

## 프리즘 광학계를 이용한 실시간 삼차원 형상 측정

김정식\*(충남대학교 대학원 기계공학과), 송창규(한국기계연구원), 주병권((주)인텍플러스),  
홍준희(충남대학교)

### The real-time three-dimensional shape measurement by prism lens

J. S. Kim (Mechanical. Eng. Dept., CNU), C. K. Song (KIMM), B. K. Joo (INTEKPLUS),  
J. H. HONG(Mechanical. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

We introduce a method of color-coded illumination that is simple and fast. The purpose of this study is the real-time shape measurement of three-dimensional object by using color-coded information. The object is illuminated by a prism color spectrum. A color spectrum of a white-light source is imaged onto the object by illumination from one certain direction. The object is observed by a color CCD camera from a direction of observation, which is different from the direction of illumination. It can be evaluated by the red, blue, green using a inherence colors of hue value are good point.

**Key Words** : prism(프리즘), real-time shape measurement(실시간 형상 측정), color-coded information(색 정보), hue(색)

#### 1. 서론

산업이 고도화된 선진국에 있어서도 검사공정의 자동화라는 작업은 매우 부진한 상태에 있는 실정이다. 이는 바꾸어 말하면 시장의 무한성을 증명 할 수 있는 것으로 기술이 발전하고, 산업의 고도화가 진전이 된다면, 더욱더 시장규모가 급격히 증대될 수밖에 없게 될 것이다. 과거에는 일반적으로 제품의 두께나 형상을 측정하기 위해서, 사람이 각종 게이지(Gauge)를 손으로 들고서, 물건을 직접 측정한다거나, 3차원 좌표측정기 (Coordinate Measuring Machine : CCM)를 이용한 탐침 접촉을 통해 형상을 측정하는 접촉식 계측 방법을 이용하였다. 접촉이 가지는 여러 가지 위험성들을 감안한다면, 비 접촉으로 정밀한 계측을 할 때의 상대적인 좋은 점이 여러 가지 생길 것이다. 특히 현대 산업의 생산체계에서 요구되는 삼차원 형상측정 기술(3-D Profile Measurement Method)은 반도체 패턴 검사와 같은 수 nm의 마이크로영역에서 인체와 같은 수백 mm 영역까지 매우 광범위 하게 적용되고 있다. 그중에서 기계가공분야는 정밀도와 대량 생산성을 피하면서, 자동화 기술의 급진적인 발전이 이루어지고 있고, 그와 더불어 정

밀기계 부품의 품질 검사 및 개선 등을 위한, 3차원 표면현상측정 기술의 필요성이 나날이 증대되고 있다. 이러한 다양한 분야에서 요구를 만족 시킬 수 있는 비 접촉 3차원 형상측정 방법이 활발히 연구되고 있으며, 여기에는 빛의 가간섭성을 이용한 피조간섭계(Fizeau Interferometer), 층밀리기 간섭계(Lateral Shearing Interferometer, LSI), 백색광 간섭계(White-light Scanning Interferometer, WSI), 모아레(Moire) 방식 등 다양하게 존재한다. 이런 광학을 이용한 삼차원 측정 방법은 접촉식 측정의 단점을 해결할 뿐 아니라 고속·고정밀도의 측정이 가능하게 된다.

본 연구는 광학식 비 접촉 삼차원 형상측정방법으로, 색 정보를 이용한 단순하고 빠른 측정 방법을 소개한다. 상세하게는 고안된 프리즘 광학 측정 장치를 이용해서 높이 정보를 포함하는 가시스펙트럼을 임의의 물체에 투사하고, 상기 물체에 분포하는 색 정보를 감지하여 높이 정보를 실시간으로 측정하는 방법이다. 여기서 색은 약 780-390nm의 파장내에 있는 가시광선으로 고유의 휴(hue)값을 갖고 있다. 이를 좀 더 자세히 보면 백색광을 파장분리수단인 프리즘에 투사하면 파장에 따른 굴절의 차이로

인해 각 파장별로 분리된 빛이 출사된다. 이때 출사되는 빛에 임의의 물체를 두고 그 상단에 라인 CCD 카메라를 설치하면 라인 CCD 카메라의 감지영역에 어떠한 파장이 감지되는지를 통해 물체의 높이정보를 추출할 수 있게 된다. 본 연구의 주요 목적은 실시간으로 측정물의 3차원 형상을 측정할 수 있는 새로운 광학 측정시스템을 구성하여, 검출수단의 설치 위치를 측정물의 형태에 가장 최적의 위치에 설치함으로써, 최적의 측정결과를 얻을 수 있도록 하는데 있다. 이와 더불어 수십 밀리미터 이하의 높이 분포를 갖는 물체의 높이 정보를 추출하기 위한, 측정 알고리즘을 제안하였다.

## 2. 원리

### 2.1 측정 원리

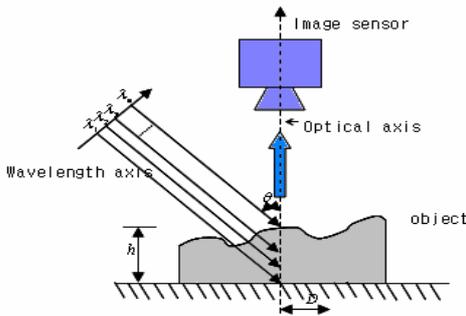


Fig. 1 Optical geometry of the measuring system

본 연구에서는 색이 가지는 고유값을 이용한다. 빛을 투사할 때 시편에 반사되어 획득할 때의 픽셀 값을 사용하여 산출된 휴(hue) 값을 구한다. 각 픽셀 값에는 하나의 파장이 대응하게 되며, 시편의 높이에 따라 빛을 투사하면 얻어지는 휴(hue) 값은 변화하게 된다.

Fig.1에서는 측정물의 임의 위치의 높이 정보를 추출하는 기본 원리를 간략히 설명한다. 그림을 보면 수십 um에서 수십 mm의 높이 분포를 가진 측정물이 있고, 광축과 일정한 각도로 기울어진 다 파장을 갖는 빛을 물체에 수직광축과  $\theta$ 의 각도로 측정물에 조사하게 된다. 상기 파장대가 가시광선 영역이라면 레인보우 패턴(Rainbow pattern)으로 보여질 것이다. 조명광의 파장 분포의 수는 측정물의 상태에 따라 증가하거나 감소될 수 있다. 물체에 의해 반사된 빛이 영상센서로 획득하게 될 때, 실제 획득하게 되는 값은 붉은색(R), 초록색(G), 푸른색(B)의 분포 값을 대표 값으로 받게 된다. 본 논문에서는 R, G, B의 분포를 하나의 값으로 표현할 수 있는 휴

(hue) 값을 적용한다.

Fig.1에서 일정한 폭을 통해 다 파장의 조명 광이 물체에 있어서 Z축 상의 임의의 점 P에 조사된다고 하면 이점에서의 색 분포는 다음과 같이 표현된다

$$P = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서 R, G, B는 컬러영상센서를 이용하여 획득하는 점P에서의 붉은색, 초록색, 푸른색의 광강도(Intensity) 값이다. 점 P와 동일한 광 강도를 가지는 색 점(achromatic point) A는 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \end{pmatrix} \quad i = (R + G + B)/3 \quad (2)$$

여기서 붉은색은 다음과 같이 표현된다.

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

식(1)-(3)을 이용하여 점 P에서의 휴 값 H는 다음과 같이 표현된다.

$$H = \cos^{-1} \left[ \frac{\langle P - A, R - A \rangle}{(|P - A|)(|R - A|)} \right] \quad (4)$$

$\langle \rangle$ 는 스칼라 곱(scalar product)를 의미한다.

상기 P점에서 계산된 휴 값 H와 물체의 높이 Z는 식(5)의 함수관계로 표현된다.

$$Z = f(H) \quad (5)$$

함수형태에는 조명 광 형태, 사용파장영역, 측정 물체의 상태 및 실험치에 따라 일차식 혹은 다항식으로 표현될 수 있으며, 식(5)에서 확인 할 수 있듯이 물체의 높이는 단지 휴 값에 의해 결정되며, 각도에 대해 어떠한 제한 조건도 없다는 것을 확인 할 수 있다.

조사하는 광원으로는 여러 개의 단일 파장 광을 합성하여 사용하거나 텅스텐 할로겐램프와 같은 일반적인 백색광을 무지개 색과 같이 분리하여 사용할 수 있다.

### 2.2 프리즘 광학계

Fig.2(a)와 Fig.2(b)은 백색광을 시편에 투사할 때, 색을 분리하여 조명광을 만들고, 이를 3색 라인

CCD 카메라를 사용하여 측정 하는 방법을 기술하였다. Fig.2(a)에서 빛의 파장을 분리하기 위하여 프리즘에 백색광을 입사시키면 파장에 따른 굴절의 차이가 생겨 빛이 파장별로 출사가 된다. 프리즘을 통과하는 빛에 측정 물체를 놓고 그 상단에 3색 라인 CCD 카메라를 설치하면 CCD 카메라에 감지되는 파장을 분석함으로써 물체의 높이 정보를 추출하게 된다.

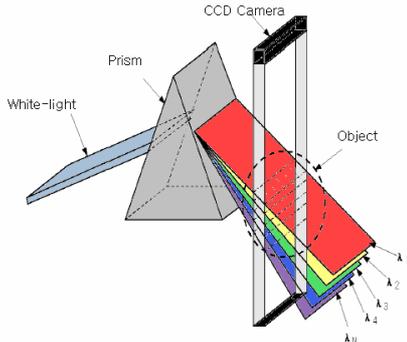


Fig. 2(a) The measuring system of prism

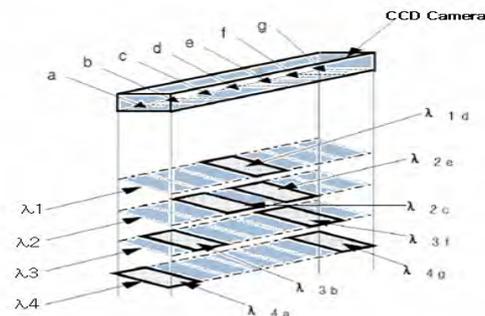


Fig. 2(b) The CCD camera use

Fig.2(b)에서 CCD 카메라가 파장영역에서 감지하는 원리를 나타내고 있다. CCD 카메라의 감지영역이 a부터 g까지의 일곱 가지의 화소(cell)로 구성되었다고 가정을 하고, 그에 대응하는 물체의 영역도 일곱 가지로 구분한다. 높이차가 있는 계단형의 물체를 CCD 카메라가 감지 할 수 있는 위치에 배치를 해둔다면 카메라의 d 부분의 감지영역에서는 첫 번째 파장영역이 감지되게 되고, c와 e의 감지영역에서는 두 번째의 파장영역이 감지 되게 된다. 이와 같은 원리로 세 번째, 네 번째 파장영역도 그와 대응 되는 카메라 감지영역에서 감지되므로, 감지된 파장으로부터 hue(색) 값을 산출할 수 있게 된다. 이러한 이차원 영역의 높이정보를 일축으로 시편을 움직이면서, 연속하게 측정하게 된다면, 추출된 정보를 합성하여 삼차원 영역의 높이정보를 얻을 수 있게 된다.

### 2.3 시스템의 구성

광학 측정 시스템의 구성도와 실험 장치의 전체 구성을 Fig.3와 Fig.4에 나타내었다. 광원으로는 150W의 할로겐램프를 사용하였고, 빛의 산란을 위해 분산프리즘을 조명렌즈(Illumination Lens) 앞부분에 위치하게 하였다. 이미지 처리를 위해 프레임그래버(Frame Grabber)는 Matrox사의 Metro II/Camera link를 사용하였다. 볼 스크류 스테이지는 한 방향으로 움직이며 시편을 스캔 할 수 있게 하였다. 조명렌즈(Illumination Lens)는 경통 안에 열한 개의 렌즈를 조합하여, 처음 광원에서 나온 빛이 프리즘에 통과하기까지 초점을 일정하게 유지시키고, 배율이 변하지 않게 하였다. 프리즘을 통과한 빛이 시편에 투사될 때, 실린더 렌즈를 사용하여, 빔 폭의 두께가 원형렌즈와 달리 얇으면서 일정하고, 레이보우 패턴이 유지 되도록 하였다.

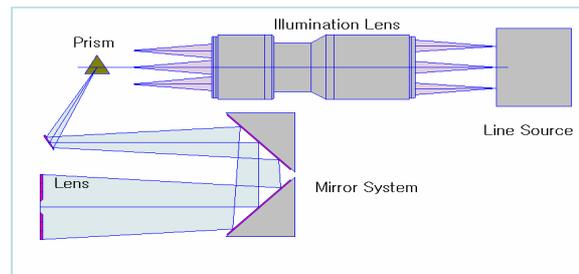


Fig. 3 Configuration of the optical system

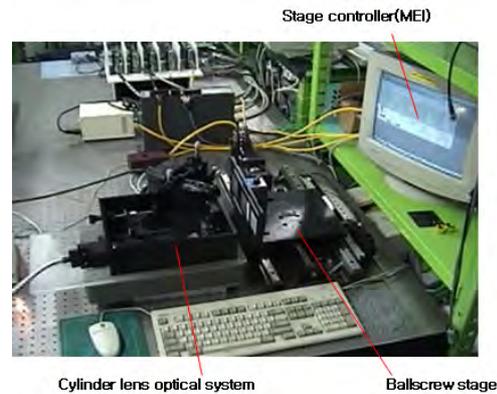


Fig. 4 Experimental Setup

### 2.4 삼차원 형상의 획득

고안된 프리즘 광학계를 이용하여 시편을 측정하는데 있어서, 색 정보를 이용한 3D 검사 기술은 미리 위상이동이 되어 있는 R, G, B를 이용하기에 위상이동을 위해 정지 할 필요가 없고, 등속 구동으로 스캔이 가능하다. 또한, 제작된 프로그램은 삼차원 형상을 얻기 위한 3장의 영상을 동시에 얻기 때문에

검사 효율이 높고 등속 구동이 가능하므로 검사 속도의 극대화를 도모할 수가 있다.

Fig. 5는 R, G, B의 90도 위상 이동 영상을 만들기 위한 영상 출력 절차를 나타내고 있다. 처음 CCD 영상 출력을 받은 후, R, G, B의 칼라 영역 변환(R,G,B Color Space Transform) 단계에서 변환 행렬을 조정하여, 레인보우 패턴(Rainbow Pattern)으로부터 R, G, B 위상 이동 영상을 얻어낼 수가 있다.

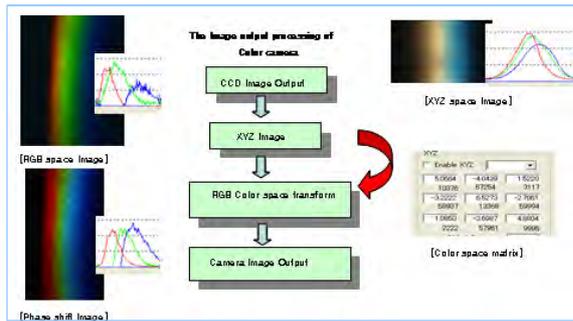


Fig.5 R,G,B Phase shift

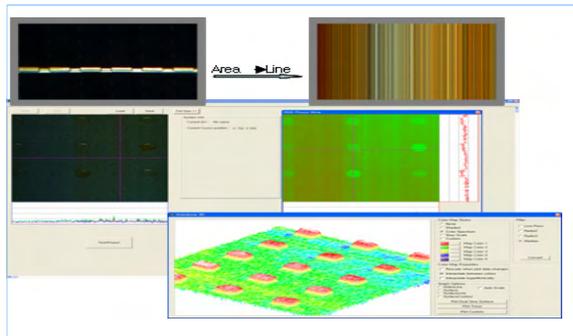


Fig.6 The Image Processing

연구를 진행하기 위해 제작된 프로그램을 Fig.6에서 간략히 나타내고 있다. 영상을 얻기 위해서 사용된 된 카메라는 라인(line)형과 면적(area)형 두 가지 모두 측정을 할 수 있는 기능이 있다. 라인(line)형으로 측정하기 위해 우선 면적(area)형에서 조사된 빛을 실시간으로 받아들이면서 실제 측정에 필요한 라인 좌표의 위치를 알아보게 된다. 그 후에 라인형으로 변환을 하여 측정표면과 위상, 삼차원 화면까지 한번에 얻을 수 있게 된다.

### 3. 실험 및 결과

본 논문에서는 프리즘 광학계를 이용한 실험에서, 최종적으로 195um의 고정단차 시편의 삼차원 형상을 얻었고, 이를 수행하기 위한 특성실험을 하였다. 시편은 칸포컬(confocal)을 사용하여 단차가 195um임을 확인하였다. Fig.8은 백색광을 Fig.5에서 보인 프로그램을 이용하여 R, G, B 90도 위상이동

시킨 것이다.

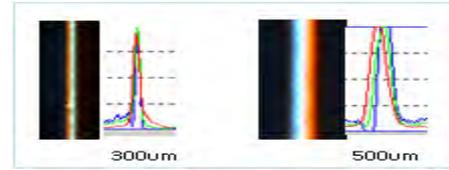


Fig.7 R,G,B Phase shift processing

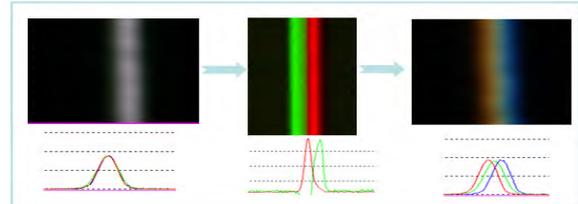


Fig.8 Rainbow pattern

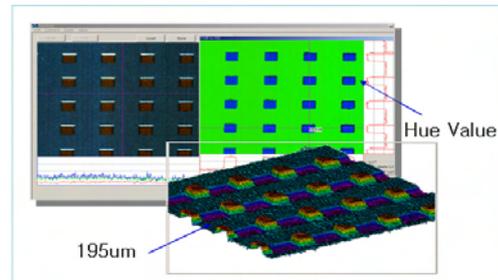


Fig.9 Measurement result

레인보우 패턴을 비교하여 보면 500um에서 R, G, B의 위상이동이 되어 분리가 잘 되어있다. 300um에서도 백색광을 분리하여 레인보우 패턴을 만들 수 있지만, 그에 따른 과정이 매우 어려워 500um에서 실험을 진행하였다. 이는 프리즘에 빛이 입사 될 때 입사각이 모든 빛에 대하여 수평이 아님으로 500um 이상의 레인보 없이 원만한 패턴 일 때 프리즘을 통과한 빛의 파장이 혼합되지 패턴(pattern)을 얻을 수 있기 때문이다. Fig.9는 라인 CCD(Line CCD)을 사용하여 195um의 고정단차 시편을 측정된 것이다.

### 4. 결론

본 연구는 프리즘 광학계를 제안, 구성하였다. 광학계에 실린더 렌즈를 사용하여 프리즘을 통과한 빛이 시편에 투사 될 때, 빔 폭의 두께가 원형렌즈와 달리 얇고, 레인보우 패턴이 유지 되도록 하였다. 색 정보를 받아 실시간으로 삼차원 형상측정을 위한 프로그램을 제작하고, 이에 따른 실험을 진행하였다.

광학적 측정 방법으로 R, G, B의 위상을 90도씩 미리 이동하고 측정을 진행하기 때문에 위상이동을 위해 따로 정지할 필요가 없다. 빔 폭을 조절해서 실험을 진행한 결과 500um의 빔 폭에서 원하는 패턴을 얻을 수가 있었다. 업체에서 제공한 시편을 가지고

측정을 진행 했을 때 195um 고정단차 시편 측정이 가능했다.

이렇게 개발된 시스템은 물체의 표면형상 측정에 있어, 등속 구동이 가능하므로 검사 속도가 높아 효율을 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다.

### 참고문헌

1. Weiyi Liu, Zhaoqi Wang, Guoguang Mu and Zhiliang Fang "Color-coded projection grating method for shape measurement with a single exposure" Applied Optics, Vol.39, No.20, pp. 3504-3508, 2000
2. E. Hasman, V. Kleiner "Color-coded optical profilometry with  $>10^6$  resolved depth steps" Applied Optics, Vol. 40, No. 10, PP. 1609-1616
3. Gerd Hausler and Dieter Ritter "Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation" Applied Optics, Vol. 32, No. 35, pp. 7164-7169
3. H. Fan, H. Zhao, and Y. Tan, "Automated three-dimensional surface profilometry using dual-frequency optic fiber phase shifting method" Opt. Eng. 36, pp. 3167-3171, 1997
4. S. Tang and Y. Hung, "Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes" Applied Optics, Vol 29, No. 19, pp. 3012-3018, 1990
5. Liu, W.-y. ; Yu, D.-y ; Hou, Q.-h. "3-D Dynamic Object Shape Measurement by Using Color-coded Method" Optoelectronics Laser, Vol. 13, No. 2, pp. 169-172, 2002