

3次元デジタル画像上のエッジ検出オペレータの導出と その能力の評価†

鈴木秀智^{††} 鳥脇純一郎^{†††}

本論文では、3次元(3D)濃淡画像用の局所差分型エッジ検出オペレータについて組織的検討を行う。すなわち、2次元(2D)画像における 3×3 近傍を用いたエッジ検出用差分型オペレータの代表的なもの(Prewitt, ラプラシアン, Sobel, 等)を $3 \times 3 \times 3$ 近傍に拡張し、合計で16種類のオペレータについて、具体的な形(重み係数, 等)を導出した。これらは、実際の画像処理にただちに適用できるように、表の形にまとめられている。さらに、これらのオペレータの性能を、理論的および実験的に比較検討する。性能の尺度としては、計算時間およびフィルタ出力のSN比(理想エッジと加法的ガウス雑音からなる入力を想定)を用いた。この結果、エッジ検出能力が比較的高く、かつ、計算時間も少ないものとして、Prewittらの超平面あてはめ型オペレータの3D拡張版、および、Zuckerらの最適化型オペレータがすぐれていることが知られた。さらに、これらの結果は実際の頭部X線CT像における腫瘍部分検出に適用され、上記結論が確認された。

1. まえがき

最近、画像処理の分野では、従来の主流である2次元(2D)画像処理に加えて、3次元(3D)濃淡画像処理の必要性が急増している。たとえば、画像生成の過程から考えた場合、3次元的な取扱いが必須であるような計算機断層像(CT像)や生体組織標本の顕微鏡像の処理と表示、CAD/CAM, 等の分野はその代表的なものである。

しかるに、3D画像処理は比較的新しい分野であるため、処理手法の蓄積はきわめて少なく、したがって、当然ながら、2D画像処理におけるSLIP, SPIDERのような汎用プログラムパッケージもない。また、数少ない既存の処理手法も、個別の問題向きに開発されたものが多く、一般的な観点からの組織的な検討はほとんど行われていない。

そこで、本論文では、3D画像処理手法の組織的な開発の1段階として、2D画像用エッジ検出オペレータを3D画像用に拡張し、その能力の評価を行う。原理的には、3Dエッジ検出オペレータは、2D画像用のものの直接的拡張であると考えられ、図形のトポロジカルな性質を扱う場合のような3次元固有の理論的な問題点¹⁾はない。しかし、3D画像では局所パ

ターンの個数が非常に多いため¹⁾、拡張の自由度が大きく、3Dエッジ検出オペレータの導出作業もかなり煩雑になる。したがって、この拡張の基本的な方式を見通しよく整理して、代表的なオペレータを具体的に示し、さらに、それらの能力を比較検討しておくことは、理論および実用の両面で十分に大きな意義をもつと考えられる。なお、具体的な3Dエッジ検出オペレータの例は文献^{4), 5), 9)}があるが、能力の比較検討はまったく行われていない。

2. 3Dエッジ検出オペレータの導出

2.1 2Dエッジ検出オペレータの概要

おもな2Dエッジ検出オペレータは、基本的な考え方からみて以下の3種類に大別される²⁾。

- (1) 局所差分型(単純1次差分, 平面あてはめ型, テンプレートあてはめ型, Roberts gradient, ラプラシアン, 等)
- (2) モデルあてはめ型(Hueckelのオペレータ等)
- (3) 信号検出型(統計的信号検出理論の応用)

(1)は、局所差分値の大きい部分がエッジである可能性が高いことを利用したものであり、計算時間が少なく検出能力も比較的良好いため、最も広く利用されている。(2)は、仮定したエッジモデルと画像とのマッチングをとることによりエッジを抽出するものであり、理論的には興味深い、計算量の大きさに比べて能力が著しくよいとは必ずしもいえないようである³⁾。(3)は、理論的なエッジに雑音を加わったものとして画像をモデル化し、雑音の確率模型に基づく統

† Derivation of Edge Detection Operators for 3-dimensional Digital Images and Evaluation of Their Performance by HIDETOMO SUZUKI (Department of Information and Computer Sciences, Toyohashi University of Technology) and JUN-ICHIRO TORIWAKI (Department of Electronics, School of Engineering, Nagoya University).

†† 豊橋技術科学大学情報工学系
††† 名古屋大学工学部電子工学科

表 1 2D 画像用のエッジ検出オペレータ
Table 1 Edge operators for a 2D image.

番号	名 称	定 義 式
1	単純1次差分	$d=f_x-f_y$
2	平面あてはめ型	$d=f_1+f_2+f_3-f_4-f_5-f_6$
3	Sobel	$d=f_1+2f_2+f_3-f_4-2f_5-f_6$
4	局所最小値差分型	$d=f_0-\min\{f_i 1\leq i\leq 8\}$
5	レンジ差分型	$d=\max\{f_i 0\leq i\leq 8\}-\min\{f_i 0\leq i\leq 8\}$
6	単純2次差分型	$d=f_x+f_y-2f_0$
7	ラプラシアン	$d=f_2+f_4+f_6+f_8-4f_0$ (4近傍型) $d=f_1+f_2+\dots+f_8-8f_0$ (8近傍型)

定義式の記号は図1を参照。
 d は差分出力を表す。

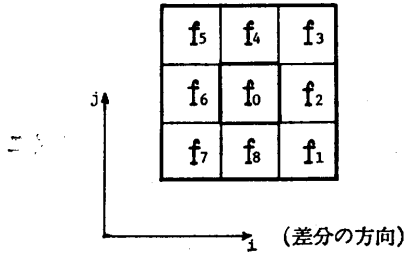


図 1 2D 画像の 3×3 局所近傍 (図中の f_i は局所近傍の対応する位置での濃度値を表す)。
Fig. 1 3×3 local neighbor of a 2D image.

計的決定理論的な手法でエッジの検出を行うものであるが、現実の画像に対するモデルの適合性には限界がある。

これらの手法のうち、(2)と(3)は、(1)と比べて計算量が大きく、その割にエッジ検出能力がきわめてすぐれているともいえない。この点は、膨大なデータを扱う 3D 画像処理では無視できないであろう。また、(2)の手法の 3D 画像への直接的拡張は理論的にかなり困難であると予想され、なんらかの制約をつけて拡張する場合にも各手法ごとに個別的工夫を要するので一般的な議論はむずかしい⁴⁾。

したがって、本論文では、(1)のオペレータについて検討することにする。すなわち、表1に示す 3×3 近傍を利用した 2D 局所差分型オペレータを、3×3×3 近傍を利用した 3D 局所差分型オペレータに拡張して、その能力の評価を行うことにする。

なお、表1の(4)、(5)、(7)は方向性がないが、その他の方向性のあるものについては、簡単のため、図1の上下方向にのびるエッジの検出を行う場合のみ

を示す。また、同表の(1)から(5)までは本質的には1次差分であり、その他は本質的には2次差分である。

以上のオペレータは、いずれも、2D 画像処理では頻繁に利用されるものであり、それらの特徴や性能もよく調べられている^{2),3),7),8),12)}。

2.2 3D エッジ検出オペレータの導出

2.2.1 基本的な考え方

前述のように、3D 画像では、局所近傍のパターン数が多いので、近傍として選ぶ点のとり方にも多様性が出てくる。そこで、以下のような方針で 3D 画像への拡張を行うことにした。

(1) 近傍のとり方：2D 画像における近傍(4近傍と8近傍)に対応して、3D 画像においては、6近傍、18近傍および26近傍がある¹⁾。したがって、3次元への拡張では、これら3種類の近傍のとり方に対するオペレータを具体的に作成しておく必要がある。このとき、当然のことながら、近傍の種類に応じて各オペレータの重み係数(計算の対象となる近傍点の入力濃度値に乘ぜられる係数)も調整する必要がある。

(2) 方向性：これは、オペレータ出力にエッジの方向の情報(濃度値分布曲面のグラディエント方向)を含めるかどうかということであり、方向性のあるものは、直交座標3方向の成分で表すのが普通である。3D 画像への拡張は、この方向性を考慮に入れると、以下のような種々の場合が考えられる。

- i) (2D, d)⇒(3D, d)⇒(3D, nd)
- ii) (2D, d)⇒(3D, nd)
- iii) (2D, nd)⇒(3D, d)⇒(3D, nd)
- iv) (2D, nd)⇒(3D, nd)

ただし、(kD, d)、(kD, nd)は、それぞれ、 k 次元方向性、 k 次元無方向性、を表す。

i)、iv)は、直接的拡張で考えやすいが、ii)、iii)は方向性がまったく逆転するので、その拡張はかなり発見的な手法によることになり、一般的な性能の予測はむずかしい⁵⁾。

そこで、本論文では、i)、iv)の場合のみについて考察する。なお、i)の場合の(3D, d)⇒(3D, nd)の変換、すなわち、3次元の無方向化の方法としては、以下の3種類を採用した。

$$i) \quad 2 \text{乗平均} \quad D = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2} \quad (1)$$

* (2D, nd)⇒(3D, d)の例としては、図2の*i*軸に垂直な3平面内で2Dラプラシアンを求め、それらの差分をとったものを C_{iii} に対応する位置の画素への出力とするようなものが考えられる。文献9)もこれに属する。

- ii) 絶対値の和 $D=|D_i|+|D_j|+|D_k|$ (2)
- iii) 最大絶対値 $D=\max\{|D_i|,|D_j|,|D_k|\}$ (3)

ただし、 D_i, D_j, D_k は、それぞれ、 i, j, k 軸方向の差分出力、 D は無方向化後の出力値を表す。

なお、実際の3D画像では、2次元平面(たとえば $x-y$ 平面)と残りの軸(z 軸)方向では画素の大きさ(分解能)が異なる(z 軸方向の標本化間隔が大きい)ことが多い。このときは、① $x-y$ 平面に平行な画像を適当に内挿する、② オペレータの重み係数

と無方向化のときの各方向成分の重みを適当に補正する、のいずれかを行う。①が無理なく行える限り、上記オペレータはそのまま適用できる。3.3節のCT像処理でも①を用いた。②の場合は上記オペレータを補正の基礎として利用する。補正そのものは容易である(文献5)にその一例がある。

2.2.2 3D局所差分型エッジ検出オペレータの導出

表1において、(1),(6)は3次元でも同じ形になり、(2)の拡張法は文献5)に示されている。また、表1の残りのものは前節の拡張の方針に基づいて、

表2 3D画像用のエッジ検出オペレータの重み係数
Table 2 Weights of edge operators for a 3D image.

C _{ijk}	1			2			3			方 向 性	連 結 性	次 数	線 形 性	記 号													
	i	j		k		l		m																			
オペレータ	k	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3											
単純1次差分														○	6	1	○	A									
超平面あてはめ型		-1	-1	-1	-1	-1	-1							1	1	1	1	1	○	18	1	○	F				
最適化型		α	α	α	α	α	α							γ	γ	γ	γ	γ	○	18	1	○	-				
Sobel		-1	-1	-2	-1	-1	-1							1	1	2	1	1	○	18	1	○	H				
局所最小値差分型		-1	-2	-1	-2	-3	-2	-1	-2	-1				1	2	1	2	3	2	1	2	1	○	26	1	○	I
レンジ差分型		☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	×	18	1	×	J				
		☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	×	26	1	×	K				
単純2次差分																			○	6	2	○	B				
																			×	6	2	○	C				
ラプラシアン																			×	18	2	○	D				
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	×	26	2	○	E

空欄の値は0である。
最適化型では、 $\alpha=-1/\sqrt{2}$, $\beta=-1/\sqrt{3}$, $\gamma=1/\sqrt{2}$, $\delta=1/\sqrt{3}$ である。局所最小値差分型は、☆印のなかの最小値を◎印の値から引いたものを出力とする。レンジ差分型は、☆印のなかの最大値と最小値の差を出力とする。

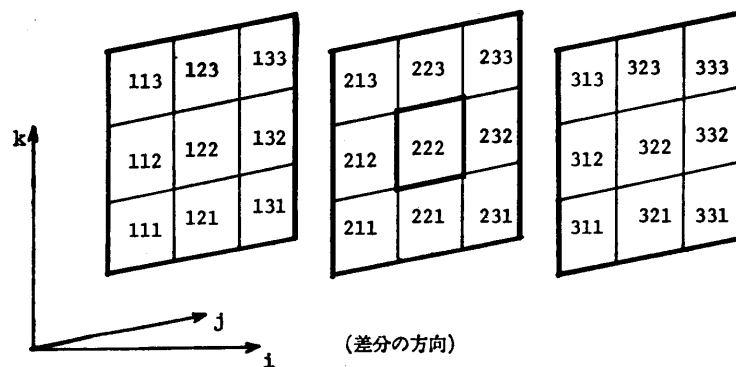


図2 3D画像の3x3x3局所近傍(図中の番号は、重み係数 C_{ijk} の添字 (ijk) の値を表す)。

Fig. 2 3*3*3 local neighbor of a 3D image.

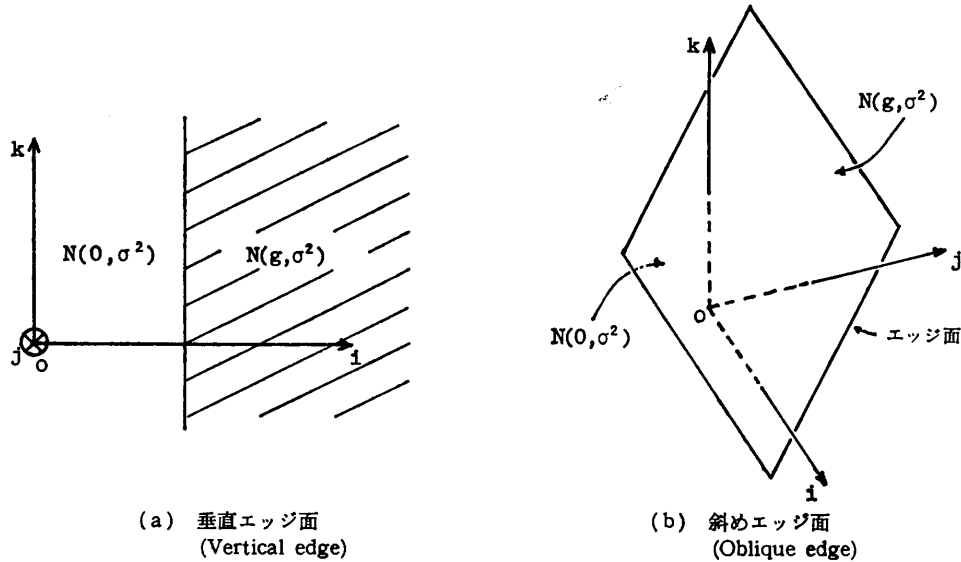


図3 3次元エッジモデル
Fig. 3 Three-dimensional edge models.

3D 画像用のオペレータを組織的に導出することができる。このほか、直接に3次元空間で導出された Zucker らのオペレータ⁴⁾ (以下最適化型とよぶ) も比較評価の対象とする。なお、Sobel のオペレータは、このオペレータの近似版ともみなされる。

導出された $3 \times 3 \times 3$ 近傍局所差分型エッジ検出オペレータを表2に示す。ただし、表中の係数 C_{ijk} は、図2の配置に従い、方向性のあるものは、 i 方向の差分 (i 軸に垂直に交わるエッジ面の検出) のための重み係数の配置を示す。

3. 3D エッジ検出オペレータの能力の評価

3.1 評価の方法

本節では、前章で導出した3Dエッジ検出オペレータの能力の評価の方法を述べる。2次元用のオペレータに対する比較研究は数多く行われており^{2), 3), 7), 12), 13)}, 文献2), 8) にその概要が述べられている。それらの結果を一概に述べることはむずかしいが、Prewitt の平面あてはめ型と Sobel のオペレータが比較的すぐれているようである。

さて、評価に用いるエッジモデルを図3に示す。(a)は一つの軸 (図では i 軸) に垂直なエッジ面 (垂直エッジ面)、(b)は3軸のすべてと同じ角度で交わるエッジ面 (斜めエッジ面) のモデルである。濃度値は、エッジ面の一方では正規分布 $N(0, \sigma^2)$ 、他方では $N(g, \sigma^2)$ (g, σ は、それぞれ、適当に決められた正の数) に従うとし、異なる画素の値は確率的に独

立であるとする*。

上記のエッジモデルに対する理論計算とシミュレーションの結果に基づいて、各オペレータの能力を評価した。このときの評価尺度としては、SN 比および計算時間を用いた。詳細を以下に示す。

(1) 理論計算 (エッジモデル: 垂直エッジ面のみ)

i) SN 比: 前節のモデルから、エッジの位置でのオペレータ出力 g_1 、および、エッジ以外の位置での出力 g_0 の確率分布を求め、それらの平均値を、それぞれ、 \bar{g}_1, \bar{g}_0 、標準偏差を σ_1 (g_1, g_0 に共通) とする。このとき、オペレータ出力の SN 比 r を以下の式で定義し、オペレータの評価尺度とする。

$$r = (\bar{g}_1 - \bar{g}_0) / \sigma_1 \quad (4)$$

ii) 計算時間: 各点の出力を計算するのに必要な基本演算 (加減乗除、最大 (小) 値選択) の回数と、各基本演算の所要時間 (相対値) から求める。このとき、各基本演算の時間は、加減算 1、乗算 1.6、除算 2.8、3個の数値の最大 (小) 値選択 2、の比率であるとする (MELCOM COSMO 800 III での実測値による)。

(2) シミュレーション (エッジモデル: 垂直エッジ面および斜めエッジ面)

i) SN 比: 正規乱数を用いて、エッジモデルを3次元配列内に作成し、エッジの位置とその他の位置

* 濃度値がエッジの一方では0、他方では g の画像に、平均値0、分散 σ^2 の一様な加法的ガウス雑音を加わったものとみてもよい。

での各オペレータの出力値を1,000回計算する。この結果の標本平均、標本標準偏差を式(4)の $\bar{\mu}$, σ , σ_1 に代入して SN 比 r を求める。

ii) 計算時間: 画素数 $20 \times 20 \times 20$ の3次元配列の画像データに対する実験の計算時間を利用する(使用計算機は MELCOM COSMO 800 III)。

なお、従来の2D エッジオペレータの評価は、エッジ抽出を「差分オペレータ+しきい値処理」によるエッジ点抽出過程とみなして、抽出された点の位置や個数に基づいている^{3), 12), 13)}。一方、本文では、エ

ッジ抽出を、たとえば「差分-しきい値処理-連結成分処理-細線化」のような複雑な手順と考へ、そのなかでの第一段の処理としての差分オペレータの能力を評価する。このとき、差分オペレータのもつべきおもな機能は、エッジ上(またはその近傍)とその他の場所との間の出力の差を極力大きくすること(エッジ部の強調)であり、その一つの目安として上記 SN 比を用いる。また、3D 画像処理特有のデータ量の膨大さから、計算時間も評価尺度の一つとする。

なお、レンジ差分型の出力、および、2.2.1 項で述

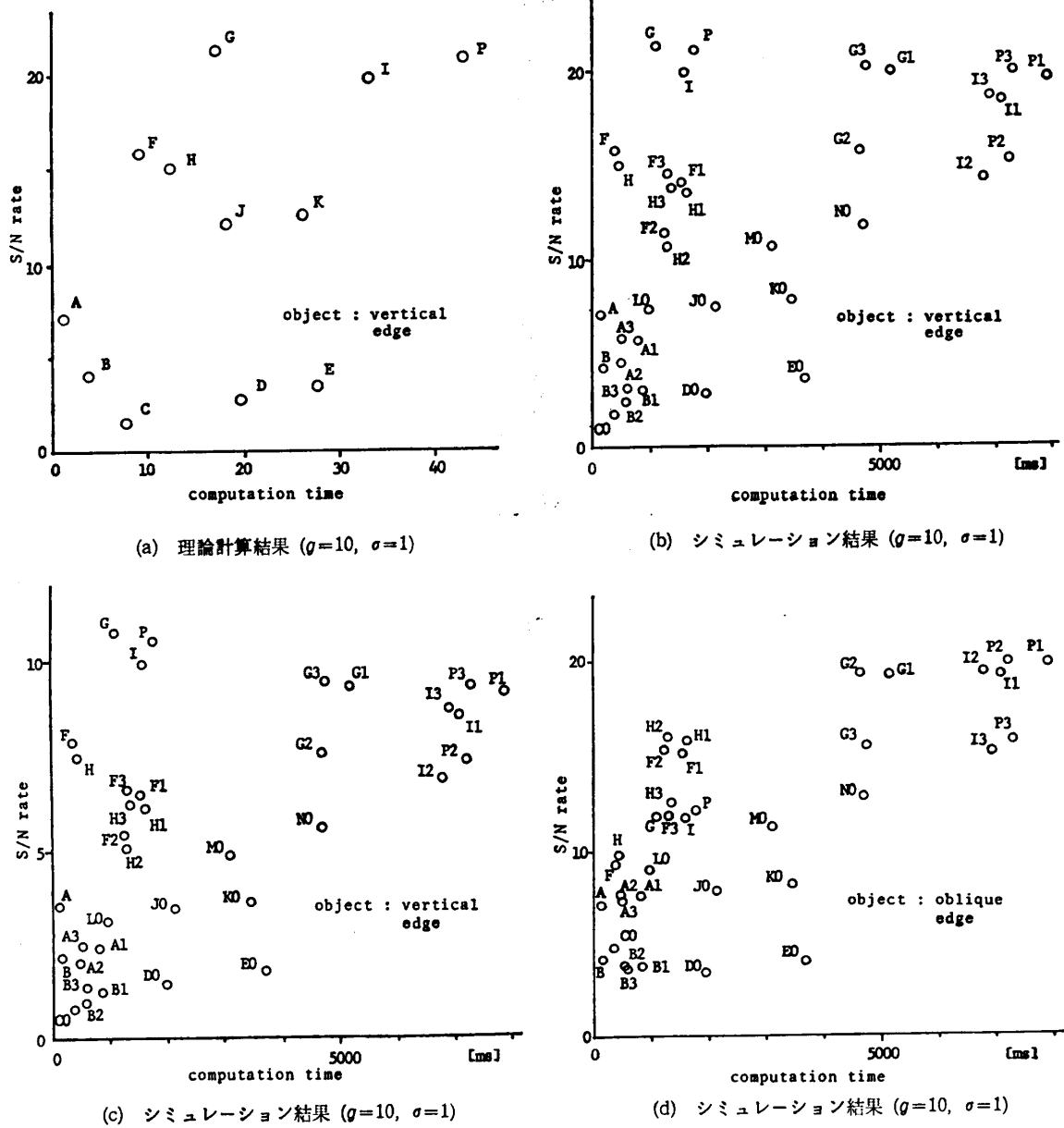


図4 エッジ検出オペレータの能力の評価結果
Fig. 4 Results of performance evaluation of edge operators.

べた無方向化処理を伴うオペレータ出力の場合には確率分布の理論計算が困難なので、シミュレーションによる評価のみを行った。また、局所最小値差分型の理論計算では、局所最小値の分布の決定には数値計算による近似値を用いた。

3.2 評価結果

前節の方法で評価した結果の一部を図4(a)から(d)に示す(詳細は文献10)参照)。図中の記号において英字の部分は、表2(2.2.2項参照)の記号欄のものと対応する。また、数字の部分は、それぞれ、本来無方向性であるものに0, 2乗平均(式(1))による無方向化の結果に1, 絶対値の和(式(2))による結果に2, 最大絶対値(式(3))による結果に3を付し、数字のないものは1方向成分のみの評価結果を示す。

これらの評価結果から以下のことがわかる。

(1) 理論計算とシミュレーションによるSN比の値がほぼ同じであることから、理論計算の結果は妥当なものであると思われる。一方、計算時間は、コンパイラの最適化機能や計算対象画素の位置計算などのオーバーヘッドにより多少相違が出ている。

(2) 垂直エッジ面と斜めエッジ面の結果を比較すると、無方向化処理を行ったもの以外は、ほぼ同様の傾向が現れている。

(3) 正規雑音の分散を変化させた場合、各オペレータの能力の相対的な関係はほぼ一定である。ただし、無方向化処理を行うと、分散の増加による劣化の割合が大きくなる傾向がみられる。したがって、グラディエントの方向(エッジの方向)を必要としない場合は、本来方向性のない無方向性エッジ検出オペレータの方がむしろ有効であると思われる。

(4) 2乗平均による無方向化は、各軸成分の強度の合成を忠実にやっているもので、原理的には最も妥当な無方向化の方法であると思われるが、計算時間が多くなる欠点をもつ。図4では計算時間にそれほど大きな差はでていないが、計算機の機種によって状況が変わる可能性がある。絶対値の和による無方向化処理では、エッジ強度が各軸方向に分散する斜めエッジ面に対しては大き目の値がでる。逆に、最大絶対値による無方向化処理では、絶対値の大きい成分にだけ左右されるので、斜めエッジ面に対しては小さ目の値がでる。これらの結果は、各手法の定義式から推測される傾向と一致する。

(5) SN比に関しては、2次差分型よりも1次差

分型のほうがよい結果を示した。これは、2次元の場合と同様に、高調波成分が強調される度合いが、1次差分型よりも2次差分型の方がより大きいことによる。

以上の議論を含めて総合的に評価すると、超平面あてはめ型、最適化型、および、Sobelのオペレータが比較的すぐれており、とくに、今回の実験の範囲では、超平面あてはめ型が最良の方法であることがわかる。

シミュレーションにおける計算時間に関しては、プログラムの書き方とコンパイラにある程度依存することは避けられない*。一般的には、各画素における出力のための計算量が大きいときは、Doループで記述したほうが見やすいが、計算時間は、定義式を直接書き下したほうが短くなる。また、オペレータG, Kは、2次元の場合と同様に、高速型アルゴリズムが可能であり¹¹⁾、オペレータGに対する高速型は、1方向のみで約0.6秒になる(図4では1.1秒)。これに対して、最適化型オペレータは、理論的定式化には興味深いものがあるが、重み係数が複雑で計算時間がかかる割に、性能は際立ってよいというわけではない。

なお、2次元の2×2近傍を用いるRobertsのオペレータ⁶⁾は、直接3次元には拡張できないことを注意しておく。これは、2×2×2近傍内に互いに直交する3個の画素対を選ぶことができないことによる。なお、文献9)は2次元Robertsオペレータの組合せを用いている。

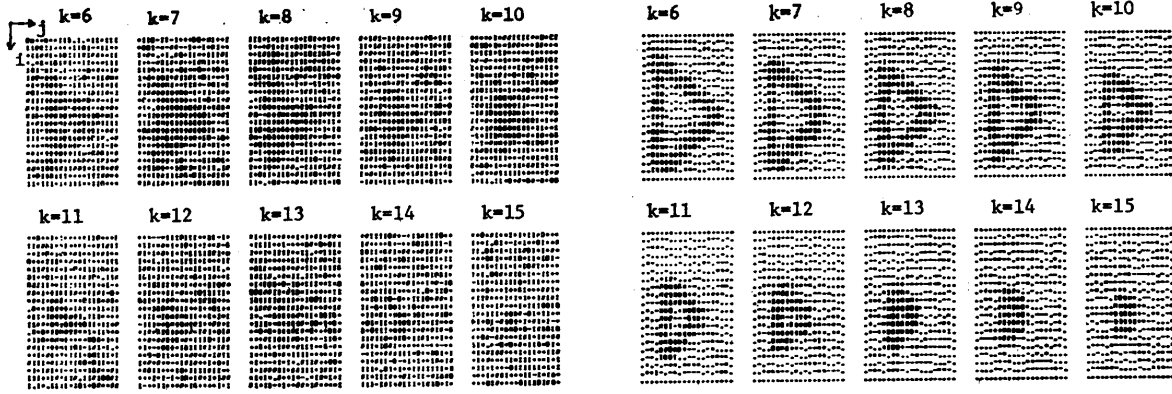
3.3 使用例

3.2節の結果を視覚的に確かめるために、人工図形(正4面体:内部は濃度10,外部は0.全体に平均値0,分散 2^2 の独立な加法的ガウス雑音を加える)に対してエッジ検出の実験を行った。図5に入力画像とオペレータ出力の一部を示す(詳細は文献10))。さらに、実際の頭部CT像における腫瘍部の輪郭面抽出にも適用した(この結果は紙面の制約のため本文では省略)¹⁰⁾。これらの実験結果はいずれも前節の結論を裏づけている。

4. むすび

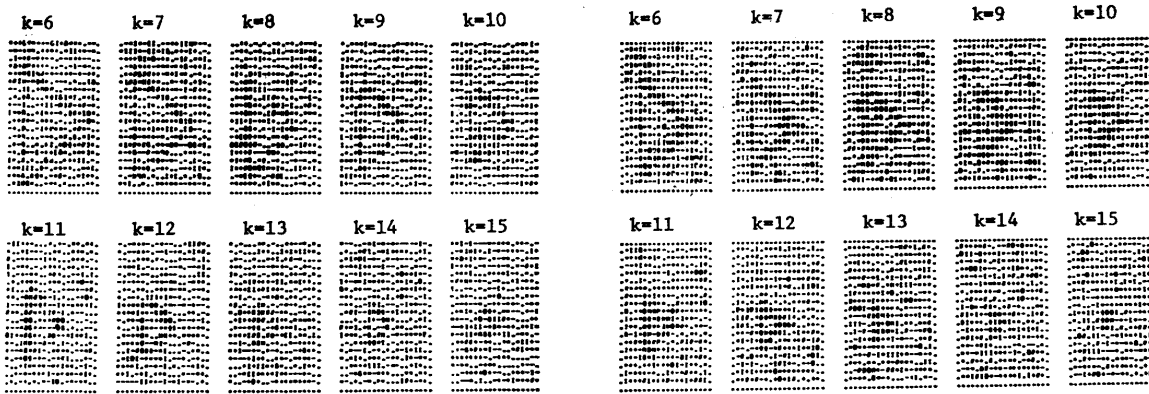
本論文では、まず、3D画像用のエッジ検出オペ

*たとえば、各画素におけるオペレータ出力の計算のためにDoループを用いてプログラム化する場合と、定義式をそのまま書き下す場合とでは、今回の実験では、後者が前者の約5割の計算時間に減少する場合があった。上記の実験では、2,3通りのFORTRANプログラムをつくって比較してある。



(a) 入力画像

(b) 出力 (超平面あてはめ型)



(c) 出力 (単純1次差分)

(d) 出力 (局所最小値差分型)

図5 使用例 (20×20×20画素の画像のうちk=6から15までの10枚だけを示す)

Fig. 5 Examples of applications.

レータ 16 種類の具体的な形を示し、次に、それらの能力を比較検討した。この結果、3D 画像上の差分によるエッジ検出オペレータとしては、2次元の場合と同様に、超平面あてはめ型、最適化型および Sobel のオペレータがよいことが知られた。

3次元画像の処理は、本質的に処理時間が長くなるため、本論文では、考察の対象を 3×3×3 近傍を用いた構造の簡単なものに限定した。本論文でとりあげたものは、いずれも、その構造が簡単であるため計算時間も少ない。また、上記三種のオペレータの能力は、シミュレーションや実際の画像に対する処理結果からも比較的すぐれていることがわかる。したがって、現在の計算機の制約を考慮に入れると、これらのオペレータが当面の3次元エッジ検出オペレータの基本となるとみてよいであろう。

3次元エッジ検出オペレータの性質の必要最小限のものは、本論文で明らかにされた。しかしながら、本論文の評価法のみで各オペレータの性能を最終的に決

めることはできない。たとえば、真のエッジの方向と検出されたエッジの強度や方向の関係^{3), 12)}、ステップ状ではなくてループ状のエッジに対する応答、なども評価する必要がある。また、3×3×3画素よりも大きい近傍を用いたオペレータや、さらに複雑な構造のオペレータについても調べる必要がある。ただし、近傍の大きさとともに可能な重み係数のとり方が急速に増し、計算時間も極端に大きくなっていくことに注意すべきである。

謝辞 本研究に関して熱心な討論、助言を賜った豊橋技術科学大学および名古屋大学の研究室の皆様へ深謝する。なお、本研究には名古屋大学大型計算機センターを利用した。また、本研究の一部は文部省科研費 (No. 56460105, No. 57380004) による。

参考文献

- 1) 米倉, 鳥脇, 横井, 福村: 3次元デジタル空間における図形の連結性とオイラー数, 信学論

- (D), Vol. J 65-D, No. 1, pp. 80-87 (1982).
- 2) 坂根, 田村: 画像処理アルゴリズムの概観(3) —エッジと線の検出—, 電総研集報, Vol. 44, No. 7, 8, pp. 464-483 (1980).
 - 3) Fram, J. R. and Deutsch, E. S.: On the Quantitative Evaluation of Edge Detection Schemes and Their Comparison with Human Performance, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-24, No. 6, pp. 616-627 (1975).
 - 4) Zucker, S. W. and Hummel, R. A.: A Three-Dimensional Edge Operator, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-3, No. 3, pp. 324-331 (1981).
 - 5) Morgenthaler, D. G. and Rosenfeld, A.: Multidimensional Edge Detection by Hypersurface Fitting, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-3, No. 4, pp. 482-486 (1981).
 - 6) Duda, R. O. and Hart, P. E.: *Pattern Recognition and Scene Analysis.*, pp. 267-272, Wiley-Interscience Pub., New York (1973).
 - 7) 羽鳥: X線写真の辺縁抽出, 情報処理, Vol. 20, No. 12, pp. 1089-1095 (1979).
 - 8) 長尾, 金出: パターン認識における縁・線の抽出, 信学誌, Vol. 55, No. 12, pp. 1618-1627 (1972).
 - 9) Liu, H. K.: Two- and Three-Dimensional Boundary Detection, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 6, pp. 123-134 (1977).
 - 10) 鳥脇: 高次元デジタル画像の構造解析に関する基礎的研究, 文部省科研費研究成果報告書 (No. 56460105) (1983).
 - 11) 鳥脇, 横井, 福村: 電子計算機による画像処理におけるフィルタリングのための高速アルゴリズム, 情報処理, Vol. 17, No. 3, pp. 215-221 (1976).
 - 12) Abdou, I. E. and Pratt, W. K.: Quantitative Design and Evaluation of Enhancement/Thresholding Edge Detectors, *Proc. IEEE*, Vol. 67, No. 5, pp. 753-763 (1979).
 - 13) 末永, 鳥脇, 福村: 濃淡図形処理のための差分形線形フィルタについて, 信学論, Vol. 57-D, No. 3, pp. 119-126 (1974).

(昭和 58 年 5 月 12 日受付)

(昭和 58 年 9 月 13 日採録)