

# 다중 레이저 슬릿광을 이용한 하이브리드 초점 방법

김경범\*(충주대학교 항공기계설계학과), 신영수(충주대학교 대학원 항공기계설계학과)

## A Hybrid Focus Method Using Multiple Laser Slits

Y. S. Shin(Aero. Mech. Design. Eng., CJU), G. B. Kim(Aero. Mech. Design. Eng., CJU)

### ABSTRACT

A hybrid focus method with multiple laser slits has been newly proposed and it is based on the integration of DFD and DFF. Rough depth information is estimated using DFD equipped with multiple laser slits, and then DFF is applied to only each specific depth range using the depth information resulting from DFD. The proposed hybrid method gives more accurate results than DFD and DFF, and faster measurement than DFF. Its performance has been verified through experiments of calibration blocks with sharp depth discontinuity.

**Key Words** : DFD(depth from defocus), DFF(depth from focus), Hybrid focus method(하이브리드초점방법), Focus measure (초점정도), Multiple laser slits(다중레이저슬릿광)

### 1. 서론

물체의 삼차원 측정 방법에는 프로브를 활용한 접촉식 방법과 광학을 이용한 비 접촉식 방법이 있다. 광학을 이용한 방법에는 초점을 이용한 것과 빛의 간섭을 이용한 것으로 나눌 수 있고, 초점을 이용한 방법에는 크게 DFD(depth from defocus)와 DFF(depth from focus)로 나눌 수 있다. DFD는 측정물의 깊이 방향에 따른 번짐 정도를 가지고 깊이를 추정하는 방법으로 2개 이하의 영상을 필요로 하며, 이 방법은 측정 속도는 빠르지만 낮은 측정 정확도를 가진다.<sup>1-3</sup> DFF는 측정물의 깊이 방향으로 이동하며 일련의 영상을 취득한 후, 초점척도(focus measure)를 이용하여 픽셀 당 초점이 최대가 되는 위치를 검색하는 방법으로 10여장 이상의 많은 영상을 필요로 하며, 이 방법은 측정 속도는 느리지만 측정 정확도는 DFD보다 우수하다.<sup>4</sup>

본 논문에서는 DFD와 DFF의 장점을 갖춘 하이브리드 시스템을 구축하기 위해 다중 레이저 슬릿광을 이용한 DFD로 대략적인 깊이 추정 후, 추정된 깊이 정보를 DFF로 더욱 정확하게 측정하는 방법을 제안하였다. 제안된 DFD와 DFF를 이용한 하이브리드 초점 방법의 검증은 계단 형태 블록게이지의 영

상을 통해 수행되었다.

### 2. 광학계의 기본 이론

일반적인 얇은 렌즈계의 광로를 Fig. 1에 나타내었다.

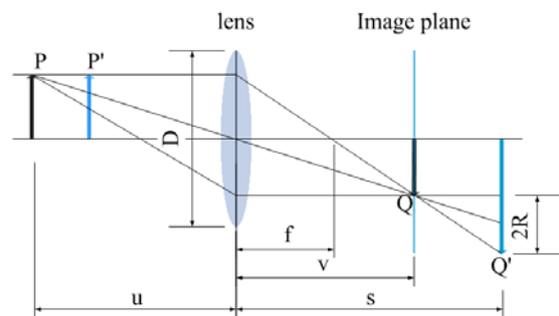


Fig. 1 Scope modelling and blur circle

렌즈의 초점거리를 f, 물체와 렌즈 사이의 거리를 u, 렌즈와 상의 거리를 v라 하면, 다음과 같은 렌즈 공식이 성립하게 된다.

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

P에서 출발한 빛은 렌즈를 지나 초점이 맞는 경우 Q에 상이 맺히게 된다. 초점이 맞지 않는 경우는 Q'에 상이 맺히게 되며, 이때는 번짐이 일어나 점이 아닌 원의 형태로 맺히게 된다. 이 원을 번짐원(blur circle)이라고 하며, 이 원의 지름은 광학계의 초점거리, 물체와 렌즈와의 거리, 맺히는 상과 렌즈와의 거리 등 여러 가지 변수에 따라 달라진다. 번짐 원 R은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{qD}{2} = \frac{sD}{2} \left[ \frac{1}{v} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right] \quad (2)$$

일반 광학계에서 초점거리와 구경 조리개가 일정하다는 것을 고려하면, 번짐 원의 반지름은 물체와 렌즈와의 거리, 그리고 상과 렌즈와의 거리의 함수라는 것을 알 수 있다.

### 3. 하이브리드 초점 방법

#### 3.1 레이저 슬릿광을 이용한 DFF

Fig. 2와 같이 기준면에 초점을 맞춘 상태에서 카메라를 고정시키고 레이저를 물체위에 조사하면 조사된 레이저는 물체의 높이에 따라 번짐이 생겨 선폭이 다른 번짐 영상으로 나타난다. 본 논문에서는 다중 레이저 슬릿광을 물체 위에 조사하여 레이저 선폭의 변화를 측정함으로써 깊이를 추정하는 방법을 제안하였다. 이것은 한 장의 이미지를 취득하여 깊이를 추정하는 방법으로 라인 빔의 수가 많을수록

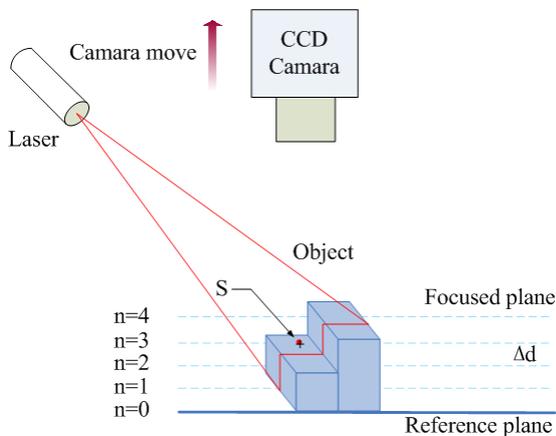


Fig. 2 A measurement system

전 영역에 걸쳐 보다 정밀하게 측정을 할 수 있다.

레이저는 물체의 높이에 따라 산란하는 정도가 달라지고, 레이저의 라인 방향을 x축, 라인에서 수직인 방향을 y축이라 할 때, x축에 따른 선폭의 변화가 일정치 않으며, 레이저의 특성상 초점이 맞는 평면의 상하로 갈수록 레이저 선폭이 커지므로, 본 논문에서는 물체의 깊이에 따른 선폭의 변화를 비선형으로 가정하고, 보정 테이블을 사용하여 깊이를 추정하였다. 보정 테이블은 측정물의 깊이 방향으로 일련의 영상을 취득한 후, 영상 내의 레이저 선폭을 정확하게 추출하기 위한 영상처리를 사용하여 생성된다. 이를 위한 영상처리 방법은 평활화 필터링 한 후, 임계값(threshold)을 설정하여 이진화 시키고, 팽창, 침식 처리를 통해 잡음을 제거한다. 잡음이 제거된 영상으로 각 레이저의 x축 픽셀 라인에 따른 선폭을 추출하여 보정 테이블을 만든다. 보정 테이블의 측정 분해능은 보정 영상 간의 간격으로 결정할 수 있다.

#### 3.2 DFF

Fig. 2에서 물체를 고정하고 센서와 렌즈를 고정된 카메라를  $\Delta d$ 만큼 이송하며 영상을 취득할 때, 물체 위의 한 점 s에 초점평면이 접근 할수록 s는 번짐이 없는 깨끗한 점으로써 고주파수 성분을 갖게 되고, 초점평면이 멀어질수록 번짐이 커져 저주파수 성분을 갖게 된다. 물체 위의 한 점 s를 영상에서 하나의 픽셀이라 할 경우, 취득한 모든 영상에서 각각의 픽셀에 대한 초점정도를 측정하고, 초점정도가 가장 높을 때의 렌즈 이동거리로써, 높이  $d$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = n\Delta d \quad (3)$$

초점정도는 각 픽셀에 대한 영상 높이를 구하기 위해서 어떤 영상평면의 픽셀이 가장 초점이 맞았는지 판별 할 수 있는 척도로서, 본 논문에서는 고주파 필터링한 영상을 얻기 위해 Nayar가 제안한 SML(sum-modified-laplacian)연산자를 이용하였다.<sup>5</sup> 라플라시안 함수는 대부분의 환경에서 잡음 특성에 가장 강인하기 때문에 일반적으로 사용되고 있다.

SML은 수정된 라플라시안을 사용한 것으로 라플라시안 보다 항상 크거나 같은 값을 가지므로 실제의 적용에 있어서 순차적인 근사에 의해 아래의 식과 같이 얻어진다.

$$ML(x, y) = |2I(x, y) - I(x-i, y) - I(x+i, y)| + |2I(x, y) - I(x, y-i) - I(x, y+i)| \quad (4)$$

여기서,  $I(x, y)$ 로서 영상 밝기 함수이고,  $i$ 는

미분값을 구하는데 사용되는 영상 픽셀 사이의 간격 (interval)이며 1로 설정한다.

최종적으로, 영상 각 점의 초점정도  $F(i, j)$ 는 수정된 라플라시안 값들의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다. 본 논문에서는 선형배율보정을 통한 DFF방법을 사용하였다.<sup>6,7</sup>

$$F(i, j) = \sum_{x=i-N}^{i+N} \sum_{y=j-N}^{j+N} ML(x, y), ML(x, y) \geq T \quad (5)$$

### 3.3 하이브리드 초점 방법

본 연구는 DFD와 DFF의 장점을 갖춘 빠르고 정확한 측정을 위하여 Fig. 3과 같이 DFD를 통한 빠른 측정으로 대략적인 물체의 높이 데이터를 가지고, DFF를 통해 보다 정확한 높이를 추정하는 방법이다.

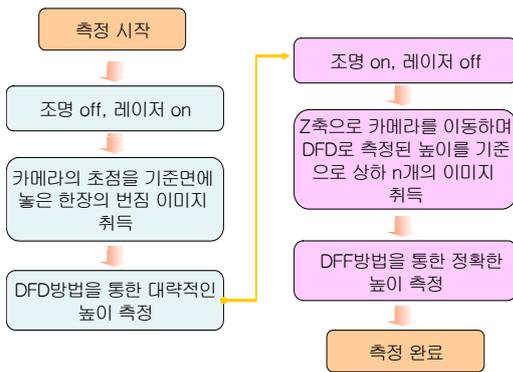


Fig. 3 A proposed hybrid focus method

## 4. 실험

### 4.1 실험 장치

측정시스템은 윈도우즈 기반의 자동 측정 시스템으로 직교로봇의 위치제어 및 영상처리에 의한 측정 소프트웨어로 구현하였다. 하드웨어 구성은 Fig. 4와 같이 위치 정밀도  $\pm 0.02\text{mm}$ 인 X-Y-Z직교로봇, 650nm 파장대의 레이저(3-Laser Technology: P16-655-3), CCD카메라(Sony: HC-HR70C), 렌즈(Optem: Zoom 70XL), 프레임 그래버는 Matrox Meteor II 보드를 사용하였고, 조명은 렌즈 앞에 Halogen 링 조명을 설치하였다.

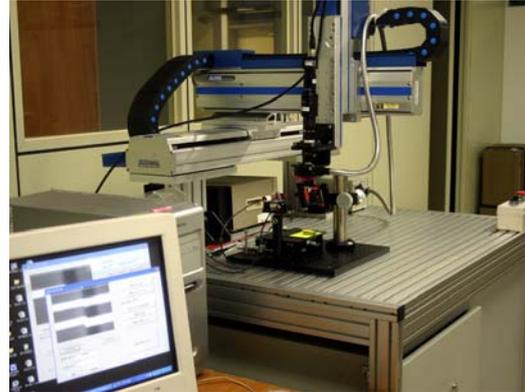


Fig. 4 A experiment device

### 4.2 결과

본 논문에서는 삼차원 형상 측정을 위해 깊이 5, 10, 15, 20mm인 블록게이지를 사용하여 수행하였다. 영상의 해상도는  $1024 \times 768$ 이고, 영상의 한 픽셀당 거리는  $0.0094\text{mm}/\text{pixel}$ 이다. 측정은 5-10mm, 5-15mm, 5-20mm의 계단형태로 나눠서 하였다. Fig. 5은 DFD의 측정영상을 나타낸 것으로 측정물체의 높이에 따라 선폭이 다른 것을 알 수 있다. Fig. 6은 계단형태 블록게이지의 깊이 값을 나타낸 것으로 세 번의 측정 결과를 하나의 그래프에 나타내었다. 그래프는 DFD와 DFF 그리고 하이브리드 초점 방법의 경우를 나타내었다. 그래프에서 DFD의 경우 보정테이블의 영상 간격이  $0.5\text{mm}$ 이므로 측정 분해능도  $0.5\text{mm}$ 로 매우 낮아 깊이 값이 각진 형상으로 보이는 것을 알 수 있다. 각 방법에 따른 측정시간은 Table 1에 나타내었고, 전체 영역에서의 깊이 평균과 평균 제곱근 오차 (root mean square error)를 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 측정결과, 측정시간은 하이브리드 초점 방법이 DFF 보다 단차가 커질수록 단축되었고, 측정 정확도는 하이브리드 측정 방법이 DFD에 비해 9.6%, DFF에 비해 1.2% 향상 되었다. 또한 제안된 방법은 평균 제곱근 오차에 대해 하이브리드 초점 방법이 DFD에 비해 1.36%, DFF에 비해 0.49% 감소한 것을 알 수 있다. 이상의 실험결과로부터 하이브리드 초점 방법은 DFF의 단점인 측정속도를 개선할 뿐 아니라 DFD와 DFF보다 더욱 정확도가 향상되는 것을 알 수 있다.

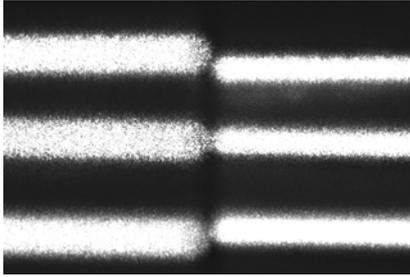


Fig. 5 Measured image of DFD

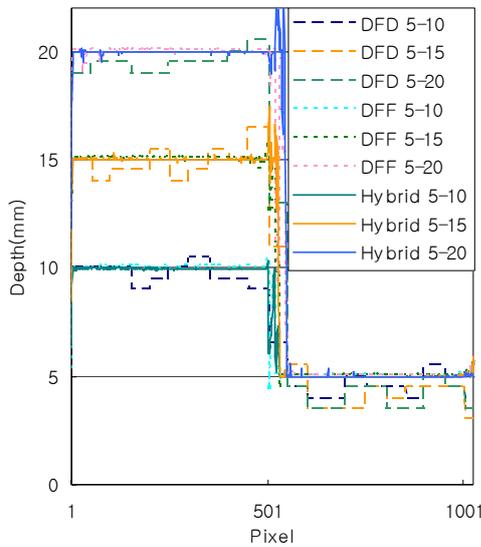


Fig. 6 Comparisons of measured depths

Table 1 Comparisons of measuring times

| Depth (mm) | Measured times(sec) |       |        | time(DFF) (sec) |
|------------|---------------------|-------|--------|-----------------|
|            | DFD                 | DFF   | Hybrid |                 |
| 5-10       | 1.27                | 32.55 | 30.62  | 1.93 ↓          |
| 5-15       | 1.36                | 51.09 | 31.79  | 19.3 ↓          |
| 5-20       | 1.16                | 63.36 | 32.19  | 31.17 ↓         |

Table 2 Comparisons of measured depth averages

| Depth (mm) | Measured depth averages (mm) |       |        | accuracy (DFD) (%) | accuracy (DFF) (%) |
|------------|------------------------------|-------|--------|--------------------|--------------------|
|            | DFD                          | DFF   | Hybrid |                    |                    |
| 5          | 4.51                         | 5.07  | 4.99   | 9.6 ↑              | 1.2 ↑              |
| 10         | 9.74                         | 10.10 | 10.01  | 2.5 ↑              | 0.9 ↑              |
| 15         | 14.83                        | 15.14 | 15.05  | 0.8 ↑              | 0.6 ↑              |
| 20         | 19.48                        | 20.13 | 20.04  | 2.4 ↑              | 0.45 ↑             |

Table 3 Means of depth errors

| Depth (mm) | RMS(%) |      |        | error (DFD) (%) | error (DFF) (%) |
|------------|--------|------|--------|-----------------|-----------------|
|            | DFD    | DFF  | Hybrid |                 |                 |
| 5-10       | 0.69   | 0.42 | 0.31   | 0.38 ↓          | 0.11 ↓          |
| 5-15       | 1.59   | 0.59 | 0.35   | 1.12 ↓          | 0.24 ↓          |
| 5-20       | 1.98   | 1.11 | 0.62   | 1.36 ↓          | 0.49 ↓          |

## 5. 결론

본 논문에서는 3차원 형상 측정을 위해 다중 레이어를 이용한 DFD 및 DFF 기반의 하이브리드 초점 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 DFD와 DFF의 장점은 더욱 개선시키고 단점을 보완할 수 있는 방법이다. 제안된 방법의 검증에 대해 계단형태 블록게이지의 측정결과, 다음과 같은 결론을 얻었다. 측정 시간은 단차가 클수록 DFF에 비해 단축되었고, 정확도는 DFD에 비해 9.6%, DFF에 비해 1.2% 향상되었으며, 오차는 DFD에 비해 1.36%, DFF에 비해 0.49% 감소한 것을 알 수 있다.

## 후기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(R05-2004-000-10512-0)

## 참고문헌

1. Park, H. J., Ahn, W. J., "A New Method of Noncontact Measurement for 3D Microtopography in Semiconductor Wafer Implementing a New Optical Probe based on the Precision Defocus Measurement," J. of KSPE, Vol. 17, No. 1, pp. 129-137, 2000.
2. Subbarao M., Surya G., "Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach," Internat J Comput Vision, 13(3), pp. 271-294, 1994.
3. Ovidiu Ghita, Paul F. Whelan, "A Video-Rate Range Sensor Based on Depth from Defocus," Optics and Laser Technology, 33, 167-176, 2001.
4. Grossman, P., "Depth from Focus," Pattern Recognition Letters, 5, pp. 63-69, 1987.
5. Shree K. Nayar and Yasuo Nakagawa, "Shape from Focus," IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, No. 8, 1994.
6. Kim, G. B., Shin, Y. S., "A Measurement Method of Surface Morphology Based on Depth-from-Focus with Magnification Variations of Optical System," Proc. of KSPE Autumn Annual Meeting, Vol.21, No. 10, pp. 1500-1503, 2004.
7. Kim, G. B., Shin, Y. S., "A Measurement Method of Three-Dimensional Surface Morphology Based on Depth-from-Focus through Linear Magnification Calibration," J. of KSPE, Vol. 22, No. 9, pp. 115-122, 2005.