

레이저 반사광 분석을 통한 미세 표면 프로파일 추정 알고리즘의 개발

서영호#, 안중환*, 김화영**, 김선호***

Development of microscopic surface profile estimation algorithm through reflected laser beam analysis

Young-Ho Seo#, Jung-Hwan Ahn*, Hwa-Young Kim **, Sun-Ho Kim ***

ABSTRACT

In order to measure surface roughness profile, stylus type equipments are commonly used, but the stylus keeps contact with surface and damages specimens by its tip pressure. Therefore, optics based measurement systems are developed, and light phase interferometer, which is based on light interference phenomenon, is the most noticeable research. However, light interference based measurements require translation mechanisms of nano-meter order in order to generate phase differences or multiple focusing, thus the systems cannot satisfy the industrial need of on-the-machine and in-process measurement to achieve factory automation and productive enhancement. In this research, we focused light reflectance phenomenon rather than the light interference, because reflectance based method do not need translation mechanisms. However, the method cannot directly measure surface roughness profile, because reflected light consists of several components and thus it cannot supply surface height information with its original form. In order to overcome the demerit, we newly proposed an image processing based algorithm, which can separate reflected light components and conduct parameterization and reconstruction process with respect to surface height information, and then confirmed the reliability of proposed algorithm by experiment.

Key Words : Reflected laser beam(레이저 반사빔), Microscopic surface(미세 표면), Roughness profile(조도 프로파일), In-process measurement(인프로세스 계측), Optical probe(광학 프로브)

기호설명

R_q = Surface roughness of root-mean-square deviation

α = Scaling ratio related to interreflection

β = Scaling ratio related to surface height

f_c = Cut-off frequency for specular light removal

I_C = Reflected light intensity of concave part

접수일: 2005년 1월 27일; 게재승인일: 2005년 9월 9일
교신저자: 부산대원 지능기계공학과
E-mail: essav76@hitel.net Tel. (051) 510-2864
* 부산대학교 기계공학부
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 동의대학교 메카트로닉스공학과

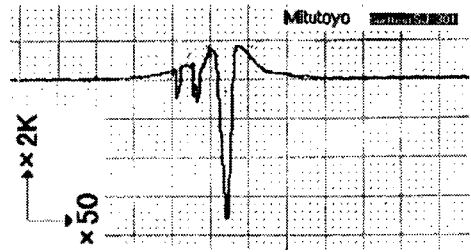
- I_r = Reflected light intensity of convex part
- σ = Standard deviation of light intensity distribution along principal axis
- E_1 = A magnitude of incident light power
- θ_i = Incident angle of light on a surface
- θ_r = Reflection angle of light on a surface
- T = Correlation distance of idealized microscopic surface model(Roughness spacing)
- σ_h = Standard deviation of idealized microscopic surface model

1. 서론

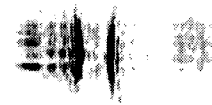
표면이란 한 물체가 다른 물체 또는 물질과 분리되는 경계면을 가리키며, 여기에서 평균 표면에 직각인 평면으로 절단하고 저주파 성분의 불규칙한 성분을 제거하여 얻은 곡선을 조도 곡선(Roughness profile)이라 한다. 표면의 조도 곡선을 얻기 위해 전통적으로 촉침식 표면 조도 측정기를 사용해 왔으며 아직까지 촉침식이 표준적인 방법으로 인정되고 있다.¹ 촉침식은 측정 원리가 간단하고 주위 환경의 영향을 적게 받으며 측정값의 반복 정밀도가 높은 반면, 시편 표면과 반드시 접촉되어야 하므로 촉침의 측정 압력으로 인해 표면을 상하게 할 우려가 많으며 촉침 선단부의 크기로 인해 측정값의 왜곡이 생기기 쉽다. 이 같은 단점을 극복하기 위해 광을 이용한 비접촉식 측정 방법이 제안되었으며 대표적인 것이 광의 간섭 현상을 이용한 광위상 간섭계이다. 그러나 위상차 생성이나 여러 단계의 포커싱을 수행하기 위해 높은 분해능을 지닌 이송 기구에 의존하므로 가공 자동화와 생산성 향상을 위한 생산 라인에서의 기상(On-the-machine) 또는 가공 중 측정에 부적합하다는 단점을 지닌다. 따라서 본 연구에서는 광의 간섭 현상 대신 반사 현상에 초점을 맞추어 접근하였다.

반사광을 이용하는 방법은 이송 기구가 필요하지 않아 기상 계측 및 인프로세스 측정에 매우 유리하지만 반사광으로부터 표면의 높이를 직접 추출할 수 없어서 근본적으로 표면 프로파일 정보를 제공하기 곤란하다는 한계가 있다. 이로 인해 표면 거칠기(Roughness)와 같은 일부의 표면 정보와 반사광의 특정 성분을 서로 매개 변수화하는 방법²이 주로 사용된다. 한편 Ha^3 에 의해 반사광

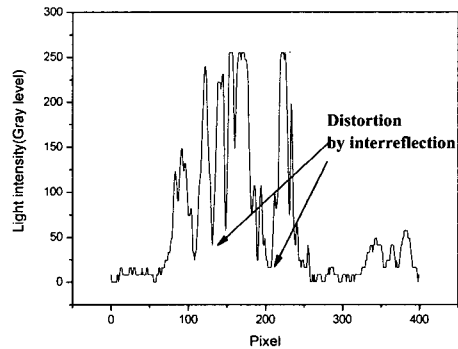
의 광강도값의 분포 자체를 매개변수화한 뒤 이를 지도화함으로써 형상 정보를 분류하고자 한 연구가 수행되었으나 실리콘 웨이퍼 상에 하나의 스크래치에 국한되었으므로 연삭, 연마면과 같이 수많은 스크래치가 가공결(Lay)을 따라 이루어진 표면에는 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 실제의 기계 가공면과 유사한 표면을 대상으로 그 미세 표면의 프로파일을 측정하기 위한 측정 알고리즘을 제안하였으며 실험적으로 그 신뢰성을 증명하였다.



(a) Profile of a scratch (Width 70, Depth 11.5 μ m)



(b) Reflected light image (Laser spot diameter 0.8mm, Viewing angle = Incident light angle)



(c) Light intensity distribution

Fig. 1 Interreflection phenomenon

2. 미세 표면 상의 반사광 강도 변화 및 내반사 왜곡

표면상에서 광이 반사될 때는 여러 반사 성분이 동시에 나타나는데 그 중에서 중앙에 집중적으로 나타나는 정반사 성분(Specular spike, Specular lobe)은 표면의 평균적인 거칠기 R_q 와 관련^{4,5}이 있고, 그 주변의 난반사 성분(Diffuse lobe)은 거시적(Macroscopic) 관점에서 표면의 전체적인 3D 형상(Texture)과 관련성⁶이 많다. Fig. 1은 하나의 미세한 스크래치를 일레로 들어 반사광의 광강도 분포를 관찰한 것인데, 그 분포 정도가 표면의 형상 정보를 일부 반영하지만 골 부분에서 반사광의 손실 정도가 큰 것을 확인할 수 있다. 이 같은 광강도 왜곡 현상은 내반사(Interreflection) 작용으로 인한 것이며, 표면의 오목한 부분에서 집중적으로 나타난다. 오목한 부분은 그 형상의 특징으로 인해 입사한 광이 무한히 서로 반사되면서 표면 밖으로 모두 나오지 못하며 골이 깊으면 깊을수록 그 정도도 커진다. 이 때 표면의 반사율(Albedo)이 1보다 작기 때문에 내반사가 안정화 되는 시점에 이르러서는 결국 광의 상당 부분이 표면에 흡수되게 된다. 따라서 미세 표면에서 반사광 강도 변화를 통해 표면의 형상 정보를 추정하고자 할 때는 이와 같은 내반사로 인한 광 강도 왜곡 현상을 극복할 필요가 있다.

3. 반사광 강도 변화를 통한 미세 표면의 조도 프로파일 추정 알고리즘

정반사 성분(Specular spike, Specular lobe)이 표면의 전체적인 거칠기 정보를 포함하며 난반사 성분(Diffuse lobe)이 표면의 국부적인 형상 정보(Surface profile)를 나타내는 성질을 이용하여 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 표면 프로파일 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 정, 난반사광의 강도 변화에 기반하며 여러 반사광 성분이 동시에 놓이는 영상의 주축(Principal axis) 상에서 각 반사광 성분들을 개별적으로 분해한다. 그 뒤 정반사 성분의 매개 변수화를 통해 표면 거칠기 R_q 를 추정하고, 이를 구속 조건으로 하면서 내반사 작용으로 인해 왜곡된 광강도를 복원하는 과정으로 이루어진다.

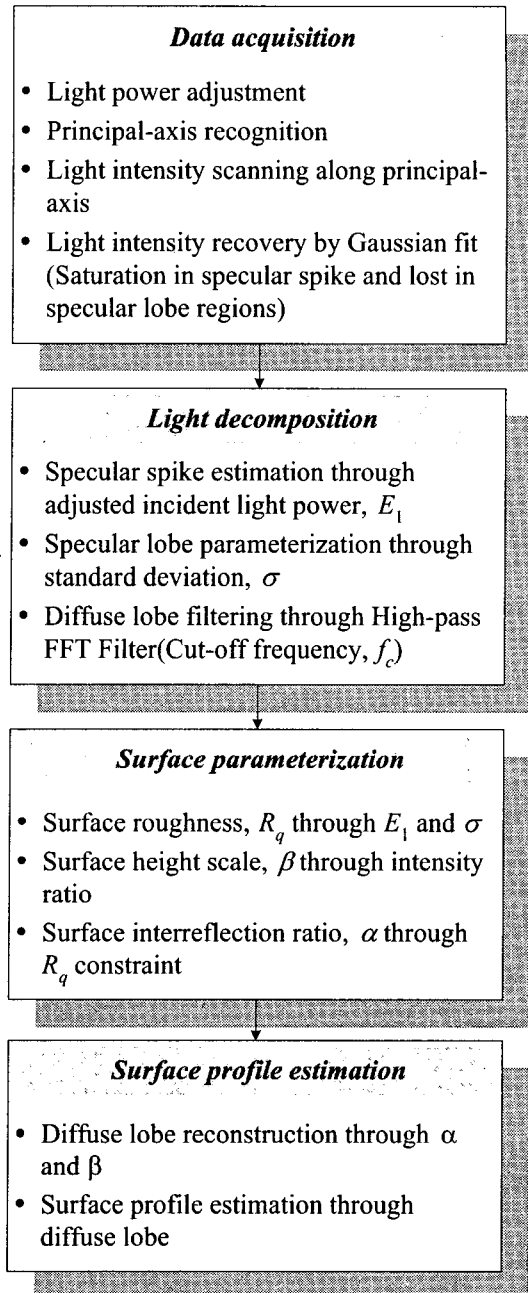


Fig. 2 Proposed signal processing algorithm for microscopic surface profile estimation

3.1 영상 처리 기반 반사광 성분 분해

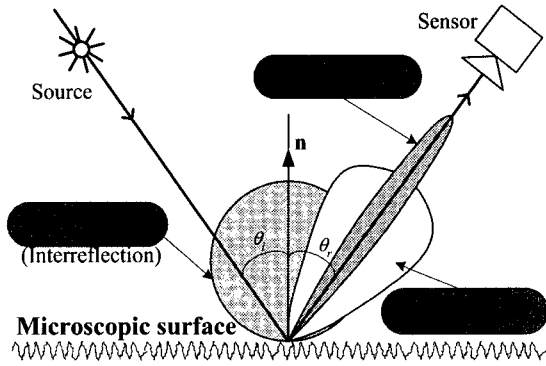
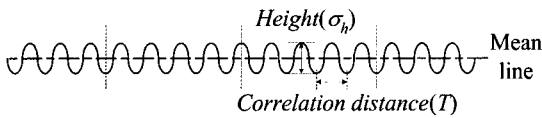
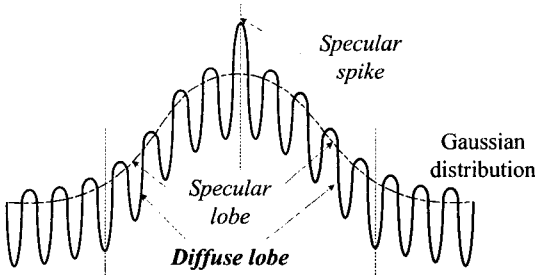


Fig. 3 Illustration of reflected light components⁵



(a) Idealized microscopic surface



(b) Light intensity distribution on principal axis (Incident light angle=Viewing angle)

Fig. 4 Model of reflected light intensity distribution on a principal axis

Fig. 3에서 미세 표면 상에서 대표적으로 나타나는 반사광 성분들을 도시하였으며, 이들을 Fig. 4에서 주축 상의 광강도 분포 모델로서 다시 나타내었다. 이 중 정반사 스파이크(Specular spike)와 정반사 로브(Specular lobe) 성분의 분해는 각각 입사광 강도(E_i) 및 광 강도 분포의 표준 편차항(σ)으로 매개화되어 수행될 수 있다.^{8,9} 그리고 광강도 분포의 FFT 분석을 통해 Fig. 5와 같이 난반사 로브 성분(Diffuse lobe)을 추출하기 위한 고역 통과 필터의

차단 주파수(f_c)를 정할 수 있다.¹¹

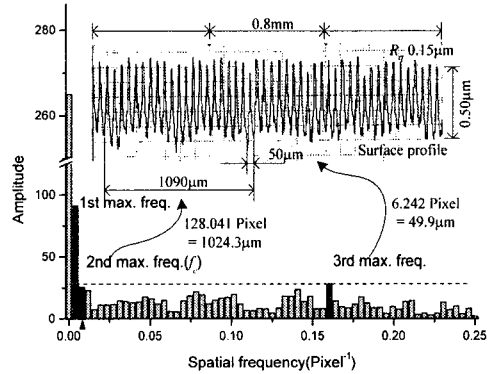


Fig. 5 Separation of diffuse lobe component by FFT analysis ($f_c=0.008 \text{ Pixel}^{-1}$)¹¹

3.2 반사 성분과 표면 정보간의 매개변수화

입사광 강도 및 광 강도 분포의 표준 편차항을 통해 추정된 정반사 스파이크와 정반사 로브 성분에 블렌딩 함수 w_1, w_2 를 도입하여 두 성분을 합하면¹⁰, Eq. (1)과 같이 표면 거칠기, R_q 를 매개화하여 추정할 수 있다. 여기서 각 계수(a, b)는 정반사 스파이크와 로브에 대한 표면 거칠기의 상관 계수이며 실험적으로 구할 수 있다.^{9,8}

다음 단계로서 표면 높이의 광강도비($\mu\text{m}/I$), β 를 불록한 부분의 광강도 크기(I_c) 분포에 한해 곡선 맞춤을 통해 실험적으로 구한다. 그 뒤 Eq. (2)에서 β 를 통해 불록한 부분과 오목한 부분을 동시에 스케일링한다. 여기서 불록한 부분의 광강도 크기만을 기준으로 삼은 까닭은 오목한 부분의 광강도 크기는 그 값을 신뢰할 수 없기 때문이다.

끝으로 Eq. (1)의 R_q 추정치를 구속 조건으로 하면 오목한 부분의 광강도 크기(I_o)에 대해 Eq. (2)에서 광강도 손실비($\mu\text{m}/I$), α 를 역으로 추정할 수 있다.

불록한 부분과 오목한 부분을 β 값으로 동시에 스케일링하고, R_q 추정치를 스케일링된 광강도 분포에서 내반사로 인한 영향을 저감하기 위해 구속 조건으로서 도입한 것은 본 논문에서 새롭게 제안하는 것으로서 오목 표면의 경우에 광강도 손실로 인해 인식되는 표면의 높이가 실제 높이보다 깊게 나타날 뿐 형상 자체가 왜곡 되는 것은 아니

므로 재귀적인 수치해석법으로 형상을 복원해 나간 Nayar의 연구⁷에 착안한 것이다.

$$R_q = w_1(a_1 E_1 + b_1) + w_2(a_2 \sigma + b_2) \quad (1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{\beta^2}{N} \left(\sum (I_{\cap})^2 + \sum (\alpha I_{\cup})^2 \right)} \quad (2)$$

(β : Intensity to height, α : Interreflection to depth ratio)

3.3 매개변수를 통한 반사광 강도 변화 복원

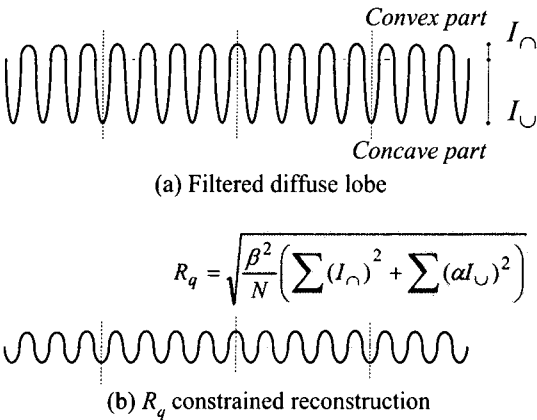


Fig. 6 Diffuse lobe reconstruction for surface profile estimation

광강도의 분포가 가우시안 함수가 유사하다는 점을 이용하면 영상 센서의 포화와 주변광(Ambient light)의 영향으로 인해 데이터 수집 단계에서 생겨난 광강도 왜곡 현상을 일부 복구할 수 있다. 그리고 Fig. 6 과 같이 고역 통과 필터를 거쳐 추출된 난반사 로브(Diffuse lobe)를 표면 매개 변수 α , β 및 R_q 를 통해 내반사 왜곡으로부터 복원할 수 있으며, 이 때 복원된 난반사 로브는 결과적으로 표면 프로파일 정보를 반영할 수 있다.

4. 실험 장치 및 방법

Fig. 7은 주어진 시편의 표면 상에 일정한 간격(T)와 깊이(σ_h)로 미세한 스크래치를 낼 수 있는 장치를 나타낸다. V 형상의 다이아몬드 공구를 이용

하여 자증을 통해 표면의 깊이를 조절하며, XY 스테이지를 통해 간격을 조절한다. 그리고 Fig. 8는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위해 설계한 광학 프로브의 개념도를 나타낸다. 레이저 다이오드와 하프 미러 및 영상 센서로 이루어졌으며 내부의 광학계는 하프미러를 통해 0.8 mm 핀홀을 통과한 레이저 광을 표면 상에 수직으로 입사시킬 수 있는 구조이다. Table 1, 2는 각각 영상 센서와 레이저 다이오드의 사양을 나타낸다. 비스듬하게 레이저 광을 입사시키는 경사형과는 달리 이와 같은 수직형의 구조는 프로브를 소형으로 제작할 수 있는 장점이 있을 뿐 아니라 경사형보다 입사각의 영향으로 인한 그림자(Shadowing) 효과가 어느정도 고정되는 효과를 기대할 수 있다.

시편의 표면 거칠기와 프로파일에 관한 기준 정보를 얻기 위해 휴대형 측정식 표면 거칠기 측정 장치(SJ-301, Mitutoyo Co.)을 이용하였다. 시편의 σ_h 와 T 는 각각 0.50 μm 과 50 μm 으로 가공하였다. 광학 프로브 내 영상 센서의 포화를 막아 영상 정보의 손실을 최대한 막으면서 측정치의 일관성을 얻기 위해 선행 연구에서 제안한 바 있는 광량 정보 피드백 기반 레이저 출력 조절법¹²을 사용하였다. 그리고 주변광(Ambient light)의 영향을 제거하기 위해 문턱치 100(Gray level) 이하의 광강도 정보는 무시하는 영상 처리 기법을 적용하였다.

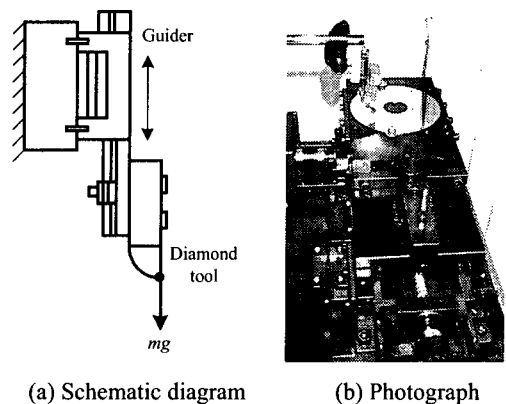


Fig. 7 Equipment for making scratches

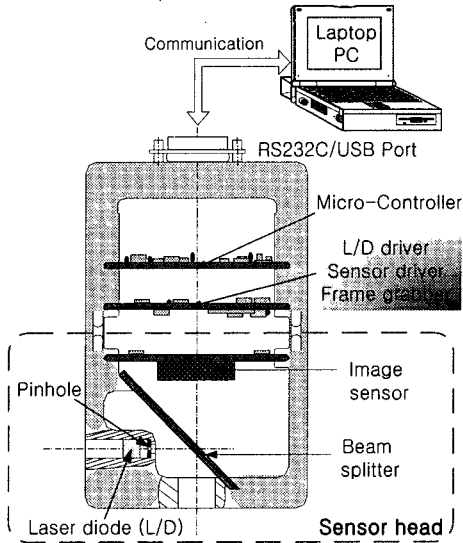


Fig. 8 Schematic diagram of optical probe

Table 1 Specification of HV7131D CMOS image sensor

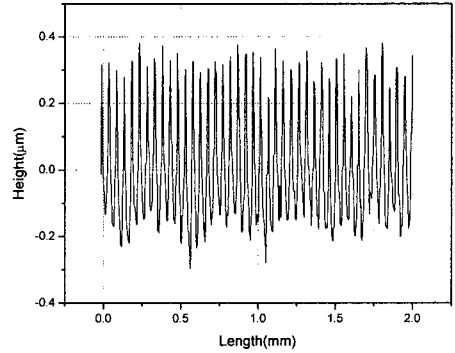
Pixel resolution	642×482
Pixel size	8×8 μm ²
Fill factor	30 %
Format	VGA
Sensitivity	2.5 V/lux·sec
Technology	0.5 μm 2 metal CMOS

Table 2 Specification of LT052 Laser diode

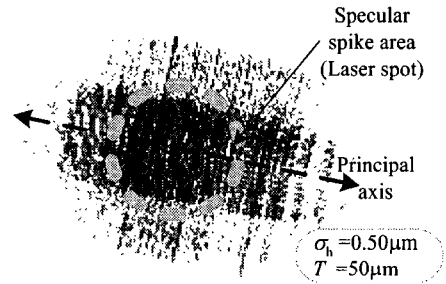
Optical power output	35 mW max.
Wavelength	650 nm band
Operating current	110 mA max.

Table 3 Average of peak values between reference and estimated surface profile (μm)

	Reference	β Reconstruction	α Reconstruction
I_{\cup}	0.31	0.31	0.31
I_{\cap}	-0.17	-0.33	-0.20



(a) Surface profile



(b) Captured image

Fig. 9 Surface profile and image of reflected laser beam

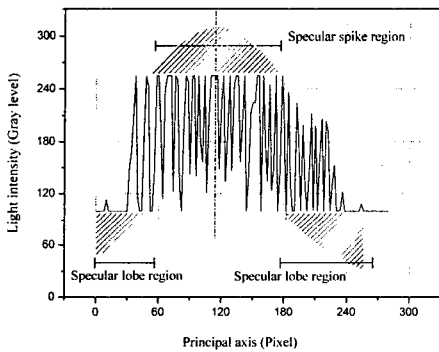
5. 실험 결과

Fig. 9(a)는 스크래치를 낸 시편에서 측정한 기준 조도 프로파일을, Fig. 9(b)는 광학 프로브를 통해 시편으로부터 획득한 영상을 나타낸다. 그리고 Fig. 10(a)는 획득한 영상의 주축 상에서 나타나는 광강도 분포의 원신호를 보인다. 여기서 레이저 스폿 영역 내의 정반사 스파이크 성분이 영상 센서 상에서 대부분 포화되고, 정반사 로브에 해당하는 나머지 영역에서는 주변광의 영향으로 인해 광강도 값이 부분적으로 무시되었다. 이와 같이 손실된 광강도 값을 가우시안 함수를 기준으로 삼아 최대한 복구하였고 그 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다.

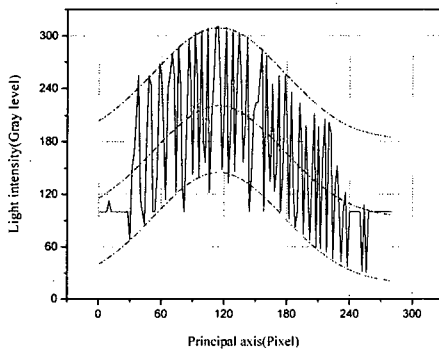
Fig. 11(a)는 차단 주파수, f_c (0.008 Pixel⁻¹)에 의해 필터링되고, 매개 변수 β (0.0042 μm/l)에 의해 표면의 높이 정보가 반영된 난반사 로브의 광 강도 분포를 나타낸다. Fig. 9(a)의 기준 프로파일과

비교할 때, 내반사의 영향으로 인해 골의 깊이 추정치에서 산의 높이 추정치에 비해 상대적으로 큰 오차가 있음을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 표면 거칠기, R_q ($0.15 \mu\text{m}$) 추정 값을 구속 조건으로 적용하여 구한 광강도 손실비, α ($0.5955 \mu\text{m}/I$)에 의해 내반사 영향이 어느 정도 저감된 것을 보인다.

Fig. 9(a)의 기준 조도 프로파일에 대해 Fig. 11(a)의 β 를 적용하여 복구한 난반사 로브 프로파일과 그 뒤에 Fig. 11(b)의 α 를 적용하여 복구한 프로파일을 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다. 각각 산과 골의 평균값을 블록 부분의 광강도(I_s) 피크치와 오목 부분의 광강도(I_v) 피크치에 대해 평균을 구하여 비교하였으며, α 를 적용한 결과 I_s 에서 기준 프로파일에 비해 β 의 $0.16 \mu\text{m}$ 에서 $0.03 \mu\text{m}$ 로 내반사 영향이 저감된 것을 확인할 수 있다.

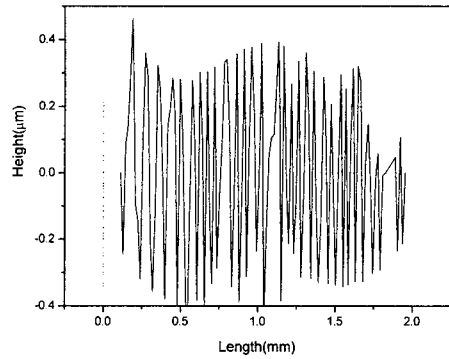


(a) Raw data

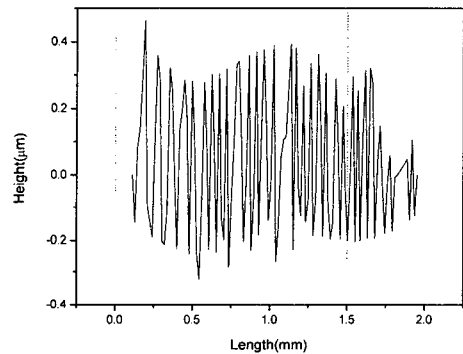


(b) Recovered data by Gaussian fitting

Fig. 10 Light intensity distribution on a principal axis



(a) Filtering diffuse lobe with scaling ($f_c=0.008 \text{ Pixel}^{-1}$, $\beta=0.0042 \mu\text{m}/I$)



(b) R_q constrained reconstruction ($\alpha=0.5955 \mu\text{m}/I$)

Fig. 11 Diffuse lobe reconstruction for surface profile estimation

난반사 로브 프로파일을 통해 표면 조도 프로파일을 추정하기 위해 초기 반사 영상을 획득하는 과정에서 영상 센서 자체의 광강도 측정 가능 영역에 관한 한계와 주변광 영향 및 반사광 성분 간의 간섭으로 인해 정반사 영역에서 주로 광강도 왜곡이 크게 발생하였고 그 왜곡의 영향이 표면 조도 프로파일을 추정한 결과에서도 여전히 존재하지만, 본 연구에서 제안한 추정 알고리즘에 의해 내반사 현상의 영향이 저감되면서 반사광의 난반사 로브 프로파일을 통해 표면 프로파일을 신뢰성 있게 추정할 수 있음이 증명되었다.

6. 결론

제한한 측정 알고리즘은 영상 신호 처리 기반으로 세 가지 반사광 성분들을 개별적으로 분해한 뒤 각 반사광 성분들에 대해 복원 및 매개변수화 과정을 수행하도록 구성되었다. 그리고 미세 표면 상에서 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위해 연삭, 연마면 등의 기계 가공면에서 흔히 볼 수 있는 스크래치 형태의 실험용 시편을 가공한 뒤에 레이저 광을 시편 표면 상에 수직으로 입사하고 그 반사광을 획득하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반사광은 정반사 스파이크, 정반사 로브 그리고 난반사 로브 성분으로 분해될 수 있으며, 그 중 난반사 로브 성분의 광강도 변화를 통해서 표면 프로파일을 추정할 수 있다.
- 2) 난반사 로브 성분을 분해하기 위해 고역 통과 필터를 사용할 수 있으며, 필터의 차단 주파수는 광강도 분포의 FFT 분석을 통해 찾을 수 있다.
- 3) 분해된 난반사 로브 성분에서는 내반사 현상으로 인한 왜곡이 나타나며, 이를 복원하기 위해 정반사 스파이크와 정반사 로브 성분을 통해 추정된 표면 거칠기, R_q 를 구속 조건으로서 사용할 수 있다.

참고문헌

1. Sherrington, I., Smith, E. H, "Modern measurement techniques in surface metrology: part I: stylus instrument," *Wear*, Vol. 125, pp. 271-288, 1988.
2. Yim, D. Y., Kim, S. W., "Optical roughness measurement of ground surfaces by light scattering," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, No. 2, pp.283-289, 1990.
3. Ha, Taeho, Miyoshi, Takashi, Takaya, Yasuhiro, Takahashi, Satoru, "Size determination of microscratches on silicon oxide wafer surface using scattered light," *Precision Engineering*, Vol. 27, pp.265-272, 2003.
4. Beckmann, P. and Spizzichino, A., "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces," Pergamon press, Oxford, 1963.
5. Nayar, Shree K., Ikeuchi, Katsushi and Kanade, Takeo, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 7, p.612, 1991.
6. Zhang, Ruo, Tsai, Ping-Sing, Cryer, James Edwin and Shah, Mubarak, "Shape from shading: A Survey," *IEEE Transactions on pattern and machine intelligence*, Vol. 21, No. 8, pp.690-706, 1999.
7. Nayar, Shree K., Ikeuchi, Katsushi and Kanade, Takeo, "Recovering Shape in the Presence of Interreflections," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1814-1819, 1991.
8. Shen, Yun-Feng, Lim, Han-Seok, Kim, Hwa-Young, Ahn, Jung-Hwan, "A Study on Roughness Measurement of Polished Surfaces Using Reflected Laser Beam Image," *Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp.145-152, 1999.
9. Seo, Young-Ho, Kim, Ju-Nyun, Ahn, Jung-Hwan, "Estimation of Specular Light Power by Adjusting Incident Laser Power for Measuring Mirror-Like Surface Roughness," *Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 94-101, 2004.
10. Seo, Young-Ho, Ahn, Jung-Hwan, "Blending of reflected light components using weighting function on a laser surface roughness measurement," *Proceeding of Korean society of precision engineering*, pp. 356-359, 2004.
11. Seo, Young Ho, Ahn, Jung Hwan, "Microscopic surface estimation through light distribution analysis of reflected laser beam," 30th Annual Conference of the IEEE Industrial electronics society, November 2-6, Busan, Korea, 2004.
12. Seo, Young Ho, Kim, Hwa Young, Ahn, Jung Hwan, "Adjustment algorithm of incident light power for improving performance of laser surface roughness measurement," *Korea society of precision engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 79-87, 2004.