

濃度輪郭線を用いた階調画像の中割りに関する研究

安居院 猛

斎藤 稔

中嶋 正之

東京工業大学 像情報工学研究施設

1. はじめに

アニメーション作成過程において、2つの異なる画像(キーフレーム画像)の中間画像を発生させる中割り作業は、非常に手間のかかる作業である。なぜならば、中割り作業は、アニメータの技術的な熟練さだけでなく、独特な個性表現や芸術的なセンスまでも必要とする作業であるからである。しかし、現在ではコンピュータによる省力化が進み、作業の効率化をはかることが可能となり、コンピュータ・アニメーション作画支援システムなどが構成されている。

このシステムの中で用いられる中割り法としては、線形キーフレーム法[1]が最も一般的である。線形キーフレーム法は、キーフレーム画像間に対応する点を直線で結び、その内分点を中間点として中間画像を生成する方法である。

線形キーフレーム法は、比較的簡単である反面、回転運動を適切に表現できない等の欠点を持っている。そのため、線形キーフレーム法以外に、動点制約法[2]、条件付きキーフレーム法[3]、制御点移動ベクトルを用いた方法[4]など、いくつかの中割り法が報告されている。

しかし、これらの中割り法もキーフレーム画像が線画や2値画像の場合を対象としているため、キーフレーム画像が階調画像の場合には適用しにくい。

本報告では、キーフレーム画像が階調画像の場合の中割り法として、2枚の階調画像から抽出される濃度輪郭線間を内挿することによって、中間の階調画像を生成する方法を提案する。

ここでは、階調画像の中割りアルゴリズム、および正面と側面の2枚の画像から、中間の回転する過程を与える画像の再生結果を示す。

2. 濃度輪郭線

濃度輪郭線は、階調画像の濃度分布を2値の線画像で記述したものであり、階調画像を効率よく記述することができる。

階調画像から抽出される濃度輪郭線は次のように定義される[5]。

[定義] 濃度輪郭線

階調画像 $F(X, Y)$ を n 個のいき値 t_k ($k=1, \dots, n$) によって、次のように2値化する。

$F(X, Y) \geq t_k$ のとき

$$B_k(X, Y) = 1 \quad (\text{黒画素})$$

$F(X, Y) < t_k$ のとき

$$B_k(X, Y) = 0 \quad (\text{白画素}) \quad (1)$$

ただし、 $k=1, 2, \dots, n$

式(1)によって得られる n 枚の2値画像 B_k ($k=1, \dots, n$) のそれぞれの白黒画素領域の境界線を抽出したものが濃度輪郭線である。

n 個のいき値 t_k ($k=1, \dots, n$) によって2値化された n 枚の2値画像 B_k ($k=1, \dots, n$) を、レベルプレーンと呼ぶ。レベルプレーンの1, 0に適當な階調レベル値をあてはめ、 n 枚のレベルプレーンを重ね合わせることによって $n+1$ 階調の画像を再生することができる。

3. 階調画像の中割りアルゴリズム

濃度輪郭線は、階調画像を記述するだけでなく、物体の移動や変形の量の検出にも利用できる。したがって、2枚の階調画像から濃度輪郭線を抽出して、対応する輪郭線どうしを内挿し、内挿された輪郭線データから、階調画像を再生すれば動きのある中間画像が得られると考えられる。

濃度輪郭線を用いた中割りのプロセスは、次に示すような5つの段階から構成される。

- (1) キーフレーム画像 F_1, F_2 に対して、 n 個のいき値 t_{1k}, t_{2k} ($k=1, \dots, n$) を選択する。
- (2) t_{1k}, t_{2k} を用いてレベルプレーン B_{1k}, B_{2k} を求め、濃度輪郭線を抽出する。
- (3) B_{1k}, B_{2k} 間でその中に存在する輪郭線どうしを対応づける。

- (4) 対応づけられた輪郭線どうしを内挿する。
- (5) 中割りされた輪郭線データから階調画像を再生する。

なお、実験に使用したキーフレーム画像は、石膏像の正面と側面の2種類である。これらの画像は、カメラとライトの関係を不変とし、石膏像を回転させて撮影した写真を、画像入力装置を用いて入力した結果得られたものである。

画像は、 256×256 画素、8ビット/画素、白黒である。

図1に、画像入力装置から得られたキーフレーム画像を示す。

3-1 いき値の選択

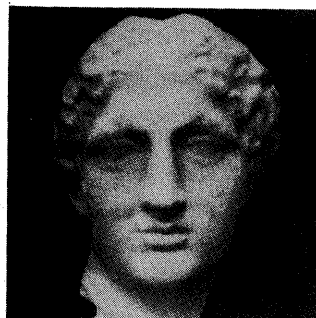
いき値の選択は、キーフレーム画像から濃度輪郭線を抽出する際の重要な問題である。いき値の選び方によって得られる濃度輪郭線が異なり、後の処理である濃度輪郭線間の対応づけや内挿にも影響を与える。そのため、元の階調画像の情報をできるだけ多く残した状態で2値化することが望ましい。本研究では、対象物体に着目した積分分割法[6]を用いる。この方法は、原画像中の特徴部分のみの濃度ヒストグラムに対して、いき値間の画素数が等しくなるように分割することによって、 n 個のいき値を決定する方法である。

3-2 濃度輪郭線の抽出

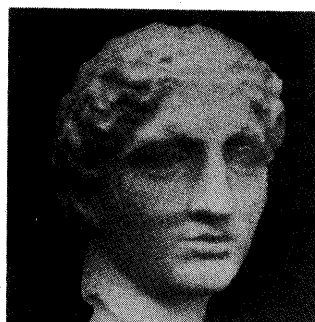
定義に従って、2枚のキーフレーム画像から濃度輪郭線を抽出する。

抽出された濃度輪郭線は、閉曲線であることから、フリーマンのチェーンコードで表現することが適当と考えられる。

一般に、閉曲線をフリーマンのチェーンコードで記述する場合には、始点の $X-Y$ 座標値とチェーンコード列だけでよい。しかし、この2つだけでは濃度輪郭線からレベルプレーンを再生するには情報が不十分である。つまり、黒画素領域の輪郭線か白画素領域の輪郭線かを示す情報がないとレベルプレーンを再生することができない。この情報をフラグとしてチェーンコードデータの先頭に付けておく。また、レベルプレーンの再生および次節で述べるような輪郭線どうしの対応を行なうためには、個々の輪



キーフレーム画像1



キーフレーム画像2

図1 キーフレーム画像

郭線にラベルを付けてレベルプレーンごとに管理し、輪郭線を扱いやすい形にしておくことが必要である。

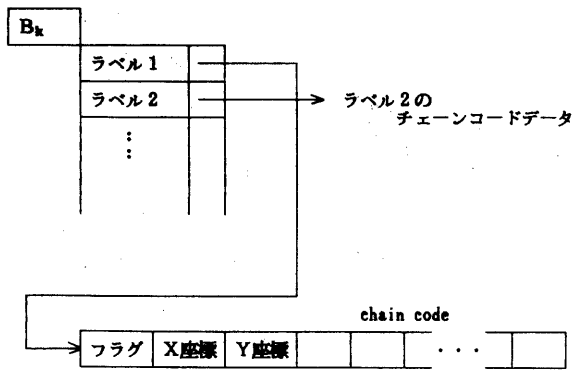
以上から濃度輪郭線のデータ構造は図2のようになる。

3-3 濃度輪郭線間の対応

レベルプレーン B_{1k} , B_{2k} 間で、その中に存在する輪郭線どうしを対応づける。

濃度輪郭線の性質として次のことが知られている[7]。

- ・レベルプレーン B_k から抽出された濃度輪郭線は、閉曲線である。



フラグ: 黒画素領域の輪郭線か白画素領域の輪郭線かを示すフラグ
 X座標: 始点のX座標
 Y座標: 始点のY座標

図2 濃度輪郭線のデータ構造

・レベルプレーン B_k から抽出された濃度輪郭線は、互いに交わらない。

したがって、濃度輪郭線の特徴量、および他の濃度輪郭線との関係を示す量として、次のようなものが考えられる。

- (1) 輪郭線で囲まれる閉領域の面積
- (2) 輪郭線の重心
- (3) 輪郭線の凹凸状態
- (4) 輪郭線の包含関係
- (5) 輪郭線の相対的位置関係

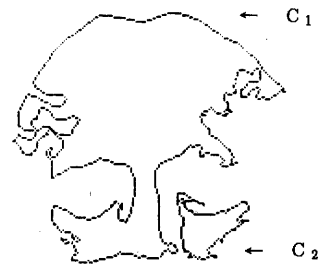
しかし、濃度輪郭線は様々であり、また、 B_{1k} 、 B_{2k} の輪郭線の数異なるなど、1対1に対応させることは難しい。ここでは、これらの情報を基にして、類似した輪郭線どうしを、次のような条件をつけて人為的に輪郭線間の対応を行なった。

- ・面積の大きい輪郭線から対応する輪郭線を見つけていく。
- ・対応する輪郭線が見つからないときは、その輪郭線を包含関係、および相対的位置関係が変わらない、ある1点に対応しているものとして扱

う。

- ・図3のように、キーフレーム画像1の2本の輪郭線 C_1 、 C_2 が、キーフレーム画像2の1本の輪郭線 C_1 に対応するときは、最も自然な中間画像が得られるように、その都度、操作者が考慮する。
- ・対応する輪郭線が見つけれない輪郭線の中で面積が10以下のものは省略する。

輪郭線間の対応は、手間のかかる作業であるが、1回決めれば、中割り枚数を単に指定するだけで、何枚でも中間画像が得られる。



キーフレーム画像1



キーフレーム画像2

図3 2本の輪郭線が1本の輪郭線に対応する例

3-4 濃度輪郭線間の内挿

対応づけられた2つの輪郭線をキーフレーム画像として、輪郭線間の内挿を行なう。

濃度輪郭線が閉曲線であることを利用して、2つの輪郭線を極座標形式で中割りする。つまり、2つの輪郭線に対して、輪郭線で囲まれる閉領域の重心を原点とした極座標系で、ベクトルの長さと角度をそれぞれ線形内挿することによって中間画像を生成する。この方法は、物体が回転した場合にも適用できる。

キーフレーム画像として、図4に示すような2つの輪郭線 C_1 , C_2 を考える。輪郭線 C で囲まれる閉領域の重心 G (G_x , G_y) を次式のように定義する。

$$G_x = \frac{\sum_{k=1}^N X_k}{N} = E(X_k) \quad (2)$$

$$G_y = \frac{\sum_{k=1}^N Y_k}{N} = E(Y_k) \quad (3)$$

ただし、 X_k , Y_k は輪郭線 C を構成する k 番目の画素の X , Y 座標、 N は輪郭線 C を構成する画素数である。

C 上の点 P は、ベクトル \overrightarrow{GP} の長さ r と \overrightarrow{GP} を水平方向から見た反時計回りを正とする角度 a を用いて、重心を原点とする極座標系 (r , a) で表すことができる。次に述べるマッチング法によって決定された C_1 , C_2 上での対応点を (r_1 , a_1) , (r_2 , a_2) とする。いま、キーフレーム画像間を m 枚の中間画像で中割りすることを考えると、中間画像の点 (r_3 , a_3) および重心 G_3 (G_{3x} , G_{3y}) は次式のように表される。

$$r_3 = r_1 + (r_2 - r_1) \cdot (J-1)/(m+1) \quad (4)$$

$$a_3 = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot (J-1)/(m+1) \quad (5)$$

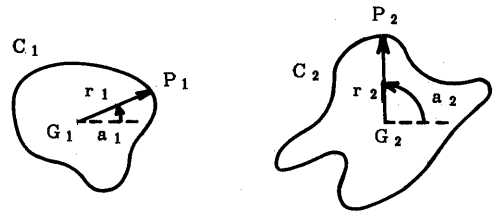
$$G_{3x} = G_{1x} + (G_{2x} - G_{1x}) \cdot (J-1)/(m+1) \quad (6)$$

$$G_{3y} = G_{1y} + (G_{2y} - G_{1y}) \cdot (J-1)/(m+1) \quad (7)$$

ただし、 $J = 1, 2, \dots, m+2$

中間画像が8連結の閉曲線にならないときは、点と点との間をスプライン関数を用いて補間する。

次に、上式に従って中間画像を生成する際の輪郭



キーフレーム画像 1

キーフレーム画像 2

C : 輪郭線 P : 対応点 G : 重心
 r : ベクトルの長さ a : ベクトルの角度

図4 輪郭線の極座標表現

線間での対応点の決め方について述べる。

前節で対応づけられた2つの輪郭線は、類似しているといっても、輪郭線を構成する画素数や局所的な凹凸の状態はかなり異なっている。そこで、次に示すような方法で輪郭線 C_1 , C_2 間での対応点を決める。

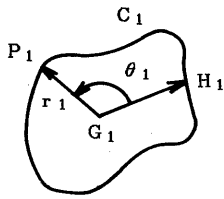
- (1) C_1 から s 個の点を選びだし、これらの点を V_{1k} ($k=1 \sim s$) とする。
- (2) V_{1k} それぞれに対して、 C_2 での対応点 V_{2k} を人為的に指定する。
- (3) V_{1k} と V_{1k+1} の間の点は、 V_{2k} と V_{2k+1} の間の点を比例配分することによって対応させる。

この方法では(2)で人為的な指定があるため、輪郭線の数が増加してくるとかなり能率が悪くなる。輪郭線で囲まれた閉領域がそれ程大きくなく、形状が単純な輪郭線に対しては、基準点からの相対的距離・重心からの距離・偏角差分関数[8]の3つの値を用いて自動的に対応点の決定を行なう。

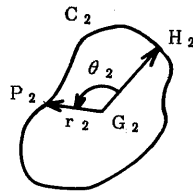
基準点からの相対的距離:

輪郭線 C に対して、 C 上に基準点 H が決まっているものとする。図5に示すように、 C 上の点 P における基準点 H からの相対的距離 θ を反時計回り正の角度で定義する。

基準点からの相対的距離による C_1 上の点 P_1 と



キーフレーム画像 1



キーフレーム画像 2

C: 輪郭線 P: 注目点 G: 重心 H: 基準点
 θ : 基準点からの相対的距離
 r: 重心からの距離

図5 基準点からの相対的距離と重心からの距離

C_2 上の点 P_2 の差 $D\theta$ を次式で表す。

$$D\theta = |\theta_1 - \theta_2| \quad (8)$$

基準点 H は、C 上の点 P の中で、ベクトル \vec{GP} (G は重心) の水平方向からの角度と C の主軸の水平方向からの角度との差が最小になる点とする。主軸は、輪郭線の形を楕円で近似したときの長軸の方向である。

輪郭線の主軸は次のように求める。

$$\begin{aligned} A &= E(X_k^2) - \{E(X_k)\}^2 \\ B &= E(Y_k^2) - \{E(Y_k)\}^2 \\ C &= E(X_k \cdot Y_k) - E(X_k) \cdot E(Y_k) \end{aligned} \quad (9)$$

これらの A, B, C によってきまる行列

$$\begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$$

の固有値に対する固有ベクトルが主軸の方向となる。

重心からの距離:

図5に示すように、輪郭線 C 上の点 P における重心 G からの距離 r は、ベクトル \vec{GP} の長さである。

重心からの距離による C_1 上の点 P_1 と C_2 上の点 P_2 の差 D_r を次式で表す。

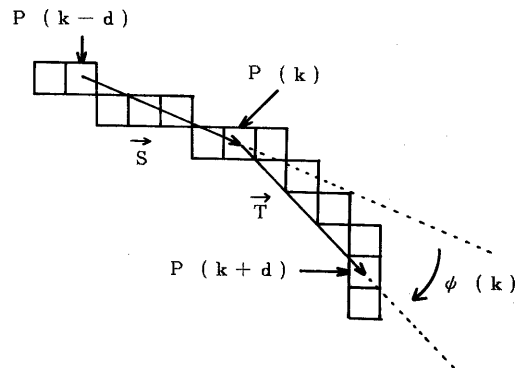
$$D_r = |r_1 - r_2| / (r_1 + r_2) \quad (10)$$

偏角差分関数:

偏角差分関数は、輪郭線の凹凸の状態を表す関数である。図6に、偏角差分関数 $\psi(k)$ の計算法を示す。 $\psi(k)$ は、点 $P(k)$ において d 画素前の点から引いたベクトル \vec{S} と d 画素後の点へ引いたベクトル \vec{T} のなす角度である。

偏角差分関数による C_1 上の点 P_1 と C_2 上の点 P_2 の差 $D\psi$ を次式で表す。

$$D\psi = (\psi_1 - \psi_2)^2 \quad (11)$$



$P(k)$: 注目点 $\psi(k)$: 偏角差分関数

図6 偏角差分関数の計算法

以上の3つの差を総合した値 T_D を次式で表す。

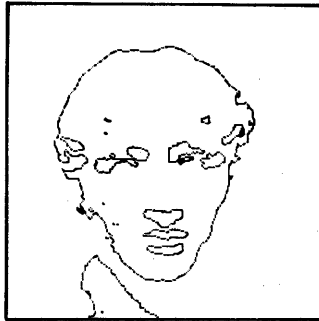
$$T_D = D\theta \cdot D_r \cdot D\psi \quad (12)$$

C_1 から選び出された V_{1k} ($k=1 \sim s$) に対する C_2 での対応点 V_{2k} ($k=1 \sim s$) は、 T_D が最小となる点とする。

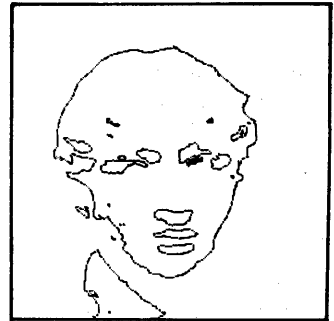
図7に、3番目のレベルプレーンの濃度輪郭線間を、内挿した結果を示す。(a), (e) がキーフレーム画像、(b), (c), (d) が中間画像である。



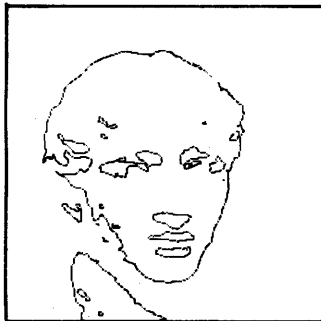
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

256 × 256 画素

(a), (e) : キーフレーム画像
(b), (c), (d) : 中間画像

図7 濃度輪郭線間の内挿例

3-5 階調画像の再生

濃度輪郭線から階調画像を再生するプロセスは、階調画像から濃度輪郭線を抽出する場合の逆になる。このプロセスは、大きく次の2つに分けられる。

(1) レベルプレーンの再生

面積の大きい輪郭線から順に、黒画素領域の輪郭線ならば輪郭線の内部に1、白画素領域の輪郭線ならば内部に0を与えていくことによって、レベルプレーンを再生する。

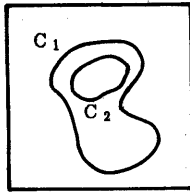
(2) $n+1$ 階調画像の再生

レベルプレーンの1, 0にそれぞれ適当な階調レベル値を対応させ、 n 枚のレベルプレーンを重ね合わせることによって、 $n+1$ 階調の画像を再生する。

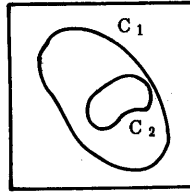
中割りされた輪郭線データから2値画像を再生する。すなわち、レベルプレーン B_{1k} , B_{2k} の中間画像を生成する。

階調画像から抽出される濃度輪郭線は、互いに交わらないという性質を持っているが、中間画像では、この性質が満たされているとは限らない。つまり、輪郭線間を内挿した結果、輪郭線どうしが交わってしまう場合がある。

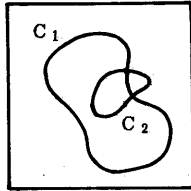
たとえば、図8のような、キーフレーム画像では輪郭線 C_1 が輪郭線 C_2 を包含していたにもかかわらず、中間画像では内側の輪郭線 C_2 が外側の輪郭線 C_1 からはみ出してしまった場合を考える。このような場合も、中間画像の領域の包含関係が、キーフレーム画像の領域の包含関係と本質的には同じであると考え、輪郭線がはみ出していない場合と同様に、面積の大きい輪郭線から順に、輪郭線の内部に1あるいは0を与えていくことによって、レベルプレーンを再生する。



キーフレーム画像 1



キーフレーム画像 2



中間画像

図 8 輪郭線がはみ出した例

次に、中割りされた n 枚のレベルプレーンから、 $n+1$ 階調画像を再生する。

再生を行なう前に、まず以下のような処理を行なう。

レベルプレーン B_k ($k=1, \dots, n$) は、次のような関係を満たしている。

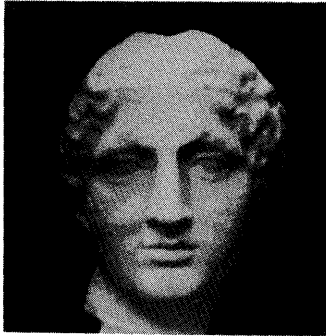
$t_i < t_j$ のとき

a) B_i の黒画素領域 $\supset B_j$ の黒画素領域

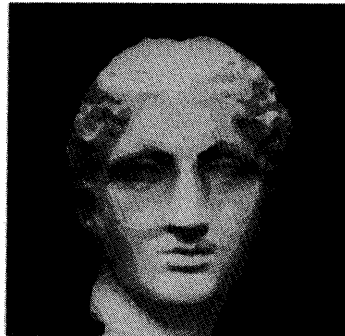
b) B_i の白画素領域 $\subset B_j$ の白画素領域

中割りされた n 枚のレベルプレーンを上の関係を満たすように修正する。レベルプレーン B_k の修正は、 B_k と B_{k-1} で論理積をとることで実行することができる。

修正された n 枚のレベルプレーンを $n+1$ 階調の画像に再生する。中間画像に与える $n+1$ 個の代表値は、濃度輪郭線を抽出する際に用いた 2 組の n 個のい値 t_{1k}, t_{2k} に対して、各再生画像に与える 2 組の $n+1$ 個の代表値 z_{1k}, z_{2k} を線形内挿することによって求める。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

図 9 再生画像

(a), (e) : キーフレーム画像の再生画像
(b), (c), (d) : 中間画像の再生画像

4. 中割り実験結果

以上述べた濃度輪郭線を用いた中割り法によって、実際に階調画像の中割り実験を行なった。

図1に示すような石膏像の正面と側面の2枚の画像をキーフレーム画像とし、正面から横へ回転する映像をコンピュータを用いて作成した。

$n = 9$ に設定し、本方法によって得られた再生画像を図9に示す。(a), (e)がキーフレーム画像の再生画像、(b), (c), (d)が中間画像の再生画像である。

この図より、濃度輪郭線間を内挿することによって、石膏像が回転していく様子を表している自然な中間画像が得られていることがわかる。

本実験に用いた計算機は、OKITAC 4300b (主記憶 64 kバイト, 16ビット/語)であり、濃度輪郭線の抽出と対応づけに約4時間、中間画像の生成には1枚当たり約2時間を必要とした。

なお、実験に使用した言語はPL/Iのサブセットであり、全システムは、約1500行のプログラムにより記述されている。

5. おわりに

本方法は、中割り作業が、複雑ではあるが、コンピュータ・アニメーションや動画画像解析への応用等を考えるとかなり有効であると考えられる。

中割り作業が複雑な原因としては、輪郭線間の対応など、人為的指定が多いことがあげられる。人為的指定の問題については、本方法に限らず、線画や2値画像を対象とした中割り法にも言えることである。人為的指定を減らし、画像間の対応関係を自動的に決定するためには、キーフレーム画像を効率よく記述することや、キーフレーム画像が何を表しているかを理解することが必要であると考えられる。

6. 参考文献

- [1] Burtnyk N. and Wein M.: "Interactive Skeleton Techniques for Enhancing Motion Dynamics in KeyFrame Animation", C. ACM, 19, 10, pp564-569 (1976)
- [2] William T. Reeves: "Inbetweening for Computer Animation Utilizing Moving Point Constraints", Computer Graphics, Vol. 15, No. 3, pp263-269 (1981)
- [3] 安居院・竹田・中嶋: "条件付きキーフレームアニメーション", 情報処理学会CG研究会, 1-2 (1981)
- [4] 木村: "制御点ベクトルを用いた中割りアルゴリズム", 電子通信学会全国大会, 598 (1983)
- [5] 中嶋・安居院・竹田: "濃度輪郭線を用いた階調画像の符号化法", 電子通信学会技術報告, IE83-74, pp1-6 (1983)
- [6] 安居院・鈴木・中嶋: "濃度輪郭線を用いた階調画像記述のためのいき値決定について(2)", 電子通信学会全国大会, 131 (1983)
- [7] 中嶋・安居院・松原: "濃度輪郭線情報を用いた低航空写真の解析", 電子通信学会技術報告, PRL80-101, pp39-46 (1981)
- [8] 安居院, 高木, 岩田: "輪郭スペクトル情報を用いた閉領域同定に関する研究", 電子通信学会技術報告, PRL80-100, pp31-37 (1981)