

輪郭とエッジの一致尺度に基づく 高速な再帰的閾値決定法

河村 真 後藤 敏行 関口 隆
横浜国立大学工学部

〒240 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台156
横浜国立大学工学部

あらまし

輪郭とエッジの一致尺度は二値化の閾値決定に有効であるが、これを多段階閾値選択に拡張しようとする場合、第一の閾値処理により生成された輪郭が第二の閾値評価に影響を及ぼすという問題がある。本論文ではこの問題を回避し、再帰処理により高速に閾値を決定できる高速手法を提案する。閾値 T で二値化した時の輪郭が、最大値フィルタ処理画像濃度が T 以上かつ最小値フィルタ処理画像濃度が T 未満であることを利用し、再帰の各段階で各濃度に対する輪郭上のエッジの割合を推定、これに基づいて閾値を濃度レベル数の二乗のオーダーで決定することが可能になった。

和文キーワード 画像処理, 領域分割, 閾値, エッジ, 輪郭

High Speed Algorithm for Recursive Threshold Selection Based on Edge and Contour Evaluation

Makoto KAWAMURA Toshiyuki GOTOH Takashi SEKIGUCHI
Faculty of Engineering, Yokohama National University

Yokohama National University
Hodogaya-ward Yokohama-city 240 JAPAN

Abstract

This paper describes a high speed algorithm for recursive thresholds selection based on edge and contour evaluation. First we discuss the problem of extending the conventional method to a multiple thresholds selection. Then we discuss the condition of a pixel (x,y) which is on the contour of the image binarized by threshold T : $\text{Max}(x,y) \geq T$ and $\text{Min}(x,y) < T$, where $\text{Max}(x,y)$ and $\text{Min}(x,y)$ are the maximum and minimum filtered images. Based on this relation, all thresholds can recursively be determined using the two dimensional histogram of $l(x,y)$ and $m(x,y)$, with operations proportional only to the square of the maximum gray level.

英文 key words Image Processing : Threshold : Segmentation : Contour : Edge Detection

1. まえがき

領域分割の基本手法の一つに多段階閾値処理があり閾値選択の自動化も種々検討されている^{[1][2][3][4]}。その多くは濃度ヒストグラムの統計的な性質を基にしている。これらの方法は演算量が少ないという利点があるが、領域の境界において濃度が急変するといった画像の局所的な性質を利用していないために、小領域や影を含む画像に対しては必ずしも対象を正しく抽出できないという問題がある^[5]。

この問題に対して、濃度ヒストグラムと微分強度の併用が試みられ、微分の大きさを重みとして濃度ヒストグラムを算出する方法^[6]、エッジに限定して濃度ヒストグラムを算出し、そのピークを検出する方法^{[7][8]}、濃度と微分値の同時ヒストグラム上でピークを検出する方法^[9]などが検討された。これらの方法は微分値が大きい境界部分における濃度が望ましい閾値になるという考え方に基づいている。しかし、この方法には、画像が空間および濃度で量子化されていることにより濃度変化が急激な場所では画素毎の濃度の揺らぎが大きくなるという相反する影響があるため、必ずしも好ましい結果が得られないことが指摘されている^[5]。

このような画像の量子化の影響を回避し、かつ、エッジの情報を有効利用する方法として、閾値処理の結果として得られる領域の輪郭とエッジができるだけ一致するように閾値を選択する方法が提案された^[10]。この方法では、条件の悪い画像でも良好な結果が得られるが、すべての濃度を閾値として実際に閾値処理を行った後に一致度を計算するために、[画素数] × [濃度レベル数] のオーダーの膨大な演算量を必要とするという問題がある。これに類似した方法として、輪郭におけるコントラスト [隣接画素間の濃度差] の平均値を評価する方法も提案された^[5]。この方法では閾値処理を実行する必要はないが、すべての閾値に対して画素毎に輪郭であるかどうかの判断とコントラストの評価が必要となり、演算量はやはり [画素数] × [濃度レベル数] に比例することになる。

一方、鳥生らは二値化の閾値選択においてエッジの情報を利用して最適な閾値を濃度レベル数に比例する演算量で選択できる方法を提案した^[11]。この方法は、ある閾値で二値化したときの輪郭画素とエッジ画素の一致度を評価値とし、これを最大にする閾値を決定するものである。この方法では、演算量を削減するために、二値化した後に収縮フィルタを施した結果が最小値フィルタを施した後に二値化した結果と等価であることに着目することによって、原画像の累積ヒストグラムと最小値フィルタ処理後の累積ヒストグラムの差をとるだけで、実際に二値化することなく閾値毎に輪郭である画素の数を推定できる。

輪郭とエッジの一致度を評価尺度とする方法は二値化の閾値決定に有効であり、かつ演算量の面でも改善が加えられたが、この手法を多段階閾値選択に拡張しようとする場合に問題が生じる。具体的には、次章で詳しく述べるように、輪郭やエッジ検出のオペレータが面積を持っているために、第一の閾値処理の結果として生成された輪郭が第二以降の閾値評

価に影響を及ぼし、そのために、単純に評価値のピークを大きいほうから順次検出するだけでは適切な閾値が求められないという問題である。

本論文では、輪郭とエッジに基づく評価尺度を多段階閾値選択に適用する際の問題点について議論するとともに、この問題を回避し、しかも濃度レベル数の二乗の演算量ですべての閾値を決定できる高速アルゴリズムを提案する。

2. 多段階閾値決定における問題

2.1. 各段階の評価値の干渉

再帰的閾値決定に、輪郭とエッジの一致度を適用する場合の問題は、単純に評価値のピークを大きいほうから順次検出するだけでは適切な閾値が求まらないことである。ここでは、図1(a)のような一次元画像に対して、閾値を t としたときの輪郭とエッジの一致度

$$E(t) = \frac{[\text{エッジかつ輪郭である画素数}]}{[\text{輪郭である画素数}]} \quad \dots \text{式(1)}$$

を評価尺度として、閾値を決定する場合について考える。

図1(a)の画像を閾値 T_1 によって二値化した場合、それによって生成される輪郭は明確なステップ状のエッジ部分に合致するため、対応する図1(b)の T_1 における評価値は非常に高い値をとる。一方閾値 T_2 による輪郭は明確なエッジ部分とならぬエッジ部分の両方に合致するため、図1(b)における総合的な T_2 の評価値は T_1 よりも低い値をとる。したがって、このような画像における濃度レベル t に対する評価値 $E(t)$ は、図1(b)に示すような、単峰性の形状となる。この結果、画像全体から算出した評価値の極大位置から閾値を決定しようとすると、領域の外側の部分を抽出するために適した閾値は求まるが、内側の部分は検出できないという問題がある。

この問題を回避するための方法の一つとして、第一の閾値処理の結果に基づいてマスク画像を生成し、それを用いて第二の閾値決定を行う方法が考えられる。具体的には、図2(a)に示すように、第一の閾値でできた領域から輪郭部分を除外した画像をマスクとして、その内部で閾値を決定して行く方法である。これによって、図2(b)に示すように第一の閾値処理の影響を回避した評価値が算出でき、第二の閾値を正当に評価できることになる。

しかし、この方法をそのまま適用した場合、閾値決定のたびに、マスク画像の生成、縮退処理、閾値処理などの画像処理を繰り返すことが必要となり、演算量が膨大になるという新たな問題が生じる。

2.2. 輪郭とエッジの位置関係について

一般のエッジ検出オペレータと輪郭抽出オペレータの出力を比較する際の問題は、エッジの位置と輪郭の位置が必ずしも一致しないという点である。図3(a)のようなほぼステップ状の濃度変化を持つ領域に対して、エッジ検出として 3×3 のSobelのオペレータを用い、輪郭抽出として背景に隣接する領域上の画素を抽出した結果を図3(b)に示す。同図では、○が輪郭の画素、●がエッジの画素を示している。検出

されたエッジは領域と背景にわたる2画素の幅となり、輪郭は領域上の1画素幅の線となる。第一の閾値決定の後に、輪郭と一致したエッジを削除したとしても、残りの部分が第二以降の閾値評価に影響を及ぼすことになる。また、図3(c)は右下を注目画素とする2x2のSobelのオペレータを用いてエッジ検出した結果である。この場合には、検出されるエッジの幅は1画素となるが、輪郭とエッジの位置が一致しないという問題がある。

3. エッジと輪郭の定義

図4に本手法におけるエッジと輪郭の定義を示す。原画像を縦横に配列した正方形画素の集合と考える。ここではその各正方形画素の頂点である格子点を注目点とし、その格子点に隣接する4画素を処理範囲とした2x2のオペレータを考える。各格子点の座標は、便宜上その格子点を左上の頂点として持つ正方形画素の座標で表す。したがって座標(i, j)で表される格子点を注目点を持つオペレータの処理範囲は座標(i-1, j-1), (i, j-1), (i-1, j), (i, j)で表される4画素となる。

座標(i, j)の格子点におけるエッジ強度Edge(i, j)は、その格子点におけるx, y方向の二次元のエッジ強度ベクトルの大きさとして次の式で定義する。

$$\text{Edge}(i,j) = \sqrt{E_x^2(i,j) + E_y^2(i,j)} \quad \dots \text{式}(2)$$

ただし

$$E_x(i,j) = -g(i-1, j-1) + g(i, j-1) - g(i-1, j) + g(i, j)$$

$$E_y(i,j) = -g(i-1, j-1) - g(i, j-1) + g(i-1, j) + g(i, j)$$

ここでg(i, j)を原画像の画素(i, j)の濃度とする。

次に輪郭の定義であるが、格子点(i, j)が閾値Tで二値化したときの輪郭を構成する条件は、格子点(i, j)に隣接する4つの画素、(i-1, j-1), (i, j-1), (i-1, j), (i, j)のうち、少なくとも一画素が背景に、また少なくとも一画素が領域に属することである。このことから、この4画素の濃度をそれぞれg₁, g₂, g₃, g₄で表すと、

$$g \geq T, \exists g \in \{g_1, g_2, g_3, g_4\} \quad \dots \text{式}(3)$$

かつ

$$g < T, \exists g \in \{g_1, g_2, g_3, g_4\} \quad \dots \text{式}(4)$$

となり、これが、閾値Tで二値化したときに輪郭を構成する格子点(i, j)の定義となる。

4. 多段階閾値決定アルゴリズム

4.1. 本手法で用いる評価関数の定義

本手法では式(1)に示すエッジと輪郭の一致度を評価基準として閾値を決定する。ただし、ここではエッジと輪郭の注目点を前章で述べたように画素ではなく格子点と定義したので、評価値を表す式(1)を次式(5)のように再定義する必要がある。

$$E(t) = \frac{\text{エッジかつ輪郭である格子点}}{\text{輪郭である格子点数}} \quad \dots \text{式}(5)$$

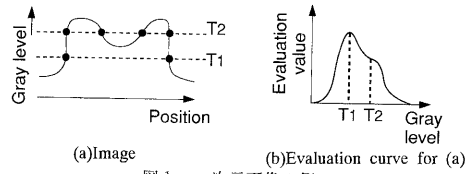


図1 一次元画像の例
Fig.1 A sample image

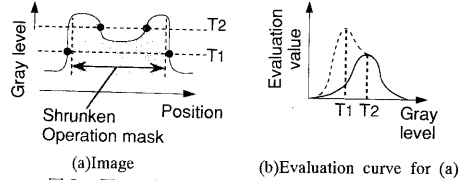


図2 図1に処理範囲マスクを適用した場合
Fig.2 Sample image and shrunken operation mask

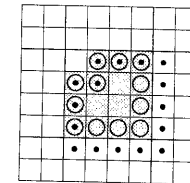
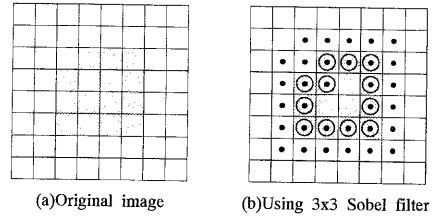


図3 エッジと輪郭の不一致
Fig.3 Incomplete matching between edge and contour pixels

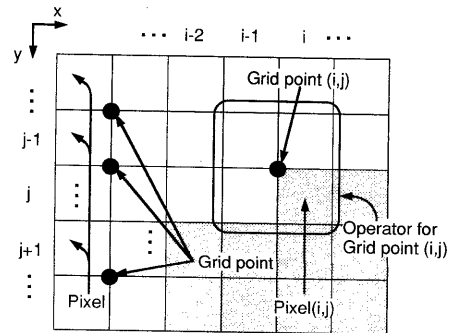


図4 本論文におけるエッジ・輪郭抽出のオペレータ
Fig.4 Operator for edge and contour detection used in this paper

次に、上記の評価関数を高速に求める方法を考える。

4. 2. 最大値・最小値フィルタを用いた輪郭格子点の判定

式(3)は、隣接4画素のうちいずれかの画素の濃度がT以上であることを表す。これは隣接4画素の濃度のうち最大濃度を持つ画素の濃度がT以上であることと等価である。したがって式(3)は次式(6)と等価となる。

$$\max \{g_1, g_2, g_3, g_4\} \geq T \quad \dots \text{式(6)}$$

同様に式(4)も次式(7)に等価である。

$$\min \{g_1, g_2, g_3, g_4\} < T \quad \dots \text{式(7)}$$

式(6)および式(7)で格子点の輪郭条件が表されることを利用すれば、各格子点の周囲4画素を処理マスクとする最大値フィルタ画像、最小値フィルタ画像をあらかじめ作成することにより、閾値Tで輪郭となる各格子点が、実際の閾値処理なしに判定できる。

すなわち、各格子点の図4のオペレータで示される周囲4画素の濃度の最大値および最小値を与えるフィルタの2つの出力画像Max(i, j)およびMin(i, j)を用いて、格子点が閾値Tで二値化したときに輪郭となる条件を、次式で表すことができる。

$$\text{Max}(i,j) \geq T \text{ かつ } \text{Min}(i,j) < T \quad \dots \text{式(8)}$$

4. 3. 高速な輪郭点数算出

画像全体で輪郭となる格子点数を高速に算出するために、図5に示すような二次元濃度ヒストグラムを利用する。図5において、縦軸は最小値フィルタ画像の濃度、横軸は最大値フィルタ画像の濃度であり、ヒストグラム上の各点には、その点に対応する最小値フィルタ画像と最大値フィルタ出力画像の濃度を持つ格子点の数が表れる。すべての格子点において、最小値フィルタ画像の濃度が最大値フィルタ画像の濃度を上回ることはないため、二次元濃度ヒストグラム状のL<mで表される左上の三角状の部分は0の値をとることになる。

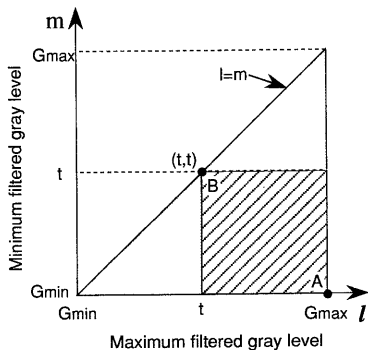


図5 二次元濃度ヒストグラム
Fig.5 2D histogram

閾値tで二値化されたときに輪郭となる格子点の数C(t)を求めるには、図5の上で式(8)に対応する部分(斜線部分)についてヒストグラムの値を累積すればよい。すなわちこの二次元濃度ヒストグラムをh(l, m)とすれば、

$$C(t) = \sum_{t \leq l, m < t} h(l, m) \quad \dots \text{式(9)}$$

となる。

さらに計算を高速に行うために図5の二次元濃度ヒストグラムから、これを下から上方向、右から左方向へ2度累積した二次元累積濃度ヒストグラムを生成する。これにより、任意の点Bを左上の頂点、A点を右下の頂点に持つ長方形部分の累積値が、二次元累積濃度ヒストグラムの点Bにあらわれることになる。このことより、生成された二次元累積濃度ヒストグラムの値をH(l, m)とすれば、式(9)は次式(10)に書き換えることができる。

$$C(t) = H(t, t-1) \quad \dots \text{式(10)}$$

したがって処理画像に対してあらかじめ二次元累積濃度ヒストグラムを求めれば、あらゆる閾値に対する輪郭点数をその二次元累積濃度ヒストグラムへの値の参照だけで算出できることになる。

4. 4. エッジかつ輪郭である格子点数の算出

〔輪郭である格子点数〕の高速算出手法については前節で述べた。式(5)の評価関数のもう一つのパラメータである〔エッジかつ輪郭である格子点数〕についても、エッジ部分だけに処理範囲を限定して二次元累積濃度ヒストグラムを作成することにより前節と同様の手順で算出できる。

すなわち、閾値tにおけるエッジかつ輪郭である格子点の数Ce(t)は、エッジ領域のみに処理範囲が限定された二次元累積濃度ヒストグラム上の値He(l, m)を用いて、

$$C_e(t) = H_e(t, t-1) \quad \dots \text{式(11)}$$

で計算される。

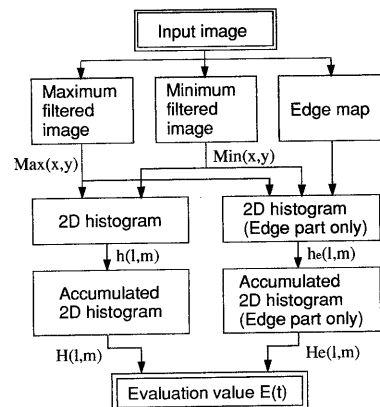


図6 評価値算出の処理のフロー
Fig.6 Flow chart for calculation of E(t)

こうして求められた2つの関数 $C(t)$ 、 $C_e(t)$ から式(5)により評価関数 $E(t)$ を算出する。図6に評価関数算出の処理の流れを示す。

4. 5. 再帰処理時の前段の輪郭の影響の回避

次に多段階再帰的閾値決定で問題となっていた、前段までに決定した閾値による輪郭の影響を回避する手法について説明する。

まず、第一段階目の評価で閾値 T_1 が決定されたとする。この閾値 T_1 によってできる輪郭格子点数は図7の二次元濃度ヒストグラム上の部分C ($1 \geq T_1, m < T_1$)に存在する格子点数である。

T_1 決定後の段階では、最小濃度 G_{min} から T_1 まで、 T_1 から最大濃度 G_{max} までの2つの濃度範囲で、第二段目の閾値 T_{21} 、 T_{22} を決定する。 T_{21} で二値化したときの輪郭を構成する格子点は、図7の中の部分D ($m \geq T_{21}, l < T_{21}$)で表されるが、このうちDとCが重なる部分であるEに存在する格子点は、閾値 T_1 で二値化したときに輪郭を構成する格子点でもある。したがって、Dの部分からEの部分を除いたFの部分に累積範囲とすれば、 T_1 による輪郭となる格子点の影響を排除して T_{21} の評価値を正當に算出できることになる。すなわち、このときの輪郭点数 $C(T_{21}; T_1)$ は、

$$C(T_{21}; T_1) = \sum_{T_{21} \leq l < T_1, m < T_{21}} h(l, m) \quad \dots \text{式(12)}$$

で表される。 T_{21} を決定するには、濃度範囲 $G_{min} \leq t < T_1$ について式(12)に基づいて $C(t; T_1)$ を算出、エッジかつ輪郭である格子点数についても同様に $C_e(t; T_1)$ を算出し、 $C(t; T_1)$ と $C_e(t; T_1)$ から評価関数 $E(t; T_1)$ を求める。この $E(t; T_1)$ を最大とする t を T_{21} と決定すればよい。

T_1 から G_{max} までの間で決定される T_{22} や第三段目以降の閾値決定に関しても同様に、すでに決定されている閾値に対応する部分を処理範囲から除外して計算を行えばよい。

2つの決定した閾値 T_a 、 T_b の間で新たな閾値を決定する場合、 T_a 、 T_b の影響を除いた閾値 t の輪郭点数 $C(t; T_a, T_b)$ は、図8のXの部分の累積であるから、次のようになる。

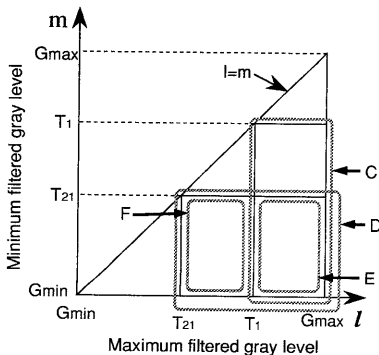


図7 二次元濃度ヒストグラムにおける再帰的閾値決定
Fig.7 Recursive threshold selection on 2D histogram

$$C(t; T_a, T_b) = \sum_{T_a \leq m < t, t \leq l < T_b} h(l, m) \quad \dots \text{式(13)}$$

式(13)は、さらに次式のように変形できる。

$$\begin{aligned} C(t; T_a, T_b) &= \sum_{t \leq l < T_b, T_a \leq m < t} h(l, m) \\ &= \sum_{t \leq l, m < t} h(l, m) - \sum_{T_b \leq l, m < t} h(l, m) \\ &\quad - \sum_{t \leq l, m < T_a} h(l, m) + \sum_{T_b \leq l, m < T_a} h(l, m) \\ &= H(t, t-1) - H(T_b, t-1) - H(t, T_a-1) + H(T_b, T_a-1) \end{aligned} \quad \dots \text{式(14)}$$

この結果より、あらかじめ一回だけ求めた二次元累積濃度ヒストグラムの4点P、Q、R、Sの値の加減算で任意の長方形部分の累積値が求められるため、前段までに決定した閾値の影響を排除しながら、評価値を高速に算出できる。

5. 処理アルゴリズム

上記の手法に基いた多段階閾値処理全体の流れを図9に示す。

まず原画像に対して第3章で述べたようなオペレータを持つ最大値フィルタ・最小値フィルタを施し、二次元累積濃度ヒストグラムを作成する。同様に 2×2 の一次微分フィルタを原画像に施し、その大きさがある閾値 E_t 以上になる格子点についてのエッジマップを作成し、このエッジマップに基づいて、エッジ領域のみの二次元累積濃度ヒストグラムを作成する。(閾値 E_t については後で考察する。)なお、エッジマップ作成の際にエッジ強度の尾根点とピーク点を検出することによるエッジマップの細線化^[12]を行っている。

第一段目の閾値決定部では処理範囲を最小濃度 G_{min} から最大濃度 G_{max} までとし、二枚のヒストグラム $H(l, m)$ 、 $H_e(l, m)$ から評価値を算出、第一段階目の閾値を決定する。その後、第一段目の閾値決定部は、図9のように処理濃度範囲として自分に与えられた G_{min} 、 G_{max} と決定した閾値 T_1 を、第二段目の閾値決定部の処理濃度範囲として引き渡し、再帰的に閾値を決定していく。

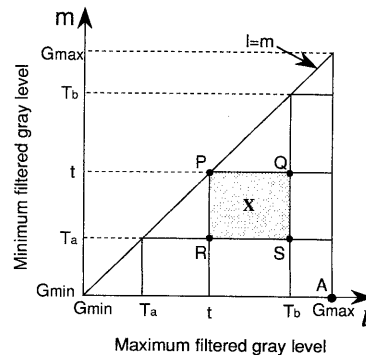


図8 二次元累積濃度ヒストグラム上での評価値の計算
Fig.8 Easy calculation on accumulated 2D histogram

6. 実験結果

図10に実験に用いた原画像、SIDBAの`home4g` (800×600画素・256階調)を示す。図11に原画像に対するエッジマップを示す。この画像に対してエッジ閾値 $E_t=17$ で本手法を適用した結果、図12(a)~(d)で示すような評価関数が得られた。図12において(a)(b)(c)(d)はそれぞれ再帰処理の第一、第二、第三、第四段階での評価関数を示している。各段階で評価関数が最大の高さを持つピーク点をその段階の閾値として決定していった結果、第一段階で141、第二段階で87と225、第三段階で114と147の、計5つの閾値が決定された。

なお、本実験では、評価値が一定値(0.2)未満であることを再帰処理の終了条件としているため、第4段階目の閾値選択で計算を終了している。図12からわかるように、各段階の評価関数は、前段までに決定された閾値の影響が除去されることにより順次形状が変化していく。

求まった5つの閾値による二値化画像を図13(a)~(e)に示す。(a)~(e)を図11のエッジマップと比較すると、適切な領域に分割されていることがわかる。

7. 考察

本手法には、先験的に与えるパラメータとして、エッジ検出の閾値 E_t が存在する。ここではこのエッジ閾値に対する処理結果の安定性について考察する。

エッジ閾値 E_t を変化させた場合、図10の画像に対して、決定された閾値を図14に示す。同図では縦軸にエッジ閾値 E_t 、横軸に決定された濃度の閾値をとっている。 E_t が小さくなるにつれて、求まった閾値の数が増加するのは、エッジとみなされる格子点の数が増加し、評価値が全体的に高くなることに起因する。

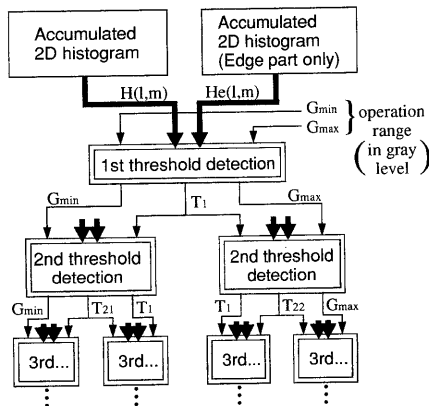


図9 全体の処理のフロー
Fig.9 Flow chart for whole operation

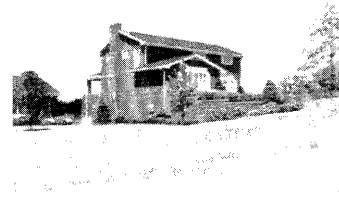
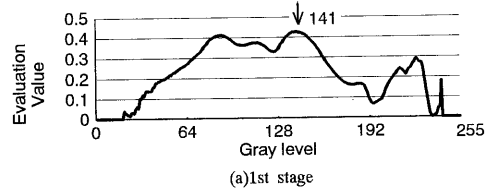


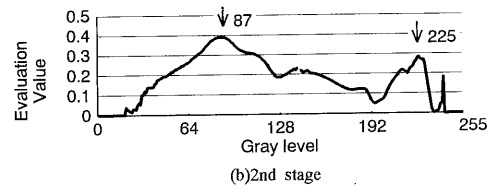
図10 原画像
Fig.10 An input image



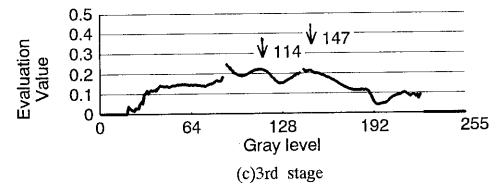
図11 エッジマップ
Fig.11 Edge map of input image



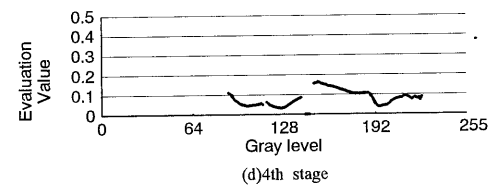
(a)1st stage



(b)2nd stage



(c)3rd stage



(d)4th stage

図12 評価関数の変化
Fig.12 Evaluation curve in each stage of recursive threshold detection



(a)By threshold 87



(b)By threshold 114



(c)By threshold 141



(d)By threshold 147



(e)By threshold 225

図13 処理結果
Fig.13 Binarized images by calculated thresholds

図14に見られる通り、決定された閾値は垂直線状に分布しており、これはエッジ閾値 E_i に対して、決定された濃度の閾値が変化しないこと、すなわち処理が比較的安定であることを示している。

しかし、エッジ検出の閾値 E_i の変化にともなって、検出される濃度の閾値の数も変化する。これに対して究極的にはエッジ閾値の決定についての自動化が望まれる。これについては、本手法の拡張により原理的には対応可能であるが、その場合、最大値フィルタ処理画像の濃度、最小値フィルタ処理画像の濃度およびエッジ強度を軸とする三次元ヒストグラムを考える必要があり、閾値決定のための演算量は濃度数の三乗のオーダーとなる。

濃度の閾値に加えて、エッジ検出の閾値も同時に高速決定できる手法の実現が今後の課題である。

8. まとめ

本論文では、輪郭とエッジの一致度を評価尺度として、再帰処理に基づいて高速に閾値を決定する手法について述べた。

輪郭とエッジの一致度を適用する方法を多段階閾値選択に拡張しようとする場合、輪郭やエッジ検出のオペレータが面積を持っているために、第一の閾値処理の結果として生成された輪郭が、第二の閾値評価の際に影響を及ぼすという問題がある。この問題を回避するために、第一の閾値処理の結果に基づいてマスク画像を生成し、それに基づいて第二の閾値決定を行う方法も考えられる。しかし、この方法を単純に適用した場合、閾値決定のたびに、マスク画像の生成、縮退処理、閾値決定、閾値処理を繰り返すこととなり、演算量が膨大になるという問題が生じる。

これに対して、筆者らは閾値 T で二値化したときに輪郭となる格子点は、周囲4画素をオペレータとする最大値フィルタ処理画像の濃度が T 以上かつ最小値フィルタ処理画像の濃度が T 未満であるという条件を満たすということを利用して、

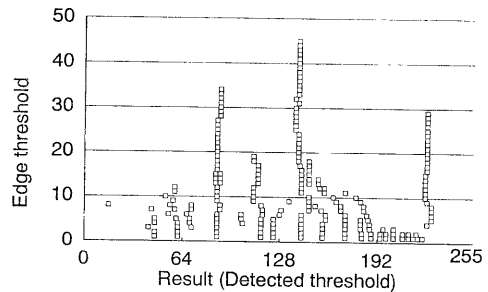


図14 エッジ閾値に対する処理結果の安定性
Fig.14 Stability of result on different edge threshold

再帰の各段階で、各濃度に対する輪郭上のエッジの割合を推定し、これに基づいて閾値を高速に決定できる手法を提案した。本手法を用いることにより、再帰処理の各段階において、実際の画像処理を行うことなく、最大値フィルタ処理画像と最小値フィルタ処理画像から二次元ヒストグラムを一回だけ算出すれば、これに基づいて各段階の適切な閾値を濃度レベル数の二乗のオーダーで決定することができるようになった。

本手法は、エッジマップを与えて濃度に対する閾値を自動決定するものであるが、次に問題となるのは、エッジ検出の閾値をいかに決定するかということである。この問題に対しても、本手法の拡張により原理的には対応可能であるが、その演算量は濃度レベル数の三乗のオーダーとなる。濃度の閾値に加えて、エッジ検出の閾値も同時に決定するための高速手法の実現は今後の課題である。

参考文献

- [1]P. K. Sahoo, S. Soltani and A. K. C. Wong : "A Survey of Thresholding Techniques", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 41, pp. 233-260(1988).
- [2]大津展之 : "判別および最小二乗基準に基づく自動閾値選定法", *信学論(D)*, J63-43, 4, pp. 349-356(1980).
- [3]J. M. S. Prewitt and M. L. Mendhelson : "The analysis of cell images", *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 128, pp. 1035-1053(1966).
- [4]J. Kittler and J. Illingworth : "Minimum error thresholding", *Pattern Recognition*, 19, 1, pp. 41-47(1986).
- [5]R. Kohler : "A segmentation system based on thresholding", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 15, pp. 233-260(1979).
- [6]S. Watanabe and the CYBEST group : "An automated apparatus for cancer processing CYBEST", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 7, pp. 259-265(1974).
- [7]Y. H. Katz : "Pattern recognition of meteorological satellite cloud photography", *Proceedings, 3rd Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 173-214(1965).
- [8]J. S. Weszka, R. N. Nagel and A. Rosenfeld : "A threshold selection technique", *IEEE Trans. Computers C-23*, pp. 1322-1326(1974).
- [9]D. L. Milgram and M. Herman : "Clustering edge values for threshold selection", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 10, pp. 272-280(1979).
- [10]D. L. Milgram and D. J. Kahl : "Region Extraction Using Convergent Evidence", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 11, pp. 1-12(1979).
- [11]鳥生隆, 岩瀬洋道, 後藤敏行 : "最小値フィルタを利用した2値化の閾値選定法", *信学論*, J72-D-II, pp.1800-1806(1989).
- [12]鳥脇純一郎 : "画像理解のためのデジタル画像処理 [II]", 昭晃堂(1983).