Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による
増感紙/フィルムシステムの X 線センシトメトリー (吉田)

原 著

Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による
増感紙/フィルムシステムの X 線センシトメトリー

吉 田 彰

岡山大学医学部附属診療放射線技師学校

(論文受理 1987年 9 月16日)

(最終論文受理 1988年 2 月26日)

(Code No. 313, 332, 333)

Key words: Sensitometry, Characteristic curves, Radiographic screen/film systems

FILTER AND MODIFIED STEPWEDGE BOOTSTRAP
SENSITOMETRY IN MEDICAL RADIOGRAPHY

AKIRA YOSHIDA

School of Radiation Technology, Okayama University Medical School

(Article received ; Sep., 16, 1987)

Summary

Two new bootstrap methods for determining characteristic curves of radiographic screen/film systems are presented: filter bootstrap sensitometry and modified stepwedge bootstrap sensitometry. Both are intensity-scale sensitometries since the radiation intensity can be varied through use of a combination of inverse square and metal filters.

Characteristic curves obtained by these methods are compared with those from screen/film systems using inverse square sensitometry as a reference standard of accuracy. The precision of all three methods is better than $\pm 2\%$ with agreement among generally being within 3% over the useful density range.

By these bootstrap methods, it is possible to obtain characteristic curves agreeing well with those using the inverse square method for a relatively short distance, and make radiographic sensitometry practical and convenient at most medical institutions.

1. 結 言

増感紙/フィルムシステムの特性曲線を正確に求めることは、そのシステムの画質評価あるいは撮像システムの画像設計において、基本的に重要なことである。

増感紙/フィルムシステムの特性曲線の測定法は多くの著者によって報告されている¹⁾⁻⁸⁾。その中で、距離逆2乗法が標準的なセンシトメトリーとして、現在考えられている^{6), 8), 10)}。しかしながら、十分な濃度域の特性曲線を得ようとするれば、この方法では、焦点-フィルム間距離

1988年5月

(FFD)を4 m程度必要とする。病院のような臨床の場において、このような長い距離を取ることは一般に困難である。また、DSA装置、X線シネ装置等のように、構造的に長い距離を取ることが不可能な装置もある。

ところで、特性曲線の形が少なくとも診断用X線エネルギー範囲内では変化しない、ということが報告されている^{11),12)}。そこで、このことを積極的に利用して、比較的短い距離でセンシトメーターが行えるブーツストラップ法、filter bootstrap (FB) 法および modified stepwedge bootstrap (MSB) 法を、われわれは開発した。これら二つのブーツストラップ法、FB法とMSB法の精度と正確さを距離逆2乗法と比較した。

2. 使用機器および実験方法

2.1 使用機器

X線装置：KXO-15(K) (東芝)

X線管：DRX-191A (東芝)

増感紙/フィルムシステム：BM-3 (化成オプトニクス)/RX (富士)、G-4 (富士)/HR-L (富士)

自動現像機：VX-400 (小西六)

現像液：XD-90C, 34°C (小西六)

定着液：XF-C (小西六)

濃度計：PDA-15 (小西六)

線量計：192X, PM-05 probe (CAPINTEC)

コンピュータ：TOSBAC UX-300F (東芝)

2.2 距離逆2乗法

距離逆2乗則に基づくこのセンシトメーターはよく知られており^{2),7),9),10)}、他のセンシトメーターとの比較のために、標準センシトメーターとして用いた。Fig. 1 および Fig. 2 に、使用したセンシトメーターの外観と概略図を示す。コリメータの前面に、厚さ3 mmで3 cm×3 cmの放射口を開けた鉛板を取り付けている。この放射口の前に、

Fig. 1 Intensity-scale sensitometer.

Fig. 2 Schematic diagram of the intensity-scale sensitometer.

フィルタを適宜入れ換えることのできるフィルタボックスを設けた。X線出力は線量計でモニタした。増感紙/フィルムシステムは、ビニール製の真空カセットに入れ、カセットホルダで保持される。このカセットホルダは、厚さ3 mm、幅50 cm×高さ78 cm、中心部に1 cm×2 cmのアーチャーを持つ鉛シールドの後ろで操作される。鉛シールドは、壁、床面などから1 m以上離れており、最大の距離でも、照射野が鉛シールドの大きさを越えることはない。オプティカルベンチの全長は4 mであり、FFDは35-350 cm、その間を、相対露光量の対数値で0.1刻みの21段階に目盛っている。FB法およびMSB法についても、このセンシトメーターを用いた。

2.3 Filter bootstrap 法

このセンシトメーターは距離逆2乗法の変法である。すなわち、2 m以内の比較的短い距離で、金属フィルタをX線放射口に取り付けて、距離逆2乗法を行う。このとき、全特性曲線の一部(高濃度部分)である1本目のセグメント曲線が得られる。次に、ある厚みの金属フィルタをさらに付け加えて、前回と同じ曝射条件、距離位置でX線曝射する。このようにして2本目のセグメント曲線が得られる。その場合、付加するフィルタの厚さを、2本目のセグメント曲線の高濃度部が1本目のセグメント曲線の低濃度部と重なるように選ぶ。数枚のフィルタを用いて、同様の操作を順次繰り返し、数本のセグメント曲線を求める。特性曲線の形がX線エネルギーによって変わらないならば、これらのセグメント曲線を露光軸に沿って平行移動し、1本の完全な特性曲線とすることができる (Fig. 3)。

2.4 Modified stepwedge bootstrap 法

厚さの異なる金属板(フィルタ)を20枚程度用意する。それぞれの金属板は、Kodakのstepwedge bootstrap法における金属ステップウェッジの各階段に相当するとみなされる。すなわち、各々の金属板は、従来のステップウェッジの各段をばらばらに切り離したものと考える。その1枚の金属板をX線放射口に取り付ける。あら

Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による 増感紙/フィルムシステムのX線センシトメトリー(吉田)

はじめ定めた距離 d_1 で、増感紙/フィルムシステムを曝射する。次に、同じ曝射条件で、別に定めた距離 d_2 ($d_1 < d_2$) で、増感紙/フィルムシステムの別の箇所を曝射する。順次、金属板の厚さを変えて、距離 d_1 および d_2 で、同様の曝射を繰り返す。すると、フィルム現像後、 d_1 の位置での濃度階段と d_2 の位置での濃度階段が得られる。距離 d_1 と d_2 は既知であるから、逆 2 乗則によって露光量比 R_E は計算できる。これら二つの濃度階段と露光量比 R_E を用いて、つなぎ合わせを行えば、特性曲線が得られることになる。

つなぎ合わせの方法は、Kodak の方法¹⁾ではなく、各金属板ごとに低露光量側の位置 (d_2) での濃度を横軸に、高露光量側の位置 (d_1) での濃度を縦軸に取った Bednar-ek 等の方法²⁾を用いた。すなわち、低露光量側の濃度の関数として高露光量側の濃度をプロットすると、Fig. 4A の曲線 C を得る。この図で、傾き 1 の直線 L は二つの濃度階段で濃度が等しい、つまり露光量が等しい (露光量比 1) 時の関係を表す。曲線 C と直線 L の濃度差を与えるものが、既知の露光量比 R_E である。曲線 C と直線 L によりつなぎ合わせを行えば、Fig. 4B となる。

2.5 データの収集と処理

距離逆 2 乗法、FB 法、MSB 法におけるデータ収集のための条件を Table 1 に示す。1 枚のフィルムに 3 手法による階段露光を行った。そのようなフィルム 4 枚を、増感紙/フィルムシステムごとに同時に現像し、標準ステップタブレット (小西六) で校正された濃度計で濃度値を読み取った。

読み取った濃度データは、われわれの作成したコンピュータプログラム「H-D 曲線処理システム」¹³⁾により処理した。距離逆 2 乗法の特性曲線、FB 法のセグメント曲線および MSB 法の濃度-濃度関係曲線の最小 2 乗法による多項式近似と FB 法および MSB 法のつなぎ合

せは、ディスプレイ上にグラフを表示させ、目で確認しながら行った。また、モニタ線量計による X 線出力の補正、特性曲線の正規化・平均化、ある濃度における相対露光量値の平均と標準偏差の計算、平均階調度の計算なども、全てこの処理システムにより処理した。

3. 結 果

Fig. 3 は、BM-3/RX 増感紙/フィルムシステム (レギュラーシステム) に FB 法を適用したものである。Fig. 3A は、3 枚の組み合わせフィルタ、0.5 mmCu+4 mmAl, 0.63 mmCu+4 mmAl, 1.5 mmCu+4 mmAl を用いて得られた 3 本のセグメント曲線である。一つのセグメント曲線は、距離 69.8 cm から 156.3 cm までの間を、相対露光量の対数値で 0.1 刻みとなるように 8 段階に目盛り、逆 2 乗法によって求められた。これらのセグメント曲線を平行移動して重ね合わせ、1 本の完全な特性曲線としたのが Fig. 3B である。

Fig. 3 Determination of a characteristic curve using the filter bootstrap method for the BM-3/RX screen/film system. A: Three segments of the curve using three filters. B: Entire characteristic curve obtained by making the segments overlap with each other.

BM-3/RX システムに、16枚の組み合わせフィルタ、0.11 mmCu+2 mmAl, 0.2 mmCu+2 mmAl, ..., 1.81 mmCu+2 mmAl を用いて、MSB 法によって得られた濃度-濃度関係曲線を Fig. 4A に示す。露光量比 R_E を

Table 1 Methods for obtaining data.

	Inverse square sensitometry	Filter bootstrap sensitometry	Modified stepwedge bootstrap sensitometry
kV	70	70	70
mA	50	100	100
sec	0.1	0.2	0.2
Filter (mm)			
Cu:	0.5	0.5, 0.63, 1.5	0.11-1.81
Al:	4.0	4.0	2.0
FFD (cm)	35.0-350.0	69.8-156.3	139.3, 175.4

Fig. 4 Determination of a characteristic curve using the modified stepwedge bootstrap method for the BM-3/RX screen/film system. A: Density-density relation curve with a log exposure ratio of 0.2. B: Characteristic curve obtained by bootstrapping A.

Fig. 5 Comparison of characteristic curves for the BM-3/RX screen/film system using the inverse square, filter bootstrap and modified stepwedge bootstrap methods.

決めるための距離は、139.3 cm と 175.4 cm の 2 点とし、これは露光量比の対数値 $\log R_E = 0.2$ に対応する。つなぎ合わせ処理後の特性曲線を Fig. 4B に示す。各点の横軸（露光量軸）の間隔が $\log R_E = 0.2$ である。

Fig. 5 に、BM-3/RX システムについて、FB 法、MSB 法および距離逆 2 乗法による特性曲線を示す。各手法と

Fig. 6 Comparison of characteristic curves for the G-4/HR-L screen/film system using the inverse square, filter bootstrap and modified stepwedge bootstrap methods.

Table 2 Relative exposure vs. optical density for the BM-3/RX screen/film system^{a), b)}

Optical density	Inverse square sensitometry	Filter bootstrap sensitometry	Modified stepwedge bootstrap sensitometry
0.20	0.204±0.007	0.209±0.009	0.203±0.007
0.40	0.429±0.007	0.432±0.004	0.437±0.005
0.60	0.590±0.005	0.592±0.007	0.597±0.006
0.80	0.738±0.002	0.741±0.006	0.742±0.005
1.00	0.885±0.000	0.887±0.003	0.887±0.003
1.20	1.039±0.000	1.038±0.001	1.039±0.001
1.40	1.204±0.002	1.199±0.006	1.202±0.005
1.60	1.386±0.005	1.373±0.012	1.382±0.009
1.80	1.591±0.011	1.567±0.018	1.586±0.013
2.00	1.829±0.020	1.793±0.026	1.823±0.017
2.20	2.113±0.035	2.071±0.040	2.108±0.021
2.40	2.468±0.056	2.434±0.065	2.462±0.029
Average gradient	2.59±0.02	2.63±0.05	2.62±0.03

a) Base plus fog densities in four measurements by the three methods were 0.15.

b) Each value represents the mean ± standard deviation of four measurements.

も 4 回の測定値の平均である。センチメートルの比較

Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による 増感紙/フィルムシステムの X 線センシトメトリー (吉田)

Table 3 Relative exposure vs. optical density for the G-4/HR-L screen/film system^{a),b)}.

Optical density	Inverse square sensitometry	Filter bootstrap sensitometry	Modified stepwedge bootstrap sensitometry
0.20	0.164±0.011	0.169±0.007	—
0.40	0.408±0.008	0.415±0.005	0.416±0.003
0.60	0.571±0.007	0.573±0.002	0.578±0.001
0.80	0.719±0.006	0.715±0.010	0.725±0.004
1.00	0.868±0.005	0.864±0.006	0.870±0.004
1.20	1.027±0.004	1.028±0.005	1.026±0.004
1.40	1.204±0.004	1.212±0.010	1.202±0.005
1.60	1.410±0.006	1.427±0.018	1.409±0.010
1.80	1.659±0.012	1.687±0.028	1.661±0.019
2.00	1.973±0.020	2.013±0.038	1.983±0.031
2.20	2.394±0.028	2.463±0.043	2.415±0.042
2.40	2.996±0.034	3.124±0.042	3.017±0.052
Average gradient	2.37±0.02	2.36±0.03	2.39±0.02

- a) Base plus fog densities in four measurements by the three methods were about 0.17.
b) Each value represents the mean ± standard deviation of four measurements.

のため、特性曲線は、ベース+カブリ濃度上1.00で相対露光量1.000になるように正規化している。三つのセンシトメトリーで得られた特性曲線はよい一致を示している。

Table 2 に、BM-3/RX システムについて、各手法のある濃度における相対露光量での平均値と標準偏差を示す。これは、各手法の精度と正確さを数値的に比較したものである。

Fig. 6 および **Table 3** は、G-4/HR-L 増感紙/フィルムシステム（オルソシステム）について、FB 法、MSB 法および距離逆 2 乗法を比較したものである。BM-3/RX システムと同様の結果が得られた。

4. 考 察

FB 法では、フィルタの数によって、用いる FFD と測定操作の複雑さが異なる。2 枚のフィルタを用いる 2 セグメント法^{a)} が最も簡単であるが、使用する FFD が長くなる（ただし、2 m 以内でも可能）。また、1 回のつなぎ合わせなので、それによる誤差が大きなカタヨリとなる可能性がある。このカタヨリを避けるためには、数多くのフィルタを用いて多くのセグメント曲線を作り、ランダム化すればよい^{a)}。結果として、FFD を短くすることに

Fig. 7 Comparison of characteristic curves for EM/RX screen/film system using the inverse square, filter bootstrap and kVp bootstrap methods.

もなるが、操作は繁雑となる。これらのことを考慮して、われわれは 3 セグメント法を採用した。

セグメント曲線の数に 10 本程度に増すと、Wagner 等の intensity-scale kVp bootstrap 法^{a)} と本質的に同じものとなる。彼らはフィルタではなく、管電圧を 44-95 kV まで変化させている。9 セグメントの FB 法と kVp bootstrap 法を、EM/RX 増感紙/フィルムシステムに適用して、得られた特性曲線を **Fig. 7** に示す。それらは互いによく一致しており、また、距離逆 2 乗法による特性曲線とも一致している。G-4/RXO-L システムについても、同様のことが言えた。

kVp bootstrap 法に比べると、FB 法は、管電圧を大きく変えることのできない装置にも適用可能という利点がある。

MSB 法では、ステップウェッジの各段を切り離しているため、従来の stepwedge bootstrap 法では避けられなかった、隣接するステップからの散乱線の影響を完全に取り除いている。また、放射口に取り付けた金属板から増感紙/フィルムシステムまで、かなりの距離を取ること（本実験では約 1 m）が可能のため、エアーギャップによって、金属板からの散乱線の影響も少なくできる。

MSB 法では、露光量比を決めるために 2 点の距離のみを使用する。ある距離 d_1 の位置で金属板の厚さを順次変えて X 線曝射し、次に距離を d_2 の位置に移動して、前

回と同様に一連の曝射をする方法が、普通は取られるであろう。しかしながら、この方法では、二つの距離合わせによる小さな誤差がつなぎ合わせによって累積され、その結果、特性曲線に無視し得ないカタヨリを与える恐れがある。それを避けるために、操作は複雑であるが、各金属板ごとに d_1 と d_2 の距離で2回曝射し、距離合わせの誤差をランダム化する方法を取った。

Table 2 より BM-3/RX システムについて、有効濃度域（ベース+カブリ濃度上0.25から2.00）辺りで、各センチメートルの精度を、平均露光量に対する標準偏差の割合（パーセント SD）で比較してみる。距離逆2乗法、FB 法、MSB 法のパーセント SD はそれぞれ1.7%、1.9%、1.2%以下となっている。また、FB 法、MSB 法の正確さを距離逆2乗法を基準として、同じく有効濃度域辺りで比較すると、FB 法では-2.0~0.7%、MSB 法では-0.3~1.9%以内で一致している。平均階調度では、パーセント SD は、距離逆2乗法、FB 法、MSB 法でそれぞれ0.8%、1.7%、1.3%、また、FB 法およびMSB 法の逆2乗法に対する違いはそれぞれ1.5%、1.2%である。

Table 3 により G-4/HR-L システムについては、パーセント SD は、距離逆2乗法、FB 法、MSB 法でそれぞれ1.9%、1.9%、1.7%以下であり、FB 法では-0.6~2.9%、MSB 法では-0.2~2.0%以内で逆2乗法に一致している。平均階調度では、そのパーセント SD は、距離逆2乗法、FB 法、MSB 法でそれぞれ0.7%、1.3%、0.7%、また、FB 法およびMSB 法の逆2乗法に対する違いは、-0.4%、0.8%である。

以上より、FB 法およびMSB 法は距離逆2乗法によく一致する特性曲線を与え、距離のあまり取れない装置または撮影室でも適用可能で、有用なセンチメートルであると考えられる。

5. 結 論

- 1) 距離逆2乗法、FB 法およびMSB 法の精度は、有効濃度域で、いずれも±2%以下である。
- 2) 有効濃度域内で、BM-3/RX システムについてはFB 法、MSB 法とも3%以内、G-4/HR-L システムについてはFB 法で3.5%、MSB 法で3%以内で距離逆2乗法一致している。どちらのシステムについても、FB 法およびMSB 法は2%以内で距離逆2乗法の平均階調度に一致する。
- 3) FB 法およびMSB 法は距離の大きく取れない装置あるいは撮影室でも適用可能であり、かつ、距離逆2乗法に匹敵するX線センチメートルが行える。

謝 辞

本研究にあたり、終始暖かい励まし、御指導を賜りました本学放射医学教室、青野要教授に心から感謝いたします。また、御協力して頂きました本学部附属病院中央放射線部、大川義弘氏、小橋利美氏、松島紀志夫技師長、ならびに本学医療技術短期大学部、山田俊治助教授に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sensitometric Properties of X-ray Films. Radiography Markets Division, Eastman Kodak Co., Rochester, N.Y., p. 27, undated.
- 2) Haus AG, Rossmann K: X-ray sensitizer for screen/film combinations used in medical radiography. *Radiology*, **94**, 673-678, (1970).
- 3) Hale J, Bloch P: Step-wedge sensitometry. *Radiology*, **128**, 820-821, (1978).
- 4) Vester MV, Barnes GT, King MK: Kilovoltage bootstrap sensitometry. *Radiology*, **136**, 785-786, (1980).
- 5) Bednarek DR, Rudin S: Comparison of modified bootstrap and conventional sensitometry in medical radiography. *Proc. SPIE*, **233**, 2-6, (1980).
- 6) Wagner LK, Haus AG, Barnes GT, et al.: Comparison of methods used to measure the characteristic curve of radiographic screen/film systems. *Proc. SPIE*, **233**, 7-10, (1980).
- 7) Wagner LK, Barnes GT, Bencomo JA, et al.: An examination of errors in characteristic curve measurements of radiographic screen/film systems. *Med. Phys.*, **10**, 365-369, (1983).
- 8) Yoshida A, Hiraki Y, Ohkawa Y, et al.: Modified inverse square sensitometry for the determination of the characteristic curve of radiographic screen/film systems. *Acta Med. Okayama*, **40**, 33-38, (1986).
- 9) Haus AG, Marsh L, Bencomo J, et al.: Sensitometry in medical imaging. *Proc. SPIE*, **127**, 76-86, (1977).
- 10) 山下一也, 山本義憲, 栗井一夫, 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).
- 11) Haus AG, Rossmann K, Vyborny CJ, et al.: Sensitometry in diagnostic radiology, radiation

**Filter Bootstrap 法と Modified Stepwedge Bootstrap 法による
増感紙/フィルムシステムの X 線センシトメトリー (吉田)**

- therapy, and nuclear medicine. J. Appl. Photogr. Eng., **3**, 114-124, (1977).
- 12) Vyborny CJ: H and D curves of screen/film systems: factors affecting their dependence on X-ray energy. Med. Phys., **6**, 39-44, (1979).
- 13) 三村誠一, 吉田 彰, 大川義弘, 他: H-D 曲線処理システム, 第27回日放技学会中国・四国部会発表, 宇部市, 山口, (1986).