

이산 웨이블릿 합성 영상을 이용한 철강 후판 검사의 조명 메커니즘에 관한 연구

조은덕*·김경범**†

*한국교통대학교 대학원, **†한국교통대학교 기계자동차항공공학부

A Study on Illumination Mechanism of Steel Plate Inspection Using Wavelet Synthetic Images

Cho Eun Deok* and Kim Gyung Bum**†

*Graduate school, Korea National University of Transportation

**†Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

In this paper, surface defects and typical illumination mechanisms for steel plates are analyzed, and then optimum illumination mechanism is selected using discrete wavelet transform (DWT) synthetic images and discriminant measure (DM). The DWT synthetic images are generated using component images decomposed by Haar wavelet transform filter. The best synthetic image according to surface defects is determined using signal to noise ratio (SNR). The optimum illumination mechanism is selected by applying discriminant measure (DM) to the best synthetic images. The DM is applied using the tenengrad-euclidian function. The DM is evaluated as the degree of contrast using the defect boundary information. The performance of the optimum illumination mechanism is verified by quantitative data and intuitive image looks.

Key Words : Discriminant Measure, Optimum Illumination Mechanism, Steel Plate, Surface Inspection, Discrete Wavelet Transform

1. 서 론

철강은 다양한 산업에서 수많은 용도로 사용되고 있으며, 그 중 철강 후판의 쓰임이 가장 많은 비율을 차지하고 있다. 철강 후판의 수요가 증가하면서 품질보증에 대한 요구도 증가하여 품질검사에 대한 필요성이 강조되고 있다. 후판의 품질 관리 목록 중에도 소비자가 가장 먼저 확인할 수 있고, 품질에 대한 평가를 내리기에 쉽기 때문에 표면품질이 가장 중요하다. 대부분의 철강 후판의 표면검사는 수동검사로 이루어진다. 수동검사는 검사자

의 감에 의해 검사가 이루어지고, 검사자 마다의 시각적 차이가 있어 품질보증에 대한 신뢰도 문제와 품질 데이터의 부족 문제가 있다. 자동 검사가 이루어지지 못하는 이유 중 가장 큰 문제는 일반 중소기업이 고가의 자동 검사 장비를 보유할 수 없는 문제점과 국내 기술로 이루어진 장비가 아니기 때문에 유지·보수에도 어려움이 있기 때문이다. 따라서 국내 기술로 만들어진 자동 검사 장비의 필요성이 증대되고 있다. 철강 후판의 경우 저대바비 균일·무특징의 특성이 있기 때문에 검사 조명계에 대한 연구에 어려움이 있다. 따라서 철강 후판의 표면 특성에 대응하고 다양한 결함을 검출하여 분류의 정확성을 높일 수 있는 최적 조명계에 대한 연구의 필요성이 있다[1].

†E-mail: kimgb@ut.ac.kr

본 연구에서는 철강 후판 대표 결함의 특징을 분석하고 기본 조명 메커니즘과 기본 조명 메커니즘을 조합한 융합 조명 메커니즘을 이용해 영상을 획득한다. 저대비비균일무특징의 특성을 가진 철강 후판 영상에 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform; DWT)을 적용하여 결함과 비결함 영역의 대비를 향상시키고, 결함의 특징 추출과 분류능력을 향상 시킬 수 있는 합성영상을 생성하였다. 합성영상에 Tengrad-Euclidian 함수를 기반한 판별함수를 적용하여 최적 조명 변수를 선정하여 철강 후판의 검사에 필요한 최적 조명 메커니즘을 결정하고자 한다.

2. 철강 후판의 대표 결함

철강 후판의 대표 결함에는 철강 후판의 표면 결함으로는 Fig. 1과 같이 스케일(scale), 스킵(scab), 균열(crack), 이물혼(foreign object) 등이 있다. 후판 표면의 반사특성은 비교적 평탄한 영역인 비결함 영역의 경우 조명에서 방사된 빛이 표면에 반사하여 주로 정반사 성분이 카메라 센서에 들어온다. 이에 반해 결함 영역의 경우는 표면이 불규칙하여 조명에서 방사된 빛이 확산 반사하여 카메라 센서에 들어오는 빛의 양이 적다. 따라서, 영상에서 비결함 영역의 픽셀 값이 결함 영역보다 상대적으로 높은 특성을 가진다.

표면 결함 중 스케일은 표면이 불규칙하고 면적이 타 결함에 비해 넓은 결함이다. 스킵은 스케일과 유사하지만 표면의 개재물에 의한 반사특성에 의해 비결함 영역과 다른 밝기 특성을 보인다. 피크랙은 횡방향으로 긴 형태를 가지며, 스타크랙은 다른 크랙에 비해 면적이 작고 불규칙한 모양과 배치를 갖는 형태이다. 이물혼은 이물 혼입에 의해 발생하는 결함으로 혼입되는 이물질의 형태에 따른 모양 특성을 가진 결함이다. 이러한 철강 후판 대표적인 결함은 표면이 요철 형태를 나타낸다.

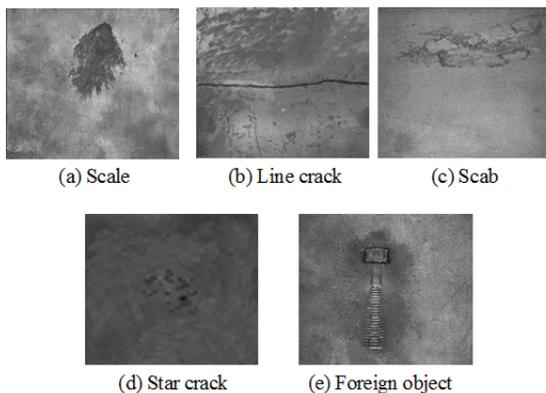


Fig. 1. Surface defects of steel plate.

3. 조명 메커니즘

철강 후판 표면의 결함 영상을 획득하기 위해 기본 구조 조명 메커니즘과 기본 구조를 융합하여 구성한 융합 조명 메커니즘을 사용하였다. 기본 조명 메커니즘에는 단방향 경사조명(Directional illumination; DI), 양방향 경사조명(Bi-directional illumination; BI), 동축조명(Coaxial illumination; CI), 돔조명(Dome illumination; DOI)이 있다.

Fig. 2의 단방향 경사조명과 양방향 경사조명은 표면이 불규칙한 경우 확산 반사를 발생시켜 요철 결함이 있는 표면의 영상을 취득하기 유리하다. 동축조명은 카메라와 조명을 동일한 축에 위치하여 표면에 정반사 되는 성분을 카메라 센서에 받아들이고 균일하고 높은 조도의 영향을 줄 수 있는 장점이 있다. 돔조명의 경우는 어떠한 형상의 대상물에도 균일한 조도의 영향을 주며 가장 큰 장점은 그림자를 만들어 내지 않기 때문에 요철 결함에서 그림자의 영향없이 영상을 획득할 수 있다. Fig. 3의 융합 조명은 기본 구조 조명 메커니즘의 특성을 고려하여 양방향 경사조명과 동축조명을 융합한 조명 메커니즘(BI&CI)과 동축조명과 돔조명을 융합한 조명 메커니즘(DOI&CI)가 있다. Fig. 3 (a)와 같은 BI&CI는 경사조명의 영향으로 요철 결함 부분에 발생할 수 있는 그림자의 영향을 줄이기에 효과가 있다. Fig. 3 (b)의 경우 DOI&CI는 일반적으로 불규칙한 표면 결함의 형태에도 균일하고 밝으며, 그림자의 영향을 받지 않는 영상을 얻을 수 있다[2].

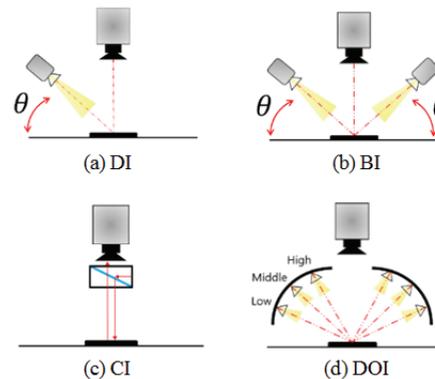


Fig. 2. Typical illumination mechanism.

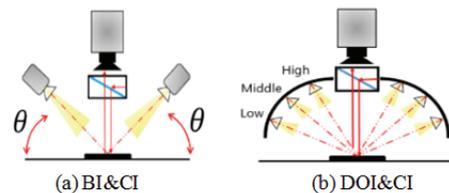


Fig. 3. Combination of typical illumination mechanisms.

기본 조명에서 DI와 BI의 경우 결합 시편을 기준으로 각도를 $10^\circ \sim 70^\circ$ 의 범위에서 10° 간격으로 각도를 구분하여 5가지의 변수로 구성하였다. DOI의 경우 채널 별 높이에 따라 상, 중, 하, 상중, 상하, 중하, 상중하의 7가지 변수로 구성하였다. 이러한 변수로 구성된 5가지 조명 메커니즘을 5가지 대표 결합에 적용하여 기본 조명 메커니즘 영상 85개와 융합 조명 메커니즘 영상 60개, 총 140장의 결합 영상을 획득하였다.

4. DWT기반 합성영상 및 판별함수

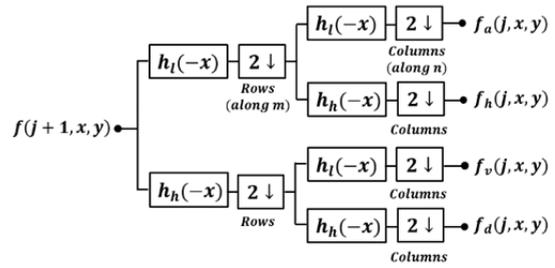
4.1 DWT 기반 합성영상

조명 메커니즘을 이용해 획득한 철강 후판 영상은 결합과 비결합 영역의 대비가 작고, 잡음이 많은 특징을 갖고 있다. 이러한 특징에 대응하여 결합과 비결합 영역의 대비를 향상시키기 위해 DWT를 적용하여 합성영상을 생성한다[3]. DWT합성영상은 결합과 비결합의 대비를 향상시키고 잡음의 영향을 줄여 결합 특징 추출과 분류능력을 향상시킨다. DWT에 적용되는 필터는 Haar wavelet transform 필터를 사용하여 영상을 분할하였다. Haar wavelet transform 필터는 식 (1)과 같이 정의된다.

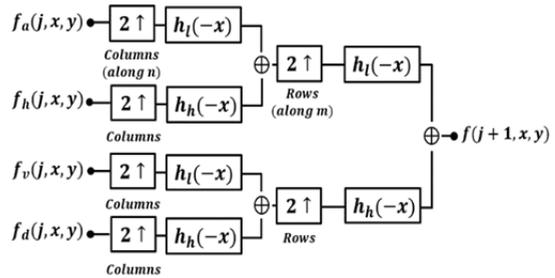
$$\begin{aligned} h_l &= \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} \\ h_h &= \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h_l 과 h_h 는 각각 Haar 변환 필터의 저역, 고역 통과 필터를 나타내고 영상을 네 개의 저해상도 성분으로 분해한다. 행과 열 방향으로 두 개의 저역 통과 필터를 통해 근사정보(Approximation coefficient, f_a)가 생성되고, 행 방향으로 저역 통과 필터와 열 방향으로 고역 통과 필터를 통해 수평상세정보(Horizontal detail coefficient, f_h)를 생성한다. 또한 행 방향으로 고역 통과 필터와 열 방향으로 저역 통과 필터를 통해 수직상세정보(Vertical detail coefficient, f_v)가 생성되고, 행과 열 방향으로 두 개의 고역 통과 필터를 통해 대각상세정보(Diagonal detail coefficient, f_d)를 생성한다. DWT를 이용한 영상 분해 및 복원 과정을 Fig. 4를 통해 나타냈다.

이 과정을 통해 생성된 저해상도 DWT 영상을 이용해 영상의 대비를 향상되고 잡음의 영향을 줄이기 위해서는 각 영상을 적절하게 합성하여 이용할 필요가 있다. DWT가 적용된 영상의 경우 연산에 의해 음수의 픽셀 값이 계산되어 있을 가능성이 있으므로 식 (2)과 같은 연산을 통해 영상을 생성한다.



(a) Wavelet transform



(b) Inverse wavelet transform

Fig. 4. Discrete wavelet transform.

$$F_i^n = f_i^n(x, y)^2 \quad (2)$$

여기서, i 는 근사(a), 수평(h), 수직(v), 대각선(d)의 방향성분, n 은 해당하는 해상도 단계를 의미한다. 이 식에서 계산한 F_a 영상은 획득한 영상의 근사정보를 의미하고 나머지 F_i 영상은 획득한 영상의 각 방향에서의 상세정보 영상을 의미한다. 이러한 상세정보 영상의 대비를 극대화시키기 위해 근사정보 영상과 각 방향의 상세정보 영상과의 비를 계산하여 정규화 에너지영상 E_h, E_v, E_d 를 식 (3)-(5)와 같이 계산한다.

$$E_h^n(x, y) = F_h^n(x, y)/F_a^n(x, y) \quad (3)$$

$$E_v^n(x, y) = F_v^n(x, y)/F_a^n(x, y) \quad (4)$$

$$E_d^n(x, y) = F_d^n(x, y)/F_a^n(x, y) \quad (5)$$

여기서 n 은 식 (2)에서와 같이 각 방향성분이다. 정규화된 에너지영상을 합성하기 위해 분할된 해상도 사이의 관계를 정의해야 한다. 각 해상도 간의 변수를 계산하는 식 (6)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta F_i^{n, n+1} = \left(\frac{F_i^{n+1}}{w^2} \right) - \left(\frac{F_i^n}{w^2} \right) \quad (6)$$

여기서 F_i^n 과 F_i^{n+1} 은 $n, n+1$ 레벨의 해상도에서 제공된 픽셀 값을 의미하고, w 는 정사각형의 마스크 크기를

나타내고, 3×3 크기의 마스크를 사용하였다. 식 (6)을 이용해 계산된 변수들을 이용하여 영상의 해상도 사이의 가중치를 계산한다. 해상도 간의 가중치는 식 (7)과 같이 계산한다.

$$C_i^{n,n+1} = 1 - \left(\frac{\Delta F_i^{n,n+1}}{F_i^n} \right) \quad (7)$$

식 (2)-(7)을 통해 계산된 해상도 간의 정규화 에너지영상과 가중치를 이용하여 다음과 같은 식 (8)에 적용하여 DWT합성영상을 생성한다.

$$S_i^{123} = E_i^1 + C_i^{1,2} E_i^2 + C_i^{2,3} E_i^3 \quad (8)$$

여기서, i 는 웨이블릿 고역 필터가 적용된 방향에 따라 나누어진 h, v, d, hv, hd, vd, hvd 의 변수를 의미한다. 식 (8)을 통해 생성된 DWT합성영상의 최적 변수를 결정하기 위해 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio; SNR)를 사용하여 평가한다. SNR을 계산하는 식 (9)는 다음과 같이 정의된다.

$$SNR = \frac{\widehat{I}_d - \widehat{I}_{df}}{\sigma_{df}} \quad (9)$$

여기서, i 는 웨이블릿 고역 필터가 적용된 방향에 따라 나누어진 h, v, d, hv, hd, vd, hvd 의 변수를 의미한다. 식 (8)을 통해 생성된 DWT합성영상의 최적 변수를 결정하기 위해 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio; SNR)를 사용하여 평가한다. SNR을 계산하는 식 (9)는 다음과 같이 정의된다. 여기서 $\widehat{I}_d, \widehat{I}_{df}$ 는 각각 결함과 비결함 영역의 픽셀 평균 값을 의미하고, σ_{df} 는 비결함 영역의 표준편차를 나타낸다. DWT합성영상에 SNR을 이용하여 계산한 각 결함 별 성능 값(SNR값)을 정규화된 값으로 정리하였다. 각 결함 별 SNR정규화 데이터를 평균값으로 정리하여 비교한 결과, 정규화된 평균 값의 크기가 각 결함 별 상위 5가지 변수를 나타내는 데이터를 Table 1에 나타냈다.

Table 1. SNR comparisons for synthetic images

Defect S_i^n	Scale	Line crack	Scab	Star crack	Foreign object
S_{hv}^3	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00
S_{hd}^3	0.63	0.65	0.94	0.34	0.67
S_h^3	0.22	0.62	0.85	0.80	0.75
S_h^{23}	0.29	1.00	0.93	0.78	0.84
S_h^{123}	0.29	0.75	0.95	0.78	0.73

Table 1을 통해 DWT합성 이미지의 변수 별 정규화 값을 비교한 결과 S_{hv}^3 를 변수로 갖는 합성 이미지에서 다른 변수에 비해 높은 SNR값을 나타내는 것을 알 수 있었다. S_{hv}^3 합성 이미지 중 띠크랙에서는 가장 높은 SNR값이 도출되지 않았지만, 띠크랙에서도 상당히 높은 SNR값이 도출되었다. 따라서 결함과 비결함 영역의 대비를 향상시키고 잡음의 영향도 줄일 수 있는 DWT합성이미지의 최적 변수는 S_{hv}^3 합성 이미지로 결정되었다.

4.2 Tenengrad-Euclidian 기반 판별함수

SNR을 이용해 평가된 최적 DWT합성이미지의 결함과 비결함 영역의 분리도를 수치적으로 나타내기 위한 수단으로 Tenengrad-Euclidian 함수[4]를 기반으로 한 판별함수(Discriminant Measure; DM)를 사용하였다. DM은 DWT합성 이미지에서 결함과 비결함 영역의 분리도를 계산할 수 있으며, 이를 통해 조명 메커니즘의 변수 중 최적 조명 변수를 결정할 수 있다. 여기서 사용된 DM은 다음 식 (10)과 같이 정의되고, 결함과 비결함 영역 사이의 경계 정보를 정량적인 차로 수치화하여 모델링 된다.

$$DM = (F_{TE-d} - F_{TE-df}) \quad (10)$$

$$F_{TE} = \sum_x \sum_y I(x,y)^2, I(x,y)^2 > T$$

여기서 F_{TE-d}, F_{TE-df} 는 결함 영역과 비결함 영역 영상의 픽셀 값을 의미하고, $I(x,y)$ 는 소벨 1차미분 마스크

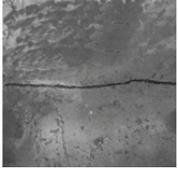
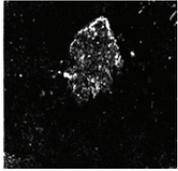
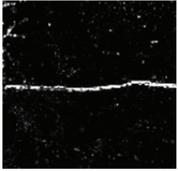
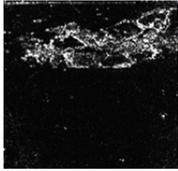
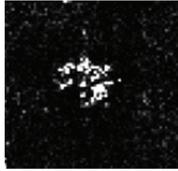
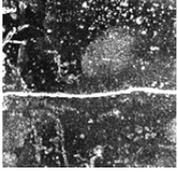
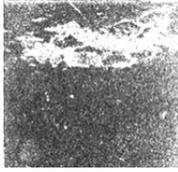
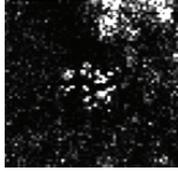
Table 2. DM value comparisons for illumination mechanisms

Defect	Scale	Line crack	Scab	Star crack	Foreign object
DI	0.90	0.97	0.80	0.89	0.91
BI	0.98	0.95	1.00	0.89	0.96
BI&CI	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00
DOI	0.15	0.76	0.87	0.88	0.85
DOI&CI	0.15	0.75	0.94	0.87	0.74

Table 3. Parameters of optimum illumination mechanism

Surface defect	Illumination mechanism	Optimum illumination
Scale	BI&CI(70°)	BI&CI (70°)
Line crack	BI&CI(70°)	
Scab	BI&CI(60°)	
Star crack	BI&CI(70°)	
Foreign object	BI&CI(70°)	

Table 4. Comparison of best and bad images of illumination mechanism

	Scale	Line crack	Scab	Star crack	Foreign object
Original Images					
Best Images					
Illumination mechanism	BI&CI	BI&CI	BI&CI	BI&CI	BI&CI
Bad Images					
Illumination mechanism	DI	DOI	DI	DI	DOI

를 적용하여 획득한 영상의 x방향과 y방향의 경계 값이다. T는 잡음의 영향을 줄이기 위해 설정된 임의의 픽셀 값을 나타내며, T이상의 값 만을 경계 값으로 계산한다.

위에서 결정된 최적의 합성 이미지변수 S_{hv}^3 의 영상에 DM을 적용하여 각 조명 메커니즘별 분리도를 계산하였다. 계산 결과를 정규화 데이터로 정리하여 Table 2와 같이 나타냈다. Table 2를 통해 정규화 데이터를 비교한 결과 BI&CI에서 스캐를 제외한 나머지 결함에서 가장 높은 값을 나타냈다. 하지만 스캐에 경우에도 가장 높은 값을 나타낸 BI의 값과 비교하여도 상당히 높은 값이 도출되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 결함과 비결함 영역의 대비를 극대화 하여 영상을 획득 할 수 있는 최적 조명은 BI&CI로 선정되었다, 여기서 최적 조명 메커니즘의 변수는 Table 3을 통해 알 수 있듯이 최대값의 누적수가 가장 많은 70°로 선정되어 최적 조명 메커니즘은 BI&CI(70°)로 결정되었다. 최적 조명 메커니즘을 통해 획득한 원본 이미지와 DWT합성이미지(Best Image), 결함 별 가장 낮은 정규화 값을 나타내는 조명을 통해 획득한 합성 이미지(Bad

Image)를 Table 4를 통해 직관적으로 비교해 보았다. BI&CI가 적용된 합성 이미지의 경우는 결함 영역이 뚜렷하게 나타나고, 영상의 잡음의 영향이 최소화된 것을 볼 수 있다. 하지만 가장 낮은 정규화 값을 나타내는 조명 메커니즘은 DI와 DOI로 나타났다. 이 조명 메커니즘은 융합된 조명 메커니즘에 비해 요철 형태의 결함의 경계를 잘 표현하지 못하고, 잡음의 영향을 줄이지 못해 비결함 영역에도 결함으로 인지될 수 있는 잡음부분이 많은 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 기반으로 생성된 합성 이미지를 사용하여 대비가 낮고 표면이 균일하지 않으며, 특별한 특징이 없는 청강 후판의 결함 검출을 위한 최적 조명 메커니즘을 제안하였다. DWT합성 이미지는 영상에서 결함과 비결함 영역의 대비를 향상시키고 잡음의 영향을 줄였다. 합성 이미지의 최적 변수를 찾

기 위해 SNR을 이용해 최적 합성영상 변수는 S_{hv}^3 로 결정되었다. 각 결합 별 S_{hv}^3 이미지에 Tenengra-Euclidian 함수 기반 판별함수를 적용하여 결합과 비결합 영역의 분리도를 수치화 하여 비교한 결과 BI&CI 조명이 최적 조명 메커니즘으로 결정되었고, 최적 조명 변수는 70° 로 선정되었다. 실험 결과 기본 조명 메커니즘을 단일적으로 사용한 결과보다 기본 조명을 융합하여 구성한 조명 메커니즘(BI&CI)이 적용된 결과 영상이 결합과 비결합 영역의 대비를 향상시키고 특징 추출과 결합 분류에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 지원사업(2015R1D1A1A01056691)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Neogi, N, Dusmanta, K. and Pranab, K., "Review of Vision-Based Steel Surface Inspection Systems", EURASIP Journal on Image and Video Processing, pp. 1-5, 2014.
2. Cho, E. D. and Kim, G. B., "Fused Illumination Mechanism Design for Steel Plate Surface Inspection" Journal of KSDT Vol. 16, No. 3, pp. 14-19, 2017.
3. Li, W. C., Tsai, D. M., "Wavelet-Based Defect Detection in Solar Wafer Images with Inhomogeneous Texture", Pattern Recognition, Vol. 45, pp. 742-756, 2012.
4. Gonzales R C, Woods R E and Eddins S L, "Digital Image Processing", 2017.

접수일: 2018년 5월 31일, 심사일: 2018년 6월 19일,
게재확정일: 2018년 6월 19일