

광학계의 배율 변화를 고려한 DFF 기반의 형상 측정법

신영수*(충주대학교 대학원 기계설계학과), 김경범(충주대학교 기계설계학과)

A Measurement Method of Surface Morphology Based on Depth-from-Focus with Magnification Variations of Optical System

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

ABSTRACT

Errors resulting from magnification variations of optical system are largely generated in three-dimensional shape measurements. In the case of measuring the surface morphology of tiny objects based on DFF, images are acquired with a very small interval and then magnification changes are minimized. However, the magnification variations are actually existed in optical system and so focus measures in DFF are wrongly or ambiguously extracted. In this paper, a methodology based on DFF with the magnification changes is proposed to make more accurate measurement in surface morphology with high depth discontinuity, compared with previous ones. Several experiments show that the proposed method outperforms existing ones without magnification changes.

Key Words : DFF(depth from focus), Magnification variation(배율변화), Center move(중심이동), Focus measure(초점척도)

1. 서론

물체의 삼차원 측정에는 프로브를 활용한 접촉식 방법과 광학을 이용한 비접촉식 방법이 있다.⁽¹⁾ 광학을 이용한 방법에는 초점을 이용한 것과 빛의 간섭을 이용한 것으로 나눌 수 있는데, 초점을 이용한 방법은 10여장 이상의 많은 영상을 필요로 하며 이 방법은 초점과 관련 되어 있어 DFF(depth from focus)라 한다. DFF는 측정물의 깊이 방향으로 이송하며 일련의 영상을 취득한 후, 초점척도(focus measure)를 이용하여 픽셀 당 초점이 최대가 되는 위치를 검색하는 방법이다. 초점을 이용한 방법은 기본적으로 카메라 렌즈를 움직이거나, CCD 평면을 움직이거나, 물체를 움직여 영상을 취득하는데 이때 배율의 변화가 발생하게 된다. 취득 영상에서 초점 정도를 비교할 경우, 이 배율변화로 인해 초점척도가 잘못 추출되거나 모호한 초점 측정이 유발된다.^(2,3)

이에 대한 해결방안으로써, 기존에는 깊이영상(depth map)에 미디언 필터 기능과 유사한 방법⁽⁴⁾의 보정 알고리즘을 적용하였다. 하지만, 이 방법은 초점측정 후의 보정방법으로 근본적인 해결책을 제시하지 못한다.

본 논문에서는 취득 영상에 광학계의 배율 변화

를 고려하여 물체의 크기를 동일하게 함으로써 기존의 문제점을 해결하고자 한다. 물체의 전 영역에 걸쳐 동일한 픽셀이 대응되므로 기존 측정보다 더 정확하고 단차가 큰 물체의 측정도 가능하다는 것을 실험을 통해 확인하였다.

2. DFF 기본 이론

일반적인 얇은 렌즈계의 광로를 Fig. 1에 나타내었다.

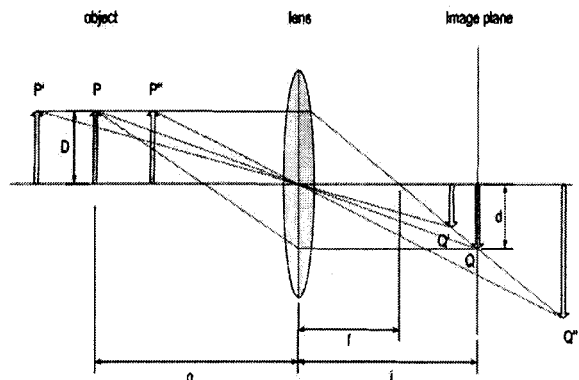


Fig. 1 Effects of object-displacement on magnification

렌즈의 초점거리를 f , 물체와 렌즈 사이의 거리를 o , 렌즈와 상의 거리를 i 라 하면, 가우시안 렌즈 법칙(gaussian lens law)에 의해 다음과 같은 렌즈 공식이 성립한다.

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

P에서 출발한 빛은 렌즈를 지나 센서평면에 초점이 맞는 이미지(focused image) Q를 형성하고 물체를 δ 만큼 이동한 P', P''에서 출발한 빛은 센서평면에 초점이 맞지 않는 이미지 Q', Q''로 나타난다. 여기서, 배율을 q 라 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{i}{o} = \frac{d}{D} \quad (2)$$

식 (2)에 의해 초점거리, 물체와 렌즈 사이의 거리, 렌즈와 상의 거리가 변화될 때 배율도 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 2는 스테이지에 놓인 임의의 물체 형상을 나타낸다. 물체를 고정하고 센서와 렌즈를 고정하고 카메라를 Δd 만큼 이동하며 영상을 취득할 때, 물체 위의 한 점 s 에 초점평면이 접근할수록 s 는 번짐이 없는 깨끗한 점으로써 고주파수 성분을 갖게 되고, 초점평면이 멀어질수록 번짐이 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 다음과 같이 구할 수 있다.

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

초점정도는 Nayar⁽³⁾가 제안한 SML(sum-modified laplacian)연산자를 이용하여 고주파 성분이 가장 큰 픽셀을 얻을 수 있다. 사용된 SML은 다음과 같이 정의 된다.

$$F(i,j) = \sum_{x=i-N}^{i+N} \sum_{y=j-N}^{j+N} ML(x,y), ML(x,y) \geq T \quad (4)$$

여기서 $ML(x,y)$ 은 순차적인 근사에 의해 구해진 라플라시안 값이다. 최종적으로 영상 각 점의 초점정도 $F(x,y)$ 는 수정된 라플라시안 값들의 합으로 구할 수 있다.

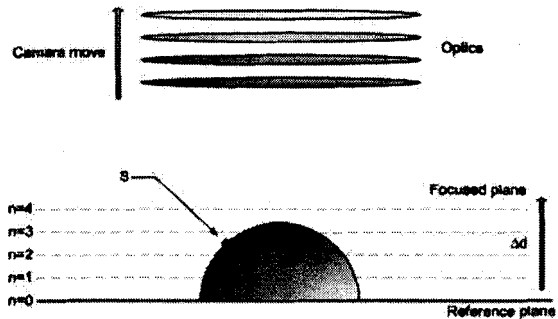


Fig. 2 Depth from Focus

3. 배율 변화를 고려한 영상 보정

기본적으로 광학계는 높이 변화에 따라 배율이 변한다. 배율의 변화는 측정오차와 직결되는데, 광학계의 측정되는 물체와의 거리가 커질수록 배율도 커짐을 식 (2)에 의해 알 수 있다. 기존에는 배율 변화를 최소화하여 무시할 수 있는 미소물체 측정에 주로 이용되었다. 그러나, 미소물체 측정에서도 작지만 배율 변화는 엄연히 존재한다. 본 논문에서는 취득 영상에 배율 변화를 적용하여 배율에 따른 측정오차를 근본적으로 제거하는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 물체를 고정하고, 렌즈와 CCD평면을 고정하고 카메라를 Z축으로 이동하여 영상을 취득하는 방법을 적용하였다. 영상의 배율은 수평 및 수직축이 각각 다르다고 가정한다. 렌즈의 초점을 스테이지 평면에 일치시킨 물체 영상의 수평 및 수직축 길이는 LH_s, LV_s 라 하고, 카메라를 Z축으로 이동하여 취득한 물체 영상의 수평 및 수직축 길이를 LH, LV 라 하면, 높이에 따른 광학계의 수평 및 수직축 배율은 다음식과 같이 계산된다. 여기서, i 는 초점 평면의 높이를 나타내는 변수이다.

$$mh_i = \frac{LH_i}{LH_s}, mv_i = \frac{LV_i}{LV_s} \quad (5)$$

Z축으로의 높이를 H 라 하면, 각 축에 대한 배율은 다음 선형식으로 모델링 할 수 있다.

$$mh = a_h H + 1, mv = a_v H + 1 \quad (6)$$

N 개의 취득 영상에서 측정된 데이터가 $(mh_i, H_i), (mv_i, H_i)$ 라 하면, 식 (6)의 계수 a_h, a_v 는 최소자승 방법에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$a_h = \frac{N \sum mh_i H_i - \sum H_i \sum mh_i}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2} \quad (7)$$

$$a_v = \frac{N \sum mv_i H_i - \sum H_i \sum mv_i}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2} \quad (8)$$

취득된 모든 영상 안의 물체의 크기를 동일하게 하기 위해서는 식 (6)에 의해 추정된 배율 mh_e , mv_e 에 역수를 취한 다음 취득된 영상의 각 픽셀 위치에 곱해준다. 보정된 영상은 $I_c(x, y)$ 라 하고, 취득영상을 $I(x, y)$ 라 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_c = I\left(x \times \frac{1}{mh_e}, y \times \frac{1}{mv_e}\right) \quad (9)$$

보정 영상에서는 물체의 크기는 동일하지만 영상 자체 크기는 배율을 적용한 만큼 커지므로 배율을 적용하기 전의 영상 크기로 맞춰 주어야 한다. 이때, 모든 보정 영상의 중심이 동일해야만 한다. 그러나 카메라를 Z축으로 이동할 때, 스테이지의 X, Y축에 대해 렌즈의 중심이 수직이 아니므로 높이에 따라 측정영상 안의 물체 중심도 이동하게 된다.

중심이동은 높이에 따른 영상 안에서 임의의 픽셀변화를 수평 및 수직축에 대해 다음과 같이 선형식으로 모델링 한다.

$$ch = a_{ch}H, \quad cv = a_{cv}H \quad (10)$$

여기서 ch , cv 는 수평 및 수직축으로의 중심이동을 나타내고, 중심이동에 대한 각각의 계수 a_{ch} , a_{cv} 는 배율 계수와 마찬가지로 최소자승 방법에 의해 계산된다.

이미 서술한 바와 같이, 광학계의 배율변화와 중심이동을 고려한 영상 보정 및 삼차원 형상 측정에 대한 검증은 다음 실험을 통해 확인 된다.

4. 실험

4.1 실험 장치

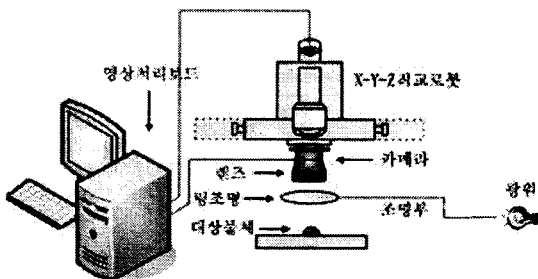


Fig. 3 A experiment device

Fig. 3과 같이, 측정 시스템은 윈도우즈(Windows) 기반의 자동 측정 시스템으로 직교로봇의 위치제어 및 영상보정에 의한 측정 소프트웨어로 구현하였다. 하드웨어 구성은 위치 정밀도 $\pm 0.02\text{mm}$ 인 X,Y,Z 직교로봇, sony HC-HR70 CCD카메라, 렌즈(f 50mm, F/1.8), 프레임 그라버는 Matrox Meteor II 보드를 사용하였고, 조명은 렌즈 앞에 Halogen 링 조명을 설치하였다.

4.2 배율 변화 및 중심 보정

배율 변화를 보정하기 위해서 X,Y,Z 직교로봇의 Z축을 이용하여, Z방향의 동일한 간격으로 인증된 사각 블록게이지(block gauge)의 영상을 30개 취득하여 측정하였다. 취득 영상에 임계값(threshold)을 설정하여 이진화 시킨 다음, 사각 블록 게이지의 수평 및 수직 방향의 픽셀 수와 블록게이지의 중심을 추출하였다. 다섯 번의 측정결과, 본 광학계에 대한 수평 및 수직축 배율은 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 이것은 식 (6)에서 배율과 높이와의 관계는 선형식으로 모델링 할 수 있다는 것을 입증하는 것이다.

식 (7), (8)에 의해 추정된 배율 계수 ah 와 av 는 -0.003318 이다. 광학계의 수차는 각축에 따라서 배율 계수가 서로 다를 가능성이 있는데 여기서는 추정된 배율 계수가 동일함을 알 수 있다.

중심이동의 보정은 취득된 30개 영상에서 블록게이지의 중심을 이용하여 수행되었다.

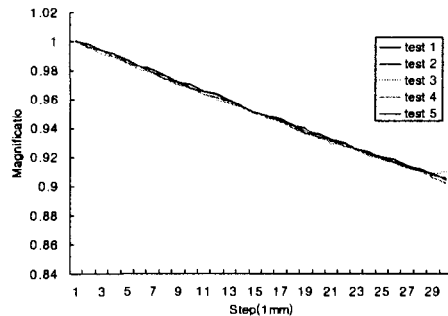


Fig. 4 Magnification variations for horizontal axis

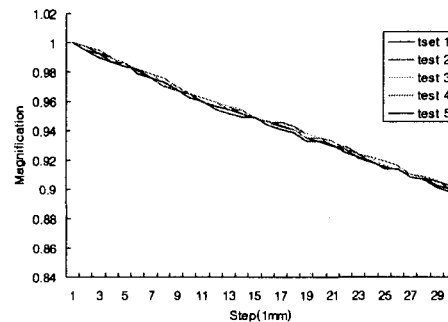


Fig. 5 Magnification variations for vertical axis

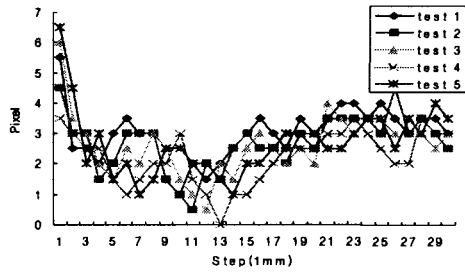


Fig. 6 Center move for horizontal axis

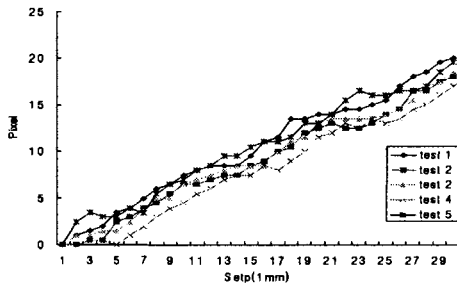


Fig. 7 Center move for vertical axis

취득영상에서 블록게이지의 수직축 중심이동은 Fig. 7와 같이 선형적인 경향이 존재하지만, 수평축 중심이동은 Fig. 6와 같이 비선형적인 경향이 있다. 수평축이 비선형적인 이유는 X,Y,Z직교로봇의 Z축을 사용하여 영상을 취득할 때, 서보모터의 회전으로 인한 영향으로 추측된다. 식 (10)의 선형식에서 수직축 중심이동에 대한 계수 a_{ω} 는 0.627로 추정되었다.

결국, 영상보정은 취득된 영상에 배율 변화와 중심이동 선형식을 적용하고, 배율을 적용하기 전 영상의 크기로 맵핑(mapping)을 수행하면 된다.

Fig. 8은 보정전의 영상으로, 동일한 면적의 사각

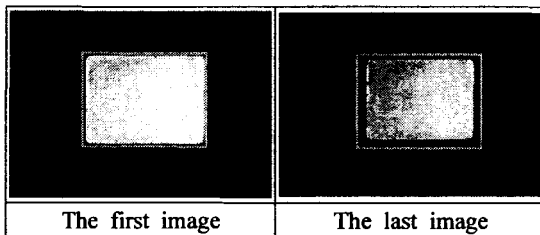


Fig. 8 Images before calibration

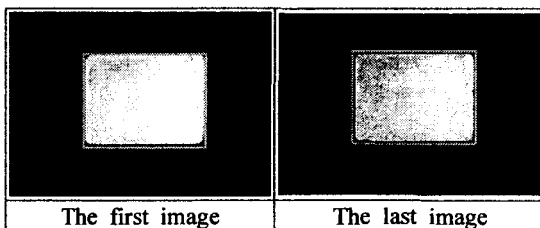


Fig. 9 Images after calibration

형을 비교할 경우, 높이에 따라 마지막 영상의 물체 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 보정된 영상으로 물체 크기가 처음 영상과 동일함을 알 수 있다. 이렇게 보정된 영상에서 물체의 크기는 동일하고 높이에 따른 초점 정도만 다른 영상이 됨을 알 수 있다.

4.3 측정결과

측정은 깊이 2.5, 5, 10mm인 계단형태의 블록게이지를 사용하였다. Fig. 10은 측정된 블록게이지의 깊이 값을 나타낸 것이다. 중간단계에 있는 깊이 5mm의 블록게이지로 깊이를 비교한 결과, 보정전 깊이 평균은 4.34mm이고, 보정된 깊이 평균은 4.77mm로 깊이 정확도가 9.9% 향상된 것을 확인할 수 있다.

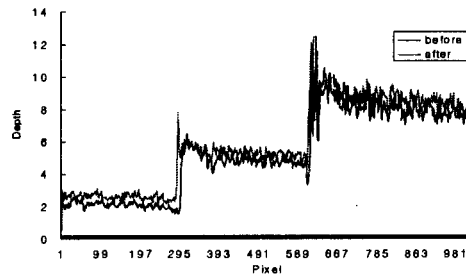


Fig. 10 Measured height value

5. 결론

본 논문에서는 취득영상에 배율 변화를 고려하여 물체 영상 크기를 동일하게 하는 영상 보정법을 제시함으로써, 기존 방법 대비 9.9%의 향상된 측정 값을 추출할 수 있었다.

후기

이 논문은 2003년 충주대학교 학술연구조성비와 한국과학재단 연구지원(R05-2004-000-10512-0)에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. Kim, G. B., "A Variable Window Method for Three-Dimensional Structure Reconstruction in Stereo Vision," KSPE, Vol. 20, No. 7, pp. 138-146, 2003.
2. Grossman, P., "Depth from Focus," Pattern Recognition Letters, 5, pp. 63-69, 1987.
3. Shree K. Nayar and Yasuo Nakagawa, "Shape from Focus," IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, No. 8, 1994.
4. Kim, C. S., Roh, K. W., Kim, C. W., "Depth Extraction from Focused Images Using The Error Interpolation," IEEK, Vol. 22, No. 1, pp. 627-630, 1999.