

경면 거칠기 측정을 위해 레이저 입사 강도 조절에 의한 정반사 광량 추정 알고리즘 개발

서영호#, 김주년*, 안중환**

Estimation of Specular Light Power by Adjusting Incident Laser Power for Measuring Mirror-Like Surface Roughness

Young Ho Seo#, Ju Nyun Kim*, Jung Hwan Ahn**

ABSTRACT

From the Beckmann's reflection model of wave incident, reflected light from a surface is known to have not only specular but also diffuse components. The specular component dominant a surface for a mirror-like surface is distributed on the almost the same area as the spot on the surface, but the diffuse component region dominant for a rough surface spreads scattered on the larger areas than the spot. Therefore, statistic parameters from the scattered light distribution are more meaningful in the diffuse region, while the magnitude of rather meaning in the specular region. In usual, there need two sensors to acquire two kinds of information: Photo-detector for light intensity magnitude and image sensor for light intensity distribution. But dual sensor scheme requires a beam splitter usually to feed light to each sensor, and moreover there is not a combination rule to relieve the different sensor characteristics. In this study a new method is proposed for acquisition of the dual information using only an image sensor. Specular region is established on an image area being distinguished from a diffuse component, and laser power is adjusted so that no pixel of the image sensor in the specular region is saturated. Simulation based on the light reflection theory and the experimental results are quite well matched, and thus the proposed method was proved to be very useful for mirror-like surface measurement.

Key Words : Surface roughness (표면 거칠기), Reflected beam (반사광), Specular region (정반사 영역), Laser power (레이저 파워), Image sensor (영상 센서)

기호설명

R_q = Root-mean-square deviation of surface profile

P_r = Normalized light power (A measure of all reflected light intensity)

$P_{r,spec}$ = Normalized specular light power (A measure of specular component of reflected light)

σ = Standard deviation of a light intensity distribution along principal axis (A measure of

접수일: 2003년 11월 26일; 게재승인일: 2004년 3월 12일

교신저자: 부산대원 지능기계공학과

E-mail: essay76@hite1.net Tel: (051) 510-3087

* 부산대원 지능기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

scattering component of reflected light)

L_r = Light intensity of reflected light

E_{o1} = A magnitude of incident electric field (A measure of a laser power)

θ_i = Incident angle of light on a surface

θ_r = Reflection angle of light on a surface

$\theta_{r,spec}$ = Reflection angle of specular light component

λ = Wavelength of incident light

T = Correlation distance of surface model

σ_h = Standard deviation of surface model

1. 서론

레이저 반사광은 표면의 형상 정보를 포함하고 있기 때문에 표면 조도 측정에 활용할 수 있는 가능성이 많다. 특히 인프로세스 계측에 뛰어난 장점이 있는 것으로 알려졌으며 표면 결함 검사나 자동 연마 등에 활용하기 위한 연구가 다각도로 진행되고 있다.^{1,2}

표면의 반사광은 크게 정반사광과 난반사광으로 나눌 수 있으며 매끈한 표면일수록 정반사광이 많고 거친 표면일수록 난반사광이 많아진다. 따라서 경면의 평가를 위해서는 정반사광을 측정하여야 할 필요가 높다. 난반사가 정반사 영역의 주변에서 가우시안 분포와 유사하게 사방으로 퍼져나가는 경향이 있으나 정반사는 반사광 중심부의 좁은 영역에서 집중적으로 나타나는 성질이 있다. 그러므로 난반사 요소는 광의 분포를 획득하는 것이 필요한 반면 정반사 요소는 광의 세기를 측정하는 것이 중요하다. 일반적으로 광의 세기와 분포를 측정하기 위해서는 각각 수광 센서(Photodetector)와 영상 센서(CCD)를 사용하는 것이 보통이다. 수광 센서는 광의 세기를 충분한 영역에서 선형적으로 확보할 수 있어 사용되지만, 이 경우 광의 세기와 분포를 서로 다른 센서에서 따로 측정하여야 하므로, 광 분할기(Beam splitter)를 사용하여 반사광을 쪼개는 복잡한 방법이 많이 시도되었다.³ 더구나 영상 센서는 반사광이 강할 때 쉽게 포화되어 영상 정보를 잃어버리므로 수광 센서와 공통의 매개화 규칙을 적용하기 어렵다.

영상 센서도 좁은 측정 범위에서지만 개개의 픽셀이 수광 센서와 유사하게 동작한다. 따라서 영상 센서의 포화 상태를 피드백하여 레이저 파워의 세기를 적절히 조절할 수 있다면, 영상 센서가

지닌 측정 범위의 한계를 극복할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이 같은 방법으로 영상 센서만으로 정반사 성분을 추정할 수 있고, 추정된 정반사 성분을 통해 경면의 거칠기를 측정할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다.

2. 정반사 광량의 이론식

2.1 표면의 광 반사 모델

Beckmann과 Spizzichino는 표면에서 빛이 반사되는 현상을 전자기파 이론의 기본적인 개념을 바탕으로 규명하였다.⁴

평균값 $\langle h \rangle = 0$ 과 표준 편차 σ_h 및 상관 거리 T 으로 정규 분포를 이루는 것으로 Fig. 1 와 같이 정의한 표면의 한점 Q에 전기장 크기 E_{o1} , 진행 방향 e_i , 전파 벡터 k_i 및 진동수(rad) ω 를 지나는 평면파가 입사각 θ_i 로 입사하여 (θ_r, ϕ_r) 의 방향으로 산란될 경우 그 평균적인 파워는 Eq. (1)과 같다.

$$\langle E_2 E_2^* \rangle = \frac{E_{o1}^2 A^2 \cos^2 \theta_i}{\lambda^2 R_{2o}^2} e^{-g} \left(\rho_o^2 + \frac{\pi T^2 D^2}{A} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} e^{-v_{xy}^2 T^2 / 4m} \right) \quad (1)$$

여기서,

$$\rho_o = \text{sinc}(v_x X) \text{sinc}(v_y Y) \quad (2)$$

$$g = \left(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} (\cos \theta_i + \cos \theta_r) \right)^2 \quad (3)$$

$$D = \left(\frac{1 + \cos \theta_i \cos \theta_r - \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \phi_r}{\cos \theta_i (\cos \theta_i + \cos \theta_r)} \right) \quad (4)$$

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (5)$$

이다. Eq. (1)에서 반사 광량은 정반사 성분(ρ_o^2)과 난반사 성분($\sum g^m e^T$)이 합해진 형태이다. ρ_o 는 Eq. (2)에 표현된 것처럼 x, y 축의 sinc 함수를 곱한 함수이므로 정반사 방향을 제외하고 모든 산란 방향에 대해 거의 0 에 가깝다. 그리고 표면이 거칠수록 급격히 정반사 성분은 사라진다.

g 는 Eq. (3)에 표현된 것처럼 표면의 거친 정도를 나타내는 σ_r/λ (optical roughness)의 제곱에 비례하므로 경면일수록 0에 가깝다.

Nayar 는 Eq. (1)의 반사 모델로부터 임의의 광학계를 가정하고 광 강도 값($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)을 Eq. (6)처럼 재정의하였다.⁵

$$L_r = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{E_{o1}^2 \cos^2 \theta_i}{2\lambda^2} e^{-g} \left(\left(\frac{z}{f} \right)^2 \frac{dA_{im} \cos \gamma}{\cos^2 \theta_r} \rho_o^2 + \frac{\pi T^2 D^2}{\cos \theta_r} \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{g^m}{m!m} e^{-v_{xy}^2 T^2 / 4m} \right) \quad (6)$$

여기서 z : 반사면과 렌즈간 거리, dA_s : 반사면 미소면적, f : 렌즈와 센서간 거리, dA_{im} : 센서 픽셀 크기, γ : 렌즈 중심의 입체각이다.

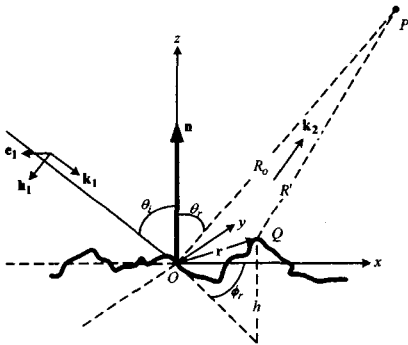


Fig. 1 Reflection model of plane wave incident on a rough surface⁴

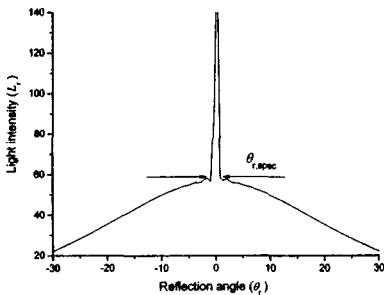


Fig. 2 Model of principal axis light intensity distribution of reflected beam ($E_{o1}=10, \lambda=0.01, g \approx 1$)

2.2 주반사축의 광강도 모델과 정반사 영역의 설정

Fig. 1의 광반사 모델에서 반사가 가장 많이 일어나는 방향을 주반사축(주축, Principal axis)으로 정의한다. 이는 광반사 모델에서 $\phi_r=0$ 으로 둔 것과 같다.

Fig. 2는 주축의 이론적 광강도 분포 모델을 나타내는데 가운데 뾰족 솟은 부분이 정반사 영역이고 나머지는 난반사 영역으로 볼 수 있다. 정반사 영역의 경계점을 sinc 함수의 1차 측대파(side lobe)의 최대값에 해당하는 각도값으로 정했다. 왜냐하면 대부분의 정반사 광량이 포함될 수 있기 때문이다.

Eq. (7)은 정반사 영역의 경계점을 광반사 모델로부터 주축 상의 각도(Specular reflection angle)로 유도한 것이다.

$$\theta_{r,spec} = \sin^{-1} \left(\sin \theta_i + \frac{\pi}{kX} \right), \quad k = 2\pi/\lambda \quad (7)$$

3. 입사광 강도 조정 시뮬레이션

광반사 모델로부터 주축의 반사광 정보를 얻기 위해서는 표면, 입사광, 그리고 광학계의 정보가 모두 필요하다. 그 중 입사광(θ_i, λ)과 광학계(z, f, dA_{im}, γ)는 고정하고 다양한 표면(σ_n, T)에 대해 주축의 광강도 분포를 획득하였다.

임의의 영상 센서를 가정하고 정반사 영역에서 각 센서 화소가 포화되는 것을 막기 위해 입사광의 세기(E_{o1})를 적절히 조정하였다. 그리고 주축의 광강도 분포에서 정반사 성분과 난반사 성분을 동시에 추출하여 그 변화를 살펴보았다.

3.1 정반사 성분 - 정반사 광강도 세기

일반적으로 영상 센서의 한 화소는 대개 좁은 영역의 광 강도 밖에는 측정할 수 없으며 그 범위를 벗어나면 쉽게 포화되어 버린다. Eq. (8)은 이 같은 특성을 한 화소(Pixel)가 측정할 수 있는 광강도의 범위에 대해 정의한 것이다. 이 때 범위는 $[L_{r,min}, L_{r,max}]$ 에 해당한다.

$$Sa(L_r) = \begin{cases} L_{r,\min}, & (L_r < L_{r,\min}) \\ L_r, & (L_{r,\min} \leq L_r \leq L_{r,\max}) \\ L_{r,\max}, & (L_r > L_{r,\max}) \end{cases} \quad (8)$$

Eq. (9)은 정반사 성분의 정규화 광강도를 정의한 것이며 정반사광의 세기를 가리킨다. 정반사 성분의 영역 $\pm\theta_{r,\text{spec}}$ 에서 $Sa(L_r)$ 을 $L_{r,\max}$ 로 정규화하고 면적을 구하였다.

$$P_{r,\text{spec}} = \int_{-\theta_{r,\text{spec}}}^{\theta_{r,\text{spec}}} \frac{Sa(L_r)}{L_{r,\max}} d\theta_r \quad (9)$$

3.2 정반사 성분의 포화 회피를 위한 입사광의 크기(E_{o1}) 조절

Eq. (10)은 L_r 의 크기를 $[L_{r,\min}, L_{r,\max}]$ 내로 재조정하기 위해 E_{o1} 의 크기를 E_{o1}' 로 변경한 것을 나타내고 이 때의 광강도를 Eq. (11)에서 L_r' 으로 정의하였다.

$$E_{o1}' = E_{o1} + E_{o1,\text{add}} \quad (10)$$

$$L_r' = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{(E_{o1}')^2 \cos^2 \theta_i}{2\lambda^2}} e^{-g} \left(\left(\frac{z}{f} \right)^2 \frac{dA_{im} \cos \gamma}{\cos^2 \hat{r}} \rho_o^2 + \frac{\pi T^2 D^2}{\cos \theta_r} \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{g^m}{m! m} e^{-v_{xy}^2 T^2 / 4m} \right) \quad (11)$$

Eq. (12)는 L_r' 에 대한 Eq. (9)의 정규화 광강도에 해당한다. 만약 L_r' 을 정반사 성분의 크기를 측정하기 위해 일정하게 유지한다면 이 때의 E_{o1}' 은 정반사 성분의 정규화 광강도 $P_{r,\text{spec}}$ 와는 당연히 반비례한다. 이를 Eq. (13)에 표현하였고, $P_{r,\text{spec}}'$ 은 $[q_0 L_{r,\max}, q_1 L_{r,\max}]$ 의 좁은 구간에서 유지한다고 보았다. 그리고 표면 거칠기 $R_{q,\text{smooth}}$ 는 Eq. (14)와 같이 일차식으로 근사시킬 수 있다.

$$P_{r,\text{spec}}' = \int_{-\theta_{r,\text{spec}}}^{\theta_{r,\text{spec}}} \frac{Sa(L_r')}{L_{r,\max}} d\theta_r \quad (12)$$

$$P_{r,\text{spec}} \propto (E_{o1}')^{-1} \quad \text{if } q_0 L_{r,\max} \leq P_{r,\text{spec}}' \leq q_1 L_{r,\max} \quad (13)$$

$$R_{q,\text{smooth}} = a(P_{r,\text{spec}})^{-1} + b = aE_{o1}' + b \quad (14)$$

3.3 난반사 성분 - 광강도 분포

Y. F. Shen 은 난반사 요소를 주축 상의 광강도 분포(L_r)의 표준 편차 값으로 측정할 수 있음을 보였다.⁶ Eq. (15)은 표준 편차 σ 를 주축의 x_i 번째 픽셀에서 주축상의 광강도가 y_i 일 경우에 대해 정의한 것이다.

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - x_c)^2 \times y_i}{\sum_{i=0}^n y_i} \right)^{1/2}, \quad x_c = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i \times y_i)}{\sum_{i=0}^n y_i} \quad (15)$$

3.4 시뮬레이션 결과

입사각 $\theta_i=0$, 파장 $\lambda=0.01$ 로 입사광을 정하고 표면 정보는 상관 거리 $T=0.01$ 로 고정한 채 프로파일 높이의 편차 σ_h 를 0.0001에서 0.003까지 변화하였다. 따라서 광학 거칠기(Optical roughness) σ_h/λ 가 커지고 광반사 모델의 표면이 점차 거칠어진다. 영상 센서의 화소 포화 범위 $[L_{r,\min}, L_{r,\max}]$ 는 $[5, 250]$ 으로, 정반사 광강도 $P_{r,\text{spec}}'$ 의 조절 범위 $[q_0 L_{r,\max}, q_1 L_{r,\max}]$ 는 $[0.1, 1.3]$ 으로 정하였다. 그리고 정반사 영역 $\pm\theta_{r,\text{spec}}$ 은 주축 광강도 모델에서 약 $\pm 0.3^\circ$ 에 해당한다.

Fig. 3는 E_{o1} 의 초기값을 50으로 두고 영상의 주축에서 얻은 광강도 분포이다. 반사광 전체의 광강도 P_r 을 65에서 80레벨로 유지할 수 있게 E_{o1} 의 초기값을 정하면 난반사광 성분을 충분히 확인할 수 있다. 그러나 이 경우 특히 매끈한 면에서는 정반사 영역이 심하게 포화되어 정반사 성분의 손실이 심하다.

Fig. 4는 정반사 성분의 손실을 막기 위해 입사광의 크기를 $E_{o1} \rightarrow E_{o1}'$ 으로 조절하였을 때의 주축의 광강도 분포이다. Fig. 5에서 정반사 성분 $P_{r,\text{spec}}$ 를 나타내었고, 그림에서 정반사 성분이 특히 ($\sigma_h/\lambda < 0.2 \Leftrightarrow g \ll 1$)의 매끈한 면을 잘 반영할 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 정반사 성분과 난반사 성분의 비율

변화를 동시에 비교해 보았다. 난반사 성분 σ 를 구하고 정반사 성분과 서로 같은 스케일로 조정된 뒤 P_r 에 대한 비율을 구하였다. 이 때 P_r 은 전체 반사광의 크기에 해당하므로 두 성분을 합하면 알 수 있다. 그림에서 한 가지 성분만이 100% 존재하는 구간이 양쪽으로 있고 각 성분이 혼재하는 구간이 가운데에 있다. 두 성분이 10~90% 혼재하는 구간을 천이 영역으로 정의한다면, $\sigma_w/\lambda=[0.075, 0.165]$ 에 해당한다. 세 단계의 구간을 차례로 매끈한 면, 중간 단계의 면, 그리고 거친 면으로 생각한다면, 이는 반사광 모델에서 각각 $g \ll 1$, $g \approx 1$, $g \gg 1$ 인 표면에 해당한다.

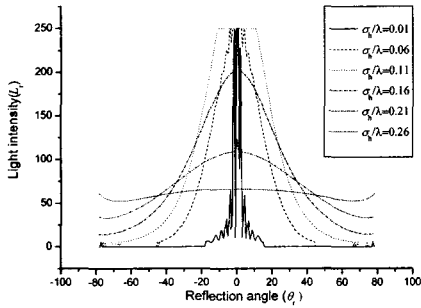


Fig. 3 Step I : Adjustment of incident light power to set a proper P_r

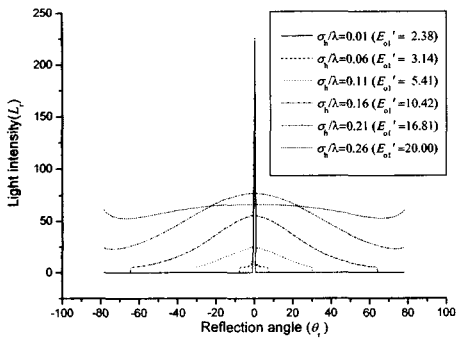


Fig. 4 Step II : Adjustment of incident light power to set a proper $P_{r,spec}$

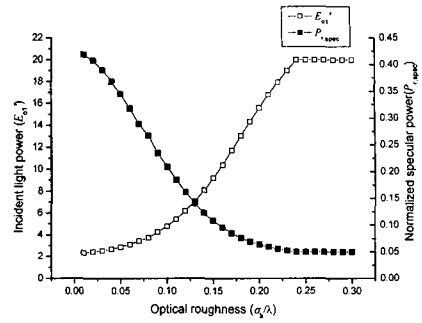


Fig. 5 Step III: Calculation of $P_{r,spec}$ from incident light power E_{oi}'

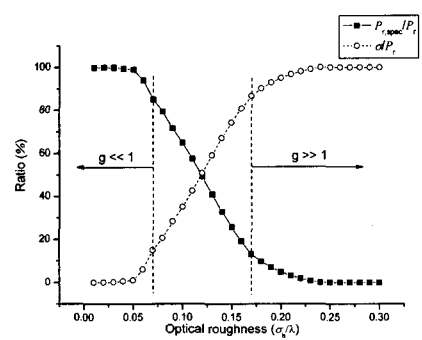


Fig. 6 Illustration of transition zone by comparison of $P_{r,spec}/P_r$ and σ/P_r

4. 실험 장치 및 방법

Fig. 7 는 실험 장치의 개략도이다. 인텔의 80C296SA 마이크로컨트롤러 기반으로 구성하였다. 레이저 출력 파워를 변화시키기 위해 프로세서의 출력 신호가 RC 필터를 통해 아날로그화된 뒤 연산 증폭기(OP-AMP)를 거쳐 신호 레벨이 변경되고 트랜지스터의 베이스 부에 인가된다. Table 1. 2.에서 실험 장치의 핵심 요소인 영상 센서와 레이저 다이오드의 사양을 보였다.

Fig. 8 은 레이저 스폿이 표면에서 반사된 영상에서 정반사와 난반사의 영역을 보인 것이다. 그림에서 정반사 영역은 반경 r_{spec} 의 중심원이고 난반사 영역은 그 주위를 둘러싼 부분(r_{diff})이다. 이때 표면이 완전히 매끈하다면 정반사 영역은 레이저 스폿의 크기에 포커싱 렌즈의 배율을 곱한 값에 해당한다. 그리고 레이저 스폿은 핀홀의 크기

로 결정되므로 영상에서 정반사 영역은 핀홀의 크기와 관련이 깊다.

정반사 영역을 결정하기 위하여 100% 반사면으로 가정할 수 있는 유리면(R_q 0.02 μm)에서 영상을 획득했다. Fig. 9(a), (b), (c)에서 각각 핀홀 직경 0.4, 0.8, 1.2mm를 통과한 레이저 스폿의 영상을 나타내었다. 영상에서 정반사광이 차지하는 영역은 54 \times 54, 102 \times 102, 그리고 158 \times 158 픽셀이고, 이는 각각 픽셀 크기로부터 0.43 \times 0.43, 0.81 \times 0.81, 그리고 1.26 \times 1.26mm²에 해당하는 값이다. 실험 장치에서 렌즈로 포커싱을 하지 않았기 때문에 배율은 1배가 되며 정반사 영역이 레이저 스폿 크기와 거의 일치한다. 스폿 크기가 너무 크면 난반사 요소를 영상에 다 담을 수가 없고, 너무 작으면 정반사 요소가 적어지며 표면의 정보도 제대로 반영할 수 없다. 따라서 핀홀의 직경은 0.8mm가 적당한 것으로 판단했고, 이 때의 정반사 영역은 102 \times 102 픽셀이 된다. 그리고 $[q_0L_{r,max}, q_1L_{r,max}]$ 은 [1620, 1800]으로 정하였고, 레이저 파워 E_{01} '은 레이저 다이오드의 드라이버에 지정한 PWM 지령치에 해당한다.

실험에서 사용한 시편은 초경과 실리콘 웨이퍼 및 SKD11이다. Mitutoyo 사의 휴대형 측정식 표면 거칠기 측정 장치 SJ-301의 측정 결과를 기준 값으로 정하였다. 세 종류의 시편에 대해 실험 장치의 측정 결과와 SJ-301의 결과를 서로 비교하였다. 각각 5~6회씩 측정한 뒤 최고치와 최소치를 오류로 가정하여 버리고 남은 값에 대한 평균을 측정 결과로 정하였다.

Table 1 Specification of HV7131D CMOS image sensor

Pixel resolution	642 \times 482
Pixel size	8 \times 8 μm^2
Fill factor	30%
Format	VGA
Sensitivity	2.5V/lux·sec
Technology	0.5 μm 2 metal CMOS

Table 2 Specification of LT052 Laser diode

Optical power output	35mW max.
Wavelength	650nm band
Operating current	110mA max.

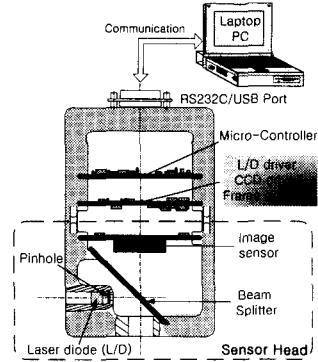


Fig. 7 Schematic diagram of experimental system based on micro-controller

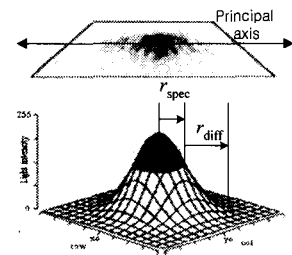


Fig. 8 Reflected light intensity distribution on a sensor plane

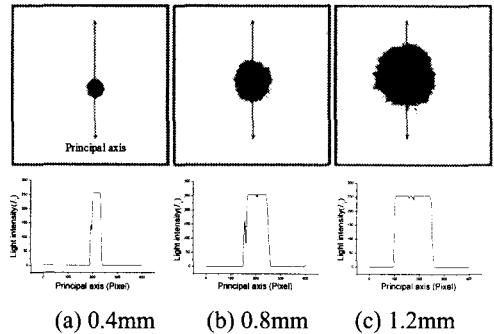


Fig. 9 Variations of specular light pattern and light intensity distribution with different pinhole diameters

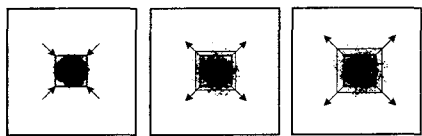
5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 10는 SKD11에서 정반사 영역의 영상 변화를 나타내었다. 여기서 (a), (b), (c)가 고품위 면

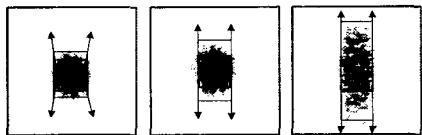
에 해당한다. (a)에서는 정반사 영역 104×104 픽셀 내에 모든 영상이 집중되어 나타난다. (b), (c)에서는 (a)의 영상이 흩어지면서 128×128, 132×132 픽셀로 영상의 영역이 커지고, 정반사 영역의 집중도가 약해진다. (d)에서 108×144(ratio=1.33) 픽셀로 영상의 확장이 갑자기 방향성을 가지기 시작하므로 난반사 성분이 나타나기 시작한다. 즉 이 부분이 천이 영역에 해당한다. (e), (f)에서는 110×164(ratio=1.49) 및 108×300(ratio=2.77) 픽셀로 영상이 완전한 방향성을 가지므로 난반사 성분이 지배적이다. 반면 정반사 영역의 집중도는 급격히 떨어지므로, 정반사 성분이 사라지는 것을 알 수 있다.

Table 3, 4, 5에서는 세 종류의 시편에서 측정된 정반사 성분(E_{o1}')의 크기 변화와 정반사 성분으로부터 계산한 경면의 거칠기 $R_{q,smooth}$ 를 나타내었다. 그리고 기준 표면 거칠기 R_q 와 비교한 측정 오차(Err.) 및 난반사 성분(σ)의 크기 변화를 참고로 나타내었다.

Eq. (14)의 환산식에서 정반사 성분으로 경면의 거칠기를 계산할 수 있다. 식에서 1 차 함수의 기울기와 절편에 해당하는 a, b 변수는 시편 종류에 따라 조금씩 다르지만 평균적으로 $a=0.0632, b=2.4557$ 이다. 정반사 성분($P_{r,spec}=E_{o1}'^{-1}$)을 난반사 성분(σ)과 서로 비교하면 시뮬레이션에서처럼 좁은 측정 구간에서 천이 영역(R_q 0.11~0.18 μm)이 존재한다. 천이 영역 아래에서는 정반사 성분이 지배적이므로 측정 오차를 $\pm 10\text{nm}$ 정도까지 유지할 수 있으나 천이 영역 바깥으로는 측정 결과가 크게 맞지 않는다.



(a) R_q 0.02 μm (b) R_q 0.07 μm (c) R_q 0.09 μm



(d) R_q 0.15 μm (e) R_q 0.23 μm (f) R_q 0.31 μm

Fig. 10 Image variation on a specular area of SKD11

Table 3 Experimental results of SKD11

R_q (μm)	E_{o1}'	$R_{q,smooth}$ (μm)	Err. (nm)	σ
0.02	39.14	0.02	0	12.50
0.03	39.31	0.03	0	11.37
0.04	39.41	0.04	0	11.38
0.07	39.85	0.06	-10	12.88
0.08	40.09	0.08	0	14.56
0.09	40.27	0.09	0	15.01
0.11	40.50	0.10	-10	16.43
0.15	40.59	0.11	-40	18.04
0.18	40.77	0.12	-60	28.76
0.23	40.89	0.13	-100	38.32
0.31	40.96	0.13	-180	47.66

Table 4 Experiment results of Super-alloy

R_q (μm)	E_{o1}'	$R_{q,smooth}$ (μm)	Err. (nm)	σ
0.04	39.55	0.04	0	11.38
0.07	39.81	0.06	-10	12.88
0.10	40.32	0.10	0	18.44
0.15	40.60	0.11	-40	20.03
0.18	40.79	0.12	-60	26.53
0.28	40.93	0.13	-150	43.30

Table 5 Experimental results of Silicon-wafer

R_q (μm)	E_{o1}'	$R_{q,smooth}$ (μm)	Err. (nm)	σ
0.02	39.18	0.02	0	7.91
0.04	39.52	0.04	0	9.26
0.06	39.93	0.07	+10	11.19
0.08	40.15	0.08	0	11.43
0.09	40.30	0.09	0	13.85
0.10	40.36	0.09	-10	14.46
0.11	40.50	0.10	-10	15.53
0.15	40.76	0.12	-30	17.19
0.18	40.82	0.12	-60	26.38
0.20	40.91	0.13	-70	29.54
0.25	41.12	0.14	-110	36.71
0.30	41.24	0.15	-150	47.46

6. 결론

본 논문에서는 영상 센서와 레이저 출력 조절 장치만으로 손쉽게 반사광에서 정반사 성분을 추정할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다. 그리고 실험을 통해 제안한 추정 알고리즘으로 고품위 면의 거칠기를 신뢰성 있게 측정할 수 있음을 보였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정반사 성분의 영역을 영상 센서 내에서 정의하고 그 정규화 광강도를 일정한 크기가 되도록 레이저의 출력을 조절한다면 영상 센서로 정반사 성분을 추정할 수 있다.
- 2) 정반사 성분과 난반사 성분이 서로 혼합되는 천이 영역이 짧은 측정 영역에 존재하며, 천이 영역의 아래에서 정반사 성분의 측정 결과가 유효하다.
- 3) 천이 영역은 R_q $0.11\mu\text{m}$ ~ $0.18\mu\text{m}$ 에서 나타나며, 정반사 요소로서 측정 가능한 고품위 면은 R_q $0.02\mu\text{m}$ ~ $0.11\mu\text{m}$ 의 범위에 해당한다.
- 4) 고품위 면에 대한 표면 거칠기 측정 오차는 측정식 거칠기 측정 결과에 비하여 $R_q \pm 10\text{nm}$ 정도이다.

참고문헌

1. TAKAHASHI, Satoru, MIYOSHI, Takashi, TAKAYA, Yasuhiro and TATSUNO, Yasufumi, "Study on In-Process measurement of silicon wafer surface defects by laser scattered defect pattern (2nd Report) - Fast defect measurement method using LSDP," Japan society of precision engineering Vol.68, No.7, pp. 1431-1435, 2002.
2. HARADA, Hiroshi, NAKAJIMA, Hideki, YAMAGUCHI, Teruo, NODA, Atsuhiko, "Optical Sensing of Surface Roughness for Polishing Robot (3rd Report)," Japan society of precision engineering Vol. 68, No. 11, pp. 962-966, 2002.
3. Yim, D.Y., Kim, S.W., "Optical roughness measurement of ground surface by light scattering," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 30, No. 2, pp.283-289, 1990.
4. Beckmann, P., Spizzichino, A., "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces," Pergamon press, Oxford, 1963.
5. Nayar, Shree K., Ikeuchi, Katsushi, Kanade, Takeo, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, pp. 611-634, July 1991.
6. Shen, Yun Feng, Lim, Han Seouk, Kim, Hwa Young, Ahn, Jung Hwan, "A study on roughness measurement of polished surfaces using reflected laser beam image," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 2, pp.145-152, 1999.