://doi.org/10.15002/00024976

廣田 章博 早野 誠治 斎藤 兆古 法政大学大学院工学研究科

近年、電子機器の小型軽量化を実現する方途として、電気回路を印刷技術で構成するプリント基板が開 発され、広汎に用いられている。結果として、精緻な電気回路が平面上に実現され、高度な半導体集積 回路の開発に伴って極めて小型軽量な電子機器の普及に繋がった。他方、産業廃棄物が社会問題とな る中で、プリント基板は精緻な回路を実装するために故障診断が不可能に近く、不良となった基板は廃 棄されるのが通例である。また、回路の健全性の検査工程においても人間の目視検査がせいぜいである。 このような現状を鑑み、筆者らはプリント基板の非破壊検査を可能とするカレントビューアの開発を試 みている。本論文では、プリント基板中の電流分布をリアルタイムで直接可視化するベクトルカレント ビューアを提案し、その原理検証例を紹介する。

1. はじめに

近年、電子機器の小型軽量化を実現する方途として、 電気・電子回路を印刷技術で構成するプリント基板が開 発され、広汎に用いられている。結果として、精緻な電 気・電子回路が平面上に実現され、高度な半導体集積回 路の開発に伴って極めて小型軽量な電子機器の普及に繋 がった。他方、産業廃棄物が社会問題となる中で、プリ ント基板は精緻な回路を実装するために故障診断が不可 能に近く、不良となった基板は廃棄されるのが通例であ る。また、回路の健全性の検査工程においても人間の目 視検査がせいぜいである。しかしながら、故障箇所が特 定可能であれば、修復も可能であり、また、プリント基 板の信頼性向上にも繋がる。

このような現状を鑑み、本論文は平面上に存在する電 流分布を直接可視化するベクトルカレントビューアを提 案する。ベクトルカレントビューアは、電流の大きさお よびその経路を可視化し、視覚的に電流分布状態の把握 を可能とすることで、故障診断や回路の健全性を評価可 能とする。基本的な原理は、通常磁界測定に用いられる ソレノイド型コイル型センサーでなく電流の流れる銅線 の半周を覆う円弧状の変形ロゴスキーコイル(以下カレ ントビューア)をセンサーコイルとして採用する。カレ ントビューアは、アンペアの法則に基づき、平面状に分 布した電流位置を推定する場合、ソレノイド型のサーチ コイルよりも電流の作る磁界を高感度に効果的に測定可 能とする。カレントビューアは平面の電流分布を測定す るために、X、Y方向に2回の走査と測定が必要である。

本稿で提案するベクトルカレントビューアは、平面上 を1回の走査でX、Y方向の磁界を同時に測定可能とす るセンサーである。また、カレントビューアでは平面に 分布する電流から得られる信号を処理し、電流の可視化 を行うが、ベクトルカレントビューアでは、X、Y方向の 出力電圧をそれぞれオシロスコープの横軸・縦軸に入力 して得られるリサージュ図形を描かせることで、リアル タイムで電流経路を可視化する。

- 2. ベクトルカレントビューア
- 2.1 センサーの形状

通常、磁界測定ではループ状のソレノイドコイルを用

いて高解像度を実現しようとする場合、巻き数を増加し 断面積を小さくする必要がある。これは、磁界源となる 電流は線上に存在するが、ソレノイドコイルはコイル面 に鎖交する磁束を測定する必要性に起因する。筆者等の グループは線上に存在する電流の位置推定精度の向上を 図るため、形状が半円弧状のカレントビューアを提案し た[1-4]。

このカレントビューアは大電流計測に用いられるロゴスキ ーコイルを部分的に利用する円弧状構造である。カレントビュ ーアは Fig. 1(a)に示すように直線電流に対して平行方向 にコイルを走査した場合、電流位置にセンサーが到達す ると電流から生じる鎖交磁束数が最大となり、出力も最 大となる。しかし、Fig. 1(b)のように直線電流に対して垂 直方向にコイルを走査しても磁束が鎖交しないため、セ ンサー出力は得られない。従って、カレントビューアは 電流分布に対して平行方向のみの電流による磁界を検出 するため、平行・垂直方向の出力信号間で直交性が成り 立つ。



Fig. 1(a) Current Viewer Set in Parallel to a Current Carrying Conductor



Fig. 1(b) Current Viewer Set in Perpendicular to a Current Carrying Conductor

ここでカレントビューアを互いに直交させたセンサーが本 論文で提案するベクトルカレントビューアである。Fig. 2 に試作 したベクトルカレントビューアを示す。



Fig. 2 Tested Vector Current Viewer

2.2 センサーの形状

複数個の角型コイルを組み合わせた同心円状のサーチ コイルで構成されたカレントビューアは、アンペアの周 回積分の法則を直接利用するロゴスキーコイルを部分的 に取り出した形状であり、センシング部分は電流が流れ る導線を覆う構造となっている。このため、カレントビ ューアはプリント基板表面で、電流の作る磁界をコイル で囲むことなく効果的に測定可能とする磁気センサーで ある。

カレントビューアの動作原理を Fig. 3 を用いて説明す る。カレントビューアを通電中の直線導体近傍で水平に 走査した場合、センサーと導体中心が一致する時点で電 流の作る磁界は半円弧状のコイルに鎖交する。しかし、 センサーと導体の中心がずれた場所に位置する場合、電 流 i の作る磁界 H は半円弧状のコイルの局所部分にのみ 鎖交する。拠って、電流の位置推定度が向上する。



Fig. 3 Current Searching by Current Viewer

2.3 カレントビューアの出力

カレントビューアの鎖交磁束計算法について述べる。 Fig.4 に示すように、無限に長い直線導体に電流 *i* が流れ ている場合、導線を含む平面内で長さの辺を導線軸に 平行とし、軸からの距離が *b* の位置にある長方形の部分 を通る磁束を考える。

線軸から r の距離に幅 dr の微小面積 dS を通る磁束は (1)式で与えられる。



Fig. 4 Various Constants of Current Viewer for Sensor Output Calculation。

$$d\phi = \mu_0 H dS \tag{1}$$

ここで μ₀ は真空中の透磁率である。r 点での磁界は(2) 式のアンペアの法則で与えられ、

$$H = \frac{l}{2\pi r} \tag{2}$$

 $dS=\ell \cdot dr$ より微小面積 S を通る磁束は(3)式で与えられる。

$$d\phi = \frac{\mu_0 i\ell}{2\pi r} dr \tag{3}$$

よって長方形を通る磁束は(4)式となる。

$$\Phi = \int_{b}^{b+a} d\phi = \int_{b}^{b+a} \frac{\mu_0 i\ell}{2\pi r} dr \qquad (4)$$

電流がサーチコイルアレイの中心にある場合、長方形のコ イルを貫く磁束は(4)式から求められ、角型コイルの個数を *N* とした鎖交磁束数 λ は *N*Φ である。よって、センサー出力の 誘起電圧はファラデーの法則より(5)式で表される。

$$v = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{5}$$

電流 I の位置が円弧の中心からずれた場合は、(4)式の解析 的な積分が困難であるため、(4)式を数値積分して全鎖交磁束 数を求める。

3. 電流分布推定

3.1ベクトル カレントビューアの校正

本論文の実験では、Fig. 2 で示したベクトルカレントビュ ーアを用いた。その仕様を Table 1 に示す。

Table 1. Specification of One of the Tested Vector Current Viewer

半径 r	厚さ a	長さ1	巻き数N
[mm]	[mm]	[mm]	[turn]
15	1.5	10	200

本実験は供試ベクトルカレントビューアの指向性と精 度を評価し、X、Y 軸方向出力の校正データを得るために 行う。

10kHz、0.5A の電流を通電している直線導体上に、供

試ベクトルカレントビューアの中心を位置し、ベクトル カレントビューアの中心を軸として、直線導体に対して カレントビューアを 0、45、90、135、180 と 225 度さら に 270 度に回転させて X、Y 方向の出力電圧をそれぞれ オシロスコープの横軸・縦軸に入力しリサージュ図形を 得る。

この実験で、0と180度、45と225度、90と270度の リサージュ図が同じならば、供試ベクトルカレントビュ - アは、互いに直交する 2 個のカレントビューアの出力 が同等であり、高精度な機械的構造と評価できる。実際 の実験結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、Y 軸方向のカレ ントビューアは0度と180度で幅が異なり多少の指向性 を持つことが判る。さらに、X 軸方向も 90 度と 270 度で 幅が異なり、多少の指向性を有することが判る。これら の指向性を利用して最終結果を校正することとする。



Fig. 5 Lissajous Diagram at Each of Vector Current Viewer Angles

3.2 電流探査実験

カレントビューアの電流位置推定精度は、サーチコイ ル直径程度が限界であることが報告されている[4]。その ため、正方形 (一辺 30mm×30mm)の Fig.6 に示す供 試電気回路を構成し、10kHz、0.5Aの電流を通電する。 正方形上を等間隔に X、Y 方向、それぞれ 10 点測定し、 合計 100 点でベクトルカレントビューアの出力を観測し た。各点でのベクトルカレントビューアによるリサージ ュ図を Fig. 7 に、そして X、Y 方向の出力を Fig. 8 と Fig. 9に示す。



Fig.6 Electric Current Model for Current Distribution Tracing

-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-				-					
-	-	~	-	-	-	-	-	`	-
-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
								1	
-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
-	-		-	-	-	-	-	1	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fig.7 Lissajous Diagrams along with the Scanned Positions



Fig.8 Output Signal Distribution of X Direction



Ý

Fig.9 Output Signal Distribution of Y Direction

従来型のカレントビューアの場合、X、Y それぞれの方 向へ 2 回スキャンする必要が有るが、ベクトルカレント ビューアを用いた場合、Fig.8とFig.9の結果が1回のス キャンで得られる。さらに、ベクトルカレントビューア を正方平面上で走査することにより、Fig.5に示すリサー ジュ図形から、Fig.7に示されるように直接電流の大きさ と通電方向をリアルタイムで可視化可能である原理がこ こで検証された。

検査対象となるプリント基板の寸法が固定されている 場合、プリント基板の寸法に合わせてベクトルカレント ビューアを所望の精度に必要な個数を配置し、個々のベ クトルカレントビューア出力を AD コンバータを介して 計算機に入力し、予め3.1節で得た校正データを用いて 校正し、計算機ディスプレイへ表示すれば、瞬時にプリ ント基板の健全性が可視化情報として評価可能な非破壊 検査システムが構成可能であろう。

4. まとめ

従来型のカレントビューアでは、平面の磁界分布を測 定する場合、X、Y軸方向へ2回の走査が必要であり、さ らに、X、Y軸方向の測定値を個々に組み合わせて電流分 布を可視化した。そのためリアルタイムでの電流分布可 視化は困難であった。

この問題を解決するため、本論文は、単一センサーに X、Y方向の電流を同時に測定可能とする変形ロゴスキー コイルを直交して配置したベクトルカレントビューアを 提案した。

検査対象となるプリント基板の寸法に合わせてベクト ルカレントビュワーを所望の精度に必要な個数を配置し、 個々のベクトルカレントビューア出力を AD コンパータ を介して計算機に入力し、予め測定しておいた校正デー タを用いて個々の出力を校正し、計算機ディスプレイへ リサージュ図形を物理的ベクトルカレントビューアの配 置と同一に表示することで、瞬時にプリント基板の健全 性が可視化情報として評価可能な非破壊検査システムを 構築するのが本研究の最終的な目的である。

本論文では、上記非破壊検査システムの原理検証実験 を主として検討した。その結果、プリント基板の非破壊 検査法として期待できることが判明した。

参考文献

[1]青木誠,斎藤兆古、"変形ロゴスキーコイルを用いた 電流分布推定"、 法政大学計算科学研究センター研究報 告第 13 巻、2000 年

[2]青木誠,斎藤兆古,早野誠治、"カレントビューアによる二次元電流分布の測定"、 電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-98-113、1999年。

[3]青木誠,斎藤兆古,早野誠治他、"カレントビューアの開発-基礎原理と実験-"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-98-113、1998年。

[4]青木誠,斎藤兆古,早野誠治、"カレントビューアに関 する研究 - その2 電流分布のデコンボリューション - "、 電気学会マグネティックス研究会資料、 MAG-98-265、 1998 年。

<u>キーワード.</u>

ベクトルカレントビューア、電流分布、プリント基板

Summary.

Current Visualization by Vector Current Viewer

Akihiro Hirota Seiji Hayano Yoshifuru Saito Graduate school of Engineering, Hosei University

In recent years, PCBs (Printed Circuit Boards) are widely employed to work out the compact as well as lightweight electrical devices. However, inspection of their regularity is not so simple because of their complex electric circuit structures. One of the non-destructive tests to do that is to measure in the vicinity the electromagnetic fields essentially accompanying with their operation. Estimating the field sources from the measured fields becomes useful and important information not only for checking up their regularity but also for the EMC/EMI problems. According to this background, we are motivated to propose the current viewer, which makes it possible to visualize the current distributions in PCBs.

Previously, we have proposed the current viewer in order to visualize the current distribution on planar electric circuits. Operation principle of this current viewer is based on those of modified Rogowski coil method. The mechanical structure of this viewer is that the sensor solenoid coils does not cover all the circumferences of the target current carrying conductor, but covers a semicircle. In this paper, we propose the vector current viewer by combining two current viewers in orthogonal way. Our vector current viewer is capable of visualizing the magnitude as well as direction of target current along with the Lissajous diagram methodology.

Keywords.

Vector Current Viewer, Current Distribution, Printed Circuit Bords