

<원저>

의료영상에서 단일 표적을 이용한 공간분해능 평가

- An Evaluation For Spatial Resolution, Using A Single Target On A Medical Image -

제주한라대학교 방사선과

이경성

— 국문초록 —

공간 분해능을 평가하기 위해서 이제까지는 일정하게 두 물체의 간격(이중 표적)을 근접한 것부터 점점 떨어진 간격으로 만들어진 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하였다. 이러한 방법으로 공간분해능을 평가하면 분해능은 테스트용으로 제작된 팬텀에 있는 표적 간격으로 제한된다. 본 연구는 이러한 문제를 극복하고자 1개의 단일 표적으로 공간 분해능을 간편하게 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 검증한 것이다.

이를 위해 PSF 및 JND를 이용하여 공간 분해능을 추정하는 개념을 제시하였다. 이렇게 유도된 공간 분해능 추정 이론을 검증하기 위해, 상용 팬텀을 이용하여 실험하였다. 실험으로 얻어진 디지털 영상에서 라인 픽셀 프로파일을 구하기 위해 만든 LabVIEW 프로그램을 이용하여 분석한 결과, 본 연구에서 유도한 단일 표적을 이용한 공간 분해능 추정 이론과 실험적으로 일치하는 것을 알 수 있었다.

실험 결과로 디지털 영상에서 공간분해능의 상대적 평가는 단일 표적을 가지고도 충분하다는 것을 증명할 수 있었다. 따라서 단일 표적 공간분해능 평가법을 이용하면 이제까지 사용되어 왔던 이중 표적을 이용한 공간분해능 평가의 한계를 극복할 수 있다.

중심 단어: 공간분해능, 단일 표적, PSF, JND

1. 서 론

의료에 이용되는 영상들이 디지털화 되면서 영상의학의 발전은 눈부시다. 이에 따라 영상의학이 의료에서 차지하는 비중은 날로 커지고 있다. 영상의학에서 화질은 중요하다. 그러므로 화질 향상을 위해 많은 노력과 연구가 더해지고 있다. 화질을 향상하기 위해서는 먼저 화질 평가가 우선되어야 한다. 객관적인 평가 기준이 있어야 화질을 논할 수 있기 때문이다. 이제까지 화질을 평가하는 방법은 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 이중에서 공간분해능을 가지고 영상 평가에 대하여 논하고자 한다.

공간 분해능이란 근접한 물체의 분리 능력을 말한다. 공간 분해능을 평가하기 위해서는 일정하게 두 물체의 간격을 근접한 것부터 점점 떨어진 간격으로 만들어진 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하고 있다. 이러한 공간분해능 평가를 위한 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하게 되면 평가할 수 있는 분해능은 테스트용으로 제작된 팬텀(패턴)에 있는 표적 간격으로 제한된다. 본 연구에서는 이러한 제한을 극복하고자 1개의 단일 표적으로 공간 분해능을 간편하게 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

의료영상에는 X선영상, CT영상, MRI영상, 핵의학영상, 초음파영상 등 여러 영상들이 있다. 디지털 영상에서 영상

This paper partly quotes a doctorate treatise and modifies it to my context (Jeju National University doctoral dissertation, 2008).
Corresponding author: Kyung-Sung Lee, Department of Radiotechnology, Cheju Halla University, 38, Halladaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do 63092, Korea / Tel: +82-64-741-7626 / E-mail: leksu@hanmail.net
Received 31 October 2016; Revised 01 December 2016; Accepted 12 December 2016

처리 과정은 대동소이하므로 본 연구에서는 이중에서 초음파 영상을 가지고 단일 표적을 이용한 공간 분해능 평가에 대한 추정이론을 제안하고 실험으로 검증하였다.

II. 공간분해능 추정 이론과 실험

1. 공간분해능 평가의 문제

영상의 선예도를 정하는 인자로서 분해능이 있다. 분해능이란 식별 한계를 나타내는 용어이다. 목적에 따라 공간 분해능, 농도 분해능, 밀도 분해능, 시간 분해능, 거리 분해능, 방위 분해능 등 여러 용어가 사용되고 있다. 공간 분해능은 공간적으로 분해할 수 있는 식별한계를 나타낸다. 공간 분해능이 높다는 것은 작은 치수까지 식별할 수 있음을 의미한다¹⁾.

공간 분해능을 평가하기 위해서는 일정하게 두 물체의 간격을 근접한 것부터 점점 떨어진 간격으로 만들어진 테스트 패턴이나 팬텀을 이용한다²⁾. Fig. 1은 X선영상, CT영상, 핵의학영상, 초음파영상의 공간 분해능 평가를 위해 사용되는 팬텀이다.

공간분해능 평가를 위한 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하게 되면 평가할 수 있는 분해능은 Fig. 1처럼 테스트용으로 제작된 팬텀(패턴)에 있는 표적 간격으로 제한된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하고자 1개의 단일 표적으로 공간 분해능을 간편하게 측정할 수 있는 방법을 제안한다. 여러 의료영상 중에서 초음파 B-모드영상을 가지고 추정이론과 실험으로 검증하였다.

2. PSF

초음파 B-모드 영상에서 초음파 빔을 매우 작은 점상 표적에 조사하여 되돌아오는 초음파 빔의 강도는 Fig. 2과 같이 입체적인 원추상의 분포를 가진다. 이러한 분포는 Fig. 2에서 도시하는 PSF (point spread function) 형태로 표현될 수 있다²⁾. 실제로 초음파 팬텀에서 선 표적을 스캔하면 Fig. 3a와 유사한 영상을 얻게 되며 얻어진 표적 영상의 중심을 지나는 선상에서 각 픽셀의 밝기에 대한 프로파일은 Fig. 3b와 같이 도시할 수 있다. 여기서 프로파일의 FWHM (full width at half maximum)은 분포의 기하학적인 특성을 표현하는 값으로 흔히 사용된다. 그림에서 ideal response는 실제 선의 직경을 의미한다. 프로파일에 FWHM과 ideal

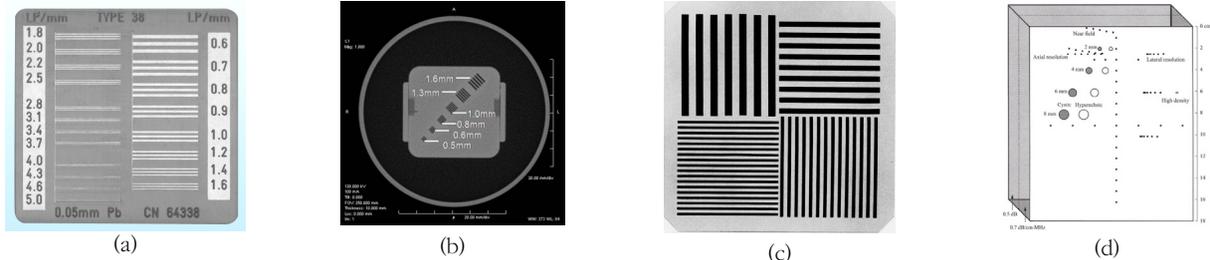


Fig. 1 Phantom for the spatial resolution

- (a) pattern for X-ray image resolution test
- (b) X-ray CT image for spatial resolution test
- (c) four quadrant bar bar phantom for scintigram resolution test
- (d) phantom for sonogram resolution test

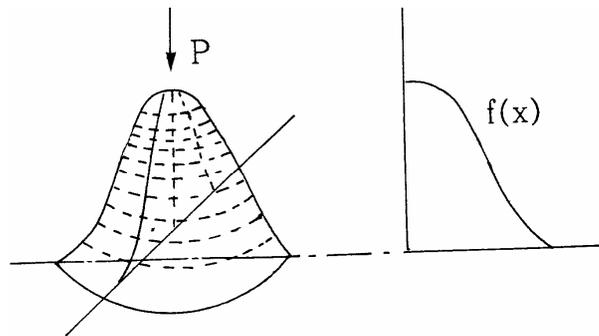


Fig. 2 The distribution of density at the dot target : PSF(Point Spread Function)

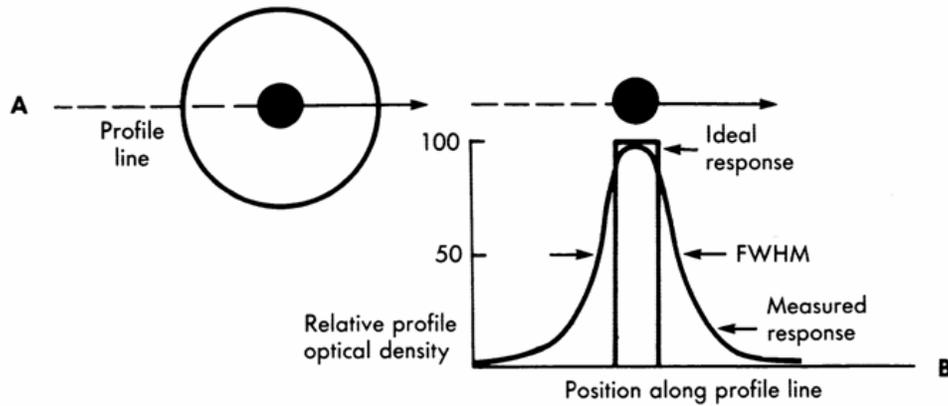


Fig. 3 For the image of a solid body in the centre of a uniform medium (left), the pixel profile of the image through the solid body is drawn as shown in B.

response를 비교하여 분해능과 관련된 정보를 표현할 수 있다. 이 경우 근접한 물체를 분리할 수 있는 공간 분해능에 대한 정보를 제공하지는 못한다^{3,4)}.

3. 공간 분해능 추정 이론

단일 선 표적에 대한 초음파 영상에서, 선의 중심부를 관통하는 픽셀의 프로파일은 Fig. 4(a) 형태로 도시할 수 있다. 이 프로파일은 동일한 스캔 조건으로 같은 깊이 있는 선 표적에 대해, 유일하게 결정되는 PSF로 간주할 수 있다. 공간 분해능은 겹쳐있는 두 개의 동일한 PSF 중 어느 하나를 서서히 이동하면 분리할 때 시각적으로 분리되기 시작하는 순간(Just Noticeable) 두 PSF 간의 거리로 정의할 수 있다 (Fig. 4(b)).

초음파 B-모드 영상의 256 그레이 스케일(Gray scale) 영상에 대해 인간의 눈은 대략 32~64단계별 구분이 가능하다고 한다⁵⁾. 만일 최소치인 32단계의 식별이 가능하다고 할 때, 256 그레이 스케일 영상에서 인간의 눈이 차를 식별하기 시작하는 한계치(Just Noticeable Difference; JND)는 대략 8 그레이 스케일(=256/32)이 된다. 두 PSF가 분리되기 시작하는 순간은 두 PSF가 만나는 점에서 최고점까지의 차이가 JND가 될 때로 가정할 수 있다.

Fig. 5는 PSF 및 JND를 이용하여 공간 분해능을 추정하는 개념을 도식화한 것이다. Fig. 5에서 왼쪽 곡선 1은 단일 선 표적(직경 D)에 대한 기준 PSF이며, 오른쪽 PSF는 기준 PSF와 동일하며 중첩 상태에서 오른쪽으로 이동하여 기준 PSF와 교점에서의 깊이가 JND가 될 때를 도시한다. Fig. 5에서 공간 분해능 R은

$$R = G - D \tag{3-1}$$

로 정의할 수 있다. 여기서 G는 두 PSF 최대값 사이의 간격이다. 본 연구에서는 PSF를 가우시안 함수로 가정하고 공간 분해능 R을 수학적으로 유도하였다. 일반적으로 공간상에서 1차원 가우시안 PSF는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$f(x) = A \exp(-\alpha x^2) \tag{3-2}$$

여기서 A값은 PSF의 최대값, x는 거리이다. 기준 가우시안 PSF에 대해, $x=G/2$ 일 때 PSF의 크기는 $A-JND$ 이므로, 이를 식 (3-2)에 적용한 G를 A, α 및 JND의 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f\left(x = \frac{G}{2}\right) &= A - JND \\ \exp\left(-\alpha \left(\frac{G}{2}\right)^2\right) &= \frac{A - JND}{A} \\ -\alpha \left(\frac{G}{2}\right)^2 &= \ln\left(\frac{A - JND}{A}\right) \\ \frac{G^2}{2} &= -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{A - JND}{A}\right) \\ &= \frac{1}{\alpha} [\ln A - \ln(A - JND)] \\ G &= 2 \sqrt{\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{A}{A - JND}\right)} \end{aligned} \tag{3-3}$$

또한 가우시안 기준 PSF에서 x가 FWHM/2일 때 PSF의 크기가 A/2라는 사실을 이용하면, α 는 FWHM를 이용하여 표기할 수 있다.

$$f(x = \frac{FWHM}{2}) = \frac{A}{2}$$

$$\frac{A}{2} = A \exp\left(-\alpha \left(\frac{FWHM}{2}\right)^2\right)$$

$$-\ln 2 = -\alpha \left(\frac{FWHM}{2}\right)^2$$

$$\alpha = \frac{4}{FWHM^2} \ln 2$$
(3-4)

식(3-3)과 (3-4)를 식(3-1)에 대입하면, 공간 분해능 R은 아래 식 (3-5)과 같이 측정이 가능한 FWHM 및 A와 설정이 가능한 JND의 함수로 표현될 수 있다.

$$R = \frac{FWHM}{\sqrt{12}} \sqrt{\ln\left(\frac{A}{A - JND}\right) - D}$$
(3-5)

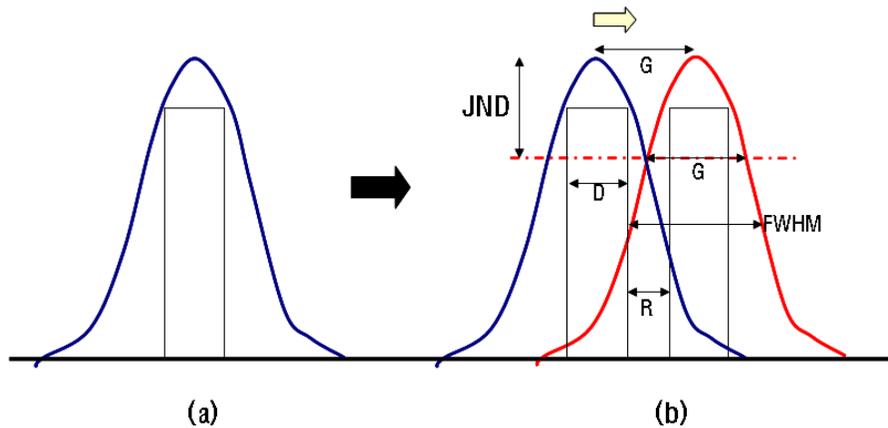


Fig. 4 Spatial resolution estimation theory based on PSF (a) Gaussian PSF obtained for a single line target, (b) spatial resolution R(G-D) determined when the one of the two PSF overlapped is slipped to be separated visually from the other

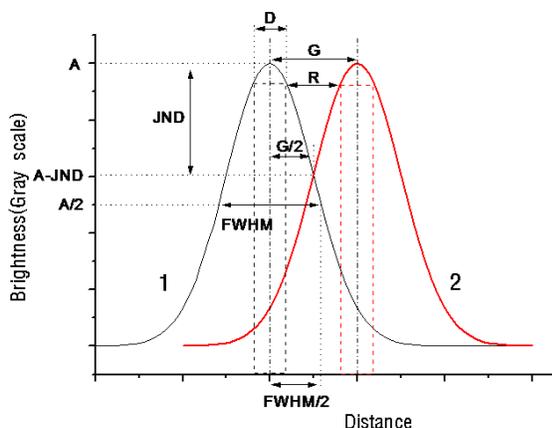


Fig. 5 Concept that estimates a spatial resolution based on a Gaussian PSF and JND.

4. 공간분해능 추정이론(단일 표적)의 실험 검증

Fig. 6은 디지털 영상에서 라인 픽셀 프로파일을 구하기 위해 만든 LabVIEW 프로그램의 메인 창이다. Fig. 7의 식 3-5에서 유도된 공간 분해능 추정 이론을 검증하기 위해, 상용 팬텀을 이용하여 실험한 예이다. 동일한 깊이에서 0.25mm, 1.0mm 간격을 가지는 두 개의 표적에서 얻어진 팬텀 영상 데이터를 이용하여 분석한 결과, Fig. 7 (b), (c)에서 보여 주는 바와 같이 본 연구에서 유도한 단일 표적을 이용한 공간 분해능 추정 이론과 실험적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

이제까지는 공간 분해능을 평가하기 위해서 일정하게 두 물체의 간격(이중 표적)을 근접한 것부터 점점 떨어진 간격으로 만들어진 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하였다. 이러한 방법으로 공간분해능을 평가하면 분해능은 테스트용으로 제작된 팬텀에 있는 표적 간격으로 제한된다. 본 실험으로

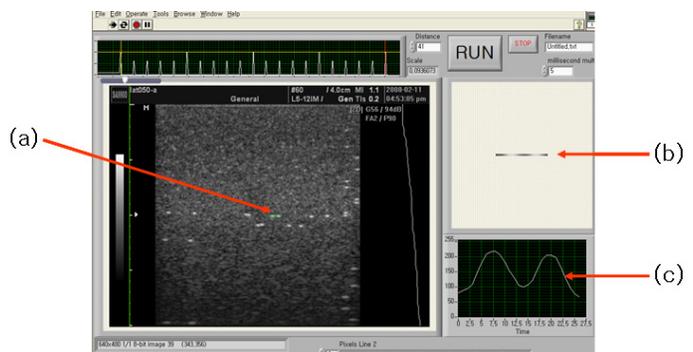


Fig. 6 Main window of Labview program for quantifying the line pixel profiles of images. (a) region of interest containing an objective target, (b) line pixel image designated (c) line pixel profile for the line image designated

III. 결론 및 제언

공간 분해능을 평가하기 위해서 이제까지는 일정하게 두 물체의 간격(이중 표적)을 근접한 것부터 점점 떨어진 간격으로 만들어진 테스트 패턴이나 팬텀을 이용하였다. 이러한 방법으로 공간분해능을 평가하면 분해능은 테스트용으로 제작된 팬텀에 있는 표적 간격으로 제한된다. 본 연구는 이러한 문제를 극복하고자 1개의 단일 표적으로 공간 분해능을 간편하게 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 검증한 것이다.

이를 위해 PSF 및 JND를 이용하여 공간 분해능을 추정하는 개념을 제시하였다. 이렇게 제안한 공간 분해능 추정 이론을 검증하기 위해, 상용 팬텀을 사용하여 실험하였다. 실험으로 얻어진 디지털 영상에서 라인 픽셀 프로파일을 구하기 위해 만든 LabVIEW 프로그램으로 분석한 결과, 본 연구에서 유도한 단일 표적을 이용한 공간 분해능 추정 이론과 실험적으로 일치하는 것을 알 수 있었다.

이 실험 결과를 보았을 때 디지털 영상에서 공간분해능의 상대적 평가는 단일 표적을 가지고도 충분하다는 것이 증명되었다. 따라서 단일 표적을 이용한 공간분해능 평가법을 가지면 이제까지 사용되어 왔던 이중 표적을 이용한 공간분해능 평가의 한계를 극복할 수 있다. 여기 더해서 이 방법의 이용을 전제로 한다면 팬텀이나 패턴 제작도 간편해지게 된다.

영상의학에서 화질은 중요하다. 영상의 선예도를 결정하는 공간분해능 평가는 화질에서 우선하는 요소이다. 본 연구에서 제안한 단일표적을 이용한 공간분해능 평가법은 디지털 영상평가에 쓸모 있게 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 이 단일표적 공간분해능 평가의 기본적인 이론과 방법은 모든 디지털 영상의 공간분해능 평가로 확대할 수 있다. 그렇다면 본 연구에서 제안한 단일 표적 공간분해능 평가방법도 영상 공간분해능 평가의 한 축으로 자리 잡을 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Shigehiko Katsuragawa, Kim Jung Min, Kim Ho Kyung : Iyou Gazou Jouhougaku 2nd ed, 77-80, Daihaksurim Pub Co, Seoul, 2008
2. Huh Joon : Medical Image Informatics of Radiation, 169-181, Shinkwang Pub Co, Seoul, 2000
3. Richard R. Carlton, Arlene M. Adler : Principles of

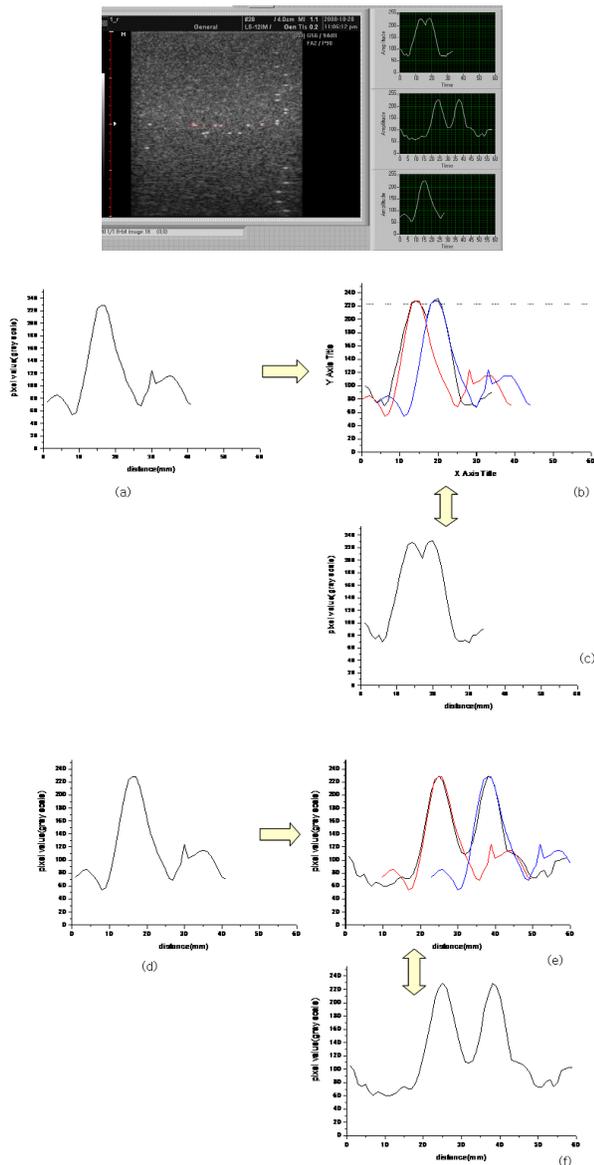


Fig. 7 Experimental verification of the theory estimating spatial resolution using a single target. (interval 0.25mm: a-c, interval 1.0mm: d-f). (a) line profile obtained for a single target (PSF), (b) combined line profile of the two PSFs located with interval of 0.25mm, (c) line profile of the phantom image of the 2 targets with 0.25mm in interval, (d) line profile obtained for a single target (PSF), (e) combined line profile of the two PSFs located with interval of 1.0mm, (f) line profile of the phantom image of the 2 targets with 1.0mm in interval.

1개의 단일 표적만으로도 공간 분해능을 간편하게 측정할 수 있고 이중 표적으로 인한 제한을 극복할 수 있다는 것이 검증되었다.

- Radiographic Imaging (An Art and a Science) 4th edition, 438–441, Thomson Delmar Learning, 2006
4. Ko Shin Kwan, Kim Gi Hong, Kim Sung Chul, et al. : Introduction of Radiologic Science, 281–284, Komoonsa Pub Co, Seoul, 2014
 5. Takahashi S. : Illustrated Computer Tomography, 18–39, Springer-Verlag, 1983
 6. Akihiro Kojima, Masanori Matsumoto, Mutsumasa Takahashi, et al. : Effect of Spatial Resolution on SPECT Quantification Values, 508–514, J Nucl Med 30, 1989
 7. Lee W. Goldman : Principles of CT (Radiation Dose and Image Quality), 213–225, J Nucl Med Technol 35, 2007
 8. Steven W. Smith : The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing 2nd ed, 423–430, California Technical Publishing, California, 1999

•Abstract

An Evaluation For Spatial Resolution, Using A Single Target On A Medical image

Kyung-Sung Lee

Department of Radiotechnology, Cheju Halla University

Hitherto, spatial resolution has commonly been evaluated by test patterns or phantoms built on some specific distances (from close to far) between two objects (or double targets). This evaluation method's shortcoming is that resolution is restricted to target distances of phantoms made for test. Therefore, in order to solve the problem, this study proposes and verifies a new method to efficiently test spatial resolution with a single target.

For the research I used PSF and JND to propose an idea to measure spatial resolution. After that, I made experiments by commonly used phantoms to verify my new evaluation hypothesis inferred from the above method. To analyse the hypothesis, I used LabVIEW program and got a line pixel from digital image. The result was identical to my spatial-resolution hypothesis inferred from a single target.

The findings of the experiment proves only a single target can be enough to relatively evaluate spatial resolution on a digital image. In other words, the limit of the traditional spatial-resolution evaluation method, based on double targets, can be overcome by my new evaluation one using a single target.

Key Words : spatial resolution, single target, PSF, JND