

2004 年度 修士論文

磁界ベクトル場の可視化法に関する研究

法政大学大学院
工学研究科 電気工学専攻 修士課程

学籍番号 03R3235
氏名 藤枝直樹

指導教員 齋藤兆古

目次

| | |
|---------------------------------------|----|
| Abstract..... | 2 |
| 1. 序論..... | 3 |
| 2. 磁界ベクトル分布の可視化..... | 4 |
| 2.1. 磁界ベクトル分布の可視化法..... | 4 |
| 2.1.1. 従来可視化法..... | 4 |
| 2.1.2. 磁界ベクトル分布のカラー可視化画像..... | 4 |
| 2.2. 基準座標系..... | 5 |
| 2.2.1. 基準座標..... | 5 |
| 2.2.2. 基準座標決定法..... | 7 |
| 2.2.3. 基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像..... | 10 |
| 2.3. 磁界ベクトル分布の可逆的可視化法..... | 12 |
| 3. 可視化磁界ベクトル分布の応用..... | 14 |
| 3.1. ベクトル場認識..... | 14 |
| 3.1.1. 画像の固有パターン..... | 14 |
| 3.1.2. 固有パターンの一致性..... | 15 |
| 3.1.3. ベクトル場認識..... | 16 |
| 3.1.4. 可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識..... | 19 |
| 3.2. ベクトル場認識による機械診断..... | 23 |
| 4. 結言..... | 26 |
| 参考文献..... | 27 |
| 研究業績..... | 28 |

Abstract

This paper reports a visualizing methodology of magnetic field vector distributions 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 a problem that the visualized images always depend on the reference coordinate system. To overcome this difficulty, we have focused on the current distributions that are the magnetic field source. As a result, we propose a deciding methodology of reference coordinate system of magnetic field vector visualization along with current vector distribution. Thus, the magnetic field vector distributions on the reference coordinate system can be uniquely visualized. Further, we propose one of the reversible visualizing methodologies that make it possible to recover vector field from visualized color images, exactly.

As an application of the visualizing methodology of magnetic vector field, we apply an image cognition method to the visualized magnetic vector fields in order to carry out the machine diagnosis of electric circuits. As a result, we have confirmed that our machine diagnosis/inspection may be practically employed at the electric circuit inspection workshop in the plants.

1. 序論

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。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。また、電子機器の小型軽量化は配線の短縮化を可能とするプリント基板の実装技術のみならず半導体の高密度集積化が大きな貢献をしている。究極の配線技術であるプリント基板と半導体の高密度集積化によって現代の小型軽量電子機器が開発され、個人レベルまで小型軽量電子機器の普及が促された結果として、通信や情報管理に大きな利便性を与えた。しかし、それら小型軽量電子機器の多くは密閉構造をしているため非破壊的に検査を行うことができず、またその小型化故に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、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が開発されている[1][2][3][4]。具体的には、測定された磁界ベクトルの三直交方向成分を光の $R(\text{Red})$, $G(\text{Green})$, $B(\text{Blue})$ 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まらない[5]。

本論文では、磁界系におけるベクトル場の基準座標決定法を考え、基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を生成する。具体的には、まず磁界ベクトル分布のカラー可視化画像の生成法、Gauge 理論を基にした基準座標の概念について述べる。そして、磁界からその発生源である電流を推定する方法、電流ベクトルによる基準座標決定法について述べ、基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を得る。また、可視化した画像から元のベクトル場を再現する可逆的可視化法について述べる。

可視化磁界ベクトル分布の応用例として、可視化磁界ベクトル分布画像へ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応用として、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可視化法

2.1.1. 従来の可視化法

Fig.1 は、磁界ベクトル分布の一例と各成分の密度分布を示している。従来広く用いられている磁界の可視化法は Fig.1 (a) のように三次元のベクトル分布で表現する方法や、Fig.1 (b) - (d) のように各成分を独立して密度分布で表現する方法などが挙げられる。しかし、前者は二次元のディスプレイや紙面において、その分布傾向を正確に判断することが困難である。また後者は各成分を独立に密度分布、すなわちスカラー量で表現するため、磁界ベクトルの方向成分を判断することが困難である。

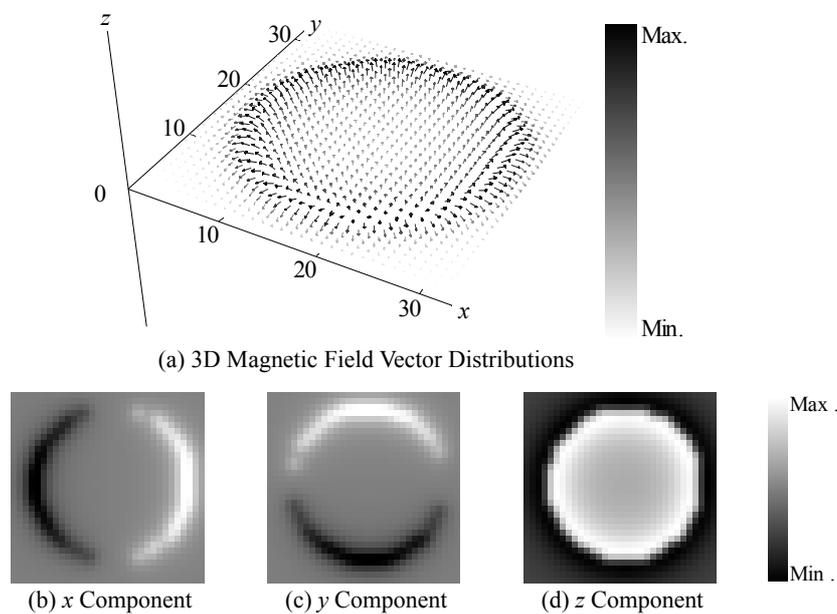


Fig.1 Magnetic Field Vector Distributions and Its Each Components

2.1.2. 磁界ベクトル分布のカラー可視化画像

Fig.1 のように、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、それぞれを光の三原色である 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可視化画像として表現することができる[1][2][3][4]。しかし、磁界ベクトルは正と負の値を持つが、コンピュータグラフィックスにおいて画像を構成する各画素は 0 から 1 の値しか持たない。そのため、次に示す (1) 式の条件を満たすように磁界ベクトルの各成分の値を正規化する必要がある。

$$\begin{aligned} 0 &\leq f_r(x_i, y_j) \leq 1 \\ 0 &\leq f_g(x_i, y_j) \leq 1 \quad (i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n) \\ 0 &\leq f_b(x_i, y_j) \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 式で、 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 はカラー可視化画像の x, y 方向の画素数である。また m, n は磁界の x, y 方向の測定点数でもあることから、この場合可視化画像の解像度と磁界の測定点数は対応する。Fig.2 は RGB 座標系、Fig.1 の磁界ベクトル分布の x, y, z 成分を対

応させた R, G, B 成分, および磁界ベクトル分布可視化カラー可視化画像である.

本可視化法は磁界ベクトル分布を二次元のカラー画像として表現するため, 二次元のディスプレイ上においても, その分布傾向の判断が容易である. また各画素の色は R, G, B 成分の構成比, すなわち磁界ベクトルの x, y, z 成分により決まるため, 画像の色から磁界ベクトルの大きさや方向を判断することが可能である.

以後, 本論文において, 磁界ベクトル分布の可視化はカラー画像化手法を用いる.

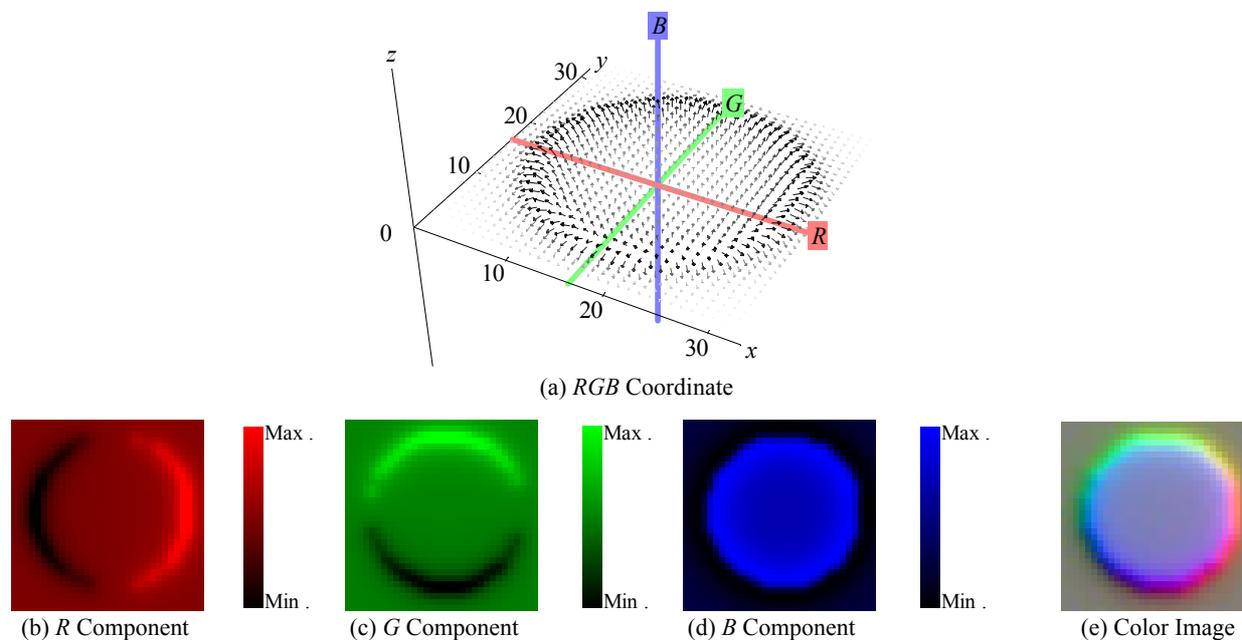


Fig.2 Visualizing Methodology of Magnetic Field Vector Distributions

2.2. 基準座標系

2.2.1. 基準座標

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,

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

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[6]. ここで, 任意のスカラー場を φ とすると,

$$\nabla \times \nabla \varphi = 0 \quad (3)$$

が成り立つため,

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}' + \nabla \varphi \quad (4)$$

としても,

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H}' \quad (5)$$

の値は同じであり, 磁界ベクトル場 \mathbf{H} は一意的に決定できないことがわかる. ベクトル場を一意的

に決定するためには、 $grad \phi$ の大きさによって基準座標を変化させなければならない。

ここで、具体的な例により基準座標の簡単な概念を説明する。Fig.3 (a) に示した左右二個のベクトルは一見すると異なるベクトルと見なされる。これは、我々が暗黙に図が描かれている枠を基準座標と仮定するためである。しかし、Fig.3 (b) に示すように基準座標軸を考えると両者は同じベクトルであることがわかる。

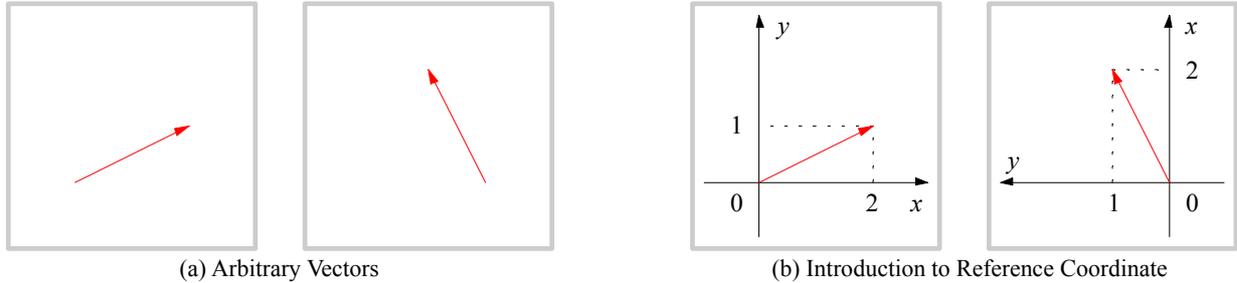


Fig.3 Concept of Reference Coordinate

次に、磁界ベクトル分布可視化の例で基準座標を考える。Fig.4 はある磁気素子から測定された磁界ベクトル分布とそのカラー可視化画像を示しており、Fig.5 は同一の磁気素子を異なる向きで配置した場合において測定された磁界ベクトル分布とそのカラー可視化画像を示している。

Fig.4, Fig.5 より明らかなように、同一の磁気素子から測定された磁界ベクトル分布であるにも関わらず、それぞれのカラー可視化画像は同一の画像ではない。これは磁界ベクトルの各成分の値が座標系に依存するため、共通の座標系で磁気素子の配置が異なる場合では、磁界ベクトル分布の x, y, z 成分が変化することに起因する。すなわち、磁界ベクトルの x, y, z 成分に対応する R, G, B 成分の、各画素における構成比が変化するため同一のカラー可視化画像が生成されない。

以上のことから、ベクトル場は常に基準座標を勘案しなければ一意的に決定することができない。換言すれば、ベクトル場における議論は基準座標系で為さなければ無意味である。

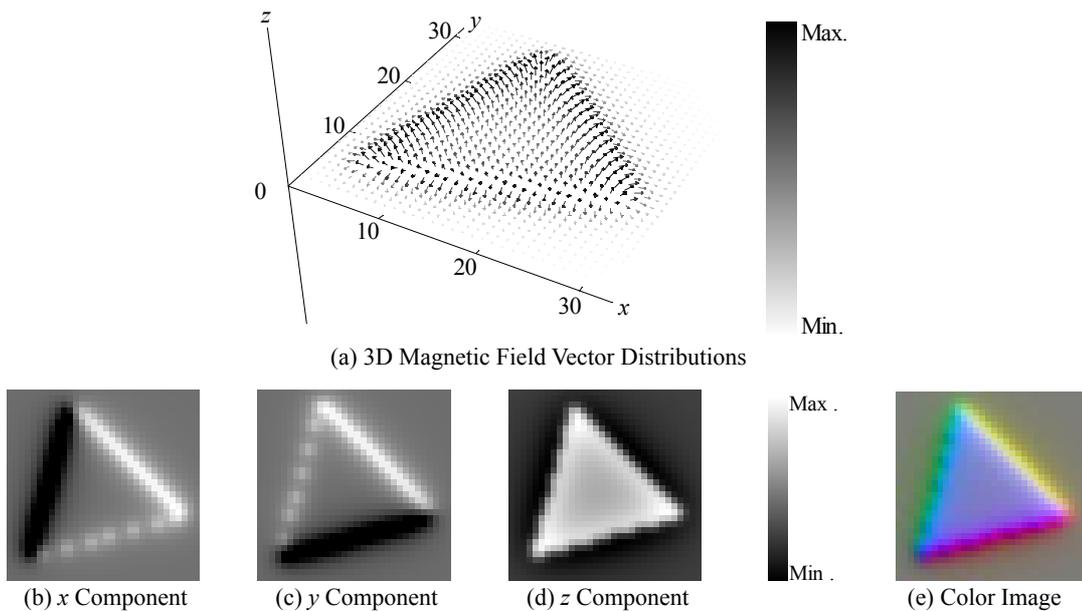


Fig.4 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions 1

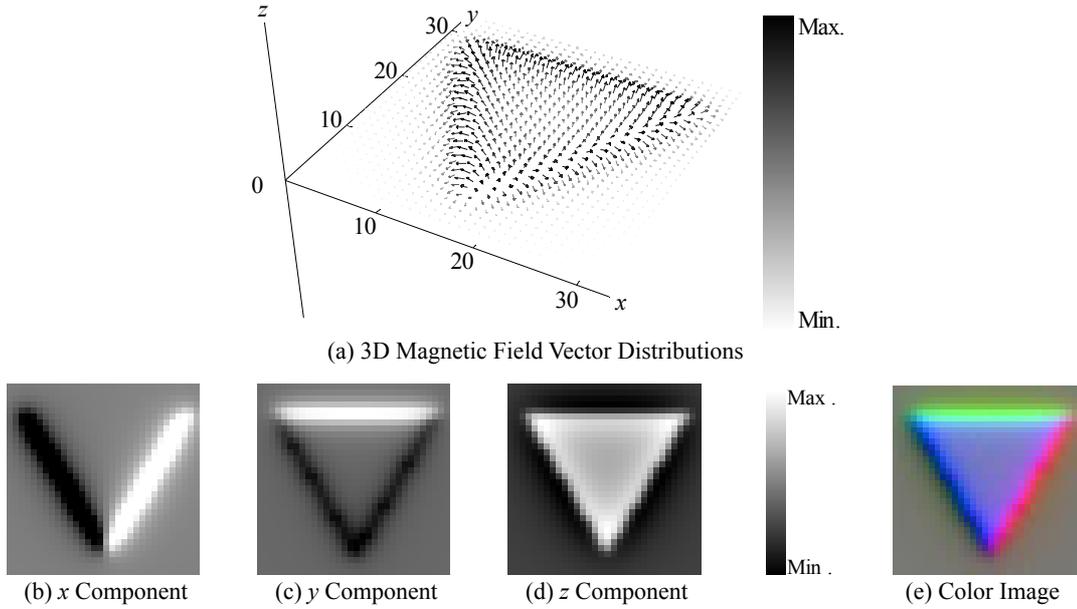


Fig.5 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions 2

2.2.2. 基準座標決定法

2.2.1 項の例では，同一磁気素子を想定しているため，Fig.4 と Fig.5 のカラー可視化画像の変化は任意のスカラー場 φ に起因する発散的ベクトル $grad \varphi$ の影響を受けていると考えられる．すなわち両者は (4) 式と同じ関係にあると言える．また，(4) 式から導かれる (5) 式より，同一磁気素子において電流ベクトルは共通の値となることがわかる．さらに，(2) 式の発散演算は，

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (6)$$

であるから，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できる[6]．よって，電流ベクトルにより磁界ベクトル分布の基準座標は決定される．まず電流ベクトルの推定法について述べる．

本論文では二次元平面に分布する電流を想定している．そのことを考慮すると，(2) 式の磁界から電流を求める演算は，

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} \\ &= \mathbf{J} \end{aligned} \quad (7)$$

と変形される．(7) 式において H_x, H_y, H_z はそれぞれ磁界ベクトルの x, y, z 方向成分であり， \mathbf{i}, \mathbf{j} はそれぞれ x, y 方向の単位ベクトルである．ここでは磁界ベクトルの x, y 方向成分は無視し，以下に示す (8) 式により二次元平面に分布する電流ベクトルを求める．

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} \mathbf{i} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \mathbf{j} \\ &= \mathbf{J}\end{aligned}\tag{8}$$

しかし、磁界ベクトル分布は無限の解像度を持つ連続系であるが、実際に得られるデータは有限な離散値系データであるために厳密な回転演算はできない。このため、次式の中心差分を用いて回転演算を近似する。

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} \mathbf{i} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \mathbf{j} \\ &\cong \frac{H_{z,j+1} - H_{z,j-1}}{2} \mathbf{i} - \frac{H_{z,i+1} - H_{z,i-1}}{2} \mathbf{j}\end{aligned}\tag{9}$$

($i = 1, 2, \dots, m$ $j = 1, 2, \dots, n$)

(9) 式で下添え字 i, j は i 行 j 列の位置を表し、 m, n は x, y 方向の要素数である。また、(9) 式を用いて回転演算を行う場合、端部のデータ、例えば 1 行 1 列のデータに対して実際は存在しないゼロ行ゼロ列のデータを必要とする。ここでは、ゼロ行とゼロ列それぞれのデータは 1 行と 1 列のデータと等しい、すなわち端部のデータは対称なデータで構成されるとする。このような境界条件を同次ノイマン境界条件といい、回転演算に適用する。

Fig.6 に Fig.4 の磁界ベクトル分布の、 z 成分の回転演算により得られる二次元電流ベクトル分布を示す。ここで、ベクトルの濃度は各ベクトルのノルムに対応している。

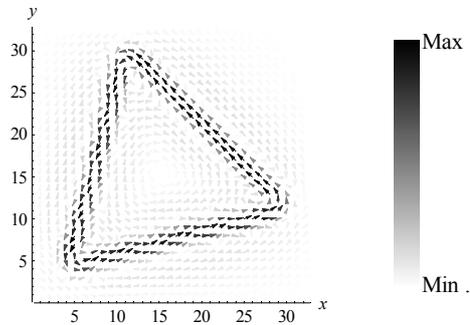


Fig.6 Current Vector Distributions by Rotation of Magnetic Field Vector z Component

続いて、二次元ベクトル分布の大きさと方向の成分を含有するベクトル場固有の量として、ベクトル固有パターン (Vector Eigen Pattern) を提案する[7][8]。ここで、ある二次元ベクトルを \mathbf{V} 、 \mathbf{V} の x, y 成分をそれぞれ V_x, V_y とすると、二次元ベクトル分布は、

$$\mathbf{V}_{i,j} = \{V_x(i,j), V_y(i,j)\} \quad (i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n)\tag{10}$$

となる。(10) 式で m, n はベクトル分布の x, y 方向の要素数である。また、位置 (i, j) におけるベクトルのノルム V_{norm} 、 x 軸を基準とした位置 (i, j) におけるベクトルの角度 V_{degree} はそれぞれ、

$$\begin{aligned}
V_{norm}(i, j) &= \|\mathbf{V}_{i,j}\| \\
&= \sqrt{V_x(i, j)^2 + V_y(i, j)^2}
\end{aligned}
\quad (i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
V_{degree}(i, j) &= \arccos \frac{\mathbf{V}_{i,j} \cdot \mathbf{i}}{\|\mathbf{V}_{i,j}\| \|\mathbf{i}\|} \\
&= \arccos \frac{V_x(i, j)}{V_{norm}(i, j)} \quad [\text{rad}]
\end{aligned}
\quad (i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

となる．(12) 式中の \mathbf{i} は x 軸方向単位ベクトルである．そして，(13) 式に示すように，ベクトル分布の 360 度方向それぞれの角度におけるベクトルの出現頻度を，各ベクトルのノルムを重みとして求めることにより，ベクトル固有パターン V_{eigen} は算出される．

$$\begin{aligned}
V_{eigen}(\theta) &= V_{eigen}(\theta) + V_{norm}(i, j) \\
\theta &= \text{Round} \left[V_{degree}(i, j) \times \frac{180}{\pi} \right]
\end{aligned}
\quad (i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

(13) 式で $\text{Round}[\]$ は括弧内の数値を整数化する演算である．(13) 式により Fig.6 の二次元電流ベクトル分布のベクトル固有パターンを求め，最大値を 1 に正規化したヒストグラムを Fig.7 に示す．

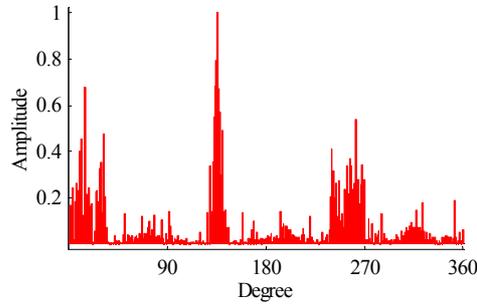


Fig.7 Vector Eigen Pattern of Current Vector Distributions in Fig.6

ここで Fig.7 のベクトル固有パターンのヒストグラムに注目すると，分布パターンが拡散していることがわかる．これは電流ベクトル分布を求める回転演算には微分演算が含まれるため，誤差を拡大していることに起因する．そこで微分演算を含まない電流ベクトル推定法を考える．

(7) 式において H_x, H_y の項には z 方向の微分演算を伴うが，本論文は二次元平面で測定される磁界ベクトル分布を想定しているため z 方向には一定値である．そのため，

$$\begin{aligned}
J_x &\propto H_y \\
J_y &\propto H_x
\end{aligned} \quad (14)$$

として，微分演算を含まない回転演算を行うことができる．(14) 式において J_x, J_y はそれぞれ電流密度ベクトル \mathbf{J} の x, y 方向成分である．Fig.8 に Fig.4 の磁界ベクトル分布に (14) 式を適用して得られ

た二次元電流ベクトル分布と、そのベクトル固有パターンを示す。Fig.8 より、(14) 式を適用して得られた二次元電流ベクトル分布は、誤差の拡大が抑えられた精度の高い電流ベクトルであると言える。

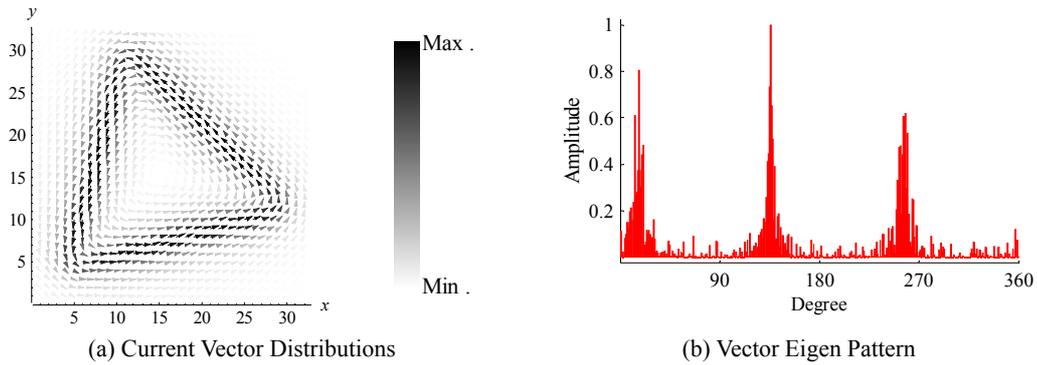


Fig.8 Current Vector Distributions and Vector Eigen Pattern by Rotation of Magnetic Field Vector x, y Components

V_{eigen} の各要素における振幅の値は、ベクトル分布が全体として、如何なる方向に向いているかを表している。本論文では、 V_{eigen} の最大値を取る要素の方向を基準座標系の x 軸方向と定義する。 y 軸方向は基準座標系の x 軸方向から 90 度の方向と定義する。 z 軸方向については、本論文では二次元平面に分布する電流を想定しているため、電流密度 \mathbf{J} は x, y の関数であり、また (7) 式より磁界ベクトルの z 方向成分 H_z も x, y のみの関数であることから、電流分布面に対して垂直方向固定としている。

以上の手順で求められた Fig.4 の磁界ベクトル分布の基準座標系を Fig.9 に示す。 図中の R_x, R_y, R_z はそれぞれ基準座標系の x, y, z 軸である。

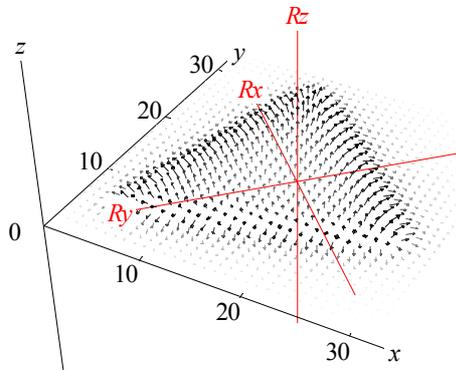


Fig.9 Reference Coordinate

2.2.3. 基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像

まず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。任意の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 R_x とのなす角を θ とすると、基準座標系における磁界ベクトル分布の R_x, R_y 成分、 H_{R_x}, H_{R_y} は、

$$H_{R_x} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \cos \theta$$

$$H_{R_y} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \sin \theta$$
(15)

から得られる[5]. Fig.10は磁界ベクトル \mathbf{H}_{xy} の x, y 成分を基準座標系に変換する概念図である. 全ての磁界ベクトルへ (15) 式を適用し, 基準座標系における磁界ベクトル分布の R_x, R_y, R_z 成分を得る. そして 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, 基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を得ることができる.

Fig.11はFig.4(a)の磁界ベクトル分布の R_x, R_y, R_z 成分およびそのカラー可視化画像であり, Fig.12は同様の手法で生成したFig.5(a)の磁界ベクトル分布の R_x, R_y, R_z 成分およびそのカラー可視化画像である. 測定時の原局所座標系で可視化されていた場合, 両者は同一の画像として表現されなかったが, 基準座標系で可視化することにより生成された画像は色情報が対象の位置・角度に依存せず, ベクトル場の一意的な可視化画像と考えられる.

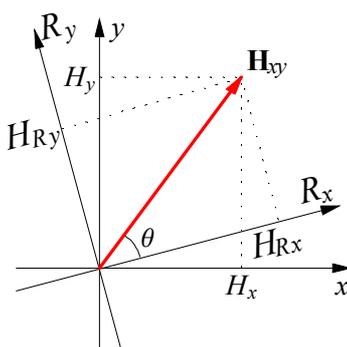


Fig.10 Transformation to the Reference Coordinate

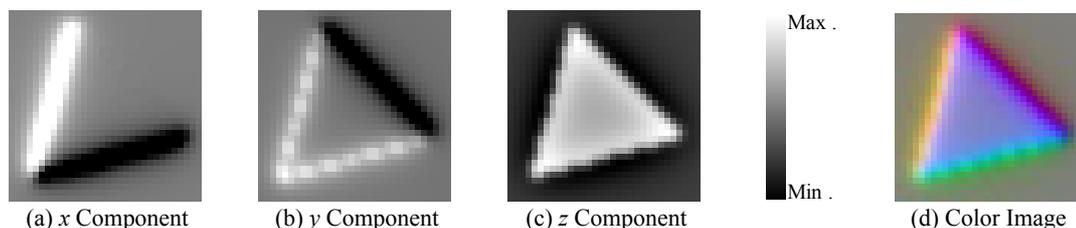


Fig.11 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions on Reference Coordinate of Fig.4

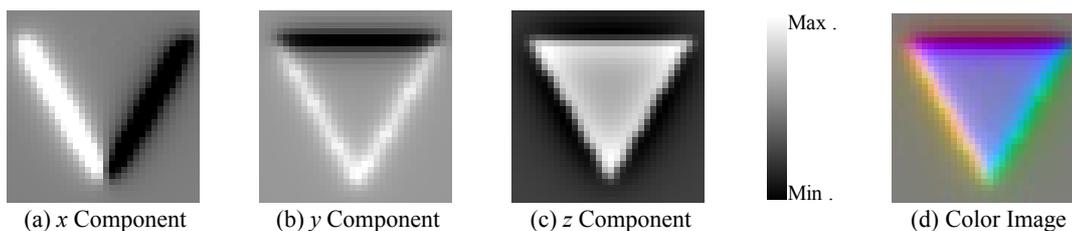


Fig.12 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions on Reference Coordinate of Fig.5

他の幾つかの磁気素子においても, 基準座標系に変換することで磁気素子の向きに依存しないベクトル場固有のカラー可視化画像を得ることができた. その一例を以下の Fig.13, Fig.14 に示す.

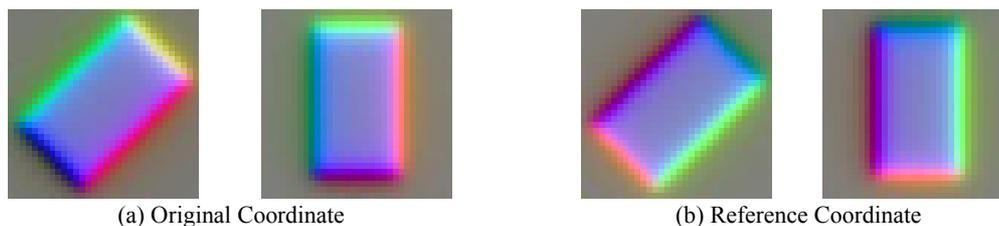


Fig.13 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions on Reference Coordinate (Rectangle Type)

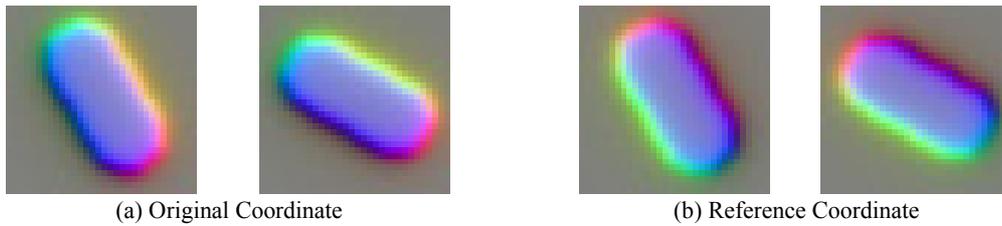


Fig.14 Visualized Image of Magnetic Field Vector Distributions on Reference Coordinate (Capsule Type)

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というのは、0 から 1 の値しか持たない。そのため本論文で用いている磁界ベクトル分布カラー可視化画像は、元の磁界ベクトル分布を再現することができない。Fig.15 は Fig.4 の磁界ベクトル分布カラー可視化画像の R, G, B 成分、それらの R, G, B 成分をベクトルの x, y, z 成分に対応させて再現されたベクトル分布、および元の磁界ベクトル分布を示している。なお、ベクトル分布のベクトルの色は各ベクトルのノルムに対応している。Fig.15 からわかるように、磁界ベクトル分布カラー可視化画像から元の磁界ベクトル分布は再現できていない。すなわち、非可逆的可視化法である。ここでは、元のベクトル分布を再現できる可逆的可視化法について考える。

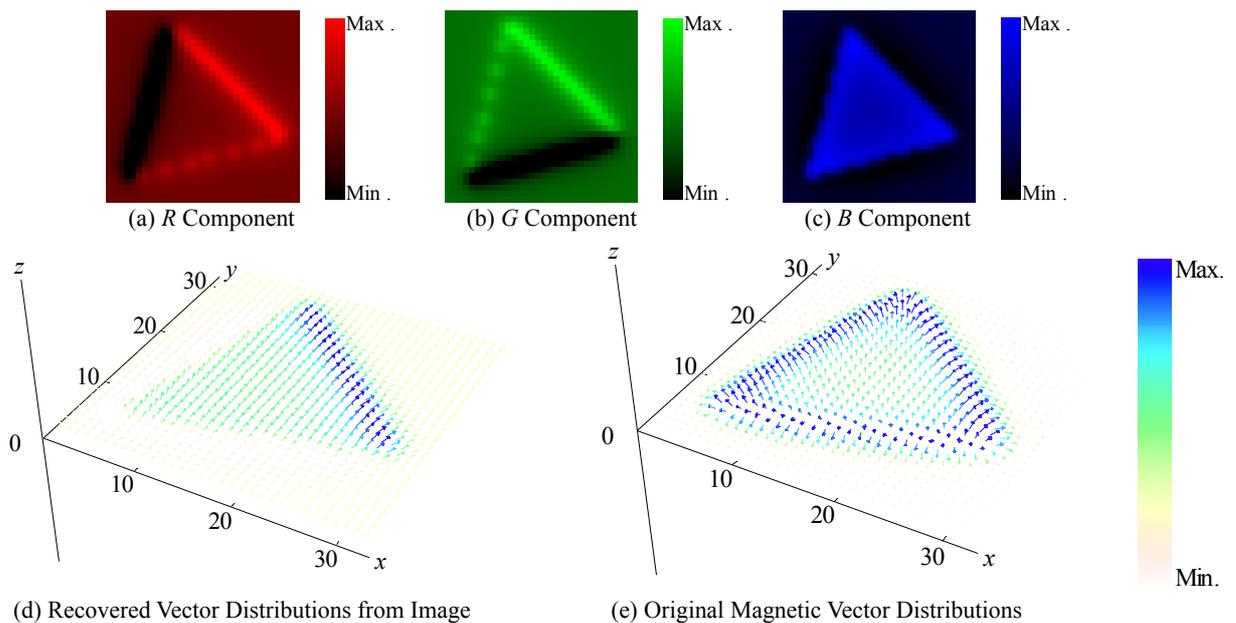


Fig.15 Irreversible Visualizing Methodology

従来の磁界ベクトル分布カラー可視化画像化手法は、正と負の値を持つ磁界ベクトル分布を画像データに変換するために、必然的に 0 から 1 の値に正規化しなければならない。すなわち、画像から磁界ベクトル分布を再現する場合の非可逆性は、正規化により負の情報が失われることに起因する。

そこで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方法を提案する。このような手順により磁界ベクトル分布の正の情報と負の情報を持った二個の画像を得ることができる。Fig.16 は Fig.4 の磁界ベクトル分布を正と負に分類した x, y, z 成分およびそれらを R, G, B 成分に対応させたカラー可視化画像である。

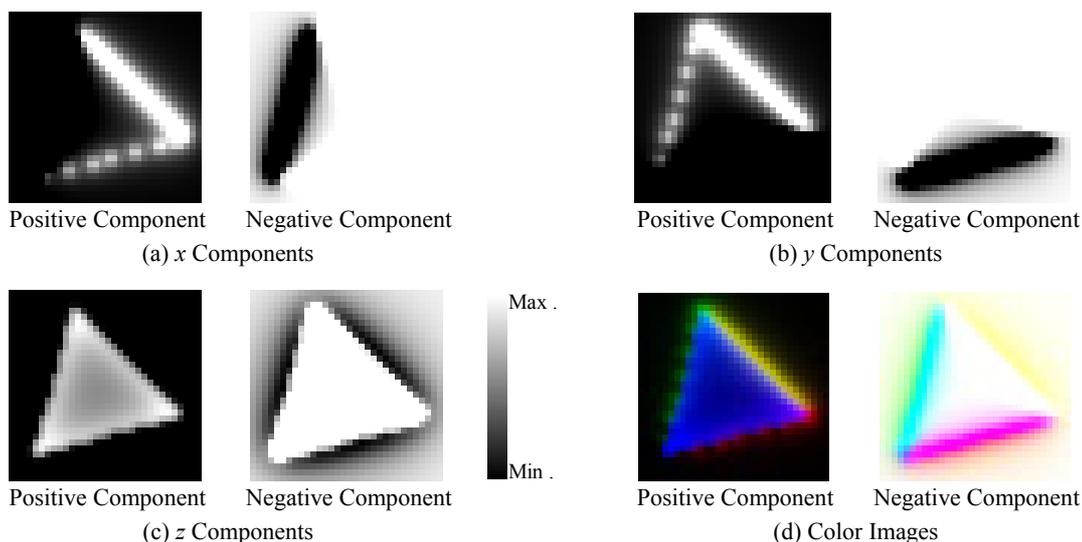


Fig.16 Reversible Visualizing Methodology

Fig.16 (d) の二個のカラー可視化画像を用いて、元の磁界ベクトル分布を再現する．ここで Fig.16 (d) の二個の画像はそれぞれプラス画像およびマイナス画像と呼ぶことにする．プラス画像およびマイナス画像は共に 0 から 1 の値しか持っていないが、マイナス画像は元の磁界ベクトル分布の負の情報を持った画像であるので、マイナス画像の画素値の最大値を各画素に対して差分することにより、-1 から 0 の値に正規化する．そして、正規化されたプラス画像とマイナス画像のデータを合成し、ベクトルの x, y, z 成分に対応させることで、可視化画像から原磁界ベクトル分布を再現することができる．Fig.17 (a) は正規化されたプラス画像とマイナス画像のデータを合成することにより再現されたベクトル分布である．Fig.17 (b) に示した元の磁界ベクトル分布と比較すると、完全に再現されたと言える．

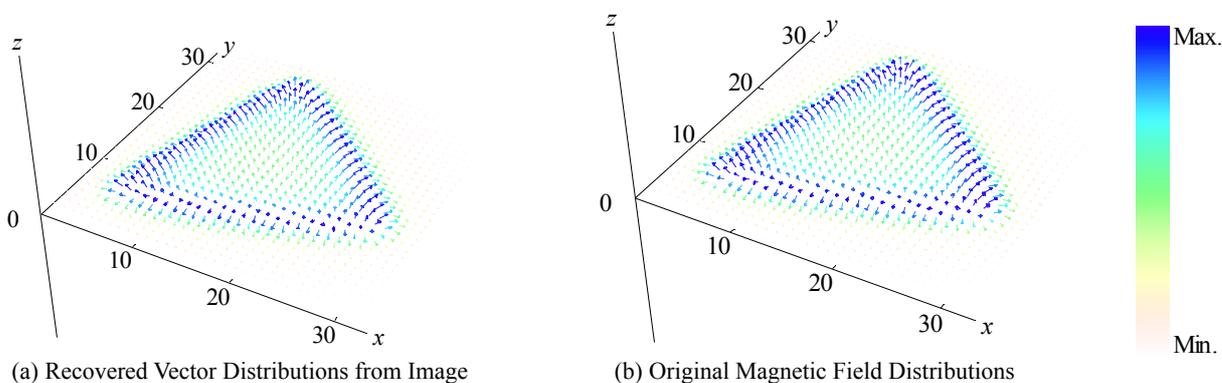


Fig.17 Recovery of Vector Distributions by Reversible Visualization

ここで、従来のカラー可視化画像化手法の利点である、各画素の色から磁界ベクトルの大きさや方向を判断できるという点であるが、可逆的の可視化法では得られるプラス画像とマイナス画像の色から、必ずしも磁界ベクトルの大きさや方向を判断できる訳ではない．しかし磁界ベクトル再現法と同様に、正規化されたプラス画像とマイナス画像のデータを合成し、合成されたデータを再び 0 から 1 の値に正規化してカラー可視化画像を生成することで、従来のカラー可視化画像化手法で得られる画像と同一のカラー可視化画像を得ることができる．すなわち、可逆的の可視化法は磁界ベクトル分布カラー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可能であるだけでなく、従来型カラー画像化手法の利点をも併せ持つことがわかる．

3. 可視化磁界ベクトル分布の応用

3.1. ベクトル場認識

前章で生成した磁界ベクトル分布カラー可視化画像に、カラー画像認識手法を適用することにより、ベクトル場の認識が可能となる[1][2]。まず、ベクトル場認識に必要な幾つかの概念について述べる。

3.1.1. 画像の固有パターン

計算機のスクリーン上における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。そのため、計算機のスクリーン上の画像は、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画像の不変量を、本論文では画像の固有パターン (Image Eigen Pattern) と呼ぶ[9][10]。

画像の固有パターンは、カラー画像における R 成分の量、 G 成分の量、 B 成分の量によって与えられる。ここではカラー画像における R 成分分布を考える。 R 成分分布を $\mathbf{I}_{\text{comp},R}$ とし、第 i 番目の画素における R 成分値を $I_{\text{comp},R,i}$ とすると、

$$I_{\text{comp},R,i} = R_i \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (16)$$

で与えられる。(16) 式中の p は画像の全画素数である。次に、 $\mathbf{I}_{\text{comp},R}$ をダイナミックレンジ D の分布に正規化した正規化 R 成分分布 $\mathbf{I}_{\text{comp},R}^D$ に変形する。なお、本論文ではダイナミックレンジ D を 0 から 255 とした。ここで、 $\text{Max}[\]$ が括弧内の集合における最大値の要素を求める演算を表すものとして、第 i 番目の画素の正規化 R 成分値を $I_{\text{comp},R,i}^D$ とすると、

$$I_{\text{comp},R,i}^D = \text{Round} \left[D \times \frac{R_i}{\text{Max}[\mathbf{I}_{\text{comp},R}]} \right] \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (17)$$

で与えられる。そして、 $\mathbf{I}_{\text{comp},R}^D$ において、0 から D までのそれぞれの R 成分値を取る画素を計数する。これにより、正規化 R 成分分布が R 成分値を階級としてヒストグラム化され、各階級の度数にあたる各 R 成分値の出現頻度が求められる。これによって求められた各 R 成分値の出現頻度をベクトルの要素とする R 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},R}$ を得る。 G 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},G}$ と B 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},B}$ も R 成分ベクトルと同様の演算処理によって得る。

以上より画像の固有パターンを \mathbf{E} とすると、 R 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},R}$ 、 G 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},G}$ 、 B 成分ベクトル $\mathbf{E}_{\text{comp},B}$ によって構成され、

$$\mathbf{E} = \left[\mathbf{E}_{\text{comp},R}^T, \mathbf{E}_{\text{comp},G}^T, \mathbf{E}_{\text{comp},B}^T \right]^T \quad (18)$$

で与えられる。(18) 式の上添え字 T は転置を表す。

Fig.18 に画像から固有パターンを抽出した一例を示す。Fig.18 において、(a) と (b) の画像は向きの異なる同一の画像である。しかし、その画像の固有パターンは同一である。また (c) と (d) の画像は他とは全く異なる画像であり、その画像の固有パターンも他とは異なる。すなわち、画像の固有

パターンは画像の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。

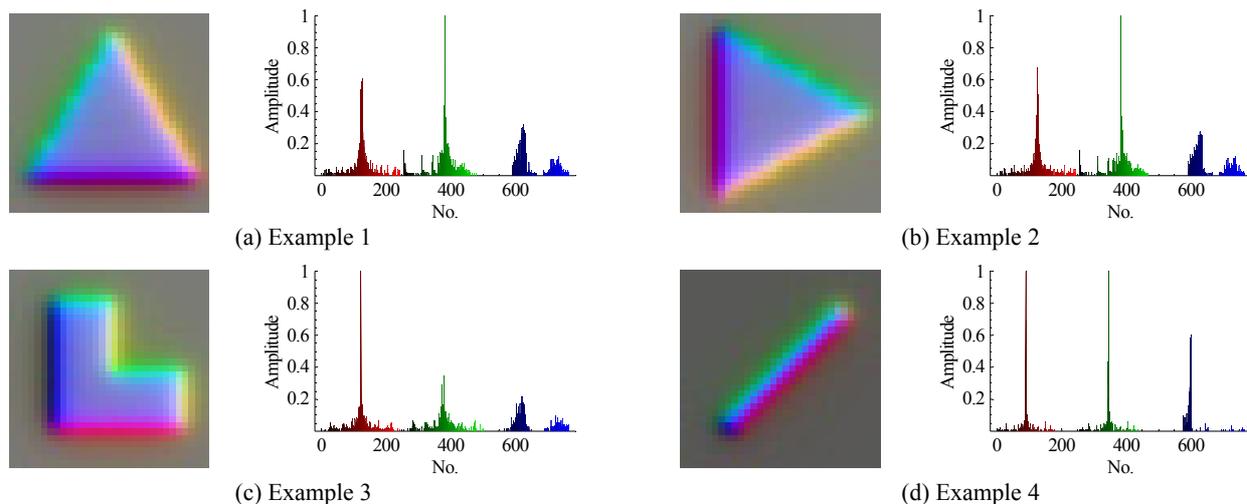


Fig.18 Examples of Image Eigen Patterns

3.1.2. 固有パターンの一致性

本論文におけるカラー画像認識は、予め複数の画像でデータベースを構築し、それぞれ画像の固有パターンを抽出する。その後、認識処理対象として与えられる任意の入力画像から固有パターンを抽出し、データベース画像と入力画像間の固有パターンの一致性を線形システム方程式の解から評価し、入力画像をデータベース画像のいずれかの画像と認識するものである[9][10]。

データベース画像の n 個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 は、

$$C = [\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n] \quad (19)$$

で与えられる。ここで、任意の入力画像の固有パターンを \mathbf{E}_x とすると、(20) 式の線形システム方程式が得られる。

$$\mathbf{E}_x = C \cdot \mathbf{X} \quad (20)$$

(20) 式における \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、(20) 式は不適切な線形システム方程式となる。本論文における画像の固有パターンの次数 m は $m = 768$ となるため、データベース数 $n < 768$ であれば解ベクトル \mathbf{X} の算出に (21) 式で示す最小自乗法を適用することができる[11]。

$$\mathbf{X} = [C^T C]^{-1} C^T \mathbf{E}_x \quad (21)$$

ここで Fig.19 に示すように、(21) 式で得られた解ベクトル \mathbf{X} の第 j 番目の要素が 1 で、他の要素が全て 0 であった場合を考える。解ベクトル中の横軸はデータベース番号と対応しているため、入力画像の固有パターン \mathbf{E}_x はデータベース画像の第 j 番目の固有パターン \mathbf{E}_j に等しい。よって入力画像をデータベースの第 j 番目の画像であると認識できる。なお、本論文では得られた解ベクトル中で最大値をとる要素を認識された対象とする。

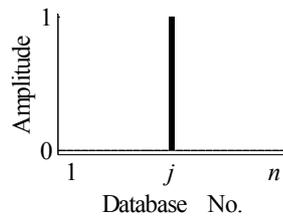


Fig.19 Example of Solution Vector

3.1.3. ベクトル場認識

3.1.1 項および 3.1.2 項で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。認識手順は以下の通りである。

複数の磁気素子を用い、そこから測定される磁界ベクトル分布をカラー可視化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。次にデータベース画像を生成した磁気素子から、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可視化画像に変換し、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 (21) 式で算出する。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。

なお、ここでは測定時の元の座標系と基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を用いた認識を行い、両者の認識精度を比較する。まず測定時の原局所座標系におけるカラー可視化画像によるベクトル場認識を行う。

Fig.20 にデータベース可視化画像の一例を示す。本論文では全 10 種類の磁気素子から得られる磁界ベクトル分布カラー可視化画像を採用した。各画像の解像度は 32×32 画素である。

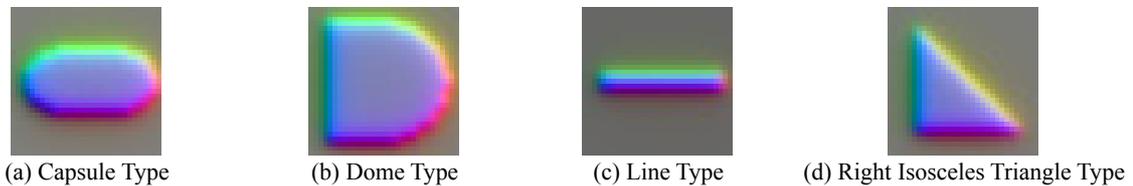


Fig.20 Examples of Database Images (Original Coordinate)

続いて入力可視化画像の一例を Fig.21 に示す。入力可視化画像には、データベース画像の生成に用いた 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、全 100 種類の磁界ベクトル分布カラー可視化画像を採用した。画像の解像度は 32×32 画素である。

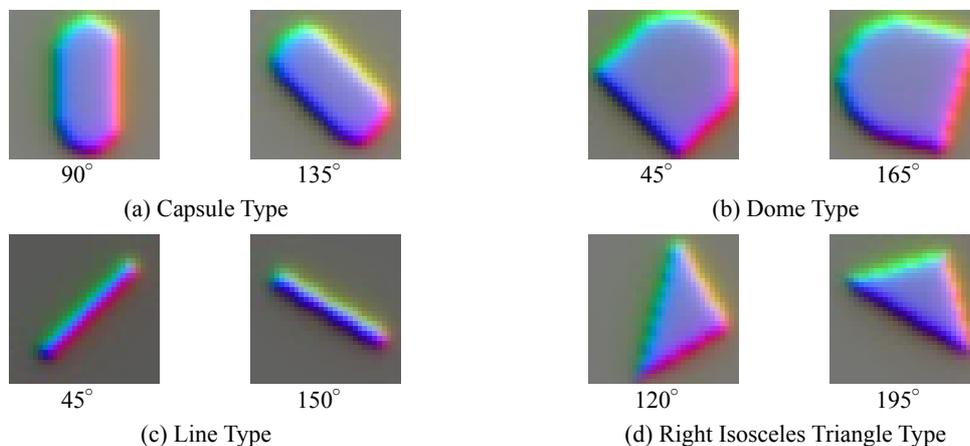


Fig.21 Examples of Tested Images (Original Coordinate)

原局所座標系におけるベクトル場認識の結果の一例を Fig.22 に示す. Fig.22 では入力可視化画像, 線形システム方程式の解ベクトルおよび認識されたカラー可視化画像を示している. Fig.22 の結果より, 測定時の原局所座標系による磁界ベクトル分布カラー可視化画像を用いたベクトル場認識は良好な結果を得られていない. 固定された原局所座標系におけるカラー可視化画像はベクトル場本来のカラー可視化画像ではないため, 誤認識が多いと考えられる. また解ベクトルを見ると, 全体的に拡散している. 以下に示す (22) 式で定義される認識率は 43%であった.

$$\text{Cognition Rate} = \frac{\text{Number of cognized images}}{\text{Total number of tested images}} \times 100 [\%] \quad (22)$$

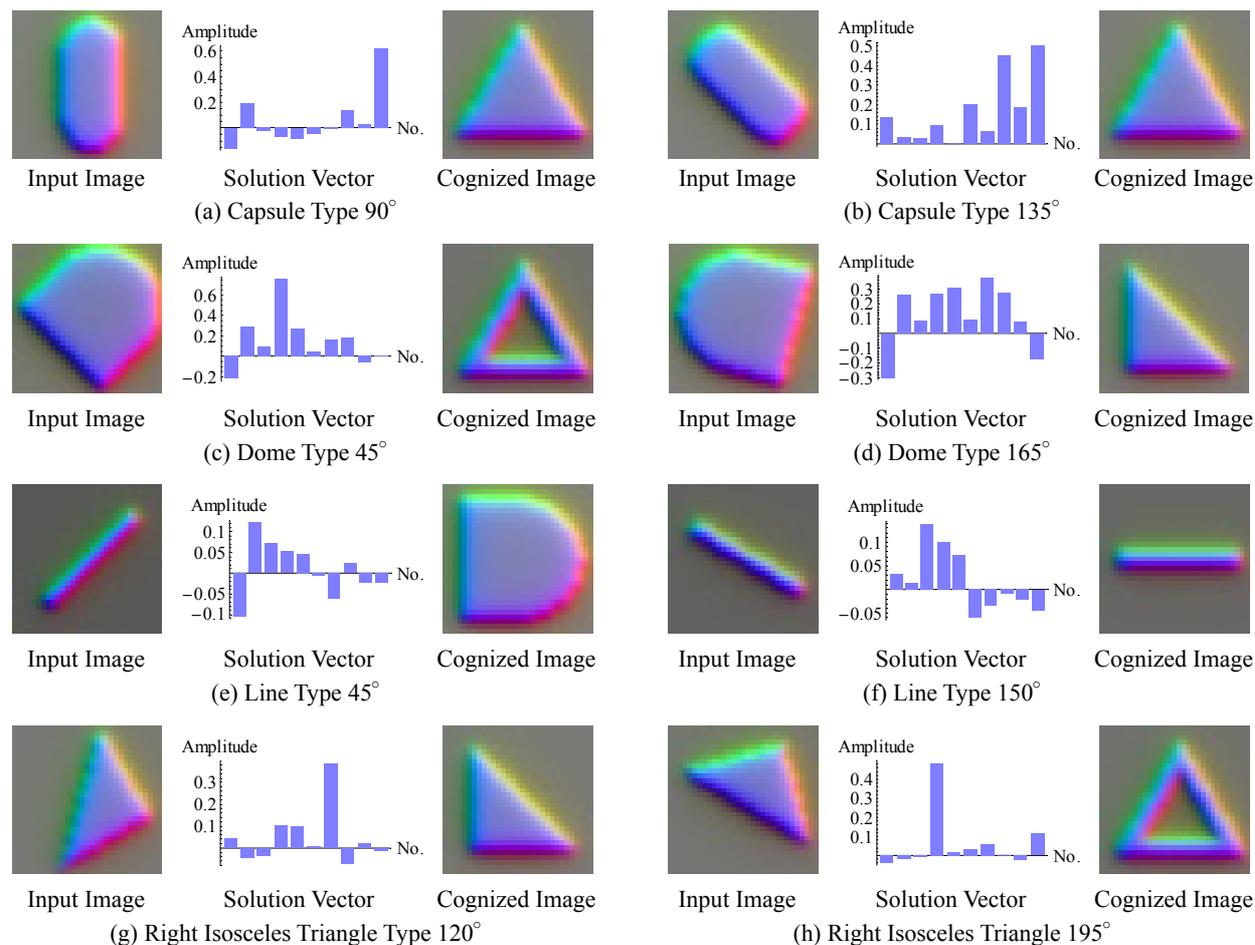


Fig.22 Cognition Result (Original Coordinate)

次に, 原局所座標系の認識で用いた磁界ベクトル分布と同一の磁界ベクトル分布を基準座標系に変換し, 基準座標系におけるベクトル場の認識を行う. Fig.23 にデータベース可視化画像の一例を, Fig.24 に入力可視化画像の一例を示す.

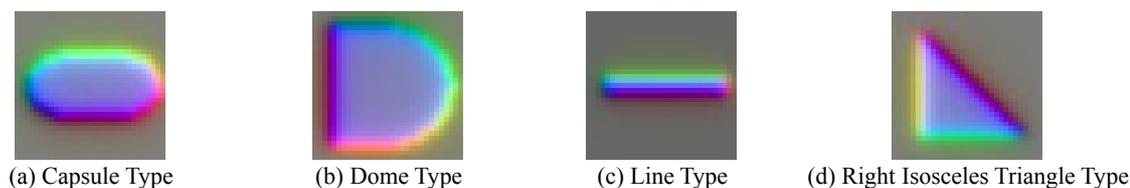


Fig.23 Examples of Database Images (Reference Coordinate)

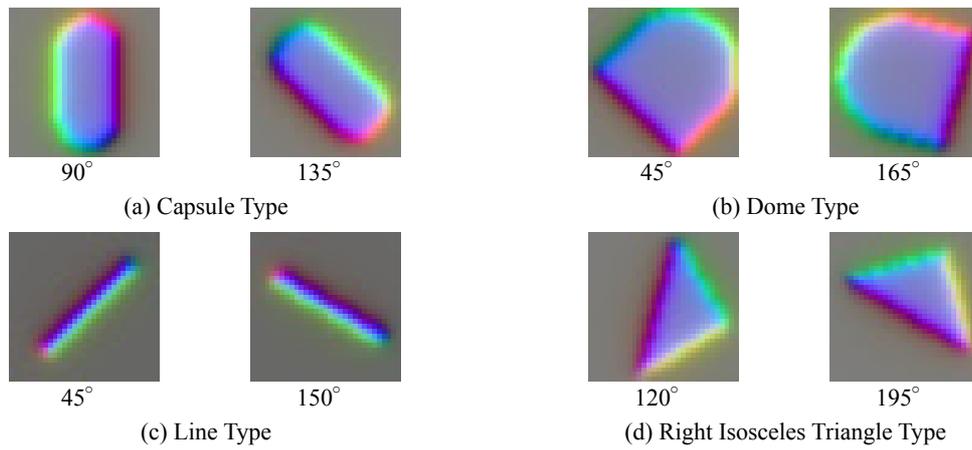


Fig.24 Examples of Tested Images (Reference Coordinate)

基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を用いたベクトル場認識の結果の一例を Fig.25 に示す. 測定時の原局所座標系における認識結果より正解の数が増え, 良好な結果を得ることができた. また, 測定時の原局所座標系における認識では解ベクトルが拡散する傾向にあったが, 基準座標系におけるカラー可視化画像を用いることにより, 全体的に解ベクトルの拡散が抑えられ正解を示す要素が支配的になっているといえる. さらに, (22) 式で定義される認識率は 69%となり, 基準座標系におけるベクトル場認識は測定時の原局所座標系におけるベクトル場認識より精度が高いことが判明した. ベクトル場本来のカラー可視化画像である基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を用いたことにより, 認識精度が向上したと考えられる.

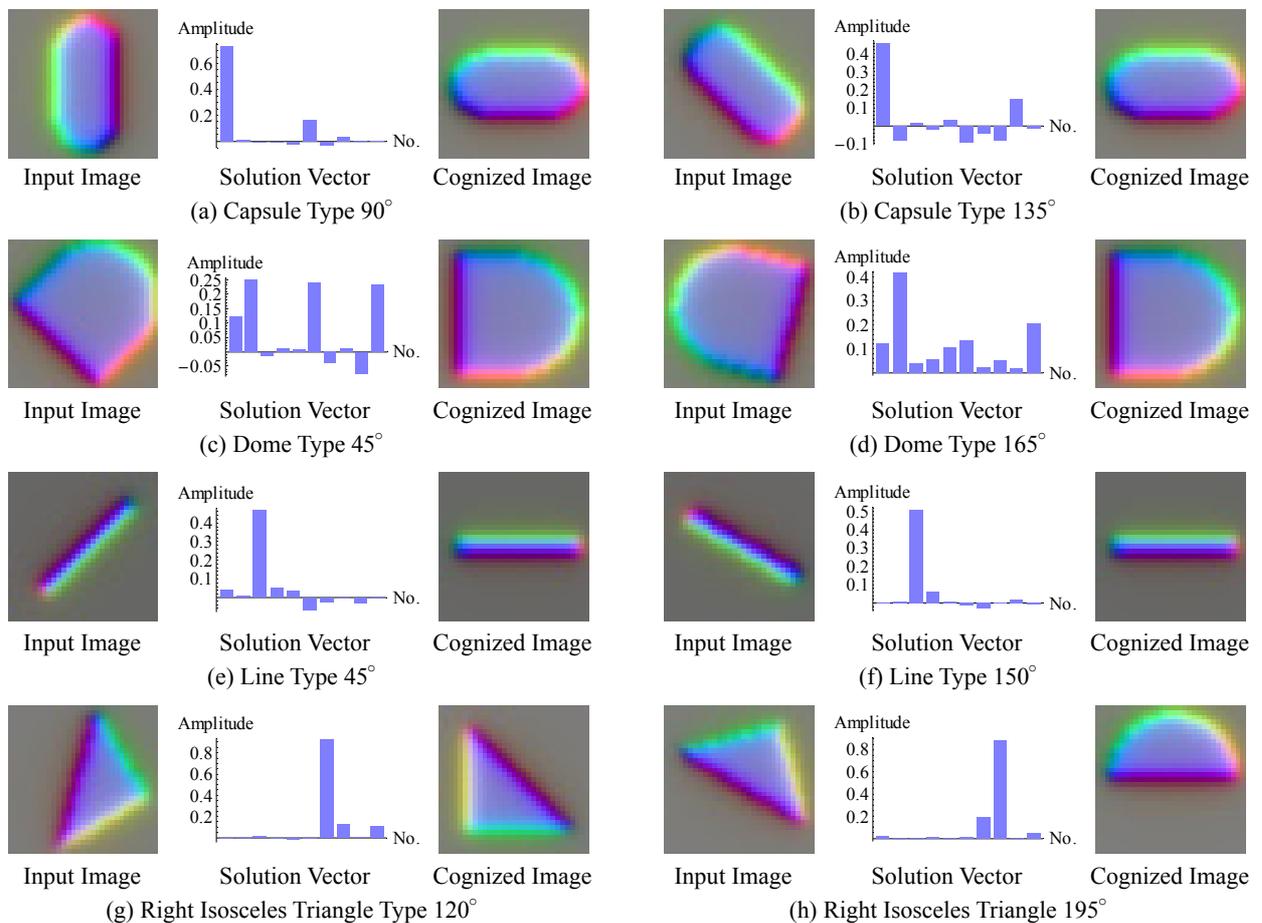


Fig.25 Cognition Result (Reference Coordinate)

3.1.4. 可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識

2.3 節で述べた可逆的可視化法は磁界ベクトル分布の可視化プラス画像と可視化マイナス画像の二個の画像を用いて、元のベクトル分布を再現する可視化法であった。ここでは、二個のカラー可視化画像が得られる可逆的可視化法を利用して、プラス画像とマイナス画像から画像の固有パターンを抽出し、ベクトル場の認識を試みる。この場合、プラス画像とマイナス画像の二個の固有パターンを合成することにより、そのベクトル場における画像の固有パターンとする。すなわちプラス画像とマイナス画像を一個の合成画像と見なして固有パターンの抽出を行う。

まず測定時の原局所座標系におけるカラー可視化画像による認識を行う。認識に用いたベクトル場は3.1.3項で用いたベクトル場と全て同一である。Fig.26 にデータベース可視化画像の一例を、Fig.27 に入力可視化画像の一例を示す。

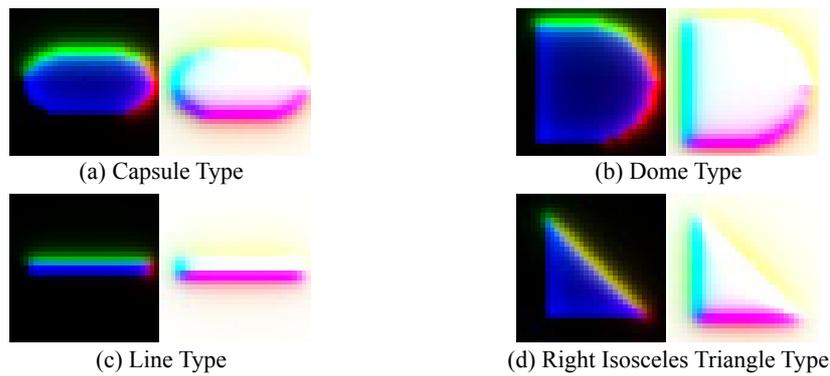


Fig.26 Examples of Database Images (Original Coordinate)

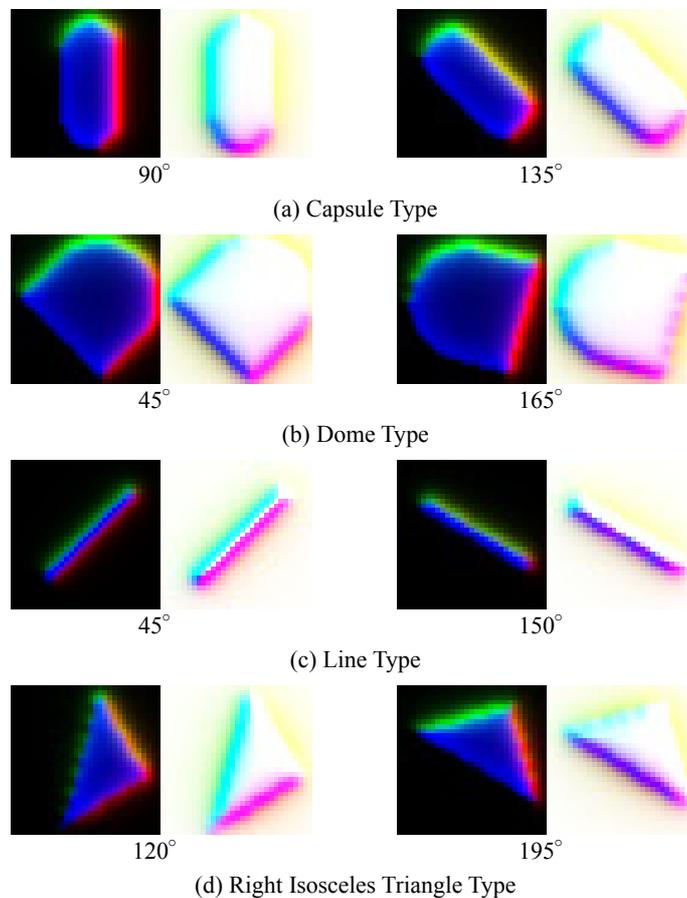


Fig.27 Examples of Tested Images (Original Coordinate)

原局所座標系における可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識の結果の一例を Fig.28 に示す。Fig.28 では入力可視化画像 (プラス, マイナス), 線形システム方程式の解ベクトルおよび認識されたカラー可視化画像 (プラス, マイナス) を示している。Fig.28 の結果より, 測定時の原局所座標系によって可視化された磁界ベクトル分布カラー可視化画像を用いたベクトル場認識は良好な結果を得られていない。(22) 式で定義される認識率は 26%であった。可逆的可視化画像を用いることにより, 磁気素子の向きの違いによるカラー可視化画像の変化がより顕著に表れ, 誤認識増加へ繋がったと考えられる。

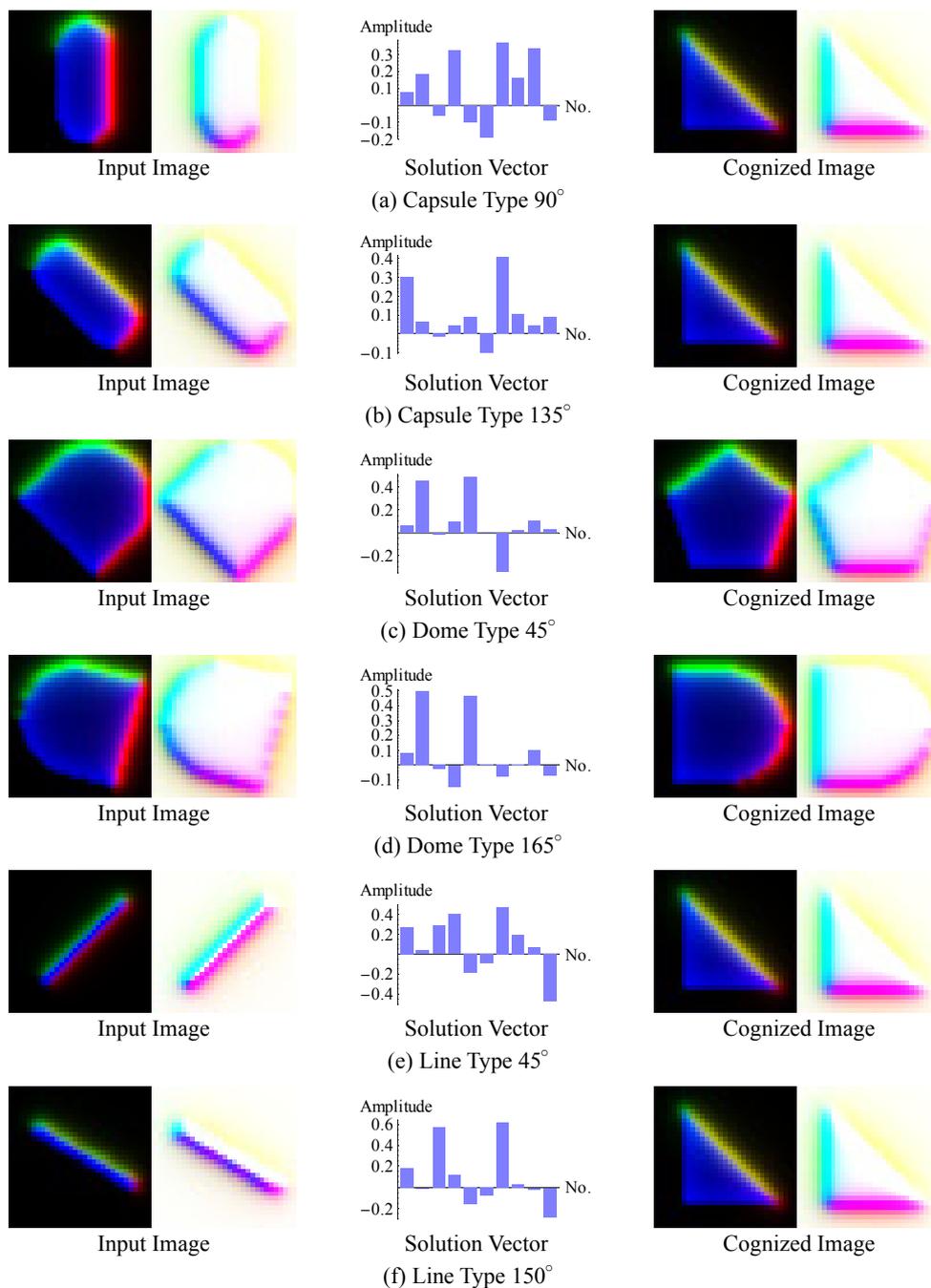


Fig.28 Cognition Result (Original Coordinate)

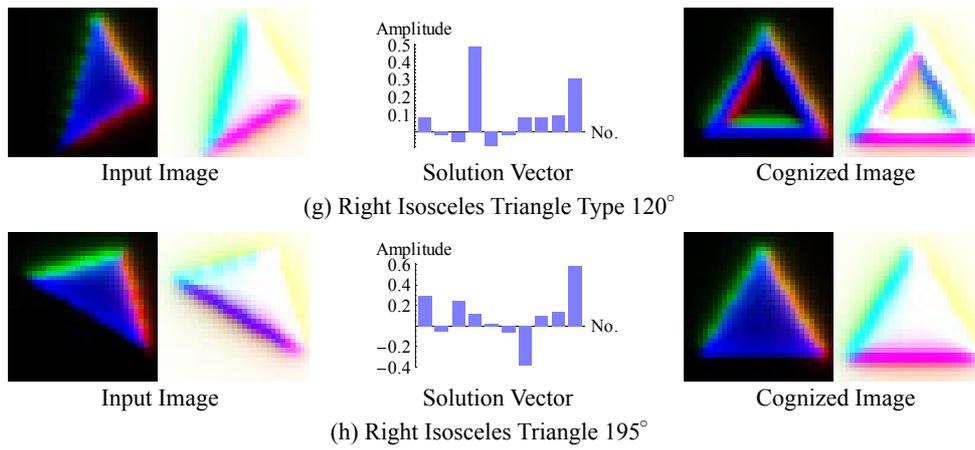


Fig.28 Cognition Result (Original Coordinate)

次に、原局所座標系の認識で用いた磁界ベクトル分布と同一の磁界ベクトル分布を基準座標系に変換し、基準座標系におけるベクトル場の認識を行う。Fig.29 にデータベース可視化画像の一例を、Fig.30 に入力可視化画像の一例を示す。

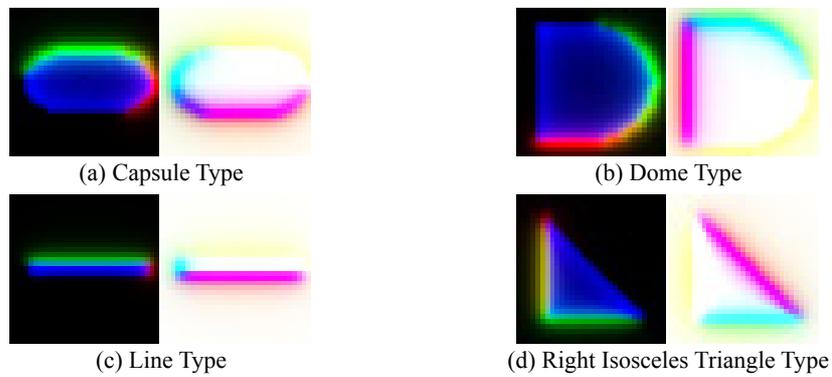


Fig.29 Examples of Database Images (Reference Coordinate)

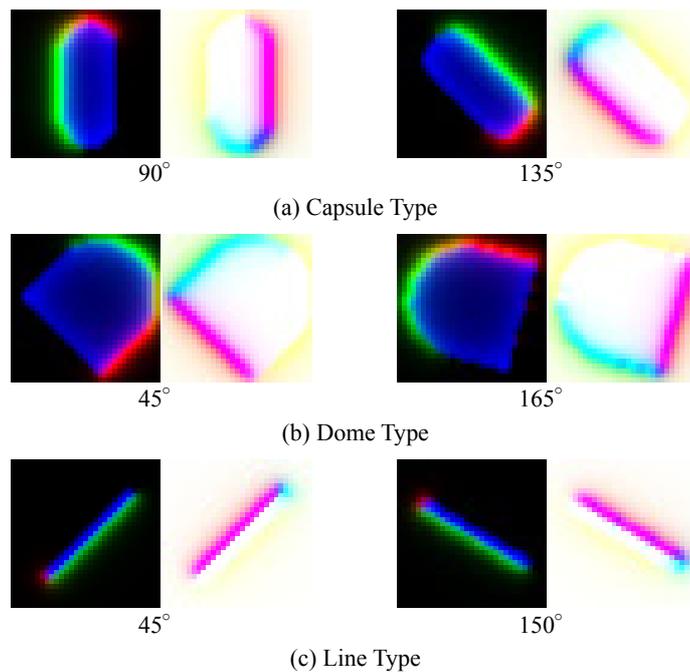
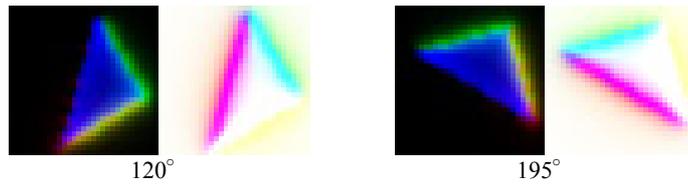


Fig.30 Examples of Tested Images (Reference Coordinate)



(d) Right Isosceles Triangle Type

Fig.30 Examples of Tested Images (Reference Coordinate)

基準座標系における磁界ベクトル分布の可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識の結果の一例を Fig.31 に示す. (22) 式で定義される認識率は 81% となり, 基準座標系における可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識が最も高い精度を有することが判明した. 基準座標系における磁界ベクトル分布を可逆的可視化法により可視化した画像が, ベクトル場本来のカラー可視化画像であることに加え, プラスとマイナスの二個の画像を用いることにより, 原ベクトルの情報を維持していることに起因していると考えられる.

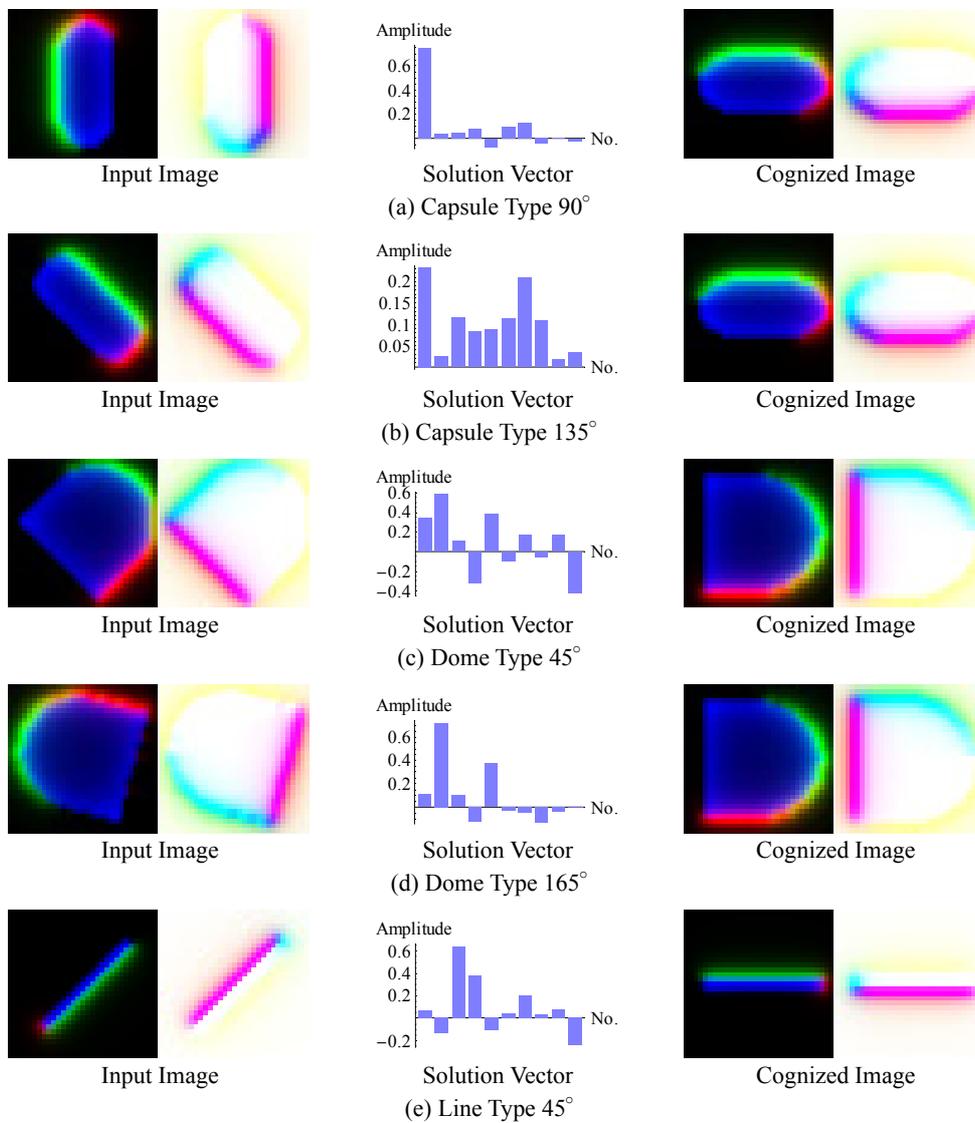


Fig.31 Cognition Result (Reference Coordinate)

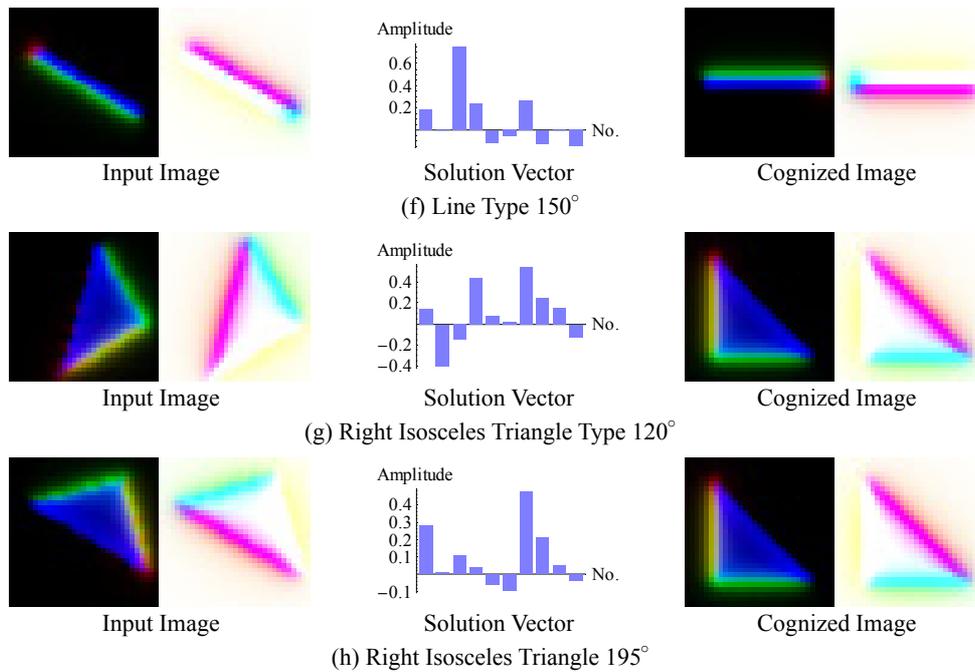


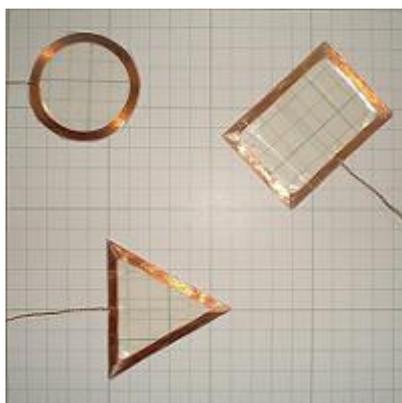
Fig.31 Cognition Result (Reference Coordinate)

3. 2. ベクトル場認識による機械診断

本節では、3.1 節で述べたベクトル場認識を応用した機械診断技術について述べる。ここでは磁界源となるコイル素子の位置推定問題について考える。具体的には、まずプリント基板を模擬した回路と回路を構成する推定対象コイル素子単体に電流を通电して放射される磁界を測定する。回路から得られた磁界ベクトル分布を複数の領域に分割し、それぞれからカラー可視化画像を生成しデータベースを構築する。続いて、コイル素子単体において得られた磁界ベクトル分布からカラー可視化画像を生成する。そして、コイル素子単体から得られたカラー可視化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がサンプリングされた位置を、推定対象コイル素子の存在する位置とする。

Fig.32 にプリント基板を模擬した回路、位置推定対象の二個のコイル素子および測定に用いたソレノイド型サーチコイルを示す。Table1 にサーチコイルの仕様を示す。磁界はコイル素子に 10[kHz], 1[A]の電流を通电し、縦 20 点、横 20 点の測定点におけるサーチコイルの誘起電圧を測定して、(23) 式に示すファラデーの法則を用いて計算を行った[6]。(23) 式において 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。ここで、測定される磁界は交流の波形であるが、本論文では任意の基準位相における瞬時値を測定点における磁界の値とした。

$$v(t) = -NS \left(\frac{dB(t)}{dt} \right) \quad (23)$$



(a) Coil Elements



(b) Triangle Type Coil



(c) Rectangle Type Coil



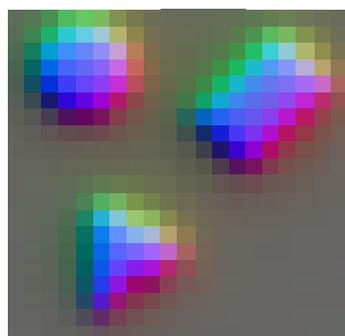
(d) Search Coil

Fig.32 Experimental

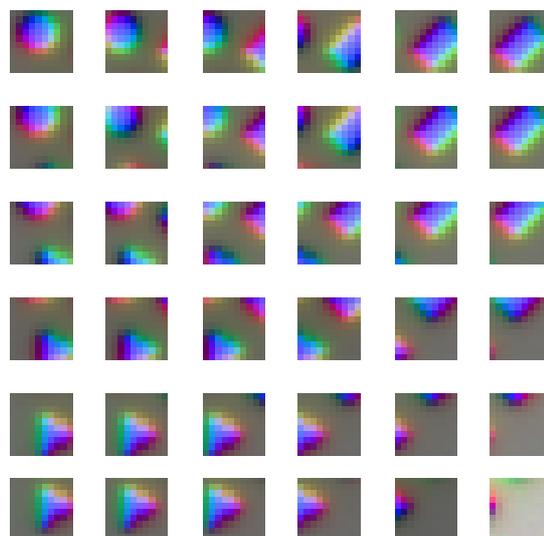
Table1 Specifications of Search Coil

| Diameter of Wire | Diameter of Coil | Number of Turns |
|------------------|------------------|-----------------|
| 0.2 [mm] | 5 [mm] | 60 [turn] |

Fig.33 に回路から測定された磁界ベクトル分布のカラー可視化画像および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複数の領域に分割し生成したカラー可視化画像を示す。本論文では縦 10 点、横 10 点の領域を 2 点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。なお、実際の認識は可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識で行っているが、ここでは非可逆的可視化画像を示している。



(a) Visualized Image



(b) Sampled Visualized Vector Field Images

Fig.33 Database Images

Fig.34 に入力画像となる, コイル素子単体から測定された磁界ベクトル分布の基準座標系におけるカラー可視化画像を示す.

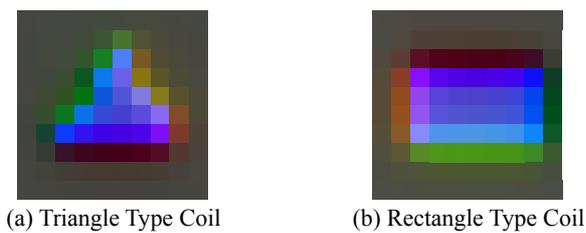


Fig.34 Tested Images

Fig.35 にベクトル場認識の結果を示す. Fig.35 では入力可視化画像, 線形システム方程式の解ベクトルおよび認識されたカラー可視化画像を示している. Fig.36 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. ほぼ妥当な位置が推定されたことがわかる. 以上のことから, 可視化した磁界ベクトル分布から計算機により自動で目標のコイル素子の位置を推定できることが判明した.

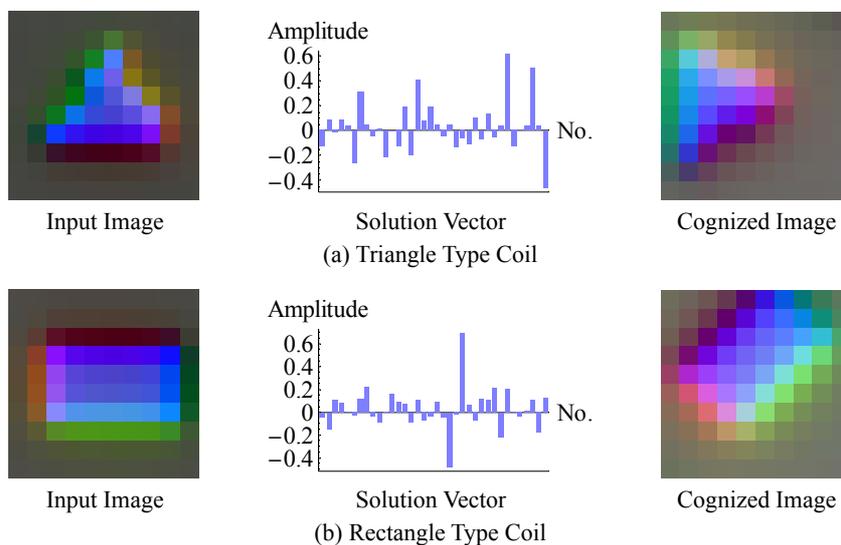


Fig.35 Cognition Result

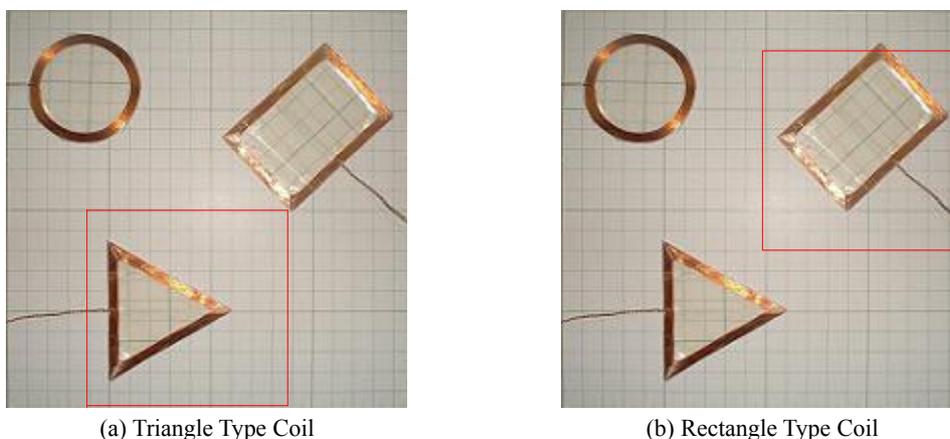


Fig.36 Estimated Position of Coil Element

4. 結言

本論文では、磁界ベクトル場の可視化法とその応用について述べた。

磁界ベクトルの x, y, z 方向成分を光の R, G, B 成分に対応させる可視化法は、ベクトル場が基準座標に依存するため一意的なカラー可視化画像が得られないという問題点が存在した。そこで本論文では Gauge 理論に基づき、磁界の発生源である電流に着目し、電流ベクトルを利用した磁界ベクトル場の基準座標決定法を提案した。電流ベクトル推定には、ビオサバールの法則に基づき磁界と電流が直交する性質を利用した方法を提案し、精度の高い電流ベクトル推定を可能とした。そして、得られた電流ベクトルから磁界ベクトル場の基準座標を決定し、基準座標系における磁界ベクトル分布カラー可視化画像を生成した。その結果、ベクトル場を基準座標系で可視化することで、測定した原局所座標系に依存しないベクトル場固有の可視化が可能であることが判明した。また、ベクトル場を正と負の成分に分類し、それぞれ独立にカラー可視化画像を生成することで、従来手法において不可能であったベクトル場可視化画像から元のベクトル場を再現する可逆的可視化法を提案した。

ベクトル場可視化の応用として、本論文ではカラー画像認識手法を用いたベクトル場の認識を行った。認識は可視化画像から画像の固有パターンを抽出し、線形システム方程式を解くことにより行った。本論文では測定時の原局所座標系におけるカラー可視化画像を用いた認識と基準座標系におけるカラー可視化画像を用いた認識の精度の比較を行った。その結果、ベクトル場本来のカラー可視化画像である基準座標系におけるカラー可視化画像を用いた認識において、より高い認識率を得ることができた。さらに原ベクトル場の情報を維持している二個の可逆的可視化画像を用いることにより、ベクトル場認識の精度が向上することが判明した。

最後にベクトル場認識を利用した機械診断技術として、磁界源となるコイル素子の位置推定を行った。その結果、可視化された磁界ベクトル場を用いることで、良好な位置推定を行うことができた。すなわち、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が示唆された。

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] 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, 佐久間正剛, 堀井清之, “電磁界分布解析への画像処理的方法”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-141, (1999)
- [4] 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, “画像の支配方程式とベクトル場への応用”, 電学論 A, Vol.120-A, No.10, pp.902-912, (2000)
- [5] 藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, “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)
- [6] 齋藤兆古, “応用電磁工学入門”, 産図テキスト, (2000)
- [7] 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)
- [8] 藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, “3次元磁界ベクトル可視化の一方法”, 可視化情報学会誌, Vol.24, No.1, pp.239-242, (2004)
- [9] 若林健一, 早野誠治, 齋藤兆古, 國井利泰, “画像の固有パターンと画像認識への応用”, 可視化情報学会誌, Vol.19, No.1, pp.91-94, (1999)
- [10] 佐藤隆紀, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, “知的可視化情報処理による可視化画像認識”, 可視化情報学会誌, Vol.21, No.1, pp. - , (2001)
- [11] G. Strang, “Linear Algebra and Its Applications”, Academic Press, Inc., (1976)

研究業績

- [1] 第31回可視化情報シンポジウム
藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, “磁界分布可視化法とその応用”
- [2] 電気学会マグネティックス研究会
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”
- [3] 第32回可視化情報シンポジウム
藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, “3次元磁界ベクトル可視化の一方法”
- [4] 法政大学計算科学研究センター研究報告
藤枝直樹, 早野誠治, 齋藤兆古, “3次元磁界ベクトル可視化に関する研究”