



局所並列演算による濃淡図形の縁の線画化*

藤村 是明**

Abstract

Edge extraction is one of the most important and fundamental technique in picture processing. A number of methods, based on different concepts, have been proposed. But simple methods depend too heavily on a priori knowledge of the input and the all-round methods are often unreal.

This paper presents a method which extracts edges by a finite sequence of local parallel operations. The main concept of extracting edge points is to select a point whose edge value is maximum on two or more of the four directions crossing at that point. This technique is very sensitive to noise, especially in rather flat area. To remove this defect, the noise level is estimated using the least square linear approximation and used to modify the edge value obtained by a simple method.

The characteristics of the method are studied using the natural patterns and the artificial one.

1. はじめに

濃淡図形から線を抽出することは図形処理の諸技術のうちでもとくに重要なものの一つであり、これまでも文献¹⁾に挙げられているように多くの手法が提案されている。しかし現在のところ、簡潔な方法では対象の性質の暗黙の仮定により処理可能な範囲が狭く、一方汎用性の高いと称される方法ではその適用条件が厳しく、実行の上でもはなはだ高価につくことが多い。

本論文では並列処理装置化の可能性の大きい局所並列演算を処理の中心におく。ここでいう局所並列演算とは、比較的小さな入力領域をもつ同一ユニットの空間的並列配置によってなされるような演算である。また対象図形のほかに与える先験的情報の使用を最小限にすることも重点をおく。

濃淡図形の線画化は一般に

- (1) 線画化したい特徴(この場合では縁)の強度を各点について求める。
- (2) (1)で得られた特徴から線図形を抽出する。

という二段階に分けられる²⁾。

(2)の線画抽出を局所並列演算によって行う方法としては、水平垂直2方向のいずれかで、中央の点が極大となっている点を基本とする方法がこれまで行われている^{3),4)}。しかしこの方法では等方性に欠けるので、本論文では斜め2方向も加えた4方向のうち2方向以上が中央極大となっているような点を基本とすることによって等方性を持たせることにした。

2.ではこの4方向による線画点検出を取り入れた線画化方式の全過程を具体的に記述して全体の関連を明らかにする。

3.では2.で述べた方式の各段階の検討を行う。すなわち先に述べた線画点検出を2方向で行ったときと4方向で行ったときの差と、雑音による誤応答を減らす

* Edge extraction using local parallel operations by Koreaki FUJIMURA (Information systems section, Computer Science Division, Electrotechnical Laboratory)

** 電子技術総合研究所ソフトウェア部情報システム研究室

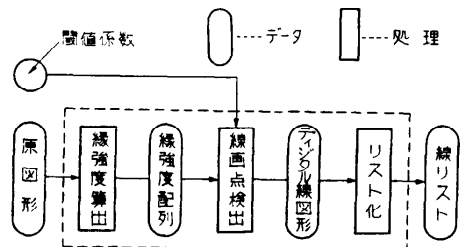


Fig. 1 The total process

ために導入している閾値の設定の当否について論じる。

4. では 3. での考察に基づいて雑音レベルの変動に自動的に適応する方法を考える。まず原図形の明度を局所的に一次式で最小二乗近似したときの誤差を雑音とみなし、縁強度の算出法の補正に使用する。これを先に述べた 4 方向極大判定による尾根点検出と組み合わせ、雑音による誤った線の出現率を一定にし、等方性のある縁の線画化方式を完成させ、実験によってその妥当性を確認する。

2. 縁の線画化の具体例

本章では縁の線画化方式の一例⁶⁾について具体的に記述し全体的な関連を明らかにする。この方式は Fig. 1 に示すように、入力原図形と制御パラメータとしての閾値係数であり、出力は線リストである。処理は、縁強度検出、線画点検出、線分化の 3 段階に分かれ、前 2 段階の出力する中間出力をそれぞれ縁強度配列、デジタル線図形と呼ぶ。縁強度検出、線画点検出はそれぞれ 2 段、4 段の局所並列演算から成り立っているが、線分化は局所並列演算ではない。全体および各段処理の概要を示すため、各処理の説明に先立ち、Fig. 2 に原図形、縁強度配列、デジタル線図形の一部および線リストの図形的表現を示す*。

以下とくに断わらないかぎり、各出力例は 128×128 点、256 レベルのデータについて行われたものである。また 3×3 近傍内での演算の記述の便のために、Fig. 3(a), (b) のように、各点の相対的な位置を表わすことがある。

2.1 縁強度とその算出法

本論文で処理の対象とする縁とは濃淡図形中の部分領域の輪郭に相当する部分で、段差(ステップ)がその特徴である。縁らしさを量にするのにも多くの方法があるが¹⁾、本章ではその中から下記のように 2 ステップからなる一次微分に基づく方法を選択した。

* 濃淡図表示はすべて文献⁷⁾の条件確率法を用い、2×2 ドット/画素で表示している。このため表示上では雑音のようなものが見られるが、これは本文中で後述する雑音とは別のものである。

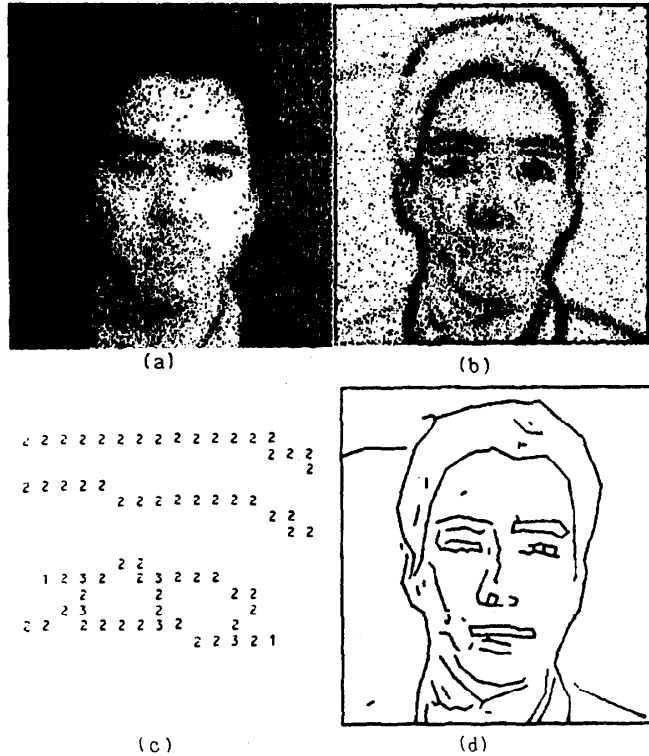


Fig. 2 Data contents

- (a) Original brightness
- (b) Edge values
- (c) Digital lines (the right eye)
- (d) Extracted lines

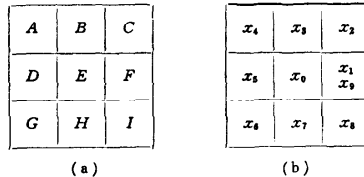


Fig. 3 Conventional notation of points in a 3×3 dot array

(ステップ 1, 平滑化) 原図形 i を各点ごとに 3×3 近傍内で平均し、平滑化図形 s を得る。すなわち、
$$s = \{i(A) + i(B) + i(C) + \dots + i(I)\} / 9$$

平滑化の効果は、後に 4.3 で示すような人工的パターンについては雑音振幅が 1/3 になることによるものではないが、実際のデータではそれ以上の平滑効果が見られる。これは各点で独立で同一分布の雑音またはテクスチャ以外の成分が存在するためと思われるが今後の考察に委ねたい。

(ステップ 2, 1 次微分) 平滑化図形 s の各点につ

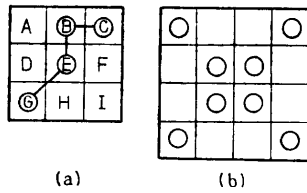


Fig. 4 (a) Direct connection between edge point
(b) An example of a violation of line-width condition

き、水平垂直方向で1次微分し、その絶対値の和でもって縁強度配列 e を得る。すなわち、

$$e = |s(A) + s(B) + s(C) - s(G) - s(H) - s(I)| + |s(A) + s(D) + s(G) - s(C) - s(F) - s(I)|.$$

2.2 デジタル線図形と線画点検出

2値の2次元配列で線図形を表現しているものをデジタル線図形と呼び、線上の点を線画点とするが、その性質については2値図形の細線化または骨格抽出に関連して詳しく研究されている。各種の定義方法があるが、ここでは次のようにした。

連結性については、4, 8連結の混合形とする。すなわち、Fig. 4(a)の例でいえば B, C, E, G が線画点のとき BC, BE, EG は直接連結しているが、E とは直接連結ではない。またデジタル線図形の線幅が1であるという条件を次のように表現する。

(ベタ塗り禁止条件) 任意の 2×2 のブロック状の点をとったときに少なくとも1点は線画点でない点が含まれていなければならない。

Fig. 4(b)はベタ塗り禁止条件を満足せず、ここではデジタル線図形とは見なされない例である。

以上の定義によるデジタル線図形中の一つの線画点に着目したとき、その点に直接連結する点の数はその点の周囲を一周するときの線画点の連結成分の数に等しく、通常これは交差数⁵⁾と呼ばれる。交差数の定義式は

$$\sum_{i=1}^8 T(x_i) \cdot (1 - T(x_{i+1}))$$

である。ただし $T(x_i)$ は x_i が線画点のときに1、そのほかは0をとるような関数である。本章で述べる線画点検出では処理の途中でこの交差数を積極的に利用している。また後の線リスト化でも交差数の計算は不可欠であるので、混乱のないかぎり先に定義したデジタル線図形の各点について交差数を計算したのもデジタル線図形と呼ぶ。Fig. 2(c)は後者の例である。

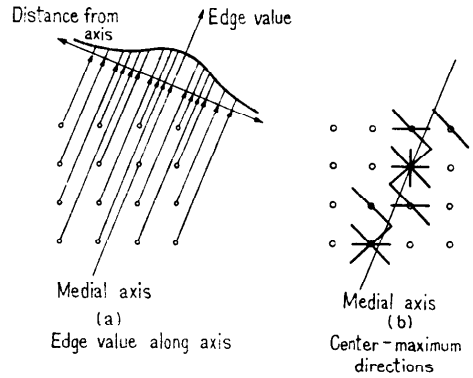


Fig. 5

縁強度図形をデジタル図形に変換するには次のような4段の並列処理の組み合わせを用いる。

(ステップ1) 各点についてその 3×3 近傍内で中心を通る水平線 (DEF), 垂直線 (BEH), 2対角線 (CEG), (AEI) の4本の線のそれぞれについて、中央点Eの縁強度が他の2点の縁強度よりも大きるときにその線を中央極大であるという。ただし、大小比較を一意的にするため、A, B, C, Dの値がEの値に等しいときには、Eが小、F, G, H, Iについてはその逆とする。たとえば、線DEFが中央極大であるということは $\{e(E) > e(D)\} \wedge \{e(E) \geq e(F)\}$ が成立することに等しい。Fig. 5(a)のように各点における縁強度がある直線(軸)からの単調減少関数で表わされるとき各点における中央極大線を Fig. 5(b)に示す。

中央極大である線が2本以上ある点を尾根点、1本であるがそれが水平線か垂直線のさきを、半尾根点とする(ここでいう尾根とは縁強度のなす曲面に着目した名称で、原図形中では急勾配点である)。尾根点と半尾根点を合わせたものについて、先のベタ塗り禁止条件が満たされていることは明らかである。

(ステップ2) ステップ1で得られた尾根点と半尾根点を用いて線画点を決定する。まず尾根点はすべて線画点とし、半尾根点は次の2条件をともに満たすときだけ線画点にする。

(条件 2-1) その点の周囲での尾根点の交差数が2であること。

(条件 2-2) その点の4近傍 (B, D, F, H) に少なくとも一つの尾根点が存在すること。

この条件の内容は、水平か垂直方向にしか極大性がない場合でもその点を線画点とすることによって連続性が増す(条件 2-1)点は線画点とする、ただし Fig. 6

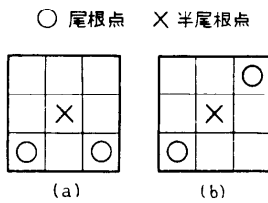


Fig. 6 Exceptional cases in adding edge points

(a), (b)のような場合は除く(条件 2-2)ということである。

以上のステップ1, 2だけで, 十分連続性のあるデジタル線画が得られるが, 局所並列演算によって孤立点および長さ1のヒゲを簡単に除去することができるので, 次のステップ3, 4でそれを行う。

(ステップ3) ステップ2で作られた線画点を表わす配列を用い, 各点について交差数を求め交差数配列を作る。孤立点の交差数は0となるから, 自動的に線画点から除去される(非線画点の交差数は0とする)。

(ステップ4) ステップ3で得られた交差数配列の値を次の2規則により変更する。ただしこの変更は逐次的にはなく並行的に行わねばならない。

(規則 4-1) その点の交差数が1でその4近傍(B, D, F, H)に交差数1, 3, 4の点が存在(たかだか1個である)するとき, その点の値を0に変更する。

(規則 4-2) その点の交差数が3, 4のときにはその4近傍に存在する交差数1の点の数を引いた値に変更する。

この段での処理は交差数配列の上で長さ1でそのどちらかの終点が端点である水平垂直線を除去したことに等しい。

2.3 閾値の設定

以上述べた縁強度算出, 線画点検出法をそのまま使用すると Fig. 7 のように原図形中では平坦に見え縁の存在しないと思われる部分で, 樹枝状または網目状に短い線が発生する。これは後に3.で検討するように大部分が原図形中の雑音に起因するものである。

これを除去するには2.2ステップ1において, 中央極大性のある点でもその点の縁強度がある一定の値よりも小なるときには, 尾根点または半尾根点としないことにする。このときの値を縁強度閾値と呼ぶ。後に3.で示すように縁強度閾値を変えれば出力は大きく変化し, 適切な値を直接指定することは困難である。しかし縁強度の全面平均を算出し, それとの比によって縁強度閾値を定めることにすれば, 適切な値を推定す



Fig. 7 Line extraction without threshold

ることも容易である。この比の値を閾値係数と呼び K_r という記号で表わす。Fig. 6 のように閾値を用いない場合は $K_r=0$ に相当し, $K_r=1.0$ は平均値を閾値とすることであり, Fig. 2(c), (d) はこれによって行っている。

2.5 線リスト表現

デジタル線図形内に潜在する線(端点または分岐点間の中間点(交差数が2)の系列)をリスト化することは, 後の処理に関連してその表現様式も変り, また並列局所演算の範囲外でもあるのでここでは詳しい記述を行わない。

Fig. 2(d) の表現は, 各線はその構成点との距離が1を超えないベクタで部分近似したものであり, 線画化の結果を視察によって評価するのに適した表現と思われる。

3. 問題点の検討

3.1 4方向極大法について

2.2ステップ1で述べた, 4方向のうち2方向以上で中央極大性があるときに尾根点とする方法(4方向極大法)を, 従来の水平垂直2方向のうち1方向以上の極大性をもって尾根点とする方法(2方向極大法)と比較してみる。

4方向極大法の問題点は縁強度を2次元曲面と考えたときに, 尾根上の高さが極小となるいわゆる鞍形の部分で尾根点の検出に失敗し, 線がとぎれることである。2.2ステップ2で極大方向数が1である半尾根点の一部を線画点に追加するのはこのためである。

一方, 2方向極大法で検出される点は4方向極大法の尾根点と半尾根点を合わせたものにほぼ等しく(対角2方向だけが中央極大である点が含まれない), 鞍

部での線のとぎれの心配は少ないが、問題は余分な点が含まれているために、等方性に欠けることである。たとえば、各点の値が中心からの距離の単調減少関数で表わされるような“同心円状”パターンを考えると、中心の水平垂直方向にだけ尾根が発生する。

したがって、4方向極大法では2.2ステップ2のような補助アルゴリズムが必要であったと同様に、2方向極大法でも補助アルゴリズムが必要であるが、局所並列演算の範囲内で実現するのは困難である。

2.2のステップ1, 2の4方向極大法

法とその補助アルゴリズムを2方向極大法で置き換えたときの出力の例をFig. 8に示す。Fig. 8(a)では同じ閾値係数($K_t=1.0$)の4方向極大法より線数が多く、とくに水平垂直方向にかなり長いヒゲが分岐していることは上記の考察を裏付けるものである。また $K_t=1.5$ としたFig. 8(b)において、頭の輪郭が一部消滅してもまだヒゲが残っていることは、閾値操作で解決できる問題ではないことを示している。

3.2 閾値の設定について

この節では2.3で述べた、縁強度平均と閾値係数を用いて雑音による誤応答を減らす方法の問題点について考える。

閾値係数の最適性を論ずるには多くの評価基準が考えられ困難であるが、少なくともそれが真の縁強度と雑音の比、および全画面中の縁の部分の比率によって変化することは確かである。前者の影響については後

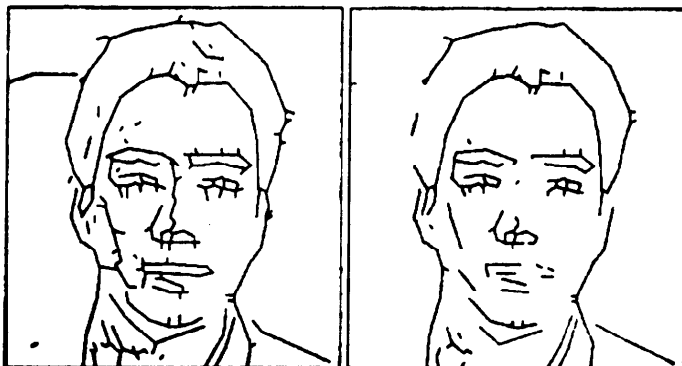


Fig. 8 Two-direction maximum finding method

(a) $K_t=1.0$

(b) $K_t=1.5$

に(4.2のFig. 10)調べることにし、後者の影響を示す極端な場合として、全画面が完全な雑音データであるような図形を処理するには $K_t=1.0$ (Fig. 9)は不適で、ずっと大きな値が望ましいことを指摘しておく。

一般に誤応答は、縁として検出したい点を見落す誤ちと、縁でない点を縁として検出する誤ちに分けられ、閾値係数 K_t を増加させれば前者の誤り率は増加し、後者の誤り率は減少する。この2つの誤り率について一定の関係を満たす処理が望ましい方式であるが、縁として検出したい点について考察するのは、はなはだ困難であるので、ここでは縁として検出したい点の代表例として、縁強度値がその近傍で完全なランダム雑音として考えられるような場合を取り上げて以下に考察を行う。

2.2ステップ1で述べた4方向極大法は(2方向極大法でも同じである)、大小比較だけに依存するため、平坦な部分(縁強度が平坦な部分であり、原図形中では一様勾配を示す部分)の雑音に弱い。3×3近傍内の各点の値が完全に独立に同じ確率分布に従うときは、A~Iを大小順に並べる、9!個の順列が等確率であることから、確率約39%で尾根点と判定されることが解る。

また、雑音が標準偏差 σ の正規分布に従うときには、平滑化と一次微分による縁強度算出法の出力の平均は 1.55σ 、標準偏差 0.85σ でともにもとの分布の標準偏差に比例している*。

以上のことから、縁でない部分を縁と判定する過剰応答の確率を一定の水準に保つためには、縁強度が一定の値よりも小なるときは尾根点としてはならないこと、およびその閾値は雑音の標準偏差と有意水準によ



Fig. 9 Edges extraction from random data ($K_t=1.0$)

* この箇所および4.1の統計的性質についての議論は本会イメージングプロセッシング研究会で発表の予定である。

って一意的に決定されることが解る。したがって 2.3 で閾値を直接指定せずに関係係数を指定するようにしたことの妥当性も示された。

4. 雑音モデルによる縁強度の補正

本章では原図形の濃淡を局所的に一次式で近似して雑音レベルを推定し、3.2 の考察に基づき過剰応答確率一定の線画化方式を作成し、その特性を調べる。

4.1 雑音モデルと標準偏差の推定

雑音レベルを推定するには種々の方法が考えられる。例えばデータの量子化で起こる雑音だけについて調べるのであれば、同一点を何回もサンプルしてみればよい。しかし量子化以外の雑音も考えれば一般に、与えられたデータだけから雑音を推定しなければならないことが多い。

ここでは各 3×3 近傍内では明度が水平座標、 (x) 垂直座標 (y) の一次式 $(ax+by+c)$ で十分近似しうるものと仮定する。例えば中心点 E で $x=0, y=0$ と

すれば、 $i(E)=c+\text{error}(E)$, $i(A)=-a+b+c+\text{error}(A)$ であり、 $\text{error}(A)$, $\text{error}(E)$ は近似誤差(残差)である。9点における残差の二乗和を最小にするように未定係数 a, b, c を定め(最小二乗法)たときの残差の二乗和を点数9で除したものの平方根を求めれば、もとの雑音の標準偏差に比例した量が得られる。雑音が標準偏差 σ の正規分布ならばこのようにして求めた値の平均値は $\sqrt{2/3}\sigma$ となる。以下この量を(一次近似)雑音レベルと呼ぶ。

4.2 雑音レベルによる縁強度の補正

4.1 で定義した雑音レベルの利用方法としては、各点ごとの値を全画面で平均し適当な値をかけて、2.3 で行ったような閾値設定と置き換えることも考えられるが、ここでは画面内での雑音の変動、さらにプログラムとしての実行上の配慮から 2.1 で述べた縁強度算出の補正という形態を採用した。

(補正方法) まず各点について一次近似雑音レベルを求め、次にこの値を、2.1 ステップ1のように $3 \times$

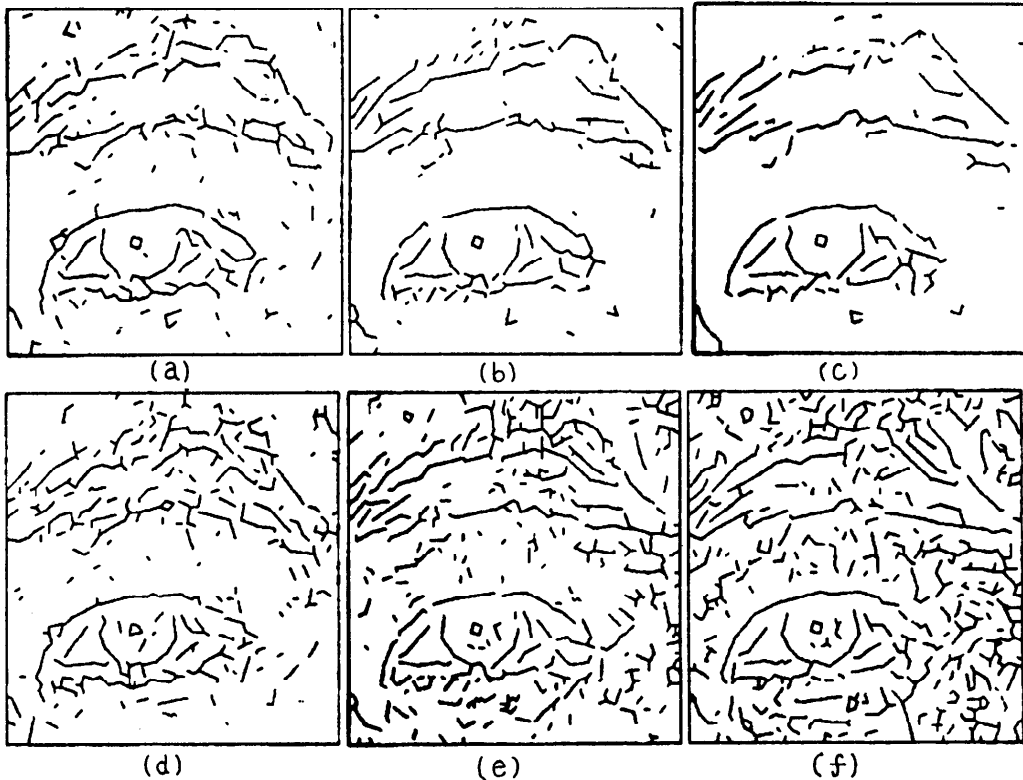


Fig. 10

Simple and modified edge values. (a), (b), (c): Simple ($K_f=1.0$), (d), (e), (f): Modified ($K_f=6.0$), (a), (d): SN ratio 23 dB, (b), (e): 29 dB, (c), (f): 35 dB

3 近傍内で平均し平滑化する。この値を各点ごとに定数 (K_s) 倍して、2.1 で求めた縁強度 (以下単純縁強度と呼ぶ) から引き (負になったときは0とする) この値を補正縁強度と呼ぶ。ここで使用する定数 K_s を誤り係数と呼ぶが、これが対象図形の内容には無関係に、統計的基準によって定められることに注意されたい。

ここで問題となるのは、検出の対象である縁というものにはステップ状であり、ステップの部分では誤差の存在とは無関係に一次近似誤差を生じることである。この場合単純縁強度と一次近似誤差の比はステップの向きによって変るが 12~13 の程度である。また実験によれば、 $K_s=6.0$ として、126×126 点の完全ランダムデータを処理して出力される線の数には6本程度である。したがって実用上は問題ない。

単純縁強度で閾値係数を用いるときと、補正縁強度で閾値を用いないときとの比較を、同一対象を SN 比を変えて量子化した3種のデータを用いて行ったのが Fig. 10 (前頁参照) である。原データは左から SN 比 23 dB, 29 dB, 35 dB である。上段は単純縁強度で $K_s=1.0$ であり、下段は $K_s=6.0$ の補正縁強度による場合である。ここで目につくことは、単純縁強度では雑音の減少により出力される線数は減少しているが、補正縁強度のときには逆に平坦部で細かい線が多数出現することである。しかし後者で出力される線は前者で雑音が大ききときの線とは異なり、本来原図形中に存在する微小な濃淡変化が雑音の低下によって観測可能となったものである。Fig. 11(a) は Fig. 10 の一部を拡大し濃淡レベルを誇張したものであり、Fig. 11(b) はその部分の線画点を示している。明らかに、図形外の情報を用いない処理において、この部分が線画点とされることは自然なことである。

実際の応用分野においても大きな段差を持つ縁よりも雑音に埋れそうな小さな段差の縁のほうが抽出すべき対象であることも十分考えられる。したがって Fig. 11 で見られるような、補正縁強度による細かい線の出現は、処理

力の弱さではなく強さを物語るものであるといえよう。

一方、顔写真等で人間が通常期待するような線画を望むときには、2.3 のような全画面一定閾値を、補正縁強度を用いて設定すればよい。Fig. 12 は $K_s=6.0$ $K_t=0.8$ として得た線画の例である。

4.3 人工ボタンによる検出力試験

4.2 では自然のデータによって補正縁強度の効果を観察したが、この節では人工的なデータにより、性能をより詳しく把握する。

使用するボタンは Fig. 13(a) (次頁参照) に示すような、外側から段差が 15, 21, 27, 36, 48, 64 とほぼ 4/3 倍で増加しているボタンを回転したものに、標準偏差 7.43 の正規雑音のをせたもので、Fig. 13(b) に濃淡表示を、Fig. 13(c) に4カ所での断面図を示した。Fig. 13(d) は補正縁強度を濃淡表示したものであり、Fig. 13(e) の上段には中心線に沿っての単純縁強度、下段には補正強度の断面を表示した。Fig. 13(f)

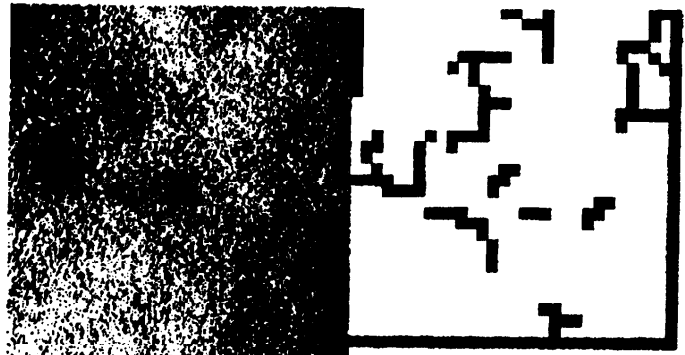


Fig. 11 The lower right 32×32 points of Fig. 10 (e)

- (a) Original brightness enhanced
- (b) Edge points



Fig. 12 Modified edge value with threshold setting ($K_s=6.0$, $K_t=0.8$)

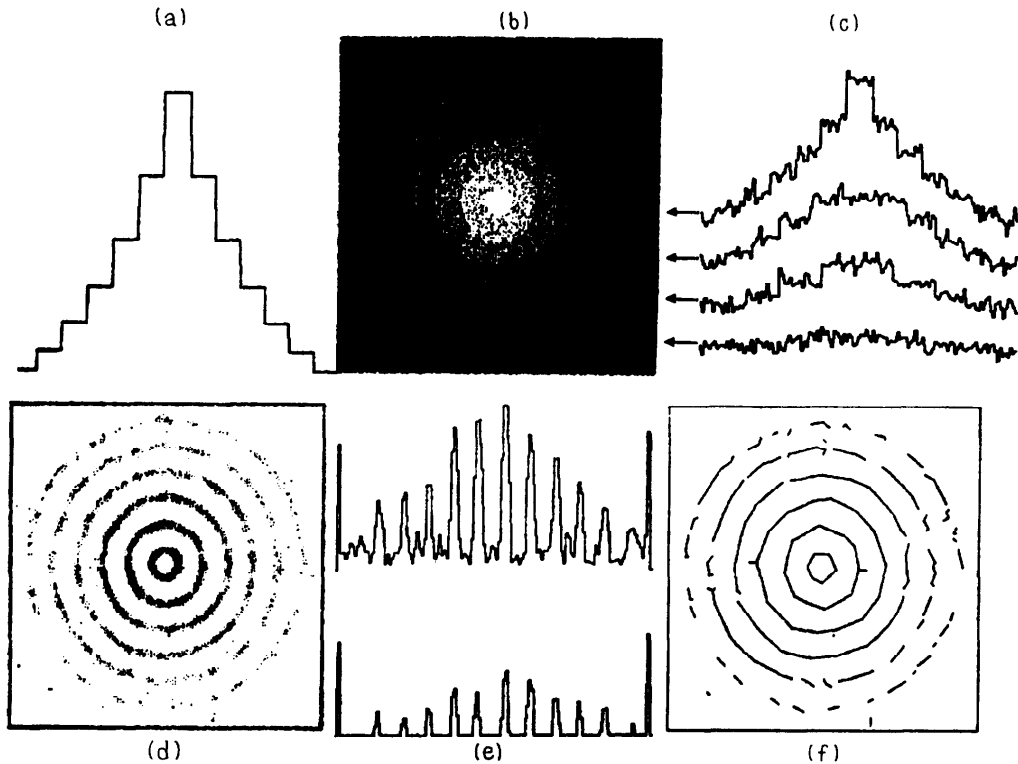


Fig. 13 Test of the total system by an artificial noisy pattern

- (a) Section of no noise data. (b) Noisy data.
 (c) Sections of noisy data. (d) Modified edge value.
 (e) Upper: Simple edge value. Lower: Modified edge value. (f) Lines extracted ($K_e=6.0, K_t=0.0$).

は $K_t=0.0$ とした線画化の結果である。補正線強度算出のための誤り係数 K_e はすべて 6.0 である。

雑音と線強度の比の変化により、線のとぎれ方が変化していることと、とぎれる様子も全体として等方的であることに注意されたい。

5. おわりに

本論文では、図形についての先験的な知識の導入を止め、局所並列演算の組み合わせという簡潔な方法で、無理の少ない仮説の下で誤り率を保証された等方的な線の線画化方式を提示した。ここで処理結果の評価は視察に依っているが、このため線のきれ、分岐といったトポジカルな性質よりもゴミ、ヒゲの除去に力を入れすぎたきらいがある。今後は線リストを入力とする高レベルの処理を用い処理全体の評価を行う予定である。

また雑音レベル変動については詳しく調べ、顔全体の線画化例と目の部分の線画化例を提示することによ

りサンプル間隔の変化の影響の一端を示したつもりであるが、その他の図形性質の変化の結果についての調査は不十分であった。とくにボケなどによって縁が鮮明なステップではなく、幅の広い緩斜面となっている場合についての調査は重要であろう。

一般に図形処理における制御パラメータは処理結果を左右するものでありながらデータごとに実験を重ねて定められることが多い。本論文では局所的な一次式近似の残差で雑音を推定しパラメータ推定の任意性を減少させたが、このような手法は雑音の含まれる現実の図形処理において有効であり、いろいろな応用が期待される。

最後に、本研究の機会を与えられた石井治ソフトウェア部長、討論・支援をいただいた情報システム研究室の方々、とくに適切な指導によって本稿の完成を可能にされた棟上昭男研究室長に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 長尾, 金出: パターン認識における縁・線の抽出, 電子通信学会誌, Vol. 55, No. 12, pp. 1618~1627 (1972).
- 2) 鹿野, 鳥脇, 福村: 濃淡図形を線図形に変換する一方法—Wave Propagation Method について—, 電子通信学会論文誌, Vol. 58-D, No. 10, pp. 668~675 (1972).
- 3) 末永, 鳥脇, 福村: 間接撮映胸部X線写真のパターン認識, テレビジョン学会誌, Vol. 26, No. 9, pp. 747~754 (1972).
- 4) E. G. Johnston & A. Rosenfeld: Digital Detection of Pits, Peaks Ridges, and Ravines, *IE³* Trans. SMC., Vol. SMC-5, No. 4, pp. 472~480 (1975).
- 5) C. J. Hilditch: Linear Skeltons from square cupboards, in B. Meltzer and D. Michie eds: *Machine Intelligence IV*, Edinburgh Univ. Press, Edinburgh, pp. 403~429 (1969).
- 6) 藤村: 濃淡図形の輪郭抽出の一方法, 昭 50 情報処理学会大会予稿集 (1975).
- 7) 藤村: ドット式表示装置による濃淡図形表示の方法, 情報処理, Vol. 15, No. 7, pp. 503~509 (1974).

(昭和 51 年 2 月 23 日受付)

(昭和 51 年 4 月 10 日再受付)