原 著

CRにおけるプリサンプリングMTF測定法の検討

松尾 悟・小水 満・木田哲生・野間和夫・増田一孝

滋賀医科大学医学部附属病院放射線部

論文受付
1997年11月17日論文受理
1998年7月1日

Code No.522

1. はじめに

現在、増感紙フィルム系の解像特性の評価は、MTF (modulation transfer function)¹⁻³⁾による方法が有力な手段として用いられている。この方法を、デジタル画像の解像特性の評価に用いた場合、位置不変性が成り立たないために生ずるエリアシングエラー等⁴⁻⁶⁾の影響から、より正確なMTFが求められないことはすでに明らかである。そこで、デジタル画像の解像特性の評価⁷⁻¹²⁾には、藤田らが報告したプリサンプリングMTF (presampling MTF)を用いた評価方法が一般的に

用いられている。

プリサンプリングMTFのおもな測定方法には二つの方法がある。一つめの方法は、信号(ここでは、スリット像)がピクセルの中心に一致している配置(以下、センター配置)で得たLSF (line spread function)から計算したデジタルMTFと信号がピクセルとピクセルのちょうど間にある配置(以下、半ピクセルシフト配置)で得たLSFから計算したデジタルMTFからプリサンプリングMTFを求める方法である⁹⁾。

二つめの方法は、センター配置からセンター配置、

Examination of Presampling MTF Measurement Method in CT

SATORU MATSUO・MITSURU KOMIZU・TETSUO KIDA・KAZUO NOMA and KAZUTAKA MASUDA

Department of Radiology, Shiga University of Medical Science

Received Nov. 17, 1997; Revision accepted July 1, 1998; Code No. 522

Summary

The presampling modulation transfer function (MTF) of digital images generally uses a profile curve obtained in the direction perpendicular to the slit. There are two methods of obtaining the profile curve in the perpendicular direction, one that uses the line spread functions (LSFs) of the center and half-pixel-shifted alignments, and one that obtains the curve from a composite LSF calculated from the profile curves of many alignments. Although the presampling MTF-calculated composite LSF is more accurate, it takes longer to obtain. Therefore, we used a presampling MTF calculated from a profile curve of the slit image obtained in the parallel direction instead of the perpendicular direction. Because the LSF calculated from the profile curves of the parallel direction corresponds closely to the composite LSF, we can obtain an accurate curve by a much simpler method. The presampling MTF calculated from the composite LSF and the LSF obtained in the direction parallel to the slit image showed a deviation of less than 0.013.

Key words: Presampling MTF (modulation transfer function), Composite LSF (line spread function), Center alignment, Half-pixel-shifted alignment, Computed radiography (CR)

別刷資料請求先：〒520-0092

滋賀県大津市瀬田月輪町

滋賀医科大学医学部附属病院 放射線部 松尾 悟 宛

または、半ピクセルシフト配置から半ピクセルシフト配置までの間に含まれるスリット像に対して直交方向の多数の配置のLSFを合成し、見かけ上、サンプリング間隔の細かい1本のLSF(以下、合成LSF)を求めてプリサンプリングMTFを計算する方法である¹²⁾。

しかしながら、これらの方法でデジタル画像のプリサンプリングMTFを求める場合、一つめの方法では、センター配置や半ピクセルシフト配置のLSFを見つけることは思ったほど簡単ではないし、仮に、これらの配置を見つけたとしても、データ数が少ないときには正確なLSFとはいえない。また、二つめの方法ではセンター配置や半ピクセルシフト配置を見つけても、スリット像に対して直交方向の多数の配置のLSFを合成する必要がある。

Fig. 1 Tungsten slit image of 10 μm width.

Fig. 2 Profile curves obtained in the parallel direction for slit image. The composite LSF is made from regions A, B and C.

そこで、本論文では、プリサンプリングMTFを用いたCR (computed radiography) の解像特性の評価を行うにあたり、スリット像に平行な方向の1本のプロファイルカーブをLSFとする方法¹³⁾に着目し、この方法とスリット像に直交する方向の多数のプロファイルカーブから作成した合成LSFを用いる方法¹²⁾により求めたプリサンプリングMTFの精度について比較検討した。

2. 使用機器

X線発生装置	： シーメンス社製 POLYDOROS 100
タングステンスリット	： 10 μm ×3.0 cm
イメージングプレート	： ST-VA(四ツ切：マトリクス サイズ 1670×2010, 画素サ イズ 150 μm)
画像読み取り装置	： 富士メディカルシステム社製 FCR9000
画像処理装置	： 富士メディカルシステム社製 CR Station
解析ソフト	： C言語による自作プログラ ムソフト

3. 方法

3-1 LSFを合成する方法^{12, 13)}

レーザスキャナの読み取り方向(以下、読み取り方向)に対して垂直な方向のMTFを求めるときのスリット像の配置をFig.1に示す。この例では、スリット像に対して直交する方向において、多数の配置のプロファイルカーブを得るために、幅10 μm のタングステンスリットを2~3度傾けて配置し撮影を行った。藤田ら¹²⁾が示した方法では、スリット像に直交するいろ

んな配置でのプロファイルカーブから隣り合う二つのセンター配置(または、半ピクセルシフト配置)を見つけて、その間に存在するピクセル数からLSFの合成を行っている。一方、スリット像に平行な方向のプロファイルカーブにもプリサンプリングMTFを求めるうえで重要な情報が多く含まれている。例えば、センター配置や半ピクセルシフト配置などの位置情報、合成LSFを作成する際のサンプリング間隔などである。Fig.1に示すスリット像に対して、平行な方向のいくつかのプロファイルカーブをFig.2に示す。これらのプロファイルカーブのピークになる

点はセンター配置の位置を、また、隣り合うプロファイルカーブが交差する点(Y_{125} と Y_{126} , Y_{126} と Y_{127} , Y_{127} と Y_{128} など)は半ピクセルシフト配置の位置を示している。合成LSFの見かけ上のサンプリング間隔は、スリット像に平行方向の隣り合う2本のプロファイルカーブのピーク点を p_1 , p_2 としたとき、式(1)により容易に求めることができる。

$$\text{sampling interval} = \text{pixel size} / |p_1 - p_2| \cdots \cdots (1)$$

以上のように、スリット像に平行方向のプロファイルカーブには多くの情報が含まれている。これらのなかで最も重要なことは、スリット像に平行方向の1本のプロファイルカーブは、スリット像に直交する方向の多数の配置のプロファイルカーブから求めた合成LSFそのものを表しているということである。すなわち、Fig.3に示す合成LSFは、Fig.2に示すB領域(Y_{129} と Y_{128} の交差する点から Y_{128} と Y_{127} の交差する点)に含まれるスリット像に直交する方向の多数の配置のプロファイルカーブを組み合わせることにより作られている。また、プロファイルカーブの各数値を示したTableを見ると、スリット像に直交する方向の多数の配置のプロファイルカーブから求めた合成LSFは、B領域(X_{119} から X_{137} の範囲)に含まれる Y_{125} から Y_{131} のデータを①～⑦の順番につなぎ合わせたものになっている。ここで、スリット像に平行方向のプロファイルカーブ $Y_{125} \sim Y_{131}$ は同じ分布を示すので、スリット像に直交する方向の多数の配置のプロファイルカーブから求めた合成LSFは、スリット像に対して平行方向の1本のプロファイルカーブでも表すことが可能である。

3-2 実験方法

特性曲線(距離法)および $10\mu\text{m}$ のタングステンスリット像をアナログ系のMTF測定と同様な方法で作成した。このときタングステンスリットは、読み取り方向に対して2～3度の角度をつけて配置した。

CRのデータ取り込みモードはFIXモードを用い、S値(感度の指標)は200, L値(ダイナミックレンジの指標)は3.0, GT(階調タイプ)はAタイプ(線形階調)とした。画素サイズは $150\mu\text{m}$, データ処理はCRステーション上で行った。

読み込んだ画像データから、関心領域 256×256 を設定し、目的とするスリット像が含まれるように画像を切り出した(Fig.1)。この画像データから得られるスリット像のプロファイルカーブをFig.4に示した特性曲線により強度変換しLSFを求めた。求めたLSFに対して、関数近似や平滑化の処理を加えず、オリジナルデータのまま以下、各項の実験を行った。

3-2-1 合成LSFから求めるプリサンプリングMTFの精度の検討

切り出した画像に含まれるスリット像に対してFig.2に示すA, B, Cの異なる三つの領域において、スリット像に直交する方向の多数の配置のプロファイルカーブから合成LSFを求めた。異なる三つの領域で作成した合成LSFおよび、この合成LSFから求めたプリサンプリングMTFの平均値を真値とし、平均値からの偏差により測定値の精度を検討した。

3-2-2 スリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFの精度の検討

Fig.1に示したスリット像に対して平行方向の7本のプロファイルカーブ(Y_{125} から Y_{131})、およびこのプロファイルカーブから求めたプリサンプリングMTFの平均値を真値とし、平均値からの偏差により測定値の精度を検討した。

3-2-3 合成LSFとスリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFの比較

次に3-2-1で求めた合成LSFおよびプリサンプリングMTFを真値として、スリット像に対して平行方向のLSF、そして、このLSFから求めたプリサンプリングMTFとの偏差を求め比較検討を行った。

4. 結果

4-1 合成LSFから求めるプリサンプリングMTFの精度

スリット像の異なる位置A, B, Cにおいて求めた合成LSFをFig.5aに、これらの平均値からの偏差をFig.5bに示す。異なる位置で求めた合成LSFの偏差は、最大で0.05であった。合成LSFから求めたプリサンプリングMTFをFig.6aに、平均値からの偏差をFig.6bに示す。合成LSFから求めたプリサンプリングMTFの偏差は、最大で0.022であった。

4-2 スリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFの精度

スリット像に対して平行方向のLSFをFig.7aに、これらの平均値からの偏差をFig.7bに示す。スリット像に対して平行方向のLSFの偏差は、最大で0.05であった。スリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTFをFig.8aに、平均値からの偏差をFig.8bに示す。スリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTFの偏差は、最大で0.018であった。

4-3 合成LSFとスリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFの比較

スリット像に直交する方向の多数の配置のプロファ

Fig. 3 Composite LSF calculated from LSFs of many alignments.
The composite LSF is a composition of profile curves obtained in the parallel direction ($Y_{125} \sim Y_{131}$) for slit image.

Fig. 4 Digital characteristic curve of the CR system.
L and S values were kept at 2.2 and 200, respectively.

Table Procedure used in making a composite LSF.

X (n)	Y_{125}	Y_{126}	Y_{127}	Y_{128}	Y_{129}	Y_{130}	Y_{131}	
111	0	0	102	435	649	396	47	
112	0	0	117	456	647	375	36	
113	0	0	131	472	639	353	26	
114	0	0	149	491	633	332	18	
115	0	0	168	511	629	310	13	
116	0	0	187	529	622	290	0	
117	0	0	204	549	614	265	0	
118	0	0	216	563	603	242	0	
119	0	0	233	569	582	222	0	Shifted alignment
120	① 0	② 0	③ 256	④ 584	⑤ 565	⑥ 206	⑦ 0	
121	0	6	277	599	552	188	0	
122	0	18	298	612	535	171	0	
123	0	27	318	623	516	150	0	
124	0	35	338	630	493	129	0	
125	0	43	358	636	471	113	0	
126	0	56	377	642	454	95	0	Center alignment
127	0	65	397	645	434	81	0	
128	0	76	417	642	411	67	0	
129	0	81	433	639	389	49	0	
130	0	92	452	637	367	32	0	
131	0	106	474	636	346	20	0	
132	0	127	496	638	328	14	0	
133	0	144	515	636	309	8	0	
134	0	161	526	625	286	3	0	
135	0	178	541	615	265	0	0	
136	0	197	558	603	241	0	0	
137	0	217	571	587	221	0	0	Shifted alignment
138	0	231	583	576	198	0	0	
139	3	250	596	563	175	0	0	
140	9	273	610	550	157	0	0	
141	16	295	621	535	137	0	0	
142	22	316	628	519	120	0	0	
143	33	336	632	501	107	0	0	
144	51	359	637	481	96	0	0	
145	60	375	639	459	84	0	0	
146	72	392	639	433	69	0	0

Fig. 5 Precision of composite LSF.
 (a) Composite LSF made from different regions (A, B, C).
 (b) Deviation of the composite LSF.

Fig. 6 Precision of presampling MTF calculated from composite LSF.
 (a) Presampling MTF calculated from composite LSF made from different regions (A, B, C).
 (b) Deviation of the presampling MTF.

イルカーブから求めた合成LSFおよびスリット像に対して平行方向の1本のLSFをFig.9aに、これらのLSFの偏差をFig.9bに示す。二つのLSFの偏差は、最大で0.042であった。この二つのLSFから求めたプリサンプリングMTFをFig.10aに、これらのプリサンプリングMTFの偏差をFig.10bに示す。二つのプリサンプリングMTFの偏差は、最大で0.013であった。

5. 考 察

デジタル画像の解像特性の評価には、藤田らが報告したプリサンプリングMTFを用いる方法が一般的である。これには、二つの方法があり、いずれも、スリット像に対して直交方向のプロファイルカーブを用いてプリサンプリングMTFを求めている。二つの方法のなかでも、合成LSFから求めるプリサンプリングMTF

Fig. 7 Precision of LSFs obtained from profile curve obtained in the parallel direction for slit image.
 (a) LSFs obtained from profile curve obtained in the parallel direction for slit image.
 (b) Deviation of the LSF.

Fig. 8 Precision of presampling MTF calculated from profile curve obtained in the parallel direction for slit image.
 (a) Presampling MTFs calculated from LSF obtained in the parallel direction for slit image.
 (b) Deviation of the presampling MTF.

は、エリアシングの影響がなく精度も高いと考えられる。この合成LSFから求めるプリサンプリングMTFの精度を、スリット像に対して異なる三つの領域で作成した合成LSFおよび、合成LSFから求めたプリサンプリングMTFにより確かめた。三つの合成LSFとプリサンプリングMTFの平均値を求め、平均値からのバラツキを評価した結果、偏差はそれぞれ、最大で0.05、

0.022と小さく、合成LSFから求めたプリサンプリングMTFの信頼性の高さを示している。また、スリット像に対して平行方向のプロファイルカーブから求めたLSFおよび、このLSFから求めるプリサンプリングMTFの精度を確かめた。スリット像に対して平行方向の7本のLSFとプリサンプリングMTFの平均値を求め、平均値からのバラツキを評価した結果、偏差はそ

Fig. 9 Comparison of composite LSF and LSF obtained in the parallel direction for slit image.

(a) Composite LSF and LSF obtained in the parallel direction for slit image.

(b) Deviation of the LSF.

Fig. 10 Comparison of presampling MTF calculated from combined LSF and LSF obtained in the parallel direction for slit image.

(a) Presampling MTF.

(b) Deviation of the presampling MTF.

それぞれ、最大で0.05, 0.018と小さく、合成LSFから求めたプリサンプリングMTFと同様に、スリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFの値も信頼性は高いといえる。これらのLSFとプリサンプリングMTFについて比較すると、LSFの偏差は最大で0.042、プリサンプリングMTFでは、最大で0.013(2.0cycles/mmでのMTF値: 0.36)であっ

た。これは、合成LSFから求めるプリサンプリングMTF値を真値とするならば、スリット像に対して平行方向の1本のLSFから求めるプリサンプリングMTFは、真値に対して最大でも4%以内の誤差で求められており、測定誤差の範囲内と考える。しかし、この方法の問題点として藤田らは、長いスリットの必要性および像面の幾何学的な歪みや不均一性の影響を指摘し

ている¹³⁾。確かに合成LSFはスリット3mm程度の範囲で合成されるのに対して、スリット像に対して平行方向の1本のプロファイルカーブから求めるLSFは4～5倍(12～15 mm)のスリット長が必要となる(Fig.2)。したがって、この方法は、スリットの精度や、X線モトールおよび検出器系などの均一性に依存するところが大きい。今回の測定から、これらの問題点について考察すると、像面の幾何学的な歪みはLSFの対称性を見ることにより、また、均一性については7～8本のプロファイルカーブのピーク点におけるピクセル値や分布のバラツキから評価が可能である。

Fig.7aからスリット像に対して平行方向のプロファイルカーブから得られたLSFは、ほぼ対称であり像面の歪みは生じていない。また、Fig.2から7本のプロファイルカーブのピーク値には差はなく、Fig.7bから7本のLSFの差は最大で0.05であり像面の均一性についても問題はないと考えられる。以上の結果、CRのプリサンプリングMTFは、スリット像に対して平行方

向の1本のプロファイルカーブから求めたLSFにより求めることが可能であり、MTFの精度についても評価できるものである。

6. 結 語

CR画像の解像特性を評価する方法としては、プリサンプリングMTFやファイナルMTFなどが有効な方法として考えられている。今回われわれは、CRの解像特性をプリサンプリングMTFを用いて評価した。アナログ画像と同様な実験配置でCRの解像特性を求める場合には、5～6個のデータ数しかもたないセンター配置、半ピクセルシフト配置のLSFからプリサンプリングMTFを求めるよりは、エリアシングの影響を考える必要のない合成LSFから求める方が精度は高い。この合成LSFの作成には多大な労力を要するという欠点があるが、これはスリット像に対して平行方向のプロファイルカーブからLSFを求めることで解決できる。この方法を用いることにより、より迅速にプリサンプリングMTFの算出が可能となった。

参考文献

- 1) Rossmann K, Lubberts G and Cleare HM: Measurement of line spread-function of radiographic systems containing fluorescent screens. *J.Opt.Soc.Am.*, 54, 187-190, (1964).
- 2) Modulation transfer function of screen-film systems. *ICRU Rep.*, 41, 1-56, (1986).
- 3) Doi K, Holje G, Loo LN, et al.: 放射線写真のスクリーン-フィルム系のMTFとウィナーспекトル. *日放技学誌*, 39 (3), 240-270, (1983).
- 4) 畑川政勝, 井上 誠, 庄垣雅史, 他: デジタル系におけるMTFの検討(ファイナルMTFおよびオーバーオールエリアシング). *日放技学誌*, 48(11), 1932-1938, (1992).
- 5) 畑川政勝, 庄垣雅史, 工藤弘明, 他: DSA装置のファイナルMTFの測定. *日放技学誌*, 51(1), 24-28, (1995).
- 6) 藤田広志, 杜下淳次: デジタルラジオグラフィの画像評価. *放射線医療技術学叢書*(7), pp.68-71, 日本放射線技術学会, 京都, (1994).
- 7) 藤田広志, 坂本 清, 杜下淳次, 他: デジタルラジオグラフィの画像評価—方法と問題点, アナログ系との比較—. *日放技学誌*, 47(6), 832-876, (1991).
- 8) Giger ML and Doi K: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. I. Modulation transfer function. *Med. Phys.*, 11(3), 287-295, (1984).
- 9) 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(6), 713-720, (1985).
- 10) 藤田広志, 土井邦雄, Giger ML, 他: デジタルラジオグラフィのMTF解析—DSAシステムのプリサンプリングMTF—. *医画情誌*, 6(1), 1-18, (1989).
- 11) 松尾 悟, 大西英雄, 野間和夫, 他: プリサンプリングMTFを用いたシンチカメラの分解能の評価. *日放技学誌*, 53(4), 460-466, (1997).
- 12) Fujita H, Tsai Du-Yih and Itoh T: A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 11, 34-39, (1992).
- 13) 岡部哲夫, 瓜谷富三: 医用放射線科学講座14. 医用画像工学, pp.59-66, 医歯薬出版, 東京, (1997).

図表の説明

- Fig. 1 10 μ m幅のタングステンスリット像。
- Fig. 2 スリット像に対して、平行方向のプロファイルカーブ。
合成LSFは、A、B、C領域で作成。
- Fig. 3 多数の配置のLSFを使って作った合成LSF。
実際には、スリット像に対して平行方向のプロファイルカーブ(Y₁₂₅からY₁₃₁)の合成である。
- Fig. 4 CRシステムのデジタル特性曲線。
L値そしてS値は、それぞれ2.2, 200に固定。
- Fig. 5 合成LSFの精度。
(a)異なる領域(A, B, C)で作成した合成LSF。
(b)これらの合成LSFの偏差。
- Fig. 6 合成LSFから求めたプリサンプリングMTFの精度。
(a)異なる領域(A, B, C)で作成した合成LSFから求めたプリサンプリングMTF。
(b)これらのプリサンプリングMTFの偏差。
- Fig. 7 スリット像に対して平行方向のプロファイルカーブから求めたLSFの精度。
(a)スリット像に対してプロファイルカーブから求めた平行方向のLSF。
(b)これらのLSFの偏差。
- Fig. 8 スリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTFの精度。
(a)スリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTF。
(b)これらのプリサンプリングMTFの偏差。
- Fig. 9 合成LSFおよびスリット像に対して平行方向のLSFの比較。
(a)合成LSFおよびスリット像に対して平行方向のLSF。
(b)これらのLSFの偏差。
- Fig. 10 合成LSFおよびスリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTFの比較。
(a)合成LSFおよびスリット像に対して平行方向のLSFから求めたプリサンプリングMTF。
(b)これらのプリサンプリングMTFの偏差。
- Table 合成LSFの作成手順。