

構造適応型CTアルゴリズムの考察 A Study of Structure Adaptive CT Algorithm

○小田中 滋, 三井 隆史, 岩崎 信, 北村 正晴
○ODANAKA Shigeru, MITSUI Takafumi, IWASAKI Shin, KITAMURA Masaharu

東北大学工学部
Faculty of Engineering, Tohoku University

キーワード: ベイズ推定法(bayesian estimation),
画像再構成(image reconstruction), 注目領域(region of interest (ROI)),
計算機断層撮影(computed tomography (CT)), 適応的(adaptive)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学工学部
量子エネルギー工学科 原子核システム安全工学講座
小田中 滋, Tel.&Fax.:(022)217-7907,Email:shigeru@mine1.nucle.tohoku.ac.jp

1 緒言

CT(計算機断層撮影法)は、物体の断面上の分布を外部からの情報を用いて計算により再構成する手法である。CTは、物体の内部構造を破壊することなく観察するために広く用いられている。医学用のX線CTスキャナは、従来の医学診断用装置と比較して豊富な診断情報を画像という形として提供するため、急速に普及し現在では医学診断に必要不可欠なものになっている。さらに、近年X線だけでなく様々な線源やセンサーを用いて科学計測や工業計測など多くの分野での応用・研究がなされはじめている。例えば、鋼材の欠陥^[1]やICの傷^[1]、樹木の年輪^[2]、核融合炉のプラズマの内部状態の計測^{[3],[4]}などの対象について二次元断面画像として視覚化することが試みられている。

医療の分野では高分解能の画像を再構成することに最大の努力がなされている。そのため、多角度の投影データを高速に収集する方法や装置・検出器の開発に力が注が

れてきた。しかし、工業分野では、高分解能の断面画像を得るということと同時に投影方向や測定数を少数に抑えたいという要求も存在する。また、構造的・物理的な制約により投影角を少数にしか設定できない場合もある。少数投影によって欠陥の検出ができれば測定時間が短くなりX線照射量も削減できるなど利点が多い。ところが、一般に投影角数を減らすと再構成結果が著しく劣化する。そのため、少ない測定数でより正確な再構成画像を得るアルゴリズムは極めて有効であると思われる。

従来のアルゴリズムでは断面画像を求める場合、試料全体を覆う透過データが必要であり、かつ、すべてのデータがそろっていないかならならず、そのような上記の要求に応えることは困難であった。そこで、我々はデータ収集と平行した処理のできるアルゴリズムの研究と関心領域(ROI)に注目したデータ収集法の開発を開始し、これまでの研究^{[5],[6]}でベイズ推定法を用いた透過型CTの新しい画像再構成アルゴリズムを提

案し、その有効性を確認した。このアルゴリズムの特徴は、従来法とは異なり測定中でもそれまでに得られた測定データから推定できる最も確からしい結果を示すことができることである。この手法は、データ取得の度に再構成結果を更新するものであるため、結果として注目領域(ROI)を設定した適応的な推定ができると期待される。また、再構成結果の取り扱いが容易なため、従来のアルゴリズムでは変更することがなかった再構成領域のメッシュサイズやビームサイズについても対象構造や再構成結果に応じ測定中に適応的に最適化することが可能となる。そこで今回、構造物の欠陥検出問題を取り上げてROI法の可能性を調べた。

2 方法

2.1 CTの原理

CTによる物体内部の観察のために、その投影データを測定しなければならない。投影データは、X線などの透過性ビームを用いて照射することによって得られる。組成が一定の物質(X線の線減弱係数 μ)に単一エネルギーのX線を照射したとき、入射X線強度 I_0 と、厚さ t の物体を透過した後のX線強度 I_t は以下のような関係にある。

$$I_t = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

この式は

$$\ln \frac{I_t}{I_0} = -\mu t \quad (2)$$

とできる。対象物体の減弱係数が分布 $f(x,y)$ を持っていたとし、左辺の値を P とすると(2)式は、

$$P = \int_s f(x,y) ds \quad (3)$$

となる。 ds は、測定のビームラインに沿った線素である。(3)式より、関数 $f(x,y)$ のビームの軸上の線積分になっていることがわかる。この一回の測定によって得られる値 P を投影要素と呼ぶ。投影要素を並進移動によって収集し、さらに多数の投影角方向からの測定データを用いて断面画像を再構成する。この並進移動によって得られた値の組を投影と呼ぶ。

図1のように測定対象領域を N 個の画素に分割し n 番目のピクセルの値を f_n とする。それぞれのピクセルにおける値を一定と考える。ビームラインの並進位置を示す k 、投影の角度 θ を表す m 、によって決定するビームライン (k,m) による投影要素は P_{km} で表される。ビームライン (k,m) が各ピクセルに寄与する重み係数 W_n^{km} とする。この重み係数を用いると投影要素 P_{km} は

$$P_{km} = \sum_{n=1}^N W_n^{km} \times f_n \quad (4)$$

のように表すことができる。

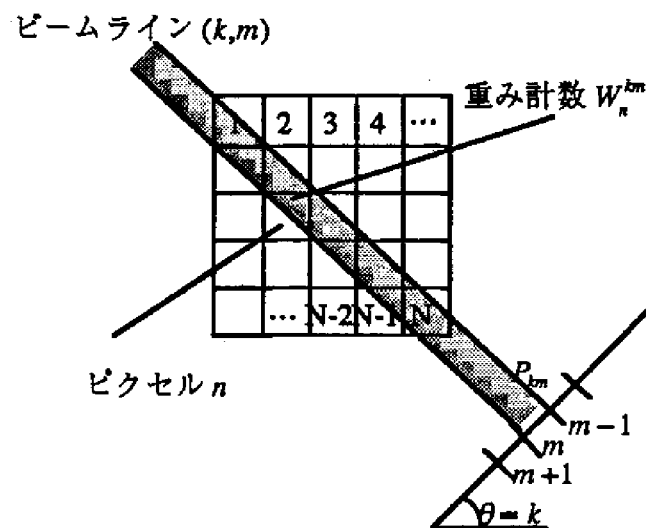


図1 ビームラインとピクセルの関係

2.2 ベイズ推定法

ベイズの定理は条件付き確率の基本的な定理であり以下のような式で表される。

$$P(A_i | B_j) = \frac{P(B_j | A_i)P(A_i)}{\sum_{i=1}^N P(B_j | A_i)P(A_i)} \quad (5)$$

この定理によって、事象 B_j を起こす原因が A_1, A_2, \dots といくつかあったとき、それぞれの原因が起こる確率 $P(A_i)$ とその原因の下で B_j が起こる確率 $P(B_j | A_i)$ がわかっているとしたとき、 B_j が原因 A_i にもとづく確率 $P(A_i | B_j)$ を求めることができることを意味している。

ベイズ逐次推定法は、このベイズの定理を繰り返し適用することによって真の分布を推定しようとする手法である。事象 B_j がデータの確率密度関数に従っており、そのパラメータを示す A_i が未知であるとき、データが得られる毎にパラメータ A_i をベイズの定理の式を用いて求めていく方法である。

ベイズの定理の式中の $P(A_i | B_j)$ は、測定結果 B_j が得られたことにより、新たに得られる分布(事後分布)であり、 $P(B_j | A_i)$ は測定結果 B_j が得られことによる尤度、 $P(A_i)$ はデータが得られる前に推定していた事前分布としている。(5)式の分母は全確率の和を1に規格化するためのものである。次の測定結果が得られたときにはこの事後分布を事前分布として測定結果が得られる度に繰り返し更新していき、より確からしい分布を推定する方法である。

2.3 ベイズ逆投影法

このベイズ推定法をCTに適用することによって測定データが得られる度にその測定データから得られる最も確からしい再構成結果が得られるものと思われる。測定によって決定することのできる尤度として各投影の重み係数 W_n^{km} を用いてベイズ推定法をCTに適用すると、式は以下のように書き換えられる。

$$f_n^r = \frac{W_n^{km} \times f_n^{r-1}}{\sum_{n=1}^N W_n^{km} \times f_n^{r-1}} \times P_{km} \quad (6)$$

ここで r は、データの更新回数を示す。この式を用いて測定データ P_{km} によって得られるビームライン上の線積分の値を各ピクセルにビームラインの寄与する割合(尤度)に従って分配する。この方法を逐次型ベイズ逆投影法と名付ける。

測定回数 $r-1$ までに推定された結果を事前分布として r 回目の測定データの測定で得られた結果 P_{km} を用い、この式に従い再構成結果を修正し、新たな推定値 f_n^r を得る。次の測定データが得られたなら、この値を事前分布としてさらに結果を更新する。逐次型ベイズ逆投影法では、上記のような方法により、ビームライン毎の画像の更新を行うことができる。

尤度 W_n^{km} は、幾何学的な重みであり、ビームの形状・分布を考慮に入れなければならないが、今回は簡単のためにビームラインが各ピクセルを通過する面積比を用いた。また、スキャン方式として直交スキャン方式(次に取得する投影角を90度程度ずらしていく方法)を用いた。これは、直交スキャンを用いることによって再構成結果の修正量が最大となり結果として収束が早くなるためである。

2.4 ROI法

初め幅広いビームを用いて大まかな概形をとらえ、その結果を用いて特徴的な領域にROIを設定する。その後、ROIについて細かいビーム(1/2, 1/4, ... のサイズ)を用いてくわしい測定を行う。それに伴い再構成メッシュの大きさを初期値の1/2, 1/4, ... などと変化させていく。つまり、再構成メッシュ数を初期値の2倍, 4倍, ... とする。このことにより、欠陥の検出を少ない測定数で行うことが期待できる。

3 結果・考察

ベイズ逆投影法の逐次的な再構成結果の変化を図2.aのファントムを用いて検証した。外側に2メッシュの幅を持つ四角の壁があり、その内側に減弱係数の値が壁の2倍の柱状の物質が存在するものと仮定した。スキャン方法は第一世代方式と呼ばれる、一对の線源-検出器を用いた方式を想定した。投影は10度毎に行った。

f_n の初期値($\tau=0$)は、一様な分布を仮定した。図2.b-eは再構成の課程を示している。最初の角度のスキャン終了後の推定値(図2.b)では壁によるものと思われる部分の値が高くなっているのが見て取れる。また、中心付近にある柱の影響によって盛り上がっている部分も存在する。次のスキャンが終了した後の推定値(図2.c)を見ると、正方形の輪郭はすでに再構成されていることがわかる。しかし、柱の部分以外にも値が高くなっている部分が存在する。図2.dは、すべてのスキャンが終了した後の再構成結果である。壁、柱ともに再構成がなされている。柱以外の壁の内側の部分は、見えていないが壁の外側と同様に値はほとんどゼロである。しかし、壁の部分に多くの揺らぎが存在するので、さらに同じデータ2回用いて再構成を行った。その結果(図2.e)を見ると、まだ壁の部分に値の揺らぎがわずかに存在す

るが、ほぼ実像に近いものになっている。

一方、すべてのデータを収集した後に再構成した従来法(フィルター補正逆投影法)の結果は、図2.fのようなになった。壁の部分の値が実際のものより大きくなっている。また、壁の外側において揺らぎがかなり多く見られる。これは、フィルターを作用させるときに行う近似によるものと思われる。

以上の結果より、今回のファントムを用いた再構成ではフィルター補正逆投影法よりベイズ逆投影法の方が定量性の面で優れていることがわかった。

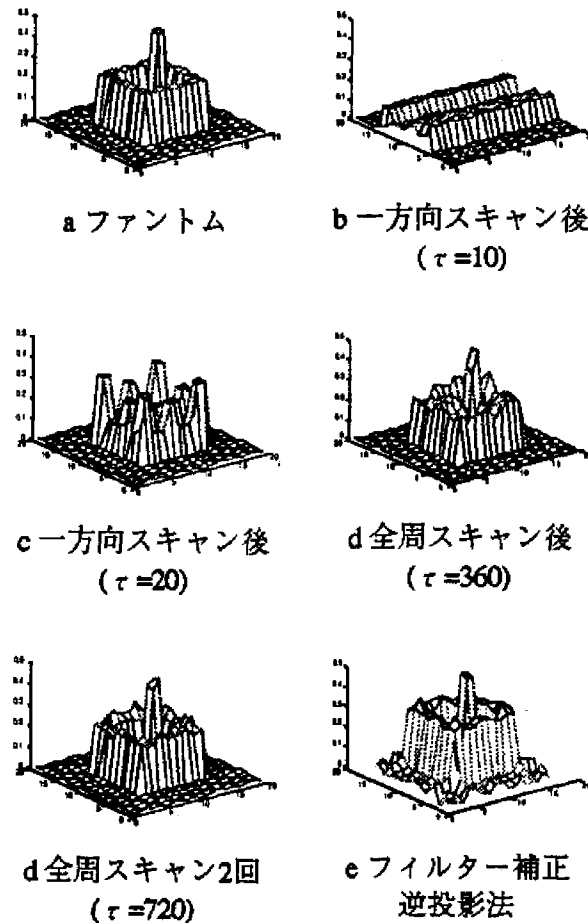


図2 逐次ベイズ投影法の再構成結果

再構成結果の逐次的な収束を調べるために、推定結果と真の分布との平均誤差の値 $\overline{\Delta f}$ の変化を調べた。 $\overline{\Delta f}$ は以下の式によって表される。

$$\overline{\Delta f} = \sum_{n=1}^N \frac{|f_n - f_n^0|}{N} \quad (7)$$

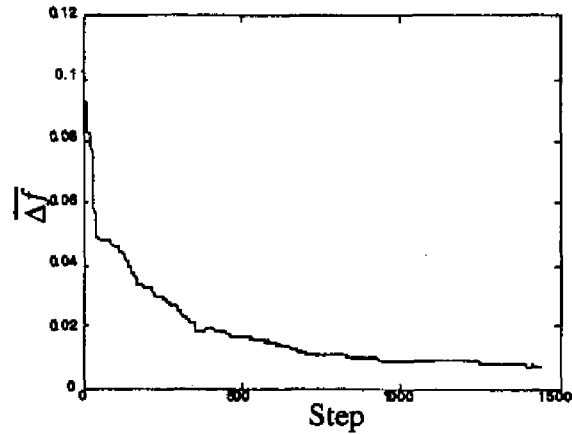
ここで f_n は推定値、 f_n^0 は真の値を示す。

この平均誤差の移り変わりをデータの更新数(ステップ数) τ に対してプロットしたものを図3.aに示す。図2.eの最終結果($\tau=720$)ではまだ値が取束していないため、さらにデータの更新を行った(図3.b $\tau=1440$)。データの更新とともに誤差の値が減少しているのが見て取れる。また、ステップ数の増加とともに値の変化量が減少して値が取束していく様子が見て取れる。しかし、拡大してくわしく見るとまだ減少していることがわかった。

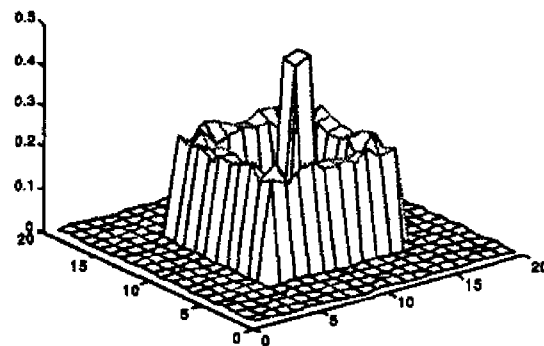
また、このときの再構成結果を図3.bに示す。壁の部分の値の揺らぎがかなり削減されており、ほぼ正確に再構成されていることがわかる。

この結果より、逐次型ベイズ逆投影法によって、データの入手とともにリアルタイムで断面画像再構成が行えることがわかった。

次に、同じファントムを用いて逐次型ベイズ逆投影法の少数投影(投影角度数半減した場合や、投影角に制限がある場合など)による再構成結果を比較してみる。この結果を図4に示す。図4.aは再構成の用いた投影角度数が半分の場合の、図4.b、図4.cは、投影角にそれぞれ30度、60度の範囲が測定できないという制限が与えられたときの再構成結果である。すべての場合において、壁・柱の部分ともに再構成されていることがわかる。角度数が半分に削減された場合(図4.a)、



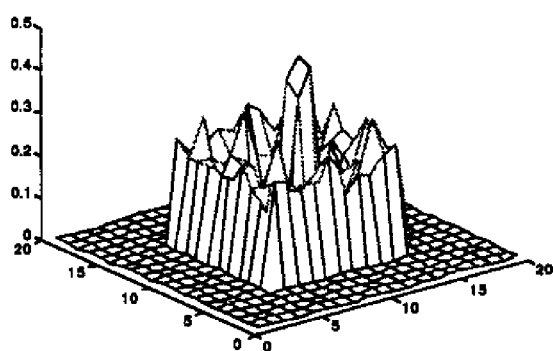
a 平均誤差のデータ更新に対する変化



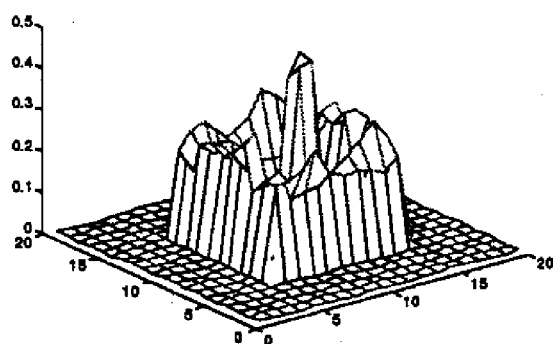
b 再構成結果($\tau=1440$)

図3 平均誤差の変化

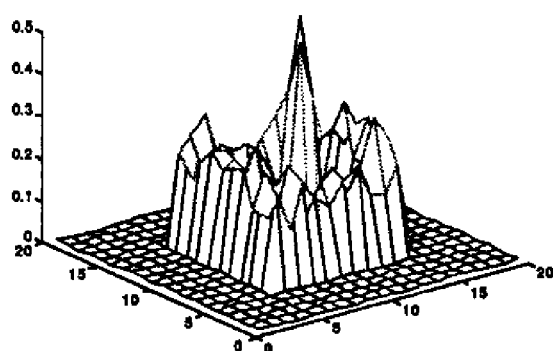
壁の部分の値にかなり高周波の揺らぎがある。しかし、平均的には定量性のよいものとなっている。角度成分が30度削減された場合は、壁の部分にある一定周期の緩やかな揺らぎ存在するが良い結果が得られている。しかし、角度成分がさらに60度制限された場合、柱の部分以外にも値の大きなアーティファクトが見られ良い結果であるとはいえない。しかし、全角度の3分の1が制限されていることを考えると、壁の部分及び柱の形状が再構成がなされており本手法は、十分ロバスト性を持っているといえる。



a 投影角半分



b 投影角30度制限



c 投影角60度制限

図4 投影角に制限

以上の結果より、ベイズ逆投影法によって、角度成分について欠陥が存在してもある程度良い結果が得られることがわかった。

ROI法の検証のために図5.aのような一様な領域(値は1に規格化してある)の中に1ピクセル(最小ビームラインの幅と同一)の欠陥があるファントムを用いた。全領域は、 32×32 ピクセルから構成されている。今回測定データとしては理想的なデータを生成しそれを用いて断面画像再構成を行った。まず、4ピクセル幅の太いビームを用いて大まかな概形をとらえた(図5.b)。今回は、既知の分布より5%以上ずれているピクセルについて設定した。その後、はじめの2分の1の太さの細かいビームによってROIを通過するビームラインのみ選択し、くわしい測定を行った。このビームラインを用いた測定(並進 $16 \times$ 投影角 16)から、ROIを通るビームライン 166 回が抽出された。このとき、ビームサイズを半分にするるとともに投影角数・メッシュサイズを2倍にし測定・再構成を行った。その再構成結果(図5.c)より、さらにROIが3点選択された。並進 $32 \times$ 投影角 32 から 370 回が選択され、最終的な再構成結果は、図5.dのようになった。このときの全測定数は 664 回であった。一方、ROIを設定せず、初めから細かいビームラインを用いたベイズ逆投影法による再構成結果は、図5.eのようになった。このときの全測定数は、 2048 回であった。ROIを設定した方法の2倍以上の測定回数となった。最終結果を見比べてみると、どちらの場合にも欠陥が正確な位置に検出されていることがわかる。ROI法(図4)の再構成結果にアーティファクトが少し多く見られるが再構成結果としては、ROIを設定しない方法とほぼ同程度のものが得られた。

ROI法とベイズ逆投影法の平均誤差の値をプロットしたものを図5.fに示す。この結果からもROI法は少ない測定数から、ROIを設定しない方法と同程度の結果が得られていることがわかる。ROI法の平均誤差の値が初期の段階においてROIを設定しない方法より

悪くなっているのは、太いビームラインを用いた測定により、大きなメッシュサイズで再構成を行っていることが原因となっている。

また、欠陥位置の値を結果の更新回数に対してプロットしたものを図5.gに示す。再構成結果の欠陥位置における値の閾値を0.5に設定すると、通常の逐次型ベイズ逆投影法は約1200回、ROI法では約600回の測定回数となった。つまり2分の1の測定数で欠陥が検出できたことになる。

4 結言

本報告においてまず、ベイズ逆投影法の確認を行った。さらに、ベイズ逆投影法を用いたROIに注目した適応的再構成が可能かつ、有効的であることを確認した。

今後の展開として、

- より正確な体系を用いたシミュレーションによる尤度の評価
- ROI設定・欠陥検出の基準の設定
- 実データを用いた解析による確認などを考えている。

参考文献

- [1]H.Ellinger: "Tomographic analysis of structure materials", Proc. SPIE, 182, pp.179-186, (1979).
- [2]M. Onoe, J. W. Tsao, H. Yamada, H. Nakamura, J. Kogure, H. Kawamura, and MIT. Yosimatsu: "Computed tomography for measuring annual rings of alive tree", Proc. IEEE, 71(7), pp.907-908, (1983).
- [3]長山好夫,"プラズマ診断におけるCT(計算機トモグラフィ)の応用",核融合研究, 62(6), pp.427-445. (1989).
- [4]岩間尚文,"プラズマ計測のための計算機トモグラフィ",核融合研究,62(6),pp.586-599. (1989).
- [5]岩崎信:"純ベイズ法によるCT画像再構成法I",日本原子力学会予稿集'95秋C55.

[6]小田中滋,三井隆史,岩崎信,北村正晴
:"14MeV中性子を用いたCTの基礎研究",日本原子力学会予稿集'96春G15.

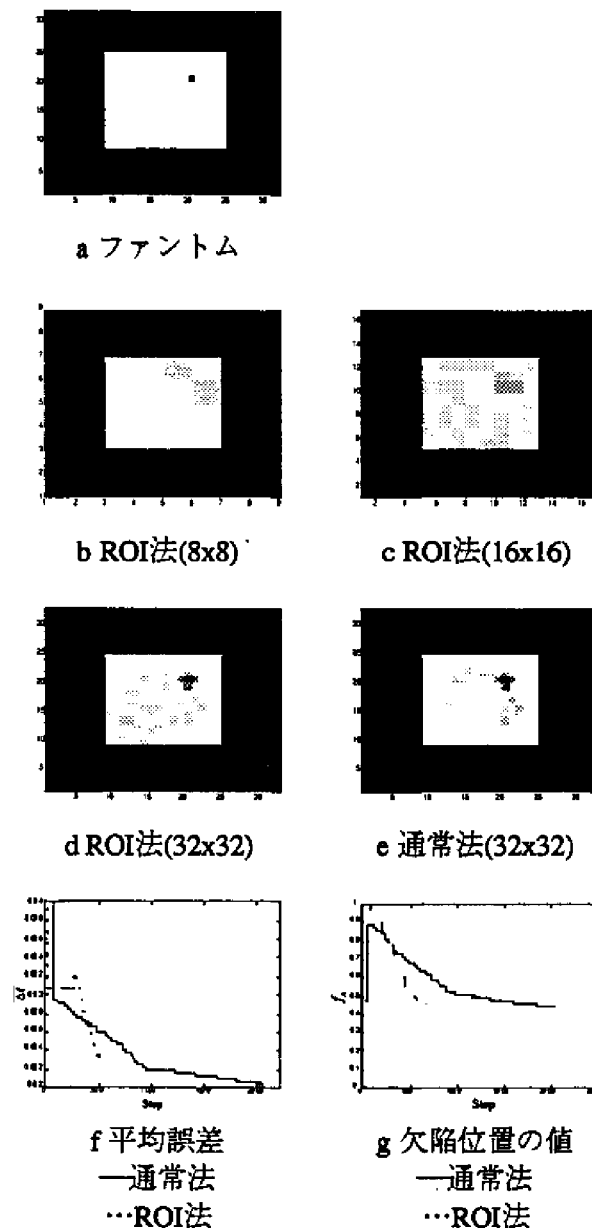


図5 ROI法の結果