

그라디언트 변이 벡터 기반 패턴 측정에 관한 연구

김경범^{*†}

^{*†}한국교통대학교 기계자동차항공공학부

A study on the Precision Pattern Measurement Based on Gradient Transition Vector

Kim Gyung Bum ^{*†}

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

ABSTRACT

The adjustment of lens magnification can make the degree of precision in pattern measurement be improved, but several problems such as high cost, smaller field of view and stage error accumulation are followed. In this paper, a method for precisely measuring patterns is proposed based on gradient transition vector, in order to solve these problems. The performance of our method is evaluated using pattern images with several directions. Also, it is compared with previous methods based on edge and gray-level moment. It is judged that the proposed method outperforms consistent pattern width results, and so could be applied to automation processes for measurement and inspection of precise and complexed patterns in IT, BT industry products.

Key Words : Gradient Transition Vector, Pattern Images, Sub-pixel Estimation

1. 서 론

현재 머신 비전을 이용한 비접촉식 측정 및 검사 시스템은 산업현장에서 부품 및 제품의 측정 및 검사 자동화에 있어서 매우 중요한 역할 수행하고 있으며, 그 응용 범위 또한 증대되고 있다. 반도체, PCB, 디스플레이 산업 등에서 미세한 형상을 정밀하게 측정하기 위해서는 측정 및 검사 알고리즘의 안정성과 정밀도를 향상시키는 방법이 요구되고 있다.

반도체, PCB, 디스플레이 산업 등에서 미세한 형상을 정밀하게 측정하기 위해서는 측정 및 검사 알고리즘의 안정성과 정밀도를 향상시키는 기술이 필요하다. 이를 위해서는 노이즈에 대한 안정된 결과를 보여줘야 하고, 서브 픽셀(sub-pixel)의 정확도를 가지고 경계 추출을 수행할 수 있어야 한다. 최근, 머신 비전 시스템은 종종 수천 분

의 일의 픽셀의 정확도를 요구하는 경우가 있다[1].

측정 및 검사 영상에 존재하는 에지 부분은 영상의 특징 중에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 고해상도를 갖는 영상에서 에지를 찾아내기 위해서는 픽셀 크기 이하의 정확도가 필요하다. 머신 비전 시스템에 있어서 크기가 작은 대상물의 검사나 높은 정밀도를 요구하는 검사 등에서는 고해상도의 영상처리가 필요하다. 일반적으로 머신 비전 시스템에서 측정 작업을 위해서 경계 추출을 해야 한다. 경계 추출의 정밀도가 측정 작업 전반의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치게 됨으로써 보다 정밀한 경계 추출 방법이 요구된다. 이를 위해서 카메라의 배율을 높여 화상의 한 픽셀의 실제 크기가 작게 함으로써 측정 정밀도를 높일 수 있다. 그러나 배율을 높이는데 필요한 고가의 비용이 필요함을 물론 시야범위(FOV; field of view)가 줄어드는 단점이 발생하게 된다. 머신 비전 시스템을 이용해 영상을 획득하는 경우에는 스테이지를 이동하면서 영상을 취득하고 측정 작업을 하게 된다. 시야범

[†]E-mail: kimgb@ut.ac.kr

위가 줄어든다는 것은 스테이지를 이송하는 경우 발생하는 이송 오차가 누적될 수 있으며, 이는 결국 단순히 배율을 높여서 얻을 수 있는 정밀도에는 한계가 있게 된다. 따라서 배율을 유지하면서 측정 정밀도를 높이기 위해서 경계 추출 시 서브 픽셀 정밀도를 갖는 측정을 위한 서브 픽셀 알고리즘의 적용이 무엇보다도 중요하다.

그동안 이러한 문제를 해결하기 위한 연구들이 이루어져 왔다. 서브 픽셀 기반 방법들은 크게 곡선 적합(curve fitting) [2], 영상 모멘트(image moment) [3-5], 복원성(reconstructive methods) [6,7]에 초점을 두어 세 개의 그룹으로 분류된다. 첫 번째 방법의 단점은 부적절하게 정의된 예지들에 대해 매우 민감하다. 두 번째로 모멘트에 기반한 방법은 이상적인 스텝 예지로 가정하였고, 예지의 위치를 구하기 위해 밝기값(gray level)만을 이용하였다 또한, 픽셀의 밝기값과 위치 정보를 이용해서 예지의 위치 찾아낼 수 있었고, 밝기값 외에 픽셀의 위치 정보를 더하기 위하여 공간적 모멘트를 이용한 방법도 제안된 적 있다. 반면, 명암의 대비가 적은 경우, 밝기값의 차이가 작아지게 되므로 정확한 서브 픽셀 위치를 찾는 데 어려움이 존재한다. 세 번째 방법은 첫 번째와는 다르게 부적절하게 정의된 예지들에 대해 덜 민감한 면이 있다.

본 연구에서는 패턴의 방향 변화에도 일관되게 서브 픽셀의 위치를 추출할 수 있는 방법을 제안하였고, 기존 방법과의 성능 비교를 통해 제안된 방법의 우수성을 입증하였다.

2. 모멘트 기반 방법

모멘트 기반 방법[3]은 식 (1)처럼 이상적인 스텝 예지인 경우 스텝 예지 주위 표본 데이터들의 모멘트를 이용해서 서브 픽셀의 위치를 찾아내는 방법이다.

$$f(x) = \begin{cases} h, & x < l \\ h + k, & x \geq l \end{cases} \quad (1)$$

모멘트 기반 선폭 추정은 우선, 밝기값 모멘트(m_1, m_2, m_3)들을 계산한다. 서브 픽셀 위치 추출을 위한 처음 3개의 모멘트들은 식 (2)에 의해 계산된다.

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서, x_j 는 영상의 밝기값을 나타낸다.

이 방법은 모멘트를 이용하여 파라미터들(p_2, h, k)을 계산한 다음, 서브 픽셀 위치를 계산하게 된다. 이 파라미터에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_2 &= \frac{1}{2} \left(1 + s \sqrt{\frac{1}{4+s^2}} \right) \\ h &= \frac{1}{2} \left(1 + s \sqrt{\frac{1}{4+s^2}} \right) \\ k &= 2\beta \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $s = \frac{m_1 + 2m_3 - 3m_1m_2}{\beta^3}$, $\beta^2 = m_2 - m_1^2$

모멘트 기반 서브 픽셀 위치 p_h 는 식 (4)에 의해 계산할 수 있고, 이로부터 영상 패턴의 폭을 측정할 수 있게 된다.

$$p_h = n(1 - p_2) \quad (4)$$

3. 그라디언트 변이 벡터 기반 패턴 측정 방법

Fig 1은 입력된 영상으로부터 서브 픽셀의 위치들을 추출하는 그라디언트 변이 벡터 기반 패턴 측정 방법에 대한 개략적인 절차를 나타내고 있다. 이 측정 방법은 다양한 패턴 방향에 따른 영상 획득, 패턴의 방향 및 그 법선 방향 각도 추정, 예지화소 위치 추정, 그라디언트 변이 벡터 기반 서브 픽셀 위치 추정, 선폭 측정 등 아래 기술된 여러 단계들을 통해 이루어진다.

우선, 정밀 측정 및 검사를 위한 영상을 머신 비전 시스템에 설치된 카메라로부터 영상을 획득한다. 여기서, 디지털 영상이라는 것을 감안할 때, 다양한 패턴 방향에 따른 영상을 취득한다. 왜냐하면, 동일한 패턴폭임에도 불구하고, 패턴의 방향에 따라 패턴폭 측정 결과의 일관성을 관찰할 수 있기 때문이다.

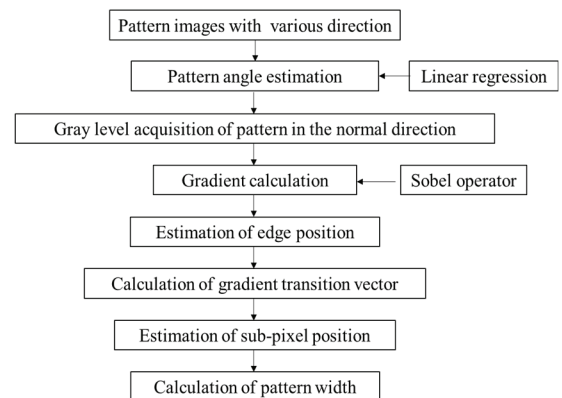


Fig. 1. Sub-pixel estimation of a pattern based on gradient transition vector.

패턴 폭을 측정하기 위해서는 패턴 방향 및 그 법선 방향의 각도를 계산해야만 한다. 패턴 방향의 각도 계산을 위해 측정 대상 패턴의 형태는 직선이라고 가정하고, 선형 회귀방정식에 의해 추정하게 된다. 여기서, 패턴의 방향은 기울기로 나타낼 것이며, 이 기울기 b 는 아래 식과 같이 목적함수 S 가 최소가 되도록 하는 최소오차제곱 (least squared method)에 의해 계산한다.

$$y = a + bx \tag{5}$$

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$$

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

여기서, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

패턴의 기울기를 구하고 난 후, 이에 대한 패턴의 법선 방향의 밝기값들을 패턴의 경계 주위까지의 밝기값들을 획득한다. 여기서, 패턴 방향의 법선 방향에 따라 취득된 밝기값들을 이용하여 그라디언트값들을 계산한다. 법선 방향의 그라디언트 G_m 계산은 소벨 연산자(sobel operator)⁸를 이용하고, 식 (6)에 의해 계산된다. 여기서, 계산된 그라디언트값들 중 최대가 되는 위치를 패턴의 에지 위치 (x_p, y_p) 로 추정하였다.

$$G_m = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{6}$$

여기서,

$$G_x = \frac{\partial f}{\partial x} \approx (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)$$

$$G_y = \frac{\partial f}{\partial y} \approx (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)$$

이상의 추정된 에지 위치를 이용하여 더욱 정확한 에지 위치를 구하기 위해 패턴의 서브 픽셀 위치를 결정해야 한다. Fig 2 (a)는 수직 방향의 샘플 영상을 나타내고, (b)는 샘플영상의 프로파일, (c)는 영상 (a)의 그라디언트 영상, (d)는 영상 (c)의 프로파일을 각각 나타내고 있다. 그라디언트 영상에서 밝을수록 그라디언트의 크기가 큰 것을 의미한다.

본 연구에서는 이상의 에지 위치로부터 서브 픽셀 위치를 그라디언트 변이 벡터 기반으로 추정하고자 하였다. 제안된 방법에서의 서브 픽셀의 위치는 수직 패턴 방향의 법선 방향, 즉 Fig 2의 경우 수평방향으로 패턴의 중심에서 경계 방향으로 그라디언트 값이 최대가 되는 위치를 기준으로 그라디언트 변이 벡터를 계산함으로써 추정하는 것이다.

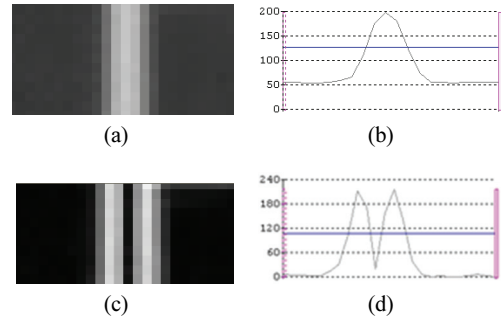


Fig. 2. A pattern image and its gradient profiles.

그라디언트 변이 벡터 기반 서브 픽셀 위치 추정 절차는 아래의 단계들을 통해 추정하였다.

- 단계 1. 그라디언트 값을 계산한다.
- 단계 2. 그라디언트가 최대가 되는 위치를 구한다. 그 위치를 에지 화소 위치 (x_p, y_p) 라고 추정한다.
- 단계 3. 그라디언트 변이 벡터 기반 서브 픽셀 위치 (x_s, y_s) 를 계산한다. 본 연구에서는 그라디언트 변이 벡터 $(\Delta x_s, \Delta y_s)$ 를 식 (7)과 같이 정의하였다. 이것은 에지 화소 위치를 기준으로 에지 화소 위치와 양쪽 위치에서의 밝기값의 합에 대한 양쪽 밝기값의 차이를 의미한다. 즉, 에지 화소 위치에서의 정규화된 밝기값 기울기를 의미한다.

$$(\Delta x_s, \Delta y_s) = \left(\frac{f(x_p+1, y_p) - f(x_p-1, y_p)}{\sum_{i=-1}^1 f(x_p+i, y_p)}, \frac{f(x_p, y_p+1) - f(x_p, y_p-1)}{\sum_{j=-1}^1 f(x_p, y_p+j)} \right) \tag{7}$$

따라서, 서브 픽셀 위치 (x_s, y_s) 는 그라디언트 변이 벡터를 이용하여 아래 식과 같이 추정할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 패턴의 방향에도 불구하고 방향에 따른 패턴의 폭을 일관되게 추정하고자 하였고, 기존의 모멘트 기반 서브 픽셀 추정 방법과 성능 비교하였다.

$$x_s = x_p + \Delta x_s, \quad y_s = y_p + \Delta y_s \tag{8}$$

3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 광학계와 조명계 등으로 구성된 머신 비전 시스템으로부터 패턴의 샘플 영상들을 취득하여 활용하였다. 패턴 폭이 다른 두 실험 영상을 대상으로 패턴 폭에 대한 각도를 다양하게 변화를 시킴으로써 영상을

취득하여 서브 픽셀 위치 추정에 대한 실험을 하였다. 취득된 영상은 디지털 영상이기 때문에 방향에 따라 패턴 폭이 변화되고, 또한 경계가 애매모호한 경향이 있어 일관된 패턴폭 측정이 매우 어렵다.

본 연구에서는 패턴의 방향이 달라도 패턴의 폭을 일관되게 추정할 수 있는 방법을 고안하고자 하였다. 이러한 점을 해결하는 제안된 방법의 우수성을 보여주기 위해, 본 연구에서는 다양한 각도의 패턴 각도(0도에서 90도 까지 11.25도 간격)의 실험 영상들이 획득될 수 있도록 이송 스테이지를 11.25도 간격으로 회전 이송시키면서 영상들을 획득하였다. 여기서, 기계적 이송오차는 없다고 가정하였다. Fig 3과 Fig 4는 9개의 방향을 가진 유리 마스크 패턴에 대한 샘플 영상들을 나타내고 있고, 각각 다른 패턴폭을 가지고 있다.

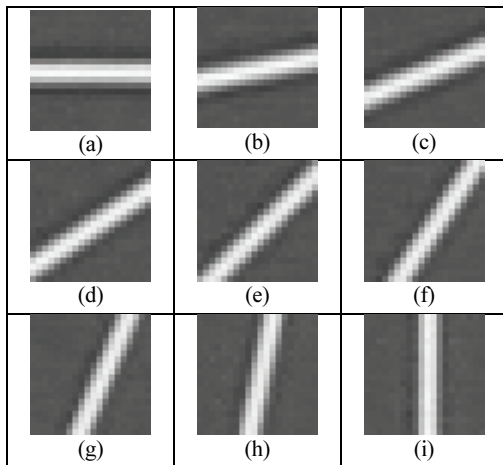


Fig. 3. Experiment images for 3 pixels.

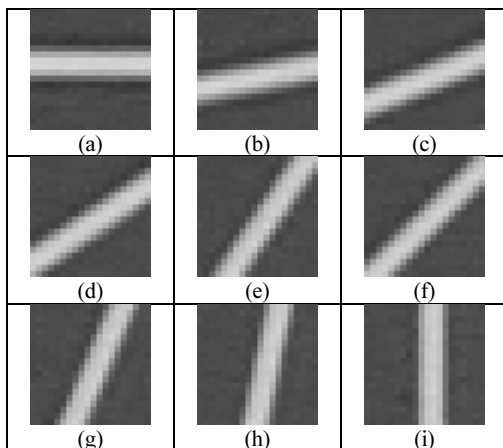


Fig. 4. Experiment images for 4 pixels.

제안된 방법의 성능은 획득된 샘플 영상을 대상으로 Matrox사의 MIL기반 상용화된 방법(Pixel Edge; PE), 모멘트 기반 방법(GLM)과의 성능 비교를 통해 제안된 방법의 우수한 점을 보이하고자 하였다.

Fig 5와 Fig 6은 실험 영상들을 대상으로 구현된 서브 픽셀 추출 알고리즘을 적용한 결과들을 나타내고 있다. Table 1과 Table 2는 이를 정량적으로 보이기 위해 패턴 방향에 따른 패턴 폭을 측정된 결과이다. 방법별 패턴 폭은 10점에 대한 평균값이고, 각 방법에 대한 평균과 표준 편차는 9방향의 데이터를 근거로 계산된 것이다.

Table 1에서와 같이, PE인 경우 패턴폭의 평균 3.59, 표준 편차 0.28로 나타났다. GLM의 경우, 패턴폭의 평균은 2.95, 표준편차 0.17이고, 반면 제안된 방법으로 그라디언트 변이 벡터 기반 방법으로 적용한 결과는 패턴폭의 평균은

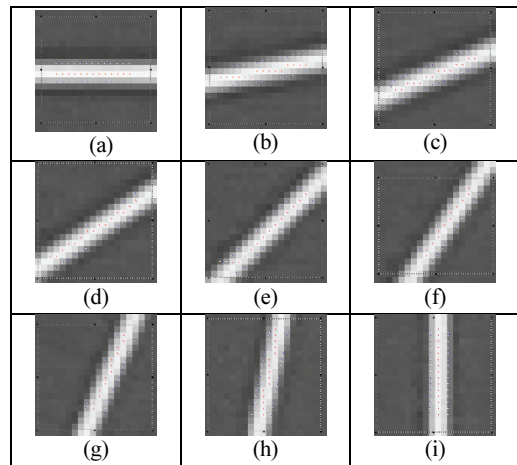


Fig. 5. Sub-pixel estimation results for Fig. 3.

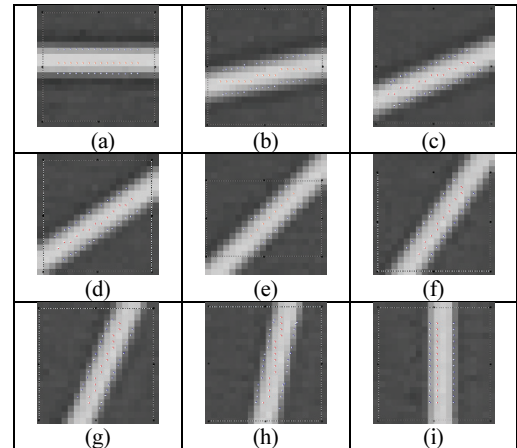


Fig. 6. Sub-pixel estimation results for Fig. 4.

Table 1. Pattern width results for Fig. 5

Pattern angle	Methods		
	PE	GLM	Proposed method
0	3	3	3.04
11.25	3.7	2.61	3.23
22.5	3.78	3.19	3.17
33.75	3.70	2.95	3.09
45	3.54	2.99	3.02
56.25	3.66	2.85	3.04
67.5	3.53	3.03	3.00
78.75	3.38	3.07	2.94
90	4.00	2.86	2.89
Mean	3.59	2.95	3.05
Standard deviation	0.28	0.17	0.11

Table 2. Pattern width results for Fig. 6

Pattern angle	Methods		
	PE	GLM	Proposed method
0	4	4.05	4.02
11.25	4.31	4.20	4.15
22.5	4.45	3.95	4.10
33.75	4.40	3.94	4.05
45	4.24	4.05	4.14
56.25	4.31	4.05	3.99
67.5	4.32	3.91	3.97
78.75	4.14	4.01	3.99
90	4.00	3.90	3.98
Mean	4.24	4.01	4.04
Standard deviation	0.16	0.10	0.07

3.08, 표준편차는 0.11으로 나타났다. 이상과 같이, 제안된 방법은 3픽셀을 가진 패턴폭에 가장 가깝게 추정하고 있고, 이것을 표준편차의 수치로 반증하고 있음을 나타내고 있다. 결국, 제안된 방법은 패턴의 방향 변화에도 일관성 있게 패턴의 폭을 측정할 수 있는 것이라고 판단된다. 다만, 수평방향의 패턴의 경우, 기존 방법은 정확하게 3 픽셀을 측정하고 있으나 제안된 방법은 0.04의 오차를 보이고는 있으나 원래 픽셀 대비1.3%의 오차로 무시할 수 있다고 사료된다.

이것은 패턴폭이 커지면 더욱 그 오차율이 낮아질 것으로 예상되고, 이것은 Table2를 통해 알 수 있다.

Table 2에서 4 픽셀을 가진 패턴의 경우, PE인 경우 패턴 폭의 평균은 4.24, 표준편차 0.16로 나타났고, GLM은 패턴 폭의 평균은 4.01, 표준편차는 0.10이다. 반면 제안된 방법의 결과는 패턴폭의 평균은 4.04로 원래 패턴폭과 1.5% 이

내이고, 표준편차 0.07로 30% 개선됨을 알 수 있다. Table 1에서와 마찬가지로 제안된 방법은 패턴의 방향 변화에도 일관되게 패턴폭을 추정할 수 있다는 것을 알 수 있었고, 수평방향의 패턴의 경우에도 0.02의 오차를 보이고는 있으나 원래 픽셀 대비0.5%의 오차로 무시할 수 있다고 사료된다.

본 연구에서는 다양한 방향성이 있는 패턴이 포함되는 최근의 산업 제품을 고려할 때, 그라디언트 변이 벡터 기반으로 일관성 있게 패턴폭을 측정할 수 있음을 보였으며, 기존 방법과의 성능 비교를 통해 제안된 방법의 우수성을 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 그라디언트 변이 벡터 기반으로 패턴의 서브 픽셀 위치를 정확하고 일관되게 추정하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법의 성능은 다양한 방향을 가진 유리 마스크의 패턴 영상을 취득한 후, 상용화된 방법과, 모멘트 기반 방법과의 비교를 통해 보여주었다. 그 결과, 방향 변화에도 불구하고 정확성에 해당하는 패턴폭의 평균은 원래 패턴폭과 거의 일치함을 보였다. 또한 정밀도에 대응하는 패턴폭의 표준 편차는 기존 방법보다 우수한 결과를 보여 주었다.

향후, 더욱 다양한 패턴의 방향과 폭을 가지 샘플 영상에 대해 실험이 진행될 경우, 제안된 방법은 반도체, 디스플레이, LCD 산업 등 다양한 분야에서 미세 패턴을 정밀하게 측정 및 검사할 수 있는 시스템에 적용이 가능하리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

1. Zhu, F., Jin P., "Sub-pixel Measurement System for Grid's Width and Period Based on an Improved Partial Area Effect," Optics Communications, Vol. 404, pp.124-131, 2017.
2. Yao, Y, Ju, H., "A Sub-pixel Edge Detection Method Based on Canny Operator," International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp. 97-100, 2009.
3. Tabatabai, A. J., Mitchell, R., "Edge Location to

- Subpixel Values in Digital Imagery,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 6, No. 2, pp. 188-201, 1984
4. Zhang, B, Bai, L., Zeng, X., “A Novel Subpixel Edge Detection Based on the Zernike Moment,” Information Technology Journal, Vol. 1, pp. 41-47, 2020.
 5. Kaur, A., Singh, C., “Sub-Pixel Detection Using Pseudo Zernike Moment,” International Journal of Signal Processing Image Processing and Pattern Recognition, Vol.4, No.2, pp.107-118, 2011.
 6. Fabija, A., “A Survey of Subpixel Edge Detection Methods for Images of Heat-Emitting Metal Specimens”, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 22, No. 3, pp. 695-710, 2012.
 7. Hagara, M., Kulla, P., ULLA, “Edge Detection with Sub-pixel Accuracy Based on Approximation of Edge with Erf Function,” Radio Engineering, Vol.20, No.2, pp.516-524, June, 2011.
 8. Gonzalez, R. C., Woods, R. E., “*Digital Image Processing Using MATLAB*,” Prentice-Hall, 2004.
-
- 접수일: 2021년 8월 23일, 심사일: 2021년 9월 11일,
 게재확정일: 2021년 9월 16일