



SPIDER開発を通して観たデジタル 画像処理アルゴリズムの現状 (4)

—テクスチャ解析—

富田文明 田村秀行 (電子技術総合研究所)

1. まえがき

テクスチャ (texture) 情報を利用する人間の視覚処理には、(1) テクスチャの種類による対象の同定、(2) テクスチャの差異による対象の区別、(3) テクスチャの変化による実行、面の傾斜、曲面の知覚等がある [47]。計算機による画像処理でもテクスチャに関する研究は盛んで [22, 24, 56, 65, 67]、テクスチャの記述と特徴抽出 (2章)、テクスチャを含む画像の領域分割 (3章)、テクスチャの勾配 (4章)、テクスチャの (生成) モデルと合成 (5章) 等の問題がある。

心理学の方でも、各種のテクスチャに対する人間の識別能力が調べられており、その成果は画像処理の方法に少なからず影響を及ぼしている。例えば、Julesz [27] によれば、人間の純粋知覚では、第1次又は第2次統計量の異なるテクスチャは区別できるが、第1次と第2次統計量が等しければ、第3次以上の統計量の異なるテクスチャを区別するのは困難になる。この仮説に対し、Prattら [47] は、Julesz らの実験の不備 (利用しているランダムパターンの濃度レベル数が少なく、一次元マルコフ過程により発生しているため二次元的な相関がない等) を指摘して追加実験を行ったが、反証するには至らなかった。しかし、Julesz の仮説は多くの場合成立するものであるが、いくつかの反例もある。Gagalowicz [19] は、第2次統計量が等しく高次の統計量の異なる一次元ランダム2値パターンを生成する方法を提案し、高次統計量の異なるパターンの区別できる例を示した。また、Julesz ら [28] によれば、同じ第2次統計量を有するテクスチャでも、図1のようにテクスチャ要素の colinearity, corner, closure 等の局所的幾何学的特徴により区別できる例がある。このことは、人間の

視覚には、特定の幾何学的特徴に反応する多くの非線形な局所的特徴抽出器が存在することを示唆している。

2. テクスチャの特徴

一般に、テクスチャを“サブパターンが一定の法則に従って配列されてできる繰り返しパターン”と定義する [32]。しかし、その各サブパターンにもミクロなテクスチャ (micro-texture) が存在する場合もあるし、繰り返しパターンが大きなサブパターンとなったマクロなテクスチャ (macro-texture) を構成する場合もある。従って、テクスチャの解析とは、サブパターンあるいはテクスチャ要素 (texture element = texel) を定義し、その texel の性質と配列の性質を調べることであると言える。従って、テクスチャの解析方法を利用して texel の種類によって分類することができる (2.1~2.9)。また、その他に、周波数領域で解析する方法 (2.10) と、テクスチャのモデルに当てはめる方法 (2.11~2.13) がある。

2.1 画素 (picture element = pixel)

texel の最小単位で、その性質は濃度である。画像に明確な構造が存在しない場合、pixel の空間的分布を調べることは有効で、いわゆる統計的手法である。

2.1.1 pixel の第1次統計量

画像内の pixel の濃度の生起確率 (ヒストグラム) である。分布の違いを直接的に KS (コルモゴロフ-スミルノフ) 検定法等で調べたり [42]、分布の平均、分散、3次モーメント (skewness)、4次モーメント (kurtosis) [48] 等を利用する。

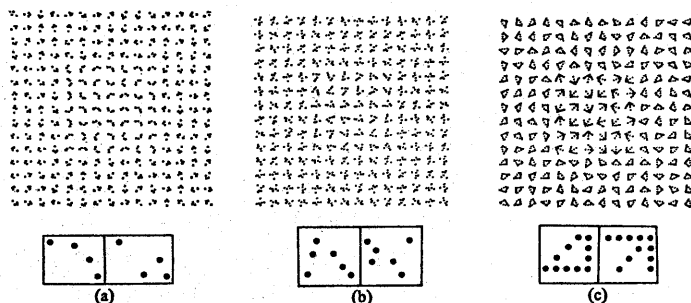


図1. 第2次統計量は等しいが区別できるテクスチャ [28]

† 第 n 次統計量は一定の空間的關係を有する n 個の要素の性質の組み合わせ (n 次元ベクトル) についての統計量である。
‡ 従来は、テクスチャの解析方法を統計的手法と構造的手法に大別していたが、“構造”の定義があまりに議論の要するところである。

2.1.2 pixelの第2次統計量

a) cooccurrence 行列

画像内の濃度が i の点から一定の変位 $\delta = (r, \theta)$ だけ離れた点の濃度が j である確率である。

Haralick ら [21] は $r=1, \theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の場合の各行列から分布の各種のモーメントや相関およびエントロピー等 14 種類の特徴を利用した。

Tou ら [71] は, Haralick らの特徴の冗長さを指摘して, 各特徴を KL 展開して利用することを提案した。

Zoblist ら [79] は, Beck の心理実験のモデルに, 2 領域のテクスチャの類似度として 距離関数

$$D = C_1 d_1 + \dots + C_n d_n$$

を計算した。但し, $d_i (i=1, \dots, n)$ はテクスチャの i 番目の特徴についての 2 領域間の距離で, 特徴には $r=1, 2, \theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の場合の各行列について Haralick らの 5 種類の特徴と領域の第 1 次統計量 (平均と分散) および領域間の相互相関の計 43 個を利用した。係数は線形計画法により決定したが, 有効な特徴は 7 個であった。

Comers [6] は, テクスチャの水平又は垂直方向の周期性を調べるために, $\theta=0^\circ, 90^\circ$ について, r の関数として行列の横性モーメントを利用した。

Deutsch ら [11] は, 2 値画像の解析に行列 (2×2) の各要素の値の比を利用した。

b) 差分統計量

画像内の変位 δ だけ離れた 2 点の濃度の差の絶対値が k である確率である [75, 76]。cooccurrence 行列の $|i-j|=k$ となる, (i, j) 項の総和から求めることができる。

c) 極座標 cooccurrence 行列

Mack ら [35] は, 濃度が同心円上に分布している画像の解析に, 図 2 のように円の中心を原点として変位 $\delta = (D, \theta)$ だけ離れた 2 点の濃度の cooccurrence 行列を計算した。

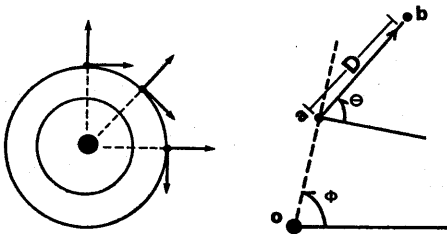


図 2. 極座標表現による変位 (D, θ) だけ離れた 2 点 a, b の関係

2.1.3 pixelの高次(3次以上)統計量

a) interval cover

Read ら [50] は, 画像内に存在する 3×2 の突パターンの中で, 他の画像に比べて頻度の高い突パターンを最小の interval cover で表現し, 画像の分類に利用した。

b) run length 行列

画像内で $\theta (0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ の方向に濃度 i の点から j 個続く頻度である。Galloway [20] は各行列から 5 種類の特徴を抽出した。

2.2 edge 要素 (edge element = edgel)

edgel は画像の空間微分によって求めることができ, 一定値以上のものは非極大値消去 (non-maximum suppression) 後の edge である。edgel の性質は edge の値, edge の方向, edge のサイズ (3.4 参照) である。

2.2.1 edgelの第1次統計量

edgel の密度 [52], edge 値の平均 [52, 55], edge サイズの平均 [25] はテクスチャの coarseness と相関がある。また, edge 方向のヒストグラムからはテクスチャの方向性を検出できる [61]。

2.2.2 edgelのcooccurrence

Tamura ら [61] は方向 (16 バック) から i の edgel からその方向に距離 $d (=4)$ だけ離れた edgel の方向が j である確率 (方向 cooccurrence 行列) を計算し, edge 方向の局所的変動の大きさを測定する特徴を利用した。

Nevatia ら [45] は画像を $\theta (0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 方向に走査したときに, 距離 d だけ離れた 2 つの edgel の方向が θ に垂直で同方向 (exact edge direction match) である頻度と逆方向 (opposite edge direction match) である頻度をそれぞれ d の関数で表現し, 前者からは周期的画像の領域の (θ 方向の) 間隔を, 後者からは領域の大きさを推定した。

2.3 一般化 cooccurrence 行列

2.1.2.a の cooccurrence 行列を pixel の代わりに画像の局所的性質に, 変位 δ の代わりに空間的拘束条件 F として一般化したものである。即ち, 画像内の点 P_i と P_j の局所的性質がそれぞれ d_i, d_j であり, $F(P_i, P_j)$ が真である点の対 (P_i, P_j) の頻度である。例えば, Davis ら [8] は, 局所的性質として H は V (edge の方向が水平又は垂直), 空間的拘束条件と

して、 $F_1(P_i, P_j, k)$ (P_i と P_j の距離が k 以下)、 $F_2(P_i, P_j)$ (P_j が P_i の最近傍点)、 $F_3(P_i, P_j, \theta, \Delta)$ (P_j が図3の斜線部分にある)等を利用した

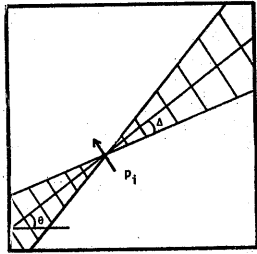


図3 $F_3(P_i, P_j, \theta, \Delta)$

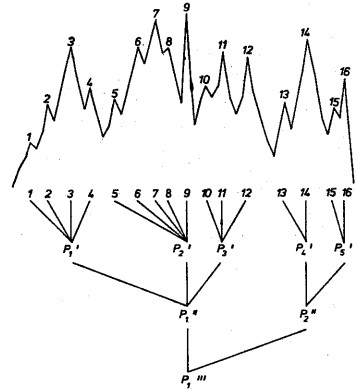


図5 peakの(3レベル)の関係木表現

2.4 extrema

Mitchellら[40]は画像を水平又は垂直に走査したときの局所的極大点又は極小点(extrema)をgear backlash平滑化処理によって求めた(図4)。

extremaの性質はそのサイズであり、contrastに相当する。各サイズのextremaの個数からその変化の割合を計算した。

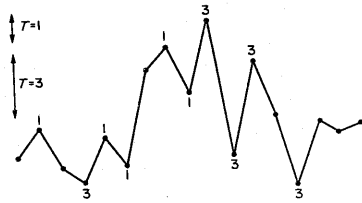


図4. サイズ(T)が1と3のextrema

2.5 peak

Ehrlichら[13]は画像を水平又は垂直に走査したときの局所的極大点(peak)を図5のように関係木(relational tree)表現した。木の各レベルはミクロとマクロのテクスチャの関係である。peakの性質は、絶対的な高さ(濃度)、(谷との)相対的な高さ(contrast)と幅である。各レベルのpeakの性質の3次元ヒストグラムを調べた。

2.6 窓(window)

画像を一定の大きさの窓に分割し、各窓パターンの性質を調べる方法である。

2.6.1 構文法

Luら[33,34]は、画像を大きさ5x5の窓に分割し、各窓パターンを図6のように木表現し、窓パターンの生

成文法を作った。パターンのおこな変動には生成文法に確率を導入した。また、テクスチャと窓との位相のずれに伴うパターンのおこな変動には、いくつかの異なる生成文法を作り、異なる生成文法の窓パターンの配列を決める生成文法も作った。窓パターンの認識には各木表現と各生成文法との距離を調べた。また、生成文法を利用して、テクスチャの再構成ができる。

Tsaiら[72]は方向性のあるテクスチャの場合には、一定(固定)方向についてだけの生成文法を作れば良いように、画像の濃度の分散が最小の方向θを調べ、画像をθだけ回転したときの生成文法を作った。そして、窓パターンの認識には、各窓パターンを各固定方向に回転してから生成文法と比較した。

2.6.2 random walk

Wechslerら[73,74]は、画像を大きさ5x5の窓に分割し、図7の各窓の各Mの点から4隣接点との濃度の差に依存した確率に従ってランダムに動くとき、B点を通って T_A, T_B, T_L, T_R の各境界の外に出る頻度を求め、その分布から各種の特徴を計算した。

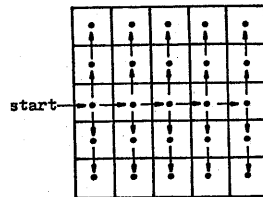


図6. 窓パターンの木表現

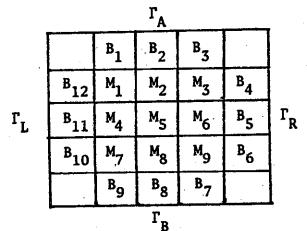


図7 窓の内側の点(M)と境界点(B)

2.7 線画

2.7.1 primal sketch

Marr [37] は、各種の edge マスクと棒マスクを利用して画像の各点との相関を計算し、画像を各種の primitive (edge, line, blob) からなる primal sketch と呼ぶ記号表現に変換した。各 primitive は方向、大きさ、contrast, 位置等の値を持つ。そして、primitive の contrast のヒストグラム、方向のヒストグラム、各方向の長さの合計、大きさの平均と分散と primitive 間距離の平均と分散を調べた。

2.7.2 仮想線

Schatts [58] は、図8のような線画テクスチャを区別するために仮想線 (\setminus と $/$) を含む線 の方向と長さを利用した。

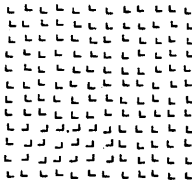


図8 線画テクスチャ

2.8 spot

画像の spot は spot 検出器 [53] によって求めることができ、その性質は spot の値と spot のサイズである。

spot サイズの平均値はテクスチャの coarseness と関係がある [17,25]。

また、Davis [9] は、spot 間の相対的位置ベクトルの分布から spot の配列の規則性を調べている。

2.9 均質な小領域

画像を局所的性質あるいはミクロなテクスチャについて均質な小領域に分割し、各小領域の性質と配列の性質を調べる方法である。

Tomita ら [68,69] は、画像を濃度の均質な小領域に分割し、各小領域の性質として、濃度、面積、サイズ、伸長度、方向等を測定した。さらに、各性質の分布に基づいて小領域の分類をし、各クラスに属する小領域の各性質の平均と分散と配列の性質として密度と隣接関係を求め認識に利用した。また、画像の“図”と“地”に対応するクラスを決め、“図”のクラスの典型的な小領域と小領域間の相対的位置ベクトルを利用して画像の再構成を行った。

Maleson ら [36] は、濃度の均質な領域を構成

で近似し、各小領域間の colinearity を調べた。

2.10 周波数領域での解析

2.10.1 ハワースペクトル

Bajcsy ら [1] は画像の Fourier 変換の周波数成分の大きさを表すハワースペクトルを極座標変換し、各θ方向について周波数 γ の成分の総和 $P_\theta(\gamma)$ と各周波数 γ についてθ方向の成分の総和 $P_\gamma(\theta)$ を利用した。

$P_\gamma(\theta)$ の分布からはテクスチャの方向性が検出でき、 $P_\theta(\gamma)$ の分布からは、level の間隔と大きさ等を推定した。

Sutton ら [60] と Weszka ら [75,76] はハワースペクトル面を適当に区切って分類に利用したが、良い結果を得ていない。その原因として、Dyer ら [12] は edge effect を考え、その緩和を行ったが、余り改善できなかった。

2.10.2 位相情報

Eklundh [15] は Fourier 変換の位相成分の2次微分 (パターンの平行移動に不変な情報が得られる) の分布を利用して Weszka ら [75] と同じ分類実験を行なったが役に立たなかった。

2.10.3 帯域フィルタ

Faugeras [16] は人間の視覚モデルに基づいて、図9の多重チャンネルの出力を利用した。各チャンネルは図10のような帯域フィルタ H_i からなる。

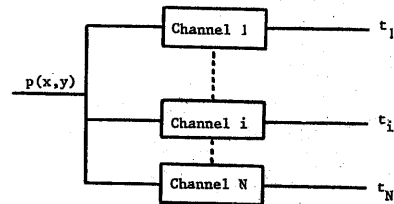


図9 多重チャンネル

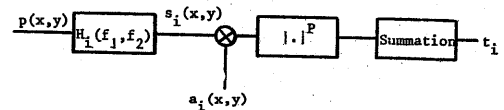


図10 i番目のチャンネルのブロック線図

2.11 時系列モデル

時系列 $\{Z_t\}$ の現在の値 Z_t を過去の値から推定する方法で、自己回帰の項と移動平均の項からなる。

$$\hat{Z}_t = \sum_{i=1}^p \phi_i Z_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i a_{t-i}$$

$$\text{但し、} a_t = Z_t - \hat{Z}_t$$

モデルの形は時系列の自己相関関数と部分自己相関関数の性質から推定し、係数は誤差 A_t の2乗和の期待値が最小になるように決定する。

McCormick [38] と Tou [70] は、このモデルを2次元に拡張して、テクスチャ画像のモデルを推定し、そのモデルに基づいて画像を再構成した。但し、再構成には初期パターンを必要とする。

Deguchi [10] は自己回帰モデルを利用して画像の一点の濃度をその周囲の点の濃度の線形加重和で推定した。係数は誤差の2乗和の期待値が最小になるように決定され、画像の自己相関関数から求めることができる。但し、田村 [62] はその領域分割への利用の方法の不備を指摘し、改善した。

2.12 統計的モデル

Gagalowicz [18] は図11の伝達関数 $H(z)$ からなるテクスチャの生成モデルを提案した。白色雑音 $B(k)$ の分布が既知の場合には、画像 $T(k)$ から図12のように伝達関数を推定できる。

$B(k)$ の分布が未知の場合には伝達関数を一意的に決めることはできないが、Bratt [49] は、このモデルに基づいたテクスチャの認識のために、画像の自己相関関数から無相関化オペレータを求め、画像を無相関化したときの濃度のヒストグラムの違い (2.1.1 後半) を利用した。

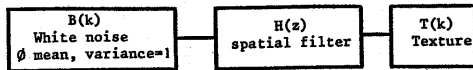


図11 統計的モデル

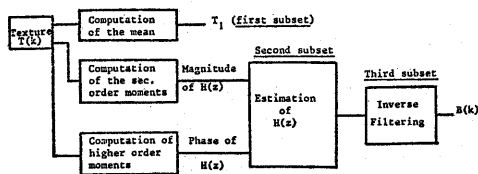


図12 伝達関数の推定

2.13 ランダムモザイクモデル

セル状テクスチャのモデルで、画像をランダムな幾何学的処理によってセルに分割して得られるテクスチャである。Schachter [57] は図13の Poisson line モデル (線の密度 τ/π で決まる) と checker-board モデル (一辺の長さ b で決まる) を利用した。 τ は b の関数として、モデルの *wiogram* (2点の距離の関数

で濃度の差の2乗の期待値で、2.1.2. bの差分統計量と同様の分布) と単位長当たりの領域(セル)の変化の個数 k は既知なので、実テクスチャの各モデルへの当てはめは、実テクスチャの *wiogram* に一致するように τ は b を決める方法と、実テクスチャを濃度のヒストグラムに基づいて2値化し、そのときの k の値を測定して τ は b を決める方法がある。

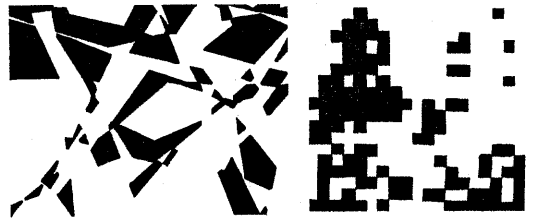


図13 Poisson line モデル 図14 checker-board モデル

3. テクスチャ領域の分割

画像をいくつかのテクスチャの異なる領域に分割する方法で、2章のテクスチャの特徴を利用することになる。

3.1 合併法

Muerle [42] は、画像を 2×2 のセルに分割し、隣接するセルの類似性を 2.1.1 の KS 検定法で調べて類似性の高いセルを合併して領域にし、次に領域とセルの類似性を調べて領域を拡大する方法を行った。

3.2 split and merge 法

Chen [5] は、2.1.2. a の cooccurrence 行列と split and merge 法を組み合わせた。

領域分離 (split) の場合には、領域の一意性の詳細に、その4つの領域の cooccurrence 行列の各要素の値の類似性を直接的に調べ、領域合併 (merge) の場合の各領域の行列の比較には L_1 ノルムを利用した。

3.3 微分法

Thompson [63] は texture edge (画像の局所的性質の平均値の急変する部分 [54]) を求めるために、画像の各点を中心として図14の4つの近傍を考え、edge の値として 2.1.2. a の距離関数 D を利用して

$$T = D(a, d) + D(b, c)$$

を計算した。

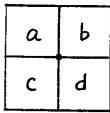


図14 注目点(・)の4近傍

3.4 可変差分法

Rosenfeldら[53,54]は最適な texture edge を求めるために、画像の各点について図15のように一辺 $2k$ ($k=0\sim L$) の隣接する近傍の組を水平、垂直 (45° , 135°) の2(4)方向に考え、各組の局所的性質の平均値の差から最良の texture edge のサイズ k , edge の方向および edge の値を求めた。

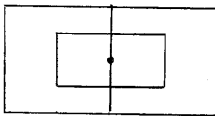


図15 注目点(・)の水平方向の近傍の組

3.5 固定平均化法

画像の各点の局所的性質の局所的平均値に基づいて画像を分割する方法である。

Ohlanderら[46]は、2.2.1の edge の値の局所的平均値が一定値以上の領域をテクスチャ領域として扱った。

Mitchellら[4,41]は2.4の4つのサイズ n の extrema の個数の局所的平均値を計算し、画像の各点をその性質の4次元ベクトルの距離によって分類した。

Davisら[7]によれば「画像内に2種類の領域しか存在しない場合は、局所的に平均化した画像のしきい値処理により、画像を容易に各領域に分割できるが、3種類以上の領域が存在する場合は誤った結果が生じる。

3.6 可変平均化法

Tomitaら[65,66]は3.5の固定平均化法の欠点を取り除くために、平均化の位置を可変にした。画像の各点について図16のように5つの近傍を考え、各近傍の一樣性を3.3のおなじオレータで調べて、最も一樣な領域の境界線を含まない近傍の平均値を出力することにより、texture edge を保存することができる。

田村ら[62]は2.11の自己回帰モデルを利用した

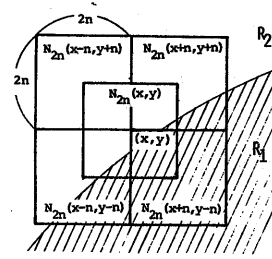
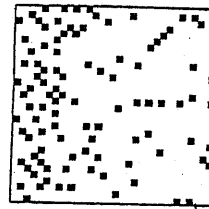


図16 注目点(x,y)の5近傍

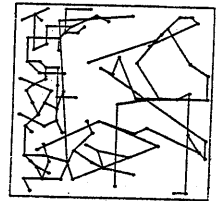
領域分割に、又池田ら[26]は濃度(2.1.1)と edge の値と方向(2.2.1)を局所的性質とする画像の分割に3.8の反復しきい値処理と組み合わせ利用した。

3.7 Minimum Spanning Tree

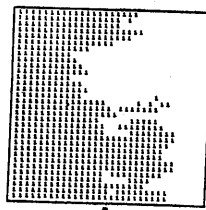
Ehrlichら[14]は、2.5の画像の peak の木表現上の最下位レベルの peak について、その位置と性質(絶対的および相対的高さ)に関する距離に基づいて MST を求め、しきい値以上の距離のある枝を刈ることにより peak を分類し、それによって画像を領域に分割した(図17)。



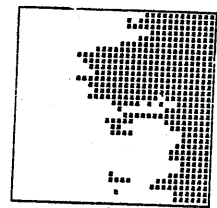
(a) peak点



(b) Minimum Spanning Tree



A



B

(c) 分割領域

図17 MSTによる領域分割

3.8 反復しきい値処理

Tomitaら[64]は2.9のように画像を濃度の均質な領域に分割し、各領域の性質(面積、周囲長、各種モーメント)と密度についてのヒストグラムの反復しきい値処理により、小領域を分類し、各クラスの占める領域の連結性や重複度を調べて画像を領域に

分割した。

池田ら [26] は、3.6でも述べたように、画像の濃度、edgeの値と方向の局所的な平均値についてのヒストグラムの反復しきい値処理により画像を領域に分割した。

4. テクスチャの勾配

テクスチャの変化の割合あるいは勾配 (texture gradient) から興行き、面の傾斜、曲面等の3次元的な情報を得る方法である。

4.1 edgelの利用

Rosenfeld [55] はテクスチャ勾配をテクスチャの coarseness の変化の割合とみなし、画像の点 (x, y) の coarseness の測定に 2.2.1 のように、点 (x, y) を中心とする半径 r 内の edge の値の平均を計算し、coarseness の水平方向の変化の割合 H_r と、垂直方向の変化の割合 V_r から勾配の大きさ $\sqrt{H_r^2 + V_r^2}$ と方向 $\tan^{-1}(V_r/H_r)$ を求めた。

4.2 パワースペクトルの利用

Bajscy ら [2] は興行きの知覚に画像を 128×128 の窓に分割し、各窓パターンについて、2.10.1 のパワースペクトルの $P_r(\theta)$ の分布から方向性を検出し、その方向の $P_\theta(r)$ の分布で最大となる周波数 r から波長を計算した。そして、垂直方向の各窓パターンの波長の変化の割合から興行きを推定した。

4.3 勾配空間 (gradient space) の利用

Kender [30] は、3次元平面上の物体 (2種類の多数の線分) を正射影した画像から逆に面の傾きを推定する場合に、2種類の線分の実際 (3次元上) の長ささと交叉角度を仮定することにより、勾配空間上で容易に可能な面の傾きを拘束できることを示した。

また、Kender [31] は、3次元平面の透視図上の平行線や収斂線は、3次元平面上では平行線であると仮定することによって面の傾きを推定した。画像

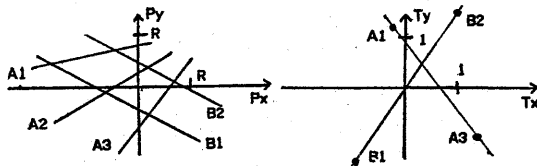


図18 平行線と収斂線(左図)の直線上の点(右図)への変換

内の各線の Hough 変換-極座標変換-対合変換により、平行線や収斂線は図18のようにそれぞれ直線上の点に変換され、しかも2直線の交点の座標は面の傾きと一致する勾配空間の座標であることを示した。

金出 [29] は図19のようにアフィン変換可能な texel の組の適当な仮定により各 texel のある面の勾配に拘束を与えることができ、曲面の情報を取り出す方法を提案している。

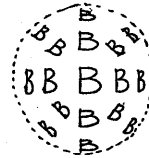


図19 "B" をスタンプしたボール

5. テクスチャの合成

テクスチャの合成の目的には性質が既知のテクスチャを利用して心理実験を行うため、テクスチャ解析アルゴリズムの比較実験や評価をするため等がある。また、analysis-by-synthesis の観点から得られたテクスチャの記述を利用して、テクスチャを再構成する。

5.1 マルコフ過程

1章でも述べたように、Julesz [27], Pratt ら [48] Gagalowicz [19] は心理実験に一次元マルコフ過程を利用して統計量の異なるテクスチャを合成した。

Yokoyama ら [78] はマルコフ過程の遷移確率行列と 2.1.2 の cooccurrence 行列との関係を述べ、weaving 法, composite 法, compound 法, 確率変換法によって遷移確率を変えることにより統計的に異なるテクスチャを合成した。

Pratt ら [48] と Hassner ら [23] は二次元マルコフ過程によりテクスチャを合成した。

5.2 成長モデル

Yokoyama ら [77] は seed distribution, skeleton growth, muscle growth と呼ぶ手順により、いくつかのカテゴリに属する点(種)を領域に成長させ、各カテゴリに属する領域に適当な濃度を与えて色々なテクスチャを合成した。

5.3 構造的な方法

Rosenfeld [51] は2章のテクスチャの定義に従ってサブパターンを配列するいくつかのルーチンを作り、この方

法によって合成できるテクスチャの一般的考察をしている。

また、Zucker [8] は、サブパターンの基本的な配列表現に、3種類の *regular tessellation*、8種類の *semi-regular tessellation* 又は線形サブクワッドと同型なグラフ表現を提案した。

以上の他に、*analysis-by-synthesis* の観点から、2.6.1のLuら [33,34]、2.9のTomitaら [69]、2.11のMcCormickら [38] と Touら [70] はテクスチャ画像の再構成をしているが、任意のテクスチャの合成にも利用できる。又、2.12の統計的モデル、2.13のランダムモザイクモデル等の各モデルを利用してテクスチャを合成することができ。

6. おまけ

いずれの解析方法についてもその性能を知ることは重要である。そこで、保存している情報量について見ると、第1次統計量、第2次統計量、高次統計量は図20(a)の包含関係にある。そして、図20(b)のように、2.2.1の変位σについての *cooccurrence* 行列は第2次統計量の一部であり、2.2.1.bの変位σについての差分統計量はそのまた一部である。また、各分布から得られる特徴については、さらに情報量は減少している。2.10.1のハワースペクトル、2.11の自己回帰モデルおよび自己相関関数は理論的には、図20(c)のように、第2次統計量の一部であり、しかも同じ情報量を持つ [65,67]。従って、扱えるテクスチャも同じで、例えば、いずれの方法によっても第3次以上の統計量の異なるテクスチャを区別することはできない。しかし、実際にはその使用法は異なっている。第2次統計量の一部である *cooccurrence* 行列は第1次統計量を包含しているか、図20(d)のように高次統計量を測定している方法か、又、すくなくとも低次統計量を測定しているとは限らない (例えば、2.1.3.bの *run length* 行列からすくなくとも第2次統計量を求めることはできない) ので、高次統計量を測定している方法か、低次統計量を測定している方法よりもすぐれているとは、一概には言えない。即ち、多くの解析方法の保存する情報量の包含関係は上記のように明らかでない。その評価の方法として、その分類能力を調べることも多い [75,76]。しかし、その結果は使用データに依存したもので、絶対的な評価とはなり得ない。他の一つの評価方法に、得られた記述や特徴からテクスチャを再構成し、原画像と比較する *analysis-by-synthesis* 法がある [69]。こ

の方法によれば、いかなる情報が保存され、いかなる情報が棄却されているか直接的に見ることができ、解析アルゴリズムの評価と改良に利用できる。

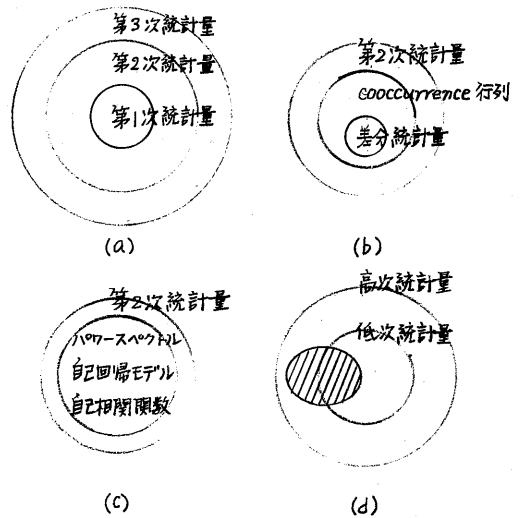


図20 情報量の包含関係

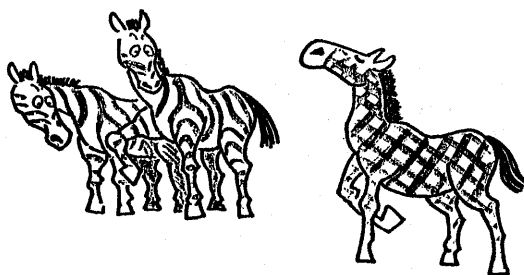
References

Abbreviations

- PR: Pattern Recognition
 - CGIP: Computer Graphics and Image Processing
 - PRIP'xx: Proceedings of 19xx IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing
 - nIJ CPR: Proceedings of n-th International Joint Conference on Pattern Recognition
 - nIJCAI: Proceedings of n-th International Joint Conference on Artificial Intelligence
- [1] R. Bajcsy, "Computer description of textured surfaces," 3IJCAI, pp.572-579, 1973.
 - [2] R. Bajcsy and L. Lieberman, "Texture gradient as a depth cue," CGIP, Vol.5, No.1, pp.52-67, 1976.
 - [3] P. Brodatz, "Textures," Dover, 1966.
 - [4] S.G. Carlton and O.R. Mitchell, "Image segmentation using texture and gray level," PRIP'77, pp.387-391.
 - [5] P.C. Chen and T. Pavlidis, "Segmentation by texture using a co-occurrence matrix and a split-and-merge algorithm," CGIP, Vol.10, No.2, pp.172-182, 1979.
 - [6] R.W. Conners, "Towards a set of statistical features which measure visually perceivable qualities of textures," PRIP'79, pp.382-390.
 - [7] L.S. Davis, A. Rosenfeld, and J.S. Weszka, "Region extraction by averaging

- and thresholding," *IEEE Trans.*, Vol.SMC-5, No.3, pp.383-388, 1975.
- [8] L.S.Davis, S.A.Johns, and J.K.Aggarwal, "Texture analysis using generalized co-occurrence matrices," *IEEE Trans.*, Vol.PAM-1, No.3, pp.251-259, 1979.
- [9] L.S.Davis, "Computing the spatial structure of cellular textures," *CGIP*, Vol.11, No.2, pp.111-122, 1979.
- [10] K.Deguchi and I.Morishita, "Texture characterization and texture-based partitioning using two-dimensional linear estimation," *IEEE Trans.* Vol.C-27, No.8, pp.739-745, 1978.
- [11] E.S.Deutsch and N.J.Belknap, "Texture descriptors using neighborhood information," *CGIP*, Vol.1, No.2, pp.145-168, 1972.
- [12] C.R.Dyer and A.Rosenfeld, "Fourier texture features: Suppression of aperture effects," *IEEE Trans.*, Vol.SMC-6, No.10, pp.703-705, 1976.
- [13] R.W.Ehrich and J.P.Foith, "A view of texture topology and texture description," *CGIP*, Vol.8, No.2, pp.174-202, 1978.
- [14] R.Ehrich and P.F.Lai, "Elements of a structural model of texture," *PRIP'78*, pp.319-326.
- [15] J.O.Eklundh, "On the use of Fourier phase features for texture discrimination," *CGIP*, Vol.9, No.2, pp.199-201, 1979.
- [16] O.D.Faugeras, "Texture analysis and classification using a human visual model," *4IJCP*, pp.549-552, 1978.
- [17] N.Funakubo, "Analysis and discussion of a coarseness detector," *IEEE Trans.*, Vol.SMC-8, No.3, pp.229-232, 1978.
- [18] A.Gagalowicz, "Analysis of texture using a stochastic model," *4IJCP*, pp.541-544, 1978.
- [19] A.Gagalowicz, "Stochastic texture fields synthesis from a priori given second order statistics," *PRIP'79*, pp.376-381.
- [20] M.M.Galloway, "Texture classification using gray level run length," *CGIP*, Vol.4, No.2, pp.172-179, 1975.
- [21] R.M.Haralick, K.Shanmugam, and I.Dinstein, "Textural features for image classification," *IEEE Trans.*, Vol.SMC-3, No.6, pp.610-621, 1973.
- [22] R.H.Haralick, "Statistical and structural approach to texture," *4IJCP*, pp.45-69, 1978.
- [23] M.Hassher and J.Sklansky, "Markov random field models of digitized image texture," *4IJCP*, pp.538-540, 1978.
- [24] J.K.Hawkins, "Textural properties for pattern recognition," in [32], pp.347-370.
- [25] K.C.Hayes, Jr., A.N.Shah, and A.Rosenfeld, "Texture coarseness: Further experiments," *IEEE Trans.* Vol.SMC-4, No.5, pp.467-472, 1974.
- [26] 池田 谷内田 辻, "テクスチャ領域の境界線の抽出," 情報学会コンピュータビジョン研資4, 1980.
- [27] B.Julesz, "Experiments in the visual perception of texture," *Scientific American*, Vol.232, pp.34-43, 1975.
- [28] B.Julesz and T.Caelli, "On the limits of Fourier decompositions in visual texture perception," *Perception*, Vol.8, pp.69-73, 1979.
- [29] 倉出, "Skewed Symmetry と画像中の規則性を示す形の拘束条件に変換する方法," 信学技報, PRL 79-84, 1980.
- [30] J.R.Kender, "Shape from texture: A computational paradigm," *Proc. Image Understanding Workshop.*, pp.134-138, 1979.
- [31] J.R.Kender, "Shape from texture: An aggregation transform that maps a class of textures into surface orientation," *6IJCAI*, pp.475-480, 1979.
- [32] B.C.Lipkin and A.Rosenfeld, Eds., "Picture Processing and Psychopictorics," Academic Press, 1970.
- [33] S.Y.Lu and K.S.Fu, "A syntactic approach to texture analysis," *CGIP*, Vol.7, No.3, pp.303-330, 1978.
- [34] S.Y.Lu and K.S.Fu, "Stochastic tree grammar inference for texture synthesis and discrimination," *CGIP*, Vol.9, No.3, pp.234-245, 1979.
- [35] G.A.Mack, V.K.Jain, J.A.Madden and E.A.Eikman, "Polar reference texture in radiocolloid liver image," *PRIP'78*, pp.369-371.
- [36] J.T.Maleson, c.M.Brown, and J.A. Feldman, "Understanding natural texture," *Proc. Image Understanding Workshop*, pp.19-27, Oct. 1977.
- [37] D.Marr, "Early processing of visual information," *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B*, Vol.275, pp.483-524, 1976.
- [38] B.H.McCormick and S.N.Jayaramamurthy, "Time series model for texture synthesis," *Comput. and Inform. Sci.*, Vol.3, No.4, pp.329-343, 1974.
- [39] B.H.McCormick and S.N.Jayaramamurthy, "A decision theory method for the analysis of texture," *ibid.*, Vol.4, No.1, pp.1-38, 1975.
- [40] O.R.Mitchell, C.R.Myer, and W.Boyne, "A max-min measure for image texture analysis," *IEEE Trans.*, Vol.C-26, No.4, pp.408-414, 1977.
- [41] O.R.Mitchell, S.P.Lutton and S.Su, "Texture image segmentation using local extrema," *PRIP'79*, pp.508-511.
- [42] J.L.Muerle, "Some thoughts on texture discrimination by computer," in [32], pp.371-379.
- [43] M.Nagao, H.Tanabe, and K.Ito, "Agricultural land use classification of aerial photographs by histogram similarity method," *3IJCP*, pp.669-672, 1976.
- [44] 長尾 松山, "テクスチャ構造の階層的記述," 信学技報, PRL 78-71, 1978.
- [45] R.Nevatia, K.Price, and R.Vilnrotter, "Describing natural textures," *6IJCAI*, pp.642-644, 1979.
- [46] R.Ohlander, K.Price and D.R.Reddy, "Picture segmentation using a recursive splitting method," *CGIP*, Vol.8, No.3, pp.313-333, 1978.
- [47] R.M.Pickett, "Visual analysis of texture in the detection and recognition of objects," in [32], pp.298-308.
- [48] W.K.Pratt, O.D.Faugeras, and A.Gagalowicz, "Visual discrimination of stochastic texture field," *IEEE Trans.* Vol.SMC-8, No.11, pp.796-804, 1978.

- [49] W.k.Pratt and O.C.Faugeras, "Development and evaluation of stochastic-based visual textures features," 4IJCP, pp.545-548, 1978.
- [50] J.S.Read and S.N.Jayaramamurthy, "Automatic generation of texture feature detectors," IEEE Trans., Vol.C-21, No.7, pp.803-811, 1972.
- [51] A.Rosenfeld and B.S.Lipkin, "Texture Synthesis," in [32], pp.309-34.
- [52] A.Rosenfeld and E.B.Troy, "Visual texture analysis," Compt. Sci. Center, Univ. Maryland, Tech. Rep., TR-116, 1970.
- [53] A.Rosenfeld and M.Thurston, "Edge and curve detection for visual scene analysis," IEEE Trans., Vol.C-20, No.5, pp.562-569, 1971.
- [54] A.Rosenfeld, M.Thurston, and Y.H.Lee, "Edge and curve detection: Further experiments," ibid., Vol.C-21, No.7, pp.677-715, 1972.
- [55] A.Rosenfeld, "A note on automatic detection of texture gradients," ibid., Vol.C-24, No.10, pp.988-991, 1975.
- [56] A.Rosenfeld, "Visual texture analysis: An overview," Compt. Sci. Center, Univ. Maryland, Tech. Rep., TR-406, 1975.
- [57] G.J.Schachter, A.Rosenfeld, and L.S.Davis, "Random mosaic models for textures," IEEE Trans., Vol.SMC-8, No.9, pp.694-702, 1978.
- [58] B.R.Schatz, "Computation of immediate texture discrimination," SIJCAI, p.708, 1977.
- [59] J.P.Strong III and A.Rosenfeld, "A region coloring technique for scene analysis," C.ACM, Vol.16, No.4, pp.237-246, 1973.
- [60] R.N.Sutton and E.L.Hall, "Texture measurement for automatic classification of pulmonary disease," IEEE Trans., Vol.C-21, No.7, pp.667-676, 1972.
- [61] H.Tamura, S.Mori, and T.Yamawaki, "Textural features corresponding to visual perception," IEEE Trans., Vol.SMC-8, No.6, pp.460-473, 1978.
- [62] 田村, 山田, "テクスチャ領域の分類への自己回帰モデルの有用性の検討," 情報学報, PRL 78-88, 1979.
- [63] W.B.Thompson, "Textural boundary analysis," IEEE Trans., Vol.C-26, No.3, pp.272-276, 1977.
- [64] F.Tomita, M.Yachida and S.Tsuji, "Detection of homogeneous regions by structural analysis," 3IJCAI, pp.564-571, 1973.
- [65] 富田, 白井, 江, "テクスチャ画像処理についての比較研究," 構造化イメージ・プロセッシング研究 11, 1977.
- [66] F.Tomita and S.Tsuji, "Extraction of multiple regions by smoothing in selected neighborhoods," IEEE Trans., Vol.SMC-7, No.2, pp.107-109, 1977.
- [67] 富田, 白井, 江, "テクスチャの構造," 情報学報, Vol.19, No.2, pp.173-182, 1978.
- [68] 富田, 白井, 江, "構造解析によるテクスチャの分類," 情報学報, Vol. J61-D, No.7, pp.457-464, 1978.
- [69] F.Tomita, Y.Shirai, and S.Tsuji, "Description of textures by a structural analysis," 6IJCAI, pp.564-571, 1979.
- [70] J.T.Tou, D.B.Kao, and Y.S.Chang, "Pictorial texture analysis and synthesis," 3IJCP, pp.590-590P, 1976.
- [71] J.T.Tou and Y.S.Chang, "Picture understanding by machine via textural feature extraction," PRIP'77, pp.392-399.
- [72] W.H.Tsai and K.S.Fu, "Image segmentation and recognition by texture discrimination: A syntactic approach," 4IJCP, pp.560-564, 1978.
- [73] H.Wechsler and M.Kidode, "A random walk procedure for texture discrimination," IEEE Trans., Vol.PAMI-1, No.3, pp.272-280, 1979.
- [74] H.Wechsler, "Feature extraction for texture discrimination," PRIP'79, pp.399-403.
- [75] J.S.Weszka, C.R.Dyer, and A.Rosenfeld, "A comparative study of texture measures for terrain classification," IEEE Trans., Vol.SMC-6, No.4, pp.269-285, 1976.
- [76] J.S.Weszka and A.Rosenfeld, "An application of texture analysis to material inspection," PR, Vol.8, No.4, pp.195-200, 1976.
- [77] R.Yokoyama and R.M.Haralick, "Texture synthesis using a growth model," CGIP, Vol.8, No.3, pp.369-381, 1978.
- [78] R.Yokoyama and R.Haralick, "Texture pattern image generation by regular Markov chain," PR, Vol.11, No.4, pp.225-234, 1979.
- [79] A.L.Zobrist and W.B.Thompson, "Building a distance function for gestalt grouping," IEEE Trans., Vol.C-24, No.7, pp.718-728, 1975.
- [80] S.W.Zucker, A.Rosenfeld, and L.S.Davis, "Picture segmentation by texture discrimination," ibid., Vol.C-24, No.12, pp.1228-1233, 1975.
- [81] S.W.Zucker, "Toward a model of texture," CGIP, Vol.5, No.2, pp.190-202, 1976.



テクスチャの違い