フラクタルを応用した印刷濃度むらの 定量評価法の研究

Study on Quantitative Evaluation of Print Density Uniformity Using Fractal Dimension

技術本部山下博*1中元 淳*1

印刷障害の"ざらつき感"等の濃度むらは、人間によって官能評価される。このため個人差、体調等により評価結果はばらつ きが大きく、定量的評価基準が存在しなかった。本研究では、官能評価の定量化に対象の複雑さを表す指標であるフラクタル次 元の適用を試みた。"ざらつき感"に適用した結果、目視評価と傾向が一致する出力値を得た。さらに、"見え方"の感度であ る視覚特性 MTF (Modulation Transfer Function:濃淡の空間周波数に対する眼の変調特性)を考慮した修正局所フラクタル 次元を独自に定義することにより、"ざらつき感"の差をより強調された形で示すことが可能となり、定量化への指針が得られ た。

As print density uniformity is evaluated by human beings, evaluation results vary by person and phisical condition and so on. Thus it is very difficult to evaluate quantitatively. Fractal dimension is applied to evaluate print density uniformity quantitatively and we can get the same tendency with human evaluation. We defined modified local fractal dimension which considers the human vision system MTF (Modulation Transfer Function) and can emphasis the difference of print density uniformity.

1. まえがき

当社では、枚葉印刷機械や電子写真印刷機械を初めとする印刷 機械の開発、製品化に取組んでいる。印刷物の良否や美しさは人 間によって評価される。これらは官能評価と呼ばれ、個人差、体 調、照明条件等により評価結果はばらつくことが多く、定量的評 価は困難であった。その代表例が印刷障害の一つである"ざらつ き感"で、本来濃度一定であるべき部分の濃度むらをいう。

近年,自然物体の形状や自然現象をうまく記述できる"フラク タル"という概念が注目されている.これは,B.B.Mandelbrot による造語であり,狭い意味で自己相似性を有する図形のことを いう.自己相似性とは、ある図形の部分が全体とどの程度似てい るかを表したもので,"複雑さ"と言換えることもできる.この "複雑さ"を表すものとしてフラクタル次元が定義される.この フラクタル次元を用いることにより,従来定量評価が困難であっ たものへの適用が試みられている⁽¹⁾.本研究では、フラクタル次元 を導入することにより"ざらつき感"を定量的に評価することを 試みる.

2. フラクタル次元

フラクタル次元とは、図形の自己相似性または複雑さを表す数 値で、一般に非整数値である。その値が大きくなるほど図形は複 雑であるといえる。例えば、線図形のフラクタル次元⁽²⁾は1.0以 上、2.0 未満の値を取る。これは直線の次元が1で、平面の次元が 2 であることから、その中間の値を取るものと理解できる。同様 に濃淡画像のフラクタル次元は2.0以上、3.0 未満の値を取る。濃 淡画像は(x, y)で表される場所における輝度情報 I で表される ため、立体の次元3 未満の値となる。

濃淡画像のフラクタル次元の算出法は BOXCOUNT 法と呼ばれる⁽³⁾⁽⁴⁾.

これは、画像輝度面の複雑さの指標としてフラクタル次元を計

算するものである.まず,画素間隔が $r \times r$ (画素)の領域を単位 領域として考える.図1のように,単位領域の画像輝度面を被覆 する一辺の画素間隔がrの立方体の個数n(r)を

$$n(r) = \text{floor}\left(\frac{\max I_i - \min I_i}{r}\right) + 1 \qquad i = 1, 2, 3, 4 \tag{1}$$

とする. ここで, *I* は 4 隅での輝度であり, max, min はそれぞれ 最大, 最小を表し, floor は整数化(切捨て)とする.

次に、フラクタル次元を求める領域(面積 S, ここでは画像全体) 内のすべての単位領域でn(r)を求め、その平均値がn(r)である ときN(r)を次式で定める.

$$N(r) = \overline{n(r)} \frac{S}{r^2}$$
(2)

スケールrを変化させて各rにおけるN(r)を求め, 〔logr, logN(r)〕をプロットしたその回帰直線の傾きの絶対値がフラク





タル次元となる.ただし,底は自然対数 e とする. log-log プロットの一例を図2に示す.

"ざらつき"の印刷サンプル画像を図3に示す.これらは512× 480 画素,256 階調であり,実視野は70×65 mm である.サンプ ル画像 A が最も"ざらつき"が少なく,B,C,Dの順に"ざらつ き"が多くなり印刷品質が良くないと言える(注:印刷の都合上, 画像を強調してある.実際には非常に微妙な違いしかない).

分析スケールrを1~32と変化させ、各画像のフラクタル次元 を計算した。その結果は、サンプル画像A,B,C,Dの順に、

2.4576 < 2.4997 < 2.5255 < 2.5798

となり、目視評価と一致する出力を得た.

従来用いられていた輝度の標準偏差を計算すると,

3.03 < 3.72 < 4.01 < 4.60

となり,これも目視評価と一致している.しかし,輝度の標準偏 差が3.03のときどれくらい画像が複雑であるかをイメージするの は困難であり,数値と"複雑さ"が結びつきにくい.これに対し てフラクタル次元は2.0以上,3.0未満の値を取るため,どれくら い複雑かが直接イメージできるという利点がある.また,標準偏 差は輝度の生起確率によってのみ決まり,どのように分布してい るかを反映していない.これに対して,フラクタル次元は輝度表 面の複雑さを求めたものであるため,分布状態を反映しており, 本当の意味での"複雑さ"を表しているといえる.以上の理由か ら,フラクタル次元の方が"ざらつき感"の評価に適していると いうことができる.

3. 局所フラクタル次元

前章で求めたフラクタル次元はスカラ量であり、これは画像上 に自己相似性を仮定した上で計算されたものである。具体的には、 log-log プロットですべての点が一直線上に乗ることを前提として いる。ところが、実際の画像においては自己相似性を完全に満足 するものは少なく、すべての点が一直線上に乗ることはまれであ る。そこで局所フラクタル次元⁽³⁾を導入する。これは画像全体に自 己相似性を仮定するのではなく、計測スケールrの近傍では局所 的に自己相似性を満足しているとするものである。これによりフ ラクタル次元は計測スケールrの関数となり、スケールrに対す る局所フラクタル次元が定義される。具体的には log-log プロット において、



(c) サンプル画像 C

(d) サンプル画像 D

図3 サンプル画像 "ざらつき感"の印刷サンプルを画像入力したもの. Sample images of "zaratsuki"

 $(\log(r-1), \log N(r-1))$ $(\log r, \log N(r))$ $(\log(r+1), \log N(r+1))$

の隣接3点に対する回帰直線の傾きの絶対値で表される.

このようにして各スケールrに対する局所フラクタル次元を各 各計算し,並べることにより一種のベクトルとみなすことができ る.この局所フラクタル次元をその画像のフラクタル的性質を表 すものとして用いれば、単なるスカラ量であるフラクタル次元よ りも強力な解析ツールになると考えられる.

図3に示した画像の局所フラクタル次元を求める.フラクタル 次元を求めるスケールrは、1~32とする.局所フラクタル次元は 隣接3点の回帰直線の傾きの絶対値であるため、計算可能な局所 フラクタル次元は、スケールrが2~31のときである.計算結果 を図4に示す.

スケールrが2~7の範囲では、局所フラクタル次元に大きな 差は見られないが、スケールrがそれ以上になると差がでてく る.サンプル画像Aはr=7以降減衰し始め、次第に2.0に収束 する.同様にサンプル画像Bはr=9、サンプル画像Dはr=12以 降減衰し始め、2.0に収束する.

減衰を開始するスケール r が小さいということは、その画像が それほど複雑ではないということを意味している.これは、もし 完全に濃度一定のサンプルがあれば、その画像の局所フラクタル 次元はすべてのスケール r に対して 2.0 となることから容易に推 測できる.このことから、局所フラクタル次元を見る限り、サン プル画像 A, B, C, D の順に複雑であるということができる.こ れは目視評価結果と一致する.

局所フラクタル次元を導入することによって、"小さいスケー ル r で局所フラクタル次元が減少し始め、早く2.0に収束した画 像の方が単純である"ということができる.フラクタル次元をス ケール r の関数とすることにより、より強力なツールとすること ができた.



Local fractal dimension of sample images

4. 修正局所フラクタル次元

局所フラクタル次元は、スケールrの関数としてのフラクタル 次元である.すなわち、スケールrで画像を眺めたとき、どれく らい複雑かどうかを表している.例えばr=2に対する局所フラク タル次元は定義できるが、我々人間が果たしてそのスケールで画 像を眺めることができるかどうかは別問題である.この問題は、 視覚の空間周波数特性 MTF (Modulation Transfer Function) と関連付けることによって解決される.そこで、視覚特性 MTF を 考慮した局所フラクタル次元 (修正局所フラクタル次元と呼ぶ) を導入する.

4.1 視覚特性 MTF

図5に視覚の空間周波数特性 MTF を示す⁽⁵⁾

横軸は空間周波数(CPD: cycle/degree) であり、縦軸は相対



コントラスト感度である。空間周波数が3 CPD のときの相対コン トラスト感度とは,視野角1°の範囲に正弦波状の濃淡パターンが 3 周期分含まれる画像に対する感度を表している。同図を見ると, 3 CPD のときにピークを持つ帯域通過型のフィルタ特性を示して いる。

4.2 修正局所フラクタル次元

視覚特性 MTF を考慮した局所フラクタル次元を修正局所フラ クタル次元として新たに定義する.その場合,空間周波数(CPD) と局所フラクタル次元を求めるスケール r を対応付ける必要があ る.空間周波数は視野角で表現されているため,実際の視野 W は 目と対象物体間の距離 L によって定まる〔図 5 (b)参照〕.通常, 印刷サンプルを観察する場合の距離 L は 500 mm 程度である.視 野角 1°としたときの視野 W は約 8.728 mm である.他方,サン プル画像は,70×65 mm の視野範囲を 512×480 画素でサンプリン グ, A/D 変換したものである.これから1 画素の大きさは,約 0.137 mm となる.

スケールrにおける局所フラクタル次元とは,r×r(画素)の 大きさ(分解能)で画像を見たときの複雑さを表している.これ はr×r(画素)を1周期とみなして画像を分析していることと等 価とみなせる.これらの知見に基づいて空間周波数とスケールrを 次の例のように対応付ける.

例:スケール r=16 (画素) の場合.

16 画素の実際の大きさは次式で表される.

<u>70 mm(画像の横サイズ)×16(スケールの画素数)</u> 512(画像の横画素数)=2.188 mm

視野角 1°としたときの視野 W は約 8.728 mm であるから, 視野 W の中にスケールr=16 は次式で示されるように 4 個入ることに なる.

8.728/2.188≒4.0

視野角1°の中に4周期なので、4 CPD に相当する.

以上から, r=16の場合は空間周波数4 CPD に対応する.

このようにしてスケール r と空間周波数は関連付けることがで きる. 図5から空間周波数と相対コントラスト感度の関係を読取 れば, スケール r と相対コントラスト感度を対応付けることがで きる.

スケールr, 空間周波数及び相対コントラスト感度を対応付けた ものを表1に示す.スケールrと相対コントラスト感度の関係を 図6に示す.

スケールrのときの相対コントラスト感度を局所フラクタル次 元のゲインとして用いれば、人の視覚特性を考慮した局所フラク タル次元を定義することができる。局所フラクタル次元が2.0の ときが最も単純な画像(平面)であるという次元としての意味合 いを残すため、次式にて修正局所フラクタル次元を定義する。

修正局所フラクタル次元=(局所フラクタル次元-2.0) ×相対コントラスト感度+2.0 (3)

図4の局所フラクタル次元を式(3)に代入して修正局所フラクタ ル次元を計算した.結果を図7に示す.

同図を見るとサンプル画像 D が最も大きな値を取っており,最 も複雑であるといえる.また、サンプル画像 C, B, A の順に小さ な値を取るようになっており、目視評価結果と一致している.ま た、図 4 の局所フラクタル次元において差がほとんどなかったス ケール $r=1 \sim 7$ の区間では、感度が低いために差が強調されるこ となくほとんど同じような値を取っている.これに対して、スケ ール $r=7 \sim 25$ の区間では感度が高いために差がより強調された

三菱重工技報 Vol. 33 No. 6 (1996-11)

表1 スケール r, 空間周波数及び相対コントラス ト感度の対応関係

Relationship between analyzing scale r, spatial frequency and contrast sensitivity

	·····		
スケール r (画素)	一辺の大きさ (mm)	空間周波数 (CPD)	相対コント ラスト感度
1	0.136719	63.8	0.01
2	0.273438	31.9	0.01
3	0.410156	21.3	0.014
4	0.546875	16	0.04
5	0.683594	12.8	0.08
6	0.820313	10.6	0.16
7	0.957031	9.1	0.26
8	1.09375	8	0.38
9	1.230469	7.1	0.49
10	1.367188	6.4	0.64
11	1.503906	5.8	0.74
12	1.640625	5.3	0.84
13	1.777344	4.9	0.91
14	1.914063	4.6	0.94
15	2.050781	· 4.3	0.97
16	2.1875	4	1
17	2.324219	3.8	0.99
18	2.460938	3.5	0.975
19	2.597656	3.4	0.97
20	2.734375	3.2	0.96
21	2.871094	3	0.95
22	3.007813	2.9	0.925
23	3.144531	2.8	0.9
24	3.28125	2.7	0.875
25	3.417969	2.6	0.85
26	3.554688	2.5	0.825
27	3.691406	2.4	0.8
28	3.828125	2.3	0.775
29	3.964844	2.2	0.75
30	4.101563	2.1	0.725
31	4.238281	2.1	0.725
32	4.375	2	0.7

形となっている.

人の視覚特性 MTF を考慮した修正局所フラクタル次元を独自 技術として導入することにより,画像間の複雑さがより強調され た形で示された. "ざらつき感"の定量化に修正局所フラクタル 次元は有効であるといえる.これまでのフラクタル画像解析では, 画像輝度面の複雑さとしてのフラクタル次元を計算していたに過 ぎず,人がどのように見えるかについては全く考慮していなかっ た. "ざらつき感"のように官能評価されるものについては,単 なる物理量であるフラクタル次元よりも人の視覚特性を考慮した 修正局所フラクタル次元を用いるほうが,より官能評価に近い結 果が得られると考えられる.

5. む す び

従来,定量的評価が困難であった官能評価の問題に対して,フ ラクタル次元を導入することにより目視評価と傾向的に一致する



出力を得た.また,画像解析能力を高めるために,これを局所化 した局所フラクタル次元を導入した.さらに,人の視覚特性 MTF を考慮した修正局所フラクタル次元を独自に定義し,局所フラク タル次元よりも更に"ざらつき感"の差が強調された形で示すこ とが可能となった.これにより,定量的評価への指針が得られた.

参考文献

- (1) マンデルブロ著,広中平祐監訳,フラクタル幾何学,日経サ イエンス社 (1985) p.1
- (2) 石村貞夫ほか、フラクタル数学、東京図書(1990) p.238
- (3)金子 博、フラクタル特徴とテクスチャ解析,電子情報学会 論文誌 D Vol.J 70-D No.5 (1987) p.964
- (4)中山 寛ほか、フラクタル次元と低次統計量を用いた気象衛 星画像のテクスチャ解析、コンピュータビジョン 44-4 (1986) p.1
- (5) 畑田豊彦, 濃淡画像と視覚特性, O plus E. No.60 (1984)p.90