

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

레이저빔 반사 화상을 이용한 연마면 거칠기 측정법에 관한 연구

Yun-Feng Shen*, 임한석**, 김화영***, 안중환***

A Study on Roughness Measurement of Polished Surfaces Using Reflected Laser Beam Image

Yun-Feng Shen*, Han-Seok Lim**, Hwa-Young Kim***, Jung-Hwan Ahn***

ABSTRACT

This paper presents the principle and experimental results of a non-contact surface roughness measurement by means of screen projected pattern of laser beam reflected from a polished surface.

In the reflected laser beam pattern especially from a fine surface like ground or polished one, light intensity varies from the center of the image to its boundary as the Gaussian distribution. The standard deviation of a light intensity distribution is assumed to be a good non-contact estimator for measuring the surface roughness, because the light reflectivity is known to be well related with the surface roughness. This method doesn't need to discriminate between the specularly reflected light and the diffusely reflected one, whereas the scattered laser intensity method must do. Nor it needs to adjust the change of light intensity caused by environmental lights or specimen materials.

Reflected laser beam pattern narrowly spreads out in the vertical direction to tiny scratches on the polished surface due to abrasives. The deeper the scratch the more the dispersion, which means the rougher surface. The standard deviation of the pattern is nearly in proportion to the surface roughness. Measurement errors by this method are shown to be below 10 percent compared with those obtained by a common contact method. The inclination of measuring unit from the normal axis causes the measurement errors up to 10 percent for an angle of 4 degree. Therefore the proposed method can be used as an on-the-machine quick roughness estimator within 10 percent measurement error.

Key Words : surface roughness(표면 거칠기), polished surface(연마표면), Gaussian surface(정규분포표면), scattered lights(산란광), light intensity(광강도), specularly reflected light(정반사광), diffusely reflected light(난반사광), standard deviation(표준편차)

1. 서론

연마공정은 제품 제작의 마무리 단계 작업으로

연마공정에서의 정밀도는 해당 제품의 질을 결정하는 중요한 요인이 된다. 연마가공 후 표면 상태의

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 기계공학부

품위를 평가하는 표면 거칠기 측정법은 전통적으로 측정식 표면조도 측정기를 사용해 왔으며 아직까지 측정식이 표준적인 방법으로 인정되고 있다.⁽¹⁾ 측정식은 고정도 측정이 가능한 반면 측정 시간이 길고 생산라인에서의 기상(on-the-machine) 또는 가공 중 측정이 부적합하다는 단점을 가지고 있다.

표면 거칠기의 비접촉 측정에는 광절단법, 광측침법등 표면의 미세형상 자체를 측정하는 비매개 변수법⁽²⁻⁴⁾과 정반사광을 이용한 방법, 난반사광을 이용하는 방법, TIS(Total Integrated Scatter) 방법, 산란각 분포를 이용하는 방법 등 특정 거칠기 변수만 측정하는 매개변수법⁽⁵⁻¹²⁾이 있다. 기상 또는 가공중 측정을 위해서는 빠른 측정이 필요하므로 일반적으로 매개변수법으로 분류되는 방법이 바람직하며 그 중에서도 측정장치 구성의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법이 가장 적절한 방법으로 평가되고 있다.⁽⁶⁾

가공 자동화와 생산성 향상을 위해 절삭가공⁽¹³⁻¹⁴⁾, 그리고 연삭가공⁽¹⁵⁻¹⁶⁾에서는 가공물을 가공기에서 이탈시키지 않고 가공물 표면 거칠기를 측정할 수 있는 기상 계측의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔으며 많은 연구가 계속되어 왔다. 금형연마표면에 대한 표면 거칠기 평가는 가공중 숙련공이 표준시편을 사용하여 거칠기 정도를 비교 판단하고 있으며 연마가공중 금형 표면의 표면 거칠기를 정량화할 수 없는 실정이다. 표면 거칠기를 정량화하기 위해서는 금형을 연마기에서 이탈시켜 측정실에서 측정해야 하며 대형 금형의 경우는 측정실에서도 측정하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 금형 연마 가공물을 연마기에서 이탈시키지 않고 연마표면 거칠기를 측정할 수 있는 비접촉 측정법을 연구하고자 한다.

광산란을 이용한 비접촉식 표면 거칠기 측정법에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 많이 수행되어 왔다.⁽⁵⁻¹⁶⁾ 이전 연구들은 대부분 산란광의 강도를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 이들 방법은 표면상태에 따른 편차가 크고 측정가능 영역이 한정되 광학계가 복잡해지는 단점을 갖고 있다. 그리고 측정재질의 반사율, 색상, 외부광원의 영향을 많이 받으며 산란광 강도를 측정하기 위해 산란광의 전방에 렌즈를 설치하여 집광하기 때문에 산란된 광이 렌즈의 수광각 범위를 벗어날 경우 산란광의 전체 정보에 대한 획득이 불가능하다.⁽¹³⁻¹⁷⁾

본 연구에서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하

여 반사광의 스크린 투영패턴을 이용한 표면 거칠기 측정법을 제안하였는데 렌즈 대신 스크린을 사용하여 스크린에 맺힌 산란광의 분포 패턴을 구하기 때문에 구조가 간단하고 산란광 전체 정보의 획득이 가능하였으며 표면 거칠기에 따른 산란광 분포패턴의 직접관찰이 가능하다. 본 연구에서는 표면에서 반사된 레이저빔을 스크린에 투영시켜 환경 변화에 따른 변동을 억제하면서 산란광의 분포 정보를 획득하고, 이를 분석하여 연마면의 표면 거칠기를 측정하는 PLBP(Projected Laser Beam Pattern)법을 개발하였다.

2. 측정원리

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 산란광의 스크린 투영패턴을 이용한 표면 거칠기 측정법의 원리를 설명하고 있다. 레이저 다이오드에서 출력된 평행광은 일정한 경사각(θ)으로 측정 표면에 입사된다. 입사된 레이저광은 피측정물의 표면에서 산란하게 되는데, 산란된 빛은 CCD 카메라의 전방에 설치된 스크린에 거칠기 정보를 가지는 특성의 패턴을 형성하게 된다. 이 패턴 정보를 CCD 카메라로 읽어들이어 거칠기 측정 정보로 사용한다. 표면 거칠기가 작을수록 분포곡선은 C→A로 바뀐다. 광량분포곡선에 대한 평균(m_x), 분산(V_x), 표준편차(σ_x)는 다음 식과 같다.

$$m_x = \frac{\sum(x_i \times g_i)}{\sum g_i} \quad (1)$$

$$V_x = \frac{(\sum(x_i - m_x)^2 \times g_i)}{\sum g_i}, \sigma_x = \sqrt{V_x} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 화소(pixel) i 의 위치이고, g_i 는 해당 화소의 밝기를 나타내는 그레이 레벨(gray level)이다.

레이저빔의 반사화상을 취득하는 방법은 Fig. 2와 같이 수직형과 경사형의 2가지가 가능하다. Fig. 2(a)의 수직형은 측정장치를 측정면의 법선 위치에 놓이게 할 수 있는 장점을 가지고 있지만 측정면과 측정장치 사이의 거리를 일정하게 유지하기 어려운 단점을 가지고 있다. Fig. 2(b)의 경사형은 반대로 측정 거리를 일정하게 유지할 수 있는 장점을 가지고 있지만 측정면이 기울어져 있을 때 측정장치의 자세를 조절하지 않으면 오차가

거지는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 1차적으로 평면 연마시편에 한정하여 가공 면과 측정장치 사이의 거리를 일정하게 유지하기 쉬운 경사형을 선택하였다.

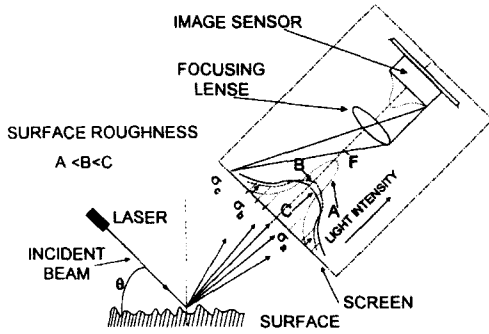


Fig. 1 Principle of surface roughness measurement using scattered laser beam pattern

광 패턴으로부터 스크린의 중심을 통과한 한 라인 상에 있는 광량을 읽어들이어서 2)평균치(m_x)를 구한 다음 m_x 가 스크린 중심의 좌표 치와 일치하도록 측정장치를 아래, 위로 이동시킨다.

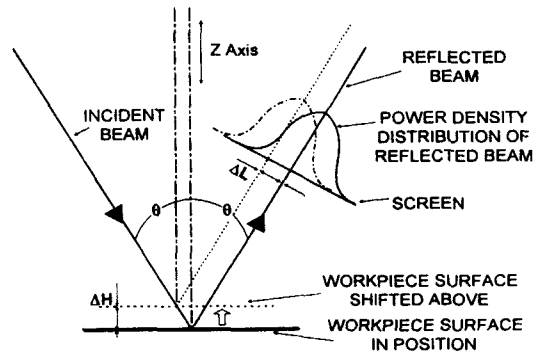


Fig. 3 Principle of measurement height adjustment

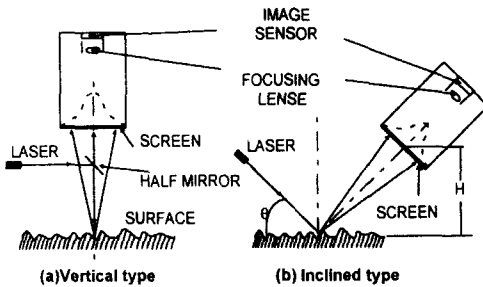


Fig. 2 Two types acquiring laser beam pattern

3. 실험장치의 구성

전체 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같이 PC, 측정부, XY 테이블, 화상입력장치(image grabber), 반도체레이저 발광장치 등으로 구성되었다. CCD 카메라에 맺힌 화상은 화상입력장치를 통하여 PC에서 읽어들이어 데이터 처리를 행한다. 화상의 각 화소는 화상입력장치에서 8 bit로 A/D변환되어 0~255사이의 그레이레벨(gray level)로 입력되게 된다.

Fig. 3은 측정면과 측정장치 사이의 거리를 일정하게 유지하는 방법을 설명하는 그림이다. 우선 측정기에 대해 수직으로 시편을 설치하고 그림과 같이 Z축을 구동하면, 측정장치와 측정면 사이의 거리가 변화됨에 따라 스크린에 맺힌 상의 위치가 변화된다. 거리의 변화(ΔH)에 따른 화상 위치의 변화(ΔL)는 식(3)과 같다.

$$\Delta L = \frac{\sin 2\theta}{\cos \theta} \Delta H = (2 \sin \theta) \Delta H \quad (3)$$

광량분포곡선은 높이 변화에 따라서 스크린 상에서의 위치가 변화된다. 식(3)에서 θ 가 일정하다면 $\Delta L \propto \Delta H$ 이므로 $\Delta H=0$ 로 하기 위해서 $\Delta L=0$ 되도록 하면 된다. 이것을 높이 맞춤이라하며 이를 자동으로 수행하기 위해 1)CCD 카메라에 맺힌 산란

Fig. 5는 스크린 투영패턴을 이용한 측정장치도이다. 측정장치의 설계에서 레이저빔의 입사각은 중요한 설계 파라미터 중 하나이다. 입사각이 너무 작으면 측정면과 측정장치 사이의 거리 맞춤이 어렵고 입사각이 큰 경우는 측정장치가 커진다는 단점이 있다. 본 연구에서는 예비실험을 통해 레이저빔의 입사각을 30° 로 하였으며 거울면을 사용하여 스크린에 맺힌 상의 방향을 바꾸어 CCD 카메라에 잡히게 하므로 측정장치를 소형화하였다. 스크린의 중심과 시편과의 거리는 30mm가 되도록 측정장치를 설계하였다.

실험에 사용된 CCD카메라의 사양은 Table 1과 같다. 레이저 발생기로 파장 $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, 출력 4mW의 레이저 다이오드를 사용하였다. 레이저 다

그리면 Fig. 7(b), Fig. 7(c)와 같다. Fig. 7(b)는 주방향에서의 거칠기 값과 표준편차의 상관관계이고 Fig. 7(c)는 부방향에서의 거칠기 값과 표준편차의 상관관계이다. 주방향에서의 표준편차가 부방향에서 구한 표준편차보다 거칠기와 상관관계가 높음을 알 수 있다. 본 연구에서는 주방향의 광량 분포 표준편차를 연마면 거칠기 측정을 위한 파라미터로 사용한다.

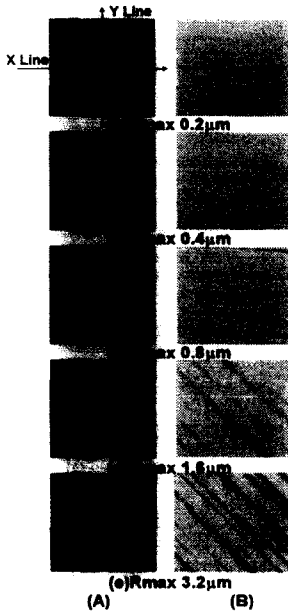


Fig. 6 Measured Laser Beam Pattern(A) and Microscopic Surface of Specimen(B)

Fig. 7(b)으로부터 래핑면과 연마면에 대해 표면 거칠기와 표준편차는 일정한 비례관계를 가지며 같은 연마면 이라도 자유 입자와 고정 입자에 의해 가공된 면의 특성이 다름을 알 수 있다. Fig. (b)로부터 거칠기와 표준편차의 상관관계식을 구하기 위해 최소자승법을 이용하여 직선 근사한 식이 (4), (5)식이다.

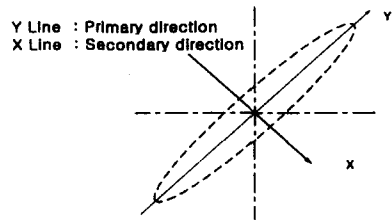
$$\text{래핑면일 때 } \sigma_y = \frac{R_{\max} - 22.95}{57.28} \quad (4)$$

$$\text{연마면일 때 } \sigma_y = \frac{R_{\max} - 67.32}{1.81} \quad (5)$$

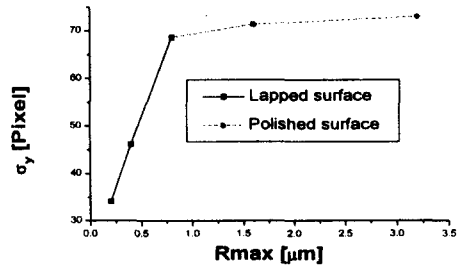
따라서 CCD카메라에 잡힌 산란광의 광량 분포로부터 표준편차를 구한 뒤 식(4), (5)를 이용하여

연마면의 표면 거칠기를 간접적으로 측정할 수 있다.

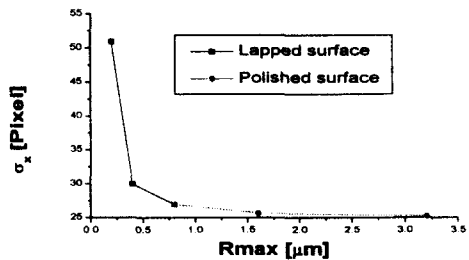
Table 2는 식(4), 식(5)로 학습시킨(교정한) 데이터를 이용하여 본 연구에서 제안한 방법인 PLBP법으로 측정된 값과 접촉식 표면조도 측정기 SV-400(made by Mitutoyo)으로 측정된 값을 비교한 표이다. PLBP법에서는 시편을 10회 측정하여 얻어진 광량분포의 표준편차를 식(4)와 식(5)에 대입하여 거칠기 값을 측정하였다. 표준시편에 대해서 PLBP법의 측정오차는 8%이내이고 재현성이 우수함을 알 수 있다.



(a) Two principal directions of reflected laser beam pattern



(b) Primary direction



(c) Secondary direction

Fig. 7 Standard deviation of light intensity distribution according to primary(b) and secondary direction(c)

4.2 가공 시편의 거칠기 측정 실험

실제 연마면에 대한 평가실험을 하기 위해 #100, #200, #400, #800인 CBN숫돌로 각각 20회씩 가공을 하여 연마면을 얻었다. 접촉식 측정기 SV-400으로 측정된 값을 기준 값으로 하여 PLBP으로 측정된 값을 비교하였다. Table 3은 기준치와 측정치의 비교표이다. 가공시편에 적용하였을 때 거칠기 측정치와 기준치의 상대오차는 8% 범위 이내이다.

Table 2. Surface roughness measurements for standard specimen

Specimen	1	2	3	4	5
SV-400(μm) (Reference)	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2
PLBP(μm)	0.196	0.406	0.735	1.696	3.171
Error(%)	2	1.5	7.8	6	0.9

*SV-400 : Mitutoyo surface roughness tester
 PLBP : Proposed method in this study

Table 3. Surface roughness measurements for polished surface

Specimen	1	2	3
SV-400(μm) (Reference)	0.6	0.7	1.1
PLBP(μm)	0.66	0.65	1.19
Error(%)	10	7.1	8.0

4.3 외부 환경의 영향에 대한 평가

실제 기상 측정을 위해서는 여러 작업환경 등에 대해 강인하여야 한다. 이를 위해 외부 광원의 영향, 높이 변동의 영향, 절삭유의 영향 등에 대하여 평가를 하였다.

외부광원의 영향을 평가하기 위해 레이저 다이오드의 광출력을 일정하게 하여 암실과 일반 실내에서 측정을 해보았다. 입력된 화상의 주방향 광량 분포는 Fig. 8과 같다. 그림으로부터 암실에서 측

정한 그레이 레벨이 일반 실내에서 측정된 그레이 레벨보다 70정도 높지만 분포패턴은 거의 같다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 광량분포의 표준편차를 매개변수로 하면 외부광원의 영향은 받지 않음을 나타낸다.

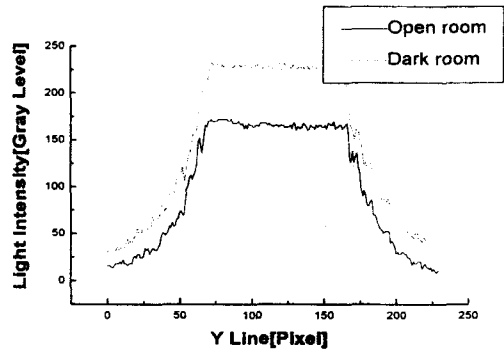


Fig. 8 Change of light intensity distribution due to external light

자동 높이 맞춤을 행한 후에도 높이는 일정한 오차를 가질 수 있다. 따라서 높이 변화에 따른 측정치의 변화를 알아보기 위해 $R_{\text{max}} 0.4\mu\text{m}$ 인 표준 시편에 대해 높이를 0.1mm씩 상하로 0.5mm까지 이동시키면서 거칠기 변화를 조사하였다. Fig. 9(a)는 높이 변화에 따른 화상의 위치 변화이고 Fig. 9(b)는 높이 변화에 따른 거칠기 측정치이다. Fig. 9(a)에서 알 수 있는 바와 같이 높이가 바뀌면 스크린 상에서 화상의 위치가 변화하나 화상이 스크린 중심에서 벗어날 뿐 화상의 크기 변화는 거의 없다. 따라서 매개변수인 표준편차는 스크린에서의 화상의 위치와 크게 관련이 없고, 거칠기 측정치는 높이 변동의 영향을 받지만 미세한 높이 변화에는 큰 영향을 받지 않음을 Fig. 9(b)로부터 알 수 있다.

절삭유의 영향을 조사하기 위하여 절삭유가 없는 상태와 절삭유가 있는 상태에서 표준 시편에 대해 측정을 해보았다. 절삭유 유무에 따른 거칠기 측정치의 상대 오차는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 가공면에 절삭유가 있는 경우 측정치의 오차가 어느 정도 커짐을 알 수 있다. 따라서 본 장치를 기상 계측에 적용하여 정밀한 측정을 하기 위해서는 측정전 연마 표면에 있는 절삭유를 어느 정도

붙어내고 나서 측정을 해야함을 알 수 있다.

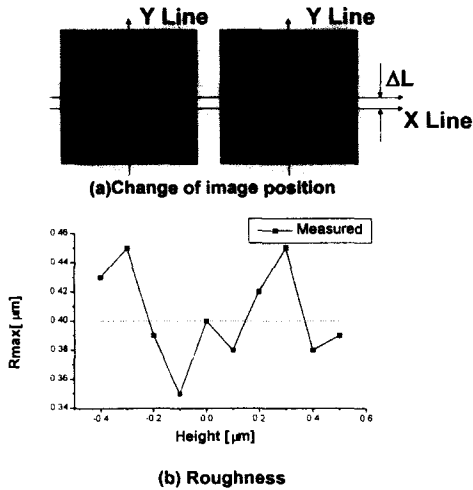


Fig. 9 Influence due to measurement height variations

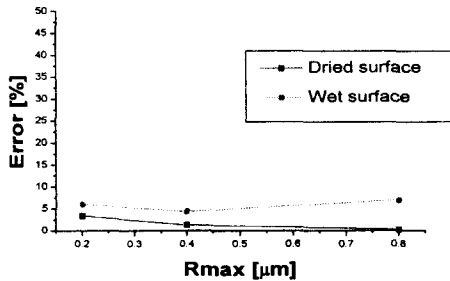


Fig. 10 Influence due to coolant

5. 결론

본 연구는 산란광의 스크린 투영패턴을 이용한 표면 거칠기 측정에 관한 기초적인 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저빔의 반사화상을 이용한 비접촉 표면 거칠기 측정 시스템을 제작하였다.
- 2) 반사광의 분포패턴은 측정면 스크래치의 방향과 수직인 방향(주방향)으로 넓게 퍼지며, 래핑면과 연마면에 따라 다른 분포패턴을 보였다.
- 3) 주방향 광량분포의 표준편차와 표면 거칠기는 일정한 비례관계를 가지고, 측정오차가 10%이

내이므로 간이 측정용으로 유용하다.

- 4) 화상 주방향 광량분포는 정규분포에 가깝고 표준편차는 주변 광원의 영향, 절삭유의 영향, 측정 높이 변화의 영향을 크게 받지 않는다.

참고문헌

1. I. Sherrington and E. H Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology; part I: stylus instrument," *Wear*, Vol. 125, pp. 271-288, 1988.
2. E. L. Church, "The measurement of surface texture and topography by differential light scattering," *Wear*, Vol. 57, pp. 93-105, 1979.
3. Y. L David, et al., "Surface profile measurement with a dual beam optical system," *Applied Optics*, Vol. 23, No. 5, pp. 746-751, 1984.
4. O. Sasaki and Y. Fukuhara, "Surface profile measurement from intensity of diffracted light using the phase retrieval method," *Applied Optics*, Vol. 24, No. 16, pp. 2696-2700, 1985.
5. 塚田忠夫, 谷村吉久, 非接觸式による精密加工表面の性状評價. 日本精機學會, 1985.
6. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology: part II: optical instruments," *Wear*, Vol. 125, pp. 36-42, 1988.
7. P. Beckmann and A. Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Pergamon press, Oxford, 1963.
8. L. H. Tanner, M.Fahoum, "A Study of the Surface Parameters of Ground and Lapped Metal Surfaces, Using Specular and Diffuse Reflection of Laser Light," *Wear*, Vol. 36, pp. 299-316, 1976.
9. 日本機械學會, 光應用機械計測技術, 朝倉書店, 1985.
10. 高井信勝, "レーザ光散亂による表面粗さ計測," *日本精密工學會誌*, Vol. 64, No. 9, pp.1304-1307, 1998.
11. T. V. Vorburger, et al., "Optical measurement of the roughness of sinusoidal surface," *Wear*, Vol. 109, pp.15-27, 1986.
12. R. Brodmann and G. Thurn, "Roughness measurement of ground, turned and shot peened surfaces by the light scattering method," *Wear*, Vol. 109, pp. 1-13, 1986.

13. 森田 健二, 川久保洋一, “回折光を利用した鏡面加工表面粗さのインプロセス計測,” 日本精密工學會, 1988.
14. T. MIYOSHI and K.SAITO "Non-Contact Measurement of Ultra-Precision Diamond Turned Surface Roughness," Bull. of JSPE, Vol. 23, pp.182~188, 1989.
15. D.Y.YIM and S.W.KIM "Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces by Light Scattering," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.30, No.2, pp.283-289, 1990.
16. 홍성욱, 김현수, “기상 측정을 위한 광학적 표면 거칠기 측정센서 개발,” 한국정밀공학회지, 제 11권, 제6호, pp. 168-178, 1994.
17. Motoyoshi Hisaoka, “Development of Reflex Measurement on Surface Roughness by Scanning Vibration of Laser Beam,” Bull. of JSPE, Vol. 63, No. 3, pp. 410-414, 1997.