

# 磁界ベクトル場の可視化法に関する研究

## A STUDY OF VISUALIZING METHODOLOGY OF MAGNETIC VECTOR FIELD

藤枝直樹

Naoki FUJIEDA

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

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 aimed at 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 machine diagnosis of electric circuits. As a result, we have confirmed that machine diagnosis/inspection may be practically employed at the electric circuit inspection workshop in the plant.

**Key Words :** *Magnetic Field Vector, Visualized Image, Reference Coordinate*

### 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。しかし、そ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、我々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直交方向成分を光の  $R$ (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まらない[3]。

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考え、基準座標系における磁界ベクトル分布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について述べる。そして、Gauge理論を基に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について述べ、基準座

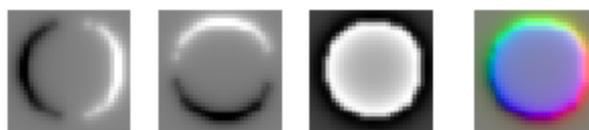
標系における磁界ベクトル分布可視化画像を得る。また可視化した画像から元のベクトル場を再現する可逆的の可視化法について述べる。

最後に機械診断応用の一例として、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、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

#### (1) 磁界ベクトル分布のカラー可視化画像

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  $R$ ,  $G$ ,  $B$  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は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を示す。



(a)  $x$  Comp. (b)  $y$  Comp. (c)  $z$  Comp. (d) Color Image

Fig.1 Magnetic Field Components and Visualized Color Image

## (2) 基準座標系

### a) 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 の方程式は、

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

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) 式で、 $H_x, H_y$  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。また、(3) 式により磁界から電流密度ベクトルを求めることができる。

本稿では電流密度ベクトルのノルムを重みとし、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の方向を基準座標系の  $x$  軸と定義する。 $y$  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、 $x$ - $y$  平面の垂直方向とする。

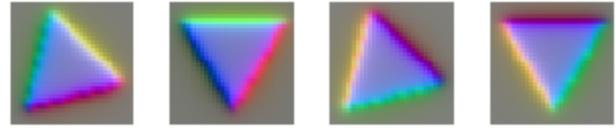
### b) 基準座標系における磁界ベクトル分布可視化画像

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。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。 $\mathbf{H}_{xy}$  と基準座標軸とのなす角を  $\theta$  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、 $H_{Rx}, H_{Ry}$  は、

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

から得られる[3]. 全ての磁界ベクトルへ (4) 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、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 に測定時の原局所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) の可視化画像と比較して、色情報が対象の位置・角度に依存せず同図 (b) の可視化画像はベクトル場の一意的な可視化画像と考えられる。



(a) Original Coordinate (b) Reference Coordinate

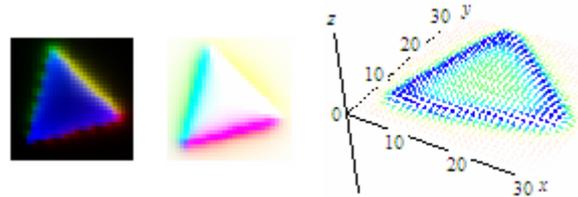
Fig.2 Visualized Image by Each Coordinate

### (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ができない。すなわち、非可逆的可視化法である。

本稿では、可逆的可視化法として、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。この方法では、得られた二つの画像を合成することで、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.3 に磁界ベクトルの正と負の情報を持った可視化画像および再現されたベクトル分布を示す。



(a) Image (Positive Comps.) (b) Image (Negative Comps.) (c) Recovered Vector Distribution

Fig.3 An Example of the Reversible Visualized Images

## 3. 可視化磁界ベクトル分布の応用

### (1) ベクトル場認識

#### a) 画像の固有パターン

計算機スクリーン上の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形状を表す。カラー画像の場合、各画素は  $R, G, B$  成分の情報をもつ。また、計算機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  $R, G, B$  成分の各強度値を計数し、正規化した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角度に無関係な画像固有の量であることがわかる。

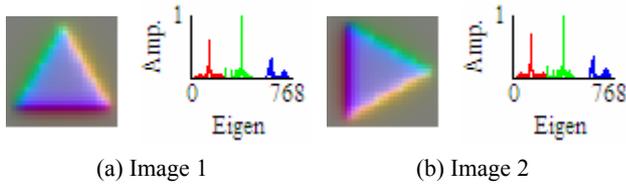


Fig.4 Image Eigen Pattern

### b) 固有パターン的一致性

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  $C$  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) 式で、 $\mathbf{E}_x$  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  $m > n$  の場合を扱う。この場合、解ベクトル  $\mathbf{X}$  の算出に (7) 式の最小自乗法を適用することができる[5]。

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

本稿では、(7) 式の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画像認識を行う。

### c) ベクトル場認識

以上、上記の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可視化カラー画像に変換し、データベースを構築する。さらに、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と同様の磁気素子の放射する磁界ベクトルを任意の座標で測定し、可視化カラー画像を経て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入力ベクトルとして線形システム方程式を解き、解ベクトルを (7) 式で算出する。得られた解ベクトルの最大値をとる要素を認識された磁気素子とする。

本稿では 10 種類の磁気素子の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 100 種類の可視化画像を採用した。

本稿では、非可逆的可視化画像、可逆的可視化画像、それぞれの測定時における座標系の可視化画像、基準座標系の可視化画像を用いた場合について認識を行った。可逆的可視化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、合成することで得た。

ベクトル場の認識結果を Table1 に示す。基準座標系可視化画像を用いた場合の認識率が高く、さらに可逆的可視化画像を用いた場合の認識率が最も良好な結果である。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、可逆的可視化法の正負二画像を用いることで原ベクトルの情報を維持していることに起因する。

Table1 Cognition Rate

Irreversible Visualization		Reversible Visualization	
Original	Reference	Original	Reference
43 [%]	69 [%]	26 [%]	81 [%]

### (2) ベクトル場認識技術による機械診断

本節では、前節で述べたベクトル場認識技術を利用した機械診断について述べる。ここでは具体例として、コイル素子の位置推定問題を考える。すなわち、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複数の領域に分割し、それぞれの可視化カラー画像から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の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、コイル素子の存在する位置とする。

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 点の測定点でサーチコイルに誘起する電圧から (8) 式の計算により行った[4]。(8) 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。

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

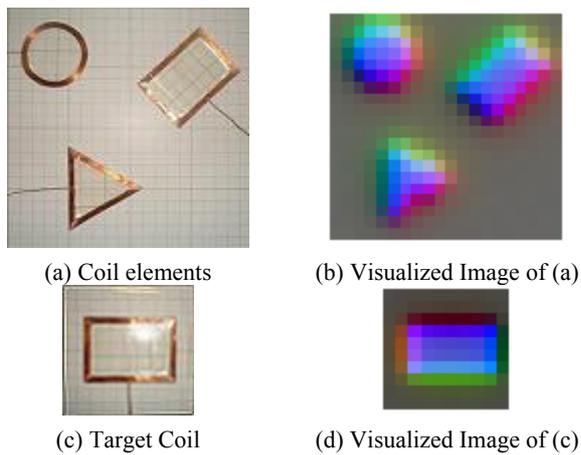


Fig.5 Experimental

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、それぞれを基準座標系へ変換している。

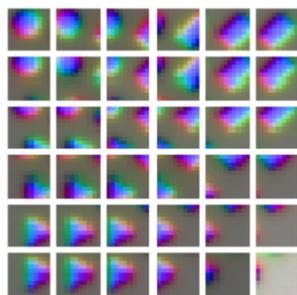


Fig.6 Sampled Visualized Vector Field Images

Fig.7 にベクトル場認識結果を示す。Fig.7 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。Fig.8 の結果から、ほぼ妥当な位置が推定されたことが判る。

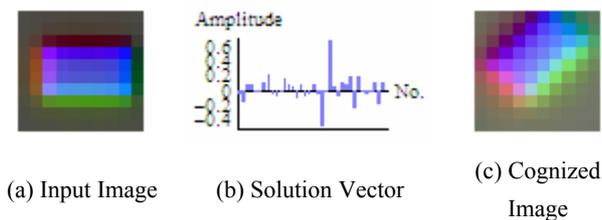


Fig.7 Cognition of Vector Field

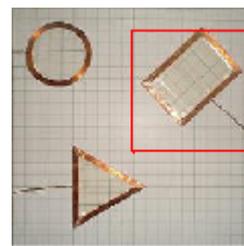


Fig.8 Estimated Position of Target Coil

#### 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、一意的な磁界ベクトルの可視化画像を生成した。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で、得られる可視化画像が座標系に依存するという問題点を解決し、ベクトル場固有の可視化画像を生成することが可能となった。また、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。

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、ベクトル場本来の可視化画像である基準座標系可逆的可視化画像を用いたベクトル場認識が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) 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

## 本研究の背景

- ・プリント基板技術の向上
- ・半導体の高密度集積化



小型軽量電子機器の開発



小型軽量電子機器の個人レベルの普及

通信や情報管理の分野に  
大きな利便性

### 問題点

- ・密閉構造
- ・小型化



破壊検査

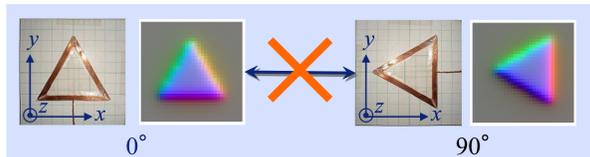
不良部位の  
特定が困難

## 基準座標

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

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \downarrow \mathbf{H} &= \mathbf{H}' + \nabla \varphi \\ \mathbf{J} &= \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H}' \\ \therefore \nabla \times \nabla \varphi &= 0 \\ \varphi &: \text{任意のスカラー場}\end{aligned}$$

ベクトル場は基準座標を  
勘案しなければ  
一意に決まらない。



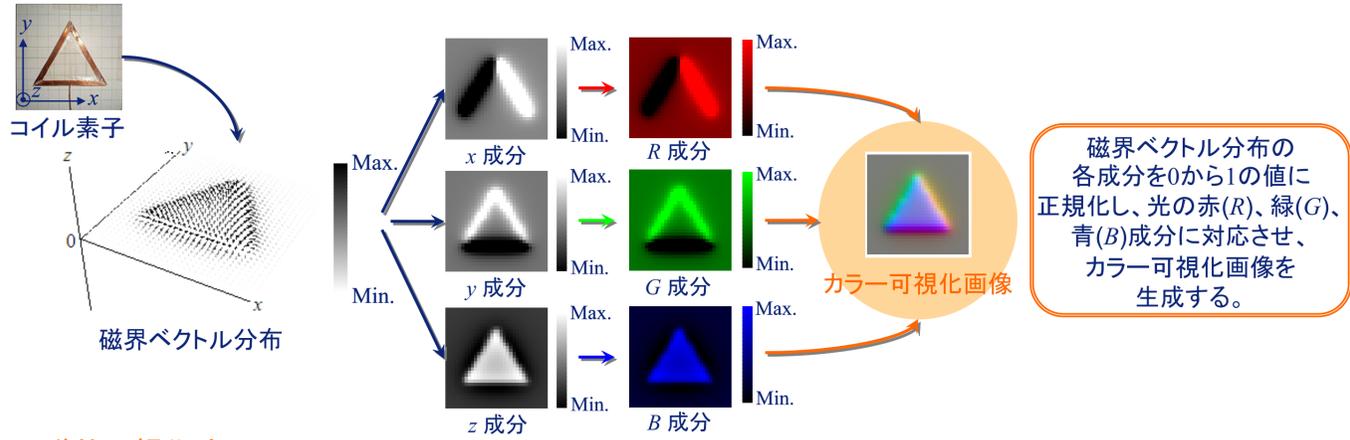
基準座標が異なる場合のカラー可視化画像

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} &= \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \therefore \nabla \cdot \nabla \times \mathbf{C} &= 0 \\ \mathbf{C} &: \text{任意のベクトル場}\end{aligned}$$

Maxwellの方程式より導かれる  
左記の式より、電流密度ベクトル $\mathbf{J}$ 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、  
一意に求めることができる。

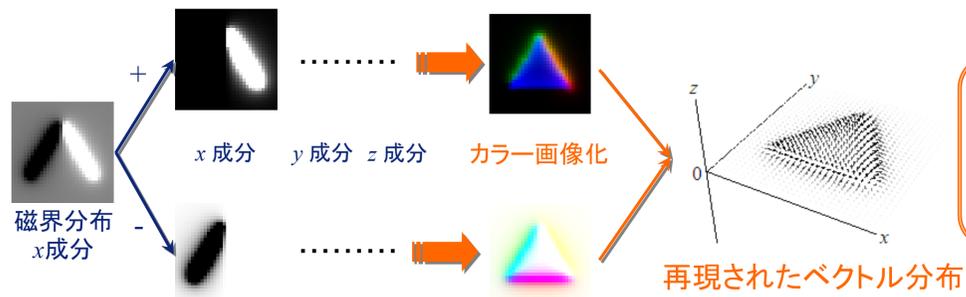
電流ベクトルを用いて基準座標を決定

## 磁界ベクトル分布のカラー可視化画像



磁界ベクトル分布の  
各成分を0から1の値に  
正規化し、光の赤(R)、緑(G)、  
青(B)成分に対応させ、  
カラー可視化画像を  
生成する。

### 可逆的可視化法



磁界ベクトルを正の分布と  
負の分布に分類し、独立に  
カラー可視化画像を生成  
することで、元のベクトル分布を  
再現可能なカラー可視化画像を  
得ることができる。

## 可視化磁界ベクトル分布の応用

磁界ベクトル分布  
可視化画像

画像認識手法

- ・画像の固有パターン
- ・線形システム方程式

ベクトル場認識

コイル素子の位置推定

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_x &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \\ \text{線形システム方程式} \\ \downarrow \\ \mathbf{X} &= [\mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{E}_x \\ \text{最小自乗法}\end{aligned}$$

$\mathbf{C}$ :  $n$ 個のデータベース画像の固有パターン  
 $\mathbf{E}_x$ : 入力画像の固有パターン  
 $\mathbf{X}$ : 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

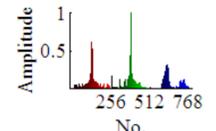
固有パターンの次数を $m$ とすると、  
本研究では $m > n$ の関係であるので、  
解ベクトル $\mathbf{X}$ の算出に最小自乗法を  
適用する。そして、解ベクトルの中で  
最大値をとる要素で認識を行う。

画像の固有パターン  
カラー画像中におけるR成分、G成分、B成分の0から255の値を  
持つ画素の出現頻度を各成分ごとに計数した量。

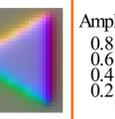
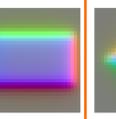
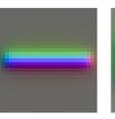


磁界ベクトル分布  
可視化カラー画像

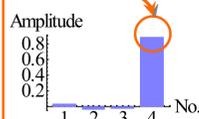
画像の固有パターン



入力画像



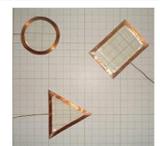
データベース画像



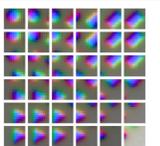
解ベクトル

### コイル素子の位置推定

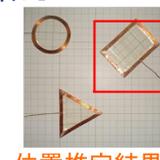
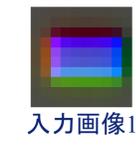
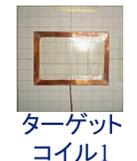
プリント基板模擬回路から生じる磁界ベクトル分布を  
複数の領域に分割し、可視化画像を生成する。  
同様にターゲットコイルから生じる磁界ベクトル分布から  
可視化画像を生成し、画像認識手法により  
コイル素子の位置推定を行う。



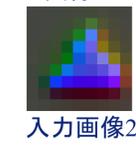
プリント基板模擬回路



データベース画像



位置推定結果1



位置推定結果2



# 画像の RGB 情報とその応用に関する研究

## A STUDY OF RGB COLOR INFORMATION AND ITS APPLICATION

丸山和夫

Kazuo MARUYAMA

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

This paper deals with a method of dynamic image cognition. Our image cognition method has two distinguished features. One is that the image is handled as its Eigen (characteristic) pattern and time series frequency characteristic. The other is that the cognition is carried out by solving for the ill-posed linear system of equations comprising the Eigen patterns and time series frequency characteristic as a database. The Eigen pattern consists of histograms in RGB 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. The time series frequency characteristic consists of Fourier power spectra of time changing Eigen patterns. This time series frequency characteristic is a distinct frequency characteristic to each of the objects. The image cognition method proposed in this paper is composed of the Eigen pattern and time series frequency characteristic. As a result, it is revealed that the image cognition method is one of powerful and effective methods of dynamic image cognition.

**Key Words** : Image cognition, Eigen pattern, Time series frequency characteristic

### 1. はじめに

本稿は、CCD(Charge Coupled Device)カメラを装着した計算機に人間と同等の視覚情報処理能力を与えることを究極の目標とする研究にかかわる。画像を計算機によって人間と同等に認識させることが可能であれば、人間の脳が行う視覚情報処理を計算機が代行可能であることを意味し、産業のオートメーション化や建築物などのセキュリティシステムなど、人間の視覚情報処理を必要とする分野を全て機械に代行させることが可能となる。

従来の大部分の画像認識技術は、対象の幾何学的特異点抽出に基づいた手法が一般的で、対象の幾何学的変形に対応不可能なため、人間の情報処理能力には到底及ばない問題点があった。この問題点を鑑み、本論文は動画画像の空間情報と時間軸情報を利用した全く新しい動画画像認識手法を提案し良好な精度で動画画像認識が可能であることを報告する[1][2]。

空間情報として本論文では、計算機に取り込まれた画像から、画素数、配置、変形等に無関係となる画像の特徴量を抽出する。本稿では、この空間情報の特徴量を固有パターンと呼ぶ。

時間軸情報として本論文では計算機に取り込まれた動

画像から対象物固有の周波数特性を抽出する。自然界の動きは、天体の自転・公転や振り子の周期などに代表されるように、それぞれ固有の周波数特性をもっている。この周波数特性はロウソク炎、人間の動き、風景(波や雲など)にも存在し「 $1/f$  ゆらぎ」や「 $1/f^2$  ゆらぎ」などと大まかに分類されている。本論文ではこのゆらぎ解析の概念を導入し動画画像の時間軸情報の特徴量を抽出し、動画画像認識に応用する。この時間軸情報の特徴量を時系列周波数特性と呼ぶ。

本論文では動画画像から固有パターンと時系列周波数特性を抽出し、固有パターンと時系列周波数特性を合わせた画像の特徴量を用いて動画画像認識を試みる。

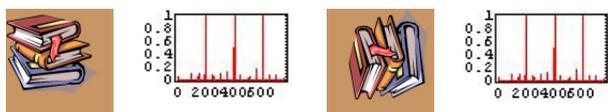
### 2. 可視化情報の特徴量

#### (1) 空間情報

##### a) 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、2次元平面上の画素で構成される。画素は可視光の波長によって R, G, B 成分の情報を持ち、それらの幾何学的配置で形状が表現される。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画像の特徴量を、固有パターンと呼ぶ。固有パターンは、画像を構成する R, G, B 成分値の組み合わせから正規化ヒストグラムを作成することによってハードウェア依存性を削減する。図2に固有パターンの例を示す。同図(a)(b)の固有パターンはいずれも同値となり、解像度や基準座標に依存しない特徴量であることがわかる。



(a) 画像 1 (300×300 画素) (b) 画像 2 (100×100 画素)  
図 1 固有パターン

### b) 固有パターンの動画像への一般化

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。本稿では、対象物の位置や角度のみならず移動方向に依存しない特徴量を動画像の固有パターンとして抽出する。そのため、動画像を構成する全フレームを重ねる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。図2、図3は同一人物が異なる動き(表情)をしている動画像であるが、同図の固有パターンはいずれも同値となり、動き情報を削除した特徴量であることがわかる[3]。



図 2 動画像の固有パターン 1



図 3 動画像の固有パターン 2

## (2) 時間軸情報

次に動画像の時間軸情報から特徴量を抽出する方法を述べる。本稿では画像の時間軸情報として RGB 成分の時系列変化をゆらぎとして捕らえ、そのゆらぎから動画像の特徴量を抽出することを試みる。まず、従来のゆらぎ画像解析法について述べる。次に従来のゆらぎ画像解析へ固有パターンに導入したゆらぎ画像解析法について述べる。

### a) 従来のゆらぎ画像解析

従来のゆらぎ画像解析法とは、RGB 成分強度値の 1 フレームに対する平均値を算出し、それを全フレームから求め時系列に並べることでゆらぎを 1 次元数値配列として取得し、その数値配列に対してフーリエ解析を用いてゆらぎの特徴を求める。この方法は一般に「 $1/f$  ゆらぎ」の解析を行なうときに用いられる。より具体的には、あ

る信号へ離散的フーリエ変換 (DFT) を適用して得られるフーリエ・パワースペクトラムの概形でゆらぎの解析を行なう。従来のゆらぎ画像解析でフーリエ・パワースペクトラムの概形を視覚的に判りやすくするために、よく行われる常套手段はフーリエ・パワースペクトラムをパワースペクトラム対周波数の両対数グラフへ描き、描かれる線図の傾きによってゆらぎの種類を大別する方法である。図4にフーリエ・パワースペクトラムの一例を示す。

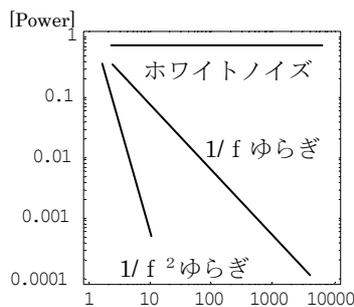
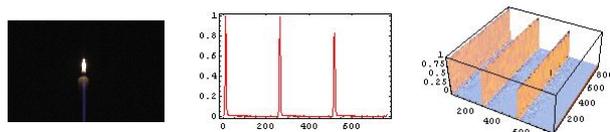


図 4 フーリエ・パワースペクトラムの例

### b) 時系列周波数特性による動画像解析

従来のゆらぎ画像解析を固有パターンへ導入し、RGB 成分の 1 から 255 までの強度値における周波数特性を算出する。図5(a)に示すろうそく炎の動画像の 1 フレームから固有パターンを抽出すると図5(b)のようになる。さらに、動画像の全フレームから固有パターンを抽出し、固有パターンを時系列に並べ、固有パターンのゆらぎを構成すると図5(c)に示すようになる。



(a) ろうそく炎 (b) 固有パターン (c) ゆらぎ

図 5 固有パターンのゆらぎ

次に燃焼画像より得られた固有パターンのゆらぎ解析を行なう。燃焼画像より得られた固有パターンのゆらぎを時系列(フレーム)方向に DFT 解析し、各周波数に対するフーリエ・パワースペクトルを計算する。そして、累乗近似を用いて両対数グラフで表し、傾きを求める。ただし、DFT の精度を勘案して全サンプル数の  $1/4$  項までの低周波領域を計算に採用した。その結果、RGB 成分の 1 から 255 までの強度分布のゆらぎの特性を表した数値配列を得ることができ、横軸に RGB 成分強度値、縦軸にフーリエ・パワースペクトラムの傾きを対応させてグラフ化した。本稿では、この傾き分布を時系列周波数特性と呼ぶ。

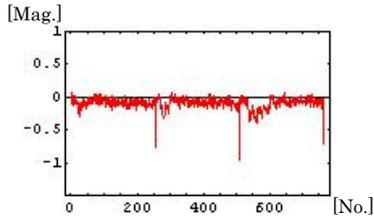


図6 時系列周波数特性

時系列周波数特性をもちいてゆらぎの解析をおこなった。その1例を図7に示す。

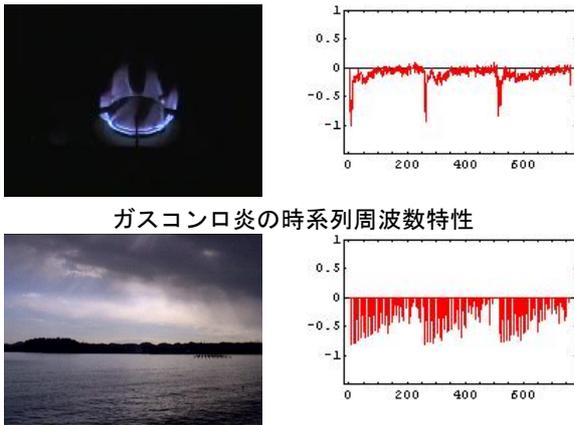


図7 ゆらぎ画像解析

図7から、化学反応である燃焼画像と自然界の気象画像は、それぞれ固有の時系列周波数特性をもっていることがわかる。また、時系列周波数特性は対象物固有の時間軸情報であるため、同一のゆらぎ情報を持っているものであれば同一の時系列周波数特性を得ることができる。すなわち、図8に示すように場所が異なっても同じ分類（例えば、化学反応、自然界の雲の動き、海の波の動きなど）のものであれば、時系列周波数特性は等しくなる。

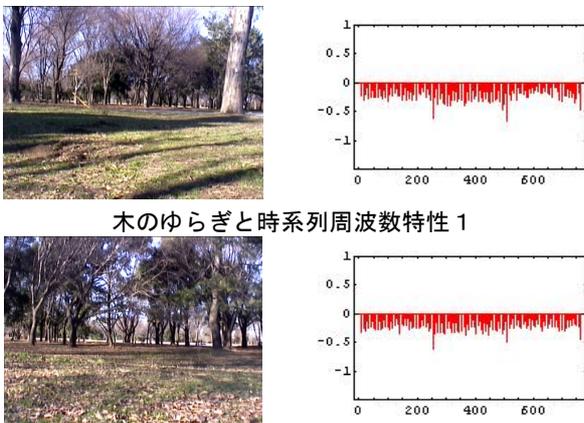


図8 時系列周波数特性

異なる場所で撮影した木のゆらぎは、ほぼ等しい時系列周波数特性をもっている。この結果からわかるように時系列周波数特性は対象物固有の特徴を抽出しており、動画の時間軸情報から物体の固有周波数特性を抽出できていることがわかる。したがって、時系列周波数特性は動画認識技術の時間軸情報として用いることが可能である。

### 3. 可視化情報の特徴量を利用した動画認識

#### (1) 最小自乗法による一致性評価

本稿における画像認識とは予め複数の画像から特徴量を抽出し、データベースを構築しておく。次に入力画像の特徴量を抽出し、最小自乗法を用いてデータベースと入力画像の特徴量における一致性を評価し、入力画像の同定を行うものである。ただし、特徴量とは固有パターンや時系列周波数特性の1次元数値配列のことを言う。

例として  $n$  個の画像データから特徴量を抽出しデータベースを構築する。

各画像データは1個の特徴量を持つ。よってデータベース特徴量は式(1)のシステム行列を構築可能とする。

$$C = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_n] \quad (1)$$

入力画像データの特徴量を  $\mathbf{Y}$  とすると、線形システム方程式は式(2)で表すことができる。 $\mathbf{X}$  は解ベクトルであり、式(1)を構成する固有パターンの重みに対応し、解ベクトルの要素で最大値をもつ要素が残りの要素に対して相対的に値が大きいほど、入力画像データと式(1)を構成する特定の特徴量が等しいことを意味する。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \quad (2)$$

特徴量の要素数は特徴量を何にするかによって変わってくる。本稿では固有パターンや時系列周波数特性を特徴量とするため、要素数は最小で765個ある。従って、データベース数  $n$  よりも固有パターンの要素数の方が大きいと仮定することができる。すなわち、システム行列  $C$  は正方行列ではなく縦長長方形となるため逆行列が存在しない。したがって、式(2)のシステム方程式から解ベクトル  $\mathbf{X}$  を求めることは不適切問題を解くことに帰する。この不適切問題の解法として本稿では式(3)に示す最小自乗法を採用し解ベクトル  $\mathbf{X}$  を求める。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

なお、得られた解ベクトル  $\mathbf{X}$  中で最大値をとる要素を認識された対象とする。

#### (2) 固有パターンと周波数特性を利用した動画認識

可視化情報の特徴量は上述したように固有パターンと

時系列周波数特性で表すことができる。固有パターンは対象物の位置、角度に影響を受けない空間情報である。時系列周波数特性は物体固有の時間軸情報である。これらの特徴量を合成し動画像の特徴量を得ることができる。

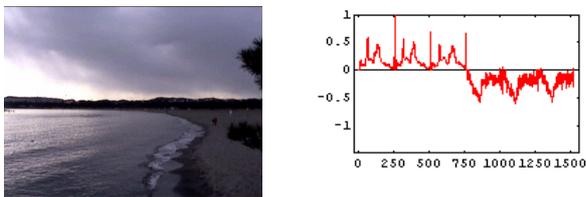


図9 動画像の特徴量

上述した動画像の特徴量、そして最小自乗法による一致性評価を用いて動画像認識を行なう。

認識率の向上と認識結果の妥当性を計算機で判定可能とするために動画像認識を3台の CCD カメラを併用して行う。CCD カメラ1, CCD カメラ2, CCD カメラ3を、それぞれ認識対象物に対して異なる角度から撮影できるように配置し、3台の CCD カメラでそれぞれ動画像認識をおこない、独立した3個の解ベクトル  $\mathbf{X}$  を求める。3個の解ベクトル  $\mathbf{X}$  を比較し2個或いは3個等しい解が得られたならば、その解は信頼性があると判断され、最終的な解として決定する。また3個の解ベクトルを比較した結果、すべて異なる解が得られた場合、その解は信頼性がなく該当なしと判断する。

データベースの1例を図10に示す。認識対象画像、認識結果、3台の CCD における解ベクトルを図11に示す。



図10 データベースの1例

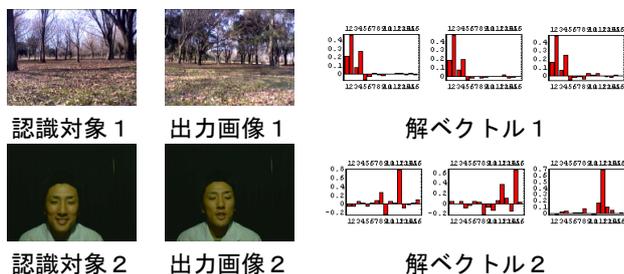


図11 認識結果

認識対象1はデータベース No.2(木)として認識され、認識対象2はデータベース No.12(人物A)として認識された。したがって、認識対象1, 認識対象2共に正しい認識結果が得られた。

#### 4. 結論

本稿では、人間の視覚情報処理能力を計算機によって実現する第一段階として、可視化情報から空間情報と時間軸情報の特徴量を RGB 情報から抽出する方法を提案し、さらに、その特徴量を利用した動画像認識手法について述べた。

第2章では可視化情報の空間情報と時間軸情報の特徴量である固有パターンと時系列周波数特性の抽出方法について述べた。空間情報の特徴量である固有パターンは、対象物の座標や角度情報、更に動き情報を削除できることについて述べた。また、動画像の時間軸情報は、RGB 情報のゆらぎをフーリエ変換し、得られたフーリエ・パワースペクトラムへゆらぎ解析手法を適用して時系列周波数特性を抽出した。この時系列周波数特性は個々の対象物体固有の時間軸情報であり、異なる場所で撮影した風景画像でも同じ分類（例えば、化学反応、自然界の雲の動き、海の波の動きなど）のものであれば同様な特性を示す特徴量であることを示した。

第3章では可視化情報の空間情報と時間軸情報の特徴量を用いた動画像認識について述べた。特徴量データの一致性評価は、最小自乗法による線形システム方程式の解ベクトルからおこなった。また3台の CCD カメラを用いて独立した認識をおこない、多数決を取ることでより認識率が向上し、妥当性判断が可能であることを示した。

本論文で提案した動画像認識手法は、従来の幾何学的特徴を利用した画像認識では不可能であった人物認識の顔の表情に変化がある場合においても認識可能であり、また風景など外部からの影響(日照, 大気変動)を受けて変化する動画像に対しても認識が可能であることを示した。

よって、本稿で提案した方法は極めて人間の視覚情報処理能力に近い識別能力を有することを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) Sato, T. et al.: Image Cognition by Means of Inverse Approach, Proceeding of the XII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA2001), Vol.II, pp112-119, 2001
- 3) 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古: 色情報を利用した知的動画像認識, 可視化情報学会誌, pp.95-98, 2003
- 4) 丸山和夫, 早野誠治, 齋藤兆古: 色情報による光源特徴の一解析法, 可視化情報学会誌, pp.223-226, 2004
- 5) 中島龍興, 近田玲子, 面出薫: 照明デザイン入門, 彰国社, 1995
- 6) 小杉幸夫, 高橋孝夫, 鈴木晴夫, 高倉公明, 鈴木真人, 池辺潤, 武者利光: 1/f ゆらぎのリズムを持つ電気刺激による除痛について, 電子通信学会, 1978
- 7) 武者利光: ゆらぎの科学, 森北出版株式会社

# 画像のRGB 情報とその応用に関する研究

## A STUDY OF RGB COLOR INFORMATION AND ITS APPLICATION

03R3237 丸山 和夫

### 目的

CCD カメラを装着した計算機に人間と同等の視覚情報処理能力を与えることが究極の目的。  
人間の視覚処理能力に近い画像認識の開発。

### 従来の画像認識

対象の幾何学的特異点抽出に基づいた手法  
↓  
顔認識の場合、目・鼻・口などの位置で認識  
表情の変化、顔の角度などに対応不可能

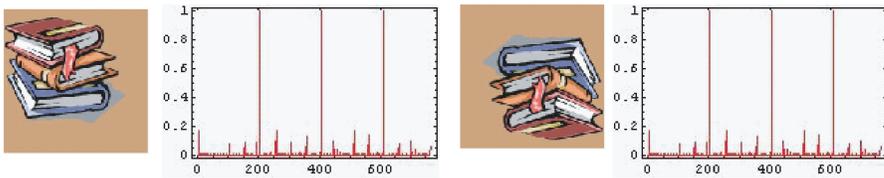
### 新しい画像認識

対象の配置、角度、変形等に無関係となる  
**画像の特徴量**を用いた動画像認識  
動画像の特徴量 = 空間情報 + 時間軸情報  
顔認識の場合、表情や角度などの変化に対応可能

### 空間情報

#### 固有パターン

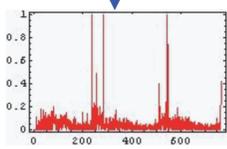
画像のRGB 成分をヒストグラム化



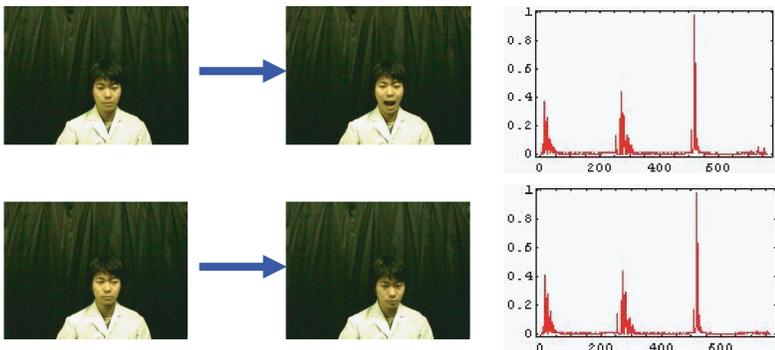
特徴: 対象の角度・位置の影響を受けない

#### 複数フレーム動画像へ一般化

動画像のRGB 成分をヒストグラム化



特徴: 対象の角度・位置・動きの影響を受けない



同一人物で異なる動き  
表情の変化(動き)に影響されない

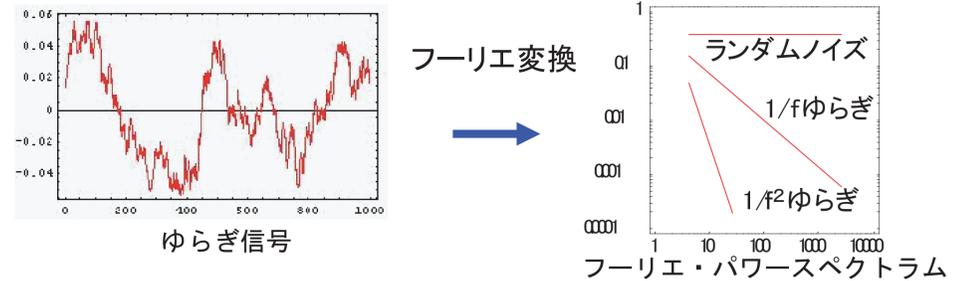
### 時間軸情報

RGB 成分の時系列変化をゆらぎとして捕らえ、  
そのゆらぎから動画像の特徴量を抽出

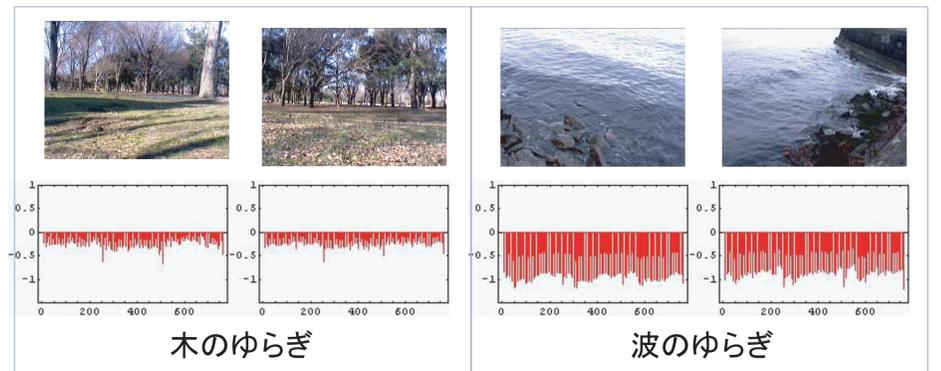
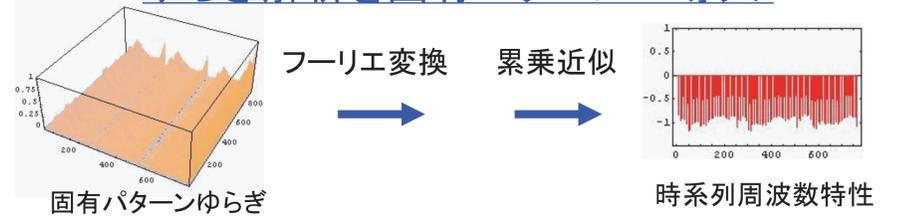
ゆらぎ画像解析を固有パターンに導入したゆらぎ画像解析法の提案

#### 従来のゆらぎ画像解析

信号情報に対してフーリエ変換し、  
フーリエ・パワースペクトルの概形でゆらぎの種類を分類



#### ゆらぎ解析を固有パターンへ導入



対象固有の時間軸情報

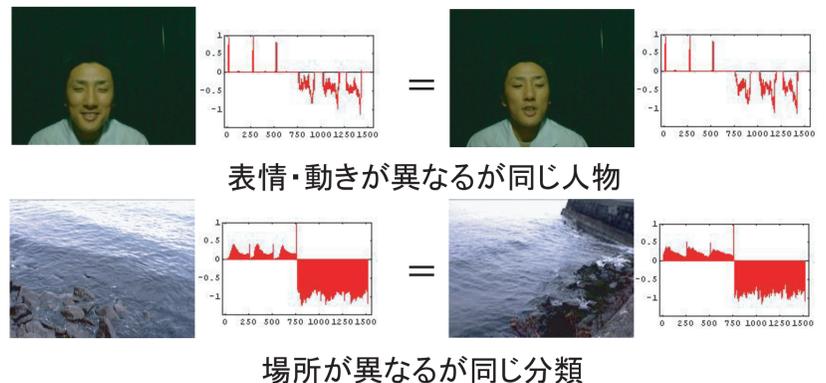
### 最小自乗法による一致性評価

本研究における画像認識とは予め複数の画像から特徴量を抽出し、データベースを構築しておく。次に入力画像の特徴量を抽出し、最小自乗法を用いてデータベースと入力画像の特徴量における一致性を評価し、入力画像の同定を行うものである。

$$C = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_n] \quad E: \text{データベース特徴量}$$
$$Y = C \cdot X \quad C: \text{システム行列}$$
$$X = [C^T C]^{-1} C^T Y \quad Y: \text{認識対象特徴量}$$
$$X: \text{解ベクトル}$$

システム行列Cは正方行列ではなく縦長長方形となるため  
逆行列が存在しない。最小自乗法を用いて解ベクトルXを求める。

### 認識結果



人間の視覚処理能力に近い画像認識が可能になった

### 将来の課題

人物認識の場合、背景が同一でないと認識できないという問題がある。背景と認識対象の分離(背景削除)が課題である。

# 電気双極子を用いた電気インピーダンス法に関する研究

## A STUDY OF ELECTRICAL IMPEDANCE METHOD USING ELECTRICAL DIPOLE

音川 英一

Eiichi OTOGAWA

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

With the developments of modern high-speed computer, X-ray tomography and MRI are widely used as a deterministic tool of medical diagnosis. On the other side, EIT (Electrical Impedance Tomography) is now developing mainly for industrial use. Fundamental difference between them is that MRI or X-ray tomography needs not to handle the functional measured data, but EIT is based on the functional nature of the measurable data. Namely, EIT requires a solution of ill-posed system equations but MRI or X-ray tomography does not require the solution of such the ill-posed system equations. In the present paper, we propose one of the most reliable solution methodologies accompanying with EIT development.

**Key Words:** Generalized Vector Sampled Pattern Matching method, Inverse parameter problems, Functional type tomography

### 1. はじめに

現在, 実用化されている断層撮影技術として, X線CT(Computerized Tomography) やMRI(Magnetic Resonance Imaging)などが挙げられる。これらは医療分野などにおいて非常に重要な技術である。X線CTを行うためには, X線照射装置などが必要であり, MRIを行うためには, 強力な磁界生成のために超伝導磁石が必要となる。これらの装置は比較的大型, 比較的高価であるという欠点を持つ。これらの点を解消すべく, より小型の装置で安価に断層撮影を行うための研究が各国で行われている。特に, 多くの人口を抱える中国では, 国家計画として研究・開発が行われている[1]。これらの研究の一例として, 電気インピーダンス・トモグラフィ(Electrical Impedance Tomography, EIT)が挙げられる。

X線CTやMRIなどでは, 断層撮影対象への働きかけに, 断層撮影対象内を直進する性質を持っているX線やマイクロ波を用いるので, その応答は一次関数で表現することができる。EITなどでは, 断層撮影対象物への働きかけに対する応答が二次元以上の関数で表現されるため, これらの断層撮影技術を関数型トモグラフィ(Functional Tomography)と分類する。二次元以上の関数の応答を元にする点が関数型トモグラフィの断層撮影映像生成理論の確立を困難にしている。

関数型トモグラフィの研究で最も一般的な理論の一つとして, Sensitivity行列法が挙げられる。Sensitivity行列法は, 一種の条件付パターンマッチング法と考えることができる。考えられる全てのパターンを用意する事が困難であるというパターンマッチング法の限界が

Sensitivity行列法の最大の欠点である。

本論文では, 電磁気学における電気双極子を関数型トモグラフィに導入した電気双極子法という新たな定式化法を提唱する。電気双極子法の利点は, Sensitivity行列法のようなパターンマッチング法の限界は存在しない事にある。

本論文は, 関数型トモグラフィの一つであるEITの新たな定式化法として電気双極子法を提唱し, 一般的に研究が行われているSensitivity行列法の問題点と, 電気双極子法の有効性の二点について検証を行うものである。

### 2. 理論的背景

#### (1) Sensitivity行列法

Sensitivityとは, 断層撮影対象内を離散化した最小領域のうちの一点で媒質パラメータが変化した際の領域全体のインピーダンス変化量を表す。断層撮影対象外周部に設置された測定電極対が $i, j$ であるときの任意の離散化領域 $r_n$ のSensitivity値 $S_{i,j}^{r_n}$ は, 式(1)のように表される。

$$S_{i,j}^{r_n} = \frac{1}{\beta} \frac{Z_{i,j}^{r_n} - Z_{i,j}^a}{Z_{i,j}^b - Z_{i,j}^a} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_n}{D_{all}} \quad (2)$$

Sensitivity値 $S_{i,j}^{r_n}$ は, 任意の離散化領域 $r_n$ のみに検出対象導電率 $b$ [S/m]が存在する場合のインピーダンス $Z_{i,j}^b$ [ $\Omega$ ]と, 領域内が基準導電率 $a$ [S/m]で満たされた基準状態でのインピーダンス $Z_{i,j}^a$ [ $\Omega$ ]との差分を取ること

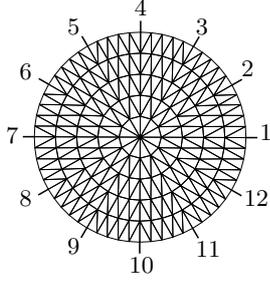


Fig.1 Discreted Area and Electrodes

で、基準インピーダンスからのインピーダンス変化量を算出し、それを最大の変化量  $Z_{i,j}^b - Z_{i,j}^a$  で正規化する。 $Z_{i,j}^a[\Omega]$  は対象領域が全て基準導電率  $a$  で満たされている場合の基準インピーダンス、 $Z_{i,j}^b[\Omega]$  は検出対象導電率  $b[S/m]$  で満たされている場合の最大インピーダンスである。更に対象領域全体の面積  $D_{all}[m^2]$  に対する離散化領域  $r_n$  の面積  $D_n[m^2]$  の占める割合  $\beta$  で除することで、各離散化領域の面積の違いの影響を無くす。

このような Sensitivity 値を測定電極  $i, j$  の全ての組み合わせと、全ての離散化領域  $r_k$  について並べたものを Sensitivity 行列と定義する。Fig.1 の場合、測定電極は 12 極存在するので、 $i, j$  の全ての組み合わせは  $(12 \times (12 - 1)) / 2 = 66$  組となる。また、断層撮影対象領域は 312 個の領域に離散化されているので、 $k = 312$  となる。任意の導電率分布状態における測定インピーダンス  $Z_{i,j}[\Omega]$  と基準インピーダンス  $Z_{i,j}^a[\Omega]$  の差であるインピーダンス変化量  $Z'_{i,j}[\Omega]$  は、Sensitivity 行列  $S$  と導電率分布  $\kappa$  の積の形で表すことができると考えると、式 (5) が成り立つ。

$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} - Z_{i,j}^a \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} Z'_{1,1} \\ Z'_{1,2} \\ \vdots \\ Z'_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1}^{r_1} & S_{1,1}^{r_2} & \dots & S_{1,1}^{r_k} \\ S_{1,2}^{r_1} & S_{1,2}^{r_2} & \dots & S_{1,2}^{r_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i,j}^{r_1} & S_{i,j}^{r_2} & \dots & S_{i,j}^{r_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \vdots \\ \kappa_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z' = S\kappa \quad (5)$$

ただし、ここに問題が一点存在する。複数の離散化領域に導電率変化が生じている場合のインピーダンス変化量は、導電率変化が生じた離散化領域の Sensitivity 値の和で表現できるとは限らない。Sensitivity 値の和をとるということは、電気回路における抵抗素子の直列接続に相当する。しかし、多くの場合の導電率分布が各離散化領域の直列接続として考えられるわけではない。よって、Sensitivity 行列法は本来、断層撮影対象内を離散化した際に考えられる全ての導電率分布パターンにおける Sensitivity 値を用意しておかなくてはならない。この手法は一種のパターンマッチング法と考る事ができる。

パターンマッチング法の問題点は、解の精度が用意するパターンの数に依存する事にある。Sensitivity 行列

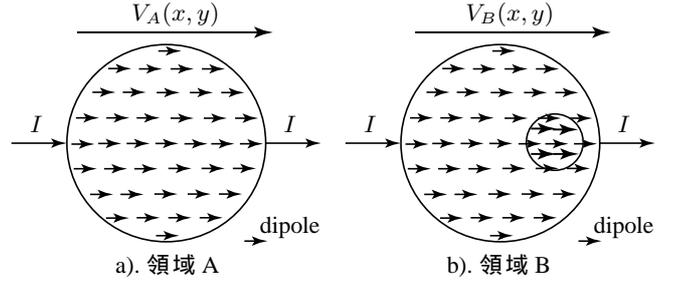


Fig.2 Counter Electromotive Force by Different Resistance

法では、そのパターンを全て用意することが非常に困難なため、式 (5) のような導電率合成の法則が成り立つとする非合理的な条件を課すことで、パターン数を限定している。つまり、Sensitivity 行列法の最大の問題点はパターンマッチング法であることと言える。

式 (5) を用いて導電率分布  $\kappa$  を求めるためには、 $S$  の逆行列を  $Z'$  の左側からかけることになる。しかし、 $S$  は一般的に正則ではないため、逆行列を求めることができない。したがって、この問題は不適切な線形システム方程式を解く逆問題に帰する。近年、村井や加川等によって提唱された Sensitivity 行列法へ筆者等が提唱した GVSPM (Generalized Sampled Pattern Matching) 法を適用した結果、Newton 法や特異値分解法等よりも良好な結果が武居等や Dong 等によって報告されている [2, 3, 4, 5]。本論文では、この不適切な線形システム方程式の解法として GVSPM 法を採用する。

## (2) 電気双極子法

電気回路において、抵抗素子で生じる電圧降下は電圧源に対して逆方向にかかる起電力と考える事ができる。この起電力は逆起電力と呼ばれる。抵抗素子を微小な抵抗素子の集合と考えれば、抵抗素子における逆起電力は微小な逆起電力の集合と考えられる。微小な逆起電力は陽・陰電極の組み合わせであるから、電気双極子と考えられる。電気双極子は陽・陰電荷の極対である。よって、抵抗素子における逆起電力とは、電気双極子の集合であると考えることが可能である。

Fig.2 a) に示す領域 A に対して電流  $I[A]$  を注入した場合、領域内部には逆起電力分布  $V_A(x,y)[V]$  が生じる。同様に Fig.2 b) に示す領域 B に先ほどと等しい電流  $I[A]$  を注入した場合、領域内部には逆起電力分布  $V_B(x,y)[V]$  が生じる。領域 B は領域 A 内に異なる導電率の部分を追加した状態である。領域 A の状態から領域 B の状態への導電率分布変化に起因する両者の逆起電力分布の相違  $V_C(x,y)$  は式 (6) で与えられる。この差分逆起電力分布  $V_C(x,y)$  は電気双極子の集合からなると考えられる。

$$V_B(x,y) - V_A(x,y) = V_C(x,y) \quad (6)$$

EIT の目的は、断層撮影対象領域外周部で測定される電圧分布から断層撮影対象領域内部の導電率分布を推定することにある。導電率分布の推定は、導電率の変化によって生じる逆起電力分布  $V_C(x,y)$  が与える対

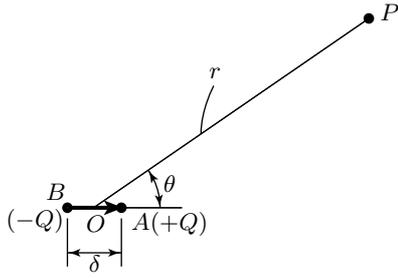


Fig.3 Electric Dipole

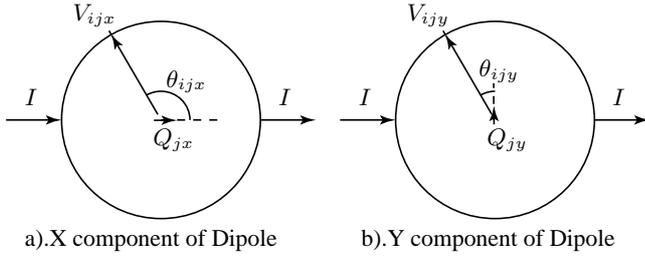


Fig.4 Measurable Voltage and Voltage Dipole

象周辺電圧分布から電気双極子の位置と大きさを推定することと等価であると考えられる。このように、EITの導電率パラメータ推定問題は、電気双極子の与える対象周辺電圧分布から電圧源である電気双極子の位置を推定する問題に置き換えることが可能である [6, 7, 8, 9]。

Fig.3に示す電気双極子が作る電圧は式(7)で与えられる。ここで、 $V_P[V]$ は電荷 $Q[C]$ を有する電気双極子が距離 $r[m]$ 離れた任意の点 $P$ に作る電圧である。また、 $\epsilon[F/m]$ は空間の誘電率であり、 $\delta[m]$ は電気双極子の有する陽極、陰極間の距離である。

$$V_P = \frac{Q\delta \cos \theta}{4\pi\epsilon r^2} \quad (7)$$

Fig.4に示すように、任意の離散化領域に存在する電気双極子は $X$ 成分、 $Y$ 成分で構成されるものとする。断層撮影対象領域外周部の周辺電圧分布は対象領域内を離散化した複数点の電気双極子の $X$ 成分、 $Y$ 成分が作る電圧分布の線形和であると考えられる。よって、対象領域外周部の周辺電圧分布は式(7)を用いて、式(9)で与えられる。ただし、 $\delta = 4\pi\epsilon$ とする。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11x} & G_{11y} & \cdots & G_{1mx} & G_{1my} \\ G_{21x} & G_{21y} & \cdots & G_{2mx} & G_{2my} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{n1x} & G_{n1y} & \cdots & G_{nmx} & G_{nmy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \\ \vdots \\ Q_{mx} \\ Q_{my} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{GQ} \quad (9)$$

$$G_{ijx} = \frac{\cos \theta_{ijx}}{r_{ij}^2} \quad (10)$$

$$G_{ijy} = \frac{\cos \theta_{ijy}}{r_{ij}^2} = \frac{\sin \theta_{ijx}}{r_{ij}^2} \quad (11)$$

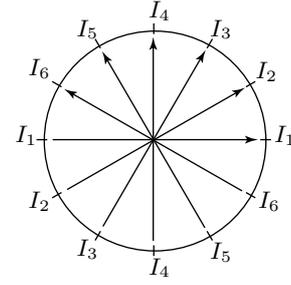


Fig.5 Pairs of Electrodes for Current Injection

式(9)のシステム方程式から求めるべきは任意の位置の電気双極子の大きさ $Q[C]$ であるから、 $G$ の逆行列を周辺電圧値 $V[V]$ の左側に掛けることになる。ところが、対象領域外周部に設置できる測定電極数は有限個に限定されるため、一般に行列 $G$ は正方形にならない。したがって、この問題は不適切な線形システム方程式を解く逆問題に帰する。電気双極子法においても、Sensitivity行列法の場合と同様に逆問題解法としてGVSPM法を採用する。

このような線形システム方程式は、電流注入パターンそれぞれに与えられる。これらの線形システム方程式をそれぞれ独立に解き、得られた複数の結果を用いて式(12)であらわされる畳み込み演算(convolution)を行う。畳み込み演算は解の共通部分を抽出するフィルタ演算であり、電流注入パターンを変えても、常に異なる導電率が検出される部分のみを抽出することによって、逆問題による解の信頼性向上を図る。

$$Z = Z_1 \otimes Z_2 \dots \otimes Z_{n/2} \quad (12)$$

対象領域内の電流分布を助案すると、この畳み込みによる方法は、電極組み合わせ数を増やすことが、必ずしも解の精度を向上させることを意味しない。よって、可能な限りの電極組み合わせ数を取ることなく、測定電極 $n$ 個に対して、電流注入パターン数は $n/2$ 個となるように電極組み合わせを設定する。Fig.5に示すように、対象領域外周部に電極が12個存在する場合、対象領域への電流注入パターンは6方向とする。

### 3. シミュレーションによる検証

#### (1) Sensitivity行列法のシミュレーション

2.(1)で述べた理論的背景を前提としてSensitivity行列法の数値シミュレーションを行う。Sensitivity行列法のシステム方程式は式(13)のようにLaplaceの方程式で表される。ここで、 $\kappa[S]$ は導電率、 $\phi[V]$ は電圧をあらわす。

$$\nabla \cdot \kappa(\nabla \phi) = 0 \quad (13)$$

対象領域内の離散化には三角形一次有限要素法(Finite Element Method, FEM)を用いる。断層撮影対象領域外周部に設置する測定電極数は12極とし、電極番号はFig.1の様に設定する。

Fig.6 a), b), c)は、シミュレーションに用いた導電率分布を表し、Fig.6 d), e), f)は式(5)から得られたシミュ

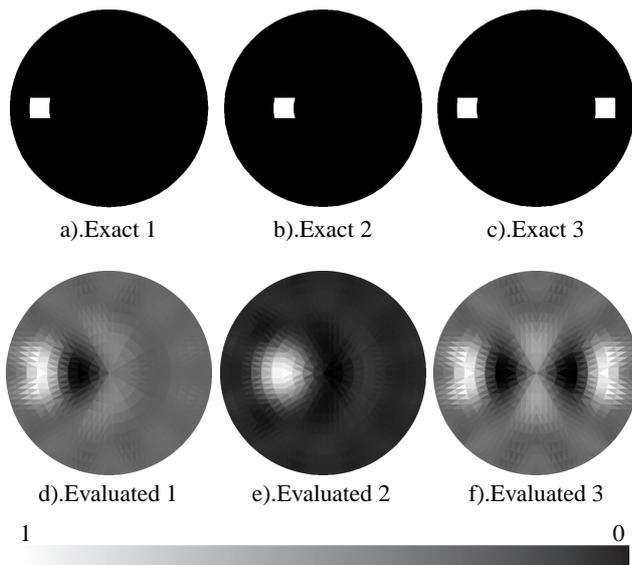


Fig.6 Exact and Evaluated Conductance Distributions

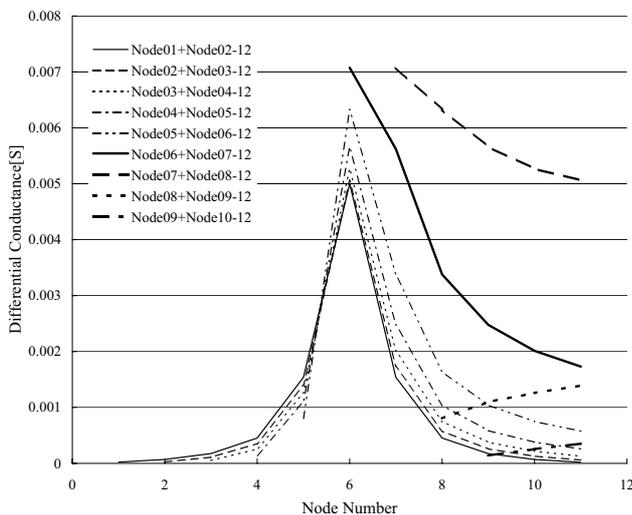


Fig.7 Differential Impedance

レーション結果を表す。Fig.6における黒色部は基準導電率部、白色部は検出対象導電率部をあらわしている。Fig.6 d), e), f)の結果は、それぞれ、算出結果の白色部が検出対象導電率部付近に現れていることから、検出対象を算出することに成功していると考えられるが、白色部に隣接して黒色部が存在する事が解の信頼性を低くしている。

Fig.7はFig.6 a)における各測定電極組み合わせとインピーダンス変化量の関係をあらわす。Fig.7のデータ列 Node01+Node02-12はインピーダンスを計測するために接続する二極の電極のうち、一極目をNode01へ接続し、二極目をNode02からNode12へとつなぎ変えたときに得られるインピーダンスを表す。測定電極と対象導電率部が近接しているときにインピーダンス変化量が高いことが分かる。これらのデータ列を式(5)の $Z'$ として、 $\kappa$ を求めた結果がFig.6 d)である。逆問題の解法としてはGVSPM法を用いた。

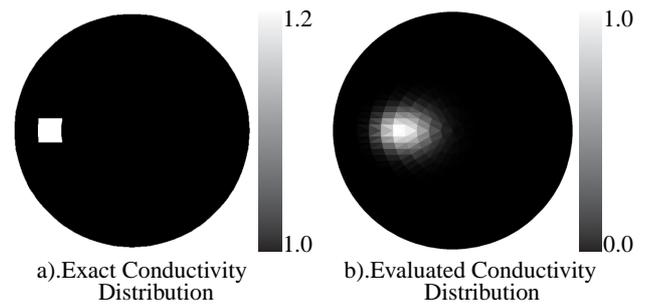


Fig.8 Exact and Evaluated Conductivity Distributions

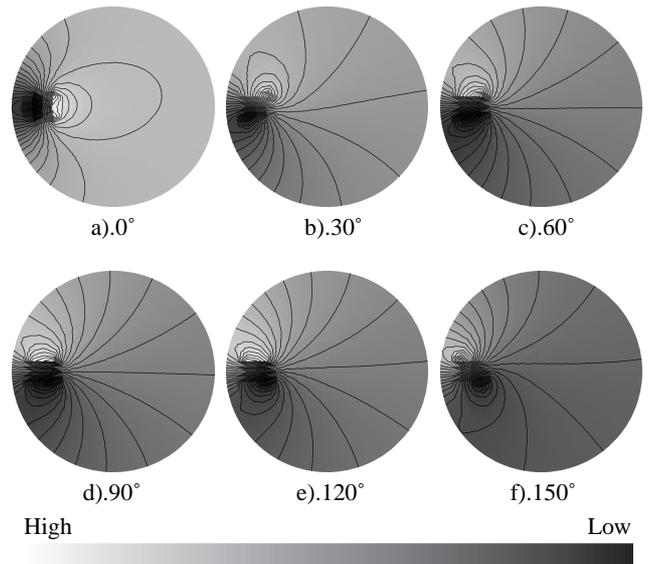


Fig.9 Voltage Distributions obtained by solving Eq. (6)

## (2) 電気双極子法のシミュレーション

2.(2)で述べた理論的背景を前提として有限要素法による電気双極子法の数値シミュレーションを行う。EITのシステム方程式は式(14)のようにPoissonの方程式で表される。ここで、 $\kappa$ [S]は導電率、 $\phi$ [V]は電圧、 $j$ [A/m<sup>2</sup>]は印加電流密度をあらわす。

$$\nabla \cdot \kappa (\nabla \phi) = j \quad (14)$$

断層撮影対象領域への電流注入により領域内に生じる電圧分布の導出には三角形一次有限要素法を用いた。式(9)のシステム方程式に用いる電気双極子は、断層撮影対象領域を離散化した微小領域の重心に存在するものとする。測定電極数は24極であることを想定した。これは、正しい解を得るためには最低でも24極の測定電極を用意しなければならないことが経験的に分かっているためである。

Fig.8 a)はシミュレーションに用いた導電率分布をあらわし、Fig.8 b)は、式(9)、(12)から得られた導電率分布をあらわす。Fig.8 b)の結果はFig.8 a)に示される検出対象導電率部の位置よりも内側に検出対象導電率部が検出されてしまうという傾向はあるものの、比較的良好な結果が得られていると考えられる。

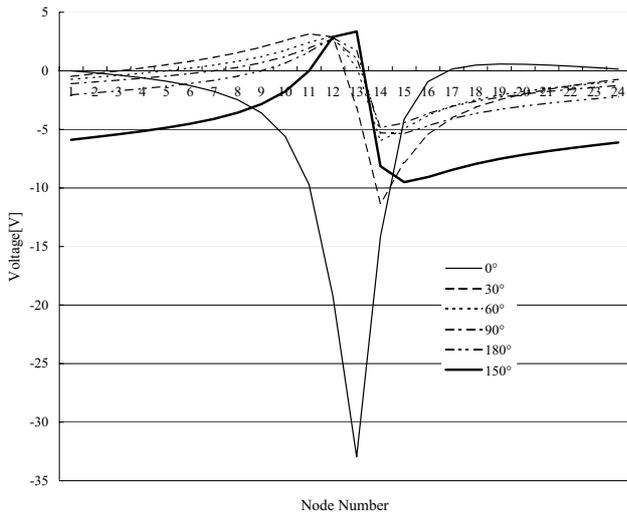


Fig.10 Differential Surface Voltage

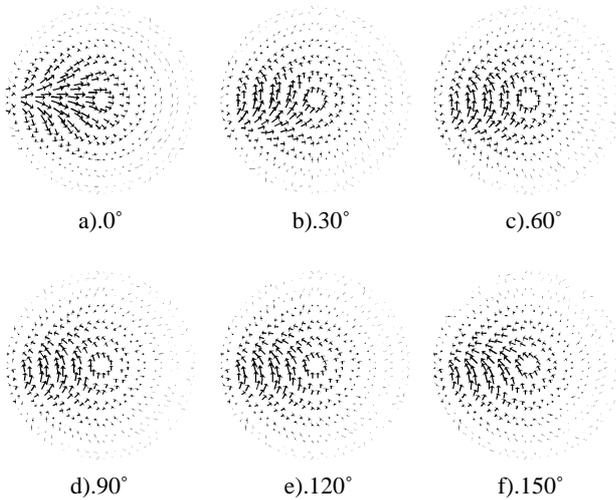


Fig.11 Voltage Dipole Distributions obtained by solving Eq. (9), independently

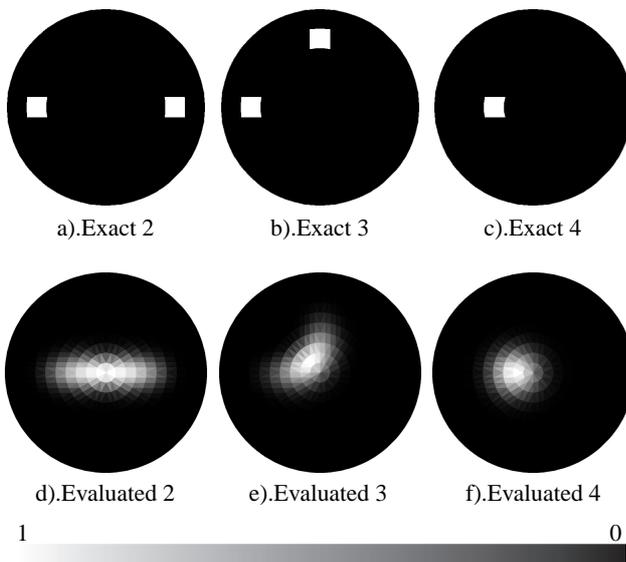


Fig.12 Exact and Evaluated Conductance Distributions

Table 1 Parameters of tested System(Sensitivity Matrix Method)

測定対象トレイ	アクリル樹脂製，直径 20cm，銅板電極 24 極 (H=2cm W=1cm D=0.3mm)，水深 1cm
検出対象物	銅ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)，発泡スチロールブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)
Impedance Analyzer	HewlettPackard 4194A

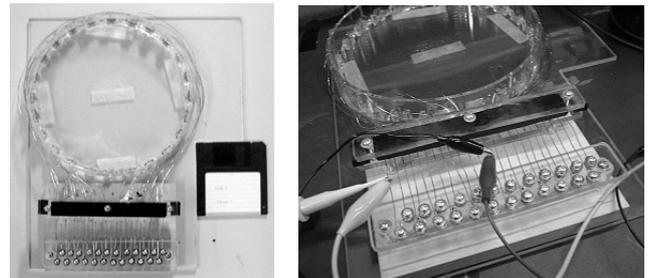


Fig.13 Device for Experiments

Fig.9は検出対象導電率部の有無による電圧変化をあらわした電圧分布と等電圧線である。Fig.9は式(6)によって得られる。Fig.9に示される角度は電流注入角度を表し、Fig.5における $I_1$ の角度を基準角度 $0^\circ$ とする。

Fig.10はFig.9の電圧分布から、対象領域外周部に設置された測定電極の値のみを抽出したものである。Fig.10に示される外周部電圧データ列を Gauss の法則にしたがって正規化したものを式(9)の $V$ とする。Gauss の法則とは、任意の閉領域の外周部から出て行く電束の総和はその領域内に存在する電荷の総和に等しいことを意味する。本研究においては領域内に存在する電荷は全て電気双極子であることを前提とする。電気双極子は陽・陰電荷の極対なので、断層撮影対象領域外周部から出て行く電束の総和は0である。

Fig.11は各電流注入パターンにおいて得られる式(9)をそれぞれ独立に解いて得られた電気双極子分布をあらわす。逆問題の解法としてはGVSPM法を用いた。Fig.11 a)-f)に示される電気双極子分布から、電流の通電パターンを変えても共通に電気双極子が検出される位置を抽出した結果がFig.8 b)である。Fig.11に示される電気双極子が有する電荷の絶対値を0から1の間に正規化して、式(12)の畳み込み演算を行うことで共通位置の抽出を行った。

Fig.12は検出対象導電率分布と式(9),(12)によって得られた導電率分布を示す。Fig.8, Fig.12の結果は、それぞれ正確な導電率分布とほぼ一致した導電率分布を推定することに成功している。よって、本論文で提唱する電気双極子による導電率パラメータ推定問題の定式化の妥当性がシミュレーションによって検証された。

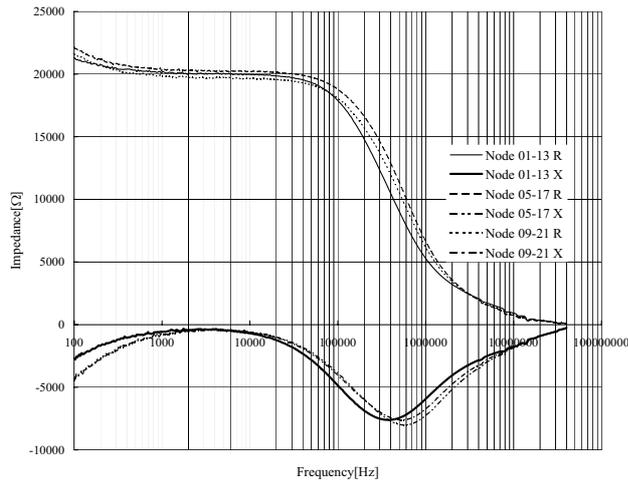
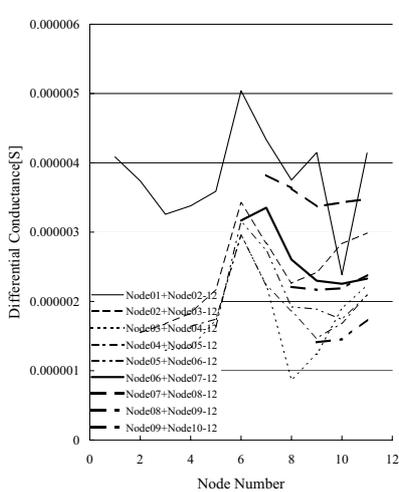
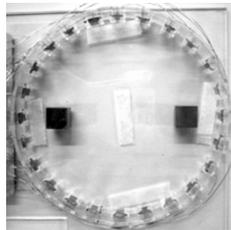


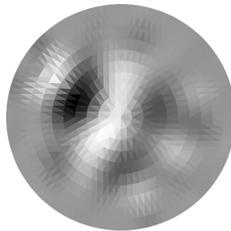
Fig.14 Frequency characteristics of the tested Tray



a). Differential Impedance

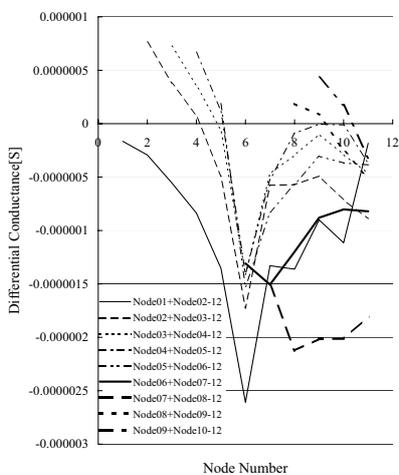


b). Target

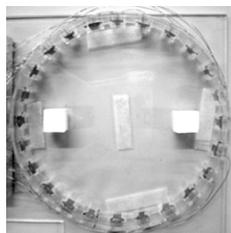


c). Evaluated

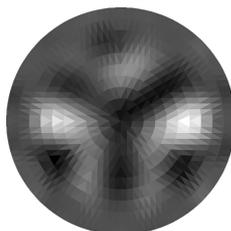
Fig.15 Result of Experiment (Copper Block)



a). Differential Impedance

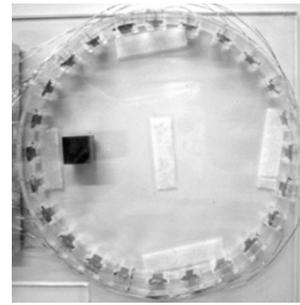


b). Target

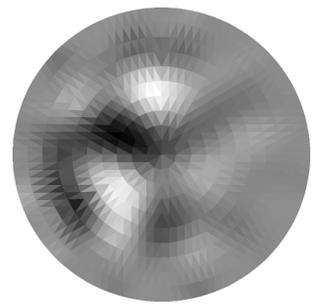


c). Evaluated

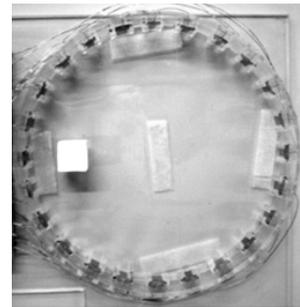
Fig.16 Result of Experiment (Polystyrene Block)



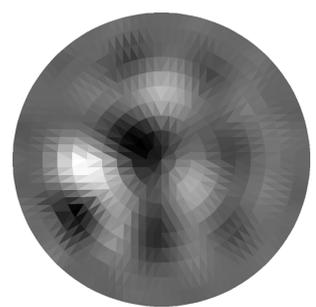
a). Copper Target



b). Copper Evaluated



c). Polystyrene Target



d). Polystyrene Evaluated

Fig.17 Exact and Evaluated Conductance Distributions

#### 4. 実験による検証

##### (1) Sensitivity 行列法の実験

実験には断層撮影対象として、Fig.13のようなトレイを用意し、インピーダンス・アナライザを用いて各電極組み合わせにおけるインピーダンスの測定を行った。装置の各パラメータはTable.1に示すとおりである。

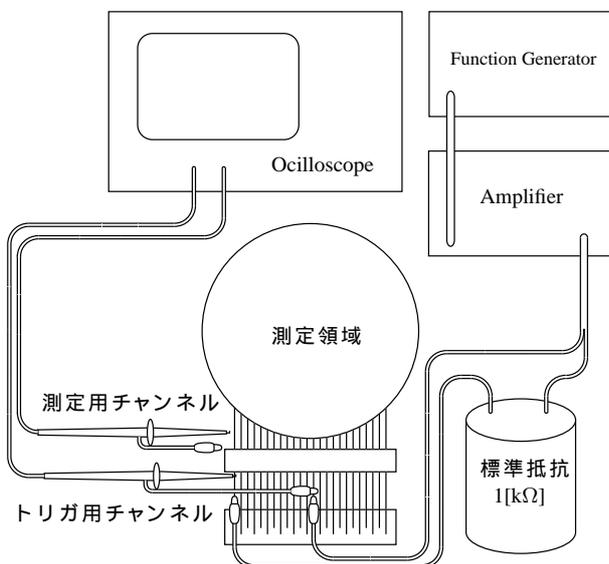
測定対象とするインピーダンスは抵抗成分とし、リアクタンス成分は考慮しない。測定対象周波数には測定対象トレイの共振周波数を用いることで、リアクタンスの影響を最小限にする。共振周波数とはリアクタンスが最小となる周波数である。Fig.14に示す、測定対象トレイの電極間インピーダンス周波数特性の測定結果から、測定対象周波数を3[kHz]と決定した。

Fig.15, Fig.16に実験結果を示す。Fig.15 a), Fig.16 a)は測定対象である銅ブロック、発泡スチロール・ブロックの有無による測定対象トレイのインピーダンス変化を表す。Fig.15 a)は、基準媒質である水に対して導電率の高い銅ブロックが挿入されたことで領域全体のコンダクタンスが増加していることが分かる。Fig.16 a)は、基準媒質である水に対して導電率の低い発泡スチロール・ブロックが挿入されたことでコンダクタンスが減少している事が分かる。

これらの測定値を用いて式(5)を解いた結果がFig.15 c), Fig.16 c)である。Fig.15 c)の結果は検出対象である銅ブロックを検出しているとは言いがたい。Fig.16 c)の結果は比較的良好であると評価することができる。その他、Fig.17のような結果も得られている。Fig.17 d)は比較的良好に発泡スチロール・ブロックの位置を検出していると考えられるが、Fig.17 b)は銅ブロックを検出しているとは評価しがたい。

**Table 2 Parameters of tested System (Electric Dipole Method)**

測定対象トレイ	アクリル樹脂製, 直径 20cm, 銅板電極 24 極 (H=2cm W=1cm D=0.3mm), 水深 1cm
検出対象物	銅ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm), 発泡スチロールブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)
標準抵抗	1k $\Omega$
Function Generator	KIKUSUI MODEL 4502
アンプ	NF Electronic Instruments 4025 HIGH SPEED POWER AMPLIFIER
オシロスコープ	YOKOGAWA DL7100



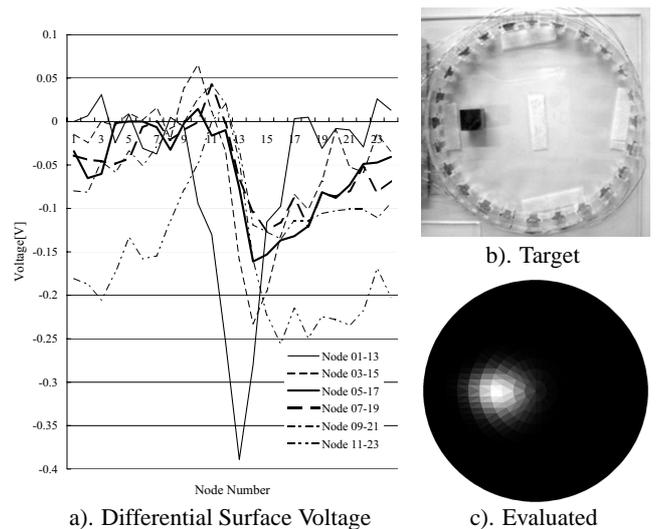
**Fig.18 Schematic diagram of the tested EIT**

(2) 電気双極子法の実験

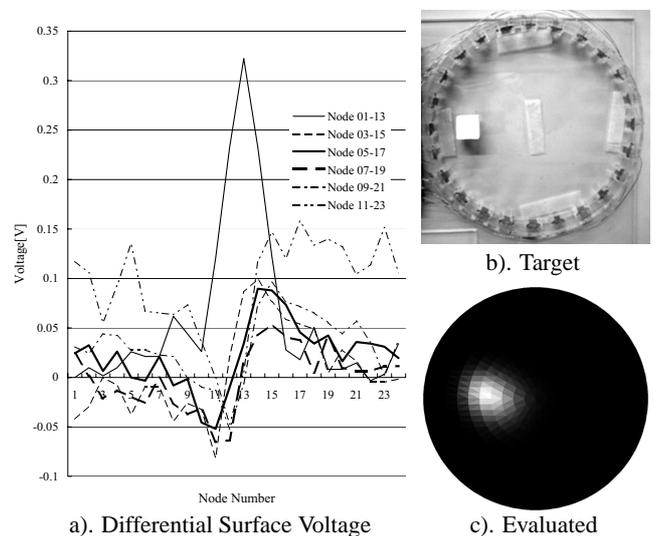
電気双極子法の実験でも, 測定対象として Fig.13 のトレイを用い, Fig.18 のような実験システムを構築した. 装置の各パラメータは Table.2 に示すとおりである.

電気双極子法は直流を前提としたものであるが, 実験は交流で行うことにする. 直流電流を用いた実験は水の電気分解が生じるなどのノイズ要因が懸念されるためである. Sensitivity 行列法の実験と同様に, リアクタンス分の影響をできるだけ減らすため, 電源の駆動周波数を測定トレイの共振周波数である 3[kHz] とする.

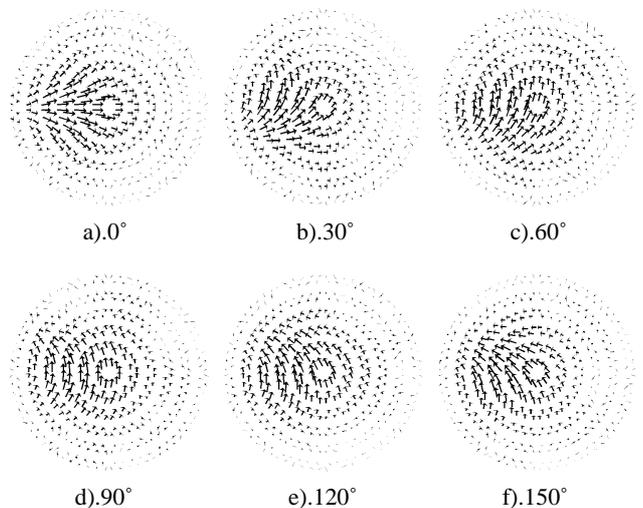
Fig.19, Fig.20 に実験結果を示す. Fig.19 a), Fig.20 a) のグラフから, 銅ブロック, 発泡スチロール・ブロックの有無による断層撮影対象外周部の電圧変化は検出対象の存在する場所に近い電極で強く現れることが分かる. また, 水に対して導電率が高い銅ブロックを挿入した場合と導電率が低い発泡スチロールを挿入した場



**Fig.19 Result of Experiment (Copper Block)**



**Fig.20 Result of Experiment (Polystyrene Block)**



**Fig.21 Voltage Dipole Distributions obtained by solving Eq. (9), independently**

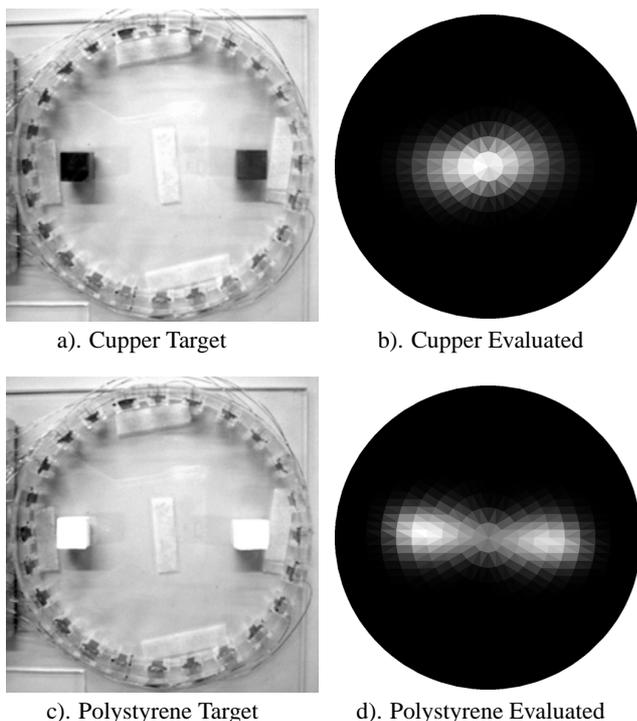


Fig.22 Exact and Evaluated Conductance Distributions

合とでは外周部の電圧変化の傾向が相反していることが分かる。この結果は、検出対象導電率部に配置された電気双極子が、銅ブロックを挿入した場合と発泡スチロール・ブロックを挿入した場合とでは逆方向を向いていることを表している。

Fig.19 a) の測定値を用いて式 (9) のシステム方程式を解いた結果が Fig.21 である。式 (9) は Fig.19 a) における各電流通電パターンについて、それぞれ独立に解いた。Fig.21 a)-f) の結果から、電気双極子が共通に存在する部分を式 (12) を用いて抽出した結果が Fig.19 c) である。

Fig.21 はシミュレーション結果である Fig.11 と比較してノイズの影響が出ていることがわかる。しかし、式 (12) を用いた畳み込み演算後の結果にはノイズの影響が比較的現れていないことから、畳み込み演算にはノイズ低減処理的な効果が現れていると考えられる。

Fig.20 a) の測定値について同様の処理を行った結果が Fig.20 c) である。Fig.19 c), Fig.20 c) は共に銅ブロック、発泡スチロール・ブロックの位置を比較的良好に検出することに成功していると考えられる。

その他、Fig.22 のような結果も得られている。Fig.22 d) の発泡スチロール・ブロック二個を対象とした場合は Fig.12 d) のシミュレーション結果に比較的近い結果が得られたが、Fig.22 b) の銅ブロック二個を対象とした場合では良い結果が得られなかった。

以上のように、Fig.22 b) では良い結果が得られなかったものの、全体としては比較的良好的な結果が得られたと考えられる。よって、本論文で提唱する電気双極子による導電率パラメータ推定問題の定式化について一定の妥当性が実験によって検証された。

## 5. まとめ

本論文では、関数型トモグラフィの研究として一般的な Sensitivity 行列法と筆者等が提唱する電気双極子法について、シミュレーションと実験によってそれらの有効性を検証した。電気双極子法は、抵抗素子に電流を流した際に生じる電圧降下が逆起電力で表すことができる点に注目し、その逆起電力を電気双極子として扱うことで、導電率パラメータ推定問題である EIT に電気双極子を用いた新たな定式化法である。

Sensitivity 行列法はシミュレーション、実験共に良好な結果が得られたとは評価しがたい。これらの結果は、Sensitivity 行列法の理論的限界を確認するものと言えるであろう。一方、電気双極子法はシミュレーション、実験共に比較的良好的な結果が得られたと評価することができるであろう。よって、EIT 問題を電気双極子分布探查問題へ定式化することの妥当性が検証された。

## 参考文献

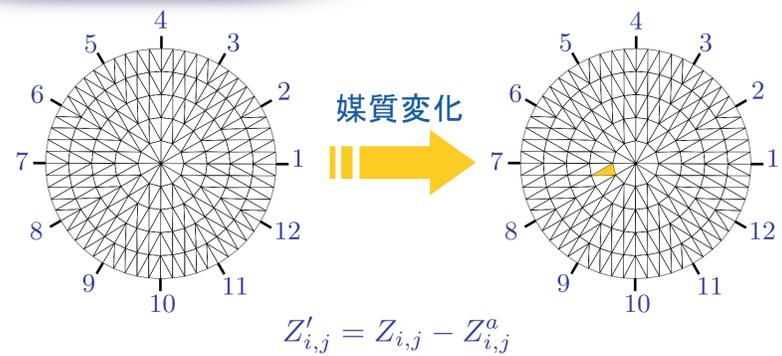
- 1) H. Tian, W. He, and Y. Saito, A Study of Reconstruction Algorithm for Electrical Impedance Tomography, The 2nd Japan, Australia and New Zealand Joint Seminar, pp.24-25, Kanazawa Japan, January 2002.
- 2) T. Murai, and Y. Kagawa, Electrical impedance computed tomography based on a finite element model, IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol.32, pp.177-84, 1985.
- 3) H. Endo, S. Hayano, Y. Saito, and K. Miya, Generalized vector sampled pattern matching method-theory and applications Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Studies Appl. Electromagn. Mech, pp.285-92, 2002.
- 4) 武居昌宏, 李輝, 越智光昭, 齋藤兆古, 堀井清之, "サンブルパターン・マッチング法による固気二相流 CT 画像の再構成", 可視化情報学会論文集, Vol.22, No.9, pp.71-78, 2002.
- 5) G. Dong, R. Bayford, S. Gao, Y. Saito, R. Yerworth, D. Holder, W. Yan, The application of the generalized vector sample pattern matching method for EIT image reconstruction, Physiol. Meas., pp.449-466, 2003
- 6) H. Saotome, T. Doi, S. Hayano, Y. Saito, Crack identification in metallic materials, IEEE Transaction on Magnetics Vol. MAG-29, No.2, March, pp.1861-1864, 1993
- 7) 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, "パラメータ推定に関する逆問題とその関数型トモグラフィへの応用", 可視化情報学会論文集, Vol.23, No.1, pp.103-106, 2003.
- 8) 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, "電気インピーダンス法に関する一考察", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103 No.564, pp.91-98, 2004.
- 9) 音川英一, 早野誠治, 齋藤兆古, 堀井清之, "電気インピーダンス法による導電率分布可視化とその実験的検証", 可視化情報学会論文集, Vol.24, No.1, pp.255-258, 2004.

# 電気双極子を用いた電気インピーダンス法に関する研究

A STUDY OF ELECTRICAL IMPEDANCE METHOD USING ELECTRIC DIPOLE

法政大学大学院 電気工学専攻 齋藤兆古研究室 音川 英一 [03R3211]

## Sensitivity 行列法



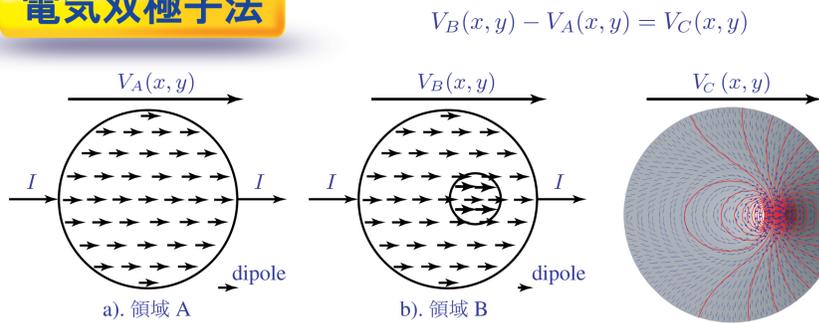
$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} - Z_{i,j}^a$$

$$S_{i,j}^{r_n} = \frac{1}{\beta} \frac{Z_{i,j}^{r_n} - Z_{i,j}^a}{Z_{i,j}^b - Z_{i,j}^a}$$

$$\beta = \frac{D_n}{D_{all}}$$

$$\begin{bmatrix} Z'_{1,1} \\ Z'_{1,2} \\ \vdots \\ Z'_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1}^{r_1} & S_{1,1}^{r_2} & \dots & S_{1,1}^{r_k} \\ S_{1,2}^{r_1} & S_{1,2}^{r_2} & \dots & S_{1,2}^{r_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{i,j}^{r_1} & S_{i,j}^{r_2} & \dots & S_{i,j}^{r_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \vdots \\ \kappa_k \end{bmatrix}$$

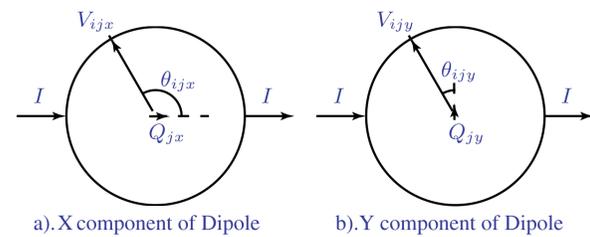
## 電気双極子法



$$V_P = \frac{Q\delta \cos \theta}{4\pi\epsilon r^2}$$

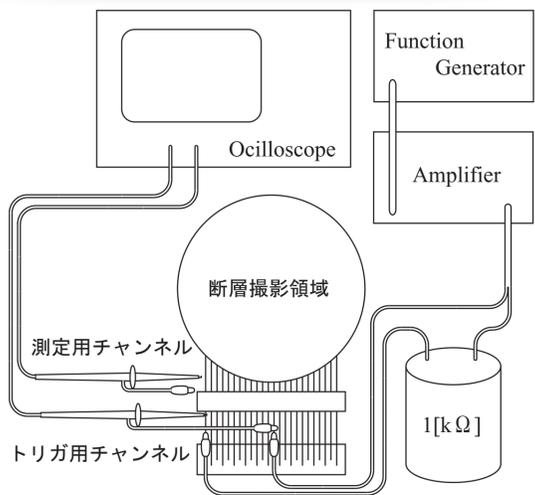
$$G_{ijx} = \frac{\cos \theta_{ijx}}{r_{ij}^2}$$

$$G_{ijy} = \frac{\sin \theta_{ijy}}{r_{ij}^2} = \frac{\sin \theta_{ijx}}{r_{ij}^2}$$

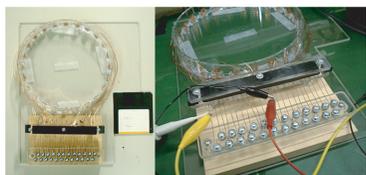


$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11x} & G_{11y} & \dots & G_{1mx} & G_{1my} \\ G_{21x} & G_{21y} & \dots & G_{2mx} & G_{2my} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{n1x} & G_{n1y} & \dots & G_{nmx} & G_{nmy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \\ \vdots \\ Q_{mx} \\ Q_{my} \end{bmatrix}$$

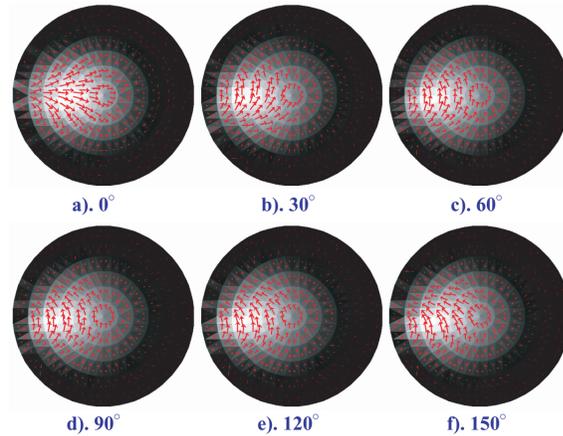
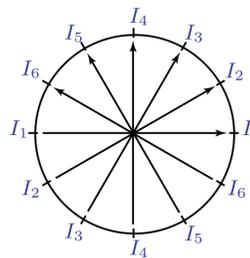
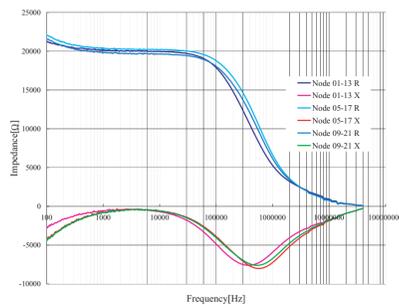
## シミュレーション, 実験結果



電気双極子法の実験回路

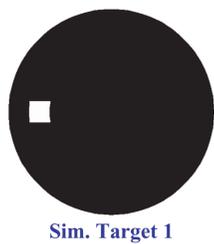


トレイの周波数特性

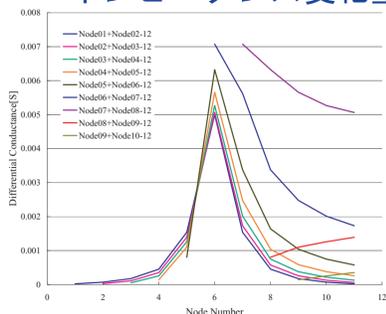


$$Z = Z_1 \otimes Z_2 \dots \otimes Z_{n/2}$$

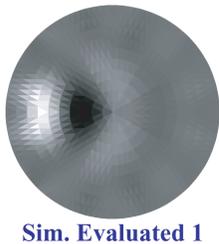
### 媒質分布モデル



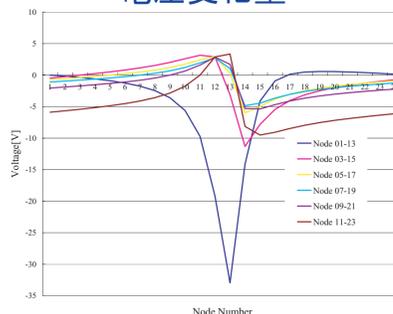
### インピーダンス変化量



### Sensitivity 行列法



### 電圧変化量



### 電気双極子法

