

기상(機上) 측정을 위한 광학적 표면 거칠기 측정센서 개발

김 현 수*, 홍 성 욱**

Development of An Optical Surface Roughness Sensor for On-the-Machine Measurement

Hyun-Soo Kim*, Seong-Wook Hong**

ABSTRACT

This paper presents an optical surface roughness sensor developed for intermediate-process measurement on the machine. The light scattering method is adopted for the sensor, which is designed compact and flexible enough to apply to 'on the machine' measurement of surface roughness. The developed sensor has special features such that it makes use, as the measurement parameter, of the ratio between fluxes of the incident light, and the specularly and partly diffusely reflected light, and that it can adjust the incident light angle. The experimental investigation reveals not only the sensor has good performance as a surface roughness sensor but the sensor is very robust so as to be useful in in-process measurement.

Keywords : Surface Roughness(표면 거칠기), Light Scattering(광산란), On the Machine Measurement(기상측정), Specularly Reflected Light(정반사광), Diffusely Reflected Light(난반사광), Light Flux Ratio(광속비)

1. 서 론

정밀부품들의 표면정밀도 확보를 위해 표면 거칠기의 측정이 많이 이용되고 있다. 특히 가공완료 후 별도의 측정설비를 이용해 실시해오던 표면 거칠기 측정에 대해 근래에는 가공 자동화와 생산성 향상을 위해 기상(On the machine)측정과 가공중(In process 또는 Intermediate process)측정의 필요성이 꾸준히 제기

되고 있다. 기상 측정은 가공중 측정을 위한 필요조건으로서 그 원리와 구조 그리고 설계상 많은 제약을 받으나 생산성 향상에 큰 장점을 가진다. 그러나 기존의 접촉식 촉침(Stylus)⁽¹⁾에 의한 표면 거칠기의 측정은 기상 또는 가공중 측정에 부적당하기 때문에 비접촉식 측정방법을 개발하려는 연구가 계속되어 왔으며, 특히 광학적 방법을 이용한 많은 대안이 제시되어왔다⁽²⁻¹⁰⁾.

표면 거칠기의 측정은 보편적으로 촉침식을 이용하고

* 금오공과대학교 정밀기계공학과 대학원

** 금오공과대학교 정밀기계공학과 (정회원)

있으며 아직까지 측정식이 표준적인 방법으로 인정되고 있다⁽¹⁾. 측정식 표면 거칠기 측정장치는 표면의 단면형상을 따라 상하로 요동하는 다이아몬드 측정의 미세한 변위를 전기적 신호로 변환한 후 증폭하여 표면 거칠기를 산출하는 방법을 이용한다. 이 방법은 정확한 측정을 가능하게 하고 측정표면의 단면곡선을 재현할 수 있다는 장점이 있기는 하지만 측침이 측정표면을 횡단하므로 연속적이고 빠른 측정을 요하는 경우에는 부적당하다. 또한 측정 가공물의 재질이 연할 경우 가공물 표면에 측침의 자국이 생겨 정밀가공물 표현에 결함을 만드는 단점을 가지고 있다.

생산성 향상을 위한 기술개발이 활발해짐에 따라서 가공중 측정과 기상 측정이 요구되면서 표면 거칠기 측정에서 광학적 방법을 이용한 비접촉 방식에 관심이 모아져 왔다. 광학적 표면 거칠기 측정시스템은 거칠기 변수(Roughness parameter)의 산출방식에 따라 매개 변수법(Parametric technique)과 비매개 변수법(Non parametric technique)으로 나눌 수 있다⁽²⁾. 매개 변수법은 특정 거칠기 변수만을 측정하고⁽⁶⁻¹⁶⁾, 비매개 변수법은 표면의 미소한 형상 자체를 측정할 수 있는 방식이다⁽³⁻⁵⁾. 기상 또는 가공중 측정을 위해서는 빠른 측정이 필요하므로 일반적으로 매개 변수법으로 분류되는 방법이 바람직하며 그 중에서도 측정장치 구성의 간편성이나 효율성을 고려할 때 광산란법이 가장 적절한 방법으로 평가되고 있다⁽²⁾.

광산란법(Light scattering method)의 기본원리는 측정물의 표면이 고출수룩 산란이 작아져서 반사광들이 정반사 방향으로 집중되고, 표면이 거칠수록 산란이 커져서 난반사 방향으로 분산되는 현상을 이용한 것이다⁽²⁾. 광산란에 대한 연구는 오래 전부터 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 이러한 연구는 Beckmann과 Spizzichino에 의해 이론체계를 갖추게 되었다⁽¹⁰⁾. Beckmann의 이론은 표면의 특정부분에 입사되는 광이 표면 거칠기의 영향으로 산란될 때의 광학적인 현상을 다룬 것으로 표면특성에 관한 기본 정보가 제공될 때 반사각도에 따른 산란광의 광강도(Intensity; Irradiance)와 거칠기의 관계를 알 수 있음을 밝히고 있다.

근래에 들어 Beckmann 이론의 응용이 활발한 가운데 Shiraiishi는 거친 표면에 대해 광산란에 의한 표면 거칠기 측정의 가능성을 실험적으로 제시하였다^(13,14). 그러나 참고문헌^(13,14)에서는 일정한 각도로 평행 레이저광을 입사시키면서 서로 다른 각을 갖도록 설치된 두개의

광다이오드로 측정된 산란광강도의 비를 측정하는 방법을 택하여 고운 표면에 대해 측정할 때 오차가 개입될 가능성이 높다. 한편 D.Y. Yim, S.W. Kim⁽¹⁵⁾는 비교적 고운 표면에 대해 광산란 측정방법과 Beckmann의 이론 사용을 제안하고 있는데, 정반사광의 광강도와 산란광의 패턴을 측정매개변수로 사용하는 방식을 채용하였다. 여기서는 고운표면의 경우 정반사광의 광강도 측정이 적합하고 이 범위를 넘는 경우 산란광 패턴측정에 의한 방법이 바람직함을 보이고 있다. 그러나 입사광의 각도와 반사광의 측정각을 모두 표면에 수직인 상태로만 설정하여 각변화에 따른 효과를 검토하지 않았고 고운 표면에만 한정하여 거친 표면에서의 확장성은 고려하지 않았다. 한편 광산란 방법에 의한 표면 거칠기 측정방법을 제안한 대부분의 연구에서 입사광의 광강도 변화를 고려하지 않아 입사광의 광강도가 변화하면 측정치 역시 변화하므로 광원의 변동에 매우 민감할 것으로 생각된다. 그외의 연구에서도 광산란방법에 의한 표면 거칠기 측정방법에 대한 논의는 많았으나 아직 실용화된 것은 거의 없는 실정이다⁽¹⁶⁾.

본 연구에서는 실용화를 목표로 광산란이론을 응용하여 표면 거칠기 측정을 위한 센서를 개발하였고 그 특성과 기상 측정의 타당성을 분석하였다. 특히 측정방식으로는 지금까지 고려하지 않았던 정반사광(Specularly reflected light)과 일부의 난반사광(Diffusely reflected light)을 포함하는 광속(Light flux)을 측정하는 방식을 택하였다. 측정시 외부적인 변동요인에 의한 오차를 줄이기 위해 반사광의 광속과 입사광의 광속을 나눈 광속비(Light flux ratio)를 측정매개변수로 하였다. 또한 입사광의 각을 변경시킬 수 있도록 하여 센서로서의 유연성을 얻을 수 있도록 하였다. 측정장치는 실제 가공기에서의 기상활용이 가능하도록 간결하고도 효율적으로 구성하였다. 실험결과, 제작된 측정장치로 부터 얻어지는 광속비는 R_{max} 0.8 에서 R_{max} 25 μm 까지의 폭넓은 표면 거칠기를 측정할 수 있는 바람직한 특성을 보였다. 또한 기상 측정을 위해 평가한 센서장착오차에 대해서도 매우 강건함을 보여 기상 표면 거칠기 측정센서로 적합함을 알 수 있었으며 입사광의 각을 변화시켜 측정영역을 확장할 수 있음을 확인하였다. 한편 본 표면 거칠기 측정센서는 연삭기에 장착, 가공중 하나의 프로세스로서 표면 거칠기 상태를 측정하여 제어기에 피이드백함으로써 가공조건을 개선하는데 일차적인 목적이 있으며 향후 연삭가공기에 장착되

어 실공정에서 평가할 예정에 있다.

2. 광산란법에 의한 비접촉식 표면 거칠기 측정방법

표면 거칠기를 측정하는 방법은 많은 연구자들에 의해 개발된 것으로 발표되었으나 가공시 기상에서 직접 활용할 수 있는 시스템은 아직 상용화된 것이 거의 없다. 그 이유는 기상 측정과 가공중 측정을 실현하기 위해서는 실제 가공조건에서의 여러 가지 문제점을 극복해야 하기 때문으로 생각된다.

기상에서 표면 거칠기 측정이 어려운 이유로는 작업 여건상 접촉방식이 곤란하므로 기존의 대표적인 표면 거칠기 측정장치인 촉침의 사용이 곤란하다. 측정센서의 주변조건들도 매우 열악하므로 측정시스템이 주변여건에 대해 강건하게 설계되어야 하며 센서로서의 유연성이 있어 장착조건 등에 무관하게 응용될 수 있어야 한다. 또한 측정과정이 가공시간을 지연시키는 것은 바람직하지 않으므로 측정시간이 많이 소요되는 방법 역시 적용이 곤란하다. 이와 같은 점들을 극복할 수 있는 가장 근접된 해결방법이 광산란법이라고 평가되고 있다⁽²⁾.

Fig. 1 은 광산란 현상을 설명하고 있다. 고운 표면에 입사되는 빛은 그 빛이 입사된 각도와 같은 각을 이루며 반사된다. 그러나, 물체의 표면에 형상이 존재하므로 이 표면형상의 영향으로 반사되는 빛은 입사각과 다른 각으로 난반사를 하게 된다. 물체의 표면에서 산란되는 빛은 표면 거칠기가 거칠수록 난반사 현상이 두드러지며, 이러한 기초적인 빛의 산란특성을 이용하여

표면 거칠기를 측정하는 것이 광산란법에 의한 표면 거칠기 측정이다.

광산란 방법은 비접촉 방식인 동시에 매개변수법으로서 비교적 간결한 구조로 빠른 측정이 가능하므로 기상에서 가공물의 표면 거칠기를 측정하는데 적합한 방법이다. 광산란 방법은 자체적으로 표면 거칠기를 제공한 다기 보다는 표면 거칠기에 대응되는 값을 산출하는 방법이므로 대부분 측정 대상물에 대한 사전 정보를 필요로 한다. 광산란을 응용하는 방법으로는 정반사광을 이용하는 방법, 난반사광을 이용하는 방법, T.I.S 방법, 산란각 분포를 이용하는 방법 등이 있다⁽²⁾.

□ 정반사광(Specularly reflected light)을 이용하는 방법

정반사광의 광강도를 측정하여 거칠기변수와의 관계를 얻는 방법이다. Beckmann⁽¹⁰⁾은 고운 표면에 대한 정반사광의 광강도를 수식화하여 이 방법의 이론적인 근거를 제시하고 있다. Beckmann의 정규분포표면(Normal surfaces)에 대한 이론을 적용하여 전체 산란광강도의 정반사광강도에 대한 비를 표면 거칠기의 매개변수로 사용하여 거칠기를 측정한다^(6,9,15). 이 방법은 정규분포 표면과 유사한 연삭표면에서, 특히 비교적 고운 표면의 경우에 유용하나 실험적으로는 보다 거친 표면과 선삭표면 등에서도 유용함이 밝혀지고 있다⁽⁶⁾.

□ 난반사광(Diffusely reflected light)을 이용하는 방법

연삭표면에서 정반사광(Specularly reflected light)과 특정각도의 난반사광(Diffusely reflected light)의 광강도비 또는 두개의 각도에서 측정된 난반사광의 광강도비를 측정매개변수로 사용하는 방법이다. 백색광원(Halogen lamp)과 광섬유다발(Optic fiber bundle)을 사용하여 입사와 집광을 하는 방법⁽¹⁶⁾이나 레이저와 광다이오드를 이용하는 방법^(13,14) 등이 적용되었다. 일반적으로 거친 표면의 거칠기 측정에 적합하다.

□ T.I.S(Total Integrated Scatter) 방법

이 방법은 Bennett⁽⁸⁾에 의해 구체화된 것으로 표면의 형태를 정규분포(Normal distribution)로 가정하여 총산란광에 대한 총난반사 광강도비로부터 거칠기 변수를 산출한다. 이 방법은 빠른 측정은 가능하나 가

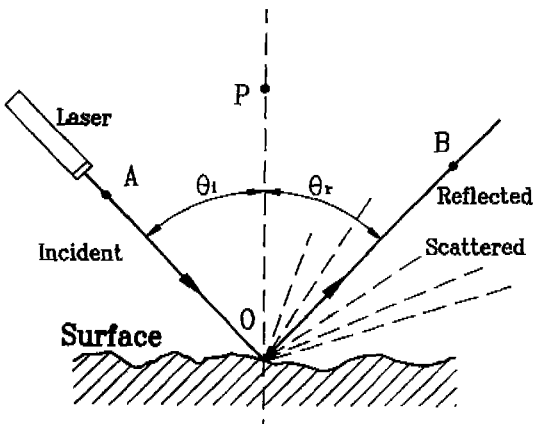


Fig. 1 Concept of the light scattering

공중 측정에는 부적합하다.

3. 표면 거칠기 측정장치 개발

□ 산란각 분포(Scattering angle distribution) 이용방법

이방법은 광산란에 의해 발생하는 광각도의 분포를 이용하는 방법으로 광각도분포 자체와 분포의 편차등을 측정매개변수로 하여 거칠기를 산출하는 방법이다^{7),15)}. 표면의 특성에 따라 큰 편차를 보이므로 실제 적용에 어려움이 있다.

본 연구에서는 정반사광을 포함하는 일부의 산란광에 대한 광속을 측정하는 방식을 채택하였다. 이렇게 하면 비교적 가공중 측정에 적합한 것으로 평가되고 있는 두 가지 방법, 즉 정반사광을 이용하는 방법과, 난반사광을 이용하는 방법의 두가지를 혼합하는 의미를 가지게 된다.

3.1 측정장치의 원리

본 논문에서는 광산란개념을 응용하여 표면 거칠기 센서를 개발하였다. 여기서는 정반사광을 이용할 경우 고운표면에 유리하다는 점과 난반사광을 이용할 때 거친 표면에 대해 유리하다는 점에 착안하여 두 가지 방법을 결합한 형태의 측정방식을 택하였다. 즉 레이저광을 표면에 대해 일정한 각도로 입사시켰을 때 반사광을 받아들이는 수광렌즈 구경내에 포착되는 반사광(정반사광과 난반사광 일부)에 대한 광속을 측정할 수 있도록 장치를 구성하였다.

측정장치의 신뢰도를 높이기 위하여 반사광속을 입사광속으로 나눈 광속비(Flux ratio)를 측정변수로 하였다. 따라서 입사광이 여러 가지 변동요인에 의해 변화되어도 반사광도 비례적으로 변화되므로 그 비는 일정

SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT SYSTEM

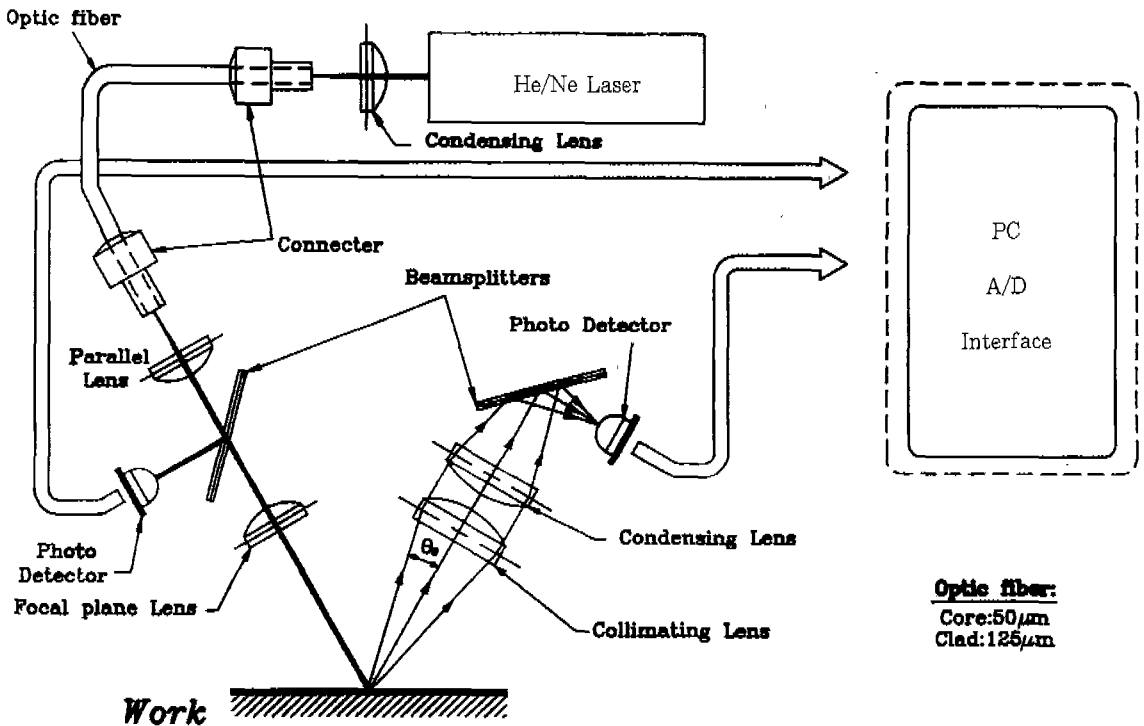


Fig. 2 Schematic diagram of the surface roughness measurement system.

하게 되어 안정적인 결과를 얻을 수 있게 된다. 또한 입사광의 각을 변경시킬 수 있도록 하여 센서로서의 유연성을 얻을 수 있도록 하였다. 특히 입사광의 각이 수평(Grazing angle)에 가까워 질수록 반사광의 광각도는 상대적으로 커지게 되므로⁽¹⁰⁾ 실제 기상 측정을 실현하기 위해 적절한 각을 선정함으로써 측정영역을 확대할 수 있다. 측정장치는 실제 가공기에서의 기상활용이 가능하도록 간결하고도 효율적으로 구성하였다.

3.2 측정장치의 개략도

Fig. 2 에서는 개발한 표면 거칠기 측정장치의 개념도를 보여주고 있다. 사용된 레이저는 4mW급 He-Ne 레이저로 0.8mm의 빔직경(Beam diameter)을 갖고 TEM₀₀ Mode 이다. 파장은 632.8 nm 이고, 광각도는 가우스분포를 갖는다. 레이저 광을 입사부까지 전송하기 위해 광섬유(Optic fiber)를 사용하여 측정부가 레이저 발생기와 무관하게 이동할 수 있게 구성하였다. 따라서 평면-볼록렌즈(Plano convex lens)로 레이저 광을 광섬유의 한쪽 끝단에 집속시켜 원하는 위치까지 이동시킨 후 입사부에서는 다시 같은 렌즈를 사용하여 평행광으로 환원(Collimation)한다. 평행광으로 환원된 입사광은 반사율(Reflectivity) 33%의 광분할기(Beam splitter)로 분할되어 일부는 광다이오드(Photodiode)로 전달되어 입사광속 측정을 위해 사용되고 나머지는 표면에 입사된다. 표면에서 산란된 광을 2개의 좀 더 큰 평면-볼록렌즈로 받아들이고, 다시 광분할기를 통과한 33%의 광을 광다이오드를 이용하여 반사광속을 측정한다. 이와같이 얻어지는 입사부와 반사부의 두 광속을 A/D 한 후 나누고 스케일 조정을 하면 본 연구에서 측정 매개변수로 택한 광속비를 얻게 된다.

3.3 측정장치의 이론적 배경

측정표면의 기하학적 단면곡선으로 부터 얻어지는 표면경사각이 정규분포를 한다고 가정하면 표면경사각 분포함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(\theta_s) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\sigma_s}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_s}{\sigma_s}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기서 θ_s 는 표면경사각을, σ_s 는 표면경사각의 표준편차를 의미한다. 만일 입사광이 평행광으로서 수광렌즈 초점위치의 표면을 중심으로 매우 작은 반경내에 입사

된다고 하면 반사광이 수광렌즈를 통해 포착될 확률은 다음과 같다. 즉,

$$\Phi = \int_{-0.5\theta_0}^{0.5\theta_0} f(\theta_s) d\theta_s \quad (2)$$

여기서 Φ 는 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률을, θ_0 는 렌즈 유효수광각(Fig.2 참조)을 의미한다. Fig. 3은 정규분포 곡선과 측정되는 표면경사각 영역(1/2 x 유효수광각)을 나타내고 있다. 표면경사각 측정영역은 반사각이 경사각의 2배가 되므로 유효수광각의 1/2이 된다. 식(2)에 의하면 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률은 표면경사각 표준편차의 함수가 된다. 수광부에서 실제 측정되는 반사광속은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_r = C \Psi_i \Phi \quad (3)$$

여기서 Ψ_r, Ψ_i 는 각각 반사광속과 입사광속을 나타내며 C는 측정장치나 조건등에 따라 결정되는 계수이며 1보다 작은 값이다. 따라서 측정매개변수로 택한 광속비(FR)는 다음과 같이 나타난다.

$$FR = \frac{\Psi_r}{\Psi_i} = C\Phi \quad (4)$$

결국 측정매개변수로부터 입사광이 수광렌즈에 포착될 확률을 얻게 되며 이는 표면경사각의 표준편차와 직접 관련을 갖게 된다. 표면경사각의 표준편차는 여러가지 공정에서 표면 거칠기과 관계를 갖는 것으로 밝혀져 있으며 참고문헌⁽¹⁰⁾에서는 다음과 같은 관계식을 추천하고 있다.

$$\sigma_s = a + b \log R_a \quad (5)$$

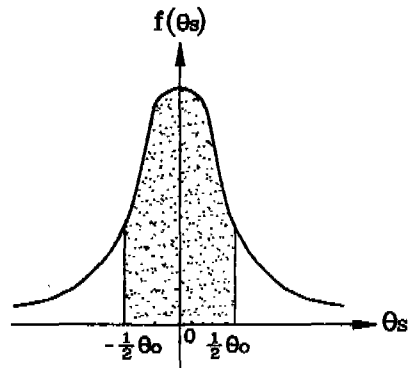


Fig. 3 Normal distribution of surface slope and effective angle of detection

여기서 a, b는 재질 및 공정에 따른 상수이다. 결국 식(1)-(5)를 이용하면 측정매개변수인 광속비와 표면 거칠기와의 관계를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.4 측정장치의 구성

Fig. 4 와 Photo. 1 에서는 실제 구성된 시스템을 보여주고 있다. 구성된 측정장치를 기능별로 구분하면 Fig. 4에서와 같이 5개부분으로 나눌 수 있다.

① 평행광 집속부로서 레이저 광을 집광, 광섬유를 통해서 전송을 하기 위한 것으로 부품간의 중심선이 맞도록 테이퍼(Taper)가공을 하여 부품을 조립하였다.

② 레이저광을 측정표면에 입사시키는 부분을 나타낸다. 석영광섬유(코어직경: 50 μ m, 클래드(Clad)직경: 125 μ m, 개구수(NA, Numerical aperture): 0.21)를 통해 전송된 레이저 광을 다시 평행광으로 만들어 측정하고자 하는 표면에 입사한다. 그리고, 광분할기를 통해 평행광 33%를 분할하여 광다이오드로 보내 입사부의 광속을 측정한다. 입사부 끝의 평면-볼록렌즈는 광학계 오차나 가공에 따른 오차를 보상하여 가공표면에 입사되는 광의 평행도를 조절하기 위한 것이다.

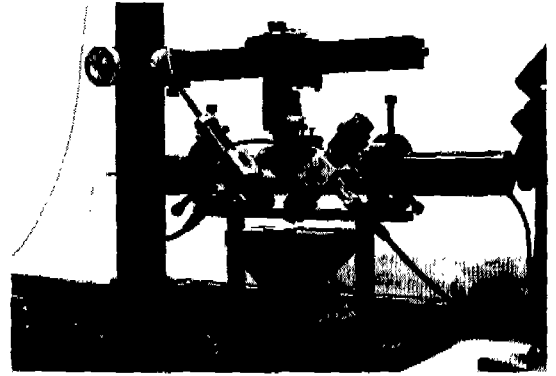


Photo. 1 The surface roughness measurement system.

③ 반사된 광을 받아들이는 수광부를 나타내고 있다. 첫번째 렌즈는 위치조절이 가능하도록 하여 측정표면이 렌즈축점거리에 오도록 조절을 가능케 하였으며 유효수광각은 약 26°이다. 두번째 렌즈는 첫번째 렌즈를 통과한 광을 축점으로 모으는 역할을 하며 첫번째 렌즈와 동일한 렌즈를 사용하였다. 두번째 렌즈를 통과한 광은 광분할기에서 약 33%가 분할되어 두번째 렌즈의 축점

SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT SYSTEM

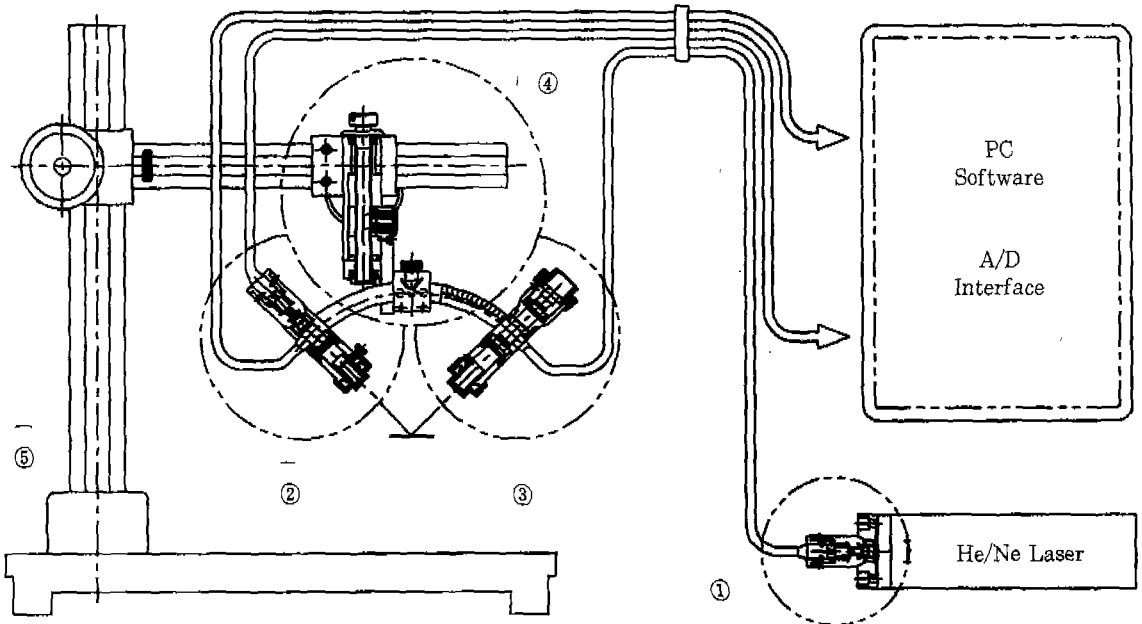


Fig. 4 The surface roughness measurement system.

거리 위치에 있는 광다이오드로 모아져서 산란광의 광속을 측정한다. 광다이오드의 유효면적(Active area)은 약 3.14mm², 즉 직경 2 mm 이다.

④ 위치조정구로서 입사부와 수광부를 포함하는 전체 센서를 원하는 곳에 위치시키고 입사광의 각도를 변경시키면 동일한 각만큼 반사광 측정각도를 변경시킬 수 있도록 하였으며 각도가 변경되어도 측정표면과의 상대 거리는 변하지 않도록 구성하였다. 본 연구에서 개발한 센서는 측정대상 표면의 위치와 산란광을 받아들이는 렌즈사이의 간격이 일정해야 한다. 따라서 각도를 변경시킬 때 특별한 주위가 필요하다. 여기서 고안한 형태는 각도를 변경시켜도 수광부와 물체간의 간격이 일정하게 유지되도록 특별히 설계된 것이다.

⑤ 센서 전체를 측정 대상표면에 위치시키기 위한 고정구로서 레크와 피니언으로 위치조정이 가능하도록 하였다. 실제 가공기에 취부하기 위해서는 대상 가공기 구조에 맞도록 고정구가 다시 설계되어야 하며 위치이동을 위한 구동부가 있어야 한다.

전체적으로 광학계 및 측정을 위해 개발된 기구물의 제작오차 등을 고려하여 본연구에서는 장치 개발시 렌즈부분의 미세조정이 가능하도록 설계하였다. 실험에 사용된 기준시편은 연삭시편으로서 R_{max} 0.8, 1.6, 3.2, 6.3, 12.5, 25 μm 등 6개를 사용하였다.

4. 실험

본 연구에서 개발한 표면 거칠기 측정장치는 측정변수를 입/출력단 측정에 의한 광속비로 하였고 입사각을 조절할 수 있기 때문에 이와같은 특징에 대한 응용성을 확인하기 위해서 여러 가지 측정을 실시하였다. 특히 측정변수로 택한 광속비의 타당성과 광속비와 표면 거칠기와의 관계, 그리고 입사각의 변화에 따른 효과 등 센서로서의 특성을 검토하였다. 또한 측정장치로서의 장착조건에 따른 변동요인들을 검토함으로써 기상측정 센서로서의 가능성을 조사하였다. 다음에는 개발된 측정장치에 대한 실험을 통해 성능을 평가한 결과를 설명하도록 한다.

4.1 광속비의 시간변화

레이저 발생기에서 발생하는 레이저는 여러 가지 원인에 의해 변동성분이 유기된다. Fig. 5는 동일시편에 인가한 입사광 및 반사광의 광속, 그리고 반사광속을

입사광속으로 나눈 광속비를 보이고 있다. 특히 전원을 가한 초기에 큰 폭의 변화를 보이던 광속이 일정시간이 경과하면 수렴하지만 여전히 변동성분이 나타나고 있음을 알 수 있다. 입사부에서의 변동은 반사광을 받게 되는 수광부에서도 유사한 경향을 띠게 된다. 이와는 달리 광속비는 비교적 시간에 무관하게 일정한 값을 나타내고 있으므로 측정변수로서 광속비를 택하면 실제 조건에서도 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 한편 광속비의 불규칙 오차성분은 약 0.25 % 미만으로서 측정에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

4.2 광속비와 표면 거칠기 관계

제작된 표면 거칠기 측정장치의 특성을 살펴보기 위해 표준시편을 이용하여 광속비와 표면 거칠기와의 관계를 구하였다. Fig. 6은 그 결과를 보여주고 있다. 여기서는 입사각을 변화시킬 때의 효과도 같이 구하였는데 입사각이 클수록 광속비가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 전체적인 경향은 비교적 고온 표면에서는 광속비가 급격히 감소하는 반면 거친 표면에서는 변화가 둔화됨을 알 수 있다. 측정영역 전체에 걸쳐 일관되고 안정적인 관계를 제공하고 있으므로 표면 거칠기 측정센서로서 바람직하며 특히 실용도가 높은 표면 거칠기 R_{max} 6.3 μm 이하에서는 더욱 민감한 결과를 보이고

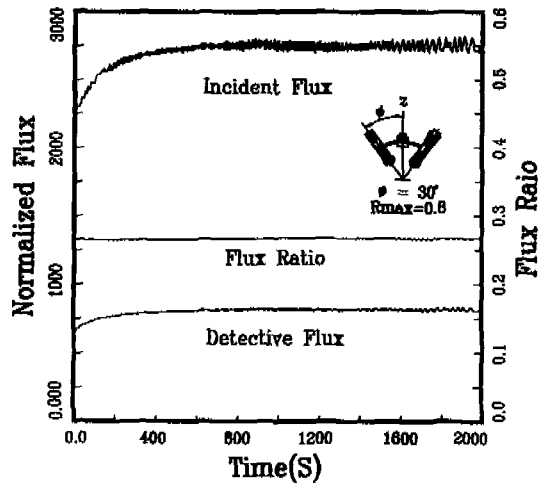


Fig. 5 Variation of incident light flux, reflected light flux, and the flux ratio (measurement parameter) just after power is on.

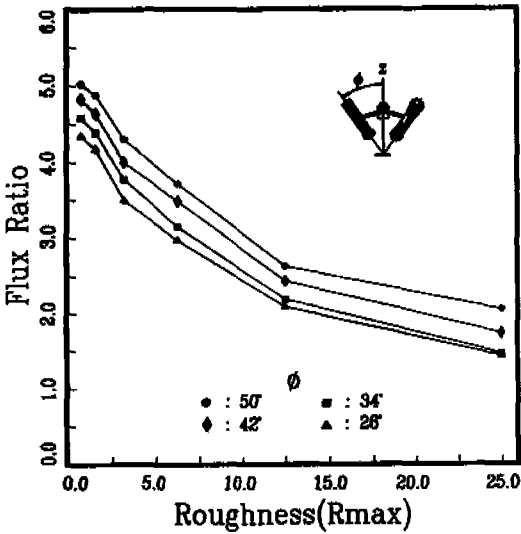


Fig. 6 Flux ratio as a function of surface roughness parameter R_{max}

있으므로 실용성이 높을 것으로 생각된다. 그러나 Beckmann의 이론식을 직접 적용하기 곤란하므로 실제 사용을 위해서는 광속비와 표면 거칠기변수의 관계에 대한 사전 보정(Calibration)을 해야한다.

4.3 측정장치의 강건도(Robustness) 평가

본 실험은 개발한 표면 거칠기 측정장치의 외부 환경(기계적 오차)에 대한 강건도를 평가하기 위한 것이다.

(1) 수직 위치 변동에 따른 광속비의 변화

가공기에 결합되어 사용되기 위해서는 표면 거칠기 측정기가 가공물의 표면까지 이송되어야 하므로 구동장치가 사용될 필요가 있다. 이때 구동장치의 위치결정 오차가 결과에 큰 영향을 준다면 기상 측정장치로서는 적합하지 않으므로 이를 검토하기 위해 표면 거칠기 측정장치에 위치오차가 있을 때의 효과를 검토하였다.

Fig. 7, 8은 각각 측정장치 입사각을 고정하고 센서부(입사부와 수광부)를 수직축(Z축)으로 이동하였을 때의 광속비 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축 값이 0인 점이 측정장치의 고정점(Setting point)이다. 실험결과를 보면 먼저 입사각이 작을수록 측정센서의 수직축 변화에 대한 광속비의 변화가 다소 적어짐을 알 수 있다. 따라서 입사각이 커지면 반사광속이 증가한다

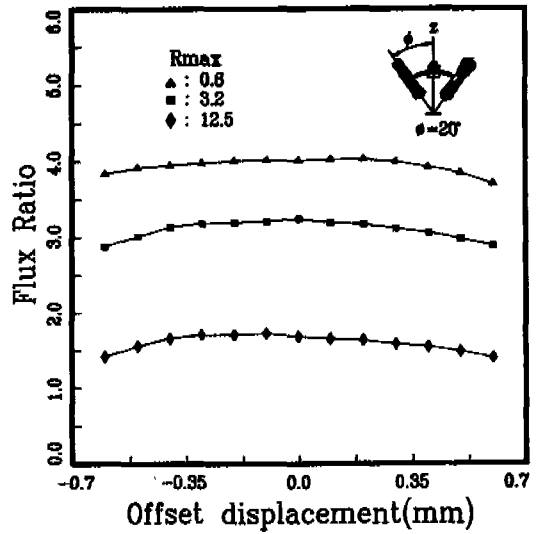


Fig. 7 Flux ratio variation subject to vertical offset of the sensor(Incident angle=20°)

고 해도 기상 측정을 위해서는 무조건적으로 각을 증가시키는 것은 좋지 않으며 위치결정오차에 따른 측정치의 민감도를 고려하여 적절한 각을 선정할 필요가 있다.

그림을 보면 수직축 변위(Offset)에 대해 광속비가 급격히 감소하는 임계점이 존재하는데 이것은 수직축

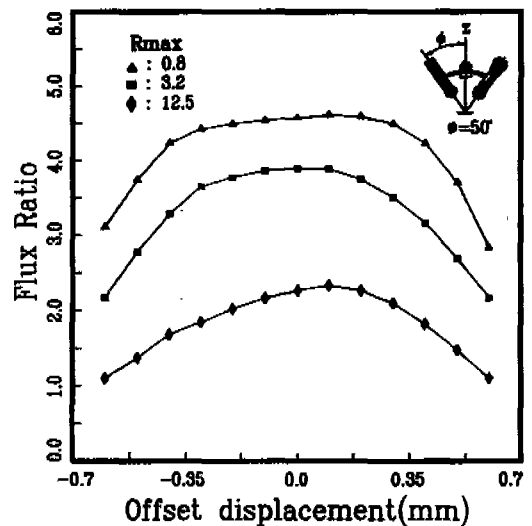


Fig. 8 Flux ratio variation subject to vertical offset of the sensor(Incident angle=50°)

변위에 따른 반사광과 수광렌즈의 중심편차와 수광부에 있는 광다이오드의 유효수광면적 등에 따라 달라질 수 있다. 표면위치변동에 따른 반사광과 수광렌즈 중심편차는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$d = 2h \sin \theta_i \quad (6)$$

여기서 d 는 반사광과 수광렌즈 중심편차, h 는 수직 축 변위, 그리고 θ_i 는 입사각이다. 반사광과 렌즈 중심편차가 발생하면 굴절률 차이와 렌즈구면수차 때문에 반사광이 렌즈의 초점에 위치하는 광다이오드에 모이지 않게 된다. 이때 광다이오드의 직경이 약 2mm 이므로 최대허용 초점위치 변동량은 반경에 해당되는 $\pm 1\text{mm}$ 가 되고 따라서 최대 허용 수직축 변위는 중심편차로 인한 초점위치 오차가 1mm가 되는 값이 되며 측정결과에 의하면 최소한 $\pm 0.5\text{mm}$ 까지의 수직변위에 대해서는 본 측정장치가 신뢰도를 갖게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 양은 기계 구동장치의 정밀도를 고려할 때 충분한 양으로 판단되므로 실제 가공기에 장착해서 활용하는데 문제가 없으리라 기대된다. 한편 이와 같은 수직변위에 따른 효과는 입사각이 작아질수록 작아지는데 이는 뒷식에 의하면 입사각이 작아지면 반사광과 수광렌즈 중심간의 편차가 작아지기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

(2) 측정장치 각오차에 따른 광속비의 변화

가공기에 결합되어 사용되기 위해 가공물의 표면까지 이송되는 과정에서 발생하는 이송장치의 기구적 오차나 센서의 장착오차 또는 표면 자체의 파상도(Waviness) 등에 의해 실제 측정해야할 표면과 측정장치 간에는 수직을 이루지 못할 가능성이 많다. 본 실험에서는 측정 표면과 측정장치간에 수직을 이루지 못하는 경우, 즉 수광렌즈의 중심이 정반사각에 놓이지 않을 때의 효과에 대해 검토하였다.

Fig. 9, 10은 기준입사각을 각각 다르게 둔 상태에서 측정장치가 수직축에 대해 각오차가 있을 때 광속비의 변화를 측정한 결과이다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 큰 폭의 각오차가 있어도 광속비의 변화는 크게 나타나고 있지 않다. 결과에 의하면 각오차가 약 2° - 3° 안팎의 값일 때까지 광속비가 비교적 적은 양으로 변동되므로 실장조건이나 파상도에 의해 발생할 수 있는 각오차에 비교적 둔감할 것으로 생각된다.

(3) 수광부 위치 변동에 따른 광속비의 변화

본 실험은 입사부는 측정표면과의 상대거리에 무관하므로 적당히 선정해도 결과에 영향이 없으나 수광부와 표면과의 거리를 변동시킬 때 표면이 렌즈의 초점상에 놓이지 않게 되어 발생할 수 있는 효과를 검토하고자

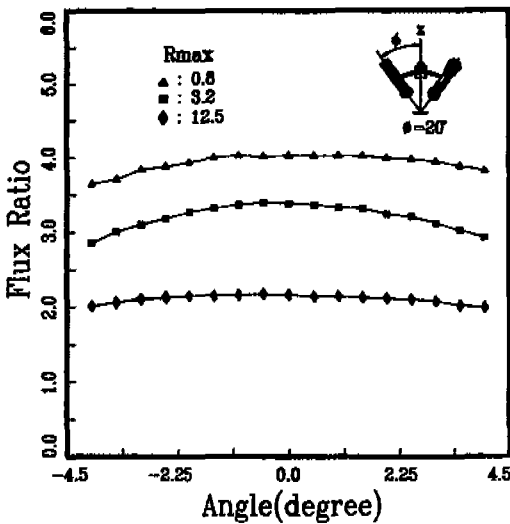


Fig. 9 Flux ratio variation subject to angular deviation of the sensor(incident angle=20°)

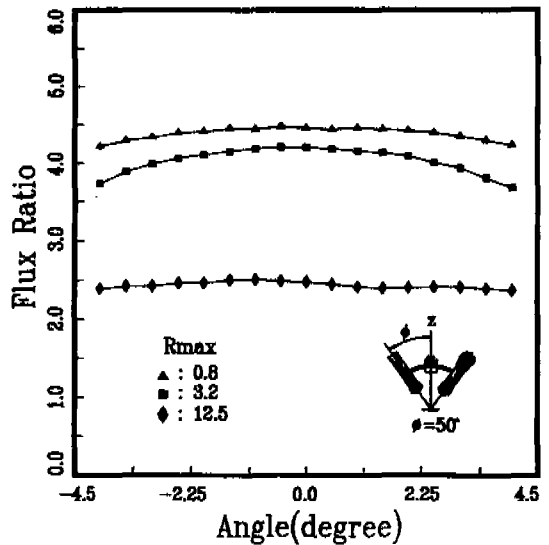


Fig. 10 Flux ratio variation subject to angular deviation of the sensor(incident angle=50°)

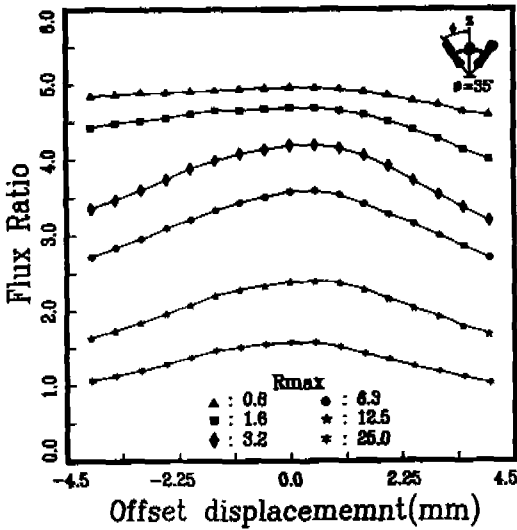


Fig. 11 Flux ratio variation subject to mistuning the focus of the detection part lens

준비한 것이다. 즉, 측정장치의 입사부와 수광부의 각을 일정하게 (35°) 고정하고 측정물에 대해서 수광부 위치를 변동하면서 광속비의 변화를 알아보는 실험이다.

Fig. 11 은 수광부의 첫번째 렌즈를 이동하면서 광속비를 측정하는 것이다. 전체적으로 수광부의 위치변동에 대해 광속비가 둔감하게 변하며 측정물의 표면 거칠기가 작을수록 상대편차가 더욱 작음을 알 수 있다. 따라서 측정장치의 장착오차에도 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 표면 거칠기가 커질수록 입사광이 측정면에서 확률적으로 더 큰 산란각을 나타내므로 광다이오드에 모아지는 빛의 양이 수광부와 떨어짐에 따라 더 큰 차이를 보인다. 전체적으로 볼 때 변위 0.5mm 이내에서는 곡선기울기의 변화가 모든 경우에 매우 작다. 이것은 측정장치에서 광다이오드의 유효 수광면적으로 광을 모을 수 있는 렌즈위치 변동 허용범위를 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 광산란법에 기초한 표면 거칠기 측정장치를 개발하였다. 개발한 표면 거칠기 측정장치는 가공기에 장착하는 것을 목표로 실시간 측정과 간결성 그리고 유연성 측면을 고려하였다. 측정변수를 정반사광과 난반사광의 일부를 받아들여 구한 광속과 입사광속

을 나눈 광속비로 택하여 불안정한 외부 환경조건에 대해 강건하고 넓은 영역의 표면 거칠기를 측정할 수 있었다. 또한 입사각을 변화시킬 수 있도록 하여 측정가능영역을 확대할 수 있게 하였다. 개발된 표면 거칠기 측정센서는 기상 측정을 통해 가공조건을 평가하여 피드백하는데 활용이 가능할 것으로 기대된다. 예컨대 연삭가공을 일시 중단하고 표면 거칠기를 기상에서 측정하여 연삭휠의 드레싱 실시 필요여부등을 판별하는 응용이 가능할 것으로 생각된다. 향후 개발된 측정장치를 연삭공정에 실제 적용하는 연구가 계속되어 실장착식의 문제점에 대해서도 논의할 예정에 있다.

제작 및 실험에 의해 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개발된 표면 거칠기 측정센서는 입사부와 반사부의 광속비를 측정매개변수로 하여 전원이나 레이저 발생기의 불안정으로 인한 오차 없이 안정적으로 표면 거칠기를 측정할 수 있고 측정시편이 준비된 $R_{max} 0.8\mu m$ 의 비교적 고운 연삭표면에서 $R_{max} 25\mu m$ 의 매우 거친 표면까지 일관된 경향을 나타낸다.

(2) 개발된 표면 거칠기 측정센서는 표면이 거칠어질수록 광속비가 단조적인 감소를 하며 표면 거칠기에 대한 절대적인 값을 구하기 위해서는 보정 (Calibration)이 필요하다.

(3) 입사각이 클수록 광속비가 커지므로 응용영역이 확대될 수 있으나, 입사각이 작을수록 측정표면과의 거리편차에 대한 광속비의 변화가 작으므로 기상 측정에 바람직하다.

(4) 개발된 측정장치는 입사부와 수광부가 측정표면과 유지해야할 수직방향 위치의 편차 (Z 축 Offset)와 각오차, 그리고 수광부의 변위 변화에 대해 비교적 둔감하므로 기상 측정센서로서 바람직하다.

참고문헌

1. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology: part I: stylus instrument", Wear, Vol. 125, 1988, pp. 271- 288.
2. I. Sherrington and E.H. Smith, "Modern measurement techniques in surface metrology: part II: optical instruments", Wear, Vol. 125, 1988, pp. 289-308.

3. E.L. Church, "The measurement of surface texture and topography by differential light scattering", *Wear*, Vol.57, 1979, pp.93-105.
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, 1985, pp.2696-2700.
5. Y.L. David, et al., "Surface profile measurement with a dual-beam optical system", *Applied Optics*, Vol.23, No.5, 1984, pp746-751.
6. L.H. Tanner and 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, 1979, pp.299-316.
7. E.C. Teague, T.V. Vorburger and D. Maystre, "Light scattering from manufactured surfaces", *Annals of the CIRP*, Vol.30, No.2, 1981, pp.563-569
8. H.E. Bennett, "Scattering characteristics of optical materials", *Optics Engineering*, Vol.17, 1978, pp.480-488.
9. K.J. Stout, "Optical assessment of surface roughness", *Precision Engineering*, Vol.6, No.1, 1984, pp.35-39.
10. P. Beckmann and A. Spizzichino, The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, Pergamon press, Oxford, 1963.
11. D.G. Jansson, et al., "High-speed surface roughness measurement", *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.106, No.1, 1984, pp.34-39.
12. R. Brodmann and G. Thurn, "Roughness measurement of ground, turned and shot peened surfaces by the light scattering method", *Wear*, Vol.109, 1986, pp.1-13.
13. M. Shiraishi, "A consideration of surface roughness measurement by optical method", *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol.109, 1987, pp.100-105.
14. M. Shiraishi, "In-process measurement of surface roughness in turning by laser beams", *Trans. ASME Journal of Engineering for industry*, Vol.103, No.2, 1981, pp.203-209.
15. D.Y. Yim and S.W. Kim, "Optical roughness measurement of ground surfaces by light scattering", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.30, No.2, 1990, pp.283-289.
16. 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.