

### 3次元磁界ベクトル可視化に関する研究

藤枝 直樹 早野 誠治 齋藤 兆古  
法政大学大学院工学研究科

我々は、電気・電子機器周辺の磁界分布を可視化し、画像認識技術を用いて電気・電子機器の非破壊検査を行う方法を研究・開発している。磁界ベクトル分布を可視化する一方法は、磁界ベクトルの三成分をそれぞれ、可視光の赤、緑、青成分へ対応させる方法である。しかし、この可視化法は、同一磁界ベクトル分布であっても基準座標の選定で異なった磁界画像となる点が最大の問題となる。本論文では、任意の座標系において測定された磁界の三成分から基準座標を決定し、基準座標系による磁界ベクトル分布の可視化を行う。

#### 1. はじめに

21世紀に入り、パーソナルコンピュータ・携帯電話を代表とする、小型軽量電子機器の個人レベルの普及が著しい。小型電子機器の普及は電子回路の高密度実装化技術の向上を意味することに他ならない。すなわち、電子回路の高密度実装化にはプリント基板技術の進歩が大きく貢献している。しかし、電子機器の小型軽量化は、電子機器から放射される電磁界を削減するわけではない。電子機器を駆動するには必然的に電流が流れ、電子機器周辺へ電磁界を放射し、周辺機器の誤動作などを喚起する可能性がある。また、小型化故に機器の検査および不良部位の特定が困難になってきている事実は否めない。

以上のような現状に鑑み、我々は、小型軽量電子機器周辺の放射磁界ベクトルを、基準座標が与えられていることを前提とし、測定された磁界ベクトルの3方向成分を可視光の  $R(\text{Red})$ ,  $G(\text{Green})$ ,  $B(\text{Blue})$ 成分に対応させ、磁界ベクトル分布のカラー画像を生成してきた[1][2]。そして、画像認識技術を用いて電子機器の非破壊検査法について検討してきた。しかし、基準座標を既知とする従来型可視化法では、測定環境が限定されてしまうという問題点が依然として残っていた。

この問題点を解決すべく、測定された磁界分布から基準座標を決定する新たな手法を提案し、測定時の座標系に依存しない磁界分布の可視化を可能とした[3]。この方法は、最も支配的である磁界ベクトルの  $z$  軸方向を、磁界測定面に対して垂直方向固定とする条件を加味した手法であった。しかし、基準座標の1個を既知とする問題点が残っていた。

本論文では、測定された磁界ベクトルのベクトル和から決まる単一のベクトルを基準ベクトルとして、3次元アフィン変換を用いて3次元磁界ベクトルの各成分値を修正する。そして修正した磁界の値から磁気素子の形状ベクトルを用いる手法により  $x, y$  方向を決定し、基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像を生成する。

#### 2. 3次元基準座標決定法

##### 2.1. 磁気素子の形状推定

まず、磁界から電流分布を推定する。本論文では、電流分布推定にループ電流モデルを採用する[4]。ループ電流モデルは、電流が分布する測定対象導体を微小長方形に分割し、各微小長方形には一個のループ電流が存在していると仮定したものである。

各微小長方形における、単位ループ電流が生じる磁界を求め、システム行列  $C$  を生成する。すなわち、測定磁界を要素とするベクトルを  $Y$ 、ループ電流を要素とするベクトルを  $X$  とすると(1)式のシステム方程式が成立する。

$$Y = CX \tag{1}$$

一般に、ベクトル  $Y$  を構成する測定磁界の要素数は、ベクトル  $X$  を構成するループ電流分布の要素数よりも多い。これは未知数より式の数が多いことを意味し、システム行列  $C$  が縦長長方形列となることから、直接逆行列を求めることが出来ず、不適切なシステム方程式を解くことを意味している。このため本論文では、(2)式に示す最小自乗法でシステム方程式を解くことにより、ループ電流分布を推定する[4]。

$$X = [C^T C]^{-1} C^T Y \tag{2}$$

Fig.1(b)に同図(a)に示す磁気素子のループ電流分布を最小自乗法により推定した例を示す。ループ電流は閉じた経路を流れているから、隣接するループ電流は差になり、結局、電流ベクトルはループ電流分布の等高線に沿って流れていることとなる[5]。すなわち、隣接するループ電流分布間で差分演算を行うことにより、電流ベクトルを求めることが出来る。Fig.1(c)に得られた電流ベクトルを示す。

次に電流ベクトルから磁気素子の形状を表すベクトルを求める。本論文では、電流ベクトルにベクトルウェーブレット変換による多重解像度解析を適用しノイズ処理を行い、電流ベクトルの輪郭部分を抽出する。本論文ではこれを磁気素子の形状ベクトルと呼ぶ。Fig.1(d)に推定された磁気素子の形状ベクトルを示す。同図(a)に示す磁気素子の外形の形状を正確に表現していることが分かる。

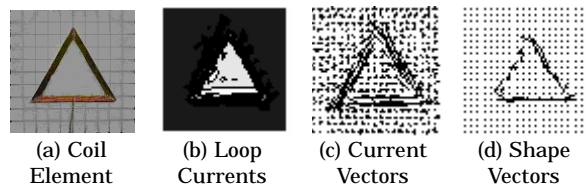


Fig.1 Estimate of Shape Vectors

## 2.2. アフィン変換

アフィン変換とは、主にコンピュータグラフィックスなどに用いられ、平行移動、回転移動、拡大・縮小などの処理をすることが出来る幾何学の変換方式の一種である。本論文では、磁界ベクトルを基準座標系に変換する際に、アフィン変換を適用する。点 $(x, y, z)$ を点 $(x', y', z')$ に移動させる場合のアフィン変換は、

$$[x' \ y' \ z' \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}$$

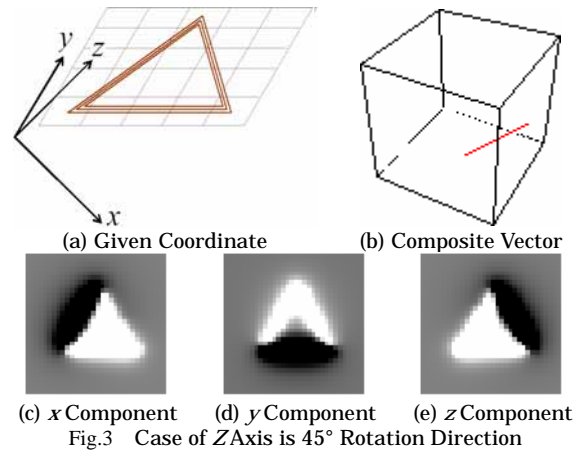
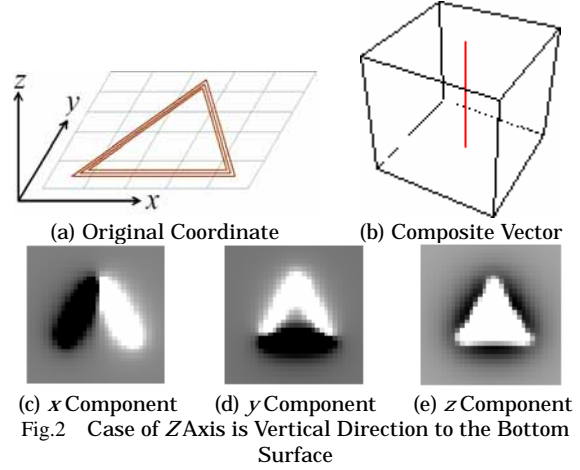
$$\begin{vmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{vmatrix} \neq 0 \quad (3)$$

となる。(3)式で $a \sim t_z$ までのパラメータを変えることにより、 $x, y, z$ 軸まわりの回転、平行移動、拡大・縮小などの処理を行うことが出来る。

## 2.3. 合成ベクトル

従来我々が提案してきた可視化法において  $z$  軸方向は磁界の測定面に対して垂直方向であるという前提のもと行われていた。本論文では、測定時の座標系において  $z$  軸が垂直方向ではない一般的な場合について述べる。

Fig.2 は測定面に対して垂直方向を  $z$  軸として測定した場合の磁界ベクトルの各成分およびその合成ベクトルを示している。また、Fig.3 は  $y$  軸を中心に  $x, z$  軸の方向が  $45^\circ$  回転して測定した場合の磁界ベクトルの各成分およびその合成ベクトルを示している。Fig.2 および Fig.3 から分かるように、合成ベクトルの方向は測定時の  $z$  軸方向と同一の方向を向いていることが分かる。以上のことから、磁界ベクトルの合成ベクトルを求めることにより、測定時の座標系における  $z$  軸方向がどのように定められたかを判断することが出来る。すなわち、合成ベクトルから測定時の  $z$  軸方向が測定面の垂直方向とどれだけ差異があるかを求め、アフィン変換を用い  $z$  軸を垂直方向に修正すれば、測定時の座標系に依存しない可視化画像生成が可能になる。



## 2.3. 形状ベクトルを用いた基準座標決定法

本論文では磁気素子の形状ベクトルから磁界の  $x, y$  成分の基準座標を決定する。磁気素子の形状がわかれば、磁気素子から放射される磁界の基準座標が定まることは自明である。磁気素子の形状を表す個々のベクトルは、大きさや方向を持つ。そこでベクトルの方向成分に着目し、基準座標を決定する。

形状ベクトルの方向、すなわち角度を求めその出現頻度をカウントする。よって、その出現頻度を  $A$  とすれば、

$$A \in \text{Count}[\theta_{ij}, k] \quad (4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, 359$$

となる。(4)式において  $\text{Count}[\text{list}, \text{pattern}]$  は、 $\text{list}$  における  $\text{pattern}$  に適合する要素の数を与える関数であり、 $\theta_{ij}$  は位置  $(i, j)$  における形状ベクトルの角度を整数化した配列である。

しかしながら出現頻度  $A$  のスペクトラムには多少のばらつきがあることが知られている[3]。そこで特定の誤差

角度を考慮し、誤差角度の範囲内におけるベクトルは同一とみなして出現頻度をカウントし、出現頻度Aの修正を行う。すなわち、誤差角度を $e$ 、修正出現頻度を $A_{revision}$ とすれば、(5)式で与えられる。

$$A_{revision} \in \sum_{l=-e}^e A_{k+l} \quad (5)$$

$$k = 0,1,2,\dots,359$$

ただし、

$$k+l < 0 \Rightarrow k+l = k+l+360 \quad (6)$$

$$k+l > 359 \Rightarrow k+l = k+l-360$$

である。

そして、形状ベクトルの中で、出現頻度の多い方向のベクトルを抽出し、そのベクトルの方向を基準座標の  $x$  軸とする。基準座標の  $x$  軸の方向から 3 次元アフィン変換の  $z$  軸まわりの回転処理を行うことにより、基準座標系の磁界の  $x, y$  成分を求めることが出来る。

### 3. 基準座標における磁界ベクトル分布可視化画像

#### 3.1. 磁界分布のカラー画像生成

磁界ベクトルの各直交成分が  $x, y, z$  方向について得られている場合、それぞれを光の  $R, G, B$  成分に対応させることで磁界分布をカラー画像として表現することができる[1]。この場合、以下に示す(7)式の条件を満たすように、各成分の最大値を 1 に正規化する必要がある。

$$0 \leq f_r(x_i, y_i) \leq 1,$$

$$0 \leq f_g(x_i, y_i) \leq 1,$$

$$0 \leq f_b(x_i, y_i) \leq 1, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

(7)式で、はそれぞれ  $R, G, B$  成分を与える関数であり、 $m, n$  は画像の  $x, y$  方向の画素数である。Fig.4 は、磁界の  $x, y, z$  方向成分、およびそれらを光の  $R, G, B$  に対応させて可視化した磁界カラー画像の一例である。

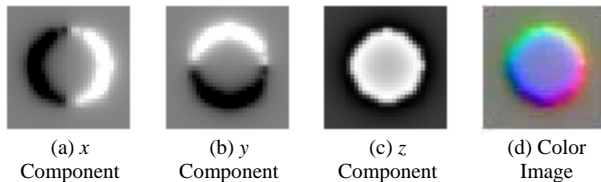


Fig.4 Magnetic Field Components and Visualized Magnetic Field Image

#### 3.2. 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像

本論文で提案する基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像を、シミュレーションで検証する。シミュレーションでは、Fig.5 に示す  $32 \times 32$  の均一なループ電流分布を持つ磁気素子を仮定した。そして、各シミュレーションループ電流分布が生成する磁界を計算により求め、測定時の任意の座標系と基準座標系における磁界ベクトル分布可視化画像をそれぞれ生成する。同様に、Fig.5 のループ電流分布を持つ磁気素子が任意の角度で回転した場合の磁界を計算により求め、測定時の任意の座標系と基準座標系における磁界ベクトル分布可視化画像を生成する。生成した可視化画像から画像の固有パターンを求め、任意の座標系および基準座標系における可視化画像の固有パターン間の相関係数を計算し、基準座標系の妥当性を検証する。

ここで採用する画像の固有パターンとは、可視光が  $R, G, B$  成分の  $0 \sim 255$  の値を持つことを利用して、それらの出現頻度をカウントした画像固有の量である[1][2]。画像の色情報のみを用いているため、画像の角度、位置には無関係である。すなわち、磁界ベクトル分布の可視化画像の相関係数を求める上で固有パターンを用いることが有効であることがわかる。

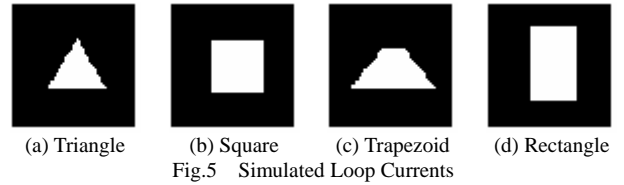


Fig.5 Simulated Loop Currents

Fig.6 は Fig.5 に示したループ電流分布が生成する磁界ベクトル分布を、測定時の任意の座標系および基準座標系により可視化した画像である。また、Table1 は画像の固有パターン間の相関係数を求めた結果である。Fig.6 に示す可視化画像および Table1 の結果より、測定時の任意の座標系において弱い相関を取るモデルであっても、基準座標系に変換することで良好な相関を持つことが判る。抛って、シミュレーション結果より、本論文の提案する 3 次元磁界ベクトル分布可視化法は有効であることが判明した。

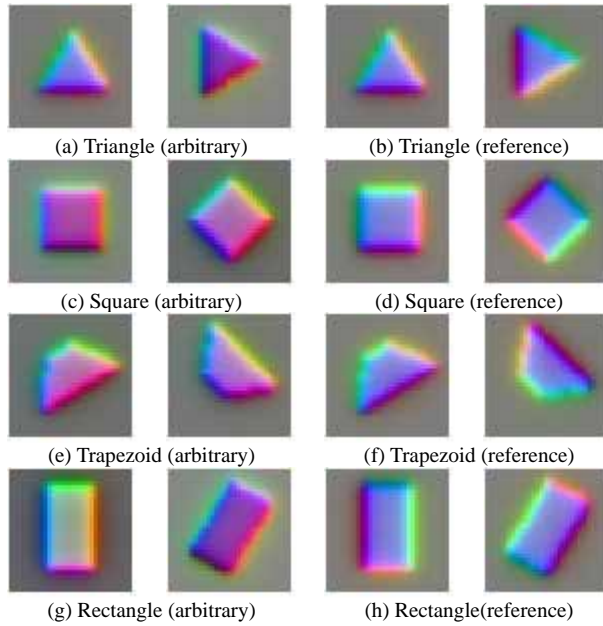


Fig.6 Visualized Color Images of Magnetic Field Vector Distributions

Table1 Correlation Coefficients of Image Eigen Pattern

	Arbitrary	Reference
Triangle	0.278330	0.973708
Square	0.322262	0.946446
Trapezoid	0.612614	0.879497
Rectangle	0.407532	0.781799

#### 4. まとめ

本論文では、我々が提案してきた、磁界ベクトルの  $x, y, z$  方向成分を可視光の  $R, G, B$  成分に対応させる可視化法において、垂直方向固定としていた  $z$  方向成分の基準座標決定法について述べた。

具体的には、測定された 3 次元磁界ベクトル分布のベクトル和を取り、定まった単一のベクトルの方向が測定時の  $z$  方向を向くことを利用して、アフィン変換を用い磁界の各成分の値を修正した。そして、修正した値から磁気素子の形状ベクトルを求め、基準座標系の  $x, y$  方向を決定した。

シミュレーションでは、測定時の座標系が様々な方向に向いている場合を想定し検証を行ったが、全ての結果について、基準座標系に変換した方が極めて良好な相関を得ることが出来た。すなわち、本論文の提案する、3 次元磁界ベクトル分布可視化法は、ベクトルの可視化法として極めて有効な手段であると言える。

#### 参考文献

- [1] 若林健一, 早野誠治, 齋藤兆古, "磁界の固有パターンを用いたコイル素子の認識", 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-00-262 (2000)
- [2] 佐藤隆紀, 早野誠治, 齋藤兆古, "動画像認識手法の提案と電子・電磁機器の非破壊検査への応用", 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-222 (2001)
- [3] 藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, "磁界ベクトル分布可視化法に関する研究", 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-03-141 (2003)
- [4] 高橋広幸, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, 堀井清之, 澤田彰, "最小自乗法による電流分布推定", 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-152 (1999)
- [5] 宮原晋一郎, 早野誠治, 齋藤兆古, "準 3 次元電流分布測定法とその応用", 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-153 (1999)

キーワード.

可視化画像、基準座標系、3次元磁界ベクトル

-----

Summary.

## **A Study of Visualization Methodology of the 3D Magnetic Field Vectors**

Naoki Fujieda   Seiji Hayano   Yoshifuru Saito  
Graduate School of Engineering, Hosei University

Visualization of the magnetic field distributions radiated from various electronic/electrical devices makes it possible to evaluate the magnetic field sources, i.e. current distributions. The magnetic field sources distributions reveal to the soundness of the electrical/ electronic devices. According this methodology, it may be possible to work out a fully automatic inspection system of the electrical/ electronic devices in a factory line. However, in order to realize this system, we have to solve to various serious difficult problems. One of the most basic and important problems is the visualizing methodology of magnetic fields, i.e. how to visualize the vector fields as the color images.

In the present paper, we propose a deterministic method, which enable us to the unique visualize vector field images as the color images. Applying our color image cognition methodology to these vector field images suggests that our vector field visualization method has various possibilities for the study of physical vector fields not only the magnetic fields.

Keywords.

Visualized Image, Reference Coordinate, 3D Magnetic Field Vectors