

画像処理技術を拡張した電磁界可視化手法

齋藤 兆古 (法政大)

Visualization Technology of Electromagnetic Fields
Based on the Image Processing
Koganei Tokyo 184-8584, Yoshifuru Saito (Hosei University)

Abstract

This paper reviews a new image processing methodology based on the image Helmholtz equations and its application to the visualization technique concerning on electromagnetic fields. At first, current visualization is carried out by means of the inverse approach. Second, magnetic fields are visualized by respectively corresponding x,y and z magnetic field components to the red, green and blue components of image. Finally, it is demonstrated that image cognition methodology is one of the most powerful non-destructive testing ways to the electromagnetic devices.

キーワード： 可視化電磁界、画像の Helmholtz 方程式、画像処理
(Visualized Electromagnetism, Image Helmholtz Equations, Image Processing)

1. まえがき

物理学の一分野として種々の電磁現象が観測され、現象の知見が蓄積されつつある時点で、産業革命による遠距離通信の必要性が電気通信機器の開発と実用化を促し、これが今日の電気・電子工学の発端となった。その後、蒸気機関による動力の集中使用による大量生産体制は部品製造に動力の分散使用を必要とし、これが効率的なエネルギーの伝送を可能とする電力系統網の整備および動力の分散生成と使用を可能とする発電機・電動機の開発と普及をもたらした。すなわち、産業革命が電磁気学を単なる物理学の一分野から電気・電子工学の基礎学術へ変貌させた。

物理学としての電磁気学は、電磁現象が空間座標の関数となるため、すべて空間・時間に関する微積分方程式で記述される分布定数系で議論される。他方、電気・電子工学における電磁気学は、空間や時間の微積分方程式で表現される電磁現象から出発し、最終的には何らかの集中定数系で現象をモデル化し、電磁現象を利用した有線通信、電力系統、さらに電気機器を設計・開発する学問的基礎を与える。この意味で、物理学の量子力学が物性系工学分野のバンド理論を導く基礎となっているように、物理学の分布定数系電磁気学が電気・電子工学の集中定数系を導く電磁気学の基礎になっている。

集中定数系で表現される電磁現象は、空間的な微積分を必要としないため、明快で理解し易く、電気・電子機器の設計・開発に極めて有効なモデルであり、その結果、電気・電子機器は、現代社会を支える必要不可欠な文明の利器として広汎に普及している。

1960年代の後半から爆発的な普及と高性能・小型・軽量化がなされた計算機は多くの工学機器へ搭載され、単純な

機械を知的な機械へ変貌させている。より高度な知的能力と小型・軽量化が電気・電子機器へ期待され、これを実現する方途として、電気・電子機器の駆動周波数が高周波化され、既に計算機では1GHzの動作周波数領域へ到達しつつある。明らかに、電気・電子機器の設計・製作は集中定数モデルの限界を超えつつある。電気・電子機器は、それらの駆動周波数が如何に高周波化しても、電波伝播を前提とするアンテナを備えていない。このため、現代の電気・電子機器は、集中定数の電気・電子回路系や電波伝播を前提とする分布定数系とも異なる近傍電磁界系として捉えざるを得ない。

近傍電磁界系は、物理系のマクロとミクロの中間系であるメソスコピックな系と類似した集中定数系と分布定数系の中間的な系であり、過去に技術的・学問的知見が殆ど蓄積されていない。電磁界の可視化技術は、現代電気・電子機器の設計・開発の根幹技術となる近傍電磁界解析技術の一端をなすものである。何ごと「百聞は一見にしかず」の格言と同様に、まずは、電磁界を可視化することが近傍電磁界解析技術開発の大きな手掛かりとなる。換言すれば、近傍電磁界現象を正確に把握する技術が電磁界可視化技術である。

2. 近傍電磁界の可視化

〈2・1〉 近傍電磁界解析 近傍電磁界の可視化を可能とする方法は二種類へ分類される。最初は、電磁界源と空間・時間条件を既知として、周辺の電磁界を解析的に計算する順問題的方法である。他方は、周辺電磁界分布から電磁界源を推定し、推定された電磁界源から周辺電磁界分布を計算する逆問題的方法である。前者の順問題的方法は、

実現される製品を忠実にモデル化可能であれば、有用な方法である。残念ながら、近傍電磁界問題の多くは、順問題のモデルで表現出来ない現象に起因する。他方、生産された製品が周辺へ与える近傍電磁界から電磁界源を推定する逆問題的手法は、解の一意性等、数学的基盤の弱さが存在する反面、計算機の強力な反復計算能力を前提とする方法が開発されつつある⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

本稿では、後者の逆問題的解析法を用いて近傍電磁界を可視化する。さらに、可視化された電磁界のイメージ処理について概説する^{(6), (7)}。

〈2・2〉 電流分布の可視化 ここでは磁気誘導加熱調理器の周辺磁界測定から電流分布を可視化する例題を取り上げる。

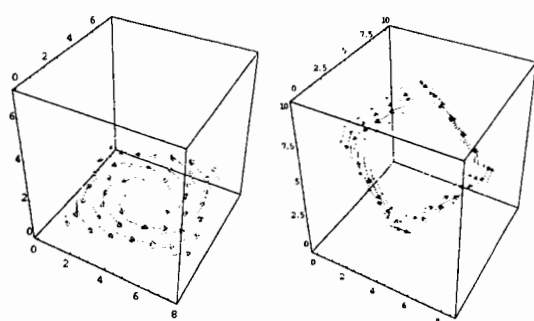


図1 準3次元電流分布の例
Fig.1. Examples of the quasi-3D currents

励磁コイルを取り囲む 16cm^3 の立方体、各面に垂直方向の磁界を測定し、立法体内の電流分布を推定する。実験に用いた励磁コイルは内半径 2cm 、外半径 10cm のドーナツ状であり、正弦波 100kHz 、 1A の電流を通電した。立方体各面へ垂直な磁界の測定点数は縦・横方向共に8点とした。従って、全体の磁界測定点数は $6 \times 8 \times 8 = 384$ 点である。図1に推定された電流分布の例を示す。尚、計算は直接逆行列法を採用した。磁界の測定面に平行な面上の2次元電流を6面について計算し、それらを組み合わせて準3次元電流を推定した。また、電流の主要部分を抽出するため、予めシミュレーションで決定した閾値を用いて閾値演算を行った⁽⁵⁾。

〈2・3〉 磁界の固有パターン 磁界はベクトル量であるから、互いに直交する x, y, z 成分で表される。磁界を可視化するため、磁界の x, y, z 方向成分をそれぞれ光の3原色、赤(以下、Rと略記)、緑(以下、Gと略記)、青(以下、Bと略記)に対応させて可視化する。図2に磁界を可視化した画像の1例を示す。

従って、可視化された磁界の画像から磁界の固有パターンが抽出でき、局所的な磁界から全体の磁界分布の再構成や励磁コイルの形状が認識可能である。

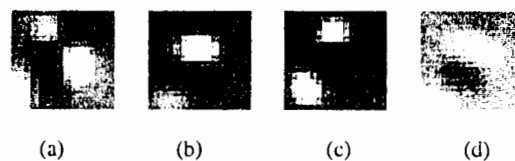


図2 磁界の各成分と可視化画像、(a)x方向成分、(b)y方向成分、(c)z方向成分、(d)可視化画像
Fig.2 Each magnetic field component and visualized image. (a) x-component, (b) y-component, (c) z-component, (d) visualized image

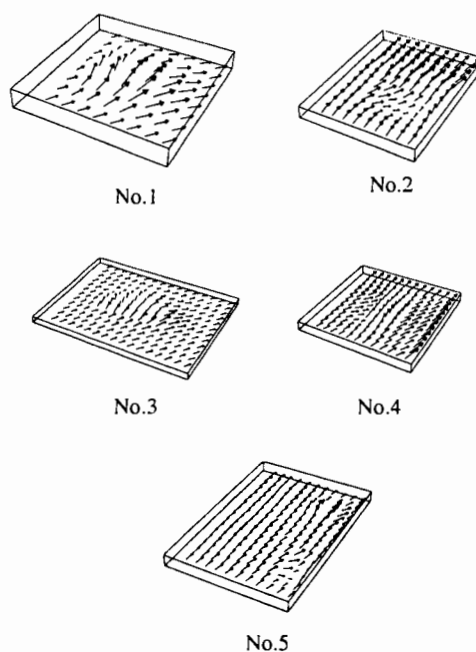


図3 局所的に測定された3次元磁界分布
Fig. 3. Locally measured 3D magnetic fields.

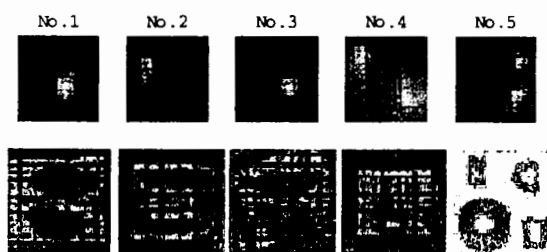


図4 再現された画像(上段)と認識された供試コイル(下段)
Fig.4. Upper: Recovered images, Lower: Identified coils

このようにして可視化された磁界は既にベクトル量ではないため、カラー画像として取り扱いが可能となる。カラー画像は、カラー画像を構成するRGB情報を抽出することが可能であり、このカラー画像のRGB情報が構成するパターンを画像の固有パターンと呼ぶ。予め既知の画像情報が与えられていれば、画像の固有パターンを用いて低解像度画像から高解像度画像の再構成や認識が可能である⁽⁶⁾。

具体的な例として、図3に示す磁界画像から励磁コイルの形状を認識する問題を考える。図3に示す磁界画像の高解像度画像が既知とすれば、最小自乗法を用いて図4の上段に示す高解像度の磁界画像が再構成される。また、図4の下段に示すように回路構成を認識できる。この手法は、回路構成を認識するよりも、むしろ、磁界の固有パターンから電気・電子機器内の電気・電子回路の健全性を評価する非破壊検査に有用である。

〈2・4〉 画像の支配方程式 画像データは、数値をマトリックス状に配置した画素 (pixel) と呼ばれるもので構成されている。通常のディスプレイの場合、縦方向、横方向の画素間の距離は等しい。カラー画像のRGB各成分において、 i 行 j 列目の画素の値を $U_{i,j}$ とすれば、画像のラプラス演算は、(1)式の有限差分で近似的に与えられる⁽⁷⁾。実際に(1)式の有限差分を実行する場合、画像の周囲に境界条件を設定しなければならない。本稿では、画像の周囲を画素値 $U=0$ とするDirichlet型境界条件を採用した。カラー画像を構成するRGB各成分に(1)式を適用

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \approx \frac{1}{6} \begin{bmatrix} U_{i+1,j+1} + U_{i+1,j-1} + U_{i-1,j+1} + U_{i-1,j-1} \\ + 4(U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}) \\ - 20U_{i,j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

する。これは、各カラー画像の画素値をスカラーポテンシャル U とみなせば、RGB各成分のフィールドソースを計算することを意味している。以上のことから画像の支配方程式は(2)式のポアソン型方程式となる。

$$-\nabla^2 U_p = \sigma_p, \quad p = Red, Green, Blue. \quad (2)$$

画像は、(2)式のポアソン方程式を満足する。画像データが低解像度であっても画像の支配方程式を解くことで高解像度画像を生成することが可能である。厳密に言えば、ポテンシャル分布が低解像度で与えられても、そのラプラス演算で得られたフィールドソースに対し細かいメッシュシステムを用いて支配方程式を解くことで高解像度のポテンシャル分布を得ることが可能である。これは、単なる線形補間ではなく、画素間を双曲線関数で補間することを意味する。



図5 フィルムトランスを用いたDC/DCコンバータ
Fig.5. DC/DC converter using film transformer.

検証実験として、スイッチング動作中のフィルムトランスを用いたDC/DCコンバータ⁽⁸⁾直上の磁界を x, y, z 各方向についてソレノイド型サーチコイルで測定した。測定対象となったDC/DCコンバータを図5に示す。また、磁界画像を図6に示す。測定点数を 32×32 点とした。従って、図6は 32×32 画素の解像度を持つ画像となる。

画像が低解像度であっても、画像の支配方程式を用いることから、画素間を双曲線関数で補間した高解像度画像が生成することができる。

測定した磁界分布データを一定間隔で間引きすることで低解像度測定データを生成する。図6の 32×32 画素のカラー画像をそれぞれ 16×16 、 8×8 、 4×4 、画素に間引きして低解像度画像を作成した。それぞれの低解像度画像に対し、(1)式のラプラス演算を用いてフィールドソースを求めた。さらに、所望の画素数と等しい節点数のメッシュシステムで画像の支配方程式(2)式を解き、磁界分布を再構成した。低解像度画像からそれぞれ 32×32 の解像度を持つ画像を再構成した結果を図7に示す。図5に示した画像と図7で得られた画像データ間の相関係数は、間引き画像の画素数が 16×16 、 8×8 さらに 4×4 に対してそれぞれ、0.91、0.80、0.50となった。よって、6.25%のデータ量で0.8の相関係数を持つ磁界分布を再構成することができた⁽⁹⁾。

3. まとめ

本稿では電磁界の可視化技法とその応用について概説した。電磁界の可視化を近傍磁界解析問題の基幹技術として位置付け、具体的例題として、周辺磁界から電流分布の可視化を行った。また、磁界ベクトルをカラー画像として可視化する手法を述べ、その結果、画像認識の技法が電気・電子機器の非破壊検査へ有用であることを述べた。さらに、画像の支配方程式を導き、この支配方程式から任意の解像度を持つ画像が再構成可能であることも述べた。



図 6 DC/DC コンバータ上の磁界分布(解像度:32x32)
Fig. 6. Visualized magnetic field image over the DC/DC converter having 32 by 32 resolution.

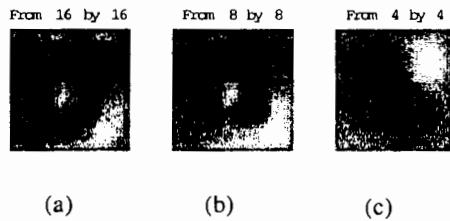


図 7 低解像度の磁界分布から高解像度の磁界分布の再構成、解像度: (a)16x16 から 32x32 (b) 8x8 から 32x32 (c) 4x4 から 32x32
Fig. 7. Recovered magnetic field images; from (a) 16 by 16, (b) 8 by 8, and (c) 4 by 4 to 32 by 32 resolutions.

参考文献

- (1) T. Doi, S. Hayano and Y. Saito: "Magnetic field distribution caused by a notebook computer and its source searching", Journal of Applied Physics, Vol. 79, No. 8, pp. 5214-5216 (1996).
- (2) Y. Midorikawa, J. Ogawa, T. Doi, S. Hayano and Y. Saito: "Inverse analysis for magnetic field source searching in thin film conductor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. MAG-33, No. 5, pp. 4008-4010 (1997).
- (3) 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, Vol. 119, No. 7, pp. 997-1004 (1999).
- (4) 関島大志郎, 早野誠治, 斎藤兆古, 澤田彰, 堀井清之: "一般化 SPM 法による二次元電流分布推定", 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-99-151, (1999).
- (5) 宮原晋一郎, 早野誠治, 斎藤兆古: "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) 若林健一, 他: "画像の固有パターンと磁界分布解析への応用", 電気学会マグネティクス研究会, 1999 年, MAG-99-142, (1999).
- (7) 赤坂 隆, "数値計算", コロナ社 (1968).
- (8) T. Ogawa, et al "Realization of a coreless transformer and its application to a DC/DC converter," Elektrotechn. CAS., 44 (1993), No. 7, pp. 238-241.
- (9) 遠藤 久, 早野誠治, 斎藤兆古, 國井利泰, "ウェーブレット変換法と微積分方程式によるカラー画像の圧縮および再現性について", 可視化情報学会誌, Vol. 19, Suppl. No. 1, July, 1999, pp. 79-82.

原稿受付日

平成 15 年 3 月 4 日