

画像認識手法を用いた磁界系非破壊検査

佐藤 隆紀 早野 誠治 齋藤 兆古
法政大学大学院工学研究科

本論文は磁界の可視化手法に画像認識手法を応用した非破壊検査法を提案する。さらに、カラー動画画像として可視化された動磁界分布から解像度や基準座標に依存しない不変量を抽出し、抽出された不変量から線形システム方程式を導出し、方程式を解くことによって画像認識を行う。非破壊検査の具体例として磁気素子の認識を行い、その有用性を報告する。

1. はじめに

近年の電子・電磁機器は数多くの半導体によって回路が集積化されており、多くの場合密閉構造をしている。そのため、破壊・分解なしに機器内部の健全性を検査・診断、及び不良部位を特定することは比較的困難である。非破壊的な電子・電磁機器の検査にあたり、電磁界を利用した方法は機器の動作に伴う電磁界分布検査も兼ねることが可能であり、極めて簡便で有効な方法である。本研究は、最初に磁気素子直上で測定される磁界分布を動的なカラー画像データ、すなわち動磁界を動画画像で可視化することを考える。次に動画画像から、測定の解像度や位置などハードウェアの制約に依存しない不変量となる固有パターンを抽出する。さらに各動画画像から得られる固有パターンをデータベースとしてシステム方程式を導き、動画画像認識を行う。最終的な結果として、少ない測定点で測定された粗悪な磁界分布から得られる固有パターンをシステム方程式の入力として解くことで、元の磁界分布を認識可能であることを述べる。

2. 磁界分布の可視化

磁界はベクトル量であるから、互いに直交する x, y, z 成分で表現される。そこで、磁界の各直交成分が x, y, z 方向3成分について得られている場合、それら x, y, z 方向成分をそれぞれカラー画像の赤、緑、青（以下それぞれ R, G, B と略記）成分に対応させることで磁界分布を可視化する[1][2]。図1は平面状コイルを正弦波 10kHz, 0.5A で励磁し、その直上をソレノイド型サーチコイルで測定した磁界の x, y, z 方向成分、及びそれらを用いて磁界分布をカラー画像として可視化した画像である。実験時の測定点数は縦・横共に17点であるので、生成された可視化画像の解像度は 17×17 画素となる。

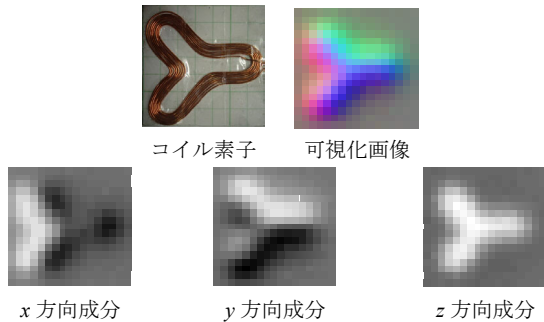


図1. カラー画像による磁界分布の可視化

3. 画像認識手法

3.1 画像の不変量抽出

計算機のスクリーン上へ可視化された画像は、2次元平面上の画素(Pixel)で構成される。各画素は可視光の波長によってそれぞれ R, G, B 成分の情報をもつ。また、画像は反射光の強さ(Intensity)、色相(Tone)、色成分(Color component)の組み合わせからなり、それらの幾何学的配置で表現される。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基準座標(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、本論文では固有パターンと呼ぶ[3]。

3.1.1 固有パターンの構成要素

固有パターンは反射光強度、色相、色成分ベクトルの3要素によって構成される。反射光強度ベクトルは、各画素中の R, G, B の色成分のベクトルノルムで与えられ、1画像に対して1組得られる。色相ベクトルは、各画素を構成する R, G, B の色成分の構成比で与えられる。各成分の和は反射光強度で与えられるので、独立な構成比は R, G, B の色成分の中で任意の2組である。色成分ベクトルは、1画像を構成する R, G, B の色成分の量で与えられる。従って、1画像に対して3組得られる。

3.1.2 反射光強度ベクトル

x, y 方向の画素数がそれぞれ a, b であるとき、画像データを $a \times b$ 次のベクトルとして扱う。ベクトルとして表現されたカラー画像における第 i 番目の画素の反射光強度値を $I_{int,i}$ とし、同画素の R, G, B の色成分値を R_i, G_i, B_i とすると、反射光強度値 $I_{int,i}$ は色成分値 R, G, B のベクトルノルムによって与えられる。

$$I_{int,i} = \sqrt{R_i^2 + G_i^2 + B_i^2}, \quad i=1,2,3,\dots,p \quad (1)$$

(1)式における $p (=a \times b)$ は表示画像中の全画素数である。従って、反射光強度分布を \mathbf{I}_{int} とすると、(2)式で与えられる。

$$\mathbf{I}_{int} = [I_{int,1}, I_{int,2}, I_{int,3}, \dots, I_{int,p}] \quad (2)$$

次に、反射光強度分布 \mathbf{I}_{int} をダイナミックレンジ D の分布に正規化した正規化反射光強度分布 \mathbf{I}_{int}^D に変形する。ここで、 $\text{Round}[\]$ が括弧内の値を整数化する演算を表し、 $\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する、第 i 番目の画素の正規化反射光強度値 $I_{int,i}^D$ は(3)式によって与えられる。

$$I_{\text{int},i}^D = \text{Round} \left[D \times \frac{I_{\text{int},i}}{\text{Max}[\mathbf{I}_{\text{int}}]} \right], \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, p$$

正規化反射光強度分布 $\mathbf{I}_{\text{int}}^D$ において、1 から D までのそれぞれの反射光強度値を取る画素を計数する。これにより、正規化反射光強度分布が反射光強度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反射光強度値の出現頻度が求められる。これによって求められた各反射光強度値の出現頻度を、ベクトルの要素とする反射光強度ベクトル \mathbf{E}_{int} を生成する。

3.1.3 色相ベクトル

本論文で考える色相は、各画素中の R, G, B の色成分の構成比であり、反射光強度値に対する R, G, B の色成分の割合で表す。ここではカラー画像における R 成分色相分布を考える。 R 成分色相分布を $\mathbf{I}_{\text{tone},R}$ とし、第 i 番目の画素における R 成分色相値を $I_{\text{tone},R,i}$ とすると、(4)式で与えられる。

$$I_{\text{tone},R,i} = \frac{R_i}{I_{\text{int},i}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p \quad (4)$$

次に、正規化 R 成分色相分布を $\mathbf{I}_{\text{tone},R}^D$ とし、第 i 番目の画素における正規化 R 成分色相値を $I_{\text{tone},R,i}^D$ とすると、(5)式で与えられる。

$$I_{\text{tone},R,i}^D = \text{Round} \left[D \times \frac{I_{\text{tone},R,i}}{\text{Max}[\mathbf{I}_{\text{tone},R}]} \right], \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, p$$

正規化 R 成分色相分布 $\mathbf{I}_{\text{tone},R}^D$ において出現頻度を求め、 R 成分色相ベクトル $\mathbf{E}_{\text{tone},R}$ を得る。 G 成分色相ベクトル $\mathbf{E}_{\text{tone},G}$ と B 成分色相ベクトル $\mathbf{E}_{\text{tone},B}$ も R 成分色相ベクトルと同様の演算処理によって得る。

3.1.4 色成分ベクトル

色成分ベクトルは、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、(6)式で与えられる。

$$I_{\text{comp},R,i} = R_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p \quad (6)$$

次に、正規化 R 成分分布を $\mathbf{I}_{\text{comp},R}^D$ とし、第 i 番目の画素における正規化 R 成分値を $I_{\text{comp},R,i}^D$ とすると、(7)式で与えられる。

$$I_{\text{comp},R,i}^D = \text{Round} \left[D \times \frac{R_i}{\text{Max}[\mathbf{I}_{\text{comp},R}]} \right], \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, p$$

正規化 R 成分分布 $\mathbf{I}_{\text{comp},R}^D$ において出現頻度を求め、 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。

3.1.5 固有パターン

固有パターンを \mathbf{E} とすると、固有パターン \mathbf{E} は反射光強度ベクトル \mathbf{E}_{int} 、 R 成分色相ベクトル $\mathbf{E}_{\text{tone},R}$ 、 B 成分色相ベクトル $\mathbf{E}_{\text{tone},B}$ 、 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、(8)式で与えられる。

$$\mathbf{E} = [\mathbf{E}_{\text{int}}^T, \mathbf{E}_{\text{tone},R}^T, \mathbf{E}_{\text{tone},B}^T, \mathbf{E}_{\text{comp},R}^T, \mathbf{E}_{\text{comp},G}^T, \mathbf{E}_{\text{comp},B}^T]^T \quad (8)$$

(8)式の上添え字 T は転置を表す。

図 2 に固有パターンの例を示す。本論文における固有パターンのダイナミックレンジ D はいずれも 255 としたので、(8)式から構成される固有パターンは $255 \times 6 = 1530$ 次のベクトルとなる。同図(a)(b)の固有パターン間の相関係数は 0.999 となり、解像度や基準座標に依存しない不変量であることがわかる。

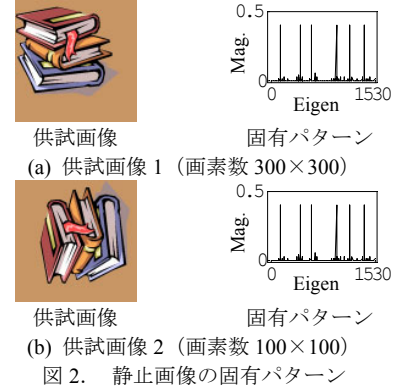


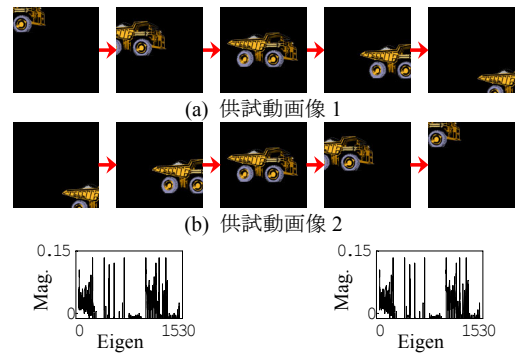
図 2. 静止画像の固有パターン

3.1.6 動画像への拡張

固有パターン抽出の概念を動画像へ拡張することを考える。本論文では、対象物の位置や角度のみならず移動方向に依存しない不変量を動画像の固有パターンとして抽出する[4]。

動画像は複数のフレーム画像によって構成される。そのため、フレーム画像全体を通した画素分布から不変量を抽出する必要がある。そこで、動画像を構成する全フレームを重ならないように合成した全フレームの合成静止画像を作成し、この合成静止画像から固有パターンを抽出する。固有パターンはスクリーン上の可視化画像の位置や角度に依存しない量であるため、合成静止画像から抽出した固有パターンは、動画像中のフレーム移動情報を削除することが可能となる。

図 3(a), (b)に同一対象が異なる方向へ移動する動画像を示す。同図(c), (d)に示す固有パターンはいずれも同値であることから、合成静止画像から抽出された固有パターンはフレーム移動情報を削除した不変量であることがわかる。



(c) 図 3(a)の固有パターン (d) 図 3(b)の固有パターン

図 3. 動画像の固有パターン

3.2 一貫性評価

本論文における画像認識は、予め複数の画像から固有パターンを抽出し、データベースを構築しておく。その後、認識処理対象として与えられる未知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貫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[5]。

データベースに 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(9)式で与えられる。

$$C = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_n] \quad (9)$$

ここで、任意の入力画像の固有パターンを E_x とすると、(10)式の線形システム方程式が得られる。

$$E_x = C \cdot X \quad (10)$$

(10)式における 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 列の長方形となるので、(10)式は不適切な線形システム方程式となる。本論文における固有パターンの次数 m は $m = 1530$ となるので、データベース数 $n < 1530$ であれば解ベクトル X の算出に(11)式で示す最小自乗法を適用することができる[6]。

$$X = [C^T C]^{-1} C^T E_x \quad (11)$$

ここで、(11)式で得られる解ベクトル X の第 j 番目の要素が 1 で、他の要素がすべて 0 であるならば、入力画像の固有パターン E_x はデータベース画像の j 番目の固有パターン E_j に等しい。よって入力画像をデータベースの j 番目の画像と認識できる。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。

4. 磁界系非破壊検査

磁界系非破壊検査の例として、第 2 章で述べた可視化手法及び第 3 章で述べた画像認識手法を用いた磁気素子の認識を行う[7][8]。

図 4 にデータベース画像の例を示す。データベース画像として、コイル素子や DC/DC コンバータ等の磁気素子

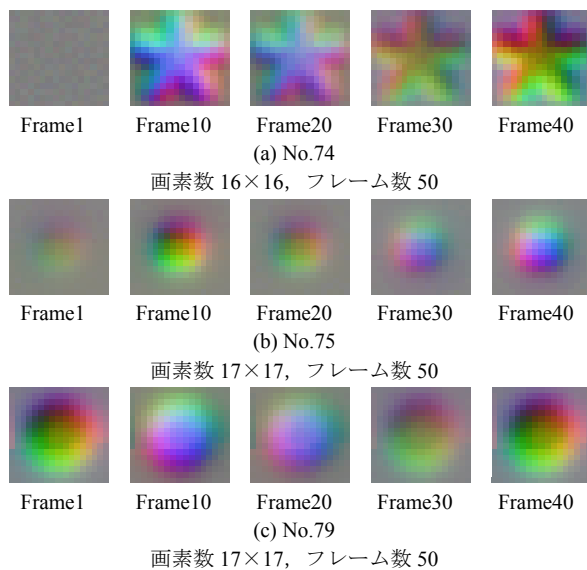


図 4. データベース画像

及びシミュレーションによって得られた動磁界分布を 100 類採用した。フレーム数は 50 であるが、各画像の解像度は実験時の測定点数の違いから画像によって異なり、 16×16 画素 $\sim 35 \times 35$ 画素である。

図 5 に入力画像の例を示す。入力画像として、データベース画像と同形状の磁気素子を使用し、実験時の測定間隔を粗くして得た動磁界分布を採用した。各画像のフレーム数は 40、解像度は 9×9 画素 $\sim 13 \times 13$ 画素である。これらの低解像度磁界分布から元の磁界分布を探索する。

図 6 に認識結果の例を示す。同図に入力画像、認識された出力画像、また得られた画像の妥当性を吟味するために、解ベクトルも示す。解ベクトルの横軸はデータベース画像の番号であり、図 4 の番号と対応している。図 6 の入力画像はデータベースの No.74, 75, 79 と同形状の可視化画像であるが、同図に示す解ベクトルは正解を示す要素で最大値をとり、正しい認識結果が得られた。

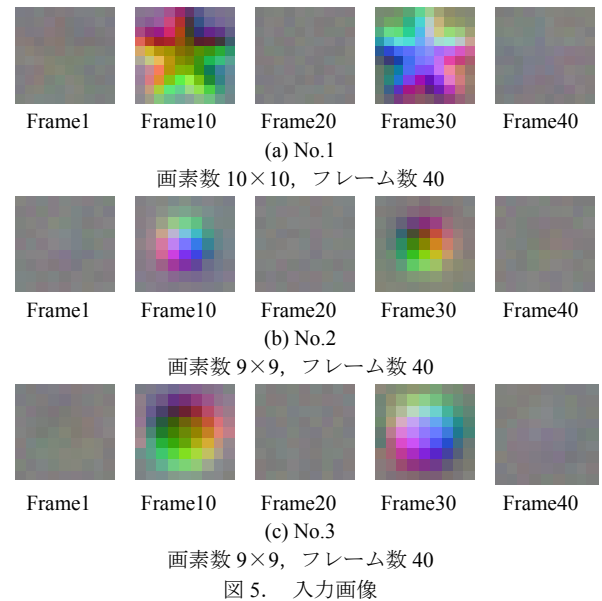


図 5. 入力画像

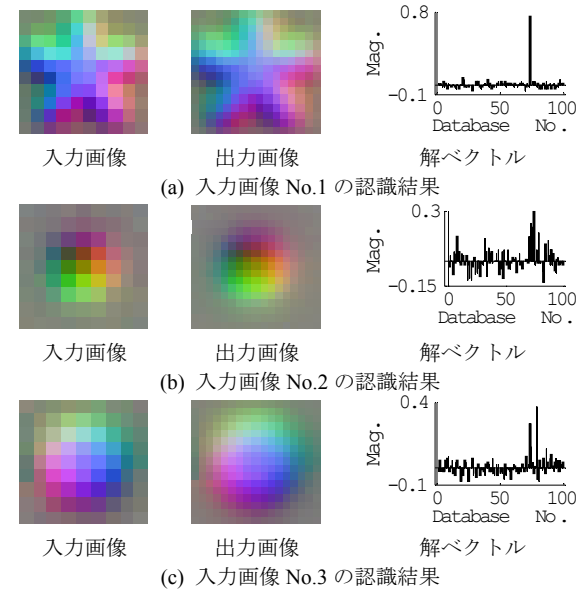


図 6. 認識結果

また、動画像認識と動画像の1フレームのみ、すなわち静止画像認識との結果を比較する。図4のデータベース画像及び図5の入力画像のFrame10のみを使った静止画像認識による解ベクトルを図7に示す。静止画像認識による解ベクトルは、解ベクトル要素の値が小さく誤った認識結果を得た。一方、動画像認識による解ベクトルは、正解を示す要素の値が大きく、また正解はピーク値に対応し、良好な認識結果が得られた。これは、複数フレームを用いた動画像認識は、単一フレームによる静止画像認識に比べ情報量が増加し、素子固有の情報により多く抽出しているためである。

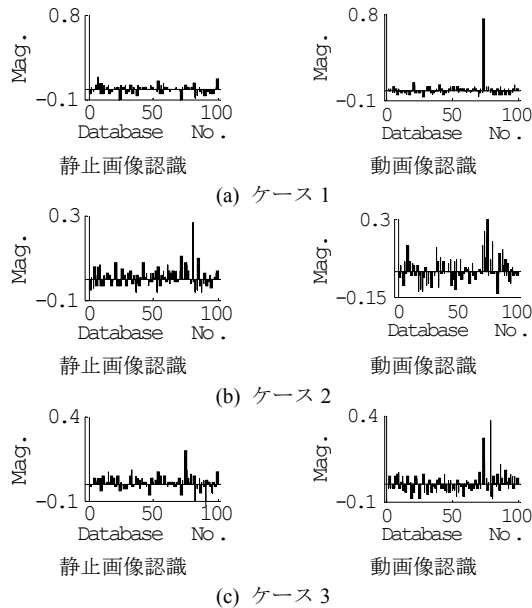


図7. 静止画像認識との比較

5. まとめ

本論文では、磁界の可視化手法に画像認識手法を応用した非破壊検査法を提案した。第2章では磁界分布の可視化について述べた。磁界の x, y, z 方向成分をそれぞれカラー画像の R, G, B 成分に対応させることで、ベクトル量である磁界分布をスカラー量であるカラー画像として可

視化した。第3章では固有パターンと線形システム方程式を用いた画像認識について述べた。画像の不変量を固有パターンとして抽出する方法を提案し、静止画像のみならず動画像へ拡張する方法について述べた。また、固有パターンを用いた線形システム方程式を導入し、解ベクトルを算出することで画像の認識を行った。第4章では磁界系非破壊検査の例として、磁気素子の認識を行った。その結果、少ない測定で得られる磁界分布からデータベース中の磁気素子が探査可能であることを示した。このことは測定されたフィールド分布から特定の素子や物理的状態が探査可能であることを示唆し、さらに、短時間で行われるべき非破壊検査で有力な手法として期待できることを意味する。

参考文献

- [1] 遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古, “電磁界の可視化手法に関する考察”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-069, 2001年.
- [2] 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, Vol.120-A, No.10, pp.902-912, 2000年.
- [3] 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年.
- [4] T. Sato, I. Marinova, S. Hayano and Y. Saito, "Dynamic Image Cognition Along with Eigen Patterns", The 2nd Japan-Australia-New Zealand Joint Seminar, 2002.
- [5] T. Sato, H. Endo, S. Hayano and Y. Saito, "Image Cognition by Means of Inverse Approach", Proceeding of the XII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SEILA2001), Vol.II, pp.112-119, 2001.
- [6] G. Strang, "Linear Algebra and Its Applications", Academic Press, Inc., 1976.
- [7] 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年.
- [8] T. Sato, I. Marinova, S. Hayano and Y. Saito, "Dynamic Image Cognition and Its Application to Visualized Information", Proceeding of the 10th International Symposium on Flow Visualization, F0301, 2002.

キーワード.

画像認識, 固有パターン, 非破壊検査

Summary.

Magnetic Nondestructive Inspection by Means of Image Recognition

Takanori Sato Seiji Hayano Yoshifuru Saito
Graduate School of Engineering, Hosei University

A method of image recognitions is proposed and applied to the nondestructive inspection utilizing the database of color-imaged magnetic fields. Our image recognition method has two distinguished features. One is that the image is handled as its eigen pattern. The other is that the recognition is carried out by solving for the ill-posed linear system of equations comprising the eigen patterns as a database. The eigen pattern consists of histograms in terms of intensity, tones and primal color components of the image. This eigen pattern of color components yields a numerical data set which is hard to be changed by the differences in spatial position of target as well as resolution of the image. An application of the proposed image recognition method to the nondestructive inspection based on measuring magnetic fields is carried out to demonstrate the usefulness of our method. Consequently, it is revealed that our methodology is one of the most powerful and effective nondestructive inspections of magnetic devices.

Keywords.

Image Recognition, Eigen Pattern, Nondestructive Inspection