

フーリエ変換を用いた テクスチャの構造解析

松山隆司, 三浦修一, 長尾真 (京都大学工学部)

1. はじめに

物体を認識する視覚処理のひとつとして、テクスチャ性による対象の同定、識別がある。テクスチャとは、ある要素が一定の配列規則に従って配列されてできる繰り返しパターンであると定義されるが、人間がテクスチャを見て、どのようにしてその要素と配列規則を認識するかは興味深い問題である。

テクスチャの解析法は、大別すると統計的方法と構造的な方法に分けられる。統計的方法は、木目、砂地、芝生のようにその要素も規則も全く判然としないものを解析するのに使われ、その画像の統計的性質により特徴を記述するものである。構造的な方法は要素と規則が明瞭な場合に行われ、構成要素の抽出とその配列規則の記述を目的とする。

構造的解析法としては、領域分割などにより要素を抽出した後、各要素間の配列規則を求めるというボトムアップ的方法がこれまでとられて来た。^{[1][2]} しかしこのような方法では自然のテクスチャを解析する場合、雑音やシェーディング、コントラストの悪さなどのために領域分割が難しく、うまく要素が抽出できないことが多い。このため、こうした弱点を補うために複雑な処理が必要となる。^{[2], [3]} これに対し、先に配列規則を求め、次に要素を抽出するというトップダウンの方法が近年とられるようになった。^{[4][5]} これは統計的解析手法を構造的解析法に適用しようとするもので、上記の雑音や画質の悪さに対して強く、自然のテクスチャの解析に適している。

Connors^[4]やZucker^[5]は、濃度同時生起行列を利用してテクスチャの周期性を抽出した。しかし、濃度同時生起行列による方法は、計算量が膨大であり、また後に述べるように、反復格子の位相の情報を含まないため、要素抽出の段階で問題が生じる。

本報告では、フーリエ変換を用いてトップダウン的にテクスチャの構造解析を行う方法について述べる。フーリエ変換は、高速アルゴリズムFFTにより簡単に計算でき、また位相情報を要素の抽出に利用できるなどのすぐれた特徴をもつ。

また、本手法では、次のようなテクスチャを対象とする。

(1) 画面全体が一様なテクスチャ領域である。

(2) 要素の配列規則は2方向のベクトルによって記述される。すなわち、単一方向性のテクスチャや、ひとつの要素がさらに小さな要素の配列によって構成される階層的テクスチャは取り扱わない。以上のような性質を持つ画像として、図1に示す画像D3^[6]を例にとって説明する。画像は128×128の大きさで、濃度は256レベルに量子化されている。

2. 処理の概要

フーリエ変換を利用した構造解析の処理過程は大きく2段階に分けられる。第1段階はフーリエ変換のパワースペクトルからテクスチャの配列規則を求める過程、第2段階はフーリエ変換の位相情報から要素の抽出を行う過程である。

第一段階の配列規則の記述では、パワースペクトル空間において、テクスチャの周期性を表わす2つの基本周期ベクトル $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ を求める。

原画像が完全に周期的なパターンであれば、そのパワースペクトルもまた規則正しい配列をとり、スペクトル空間でゼロでない値を持つすべての位置ベクトルは、 $m\vec{p}_1 + n\vec{p}_2$ (m, n は整数) によって与えられる。雑音や歪のある自然のテクスチャの場合、スペクトルは空間全域に分布するが、原画像の周期性に対応する基本周期成分とその高調波にエネルギーが集中する。(図1参照) したがって、2つのベクトル $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ のスペクトル強度 $P(\vec{p}_1), P(\vec{p}_2)$ 、およびその高調波成分 $P(m\vec{p}_1 + n\vec{p}_2)$ の強さを調べれば、原画像の配列規則を規定する2つのベクトルが決定できる。

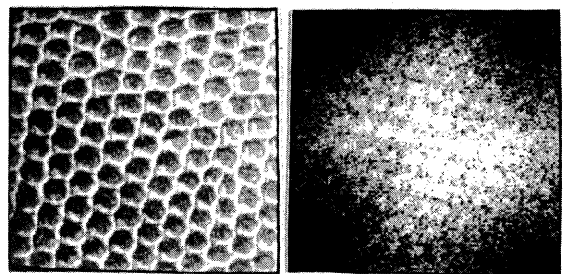


図1 画像D3とそのパワースペクトル

$\vec{p}_1, \vec{p}_2$ が求まると、画像平面上の要素の配列規則を表わすベクトル $\vec{a}_1, \vec{a}_2$ が次のようにして得られる。

$$|\vec{a}_1| = \frac{M}{|\vec{p}_1|} |\cos \theta|, |\vec{a}_2| = \frac{M}{|\vec{p}_2|} |\cos \theta|$$

$$\angle \vec{a}_1 = \angle \vec{p}_2 + \frac{\pi}{2}, \angle \vec{a}_2 = \angle \vec{p}_1 + \frac{\pi}{2}$$

ここで、 θ は $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ のなす角、 M は画像の大きさ ($M \times M$) を表わす。

第2段階の要素抽出では、「要素とは、濃度の一様な領域である。」という仮定において、フーリエ変換の位相情報から要素の位置を決定し、要素抽出を行う。この場合、原画像には雑音や歪が含まれており、単純な操作では要素抽出は困難である。そこで複素フーリエ変換像を加工して逆フーリエ変換することにより、雑音や歪を除いた復元画像を生成し、この復元画像上で要素抽出を行う。

要素の抽出法としては、フーリエ変換の位相情報と処理の第1段階で求めた配列規則とを利用し、格子状に配列する要素の核となる点を求め、それらを並列的に成長させて得られる領域の平均像を要素と見なす。

3. 配列規則の記述

テクスチャの配列規則の記述を得るための処理は (1) 前処理, (2) ベクトル候補の選択, (3) ベクトル対の決定, の3段階に分けて進められる。

(1) 前処理

取り扱う画像がデジタル画像であるため、そのフーリエ変換は離散的フーリエ変換となり、求めたスペクトルは原画像が上下左右に無限に繰り返されたもののスペクトルとなる。したがって、原画像の上下、左右のそれぞれ対応するエッジの間に濃度の跳躍があると、それがスペクトルに雑音となって影響する。

このような雑音は有用な情報を消してしまう恐れがある

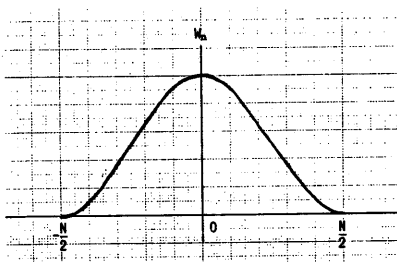


図2 ハニングの窓関数

で取り除かなければならない。このため、原画像にハニングの窓をかける。ハニングの窓は一次元の場合、

$$W_n = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi n}{N} \right) \quad \left(-\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2} \right)$$

で表わされる。^[7] この重み関数は、図2に示すように中心で1、両端で0になっている。ハニングの窓を2次元に拡張した関数 W_r を、 $M \times M$ の画像に対して

$$\begin{cases} W_r = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi r}{M} \right) & (r \leq \frac{M}{2}) \\ W_r = 0 & (r > \frac{M}{2}) \end{cases}$$

と定義する。ただし、 r は画像の中心からの距離である。上式で表わされるハニングの窓関数を原画像にかけることにより、エッジでの距離をなくし、スペクトル空間での雑音を除くことができる。

(2) ベクトル候補の選択

窓関数をかけた画像をフーリエ変換し、そのパワースペクトル $P(u, v)$ を利用して、配列規則を記述するベクトル $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ を求める。 $P(u, v)$ 空間では、原画像の周期性に対応する位置にエネルギーが集中することから、まずスペクトル強度のピーク(極大)点を求め、その位置をテクスチャの周期性を表わすベクトルの候補と考える。ところが、パワースペクトルは一般に原点から裾野をひくように広がっているため、原点付近に現われるべきピークは低周波雑音成分に隠されてしまう可能性がある。これをさけるために $P(u, v)$ からその 5×5 の移動平均画像 $\bar{P}_5(u, v)$ をひいた $A_5(u, v) = P(u, v) - \bar{P}_5(u, v)$ の空間でピークを求める。

このようにして得られたベクトル候補のなかには、冗長なものが含まれており、後の計算量を減らすためにそれを取り除く。まず、テクスチャの繰り返し周期はあまり高くない空間周波数によって表わされる(要素が適当な大きさを持つ)と考えられるので、適当に周波数に制限を設けてもよいと考えられる。また、あるベクトル $\vec{p}_1$ に対して $\vec{p} \approx n\vec{p}_1$ ($n=2, 3, \dots$), $P(\vec{p}) \leq P(\vec{p}_1)$ であるようなベクトル $\vec{p}$ は、 $\vec{p}_1$ の高調波であり、配列規則を与えるベクトルとはならないので無視できる。

以上のことから、 $A_5(u, v)$ 空間において、 $-32 \leq u \leq 32$, $0 \leq v \leq 32$ の範囲で、 $A_5(u, v) > A_5(ut_i, v+j)$ ($i, j = \pm 2, \pm 1, 0$) を満たすベクトル $\vec{p} = (u, v)$ を求め、上記の高調波のベクトルの除いたものを最終的なベクトル候補とする。画像 D3 の場合、ベクトル候補の数は54になった。

(3) ベクトル対の決定

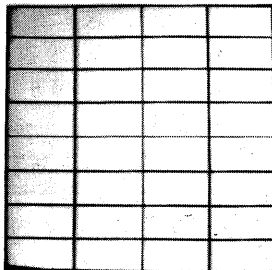
上記のベクトル候補の任意の対に対して 次のような評価関数を定義し、この評価量が最大となるベクトル対を原画像の配列規則とする。

パワースペクトル空間 $P(u, v)$ からその 7×7 の移動平均画像をひいたものを $A_7(u, v)$ とする。2つのベクトル $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ の対としての評価量 $E(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ は、

$$E(\vec{p}_1, \vec{p}_2) = P(\vec{p}_1) + P(\vec{p}_2) + \sum_{m,n} A_7(m\vec{p}_1 + n\vec{p}_2)$$

と定義される。ただし m, n は整数であり、 $m\vec{p}_1 + n\vec{p}_2$ は、 $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ が $A_7(u, v)$ 空間に生成する格子点である。 $A_7(u, v) = A_7(-u, -v)$ であることから、 $A_7(u, v)$ 空間の $v \geq 0$ の領域に対して計算を行えばよい。また、原点の値は評価しない。上式第1項、第2項はベクトル自身の強さを表わし、第3項はベクトルの対としての評価量である。

多くの場合、パワースペクトル強度の強い2つのベクトルを選べばよいのであるが、要素の方向性と配列規則の方向性が異なる場合には、必ずしも強度の強い2つのベクトルが要素の配列規則を与えるとは限らない。レンガ模様はその典型的な例である。図3に示すような位置を少しずつずらした5枚のレンガ模様において、要素自身の方向性を示す垂直方向と水平方向の最大スペクトル強度と、配列規則を与えるななめ方向のスペクトル強度を、レンガのずれのピッチに対して描いたグラフを図4に示す。グラフから、ななめ方向のスペクトル強度は、ずれのピッチ



が大きくなるほど弱くなり、いずれの場合も垂直、水平方向のスペクトルに比べ弱い値を持つことがわかる。しかし、配列規則としてはななめ方向のベクトルが選ば

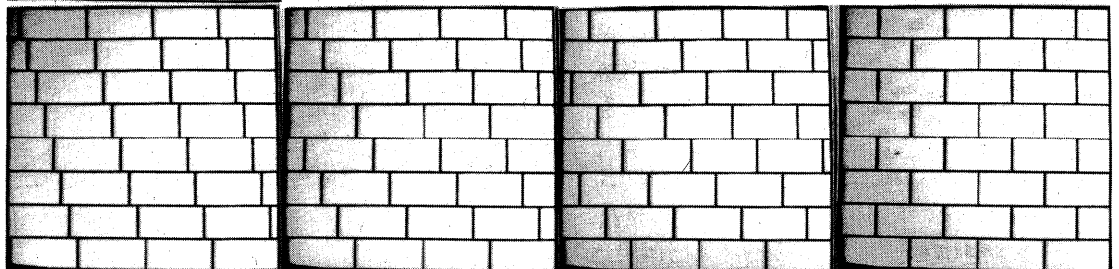


図3 4 pixel ずつつづらしたレンガ模様

れるべきであり、ベクトル対の高調波成分を評価に入れることによってそれが実現できる。

一方、画質の悪さや雑音のある自然のテクスチャの場合、スペクトル空間に非常に広くその成分が分布しており、 $P(u, v)$ 空間において単に高調波成分を評価量にたしあわせるだけでは正しい評価がなされない。これは低周波のベクトル対を選んだ場合、 $P(u, v)$ 空間に生成される格子点の数が非常に多くなり、余分な雑音成分を評価量にたしあわせてしまうからである。そこで、 $P(u, v)$ 空間からその 7×7 の移動平均をひいた $A_7(u, v)$ 空間で高調波成分をたしあわせる。一般に、配列規則を与えるベクトル対の高調波成分は $A_7(u, v)$ 空間においても強い値を持ち、たしあわせることによって評価量が大きくなる。これに対して、配列規則を与えないベクトル対の高調波成分は、 $A_7(u, v)$ 空間では負の値をとる場合があり、たしあわせることによってかえって評価量が小さくなる。

以上のことから、 $E(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ によって配列規則を与えるベクトル対をうまく選ぶことができる。D3の場合、 $E(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ によって、 $(-2, 12)$ 、 $(7, 10)$ というベクトル対が配列規則として得られた。

4. 要素の抽出

前節で求めた基本周期ベクトルから、原画像の繰り返し最小単位、「セル」を求めることができる。セルを求める最も簡単な方法は、基本周期ベクトル $\vec{p}_1, \vec{p}_2$ から画像空間の配列規則を与えるベクトル $\vec{a}_1, \vec{a}_2$ を求め、 $\vec{a}_1, \vec{a}_2$ によって格子をつくり、原画像に重ね、格子の1区画をセルとして切り出すことである。しかし求めた格子をどこに置くかは任意であり、濃度同時生起行列を用いた Connors らの方法ではそれを決定することはできず、テクスチャの構造記述を求める上で、大きな問題を残している。これに対し、フーリエ変換は位相情報を含み、これをうまく利用すれば格子の位置をユニークに決定できる。

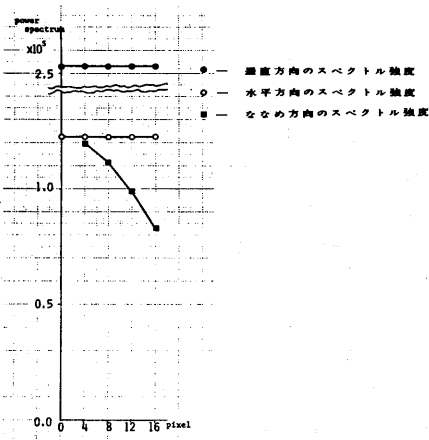


図4 図3のレンガ模様の
垂直、水平、ななめ方向の
スペクトル強度

図5は画像D3の基本周期ベクトル $\vec{p}_1$, $\vec{p}_2$ の位置における複素フーリエ変換像の値 $F(\vec{p}_1)$, $F(\vec{p}_2)$ だけを取り出して逆フーリエ変換した画像である。これは2方向の正弦波の重ね合わせによって生成される画像で、濃度値の山と谷が現われている。この画像の濃度値の最大点、あるいは最小点を格子点のひとつと考え、周期性を表わすベクトル $\vec{a}_1$, $\vec{a}_2$ を用いて格子を生成すれば、2通りの格子の位置がユニークに決定できる。ここで、濃度値の最大点、最小点のどちらを格子点として考えるかによって、この2つの格子をそれぞれ「白格子」、「黒格子」と呼ぶことにする。図6に画像D3に対して「白格子」と「黒格子」を重ねた画像を示す。

次に、「白格子」、「黒格子」とテクスチャ画像との関係について考える。格子の位置を決めるために使用した図5の画像は、もとのテクスチャのひとつの近似と考えられる。つまり、図5の画像での濃度値の山と谷は、原画像における明るい領域と暗い領域

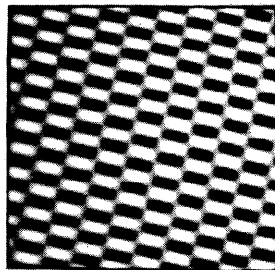


図5 画像D3の
基本周期成分のみによる
逆変換画像

域に対応している。

したがって、白格子、黒格子の各格子点はそれぞれ原画像の明るい領域、暗い領域の中心に位置すると考えてもよい。たとえば、白格子によって切り出されたセルは、図6からわかるように、平行四辺形の4角に明るい領域が位置し、

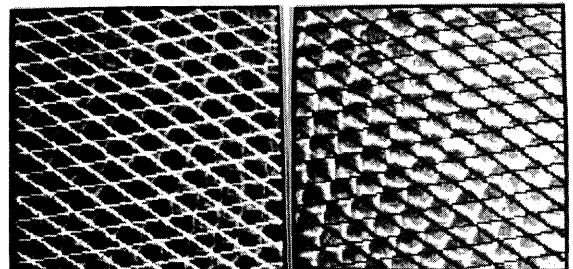
中央に暗い領域が位置するようなセルとなる。ここで、テクスチャは図と背景に分けられると考えれば、白格子によって切り出されたセルは、暗い領域が図で、明るい領域が背景のように感じられ、黒格子によって切り出されたセルでは逆のことが言える。

この段階で、白あるいは黒格子で切り出されたセルを直ちにテクスチャの要素であると考えてもよいが、そうすると、セルが人間の知覚する要素とくいちがうことかしばしば生じる。これは、図7のレンガ模様とそのセルからもわかるように、人間が知覚する要素(濃度の様な領域)の持つ方向性と格子の方向とは一致しない場合、要素(領域)が1つのセル内におさまらなくなってしまうためである。

以上の考察から、本手法では、白格子、あるいは黒格子によって囲まれた領域を切り出し、要素として記述するのではなく、各格子点を要素の中心と考え、その点から領域成長させることにより濃度の様な領域を求め、それを要素とする方法をとった。この操作によって、白い要素と黒い要素を抽出し、最後に一方を要素、他方を背景と判定する。以下にアルゴリズムを述べる。

(1) 復元画像の生成

原画像で要素抽出をしようとした場合、配列規則のゆらぎや要素の欠損によって格子点が必ずしも要素の中心に落ちるとは限らず、またシェーディングやコントラストの悪さのため領域成長の閾値の決め方が難しいなど多くの問題がある。そこで複素フーリエ変換 $F(u, v)$ において、基本周期成分 $F(\vec{p}_1)$, $F(\vec{p}_2)$ と、その高調波成分 $F(m\vec{p}_1 + n\vec{p}_2)$ だけを取り出し、それらを逆フーリエ変換することにより、歪みや画質の悪さ、雑音などのない復元画像を生成し、この復元画像上に格子点を落とす。復元画像は完



(a) 白格子

(b) 黒格子

図6 画像D3と格子

全に周期的であり、格子点はすべて要素の中心に落ちる。
図8に画像D3の復元画像を示す。

(2) 閾値の決定

次に領域成長のための閾値を復元画像のヒストグラムから求める。しかし、復元画像はコントラストが悪く、そのヒストグラムに明確な谷が現われず、このままでは閾値を求めるのは困難である。このため、復元画像にエッジを保ったスムージング^[8]を施すことによりコントラストを強調し、ヒストグラムに明確な谷が現われる状態にしてからグループ間分散法^[9]により閾値を求める。また、スムージングされた画像は閾値を求めるだけに使用し、領域成長はもとの復元画像に対して行う。

(3) 領域成長による要素抽出

要素の核となる格子点の集合は白い要素に対応する白格子点と黒い要素に対応する黒格子点の2種類があり、この段階ではまだどちらを要素として選べばよいかを決定する根拠がない。したがって、2種類の要素をそれぞれ別々に抽出し、その後どちらを要素とするかを判定する。この場合、要素ではないと判定された方は、背景であるとみなす。また、要素同士の

隣接している場合にも、安定に要素抽出が行えるために、各格子点から並列的に領域成長させて要素を抽出する。ある領域の成長が止まる条件は、許された濃度範囲(白格子点の場合は濃度 $\geq$ 閾値、黒格子点の場合は濃度 $\leq$ 閾値)を超えた濃度の画素、あるいは並列的に成長している他の領域に囲まれたときである。

このようにして各格子点を並列的に成長させて求めた領域を、重心をそろえてすべて重ね合わせ、確率 $1/2$ 以上で重なった領域(部分)を要素とする。図9に、画像D3に対して求められた白と黒の要素を示す。

(4) 要素の決定

領域成長によって求められた2つの要素のうち、どちらを最終的な要素として選ぶかを最後に決定する。このためには、「人間は濃度の一樣な領域に境界線を引くことは難しい」という事実を利用すればよい。図10のテクスチュアの場合、黒い要素としては正方形の領域が抽出され、白い要素としては斜線を引いた十字の領域が抽出される。白い要素が十字の形をとるのは、各格子点から並

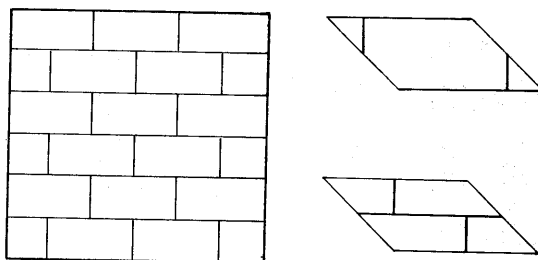


図7 レンガ模様とセル

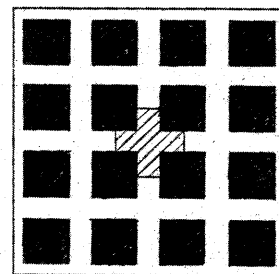


図10 要素と背景

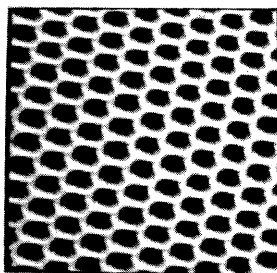
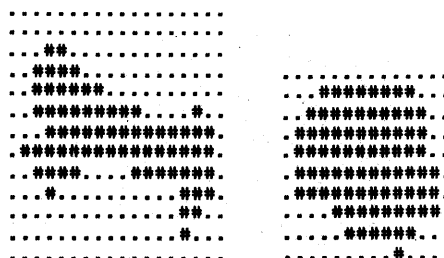


図8 D3の復元画像



(a) 白い要素 (b) 黒い要素

図9 抽出された要素

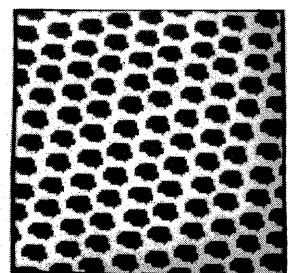
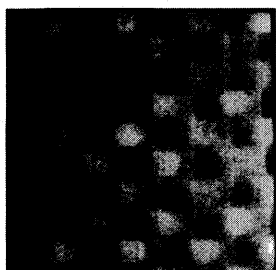
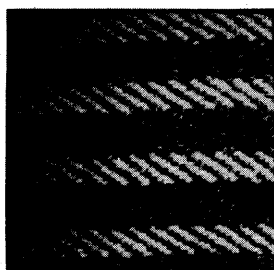


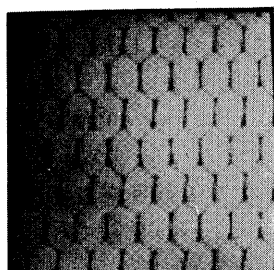
図11 構造記述に基づく
D3の合成画



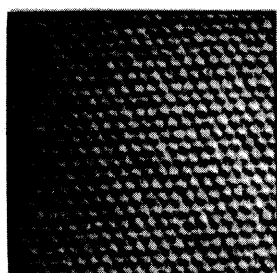
(a) D 8



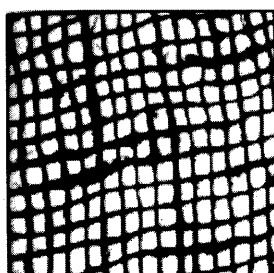
(b) D 11



(c) D 34

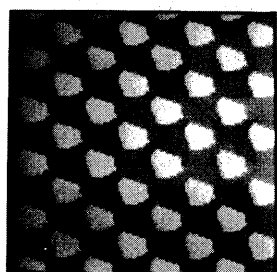


(d) D 77

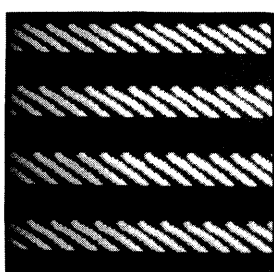


(e) D 103

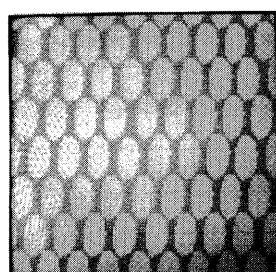
図12 実験に使用した
テラスチュア



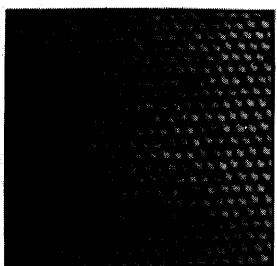
(a) D 8



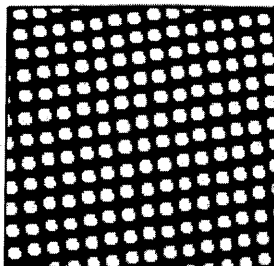
(b) D 11



(c) D 34



(d) D 77



(e) D 103

図13 実験結果
(構造記述に基づく合成画)

列的に領域成長させたため、隣の領域とぶつかったところで境界線が引かれている。黒い要素はそれぞれの領域が独立しているため、一つのまとまった要素として知覚できるが、白い要素の場合は、隣の領域と接しているため、要素として十字の形を知覚することは困難である。これは上記の人間の知覚的特性によるもので、白い領域が隣接しているため、そこに境界線を見い出すことが難しいからである。

以上のことから、白と黒の格子点を成長させて得られた領域の平均隣接領域数をそれぞれ求め、その値の小さい方を最終的な要素であると決定し、もう一方を背景とみなすようにすればよい。図10では、このような考えから、黒い領域が要素で、白い領域が背景となる。画像D3の場合、平均隣接領域数を計算すると、白い要素に対して4.0、黒い要素に対して0.0となる。よって黒い要素が最終的な要素であり、白い要素は背景であると決定する。

以上の解析によって、配列規則と要素が求められたので、テクスチャの構造記述が得られたことになる。図11は求められた要素を配列規則に従って並べた合成画である。

5. 考察

図12の5枚の画像に対して本手法を用いて解析を行った結果を図13に示す。雑音やコントラストの悪さ、シェーディング、配列規則のゆらぎなどを持つ画像に対して本手法が有効であることがわかる。

次に、本手法の適応性と問題点について考える。

(1) 階層的テクスチャと多要素テクスチャの問題

階層的テクスチャとは、図14に示すように一つの要素がさらに小さな要素の配列によって表わされるテクスチャであり、本手法によれば、たとえば図14の場合、その配列規則のうち、一番大きな構造が選ばれるであろう。よって次の段階としてさらに細かい構造をいかに検出するかは今後の課題である。

また、図15に多要素テクスチャの例を示す。本手法では、テクスチャを図と背景に分けたが、このようなテクスチャは図と背景という概念では解析できない例であり、要素抽出の段階で考えなければならぬ問題である。

(2) 離散的フーリエ変換の問題

フーリエ変換が離散的であるために、スペクトル空間上のベクトルの成分 u, v はすべて整数値をとる。しかし、原画像におけるテクスチャの繰り返し周期は、一般に、その成分が実数値であるような空間周波数によって表わされるので、われわれが求めたベクトルの位置は近似的なものとなっている。この影響は人工的に作られたテクスチャの場合に問題となる。たとえば、図16は、もしフーリエ空間が連続であれば $(0, 8)$ 、 $(4, 1.5)$ というベクトル対が選ばれるべきであるが、

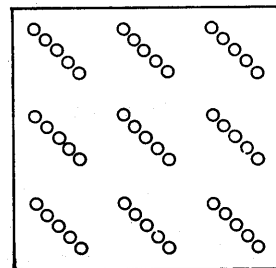


図14 階層的テクスチャ

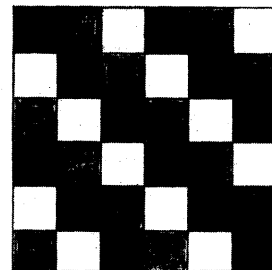


図15 多要素テクスチャ

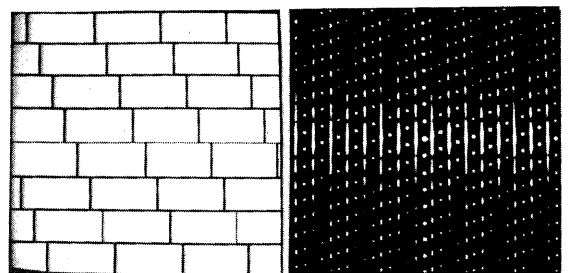


図16 レンガ模様とそのパワースペクトル

(4, 1.5) という座標はないので、この場合その2倍波にあたる(8, 3)が誤まって検出される。このような画像のスペクトルは図16からもわかるように、テクスチャの周期性に対するエネルギーがスペクトル空間に分散している。

しかし、自然のテクスチャの場合、各種の歪み、画質の悪さ、雑音などの影響により、スペクトルのピーク自体がぼけて来るので、上記の誤差はそれほど大きな問題とはならない。

6. むすび

フーリエ変換を用いてテクスチャの構造解析をトップダウン的に行う方法を提案し、各種の歪みや雑音のある自然のテクスチャに対して有効であることを示した。また、人間にとって自然であるという立場から、要素の選択の一つの方法を示した。階層的テクスチャや多要素テクスチャに対して本手法がどのように適用できるかはこれからの研究課題である。

参考文献

- [1] 富田, 白井, 辻: 構造解析によるテクスチャの分類, 信学論, Vol. J61-D, No. 7, pp. 457-464, 1978.
- [2] Matsuyama, T., Saburi, K. and Nagao, M.: A Structural Description of Regularly Arranged Textures, Proc. of 5th ICPR, 1980, pp. 1115-1118.
- [3] 富田: 一般テクスチャの適応的解析, コンピュータビジョン8-4, 1980, pp. 1-8.
- [4] Connors, R. W.: Towards a set of statistical features which measure visually perceivable qualities of Textures, PRIP, 1979, pp. 382-390.
- [5] Zucker, S. W.: Finding Structure in Co-Occurrence Matrices for Texture Analysis, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 12, 1980, pp. 286-308.
- [6] Brodatz, P.: Textures, Dover, 1966.
- [7] ゴールド, B., リッター, C. M. (石田晴久訳): 電子計算機による信号処理 (共立出版), 昭和47年, 第7章, pp. 246.
- [8] Nagao, M. and Matsuyama, T.: Edge Preserving Smoothing, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 9, 1979, pp. 394-407.
- [9] Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, 1979, pp. 62-66.