

磁界ベクトル分布の可視化法に関する研究

FUJIEDA, Naoki / SAITO, Yoshifuru / HAYANO, Seiji / 齊藤,
兆古 / 藤枝, 直樹 / 早野, 誠治

(出版者 / Publisher)

電子情報通信学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学 / 電子情報通信学会技術研
究報告. EMCJ, 環境電磁工学

(巻 / Volume)

103

(号 / Number)

564

(開始ページ / Start Page)

85

(終了ページ / End Page)

90

(発行年 / Year)

2004-01-13

磁界ベクトル分布の可視化法に関する研究

藤枝 直樹[†] 早野 誠治[†] 齋藤 兆古[†]

[†] 法政大学工学部 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

E-mail: [†] fujieda@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

あらまし 近年、指紋照合に拠る認証・識別に代表される画像データを用いた認識技術が実用化の兆しを見せている。我々は、このような現状に鑑み、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、任意の座標系における磁界の三成分から推定された磁気素子の形状ベクトルにより基準座標を決定し、基準座標系による磁界ベクトル分布の可視化を行う。

キーワード 磁界、可視化、ベクトル画像、形状ベクトル、基準座標

A Study of Visualization Methodology of Magnetic Field Vector Distributions

Naoki FUJIEDA[†] Seiji HAYANO[†] and Yoshifuru SAITO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Hosei University 3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8584 Japan

E-mail: [†] fujieda@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

Abstract According to the widely spreading use of the personal computers, image cognition such as finger print check may be practically used for the security and privacy problems. To realize image cognition, we have previously proposed one of the deterministic methods based on the color components of human visible light. Furthermore, we have proposed that magnetic field distribution can be visualized by corresponding the respective x, y, z components of magnetic field to red, green and blue color image components of light. By means of this visualization, it has been clarified that nondestructive inspection of the small electric devices can be carried out in a most efficient manner. However, we have confronted to a serious problem: how to determine a unique reference coordinate system for the measured magnetic field distributions.

In this paper, it is revealed that the form vector of the magnetic element estimated from three components of the magnetic field at arbitrary coordinate systems determines reference coordinates, and the magnetic field vector distributions on the reference coordinate system can be uniquely visualized.

Keyword Magnetic Field, Visualization, Vector Image, Shape Vector, Reference Coordinate

1. まえがき

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。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、電子機器周辺へ磁界を放射する。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を可視化し画像認識技術と組み合わせることで、放射電磁界の指向性や強度評価、さらに検査工程の全自動化などを究極の目標として、ベクトル場の可視化技術を開発してきた^{[1][2]}。

従来、筆者らが開発したベクトル場の可視化は、予め局所的に測定されるベクトルの基準座標が与えられていることを前提とした。具体的には、基準座標を既知として測定された磁界の三方向成分を光の R, G, B 成分に対応させ、磁界分布をカラーイメージとして表現し、画像認識技術を適用し、電子回路素子の健全性を評価した^[1]。さらに、ベクトル場の基準座標の変化を

ある特定範囲へ限定するが、測定自由度を改善した^[2]。また、磁界から求めた電流ベクトルでベクトル場の基準座標を決定することにより、シミュレーションにおいて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]。しかし、いずれの場合も基準座標が90°の整数倍に限定された手法であり、ノイズ・測定誤差から逃れられない実測値においては、それらの影響を受け正しい基準座標を得ることができなかった。

そこで本論文では、新たに測定磁界により求めた電流ベクトルから磁界源である磁気素子の形状を推定し、その形状から磁界ベクトル分布の基準座標を決定する手法を提案する。シミュレーション、実測値共に良好な結果を得ることが出来たので、ここに報告する。

2. 電流ベクトルを用いた磁気素子の形状推定

2.1. 電流ベクトル推定法

2.1.1. 最小自乗法による電流分布推定

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図.1に示すように、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 とすると式(1)のシステム方程式が成立する。

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

式(1)のシステム方程式から、推定される電流分布は式(2)で与えられることがわかる。

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

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、式(3)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]。

$$X = [C^T C]^{-1} C^T Y \tag{3}$$

図.2にモデル磁界分布と、最小自乗法により求めたループ電流分布の例を示す。

2.1.2. 電流ベクトル

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。図.3は図.2(d)のループ電流分布から求めた電流ベクトルである。

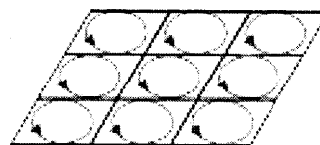


図.1 Loop Current Model

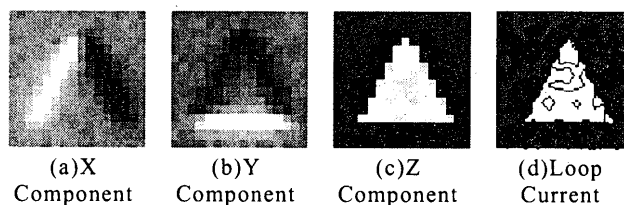


図.2 Magnetic Field Components and Estimated Loop Current

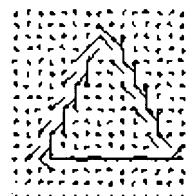


図.3 Current Vectors

2.2. ベクトルウェーブレット変換によるノイズ除去

2.2.1. ベクトルウェーブレット変換の考え方

従来、ウェーブレット変換は、一次元の波形データか二次元の画像データに用いられるのが大半で、ベクトルに適用された例は見当たらない。しかし、データの特徴抽出についてウェーブレット変換の効果は期待できる。

簡単のため、次式で与えられる二次元ベクトル Z を考える。

$$Z = X + Y \tag{4}$$

式(4)はベクトル Z が互いに直交する X , Y 成分ベクトルから成り、当然、

$$X \cdot Y = 0 \tag{5}$$

が成立する。

式(4)の両辺にウェーブレット変換行列 W を掛け算すれば、

$$WZ = WX + WY \quad (6)$$

となる。

したがって、ベクトルのウェーブレット変換はベクトルを構成する成分ごとにウェーブレット変換することでなされる^[6]。

2.2.2. 多重解像度解析によるノイズ除去

多重解像度解析とは、離散値データの組み合わせで構成されるベクトルを他のベクトルの和に分解し、元のベクトルの特徴を吟味する解析である。換言すれば、ベクトルを他のベクトルの線形結合に分解して解析する手法である。和となる個々のベクトルは、ウェーブレットスペクトラムベクトルを構成する要素をグループごとに逆変換して得られる。ファザーウェーブレットが最も低い時間・空間周波数成分を含み、他のスペクトラムは低周波から順次高周波成分を表すベクトルとなる。すなわち、高周波成分に相当する高レベルのスペクトラムを除去することにより、ベクトルのノイズ除去が可能となる。

図.4はドビッシーの8次基底関数を用いたベクトルウェーブレット変換の多重解像度解析によるノイズ処理の過程を示したものである。図.4(b)はフィルタ演算されたベクトルである。図.4(e)の最も高レベルのベクトルを削除することで主要ベクトルが抽出されていることがわかる。

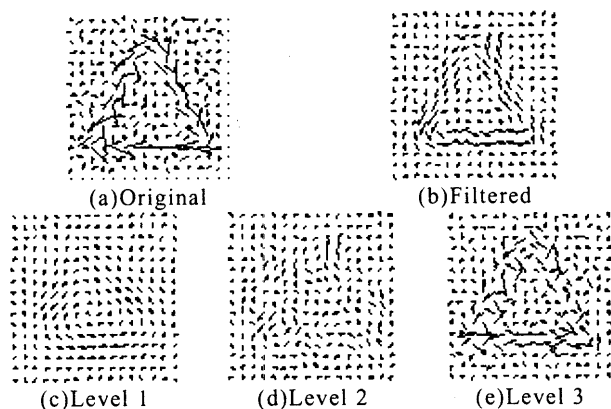


図.4 Multi-Resolution Analysis of Vector Wavelet Transform by Daubechies 8th Order Base Function

2.3. 磁気素子の形状推定

ベクトルウェーブレット変換の多重解像度解析によるノイズ処理で得られた電流ベクトル分布も、磁気素子の形状を顕著に表しているが、得られた電流ベ

クトルには依然として僅かなノイズが残っている。そこで、最小自乗法により得られたループ電流分布の平均値以上を1、平均値未満を0にして二値化演算し、二値化ループ電流分布から電流ベクトルを求める。さらに、ベクトルウェーブレット変換の多重解像度解析を行うことにより、磁気素子の形状を表すベクトルの抽出を試みる。

図.5は上段左側が元のループ電流分布およびその電流ベクトル、右側が二値化したループ電流分布およびその電流ベクトル、下段左側が磁気素子で右側が推定された形状ベクトルである。二値化したループ電流分布から得られる電流ベクトルをベクトルウェーブレット変換してノイズ除去を行い、ノイズ除去したベクトルからウェーブレット変換前のベクトルが存在する部分のみを抽出すれば、磁気素子の形状ベクトルを得ることができる。

図.5より、推定された形状ベクトルは良好な結果を再現していることがわかる。

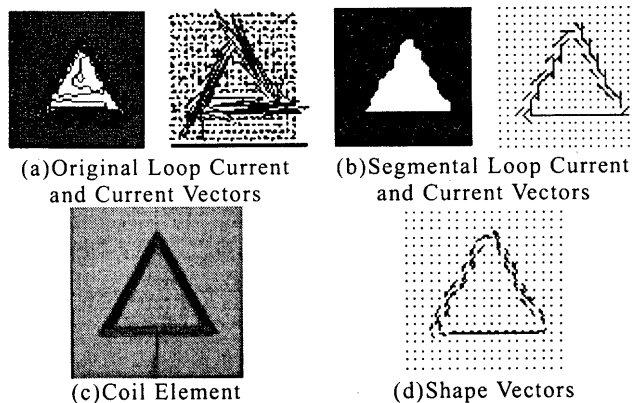


図.5 Estimate of Shape Vectors

3. 基準座標系磁界ベクトル分布

3.1. 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、大きさと方向を持つ。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 (appearance frequency) をカウントする。よって、その出現頻度を A とすれば、

$$A \in \text{Count}[\theta_{ij}, k] \quad (7)$$

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

となる。式(7)において $\text{Count}[\text{list}, \text{pattern}]$ は、 list にお

ける pattern に適合する要素の数を与える関数であり、 θ_{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。

すなわち、形状ベクトルのある角度における出現頻度は、形状ベクトルが表す図形の辺の長さに対応していることになる。図.6(a)は形状ベクトルの一例を示したものであり、図.6(b)は同図(a)の形状ベクトルにおける出現頻度 A をヒストグラム化したものである。

しかしながら図.6(b)からわかるように、図.6(a)の出現頻度 A のスペクトラムには多少のばらつきがあり、正確な形状の情報を表していない。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、式(8)で与えられる。

$$A_{revision} \in \sum_{l=-e}^e A_{k+l} \quad (8)$$

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

ただし、

$$k+l < 0 \Rightarrow k+l = k+l+360$$

$$k+l > 359 \Rightarrow k+l = k+l-360 \quad (9)$$

である。

図.7は図.6(b)の出現頻度 A を 6° の誤差角度 e を考慮し修正した修正出現頻度 $A_{revision}$ をヒストグラム化したものである。図.7のスペクトラムは図.6(a)の形状ベクトルの形状の情報を正確に表現していることがわかる。

次に形状ベクトルの中で、出現頻度の多い方向のベクトルのみを抽出し、抽出したベクトルを方向の近いベクトル同士でグループ化してその平均のベクトルを求めることで、形状ベクトルを構成する主要な最少個数のグループベクトルを生成する。

得られたグループベクトルの、ベクトル間の角度、すなわち、修正出現頻度のスペクトラムの横軸の間隔が全て等しいとすれば、それらのグループベクトルのベクトル和は零になるため、いずれかの方向のグループベクトルを基準座標の x 軸とする。ベクトル間の角度が全て等しくないとすれば、それらのベクトルのベクトル和は零にならないため、そのベクトル和の方向を基準座標の x 軸とする。

一般に z 軸は垂直方向に用いられることが多いため、本論文に於いても、基準座標の z 軸は xy 平面に対して垂直方向に固定する。 x 軸および z 軸が定まったことにより、基準座標の y 軸は自動的に決まる。

3.2. 基準座標系磁界ベクトル分布

任意の座標系で測定した磁界ベクトルの x,y 成分を基準座標系へ投影し、基準座標系の磁界ベクトルの x,y 成分を求める。任意の座標系の、ある一点における磁界の x,y 成分が作る磁界ベクトルを \mathbf{H}_{xy} とする。 \mathbf{H}_{xy} と基準座標系の x 軸とのなす角を θ 、 \mathbf{H}_{xy} の x,y 成分、すなわち任意の座標系における磁界ベクトルの x,y 成分をそれぞれ H_x, H_y とすると、基準座標系の磁界ベクトルの x,y 成分、 H_{xr}, H_{yr} は、

$$H_{xr} = |\mathbf{H}_{xy}| \cos \theta = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \cos \theta$$

$$H_{yr} = |\mathbf{H}_{xy}| \sin \theta = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \sin \theta \quad (10)$$

と求めることができる^[3]。図.8は任意の座標系のある一点における磁界ベクトルを基準座標系に変換する概念図を示す。全ての点において式(10)で基準座標系に変換することにより、磁気素子固有の磁界ベクトル分布を得ることが出来る。

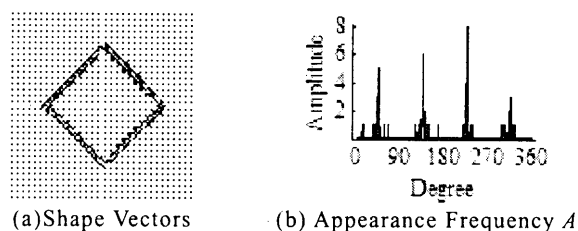


図.6 Shape Vector and Appearance Frequency

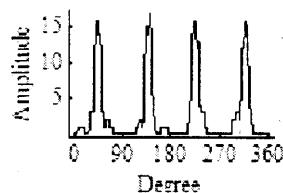


図.7 $A_{revision}$

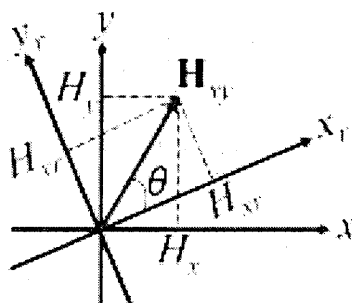


図.8 Transformation to the Reference Coordinates

4. 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像

4.1. 磁界ベクトル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 (Red), G (Green), B (Blue)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、以下に示す式(11)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。

$$\begin{aligned} 0 \leq f_r(x_i, y_i) &\leq 1, \\ 0 \leq f_g(x_i, y_i) &\leq 1, \\ 0 \leq f_b(x_i, y_i) &\leq 1, \end{aligned} \quad (11)$$

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

式(11)で、 f_r, f_g, f_b 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。図.10は、磁界の x, y, z 方向成分、およびそれらを光の R, G, B に対応させ可視化した磁界カラー画像の一例である。

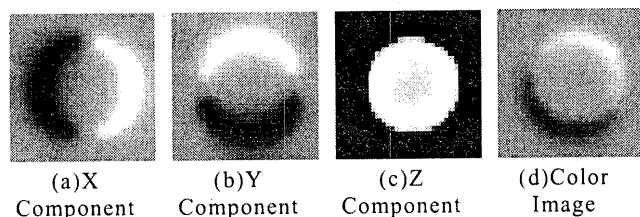


図.10 Magnetic Field Components and Visualized Magnetic Field Image

4.2. 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像

4.2.1. シミュレーション

シミュレーションでは、図.11に示す 32×32 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、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。同様にして、図.11のループ電流分布を持つ磁気素子がある角度で回転した場合の磁界を計算により求め、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。

図.12は図.11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、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、表.1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。図.12に示す可視化画像および表.1の結果より、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かなり強い相関を持つことが出来る。シミュレーションにおいて、本論文の提案する磁気素子の形状ベクトルを用いた基準座標系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。

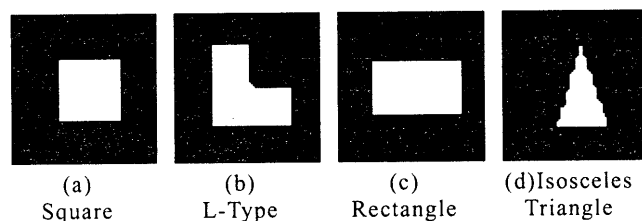


図.11 Simulation Loop Currents

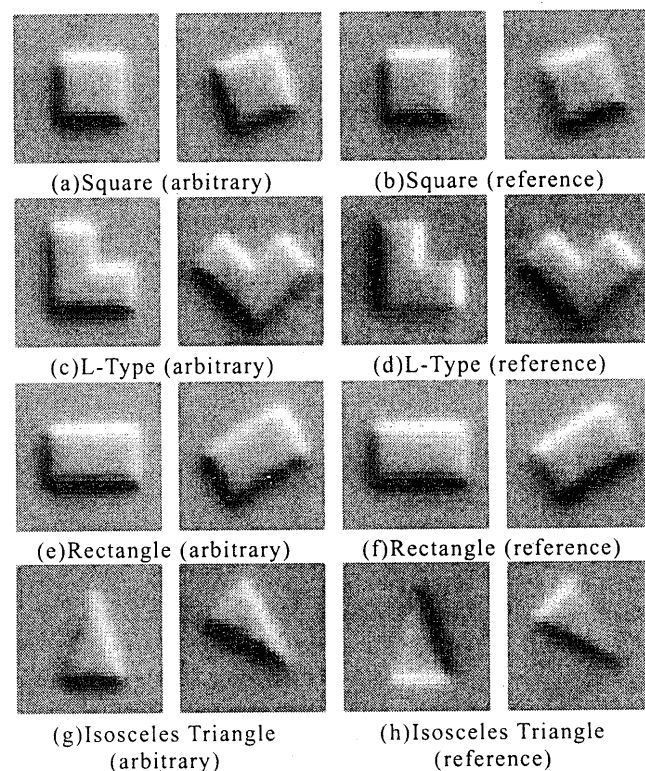


図.12 Visualized Color Images of Magnetic Field Vector Distributions (Simulation)

表.1 Correlation Coefficient of Image Eigen Pattern (Simulation)

	arbitrary	reference
Square	0.839252	0.920612
L-Type	0.561591	0.806130
Rectangle	0.692097	0.903217
Isosceles Triangle	0.276246	0.932002

4.2.2. 検証実験

図.13 に示す二種類のコイル素子に 0.5A, 10kHz の電流を通電し, サーチコイルに誘起する電圧を積分して得られる磁界を用いて検証実験を行った. 各コイル素子について, 縦 20 点, 横 20 点の計 400 点における磁界の三成分の測定を行い, 測定時の任意の座標系および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. 次にコイル素子を任意の角度で回転させ同様の測定および可視化を行う. 最後に画像の固有パターン間の相関係数を求めることで, 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像の再現性を評価する.

図.14 は図.13 に示したコイル素子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, 表.2 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. 図.14 に示す可視化画像および表.2 の結果より, 実測値においても, 基準座標系に変換することによりコイル素子固有の画像を生成することが可能であり, 角度が異なる同一コイル素子から生成された可視化画像間の相関は大きくなった. このことから, 本論文の提案する基準座標系磁界ベクトル分布可視化法は実測値においてもその妥当性が検証された.

5. 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 成分を光の R, G, B 成分に対応させる可視化法の問題点解決を試みた.

磁界ベクトルから最小自乗法により電流分布を求め, さらにウェーブレット変換によりノイズ処理を行うことで磁気素子の形状ベクトルを推定し, 形状ベクトルによる磁界の基準座標決定法を提案した.

その結果, 基準座標系による磁界ベクトル分布可視化画像は, 測定時の座標系に依存しない, 磁気素子固有の可視化画像であることが, シミュレーション, 実測値によって, 判明した. すなわち, 画像認識手法を用いた電子機器非破壊検査に, 本論文の提案する基準座標系磁界ベクトル分布可視化法は極めて有効であると考えられる.

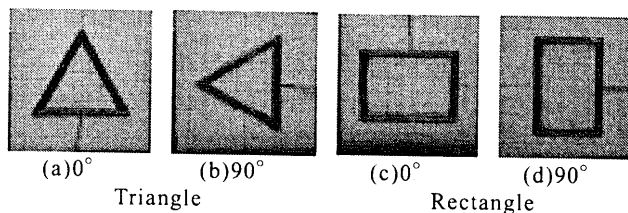


図.13 Tested Coils

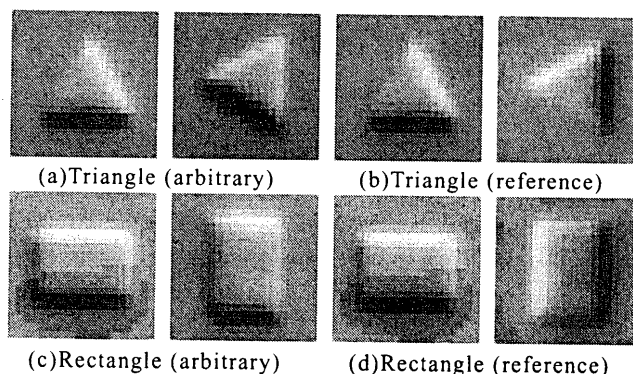


図.14 Visualized Color Images of Magnetic Field Vector Distributions (Measured Value)

表.2 Correlation Coefficient of Image Eigen Pattern (Measured Value)

	arbitrary	reference
Triangle	0.097760	0.575098
Rectangle	0.364570	0.645389

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, “磁界分布可視化法とその応用,” 可視化情報学会誌, Vol.23, No.1, pp.275-278, 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クス研究会資料, MAG-99-153, 1999.
- [6] 齋藤兆古, ウェーブレット変換の基礎と応用, 朝倉書店, 1998.