

# 깊이불연속 형상 측정을 위한 레이저 응용 하이브리드 초점법

김경범#, 신영수\*, 문순환\*\*

## A Laser-Applied Hybrid Focus Method for the Measurement of a Surface Morphology with Depth Discontinuity

Gyung Bum Kim<sup>#</sup>, Young Su Shin<sup>\*</sup> and Soon Hwan Moon<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

A hybrid focus method with multiple laser slits is newly proposed for the measurement of surface morphology with depth discontinuity, and it is based on the integration of DFD and DFF. Rough depth information is estimated through calibration tables which are constructed by DFD with multiple laser slits, and then DFF is applied to only each specific depth range using the rough depth information resulting from DFD. The proposed hybrid method gives more accurate results than DFD and DFF, and faster measurement than DFF in the vicinity of depth discontinuity. Its performance is verified through experiments of calibration blocks with sharp depth discontinuity.

**Key Words** : DFD(비초점법), DFF(초점법), Focus measure(초점정도), Laser-applied hybrid focus method(레이저 응용하이브리드초점법), Multiple laser slits(다중 레이저 슬릿)

### 1. 서론

기술과 산업이 고도로 발전함에 따라 그 생산품을 측정하는 기술 또한 급속하게 발전되고 있다. 최근, 기계부품만이 아니라 반도체, 디스플레이, 정보통신과 같은 IT/BT 산업이 발전함에 따라 특수 공정에 의해 가공된 미세패턴의 3차원 형상을 측정하기 위한 수요가 증대되고 있으며, 이 경우 요구되어지는 정밀도는 나노미터의 수준에 이르고 있다. 이를 위한 접촉 및 비접촉식 방법이 있는데, 삼

차원 측정은 주로 광학 기반 머신비전(machine vision)에 의해 이루어진다. 머신비전에 의한 측정은 여타 접촉식 측정방법과 비교하여 측정 속도가 매우 빠르고, 복잡한 형상의 경우에도 자동 측정이 용이하며, 프로브(touch probe)와의 접촉으로 인해 발생하기 쉬운 피측정물 표면의 긁힘이나 오염 등을 방지할 수 있고, 탄소성 변형이 쉬운 연성재료의 표면이나 박막의 경우에도 정확한 측정을 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>1,2</sup>

머신비전을 이용한 삼차원 측정 방법에는 광축

접수일: 2006년 1월 12일; 게재승인일: 2006년 8월 1일  
# 교신저자: Chungju대학교 항공기계설계학과  
\* (주) 인텍플러스  
\*\* 주성대학 테크노정보과  
E-mail kimgb@chungju.ac.kr Tel. (043) 841-5378

심법, 슬릿빔주사법, 영사식모아레법, 백색광주사 간섭법, 스테레오비전, DFF(depth from focus), DFD(depth from defocus) 등의 다양한 형태의 측정 방법이 존재하는데, 각기 다른 장점과 한계성을 가지고 있다.<sup>2</sup> 본 연구에서는 깊이불연속에서의 효율적인 측정을 위해 레이저 응용 하이브리드 초점 기반 DFD와 DFF의 통합시스템을 시도하고자 한다. DFD는 측정물의 깊이 방향에 따라 대상물의 비초점된 번짐 정도를 가지고 깊이를 추정하는 방법으로 2개 이하의 영상을 필요로 하며, 이 방법은 측정 속도는 빠르지만 낮은 측정 정확도를 가진다.<sup>3-9</sup> DFF는 측정물의 깊이 방향으로 이송하며 일련의 영상을 취득한 후, 초점척도(focus measure)를 이용하여 픽셀 당 초점이 최대가 되는 위치를 검색하는 방법으로 10여장 이상의 많은 영상을 필요로 하는데, 이것은 측정 속도는 느리지만 측정 정확도는 DFD보다 우수하다.<sup>10-13</sup>

본 논문에서는 깊이불연속에서의 정확하고 빠른 측정을 위해 DFD의 빠른 측정속도와 DFF의 높은 측정 정확성의 장점을 갖춘 레이저 응용 하이브리드 시스템을 시도하고자 한다. 제안된 방법은 다중 레이저 슬릿광을 물체 위에 조사하여 레이저 선 폭의 변화를 측정함으로써 보정테이블을 통해 깊이를 추정하는 방법으로써, 한 장의 영상을 필요로 하며 라인 빔의 수가 많을수록 전 영역에 걸쳐 보다 정밀하게 측정 할 수 있다. 또한, 다중 레이저 슬릿광을 이용한 DFD로 대략적인 깊이 추정 후, 그 깊이 정보 근처에서 선형배율보정을 통한 DFF로 더욱 정확하게 측정하는 방법을 제안하였다.<sup>14</sup>

제안된 하이브리드 초점법의 검증은 깊이불연속 특성을 갖는 계단 형태 블록게이지의 영상을 통해 수행되었다. 대상물체의 측정결과, 물체의 단차가 커질수록 제안된 하이브리드 초점법은 DFF보다 측정시간이 단축되었고, 추정된 깊이 정확도는 DFD 및 DFF보다 향상됨을 보여 그 효용성을 입증하였다.

## 2. 광학계의 기본 이론

렌즈의 초점거리를  $f$ , 물체와 렌즈 사이의 거리를  $u$ , 렌즈와 상의 거리를  $v$ 라 하면, 다음과 같은 렌즈 공식이 성립하게 되고 일반적인 얇은 렌즈계의 광로는 Fig. 1에 나타내었다.

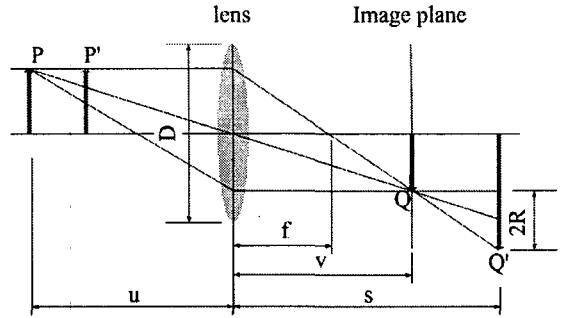


Fig. 1 Scope modelling and blur circle

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

P에서 출발한 빛은 렌즈를 지나 초점이 맞는 경우 Q에 상이 맺히게 된다. 초점이 맞지 않는 경우 P'는 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 초점 거리, 물체와 렌즈와의 거리, 맺히는 상과 렌즈와의 거리 등 여러 가지 변수에 따라 달라진다.

$q$ 를 배율이라고 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{2R}{D} = \frac{s-v}{v} = s \left[ \frac{1}{v} - \frac{1}{s} \right] \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 번짐원의 반지름,  $D$ 는 구경 조리개를 통과한 주평면 상의 빛의 지름을 나타낸다.  $v$ 는 렌즈와 Q사이의 거리,  $s$ 는 렌즈와 Q'사이의 거리를 나타낸다.

식 (1)과 (2)로부터 번짐 원의 반지름은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{qD}{2} = \frac{sD}{2} \left[ \frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right] \quad (3)$$

일반 광학계에서 초점거리와 구경 조리개가 일정하다는 것을 고려하면, 번짐 원의 반지름은 물체와 렌즈와의 거리, 그리고 상과 렌즈와의 거리의 함수라는 것을 알 수 있다. 물체의 깊이 방향의 변화에 의한 상의 위치가 변하지 않는다고 가정하면, 상은 면적과 세기만 변화한다고 할 수 있다. 그러므

로 식 (3)으로부터 물체의 위치와 변집원  $R$ 과의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{m}{u} + c \quad (4)$$

여기서,  $m$ ,  $c$ 는 주어진 카메라 상수를 나타내고,  $m = -\frac{Ds}{2}$ ,  $c = \frac{Ds}{2} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{s} \right)$ 이다.

### 3. 레이저 응용 하이브리드 초점법

#### 3.1 보정 테이블을 통한 대략적 깊이 추정

카메라의 초점을 기준면에 놓은 상태에서 카메라를 고정시키고 레이저를 물체위에 조사하면 조사된 레이저는 식 (4)에서와 같이 물체의 높이에 따라 변집이 생겨 선폭이 다른 변집 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 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 평면에서 상하로 갈수록 레이저 선폭이 커진다. 따라서 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. 그 영상처리는 평활화(smoothing) 필터링 한 후, 임계값(threshold)을 설정하여 이진화 시키고, 팽창(dilation) 또는 침식(erosion) 처리를 통해 잡음을 제거한다.

하이브리드 초점법을 위한 DFD 기반 영상 취득 및 처리는 Fig. 2와 같이 카메라의 초점을 기준면에 놓은 상태에서 한 장의 변집 영상을 취득한 후, 보정 테이블과 동일한 영상처리를 통해 잡음을 제거한다. 여기서, 대략적인 깊이 추정은 잡음이 제거된 영상으로 X축 픽셀 라인에 따른 선폭을 측정하여 보정 테이블로부터 선형보간(linear interpolation)을 통해 수행된다.

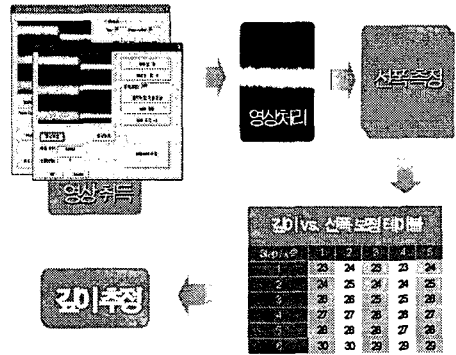


Fig. 2 A depth estimation based on DFD

잡음이 제거된 영상으로 각 레이저의 X축 픽셀 라인에 따른 선폭을 추출하여 보정 테이블을 생성한다. 보정 테이블의 측정 분해능은 보정 영상 간의 간격으로 결정된다.

#### 3.2 DFF 방식

Fig. 3에서 물체를 고정하고 센서와 렌즈를 고정된 카메라를  $\Delta d$ 만큼 이송하며 영상을 취득할 때, 물체 위의 한 점  $s$ 에 초점평면이 접근 할수록  $s$ 는 변집이 없는 깨끗한 점으로써 고주파수 성분을 갖게 되고, 초점평면이 멀어질수록 변집이 커져 저주파수 성분을 갖게 된다. 물체 위의 한 점  $s$ 를 영상에서 하나의 픽셀이라 할 경우, 취득한 모든 영상에서 각각의 픽셀에 대한 초점정도를 측정하고, 초점정도가 가장 높을 때의 렌즈 이동거리로써, 높이  $d$ 를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$d = n\Delta d \quad (5)$$

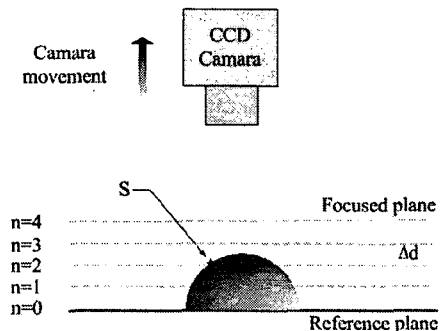


Fig. 3 A depth-from-focus system

초점정도는 각 픽셀에 대한 형상 높이를 구하기 위해서 어떤 영상평면의 픽셀이 가장 초점이 맞았는지 판별 할 수 있는 척도이다. 본 논문에서는 고주파 필터링한 영상을 얻기 위해 Nayar<sup>11</sup>가 제안한 SML(sum-modified-laplacian)연산자를 이용하였다. 라플라시안 함수는 대부분의 환경에서 잡음 특성이 가장 강인하기 때문에 일반적으로 사용되고 있다. SML은 수정된 라플라시안을 사용한 것으로 실제의 적용에 있어서 순차적인 근사에 의해 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$ML(x, y) = |2I(x, y) - I(x-i, y) - I(x+i, y)| + |2I(x, y) - I(x, y-i) - I(x, y+i)| \quad (6)$$

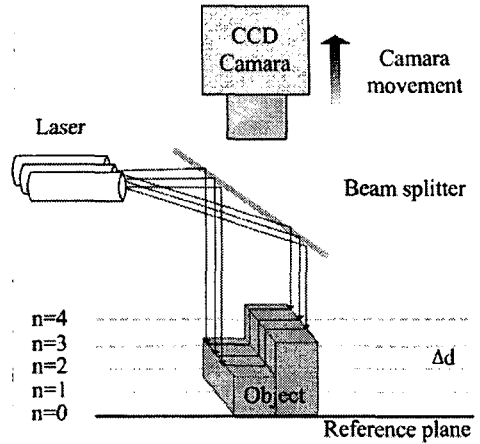
여기서,  $I$ 는  $I(x, y)$ 로서 영상 밝기 함수이고,  $i$ 는 미분값을 구하는데 사용되는 영상 픽셀 사이의 간격(interval)이며 1로 설정된다. 최종적으로, 영상 각 점의 초점정도  $F(i, j)$ 는 수정된 라플라시안 값들의 합으로 다음과 같이 구할 수 있는데,  $T$ 는 임계값을 의미한다. 본 논문에서는 보정데이블을 통한 대략적 깊이 추정후, 선형배율보정을 통한 DFF방식<sup>12,13</sup>을 사용하여 하이브리드 초점법을 개발하고자 한다. 이 DFF는 배율의 변화를 고려한 영상 보정을 통해 다른 방식에 비해 우수한 결과를 주는 방식이다.

$$F(i, j) = \sum_{x=i-T}^{i+T} \sum_{y=j-T}^{j+T} ML(x, y), ML(x, y) \geq T \quad (7)$$

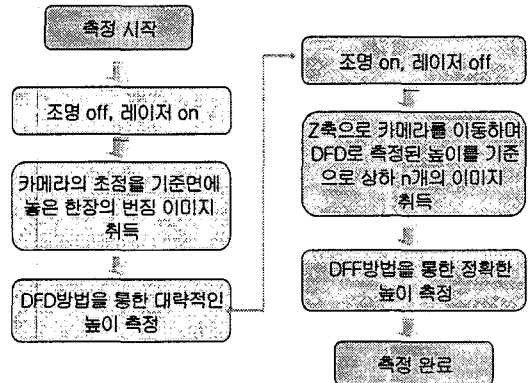
### 3.3 하이브리드 초점법

새롭게 제안된 하이브리드 초점법은 레이저 응용 DFD를 활용해 한 장의 영상을 취득하여 보정 데이블을 통한 대략적인 깊이 정보를 추정하고, 추정된 깊이정보를 이용하여 각각의 깊이 영역에서 일련의 정밀한 영상을 취득하여 DFF를 적용함으로써, DFD와 DFF의 장점을 갖춘 보다 빠르고 정확하게 깊이를 추정하는 방법이다. 여기서, 추정된 깊이는 DFD 및 DFF 보다 정확하고 측정속도는 DFF보다 빠른 장점을 갖는 방법을 시도하고자 하였다.

Fig. 4(a)는 다중 레이저 슬릿을 이용한 하이브리드 초점법에 대한 광학계를 나타낸 것이다. DFD에 의한 대략적인 깊이 추정은 우선, Fig. 4(b)와 같이 카메라의 초점을 기준면에 놓은 상태에서 한 장



(a) Optical system with multiple laser slits



(b) A software flowchart

Fig. 4 A laser-applied hybrid focus method

의 번짐 영상을 취득한다. 다음으로는 취득한 번짐 영상의 영상처리를 통해 잡음을 제거한 후, 선폭을 측정하여 보정 데이블에 의해 깊이를 추정한다. DFD에 의해 대략적으로 추정된 깊이를 이용하여 DFF로 측정하기 위해서는 각 단차의 깊이 평균이 필요하다. 이것은 각 레이저의 추정 깊이에서 잡음이 심한 단차 부분을 제외한 영역으로 구한다. 이때, 선형배율보정을 통한 DFF는 DFD로 추정된 깊이에서 상하 n개의 이미지를 취득하여 보다 정확하게 깊이를 추정한다. 단, 깊이 분해능은 깊이 이송을 위한 기계적 시스템에 의존된다.

Fig. 5는 초점 및 비초점 특성을 갖는 DFD 및 DFF와 본 연구에서 제안된 레이저 응용 하이브리드 초점법의 차이점을 보인 것이다. DFF는 물체의

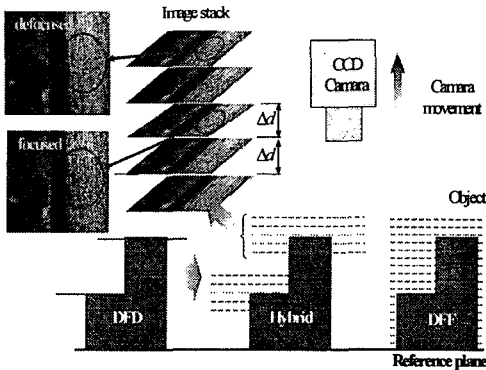


Fig. 5 The originality of a proposed hybrid method

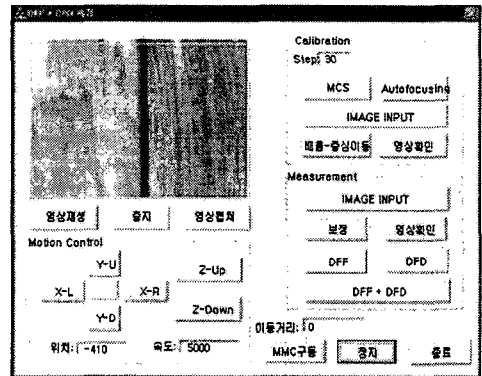


Fig. 6 The developed measurement system

깊이 방향으로 전 영역에 걸쳐 일련의 영상을 취득하지만, 하이브리드 초점법은 DFD에서 추정된 각 단차의 깊이정보를 가지고, 추정된 깊이 영역에서만 일련의 영상을 취득하여 깊이를 추정하므로, DFD에서의 깊이추정에 불필요한 영상을 취득할 필요가 없어 고속의 영상 취득이 가능한 장점을 가진다. 결국, 깊이불연속에서 하이브리드 초점법에 의한 깊이 측정 속도는 더욱 빨라지고 잡음이 감소되어 측정 정확도가 향상된다.

#### 4. 실험

##### 4.1 실험 장치

측정시스템은 Fig. 6과 같이 윈도우즈 기반의 자동 측정 시스템으로 직교로봇의 위치제어 및 영상처리에 의한 측정 소프트웨어로 구현하였다. 하드웨어 구성은 Fig. 7과 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.

##### 4.2 보정 테이블 생성

본 연구에서는 레이저의 선폭 보정을 위해 X-Y-Z직교로봇의 Z축을 이용하여 영상을 취득한 후, 영상처리를 이용하여 선폭을 측정하였다. Z축 이송에 따른 취득영상은 카메라의 초점을 기준면에 놓은 상태에서 Z축 상향으로 이송하며 50개의 영

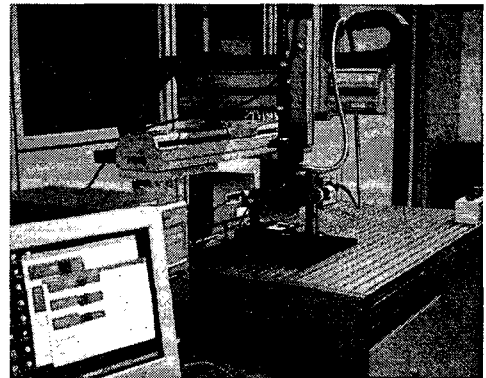


Fig. 7 A experiment device

상을 0.5mm의 간격으로 취득하여 이루어졌다. 높이에 따른 선폭의 보정테이블은 취득된 영상에 잡음을 제거하기 위해 영상처리를 한 후, 각 레이저의 X축으로 각 픽셀라인에 대한 보정 테이블을 작성하였다.

Fig. 8은 보정을 위해 취득된 스텝 영상을 나타내었다. 스텝이 높아짐에 따라 라인 빔의 번짐이 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 하나의 레이저 빔에 대해 X축의 첫 번째 픽셀 라인, 500번째 픽셀라인, 1000번째 픽셀라인에서 측정된 선폭의 변화를 나타내었다. 그래프에서 X축에 따른 각 픽셀라인의 선폭 변화가 일정하지 않아 기울기가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있고 비선형적인 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

##### 4.3 측정결과

본 연구에서는 계단형태의 깊이불연속 측정을



(a) Step=0, 5



(b) Step=10, 15



(c) Step=20, 25

Fig. 8 Measured step images

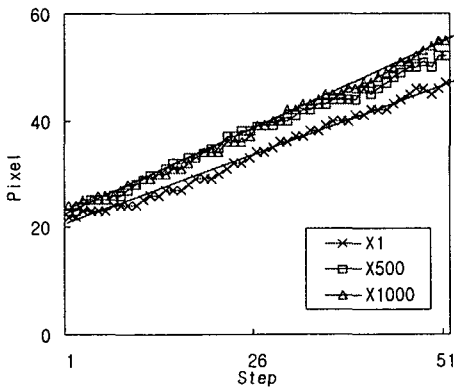


Fig. 9 Lens step vs. Pixel

위해 Fig. 10과 같은 가공정밀도 0.01mm, 깊이 5 ~ 20mm인 2등급 블록계지를 사용하여 수행하였다. 영상의 해상도는 1024×768이고, 영상의 한 픽셀당 거리는 0.0094mm/pixel이다. 측정은 5, 10, 15mm의 단차가 있는 5-10mm, 5-15mm, 5-20mm의 계단형태로 나눠서 하였다. Fig. 11은 DFD의 측정영상을 나타낸

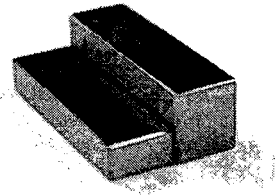


Fig. 10 Measured objects with depth discontinuity

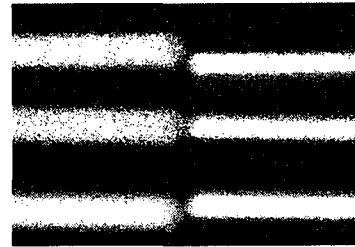
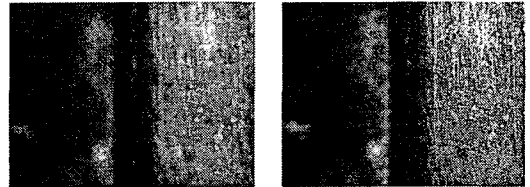
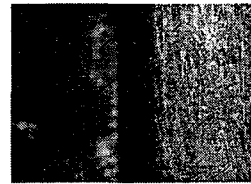


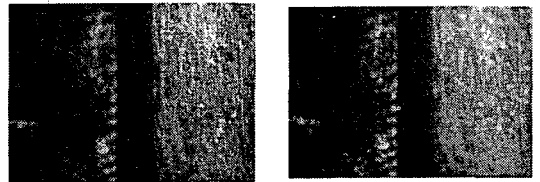
Fig. 11 An image acquired by DFD



(a) step=-2, -1



(b) step=0



(c) step=1, 2

Fig. 12 Measured step images of DFF

것으로 측정물체의 높이에 따라 좌우의 선폭이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 DFD로 추정된 깊이를 기준으로 한 단차 영역에서 상하 2

개씩 취득한 스텝 영상을 나타내었다. 스텝 0을 기준으로 상하로 갈수록 번짐이 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 계단형태 블록게이지의 깊이 값을 나타낸 것으로 세 번의 측정 결과를 하나의 그래프에 나타내었다. 그래프는 DFD와 DFF 그리고 하이브리드 초점법에 대한 예를 나타내었고, 단차 영역에 의한 깊이 오차를 최소화하기 위해 A, B영역으로 깊이를 추정하였다. 그래프에서 DFD의 경우 보정 테이블의 영상 간격이 0.5mm이므로 측정 분해능도 0.5mm로 매우 낮아 깊이값이 각진 형상으로 보이는 것을 알 수 있다.

각 방법에 따른 측정시간은 Table 1에 나타내었고, 전체 영역에서의 깊이 평균과 평균 제곱근 오차(root mean squared error;RMS)를 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 측정결과, 측정시간은 하이브리드 초점법이 DFF 보다 단차가 커질수록 단축되었고, 측정 정확도는 하이브리드 측정법이 DFD에 비해 최대 9.6%, DFF에 비해 최대 1.2% 향상되었다. 제안된 하이브리드 초점법이 DFD와 DFF 보다 모든 영역에서 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 반면, Table 2에서 제안된 방법이 깊이가 커짐에 따라 정확성이 일관되게 향상되지 않음을 볼 수 있다. 이것은 기본적으로 광학계가 가지고 있는 기본 특성, DFD의 오차범위 그리고 DFF의 초점심도(depth of focus)에 의한 오차의 영향으로 판단된다. 또한, 제안된 방법의 RMS는 Table 3과 같이, DFD에 비해 최대 70.44%, DFF에 비해 최대 44.14% 감소한 것을 알 수 있다. 여기서, RMS는 추정된 깊이에서 단차 영역을 제외하지 않은 전 영역에서 RMS 오차를 산출했기 때문에 단차가 커질수록 오차도 커지는 것을 볼 수 있다. 하이브리드 초점법이 DFD와 DFF에 비해 하이브리드 초점 특성을 이용하기 때문에 상대적으로 깊이불연속에 대해 효율적인 방법으로 단차가 커질수록 오차가 더욱 감소하는 것을 볼 수 있다.

이상의 실험결과로부터 하이브리드 초점법은 DFF의 단점인 측정 속도를 개선할 뿐 아니라 DFD와 DFF 보다 우수한 정확성을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서, 레이저 응용 하이브리드법은 DFD와 DFF의 장점은 더욱 향상시키고 단점은 대폭 보완하여 깊이불연속을 갖는 삼차원 형상에서 효율적으로 적용 가능한 방식이다.

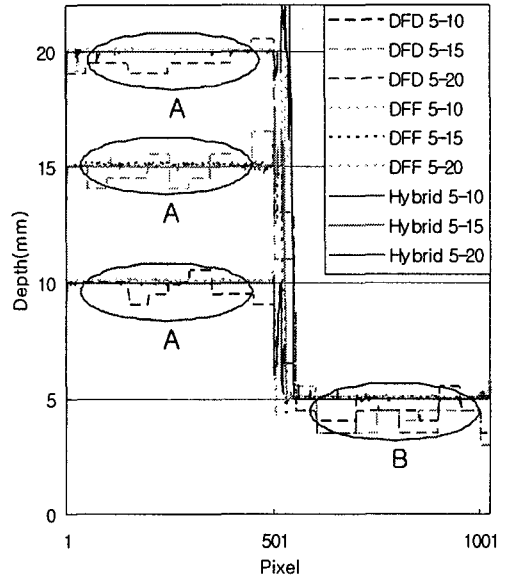


Fig. 13 Comparisons of measured depths

Table 1 Comparisons of measuring time

Depth (mm)	Measured time(sec)			time(DFD) (%)
	DFD	DFF	Hybrid	
5-10	1.27	32.55	30.62	5.93 ↓
5-15	1.36	51.09	31.79	37.78 ↓
5-20	1.16	63.36	32.19	49.19 ↓

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(mm)			error (DFD) (%)	error (DFF) (%)
	DFD	DFF	Hybrid		
5-10	0.69	0.42	0.31	55.07 ↓	26.29 ↓
5-15	1.59	0.59	0.35	70.44 ↓	40.6 ↓
5-20	1.98	1.11	0.62	68.69 ↓	44.14 ↓

## 5. 결론

본 연구에서는 깊이불연속이 존재하는 3차원 형상 측정을 위해 레이저 응용 하이브리드 초점법을 새롭게 제안하였다. 제안된 방법은 다중 레이저 슬릿을 이용하고 이에 대한 하이브리드 초점 특성을 사용함으로써, DFD와 DFF의 장점은 더욱 개선시키고 단점을 보완할 수 있다.

제안된 방법의 검증을 위해 깊이불연속에 대한 특성을 갖는 계단형태 블록게이지의 측정결과, 측정시간은 단차가 클수록 DFF에 비해 대폭 단축되었고 측정 정확도는 DFD에 비해 최대 9.6%, DFF에 비해 최대 1.2% 향상되었으며 측정 오차는 RMS의 경우 DFD에 비해 최대 70.44%, DFF에 비해 최대 44.14% 감소하였다.

향후, 물체 표면에 대한 레이저의 산란 정도에 무관하고 간섭계를 이용한 레이저의 정밀 보정을 통한 하이브리드 초점법의 개발이 요구된다. 이 방법은 깊이불연속을 포함하는 삼차원 형상 측정에 효율적인 적용이 가능하리라 판단된다.

## 후 기

이 논문은 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다.(R05-2004-000-10512-0) 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Park, H. J. and Hwang, Y. M., "Dimensional Measurement Using the Machine Vision," J. of KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 10-17, 2001.
2. Lee, S. Y. and Lim, S. G., "Three Dimensional Measurements Using Machine Vision," J. of KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 18-22, 2001.
3. Park, H. J. and 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.
4. Ghita, O. and Whelan, P. F., "A Video-Rate Range Sensor Based on Depth from Defocus," Optics and Laser Technology, Vol. 33, pp. 167-176, 2001.
5. Roh, K. W. and Kim, C. W., "Three Dimensional Shape Recovery from Blurred Images," Proc. of the IEEK Conf. pp. 799-802, 2000.
6. Subbarao, M. and Surya, G., "Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach," Internat J Comput Vision, Vol. 13, No. 3, pp. 271-294, 1994.
7. Subbarao, M., "Determining Distance from Defocused Images of Simple Object," Tech. Report No. 89.07.20, Computer Vision Laboratory, Dept. of electrical Engineering, State University of New York, Stony Brook, NY 11794-2350.
8. Lee, S., Ahn, S. C. and Meyyappan, A., "Depth from Magnification and Blurring," Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Automation, 1997.
9. Grossman, P., "Depth from Focus," Pattern Recognition Letters, Vol. 5, pp. 63-69, 1987.
10. Subbarao, M. and Tyan, J. K., "Selecting Optimal Focus Measure for Autofocusing and Depth-From-Focus," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 8, PP. 864-870, 1998.
11. Nayar, S. K. and Nakagawa, Y., "Shape from Focus," IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, No. 8, 1994.
12. Kim, G. B. and 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.
13. Kim, G. B. and 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.
14. Kim, G. B. and Shin, Y. S., "A Hybrid Focus Method Using Multiple Laser Slits," Proc. of KSPE Autumn Annual Meeting, Vol.22, No. 10, pp. 706-709, 2005.