한국정밀공학회지 제18권 제11호 (2001년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 11, November 2001.

레이저광 반사 화상을 이용한 표면 거칠기 측정법의 개발과 적용

申雲峰*, 김화영**, 안중환**, 최이존***

Development of a Surface Roughness Measurement Method Using Reflected Laser Beam Image and Its Application

Yun Feng Shen*, Hwa-Young Kim**, Jung-Hwan Ahn**, Lee-Jon Choi***

ABSTRACT

A light beam reflected from a machined surface generally containes information concerning about its surface roughness. This study examines and proposes a surface roughness measurement technique for on-machine measurement of machined surfaces. The technique is based on the measurement of a reflected laser beam pattern and the statistical analysis of its light intensity distribution. The surface roughness was found to be closely related to the standard deviation of the light intensity on the primary axis of the reflected pattern.

An image acquisition device is made up of a laser diode, a half mirror, a screen, and a CCD camera. The exact image with the primary and secondary axes of a reflected laser beam pattern is calculated through such image processing algorithm as thresholding, edge detection, image rotation, segmentation, etc. A median filter and a surrounding light correction algorithm are improve the image quality and reduce the measuring error.

Using the developed measuring device the effect of screen materials and workpiece materials was investigated. Experimental results regarding to relatively high-quality surfaces machined by grinding, polishing, lapping processes have shown that the measurement error is within 10% in the range of 0.1㎛~0.8㎛ R_q. Therefore, the proposed method is thought to be effectively used when quick measurements is needed with workpieces fixed on the machine.

Key Words : Surface roughness(표면 거칠기), Machined surface(기계 가공면), Reflected laser beam(레이저반사광)

1. 서론

최근 가공의 초정밀화가 진행됨에 따라 제품의 치수 정도뿐 아니라 표면거칠기 상태에 대한 엄격한 기준을 요구하고 있으며, 이에 따라 표면거칠기 측정의 고정화에 대한 필요성도 점차 커지고 있다.

기계 가공면의 표면 거칠기를 측정하는 방법에는 크게 기계적인 촉침을 사용한 접촉식 표면거칠기

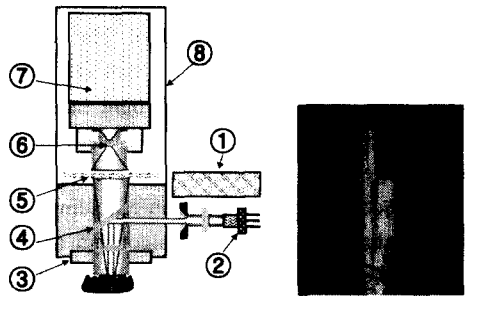
☞ 2001년 2월 6일 접수
* 부산대학교 일반대학원 지능기계공학과
** 부산대학교 기계공학부
*** (주)새미

측정법과 광을 이용한 비접촉식 표면거칠기 측정법으로 나눌 수 있다. 촉침식 표면거칠기 측정법은 표면의 기계적 변위를 기계적으로 측정하므로 측정원리가 간단하고, 주위환경에 영향을 적게 받으며 측정값의 반복 정밀도가 높다는 장점을 갖고 있는 반면에 측정면과 접촉시 촉침의 측정 압력으로 인한 측정면의 손상과 촉침의 낮은 추종특성으로 인한 측정 속도 저하 및 촉침 선단부의 크기로 인해 생기는 측정값의 왜곡, 촉침의 마멸 등 몇가지 문제점들을 가지고 있다(1). 이러한 이유들 때문에 광을 이용한 비접촉식 표면거칠기 측정법들에 대한 관심이 커지고 있다. 광을 이용한 비접촉식 측정법은 알루미늄 같은 연질재료의 표면거칠기 측정이 가능하고, 촉침이 없으므로 미세한 표면거칠기 변화에 대한 고속, 고분해능 측정이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 단점으로는 측정 표면의 유막등이 측정값에 악영향을 미치므로 측정면의 표면을 깨끗이 유지시켜야 하며 재질에 따른 반사율의 차이 및 외부 광원의 영향을 제거해야하는등 문제점을 갖고 있다. 광을 이용한 비접촉식 표면거칠기 측정법에는 전반사 임계각법을 이용하는 방식, 비점수차법을 이용하는 방식, 광절단법을 이용하는 방식, 반사광량 변화를 이용하는 방식등 다양한 측정법이 있다(2~8). 이중 측정표면에서 반사된 레이저광의 반사광량의 변화를 이용한 측정법이 이들 문제점을 해결하기 위해 많이 연구되고 있다. 광산란을 이용한 이전 연구들은 대부분 산란광의 강도를 측정하는 방법을 이용하고 있다. 이들 방법은 표면상태에 따른 편차가 크고 측정 가능 영역이 한정되고 광학계 설계도 복잡해지는 단점을 갖고 있다.

광의 스크린 투영 패턴을 이용한 연마면 거칠기 측정법을 제안하였으며 선행 연구 결과로 발표한바 있다[9]. 선행 연구를 통해 반사패턴 주방향 광량분포곡선의 표준편차와 표면거칠기 사이에 측정 영역에 따라 일정한 비례관계가 있음을 실험적으로 확인하였고 레이저광 반사패턴을 이용한 거칠기 측정 실용화의 가능성을 보여주었다. 본 연구는 레이저광 반사패턴을 이용한 연마면 거칠기 측정법의 측정 성능 향상에 관한 것으로 영상처리를 통한 측정정도의 향상, 스크린의 특성 조사와 가공면 종류에 따른 반사 패턴의 분포 특성을 분석하고 절삭, 연삭등 다양한 가공면에 대한 적용가능성을 검토하였다.

2. 측정 시스템의 구성

Fig. 1은 레이저광 반사패턴을 이용한 표면거칠기 측정 장치의 구조와 사진을 나타낸다. 본 연구에서는 레이저광을 수직으로 측정면에 조사하기 위해 half mirror를 사용하여 레이저광의 입사각을 90^0로 하였고 스크린과 측정면 사이의 거리를 50㎜로 하였다. 레이저 발생기로 파장 λ =0.6328㎛, 출력 4mW의 레이저 다이오드를 사용하였으며 일정한 광출력을 얻기 위해 레이저 다이오드의 출력을 0.5%이하로 안정시킬 수 있는 APC(Automatic Power Control)회로를 사용하였다. 또한 레이저 다이오드의 광출구쪽에 직경 1㎜ 구멍의 핀홀을 설치하여 측정영역을 직경 1㎜로 제한하였다. 카메라는 가격이 저렴하면서 일반적으로 가장 많이 사용하는 640× 480계열의 CCD카메라를 사용하여 영상을 획득하였다.



(a) structure (b) photo

1.Laser Diode Driver 2.Laser Diode
3.Protection Lens 4.Half Mirror
5.Screen 6. Lens set
7.CCD Camera 8..Measuring Device body

Fig. 1 Structure of the measuring device

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 측정 장치를 이용한 가공면의 표면거칠기 측정 시스템의 구성도를 나타낸다. 전체 측정 시스템은 컴퓨터, 표면거칠기 측정장치, 3축 또는 5축 가공기, 화상입력장치(image grabber)등으로 구성되었다. 표면거칠기 측정장치는 가공기의 주축에 직접 부착하거나 치구를 사용하여 부착이 가능하므로 가공기에서 가공한 후 가공면을 가공기상에서 직접 측정하는 기상측정(on-the-machine)이 가능하다. CCD카메라에 맺힌

화상은 화상입력장치를 통하여 PC에서 읽어들여 데이터 처리를 행한다. 화상의 각 화소는 화상입력장치에서 8 bit로 A/D변환되어 0~255사이의 그레이레벨(gray level)로 입력되게 된다.

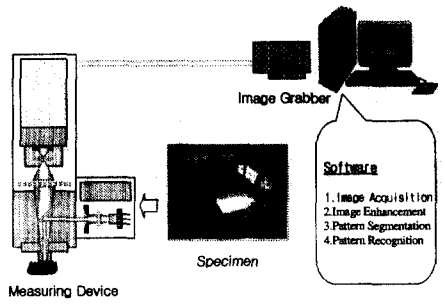


Fig. 2 Schematic diagram of the roughness measuring system

3. 가공법에 따른 표면의 특성

스크래치는 표면거칠기에 큰 영향을 주는데 일반적으로 레이저 반사광의 분포패턴은 스크래치의 영향을 많이 받으며 스크래치 방향에 수직되는 방향으로 퍼지는 경향이 있다[9]. 가공법에 따라 스크래치도 다르게 형성되며 이러한 특성은 측정화상에서 산란광 패턴의 전반적인 형태를 통해서 알 수 있다. Fig. 3은 가공법에 따른 스크래치의 특성을 나타내고 있다.

		Scratch direction	Image	Extracted pattern
(a)	turning ball end milling grinding			
(b)	lapping ball end milling grinding			
(c)	polishing face milling			

Fig. 3 Reflected laser pattern image due to scratch direction

Fig. 3 (a)와 같은 한 방향 스크래치는 선삭, 볼엔드 밀링, 수평축 평면 연삭과 같은 가공법에서 주로 나타난다. 선삭, 밀링가공에서는 스크래치의 깊이와 간격이 가공조건에 따라 일정하게 나타나고 연삭에서는 숫돌 입자 크기에 따라 랜덤하게 나타나는 경향이 있다. Fig. 3 (b)와 같은 양방향 스크래치는 래핑가공에서 주로 생기는데 래핑의 진행 방향에 따라 스크래치의 방향이 결정되며 스크래치의 깊이와 간격이 연삭 가공에서와 같이 랜덤하게 나타난다. Fig. 3 (c)와 같은 스크래치는 수직축 평면 연삭, 평면 밀링, 연마면에서 주로 나타나며 스크래치의 휘인 정도인 곡률(curvature)은 숫돌의 직경에 의해 결정된다. 그리고 연마가공에서는 전가공면의 커스프가 깨끗하게 제거 됐는지 여부에 따라 (a)와 (c)의 두 가지 특성이 복합적으로 나타날 수 있다. Fig. 3 (b)와 같은 반사패턴은 영상 분할을 거쳐 두 방향 스크래치에 의해 형성된 반사 패턴을 분리한 후 분할된 영상을 이용하여 표면거칠기를 산출한다.

4. 패턴 분석 소프트웨어

Fig. 4는 CCD 카메라에서 획득한 반사패턴 영상을 처리하는 알고리즘의 흐름도이다. 반사패턴의 영상처리 과정에는 조명광의 보정, 노이즈 제거를 포함한 전처리 과정과 영상의 2치화, 윤곽선 추출, 패턴 분할을 행하는 영상 분할 과정 그리고 분할한 패턴의 장 · 단축 추출, 장축 방향 광량분포의 표준편차 산출을 행하는 표면거칠기 산출과정으로 구성되어 있다. Fig. 5는 패턴분석을 통해 표면거칠기를 계산하는 프로그램의 화면을 보여주고 있다.

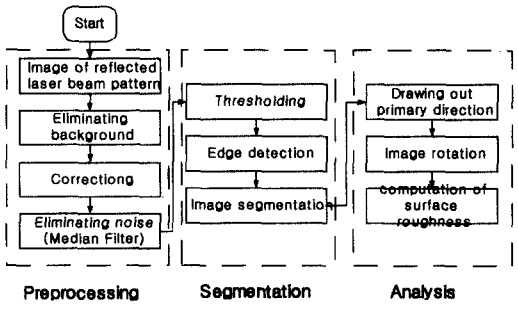


Fig. 4 Flow chart of pattern analysis algorithm

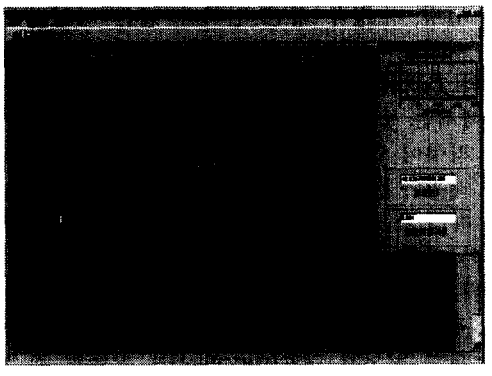
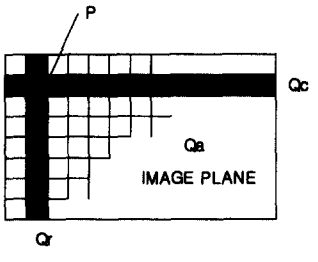


Fig. 5 Example of resulted pattern

4.1 외부 광원 보정

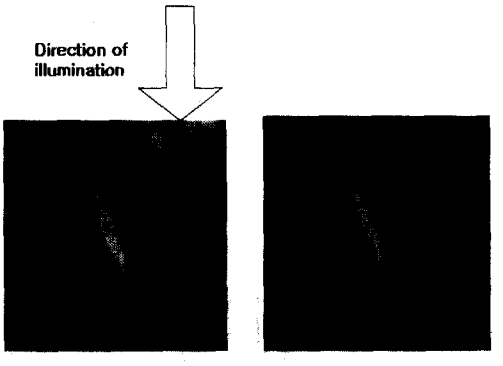
측정 환경에 따른 주변광원의 영향을 제거하기 위하여 영상 전처리 과정에서 Fig. 6과 같은 방법을 사용하여 영상 보정 작업을 행한다[10]. 보정 대상이 되는 화소의 광강도를 P, 그 화소를 포함한 행과 열에 있는 화소들의 광강도 평균치를 각각 Q_c , Q_r 로 하고 CCD 카메라로 읽은 전체 이미지의 평균 광강도를 Q_a로 하였을 때 보정된 광강도 P'는 식(1)과 같이 표현된다[10].

$$P' = \frac{Q_a}{Q_r}\frac{Q_a}{Q_c}P \text{---------(1)}$$



Qa: Mean value of gray level of all pixels
Qc: Mean value of gray level of column pixels
Qr: Mean value of gray level of row pixels
P : Value of gray level before correction
P': Value of gray level after correction

Fig. 6 Principle of correction



(a) Before correction (b) After correction

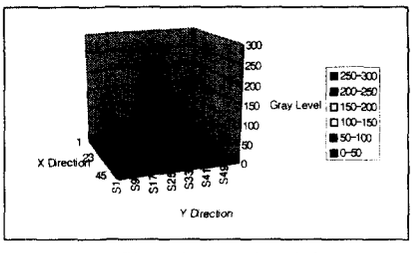
Fig. 7 Correction process

식(1)을 이용하여 전화소에 걸쳐 외부 광원에 대한 보정을 수행한다. 식(1)을 이용하면 간단한 산술 연산으로 외부광원 보정을 행할 수 있기 때문에 프리에 변환을 이용하여 외부 광원보정을 행하는 것 보다 처리속도를 훨씬 빠르게 할 수 있다. Fig. 7은 외부광원에 대한 보정 처리 전후의 이미지의 형상을 나타낸다. Fig. 7(a)는 보정 처리를 행하지 않은 화상으로 조명 장치에 가까운 곳에 위치한 화소들의 밝기가 밝음을 알 수 있다. 이러한 밝기 정도는 조명광의 종류 및 조명광 유무에 따라 달라지므로 영상처리를 통한 표면거칠기 값의 산출에 큰 영향을 미친다. Fig. 7(b)는 보정처리를 거친 영상으로 본 알고리즘을 통해 조명광 및 주변광원의 영향을 완전히 제거할 수 있음을 보여준다.

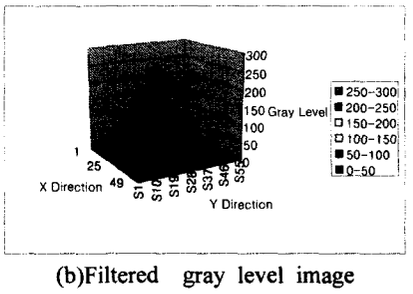
4.2 영상의 노이즈 제거

CCD카메라에서 획득한 반사패턴 화상에는 CCD의 암전류(dark current), 주변 광원의 불안정으로 인한 노이즈의 영향을 받기 쉬우므로 영상처리 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 노이즈의 영향을 제거하는 과정이 필수적이다. 영상 노이즈를 제거하는 방법으로는 영상의 평활화에 의한 노이즈 제거법, 미디언 필터에 의한 노이즈 제거법 등이 있다[8]. 평활화에 의한 노이즈 제거법은 주변화소들의 광강도의 평균을 취하여 대입하기 때문에 노이즈를 제거하는 동시에 영상 자체를 흐르게 하므로 영상에 실려 있는 표면거칠기 정보를 손상시킬 가능성

이 있다. 따라서 본 연구에서는 원영상에 영향을 주지 않으면서 노이즈를 제거할 수 있는 미디안 필터를 사용하여 노이즈를 제거하고 영상에 실려 있는 표면거칠기 정보들을 보존하도록 하였다. Fig. 8은 미디안 필터를 이용한 노이즈 제거 전후의 그레이레벨 영상이다. Fig. 8의 (a)는 필터링 전 영상에 대한 그레이레벨을 나타내며 Fig. 8(b)는 필터링 후 노이즈가 제거된 그레이레벨 영상을 나타낸다. Fig. 8 (a)에서 나타난 노이즈들이 미디안필터를 거쳐 완전히 제거가 되었고 영상에 실려있는 표면거칠기 정보는 그대로 보존되어 있음을 확인할 수 있다.



(a)Non-filtered gray level image

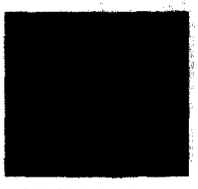


(b)Filtered gray level image

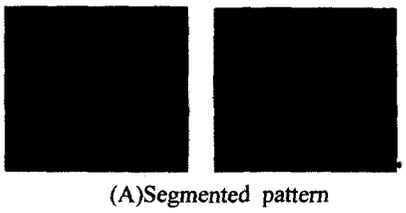
Fig. 8 Noise elimination by median filtering process

4.3 영상 분할

반사패턴은 측정 표면 스크래치 방향의 영향을 받아 형성된다. 표면의 스크래치가 여러 방향으로 형성되어 있으면 반사패턴도 스크래치의 영향을 받아 Fig. 9(a)와 같은 중첩된 반사패턴이 형성된다. 이 경우 영상분할법을 이용하여 반사패턴에서 영상을 분할 한 후 가장 크게 형성된 패턴을 추출하여 표면거칠기를 산출해야 한다. 영상분할 방법으로는 Automatic Thresholding을 이용한 P-Tile Method, Mode Method[11]와 같이 화소 값에 기반한 방법들이 있으나 이들 방법들은 분할해야 할 영상들의 화소값들이 서로 다른 레벨을 가지는 경우 적용이 가능하며 본 연구에서 획득한 화상과 같이 두 영상사이의 화소값의 차이가 거의 없는 경우에는 적용하기 어렵다. 그래서 본 연구에서는 영역에 기반한 영상분할법을 사용하여 영상분할 작업을 행하였다. 영역에 기반한 영상분할법은 전체 이미지를 미소한 영역으로 구분하여 각각의 영역에 걸쳐 분할 작업을 행하기 때문에 화소값들의 영향을 적게 받는 장점을 가지고 있다. Fig. 9는 이와 같은 영상분할법을 사용하여 패턴 분할을 한 영상을 나타낸다. Fig. 9(a)는 분할하기 전 원 영상이며 Fig. 9(b)는 영상분할법으로 두 영상으로 분할한 영상을 나타낸다. 영상을 분할한 후 큰 영상패턴을 갖는 쪽을 택하여 표면거칠기를 산출한다.



(A)Original pattern



(A)Segmented pattern

Fig. 9 Pattern segmentation by hierarchical representation

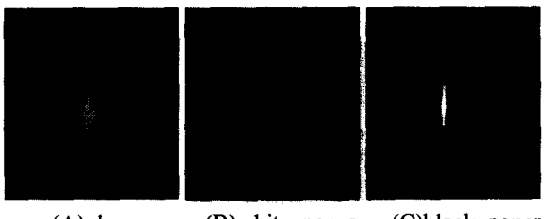
5. 실험결과 및 고찰

5.1 스크린 재질의 특성 평가

스크린의 재질은 반사패턴의 형성에 큰 영향을 주고 있다. 스크린 재질의 반사특성, 방향성, 균일성에 따라 동일한 면에서의 레이저광의 반사일지라도 Fig. 10과 같이 완전히 다른 분포특성을 가진 화상을 맺게 된다. Fig. 10은 간유리, 백색지 흑색지를 스크린 재질로 사용하여 Rmax가 0.78㎛인 연삭면을 측정하였을 때 스크린에 맺힌 화상들이다. 광학측정에 많이 사용되고 있는 간유리는 반사율이 크

고 굴절율이 크기 때문에 반사패턴이 가장 작게 형성된다. 그리고 백색지와 흑색지는 간유리와 같은 굴절율의 영향은 받지 않지만 반사율의 차이에 의해서 흑색지를 스크린 재질로 사용하였을 때 가장 큰 패턴을 얻을 수 있다.

Fig. 11은 세 가지 재료를 스크린으로 사용하여 Rmax가 0.29～0.79㎛ 사이에 있는 연삭 시편 6개에 대해 측정을 행하였을 때 반사패턴 주방향에서 광량분포의 표준편차와 표면거칠기 사이의 관계이다. 흑색지가 표면거칠기의 변화에 가장 민감한 패턴을 형성하며 간유리가 표면거칠기 변화에 가장 둔감한 패턴을 형성함을 알 수 있다.



(A)glass (B)white paper (C)black paper

Fig. 10 Reflected pattern due to screen material

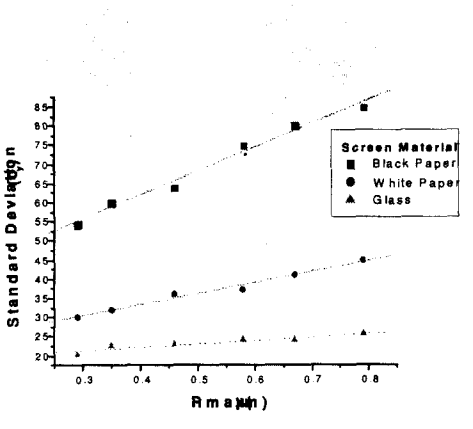


Fig. 11 Relationship between the surface roughness and the standard deviation of primary direction

5.2 측정물 재질에 따른 특성 평가

같은 표면거칠기를 갖는 측정면에 있어서도 측정 재질에 따라 반사율은 모두 다르다. 따라서 반사율에 따라 스크린에 맺히는 반사패턴의 크기와 광강도는 변하게 된다. 반사율이 클수록 반사패턴의 크기가 커지고 광강도도 높아진다. 측정물 재질에 따른 반사패턴 주방향에서 광량분포의 표준편차와 표면거칠기 사이의 관계를 알기 위해 재질이 SUS 304, SKD11, S45C인 시편을 제작하여 측정을 하였다. Fig. 12는 흑색지를 스크린 재질로 사용하여 세 종류의 시편에 대해 측정을 하였을 때 반사패턴 주방향에서 광량분포의 표준편차와 표면거칠기 사이의 관계를 보여주고 있다. 측정물 재질의 변화에 따라 반사패턴 주방향에서 광량분포의 표준편차의 값이 일정한 DC 성분을 가지고 있지만 기울기는 비슷함을 알 수 있다. 측정물 재질에 따른 이와 같은 이와 같은 DC 성분에 대한 정보를 사전에 알고 있으면 보정을 거쳐 측정물 재질 반사율의 영향을 제거할 수가 있다.

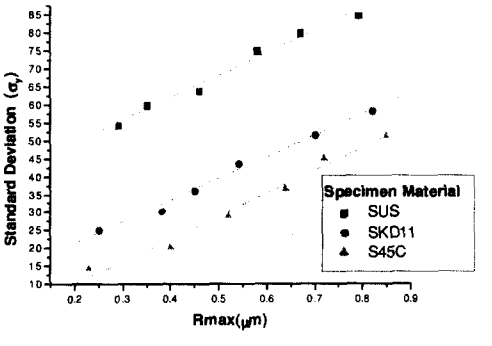


Fig. 12 Relationship between the surface roughness and the standard deviation of primary direction

5.3 가공법에 따른 표면거칠기 측정 실험

실제 기계가공면에 대한 평가실험을 하기 위해 연삭가공, 연마가공, 밀링가공을 통하여 최대표면거칠기(Rmax)가 0.1～1.0㎛ 사이에 있는 시편을 각각 6개씩 제작하여고, 접촉식 표면거칠기 측정기 SV-400(Mitutoyo)으로 측정한 값을 기준 값으로 하고 제안한 반사패턴 투영법(PLBP Projected Laser Beam Pattern)으로 측정한 값을 비교하였다.

Table 1 Surface roughness measurements of machined surfaces

Specimen		1	2	3	4	5	6
Grinding	SV-400	0.29	0.35	0.46	0.58	0.67	0.79
	PLBP(㎛)	0.32	0.37	0.42	0.63	0.70	0.87
	Error(%)	10.4	5.7	8.7	8.6	4.4	10.1
Polishing	SV-400	0.18	0.31	0.49	0.60	0.72	0.84
	PLBP(㎛)	0.22	0.34	0.43	0.67	0.68	0.89
	Error(%)	22.2	9.6	12.2	11.7	5.6	5.6
Milling	SV-400	0.31	0.48	0.59	0.72	0.81	0.94
	PLBP(㎛)	0.34	0.45	0.61	0.70	0.85	0.90
	Error(%)	9.7	6.3	3.3	2.8	4.9	4.2

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

6. 결론

본 연구에서는 산란광의 스크린 투영패턴을 이용한 표면거칠기 측정법을 제안하였으며, 측정 성능 향상을 위한 다양한 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1)가공면 종류에 따른 레이저광 반사패턴의 분석 및 실험을 행하였으며 제안한 측정법이 여러 가지 가공면에 적용 가능함을 알 수 있었다.

2)조명광 보정, 노이즈 제거 알고리즘을 이용하여 표면거칠기의 측정 정도를 향상시킬 수 있었다.

3)스크린 재질에 따른 반사패턴을 분석하였으며 흑색지가 비접촉식 표면거칠기 측정에 가장 적합한 스크린 재질임을 알 수 있었다.

4) 측정 재질의 반사율 변화에 따른 반사패턴의 변화특성을 분석하였으며 측정 결과 측정재질에 따라 반사광의 강도는 다르나 거칠기 변화에 따른 측정값의 기울기 변화는 거의 동일하므로 본 연구에서 제안한 측정법을 여러 재질의 표면거칠기 측정에 적용하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

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. 홍성욱, 김현수, "기상 측정을 위한 광학적 표면거칠기 측정센서 개발," 한국정밀공학회지, 제 11권, 제6호, pp. 168-178, 1994.
6. 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.
7. T. MIYOSHI and K.SAITO "Non-Contact Measurement of Ultra-Precision Diamond Turned Surface Roughness," Bull. of JSPE, Vol. 23, pp.182-188, 1989.
8. Motoyoshi Hisaoka, "Development of Reflex Measurement on Surface Roughness by Scannin Vibration of Laser Beam," Bull. of JSPE, Vol. 63, No. 3, pp. 410-414, 1997.
9. Yun-Feng Shen, 임한석, 김화영, 안중환, "레이저빔 반사 화상을 이용한 연마면 거칠기 측정법에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 145-152, 1999.
10. Hirotaka TSUTSUMI, Akira KYUSOJIN, "Development of an Automatic Scraping Machine with Recognition for Bearing of Scraped Surfaces(1st Report)," Bull of JSPE, Vo. 62, No. 2, pp. 219-223, 1998.
11. Ramesh Jain, Rangachar kasturi, "Machine Vision," International Editions, pp. 73-134, 1995.