

## ガボールフィルタを用いた連続的に変化するテクスチャ画像の領域分割

中村貴志, 宮道壽一, オコンピベルタン, 東海林健二

宇都宮大学 工学部 情報工学科

あらまし: テクスチャは、通常、微視的にはある基本要素の繰り返し、巨視的には均一に感じられるパターンとして定義される。しかしながら遠近画像や三次元曲面に貼りつけられたテクスチャ模様を見るときのように、テクスチャ特徴量が徐々に変化する領域も、我々是一个の領域として認識する。本論文では、ガボールフィルタバンクを用い、対象テクスチャに適合したフィルタの出力が境界部分で大きく変化することを利用して、テクスチャ特徴量の急激に変化する部分をテクスチャ領域の境界として検出する。提案手法が、特徴量が徐々に変化するテクスチャ領域の抽出に有効であることを実験により確かめる。

キーワード: 空間的に変化するテクスチャ、Gabor フィルタ、テクスチャ勾配、テクスチャ境界、領域分割

## Segmentation of Space-Variant Texture Images Using Gabor Filter Bank

Takashi NAKAMURA, Juichi MIYAMICHI, Bertin OKOMBI-DIBA and Kenji SHOJI

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

Abstract: Segmentation of texture regions with spacially varying textures is addressed in this paper. Usually, the goal of texture segmentation is to split the image into disjoint regions such that within each region there is a homogeneity of texture properties. But, a region with spacially varying texture properties is recognized as an integral part if the texture properties change smoothly. In this paper, using Gabor filter set and calculating the texture gradients, texture boundaries are located where texture properties change abruptly. Inside the region no boundary edge are detected since texture properties change smoothly. Some experimental results show the effectiveness of the proposed texture segmentation method.

Keyword: Space-variant texture, Gabor filter, Texture gradient, Texture boundary, Segmentation

# 1 はじめに

本論文では特徴量が空間的に徐々に変化しているテクスチャ画像を対象として、テクスチャの領域分割問題を考える。テクスチャはこれまで微視的にはある基本要素の繰り返し、巨視的には均一に感じられるパターンとして定義され [1]、テクスチャ画像の領域分割は、与えられた画像に対してテクスチャ特徴量を計算し、テクスチャ特徴の様な等質領域に分割する問題として定式化されてきた [1][2]。しかしながら、遠近画像や三次元曲面に貼りつけられたテクスチャ模様を見るときのように、テクスチャ特徴量が徐々に変化する領域も、我々は一つの領域として認識する。本論文では徐々に特徴量の変化する領域を1つのまとまった領域として抽出する手法について考える。

これまで、テクスチャ特徴量抽出法としては、ヒストグラム、同時生起確率などの各種統計量、パワースペクトル、フラクタル次元、自己相関関数、自己回帰モデルによる線形推定など、多くの手法が開発されている [1]。近年、Gabor 関数を用いる手法も多く提案されている [4]~[11]。本研究では、ガボールフィルタバンクを用い、対象テクスチャ領域に適合したフィルタの出力が他の領域との境界部分で大きく変化することを利用して、テクスチャ特徴量の急激に変化する部分をテクスチャ領域の境界として検出する。テクスチャ特徴量が変わってもその変化が急激でなければフィルタ出力の変化の程度は小さく領域境界とは認識されない。提案手法が、特徴量が徐々に変化するテクスチャ領域の抽出に有効であることを実験により確かめる。

テクスチャ画像の領域分割では、大きく分けて2つの手法、すなわち (1) いくつかの特徴量がある一定値を示す均質領域を抽出しそれらを分離する線として、領域境界を決定する手法と、(2) 特徴量が急激に変化する部分をエッジ (領域境界) として抽出し、それらで囲まれた部分を1つの領域とする手法が考えられる。本論文で扱う、特徴量が空間的に変化するテクスチャ領域の抽出問題では、1つのテクスチャ領域を均質特徴量の広がる範囲と定義できないため、後者の手法が有効である。ただし、最終的に閉じた領域境界を決定す

る場合には前者の考え方が必要となる。

以下第2章で本論文で用いる Gabor フィルタによる特徴抽出について簡単に説明する。第3章で、提案手法による連続的に変化するテクスチャ領域の分割についての実験結果を示し考察を加え、本論文の手法の有効性を示す。第4章で、本論文の結果をまとめ、今後の課題を示す。

## 2 Gabor フィルタによるテクスチャ画像特徴量の検出

### 2.1 Gabor フィルタ

#### 2.1.1 Gabor フィルタの定義

Gabor フィルタによるフィルタリングを次のようなたたみこみ演算 \* で定義する。

$$m(x, y) = I(x, y) * \phi(x, y) \quad (1)$$

ただし、 $I(x, y)$  は対象画像、インパルス応答  $\phi(x, y)$  は次式で定義される2次元 Gabor 関数 (複素正弦波で変調されたガウス関数) である。

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\lambda} \exp\left\{-\frac{((x'/\lambda)^2 + (y')^2)}{2\sigma^2}\right\} \times \exp(2\pi j F x') \quad (2)$$

ここで、 $(x', y') = (x\cos\theta + y\sin\theta, -x\sin\theta + y\cos\theta)$  は  $(x, y)$  座標系を  $\theta$  だけ回転させた直交座標系であり、 $\lambda$  は2次元ガウス関数のアスペクト比、 $\theta$  は主軸方向、 $\sigma$  はスケールパラメータで、 $\sigma$  はフィルタの空間的広がりやバンド幅を決定する。簡単のため、(2) 式のフィルタはガウス関数の軸方向と、複素正弦波の方向を一致させている。 $\phi(x, y)$  のフーリエ変換  $H(u, v)$  は、次式で与えられる。

$$H(u, v) = \exp\{-2\pi^2\sigma^2\{((u-U)\lambda)^2 + ((v-V))^2\}\} \quad (3)$$

ただし、 $((u-U)', (v-V)') = ((u-U)\cos\theta + (v-V)\sin\theta, -(u-U)\sin\theta + (v-V)\cos\theta)$  は、 $(U, V)$  だけ平行移動し、 $\theta$  だけ回転した空間周波数領域の座標系である。 $H(u, v)$  は、中心周波数  $(U, V)$  (ただし、(2) 式の  $F$ 、および  $\theta$ 、 $U$  と  $V$  は

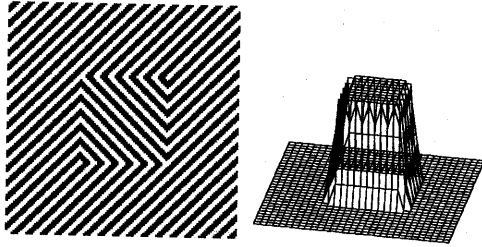


図 1: (a) テスト画像 (b) パワー係数値 ( $\theta=135$  度)

$F = \sqrt{U^2 + V^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1}(V/U)$  の関係にある) の帯域通過型ガウス関数で、通過帯域幅はパラメータ  $\sigma$ ,  $\lambda$  で制御される。

### 2.1.2 テクスチャ画像特徴量の検出

2次元 Gabor 関数は複素数であり、従って式 (1) も複素数値になる。この Gabor フィルタのパワー係数値 (フィルタ出力) を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} g(x, y) &= |m(x, y)|^2 \\ &= \{Re(m(x, y))\}^2 + \{Im(m(x, y))\}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

図 1 (a) のようなテクスチャ画像 (256 画素  $\times$  256 画素) に Gabor フィルタを適用した例を示す。図 1 (b) の画像は、中心周波数  $F = 0.15$  サイクル/画素、回転角  $\theta = -45$  度 (内側の正方領域のテクスチャの線の方向に一致)、スケールパラメータ  $\sigma = 12.6$  の Gabor フィルタのパワー係数値の変化を 3 次元的に図示したものである。内側の正方領域が正確に検出できていることが分かる。中央の正方領域でパワー係数値は大きな値となる。 $g(x, y)$  の値の変化の勾配を計算すれば領域境界のエッジが抽出できる。

白黒濃淡画像のエッジ部分は、濃度の急変する部分として特徴づけられ、空間的な微分演算で求められる。テクスチャ画像の場合には、テクスチャの均一性を何らかの方法で濃淡値の均一性に交換できれば、同様な微分演算の手法で、テクスチャ領域の境界を抽出できる。テクスチャが局所的な

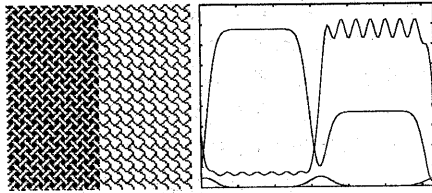
主要周波数成分によって特徴づけられると仮定すると、その局所的な成分周波数に適合したフィルタの出力値は高い値を示し、他のフィルタ出力値は低い値となる。あるテクスチャ領域に適合したフィルタはその領域で高い値、その外側で低い値となるため、テクスチャ領域の境界部分で、フィルタ出力 (= パワー係数値  $g(x, y)$ ) は急な勾配を持ち、空間微分により急な勾配部分 (= 領域境界) を検出できる。空間的に徐々に特徴量の変化する領域に対して、領域内部ではフィルタ出力の変化は緩く境界部分で急激に変化する。従って領域境界は検出されるが、領域内部にエッジは検出されない。

## 2.2 テクスチャ境界でのフィルタ出力

2つの異なるテクスチャが接合するテクスチャ境界におけるフィルタ出力の不連続特性について調べる。フィルタの周波数特性が、片側の領域のテクスチャの局所周波数成分に適合し、他の領域のテクスチャに適合しない場合、フィルタの出力は、境界部分で大きく変化し、急な勾配が形成される。D.Dunn らは [6]、テクスチャ領域直線境界における、フィルタ出力の変化の様子を調べ、(1) ステップ状変化、(2) 谷状および尾根状変化、(3) 局所平均出力値のステップ状変化に大きく分類している。

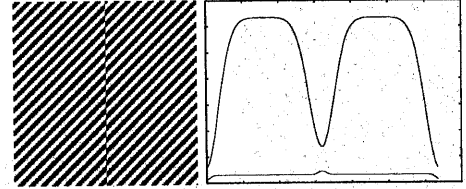
(1) の変化は、2種類の異なるテクスチャ (異なる基本要素、基本要素の向きの違い、基本要素の配列間隔の違いなど) が接合している場合で、使用するフィルタに適合した領域で出力が大きくなり他方で出力が小さくなるので、領域境界部分に大きな勾配が発生する。フィルタの通過帯域が両側のテクスチャ成分に適合しなければ、境界部分の出力が両側のテクスチャ領域における出力より大きくなり尾根状の出力変化を示すが、その大きさは適合フィルタの出力に比べると非常に小さい。図 2 に 2つの異なるテクスチャを接合した画像の例 (a) とそれに対するいくつかの Gabor フィルタのパワー係数値の 2つの領域での変化の様子を示す。

(2) は 2つの領域が同一のテクスチャから構



(a) テスト画像1 (b) ステップ状変化

図 2: 2つの異なるテクスチャ  
フィルタ出力のステップ状変化



(a) テスト画像2 (b) 谷状または尾根状変化

図 3: 同一テクスチャの位相ずれ  
谷状または尾根状変化

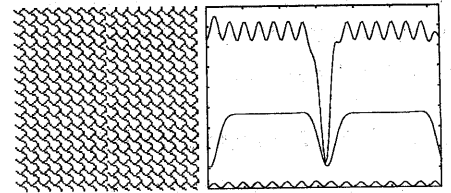
成され、両者が上下または左右にシフトして、境界線部分で位相差が発生している場合で、フィルタが両領域のテクスチャの主要周波数成分に適合していれば、境界部分で出力値が小さくなり谷状の変化、適合していない場合には、境界部分で出力が大きくなり、尾根状の変化を示す。図3および図4に、同一テクスチャが境界部分でずれ、位相差が発生している画像の例(a)と、それに対するGaborフィルタのパワー係数値の2つの領域および境界部分での値の変化の様子を示す。両領域のテクスチャに適合しないフィルタの出力は境界部分で大きくなるが、その大きさは一般に適合フィルタの2つの領域での出力値よりかなり小さい。図3のテクスチャはただ1つの空間周波数成分を含むので、特定のフィルタに対してのみ大きな出力となるが、一般には複数個の空間周波数成分を含むため、図4のようにいくつかのフィルタの出力が領域部分で大きな値を示す。

(3)は各テクスチャ領域が、基本要素の一樣配列になっていない場合で、各領域の部分部分で出力に局所的な凹凸が見られ、平均値に見ると境界部分で出力のステップ状に変化している。微分により、比較的变化の大きい領域境界部分が検出される可能性がある。

## 2.3 テクスチャ勾配とテクスチャエッジ

### 2.3.1 フィルタバンクの構成

アスペクト比  $\lambda$  と周波数領域での方位バンド幅を一定にし、周波数の大きさ方向のバンド幅を



(a) テスト画像3 (b) 谷状または尾根状変化

図 4: 同一テクスチャの位相ずれ  
谷状または尾根状変化

フィルタ中心周波数の大きさに比例させ、隣接するフィルタがほぼ Half-Peak で互いに接するように Gabor 関数を選択し、必要な範囲の周波数領域を覆うようにする。図5は80個のフィルタ(2次元ガウス関数の大きさのみ濃淡で表示。変調正弦波は表示されていない)で周波数領域の上半平面を覆った例である。方位方向に16種類、周波数の大きさ方向に5種類のフィルタバンクである。

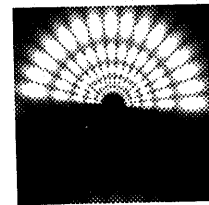


図 5: 周波数領域での Gabor フィルタ群の配置

### 2.3.2 テクスチャ勾配の計算とテクスチャエッジ

フィルタバンクを構成する  $M$  個の Gabor フィルタに対し、式 (4) で計算されるパワー係数値 (フィルタ出力) を、 $g_1(x, y), \dots, g_M(x, y)$  とする。各出力関数  $g_i(x, y)$  に対し、その勾配ベクトル  $\nabla g_i(x, y)$  を次式で計算し、

$$\nabla g_i = \left[ \frac{\partial}{\partial x} g_i, \frac{\partial}{\partial y} g_i \right]^T \quad (5)$$

その絶対値の2乗の、 $M$ 個のすべてのフィルタについての和をその点におけるテクスチャ勾配の大きさ  $h(x, y)$  と定義する。

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^M |\nabla g_i|^2 \quad (6)$$

テクスチャ勾配の大きさ  $h(x, y)$  はテクスチャの変化量の特徴づけるものであり、その大きさが小さければ、その位置近傍の領域は一樣なテクスチャであることを示し、大きければその位置近傍の領域はテクスチャの境界付近であることを示すと考えられる。河田ら [4] は別の方法でテクスチャ勾配を定義しているがその物理的な意味は必ずしも明確ではなく、前節の考察に基づいた (6) 式の定義が分かりやすい。

勾配の大きさ  $h(x, y)$  の尾根部分がテクスチャ境界に相当する。 $h(x, y)$  の値がある閾値  $\epsilon_1$  以上で、かつ、微分  $\frac{\partial h}{\partial x}$  および  $\frac{\partial h}{\partial y}$  がともにある閾値  $\epsilon_2$  以下の部分を本論文ではテクスチャエッジとする。領域境界を線として抽出するにはさらに細線化あるいは近傍領域のテクスチャ変化をさらに詳細に検討した領域分割が必要となる。

前出の2つのテクスチャ画像、図2および図3に対して (6) 式で計算される  $h(x, y)$  の大きさの変化の様子および抽出されたテクスチャエッジを図6、図7に示す。図6 (a) のように左右の領域でテクスチャが異なる画像では、テクスチャエッジが1ヶ所に定まるが、図7 (a) のように境界の両側でテクスチャの位相が異なる画像では2ヶ所現れる。2次元ガウス関数のひろがりを変えるスケールパラメータ  $\sigma$  の値を変えると、2本のテクスチャエッジの間隔も変化する。 $\sigma$  の値を大きくするとエッジの間隔もそれに応じて広く検出され

る。異なる  $\sigma$  に対する2本のエッジを図8に示す。使用する Gabor フィルタのスケールパラメータ  $\sigma$  の値により、この間隔は決まるので、ほぼこの間隔で2本のエッジが検出された場合には、各フィルタの出力変化  $g_i(x, y)$  を調べ、(5) 式の勾配ベクトルが、ほぼ同じ大きさで向きが逆の場合には、同一テクスチャの位相ずれと判定し2本のエッジの中間部分をテクスチャエッジとする必要がある。詳細は検討中である。

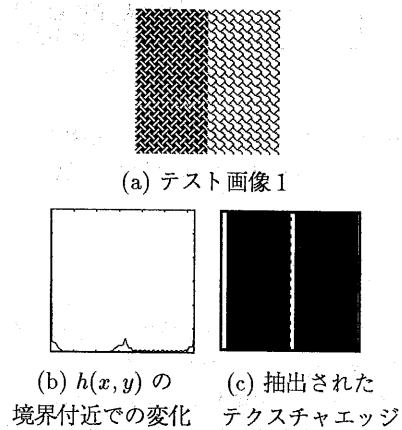


図6: 異なるテクスチャの場合

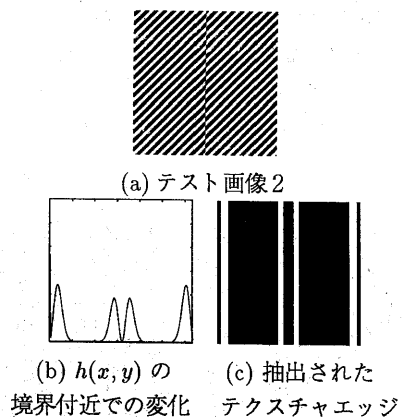


図7: 同一テクスチャの位相のずれの場合

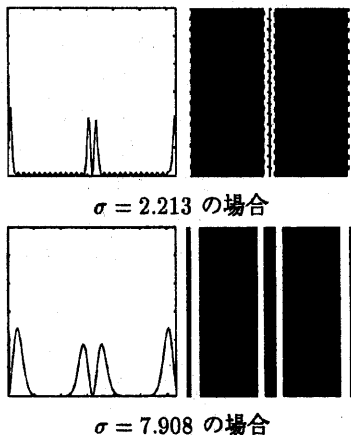


図 8: スケールパラメータ  $\sigma$  と検出される 2本のエッジの間隔との関係

### 3 実験

前節のテクスチャ領域境界検出手法の有効性を確かめるため、いくつかのテクスチャに対して実験を行なった。対象とする画像の構成テクスチャに応じたフィルタバンクを用いないと、用意すべきフィルタの個数が非常に多くなるため、実験毎にフィルタパラメータを少し調整している。

#### 実験 1

実験 1 では図 9 (a) に示す、複数のテクスチャからなる 2 値画像 (256 画素  $\times$  256 画素) を対象とした、各テクスチャ領域は一定のテクスチャ特徴量を持ち、空間的に変化するテクスチャではない。

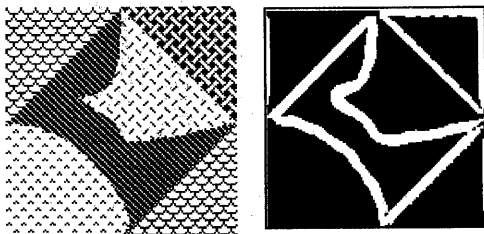


図 9: (a) 実験画像 1 (b) テクスチャエッジ

実験 1 で用いたフィルタバンクは、方位バンド幅  $\Omega$  を 11.25 度、アスペクト比  $\lambda$  を 1.0、周波数平面での方向角を 0 度から 168.75 度までの 11.25 度ずつ変化させた 16 通り、中心周波数  $F$  は 0.145 から 1.5 倍ずつ変化させた 5 通りの合計 80 個のフィルタで構成されている。テクスチャエッジを求めた結果を図 9 (b) に示す。画像の外周部分を除き、ほぼ正確にテクスチャ領域の境界が得られている。

#### 実験 2

実験 2 では図 10 (a) に示す画像を対象とした。図 10 (a) は、空間的に徐々に変化するパラメータをもつ領域を 1 つのまとまった領域として抽出できることを確認するための人工的に作成した画像である。

実験 2 で用いたフィルタバンクは、方位バンド幅  $\Omega$  を 11.25 度、アスペクト比  $\lambda$  を 1.0、周波数平面での方向角を 0 度から 168.75 度までの 11.25 度ずつ変化させた 16 通り、中心周波数  $F$  は 0.086 から 1.5 倍ずつ変化させた 3 通りの合計 48 個のフィルタで構成されている。中央部の円周状曲線で構成される領域とその上下に広がる領域が 1 つの領域として抽出されており、提案手法の有効性が確認できる。

いくつかのフィルタの出力  $g_i(x, y)$  の変化の様子を 3 次元的に表現したものを図 11 に示す。図 11 (a) は図 10 (a) の中央のいくつかの円で構成されるドーナツ状領域の  $\theta = 135$  度の方向に適合したフィルタの出力で、対応する部分で出力値は大きくなっているが、変化は緩い。図 11 (b) は図

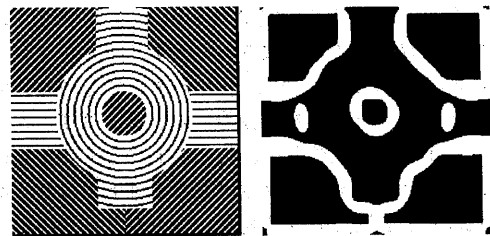


図 10: (a) 実験画像 2 (b) テクスチャエッジ

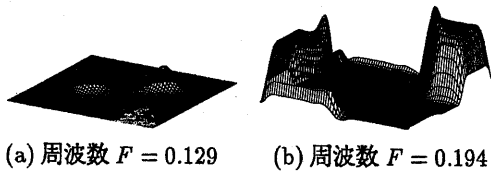


図 11: 図 10(a) のパワー係数值 ( $\theta = 135$  度)

10 (a) の右上および左下の領域に適合したフィルタで、方向は同じであるが、中心周波数が少し高い。領域境界で出力が急激に変化している様子が分かる。

### 実験 3

実験 3 では図 12 (a) に示す、3次元物体にテクスチャを張り付けた多値画像 (256 画素  $\times$  256 画素、256 階調) を対象とした。より現実に近い画像で徐々にパラメータが変化する領域を 1 つのまとまりとして抽出できることを確認する。

実験 3 で用いたフィルタバンクは、方位バンド幅  $\Omega$  を 45.0 度、アスペクト比  $\lambda$  を 2.0、周波数平面での方向角を 0 度から 135.0 度までの 45.00 度ずつ変化させた 4 通り、中心周波数  $F$  は 0.33 から 1.2 倍ずつ変化させた 5 通りの合計 20 個のフィルタで構成されている。

テクスチャの徐々に変化する 3次元物体、床がそれぞれ 1 つの領域として抽出されている。

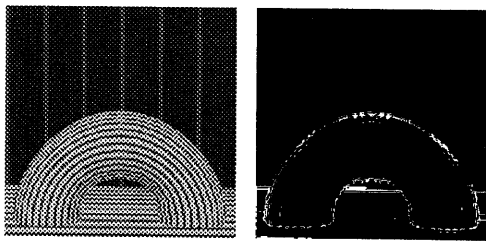


図 12: (a) 実験画像 3 (b) テクスチャエッジ

### 実験 4

実験 4 では短い線分で構成されるペン画自然風景画像を対象とし、提案手法により検出されるエッジ領域について検討した。

実験 4 で用いたフィルタバンクは、方位バンド幅  $\Omega$  を 11.25 度、アスペクト比  $\lambda$  を 1.0、周波数平面での方向角を 0 度から 168.75 度までの 11.25 度ずつ変化させた 16 通り、中心周波数  $F$  は 0.1 から 1.3 倍ずつ変化させた 3 通りの合計 48 個のフィルタで構成されている。

線画タッチの急に変化する部分がテクスチャエッジとして抽出されていることが分かる。



図 13: (a) 実験画像 4 (b) テクスチャエッジ

## 4 おわりに

本論文では、Gabor フィルタバンクを用い、複数個の Gabor フィルタのパワー係数 (フィルタ出力) 変化の勾配ベクトルを計算し、その絶対値の 2 乗和の変化の尾根部分をテクスチャエッジとして検出をした。一部エッジの欠落やノイズがみられるが、提案手法が連続的に変化するテクスチャ画像の領域分割に有効であることが確認できた。

今後の課題として、正確なテクスチャエッジ抽出のためのフィルタバンクのパラメータの設定、2 つの領域の位相差が示す領域境界抽出の有効な手法の検討、得られたテクスチャエッジからの領域抽出手法の検討、他の自然画像の領域分割への適用などを検討中である。

## 参考文献

- [1] 尾上守夫 他: "画像処理ハンドブック", 昭晃堂, pp.295-303(1987).
- [2] 大恵俊一郎, 篠原靖典, 土井幹生: "2次元場自己回帰モデルとピラミッドリンクを用いたテクスチャ画像の領域分割法", 信学論 (D-II), Vol. J75-D-II, No.7, pp.1143-1141(1992).
- [3] R.W.CONNERS, and C.A.HARLOW: "A Theoretical Comparison of Texture Algorithms", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., PAMI-2, No.3, pp.204-222(1980).
- [4] 河田耕三, 有本卓: "ガボール展開係数を用いた階層的テクスチャ解析", 信学論 (D-II), Vol. J78-D-II, No.3, pp.437-444(1995).
- [5] Bovik A.C., Clark M. and Geisler W. S.: "Multichannel Texture Analysis Using Localized Spatial Filters", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., PAMI-12, No.1, pp.55-73(1990).
- [6] Dunn D., Higgins W. and Wakeley J.: "Texture Segmentation Using 2-D Gabor Elementary Functions", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., PAMI-16, No.2, pp.130-149(1994).
- [7] Jain A. K. and S. Bhattacharjee: "Text segmentation using Gabor filters for automatic document processing", Machine Vision Appl. 5, pp.169-184(1992).
- [8] Jain A. K. and K. Farrokhnia: "Unsupervised texture segmentation using Gabor filters", Pattern Recognition 24, pp.1167-1186(1991).
- [9] Thomas P. Weldon, William E. Higgins and Dennis F. Dunn: "Gabor filter design for multiple texture segmentation", Opt. Eng. 35, 10, pp.2852-2863(1996).
- [10] M. R. Turner: "Texture Discrimination by Gabor Functions", Biol. Cybern. 55, pp71-82(1986).
- [11] J. M. H. DU BUF: "Gabor Phase in Texture Discrimination", Signal Processing 21, pp.221-240(1990).