

確率的弛緩法を用いた樹木画の領域分割

小 川 秀 夫[†]

心理臨床における樹木画テストで得られる樹木画を確率的弛緩法により、樹冠、幹および根（地面を含む）の各領域に分割する手法を提案する。本手法では、原画像から解像度の低いセル画像を構成し、セル単位で樹冠、幹および根の領域である可能性を評価する。また、樹木画の特徴を利用して各領域の位置情報を与える4つの基準線を適応的に設定する。本手法により、多様な樹木画に対して良好な領域分割が得られることを実験結果により示す。

Segmentation of Tree-drawings Using Probabilistic Relaxation

HIDEO OGAWA[†]

This paper proposes a method for segmenting a tree-drawing, obtained in the field of clinical psychology, into three components, i.e. the tree-crown, the trunk and the root inclusive of the ground. In this method, an image is converted into a low-resolution image called a cell image. And four datum lines are adaptively established, which are used to evaluate the locations of three components in a cell image. The possibility for each cell to belong to each component is estimated using the probabilistic relaxation method. It is shown experimentally that the proposed method provides the satisfying segmentation of tree-drawings.

1. はじめに

本論文は、確率的弛緩法を用いて樹木画を樹冠、幹および根（地面を含む）の3領域に分割する方法を提案している。ここで対象とする樹木画は、心理臨床における樹木画テスト¹⁾で得られるものであり、一定の大きさの用紙に1本の木が鉛筆を用いて手書きで自由に描かれるものである。筆者は樹木画テストにおいて描かれた木の「全体的評価」、「形式分析」および「内容分析」の機能を知識ベースを用いた線画理解システムとして実現したいと考えている。本論文では、このための前処理というべき過程であるが、樹木画を特徴づけるために最も基本となる3領域を識別する方法について述べる。

樹木画を対象とした画像処理・理解の研究は筆者の知る限りでは見当たらない。従来、リモートセンシング画像を用いた樹冠の解析などの研究²⁾は行われているが、本論文で対象とする樹木画とは異なる。樹木画は被検者のパーソナリティを表し、種々の多様性を持つきわめて複雑な対象である。

本論文で提案する方法は次の特徴を持つ。

(1) 描かれた樹木画を線画に変換する（描かれた段階では、樹冠や幹が塗りつぶされているなど、一般に線画とはいえないものもある）。

(2) 線分を同一方向を持つ方向セグメントに分割し、次の(3)の処理結果を用いて方向セグメントごとに、樹冠、幹および根に分類する。

(3) 原画像から解像度の低いセル画像を構成し、確率的弛緩法によりセル単位で、樹冠、幹および根の領域である可能性を評価する。

(4) 樹木画の特徴を利用して、各領域の位置情報を与える4つの基準線を適応的に設定する。

本手法により、多様で複雑な樹木画に対する線画理解システムの前処理として、良好な領域分割が可能となった。

2. 樹木画の領域分割

図1に樹木画の一例を示す。同図に見られるように樹木画は、(1)描かれた木全体の大きさ、位置、線の太さ、濃さ、(2)樹冠の形状、大きさ、枝の有無、テクスチャ、(3)幹の形状、太さ、位置、テクスチャ、(4)根の形状、大きさ、有無、がそれぞれ意味を持つきわめて多様な画像である。本論文で提案する領域分

[†] 愛知教育大学教育学部

Faculty of Education, Aichi University of Education

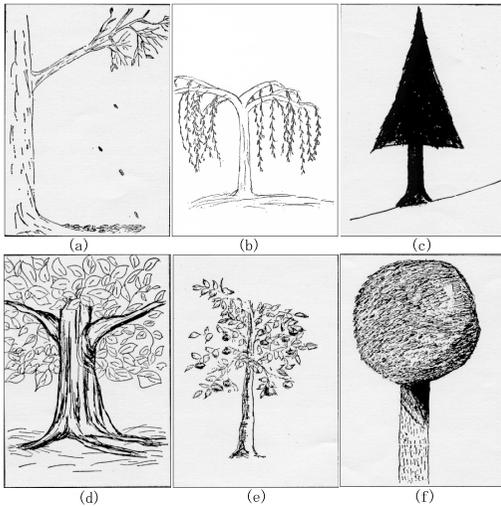


図 1 樹木画の一例

Fig. 1 Examples of tree-drawings.

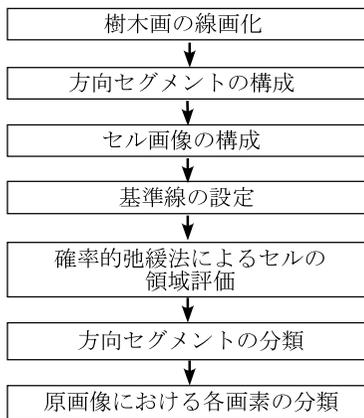


図 2 領域分割の手順

Fig. 2 Flow of the segmentation.

割の処理手順を図 2 に示す。以降、この手順に沿って、各処理の詳細を述べる。なお、本論文で用いる画像は、縦 524 画素、横 372 画素、各画素 256 階調の濃淡画像である。

2.1 樹木画の線画化

樹木画の多くは線画であるが、中には樹冠や幹が塗りつぶされている場合がある。これらを統一的に処理するために、次の 4 段階の処理によりすべての樹木画を樹冠、幹および根の形状を保存した線幅 1 の線画に変換する。個々の処理³⁾は、特別に新しいものではないので、ここで詳細を述べることは省略する。

- (1) 観測画像の 2 値化。
- (2) 2 値画像の収縮と膨張処理（輪郭線上の小さい突起、くぼみおよび内部の小さい穴を除去する）。

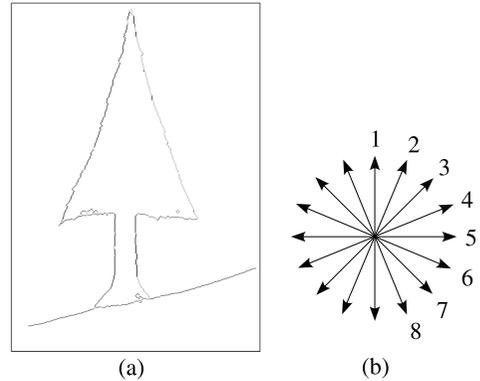


図 3 (a) 方向セグメントと (b) 方向コード (数値)

Fig. 3 (a) Directional segments and (b) direction codes (values).

- (3) 2 値画像の距離変換（距離値が 3 以内の画素を残す）。
- (4) 細線化処理。

2.2 方向セグメントの構成

得られた線画の線分（次の (1) で定義している）ごとに属する領域を評価し、決定することは困難である。複数の領域にまたがる線分も多く存在する。そこで、さらに線分を同一方向を持つ画素の列（本論文では、これを方向セグメントと呼ぶ）に分割し、方向セグメントごとに樹冠、幹および根に分類することにした。方向セグメントは次の処理により得られる。

- (1) 線画における交点画素を検出し、それらを削除する。これにより、線画は枝を持たない画素列（これを線分と呼ぶ）に分割される。
- (2) 各線分について、線分を構成する画素に方向を与え、連続する同一方向画素の列を方向セグメントとする。

ここで、画素 P_i に与える方向は、次のようにして定める。画素 P_i を含む画素列 $(P_{i-k}, P_{i-k+1}, \dots, P_{i-k+N})$ を最小 2 乗法により直線近似し、その近似誤差を求める。ここで、 N はあらかじめ定められた画素列の長さであり、本論文では 7 とした。 k を 0 から N まで長さ N の画素列が存在する範囲で変えたとき、近似誤差が最小となる画素列に対する近似直線の傾きを図 3(b) に示す 8 方向に量子化し、画素 P_i の方向とする。

線画化の結果と方向セグメントの一例を図 3(a) および図 4(a) に示す。同図では、方向コード（数値）を 8 段階の濃淡で区別している。同一の方向コードを持つ連続した画素列が方向セグメントである。以降、上記の処理により画素に方向を与えた画像を方向画像と呼ぶ。

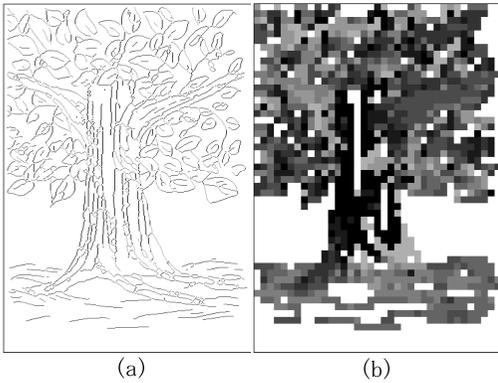


図 4 (a) 方向セグメントと (b) セル画像

Fig. 4 (a) Directional segments and (b) the cell image.

2.3 セル画像の構成

方向セグメントを各領域に分類する場合に、方向セグメントが持つ方向および位置の情報が有用と考えられる。しかし、実際方向セグメントの位置は不規則であり、方向セグメント間の位置関係を記述あるいは判定することもきわめて困難である。そこで、位置情報の扱いを容易とするために、次に示すセル画像を構成し、各セルが樹冠、幹および根の各領域に属する度合いを評価する方法を考案した。ここで、セル画像とは原画像の $n \times n$ 画素を 1 画素（セル）とする画像である。なお、本論文では実験の結果から $n = 10$ とした。また、セルの値は原画像の対応する $n \times n$ 画素内で画素数が最大の方向セグメントの方向とする。方向セグメントを含まないセル（背景画素）の値は 0 とする。

セル画像の導入は、大局的な処理を可能とし、雑音とも見なされる不規則な方向を持つ短い方向セグメントの処理をも容易とした。たとえば、幹の領域には垂直方向（方向コード 1, 2 あるいは 8）の方向セグメントが多数存在するが、中には水平方向（方向コード 4, 5 あるいは 6）の短い方向セグメントも存在する。これらの方向セグメントはセル画像では隠されてしまい、処理の対象とならない。一例として、図 4(b) に同図 (a) の方向画像に対するセル画像を示す。同図では、1 セルを原画像の 10×10 画素として表し、セルの値（方向コード）は 8 段階の濃淡で区別して表している。

2.4 基準線の設定

セル画像における樹冠、幹および根の各領域の相対的位置を評価するために、次の手順により 4 つの基準線を設定する。図 5 に、ここで用いる座標系および求める基準線を示す。

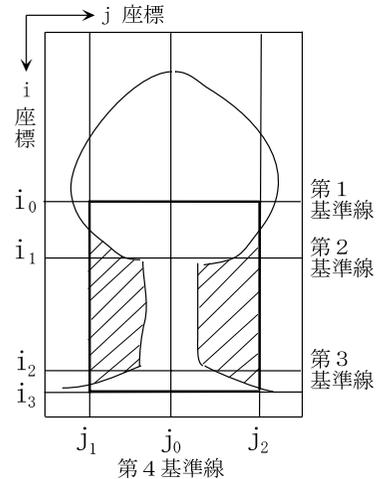


図 5 4 つの基準線

Fig. 5 Four datum lines.

(手順 1) セル画像の背景画素を除く全画素を、その座標値を特徴量として k -means アルゴリズムにより 2 つのクラスに分割する。ここで、 i 座標の最小の画素と最大の画素をそれぞれ第 1 クラスおよび第 2 クラスの初期クラス中心とする。また、第 1 クラスを樹冠の近似とするために、画素値が 1 の画素は第 2 クラスに属するものとして k -means アルゴリズムを実行する。クラスタリングが終了後、第 1 クラスのクラス中心の i 座標を m_{0i} とし、同クラスに属する画素の i 座標の標準偏差 σ_{0i} を求める。 i 座標 $i_0 = m_{0i} + \sigma_{0i}$ を通る水平線が第 1 基準線であり、樹冠の位置の基準となる。

(手順 2) セル画像を用いて、 i 座標が i_0 より大きい範囲において画素値が 1, 2 および 8 である画素の j 座標の平均値 m_{1j} を求め、次いで同範囲における背景画素を除く全画素の m_{1j} に対する j 座標の標準偏差 σ_{1j} を求める。

(手順 3) i 座標 i_0 を通る水平線、 i 座標 i_3 を通る水平線、 j 座標 $j_1 = m_{1j} - \sigma_{1j}$ を通る垂直線および j 座標 $j_2 = m_{1j} + \sigma_{1j}$ を通る垂直線により囲まれる四角形領域を処理窓 W とする。ここで、 i_3 は背景画素を除く全画素における i 座標の最大値である。

(手順 4) セル画像の処理窓 W 内を対象として、図 5 に斜線で示す“窪み領域”を検出する。実際には、距離変換を利用して窪み領域を求めているが、ここではその詳細は割愛する。

(手順 5) 処理窓 W 内で、背景画素および画素値が 1 (方向コードが 1) の画素を除いて、窪み領域の上側と接する (下の画素 (i 座標が 1 だけ大きい画素) が窪み領域に属する) 画素の i 座標の平均値 m_{1i} と標

準偏差 σ_{1i} を求め、 i 座標 $i_1 = m_{1i} + \sigma_{1i}$ を通る水平線を第 2 基準線とする。第 2 基準線は樹冠の下端位置の基準となる。

(手順 6) 処理窓 W 内で、背景画素および画素値が 1 の画素を除いて、窪み領域の下側と接する(上の画素(i 座標が 1 だけ小さい画素)が窪み領域に属する)画素の i 座標の平均値 m_{2i} と標準偏差 σ_{2i} を求め、 i 座標 $i_2 = m_{2i} - \sigma_{2i}$ を通る水平線を第 3 基準線とする。第 3 基準線は根の上端位置の基準となる。

(手順 7) 処理窓 W 内で、 i 座標が i_1 と i_2 の間にあり、画素値が 1, 2 または 8 の画素で窪み領域の横側と接する(右あるいは左の画素(j 座標が 1 だけ大きい、あるいは小さい画素)が窪み領域に属する)画素の j 座標の平均値 j_0 と標準偏差 σ_{0j} を求める。 j 座標 j_0 を通る垂直線が第 4 基準線であり、幹の中心位置の基準となる。

2.5 確率的弛緩法によるセルの領域評価

ここでは、セル画像を対象として、確率的弛緩法により背景画素を除く各画素を樹冠、幹および根の各領域に分類する方法(樹冠、幹および根をラベルとするラベリング処理)を提案する。なお、以降はセル画像の画素をセルと呼ぶ。

ここで、記号を定義しておく。ラベルを表す変数を l とし、 $l = 0$ は樹冠、1 は幹、2 は根(地面を含む)を表すものとする。セル i がラベル l の領域に属する確率を $P_i^n(l)$ で表す。ここで、 n は弛緩法における確率の更新回数である。

2.5.1 初期確率

セル i がラベル l の領域に属する初期確率 $P_i^0(l)$ は、すべてのラベルについて同等とした。すなわち、すべてのセル i について、

$$P_i^0(l) = \frac{1}{3}, \quad l = 0, 1, 2 \quad (1)$$

とした。

2.5.2 適合係数

近傍セルの解釈(ラベル)との無矛盾性を評価する適合係数 $c_{ij}(k, l)$ を定義する。 $c_{ij}(k, l)$ はセル i のラベルを k とし、セル j のラベルを l としたときの無矛盾性を 1 から -1 の間の実数で表すものである。

まず、基準線 i_0, i_1, i_2 および j_0 を用いて、各ラベル l に対するセル i の位置情報(座標 (y_i, x_i))に基づく重み関数 $w_i(l)$ を次のように設定する。なお、ここでは i 座標を y 、 j 座標を x と表す。

(1) 樹冠に対して ($l = 0$):

$$y_i \leq i_1 \text{ のとき, } w_i(l) = 1.0 \quad (2)$$

$$y_i > i_1 \text{ のとき, } w_i(l) = \exp(-ad^b) \quad (3)$$

ここで、 $d = |y_i - i_1|$ であり、 a および b は i_1 から下方(i 座標の増大する方向)へ $|i_2 - i_1|/8$ の位置で指数関数の値が 0.8 に、 $|i_2 - i_1|/4$ の位置で 0.2 に減衰するように定めた。

(2) 幹に対して ($l = 1$):

$$w_i(l) = w_1 \times w_2 \quad (4)$$

w_1 は j 座標 x_i に関して次のように定める。

$$w_1 = \exp(-ad^b) \quad (5)$$

ここで、 $d = |j_0 - x_i|$ であり、 a および b は j_0 から左右(横方向)に、先に求めた σ_{0j} だけ離れた位置で指数関数の値が 0.8 に、 $1.5\sigma_{0j}$ だけ離れた位置で 0.2 に減衰するように定めた。

w_2 は i 座標 y_i に関して次のように定める。

$$y_i \leq i_0 \text{ のとき, } w_2 = \exp(-ad^b) \quad (6)$$

ここで、 $d = |i_0 - y_i|$ であり、 a および b は i_0 から樹木の上端までの中間位置で指数関数の値が 0.8 に、樹木の上端で 0.2 に減衰するように定めた。

$$i_0 < y_i < i_2 \text{ のとき, } w_2 = 1.0 \quad (7)$$

$$y_i \geq i_2 \text{ のとき, } w_2 = \exp(-ad^b) \quad (8)$$

ここで、 $d = |i_2 - y_i|$ であり、 a および b は i_2 より 2 セル下方の位置で指数関数の値が 0.8 に、4 セル下方で 0.2 に減衰するように定めた。

(3) 根に対して ($l = 2$):

$$y_i \leq i_2 \text{ のとき, } w_i(l) = \exp(-ad^b) \quad (9)$$

$$y_i > i_2 \text{ のとき, } w_i(l) = 1.0 \quad (10)$$

ここで、 $d = |i_2 - y_i|$ であり、 a および b は i_2 から上方へ $|i_2 - i_1|/8$ の位置で指数関数の値が 0.8 に、 $|i_2 - i_1|/4$ の位置で 0.2 に減衰するように定めた。

次に、上記の位置情報を担う重み関数とセルが持つ方向の情報を用いて適合係数 $c_{ij}(k, l)$ を定義する。

[$k \neq l$ の場合]

$$c_{ij}(k, l) = 0.0 \quad (11)$$

異なるラベルの位置関係は、実際、種々のものが存在し、無関係であるとした。

[$k = l = 0$ の場合]

$$c_{ij}(k, l) = (0.5 + 0.5 - 1 + w_i(k) + w_j(l) - 1) / 2 \quad (12)$$

上式右辺の第 1 項は、セル i の方向の適合性を評価するものである。セル i が樹冠領域の場合は、実際、種々の方向が存在するため 0.5 とした。また、第 2 項はセル j の方向の適合性を評価するものであるが、セル i と同様に 0.5 とした。第 3 項の -1 は、第 1 項および第 2 項の方向に関する適合性の合計値を 1 から

-1 の範囲とするための補正量である．第 4 項および第 5 項は先の位置情報を担う重み関数である．第 6 項は前 2 項の補正量であり，最後に方向情報と位置情報を平均化している．

[$k = l = 1$ の場合]

$$c_{ij}(k, l) = (\exp(av_i^b) + \exp(av_j^b) - 1 + w_i(k) + w_j(l) - 1)/2 \quad (13)$$

ここで， v_i は方向コード 1 とセル i の方向コードの差の絶対値である．ただし， $v_i \geq 5$ のときは， $8 - v_i$ を改めて v_i とする．同様に， v_j は方向コード 1 とセル j の方向コードの差の絶対値である．また， a および b は v_i (あるいは v_j) が 1 で指数関数の値が 0.8 に，2 で 0.2 に減衰するように定めた．

ここでは，セル i とセル j の方向が両者とも垂直 (方向コード 1) のとき，幹領域として最も適当であるとし，方向情報による適合性の値は 1 となる．また，両者とも水平 (方向コード 5) のとき，幹領域として最も不適当であるとして，方向情報による適合性の値はほぼ -1 となる．

[$k = l = 2$ の場合]

$$c_{ij}(k, l) = (\exp(av_i^b) + \exp(av_j^b) - 1 + w_i(k) + w_j(l) - 1)/2 \quad (14)$$

ここで， v_i は方向コード 5 とセル i の方向コードの差の絶対値であり， v_j は方向コード 5 とセル j の方向コードの差の絶対値である．また， a および b は $k = l = 1$ の場合と同様である．

ここでは，セル i とセル j の方向が両者とも水平 (方向コード 5) のとき，根領域として最も適当であるとし，方向情報による適合性の値は 1 となる．また，両者とも垂直 (方向コード 1) のとき，適合性の値はほぼ -1 となる．

2.5.3 確率の更新

確率的弛緩法の一一般的な方法に従って，次のように確率を更新する．

$$P_i^{n+1}(k) = \frac{P_i^n(k)[1.0 + q_i^n(k)]}{\sum_{l=0}^2 P_i^n(l)[1.0 + q_i^n(l)]} \quad (15)$$

ここで， $q_i^n(k)$ は近傍セルのラベルを考慮して，セル i がラベル k の領域に属すると評価できる度合いを表し，次式で定義される．

$$q_i^n(k) = \frac{1}{|R|} \sum_{j \in R} \sum_{l=0}^2 c_{ij}(k, l) P_j^n(l) \quad (16)$$

上式で， R は近傍セルの集合であり，セル i を中心と

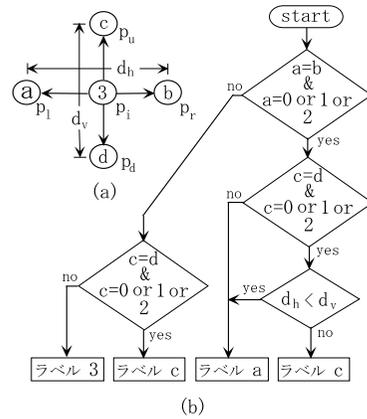


図 6 (a) 画素とラベル，(b) 画素のラベル付けのための決定木
Fig. 6 (a) Pixels and labels, (b) Decision tree for labeling the pixels.

する 5×3 の 15 セルとした．また， $|R|$ は R の大きさである．

2.6 方向セグメントの分類

これまでの処理により，セル画像における各セルが樹冠，幹および根の領域に属する確率が求められた．この確率を用いて，ここでは各方向セグメントを樹冠，幹および根に分類する．すなわち，方向セグメントごとにラベルを決定する．

1 つの方向セグメントを L_k とする． L_k が樹冠，幹および根である度合いを u_0, u_1 および u_2 とし，次式で評価する．

$$u_l = \sum_{o_i \in L_k} P_{j(o_i)}(l), \quad l = 0, 1, 2. \quad (17)$$

上式で， o_i は L_k を構成する画素であり， $j(o_i)$ は o_i を含むセルを表す．これら u_l の最大値に対する l を方向セグメント L_k のラベルとする．

2.7 原画像における各画素の分類

方向セグメントのラベルが決定された段階で，原画像 (ここでは，観測画像を 2 値化した 2 値画像) の各画素は，(1) 0, 1 または 2 のラベルが決定している画素 (方向セグメントを構成する画素)，(2) ラベルが未決定の画素 (線画化により削除された画素) および (3) 背景画素，に分類される．

ラベルが未決定の各画素に対して，次の処理を行う．ここで，ラベルが未決定の画素にはラベル 3 を，背景画素には 4 を付けておく．

(Step 1) ラベル 3 の画素 p_i について，図 6(a) に示すように左方向 (j 座標が小さくなる方向) に見たとき，最初に現れるラベル 3 以外のラベルを持つ画素を p_l ，そのラベルを a とする．同様に，右方向，上方向および下方向について，それぞれ画素を p_r, p_u およ

び p_d , ラベルを b, c および d とする. また, 画素 p_l と p_r の距離を d_h , 画素 p_u と p_d の距離を d_v とする. 図 6 (b) に示す決定木により画素 p_i のラベルを決定する.

(Step 2) 決定木で未決定 (ラベル 3) となった画素 p_i について, p_i の 8 近傍にラベル 0, 1 または 2 の画素があれば, そのラベルを p_i のラベルとする. この処理を未決定の画素が無くなるまで繰り返す.

3. 処理結果と考察

本手法の有効性を確認するために, 文献 1) より得た 40 枚の樹木画に対して領域分割処理を行った. ここでは, 一例として図 1 の樹木画に対する処理結果を示す. まず, 妥当なセルの大きさ n (1 セルに対応する原画像の画素数 $n \times n$) を決定するために, n を 3 から 19 まで変えて本手法を実行した. その結果, n が 5 から 15 においてほぼ同様な分割結果が得られ, 最も良好であった. そこで, 本論文では $n = 10$ とした. なお, 原画像は縦 524 画素, 横 372 画素である. また, 弛緩法の更新回数は, すべての樹木画に対して 20 回とした.

図 7 (a) は各セルの初期確率を表している. ここでは, 確率 ($P_i^n(0), P_i^n(1), P_i^n(2)$) を次のように 8 ビット RGB カラーに対応させて表示している.

$$G = 255 \times P_i^n(0), \tag{18}$$

$$R = 255 \times P_i^n(1), \tag{19}$$

$$B = 255 \times P_i^n(2), \tag{20}$$

したがって, 初期確率では $R = G = B = 255/3$ であるため, 背景を除くすべてのセルが灰色となる. 確率が収束した場合には, 樹冠は緑で, 幹は赤で, 根は青で表示されることになる. 図 7 (b) に, 同図 (a) の初期確率から 20 回更新した結果を示す.

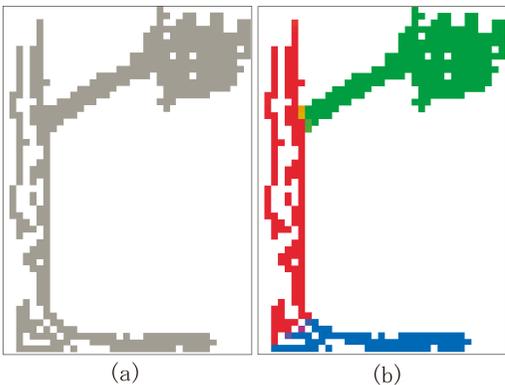


図 7 (a) 初期確率と (b) 弛緩法による処理結果 (20 回の更新)
Fig. 7 (a) Initial probabilities and (b) the result of the relaxation (20 iterations).

図 8 は線画化された樹木画の領域分割結果, すなわち, 方向セグメントの分類結果である. また, 図 9 は原画像の領域分割の結果であり, 最終処理結果を示している. なお, 図 1 (a) の樹木画で, 舞い降りる 4 枚の葉が図 9 (a) の処理結果では削除されている. これはセル画像において雑音領域として削除した結果であるが, このような領域は樹冠, 幹および根の分類には馴染まないと考えている. 以降の処理, すなわち, 樹木画を特徴付ける処理においては意味のある領域である.

他の 34 枚の樹木画についても, 線画理解システムにおける次の処理である各領域の特徴抽出あるいは記

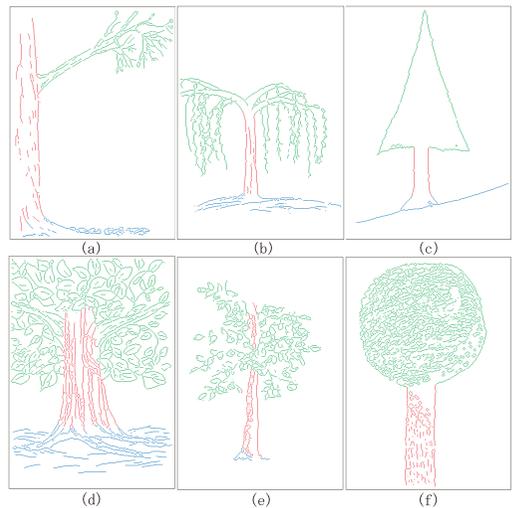


図 8 方向セグメントの分類
Fig. 8 Classification results of the directional segments.

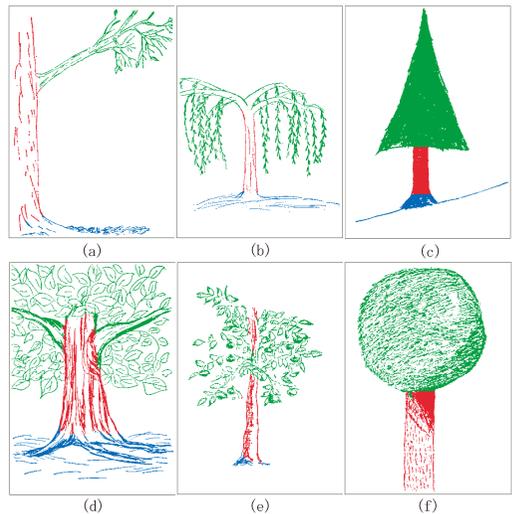


図 9 提案手法による領域分割の結果
Fig. 9 Segmentation results by the proposed method.

述に対して十分な精度の領域分割が達成され、また、人間による樹冠、幹および根（地面を含む）の識別に近い結果が得られている。これらの処理結果より、本手法は、普通に描かれた樹木画に対しては良好な領域分割を可能とする有効な方法であるといえる。

樹木画テストにおいて、横に倒れた木が稀に描かれることがある。本手法はこのままではこれらの樹木画に対応できない。今後の課題として残されている。

4. おわりに

本論文では、樹木画を確率的弛緩法により樹冠、幹および根（地面を含む）の3領域に分割する手法を提案した。ここでは、画像に適応的に定められる基準線とセル画像の導入により、多様で複雑な樹木画に対して良好な領域分割が可能となった。

さらに、樹木画の多岐にわたる詳細な分析および理解のためには、樹冠を葉と枝の領域に分割し、根と地面を区別する必要がある。これらを含めて、各領域の特徴抽出法あるいは記述法の開発を現在進めている。

参考文献

- 1) 高橋雅春, 高橋依子: 樹木画テスト, 文教書院 (1986).
- 2) 井上光平, 朝廣和夫, 上原三和, 重松敏則, 瀬戸島政博: マルチスペクトル画像からの樹冠円抽出の高速化, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D-II, No.5, pp.1193-1195 (2004).
- 3) 手塚慶一, 北橋忠宏, 小川秀夫: デジタル画像処理工学, 日刊工業新聞社 (1985).

(平成 19 年 2 月 26 日受付)

(平成 19 年 8 月 9 日採録)



小川 秀夫 (正会員)

昭和 50 年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了。同年福井大学工学部電子工学科助手。同助教授を経て、昭和 63 年愛知教育大学教育学部助教授。平成 5 年同教授。パターン認識, 画像処理・理解に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 電子情報通信学会各会員。