

可視化磁界ベクトル場の基準座標系に関する研究

藤枝直樹, 早野 誠治, 斎藤 兆古 (法政大学大学院)

堀井 清之(白百合女子大学)

Study on the Reference Coordinate System of Visualized Magnetic Vector Fields

Naoki FUJIEDA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

This paper reports a visualizing methodology of magnetic field vector distribution and its applications. The vector fields are visualized as the color images by projecting the x , y , and z components in each of the vectors to the red, green, and blue components of light, respectively. However, this visualizing methodology of vector fields has the problem that the visualized images always depend on the reference coordinate. Therefore, we have noticed to the current distributions that is the magnetic field source. As a result, we propose here a deterministic decision methodology of the reference coordinate along with current vector. Thereby, it is shown that the magnetic field vector distributions on the reference coordinate system can be uniquely visualized.

As an application of our vector field visualizing methodology, we apply our method to a vector field recognition problem. As a result, we have succeeded in carrying out the machine diagnosis of the vector field.

Keywords: Magnetic Field Vector, Visualized Image, Reference Coordinate

1. 緒 論

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。他方、電子機器の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。このような現状に鑑み筆者らは, 小型軽量電子機器周辺の放射電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する, ベクトル場の可視化技術を開発してきた¹⁻²⁾。具体的には, 測定された磁界ベクトルの三方向成分を光の R (Red), G (Green), B (Blue)成分に対応させることで, 磁界ベクトル分布をカラー画像として可視化する。しかし, Gauge 理論より, ベクトル場は基準座標を勘案しなければ一意的に決定できない³⁾。

このような背景を前提として本稿では, 磁界系におけるベクトル場の基準座標決定法を提案し, 基準座標系に

おける一意的な磁界ベクトル分布可視化画像を生成する。まず磁界ベクトル分布のカラー画像化手法について述べる。つぎに Gauge を前提として磁界の発生源となる電流に着目し, 電流ベクトルによる基準座標決定法を提案し, 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像を得る。

本手法の具体的応用例として, 磁界ベクトル分布可視化画像にカラー画像認識手法を適用し, ベクトル場の認識を行う。さらにベクトル場認識技術を利用した機械診断例として 磁界源となるコイル素子の位置推定を行う。

2. 磁界ベクトル分布の可視化

2.1 磁界ベクトル分布のカラー画像化

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 0 から 1 の値に正規化し光の

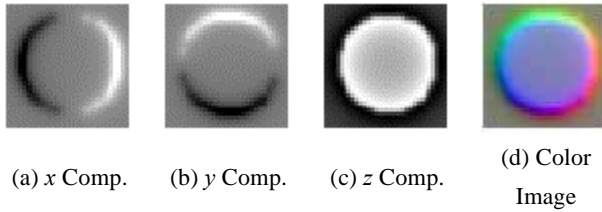


Fig.1 Magnetic Field Components and Visualized Color Image

R, G, B 成分に対応させることで、磁界ベクトル分布をカラー画像として表現することが出来る¹⁻²⁾。Fig.1 に磁界ベクトル分布の x, y, z 成分および生成された可視化カラー画像の一例を示す。

2.2 基準座標系

2.2.1 基準座標決定法

変位電流を無視し、導体中を流れる電流のみを対象とする準静的な電磁界系における磁界 \mathbf{H} と電流密度 \mathbf{J} の関係を表す Maxwell の方程式より、

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

であるから、磁界 \mathbf{H} の回転演算は電流密度 \mathbf{J} を与える⁴⁾。さらに、(1) 式の発散演算は、

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

となり、電流密度 \mathbf{J} はスカラーポテンシャルに起因する発散成分が存在しないため、一意的に求めることが出来る。すなわち、電流ベクトルを用いて磁界ベクトルの基準座標を決定すればよいことがわかる。

本稿では二次元平面に分布する電流を想定しているため、(1) 式の回転演算は、

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= -H_y \mathbf{i} + H_x \mathbf{j} \\ &= \mathbf{J} \end{aligned} \quad (3)$$

と変形される。(3) 式において H_x, H_y はそれぞれ磁界ベクトルの x, y 成分であり、 \mathbf{i}, \mathbf{j} はそれぞれ x, y 方向単位ベクトルである。(3) 式により磁界から電流を求めることができる。

本稿では電流ベクトルのベクトルノルムを重みとし、方向を要素とする重み付きヒストグラムを生成し、その最大値をとる要素が表す方向を基準座標系の x 軸と定める。 y 軸は x 軸から 90 度の方向とし、 z 軸は x, y 成分の関数であるため、 $x-y$ 平面の垂直方向と定める。

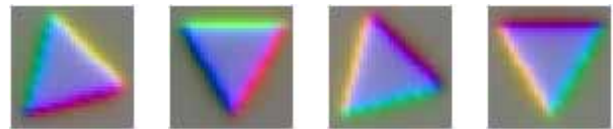
2.2.2 基準座標系磁界ベクトル分布可視化画像

得られた基準座標を用いて、磁界ベクトル分布の x, y 成分を基準座標系に変換する。ある一点における二次元 $x-y$ 平面磁界ベクトル \mathbf{H}_{xy} の x, y 成分をそれぞれ H_x, H_y とする。 \mathbf{H}_{xy} と基準座標軸とのなす角を θ とすると、基準座標系磁界ベクトル分布の R_x, R_y 成分、 H_{Rx}, H_{Ry} は、

$$\begin{aligned} H_{Rx} &= \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \cos \theta \\ H_{Ry} &= \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

と求めることができる³⁾。全ての磁界ベクトルに (4) 式を適用することにより、基準座標系磁界ベクトル分布の R_x, R_y, R_z 成分を得ることが出来る。そして基準座標系磁界ベクトル分布の R_x, R_y, R_z 成分を光の R, G, B 成分に対応させることにより、基準座標における磁界ベクトル分布可視化画像を得ることができる。

Fig.2 に測定時の元の座標系における可視化画像と基準座標系における可視化画像の例を示す。Fig.2 (a) の可視化画像に対して、同図 (b) の可視化画像はベクトル場固有の可視化画像である。これは Fig.2 (b) の画像はスクリーンの角度や配置に無関係な RGB 情報で構成されるためである。

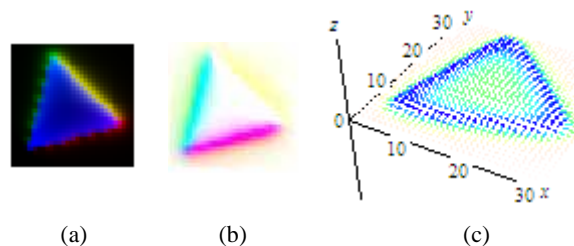


(a) Original Coordinate (b) Reference Coordinate
Fig.2 Visualized Image by Each Coordinate

2.2.3 磁界ベクトル分布の可逆的可視化法

コンピュータグラフィックスにおける画素の値は 0 から 1 の値しか持たないため、本稿で用いている磁界ベクトル分布可視化法は、元の磁界ベクトル分布を再現することはできない。すなわち、非可逆的可視化法である。このため、磁界ベクトル分布の x, y, z 成分をそれぞれ正と負の分布に分類し、それらを独立に R, G, B 成分に対応させ、正と負の画像を生成する。このようにして、得られた可視化画像から元の磁界ベクトル分布を再現することができる。

Fig.3 に磁界ベクトルの正と負のそれぞれの情報を持つ可視化画像および再現されたベクトル分布を示す。



(a) Plus Image (b) Minus Image (c) Recovered Vectors
Fig.3 Reversible Visualizing Methodology

3. 磁界ベクトル可視化画像の応用

3.1 ベクトル場認識

3.1.1 画像の固有パターン

計算機のスクリーン上へ可視化された画像は二次元平面上の画素で構成されており、画素の幾何学的配置によって表現される。カラー画像の場合、各画素は R, G, B 成分の情報からなる。そのため、計算機のスクリーン上の可視化画像は、スクリーンの解像度や視点に依存する性質をもつ。このようなハードウェアに依存する性質を削減した可視化画像の不変量を、本稿では画像の固有パターン (Image Eigen Pattern) と呼ぶ¹⁻²⁾。

画像の固有パターンは画像中における R, G, B 成分の各強度値をカウントし、正規化ヒストグラムを算出することで得られる。Fig.4 に画像の固有パターンの一例を示す。画像の固有パターンは位置や向きに無関係な画像固有の量であることがわかる。

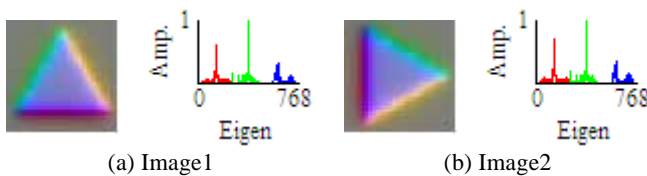


Fig.4 Image Eigen Pattern

3.1.2 固有パターンの一致性

データベースに n 個の画像の固有パターンが得られているとすれば、システム行列 C を、

$$C = [\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n] \quad (5)$$

として、(6) 式の線形システム方程式が得られる。

$$\mathbf{E}_x = C \cdot \mathbf{X} \quad (6)$$

(6) 式において \mathbf{E}_x は任意の入力画像の固有パターンであり、 \mathbf{X} はデータベース画像の各固有パターンの重みを要素とする n 次のベクトルである。固有パターンの次数を m とすると、 $n = m$ でない限りシステム行列 C は m 行 n 列の長方形列となるので、(6) 式は不適切な線形システム方程式となる。本稿では $m > n$ の関係であると仮定し、解ベクトル \mathbf{X} の算出に (7) 式で示す最小自乗法を適用する⁵⁾。

$$\mathbf{X} = [C^T C]^{-1} C^T \mathbf{E}_x \quad (7)$$

画像認識は解ベクトル中で最大値をとる要素を認識された対象として行われる。

3.1.3 ベクトル場認識

以上に述べた画像の固有パターン、線形システム方程式によるカラー画像認識手法を用いてベクトル場の認識を行う。認識方法は以下の通りである。

幾つかの磁気素子を用い、そこから測定される磁界ベクトル分布を可視化カラー画像に変換し、データベースを構築する。この時、各磁気素子における測定座標 (配置, 向き) は一通りとする。そして各データベースの可視化画像に対して画像の固有パターンを抽出する。次に

データベースに用いた磁気素子と同様の磁気素子から、任意の座標で測定される磁界ベクトル分布を可視化カラー画像に変換し、画像の固有パターンを抽出する。得られた固有パターンを用いて線形システム方程式を解き、解ベクトルを算出する。そして、得られた解ベクトルの最大値をとる要素で認識を行う。

本稿では合計 10 種類の磁気素子を採用し、そこから得られる磁界ベクトル分布可視化画像を用いてデータベースを構築した。入力可視化画像には、データベースに用いた 10 種類の磁気素子を様々な角度で配置した場合に得られる合計 100 種類の可視化画像を採用した。

また、非可逆的可視化画像および可逆的可視化画像についてベクトル場認識、さらに、それぞれ測定時の原座標系における可視化画像、基準座標系における可視化画像についてベクトル場認識を行った。可逆的可視化画像を用いた場合の画像の固有パターンは、正と負の情報を持った画像それぞれから画像の固有パターンを抽出し、それらを合成して得た。

ベクトル場認識の結果を Table1 に示す。基準座標系可視化画像を用いた識別は正確な認識率が高く、さらに可逆的可視化画像を用いた場合、最も高い認識率が得られた。これは基準座標系可視化画像がベクトル場本来の可視化画像であることに加え、可逆的可視化法の二画像を用いることに起因している。すなわち、可逆的可視化法は原ベクトルの情報が縮退しない。

Table1 Recognition Rate [%]

Irreversible Visualization		Reversible Visualization	
Original	Reference	Original	Reference
43	69	26	81

3.2 ベクトル場認識による機械診断

本節では、前節で述べたベクトル場認識を利用した機械診断技術について述べる。ここではコイル素子の位置推定問題について考える。具体的には、プリント基板を模擬した回路と、回路を構成するコイル素子単体から生じる磁界を測定する。回路から得られた磁界ベクトル分布を幾つかの領域に分割し、それぞれを可視化カラー画像に変換し、データベースを構築する。続いて、コイル素子単体から得られた磁界ベクトル分布を可視化カラー画像に変換する。そして、コイル素子単体から得られた可視化カラー画像を入力画像として画像認識を行い、認識されたデータベース画像の回路中における位置を、入力画像が表すコイル素子の存在する位置として推定する。

Fig.5 にプリント基板を模擬した回路、位置推定対象のコイル素子およびそれらの磁界ベクトル分布可視化画像を示す。磁界の測定はコイル素子に 10[kHz], 1[A] の電流を通電し、縦 20 点、横 20 点の測定点においてサーチコイルに誘起する電圧から (8) 式に示すファラデーの法則により求めた⁴⁾。(8) 式で、 v はサーチコイルに誘起した

電圧, B は磁束密度, N, S はそれぞれサーチコイルの巻き数, 断面積である.

$$v(t) = -NS \left(\frac{dB(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

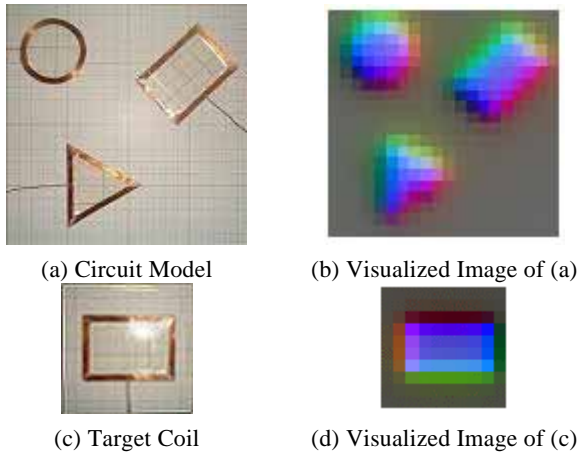


Fig.5 Experiment Model

Fig.6 にデータベース画像となる回路から測定された磁界ベクトル分布を任意の領域に分割し可視化したカラー画像を示す. 本稿では縦 10 点, 横 10 点の領域を 2 画素ずつ移動してサンプリングを行い, それぞれについて基準座標系に変換している.

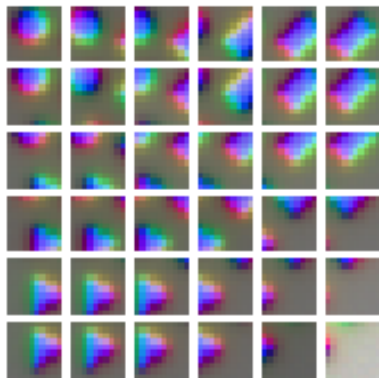


Fig.6 Sampled Images

Fig.7 にベクトル場認識の結果を示す. Fig.7 では, 左から入力可視化画像, 線形システム方程式の解ベクトルおよび認識された可視化画像を示している. Fig.8 はベクトル場認識の結果から推定されたコイル素子の実際の位置を示している. ほぼ妥当な位置を推定することができた.

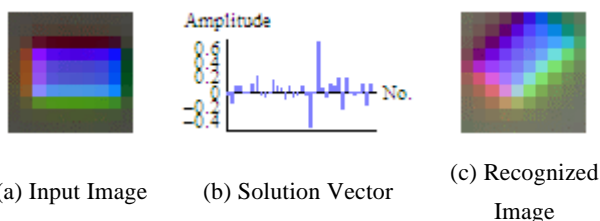


Fig.7 Recognition of Vector Field

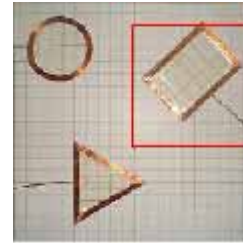


Fig.8 Estimated Position of Target Coil

4. 結言

本稿では, 磁界ベクトル場の基準座標決定法を提案した. 磁界の発生源である電流に着目し, 電流ベクトルの方向から磁界ベクトル場の基準座標を決定した. 従来の磁界ベクトル分布可視化法における可視化画像の座標系依存問題を解決し, ベクトル場固有の可視化画像を生成することを可能とした. また, 可視化画像から元のベクトル場を再現可能な可逆的の可視化法を提案した.

磁界ベクトル場可視化技術の応用として, 本稿では画像の固有パターン, 線形システム方程式を用いたカラー画像認識手法をベクトル場可視化画像へ適用し, ベクトル場の認識を行った. その結果, ベクトル場本来の情報量を持つ可逆的の可視化画像法がベクトル場認識問題に対して最も高い認識率を有することが判明した. さらに, ベクトル場認識による機械診断としてコイル素子の位置推定を行い, 良好な位置推定を行うことができた. このことは, ベクトル場認識技術を用いることにより, 計算機による電気・電子機器の非破壊検査が可能となり, 人間の目視では不可能な小型機器の検査および検査の自動化が可能であることを示唆している.

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) 齋藤兆古: 応用電磁工学入門, 産図テキスト, 2000
- 5) G. Strang: Linear Algebra and Its Applications, Academic Press, Inc., 1976