〔第49回総会シンポジウム デジタルX線画像の最適化—被曝線量の観点から—〕

6. I.I./TV-DR における被曝線量と物理特性の関係

小 倉 敏 裕

(財)癌研究会附属病院

Key words: Digital radiography, II/TV system, Modulation transfer function, Digital Wiener spectrum, Detectabilities

RELATIONSHIP OF THE IMAGING PROPERTIES OF THE I.I./TV BASED DR SYSTEM FOR INCIDENT EXPOSURES.

TOSHIHIRO OGURA

Department of Radiology, Cancer Institute Hospital

Abstract

We investigated imaging properties of a 2048×2048 matrix I.I./TV based digital radiography (DR) system (DR-2000 H) for various incident exposures. It should be noted that the resolution property of the I.I./TV based DR system depends on the incident exposures, the level of signal current from the TV image pickup tube and also regarding the size of the iris in the TV lens. Digital Wiener spectra and the detectabilities of low-contrast objects were measured for different incident exposures. It can be clearly seen that the noise properties and detectabilities decreased with a decrease in the incident exposures. The digital Wiener spectra also seemed to depend on the specific combination of the MTF's of the optical lenses, the level of signal current from the TV image pickup tube and quantum mottle. We must pay attention to these parameters when acquiring clinical images and evaluating the imaging properties. Furthermore, because the sensitivity of this system is higher than that of screen-film system, an X-ray tube of 0.2-mm focal spot is available routinely, the effect of geometric unsharpness can be reduced in practical clinical implementation; the resolving power of the DR system with 7"-I.I. mode at a certain magnification factor are equivalent or even superior to the resolving power of screen-film system employed.

1. はじめに

I.I./TV システムを用いた DR では、X線検出効率が高く被曝低減が可能である反面、空間分解能が screen/film system (以下 S/F とする) に劣る。しかし、最近登場した I.I./TV 方式2048×2048マトリックス (以下 2k とする) DR は、二次蛍光面を60 mmφ に大口径化するなど、空間分解能の改善が図られた I.I. を搭載している¹⁾。しかし、装置の設定条件や入射線量によって、画像特性は同一インチモードにおいても、変化することが分かっ

た。同時にノイズ特性も変化する。ここでは、I.I./TV-DR についての線量と画像特性の関係について報告する。

2. 方 法

2.1 使用装置

本研究で使用した I.I./TV 方式の DR 装置 (DR-2000 H, 日立メディコ) は、出力口径60 mm の縮小比の小さな12インチ I.I. (12, 9, 7 インチの3モード) と、2100 本 TV カメラ (1 インチ含浸型ダイオードガンサチコン) が搭載されている。光量を制御するアイリスは可変

型で、口径制御の駆動は DR 装置内の CPU 管理のもとで行われている。出力映像信号は、アンプにより増幅された後、A/D 変換器により 2k、または、 1024×1024 マトリックス（以下 1k とする）で 10 ビット（ディスプレイ時は 4096 階調で表示）のデジタル信号に変換される。このとき、最大映像信号電流は 550 nA（デジタル値 4095 に相当）に設定されている。また、専用のディストリビュータによって 100 mm ロールフィルムへの撮影も可能である。

2.2 被曝線量の測定

20 cm 厚の亚克力板を撮影し、S/F (HR 4/HRS および HR 6/HRS, Fuji photo film co.), および、各インチモードでの 100 mm ロールフィルム (Fuji medical imaging film, type SF II) を用いたとき、濃度 1.0 となる線量（ファントム入射表面線量）を測定した。

2.3 解像特性の測定

DR 系における固有な MTF として、検出器自身の効果（アナログ成分）とサンプリングアーチャの効果を含んだプリサンプリング MTF の概念が導入され²⁾、本研究でもこのプリサンプリング MTF を測定した。測定では、副走査方向（TV カメラの走査線方向に垂直な方向）に対してわずかに傾き（通常 2 度以内）をつけたスリットによる手法³⁾を用いて、“合成された”line spread function（以下、LSF）を作成する。この合成 LSF から、通常の MTF の計算と同じように計算し、プリサンプリング MTF を求めた⁴⁾。このとき、ペーリンググレアに相当する成分はカットし、LSF のすそ野部分は指数関数で外挿した。スリットの撮影は、I.I. の入射面の中央部に幅 $10 \mu\text{m}$ のスリットを置き、焦点-I.I. 入射面距離 80 cm 一定で、管電圧 80 kV で撮影した。なお、入出力特性は、タイムスケール法によって求め⁵⁾、ピクセル寸法（サンプリング間隔）は、I.I. の中心部において既知寸法の被写体を撮影して実測した。

一方、各拡大率における空間分解能の比較を DR-2k、100 mm ロールフィルム、S/F で行った⁶⁾。解像力チャート (Nuc. Assoc.-Carle Plarle, N.Y-07-526 0.05 mm Pb Nr 67412) は、腹厚 20 cm 被写体の中央を想定して、天板上 10 cm の位置に設置した。焦点は通常使用している小焦点 (0.2 mm) を使用した。100 mm ロールフィルムや S/F (HR6/HRS) も同じ幾何学的条件で撮影した。アイリス径を $28 \text{ mm}\phi$ とし、撮影条件は、50 kV、20 mA で、ピクセル値が 700 前後となるよう撮影時間を調節し照射した。S/F は小焦点撮影を行うと照射時間が長くなり、実際の臨床撮影では運動ぼけとなって使用できない。

そのため大焦点 (0.8 mm) を使用した。DR の場合、表示は 1000 本モニタを用い、2k 画像の 1/4 領域表示で肉眼による解像力を調べた。

2.4 ノイズの測定法

ここでは、入力から表示までのノイズ成分すべてを含んだオーバーオール・ウィナースペクトル（以下 WS とする）ではなく、1) X 線量子モトル、2) I.I. の構造モトル、3) TV カメラの電気ノイズ、4) アンプのノイズ、5) 量子化ノイズ等を含んだデジタル WS について評価を行った⁷⁾。デジタル WS は、A/D 変換後のピクセル値から直接計算されるもので CRT やレーザープリンター等のディスプレイ部の影響や画像処理の影響を含んでいない。また、量子化ノイズも一定である。撮影モードは 9 インチ一定で行った。実験では、アイリスサイズ一定の状態に入射 X 線量を変化させたとき、デジタル WS がどのように変化するかを調べた。焦点-I.I. 間距離 104.5 cm、管電圧 80 kV で 2 mm の Cu を付加し、一定のゲインのもとで、X 線を I.I. に照射し試料を作成した。I. I. 入射線量を変化させるために、照射時間を変えた。WS の測定は、副走査方向について行い、I.I. の中心領域の 1024×470 ピクセルをノイズの計算に使用した。WS の計算は、DR 装置から直接フロッピーに落とし、フォーマット変換を行い、FFT 法でパーソナルコンピュータで行った。I.I. のノンユニフォーミティー（不均一性）が存在するために、バックグラウンドトレンド補正には、多項式近似曲線を用いた。

2.5 低コントラスト被写体の検出能

線量の変化による低コントラスト被写体の検出能の変化を、ROC 解析によって調べた^{8,9)}。あらかじめ 20 cm 厚の亚克力板の中央に、バーガーファントム（直径と深さの異なる各信号が自由に配置できる自作の特性ファントム）を設置し、限界検出能を調べた。その限界検出領域の直径 ($0.4 \text{ mm}\phi$ - $5 \text{ mm}\phi$) と深さ (1 mm - 5 mm) が異なる被写体 50 個を選び、その信号 50 個と信号なし 50 個をランダムに配列して、実験用のファントムとした。このファントムを 20 cm アクリル板の中央にはさみこみ、撮影を行った。ROC 評価は 5 段階評価で、放射線技師 5 人によって行い、1 画像当たり合計 500 の観察結果より求めた。撮影条件は全て 80 kV である。観察方法は、実際の臨床に使用しているときと同様、DR では CRT 観察で、階調設定は自由、周波数処理なしとした。S/F の評価にはシャーカステンを用いた。

3. 結 果

3.1 被曝線量

100 mm ロールフィルムを用いたときの濃度1.0を得るのに必要な線量は、S/F (HR6/HRS) と比較した場合、12インチモードでS/Fの約1/10、9インチモードで約1/5、7インチモードで約1/3であった。S/F (HR4/HRS) との比較では、12インチモードで約1/12であった。DRの場合、濃度1.0の規定がないので、現在 Table 1 に示した間接撮影 (100 mm ロールフィルム) を基準に、その3割減の線量で撮影を行っている。

3.2 解像特性

I.I. 中心部における実効ピクセル寸法は、2k で、 $91\mu\text{m}$ (7インチ)、 $116\mu\text{m}$ (9インチ)、および、 $164\mu\text{m}$ (12インチ) であった。

Fig. 1 に2k 各インチモードにおける主走査方向のプリサンプリング MTF を示す。インチモードが小さくなる程、良い解像特性を示した。しかし、評価に際して、MTF 値がスリット像分布 (LSF) のピーク値に依存することが分かった。Fig. 2 に2k、7インチモードにおけ

Table 1 Comparison of incident exposures on the surface of a 20-cm thick lucite phantom for screen-film and 100 mm roll-film systems.

TECHNIQUE	INCIDENT DOSE
SCREEN/FILM [HR4/HRS]	250 mR ($64.5 \times 10^{-6} \text{ C/Kg}$)
SCREEN/FILM [HR6/HRS]	194 mR ($50.1 \times 10^{-6} \text{ C/Kg}$)
7" II MODE	21 mR ($5.4 \times 10^{-6} \text{ C/Kg}$)
9" II MODE	43 mR ($11.1 \times 10^{-6} \text{ C/Kg}$)
12" II MODE	73 mR ($18.8 \times 10^{-6} \text{ C/Kg}$)

Fig. 1 Presampling MTFs of the I.I./TV based DR system at three I.I. modes for 2048×2048 matrix in a direction parallel to the TV raster lines. (LSF peak value: 650, iris diameter: 22.5 mm).

る、LSF のピークのピクセル値が異なるプリサンプリング MTF を示す。アイリス径は $33.5\text{ mm}\phi$ 一定で、線量を変化させピクセル値を変えた。すなわち、線量を増やしたとき大きなピクセル値となる。スリット像分布のピークのピクセル値が小さくなると、プリサンプリング MTF が高くなった。

次に、ピクセル値を1100一定に保った状態で、アイリス径を変化させたときの解像力の変化を Fig. 3 に示す。アイリス径を絞ったときは線量を増やし、逆に広くしたときは線量を減じてピクセル値を1100に保った。アイリス径を絞るほどプリサンプリング MTF が高くなった。これらの傾向を簡易的に解像力チャートを用いて実験して確認したが同様の結果となった。

Fig. 2 Presampling MTFs of our DR system measured at the 7"-I.I. mode (2048×2048 matrix), which demonstrates a dependency of MTF values on the peak value of the LSFs with the size of diaphragm (33.5 mm).

Fig. 3 Presampling MTFs measured at the 7"-I.I. mode (2048×2048 matrix), showing degradation as iris diameter in creases, for constant peak pixel value of 1100 in the LSFs.

Fig. 4 Resolving powers as a function of magnification factor for the 100-mm roll-film, the DR, and screen-film (HR6/HRS) systems.

Fig. 5 Measured digital Wiener spectra for various incident exposures in a direction perpendicular to the TV raster lines. The image samples for noise measurements were exposed under the constant iris diaphragm (28 mm ϕ) with 9" I.I. mode.

Fig. 6 Comparison of the receiver operating characteristic curves for the detection of low contrast objects, which are investigated with the DR (2048 $\times$ 2048 matrix, 7"-I.I. mode) under various incident exposures.

各拡大率における、チャートを用いた解像力の結果を Fig. 4 に示す。S/F(HR6/HRS) は撮影線量の問題で、大焦点を使用せざるを得ない。そのため、拡大率を上げると、焦点寸法に起因する幾何学的不鋭が大きくなり、急激に解像力が低下した。100 mm ロールフィルム 7 インチモードは、1.14~1.43 倍のすべての拡大率で 7.0 lp/mm が確認でき、S/F の解像力より良い結果となった。DR-2k は、各インチモードで 100 mm ロールフィルムより劣った。しかし、S/F と比較した場合、7 インチモードは、拡大率 1.2 倍以上になると S/F より良くなった。

3.3 ノイズ特性

Fig. 5 にアイリス径を一定 (28 mm ϕ) にし、I.I. への入射線量を変えたときの WS を示す。線量の増加に伴って、低周波数領域から高周波数領域にわたって、ノイズ

特性の改善がみられた。

3.4 低コントラスト被写体検出能

Fig. 6 は DR-7 インチで線量を変化させて撮影したときの結果である。線量を下げると同時にアイリス径を大きくピクセル値を等しくした。線量を少なくすると、検出能は明らかに低下した。

4. 考 察

Fig. 2 に示すように、MTF 値はスリット像分布 (LSF) のピーク値に依存し、線量を増やすと解像特性が悪くなる傾向がある。通常、S/F 系のスリット法による MTF 解析においては、LSF の“すそ野”まで広い範囲

〔第49回総会シンポジウム〕 6. I.I./TV-DR における被曝線量と物理特性の関係 (小倉)

にわたってスリット像分布を得るために、スリット像のピークの値をできるだけ大きくとるようになってきた。そして、このとき、得られた MTF の結果にスリット像のピーク値の依存性がみられないことが“常識”であった¹⁰⁾。しかし、I.I./TV-DR では依存性がみられた^{4,11)}。この原因として、I.I. の線量の変化による解像特性の変化と、撮像管の信号電流の変化による解像特性の変化が考えられる。前者については、100 mm ロールフィルムを用いて、I.I. の 2 次蛍光面のアナログ像の解像力を調べた。しかし、照射線量の異なる場合や、同一 mAs で管電流と照射時間の組合せを変化させた場合でも、解像力の変化はみられなかった。したがって、撮像管の信号電流が大きくなることによって、MTF が低下するといえる。撮像管への入力光学像は、入力フェースプレート上に電荷像として形成され、その電子ビームによるスキャンによって電気信号に変換される。入力光が過大になって信号電流が大きくなったときには、像がにじみ、ブルーミング現象が起きる。このブルーミングは、空間分解能の低下を招く一因と考えられる。この現象が起きるために倍数露光の手法がとれない。また、解像力は、Fig. 3 に示されるよう、撮像管の影響のみならず、アイリスの影響も受けていることがわかった。この場合、アイリスを絞って線量を増やすと解像特性が良くなる。本 DR システムは、レンズが 200 mm (F1.5)、二次レンズが 50 mm (F0.65) の明るいものを使用している。このように口径の大きなレンズを使用しているため、解像力のアイリス径依存性は無視できない。アイリスを絞ることによる光学レンズの解像特性の上昇は、主に球面収差等が影響しているものと考えられる。

12 インチモードで、S/F の 1/10 以下の線量で撮影しているため、ルーチンに小焦点 (0.2 mm) 撮影が可能である。このため、焦点寸法に起因する幾何学的不鋭が小さくなり、解像力の高い画像が得られる。X 線検出器として、I.I./TV-DR の解像特性は S/F に劣るが、小焦点拡大撮影の技法が応用でき、S/F に匹敵する解像特性の有する画像が得られる。被写体厚が厚い場合、被写体に密着して撮影したとき、拡大率が 1.2 程度となる。この様な被写体に対し DR-2k、7 インチモードの密着撮影の解像力が、S/F の密着撮影と同等である。また、アンダーチューブ方式の装置では、幾何学的不鋭の少ない画像を得るために、被写体にできるかぎり S/F を接近させるのが撮影手技として常識である。しかし、当 DR や 100 mm ロールフィルムでは、解像力に関して、常に密着撮影する必要はないと言える。Fig. 4 に示すように、100 mm ロー

ルフィルム 7 インチモードは、すべての拡大率で S/F の解像力より良い結果となったが、デジタル化される前のアナログ成分 (I.I. 自身) の解像力が大きく改善されたために、デジタル化された画像も優れた解像特性を有しているといえる。

アイリス径一定のもとで、線量を増加させると、全周波数領域にわたってノイズ特性の改善がみられた。これは、高周波数側 (約 1.5 cycles/mm ~ ナイキスト周波数) のノイズと低周波数側 (約 1.5 cycles/mm 以下) のノイズの改善が同時に起こっているためであることが別の実験で分かっている¹²⁾。高周波数側のノイズは、線量を増すことによってピクセル値が上昇し、MTF の劣下によって改善される。そのノイズの大きさは、カメラの信号電流に依存し、信号電流が大きくなるとデジタル WS 値は小さくなる。一方、低周波数側のノイズは、主に X 線量子モトルの減少等により改善される。また、アイリス径による MTF の変化もノイズに影響している。

Fig. 6 に示すように、線量を少なくすると、ノイズの上昇とともに、低コントラスト被写体検出能は明かに低下する。DR 装置の場合、線量はアイリス径の設定により CR と同様、線量低減が可能であるが、むやみに線量を下げるのは危険である。逆に、線量を多くすると検出能は良くなる。しかし、実際の臨床では線量を多くするために大焦点 (0.8 mm) を使用しなければならず解像力が落ちる。小焦点 (0.2 mm) が使用でき、撮影タイマーが、運動ボケの無い程度で切れるように、撮影条件の設定を行うべきである。

5. ま と め

1. 解像特性は、同一インチモードにおいてもアイリス径とピクセル値がそれぞれ大きくなると低下することがわかった。このことは、I.I. への入射線量の増減により解像特性が変化することを意味する。

a アイリス径を一定に保ち、入射線量を増すとピクセル値が上昇し解像特性が低下する。

b ピクセル値を一定に保つためにアイリス径を広くし、入射線量を減すると解像特性が低下する。

すなわち、高い解像特性の画像を得るためには、アイリス径を絞り、低いピクセル値となるような線量で撮影する。逆にあまり高い解像特性を必要としない場合、アイリス径を広くすることによって被曝低減が可能である。

2. 低線量撮影により、ルーチンに小焦点 (0.2 mm) 撮影が可能である。このため、小焦点拡大撮影の技法が応用でき、S/F に匹敵する解像特性の有する画像が得ら

れる。

3. ノイズに関して、線量の低減によって量子モトルが増加し、デジタル WS は上昇した。そして、同時に低コントラスト被写体検出能の低下も顕著であった。また、ノイズ特性は、解像特性と密接な関係があるため、アイリス径や、ピクセル値によっても異なる。

このように、II/TV-DR の場合、入射線量と解像特性とノイズ特性の間には、複雑な関係があり、これらの特性を熟知したうえで撮影目的にあった DR 装置のパラメータの設定、線量、撮影方法を決定する必要がある。

謝 辞

共同研究者で、終始ご指導頂いた岐阜大学工学部電子情報工学科助教授藤田広志博士ならびに、研究を進めるにあたりご協力頂いた当院放射線部の皆様に厚くお礼申し上げます。

最後に、本研究の遂行にあたり技術的援助をしていただいた(株)日立メディコ技術研究所の諸氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 遠藤哲朗：高解像度リアルタイム DR 対応12寸高精度 X 線イメージインテンシファイア V3733P の開発., 映像情報 (MEDICAL), 23(15), 854-858, (1991).
- 2) Fujita H., Doi K., and Giger ML.: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6. MTFs of II/TV digital imaging systems., Med. Phys., 12, 713-720, (1985).
- 3) Fujita H., Tsai D.-Y., Itoh T., et al.: IEEE Trans. Med. Imag., 11(1), 34-39, (1992).
- 4) 小倉敏裕, 藤田広志：新しい2K×2K マトリクス II/TV 方式のデジタルラジオグラフィの解像特性, Med. Imag. Tech., 9(5), 569-574, (1991).
- 5) 藤田広志, 大西義隆, 坂本 清, 他：デジタルラジオグラフィの画像評価〈1. 特性曲線〉., 日放技学誌, 46, 1579-1592, (1990).
- 6) 小倉敏裕, 岡村泰賢, 丸山雅一, 他：高解像度 X 線イメージインテンシファイアを用いた上部消化管診断., 医用電子と生体工学, 30(4), 54-60, (1992).
- 7) Giger ML., Doi K., and Fujita H.: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 7. Noise Wiener spectrum of II-TV digital systems., Med. Phys., 13(2), 131-138, (1986).
- 8) Metz CE.: ROC methodology in radiologic imaging, Invest. Radiol., 21, 720-733, (1986).
- 9) Ogura T., Masuda Y., Fujita H., et al.: Technical and clinical evaluations of a 2048×2048-matrix digital radiography system for gastrointestinal examination., Proc.SPIE, 1443, 153-159, (1991).
- 10) Strubler K., Doi K., and Rossmann K.: Density dependence of the line spread function of radiographic screen-film systems., Phys. Med. Biol., 18, 219-225, (1973).
- 11) Ogura T., Fujita H., and Tsai D.-Y.: Resolution properties of a 2048×2048-matrix II-TV based digital radiography system., Med. Phys. (投稿中)
- 12) 小倉敏裕, 藤田広志：新しい II/TV-2k×2k マトリクスデジタルラジオグラフィのノイズ特性., Med. Imag. Tech. (抄録), 10(3), 267-268, (1992).