

레이저 표면 거칠기 측정 성능 향상을 위한 입사 광강도 조정 알고리즘

서영호[#], 김화영^{*}, 안중환^{**}

Adjustment Algorithm of Incident Light Power for Improving Performance of Laser Surface Roughness Measurement

Young Ho Seo[#], Hwa Young Kim^{*} and Jung Hwan Ahn^{**}

ABSTRACT

The light pattern reflected from a machined surface contains some information like roughness and profile on the projected surface as expected in the Beckmann-Spizzichino model. In applying the theory into a real reliable measuring device, many parameters such as incident light power, wave length, spot size should be kept a constant optical value. However, the reflected light power is likely to change with the environmental noise, the variations of the light source, the reflectivity of the surface, etc. even though the incident light power is constant. In this study, a method for adjusting the incident light power to keep the reflected light power projected on a CMOS image sensor constant was proposed and a simple adjustment algorithm based on PI digital control was examined. Experiments verified that the proposed method made the surface roughness measurement better and more reliable even under variations of the height of light source.

Key Words : Surface roughness(표면 거칠기), Laser measurement(레이저 측정), PI digital control (PI 디지털 제어), Incident light power(입사 광강도)

1. 서론

광학식 표면 거칠기 측정법은 측정면에 손상을 주지 않으며 크게 이송계가 있는 방식과 없는 방식으로 나눌 수 있다. 전자는 촉침을 이용하는 접촉식 방식처럼 광을 스캐닝하기 때문에 측정면의 프로파일까지 측정할 수 있다. 후자는 측정 표면의 반사광이나 회절광을 분석하여 그 속에 포함된 면의 정보를 찾아낸다. 반사광을 이용한 광학

식 측정법은 높은 측정 환경이 필요 없으면서 비교적 빠르고 정확하게 측정 할 수 있어서 기상에서 인프로세스 계측에 손쉽게 활용할 수 있다.^{1,2}

반사광을 이용한 측정법은 광 강도의 분포 및 세기를 분석하여야 하므로 센서로 정확하게 반사광을 획득하는 것 못지 않게 레이저 광원의 안정적인 공급이 중요하다. 그러나 레이저 다이오드 모듈 내의 회로 상에서 안정적으로 레이저의 전원을 공급하더라도 레이저 광원과 측정면 사이의 상

^{***} 접수일: 2003 년 10 월 30 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일
[#] 교신저자: 부산대원 지능기계공학과
E-mail: essay76@hitel.net / youngho@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-3087
^{*} 부산대학교 기계기술연구소
^{**} 부산대학교 기계공학부

대적인 높이 변화, 측정물 재질의 반사율의 차이, 그리고 측정편의 가공 방식의 차이 등으로 인해 영상의 광 강도가 달라진다. 그리고 센서가 획득 할 수 있는 광 강도의 영역은 정하여져 있으므로 광 강도가 너무 약하거나 강하면 영상 정보에 손실이 발생한다. 그러므로 측정 결과의 신뢰성을 향상하기 위해서는 측정 환경의 변화에 적응할 수 있는 레이저 광량 조정 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 정확하게 영상 정보를 얻기 위해 레이저 광량 조절 알고리즘이 필요한 까닭과 그 구현 방법을 제시하였다. 그리고 실험을 통하여 알고리즘의 측정 신뢰성을 평가하였다.

2. 전반사 광량의 이론식

2.1 표면의 광 반사 모델

Beckmann과 Spizzichino는 표면에서 빛이 반사되는 현상을 전자기파 이론의 기본적인 개념을 바탕으로 규명하였다.³

평균값 $\langle h \rangle = 0$ 과 표준 편차 σ_h 및 상관 거리 T 으로 정규 분포를 이루는 것으로 정의한 표면의 한 점 Q 에 전기장 크기 E_{oi} , 진행 방향 \mathbf{e}_i , 전파 벡터 \mathbf{k}_i 및 진동수(rad/sec) ω 를 지나는 평면파가 Fig. 1 과 같이 입사각 θ_i 로 입사하여 (θ_r, ϕ_r) 의 방향으로 산란될 경우 그 평균 파워는 Eq. (1)과 같다.

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

여기서,

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

$$\rho_o = \text{sinc}(v_x X) \text{sinc}(v_y Y) \quad (3)$$

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

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

이다.

Eq. (1)의 반사 모델은 광 강도 값($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)으

로 Nayar에 의해 Eq. (6)과 같이 재정의 되었다.⁴ Fig. (2)는 그 유도 과정에서 가정된 광학계이며 표면의 dA_s 영역에서 반사되어 렌즈로 모인 빛이 센서의 dA_{im} 영역에 투영된다.

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

여기서 L_r 은 전반사항과 난반사항의 합이며, 전반사항은 dA_s 에 비례하지만 ρ_o^2 의 적분에 대해서는 반비례하며 전반사항의 크기는 dA_s 에 비례하지만 전반사항에 포함된 에너지는 이에 독립적이다.

2.2 영상 센서의 포화 모델

영상 센서는 영상을 얻기 위한 센서이며 측정면에 해당하는 영역 내에 수 많은 수광 센서가 배열된 형태로 이루어져 있으며 각각이 획득한 영상의 픽셀을 형성한다. 이를 비유하자면 넓은 들판에서 양동이를 일정한 영역 안에 균일하게 배열한 뒤 하늘에서 떨어지는 비를 양동이에 받는 것과 같다. 여기서 비가 바로 빛이고 양동이가 개별적인 수광 센서에 해당하며 그 규칙적인 배열이 바로 영상 센서가 된다. 이 때 하나의 양동이가 담을 수 있는 비의 최대 양은 양동이의 크기로 제한되며 이를 넘을 때는 옆으로 넘쳐나게 되면서 주변의 양동이에 담긴 빗물의 양에도 영향을 주게 된다.

영상 센서의 모델은 빛의 반사 모델 만큼이나 중요한 것인데 그 까닭은 영상 센서에서 발생하는 노이즈 성분과 센서 내에서의 왜곡 현상으로 인해 획득된 영상이 실제 영상과 많이 다를 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 영상 센서 내의 개개의 수광 센서가 지나치게 약한 빛에는 감응하지 못하며 일정 수준 이상의 강한 빛에는 포화되어 나타나는 것에 관심을 가지고 다음과 같은 모델을 제시하였다. 포화 연산자 Sa 는 개개의 수광 셀에만 국한하여 정의하였으며 주변의 셀들로 빛이 넘쳐나가는 현상은 고려하지 않았다.

$$Sa(L_r) = \begin{cases} L_{r,\min}, & (L_r < L_{r,\min}) \\ L_r, & (L_{r,\min} \leq L_r \leq L_{r,\max}) \\ L_{r,\max}, & (L_r > L_{r,\max}) \end{cases} \quad (7)$$

위 식에서 영상 센서의 광 강도 값 L_r 은 $L_{r,\min}$ 과 $L_{r,\max}$ 사이에서만 유효한 값을 지니도록 정의되었다.

2.3 영상 센서를 이용한 반사 광량 측정

레이저 광원에서 발생하는 광량의 세기를 알기 위해서는 광량을 감지할 수 있는 센서를 사용해야 한다. 따라서 종래에 비슷한 연구를 수행한 논문에서는 하나의 수광 센서(Photo-detector)를 활용하여 시스템을 구성하였다.¹ 그러나 이 경우 측정 영역이 넓은 수광 센서를 사용하기 때문에 광원에서 발생한 광량의 세기를 쉽고 정확하게 검출할 수가 있지만 수광 센서와 영상 센서를 조합하여 측정 결과를 도출하여야 하는 경우에는 어려움이 생길 수 있다. 예를 들어 영상 센서가 측정 가능한 빛의 세기와 수광 센서가 측정 가능한 빛의 세기가 서로 다르기 때문에 영상 센서에서 획득한 영상에 포화 현상이 발생한 경우가 종종 생겨날 수 있으며 이 경우 수광 센서의 출력값을 통해 이를 보정할 수 있는 간단한 방법이 없다. 더구나 광학계의 복잡성에 있어서도 하나의 반사광을 수광 센서와 영상 센서에서 개별적으로 획득하여야 하므로 빛의 경로를 쪼개어 주는 하프미러가 추가적으로 필요해진다. 따라서 본 논문에서는 영상 센서도 작은 수광 센서가 뺄곡하게 배열되어 형성된 것에 착안하여 영상 센서를 통하여 레이저 광원의 광량을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

Eq. (8)에서 반사광의 강도 L_r 을 $L_{r,\max}$ 에 대해 정규화한 P_r 을 정의하여 반사광 전체의 세기를 나타낼 수 있게 하였다.

$$P_r = \int_{\theta_i - \pi/2}^{\theta_i + \pi/2} \frac{Sa(L_r)}{L_{r,\max}} d\theta_r \quad (8)$$

Eq. (8)은 Fig. 3 과 같은 반사광의 영상에서 Eq. (9), (10)과 같은 영상 처리를 통해 구할 수 있다. 반사광의 영상 속에는 정반사광과 난반사광이 동

시에 포함되어 있으므로 이들을 모두 합한 r_1 구간에 대하여 정규화할 필요가 있다.

$$p_{i,j} = \begin{cases} p_{i,j}^1 & (p_{i,j}^1 > p_i) \\ 0 & (p_{i,j}^1 \leq p_i) \end{cases} \quad (9)$$

$$P_r = \sum_{i=x_c-d_1}^{x_c+d_1} \sum_{j=y_c-d_1}^{y_c+d_1} \frac{p_{i,j}}{L_{r,\max}} \quad (10)$$

영상의 각 픽셀의 광 강도 값에 대해 Eq. (9)와 같이 주변광의 강도 값에 해당하는 문턱값 p_i 를 지정하여 그 영향을 약화시킨다. Eq. (10)에서는 r_1 구간에 대해 정규화 광 강도 P_r 을 구한다.

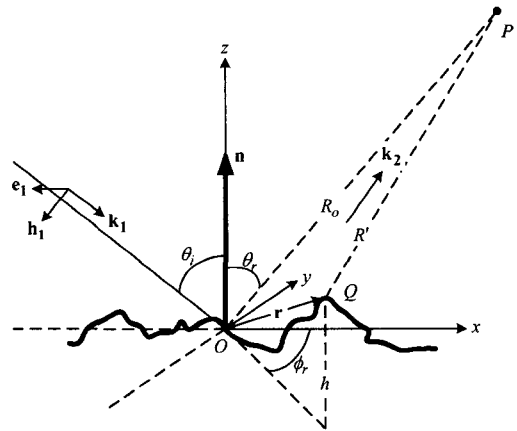


Fig. 1 Reflection model of plane wave incident on a rough surface³

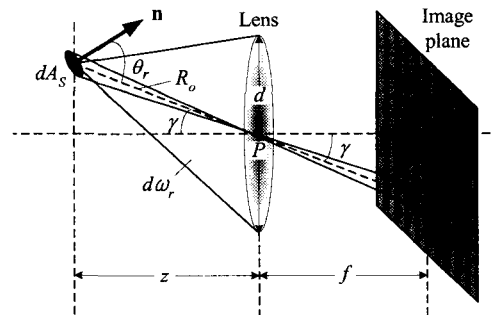


Fig. 2 Optical system for image formation⁴

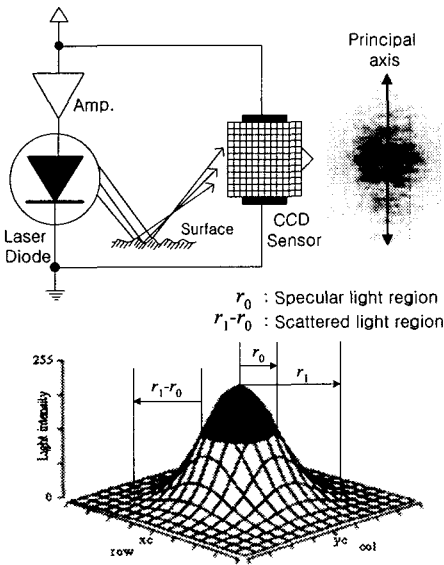


Fig. 3 Light intensity distribution of a reflected light pattern on an image sensor plane

3. 입사 광량 변동 시뮬레이션

3.1 센서를 고려한 모델로부터 시뮬레이션

종래의 연구에서는 대부분 측정 중에 레이저 광원의 세기가 측정 환경의 영향으로 인해서는 변화하지 않는다고 가정하였다. 그러나 레이저 광원의 세기는 레이저 구동 드라이버에 인가되는 전류 크기의 변동 뿐 아니라 레이저 광원의 상대적인 거리와 같은 환경 요인에 의해서도 변할 수 있고 그 세기가 적절하지 않으면 영상 정보에 손실이 생긴다. 그러므로 입사 광량 변동의 영향을 시뮬레이션하여 영상 정보 손실 정도를 관찰하였다.

Eq. (6)에서 입사각 $\theta=0^\circ$, 광학적 거칠기 $(\sigma_r/\lambda)=0.1$, 표면 형상의 상관 거리 $T=0.1\text{mm}$ 로 정하고, 입사 전기장의 크기 E_{0i} 을 $1\sim 30\text{Vm}^{-1}$ 으로 변화하였을 때 $Sa(L_r)$ 의 변화를 나타낸 것이 Fig. 4와 같다. 여기서 E_{0i} 이 $L_{r,\min}$ 이하일 때는 영상 센서에서 아무런 광 강도를 획득할 수 없으며, 반대로 $L_{r,\max}$ 이상일 때는 포화되어 나타난다. $L_{r,\min}=4$, $L_{r,\max}=250\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 으로 정하였다.

E_{0i} 을 $0\sim 250\text{Vm}^{-1}$ 으로 변화하였을 때 P_r 의 전체적인 변동을 나타낸 것이 Fig. 5이다. 여기서 포화가 일어나지 않는 구간에서는 전체적으로는 선

형적이지만 확대하여 보면 (+) 기울기의 이차 곡선이 나타난다.

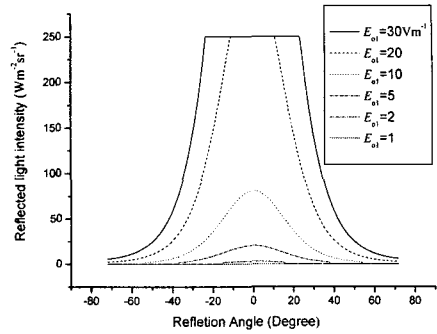


Fig. 4 Idealized intensity distribution models with various incident light power

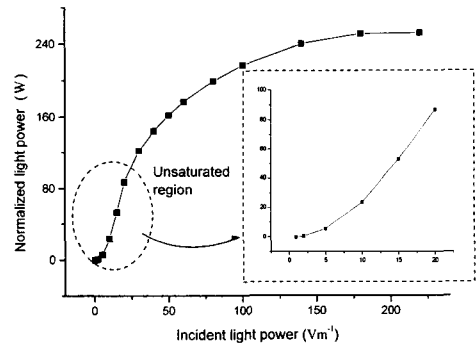


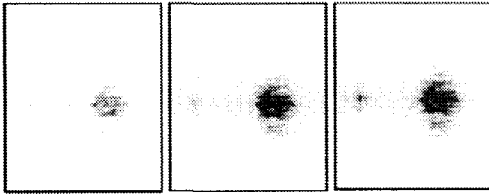
Fig. 5 Variation of the normalized reflected light power (P_r) versus the incident light power

3.2 시뮬레이션 결과의 실험적 검증

촉침식 표면 거칠기 측정 장비로 측정한 결과가 $R_q=0.3\mu\text{m}$ 인 시편으로 레이저 광원과의 거리를 고정하고 레이저 다이오드의 출력을 단계적으로 바꾸었을 때 센서에서 획득한 영상을 Fig. 6에 보였다. 레이저 다이오드 모듈은 Sharp사의 LT052를 사용하였고 최대 출력은 35mW이며 파장은 650nm이다.

각 영상의 주축(Principal-axis) 상에 나타나는 광 강도 분포를 Fig. 7에서 나타내었는데 주변광과 구별이 힘든 낮은 광 강도 레벨에서부터 포화 현

상이 나타난 것까지 여러 형태가 존재한다. 이 중 레이저 다이오드 모듈의 출력 파워 P_{Laser} 가 17.5~21.0mW인 경우가 가장 적절한 세기로서 광 강도 정보의 손실이 없다.



(a) $P_{Laser}=17.5mW$ (b) $P_{Laser}=22.7mW$ (c) $P_{Laser}=28mW$

Fig. 6 Various reflected images according to the incident light power

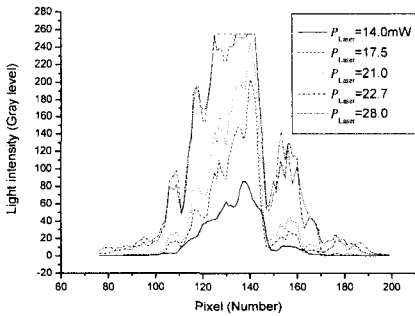


Fig. 7 Principal axis intensity distribution of reflected image with the light power varied

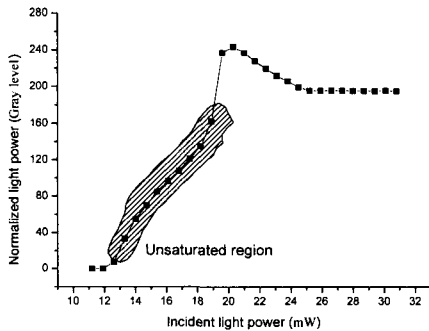


Fig. 8 Normalized reflected light power versus the incident light power

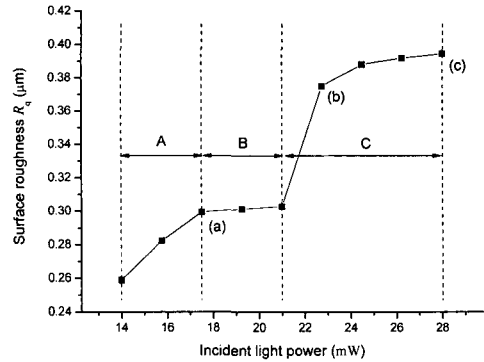


Fig. 9 Measured surface roughness versus the incident light power

레이저의 파워를 0 에서 35mW까지 서서히 증가시키면서 정규화 광 강도 P_r 의 변동을 살펴본 것이 Fig. 8 인데 시뮬레이션 결과와는 달리 센서의 포화가 급격하게 나타난다.

영상 정보의 손실이 측정 결과에 미치는 영향을 Fig. 9에서 확인하였다. 여기서 레이저의 파워가 17.5~21.0mW인 경우가 B 영역에 해당하며 영상 정보의 손실이 없어서 안정적인 측정치를 보인다. 그러나 영상 센서가 포화되는 C 시점에서는 영상 정보가 손실되어 측정 결과가 크게 변동한다.

4. 입사 광량 조정 알고리즘

4.1 시스템 모델링

레이저 파워의 크기에 따라 영상 센서가 포화되는 영역과 포화되지 않는 영역으로 구분되며 이중 비포화 영역의 응답 곡선은 Fig. 10 과 같다. 이 데이터를 Matlab을 이용하여 최소자승법으로 모델링한 결과가 Eq. (11)이고 모델의 시뮬레이션 결과를 Fig. 10 에 함께 나타내었다.

$$G(s) = \frac{1.712s^3 + 0.01269s^2 + 0.07952s - 0.0007178}{s^4 + 1.12s^3 + 0.6995s^2 + 0.0868s + 0.0012} \quad (11)$$

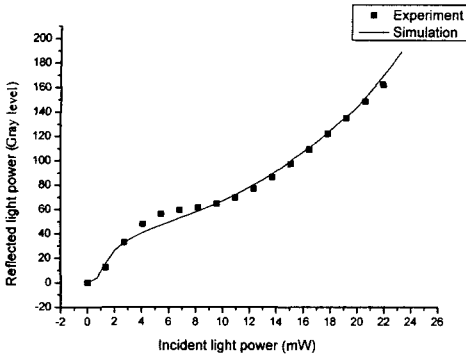


Fig. 10 Reflected light power in non-saturated region

4.2 PI 디지털 제어기 설계

Eq. (11)의 시스템에 대해 Fig. 12 와 같은 PI 제어기를 설계하고자 하며 제어기의 사양은 Table 1 과 같이 정하였다. PID 제어기의 각 계인을 선정하기 위해 Ziegler-Nichols 의 튜닝 기법을 적용하였다. 이 방법은 미분 계인과 적분 계인을 모두 0 으로 두고 비례 계인이 임계값 K_{cr} 일 때 제어 루

Table 1 Specification of digital controller

Parameter	Specification
Settling time	Below 30sec
Steady state error	Below 5%

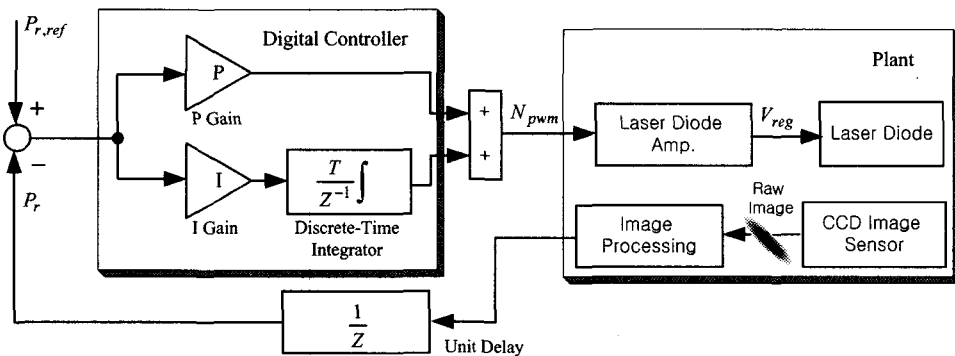


Fig. 11 Block diagram of an incident light power adjustment algorithm

프가 끊임없이 진동한다면 그 진동 주기 P_{cr} 값으로 각 계인을 정하는 방법이다.⁵

$K_{cr} = 2.14$ 로 두었을 때 시스템 응답이 끊임 없이 진동하며 그 임계 진동수가 $P_{cr} = 7\text{sec}$ 이다. 따라서 제어기 I 의 계인 값은 Eq. (12)에 의해 $P=0.963$ 과 $I=0.165$ 로 정해진다. Fig. 12 는 제어기 I 의 스텝 응답 시뮬레이션 결과이다.

$$K = 0.45K_{cr} = 0.963$$

$$I = K / (1 / 1.2 P_{cr}) = 0.165 \tag{12}$$

제어기 II 의 계인은 I 의 계인에서 $P=1.2$ $I=0.5$ 로 계인을 높였고 이 때 스텝 응답 시뮬레이션이 Fig. 13 이다. 세틀링 타임이 줄어든 대신 진동 성분이 많이 생겼다. 그러나 제어기가 갖추어야 할 사양에서 세틀링 타임과 정상 상태 오차가 중요하므로 제어기 II 를 최종적으로 선택하였다.

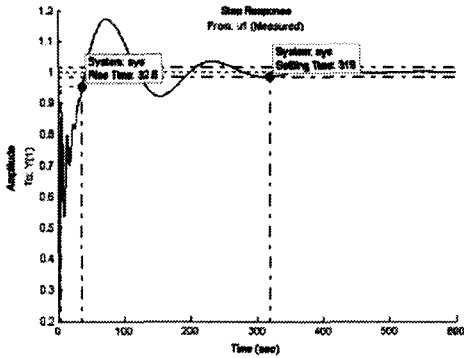


Fig. 12 Simulation of controller I with $K=0.963, I=0.165$

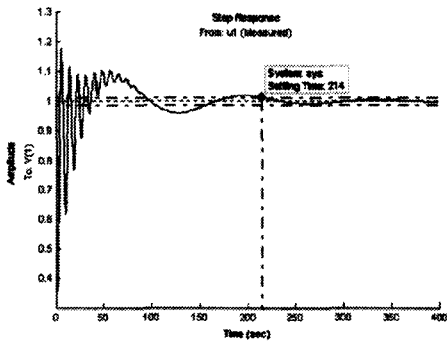


Fig. 13 Simulation of controller II with $K=1.2, I=0.5$

5. 실험 장치 및 방법

마이크로 프로세서의 PWM 출력에 동작할 수 있는 증폭 회로를 Fig. 14와 같이 구성하였다. 이 회로는 레이저 다이오드가 방출하는 레이저 파워를 변화시키기 위하여 사용되었다. 마이크로 프로세서의 PWM 출력 신호는 RC 필터를 통해 아날로그화된 뒤 연산 증폭기(OP-AMP)를 거치면서 신호 레벨이 적절하게 변경되어 트랜지스터의 베이스 부에 인가되어 레이저의 파워를 조절할 수 있다.

실험 장치는 인프로세스 계측을 고려하여 마이크로 프로세서로 구동되는 소형의 임베디드 시스템으로 설계하였고 개략도를 Fig. 15에 나타내었다. 영상 처리 및 광량 조정 알고리즘의 수행은 마이크로 프로세서가 독자적으로 할 수 있으나 실

험의 편의 및 파라미터의 튜닝과 측정 데이터의 로깅을 위하여 PC 기반의 소프트웨어와 통신할 수 있게 하였다. 그러므로 PC에서 오프라인으로 실험 결과를 분석하고 문제점을 진단할 수 있다.

실험 방법은 설계한 입사 광량 조정 알고리즘의 효율성 및 측정 성능 향상에 기여한 정도를 확인하는 것에 주안점을 두었다. 디지털 제어기의 성능 평가는 100%의 반사율을 가정한 거울을 대상으로 그 응답 특성을 수행하였다. 그리고 제안한 알고리즘에 의해 측정의 신뢰성과 강인성이 개선된 것을 확인하기 위해 플라스틱으로 제작된 표준 시편 상에서 레이저 광원의 높이를 변동시켰다. 이로 인해 일정한 레이저 파워 하에서 의도적으로 입사 광량을 변화시킬 수 있다. 실험 조건을 Table 2 에 요약하였다.

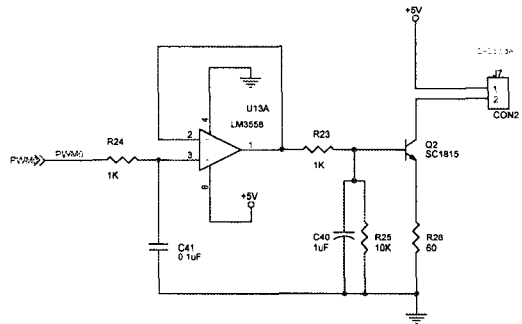


Fig. 14 Laser diode driver with PWM signal

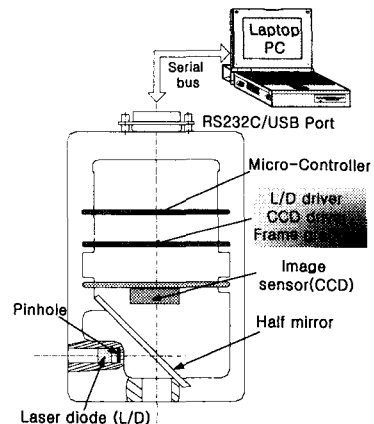


Fig. 15 Schematic diagram of the laser surface roughness measurement device

Table 2 Experimental conditions for performance test

Initial light power	21mW (60% of full power)	
Laser source height	3~15mm	
Sampling interval	4.5 sec	
Roughness specimen (Plastic surface)	#1	R_a 0.08 μ m
	#2	R_a 0.19 μ m

6. 실험 결과

거울면을 대상으로 하여 3mm의 높이에 대해 제어기 II의 성능을 평가한 결과는 Fig. 16와 같은데 Fig. 13의 시뮬레이션과 유사한 결과를 보인다. 그러나 정상상태 오차가 존재하는 것은 모델링 오차의 영향보다는 레이저 광량 조절 장치의 분해능에 기인하는 것으로 보인다.

플라스틱 재질의 표준 시편에 대해 본 논문에서 제안한 광량 조절 알고리즘을 탑재하여 3~15mm로 높이를 변화시켰을 경우 획득한 영상은 Fig. 17(a)와 같다. 레이저 광원 높이의 변동으로 인해 입사 광량이 점차 약해졌고 이를 보상하기 위하여 광량 조절 알고리즘에 의해 레이저의 출력이 점차 강해진 것을 확인할 수가 있다. 거리가 높아져서 획득한 영상의 패턴이 커졌으나, 주축 상의 광 분포의 산란 정도는 Fig. 17(b)과 같이 포화 되지 않는 정도에서 거의 일정하게 유지된다.

최소 높이에서의 측정 오차를 0%로 하여 그것을 기준으로 높이에 따른 Specimen #1과 #2의 측정 결과를 나타낸 그래프가 Fig. 18이다. 변동이 심한 영역은 영상의 크기가 센서의 영역을 벗어났기 때문에 나타나며 Specimen #1이 영상이 작으므로 Specimen #2에 비해 상대적으로 늦게 변동이 생긴다. 그리고 이 영역에서 오차율이 다시 낮아지는 것은 대부분의 영상이 센서 영역을 벗어나서 광 분포의 변화가 도리어 약해지기 때문이다. 그러나 영상이 충분히 센서의 영역 내에서 확보되는 경우에는 제안한 알고리즘이 효과적으로 광량을 조정하여 오차 변동이 일정한 수준에서 유지되는 것을 확인할 수 있다. 오차 범위는 측정법 자체의 오차율을 조금 웃도는 것으로서 제안한 알고리즘이 레이저 표면 거칠기 측정의 신뢰성과 강인성을 높여준 것을 증명한다.

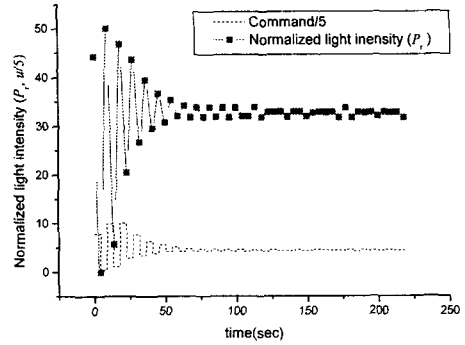
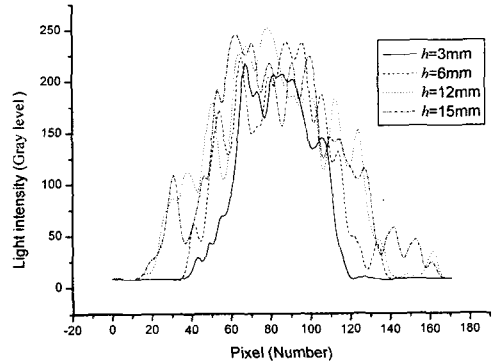
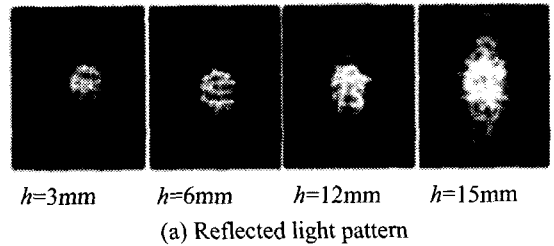


Fig. 16 Performance of PI digital controller II



(b) Principal-axis intensity distributions

Fig. 17 Light intensity adaptation due to the height variations of light source

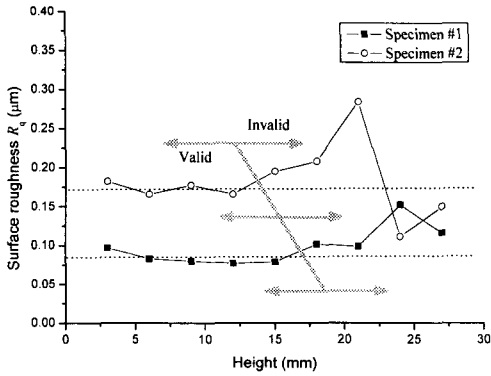


Fig. 18 Variations of measured roughness due to the height variations of light source

7. 결론

레이저 반사광을 이용한 표면 비접촉 측정법에 서 영상 정보를 기반으로 효과적으로 광량을 조정 할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 아래와 같 은 결론을 얻었다.

- (1) 획득한 반사광 중 수직으로 반사되어 나타난 광 강도 정보에 간단한 수학적 연산을 가함 으로써 광원 의존적인 종래의 방식을 개선하 여 영상의 광량 변동을 훨씬 쉽게 반영할 수 있는, 영상 의존적 광량 측정 알고리즘을 개 발하였다.
- (2) 제안한 광량 측정법은 이미지 센서의 특성으 로 인해 비선형적인 요소를 가지므로, PI 알고 리즘의 디지털 제어기를 설계하여 구현할 필 요가 있었다.
- (3) 설계한 디지털 제어기가 제한된 처리 시스템 의 성능 하에서 효과적으로 동작함을 실험을 통해 확인하였으며, 측정 결과의 신뢰성과 강 인성을 높여 줄 수 있음이 증명되었다.

참고문헌

1. Yim, D.Y. and 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.
2. Shen, Yun Feng, 임한석, 김화영, 안중환, "레이저빔 반사 화상을 이용한 연마면 거칠기 측정 법에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 2, pp.145-152, 1999.
3. Beckmann, P. and Spizzichino, A., "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces," Pergamon press, Oxford, 1963.
4. Shree K. Nayar, Katsushi Ikeuchi, Takeo Kanade, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, pp. 611-634, July 1991.
5. Dorf, B. C. and Bishop, R. H., "Modern Control Systems 7th Edition," Addison Wesley, 1995.