〔第18回秋季学術大会シンポジウム ―デジタルラジオグラフィの画像評価―〕

2. 入出力特性

坂 本 清

兵庫医科大学病院中央放射線部

Key words: Digital radiography, Digital subtraction angiography, Computed radiography, Characteristic curve, Pixel value

THE RELATIONSHIP BETWEEN INPUT AND OUTPUT IN DIGITAL RADIOGRAPHY

KIYOSHI SAKAMOTO

Department of Radiology, Hyogo College of Medicine

Summary

Characteristic curves are useful in the comparison of system speeds and in the linearization of the system response for measurement of the modulation transfer function and other physical quantities. The characteristic curve of a digital radiographic imaging system can be defined as the relationship of the output in terms of pixel value to the input in terms of relative x-ray intensity. Several different methods for determining the characteristic curve of digital radiography systems are available. We used four methods and two methods in order to determine the characteristic curve of digital subtraction angiography system (DSA) and computed radiography (CR) system. Because luminous intensity increases in proportion to X-ray intensity in these systems, we could use the time-scale method. We had to choose most suitable method in DSA system. In CR system, we can treat in a way similar to that of a screen-film system.

1. はじめに

デジタルラジオグラフィの画像評価を行う場合、入出力特性としての特性曲線を測定することは重要である。Fujitaらは、デジタルシステムの入出力特性を測定し¹⁻³⁾、特性曲線と定義している。本会の専門委員会では「デジタル画像の物理的評価検討班」を発足し、デジタルラジオグラフィの画像評価について検討を行っている。ここでは、主に第一期のメンバーによって検討された「デジタルラジオグラフィの特性曲線の測定⁴⁾」の内容を中心に述べる。デジタルラジオグラフィはDSA (Digital Subtraction Angiography) と CR (Computed Radiography) に代表されるが、デジタル特性曲線を

測定するには以下に示す測定法が考えられる。

2. DSA の特性曲線

DSA システムでは、I.I. に入射するX線強度を制御する方法と、TV カメラに入射する蛍光量を制御する方法がある。X線強度を制御する方法には、①アルミニウムをX線減弱物質として用いI.I. へ入射するX線強度をアルミニウムの厚さにより変化させるアルミニウム法、②X線管とI.I. との距離を変化させ入射X線強度を変化させる距離法、③装置のタイマを変化させるタイムスケール法があり、蛍光量を制御する方法には、④ニュートラルデンシティ (N.D.) フィルタを使用し、TV カメラへの入射光量を変化させる N.D. フィルタ法、⑤アイリス

を変化させる方法、が考えられる。これらの方法はそれぞれ問題点があり、装置によっては不可能な場合もある。ここでは①—④について述べる。

2.1 アルミニウム法

藤田らの報告によれば、Cronex Quanta III (デュポン社製) はイメージインテンシファイア (I.I.) の入力蛍光面の蛍光体 (CsI) と同等のX線吸収特性を示すため、この増感紙をI.I. に代用させることができる³⁾。アルミニウムをX線減弱物質として用い、I.I. へ入射するX線強度をアルミニウムの厚さにより変化させる方法である⁵⁾。アルミニウムの厚みをX線強度に変換する必要があるが、マニュアル撮影のできない装置にも使用できるので有用である。まず、距離法により、Quanta IIIを用いた増感紙/フィルムシステムの特性曲線を作成する。次にアルミニウムステップの撮影を行い、各ステップの写真濃度をX線強度に変換する。これはアルミニウムの減弱曲線に相当する。さらにDSA装置を用いて同条件下でアルミニウムステップの撮影を行い、各ステップのピクセル値を読み取り、アルミニウム厚をピクセル値に置き換える。これでデジタル特性曲線が完成する。

2.2 N.D. フィルタ法

これは、N.D. フィルタ (コダック ラッテン ニュートラルデンシティ フィルタ No. 96) を用いて、X線TVに入射するI.I. の2次蛍光面の光強度を制御する方法である。I.I. に入射するX線強度と2次蛍光面の蛍光量には直線関係が成り立つためこの方法が可能である。このフィルタは約450 nm以上の波長に対して透過率が一定であり、X線TVカメラに入射する光量 (平均波長約530 nm) を変化させるのに適している。撮影条件は一定にし、タンデムレンズ間に挿入するフィルタの濃度を変化させて、X線TVカメラに入射する光量を制御する。このときのフィルタの濃度 (透過光量) と撮影された画像のデジタル値との関係が特性曲線となる。

2.3 距離法

距離法については、本会の「X線センシトメトリ班」において、方法、精度などが十分検討されており⁶⁾、増感紙/フィルム系の特性曲線作成法は距離法が一般的となっている。しかし、DSAシステムの場合、装置によっては移動可能な距離が制限されるため、どの装置でも可能というものではないし、マニュアル撮影ができない装置では困難である。

2.4 タイムスケール法

I.I. には相反則不軌が生じないためタイムスケール法が使用できる点が見逃せない。マニュアル撮影ができる

装置では、装置の撮影タイマが使用できるため簡便で有効である。

2.5 結 果

60 kV, 90 kV で測定した、アルミニウムの減弱曲線を Fig. 1 に示す。この減弱曲線を用いてアルミニウム厚をX線強度に変換した、アルミニウム法の特性曲線を Fig. 2 に示す。2つの電圧で測定した特性曲線は形状を比較するために平行移動して表示してある。Fig. 1, Fig. 2, Fig. 5 は DFP-50A (東芝) を用いた大西氏によるデータである。異なる管電圧で測定した特性曲線も、同じ形状を示すことから、DSA装置の特性曲線はI.I. に入射するX線の線質に依存しないといえる。

X線強度と蛍光量の関係を Fig. 3 に示す、照度計 (MAVO-MONITOR) を用い、X線管焦点—I.I. 間の距

Fig. 1 Relationship between relative x-ray intensity and aluminum thickness. It was determined with a Cronex QuantaIII/Rx screen-film combination.

Fig. 2 Characteristic curves relating the pixel value to the x-ray intensity using aluminum method on DSA system. The x-ray exposures were made at 60 and 90 kV.

〔第18回秋季学術大会シンポジウム〕 2. 入出力特性 (坂本)

離を変えることによりX線強度を変化させ、I.I.の2次蛍光面の蛍光量を測定したものである。照射野のサイズ(2×2 cm, 5 cm ϕ)によりグラフの傾きは変化するが、X線強度と蛍光量は直線関係が成り立っているのが分かる。次に、N.D.フィルタ法により測定した特性曲線をFig. 4に示す。使用した装置はディジトロン-3(シーメンス)、撮影条件は63 kV, 512×512マトリックス, 10ビットである。この装置ではFig. 2の特性曲線と比較して、曲線の傾きが逆である点、デジタル値が0となる線量以上の強度を与えると再び値が現われる点などが特徴といえる。

Fig. 3 Relationship between luminous intensity and relative x-ray intensity of image-intensifier. It was measured by using luminous meter with inverse square method.

Fig. 4 Characteristic curve of DSA system measured by using neutral density filter method.

また、大西氏はN.D.フィルタ法で、画像収集速度およびX線パルス幅の影響についても検討を行っており、「マトリックスサイズが同じであれば、撮影モードが変化しても特性曲線の変化はない。マトリックスサイズが変わればダイナミックレンジが変わる。画像収集速度を遅くすると曲線の勾配が緩やかになるが、X線パルス幅の影響は受けない。」と報告している。画像収集速度による影響は、撮像管の走査方式(インタレース/プログレッシブ)が変わるためであろう。距離法、N.D.フィルタ法の特性曲線はよく一致している (Fig. 5)。

Fig. 6に蛍光量計を用いて測定した、設定時間と露光量との関係を示す。これはCRのタイムスケール法で用いたものであるが、タイムスケール法を行う場合、タイム精度を調べておく必要がある。

どの方法をとるにしても、開口窓寸法を極力小さくし

Fig. 5 Comparison of characteristic curves measured by using neutral density filter method and inverse square method on a DSA system.

Fig. 6 Relationship between fluorescent intensity to selected time measured by using fluorescence meter.

て、散乱線, I.I. のベーリンググレア (VG) の影響を減少させなければならない。アルミニウム法では拡大撮影を行い、グレーデル効果を利用することも有効である。

3. CR の特性曲線

CR では増感紙/フィルム系と同じ扱いができるため増感紙/フィルム系で一般的となっている①距離法を参考にすれば良い。しかし、CR システムでは、検出器としてフィルムが用いられていないため相反則不軌が起こらず、発生器のタイマを用いた②タイムスケール法が使用できる点が見逃せない。ここで使用した FCR101 は、システム感度を E 値、ダイナミックレンジを L 値 ($\text{LOG}_{10}E$ に対応) で表示している。イメージングプレート (IP) は標準タイプの ST を用いた。

3.1 距離法

DSA システムのところでも述べたように、増感紙/フィルム系の特性曲線作成法は既に確立されており、CR の特性曲線作成にも応用することができる⁷⁾。ここでは、焦点-IP 間距離は、比露光量が 2 倍になるように 40.1-320 cm の間を移動させ、7 点で測定した。この条件では、比露光量が 64 倍であり、IP の X 線受光可能域 10^4 倍をカバーするために、X 線発生装置のタイマを 3 段階に変化させた (Fig. 7)。

Fig. 7 The technique for measuring characteristic curve of computed radiography by using inverse square method.

装置の収録モードは、特性曲線の形状を詳しく見るために、L 値を最大 ($L=3.6$) とした。また、照射線量の影響をみるために、E 値を 40 (大線量用)、400 (中線量用)、および 4000 (小線量用) とした。さらに、線質の影響をみるために、一般に使用されている 80 kV、軟線質用の 30 kV、硬線質用の 120 kV で検討した。また、照射線量確認のための線量測定は、IONEX (0.3 cc Shallow

Chamber) を用いて行った。

3.2 タイムスケール法

DSA システムと同様、相反則不軌が生じないため有効な方法である⁸⁾。タイムスケール法について、タイマ使用による種々の問題を解決するため、蛍光量計を用いて測定し (Fig. 6)、装置のタイマの各々の設定値 (0.001-8.0 sec) と露光量の校正をした。

3.3 結果

1 枚の IP に数カ所露光した場合の CR 画像を Fig. 8 に示す。IP からの読み取りには He-Ne レーザービームが使用され、輝尽発光の発光寿命は $0.8 \mu\text{sec}$ と非常に短いとされている。しかし、Fig. 8 に示したように、極端な露光を与えた場合には影響があるため、読み取りレーザービームの走査方向を考慮して露光位置を決める必要がある。

Fig. 8 Image of computed radiography used for measuring of characteristic curve.

距離法を適用して測定した CR の特性曲線を Fig. 9, Fig. 10 に示す。ここでは、形状を比較するために、横軸を平行移動させて表示している。本装置の場合、IP から読み取られた信号は 8 ビットのデジタル値 (ピクセル値) に A/D 変換されるため、特性曲線の縦軸は 0~255 で示される。IP の線量依存性は直線関係にあると言われているが、CR システムで読み取った場合、線量の多少にかかわらず、ピクセル値 (0-255) が 150-170 で傾きが大きくなり、さらにピクセル値の大きいところ (210-230) で急激に傾きが小さくなった。傾く位置は E 値に依存しているようである。ピクセル値の小さいところでは直線であるが E 値が大きい場合で線量が少なくなると、フィルムの特性曲線の足部のように、直線性を失った。E 値が等しいとき、30, 80, 120 kV 共に同じ曲線となり、管電圧の違いによる特性曲線の形状に変化はなかった。Fig. 11 は E 値を 200 一定とし、L 値を変化させた結果で、

Fig. 9 Comparison of characteristic curves for three different kV measured by using inverse square method on a computed radiography system.

Fig. 10 Comparison of characteristic curves for different settings of E value measured by using inverse square method on a computed radiography system.

Fig. 11 Comparison of characteristic curves for different settings of L value measured by using inverse square method on a computed radiography system.

杜下氏によるものである。どのL値でも増感紙/フィルムに比べて直線性が良い。L値が1.0, 2.0ではピクセル値が255で飽和して一定値になっている。L値が3.3では、ピクセル値は255まで達せず、230付近で飽和する傾向に

Fig. 12 Comparison of characteristic curves measured by using time scale method and inverse square method on a computed radiography system.

ある。また、X線発生装置のタイマを利用した方法についても、距離法と同じ形状となった(Fig. 12)。このときの設定時間と蛍光量計で測定した露光量との関係はFig. 6に示している。

4. ま と め

DSA およびCR システムでは相反則不軌が生じないため、タイムスケール法が採用できるという利点があるが、タイマ精度を確認する必要があるし、DSA システムでは、マニュアル撮影ができない装置もあり、装置に適した方法をとる必要がある。

4.1 DSA システムの特性曲線

どの方法をとるにしても、開口窓寸法を極力小さくして、散乱線, I.I. の VG の影響を減少させなければならない。アルミニウム法では拡大撮影を行い、グレーデル効果を利用することも有効である。また、アルミニウム法は間接法であり、多くの測定系を通過するため実験誤差が大きくなる可能性があるので十分な注意が必要である。N.D. フィルタ法ではX線 TV カメラの入射光量を変化させているので、I.I. および光学レンズ系の特性が含まれていない。また、一般にタンデムレンズにはフォトマルの受光部が設置されているため、アイリスサイズを選択に注意する必要がある。堀田氏は乳房専用撮影装置 (DFP-50A 特, 東芝) の軟X専用 I.I. の特性曲線を、N.D. フィルタ法により測定し、本装置の入出力特性はリニアであると報告している。N.D. フィルタ法は、多くの装置に適用できる反面、フィルタ交換の度に電源を切る必要があり、手間がかかる。

4.2 CR の特性曲線

CR の特性曲線で、ピクセル値の大きいところの傾きの変化は、極端に強い入力光量を受けた場合の防止のた

めに、人為的に行っているものと考え。E値が大きいときの足部での非直線性は、E値を設定する時点でフォトマルの印加電圧を設定するため、E値が大きいとフォトマルの印加電圧が高くなり、暗電流の影響を受け、IPの発光強度とフォトマル電流量の直線性がなくなるものと思われる。

CRの特性曲線作成においても、距離法が適用できた。X線発生装置のタイマを利用したタイムスケール法についても、距離法と同じ結果が得られ、測定が簡便である。また、管電圧を変えても特性曲線の形状に変化はなかった。IPのフェーディングは8時間で25%程度といわれていたがNew TypeのIPでは20分で20%という千田らの報告⁹⁾もあり、扱いに注意を要する。また、自然放射線、残像の影響を考えて、使用前に十分画像を消去するべきである。

最後に、第一期「デジタル画像の物理評価検討班」班長の岐阜工業高等専門学校電気工学科の藤田広志先生、班員の国立循環器病センター放射線診断部の大西義隆氏、愛知県がんセンター病院放射線診断部の堀田勝平氏、山口大学医学部付属病院放射線部の杜下淳次氏に感謝致します。

文 献

- 1) Fujita H. Doi K. Giger ML, et al.: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 5. Characteristic curves of II-TV digital systems. *Med. Phys.*, **13**, 13-18, (1986).
- 2) 藤田広志, 土井邦雄: II./TV デジタル撮像系の特性曲線の測定. *医画情誌*, **4**, 31-35, (1987).
- 3) Fujita H and Doi K: Accurate measurements of characteristic curves of II-TV digital systems by use of aluminum stepwedge technique. *Med. Phys.*, **13**, 922-924, (1986).
- 4) 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) (委員会報告).
- 5) 金井一美, 大塚昭義, 杜下淳次, 他: DSA システムの特性曲線一測定法の比較一. *日放技学誌*, **44**, 1492-1496, (1988).
- 6) 山本義憲, 栗井一夫, 大竹英則, 他: 増感紙フィルムシステムのX線センチメートルについて. *日放技学誌*, **40**, 59-78, (1984) (委員会報告).
- 7) 上田克彦, 杜下淳次, 藤川津義, 他: コンピューテッドラジオグラフィの特性曲線の測定(1). *医画情誌*, **5**, 52-59, (1988).
- 8) 杜下淳次, 藤田広志, 坂本 清, 他: コンピューテッドラジオグラフィの特性曲線の測定(II). *医画情誌*, **6**, 25-33, (1989).
- 9) 千田浩一, 有馬宏寧: イメージングプレートの比較的短時間におけるフェーディング現象. *医画情誌*, **7**, 79-87, (1990).