

## ヒトの視覚特性を考慮したフラクタル次元による胸部 X 線画像の評価

遠藤 駿<sup>†</sup> 李 鎔範<sup>†</sup> 蔡 篤儀<sup>†</sup> 原 武史<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>新潟大学大学院保健学研究科 〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通 2 番町 746

<sup>‡</sup>岐阜大学大学院医学系研究科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

E-mail: <sup>†</sup> b12r101a@mail.cc.niigata-u.ac.jp, {lee, tsai}@clg.niigata-u.ac.jp, <sup>‡</sup> takeshi.hara@mac.com

あらまし

Modulation transfer function (MTF) や noise power spectrum (NPS) などを用いた X 線撮像系の客観的な評価は、receiver operating characteristic (ROC) 解析などを用いた主観的な評価と必ずしも一致しない。また、MTF や NPS を臨床画像から求めることはできない。そこで、われわれは、定量的な複雑さのほかにヒトの視覚の周波数特性を含む指標系として MTF フラクタル次元を医用 X 線撮像系に導入した。本研究では、淡い模擬腫瘍陰影を付加した胸部 X 線画像に対して MTF フラクタル次元の測定と観察者実験を実施した。その結果、二つの測定結果は同様の傾向を示した。これにより MTF フラクタル次元が医用 X 線画像の画質評価の一指標になり得る可能性が示唆されたものとする。

キーワード 医用画像, 画質評価, ヒトの視覚のコントラスト感度, 複雑さの評価

## Evaluation of chest X-ray images using fractal dimension including contrast sensitivity function of human eyes

Shun ENDO<sup>†</sup> Yongbum LEE<sup>†</sup> Du-Yih TSAI<sup>†</sup> and Takeshi HARA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Health Sciences, Niigata University, 2-746 Asahimachidori, Chuo-ku, Niigata, 951-8518 Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Medicine, Gifu University, 1-1 Yanado, Gifu-shi, Gifu, 501-1193 Japan

E-mail: <sup>†</sup> b12r101a@mail.cc.niigata-u.ac.jp, {lee, tsai}@clg.niigata-u.ac.jp, <sup>‡</sup> takeshi.hara@mac.com

### Abstract

Objective evaluation, e.g. using MTF or NPS, of X-ray imaging system may not correctly correspond to subject evaluation, e.g. using ROC. Moreover, it is difficult to measure MTF or NPS from clinical images. Therefore, we introduced MTF fractal dimension to X-ray imaging system. The MTF fractal dimension includes frequency properties of human eyes in addition to quantitative complexity. In this study, we conducted an observer performance study using chest X-ray images with subtle simulated nodules, and also measured MTF fractal dimension from the same images. The measurement results of MTF fractal dimension tended to be similar to the results of observer performance study. Therefore, we consider that MTF fractal dimension may become an index of image quality in medical X-ray imaging system.

**Keyword** medical imaging, image quality, contrast sensitivity of human eyes, complexity evaluation

### 1. 緒言

医用 X 線撮像系の物理特性の評価指標として解像特性を示す modulation transfer function (MTF) やノイズ特性を示す noise power spectrum (NPS) などが挙げられる。しかしながら、これらの評価指標による物理的な評価は、視覚的な評価と必ずしも一致するとは限らない。また、これらの評価指標の値を実際の臨床画像から求めることは困難である。したがって、一般的な臨床画像に適用することができ、かつ画像の物理特性とヒトの視覚特性の双方を考慮した評価指標系が望まれる。

一方、中元ら[1]は、複雑さを表すフラクタル次元

(fractal dimension : FD) にヒトの視覚系の空間周波数特性の概念を統合した MTF フラクタル次元 (MTF fractal dimension : MTF\_FD) を提案している。そして、その MTF フラクタル次元を印刷濃度むらの定量的評価に応用した。フラクタル次元とは図形の自己相似性を表す数値のことであり、値が大きくなるほど、その図形は複雑であるといえる。このフラクタル次元にヒトの視覚の空間周波数特性を組み込むことで、単なる物理量であるフラクタル次元に視覚の官能的特徴を含んだ結果を得ることが可能となる。そこで、われわれは、MTF フラクタル次元を医用 X 線撮像系の画質評価に適用した。本稿では、淡い模擬腫瘍陰影を付加した

胸部 X 線画像に対して MTF フラクタル次元の測定と receiver operating characteristic (ROC) 解析による観察者実験を行った。そして、これらの実験を通して臨床画像の視覚評価に対する MTF フラクタル次元の整合性について検証したので、その初期の成果を報告する。

## 2. 手法

### 2.1. MTF フラクタル次元の算出

フラクタル次元は中山ら[2]の手法に倣い、式 (1) と式 (2) を用いて算出した。

$$n(r) = \left[ \frac{I_{\max} - I_{\min}}{r} \right] + 1 \quad (1)$$

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

画像面  $S$  において、画素間隔  $r \times r$  を単位領域とした時、その単位領域内において式 (1) により画素値  $n(r)$  を求める。  $I_{\max}$  は単位領域の 4 隅の最大画素値、  $I_{\min}$  は単位領域の 4 隅の最小画素値を表す。  $[ ]$  はガウス記号であり、  $[x]$  は  $x$  を超えない最大の整数を表す。次に、画像面  $S$  について全ての単位領域で求めた  $n(r)$  の平均値  $\overline{n(r)}$  から式 (2) より  $N(r)$  を求める。そして、  $r$  と  $N(r)$  を  $\log\text{-}\log$  にてプロットし、その直線の傾きの絶対値をフラクタル次元と定義する。しかし、実際には全ての点が一直線上に乗ることは困難なため、本研究では  $(\log(r-1), \log N(r-1))$ ,  $(\log(r), \log N(r))$ ,  $(\log(r+1), \log N(r+1))$  の隣接した 3 点の回帰直線の傾きの絶対値を  $r$  における局所フラクタル次元 (local fractal dimension : LFD) と定義して、MTF フラクタル次元の算出で使用する。MTF フラクタル次元の計算式を式 (3) に示す。

$$MTF\_FD = (LFD - 2.0) \times C_r(u) + 2.0 \quad (3)$$

$MTF\_FD$  は MTF フラクタル次元、  $LFD$  は局所フラクタル次元、  $C_r$  は視覚の相対コントラスト感度の関数である。  $u$  は空間周波数である。観察者と対象画像との距離、画像の画素数、視野角を用いて空間周波数  $u$  とスケール  $r$  を対応付けることができる[1]。本研究では、観察者がモニターに表示された画像を観察することを想定し、観察者 - モニター間の距離を 500 mm、視野角 1 度当りの視野を 8.728 mm、画像の pixel size を 0.28 mm と仮定した。また、ヒトの網膜にある双極細胞や神経節細胞、あるいは外側膝状体の神経細胞は中心 - 周辺拮抗型の帯域通過型の受容野特性を持つことから、中心の領域とその周辺の領域の信号の差がその細胞の出力になる。そこで、刺激を検出しているメカニズムの受容野の形状が二つの 2 次元ガウス関数の差で近似できるものと仮定すると、周波数応答はそのフーリエ変換を用いて式 (4) のように近似される[3]。

$$CSF(u, v) = \exp\left\{-\frac{(2\pi\sigma_e)^2}{2}(u^2 + v^2)\right\} - \exp\left\{-\frac{(2\pi\sigma_i)^2}{2}(u^2 + v^2)\right\} \quad (4)$$

$u$ ,  $v$  は空間周波数、  $\sigma$  は標準偏差を表す。ここで、式 (3) の  $C_r$  は式 (4) の  $CSF$  を正規化したものである。このとき、本研究では  $C_r$  を空間周波数  $u$  のみの 1 次元関数として扱うため、  $v=0$  として用いる。各空間周波数におけるヒトの視覚の相対コントラスト感度は、網膜照度 9 td から 900 td において 4.0 cycles/degree 付近で高いコントラストとなる[4]。これに基づいて、本研究では、空間周波数 4.0 cycles/degree 付近で相対コントラスト感度が最大となるように式 (4) のパラメータを  $\sigma_e = 0.045$ ,  $\sigma_i = 0.060$  とした。Fig.1 に本研究で用いた相対コントラスト感度の関数 ( $C_r$ ) のグラフを示す。

### 2.2. 対象画像

本研究で使用する胸部 X 線画像は日本放射線技術学会が頒布する胸部 X 線画像データベース[5]から 20 症例を抜粋し、画像上の一部の領域を抜き出したものを対象画像とした。サイズは 512×512 pixels、階調数は 8 bits grayscale である。この画像上に人工的に腫瘍陰影およびスピキュラ陰影を加え、さらに高レベルと低レベルの 2 種類のガウシアンノイズを付加した。ノイズレベルはガウス分布の  $\sigma$  で調整し、低レベルは  $\sigma = 1.0$ 、高レベルは  $\sigma = 50.0$  とした。画像例を Fig.2 で示す。

### 2.3. 実験

本実験では二つの実験を行った。一つめは、スピキュラ陰影と高レベル、低レベルのノイズをそれぞれ付加した胸部 X 線画像 20 枚ずつに対して MTF フラクタル次元を測定した。各空間周波数における MTF フラクタル次元の値について比較を行い、付加したノイズ量やスピキュラ陰影のような微細な信号による MTF フラクタル次元の値の変化について検証した。

二つめの実験では、胸部 X 線画像について ROC 解析による観察者実験を行った。使用した画像はスピキュラ陰影を付加した画像 20 枚と付加をしていない画像 20 枚の合計 40 枚である。また、実験はノイズ量の付加条件別 (高レベル, 低レベル) に実施した。観察者実験は学生 5 名によって行われ、実験については観察者に研究内容を説明し、研究協力についての同意を得たうえで実施した。観察者にはモニターに表示される胸部 X 線画像に対して、学習を十分に行った上で腫瘍陰影周辺のスピキュラの有無の判定について連続確信度法を用いて 0 点から 100 点のスコアをつけてもら

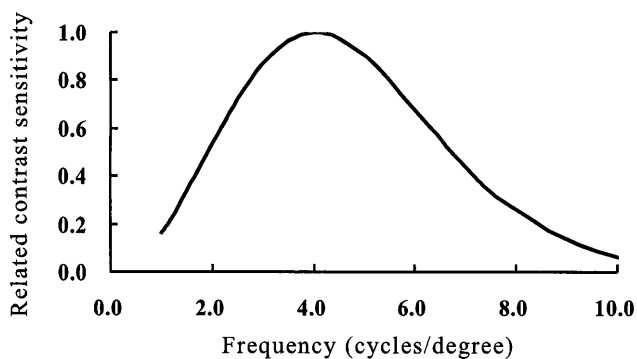


Fig.1 Contrast sensitivity function (CSF) of human eyes.

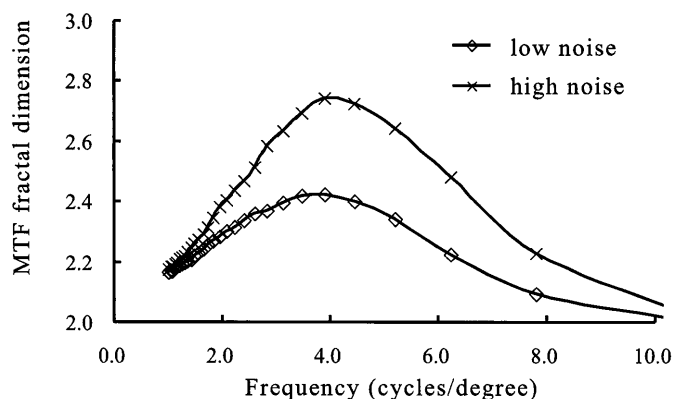


Fig.3 Measured MTF fractal dimension.

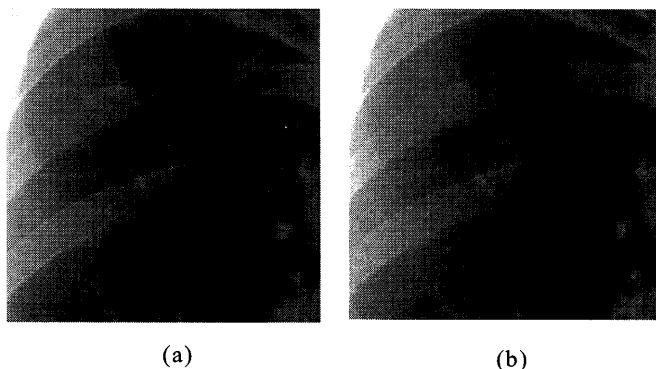


Fig.2 Chest X-ray images used in this study.

(a) Low noise image ( $\sigma=1.0$ ).

(b) High noise image ( $\sigma=50.0$ ).

った。そして、ROC 解析の結果と MTF フラクタル次元の測定結果の比較を行い、MTF フラクタル次元と視覚評価との関係性について検証を行った。なお、観察者実験で収集したデータには個人が同定される情報は含まない。

### 3. 結果

胸部 X 線画像の MTF フラクタル次元の測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 は付加したノイズレベルに対する MTF フラクタル次元のグラフである。横軸は空間周波数 (cycles/degree)、縦軸は MTF フラクタル次元の値を示す。MTF フラクタル次元の値が大きいほどヒトが観察したときの画像が複雑であることを意味する。したがって、Fig.3 では付加したノイズレベルが増加するにつれて MTF フラクタル次元も増加することが示されており、ヒトが認知できる周波数範囲内の複雑さが増大しているといえる。

観察者実験の結果を Fig.4 に示す。Fig.4 は 5 名の観察者によってスピキュラの有無を判定を行った ROC 曲線のグラフである。横軸は偽陽性率 (false positive fraction)、縦軸は真陽性率 (true positive fraction) の値を示す。曲線が左上に行くほど信号を正しく認識していることを意味している。つまり、本研究においては

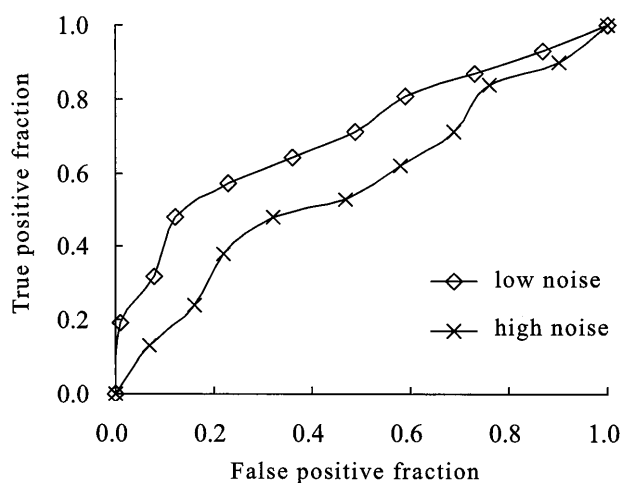


Fig.4 Receiver operating characteristic (ROC) curves obtained from observer performance study.

線が左上に行くほど腫瘍陰影周辺のスピキュラの有無について正しく判別を行うことができたといえる。また、付加したノイズレベル間において、統計的有意差検定を行ったところ  $p<0.05$  となり有意差が認められた。

### 4. 考察

二つの実験結果より、付加したノイズレベルが高い画像ほど MTF フラクタル次元の値も高くなり、視覚評価ではスコアが低いことが明らかとなった。同様に付加したノイズレベルが低い場合は MTF フラクタル次元の値が低くなり、視覚評価ではスコアが高くなることが伺える。このことより、観察者実験によるヒトの視覚評価と MTF フラクタル次元の測定による評価では一定の関係性があることが示唆された。

よりヒトの感覚に近い指標として MTF フラクタル次元を用いるために追加検証を行った。具体的には、

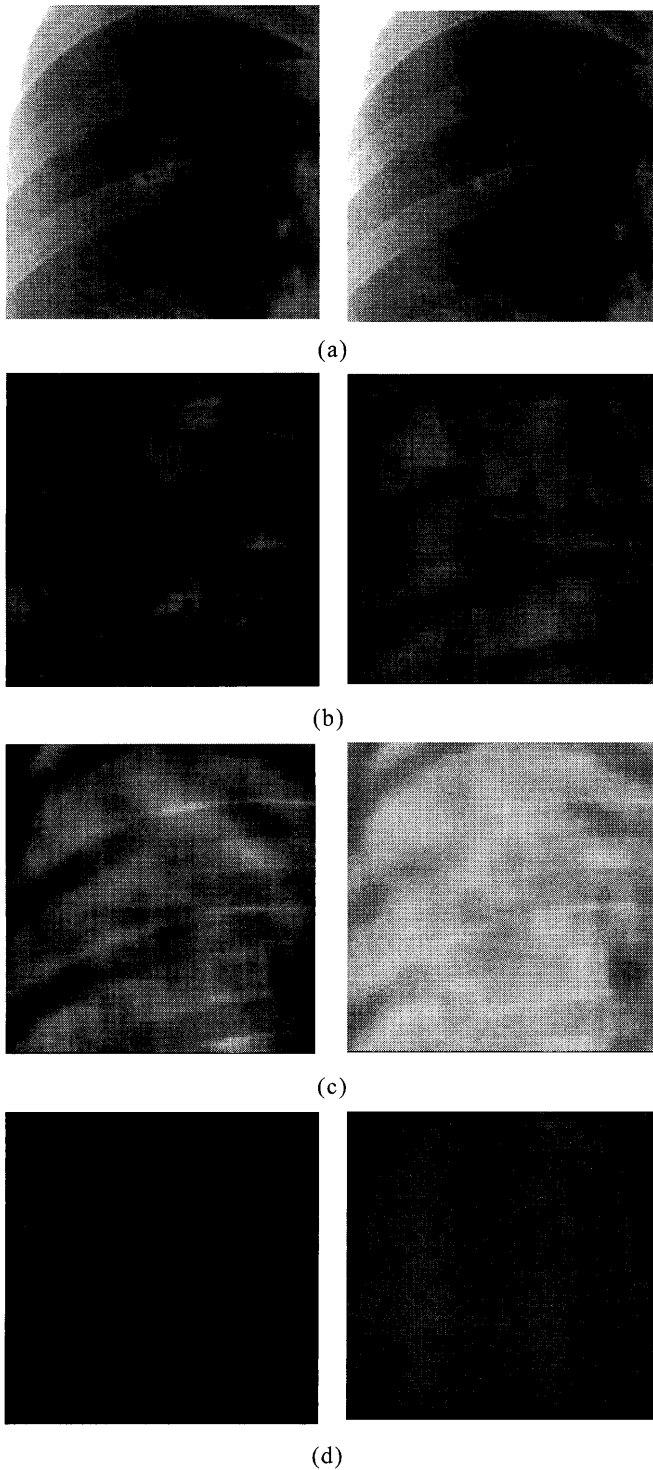


Fig.5 Images of MTF fractal dimension (MTF\_FD) for each frequency. Left images are with low noise ( $\sigma=1.0$ ). Right images are with high noise ( $\sigma=50$ ).

(a) Original image.  
 (b) MTF\_FD image at 2.0 cycles/degree.  
 (c) MTF\_FD image at 4.0 cycles/degree.  
 (d) MTF\_FD image at 8.0 cycles/degree.

各周波数域において MTF フラクタル次元を画素値に変換し画像化した。これにより複雑さを画像中の明る

さとして直感的に把握することが可能になる。原画像に対して空間周波数 2.0, 4.0, 8.0 cycles/degree を画像化した 2 例を Fig.5 に示す。Fig.5(a) は原画像, Fig.5(b), Fig.5(c), Fig.5(d) はそれぞれ空間周波数 2.0, 4.0, 8.0 cycles/degree における MTF フラクタル次元の測定結果を画像化したものである。Fig.5(b), Fig.5(d) のように、ヒトの視覚のコントラスト感度が低い周波数領域では MTF フラクタル次元の値が 2.0 に近いためどちらの画像も画素値は低く平坦に見える。一方で Fig.5(c) のようなヒトの視覚のコントラスト感度が高い周波数領域においては、付加したノイズ量の差を視覚的な情報として把握することができる。これらの検証により、ヒトの感覚に近い評価指標系として MTF フラクタル次元を活用できる可能性が示されたと考える。

## 5. 結語

複雑さを示す物理量であるフラクタル次元にヒトの視覚の空間周波数特性を考慮した MTF フラクタル次元を医用 X 線画像の画質評価に適用した。その結果、胸部 X 線画像に付加した微細な信号に対する視覚評価と MTF フラクタル次元の測定結果は同様の傾向を示した。これにより MTF フラクタル次元が医用 X 線画像の画質評価の一指標になり得る可能性が示唆されたものとする。

## 謝 辞

本研究の一部は新潟大学 GP 支援事業の助成を受けて実施した。

## 文 献

- [1] 中元淳, 山下博, 金子博. “フラクタル次元による印刷濃度むらの定量評価法,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J83D-II, no.4, pp.1082-1089. April 2000.
- [2] 中山寛, 曾根光男, 高木幹雄. “フラクタル次元と低次元統計量とを用いた気象衛星 NOAA 画像の解析とその評価,” 情報学論, vol.31, pp.91-100, 1989.
- [3] 鶴飼一彦, 花沢明俊, 古賀一男, 内川恵二, 佐藤雅之, 視覚 I. 視覚系の構造と初期機能, 篠森敬三 (編), pp.208-213, 朝倉書店, 東京, 2007.
- [4] L.V. Floris and A.B. Maarten, “Spatial Modulation Transfer in the Human Eye,” Journal of the Optical Society of America, vol.57, pp.401-406, 1967.
- [5] J. Shiraishi, S. Katsuragawa, J. Ikezoe, T. Masumoto, T. Kobayashi, K. Komatsu, M. Matsui, H. Fujita, Y. Kodera and K. Doi, “Development of a digital image database for chest radiographs with and without a lung nodule: Receiver operating characteristic analysis of radiologists’ detection of pulmonary nodules,” AJR, vol.174, pp.71-74, 2000.