

ベクタ画像を対象とした輪郭線抽出に基づく図地分離手法の検討

林 貴宏[†], 柴田 一帆[†], 尾内 理紀夫[†]

[†] 電気通信大学 情報工学科

ベクタ画像を対象とした輪郭線抽出に基づく図地分離手法を提案した。適用可能なベクタ画像はクリップアートなどのワンカットのイラストである。提案手法ではイラストに明示的に描かれた輪郭線に着目し、最も外側に存在する輪郭線を図と地の境界線と定義する。この定義に基づき、ベクタ画像を構成するオブジェクト群(ポリゴン、楕円、線など)からイラストの輪郭線を表現しているオブジェクトを検出し、図地分離を実現する。このときベクタ画像を構成するオブジェクトの中で、細く繋がった領域を有し、隣接する領域との色差が大きいオブジェクトを、輪郭線を表現しているオブジェクトとして検出する。126枚のベクタ画像のサンプルに対し計算機(提案手法を使用)と人間との図地分離結果を比較した結果、81%のサンプルが図領域の重なり誤差10%以内で一致した。

Figure-Ground Discrimination for Vector Images Based on Contour-Line Extraction

Takahiro HAYASHI[†], Kazuho SHIBATA[†], and Rikio ONAI[†]

[†] Department of Computer Science, The University of Electro-Communications

This paper reports on a method for figures-grounds discrimination for vector images based on contour-line extraction. The method is available for vector images such as clipart drawings. A vector image is expressed by composing plural objects (e.g. polygons, ellipses, lines, etc.), and some of the objects defines the region of the boundary between figure and ground. Assuming that the outermost contour-line in an image is the boundary between figure and ground, the method finds objects defining the region of the boundary. In contour-line extraction, the method selects objects which have thin continuous regions and have high color-difference to their neighboring regions. We have examined the performance of the method by use of 126 samples of vector images. In 81% of the samples, the method has automatically extracted figures.

1 まえがき

現在、画像を表現するためのデジタルデータとしてラスタ方式とベクタ方式が広く使われている。ラスタ方式は画素を基本単位として、画素を格子状に並べ各画素に色を割り当てることで画像を表現する方式である。一方、ベクタ方式は、比較的単純な図形—ポリゴン、楕円、ポリライン、曲線など—を構成要素(オブジェクト)として、それらの組合せや重ね合わせにより画像を表現する方式である。ベクタ方式は一般に、形状、配色、濃淡などは単純であるが輪郭の鮮明な画像を描くことができるため、ロゴ、図表、グラフ、地図、クリップアートなどの画像を表すのに適している。¹⁾ 近年では、webドキュメントに含まれるイラストなどにもベクタ方式が多用されている²⁾。

このようにベクタ方式が広く普及し、ベクタ方式の画像(ベクタ画像)がデータベースに蓄積されているにもかかわらず、ベクタ画像に対する画像

検索研究はほとんどないのが現状である³⁾。ベクタ画像は複数のレイヤで定義され、各レイヤに1つのオブジェクトが対応している画像と考えることができる。オブジェクト同士が互いに独立しているため、レイヤ単位での画像処理が可能である。また、複数のレイヤを任意に選出し統合するといった処理なども可能である。このような特徴はラスタ方式には無く、これを活用したベクタ方式独自の画像処理技術や画像検索技術の確立が望まれている^{3) 4) 5)}。

類似画像検索などのCBIR(Content-based Image Retrieval)においては、検索対象画像がラスタ方式であるかベクタ方式であるかに関わらず、システムが判断した画像間の類似性を人間の感覚と対応させることが要求される。人間の類似性判断には、画像中の図(figure)となる領域の特徴が、地(ground)となる領域の特徴よりも強く影響を与えることが確認されている。そのため、システムの

類似性判断を人間の感覚に近づけるための有効な前処理として、画像の図地分離が活発に研究されている 6) 7) 8) 9)。

しかし、これまでの研究はラスタ画像を対象としている。ベクタ画像に対しては、ラスタ画像に変換(ラスタ化)し、これまで提案されてきた数々の図地分離手法を適用するという方法も考えられる。しかし、ベクタ画像には、レイヤ構造、オブジェクト位置、オブジェクト間の内包関係などの情報が容易に取得可能という利点や、レイヤ単位での画像処理が可能という利点がある。よって、ベクタ画像の図地分離では、ベクタ画像におけるこれらの利点を活用することで、従来手法では分離困難だった画像に対しても、分離可能となる可能性がある。

そこで本論文では、ベクタ画像に対する画像検索実現へ向けた第一歩として、ベクタ方式独自の特徴を活かした図地分離手法を提案、評価することを目的とする。なお、本論文では、対象とするベクタ画像の種類をクリップアートのようなワンカットのイラストに限定する。

以下、2章において図地分離手法を提案する。3章で提案手法の有効性を評価するために行った評価実験について述べ、4章で本論文をまとめる。

2 図地分離処理

2.1 図地分離の方針

図と地はゲシュタルト心理学上の概念であり、視野(画像)の中で形を持って見える領域を図、背景となる領域を地であるという¹⁰⁾。画像中の図と地の区別は個人の主観や感性、あるいは過去の経験や知識が作用する。よって、人間の主観が解明されていない現段階で、これを考慮し、図と地を厳密に定義することは非常に困難である¹¹⁾。「ルビンの壺」のように、見方により図と地の判断が逆転する図地反転図形など特殊な画像も存在する。

しかし、クリップアートなどの実用的に使用されているベクタ画像に注目すると、図地反転図形のような特殊な画像は少なく、ワンカットのキャラクターの絵などの画像が多い。そしてこれらの画像のほとんどは、図の輪郭が輪郭線として明示的に描かれており、図と地が区別できる画像であることが多い。

ベクタ画像を構成するオブジェクトは、図内部を表現するためのオブジェクト、地を表現するためのオブジェクト、そして、輪郭線を表現するためのオブジェクトに分けることができる。そこで、図地分離の方針として、まず、各オブジェクトに対し、それが輪郭線を表現するオブジェクトである

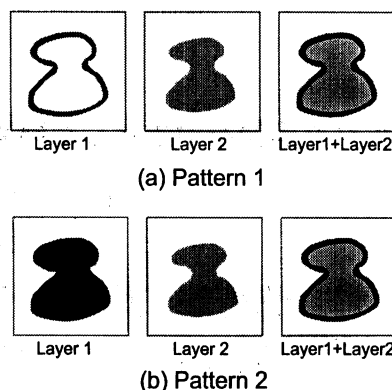


図 1: 輪郭線を表現するための二種類のパターン

かどうかを判定させ、次に、最も外側にある輪郭線に囲まれる領域に存在するオブジェクトを図内部を表現するオブジェクトと判定させる。そして最後に、輪郭線と図内部を表現するオブジェクトをまとめて図を表現するオブジェクトと判定する。

2.2 輪郭線抽出のための前処理

2.2.1 オブジェクト単位でのラスタ化

前処理として、ベクタ画像を構成する全てのオブジェクトに対し、それぞれ単独でラスタ化する。このとき、各オブジェクトの外側の領域は透明色を割り当てるものとする。また、ラスタ化により生成する画像は、縦横共に X ピクセルで規格化する(以後、画像サイズとは X を指すこととする)。各オブジェクトをラスタ化することで得たこれらの画像をレイヤと呼ぶ。また、各レイヤにおいてオブジェクトが定義されている領域(透明色以外の画素で定義される領域)をオブジェクト領域と呼ぶ。

2.2.2 差分レイヤの生成

ベクタ画像において、輪郭線を表現するためのオブジェクト構成の方法は2種類のパターンに分けられる。図1にそのパターンを示す。パターン1では、レイヤ1に輪郭線を定義している線状のオブジェクトが配置され、レイヤ2には輪郭線の内側部分を定義するオブジェクトが配置されている。すなわち、レイヤ1とレイヤ2のオブジェクト領域が排他的な関係となるオブジェクト構成の方法である。それに対し、パターン2では、レイヤ1に輪郭線の内側も含めて塗りつぶした大きなオブジェクトが配置され、レイヤ2はパターン1のものと同様のオブジェクトが配置されている。レイヤ2のオブジェクト領域がレイヤ1のオブジェクト領域の一部を上書きする関係となるオブジェクト構成の方法である。どちらのパターンもレイヤ

の統合結果は同一である。

この2種類のパターンを統一的に扱えるようにするため、輪郭線抽出に先駆け、差分レイヤ生成を実行する。差分レイヤとは、各レイヤのオブジェクト領域中、他のレイヤのオブジェクト領域で上描きされる部分を取り除いた(透明色に置換した)画像である。差分レイヤではパターン1,2の表現が等しくなるため、次節の輪郭線抽出ではパターンに依存しない統一的な処理が可能となる。

2.3 輪郭線抽出

2.3.1 輪郭線抽出の流れ

差分レイヤに着目すると、輪郭線を定義しているオブジェクト領域は幅の狭い線状の領域となる。また、輪郭線は、領域の境界を明確にするために描かれるため隣接領域の色に対して際立った色で描かれていることが多い。そこで、輪郭線抽出の手順として、まず、各差分レイヤのオブジェクト領域の中で線状のものを検出する。次に、検出された線状オブジェクトの色が隣接領域の色と比べて際立っているかどうか調べ、際立っているものを輪郭線として抽出することにする。

2.3.2 線状オブジェクト領域の抽出

まず、差分レイヤにおけるオブジェクト領域が線状となっているオブジェクトを検出する方法について述べる。この検出のために、Hilditchの細線化処理¹²⁾を利用する。細線化処理では、図形の連結性を保持したまま、線の幅が1になるまで領域の周囲から少しずつ画素を削り取る処理が繰り返して実行される。本手法ではこの繰り返し回数に着目する。繰り返し回数は、領域形状に依存する。領域形状を点状、線状、面状の3種類に分けて考えるとすると、繰り返し回数は、領域形状が点状あるいは線状のとき小さくなるのに対し、面状のとき大きくなる。

また、本手法では、繰り返し回数に加えて、オブジェクト領域を包含する最小矩形の長辺の長さにも着目する。オブジェクト領域を包含する最小矩形とは、オブジェクト領域中の最も左にある点を通る縦方向の直線、最も右にある点を通る縦方向の直線、最も上にある点を通る横方向の直線、最も下にある点を通る横方向の直線、以上4本の直線で囲まれる矩形のことである。この矩形の長辺の長さも領域形状に依存し、領域形状が点状のとき小さく、線状、面状のとき大きくなる。以上から、細線化の繰り返し回数と最小矩形の長辺の長さを利用し、オブジェクト領域 O の形状が線状であるかどうかを判定するための評価関数 $L(O)$ を

次式、

$$L(O) = M(O)S(O) \quad (1)$$

により定義する。ただし、 $M(O), S(O)$ はそれぞれ、

$$M(O) = \begin{cases} 0 & N(O) > T_n \\ 1 & N(O) \leq T_n \end{cases} \quad (2)$$

$$S(O) = \begin{cases} 0 & P(O) < T_p \\ 1 & P(O) \geq T_p \end{cases} \quad (3)$$

で定義される。 $N(O)$ は細線化における繰り返し回数、 T_n は閾値(定数)であり、この値は“点状あるいは線状”と“面状”とを区別するための繰り返し回数の境界値である。 $P(O)$ はオブジェクト領域を囲む最小矩形の長辺の長さ、 T_p は閾値(定数)であり、“点状”と“線状あるいは面状”とを区別するための長さの境界値である。以上から領域の形状が線状のとき $L(O) = 1$ となり、そうでないとき(点状または面状) $L(O) = 0$ となる。これを利用し、差分レイヤにおいてオブジェクト領域が線状となるオブジェクトを抽出できる。

2.3.3 隣接領域との色差による輪郭線判定

次に、検出した線状のオブジェクトの中から、オブジェクトの色が隣接領域の色に対して際立っているものを抽出する方法について述べる。まず、輪郭線の色が隣接領域の色に対して際立っていることを確認するためにに行った事前調査について結果を示す。

調査ではランダムで選択した100個の画像に対して、輪郭線とその隣接領域の色差、および、輪郭線以外の線(例えば模様としての線など)とその隣接領域の色差を調べた。なお、各線に隣接領域の色が複数存在する場合は最大色差のものをとった。色差の尺度としてはCIE1976L*a*b*色差¹³⁾を使用した¹⁾。CIE1976L*a*b*色差は人間が感じる知覚的な差位とほぼ比例関係にあるという性質がある。色差の分布は図2のようになった。調査結果から輪郭線とその隣接領域の色差の分布、輪郭線以外の線とその隣接領域の色差の分布にはそれぞれ明確な特徴があることが確認できた。前者はほとんど全て(98%)が色差70以上となり、後者は全てのサンプルが色差70未満となった。

この調査結果より色差を利用することで、線状オブジェクトの中でも輪郭線となるもののみを効果的に絞りこむことが可能になると考えられる。そこで、評価関数 $L(O)$ により抽出した線状オブジェ

¹⁾ L*の値域 [0,100], a* の値域 [-134,220], b*の値域 [-140,122]

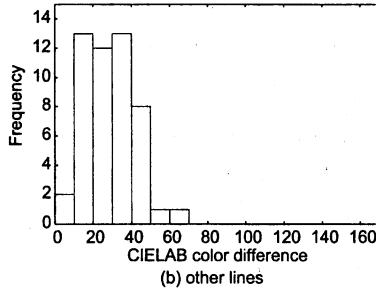
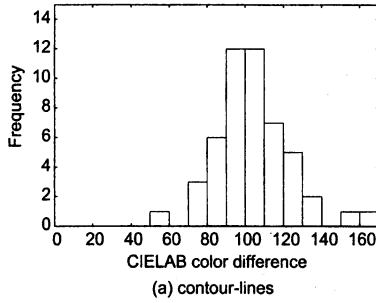


図 2: (a) 輪郭線と隣接領域の色差と (b) 輪郭線以外の線と隣接領域の色差

クトに対し、さらに輪郭線となるものを絞りこむための評価関数 $H(O)$ を次式、

$$H(O) = \begin{cases} 0 & D(O) < T_d \\ 1 & D(O) \geq T_d \end{cases} \quad (4)$$

により定義する。ここで、 $D(O)$ はオブジェクト O の色とその隣接領域の色の最大色差を表す。 T_d は輪郭線とそれ以外の線を区別するための閾値である。この閾値は先に述べた事前調査の結果から $T_d = 70$ 程度が適当と考えられる。

2.4 図領域の抽出

2.4.1 2種類の例外

2.1節で述べた図地分離の方針では、ベクタ画像を構成するオブジェクトの中で、境界線の内側にのみ存在するオブジェクトが、図内部を表現するオブジェクトと判定する。しかし、この方針では図地分離に失敗する2種類の例外が判明している。

図3にこれら2種類の例外の例を示す。(a)は境界線が完全には閉じていないという例外である。このような画像では、計算機が輪郭線の内部と外部を区別できず、図地分離ができないという問題が発生する。また、(b)は図内部の塗りつぶしを定義するオブジェクトのオブジェクト領域が境界線を少しだけのみ出ているという例外である。もし厳格に輪郭線の内側に存在するオブジェクトを

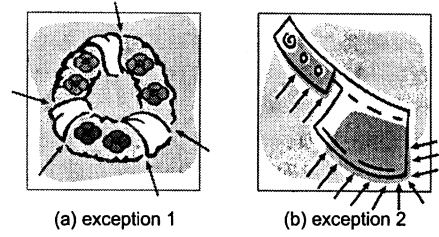


図 3: 2種類の例外

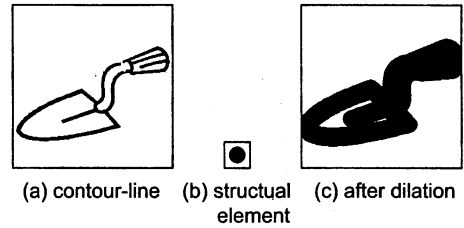


図 4: ディレイションによる輪郭線の膨張

図内部を表現するオブジェクトと判定してしまうと、このような一部だけがはみ出したオブジェクトは図内部を表現するオブジェクトとは見なされなくなる。

2.4.2 Dilation による例外への対処

そこで、この2種類の例外に対処できるように輪郭線を膨張させる処理 (dilation) を実行する。以下に処理手順を示す。

まず、輪郭線として検出されたオブジェクトの差分レイヤにおいて、オブジェクト領域の色をすべて黒に置換する。さらに、これらの差分レイヤを統合する。統合により得た画像を A とする。ここで、 A において黒画素が定義されている座標の集合を $P(A)$ と表す。また、図4(b)に示すような円領域を表す画像 B (structuring element) を考える。円の半径は r である (r の設定法については後述)。円の中心を原点とする黒画素の座標の集合を $P(B)$ と表す。このとき $P(A)$ に対し、 $P(B)$ を要素とする dilation $P(A) \oplus P(B)$ を計算し、その結果を集合 $P(C)$ とする。dilation は次式、

$$P(C) = P(A) \oplus P(B) \\ = \{c \in P(C); c = a + b, a \in P(A), b \in P(B)\} \quad (5)$$

により定義される¹⁴⁾。 $P(C)$ により定義される画像を C とする。この処理は B における原点 (円の中心) が、 A 上のすべての点上を動きまわったときの B の点の軌跡を求める処理と等価である。

dilationにより、図4(a)の輪郭線は、(c)のように膨張する。膨張した輪郭線の最も外側を定義する境界線(膨張した境界線と呼ぶことにする)は、dilation適用前の境界線(元の境界線と呼ぶことにする)よりも r だけ外側に広がる。その結果、元の境界線が閉じてない場合(例外1)であっても、元の境界線の二つの端点の距離が $2r$ 以下ならば膨張した境界線は閉じる。これにより例外1で発生する問題を解消できる。

また、膨張した境界線は、元の境界線より外側に r だけ広がる。よって、図の塗りつぶしを定義しているオブジェクト領域が元の境界線を一部はみ出ている場合(例外2)であっても、そのはみ出し幅が r 以下ならば、膨張した境界線の内側となる。これにより例外2で発生する問題を解消できる。

ただし、膨張の幅を決定する r を大きく設定しすぎた場合、境界線に近い場所に存在する地を表現するオブジェクトまで図内部を表現するオブジェクトとして判定される可能性が発生する。そのため、 r としては適切な値を設定する必要がある。例外2を含むベクタ画像50枚を無作為抽出し調査した結果、いずれもはみ出し幅が $X/15$ (X は画像サイズ)を越えないことを確認しているので、経験的に $r = X/15$ 程度が適当であると考えられる。

3 評価実験

3.1 方法

提案手法の有効性を検証するために評価実験を行った。実験では、126個のベクタ画像のサンプルを使用した。各サンプルに対し、計算機(提案手法を使用)および人手により図と地を分離した。計算機と人間による分離結果を比較し、一致(matched)、ほぼ一致(roughly matched)、不一致(unmatched)の3段階で分類した。ほぼ一致に分類されるものは以下の2条件、

$$(\text{条件1}) \quad \frac{S(F_h - F_c)}{S(F_h)} \leq 0.1$$

$$(\text{条件2}) \quad \frac{S(F_c - F_h)}{S(F_h)} \leq 0.1$$

を同時に満たすサンプルである。ここで、 F_c は計算機により図と判断された領域、 F_h は人手で図と判断された領域、 $F_i - F_j$ は領域 F_i と領域 F_j の共通部分を領域 F_i から除いた領域、 $S(F)$ は領域 F の面積(領域の画素数)である。ほぼ一致に分類されるサンプルは、誤差10%以内のサンプルであると言える。

計算機による図地分離では、パラメータとして $T_n = X/16, T_p = X/8, T_d = 70, r = X/15$ を使用した。

表 1: 実験結果

Matched	50.0%(63/126)
Roughly Matched	31.7%(40/126)
Unmatched	18.3%(23/126)

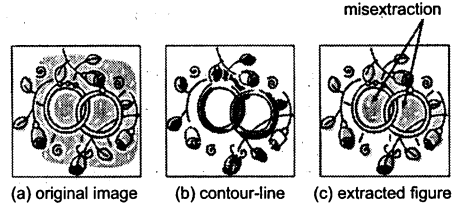


図 5: 図地分離に失敗したサンプル

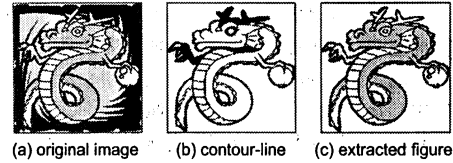


図 6: 図地分離に成功したサンプル

3.2 結果と検証

実験結果を表1に示す。実験結果において、一致とほぼ一致の割合の合計(誤差10%以下となったサンプルの割合)は81.7%となった。

次に、図5に図地分離が失敗したサンプルを示す。このサンプルでは図の外側だけでなく、図の内側にも地の領域がある(ドーナツ型の構造と呼ぶ)。しかし、提案手法では、外側の境界線の内部にあるオブジェクトをすべて図を表現するオブジェクトと判定する。そのため、境界線の内部にある地の領域も図と判定してしまう。提案手法で失敗するサンプルの多くがドーナツ型の構造を持つ画像であった。このようなドーナツ型の構造を持つ画像への対処が課題として残されている。

次に、図6(a)に図地分離が成功したサンプルを示す。図6(b)は本手法により抽出した輪郭線である。この輪郭線に基づき図地分離を行った結果が図6(c)である。この画像はラスタ画像を対象とした代表的な輪郭線抽出法である動的輪郭法¹⁵⁾では図地分離が困難と予想される。動的輪郭法では、画像中に初期輪郭 C を設定し、 C の関数として定義された評価関数 E を最適化するように C を修正していくというアプローチを採用。このとき評価

関数 E は、通常 C が位置する場所のエッジ強度が使用される。この画像においては地領域においてもエッジ強度が大きい部分が存在する。そのため、適切な輪郭線を得られない可能性がある。また、動的輪郭法では、得られる輪郭の最適性は必ずしも保証されない(初期輪郭の設定により局所収束する場合がある)ことや、繰り返し計算を必要とすることから、頑健性や処理時間の面でも不利と考えられる。これに対し、提案手法ではオブジェクト単位で輪郭線を定義しているオブジェクトかどうかを判定するため頑健性や処理時間の面でも有利である。これは、ベクタ画像が持つ利点(オブジェクト単位での画像処理が適用可能な点など)を活用した図地分離手法の優位性を示す一例といえる。

4 むすび

本論文では、ベクタ画像に対する図地分離を目的として、輪郭線抽出に基づく図地分離手法を提案した。図地分離において中心的な処理となる輪郭線抽出では、輪郭線が線状の領域であることと隣接領域との色差が大きいことを利用した抽出法を採用した。126枚のベクタ画像のサンプルに対し、計算機(提案手法を使用)と人間との図地分離結果を比較した結果、81%のサンプルが一致あるいはほぼ一致と判定された。また、不一致と判定されたサンプルを調査した結果、その多くがドーナツ型の構造(図内部に地がある構造)を持つことが判明した。

現在残されている課題として、ドーナツ型の構造を持ったベクタ画像への対処がある。今後は、この課題に取り組むと共に、ラスタ画像を対象とした輪郭線抽出法を使用した場合との比較により、提案手法の有効性と限界を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 常磐繁, マルチメディアデータ入門, コロナ社, 東京, 2003.
- 2) S. Proberts, J. Mong, D. Evans, and D. Brailsford, "Vector Graphics: From PostScript and Flash to SVG," Proc. 2001 ACM Symposium on Document Engineering, pp.135-143, 2001.
- 3) M.J. Fonseca, B. Barroso, P. Ribeiro, and J.A. Jorge, "Retrieving ClipArt Images by Content," Proc. Int. Conf. Image and Video Retrieval(LNCS 3115), pp.500-507, 2004.
- 4) J. Cho, C. Choi, Y. Chang, and S. Kim, "Representation of Clipart Image Using Shape and Color with Spatial Relationship," Proc. Pacific-Rim Conf. Multimedia(LNCS 3331), pp.165-173, 2004.
- 5) C. Choi, Y. Chang, J. Cho, and S. Kim, "Extract Shape from Clipart Image Using Modified Chain Code - Rectangle Representation," Proc. Int. Conf. Computational Science and Its Applications(LNCS 3046), pp.251-260, 2004.
- 6) L. Herault and R. Horaud, "Figure-Ground Discrimination: A Combinatorial Optimization Approach," IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol.15, No.9, pp.899-914, 1993.
- 7) L. Zhao and L. S. Davis, "Iterative Figure-Ground Discrimination," Proc. Int. Conf. Pattern Recognition, Vol.1, pp.67-70, 2004.
- 8) A. Amir, and M. Lindenbaum, "Ground from figure Discrimination," Computer Vision Understanding, Vol.1 No. 76, pp.7-18, 1999.
- 9) D. Geiger, K. Kumarau, and L. Parida, "Visual Organization for Figure/Ground Separation," Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.155-160, 1996.
- 10) 高木幹雄, 下田陽久, 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- 11) 上内秀隆, "図形処理における輪郭線について," 情報処理, Vol.11, No.5, pp.274-284, 1970.
- 12) C.J. Hilditch, "Linear skeleton from square cupboards," in Machine Intelligence, Edinburgh Univ. Press, pp.403-420, 1967.
- 13) 小林光夫, "均等色空間 (I)-Munsell 色空間から CIELAB へ," 日本色彩学会誌, Vol.26, No.2, pp.73-83, 2002.2.
- 14) J. Serra, Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, New York, 1982.
- 15) M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models," Int. J. Comput. Vis., Vol.1, No.4, pp.321-331, 1988.