

図形表示にともなう不自然な濃淡不連続線の除去

西原清一 池田克夫 (筑波大学 電子情報工学系)

1. まえがき

画像ディスプレイや濃淡表示のできるハードコピー装置上に濃淡のある画像や図形を表示することは、処理結果や中間結果を視覚により確認するのに用いられる処理である。このとき、明るさや色調が緩やかに変化している領域において、同じ濃度ももつ部分領域が帯状に並び、等濃度コンターが明瞭な縞模様としてあらわれることがある。例えば、図1において、「卵」の表面に貝がら模様似た不自然な縞模様が見られる。これは、画像ディスプレイが離散的な有限個の濃度レベルのみを表示するようになってきているからであるが、人間の目には、明度対比効果のために、これらの不連続部分は実際よりも強調されて認識される傾向がある。濃淡が徐々に変化している領域を含む画像をこのようなデジタル画像表示装置で提示する場合には、このような明度・色相および彩度の対比効果による錯視現象を緩和し、人にとって自然な画像を生成する処理が望ましい場合がある。とくに、画像・図形を定義し生成するようなシステムの場合、

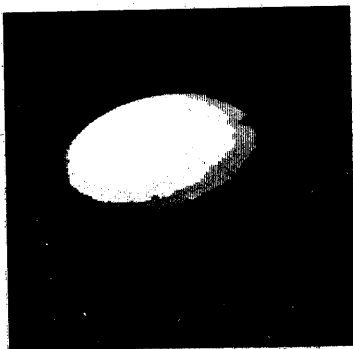


図1. '卵'の表示画像

濃淡の連続変化はプログラムにより計算され生成されるため、このような錯視効果はさらに容易に発生する。また入力画像の処理においても、読み取り精度が高いほどむしろこのような現象が確実に発生してしまうという傾向がある。

本報告では、上記の現象が生起する原因を考察したのち、微小差異の濃度領域の境界の近傍においてピクセルをランダムに置きかえることによって上のような対比錯視効果を取り除く手法を提案する。また最後に2~3の実験結果を示し、この手法の処理効果などを考察する。

2. 濃淡不連続線の除去

2.1 明度対比効果の発生

上記の不自然な濃淡不連続境界線の発生は、明度対比による錯視効果が原因である。帯状の領域を明るさの順番に並べるときに認められる錯視効果は Mach band 効果として知られている。これは、人間の目に備わっている微小明度差に対する感知能力、すなわちエッジ強調化の性質によっており、広く色の同時対比効果と呼ばれる現象の一種である[1]。明度対比効果は、明るさの差が微小であっても不連続に変化している2領域の境界において、つぎのような状況が成り立っているとき強調される傾向がある：

- 1) 境界線の形状が単純、すなわち2領域が互いに入り組んでいない。
- 2) 境界の付近において雑音が少ない。すなわち境界付近では、2領域の明度に対応して2種類のピクセルのみが観察されるが、これを2値

画像とみた場合、各領域内での他方の明度のピクセルの発生が少ない。以後、「雑音」はこの意味で用いる。

- 3) 境界の長さ自体が長い。この条件は上記1)とも関係しているが、境界線が非常に短い場合には対比効果は発生しない。

上記のうち、3)は領域の大きさに依存するところが大きいので、簡単に除くことはできない。本報告では、条件1)および2)を、境界付近に雑音を付加することにより、取り除く手法を述べる。

2.2 方法

まず処理の基本的な考え方を述べる。互いに微小な濃度レベル差を有する2つの隣接する領域の境界上に、直角方向に張り出した線分状の探査マスク(ゾンデ)を設定する(図2)。境界付近に、(前節条件2)の意味での)雑音が無ければ、探査マスクを2等分した各部分のピクセルは、全てそれぞれの所属する領域の濃度レベルに等しくなるであろう。このようなとき、明度対比錯視が発生していると見なすことができるので、この探査マスク上のピクセルに関して、濃度値を適当に入れ替えてやるとよい。このような操作を施し

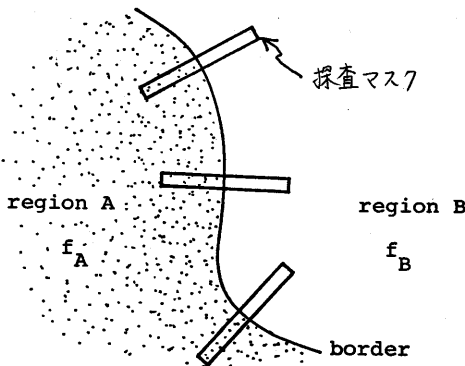


図2. 境界上の探査マスク

ながら、境界に沿って探査マスクを移動してゆくと、最終的に明度対比錯視を除去することができる。

処理手続きは大きく3段階に分けられる。まず、明度差が最小単位(普通は1)となっている場所を探し、明度対比錯視の発生の可能性のある候補境界とする。これを「境界判定手続き」と呼ぶ。つぎに得られた候補境界の付近における雑音の有無を調べる(「雑音調査手続き」)。最後に、これら2つの手続きにより、候補境界の付近に雑音のないことが判明すると、明度対比錯視が発生していると見なし、最終的に雑音を付加する(「雑音付加手続き」)。この、境界判定→雑音調査→雑音付加の手続きを、画面の全ピクセルに対して順に施すことにより、明度対比による不自然な不連続線を除去することができる。

つぎに各手続きについて詳述する。以後、画面上のピクセルの位置を (i, j) であり、その濃度レベルを $f(i, j)$ なる整数値関数で表わす。ここに、 $0 \leq f(i, j) \leq M-1$ 。Mは表示可能な濃度レベルの個数。また微小濃度差としては1を仮定するが、これは問題の適用状況によって別の値をとることもできる。ピクセル (i, j) が「凸孤立点」であるとは、4近傍[2]の濃度レベルが全て、丁度、 $f(i, j)$ より1小さいピクセルのみであるような場合である。逆に、「凹孤立点」とは、4近傍が全て、丁度、 $f(i, j)+1$ である場合をいう。また以下では、上記の候補境界、すなわち濃度レベルの差が1であるような隣接2領域の境界のことを、単に「境界」と呼ぶ。

[境界判定手続き]

ここでは、注目しているピクセル (i, j) が境界上の点かどうかを調べる。位置 (i, j) の4近傍のうち、濃度

レベルが $f(i,j)-1$ のピクセルの数を N とする。ただし、 $0 \leq N \leq 4$ 。もし $N=4$ なら、ピクセル (i,j) は凸孤立点であるため境界とはなりえない。もし $N=0$ ならば、ピクセル (i,j) は、濃度が $f(i,j)$ の領域の内部の点であるが、または近傍に濃度差が 1 より大きいピクセルが存在するかのいずれかである。とくに後者は、当該ピクセルが画像本来のエッジに接している場合に当たる。いずれの場合も、当該ピクセルは境界点ではない。つぎに $N=1, 2$ または 3 の場合は、そのうち少なくとも 1 つは凹孤立点でなく、しかも他の $(4-N)$ 個の 4 近傍が丁度 $f(i,j)$ の濃度レベルである場合、ピクセル (i,j) は境界上の点とみなすことができる。ピクセル (i,j) が境界点と判定される全てのピクセル配置を、 $N=1, 2, 3$ の各場合について、図 3 に示す。

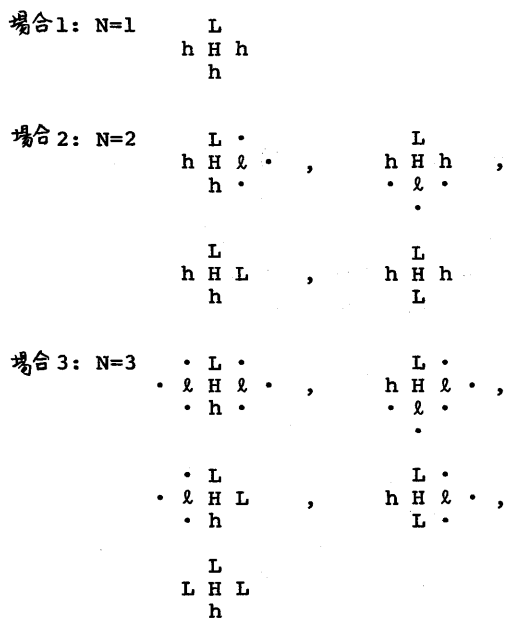


図 3. 境界の判定。H は注目中のピクセル、 h および l は、H と等しい濃度レベル $f(H)$ をもつ。L および l は $f(H)-1$ 。また l は凹孤立点を表す。

なおこの手続きは、境界として、濃度値の高い領域からみた内部境界を用いている。また境界の連続性を問題としていないので、境界追跡アルゴリズム [2] には依っていない。これは本手続きを簡単にするのに効果がある。この手続きを通過したピクセルは、そこにおいて明度対比錯視が発生している可能性のある点であると看做られ、引き続き、つぎの続きが実行される。

[雑音調査手続き]

この手続きは、上記の境界判定手続きによって境界と判定されたピクセル (i,j) の付近に、雑音が存在するかどうかを調べるものである。当該ピクセルの 8 近傍 [2] に関して、順番に つぎのような状況になっているかどうかを調べる。すなわち、或る 8 近傍の濃度レベルが $f(i,j)$ に等しく、かつそれ自身も境界であるかどうかを調べる。もしそのような 8 近傍が見つければ、それと当該ピクセル (i,j) とが形成する境界の方向を求め、それと直角の方向に、あらかじめ決められた長さ $2 \times w$ の線分状の探査マスクを設定する。これは、図 2 に示した探査マスクの設定を、境界上の 2 連続ピクセルのみを用いて局所的に行うことを意味している。当該ピクセル (i,j) ■ と 8 近傍回との位置関係によって設定される探査マスクの状態を、全ての場合について図 4 に示す。図 4 は $w=4$ の場合であるが異なる長さの探査マスクについても方向と位置は同じである。

つぎに上記により決められた探査マスクについて、つぎのような雑音調査手続きを施す。すなわち、探査マスクを 2 等分し、それぞれ長さ w の点列について、それが所属する領域の濃度レベルに等しいピクセルのみから成っているかどうかを調べる (図 2 参照)。すなわち、一方の w 個のピクセルの濃

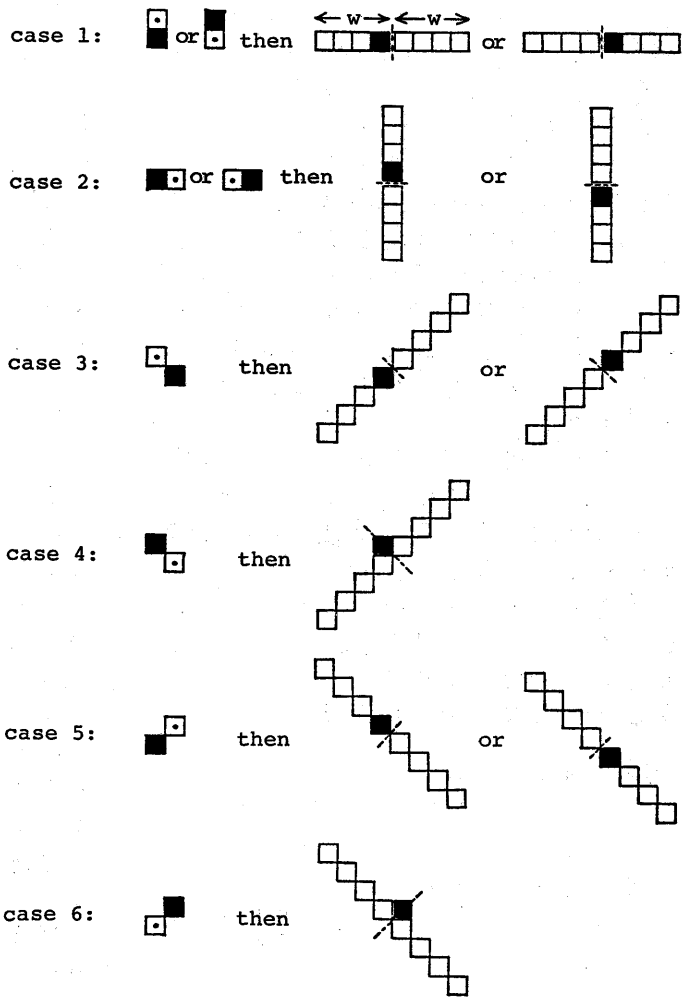
度レベルが全て $f(i,j)$ で、他方の w 個が全て $f(i,j)-1$ かどうかを調べる。もしそうであれば、この探査マスクに関して、雑音の発生はないと判定する。これは、明度対比錯視が局所的に生じていることを意味している。

[雑音付加手続き]

この手続きは、探査マスク上でランダムにピクセル濃度レベルを変更することにより、最終的に明度対比錯視の除去を現実化するものである。前項の手続きで探査マスク上に雑音の発生が無いと判定されると、この手続きを実行する。したがって、注目しているピクセル (i,j) に関して、本雑音付加手続きが複数回、呼び出されることもありうる点に注意したい。

ここで、探査マスク上で雑音付加アルゴリズムを与える。まず、探査マスクの長さを $2 \times w$ とし、図5のように、全構成ピクセルに一端から通し番号をつける。いま、 α 1 ~ w 番目のピクセルの濃度レベルを f_A で表わし、 α ($w+1$) ~ ($2 \times w$) 番目のピクセルの濃度レベルを f_B で表わし、 α ($w+1$) ~ ($2 \times w$) 番目のピクセルについては f_B で表わす。ここに $|f_A - f_B| = 1$ である。区間 $[0, 2 \times w]$ 内の一様整数乱数を用いて、つぎのアルゴリズムにより、濃度レベルの変更を施す：

```
for i:=1 to w do
  begin
    r:=get_random;
```



■ : the concerning border point
□ : the detected 8-neighbor border point

図4. 探査マスクパターン。 $w=4$ の場合。

```
if r < i then f(i):=fB end;
for i:=w+1 to 2*w do
  begin
    r:=get_random;
    if r ≥ i then f(i):=fA end;
```

ここで、'get_random' は、上記の一樣乱数の生成を意味する。また $f(i)$ は、 i 番目のピクセルの濃度レベルを表わす。このアルゴリズムにおいて、くり返しの回数を保持する変数 i は、濃度

レベル変更すなわち雑音付加を行うかどうかを決定するための閾値として使用される。したがって、探査マスクの中央に近いピクセルほど値の変更を受けやすい。

3. 実験

ここでは、明度対比錯視の除去アルゴリズムを2~3の例に適用した結果を示す。

まず、図6(a)は、図1の原画像に上記アルゴリズムを施したものである。ただし $w=4$ 。本来のエッジについては完全に保存されていることがうかがえる。図6(b)は、雑音付加手続きが実際に施された探査マスクの位置を全て、図6(a)に重ねあわせたものである。境界方向にほぼ直角に交差するよ

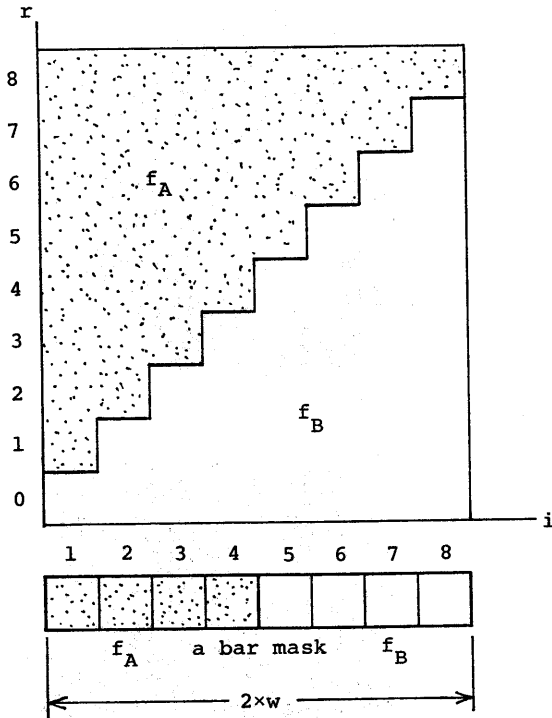
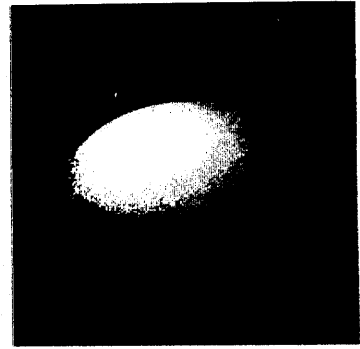


図5. 探査マスク ($w=4$) 上の雑音付加。階段状関数は閾値を5と3、 r 軸は、一様乱数の値域を示す。

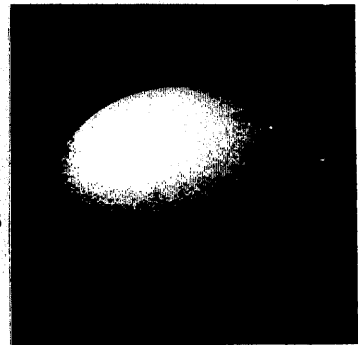
(a)
 $w=4$



(b)



(c)
 $w=8,3$



(d)



図6. 例1

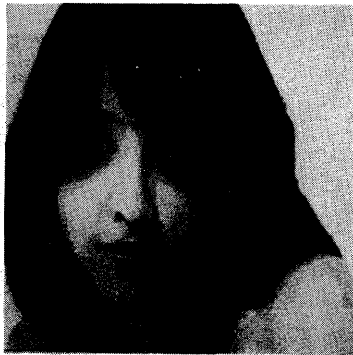
うに探査マスクが設定されていった様子がわかる。また、エッジにおいては探査マスクの設定が全く行われておらず、エッジ保存の性質も明らかである。図6(c)および(d)は $w=8$ および3の両方の場合を同時に適用した例を示している。以上いずれも、ピクセル数は 200×200 で、濃淡レベル数 M は16段階である。図6(c)は、図6(a)より良好な除去効果を得ているが、本画像に限って言えば、その差異はそれほど大きくないと言えよう。雑音付加は図6(d)にみるように、広範囲にまた大量に施されている。

つぎに、原画像に一度、雑音除去による平滑化(smoothing [2])を施し、得られた結果に本アルゴリズムによる雑音付加を行なった結果を示す。平滑化のアルゴリズムは、エッジ保存を行

う文献[3]の方法を用いた。いずれもピクセル数は 220×220 、 $M=16$ である。図7(a)は原画像である。図7(b)はエッジ保存の平滑化を施した結果で、明度対比効果による不連続線が、原画像より一層、明瞭に認識できる。図7(c)は、(b)に本アルゴリズムを、 $w=4$ の場合について適用した結果を示す。図7(d)は、雑音付加処理が実際に施された全ての探査マスクを、陽に重ねて表示したものである。図6の(b)、(d)と同様に、エッジ部分では、雑音付加処理が押さえられていることがわかる。

4. おまけ

濃淡のある図形・画像を人に提示する場合に生じる望ましくない濃淡不連続線を除去する手法について述べた。こ



(a) 原画像



(b) 平滑化の結果



(c) (b)に本処理を施した結果



(d) 探査マスク

図7. 例2

のような不自然な濃淡不連続線は、明度対比錯視の効果によるもので、図形や画像を計算機により生成する場合は、統計的な不確定要素がないために、むしろこのような現象はより容易に発生する傾向がある。雑音の少ない画像、すなわち通常、品質の良い画像においてむしろ発生し易い。したがって、意図的にピクセル濃度をランダムに変更する本手法は、人に自然な画像を提供するのに有効である。

本方法は、明度対比錯視の生じている場所を画像の部分パターンをもとに探し、雑音を付加し、相対的に高周波成分を高める処理といえる。この観点から、画像の平滑化とちょうど逆の処理であると考えることができる。なお本手法は、明度に限らず、色相・彩度の対比錯視にも適用することができる。

このアルゴリズムは、探査マスクの幅と同じ本数のラスターのピクセル・データをバッファとして保持しておくことによって、1パスの順処理で終了する。局所的な処理のくり返しとなるため、処理時間は画面の全ピクセル数に比例した時間となる。また本方法では、探査マスクの長さを前もって設定しておく必要があり、この点に試行錯誤の要素がある。これについては、探査マスクの長さを可変にしておき、境界の周辺の画像データの状態に応じて適応させるように、アルゴリズムを修正することが考えられる。

なお本アルゴリズムは、副プログラム化しておき、画像・図形の定義・生成、画像処理の一連の過程ののち、最終的に画像を出力する直前に、一度これを施しておくという使い方が適当である。

なお、本実験中の平滑化処理は、汎用画像処理ソフトウェア・パッケージ SPIDER [4] を使用させていた

だった。記して、謝意を表す。

文献

- [1] H. Gouraud, Computer Display of Curved Surfaces, Univ. of Utah, UTEC-CSc-71-113 (1971).
- [2] A. Rosenfeld & A. C. Kak, Digital Picture Processing, Academic Press, N.Y., 1976, 邦訳長尾他, デジタル画像処理, 近代科学社, 1978.
- [3] M. Nagao & T. Matsuyama, Edge Preserving Smoothing, Comput. Graphics & Im. Proc., 9 (1979), 394-407.
- [4] 田村, 富田, 坂根, 横矢, 坂上, 金子, SPIDER — 移植性の高い画像処理ソフトウェア・パッケージ, 電総研彙報, 44, 7&8 (1981).