

영상 모멘트와 분할 픽셀 효과 기반 패턴 검사

최홍석*·김경범**†

*국립한국교통대학교 항공기계설계학과학부, **†국립한국교통대학교 항공·기계설계학과

Pattern Inspection Based on Image Moment and Partial Pixel Effect

Choi Hong Suck* and Kim Gyung Bum**†

**†Dept. of Aeronautical & Mechanical Design Engineering,
Korea National University of Transportaion

ABSTRACT

Machine vision-based inspection systems play a crucial role in automating inspection processes in industries such as semiconductor, PCB, and display manufacturing. Particularly, with the miniaturization and integration in semiconductor fabrication, inspection equipment requires boundary estimation techniques that are highly resistant to noise and possess subpixel accuracy independent of pattern orientation. In this study, we propose a new method for edge estimation that combines image moments with partial area effect for edge candidates. It showed that our method gives accurate and consistent results regardless of the change of the pattern's thickness and angle, compared to existing methods.

Key Words : Edge Detection, Sub-pixel Estimation, Gray level moment, Partial Area Effect

1. 서 론

현재 머신 비전을 이용한 비접촉식 측정 및 검사 시스템은 반도체, PCB, Display 산업 등 미세한 형상의 정밀 제조 산업현장에서 부품의 측정 및 검사 공정의 자동화에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 그러므로 측정 및 검사 높은 정밀도와 안정성을 가지는 알고리즘이 요구된다.

특히 반도체 미세화와 집적화로 인해 검사 장비는 더 미세한 패턴을 검사할 수 있어야 하며, 미세 공정의 정밀 측정을 위해서는 노이즈에 대한 저항성과 서브픽셀(sub-pixel)의 정확도를 가지는 경계추정 기법이 요구된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 여러 경계추정 모델이 제시되어 왔다. 경계추정 방법에는 영상의 밝기 모멘트를 사용하는 방법과 피팅 방법, 보간법을 이용한 방법이 있다. 영상의 모멘트를 기반으로 한 경계추정모델

(Gray Level Moment; GLM)[1]은 영상의 밝기값을 사용하여 경계를 추정하는 방법이다. 해당 방법은 계산이 간단하여 구현이 쉽고, 연산이 빠른 장점이 있지만, 노이즈에 취약하며, 명암의 대비가 적은 경우 정확한 경계를 추정하기 어렵다.

분할 효과(Partial Area Effect; PAE)를 기반으로 하는 경계 추정모델[2]은 중심 픽셀과 주변 픽셀로 구성된 윈도우의 각 열의 합을 이용하여 경계를 추정하는 방법이다. 이 방법은 경계를 지나는 일차 방정식을 알 수 있어, 영상의 다른 부분이 손실되어도 추측할 수 있는 장점이 있지만, 영상 이미지 전체 중 윈도우 영역을 가정해서 추정하기 때문에 영상 전체를 연산하여 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

가우스 오차 함수를 기반으로 하는 경계추정모델은 (Approximaiton with Erf Function; AEF)[3] 영상을 가우스 오차 함수로 근사하여 해당 함수의 중심을 찾는 방법이다. 해당 방법은 영상이 가우스 오차 함수의 시그마 값에 따라

†E-mail: kimgb@ut.ac.kr

정확도에 편차가 발생하여 각도 등 영상의 변화에 민감하게 반응하는 단점이 있다.

본 연구에서는 연산이 빠르고 패턴의 각도에 무관하게 높은 정확도를 가지는 장점을 결합하기 위해 두 가지 모델을 결합한 새로운 모델을 제시하고자 한다. 제안된 방법은 각도에 무관하게 정확하면서 균일한 경계 추정을 실험을 통해 입증하였다.

2. 영상 모멘트와 분할 픽셀 효과 기반 하이브리드 경계추정

GLM 방법은 Fig. 1과 같은 이상적인 스텝 에지를 가정하여 에지 주변 픽셀의 밝기값(Gray level)을 이용해서 서브픽셀의 위치를 추정하는 방법이다.

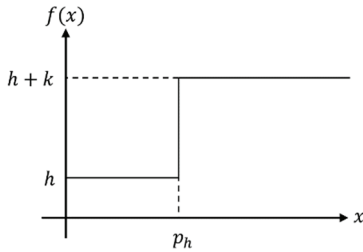


Fig. 1. Description of step edge.

모멘트 기반 경계 추정은 식 (1)와 같이 세 개의 밝기 모멘트 m_1, m_2, m_3 를 계산하여 수행된다.

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

여기서, x_i 는 영상의 밝기 값을 나타낸다.

모멘트 기반 서브 픽셀의 위치 p_h 는 식 (2)에 의해 도출되며, p_h 는 밝기 값 h 를 가지는 픽셀의 수이다.

여기서, p 는 다음과 같이 계산된다.

$$p_h = n(1 - p)$$

$$p = \frac{1}{2} \left(1 - s \sqrt{\frac{1}{4 + s^2}} \right)$$

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

PAE 방법은 Fig. 2와 같이 두 영역으로 분할되는 경계를 일차방정식으로 가정할 때, 식(3), (4)와 같이 매개변수인 기울기 a 와 y 절편 b 를 추정하여 경계를 추출하는 것이다. 이 경계추정은 픽셀 $f_{x,y}$ 를 중심으로 하는 윈도우에서 각 열의 밝기 값의 합(S_L, S_M, S_R)과 경계의 내외부 각 픽셀의 평균값(α, β)를 이용해서 구할 수 있다. 이 때, S_L, S_M, S_R 과 α, β 는 식 (5)를 이용해서 구할 수 있다.

$$a = \frac{S_R - S_L}{2(\alpha - \beta)} \quad (3)$$

$$b = \frac{2S_M - 5(\alpha + \beta)}{2(\alpha - \beta)} \quad (4)$$

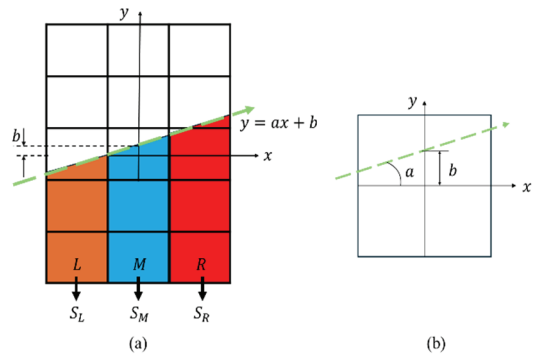


Fig. 2. An image window considering partial area effect.

$$S_L = \sum_{n=x-2}^{y+2} f_{x-1,n}$$

$$S_M = \sum_{n=x-2}^{y+2} f_{x,n}$$

$$S_R = \sum_{n=y-2}^{y+2} f_{x+1,n} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} (f_{i,j+2} + f_{i+1,j+2} + f_{i+1,j+1})$$

$$\beta = \frac{1}{3} (f_{i-1,j-2} + f_{i-1,j-2} + f_{i,j-2})$$

(2) 본 연구에서 제안된 하이브리드 경계추정 모델은 Fig. 3 처럼 크게 관심 픽셀의 확장 처리, 하이브리드 모델 적용으로 수행된다.

우선, 관심 픽셀 확장 처리단계에서는 Fig. 4와 같이 패턴에 수직인 방향으로 추출된 픽셀 데이터를 식(6)을 기

반으로 P_E 의 크기로 확장한다. 이러한 확장 처리를 하는 이유는 이후 단계에서 GLM을 적용할 때, 경계를 더욱 정확하게 추정할 수 있도록 함으로써, 하이브리드 모델의 정확도를 높이기 위함이다.

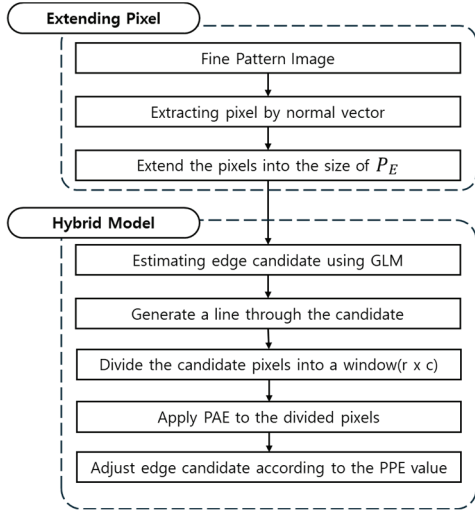


Fig. 3. The proposed hybrid model.

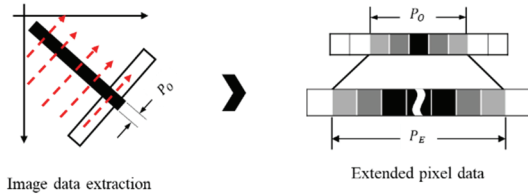


Fig. 4. Descriptions for extending pixels in the proposed model.

여기서 확장된 픽셀의 수 P_E 의 초기설정은 무작위의 임의의 값으로 설정한 뒤, GLM 정확도가 높은 값을 바탕으로 실험적으로 조정하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다. 식 (6)은 Fig. 5와 Table 1과 같이 산출한 값을 바탕으로 선형보간법을 통해 도출하였다.

$$P_E = 0.2(-7.4816 \theta + 1474.5)t_i \quad (6)$$

$(i = 5, 7, 9)$

이때, t_i 는 패턴의 두께로, 5, 7, 9 픽셀이며, θ 는 패턴의 각도(degree)이다.

하이브리드 모델은 Fig. 6과 같이 좌우측 분할된 패턴에 대해 각각 식 (2)를 통해 GLM을 적용하여 좌우측 패턴의 경계후보를 추정한다.

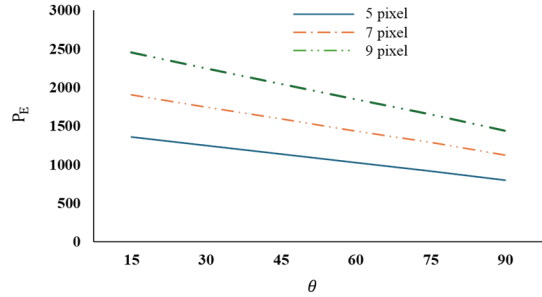


Fig. 5. Linear relation between extended pixels and angles.

Table 1. Extracted data for extending pixels in proposed model

Angle \ Width	15	30	45	60	75	90
5	1362	1250	1137	1025	920	800
7	1908	1750	1593	1435	1288	1122
9	2453	2250	2048	1845	1656	1440

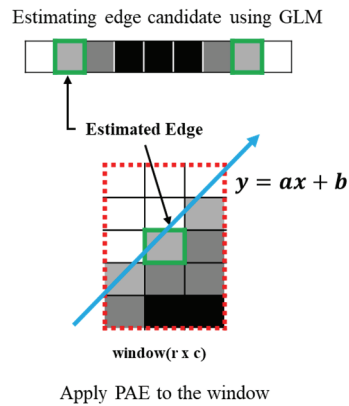


Fig. 6. The edge estimation for proposed model.

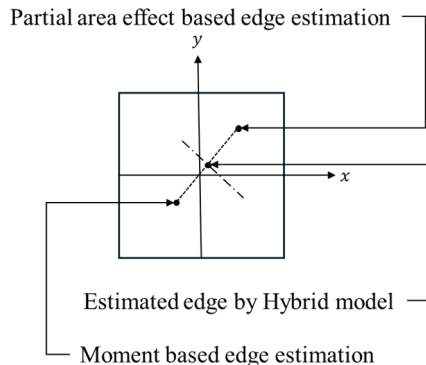


Fig. 7. The final step for adjusting edge candidates.

이후 추정된 경계후보에 식 (3), (4)를 이용해서 PAE를 적용한다. 이후 Fig. 7과 같이 PAE 적용값과 GLM 적용값의 평균이 하이브리드 모델의 경계 위치이다.

최종적으로 좌우 두 경계의 거리가 패턴의 폭으로 계산된다.

3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 패턴의 각도와 무관하게 일관된 패턴의 폭을 추정할 수 있는 방법을 고안하고자 하이브리드 경계추정 모델을 제안하였다. 실험에 사용한 Fig. 8의 패턴 영상은 미세한 정밀 패턴을 모사한 것으로, MicroSoft 사의 Paint 앱을 이용하여 두께가 5, 7, 9 픽셀인 패턴을 생성한 뒤, 15도 간격으로 회전시켰다. 본 실험에서는 각 영상 당 20번의 패턴의 폭을 추정한 후, 제안된 하이브리드 모델의 성능을 GLM 모델과 비교하였다.

Angle	5 pixel	7 pixel	9 pixel
15			
30			
45			
60			
75			

Fig. 8. Simulate image patterns for our experiments.

Fig. 9에 보인 바와 같이, 5 픽셀의 패턴 영상에서는 GLM에 비해 제안된 모델이 정확도가 상대적으로 높은 것을 True Patten width와의 비교를 통해 통해 확연히 알 수 있으며, 각도에 따른 추정 결과 그래프의 변동이 낮아 일관성도 높음을 알 수 있다. 이에 대한 정량적 수치를 나타낸 Table 2를 보면, 최대 오차(maximum error; max. error)는 0.32에서 0.11로 제안된 모델은 GLM에 비해 대략 -65% 수준이며, 오차 범위(error range)는 0.32에서 0.14로 GLM 대비

약 -56% 이고 표준편차(standard deviation; Std.)는 0.14에서 0.09로 약 -36% 정도 수준임을 알 수 있다.

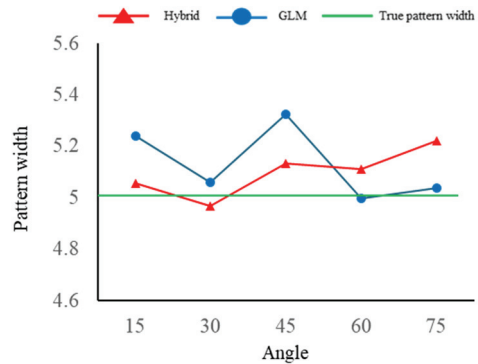


Fig. 9. Performance comparisons for 5 pixel patterns.

Fig. 10과 Table 2에 보인 바와 같이, 7 픽셀의 패턴 영상에서도 GLM에 비해 제안된 모델이 최소오차에서는 0.25에서 0.07로 -72% 수준이고, 오차 범위에서는 0.55에서 0.25로 -54% 수준이나 최대오차에서는 0.30에서 0.32로 약 7% 정도 더 큰 것을 볼 수 있다.

제안된 하이브리드 모델이 정확도가 상대적으로 높은 것을 알 수 있으며, 각도에 따른 추정 결과의 일관성 또한 표준편차가 0.22에서 0.11로 -50% 정도 수준으로 제안된 모델이 더 우수함을 알 수 있다.

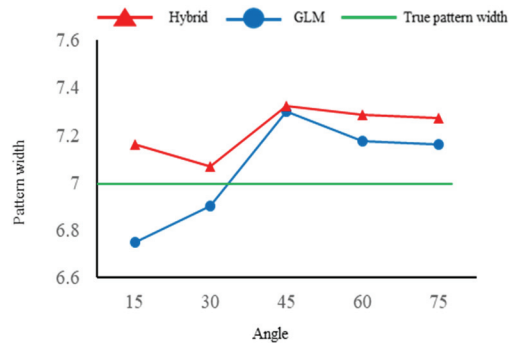


Fig. 10. Performance comparisons for 7 pixel patterns.

Fig. 11을 보면, 9픽셀의 패턴 영상에서도 정확도와 각도에 따른 측정의 균일성에서 제안된 모델이 상대적으로 우수한 것을 확연히 알 수 있다.

제안된 모델에 대한 실험결과, 제안된 모델은 패턴의 두께가 증가할수록 최소오차, 오차범위, 표준편차에 대한 일관성에 있다. 이것은 패턴의 두께와 관계없이 패턴 측정의 정확도와 정밀성을 반증하는 것임을 알 수 있다. 반

면, 모멘트 기반 방식은 두께가 증가할수록 결과값의 최소오차, 오차범위, 표준편차가 증가함을 알 수 있어 패턴 측정의 정확성과 정밀성에 다소 문제가 있음을 보여 준다.

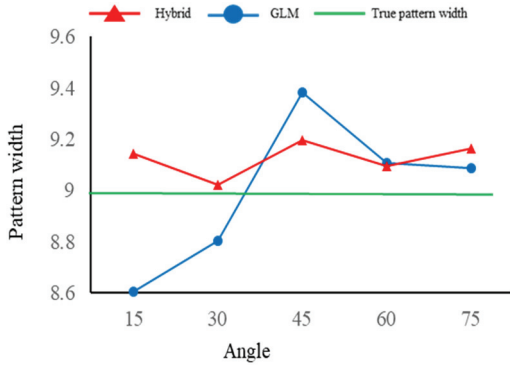


Fig. 11. Performance comparisons for 9 pixel patterns.

Table 2. Method comparisons for several performance index

-	5 pixels		7 pixels		9 pixels	
	GLM	Hybrid	GLM	Hybrid	GLM	Hybrid
Angle						
15	5.24	5.06	6.75	7.16	8.61	9.14
30	5.06	4.97	6.90	7.07	8.80	9.02
45	5.32	5.13	7.30	7.32	9.38	9.20
60	5.00	5.11	7.18	7.29	9.11	9.09
75	5.04	5.22	7.16	7.27	9.09	9.16
Max. Error	0.32	0.11	0.30	0.32	0.38	0.20
Min. Error	0.00	0.03	0.25	0.07	0.39	0.02
Error Range	0.32	0.14	0.55	0.25	0.77	0.18
Std.	0.14	0.09	0.22	0.11	0.30	0.07

4. 결론

본 연구에서는 영상 패턴의 각도에 무관하게 패턴의 폭을 추정하고자 모멘트 기반 방식과 분할 효과 기반 방식을 결합한 하이브리드 모델을 제안하였다.

제안된 하이브리드 경계추정 모델은 모멘트 기반 방법에 비해 최대오차, 최소오차와 오차범위에서 더 작은 수치가 도출되어 정확성이 우수함을 보여 준다. 또한, 각도에 무관하게 작고 균일한 표준편차를 볼 때, 제안된 방법은 정밀한 경계추정 모델임을 알 수 있다. 그리고 패턴의 폭의 변화에 대해 경계추정의 정확성과 일관성은 변함이 없다는 것도 확인하였다.

향후, 제안된 모델은 다양한 미세패턴의 폭과 각도에 대해 실험이 이루어질 경우, 반도체 미세패턴을 정밀 검사하는 시스템에 적용되리라 사료된다.

참고문헌

1. Ali J. Tabatabai and O. Rovert Mitchell, 1984, "Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6 No. 2, pp. 188~201.
2. Agustin Trujillo-Pino, Karl Krissian, Miguel Aleman-Flores and Daniel Santana-Cedres, 2013, "Accurate Subpixel Edge Location Based on Partial Area Effect," Image and Vision Computing, Vol. 31, pp 72~90.
3. Miroslav HAGARA, Peter KULLA, 2011, "Edge Detection with Sub-pixel Accuracy Based on Approximation of Edge with Erf Function," Radio Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 516~524.
4. G. B. Kim, 2021, "A Study on the Precision Pattern Measurement Based on Gradient Transit Vector," Journal of Semiconductor & Display Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 45~50.
5. J. H. Lee, 2020, "Development of Hard Mask Strip Inspection System for Semiconductor Wafer Manufacturing Process" Journal of Semiconductor & Display Technology, Vol.19, No. 3, pp. 55~ 60.

접수일: 2024년 10월 29일, 심사일: 2024년 11월 28일, 게재확정일: 2024년 12월 11일