原 著

矩形波チャート像のフーリエ変換による
プリサンプリングMTFの新しい測定法

市川勝弘・國友博史・櫻井貴裕・大橋一也

杉山雅之・宮地利明¹⁾・藤田広志²⁾

名古屋市立大学病院中央放射線部

1) 金沢大学医学部保健学科

2) 岐阜大学大学院再生医科学専攻知能イメージ情報部門

論文受付

2002年3月15日

論文受理

2002年6月17日

Code No. 522

はじめに

増感紙-フィルム系における矩形波チャートによる modulation transfer function (MTF) の測定法には、コルトマンの補正式を用いたコントラスト法と、室らが報告したフーリエ変換による方法(以下、フーリエ法)^{1, 2)}がある。これらの方法をデジタルラジオグラフィの

プリサンプリングMTFの測定に適用する場合には、サンプリングに起因した次の問題がある。コントラスト法では、出力波形の山と谷の値を正確な位置でサンプリングした点が必ずしも得られなくなる³⁾(あるいは、エリアシング(折り返し)により高周波領域では歪みが生じて計測できなくなる)。また、フーリエ法では、

New Method of Measuring Presampling MTF by Fourier Transform of Square-wave Chart Image

KATUHIRO ITIKAWA, HIROSHI KUNITOMO, TAKAHIRO SAKURAI, KAZUYA OHASHI, MASAYUKI SUGIYAMA, MASAYOSHI IMAZAWA, TOSIAKI MIYATI¹⁾, and HIROSHI FUJITA²⁾

Central Department of Radiology, Nagoya City University Hospital

1) Department of Radiological Technology, School of Health Sciences, Faculty of Medicine, Kanazawa University

2) Division of Intelligent Image Information, Regeneration and Advanced Medical Science, Graduate School of Medicine, Gifu University

Received March 15, 2002; Revision accepted June 17, 2002; Code No. 522

Summary

We developed an easy method of measuring the presampling modulation transfer function (MTF) using the square wave chart in digital radiography. In this method, the presampling MTF is measured by Fourier transform of image data of the square wave chart. When Fourier analysis of the sampling data of a square wave is carried out, it is generally difficult to find the starting point and terminal point of the periodic data that should be extracted because of an insufficient number of data. To solve this problem, interpolated data were calculated by using a window function of the frequency domain. The aliasing error was avoided using a characteristic such that the square wave has discrete frequency components. The accuracy of this method was investigated by computer simulation study. Actual measurement of the presampling MTF by this method was also performed with a CR system. These studies indicated the effectiveness of our proposed method in terms of accuracy and ease of use.

Key words: Digital radiography, Modulation transfer function (MTF), Presampling MTF, Square-wave chart, Fourier transform

別刷資料請求先: 〒467-8602 名古屋市瑞穂区瑞穂町字川澄1
名古屋市立大学病院中央放射線部 市川勝弘 宛

波形を整数周期分だけ正確に得ることが困難になるだけでなく、周波数解析を行ううえで、エリシング誤差を考慮する必要性が生じる。

そこで本論文では、周波数解析による波形再生によりサンプリング点を補間する手法と、矩形波が離散的な特定の周波数成分のみを有することを利用したエリシング誤差の回避により、フーリエ法における問題を解決し、矩形波チャートを用いてプリサンプリングMTF測定を行う新しい方法を提案する。そして、その方法の精度をコンピュータによるシミュレーションとcomputed radiography(CR)を用いた実測により確認する。

1. 提案する法

1-1 波形再生

フーリエ法によるMTFの測定では、撮影された矩形波チャート像の波形データから1周期の整数倍の範囲だけの波形を正確に抽出して、その周波数解析を行い、MTFを求める。抽出したある周波数を持つ波形の周波数解析では、その周波数に相当する基本波の成分 M_n が最も高い成分として求められる。このとき、矩形波チャートの“直流成分”に相当する窓の部分から入力された矩形波の波高から求めた入力の基本波の成分を M_0 とすると、その M_n との比(M_n/M_0)をとって、MTFが求められる。このようなフーリエ法の解析処理において重要なことは、整数周期分の波形データを正確に抽出することである。そのためには、サンプリング定理を満たす最低限のサンプリング周波数(ナイキスト周波数の2倍)に対応するサンプリング点の数十倍のサンプリング点が得られていることが必要となる。

しかし、デジタル画像においては、矩形波の周波数によっては1周期に数点しかサンプリング点が得られず、そのデータから周期の始点や終点を判別できない状態となる。この問題を解決するために、次に説明する波形再生法を利用し、サンプリング間隔に対して十分に細かい間隔の波形データを計算により求める方法を本研究では用いた。

一般的に、サンプリング定理を満たしたサンプリングデータから元の波形を再生するには、サンプリングデータをフーリエ変換して、周波数領域においてナイキスト周波数以下が1、それ以上が0である窓関数を掛けて逆フーリエ変換することによって波形再生がなされる⁴⁾。こうして作成された波形は連続値に近く、周期の始点や終点の判別が容易となりフーリエ法に利用可能となる。この波形再生処理の概要をFig. 1に示す。

一方、逆にサンプリングの定理を満たさないデータに対して波形再生を行った場合には、再生された波形

が歪み、再生が不完全となる。なぜなら、この波形内では、ナイキスト周波数以上の周波数成分の波形がエリシングを起こし、これが低い周波数成分の波形に折り重なって含まれるためである。しかし、周期成分を抽出するフーリエ法では、歪みの程度が弱く周期が判別できるような波形であればこの波形再生法が利用可能である。本手法で用いる矩形波の周波数成分は基本波と高調波からなり、高調波は基本波の1/3以下の成分値となっている⁵⁾。この高調波成分は基本波の3倍以上の周波数に位置し、基本波に比べてプリサンプリングMTFによる減弱を多く受けるため、さらに成分値は小さくなり、エリシングにより折り返しても波形の周期性を著しく失わせることは少なく、本手法が適用可能である。

1-2 エリシング誤差の回避

フーリエ法は、矩形波チャートの画像データを周波数解析する手法であるため、この方法をデジタル画像に適用する場合には、測定目的となる基本波の周波数成分に対してのエリシングによる影響を考慮する必要がある。信号の持つ周波数成分が連続で、ナイキスト周波数以上に成分を持つ波形のサンプリングでは、ナイキスト周波数以上の成分の折り返しが影響して、エリシング誤差を含んだものとなる。しかし、波形の周波数成分が離散的である場合は、折り返しの影響も離散的となり、ナイキスト周波数以下への特定の周波数にのみ影響するだけとなる。本法で利用する矩形波は、周波数成分が離散的であるため、ナイキスト周波数以上の高調波が基本波上に折り返さないか、または、基本波上に折り返してもその高調波の成分値が低く、ほとんど影響しないような基本波を用いることによりエリシング誤差の回避が可能であり、矩形波チャートを用いてのプリサンプリングMTFの測定が可能となる。

Fig. 2にその例を示す。(a)は、ナイキスト周波数が5cycles/mmで、矩形波の基本周波数が2cycles/mmの場合の高調波の折り返しの様子を示している。折り返した第1高調波は、基本周波数とは離れた位置にあり、誤差要因とはならない。一方、(b)は基本周波数2.5cycles/mmの場合であり、第1高調波の折り返しは、ちょうど基本周波数と重なり、誤差要因となる。このようにナイキスト周波数以上の高調波成分が折り返した場合に前述の波形再生を行うと、再生された波形に歪みを生じるが、目的周波数に折り返しが影響しなければ、周波数解析により歪みの原因となった周波数成分を分離でき、目的周波数の成分値を計算することが可能である。

本邦において一般的に入手可能な矩形波チャートで

Fig. 1 Schematic diagram for the calculation of a waveform reproduction when satisfied the sampling theorem.

Fig. 2 Relations between the basic frequency element and aliased frequency elements in the case of basic frequencies of (a) 2.0 cycles/mm and (b) 2.5 cycles/mm.

あるKyokkoのtype 1 を例にして、サンプリング間隔が0.1mmの場合の各基本周波数と折り返し周波数の関係をTable 1に示す。この場合、基本波に影響する高調波を有するのは0.5cycle/mm, 1.0cycle/mmおよび2.5cycles/mmであるが、影響する高調波の倍数が大きくなり、周波数がプリサンプリングMTFの値が低い高周波に位置する場合は、振幅が十分に小さくなり、折り返しの影響は無視できる。よって、0.5cycle/mmと1.0cycle/mmの影響は無視することが可能である。しかし、2.5cycle/mmにおいては、第1高調波の影響が無視できなくなる可能性が考えられ、対象となる第1

高調波は7.5cycles/mmにあり基本波の1/3の波高値を持つ。この周波数におけるMTF値が0.05である場合の影響は $0.05/3 \div 0.017$ となり、0.01の場合は $0.01/3 \div 0.0033$ となるので、影響する高調波の周波数におけるプリサンプリングMTFの値により、誤差が決定される。

1-3 本手法における制限

前述した波形再生法およびエリアシング誤差の回避法は、いずれも矩形波の基本波がナイキスト周波数以上に位置する場合でも適用が不可能ではない。ナイキ

スト周波数以上の基本波はエリアシングによりナイキスト周波数以下の特定の周波数成分として波形再生され、振幅は保たれる。また、エリアシング誤差については、基本波と高調波ともに折り返すため、高調波が基本波に重なる現象は皆無となる。しかし、エリアシングにより低い周波数に変化して周期数が減少するため、矩形波チャートの構造によっては、解析に必要な周期数が確保できなくなる問題が生じる。整数周期分の抽出による周波数解析には、精度確保のためにも2ないし3周期以上のデータが必要とされ、周期数の減少によって、精度の低下や、解析不可能となる場合がある。例えばナイキスト周波数が5cycles/mmで、7.5cycles/mmを測定する場合、折り返しによって2.5cycles/mmの波形として観測されるが、周波数の変化のため、元の矩形波が10周期であっても周期数が約3周期に減少してしまう。更に、波形抽出の際には両側の1~2周期分を除外するため、周期数の不足により解析は不可能となる。

よって、本手法の実際の適用において、十分な精度を確保するためには、解析対象とする矩形波の周波数はナイキスト周波数以下に制限されることとなる。

2. シミュレーション

2-1 方法

矩形波チャートを模擬した10周期の矩形波の元データを0.005mm間隔にて8,192点分作成した。そして、このデータを入力信号として扱うことによって、デジタル画像のサンプリングを計算によりシミュレートした。受像面(アナログ成分)のMTF(CRにおいては、imaging plate(IP)のMTFに相当する)によるボケは、入力データをFFT(fast Fourier transform)処理により周波数成分に変換し、これに受像面のMTFとして設定した値を掛けて、逆FFT処理を行うことによりシミュレートした。サンプリングアパーチャは0.1mmとして20点(0.1mmは0.05mm間隔のデータの20点分であるため)の単純な平均処理によりシミュレートし、0.1mm間隔のサンプリングに相当する20点間隔のデータ抽出を行った。Fig. 3は、このシミュレーションにおけるサンプリングデータ算出までの計算過程の概要を示している。

抽出されたデータをFFT処理により周波数成分データに変換し、前述した波形再生のための窓関数による処理の後、逆FFT処理を行い、0.1mm間隔のサンプリングデータから、元のデータと同じ0.005mm間隔のデータを作成した。そして、得られたデータから整数周期分の波形を抽出し、MTFを計算した。設定した受像面のMTFは、ナイキスト周波数である5cycles/mmでほぼ0になるものと、ナイキスト周波数以上にも値

Table 1 Relation of fundamental frequency of square wave and aliased frequency. Assumed chart is Kyokko type1.

Basic frequency : f (cycles/mm)	Aliased frequency	Multiple of fundamental frequency
0.5	9.5	19 f
1.0	9.0	9 f
1.5	8.5	-
2.0	8.0	-
2.5	7.5	3 f
3.0	7.0	-
4.0	6.5	-

を持ち、10cycles/mmでほぼ0になるものを用いた。設定した受像面のMTF値と、サンプリングアパーチャのMTF(0.1mm幅の矩形のMTF)を掛け合わせた値がプリサンプリングMTFの真値となるため、計算結果と真値を比較することにより精度を評価した。

2-2 精度評価結果

真値と計算結果の比較をFig. 4に示す。(a)のようにナイキスト周波数でMTF値がほぼ0となるものでは、折り返しの誤差がないためシミュレーションでの計算結果は真値と0.002以内の誤差となり、ほとんど真値と一致し、本手法の解析方法が妥当であることが示された。(b)のようにナイキスト周波数以上にMTF値を持つ場合は、2.5cycles/mmでの影響が予測されたが、用いたMTFの設定では約0.02の誤差となった。

本法の精度に関与すると考えられる項目は、周波数領域の窓関数処理による波形再生の精度と、ナイキスト周波数以上の成分が折り返して目的周波数に重なる場合の影響である。波形再生については、今回のような8,192点のFFT演算を用いた場合、ほとんど精度に影響しないことが確認され、折り返しの影響は、高調波の周波数におけるMTF値に応じて、確実に現れることが確認された。

Fig. 4(b)の場合のような折り返しによる誤差を未然に防ぐため、2.5cycles/mmからどの程度離れた周波数を選択すれば誤差を軽減できるかを調べた結果をTable 2に示す。この結果は計算における周波数選択性を示しており、0.1cycle/mm離れた周波数2.4cycles/mmと2.6cycles/mmにおいてほとんど誤差を解消できた。よって、高調波による基本波への折り返しを未然に防ぐ場合、サンプリング間隔に応じた基本周波数の選択が必要となるであろう。しかし、既存のチャートを用いる場合、問題となる周波数は限られ、結果中に特異点として示されることになり、前後の値を用いて

Fig. 3 Schematic diagram for the sampling data calculation in the computer simulation.

の補間による修正が可能であると考えられる。

3. CR装置による実測

本手法によって、CRシステム(富士メディカルシステム社製CR装置FCR9000)のプリサンプリングMTFの実測を行った。使用したIPは、ST-Vの六切サイズ(サンプリング間隔:0.1mm)であり、矩形波チャートには、Kyokkoのtype Iを用いた。特性曲線の作成は、アルミステップウェッジを用いてブーツトラップ法によって行った。それぞれは管電圧60kV、附加フィルタに1mm厚のAlを使用して撮影し、矩形波チャートの照射野は、散乱線の影響を抑制するため、チャートの短軸方向を20mm幅に絞って撮影した。CRシステムの処理条件は、読み込みラチチュードであるL値を2.5に固定して、感度値であるS値を調節し、適切なデジタル値となるようにした。Fig. 5は、実際の矩形波チャートの画像から得られた2cycles/mmのサンプリングデータと波形再生法によって補間した波形を示したものである。図のように抽出するデータの始点と終点はコンピュータの画面上で適切かどうかを確認した。また、本手法の精度を確認するため、開口10 μ m幅のスリットを同じ管電圧にて撮影し、スリット法によって求めたプリサンプリングMTFの結果と比較した。スリットは約2度傾けて撮影し、実効サンプリング間隔を小さくする方法⁶⁾を用いた。両手法ともに、同一試料から測定位置を5回変えて計算し、その平均値よりMTFを算出した。

Fig. 4 MTF curves of the true value and calculated result in case of (a) a cut-off frequency of 5.0 cycles/mm and (b) a cut-off frequency of 10.0 cycles/mm.

Table 2 Comparison of true MTF values and calculated results around 2.5 cycles/mm

Frequency (cycles/mm)	True value (T)	Result (R)	T-R
2.3	0.765	0.763	0.002
2.4	0.748	0.747	0.001
2.5	0.724	0.740	-0.016
2.6	0.710	0.708	0.002
2.7	0.691	0.691	0

Fig. 6は、本手法とスリット法によるプリサンプリングMTFの測定結果を比較したグラフであり、Table 3にその測定値を示す。MTF値の差は最大で0.006となり、両手法ともに実験誤差内で非常によく一致した結果が得られた。また、Table 4は、スリット法とフーリエ法の精度を比較するため、2cycles/mmにおけるプリサンプリングMTFの5回の測定値を示し、平均値と標準偏差を求めたものである。平均値の差は、実験誤差内であり、また、データのバラツキも非常に小さく、5%水準で両手法には差の有意差は認められなかった。

Fig. 5 Actual sampled data (dark circle) of a square-wave chart image and waveform interpolated with waveform reproduction. The range of extracted data was checked on the computer screen.

Fig. 6 Presampling MTFs obtained by slit and Fourier methods in a CR system.

Table 3 MTF values obtained by slit and Fourier methods in a CR system.

Frequency (cycles/mm)	Slit method	Fourier method
0.5	0.875	0.876
1.0	0.672	0.675
1.5	0.499	0.504
2.0	0.363	0.368
2.5	0.266	0.262
3.0	0.199	0.204
4.0	0.118	0.121
5.0	0.076	0.078

Table 4 MTF values at 2 cycles/mm obtained by five different time measurements. Averages and standard deviations (SD) were calculated.

Measurements	Slit method	Fourier method
1	0.373	0.372
2	0.371	0.372
3	0.372	0.371
4	0.374	0.368
5	0.376	0.367
Average	0.373	0.370
SD	0.00192	0.00235

4. 考 察

エリアシング誤差の回避法には、入力信号に離散的な周波数成分を持つ信号を用いた方法が過去にいくつか報告されている。Sonesらは、ワイヤを一定間隔に複数配置して用いているが⁷⁾、チャートの構造が特殊であり、ワイヤと画素との位置関係により誤差が生じる問題を挙げている。Droeggeらは、矩形波チャートを用いて、信号の分散値からMTFを求める手法を報告しているが⁸⁾、矩形波の離散的な周波数成分を利用するという点において、われわれの提案する方法と類似している。彼らの方法の利点として、計算が簡単でフーリエ変換の計算を必要としないことを挙げているが、プリサンプリングMTFのカットオフ周波数と高調波の関係から扱う基本波と計算式を選択するため、複雑な計算操作が要求される。これに対してわれわれの提案する方法は、一つの基本周波数の矩形波からフーリエ変換処理により、その基本周波数におけるMTF値が計算できるため、既存のチャートを用いて多数の測定点を得られ、容易にMTFの測定が可能である。本法では

フーリエ変換計算を必要とするが、一般的なFFTまたはDFT(discrete Fourier transform)の演算処理の組み合わせ以外には、特別なデータ処理を必要とせず、高速なパーソナルコンピュータの普及した現在では何ら問題とならないと考える。

5. 結 語

矩形波チャートを用いたデジタルラジオグラフィにおけるプリサンプリングMTFの新しい測定法を提案し、シミュレーションとCR装置による実測によって、本手法がナイキスト周波数以下の測定に制限されるものの、精度が良くかつ簡便な有効的な方法であることを示した。スリット法は、一般的な病院施設での利用には問題があるが、矩形波チャートによる方法は撮影が容易であり、チャートも安価で入手しやすい。よって、本法は、スリット法による精度を保ち、かつ、より簡便な方法として優れた方法であると信ずる。

なお、本報告にて提案する矩形波チャートによるプリサンプリングMTFの測定法は、日本放射線技術学会の平成10年度デジタル画像評価の標準データ検討班にて、評価法の一つとして提案した。また、本研究で

用いた矩形波チャートおよびスリットの画像データと、本手法によるMTF測定プログラムは、以下のWebページにて公開している。

<http://www.owari.ne.jp/~kitikawa/swcmtf.html>

参考文献

- 1) 室 伊三男, 池田 秀, 原口信次, 他: 矩形波チャートを用いたフーリエ変換によるMTF測定. 日放技学誌, 50 (3), 379-385, (1994).
- 2) 室 伊三男, 山下高歴: 矩形波チャートを用いた周波数解析によるMTFの自動測定法とコントラスト法の比較. 日放技学誌, 55 (10), 1042-1048, (1999).
- 3) 畑川政勝, 井上 誠, 小川隆由, 他: 矩形波チャートを用いたデジタル系のMTF測定の検討. 日放技学誌, 53 (11), 1683-1690, (1997).
- 4) 中村尚五: ビギナーズデジタル信号処理, pp.23-48, 東京電機大学出版局, 東京, (1989).
- 5) 内田 勝, 金森仁志, 稲津 博: 放射線画像情報工学 (I), pp.167-172, 通商産業研究社, 東京, (1981).
- 6) Fujita H, Tsai D-Y, Itoh T, et al.: A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography, IEEE Trans. on Med. Imaging, 11 (1), 34-39, (1992).
- 7) Sones RA, and Barnes GT: A method to measure the MTF of digital x-ray systems, Med Phys, 11 (2), 166-171, (1984).
- 8) Droegge RT, and Rzeszutarski MS: An MTF method immune to aliasing, Med Phys, 12 (6), 721-725, (1985).

図表の説明

- Fig. 1 サンプル定理を満たすときの波形再生における計算処理過程の概要。
 Fig. 2 基本周波数と高調波の折り返し周波数の関係。
 (a) 基本周波数が2.0cycles/mmの場合。
 (b) 基本周波数が2.5cycles/mmの場合。
 Fig. 3 シミュレーションにおけるサンプリングデータ算出過程の概要。
 Fig. 4 真値とシミュレーション計算結果. 実線: 真値, 破線: 計算結果。
 (a) カットオフ周波数が5cycles/mmの場合。
 (b) カットオフ周波数が10cycles/mmの場合。
 Fig. 5 実際の矩形波チャートの画像からのサンプリングデータと, 波形再生処理を用いた補間による波形。
 Fig. 6 CRによる実測時のスリット法と本法のMTF測定結果の比較。

- Table 1 極光type 1チャートの場合の, 矩形波の基本周波数と折り返し周波数の関係。
 Table 2 2.5 cycles/mm付近におけるMTF値の真値と計算結果の比較。
 Table 3 CRによる実測のMTF値の比較。
 Table 4 2手法に対する2cycles/mmにおける5回のMTF値測定結果。