

磁界の固有パターンを用いたコイル素子の認識

若林 健一 早野 誠治 斎藤 兆古
法政大学工学部電気電子工学科

計算機のスクリーン上に表現される画像データは、通常、 x, y 直交座標上の赤 (R), 緑 (G) そして青 (B) 画素成分から構成される。このことを利用し画像本来の性質を抽出する方法として、 R, G, B 直交座標を考え、この 3 次元直交座標上へ x, y 座標上の原画像を投影することで、画像の固有パターンを抽出する。可視化された磁界分布画像の固有パターンを用いたコイル素子の位置推定問題では、良好な結果を得ることができた。本論文では、ループ電流モデルを用いた電流分布推定を応用し、コイル素子が接近している場合においても位置推定が可能であるかを考察する。

1. はじめに

現代の電気電子工学においては、高周波数で動作する電子機器から放射される電磁界を考慮して電気電子機器を設計しなければならない。特に、携帯電話やパーソナルコンピュータなどの機器は数多くの半導体素子で電子回路が高度に集積されており、その高度な集積化のため電子機器の検査、不良部位の特定は困難となっている。その問題の解決にあたり、磁界を利用した非破壊検査法は社会的必要性も大きい。本研究はその一手法を提案するものである。自然界の多くは、パネの固有振動数等に代表される固有の特性をもつ。それに対し完全な人工構築物であるコンピュータグラフィックスでは、自然界の固有値に相当する画像の不変量が存在するのだろうか。画像情報は、人間の視覚情報処理能力を前提とした場合、画像中の不変量を感じ、認識することが可能である。機械に、画像中の不変量を感じさせることが可能であれば、その延長線上に存在する認知も可能であろう。本論文では、画像中の不変量を自然界の固有値へ対応させ、固有パターンと呼ぶこととする。

計算機のスクリーン (x, y 直交座標) 上に表現される画像データは、通常、 x, y 直交座標上の赤 (R), 緑 (G) そして青 (B) 画素成分から構成される。このため、画像は画像を構成する画素数、画像の x, y 座標上の位置・角度などのハードウェアに依存する成分を持つ。このようなハードウェアに依存する性質を削減し、画像本来の性質を抽出する方法として、 R, G, B 直交座標を考え、この 3 次元直交座標上へ x, y 座標上の原画像を投影することで、画像の固有パターンを抽出する。また、固有パターンを磁界分布に適用する場合、磁界の x, y, z 成分をそれぞれ R, G, B に対応させてカラーイメージとして磁界分布を表現し、固有パターンを抽出する。このようにして導出された磁界分布画像の固有パターンを応用したコイル素子の位置推定問題では、良好な結果を得ることができた[1]。本論文では、ループ電流モデルを用いた電流分布推定[2]を応用し、コイル素子が接近している場合においても位置推定が可能であるかを考察する。

2. 画像の固有パターン

2.1 画像の固有パターン

ここでは、画像から固有パターンを抽出する概念を述べる。コンピュータグラフィックスで表現される画像は、スクリーンの x, y 直交座標上の R, G, B 画素の組み合わせ

である。すなわち、 m, n をそれぞれ、 x, y 方向の画素数とすれば、画像は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{image} &\in \text{pixel}_{i,j}, \\ \text{pixel}_{i,j} &\in f_r(x_i, y_j), f_g(x_i, y_j), f_b(x_i, y_j), \\ i &= 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

(1)はそれぞれ、 R, G, B 成分を与える関数であり、(2)式の条件を満足する。

$$0 \leq f_r(x_i, y_j), f_g(x_i, y_j), f_b(x_i, y_j) \leq 1 \quad (2)$$

(1)式で、画像は画素の集合で表現され、画素は x, y 座標の関数で表現されるが、 R, G, B 直交座標系を考え、この 3 次元直交座標上で画像が表現されるとしよう。このとき、固有パターン E は $h(r, g, b)$ を要素として、

$$\begin{aligned} E &\in h(r_o, g_p, b_q), \\ r_o &\in f_r(x_i, y_j), g_p \in f_g(x_i, y_j), b_q \in f_b(x_i, y_j) \\ o &= 1, 2, \dots, R_m, \quad p = 1, 2, \dots, G_m, \quad q = 1, 2, \dots, B_m \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式の形で表現できる。ここで、(3)式中の o, p, q はそれぞれ、 R_m, G_m, B_m を最大値とする整数であり、各色の階調数を意味し、固有パターンのデータ量を決定する。このとき固有パターンは $R_m \times G_m \times B_m$ 個のデータから成る配列を形成する。また、(3)式の関数は、

$$0 \leq |h(r_o, g_p, b_q)| \leq 1 \quad (4)$$

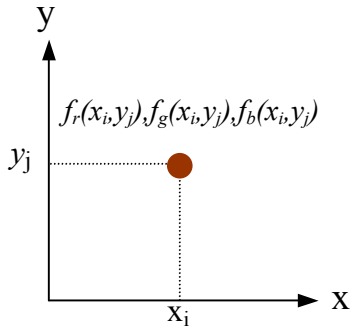
を満足するものとする。(4)式は、固有パターンの画素数依存性を低減する。ここでは、関数の初期値はすべてゼロとし、座標値が与えられる毎に関数値は、

$$h(r_o, g_p, b_q) = h(r_o, g_p, b_q) + 1 \quad (5)$$

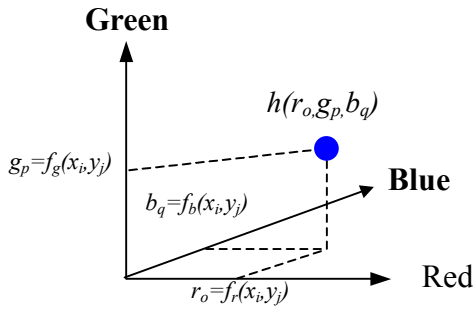
と加算される。すべての座標値について投影が終了した時点で、(4)式を満足する形へ最大値で正規化する。図 1 に、画像を x, y 直交座標系から R, G, B 直交座標系へ投影する概念図を示す。

2.2 磁界分布の可視化

以上の固有パターン抽出の概念を磁界分布へ適用するため、磁界分布を可視化することを考える。磁界の分布



(a) Screen coordinate



(b) RGB coordinate

図1 固有パターン抽出の概念図

が x, y, z 方向3成分について得られている場合, x, y, z 方向の磁界成分をそれぞれ赤, 緑, 青成分に対応させることで画像として表現することができる。この場合, (2) 式の条件を満たすよう各成分の最大値を1に正規化する必要がある。磁界の x, y, z 方向成分, およびそれら各色を成分とした画像を図2に示す。この得られた画像から固有パターンを抽出する。

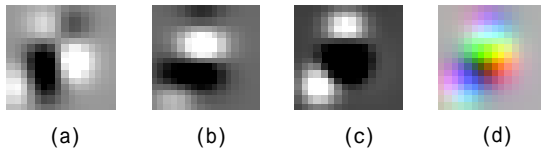


図2 磁界の各成分と得られた画像
(a) x方向成分 (b) y方向成分
(c) z方向成分 (d) カラーイメージ

2.2 基準座標系

コンピュータグラフィックスに於いては, 赤, 緑, 青の要素は角度に依らず固定されているが, 本来ベクトル場である磁界分布をカラー画像へ可視化する場合, 基準座標の角度に依存する。すなわち, 基準座標の取り方によって色合いが変化する。この問題を解決する方法として, z 軸は固定であることを考慮し, 90度の整数倍(0, 90, 180, 270度)の平面的回転に対しては全て同じ色合いで表現されるように, x, y 平面に投影したベクトルの和の向きから基準座標を決定する。図3は図3(a)の測定時の局所直交座標系で可視化した磁界を, 図3(b)の基準座標で表現した例を示す。以後, この基準座標系で議論

を進める。

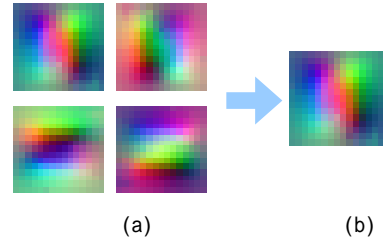


図3 基準座標系の決定

(a) 各測定時における座標系
(b) 基準座標系

3. 画像のシステム方程式

本稿では, 固有パターンを応用し, 最小自乗法を用いたコイルの位置推定問題を取りあげる。

3.1 入力ベクトル

可視化された磁界分布画像の各成分を, それぞれ R_m, G_m, B_m を最大値とする入力画像の固有パターン E_T へ変換する。

$$E_T \in g_T(i, j, k) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, R_m, j = 1, 2, \dots, G_m, k = 1, 2, \dots, B_m$$

このとき, 入力ベクトル \mathbf{Y} は, E_T の要素を一列に並べた, $R_m \times G_m \times B_m$ 次の列ベクトルとなる。

$$\mathbf{Y} = [g_r(1,1,1), g_r(2,1,1), \dots, g_r(R,1,1), \\ g_r(1,2,1), g_r(1,3,1), \dots, g_r(1,G,1), g_r(1,1,2), g_r(1,1,B), \dots, \\ g_r(R,G,B-1), g_r(R,G,B)]^T \quad (7)$$

3.2 システム行列

画像とし, データベース画像の固有パターン C_D を考える。

$$C_D^{(n)} \in g_D^{(n)}(i, j, k) \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, R_m, j = 1, 2, \dots, G_m, k = 1, 2, \dots, B_m, n = 1, 2, \dots, p$$

(7)式と同様に, システム行列の i 番目のベクトルは(9)式で与えられる。

$$\mathbf{d}^{(i)} = [g_D^{(i)}(1,1,1), g_D^{(i)}(2,1,1), \dots, g_D^{(i)}(R,1,1), \\ g_D^{(i)}(1,2,1), g_D^{(i)}(1,3,1), \dots, g_D^{(i)}(1,G,1), g_D^{(i)}(1,1,2), g_D^{(i)}(1,1,B), \dots, \\ g_D^{(i)}(R,G,B-1), g_D^{(i)}(R,G,B)]^T \quad (9)$$

結局, システム行列 D は(10)式で与えられる。

$$D = [\mathbf{d}^{(1)}, \mathbf{d}^{(2)}, \dots, \mathbf{d}^{(p)}] \quad (10)$$

3.3 システム方程式

システム方程式は, (11)式のように書くことができる。

$$(11)$$

通常、データベース数 p よりも、固有パターンの要素数、すなわち $R_m \times G_m \times B_m$ の方が大きいため、システム行列は縦長となり、最小自乗法を適用することができる[3]。

最小自乗法を用いて、解ベクトル \mathbf{X} は(12)式で求めることができる。

$$\mathbf{X} = [D^T D]^{-1} D^T \mathbf{Y} \quad (12)$$

3.4 画像認識

(11)式のシステム方程式は、入力画像の固有パターンが、解ベクトル \mathbf{X} の要素を重みとしたデータベース画像の固有パターンの線形結合で表されることを意味する。固有パターン空間で得られた解ベクトル \mathbf{X} (w_1, w_2, \dots, w_p) を用いて、画像の再構成を行う。再構成画像 V は、(8)式のデータベース画像を用いて(13)式で与えられる。

$$V_i = \sum_{j=1}^p w_j C_D^{(j)} \quad (13)$$

もし、解ベクトルの第1番目の要素 w_1 が1で他の要素が全てゼロならば、再構成された画像はデータベースの1番目の画像と同一であることを利用し、コイル素子の認識を行う。

4. ループ電流モデルによる電流分布推定

コイル素子の位置推定問題においては、形状の異なるコイルに交流電流を通じ、生じる磁界分布をサーチコイルにより測定し、得られた磁界分布から固有パターンを抽出しデータベースを作成する。また、データベース中の複数のコイルを配置した複合モデルを作成し、複合モデルの生成する磁界分布を測定し、その磁界分布から位置を変えて一定の領域を切り出したサンプルから入力ベクトルを作成する。この方法は、複合モデルにおいて各コイル素子の間隔が充分である場合、良好な結果を与えた⁽¹⁾。本研究では、素子同士が互いの磁界分布に影響を与える程度に接近した場合について位置推定を行う。コイル素子が接近している場合は、従来手法が単純に適用できないため、ループ電流モデルによる電流分布推定を応用する。ループ電流モデルは高橋らの研究[4]に詳しい。概要を以下に述べる。

まず磁界の測定点数と同数のループ電流を仮定する。各ループ電流が生じる磁界分布を計算する。図4(a)には、仮定したループ電流の例を、図4(b)には図4(a)における左下の単一ループ電流により生じる磁界分布の z 方向成分を示す(実際には x, y 方向成分も存在する)。

もし測定した磁界分布が、各ループ電流の生じる磁界の重み付き線形結合で表現されるならば、重みをループ電流に適用すれば電流分布を推定することができる。図5には測定された磁界、ループ電流分布(重み)、推定された電流分布例を示す。

素子同士が接近したモデルの場合、測定された磁界分布から一定の領域を切り出しサンプル化せず、磁界から電流分布を推定し、得られたループ電流分布から一定の領域を位置を変えてサンプル化する。サンプル化したループ電流分布から磁界分布を計算し入力とする。サンプル化した領域が、コイルが存在する部分のみならば、隣接する素子による磁界の影響を取り除くことができる。

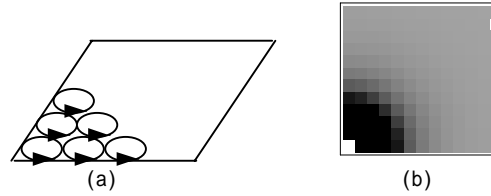


図4 ループ電流と生じる磁界
(a) 仮定したループ電流
(b) ループ電流の作る磁界 (z 方向成分)

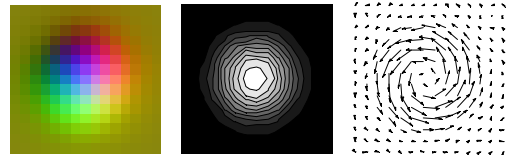


図5 ループ電流モデルによる電流分布推定
(a) 磁界分布画像 (b) ループ電流分布
(c) 推定された電流ベクトル

5. コイル素子位置推定問題

ここでは、実際の測定から得られた磁界分布を用いて、コイル素子の位置推定を行う。

5.1 データベース画像

図6にデータベースとなる各コイル素子の磁界分布画像を示す。また、図7には複合モデルに使用したデータベース中の4個のコイル及びそれらの磁界分布画像を示す。図6に示す合計9個の磁界分布からシステム行列を作成する。

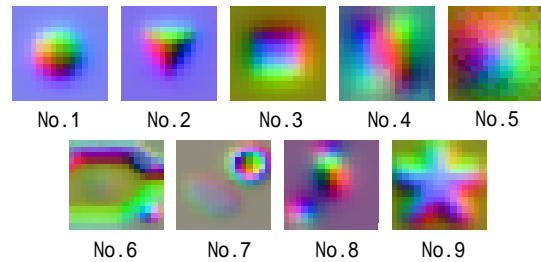


図6 データベース画像

5.2 入力画像

図8には、データベース中の4種類のコイルを含む複合モデルとその磁界分布画像及び推定されたループ電流分布を示す。複合モデルは1辺15.5cmの正方形領域であり、測定点数は 32×32 、計1024点、仮定したループ電流も合計1024点である。図8(c)のループ電流分布から、 12×12 画素領域を切り出し、磁界分布を計算する。得られた磁界を正規化し入力画像を生成する。

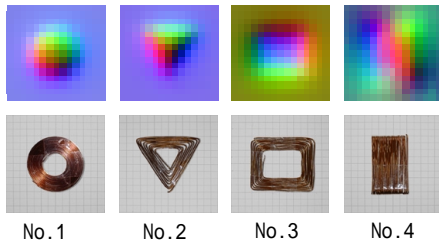


図7 複合モデルに使用されたコイル

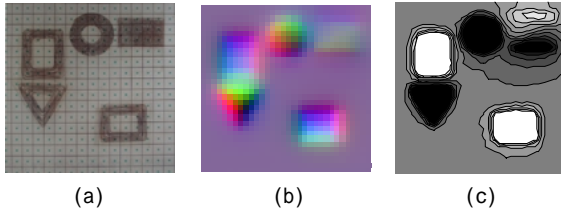


図8 複合モデル

(a)コイルレイアウト (b)磁界分布画像
(c)ループ電流分布

5.3 最小自乗解

データベース画像，入力画像から，(12)式を用いて解ベクトル X を求め，(13)式により画像の再構成を行う。図9は，入力画像の中から，実際にコイルが配置されている画像を示す。左から，複合モデル上の入力画像の位置，切り出したループ電流分布が生成する磁界分布，解ベクトルの要素である。解ベクトルの横軸はデータベースの番号であり，図6の番号と対応している。最大値を取る番号を正解とすれば，いずれも正しい結果であることがわかる。比較として，ループ電流モデルを用いず，単純に磁界分布から切り出した場合について，顕著に異なる例を図10に示す。図9(c)と同一領域を切り出したものが，隣接する円形コイルの影響を受けられていると考えられる。このことから，電流分布の時点でコイル素子の領域を選択し，磁界を計算することによって，隣接する素子の影響を取り除くことができ，素子同士が接近した場合，本手法によりコイル素子の位置推定が可能であることが示唆された。

6. まとめ

本論文では，画像を構成する画素数，画像のスクリーン x, y 座標上の位置・角度などのハードウェアに依存する性質を削減するため，カラー画像の赤，緑，青の各成分が構成する R, G, B 直交座標を考え，この3次元直交座標上へ x, y 座標上の原画像を投影することにより画像の固有パターンを抽出する方法を提案した。また，固有パターンを磁界分布へ応用し，コイル素子の位置推定を行った。その結果，ループ電流モデルによる電流分布推定法を応用することで素子が接近した場合に対しても妥当な位置を推定することができた。このことは測定された磁界分布から特定の電子回路素子が探査可能であることを示唆し，電気電子機器の非破壊検査の一方法として期待できると考えられる。

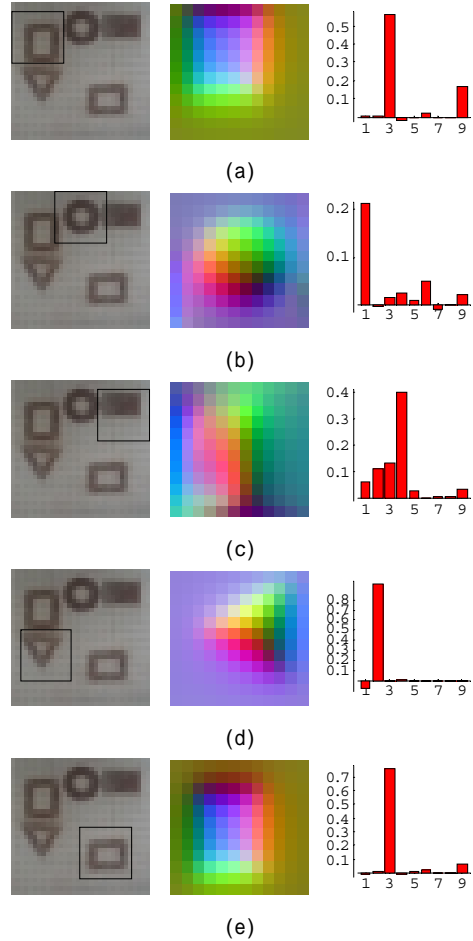


図9 正解の位置における入力画像



図10 磁界分布から切り出した場合

参考文献

- [1] 若林健一，早野誠治，斎藤兆古，"磁界の固有パターンに関する研究"，第24回日本応用磁気学会学術講演会講演番号 12pPS7，現在投稿中 2000年．
- [2] 増田則夫，緑川洋一，斎藤兆古，遠矢弘和，"電子回路基板中の電流分布推定に関する研究"，電気学会論文誌A，119-A,997，1999年
- [3] G. Strang, "Linear Algebra and its Applications", Academic Press, Inc. 1976.
- [4] 高橋広幸，早野誠治，斎藤兆古，國井利泰，澤田彰，堀井清之，"最小自乗法による画像認識とその電流分布推定への応用"，第20回計算電気・電子工学シンポジウム論文集，81，1999年．

キーワード.

固有パターン、画像認識、磁界分布

Summary.

Identifying the Coil Elements Along With the Eigen Pattern of Magnetic fields

Kenichi Wakabayashi Seiji Hayano Yoshifuru Saito.
Department of Electrical and Electronic Engineering, Hosei University

A new concept is introduced to extract the essential and distinct characteristics of the magnetic field distributions. A key idea is to calculate an eigen pattern, which can represent the characteristics of magnetic fields independent of their resolutions and space positions. The eigen pattern of a magnetic field distribution is obtained by projecting the three orthogonal magnetic field vector components at each of the space coordinates onto the x , y and z magnetic field components coordinate system. Thereby, this projection is possible to remove the space coordinate information, and extract the essential vector characteristics of the target magnetic field distribution. In this paper, we have succeeded in estimating the positions of each coil element from compound model along with eigen pattern.

Keywords.

Eigen pattern, Image identification, Magnetic field distribution.