

### 1215 SPM 法を用いた固気二相流 CT 画像の再構成

辻野, 真也 / 梅津, 敏之 / 武居, 昌宏 / 越智, 光昭 / 齊藤, 兆古 / 堀井, 清之 / TUJINO, Shinya / UMETSU, Toshiyuki / TAKEI, Masahiro / OCHI, Mitsuaki / SAITO, Yoshifuru / HORII, Kiyoshi

---

(出版者 / Publisher)

日本機械学会関東支部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集

(号 / Number)

8

(開始ページ / Start Page)

421

(終了ページ / End Page)

422

(発行年 / Year)

2002-03-14

# 1215 SPM 法を用いた固気二相流 CT 画像の再構成

## Solid Air Two Phase CT Image Reconstruction Using SPM Method

○辻野 真也 (日大)                      梅津 敏之 (日大)  
 正 武居 昌宏 (日大)                  正 越智 光昭 (日大)  
      斎藤 兆古 (法政大)              正 堀井 清之 (白百合大)

Shinya TSUJINO, Nihon University, Kandasurugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo  
 Toshiyuki UMETU, Nihon University      Masahiro TAKEI, Nihon University  
 Mitsuaki OCHI, Nihon University      Yoshifuru SAITO, Hosei University  
 Kiyoshi HORII, Shirayuri College

Sampled Pattern Matching (SPM) method, a novel image reconstruction method with the most suitable iteration number, is applied to an imitated solid air two-phase flow image to compare with typical Newton-Raphson (NR) method. As a result, the image reconstructed by SPM is more accurate than that done by NR. Behind this work, solid air two-phase flow capacitance CT observes particle movement in a pipeline. However the image of the capacitance CT is blurred. Therefore, it is necessary of an image reconstruction method to prevent it.

**Key Words:** Sampled Pattern Matching, CT, two-phase flow, Inverse problem

### 1. 緒言

現在まで固気二相流キャパシタンス CT の画像再構成法は Newton-Raphson (NR)法が一般的に用いられている [1]。しかしながら NR 法は閾値とゲインを用いて解を安定させている。また、閾値とゲインと繰り返し回数は経験値である。そこで本研究では、経験値を用いず解が安定的に収束し、最適な繰り返し回数が決まる Sampled Pattern Matching (SPM)法を用いた画像再構成法を提案し、固気二相流模擬画像に適応し、その有用性を検討することを目的とする。

### 2. SPM 法の理論

#### 2. 1 SPM 法の反復解

コンデンサーから得られるキャパシタンス  $C$  ( $n \times 1$  行列)、誘電率分布  $E$  ( $m \times 1$  行列)、センシティブリティマップ  $Se$  ( $n \times m$  行列) の関係は

$$C = SeE = \sum_{i=1}^m (Se_i E_i) \quad (1)$$

となる。この(1)式を  $C$  のノルムで正規化すると、

$$\frac{C}{|C|} = \sum_{i=1}^m E_i \frac{|Se_i|}{|C|} \frac{Se_i}{|Se_i|} \quad (2)$$

となる。従って(2)式は、

$$C' = \sum_{i=1}^m (Se_i' E_i') \quad (3)$$

$$= Se' E'$$

と表せる。「 $'$ 」はベクトルや行列が正規化されていることを示す。繰り返し計算により  $E$  を求める方法を次に示す。キャパシタンスの実験値を  $C^{(0)}$ 、LBP 法を用いて求めた  $E$  を初期値  $E^{(0)}$  とすると、

$$E^{(0)} = Se'^T C^{(0)} \quad (4)$$

となる。 $E^{(0)}$  を(3)式に代入し、 $E^{(0)}$  のときの  $C$  を  $C^{(1)}$  とすると、

$$C^{(1)} = \frac{Se' E^{(0)}}{|Se' E^{(0)}|} \quad (5)$$

と表せる。 $C^{(0)}$  と  $C^{(1)}$  よりキャパシタンスの誤差  $\Delta C^{(1)}$  は、

$$\Delta C^{(1)} = C^{(0)} - \frac{C^{(1)}}{|C^{(1)}|} \quad (6)$$

$$= Se' \Delta E^{(1)}$$

と表せる。よって(6)式より

$$\Delta E^{(1)} = Se'^T \Delta C^{(1)} \quad (7)$$

となる。(7)式を初期値の  $E^{(0)}$  に加え、加えた  $E$  を  $E^{(1)}$  とすると、

$$E^{(1)} = E^{(0)} + \Delta E^{(1)}$$

$$= E^{(0)} + Se'^T \Delta C^{(1)}$$

$$= E^{(0)} + Se'^T \left( C^{(0)} - \frac{Se' E^{(0)}}{|Se' E^{(0)}|} \right) \quad (8)$$

を得る。よって、反復解の一般式は

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + Se'^T \Delta C^{(k-1)}$$

$$= E^{(k-1)} + Se'^T \left( C^{(0)} - \frac{Se' E^{(k-1)}}{|Se' E^{(k-1)}|} \right)$$

$$= Se'^T C^{(0)} + \left( I_m - \frac{Se'^T Se'}{|Se' E^{(k-1)}|} \right) E^{(k-1)} \quad (9)$$

となる。 $k$  は繰り返し回数であり、 $I_m$  は  $m$  行  $m$  列の単位行列である。

#### 2. 2 評価関数

(3)式は、 $C'$  が必ずセンシティブリティマップ  $Se$  を構成する列ベクトル  $Se_i$  の線形結合で与えられることを意味する。

評価関数は  $f(E^{(k)})$  は(3)式をもとにして実験値  $C^{(0)}$  と(9)式の  $E^{(k)}$  を用いて

$$C^{(0)} C^{(k)} \rightarrow 1$$

$$\therefore f(E^{(k)}) = C^{(0)} \frac{Se' E^{(k)}}{|Se' E^{(k)}|} \quad (10)$$

とおく。本手法では  $f(E^{(k)}) \rightarrow 1$  となる  $E^{(k)}$  を求める。すなわち

$$1 - f(E^{(k)}) = 1 - C^{(0)} \frac{Se' E^{(k)}}{|Se' E^{(k)}|} \rightarrow 0 \quad (11)$$

(11)式の両辺に  $C^{(0)}$  をかけると

$$C^{(0)} - C^{(0)} C^{(0)} \frac{Se' E'^{(k)}}{|Se' E'^{(k)}|} \rightarrow 0 \quad (12)$$

となる。ここで、 $C^{(0)} C^{(0)}=1$  なので(12)式は

$$C^{(0)} - \frac{Se' E'^{(k)}}{|Se' E'^{(k)}|} \rightarrow 0 \quad (13)$$

となる。(13)式は(9)式の $\Delta C^{(k)}$ と等しい。よって反復解に評価関数値が含まれ、その値がゼロに近づくのでSPM法は経験値を用いないで正確な値を求めることができる。

SPM法の概略をFig.1に示す。SPM法では $C^{(k)}$ とサンプルパターン $C^{(0)}$ の内積が1、すなわち $C^{(k)}$ と $C^{(0)}$ が並行にマッチングするように繰り返し計算を行う。

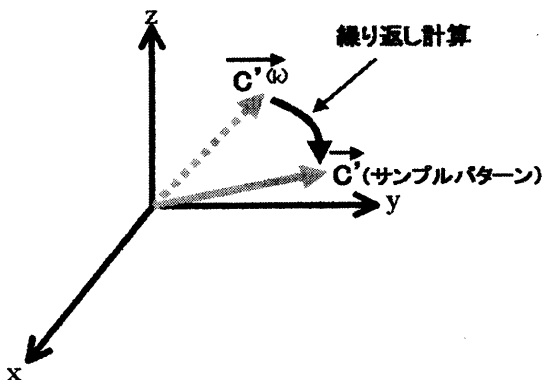


Fig.1 Outline of SPM

2. 3 収束性

SPM法の反復解について考察する。(9)式の状態遷移行列Tを

$$T = I_m - \frac{Se'^T Se'}{|Se' E'^{(k-1)}|} \quad (14)$$

とおく。今、 $E^{(k-1)}$ が行列Tの固有ベクトルに等しくなるとすれば、 $\lambda$ をTの固有値として、

$$TE^{(k-1)} = \lambda E^{(k-1)} \quad (15)$$

が成り立つから、

$$\begin{aligned} E^{(k)} &= \lambda E^{(k-1)} + E^{(0)} \\ &= \lambda(\lambda E^{(k-2)} + E^{(0)}) + E^{(0)} \quad (16) \\ &= (\lambda^k + \lambda^{k-1} + \dots + I_m) E^{(0)} \end{aligned}$$

である。よって、 $k \rightarrow \infty$ で $E^{(k)}$ の固有値 $\lambda$ の絶対値が1を超えなければ必ず収束する。

3. シミュレーション

固気二相流の粒子分布を模擬的に仮定し、LBP法、NR法およびSPM法それぞれの方法で再構成し、画像相関を計算して精度について検討する。Fig.2はシミュレーションで用いた模擬画像であり粒子分布がa)中心、b)管底およびc)分散を示す。

各シミュレーションの結果を以下の図と表に示す。Fig.2の模擬画像をLBP法、NR法およびSPM法で再構成した画像をFig.3からFig.5に示す。NR法は閾値を用いず計算し、画像相関が最大の時の画像を示した。SPM法は繰り返し回数3000回の時の画像を示した。一例として、SPM法で粒子分布が中心の時の評価関数の値をFig.6に示した。この時の $f(E^{(k)})$ の値は0.9972であり、ほぼ1に収束したことを示す。また、固気二相流の模擬画像と各方法で再構成した画像との相関をTable.1に示す。この表からSPM法は全ての場合において相関が高く、最適な方法であることがわかった。

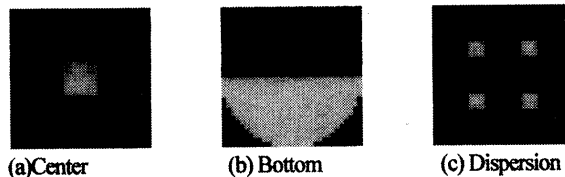


Fig.2 Particle distribution

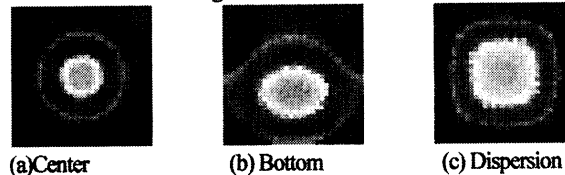


Fig.3 Reconstructed image by LBP

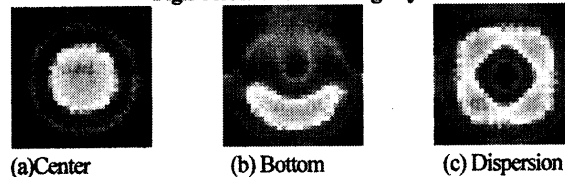


Fig.4 Reconstructed image by NR

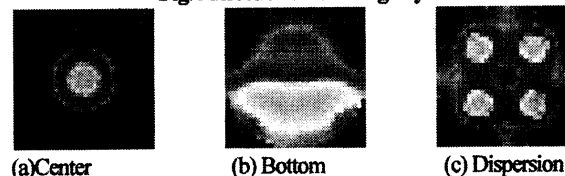


Fig.5 Reconstructed image by SPM

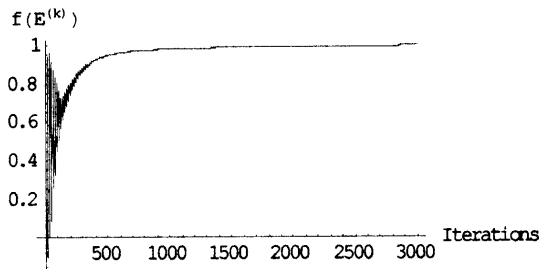


Fig.6 Convergence process of center image by SPM

Table.1 Correlation between original image and reconstructed image

	Center	Bottom	Dispersion
LBP	0.67252	0.641716	0.283811
NR	0.783681	0.474094	0.421036
SPM	0.833886	0.849833	0.598056

4. 結言

固気二相流の各模擬画像において粒子分布が中心、管底および分散のどの場合でもSPM法により再構成された画像が最高の精度で再構成された。また、SPM法は安定的に収束することがわかる。よって、SPM法は固気二相流CTの画像再構成法として有用である。

参考文献

[1]Isaksen,O., A review of reconstruction techniques for capacitance tomography, *Measurement science & technology*, Vol.7, No.3 (1996) pp325-337