

白黒階調画像に対する 滑線・滑縁化アルゴリズム

木見尻 秀子 安居院 猛 中嶋 正之

東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設

低解像度のディスプレイを用いて画像を表示すると、2値画像、階調画像どちらの場合でも、斜線部に“ジャギ”とよばれる階段状のギザギザが生じる。このジャギを滑らかにする滑線化法がいくつか提案されている。主な手法としては、ローパスフィルタを用いる方法や、線からの距離に反比例した階調を与える方法などがある。

我々は先に、白黒2値画像に対する滑線化アルゴリズムを提案した。これは、マスクを用いて水平、垂直、斜め45°の線成分としてジャギを抽出し、線成分の長さに対応した中間階調値を与えて線を滑らかにする方法である。本報告では、白黒階調画像に対して、同様にマスクによる滑線化処理アルゴリズムを提案する。さらに、線と縁を区別する改良アルゴリズムについて示す。

An Anti-aliasing Algorithm for Tonal Pictures

Hideko KIMIJIJI Takeshi AGUI Masayuki NAKAJIMA

Imaging Science and Engineering Laboratory
Tokyo Institute of Technology

Usually, computer generated figures include undesirable jagged lines. Several methods have been proposed to smooth such lines. In a method, the lines are low-pass-filtered before displaying, and in other method, gray values are given to the lines.

We have proposed an anti-aliasing algorithm using masks. In the algorithm, the gray values are given to the extracted horizontal and vertical line segments, and that of inclined 45 degrees. In this report, a modified anti-aliasing algorithm for tonal pictures is proposed. More, a method to extract individually line segments and edge segments is described.

1. はじめに

コンピュータを用いてアニメーションセルの線画等を表示する場合、通常512×512画素、または256×256画素の画素領域で処理が行われる。この程度の解像度で、画像をラスタースキャン型のディスプレイを用いて表示すると、斜めの線はギザギザに表示される。また同様に、領域と領域の縁が斜めである場合、その縁はギザギザに表示される。これらは、線や縁が急激に一画素分変化するために生じる現象で、“ジャギ”とよばれている^{1)~7)}。

ジャギを目立たなくする滑線化法には、線のまわりをぼかしたように見せる方法がある。これらの方法は、対象とする画像により、ディジタイザから入力された画像等のように、線や縁の位置が分かっている画像に対する滑線化法と、スキャナから入力された画像等のように、線が存在が分かっている画像に対する滑線化法に分けられる。前者の滑線化法としては、線を表示している画素からの距離に反比例した階調を与える方法⁸⁾や、線を仮想的に太さを持った多角形とし、その面積によって明るさを決定する方法⁹⁾等が提案されている。後者の滑線化法としては、ローパスフィルタを用いる方法¹⁰⁾があるが、画像全体に対して処理を行うため、必ずしも美しい滑線化を行うことができない。また、領域の輪郭線を追跡し、その境界部を中間階調で埋めていく方法¹¹⁾があるが、線の追跡には比較的時間がかかることが知られている。

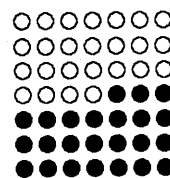
筆者らは先に、後者の滑線化法として、画像を1回だけ走査するマスク処理を用いて、ジャギを抽出し、滑線化するアルゴリズムについて報告した^{12), 13)}。文献12)は2値の線図形に対する基本的なアルゴリズムであり、文献13)は斜め線を考慮した方法である。これらの方法は、いずれも2値図形を対象とした。本報告では、白黒階調画像に対して、2値図形と同様マスク処理を利用してジャギを抽出し、中間階調を与えることにより滑線化処理を行うアルゴリズムを提案する。さらに、線と縁を区別してより原図形に忠実な滑線化を行うアルゴリズムについて示す。

2. 白黒階調画像に対する滑線化アルゴリズム

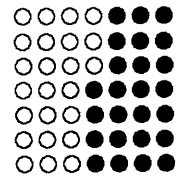
白黒2値図形に対しては、3×3のマスクを用いて原図形のパターンを調べることにより、比較的容易にジャギを抽出することができた^{12), 13)}。対象とする画像が階調画像である場合には、2値図形のように簡単に境界部を抽出することはできない。ここでは、白黒階調画像に対しても、3×3のマスク領域を擬似的に2値化することにより、2値図形の場合とほぼ同様のアルゴリズムでジャギを抽出し、滑線化する方法について述べる。

2.1 線成分について

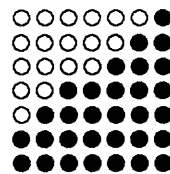
ディジタル直線は、その傾きによって、図1に示すような①水平、②垂直、③斜め右上がり、④斜め右下がり、のうちのどれかに大まかな方向が決まり、これらの方向に数画素連続した後、斜めまたは縦横に1画素移動し、これを繰り返して表示されている¹⁴⁾。このため線に段差が生じる。線を滑らかにするためには、段差のある部分を抽出する必要がある。段差は、画像の左上の端からラスタースキャン方向に1画素ずつ走査しながら抽出する。図2に示すように、段差から段差までを1本の線成分とし、線成分が連続したものを線とする。このとき、先に抽出される段差を始点、後



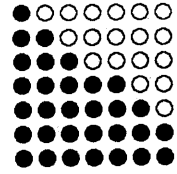
(a) 水平



(b) 垂直



(c) 斜め右上がり



(d) 斜め右下がり

図1 “ジャギ”の例

に抽出される段差を終点とする。

3×3のマスクで始点と終点を抽出し、始点から終点までを、線成分であると認識する。線が交差している場合などには、線成分の両側で段差の位置が異なることがある。このような場合、始点や終点は段差の位置に応じて、線成分の両側で別々に抽出する必要がある。例えば図3の水平の線

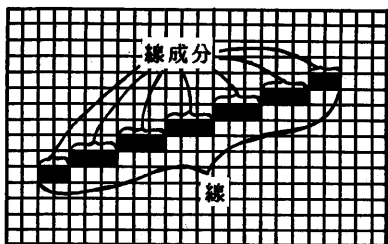


図2 線と線成分

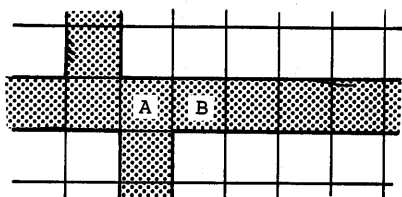


図3 十字路の例

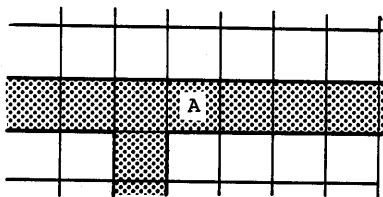


図4 T字路の例

のうち右側の線では、線成分の上側はAが始点であるが、下側はBが始点である。また、図4では、上側には段差はないが、下側は、Aが始点となっている。そこで、線成分の両側は別のもので抽出を行う。

2.2 3×3のマスクを利用した線成分の抽出

対象とする画像が階調画像であるため、段差の部分だけを抽出するために、まず3×3の領域を擬似的に2値化し、線成分になり得る黒領域と、背景の白領域にパターン化する。図5に示すように、3×3の中心の画素を注目画素とし、黒とする。残りのa～hの画素は、誤差を考慮し、注目画素との階調の差があるいき値以下の場合黒、いき値以上の場合白とする。

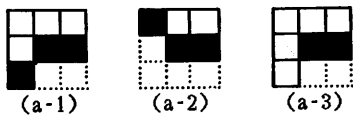
次に、始点、終点用のマスクと2値化した3×3領域のパターンを比較する。パターンが始点のマスクと一致したら、注目画素を始点として記憶しておき、終点のマスクと一致したら、対応する始点から終点までを1本の線成分として認識する。この際、以下に示す16種類の始点、終点になり得るパターンを、マスクとしてあらかじめ準備しておく。

- 1) 水平の線成分の上側の始点
- 2) 水平の線成分の下側の始点
- 3) 垂直の線成分の左側の始点
- 4) 垂直の線成分の右側の始点

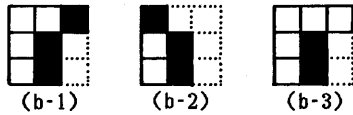
a	b	c
d	*	e
f	g	h

* : 注目画素 ...黒
a～h :
注目画素との階調の差 ≤ Th ...黒
注目画素との階調の差 > Th ...白
ただし、Th : いき値

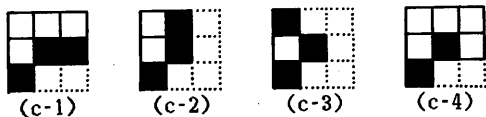
図5 3×3のマスク領域の2値化



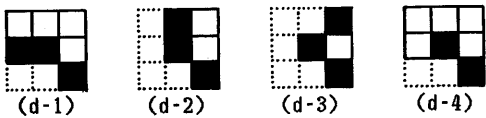
(a) 水平の線成分の上側の始点



(b) 垂直の線成分の左側の始点



(c) 右上がり斜め45°の線成分の左上側の始点

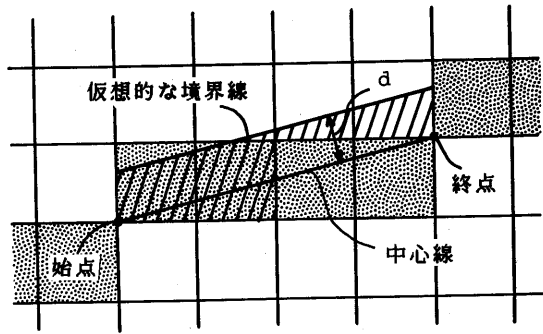


(d) 右下がり斜め45°の線成分の右上側の始点

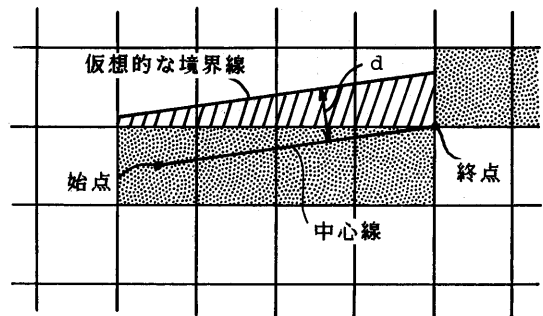
図6 線成分の抽出に用いるマスクの例

- 5) 右上がり斜め45°の線成分の左上側の始点
- 6) 右上がり斜め45°の線成分の右下側の始点
- 7) 右下がり斜め45°の線成分の右上側の始点
- 8) 右下がり斜め45°の線成分の左下側の始点
- 9) 水平の線成分の上側の終点
- 10) 水平の線成分の下側の終点
- 11) 垂直の線成分の左側の終点
- 12) 垂直の線成分の右側の終点
- 13) 右上がり斜め45°の線成分の左上側の終点
- 14) 右上がり斜め45°の線成分の右下側の終点
- 15) 右下がり斜め45°の線成分の右上側の終点
- 16) 右下がり斜め45°の線成分の左下側の終点

図6は、上記の1),3),5),7)の抽出を行うマスクを示したものであり、図中の破線の画素は、白画素でも黒画素でもよいことを示している。例えば、図6(a-1)~(a-3)は水平の線成分の上側の始点を抽出するマスクである。3つのマスクとも、図5中の画素b, cは白、画素eは黒である。画素a, d, fが白か黒かによって、(a-1)は、線成分が右上がりの線の途中の線成分である場合、(a-2)は右



(a) 始点と終点がともに線の途中である場合



(b) 始点または終点が線の端である場合

図7 中間階調値の決定

下がりの線の途中の線成分である場合、(a-3)は線の端の線成分である場合の抽出マスクとなっている。

2.3 中間階調値の決定

2.2で抽出した線成分に対して、その長さに応じた中間階調値を、線成分およびその周辺の画素に与えることにより、滑線化を行う。このとき、原画像に対し滑線化処理後の線の太さを可変にし、また水平、垂直の線と斜めの線の太さが等しく見えるように階調値を決定する。

画素は、1辺の長さ1、面積1の正方形であると仮定する。ある線成分の始点と終点がともに線の途中である場合、始点と終点の計算上の座標値は、図7(a)に示すように、隣接した線成分との接点とする。始点または終点が線の端である場合には、その座標値は図7(b)に示すように画素の中心とする。始点と終点を結び、これを中心線とし、中心線に対して、幅dをもった平行な線を仮想的な境界線とする。このdの値を変化させることにより、滑線化処理後の線の太さを自由に変えるこ

とができる。d=0.5のとき、線の幅は1画素分となり、ジャギのない水平、垂直の線と同じ太さに見えると考えられる。線成分中の画素、および周辺の画素に与える中間階調値は、(1)式に示す混合関数 (blending function¹⁴⁾) によって決定する。

$$G = G_1 \times S + (1 - S) \times G_2 \quad (1)$$

G : 与える中間階調値

G₁ : 線成分の画素の階調値

G₂ : 背景の階調値

S : 仮想的な境界線により区切られた面積

この式は、各画素に対して、仮想的な境界線に区切られた部分、すなわち図7(a)の斜線の部分の面積Sを求め、Sの、1画素の面積に対する比をその画素の新しい階調値とすることを示している。

3. 線成分と縁成分を区別した滑線化アルゴリズム

2. で示したアルゴリズムで白黒階調画像に対して滑線化処理を行うことができる。ところが、このアルゴリズムでは、ある階調の領域と別の階調の領域の境界は、2重に抽出されることになる。図8の例では、線成分ABと線成分CDの境界は、ABの下側と、CDの上側の2回抽出され、2重に中間階調値が与えられる。そこで、どちらを線成分とみなし中間階調値を与えるかは次の方法等が考えられる。

- ① 2重に与える。この場合、オーバーライトすれば、ラスタースキャン方向に走査するため、下側、右側、右下側、右上側が後から与えられ、

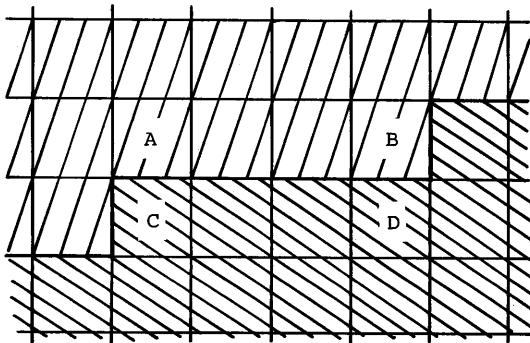


図8 領域と領域の境界の抽出

優先される。

- ② どちらか一方だけのマスクを用い、他方の側は、滑線化処理しない。
- ③ もとの画像の階調値が明るい方 (または暗い方) を線成分とみなす。

これらは、いずれの場合も滑線化処理後の線の太さが一定にならないという欠点がある。

ここでは、抽出するときに線成分であるかどうかを判断し、それに応じて中間階調値を決定する改良アルゴリズムを提案する。

3. 1 線成分と縁成分の抽出

抽出した成分が線成分であるか、領域と領域の境界の縁成分であるかを次のように定義する。

線成分: 同じ階調の領域の幅が1画素であるもの
 縁成分: 同じ階調の領域の幅が2画素以上であるもの

図6に示したマスクを線成分用のものと縁成分用のものに分離する。例えば、水平の線成分の上側の始点についてみると、図9(a)に示すように、画素a, b, c, d, e, f, gについては、2. の場合と同じであるが、画素hについては、白であれば線成分、黒であれば縁成分とする。いくつかのマスクの例を同図(b),(c),(d)に示す。なお、抽出された始点、終点の一方が線成分、もう一方が縁成分の場合、その成分は線成分であるとする。

3. 2 中間階調値の決定

線成分に対する滑線化処理、縁成分に対する滑線化処理は、次に示す2点を考慮する。

- ① 線の太さは可変とする。
- ② 縁は境界が見かけ上原図形からずれないようにする。

抽出した線成分に対しては、2. の基本的なアルゴリズムと同様の方法で中間階調値を求め、線成分中の画素および周辺の画素に、求めた中間階調値を与えて滑線化する。

抽出した縁成分に対しては、仮想的な境界線に区切られた面積と元の面積が変わらないようにする。水平の線成分を例にとると、始点、終点の座標は図10に示す位置とし、斜線部の面積と破線部の面積が等しくなるようにする。始点から終点まで結んだ線を仮想的な境界線とし、仮想的な境界線に区切られた面積から、混合関数を用いて中間階調値を求める。ただし、縁成分と縁成分の境界

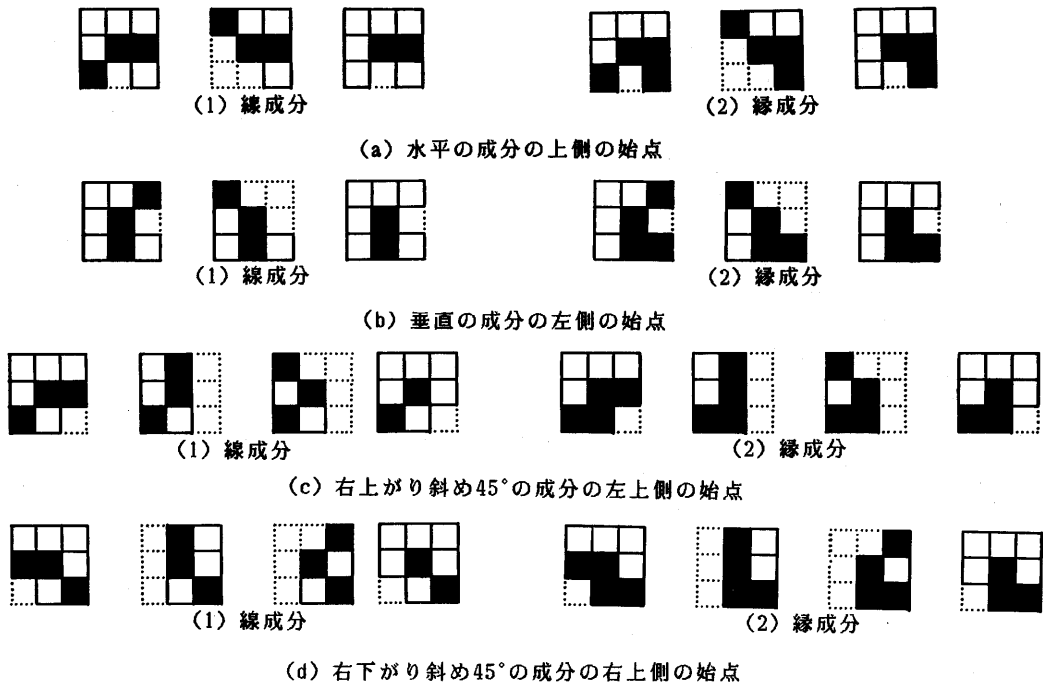


図9 線成分と縁成分を区別して抽出するマスクの例

については、どちらから処理を行っても同じ結果が得られる。したがって、水平の縁成分の場合は下側、垂直の縁成分の場合は右側、斜めの縁成分の場合は下側というように、先に抽出される縁成分だけを滑縁化処理することにする。これにより、境界が縁成分と線成分の両方である場合には線成分が優先される。すなわち、縁成分の処理によってオーバーライトされることなく、線の太さが均一にできる。

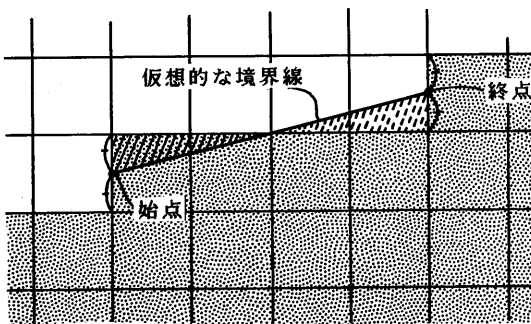


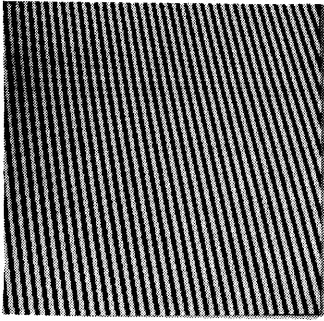
図10 縁成分の中間階調値の決定

4. 滑縁・滑縁化処理の実験結果

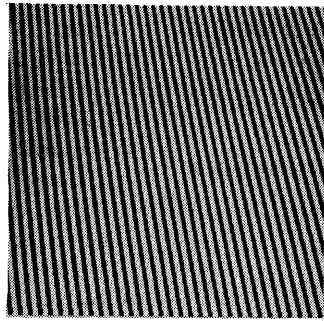
2. で示した基本的なアルゴリズムと3. で示した、線成分と縁成分を区別したアルゴリズムを用いて、白黒階調画像に滑縁化処理を施した結果を図11、図12、図13に示す。なお、2. のアルゴリズムでは、階調の明るい方を線成分と判断し、また、差が分かり易いようにdの値は0.7とした。

図11は、幅が2画素以上ある線の例である。ジャギのある(a)の原画像に対して、(b)の2. のアルゴリズムによる結果も、(c)の3. のアルゴリズムによる結果も、ともに境界は滑らかになっている。しかし(b)では、境界を線成分としているため、原画像より白領域が多い画像となっている。これに対して(c)では、境界を縁成分として領域の面積が変わらないようにしているため、より原画像に忠実な画像となっている。

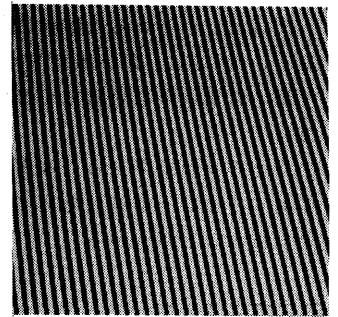
図12は、線と縁が混在している画像の例である。(b)では明るい方を線と判断しているため、白い線は太くなっているが、黒い線は逆に細くなっている。これに対し(c)では、白い線も黒い線もほぼ同



(a) 原画像

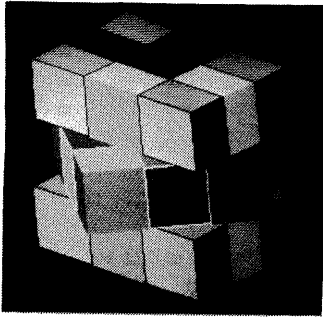


(b) 2. のアルゴリズム

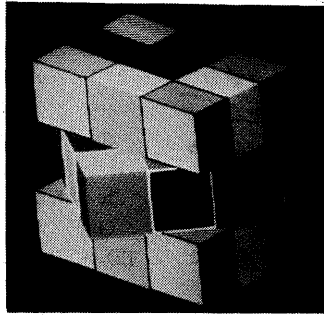


(c) 3. のアルゴリズム

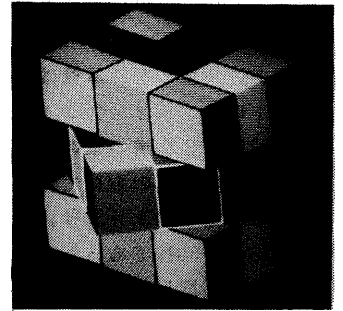
図11 滑線化処理例 1



(a) 原画像

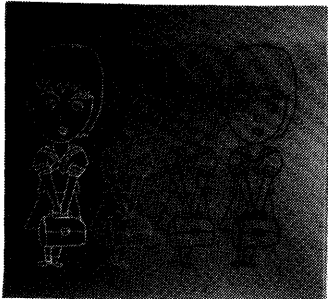


(b) 2. のアルゴリズム

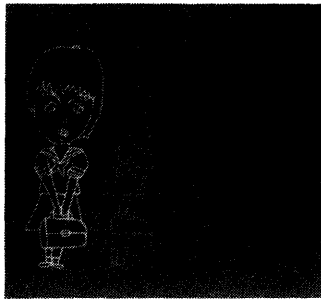


(c) 3. のアルゴリズム

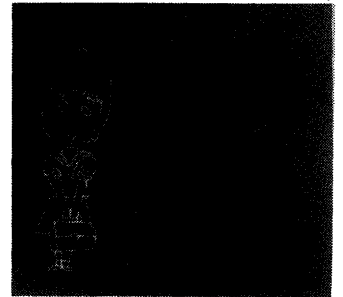
図12 滑線化処理例 2



(a) 原画像



(b) 2. のアルゴリズム



(c) 3. のアルゴリズム

図13 滑線化処理例 3

じ太さに表示されている。

図13は、いろいろな階調の線がある画像の例である。(b)では、黒い線は薄く細く見えるが、(c)では、背景より黒い線でもほぼ同じ濃さ、太さに見えている。

以上の実験結果から、本方式は、白黒階調画像に対する滑線・滑縁化処理アルゴリズムとして有効であることが分かる。

5. おわりに

線成分と縁成分を区別して抽出し、別々の方法で中間階調値を与えることにより、より原画像に忠実な滑線化・滑縁化処理を行うことができた。すなわち線の太さは変えることが可能であり、かつ、どの階調値の線も均一の太さである。また、領域と領域の境界は面積が変わらないように滑縁化することができた。

なお、使用した計算機は、VAX-11/750、言語はUNIX上のC、ディスプレイは、NEXUS6400である。処理時間は、画像の複雑さによって異なるが、図11の256×256の画像で約1分40秒、図12の256×256の画像で約1分30秒、図13の512×480の画像で約6分30秒であった。今後は、カラー画像に対しても応用したい。

参考文献

- 1) C.F.R.Weinman: "Continuous Anti-aliased Rotation and Zoom of Raster Image", ACM-SIGGRAPH, 14,3, pp.286-293 (1980)
- 2) W.J.Leler: "Human vision, Anti-aliasing and Cheap

4000 Line Display", ACM-SIGGRAPH, 14,3, pp.308-313 (1980)

- 3) J.Kajya and M.Ullner: "Filtering High quality Text for Display on Raster Scan Devices", ACM-SIGGRAPH, 15,3, pp.7-15 (1981)
- 4) E.Catmull: "A Hidden-surface Algorithm with Anti-aliasing", ACM-SIGGRAPH, 12,3, pp.6-11 (1978)
- 5) F.Crow: "The Use of Grayscale for Improved Raster Display of Vectors and Characters", ACM-SIGGRAPH, 12,3, pp.1-5 (1978)
- 6) E.A.Feibush, M.Levoy and R.L.Cook: "Synthetic Texturing Using Digital Filters", ACM-SIGGRAPH, 14,3, pp.294-301 (1980)
- 7) 安居院, 中嶋, 大江: "コンピュータアニメーション" 産報出版, pp.71-75 (1983)
- 8) S.Gupta and R.F.Sproull: "Filtering Edges for Gray-Scale Displays", ACM-SIGGRAPH, 15, 3, pp.1-5 (1981)
- 9) 西田, 中前: "カラーディスプレイにおけるスムーズな線分の発生法", 情報処理学会論文誌, 22,6 (1981)
- 10) F.Crow: "The Aliasing Problem in Computer-generated Shaded Images", Comm. ACM 20, pp.799-805, Nov. (1977)
- 11) J. Bloomental: "Edge Inference with Application to Antialiasing", ACM-SIGGRAPH, 17,3, pp.157-161 (1983)
- 12) 木見尻, 安居院, 中嶋: "マスク処理による滑線化アルゴリズム", 電子通信学会論文誌, J69-D, 3, pp.383-390 (1986)
- 13) 木見尻, 安居院, 中嶋: "コンピュータ・グラフィクス画像に対する滑線化の改良アルゴリズムとその誤差評価", テレビジョン学会技術報告, IPA78-3 (1985)
- 14) R.Brons: "Linguistic Methods for the Description of a Straight Line on a Grid", Computer Graphics and Image Processing, 3, pp.48-62 (1974)