

논문 2016-53-12-15

방사선 디텍터의 Noise Power Spectrum:

I. 영상의 평균을 사용한 측정

(Noise Power Spectrum of Radiography Detectors:

I. Measurement Using the Averages of Images)

김 동 식*, 이 은 애**

(Dong Sik Kim[©] and Eunae Lee)

요 약

디지털 x선 영상을 획득하기 위하여 최근에는 DR(digital radiography) 기술에 근거한 방사선 디텍터의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 방사성 디텍터의 잡음 특성은, 균일한 노출에서 획득한 영상을 사용하여 NNPS(normalized noise power spectrum)를 측정하여 관찰한다. 이때 고정형태잡음(fixed pattern noise)을 제거하기 위하여 두 장의 영상 차를 사용한다. 본 논문에서는 보다 정확한 NNPS를 측정하기 위하여, 먼저 여러 장의 영상을 획득하여 두 장의 평균영상을 구하고 그의 차를 사용하여 NNPS를 구하는 방법을 제안하였다. 이때 여러 장의 영상들의 평균으로 인하여 NNPS 값이 실제 값보다 작아지는데, 이러한 NNPS의 보정을 위하여, 평균할 때 사용한 영상 개수의 함수인 보정 상수도 함께 제안하였다. 또한 평균영상의 비를 사용하여 NNPS를 구하는 방법도 제안하였다. 실제 방사선 디텍터에서 획득한 영상을 사용하여 NNPS를 측정하는 실험을 통하여, 제안한 방법으로 NNPS 보다 정확하게 구할 수 있음을 관찰하였다.

Abstract

In order to acquire digital x-ray images, developing radiography detectors have been recently conducted based on the DR (digital radiography) technology. The noise property of the radiography detector can be observed from measuring the NNPS (normalized noise power spectrum) using uniform exposure images. Here, the image difference of two images is used to remove the fixed pattern noise in measuring the detector NNPS. In this paper, two average images are first calculated using several images and then their difference is used to calculate an NNPS value. Here, the obtained NNPS value is usually lower than the true detector NNPS due to the average. Hence, a compensation constant, which is a function of the number of used images, is also proposed to compensate the NNPS value to obtain the true detector NNPS. Furthermore, another measurement method, in which the ratio of the average images is used, is proposed. Through NNPS measuring experiments using real x-ray images, it is observed that the proposed method can provide further accurate NNPS measurements.

Keywords : Average image difference, Average image ratio, Noise power spectrum, Radiography detector

I. 서 론

의료 및 산업 분야에서 x선 디지털 영상의 획득을 위하여 최근에는 이미지 센서에서 직접 디지털 영상을 얻는 DR(digital radiography) 기술의 연구와 개발이 활발

히 이루어지고 있다^[1]. DR 기술에는 x선 광자(photon)를 CsI(cesium iodide)와 같은 scintillator를 통하여 가시광선 광자로 변환 후 광다이오드(photodiode)를 사용하여 전하로 변환하는 간접 방식과, x선 광자를 a-Se(amorphous selenium) 물체를 사용하여 직접 전하

* 정회원, 한국외국어대학교 (Hankuk University of Foreign Studies)

** 학생회원, 한국외국어대학교 (Hankuk University of Foreign Studies)

© Corresponding Author (E-mail: dskim@hufs.ac.kr)

※ 본 논문은 2016년도 한국외국어대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음.

Received ; October 17, 2016 Revised ; November 11, 2016 Accepted ; November 25, 2016

로 변환하는 직접 방식이 있다^[2-3]. X선 광자로부터 발생한 전하는 해당하는 화소에 수집된 전하를 TFT(thin film transistor) 장치를 통하여 수집하여 ROIC(readout integrated circuit)의 전하증폭기를 사용하여 전압 신호로 바꾼다. 이때, 하나의 디텍터에서 빠른 속도로 효율적으로 전압 신호를 얻기 위하여 다수의 ROIC를 사용하는데^[4], 각 ROIC에 따른 전하증폭기의 특성이 일정하지 못해서 불균일한 이득 특성이 발생한다. 이러한 불균일이득은 고정형태잡음(fixed pattern noise)의 원인이 된다^[5]. 다행이도 이러한 고정형태잡음은 영상을 획득할 때마다 같은 형태로 발생하므로 디텍터의 고정형태를 미리 구해서 x선 영상을 획득할 때마다 고정형태잡음을 제거해줄 수 있다.

이렇게 고정형태잡음을 제거할 수 있다면, 디텍터의 잡음 성능은 x선 광자와 전자회로에서 발생하는 잡음의 NPS(noise power spectrum) 또는 NNPS(normalized NPS)를 구하여 평가할 수 있다. 이렇게 고정형태잡음이 제거된 NNPS를 디텍터 NNPS라 정의하자. 방사선 디텍터로부터 획득한 영상으로 측정된 NNPS는 고정형태잡음으로 인하여 디텍터 NNPS보다 항상 큰 값을 보이며, 이득지도를 사용하여 불균일이득을 보정한 영상의 경우도 이득지도에 남아있는 잡음으로 인하여 이득 보정된 영상으로 구한 NNPS도 디텍터 NNPS보다 큰 값을 가진다. 따라서 고정형태잡음과 무관한 디텍터 NNPS를 정확히 측정할 수 있는 방법을 사용하여 디텍터의 잡음 성능평가를 해야 할 필요가 있다.

이러한 디텍터 NNPS를 측정하기 위하여 영상의 차를 사용한 방법이 일반적으로 사용되어왔다^[6-9]. 두 장의 영상의 차를 사용하여 디텍터 NNPS를 구하는 방법은 Williams 등^[8]과 Zhou 등^[9]이 사용하였는데, 입력 영상으로부터 이와 동일한 조건에서 획득한 영상을 뺀 차 영상의 NPS를 구한다. 이를 정규화하여 NNPS를 구하고, 차영상의 분산과 입력 영상의 분산이 서로 동일하게 되도록 보정상수 2로 나누어서 원하는 디텍터 NNPS를 구하였다. Williams 등^[8]과 Dobbins III 등^[6]은 입력 영상에서 같은 조건으로 획득한 10개 영상의 평균영상을 빼서 차영상을 구했다. 그들은 이러한 차영상으로 NNPS를 구하였는데, 특별한 보정상수는 사용하지 않았다. Kim^[7]은 입력 영상에서 같은 조건에서 획득한 n 개 영상의 평균영상을 빼서 차영상을 사용하여 디텍터 NNPS를 구하는 방법에서, 보정상수 $(1 + 1/n)$ 을 나누어 NNPS를 보정해주는 방법을 제안하였다. Williams 등^[8]과 Zhou 등^[9]이 언급한 방식은 Kim^[7]의

방법에서 $n = 1$ 인 특별한 경우로, 이때 보정상수는 $(1 + 1/1) = 2$ 가 되어 그들이 사용한, 분산을 보정하는 관점에서 구한 보정상수와 일치한다. 반면에 Williams 등^[8]과 Dobbins III 등^[10]이 사용한, 평균 영상을 빼는 방법은 Kim^[7]의 방법과 유사하지만 보정상수 $(1 + 1/n)$ 을 사용하지 않았기에 실제 디텍터 NNPS보다 $(1 + 1/10) = 1.1$ 배 큰, 즉 10%의 오차로 더 큰 값을 가지고 있다. 따라서 평균영상을 빼는 경우에도 비록 평균을 위한 영상의 개수가 $n = 10$ 이라도 보정상수 $(1 + 1/n)$ 을 사용하여 최종 NNPS 값을 나누는 보정이 필요하다.

본 논문에서는 Kim^[7]의 평균영상을 입력 영상에서 빼서 차영상을 구하고 이로부터 디텍터 NNPS를 구하는 방식을 보다 일반적인 조건으로 확장하는 방법을 제안하였다. 이는 두 장의 평균영상을 구해서 그들의 차를 구하고, 이로부터 보정상수와 함께 NNPS를 구하는 방법이다. 이렇게 일반화된 NNPS 측정 방법을 실제 x선 영상을 사용하여 실험을 수행하고 일반화된 방법의 성능과 특성을 분석하였다. 또한 두 평균영상의 비를 사용하여 NNPS를 구하는 비영상 방법도 제안하였으며 차영상 방법과 그 성능을 비교하였다. 제안한 차영상 방법과 비영상 방법은 기존의 한 장의 입력 영상으로 구하는 경우의 잡음에 민감한 문제를 해결하며 고정형태잡음을 제거한 디텍터 NNPS를 구할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 II장에서는 방사선 디텍터의 불균일한 이득의 수학적 모델을 정리하고, 입력 영상의 NNPS를 고찰한다. 제 III장에서는 영상의 평균의 차를 사용하여 NNPS를 구하는 방법을 제시한다. 또한 평균영상의 비를 사용한 방법도 제시한다. 제 IV장에서는 제안한 디텍터 NNPS를 구하는 방법을 실제 방사선 디텍터에서 획득한 x선 영상에 실험을 수행하여 그 성능과 특성을 알아보고, 마지막 장에 본 논문의 결론을 정리한다.

II. 방사선 디텍터의 Noise Power Spectrum

본 장에서는 고정형태잡음을 가지는 디텍터의 영상 형성 모델을 불균일이득^[11]이라는 개념을 도입하여 정리하고 NNPS를 구하여 디텍터의 잡음 특성을 고찰하려 한다.

주어진 노출 시간에 입사된 x선 광자가 디텍터에서 전하량을 가지는 입자를 생성하는데, $h(x)$ (e)를 위치가 $x \in \Gamma$ 인 화소에서 수집한 전하의 개수라고 정의하

자. 여기서 집합 Γ 는 영상 디텍터에서 화소들의 이산 위치를 의미하며, $h(x)$ 를 평균이 μ 이고 weakly stationary sequence라 가정하자^[12]. TFT와 구동회로는 각 화소에서 수집한 전하를 읽어내서 ROIC의 전하증폭기를 사용하여 전압 신호로 바꾸고 ADC에서 디지털 값(digital value, DV)으로 바꾼다. 불규칙변수 $g(x)$ (DV/e)를 화소 위치 $x \in \Gamma$ 에서의 불균일이득을 나타낸다고 하자. 그러면 영상 디텍터에서 획득한 디지털 영상 f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5, 7].

$$f(x) := g(x)h(x) \quad (x \in \Gamma) \quad (1)$$

여기서 이득 $g(x)$ 의 평균은 \bar{g} 이고 분산은 σ_g^2 이라고 가정하자.

이제 디텍터의 NNPS에 대하여 살펴보자. Weakly stationary sequence η 의 autocorrelation 함수를 $\phi_\eta(x)$ 라 나타내고 $\psi_\eta(x)$ 를 autocovariance 함수라고 하면 $\psi_\eta(x) = \phi_\eta(x) - E^2\{\eta\}$ 의 관계식을 만족한다. Ψ_η 를 ψ_η 의 discrete-spatial Fourier 변환이라고 하면, η 의 NNPS는 다음과 같이 정의된다^[2, 7, 10].

$$NNPS_\eta(\omega) := \frac{\Psi_\eta(\omega)}{E^2\{\eta\}} \quad (\omega \in \Omega) \quad (2)$$

식 (2)에서 주파수 범위는 $\Omega := (-\pi, \pi]^2$ 이다. 이러한 NNPS는 신호 η 의 periodogram의 평균으로 예측하는 방법으로 흔히 측정한다^[13-14]. 식 (2)로부터 입력 영상 $f = gh$ 의 NNPS인 $NNPS_f$ 는 다음과 같이 전개된다^[5].

$$NNPS_f(\omega) = NNPS_h(\omega) + NNPS_g(\omega) + NNPS_h(\omega) * NNPS_g(\omega) \quad (3)$$

식 (3)에서, $NNPS_h$ 와 $NNPS_g$ 는 각각 신호 h 와 g 의 NNPS이다. $NNPS_g$ 는 불균일이득으로 인한 고정형태잡음으로, 식 (3)을 보면 입력 영상 f 의 NNPS 값은 이러한 고정형태잡음으로 인하여 항상 $NNPS_h$ 보다 큰 것을 알 수 있다. $NNPS_h$ 는 디텍터의 고정형태잡음과 무관한 x선 양자 잡음과 전기적 잡음으로 인한 디텍터의 고유 NNPS로 디텍터 NNPS라 부르자. 만일 고정형태잡음을 입력 영상에서 온전히 제거할 수 있다고 하면 처리된 영상의 NNPS는 $NNPS_h$ 까지 낮아질 수 있다. Seibert 등^[15]과 Moy와 Bosset^[16]은 이득지도(gain map)를 사용하여 영상 f 의 이득을 보정하여 고정형태잡음을 제거했는데, 이득지도를 설계할 때 사용하는 영

상의 개수를 늘어나갈수록 고정형태잡음을 충실하게 제거할 수 있어서 $NNPS_h$ 의 성능에 근접하는 x선 영상을 얻을 수 있다. 반면에 영상의 개수가 적은 경우에는 이득지도에 존재하는 잡음을 필터를 사용하여 제거하여 성능을 개선할 수 있다^[17-19].

III. 영상 평균을 사용한 Noise Power Spectrum

본 장에서는 획득한 영상들의 평균을 사용하여 안정되게 디텍터 NNPS인 $NNPS_h$ 를 측정하는 방법을 제안한다. 이러한 디텍터 NNPS는 제 II장에서 언급한 바와 같이 입력 영상의 NNPS가 가질 수 있는 lower bound가 되며, 이득보정의 성능을 평가하기 위한 기준이 될 수 있다.

물체 없이 f 와 동일한 노출에서 획득한 L 개의 영상을 f_1, \dots, f_L 로 표기하자. 그러면 i 번째 영상은 $f_i := gh_i$ 로 정의할 수 있다. 이때 h_1, \dots, h_L 은 평균 μ 인 서로 독립이고 동일한 분포를 가진다고 가정하며, 불균일이득 g 는 고정형태잡음을 묘사하기 위하여 L 개의 영상에 모두 동일하다고 가정한다.

집합 $\{1, \dots, L\}$ 의 부분집합이면서 서로소인 집합 I_1 과 I_2 가 각각 m 과 n 개의 원소를 가지고 있다고 하자. 이때 $m+n \leq L$ 을 만족한다. 이제 다음과 같이 두 개의 영상 평균을 정의하자.

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} \sum_{i \in I_1} f_i(x) &= g(x)H_1(x) \\ \frac{1}{n} \sum_{i \in I_2} f_i(x) &= g(x)H_2(x) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 H_1 과 H_2 는 다음과 같이 정의한다.

$$H_1 := \frac{1}{m} \sum_{i \in I_1} h_i, \quad H_2 := \frac{1}{n} \sum_{i \in I_2} h_i \quad (5)$$

식 (4)의 평균영상들의 NNPS는 m 이나 n 을 증가시키면 $NNPS_g$ 로 수렴한다. 따라서 충분히 많은 영상으로 평균을 구해서 디텍터의 고정형태잡음의 NNPS를 구할 수 있다^[17].

1. 평균 영상의 차를 사용한 디텍터 NNPS 측정

본 장에서는 식 (4)의 두 평균영상의 차를 사용하여 디텍터 NNPS를 구하는 방법을 제안한다. 먼저 영상평균의 차 d 를 다음과 같이 정의하자.

$$d(x) := \left[\frac{1}{m} \sum_{i \in I_1} f_i(x) \right] - \left[\frac{1}{n} \sum_{i \in I_2} f_i(x) \right] \quad (6)$$

식 (6)의 영상평균차 d 는 $d = g(H_1 - H_2)$ 로 다시 쓸 수 있으며 d 의 autocovariance 함수는 다음과 같다.

$$\psi_d(x) = \left[g^{-2} + \psi_g(x) \right] \psi_{(H_1 - H_2)}(x) \quad (7)$$

식 (7)에서 $(H_1 - H_2)$ 의 autocovariance 함수는 $\psi_{H_1} = \psi_h/m$ 과 $\psi_{H_2} = \psi_h/n$ 의 관계식으로부터 다음과 같이 전개된다.

$$\psi_{(H_1 - H_2)}(x) = \psi_{H_1}(x) + \psi_{H_2}(x) = \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) \psi_h(x) \quad (8)$$

따라서 식 (8)로부터 식 (7)은 다음 관계식을 만족한다.

$$\frac{\psi_d(x)}{\mu_f^2} = \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) \left[1 + \frac{\psi_g(x)}{g^{-2}} \right] \frac{\psi_h(x)}{\mu_h^2} \quad (9)$$

식 (9)로부터 dNNPS(difference NNPS)를 다음과 같이 정의하자.

$$dNNPS(\omega) := \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right)^{-1} \frac{\Psi_d(\omega)}{\mu_f^2} \quad (\omega \in \Omega) \quad (10)$$

이 식에서 Ψ_d 는 ψ_d 의 discrete-spatial Fourier 변환이다. 식 (9)와 (10)으로부터 dNNPS는 다음과 같이 전개된다.

$$dNNPS(\omega) = NNPS_h(\omega) + NNPS_h(\omega) * NNPS_g(\omega) \quad (11)$$

이 식에서 dNNPS는 불균일이득 g 의 함수가 되는데, 참고문헌 [7]에서 언급한 바와 같이 $NNPS_g \ll NNPS_h$ 라고 하면 detector NNPS를 구할 수 있는, 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$dNNPS(\omega) = NNPS_h(\omega) \quad (12)$$

식 (10)에서 보정상수 $(1/m + 1/n)$ 은 두 개의 평균 영상으로부터 만들어진 것으로 Kim^[7]의 경우에 보정상수 $(1 + 1/n)$ 과 비교하면, 제안한 알고리즘에서 사용하는 또 다른 평균영상을 위한 보정항이 추가됐음을 확인할 수 있다.

2. 평균영상의 비를 사용한 디텍터 NNPS 측정

식 (6)과 같이 평균영상의 차를 사용하여 고정형태잡음을 제거한 디텍터 NNPS를 구할 수도 있지만 식 (4)의 두 평균영상의 비를 사용해서도 디텍터 NNPS를 구할 수 있다. 이는 Kim^[7]이 제안한 방법을 두 평균영상을 사용하는 경우로 확장한 형태가 된다.

식 (4)의 두 개의 평균영상의 비를 다음과 같이 정의하자.

$$r(x) := \left[\frac{1}{m} \sum_{i \in I_1} f_i(x) \right] \left[\frac{1}{n} \sum_{i \in I_2} f_i(x) \right]^{-1} \quad (x \in \Gamma) \quad (13)$$

이러한 비 r 은 $r = H_1/H_2$ 로 다시 쓸 수 있는데, 불균일이득 g 가 제거됐음을 알 수 있다. Taylor 근사로부터 r 의 autocorrelation 함수는 $\phi_r \approx \phi_{H_1} \phi_{H_2} / \mu^4$ 를 만족하며, 이로부터 r 의 autocovariance 함수는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\psi_r(x) \approx \frac{\psi_{H_1}(x)}{\mu^2} + \frac{\psi_{H_2}(x)}{\mu^2} + \frac{\psi_{H_1}(x)\psi_{H_2}(x)}{\mu^4} \quad (14)$$

식 (14)에 대하여 rNNPS(ratio NNPS)를 다음과 같이 정의하자.

$$rNNPS(\omega) := \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right)^{-1} \Psi_r(\omega) \quad (15)$$

이 식에서 Ψ_r 는 ψ_r 의 discrete-spatial Fourier 변환이다. 식 (14)와 (15)로부터 rNNPS는 다음과 같이 전개된다.

$$rNNPS(\omega) \approx NNPS_h(\omega) + \frac{1}{m+n} NNPS_h(\omega) * NNPS_h(\omega) \quad (16)$$

식 (16)은 디텍터 NNPS 값이 작은 경우 다음과 같은 근사식이 될 수 있다.

$$rNNPS(\omega) \approx NNPS_h(\omega) \quad (17)$$

따라서 식 (17)의 근사식을 사용하여 비록 근사식의 조건은 서로 다르더라도 식 (12)와 유사한 방법으로 디텍터 NNPS를 구할 수 있다.

불균일이득의 보정을 위한 이득지도 G_n 은 n 개 영상의 평균인 gH_2 를 사용하여 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$G_n(x) := \frac{\mu_f}{gH_2(x)} \quad (18)$$

이러한 이득지도를 사용하여 입력 영상 f 의 이득을 보정한 영상은 $G_n f$ 가 되는데, 식 (13)의 평균영상의 비 r 에 대하여 다음 관계식을 만족한다.

$$G_n(x)f(x) = \mu_f r(x) \quad (19)$$

식 (19)의 r 에서 $m = 1$ 이다. 이득을 보정한 영상 $G_n f$ 의 NNPS인 $NNPS_{G_n f}$ 는 식 (15), (17), (19), 그리고 $m = 1$ 으로부터 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} NNPS_{G_n f}(\omega) &= \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot r NNPS(\omega) \quad (20) \\ &\approx \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot NNPS_h(\omega) \end{aligned}$$

즉 이득지도의 설계를 위한 영상의 개수를 충분히 키우면 이득 보정된 영상은 lower bound인 디텍터 NNPS로 근접함을 알 수 있다. 또한 식 (20)으로부터, 이득 보정된 영상의 NNPS에 보정상수 $(1 + 1/n)$ 을 나누어서 디텍터 NNPS를 구할 수도 있음을 알 수 있다.

IV. 실험 결과

본 실험에서 사용한 디지털 방사선 디텍터는 DRTECH 사(www.drtech.co.kr)의, columnar CsI를 scintillator로 사용하고 TFT와 광다이오드로 전하를 수집하는 간접 방식 디텍터이다^[3]. 각 디텍터의 화소당 비트수는 14b/pixel이며 화소간 간격은 $140\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이다. 실험을 위한 x선 영상은 x선 튜브 전압 70kVp와 전류 250mA 조건(RQA 5)에서 획득하였다. 또한 디텍터의 1차원 NNPS는 표준 IEC62220-1^[13]에 따라서 구했다. 즉 식 (2)의 NNPS를 spectrogram을 평균하는 방식으로 구하고 이에 화소의 면적을 곱한 continuous-spatial NNPS를 구하였다^[14].

먼저 실제 디텍터 NNPS에 가까운 값을 구하기 위하여 100장의 영상을 획득하여 두 장씩 총 50쌍을 선택하여 기존의 차영상 방법($m = n = 1$)을 사용하여 50개의 디텍터 NNPS 곡선을 구하고 이를 평균하였다. 이러한 NNPS를 기준 NNPS라고 하고 실제 디텍터 NNPS와 근접하다고 가정한다. 이후에 측정하는 NNPS는 이러한 기준 NNPS와 비교하여 그 정확도를 판단하려 한다. 그림 1에 입력영상 f 의 NNPS와 기준 NNPS를 비

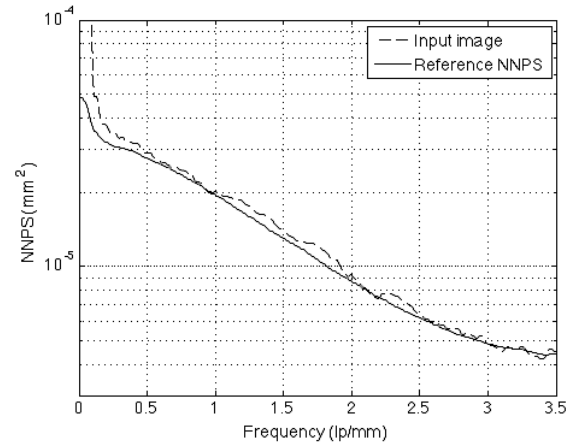


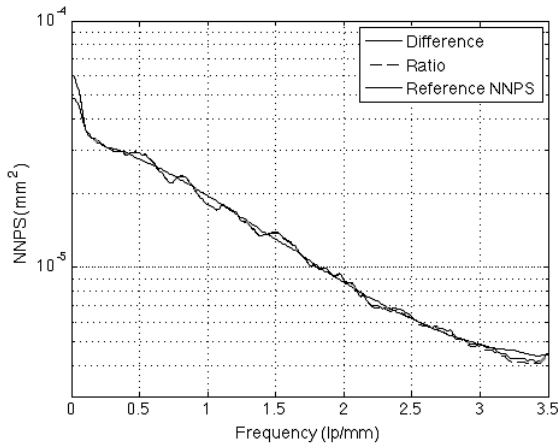
그림 1. 입력 영상 f 의 NNPS와 기준 NNPS($m = n = 1$ 인 차영상을 사용한 50개의 NNPS를 평균)의 비교
Fig. 1. Comparison between the NNPS of the input image f and the reference NNPS (average of 50 NNPS values obtained from the image difference of $m = n = 1$).

교 도시하였다. 고정형태잡음이 남아있는 입력영상 f 의 NNPS는 고정형태잡음을 제거한 디텍터 NNPS 값보다 항상 큰 값을 가짐을 알 수 있는데^[5], 특히 낮은 주파수 (< 0.2 lp/mm)에서 고정형태잡음 성분이 크게 존재하여 NNPS 값이 올라감을 관찰할 수 있다.

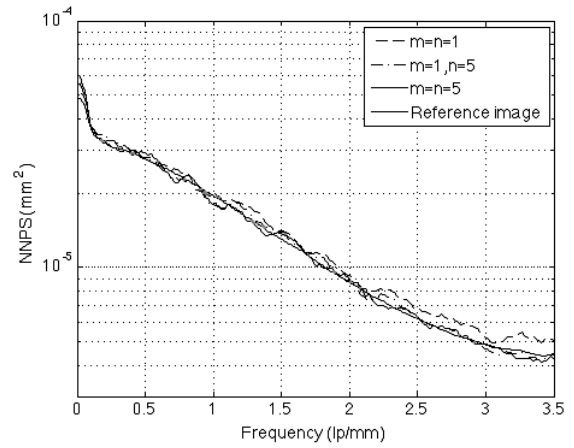
그림 2에는 영상의 차를 사용한 식 (10)의 차영상 방법과 영상의 비를 사용한 식 (15)의 비영상 방법을 비교하였다.* 그림 2(a)를 보면, 두 방법을 사용하여 측정된 NNPS 값은, 모두 기준 NNPS와 매우 작은 MSE를 가지면서 유사한 NNPS 값을 가짐을 확인하였다. 따라서 차영상 방법이나 비영상 방법을 사용하여 디텍터 NNPS를 정확하게 구할 수 있다. 그러나 사용한 여러 장의 영상 중에 잘못 획득되어 왜곡이 발생한 영상이 포함되는 경우 그림 2(b)의 실험에서와 같이 차영상 방법은 비영상 방법에 비하여 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

그림 3에는 디텍터 NNPS의 측정 결과를 기존 방식과 제안한 방식을 사용한 경우를 서로 비교하여 도시하였다. 그림 3(a)의 $m = n = 5$ 경우를 보면, 기준 NNPS와 비교하여 제안한 방법이 가장 작은 MSE를 보이고 있으며, 기존의 두 영상의 차의 경우($m = n = 1$)가 가장 안 좋은 MSE를 보임을 알 수 있다. 따라서 제

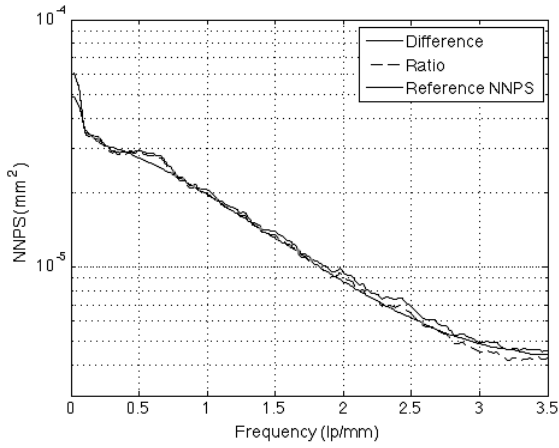
* 비영상 방법으로 NNPS를 계산하는 경우 식 (13)의 영상의 비는 분자항에 해당하는 평균영상에 따라서 상당히 큰 값이 될 수 있다. 따라서 식 (13)의 outlier를 검출하여 제거하고 NNPS를 계산해야 한다.



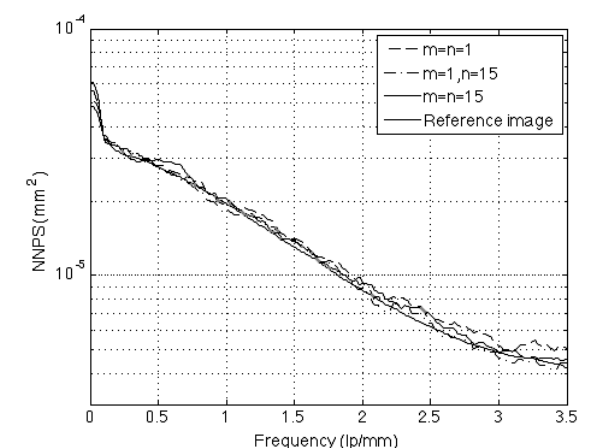
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 2. 제안한 평균 영상의 차를 사용하는 방법과 평균 영상의 비를 사용하는 방법의 비교 (a) $m = n = 5$ 실험(차영상 방법 MSE: 3.656×10^{-13} , 비영상 방법 MSE: 3.732×10^{-13}) (b) $m = n = 15$ 실험(차영상 방법 MSE: 6.826×10^{-13} , 비영상 방법 MSE: 3.741×10^{-13})

Fig. 2. Comparison of the proposed average image difference method and the average image ratio method (a) Experiment of $m = n = 5$ (difference image method MSE: 3.656×10^{-13} , ratio image method MSE: 3.732×10^{-13}) (b) Experiment of $m = n = 15$ (difference image method MSE: 6.826×10^{-13} , ratio image method MSE: 3.741×10^{-13}).

안한 방법이, 보다 많은 영상을 사용하여 NNPS를 측정하므로, 보다 정확한 디텍터 NNPS를 측정할 수 있음을 확인하였다. NNPS 측정을 위해서 사용한 영상이, 획득하는 과정에서 왜곡이 발생한 경우, 기존에 두 장만 사용하는 방법($m = n = 1$)의 경우 잘못된 결과를 보여 줄 수 있는 예를 그림 3에서 볼 수 있다. 특히 2.5

그림 3. 제안한 평균 영상의 차를 사용하는 방법으로 구한 NNPS의 비교 (a) $m = n = 5$ 실험 (제안한 $m = n = 5$ MSE: 3.656×10^{-13} , 기존의 $m = n = 1$ MSE: 7.546×10^{-13} , 기존의 $m = 1, n = 5$ MSE: 3.963×10^{-13}) (b) $m = n = 15$ 실험 (제안한 $m = n = 15$ MSE: 6.826×10^{-13} , 기존의 $m = n = 1$ MSE: 7.546×10^{-13} , 기존의 $m = 1, n = 5$ MSE: 4.004×10^{-13})

Fig. 3. Comparison between the measured NNPS from the proposed image difference method (a) Experiments of $m = n = 5$ (proposed $m = n = 5$ MSE: 3.656×10^{-13} , previous $m = n = 1$ MSE: 7.546×10^{-13} , and previous $m = 1, n = 5$ MSE: 3.963×10^{-13}) (b) Experiments of $m = n = 15$ (proposed $m = n = 15$ MSE: 6.826×10^{-13} , previous $m = n = 1$ MSE: 7.546×10^{-13} , and previous $m = 1, n = 5$ MSE: 4.004×10^{-13}).

lp/mm 이상의 주파수에서 잡음 성분의 파워가 올라가는 잘못된 결과를 보여주고 있다. 그림 3(b)의 $m = n = 15$ 인 경우를 보면 그림 2(b)의 실험에서 관찰했듯이 차영상 방법이 기존의 $m = 1, n = 15$ 인 경우보다 오히려 안 좋을 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 일반적으로 차영상 방법보다는 비영상 방법을 사용하는 것이 보다 안정되게 NNPS 값을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

방사선 디텍터의 잡음 특성은 균일한 노출로 획득한 영상을 사용하여 NNPS(normalized noise power spectrum)를 측정하여 관찰한다. 이때 고정형태잡음을 제거하기 위하여 두 장의 영상 차를 사용하거나 두 영상의 비를 사용한다. 본 논문에서는 보다 정확한 NNPS를 측정하기 위하여 여러 장의 영상을 획득하여 두 장의 평균영상을 구하고 그의 차나 비를 사용하여 NNPS를 구하는 방법을 보정 상수와 함께 제안하였다. 실제 방사선 디텍터로 획득한 영상을 사용한 실험을 통하여, 제안한 방법으로 NNPS 보다 정확히 측정할 수 있음을 관찰하였다. 나아가서 spectrum을 평균하는 방법^[20]과 같이 조합해서 정확한 NNPS를 구하는 것이 가능하다.

REFERENCES

- [1] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd. ed., Prentice Hall: NY, 2008.
- [2] J. G. Proakis and D. K. Manolakis, *Digital Signal Processing*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2007.
- [3] J. A. Rowlands, "The physics of computed radiography," *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, no. 23, pp. R123 - R166, Dec. 2002.
- [4] D. L. Lee, L. K. Cheung, and L. S. Jeromin, "A new digital detector for projection radiography," in *Proc. SPIE, Medical Imaging: Phys. Med. Imaging*, vol. 2432, pp. 237-249, 1995.
- [5] D. S. Kim and E. Kim, "Noise power spectrum of the fixed pattern noise in digital radiography detectors," *Med. Phys.*, vol. 43, no. 6, pp. 1765-2773, June 2016.
- [6] J. T. Dobbins, *Ch. 3 Image Quality Metrics for Digital Systems, Handbook of Medical Imaging: Vol. 1. Physics and Psychophysics*, SPIE, Washington, 2000.
- [7] D. S. Kim, "Noise power spectrum measurements in digital imaging with gain nonuniformity correction," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 25, no. 8, pp. 3712-3722, Aug. 2016.
- [8] M. B. Williams, P. A. Mangiafico, and P. U. Simoni, "Noise power spectra of images from digital mammography detectors," *Med. Phys.*, vol. 26, no. 7, pp. 1279 - 1293, Jul. 1999.
- [9] Z. Zhou, F. Gao, H. Zhao, and L. Zhang, "Techniques to improve the accuracy of noise power spectrum measurements in digital X-ray imaging based on background trends removal," *Med. Phys.*, vol. 38, no. 3, pp. 1600 - 1610, Mar. 2011.
- [10] D. A. Cunningham, "Applied linear-system theory," in *Handbook of Medical Imaging: Physics and Psychophysics*, vol. 1, Washington DC, USA: SPIE, 2000, ch. 2.
- [11] D. S. Kim, E. Kim, and S. Lee, "Performance analysis of the gain correction in radiography imaging," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, pp. 3641-3645, 2014.
- [12] R. M. Gray and L. D. Davisson, *Random Process: Mathematical Approach for Engineers*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 1986.
- [13] IEC62220-1, Characteristics of Digital X-ray Imaging Devices-Part1: Determination of the Detective Quantum Efficiency, International Electro Technical Commission Report, 2003.
- [14] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2009.
- [15] J. A. Seibert, J. M. Boone, and K. K. Linfors, "Flat-field correction technique for digital detectors," in *Proc. SPIE Medical Imaging: Phys. Med. Imaging*, vol. 3336, pp. 348-354, 1998.
- [16] J. P. Moy and B. Bosset, "How does real offset and gain correction affect the DQE in images from x-ray flat detector," in *Proc. Medical Imaging: Phys. Med. Imaging*, vol. 3659, pp. 90-97, 1999.
- [17] B. Rodricks, D. L. Lee, M. Hoffberg, and C. Williams, "Filtered gain calibration and its effect on DQE and image quality in digital imaging," in *Proc. SPIE Medical Imaging: Phys. Med. Imaging*, vol. 3977, pp. 477-486, 2000.
- [18] D. S. Kim, E. Kim, and S. Lee, "Performance analysis of the gain correction in radiography imaging," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process.*, Oct. 2014, pp. 3641 - 3645.

- [19] D. S. Kim, "Nonuniform gain correction based on the filtered gain map in radiography image detectors," *Jour. Inst. Electr. Inform. Eng.* vol. 53, no. 4, April 2016.
- [20] E. Lee and D. S. Kim, "Noise power spectrum of radiography detectors: II. measurement based on the spectrum averaging," *Jour. Inst. Electr. Inform. Eng.*, 2016 (submitted).

저 자 소 개



김 동 식(정회원)

1986년 서울대학교 제어계측공학과
학사 졸업.

1988년 서울대학교 제어계측공학과
석사 졸업.

1994년 서울대학교 제어계측공학과
박사 졸업.

2000년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 신호처리, 의료영상시스템, 의료영
상처리, 무선센서네트워크>



이 은 애(학생회원)

2014년 한국외국어대학교

전자공학과 학사 졸업.

2016년 한국외국어대학교

전자공학과 석사 수료.

<주관심분야 : 신호처리, 의료영상시스템, 의료영
상처리, 무선센서네트워크>