速 報

論文受付
2013 年 12 月 16 日

論文受理
2014 年 1 月 16 日

Code No. 520

MTF フラクタル次元による X 線画像の画質評価

遠藤 駿¹ 李 鎔範¹ 蔡 篤儀¹ 原 武史²

¹ 新潟大学大学院保健学研究科

² 岐阜大学大学院医学系研究科

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、本論文では、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。そして、その有用性検証のための初期実験として、シミュレーションによって基本的な画質因子と MTF フラクタル次元との相関関係を明らかにした。また、computed radiography (CR) の X 線検出器の解像特性およびノイズ特性と MTF フラクタル次元との関係性を検証した。

1. 方 法

1-1 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。

Quality Assessment of X-ray Images Using Modulation Transfer Function Fractal Dimension

Shun Endo,¹ Yongbum Lee,^{1*} Du-Yih Tsai,¹ and Takeshi Hara²

¹Graduate School of Health Sciences, Niigata University

²Graduate School of Medicine, Gifu University

Received December 16, 2013; Revision accepted January 16, 2014

Code No. 520

Summary

Objective evaluation, e.g., using the modulation transfer function (MTF) or the noise power spectrum (NPS) of an X-ray imaging system may not correctly correspond to the subject's evaluation, e.g., when using the receiver operating characteristic (ROC). Moreover, it is difficult to measure MTF or NPS from clinical images. We therefore applied MTF fractal dimension to an X-ray imaging system. The MTF fractal dimension includes the frequency properties of the human eye in addition to quantitative complexity. In this study, we demonstrated a relationship between basic image quality and MTF fractal dimension using simulated and actual X-ray images.

Key words: medical imaging, image quality, contrast sensitivity of the human eye, complexity evaluation

*Proceeding author

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

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

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)によって画素値 $n(r)$ 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 についてすべての単位領域で求めた $n(r)$ の平均値 $\overline{n(r)}$ から式(2)によって $N(r)$ を求める。そして、 r と $N(r)$ を両対数グラフにプロットし、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、実際にはすべての点が一直線上に乗ることは困難なため、本論文では $(\log(r-1), \log N(r-1))$, $(\log(r), \log N(r))$, $(\log(r+1), \log N(r+1))$ 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。

$$MTF_FD = (LFD - 2.0) \times C_r(u) + 2.0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

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⁾。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もつことから、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二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⁾。

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

u, v は空間周波数、 σ は偏差を表している。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、本論文では C_r を空間周波数 u のみの一次関数として扱うため、 $v=0$ として用いた。また、観察者がモニタに表示された画像を観察することを想定し、観察者-モニタ間の距離を 500 mm、視野角 1 度当

Fig. 1 Contrast sensitivity function (CSF) of the human eye.

りの視野を 8.728 mm、画像の pixel size を 0.28 mm と仮定した。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。

1-2 シミュレーション実験

本研究では二つの実験を行った。一つめは、MTF フラクタル次元とコントラスト、シャープネス、ノイズの各基本的な画質との相関関係を明らかにするためのシミュレーション実験である。コンピュータ上で生成したシミュレーション画像(512×512 pixels, 8 bit grayscale, pixel size : 0.28 mm と仮定)に対して MTF フラクタル次元の測定を行った。シミュレーション画像を Fig. 2 で示す。これらの画像は一樣な背景に Gaussian ノイズを加えることをベースとし、それぞれコントラスト、シャープネス、ノイズ量を段階的に変化させて作成した。ノイズについては、ノイズ量を調整するガウス分布の σ (ここでは σ_n と定義しておく) を $\sigma_n=2.0, 4.0, 8.0$ の3段階とした(Fig. 2a)。シャープネスについては $\sigma_n=8.0$ のノイズ付加画像に対して Gaussian フィルタを適用した。具体的には Gaussian フィルタにおいてぼかす程度を調整するガウス分布の σ (ここでは σ_s と定義しておく) を $\sigma_s=0, 0.5, 0.75$ の3段階とした(Fig. 2b)。コントラストについては、window level(WL)と window width(WW) を $(WL, WW)=(5, 60), (25, 60), (45, 60)$ の3段階とした(Fig. 2c)。

1-3 CR システムでの実験

二つめの実験では、CR における X 線検出器として standard タイプ(ST)と high resolution タイプ(HR)の二

Fig. 2 Simulated images used in this study.

- (a) Noise variation (Left: $\sigma_n=2.0$, Middle: $\sigma_n=4.0$, Right: $\sigma_n=8.0$)
 (b) Sharpness variation (Left: $\sigma_s=0$, Middle: $\sigma_s=0.5$, Right: $\sigma_s=0.75$)
 (c) Contrast variation [Left: (WL, WW)=(5, 60), Middle: (WL, WW)=(25, 60), Right: (WL, WW)=(45, 60)]

種類の輝尽性蛍光体プレートを用いた。また、管電流は 2.8 mAs と 5.6 mAs とし、その他の撮影条件は同一とした(管電圧 42 kV, 付加フィルタ 0.5 mm Al+0.1 mm Cu, 小焦点, 焦点-フィルム間距離 60 cm)。つまり、この実験では、二つのタイプのプレートを使用することでシャープネスを変化させたことになり、また、2 段階の管電流時間積(mA second: mAs)値によってノイズ量を変化させたことになる。撮影した X 線画像を Fig. 3 に示す。これらの画像に対して MTF フラクタル次元を測定した。なお、同画像に対して、エッジ法による MTF 測定と仮想スリット法による NPS 測定を行い、HR で MTF が高くなることと 5.6 mAs で NPS が低くなることを確認済である。

2. 結果と考察

シミュレーション実験の結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4a はノイズの変化に対する 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. 4a ではノイズ量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。Fig. 4b はシャープネスの変化に対する MTF フラクタル次元のグラフである。こ

Fig. 3 X-ray images used in this study.

- (a) 2.8 mAs, ST
 (b) 5.6 mAs, ST
 (c) 2.8 mAs, HR
 (d) 5.6 mAs, HR

a	b
c	d

のグラフはシャープネスが低下するにつれて画像がボケて複雑さが減少することを示唆している。コントラストを変化させた場合においては、MTF フラクタル次元の値に変化はみられなかった。

Fig. 4 Measured MTF fractal dimension in our simulation study.

- (a) Relations between noise level and MTF fractal dimension
(b) Relations between sharpness level and MTF fractal dimension

CRにおける実験結果を Fig. 5 に示す。MTF フラクタル次元は 5.6 mAs よりも 2.8 mAs で増加しており、これは X 線量が低下すると画像がざらついて見えることと一致する。また、検出器の種類については、HR タイプの方が低空間周波数域において MTF フラクタル次元の値が大きいことが示されており、これは HR タイプのほうが ST タイプよりもシャープネスにおいて優位である(ノイズは増し複雑さは増大する)ことを示唆している。今回の二つの実験結果から、MTF フラクタル次元

Fig. 5 Measured MTF fractal dimension in the CR system.

とコントラスト、シャープネス、ノイズとの関係性が明らかとなり、X 線撮像系における基本的な画質因子と MTF フラクタル次元の間に一定の相関関係があることが示された。今後は本実験結果を踏まえて、MTF フラクタル次元を臨床画像の画質評価に応用していく予定である。

3. 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。その初期検討として、シミュレーション実験と CR システムにおいて実験を行った。その結果からコントラスト、シャープネス、ノイズの基本的な画質因子と MTF フラクタル次元の関係性について明らかにした。

謝 辞

本研究は新潟大学 GP 支援事業の助成を受けた。

本論文は、日本放射線技術学会第 69 回総会学術大会にて発表した研究成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 中元 淳, 山下 博, 金子 博. MTF 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 2000; J83D-II(4): 1082-1089.
- 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 1989; 31: 91-100.

- 3) 鶴飼一彦, 花沢明俊, 古賀一男, 他. 視覚 I. 視覚系の構造と初期機能. 朝倉書店, 東京, 2007: 208-213.
- 4) van Nes FL, Bouman MA. Spatial modulation transfer in the human eye. J Opt Soc Am 1967; 57: 401-406.

問合せ先

〒 951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通 2 番町 746
新潟大学大学院保健学研究科 李 銘範