

□原著論文□

残像のある動画用 X 線検出器の DQE 測定に関する一考察

西木 雅行^{*} 飯沼 一浩^{**}

抄 録

動画用 X 線検出器の DQE (Detective Quantum Efficiency) 測定方法が IEC62220-1-3 で規定されている。この規定では、検出器の残像が DQE 測定結果に影響を与えることを防ぐために、残像の影響を正確に評価する方法を定めているが、そこでは、残像がある場合とない場合の空間的 NPS (Noise Power Spectrum) の比が、時間的 NPS の全周波数に渡る積分値の比に等しい、という重要な仮定が証明なしになされている。本稿では、一般に実用的に使用されている X 線検出器とその使用環境で満たされている 2 つの条件 (①時間軸方向の定常性と②空間内の一様性) を前提にして、この仮定の妥当性を検討した。まず、NPS の周波数空間における積分が分散に等しいことを利用することによって、空間内の分散値が時間軸方向の分散値に等しいことを理論的に示し、この仮定が成り立つことを証明した。次にコンピュータシミュレーションによって、誤差 0.4% の範囲内でこの仮定が正しいことを示した。

A discussion on the DQE measurement of X-ray detectors for dynamic imaging with image lag

NISHIKI Masayuki and IINUMA Kazuhiro

Abstract

The measurement procedure of the detective quantum efficiency (DQE) for detectors used in dynamic imaging is standardized in IEC62220-1-3. In this standard, a method for precisely evaluating the effect of image lag is described in order to prevent the lag from affecting DQE measurement results. In this method, however, it is implicitly assumed that the temporal noise variance is exactly the same as the spatial noise variance, which has not been proved yet. In this paper, to prove the assumption is valid, we introduced two conditions that the concerned detector be (1) stationary in the time domain and (2) uniform in the spatial domain, both being satisfied in practical X-ray detectors and in environment under which those detectors are used. First we proved theoretically in terms of equations, then confirmed experimentally by computer simulation within the limit of experimental error 0.4 %, that the assumption is valid under the above two conditions.

Keywords: DQE, X-ray detector (X線検出器), image lag (残像)

I. はじめに

X 線検出器の性能評価指標として従来から、①入出力特性、②解像特性、③ノイズ特性が一般的に使われてきたが、近年 X 線画像診断分野への平面検出

器 (Flat Panel Detector : FPD) の導入が飛躍的に進んだことを契機として、空間周波数の関数としての検出量子効率 (Detective Quantum Efficiency : DQE) が使われることが多くなってきた。その背景として、

受付日 : 2008 年 9 月 11 日 受理日 : 2008 年 12 月 15 日

^{*}国際医療福祉大学大学院 医療福祉学研究科 保健医療学専攻 放射線・情報科学分野 研究生
Division of Radiological Sciences, Health Sciences, Research Institute of Health and Welfare Sciences, Graduate School, International University of Health and Welfare
E-mail : masayuki.nishiki@toshiba.co.jp

^{**}国際医療福祉大学 保健医療学部 放射線・情報科学科 教授
Professor, Department of Radiological Sciences, School of Health Science, International University of Health and Welfare

デジタル画像では階調処理によって信号のコントラストを高く表示することが一般的に行われるようになってきたことが挙げられる。階調処理が自由に行われる環境では、信号の大きさよりも信号対ノイズの比 (Signal to Noise Ratio : SNR) がより重要である。DQE は、入力 SNR をいかに低下させずに出力に伝達するかを表す指標であることと、画像の線形フィルタ処理に対して不変であることが、近年 DQE が重視されるようになってきた理由である。

DQE は、その使用目的に応じて様々な形で表現されるが (Dainty と Shaw 1974)、最も一般的には、変調伝達関数 (Modulation Transfer Function : MTF) とノイズパワースペクトル (Noise Power Spectrum : NPS) を使って次式で与えられる (Dobbins III 2000)。

$$DQE(u, v) = \frac{q^2 \cdot MTF(u, v)^2}{SNR_m^2 \cdot NPS(u, v)} \quad (1)$$

ここで、 (u, v) は 2 次元周波数空間の座標であり、 q は $NPS(u, v)$ を測定するときの検出器出力の平均値である。また、 SNR_m は検出器の単位面積に入射する X 線粒子の統計的変動に起因する入力 SNR を表し、空間周波数によらず一定であり、 SNR_m^2 は検出器に入射する X 線量に比例する。 SNR_m^2 を始めとするそれぞれの物理量には様々な測定方法が存在するので、測定方法を統一させるための試みが国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission : IEC) で続けられてきた。DQE の測定方法を定めた IEC 規格では、 $MTF(u, v)$ はエッジ法、 $NPS(u, v)$ は 2 次元フーリエ変換法を使うことが決められており、 $NPS(u, v)$ は次式で定義される。

$$NPS(u, v) = \frac{1}{S} |F(u, v)|^2 \quad (2)$$

ここで、 $F(u, v)$ は画像のノイズ成分のフーリエ変換、 S は画像の面積である (内田ら 1980)。

SNR_m^2 は、個々の施設で正確に測定することは難しいので、これを線量と線質から決まる定数として予め計算しておき、この計算された値を各施設で

共通に使うことを IEC 規格では規定している。

DQE 測定方法に関する IEC 規格は以下の 3 部から成り、それぞれ取り扱う検出器の種類が異なる。

- ① IEC62220-1 : 静止画用検出器
- ② IEC62220-1-2 : マンモグラフィ用検出器
- ③ IEC62220-1-3 : 動画用検出器

このうち本稿では動画用検出器の DQE 測定について検討する。動画用の検出器では、どの検出器にもある程度は残像が存在するので、残像をどう扱うかという独自の配慮が必要となる。IEC62220-1-3 では、静止しているエッジを使って MTF を測定することを規定しているので、残像は MTF 測定結果に影響を与えない。したがって、従来から実施されているような固定したエッジ (Samei ら 1998) を使う方法が MTF 測定にそのまま利用できる。しかし残像は、NPS には大きな影響を与える。残像があると、過去のフレームの信号の一部が現フレームに加算されるので、連続する画像フレーム間に相関 (correlation) が発生し、同じ検出器で残像がない場合に比べてノイズが小さく測定される。残像が極めて大きいような極端な場合には、(1) 式の分母である $NPS(u, v)$ が著しく小さくなるので、 $DQE(u, v)$ が 1 を超えてしまうこともある。このような事情により、動画用検出器の正確な DQE を求めるには、(1) 式で残像の影響がない場合の NPS を用いる必要があると考えられている。しかし実際の動画像には残像が含まれているので、残像がある画像から残像がない場合の NPS を推定しなければならない。このために IEC62220-1-3 では、以下のような方法を規定している。

以後、残像の影響がない場合の NPS を $NPS(u, v)$ 、残像がある場合の NPS を $NPS_{lag}(u, v)$ とする。

$NPS_{lag}(u, v)$ から $NPS(u, v)$ を求めるために、以下の $r(u, v)$ を求める。

$$r(u, v) = \frac{NPS_{lag}(u, v)}{NPS(u, v)} \quad (3)$$

残像がなければ $r(u, v) = 1$ であるが、通常は残像が

あるので $r(u, v) \leq 1$ となる。 $r(u, v)$ は一般に空間周波数 (u, v) の関数であるが、残像に空間周波数依存性がなければ、 $r(u, v) = r$ (定数) となる。通常の X 線検出器においては、残像はどの空間周波数においても等しい割合で発生するので、以後 $r(u, v) = r$ とする。IEC 規格では、Menser ら (2005) が提案した方法に基づいて、 r を次式のように、空間的 NPS ではなく時間的 NPS から計算することを定めている。

$$r = \frac{\int_{-f_N}^{f_N} NPS_{lag}(f) df}{\int_{-f_N}^{f_N} NPS(f) df} \quad (4)$$

ここで f と f_N はそれぞれ、時間的な周波数とナイキスト周波数を表し、 $NPS_{lag}(f)$ と $NPS(f)$ はそれぞれ、残像がある場合とない場合の時間的な NPS を表す。時間的な NPS は空間の場合と同様に次式で定義される。

$$NPS(f) = \frac{1}{K} |F(f)|^2 \quad (5)$$

ここで、 $F(f)$ は画素値の時間軸方向の変動分のフーリエ変換、 K は画素が含まれる時間である。実際に r を求めるには、まず $NPS(u, v)$ を評価したい一定線量の X 線を照射し続けて、一連の画像を記録しておくことから始める。この連続画像から時間的なスペクトル $NPS_{lag}(f)$ を計算する。 $NPS_{lag}(f)$ は、図 1 に示すように画素 (i, j) 毎に時間軸方向の画素値列を抜き出してフーリエ変換を実行すれば計算できる。残像がなければこれらの画素値は時間軸方向に無相関であり、図 2 に示す $NPS(f)$ のようにスペクトルは白色になる。残像が存在する場合には時間軸方向に相関があるので、白色とはならない。 $NPS_{lag}(f)$ は実測できるので、(4) 式にしたがって r を求めるには $NPS(f)$ を求めればよいことになる。

$NPS(f)$ を求めるには、 $NPS(0) = NPS_{lag}(0)$ であることを利用する。この式が成り立つ理由は、定常状態では信号量が時間的に一定であり、したが

って NPS の直流成分は無相関の場合と相関がある場合とで変わらないからである。 $NPS(0)$ が求まれば、 $NPS(f)$ は白色であるから、

$$NPS(f) = NPS(0) = NPS_{lag}(0) \quad (6)$$

であり、(4) 式は次のようになる。

$$r = \frac{1}{2f_N \cdot NPS_{lag}(0)} \int_{-f_N}^{f_N} NPS_{lag}(f) df \quad (7)$$

このようにして、 $NPS_{lag}(f)$ の測定値から r が求まる。 r が求まれば、(3) 式にしたがって、実測された $NPS_{lag}(u, v)$ から $NPS(u, v)$ を求めることができる。(7) 式に基づいて実際に r を計算するには、測定誤差をできるだけ小さくするために、 $NPS_{lag}(f)$ は少なくとも 256×256 画素についての平均を取らなければならない。

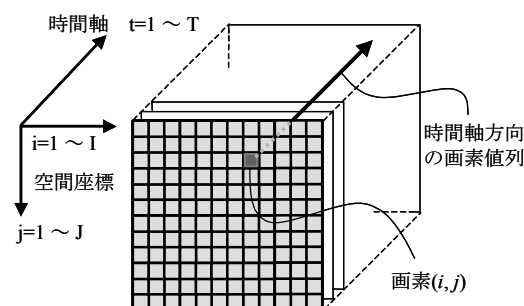


図1 対象とする画像の集合

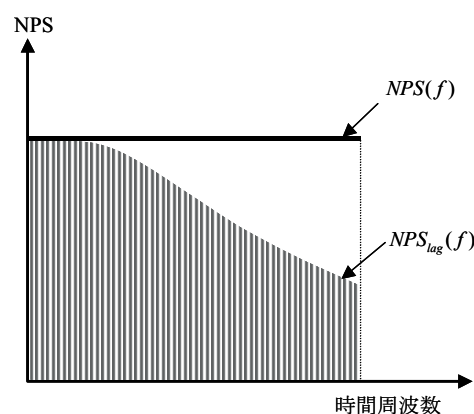


図2 時間的な NPS

残像がある場合の NPS を $NPS_{lag}(f)$ 、残像がない場合の NPS を $NPS(f)$ で示した。

IEC62220-1-3が規定している方法は以上であるが、この方法の前提として、(3)式の空間的NPSの比が(4)式の時間的NPSの積分値に等しいという重要な仮定がなされている。この仮定は、2次元空間内にも時間軸方向にも相関がない場合、すなわち全ての方向でスペクトルが白色である等方的な3次元空間の場合には(3)式と(4)の両方で $r=1$ となり、成り立つことは自明である。しかし、2次元空間内にも時間軸方向にも相関が存在する実用的な検出器の場合にも成り立つことは、未だ証明されていない。本研究では、この仮定がある特定の条件の下で成り立つことを、理論及びコンピュータシミュレーションにより証明することを目的とする。

II. 理論

r は (u, v) によらず一定であり、したがって(3)式の分子と分母をともに同一区間で積分してもその比は変わらないことと、一般にノイズ分散がNPS積分値に一致する(内田ら1980)ことを考慮すれば、(3)式は以下のように変形される。

$$r = \frac{NPS_{lag}(u, v)}{NPS(u, v)} = \frac{\int_{-u_N}^{u_N} \int_{-v_N}^{v_N} NPS_{lag}(u, v) du dv}{\int_{-u_N}^{u_N} \int_{-v_N}^{v_N} NPS(u, v) du dv} \quad (8)$$

$$= \frac{\sigma_{s, lag}^2}{\sigma_s^2}$$

ここで $\sigma_{s, lag}^2$ および σ_s^2 はそれぞれ、残像がある場合とない場合の2次元実空間内の分散である。以後、「空間」という語は2次元実空間の意味で用いる。

図1に示すような複数フレームの画像を考える。1枚の画像の画素数は $I \times J$ 画素とし、画像の枚数は T 枚とする。これらの画像は、一定強度のX線を照射開始してから十分長い時間が経過し残像の影響が定常的になった状態において収集されたものとし、且つ、照射されたX線強度は空間内で一様であるとする。すなわち、次の2つの条件のみを前提とし、空間内や時間軸方向の相関の有無は条件としない。

条件①：時間軸方向の定常性

条件②：空間内の一様性

時刻 t の画像における空間座標 (i, j) の画素値を $P_{ijt}(i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J; t=1, 2, \dots, T)$ とする。ここで、 P_{ijt} が属する母集団内の真の画素平均値を P 、真の分散値を σ^2 とする。同様に、 P_{ijt} が属する母集団内で時刻 t における空間内の真の画素平均値を $P(t)$ 、真の分散値を $\sigma^2(t)$ 、空間座標 (i, j) における時間軸方向の真の画素平均値を $P(i, j)$ 、真の分散値を $\sigma^2(i, j)$ と置く。

条件①によって $P(t)$ は時刻 t に依存せず一定なので、

$$P(t) = P \quad (9)$$

となる。 $\sigma^2(t)$ は、時刻 t における $(P_{ijt} - P(t))^2$ の期待値として、次式のように表される。

$$\sigma^2(t) = E_{i,j}[(P_{ijt} - P(t))^2] = E_{i,j}[(P_{ijt} - P)^2]$$

$$= \lim_{I, J \rightarrow \infty} \frac{1}{IJ} \sum_{i,j=1}^{I,J} (P_{ijt} - P)^2 \quad (10)$$

ここで $E_{i,j}[\cdot]$ は、 P_{ijt} が属する母集団内で時刻 t における空間座標 (i, j) 方向についての期待値を表す。

サンプル数が有限の $P_{ijt}(i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J)$ から求めた値は時刻 t における真の分散値ではないので、(10)式では (i, j) の範囲を無限大まで拡張した。条件①によって $\sigma^2(t)$ は時刻 t に依存せず一定なので、(10)式は以下のように書き換えられる。

$$\sigma^2(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sigma^2(t)$$

$$= \lim_{I, J, T \rightarrow \infty} \frac{1}{IJT} \sum_{i,j,t=1}^{I,J,T} (P_{ijt} - P)^2 \quad (11)$$

$$= E_{i,j,t}[(P_{ijt} - P)^2] = \sigma^2$$

ここで $E_{i,j,t}[\cdot]$ は、 P_{ijt} が属する母集団内の期待値を表す。

同様に、条件②によって $P(i, j)$ は空間座標 (i, j) に依存せず一定なので、

$$P(i, j) = P \quad (12)$$

$\sigma^2(i, j)$ は、空間座標 (i, j) における $(P_{ijt} - P(i, j))^2$ の期待値として、次式のように表される。

$$\begin{aligned}\sigma^2(i, j) &= E_t[(P_{ijt} - P(i, j))^2] = E_t[(P_{ijt} - P)^2] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{ijt} - P)^2\end{aligned}\quad (13)$$

ここで $E_t[\cdot]$ は、 P_{ijt} が属する母集団内で空間座標 (i, j) における t 方向（時間軸方向）についての期待値を表す。

条件②によって $\sigma^2(i, j)$ は空間座標 (i, j) に依存せず一定なので、(13)式は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}\sigma^2(i, j) &= \lim_{I, J \rightarrow \infty} \frac{1}{IJ} \sum_{i, j=1}^{I, J} \sigma^2(i, j) \\ &= \lim_{I, J, T \rightarrow \infty} \frac{1}{IJT} \sum_{i, j, t=1}^{I, J, T} (P_{ijt} - P)^2 \\ &= E_{i, j, t}[(P_{ijt} - P)^2] = \sigma^2\end{aligned}\quad (14)$$

(11)式と(14)式より、次式が成り立つ。

$$\sigma^2(t) = \sigma^2(i, j) = \sigma^2\quad (15)$$

結局、条件①と②が満たされていれば、空間内や時間軸方向の相関の有無にかかわらず、「時間軸方向のノイズ分散値と空間内のノイズ分散値は等しい」ことが示されたことになる。

すなわち、(15)式から以下の2式が成り立つ。

$$\sigma_s^2 = \sigma_t^2\quad (16)$$

$$\sigma_{s, lag}^2 = \sigma_{t, lag}^2\quad (17)$$

ここで $\sigma_{t, lag}^2$ および σ_t^2 はそれぞれ、残像がある場合とない場合の時間軸方向の分散である。(16)式と(17)式を(8)式に代入すれば、

$$r = \frac{\sigma_{s, lag}^2}{\sigma_s^2} = \frac{\sigma_{t, lag}^2}{\sigma_t^2} = \frac{\int_{-f_N}^{f_N} NPS_{lag}(f) df}{\int_{-f_N}^{f_N} NPS(f) df}\quad (18)$$

となって、(3)式と(4)式の等しいことが証明された。

III. コンピュータシミュレーションによる検証

II章で数式により証明した結果を検証するために、コンピュータを使ったシミュレーションを行った。

1. 方法

シミュレーションに使用する画像は、次の3段階の手順によりコンピュータ上で作成した。

1) 空間内でも時間軸方向にも無相関の画像を 128

枚作成した。

これらの画像は、コンピュータ内で正規分布に従う乱数(平均値: 2000, 標準偏差: 250)を発生させることによって作成した。画素数は 66×66 である。このグループを以後「原画像」と呼ぶ。

2) 原画像の全てに、低域通過型の空間フィルタを適用した。フィルタサイズは 3×3 で、実際の係数を図3に示す。これによって空間内には相関が発生するが、時間軸方向には依然として無相関のままである。これらの画像は、空間的にぼけてはいるが、残像のない画像である。このグループを以後「空間フィルタ適用画像」と呼ぶ。

0.175	0.240	0.175
0.240	1.000	0.240
0.175	0.240	0.175

$\times 0.376$

図3 低域通過型の空間フィルタ係数

3) 空間フィルタ適用画像の各画素に、低域通過型の次式で定義される巡回型時間フィルタを適用した。

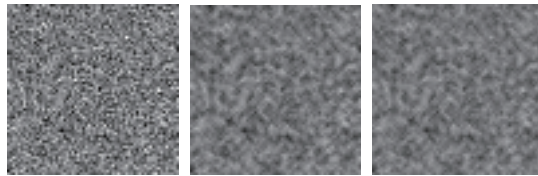
$$\left. \begin{aligned}Q'_t(i, j) &= Q_t(i, j) & \text{if } t = 1 \\ Q'_t(i, j) &= k \times Q_t(i, j) \\ &\quad + (1 - k) \times Q'_{t-1}(i, j) & \text{if } t \geq 2\end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここで、 $Q'_t(i, j)$ 、 $Q_t(i, j)$ はそれぞれ、時刻 t における時間フィルタ適用後画像と適用前画像を表す。実用的な検出器で想定される残像量に匹敵する値として、 $k = 0.9$ とした。これによって空間内でも時間軸方向にも相関のある画像が 128 枚得られた。これらの画像は、空間的にぼけていて且つ残像も含まれる画像で、一般に実用的に使用されている X 線検出器で得られる画像を模擬していることになる。このグループを以後「空間時間フィルタ適用画像」と呼ぶ。

図4-1にこれらの画像例を示した。図には、画像中心の 64×64 画素分のみ表示してある。図4-1(a)(b)(c)はそれぞれ、原画像、空間フィルタ適用画像、空間時間フィルタ適用画像である。全部で 128

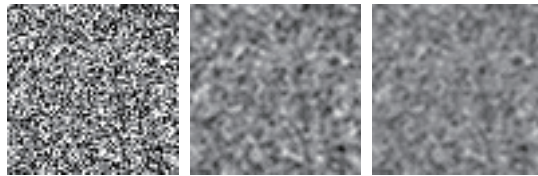
枚の画像のうち、図には128枚目の画像を掲げた。

図4-1では時間フィルタの効果がわずかであり視覚的にわかりにくいので、図4-2に $k=0.7$ の場合の画像を参考のために掲げた。全部で128枚の画像のうち、以後の解析に使うのは後半の64枚(65枚目から128枚目)に限定した。この理由は、時間フィルタ適用開始から十分時間を取ることによって時間軸方向の定常性を確保するためである。



(a) 原画像 (b) 空間フィルタ適用画像 (c) 空間時間フィルタ適用画像

図4-1 コンピュータシミュレーションで使った画像例 ($k=0.9$)



(a) 原画像 (b) 空間フィルタ適用画像 (c) 空間時間フィルタ適用画像

図4-2 コンピュータシミュレーションで使った画像例 ($k=0.7$)

上記の3グループの画像のうち、空間フィルタ適用画像と空間時間フィルタ適用画像に対して、空間的なNPSと分散、時間的なNPSと分散をそれぞれ計算した。

空間的なNPS(u, v)は、各画像の中心部 64×64 画素に2次元フーリエ変換を施し、これを時間軸方向について64枚分平均して求めた。一方、空間内のノイズ分散値は、前節の理論式のように母集団の真の分散値を用いることはできないので、まず各時刻 t において次式で表される不偏分散を計算した。

$$s^2(t) = \frac{1}{IJ-1} \sum_{i,j=1}^{I,J} (P_{ijt} - \overline{P(t)})^2 \quad (20)$$

ここで $\overline{P(t)}$ は時刻 t における P_{ijt} の標本平均である。

$$\overline{P(t)} = \frac{1}{IJ} \sum_{i,j=1}^{I,J} P_{ijt} \quad (21)$$

時間の異なる64枚全てについて(20)式より不偏分散を求め、これらを平均して空間内のノイズ分散値の実験値とした。この際に得られた64個の不偏分散値は一定ではないので、これら不偏分散値の間のばらつき(標準偏差)を実験誤差とした。

時間的なNPSは、64枚の各画像の中心部 64×64 個の各画素について、64点の時間軸方向データをフーリエ変換し、これを全画素(64×64)に渡って平均することにより求めた。一方、時間軸方向の分散値は、時間軸方向の各データ列について計算した不偏分散を、全画素(64×64)に渡って平均することにより求めた。不偏分散の計算は、(20)(21)式に準じて実施した。この際、 64×64 個の各画素間における不偏分散のばらつき(標準偏差)を実験誤差とした。

不偏分散と真の分散との間には、一般に $E(s^2) = \sigma^2$ という関係がある(東京大学教養学部統計学教室1991)ので、時間軸方向のノイズ分散値と空間内のノイズ分散値が等しいかどうかの確認は、不偏分散同士を比較することによって実施した。

2. 結果

空間的なNPSを計算した結果を図5に示した。図5(a)(b)はそれぞれ、空間フィルタ適用画像と空間時間フィルタ適用画像についての空間的なNPSである。空間周波数軸はそれぞれ、サンプリング周波数(u_s, v_s)で規格化してある。すなわち、空間周波数0.5はナイキスト周波数に対応する。空間的に等方的なフィルタをかけたので、両者とも回転対称なスペクトル形状を示している。このスペクトル形状を細かく観察すると、両者の比は周波数によらず一定であることがわかる。これは、(3)式の r が空間周波数に依存しないことに対応している。また、空間的なNPSについて u 方向のプロファイル(図6)

を見ると、 r が空間周波数に依存しないことは一層はっきりと確認できる。図7は、時間的なNPSを図示したものである。図中、 f_s は f 方向のサンプリング周波数である。残像がない空間フィルタ適用画像

の時間的NPSは白色である一方、残像を考慮した空間時間フィルタ適用画像の時間的NPSには、画像フレーム間相関を反映して図2で示したような周波数特性が見られる。

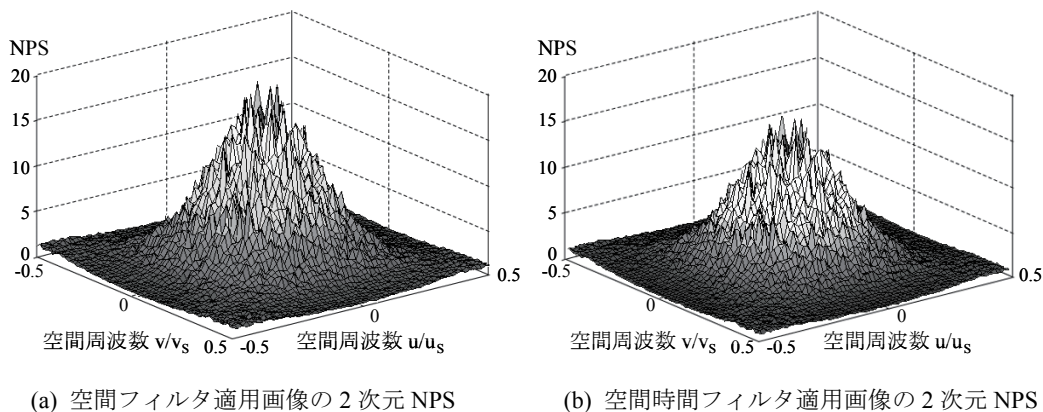


図5 空間的な2次元NPS

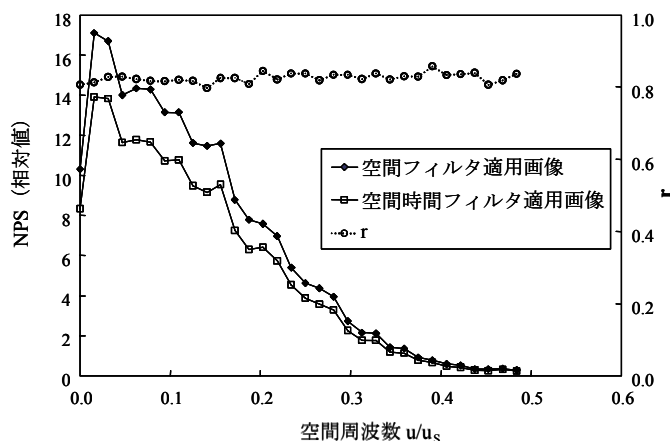


図6 空間的2次元NPSの u 軸方向プロファイル

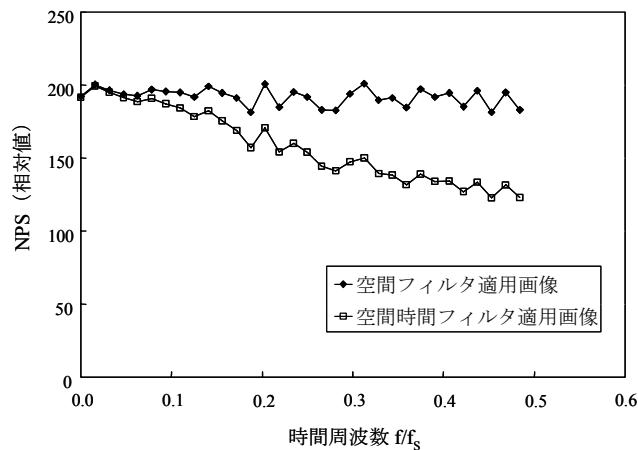


図7 時間的なNPS

空間内の不偏分散と時間軸方向の不偏分散を計算した結果は、表1のようになった。不偏分散の実験誤差は、表中で括弧内に示した。実験誤差の最大値は、相対値で0.4%であった。この結果から、空間内の不偏分散と時間軸方向の不偏分散は、空間フィルタ適用画像と空間時間フィルタ適用画像の両方において、実験誤差の範囲で一致していることがわかる。NPSの積分値と分散値は一致する(内田ら1980)から、NPS同士を比較してもよい。図5に示した空間的なNPSの積分値と、図7に示した時間的なNPSの積分値は、空間フィルタ適用画像と空間時間フィルタ適用画像でそれぞれ、実験誤差の範囲で一致していた。もちろんこれらの値は、それぞれ対応する不偏分散とも一致していた。

表1 空間内と時間軸方向の不偏分散を計算した結果
空間内と時間軸方向の不偏分散は、実験誤差の範囲で一致している。

	空間内不偏分散の時間的平均値	時間軸方向不偏分散の空間的平均値
空間フィルタ適用画像	12280 (±52)	12291 (±34)
空間時間フィルタ適用画像	10062 (±43)	10037 (±29)

IV. 考察

IEC62220-1-3において、「残像がある場合とない場合の空間的NPSの比が、時間的NPSの全周波数に渡る積分値の比に等しい」という重要な仮定が証明なしで採用されている。その理由としては、2次元空間内にも時間軸方向にも相関がない場合、すなわち全ての方向でスペクトルが白色である等方的な3次元空間の場合の類推に依るものと推定されるが、2次元空間と時間軸からなる系ではこの仮定は自明ではなく証明が必要である。

本稿では、「残像がある場合とない場合の空間的NPSの比が、時間的NPSの全周波数に渡る積分値の比に等しい」という命題を証明するために、

これと等価な命題である「空間内のノイズ分散値と時間軸方向のノイズ分散値は等しい」ことを、理論式とコンピュータシミュレーションにおいて証明した。この際、条件①②が満たされていることを前提とした。上記命題を、理論式では母集団内の真の分散値を使って証明し、コンピュータシミュレーションでは不偏分散の比較によって確認した。条件①の時間軸方向定常性については、IEC62220-1-3ではX線照射開始から十分に時間をおいてから画像収集することを規定しており、また、一般に実用的に使用されているX線検出器では一定強度のX線を照射し続ける限りその出力は安定して変化しないことから、一般にこの条件は満たされていると判断できる。条件②の空間内一様性についても、一般に実用的に使用されているX線検出器では成立している条件である。また、IEC62220-1-3に規定されている方法で $MTF(u, v)$ や $NPS(u, v)$ を測定しようとするれば、空間内で様な特性を持つ検出器でなければこれらは測定できない。したがってIEC62220-1-3では条件②を仮定しているので、この条件も一般に満たされていると判断できる。

このように、2つの条件は一般に実用的に使用されているX線検出器とその使用環境では満たされていると考えられるが、今後開発されるであろう新方式の検出器でも常に満たされていることが保証されているわけではない。IEC62220-1-3の適用に当たっては、これら2つの条件が成立しているかどうかをよく見極めた上で、適用することが必要である。

動画用X線検出器における残像は、当然動画の解像特性に影響を与えるが、IEC62220-1-3では静止しているタングステンエッジを動画用X線検出器で撮影した場合について規定している。一方、動いているエッジを動画撮影して動的な解像度を求めるような検討も進行中である(Friedmanら2008)。この場合には、残像の効果は解像度の中に

含まれるので、残像がノイズに及ぼす影響を考慮する必要がない。このような動画についての検討は、最近になってスタートしたばかりである。将来は、それらの研究成果をもとに新しい動画の評価指標、測定法に関する規定も定められるものと思われる。

V. 結論

動画用 X 線検出器の DQE 測定方法を定めた IEC62220-1-3 では、検出器の残像が空間的 NPS に与える影響を定量評価するために、残像がある画像の時間的 NPS の測定値から残像がない場合の時間的 NPS を計算する方法を規定している。時間的 NPS を使って残像の影響がない状態での空間的 NPS を推定するのであるが、この際に、残像がある場合とない場合の空間的 NPS の比が、時間的 NPS の全周波数に渡る積分値の比に等しい、という重要な仮定がなされている。本稿ではこれと等価な仮定である、時間軸方向のノイズ分散値と 2 次元空間内のノイズ分散値は等しいという仮定を、①時間軸方向の定常性と②2 次元空間内の一様性という 2 つの条件の下で、理論式とコンピュータ

シミュレーションによる検証を行った。その結果、上記 2 つの条件が満たされれば、2 次元空間内のノイズ分散値と時間軸方向のノイズ分散値が等しくなることを示した。これらの条件は一般に実用的に使用されている X 線検出器とその使用環境では成立しているが、今後 IEC62220-1-3 の適用に当たって留意すべき点である。

文献

- Dainty J.C., Shaw R., 1974, Image science, Academic Press
 Dobbins III J.T., 2000, Image quality metrics for digital systems. In: Beutel J., Kundel H.L., Van Meter R.L., editors. Handbook of medical imaging, Vol. 1, 161-222, SPIE Press
 Friedman S.N., Cunningham I.A., 2008, A moving slanted-edge method to measure the temporal modulation transfer function of fluoroscopic systems, Med. Phys., 35, 2473-2484
 Menser B., et al., 2005, Linear system models for lag in flat dynamic x-ray detectors, Proc. SPIE, 5745, 430-441
 Samei E., et al., 1998, A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic system using an edge test device, Med. Phys., 25, 102-113
 東京大学教養学部統計学教室, 1991, 統計学入門, 175-192, 東京大学出版会
 内田勝, 金森仁志, 稲津博, 1980, 放射線画像情報工学, 13-140, 日本放射線技術学会