北海道大学工学部研究報告
第167号（平成6年）

Bulletin of the Faculty of Engineering
Hokkaido University, No. 167 (1994)

自然風景画像中のテクスチャを分類するための特徴抽出法

林　　世紀[1)]　　田中　　譲[2)]

（平成5年8月31日受理）

A feature extraction method for classifying textures in natural scenes

Toshinori HAYASHI, Yuzuru TANAKA

(Received August 31, 1993)

Abstract

The difference of lighting condition and imaging process often makes a variety of images from the same object. We need a feature that can indicate types of objects rather than types of images. In texture analysis, fractal dimension was used to extract features from images in natural scenes. But none of them succeed in classifying images according to types of object such as woods, grass, and so on. In this paper, we propose new image feature called granularity dimension that is invariant to scaling and contrast change. We also develop an algorithm to extract this feature from images.

1．はじめに

画像中のある領域に写っている被写体の種類を人手を介さずに知りたいという要求がある。そのためには，各画像領域に写っている被写体の種類を同定できるような特徴量を定義し，その計算方法を明かにする必要がある。ここでは，自然風景画像のような一見無秩序に見える画像から，被写体の種類を特定できるような画像特徴量を得る方法について考えてみる。

同一の風景を撮った写真を考えた場合でも，撮影時刻が異なれば照明条件も異なり，得られる画像は一定しないのが普通である。また，例え同じ時刻に写した写真であったとしても，画像化の過程が異なれば，得られる画像も違ってくる。そのため，被写体の種類を特定するための画像特徴量は，異なる被写体の種類に対し値が違うというだけではなく，照明条件や画像化の過程の違いの影響を受けにくい必要がある。特に，ズームやコントラスト変化といった，頻繁に起きる画像変化に対する不変性が強く望まれる。

本論文では，自然風景を写した白黒濃淡画像から被写体の種類を特定する画像特徴量について述べる。そのために，粒度次元と呼ばれる新たな画像特徴量を導入する。現在までに，自然風景画像を対象とした種々の画像特徴量が提案されているが，その中にフラクタル理論に基づく特徴量がある。粒度次元もフラクタル理論に基づいた特徴量である。2章では，従来からテクスチャ

1）大型計算機センター研究開発部
2）電気工学科　応用制御工学講座

解析の分野で使われてきているフラクタル次元を用いた画像特徴量について解説する。さらに，その特徴量の性質について，実験と理論を通して考察を加える。３章では，その考察を基に新たな特徴量である粒度次元を考案する。４章では，粒度次元を森と草地という２種類の自然風景画像について計算し，その結果を示す。

2．テクスチャ解析におけるフラクタル次元

フラクタル次元を用いて画像の特徴を捉えようとした従来の研究について解説する。フラクタル次元について説明した後に，それを画像に適用した輝度フラクタル次元について述べる。

2.1　フラクタル次元

Mandelbrot は，定規を当てながらイギリスの海岸腺の長さを計った場合，その定規の長さにより，海岸線の長さも変化することに着目した。これは，定規を短くすればするほど，細かな凹凸が海岸線を長くする傾向があるためである。地図に描かれた海岸線の長さは以下のようにして測定することができる。地図に間隔 e の格子を描き，海岸線が横切っている升目を全て選び，その数 A(e) を数える。選ばれた升目は海岸線に沿った幅2e の帯状に分布することになるので，海岸線の長さは L(e)＝A(e)/2e とみなすことができる。Mandelbrot は，多くの海岸線の長さを上記の方法で測定することにより，海岸腺の長さ L(e) と升目の間隔 e は，ある定数 D に対して次の関係を満たすことを示した。

$$L(e) = Fe^{1-D}$$

ここで，D はフラクタル次元と呼ばれ，升目の間隔 e に依存せずに，海岸線を特徴付ける量になる。通常のユークリッド幾何に現れる図形では，フラクタル次元はユークリッド次元に等しくなるが，一般にはユークリッド次元以上の値となる。海岸線は曲線であり，ユークリッド次元が１の図形であったが，フラクタル次元はより高次の図形に対しても同様に定義することができる。フラクタル次元がユークリッド次元より大きい図形は，フラクタルと呼ばれる。

2.2　輝度次元とその計算方法

現在までに，自然界には多くのフラクタルが存在することが知られるようになってきている。画像の分野でもフラクタル次元を用いて，画像の特徴を捉えようとする研究が行われてきた[1),2),3)]。それらの研究では，画像データから輝度曲面と呼ばれる３次元空間中の曲面を構成し，その曲面のフラクタル次元を画像特徴量としていた。ここでは，そのような画像特徴量を輝度次元と呼ぶことにする。なお，輝度次元が３章で提案する新たな画像特徴量と異なる点は，用いる曲面が輝度曲面と違う点だけである。

輝度曲面は次のようにして画像から構成することができる（図１参照)。画素平面の縦横軸を，それぞれ３次元空間の X，Y 軸に重ねて置き，各画素の上の輝度値分だけ離れた場所に画素の広さの平面を置く。これらの平面を繋ぎ合わせて得られる曲面が輝度曲面である。輝度曲面を描く際，XYZ 各軸の縮尺の決め方に関して，自由度が残っている。画素間隔を XY 軸の１単位に，輝度 c を Z 軸の１単位にしたときに得られる曲面を，c-輝度曲面と言うことにする。

輝度曲面のフラクタル次元は次のようにして計算することができる。輝度曲面の両表面に厚さ e の被覆を被せ，その被覆の体積 V を計算する。被覆の被せ方には数通り考えられているが，ここでは，１画素分の表面に１個，図２のような辺の長さ e の立方体を用意して表面を覆うことに

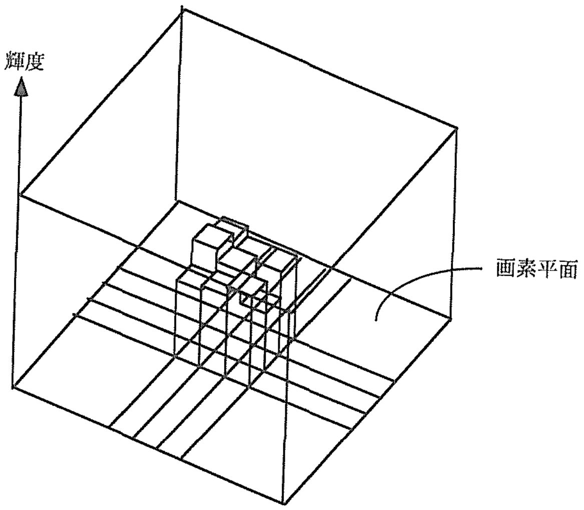

図 1　輝度曲面

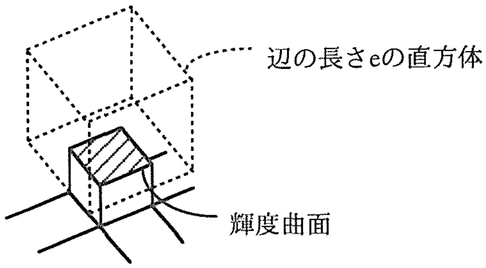

図 2　フラクタル次元の求め方

する。被覆の厚さは2e になるので，S＝V/2e が曲面の表面積と考えられる。もし，曲面がフラクタルなら被覆の厚さ e を薄くしていくとしだいに，表面積は増加するので，その増え方から曲面のフラクタル次元を計算することができる。海岸線のときと同じように，フラクタルはある定数 F と D に対し，次の等式を満たす。

$S = Fe^{2-D}$

S＝V/2e であるために，次式が得られる。

$\log V = (3-D)\log e + \log 2F$

この式から明らかなように，V と e を両対数グラフ上にプロットしたときの傾きが g ならば，3-g がフラクタル次元 D である。対象とする図形が完全なフラクタルの場合，このグラフは直線になるが，そうでない場合は必ずしも直線になるとは限らない。このグラフの形はフラクタルシグネチャと呼ばれている。

2.3　輝度次元を用いた画像特徴量

輝度平面をフラクタルとみなして画像特徴量を計算する研究が幾つか行われてきている。

文献[1]では，フラクタルの一種であるフラクタルブラウン関数で表される図形について，その図

形自体のフラクタル次元は,図形を写した画像の∞-輝度次元(に等しくなることが示されている。さらに,画像の∞-輝度次元を用いることにより自然風景画像などの画像の領域分割に成功している。

文献[2]では,Brodatz テクスチャや航空写真などの領域分割について,0-輝度次元を用いた場合が述べられている。そこでは,フラクタルシグネチャを描く際に,eが1,2,3,5の範囲だけでフラクタル次元を計算しており,0-輝度次元は微視的な視点から得られる画像特徴量であるとしている。また,さらに良い領域分割を行うためには,テクスチャの繰り返しや配置に関する特徴量が必要であることが指摘されている。

文献[3]では,1-輝度曲面のフラクタルシグネチャが直線でないことが観察されるため,替わりに,シグネチャ自体を用いて Brodatz テクスチャの分類を行っている。そこでは,シグネチャの傾きを48箇所で計算し,それらの差の自乗和により12個の Brodatz テクスチャの間で類似性を判定している。

文献[2]と[3]では,輝度曲面のフラクタルシグネチャが直線にならないために,シグネチャが得られた後の特徴量抽出法に工夫を凝らすことにより,領域分割やテクスチャの分類を行っていた。また,そこでは,得られた特徴量により画像の領域分割や分類を行ってはいるが,自然画像中の被写体の種類で画像を分類できるという報告は行われていない。

本稿では,上記の論文中でも認識されていた輝度曲面のフラクタルシグネチャの直線性の悪さについてさらに考察を加え,その後に新たな画像特徴量を導出する。

2.3　輝度曲面のフラクタルシグネチャの直線性

文献[3]において指摘されている,輝度曲面のフラクタルシグネチャが直線になっていないという観察結果を,自然風景画像を例にしてさらに詳細に確かめることにする。文献[3]では1つのcの値に対するc-輝度次元,すなわち1-輝度次元のみを計算しているが,ここではcを変えた場合の直線性の変化のようすも示すことにする。

種々のcの値についてのc-輝度曲面のフラクタルシグネチャの例を示す(図3参照)。c=100の場合,グラフの直線性が損なわれてきていることが観察される。この結果から,∞-輝度曲面は限られた範囲でしかフラクタルと言うことはできず,輝度次元の画像特徴量としての能力も限られていると考えられる。また,cを0に近付けていくと直線性が良くなっていることが観察される。

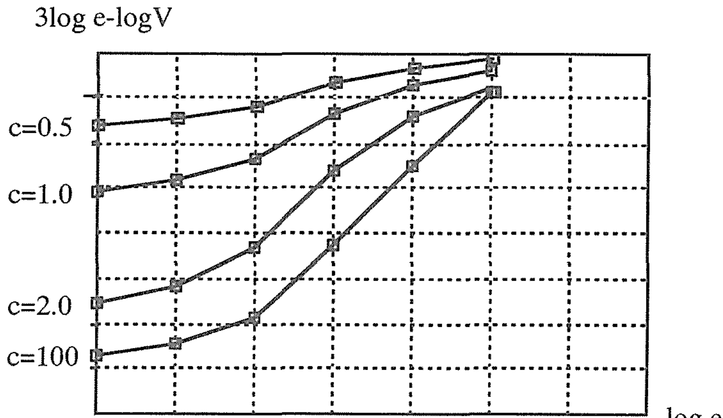

図3　c-輝度曲面のフラクタルシグネチャ

この場合フラクタルと見なせるようにはなるが，被写体特徴量として用いるには，0-輝度次元はやはり不向きである。その理由は，0-輝度次元が画像コントラストの影響を受け易いという点にあるが，ここでは詳細は省略する。

3．粒度次元

2章では，輝度曲面を用いた場合の欠点について述べた。そこで，ここでは輝度曲面の替わりに別な曲面を使うことにより，粒度次元と呼ばれる新たな画像特徴量を定義することにする。

3.1　粒度次元の定義

粒度次元を定義するために導入される曲面は，以下に説明する粒度を用いて定義される。粒度の基本的なアイデアは，画像中に粒子状の物体が写っている場合に，その粒子の直径を利用する点にある。図4に示したように，粒子の中心部分では粒子の直径になり，へりにずれた部分ではそのずれた距離だけ小さくなるような量を考えることができる。粒度は，各画素に対しこのような量になることを意図したもので，以下のように定義される。

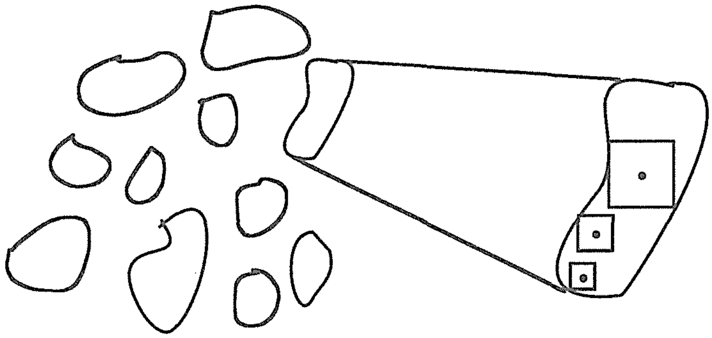

図4　粒度の基本的なアイデア

粒度の定義：　各画素に対して，その画素を中心とする正方形を考える。正方形内の領域の輝度の最大最小値の差が，ある閾値h以下になるようなものに着目する。それらの正方形の中で最も大きい正方形の辺の長さを，その画素におけるh-粒度と言う。

新たな曲面，h-粒度曲面と粒度曲面の違いは，輝度の替わりに今定義したh-粒度を用いている点だけである。すなわち，h-粒度曲面は以下のようにして構成される。画素平面の縦横軸を，それぞれ3次元空間中のX，Y軸に重ねて置き，各画素の上の粒度の分だけ離れた場所に画素の広さの平面を置く。これらの平面を繋ぎ合わせて得られる曲面が，h-粒度曲面である。h-粒度曲面を描くときは，XYZ軸とも画素間隔を1単位とすることにする。

粒度曲面は次の性質を満たしている。

・被写体を拡大しても粒度次元は変化しない。

なぜなら，被写体をs倍にした場合，各画素の粒度もs倍になり，h-粒度曲面は全ての方向にs倍されることになる。フラクタルシグネチャはlog sだけずれるが，その傾きは不変である。よって，フラクタル次元も不変である。

この性質から，画像をズームしても輝度次元は変化しないことが期待できる。ズームは，画像化過程の違いによる画像変化の代表的な例であり，そのような変化に対し不変な特徴量は被写体の特徴を良く表すことが期待できる。

3.2　粒度次元の計算アルゴリズム

粒度次元を求めるには，各点の粒度を計算して粒度曲面を構成した後に，その曲面のフラクタル次元を求める必要がある。フラクタル次元の求め方は輝度次元の場合と同様なので，ここでは，粒度を求めるアルゴリズムについて述べる。

h-粒度を求める最も簡単な方法は，正方形の辺の長さを1から順に増やしながら，正方形内の輝度値の最大最小値を計算し，その差がhを越えるまでループを回すという方法である。この場合，求まる粒度をgとして，gの3乗オーダの計算量になる。ここでは，さらに高速にh-粒度を計算するアルゴリズムを示す。先ず，全ての画素に対し，その画素を左上隅にし，辺の長さが2のべき乗になる全ての正方形について，その正方形内の最大および最小の輝度値を計算しておく。(i,j)を左上隅とし，辺の長さ2^kの正方形を考える。その正方形内の最大輝度値を$u_k(i,j)$により，最小輝度値を$l_k(i,j)$により表すことにする。$k=1$の時は正方形内の4点の輝度値から直接最大最小輝度値を計算できる。$k \geqq 2$の場合は，k-1のときの4点に関する計算結果から求めることができる。すなわち，$u_k(i,j)$と$u_k(i,j+2^{k-1})$，$u_k(i+2^{k-1},j)$，$u_k(i+2^{k-1},j+2_k{}^{-1})$の4つの値の最大値が$u_k(i,j)$に，$l_k(i,j)$と$l_k(i,j+2^{k-1})$，$l_k(i+2^{k-1},j)$，$l_k(i+2^{k-1},j+2^{k-1})$の4つの値の最小値が$l_k(i,j)$になる。全画素数をnとした場合，辺の長さが$\sqrt{n}$より大きい正方形を考えても意味が無い。そのため，$2^k$が$\sqrt{n}$以下になるkについて最大最小輝度値を求めることを考える。先ず前処理として，辺の長さが$\sqrt{n}$下の2のべき乗数になる全ての正方形に対して上記の値を計算し，配列内に記憶しておくことにする。この場合，配列は$2n \log n$の大きさが必要であり，計算時間は$O(n \log \sqrt{n})=O(n \log n)$になる。辺の長さkが2のべき乗でない場合の最大最小輝度値は，この配列内の4つの値を用いて計算することができる（図5参照）。各画素のh-粒度を計算するには，ここまで述べた最大最小輝度値の計算方法の他に，正方形の辺の長さkに関する二分探索法も用いる。二分探索の各ステップでは，最大最小輝度値の差$u_k(i,j)-l_k(i,j)$と，hとの間で大小判定を行う。全画素についてこの計算を行うには，$n \log \log n$時間が必要であり，結局前処理に必要な計算時間の方が大きいことになる。したがって，全体の計算量は$O(n \log n)$時間となる。粒度曲面からフラクタル次元を求める計算も含めて考えた場合も同じオーダであり，計算量は輝度次元の場合と変わらないオーダであることが分かる。

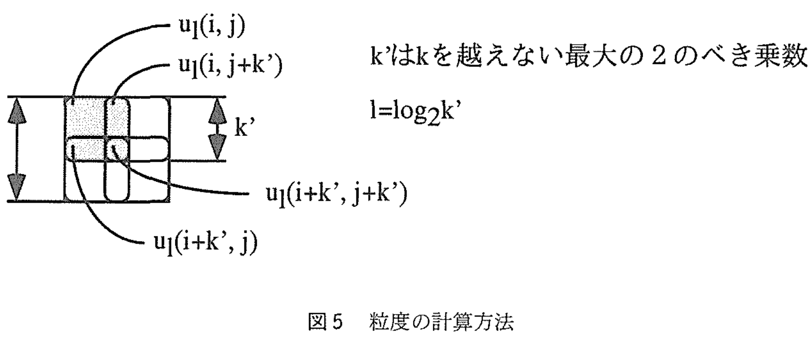

図5　粒度の計算方法

3.3　標準粒度次元

粒度次元を画像特徴量として用いるときに最初に決めなければいけないのは，粒度を計算する際の閾値hの大きさである。閾値を大きくし過ぎると粒子を捉えることができなくなり，逆に小さくし過ぎると粒子とは関係のないノイズを拾うことになってしまう。これを防ぐには，画像全

体の輝度分布を調べてから，閾値 h を決めれば良いと考えられる。ここでは，輝度分布から標準偏差 s を計算し，その s を閾値にすることにする。以下，s-粒度次元を標準粒度次元と呼ぶことにする。輝度分布の標準偏差を用いたことにより，画像のコントラスト変化に対し標準粒度次元は不変になることが予想される。画像コントラストは画像化の過程や照明条件の違いにより容易に変化するが，標準粒度次元を用いればそのような画像変化の影響を受けずに被写体自体の特徴を捉えることができると考えられる。

4．粒度次元による分類実験

シグネチャの直線性

本章では，3章で導入した標準粒度次元の分布を，森と草地を写した画像で調べてみる。画像は64×64画素，256階調の白黒画像を用いた。草地と森を写した画像をそれぞれ12枚用意し，標準粒度次元を計算した。結果を表1に示す。2.072を境に草地はそれ以上の次元に，森はそれ以下の次元になっているのが分かる。

表1　森と草地を写した画像の標準粒度次元の分布

森	2.044	2.056	2.057	2.058	2.062	2.063	2.067	2.068	2.069	2.070	2.070	2.072
草地	2.072	2.073	2.075	2.081	2.082	2.083	2.086	2.087	2.088	2.089	2.090	2.097

5．おわりに

本稿では，被写体の特徴を表す画像特徴量として，粒度次元を提案した。粒度次元は画像のズームに対する不変量であり，また，コントラスト変化の影響も受けにくいと考えられる。簡単な実験により，被写体が森と草地の場合とでは粒度次元の値に差が生じることも確かめられた。粒度次元の計算時間は，従来から使われてきた輝度平面のフラクタル次元を求める方法と同じく，画素数を n として，n log n オーダである。

今後の課題としては，粒度次元が持つ特徴であるズームに対する不変性やコントラスト変化に対する安定性を，実際の画像を用いて確認することや，森や草地以外の被写体に対する特徴抽出性能を評価することなどが考えられる。

参考文献

1）A. P. Pentland, "Fractal-Based Description of Natural Scenes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 6, pp. 661-674, November 1984.

2）G. G. Medioni, Y. Yasumoto, "A Note on using the fractal dimension for segmentation", IEEEProceedings of the Workshop on Computer Vision : Representation and Control, pp. 25-30, 1984.

3）S. Peleg, J. Naor, R. Hartley, D. Avnir, "Multiple resolution texture analysis and classification", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 4, pp. 518-523, July 1984.