

# 가우시안 보간을 이용한 영상 패턴의 폭 측정에 관한 연구

김경범<sup>†</sup>

<sup>†</sup>한국교통대학교 기계자동차항공공학부

## A study on the Width Measurement of Image Patterns Using Gaussian Interpolation

Kim Gyung Bum<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

### ABSTRACT

In this paper, a method for measuring image pattern widths is proposed using gaussian interpolation, in order to improve inconsistent results coming from the different directions in image patterns. The performance of our method is evaluated using image patterns with 9 directions, and compared with previous methods. It is confirmed that the proposed method gives accurate and consistent width results regardless of pattern directions.

**Key Words** : Automated inspection, Gaussian interpolation, Pattern measurement, Sub-pixel position

### 1. 서 론

최근 반도체, 디스플레이, 인쇄회로기판 등 많은 산업 분야에서 미세한 패턴을 정밀하게 측정하고 검사하기 위한 필요성이 커지고 있다. 머신 비전을 이용한 비접촉식 측정 및 검사 시스템은 산업현장에서 부품 및 제품의 측정 및 검사 자동화에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하고 있으며, 그 응용 범위 또한 증대되고 있다. 일반적으로 사람의 눈을 이용한 방법은 측정 검사 오류, 측정 검사 결과를 판단하는데 주관적인 견해가 포함된다는 점 등의 많은 단점들이 있다. 미세한 형상을 정밀하게 측정하기 위해서는 측정 및 검사 알고리즘의 안정성과 정밀도를 향상시키는 기술이 필요하다.

제품 영상에 존재하는 에지 경계 부분은 특징 중에서 측정 및 검사를 위해서 쓰이는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 경계 추출의 정밀도가 제품 검사 공정에 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 시야 범위(field of view, FOV)가 줄어드는 단점이 발생하게 된다. 배율을 유지하면서 측정 정밀도를 높이기 위해서 경계 추출 시 서브 픽셀 정밀도를 갖는 정밀 패턴 측정 방법이 무엇보다도 중요하다.

경계 추출을 위해 Sobel, Prewit, Canny detector 등 다양한 연산자들이 사용될 수 있다. 이들 방법들은 서브픽셀 정확도를 가지지 않는다[1]. Yao & Ju는 서브픽셀 추출을 위해 Canny 연산자에 의해 얻어진 공간 데이터를 B-스플라인 곡선맞춤법(curve-fitting)을 적용하였다[2]. 이것은 물체의 모양에 따라 민감한 영향을 받게 되는 면이 있다. Tabatabai & Mitchell 는 에지를 이상적인 스텝으로 가정하였고, 영상 모멘트 기반으로 에지의 위치를 구하기 위해 명암값만을 이용하였다[3]. Lyvers는 픽셀의 명암값과 위치 정보를 고려한 공간적 모멘트 기반 방법을 제안하였다[45]. 기존 방법들의 문제점은 다양한 패턴 각도에 대해 동일 패턴임에도 정밀도의 차이점이 크다[67].

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 가우시안 보간을 기반으로 하는 서브 픽셀 에지 위치를 추정하

<sup>†</sup>E-mail: kimgb@ut.ac.kr

고 폭을 정확하게 측정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 성능 평가를 위해 에지 기반 방법[8], 모멘트 기반 방법[3], 그라디언트 변이 벡터[9] 기반 방법들의 적용 결과들과 비교 분석을 행한 결과, 상대적으로 다양한 패턴 방향에 대해 정밀한 패턴 측정을 한 것을 보였다.

## 2. 가우시안 보간 영상 패턴의 폭 측정 방법

가우시안 보간 패턴 측정법은 다양한 방향을 갖는 마스터 패턴의 영상 획득, 패턴의 법선 기울기 추정, 에지화 소 위치 추정, 서브 픽셀 위치 검출로 크게 4단계로 구분하여 수행된다.

우선, 비전 시스템에 설치된 카메라로부터 다양한 방향을 갖는 마스터 패턴의 영상을 취득한다. 디지털 영상에서는 패턴의 방향에 따라 동일한 패턴폭임에도 불구하고 폭이 다르게 측정될 수 밖에 없는 원래 한계를 가지고 있다. 이 영상들은 충분하지는 않지만 다양한 방향을 모사하고 영상 패턴 폭 측정의 문제점을 해결하는 재료로 이용하였다.

취득된 영상 패턴을 이용하여 패턴 방향에 대한 법선 기울기를 구한다. 비전 시스템에서 조명계의 최적화를 통해 영상 패턴은 밝게 배경은 어둡게 보이게 최대한 구분하였다. 이 패턴 영상을 취득한 후, 영상 전처리, 문턱치(thresholding)를 적용하여 패턴이라고 생각되는 패턴 후보 위치를 정한다. 이 패턴 후보 위치를 이용하여 패턴의 방향과 법선 방향을 추정한다. 패턴의 방향은 패턴을 직선이라 가정할 때 기울기에 해당하고, 패턴의 폭은 패턴의 방향에 대한 법선 방향으로 측정해야 한다. 따라서, 패턴의 법선 방향을 알아야 한다. 패턴은 직선이라고 가정하였고, 아래와 같이 선형회귀식에 의해 목적함수가 최소가 되도록 패턴의 방향을 추정한다.

$$v = p_s u + o_s$$

$$\min \sum_{i=1}^n (v_i - s_p u_i + o_s)^2 \quad (1)$$

여기서,  $(u, v)$ 는 패턴 후보 위치,  $p_s$ 는 패턴의 기울기이고  $o_s$ 는 직선의 오프셋을 의미한다. 법선 방향  $p_{nl}$ 은 패턴의 기울기  $p_s$ 로부터 구하고, 이 법선 방향 안에 있는 패턴의 밝기값들을 획득한다. 이 밝기값들을 이용하여 밝기값의 그라디언트(gradient)들을 계산한다. 그라디언트 계산은 소벨 연산자(sobel operator)를 사용하였다. 계산된 그라디언트 값들 중에서 최대가 되는 위치는 패턴의 에지라고 추정하였다. 아래 식에서  $p_e$ 는 화소의 위치를 나타내고,  $i$ 는 계산된 그라디언트의 갯수를 의미한다.

$$p_{e+i} = \max_i GV_i \quad (2)$$

본 연구에서의 서브 픽셀 위치는 가우시안 보간 기반 방법(gaussian interpolation based method; GIM)을 기반한 방법을 통하여 추정하고자 한다. 서브 픽셀의 위치는 패턴의 법선 방향의 그라디언트 값들로부터 가우시안 함수[9]로 모델링한 후 추정된다. 식 (2)는 앞에서 추정한 에지 화소 위치  $p_e$ 에서 법선 방향을 따라 해당 위치와 양쪽에서의 그라디언트값에 대한 가우시안 분포식을 가정한 것이다.

$$GV = GV_p \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(p_e - \bar{p}_e)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (3)$$

여기서,  $GV$ 는 그라디언트값이고,  $\bar{p}_e$ 는 그라디언트에 대한 가우시안 분포의 평균값으로 추정하고자 하는 서브 픽셀 위치를 나타낸다.  $\sigma$ 는 그라디언트값에 대한 가우시안 분포의 편차를 나타낸다. 이 식으로부터 자연 로그를 취하면 아래와 같이 된다.

$$\ln GV = \ln GV_p - \frac{1}{2} \frac{(p_e - \bar{p}_e)^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

이 식에 그라디언트값  $GV_{p_{e-1}}, GV_{p_e}, GV_{p_{e+1}}$ 와 이에 대응되는 법선 방향  $p_{nl}$ 의 에지 후보 위치  $p_{e-1}, p_e, p_{e+1}$ 를 대치하여 세 개의 방정식을 얻는다. 이를 이용하여 서브 픽셀 위치인  $\bar{p}_e$ 를 식 (5)와 같이 추정한다.

$$\bar{p}_e = \frac{(\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e+1}})(p_e^2 - p_{e-1}^2)}{2\Delta p_e \left\{ (\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e-1}}) + (\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e+1}}) \right\}} - \frac{(\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e-1}})(p_e^2 - p_{e+1}^2)}{2\Delta p_e \left\{ (\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e-1}}) + (\ln GV_{p_e} - \ln GV_{p_{e+1}}) \right\}} \quad (5)$$

이 식을 이용하여 패턴의 양쪽 서브 픽셀 위치를 추정한 후 법선 방향을 따라 패턴의 폭을 측정한다. 이상에서 설명한 제안된 방법의 절차는 Fig 1과 같다. 제안된 방법의 성능 검증은 기존 방법과의 모의 실험을 통해 수행된다.

## 3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 마스터 클래스의 패턴 영상들을 획득해서 기존 방법과 비교함으로써 제안된 방법의 성능을 검증하였다. 마스터 클래스는 클래스 위에 0도에서 90도까지 11.25도 간격으로 9개의 방향으로 정밀하게 새긴 정밀 유리이고, 패턴의 폭은 광학계를 조정하여 패턴의 폭이 3픽셀과 4픽셀을 기준으로 하였다.

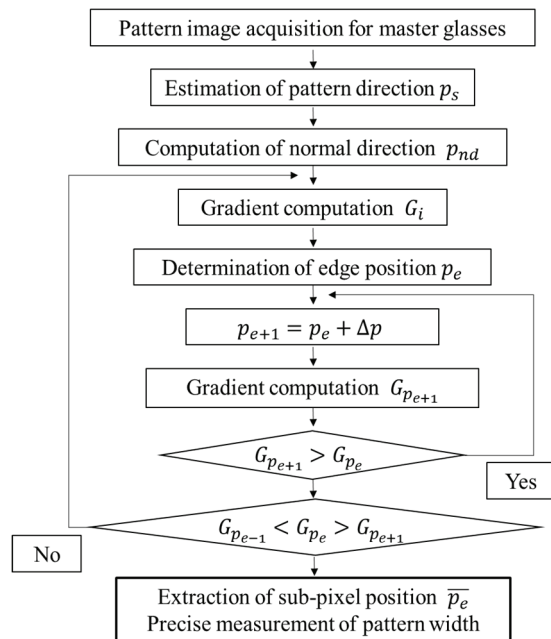


Fig. 1. The flowchart of our proposed method.

광학계의 배율을 조절할 경우, 다양한 방향에 대해 1픽셀당 실제 크기가 다르기 때문에 실제 패턴 폭을 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 2-3은 이를 통해 획득된 샘플 영상들을 나타내고 있다.

본 연구에서는 패턴의 서브 픽셀 위치를 자동으로 추출할 수 있는 알고리즘의 개발 및 구현을 위해 MATLAB 환경과 Visual C++ 환경을 병행하여 활용하였다.

Fig. 4-5는 Fig. 2-3의 실험 영상들을 대상으로 서브 픽셀 추출 알고리즘 적용한 결과들을 나타내고 있다. 이 결과에서는 방향에 따른 패턴 중심의 꺾적과 이에 따른 법선 방향의 선폭, 즉 패턴의 양쪽 에지를 각각 빨간색 점과 파란색 점으로 표시하였다. 이 표시는 직관적으로만 볼 수 밖에 없어 이 결과를 정량적으로 Table 1-2에 나타냈고 방향에 따른 결과의 편차 추세를 전체적으로 보기 위해 Fig. 6-7에 보였다.

본 연구에서는 제안된 방법의 우수성을 보이기 위해 세가지의 방법과 비교하였다. 이 방법은Matrox 사의 MIL 기반 방법인 Pixel Edge(PM) [8], 밝기값 모멘트 기반 방법(gray level moment; GLM) [3], 그라디언트 변이 벡터 기반 방법(gradient transition vector; GTV) [9]이 있다.

Table 1의 경우, Fig. 4의 측정 결과를 정량적으로 보인 것이다. 패턴의 방향에 따라 패턴 측정의 정확도는 평균으로, 정밀도는 표준 편차로 간주하여 계산하였다. 제안된 방법인 GIM의 경우, 평균과 표준편차는 3.06, 0.08이다. 패

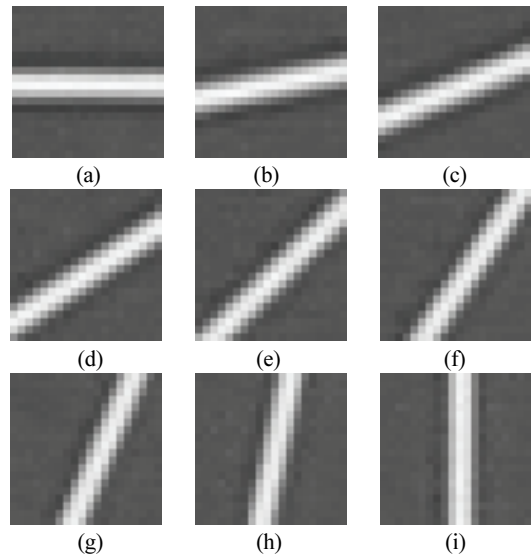


Fig. 2. Pattern images for 3 pixels.

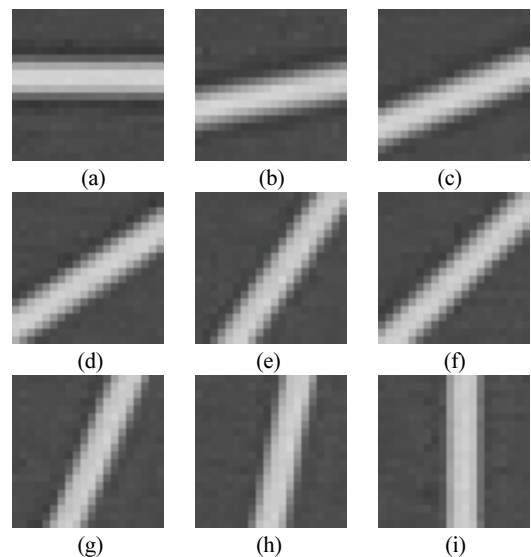


Fig. 3. Pattern images for 4 pixels.

턴 평균의 경우 GLM과 거의 비슷하나 표준편차의 경우는 다른 방법보다 상대적으로 우수하다.

이것은 패턴 방향에 따라서도 일관적인 패턴 측정을 수행할 수 있다는 것을 의미한다. 이것은 Fig. 6에서도 알 수 있다. 측정된 패턴 크기의 최대 편차는 PM에서 0.98로 거의 1픽셀 크기로 가장 크고 제안된 방법인 GIM은 0.18로 상대적으로 매우 작다. 또한, GLM과 GTV 보다 작은 것을 알 수 있다. 이것은 예를 들면 픽셀당 5 $\mu$ m의 해상도를 갖는 실제 패턴의 측정의 경우, PM은 4.9 $\mu$ m의 최대 측

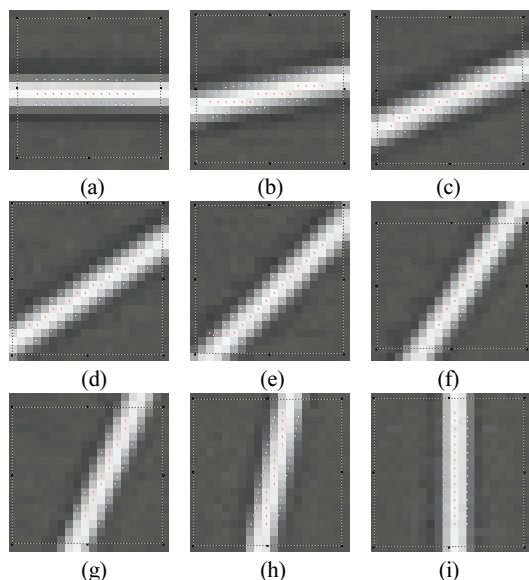


Fig. 4. Estimation of sub-pixel position at pattern edge for Fig. 2.

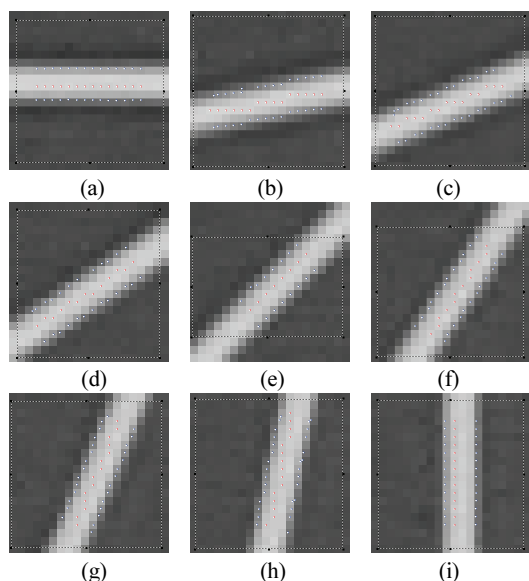


Fig. 5. Estimation of sub-pixel position at pattern edge for Fig. 3.

정 오차가 있는 반면, 제안된 방법은 0.9 $\mu$ m의 최대 측정 오차를 갖는 것을 의미한다. 다만, 수평(0°), 수직(0°) 패턴의 경우, 모든 방법의 결과가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

Table 2의 경우, Fig 5의 측정 결과를 정량적으로 보인 것이다. 제안된 방법인 GIM의 경우, 평균과 표준편차는 4.03,

Table 1. Pattern width results for images of Fig. 4

Method		PM	GLM	GTV	GIM
Pattern angle	1 0°	3.02	3.09	3.03	3.05
	2 11.25°	3.75	2.52	3.25	3.18
	3 22.50°	3.82	3.32	3.19	3.08
	4 33.75°	3.64	2.81	3.12	3.15
	5 45.00°	3.66	2.90	3.14	3.10
	6 56.25°	3.77	2.79	3.08	3.04
	7 67.50°	3.62	3.14	3.17	3.05
	8 78.75°	3.58	3.12	2.89	2.94
	9 90.00°	3.98	2.81	2.89	2.96
Mean		3.15	2.94	3.08	3.06
Standard deviation		0.27	0.24	0.13	0.08
Max. deviation		0.98	0.48	0.25	0.18
Min. deviation		0.02	0.09	0.03	0.04

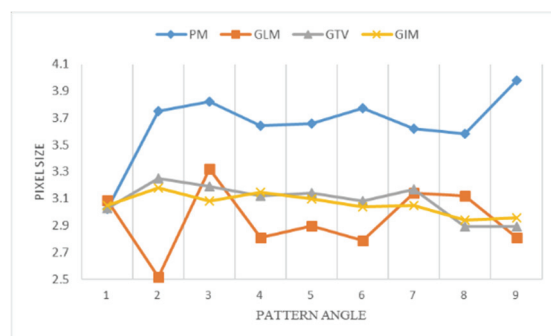


Fig. 6. Comparisons of measured pattern widths in Table 1.

Table 2. Pattern width results for images of Fig. 5

Method		PM	GLM	GTV	GIM
Pattern angle	1 0°	4.00	4.04	4.02	4.04
	2 11.25°	4.39	4.29	4.19	4.14
	3 22.50°	4.50	3.84	4.08	3.97
	4 33.75°	4.46	3.91	4.09	4.05
	5 45.00°	4.29	4.07	4.19	4.04
	6 56.25°	4.39	4.05	3.89	4.03
	7 67.50°	4.40	3.85	3.87	4.04
	8 78.75°	4.25	4.15	3.95	3.97
	9 90.00°	4.05	3.87	3.96	4.00
Mean		4.30	4.01	4.03	4.03
Standard deviation		0.18	0.15	0.12	0.05
Max. deviation		0.5	0.29	0.19	0.14
Min. deviation		0	0.04	0.02	0

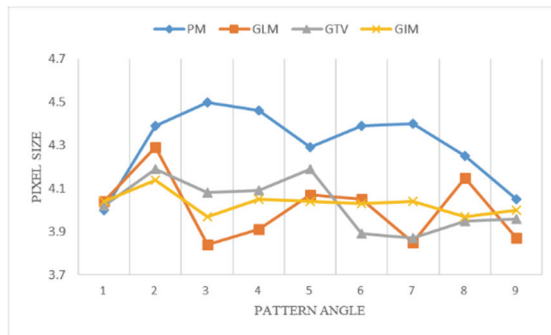


Fig. 7. Comparisons of measured pattern widths in Table 2.

0.05이다. Table 1의 결과와 마찬가지로, 패턴 평균의 경우 GLM과 거의 비슷하고 정확도가 1%이내로 우수하다.

표준편차의 경우는 다른 방법보다 상대적으로 우수하다. 이것은 패턴 폭과 패턴의 방향에 따라서도 일관적인 패턴 측정을 수행할 수 있다는 것을 의미한다. Fig 7은 Table 2를 그림으로 나타낸 것이다. GIM 이 상대적으로 패턴 방향에 따라 패턴 폭의 측정 결과의 추세가 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

Table 1-2에서, 패턴 폭의 평균을 기준으로 2%(3.06), 0.75%(4.03)의 오차를 갖는다. 또한 패턴 폭의 최대 편차도 6%(0.18), 3%(0.14) 이다. 이것은 패턴 폭이 커질수록 더 좋은 결과를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 GIM은 패턴의 방향과 패턴 폭의 상관 없이 정확도와 정밀도에서 상대적으로 우수한 결과를 얻은 것을 알 수 있다.

본 연구의 실험은 마스터 클래스의 패턴을 이용한 것으로 실제 다양한 패턴 폭과 방향에 대한 실험이 추가되어 비교하는 것이 필요하다. 또한, 비교 기준으로 제시되는 기존의 방법의 선정과 구현 정도 등에 따라 실험 결과는 다르게 나타날 가능성이 있다. 이에 대한 다양한 실험 변수들이 향후 고려가 되어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가우시안 보간 기반으로 패턴의 방향과 패턴 폭의 상관 없이 서브 픽셀 위치를 정확하고 추정하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 3픽셀 기준인 패턴의 경우 평균은 3.06으로 2% 오차이고, 표준 편차는 0.08로 방향에 상관없이 측정된다는 것을 알 수 있다. 4픽셀인 경우도 마찬가지로 평균은 4.03으로 1% 이내 오차이고 표준편차는 0.05이다. 또한, 이 결과는 세 개의 기존 방법들과 비교할 때 상대적으로

우수한 결과를 보여 주었다.

향후, 본 연구는 더 다양한 실제의 패턴 폭과 방향 변화에 대한 성능 검증 실험이 진행될 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

#### 참고문헌

1. Alasdair McAndrew, Introduction Digital Image Processing with MATLAB, Cengage Learning, 2007.
2. Yao, Y. and Ju, H., "A Sub-pixel Edge Detection Method based on Canny Operator," Proceedings of the 6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp. 97-100, 2009.
3. Tabatabai, A. J. and Mitchell, O. R., "Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery," IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, No.2, pp.188-201, 1984.
4. Lyvers, E. P., Mitchell, O. R., Akey, M. L. and Reeves A. P., "Subpixel Measurements Using a Moment-Based Edge Operator," IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.12, pp.1293-1309, 1989.
5. Kaur, A. and 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. Khademi, S., et al, "A Sub Pixel Resolution Method," World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 70, pp. 633-636, 2010.
7. Pan, S. Y., et al, "Sub-pixel Position Estimation Algorithm based on Gaussian Fitting and Sampling Theorem Interpolation for Wafer Alignment," Applied Optics, Vol. 60, Issue 31, pp. 9607-9618, 2021.
8. <https://www.matrox.com/en/imaging>, Matrox Imaging Library
9. Kim, G. B., "A Study on the Precision Pattern Measurement Based on Gradient Transition Vector," Journal of the Korean Society of Semiconductor & Display Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 45-50, 2021.
10. Nayar, S. K., "Shape form focus," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vo. 16, No. 8, pp. 824-831, 1994.

접수일: 2022년 8월 1일, 심사일: 2022년 9월 6일,  
게재확정일: 2022년 9월 19일