

선형배율보정을 통한 DFF 기반의 삼차원 형상 측정법

김경범[#], 신영수^{*}

A Measurement Method of Three-Dimensional Surface Morphology Based on Depth-from-Focus through Linear Magnification Calibration

Gyung Bum Kim[#], Young Su Shin^{*}

ABSTRACT

Errors resulting from magnification variations of a optical system are largely generated in three-dimensional shape measurements based on depth-from-focus. In the case of measuring the surface morphology of tiny objects based on DFF, images are acquired with a very small interval so that magnification changes can be minimized. However, the magnification variations are actually existed in the acquired images and so focus measures are wrongly or ambiguously extracted. In this paper, a methodology with linear magnification calibrations, based on DFF, 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 calibrations.

Key Words : DFF (depth from focus), Linear magnification calibration(선형배율보정), Magnification variation (배율변화), Focus measure (초점정도), Three-Dimensional surface measurement(3차원형상측정)

1. 서론

물체의 삼차원 측정에는 프로브를 활용한 접촉식 방법과 광학을 이용한 비접촉식 방법이 있다.^{1,2} 광학을 이용한 방법에는 초점을 이용하는 방법 (focus based method)과 간섭상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있고, 초점을 이용한 방법은 크게 DFF(depth from focus)와 DFD(depth from defocus)로 구분된다. 본 논문에서 다루려는 DFF는 측정물의 깊이 방향으로 이송하며 일련의 영상을 취득한 후,

초점정도(focus measure)를 적용하여 픽셀 당 초점이 최대가 되는 위치를 검색해 깊이를 추정하는 방법이다. 초점을 이용한 방법은 기본적으로 카메라 혹은 CCD평면 혹은 물체를 움직여 영상을 취득하는데 이때 배율의 변화가 발생한다. 취득 영상에서 초점정도를 비교할 경우, 이 배율변화로 인해 초점정도가 잘못 추출되거나 모호한 초점 측정이 유발된다.³⁻⁶

이에 대한 해결방안으로써, 기존에는 깊이영상 (depth image)에 미디언 필터 기능과 유사한 방법의

접수일: 2005년 4월 12일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

[#] 교신저자: 충주대학교 기계설계학과

E-mail kimgb@chungju.ac.kr Tel. (043) 841-5378

^{*} 충주대학교 대학원 기계설계학과

보정 알고리즘을 적용하거나⁷, 외부 조리개를 정면 초점 포인트(front-focal point)에 위치시키거나⁹, 푸리에 변환(fourier transform)을 사용하여 보정하는 방법¹⁰ 등을 사용하였다.

본 논문에서는 취득 영상에 광학계의 선형배율 보정을 통해 대상 물체의 크기를 동일하게 함으로써, 물체의 전 영역에 걸쳐 동일한 픽셀이 대응되므로 기존 측정보다 더 정확하고 단차가 큰 물체의 측정도 가능하다는 것을 실험을 통해 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 기본적인 광학이론과 DFF원리를 설명하고, 3장에서는 배율변화를 고려한 영상 보정법을 설명한다. 4장에서는 제안된 선형배율보정을 통한 DFF기반 측정법을 검증한다.

2. 이론

2.1 광학계의 기본원리

일반적인 얇은 렌즈계의 광로를 Fig. 1에 나타내었다. 렌즈의 초점거리를 f , 물체와 렌즈 사이의 거리를 o , 렌즈와 상의 거리를 i 라 하면, 가우시안 렌즈 법칙(gaussian lens law)에 의해 식 (1)과 같은 렌즈 공식이 성립된다.

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

점 P에서 출발한 빛은 렌즈를 지나 센서평면에 초점이 맞는 이미지(focused image) Q를 형성하고 물체를 δ 만큼 이동한 P', P''에서 출발한 빛은 센서 평면에 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 배율이 변화됨을 알 수 있다.

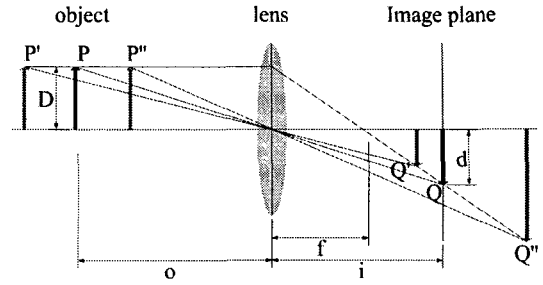


Fig. 1 Effects of object-displacement on magnification

2.2 DFF 기본원리

Fig. 2는 스테이지에 놓인 임의의 물체 형상을 나타낸다. 물체를 고정하고 센서와 렌즈를 고정한 카메라를 Δd 만큼 이송하며 영상을 취득할 때, 물체 위의 한 점 s에 초점평면이 접근할수록 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, 물체의 형상 높이 d 는 취득한 모든 영상에서 각각의 픽셀에 대한 초점 정도를 측정 후, 그 초점 정도가 가장 높을 때의 렌즈 이동거리를 설정함으로써, 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

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

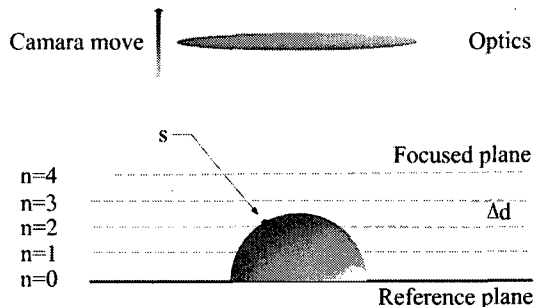


Fig. 2 Depth from focus

2.3 초점 정도 측정

위에서 언급했듯이, 초점정도는 각 픽셀에 대한 형상 높이를 구하기 위해서 어떤 영상평면의 픽셀이 가장 초점이 맞았는지 판별할 수 있는 척도이다. 단계별로 측정된 영상에서는 고주파수 성분을 가진 초점이 맞는 부분과 저주파수 성분을 가진 초점이 맞지 않는 부분으로 나눌 수 있는데, 최대의 초점정도는 고주파수 성분을 가진 초점이 맞는 부분으로 구할 수 있다. 본 논문에서는 고주파 필터링한 영상을 얻기 위해 Nayar가 제안한 SML(sum-modified-laplacian) 연산자를 이용하였다.⁵ 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 는 $I(x, y)$ 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.

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

3. 배율 변화를 고려한 영상 보정

3.1 배율 변화 모델

기본적으로 광학계는 높이 변화에 따라 배율이 변하게 되며, 이 배율변화는 측정오차와 직결된다. 광학계와 측정 물체와의 거리가 멀어질수록 배율은 커짐을 식 (2)에 의해 알 수 있다. 기존에는 배율변화를 최소화하여 무시할 수 있는 미소물체 측정에 주로 이용되었다. 그러나 미소물체 측정에서도 배율변화는 작지만 엄연히 존재한다. 본 논문에서는 취득 영상에 선형배율보정을 적용하여 배율에 따른 측정오차의 최소화를 수행하는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 물체를 고정하고, 렌즈와 CCD평면을 고정한 카메라를 Z축으로 이송하며 영상을 취득하는 방법을 적용하였다. 배율은 렌즈의 왜곡에 의한 영향을 최소화하기 위해 광축에 수직으로 놓인 사각형 물체(6×6mm)에 대한 대각선 길이를 이용하여 추정하였다. 렌즈의 초점을 스테이지 평면에 일치시킨 물체 영상의 대각선의 길이를 DL_s 라 하고, 카메라를 Z축으로 이동하여 취득한 물체 영상의 대각선 길이를 DL_i 라고 하면, 높이에 따른 광학계의 배율인자(magnification factor) m_d 는 다음 식과 같이 유도된다. 여기서, i 는 초점 평면의 높이를 나타내는 변수이다.

$$m_d = \frac{DL_i}{DL_s} \quad (6)$$

Z축으로의 높이를 H 라 하면, 배율변화는 다음 선형식으로 모델링할 수 있다. N개의 취득 영상에서 높이에 따른 배율인자가 (m_d, H) 라 하면, 식 (7)의 계수 α_m 은 최소자승방법에 의해 계산될 수 있다.

$$m_d = \alpha_m H + 1 \quad (7)$$

$$\alpha_m = \frac{N \sum m_d H_i - \sum H_i \sum m_d_i}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2}$$

취득된 모든 영상 안의 물체의 크기를 동일하게 하기 위해서는 식 (7)에 의해 추정된 배율인자 m_d 에 역수를 취한 다음, 취득된 영상의 각 픽셀 위치에 그 역수를 곱하여 확대한다. 영상의 확대는 선형 보간법을 사용하여 수행하였다. 선형배율보정된 영상 $I_c(i, j)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_c(i, j) = I(x \times \frac{1}{m_d}, y \times \frac{1}{m_d}) \quad (8)$$

3.2 중심 이동 모델

보정된 영상에서 물체의 크기는 동일하지만 영상 자체 크기는 배율을 적용한 만큼 커지므로 배율을 적용하기 전의 영상 크기로 조절해 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 픽셀 변화를 수평 및 수직축에 대해 다음과 같이 선형식으로 모델링 된다. 수평 및 수직축으로의 중심이동 c_h, c_v 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 중심이동에 대한 각각의 계수 $\alpha_{c_h}, \alpha_{c_v}$ 는 배율인자 계수와 마찬가지로 최소자승방법에 의해 계산된다.

$$c_h = \alpha_{c_h} H, \quad c_v = \alpha_{c_v} H$$

$$\alpha_{c_h} = \frac{N \sum c_{h_i} H_i - \sum H_i \sum c_{h_i}}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2} \quad (9)$$

$$\alpha_{c_v} = \frac{N \sum c_{v_i} H_i - \sum H_i \sum c_{v_i}}{N \sum H_i^2 - (\sum H_i)^2}$$

3.3 렌즈 스텝 vs. 초점이 맞는 거리 모델

렌즈가 Z축으로 일정한 스텝을 가지며 이동할 때, 각각의 렌즈 스텝에 대한 물체의 깊이가 같아야 한다. 반면, 렌즈 스텝에 대응되는 초점이 맞는 물체 깊이가 다를 경우, 이에 대한 보정이 이루어져야 한다. 스텝 거리를 S_d 라 하고 그에 대응되는 초점이 맞는 거리를 D_f 라 하면, 식 (10)과 같은 선형식으로 모델링 된다. 초점이 맞는 거리에 대한 계수 α_f 는 최소자승방법에 의해 계산되고, 보정된 거리 D_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_f = \alpha_f S_d, \quad D_c = \frac{1}{\alpha_f} \times D_f \quad (10)$$

$$\alpha_f = \frac{N \sum D_{f_i} S_{d_i} - \sum S_{d_i} \sum D_{f_i}}{N \sum S_{d_i}^2 - (\sum S_{d_i})^2}$$

이미 서술한 바와 같이, 광학계의 배율 변화와 중심이동 그리고 렌즈 스텝에 따른 초점이 맞는 거리에 대한 영상 보정 및 삼차원 깊이 측정에 대한 검증은 다음 실험을 통해 확인된다.

4. 실험

4.1 실험장치

측정시스템은 Fig. 3과 같이 윈도우즈 기반의 자동 측정 시스템으로 직교로봇의 위치제어 및 영상보정에 의한 측정 소프트웨어로 구현하였다. 하드웨어 구성은 Fig. 4와 같이 위치 정밀도 $\pm 0.02\text{mm}$ 인 X,Y,Z직교로봇, CCD카메라(HC-HR70C), 렌즈($f=50\text{mm}$, F/1.8), 프레임 그래픽은 Matrox Meteor II 보드를 사용하였고, 조명은 렌즈 앞에 Halogen 링 조명을 설치하였다.

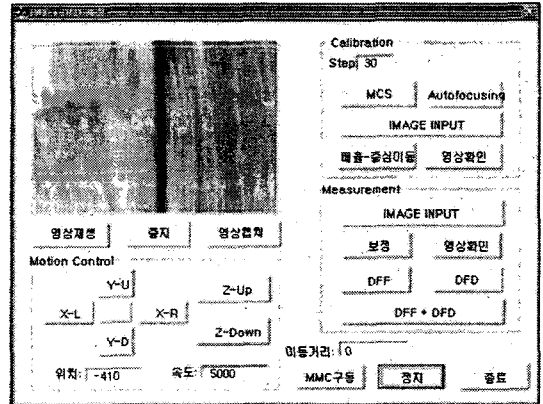


Fig. 3 The developed measurement system



Fig. 4 A experiment device

4.2 보정 결과

배율 변화를 보정하기 위해 이차원 사각 패턴 (6×6mm)을 광축에 수직으로 놓고 X,Y,Z직교로봇의 Z축을 이용하여 영상을 취득한 후 측정하였다. Z축 이송에 따른 취득영상에 대한 번짐을 최소화하기 위해 초점이 맞는 영상을 기준으로 상하 15개의 영상을 0.2mm의 간격으로 취득하였다. 측정은 취득영상에 임계값(threshold)을 설정하여 이진화⁸ 시킨 다음, 사각형의 대각선 길이와 사각형의 중심을 추출하여 이루어졌다. 세 번의 측정결과 본 광학계에 대한 배율인자는 Fig. 5와 같다. 이것은 식 (7)에서 배율인자와 높이와의 관계는 선형적으로 모델링 할 수 있다는 것을 입증하는 것이다. 추정된 배율인자 α_m 는 -0.00526이다.

중심이동 보정은 취득된 30개 영상에서 측정된 사각형의 중심을 이용하여 수행되었다. 취득영상에서 수평축 중심이동은 Fig. 6과 같이 선형적인 경향이 존재하지만, 수직축 중심이동은 Fig. 7과 같이 비선형적인 경향을 보이므로 본 논문에서는 고려하지 않았다. 수직축이 비선형적인 이유는 X,Y,Z직교로봇의 Z축을 사용하여 영상을 취득할 때, 서보모터의 회전에 따른 영향과 카메라 지그면에 대한 수직방향으로의 기계적 결합의 부재로 인한 흔들림 등으로 추측된다.

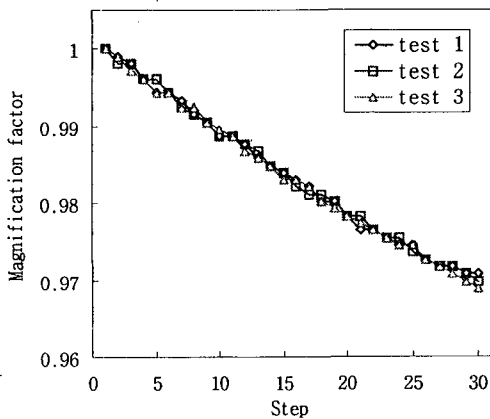


Fig. 5 Magnification Factor vs. Steps

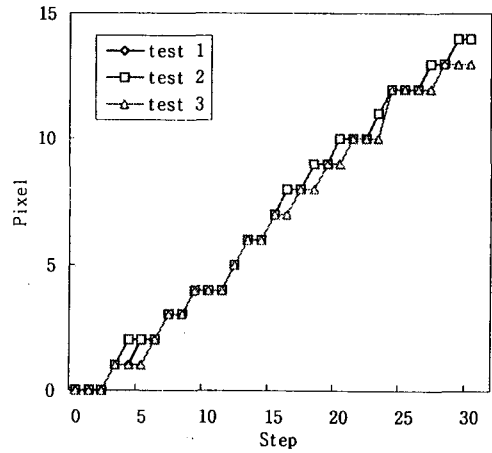


Fig. 6 Center move for horizontal axis

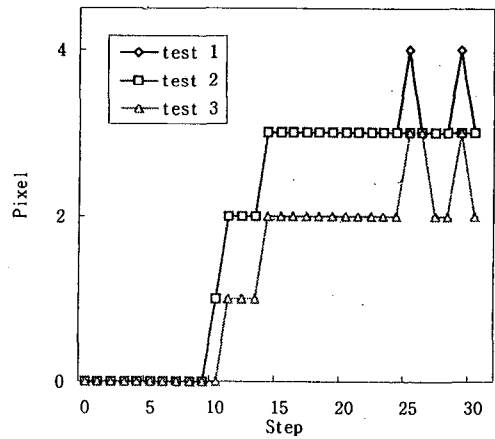


Fig. 7 Center move for vertical axis

식 (9)의 선형식에서 수평축 중심이동에 대한 계수 α_c 는 2.51로 추정되었다.

Z축의 각 스텝에 대한 초점이 맞는 거리의 보정은 20mm내에서 2mm간격으로 10개의 인증된 사각 블록게이지를 측정하여 이루어졌다. 사각 블록게이지의 윗면을 자동 초점 알고리즘을 사용하여 초점을 맞춘 후 그때의 Z축 렌즈 위치를 측정한 그래프는 Fig. 8과 같다. 식 (10)의 선형식에서 초점이 맞는 거리에 대한 계수 α 는 0.994이다.

결국, 선형 배율 보정은 취득된 영상에 배율변화, 중심이동, 렌즈 스텝에 대한 초점이 맞는 거리

를 보정한 다음, 배율변화를 적용하기 전 영상의 크기로 맵핑(mapping)을 수행하면 된다. Fig. 9는 배율과 중심이동의 보정 전 영상으로, 동일한 면적의 사각형을 비교할 경우, 마지막 단계에 있는 영상안의 물체 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 보정된 영상으로 물체 크기가 처음 단계에 있는 영상과 동일함을 알 수 있다. 이렇게 보정된 영상에서는 물체의 크기는 동일하고 높이에 따른 초점정도만 다른 영상이 됨을 알 수 있다.

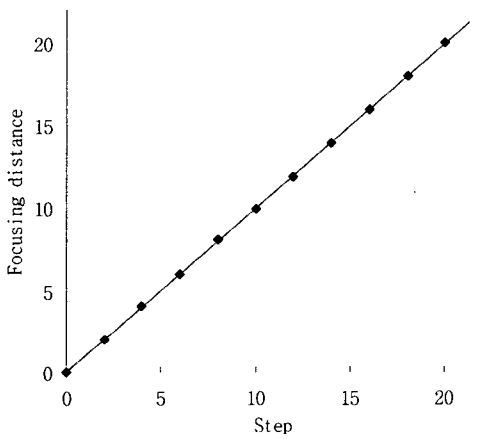
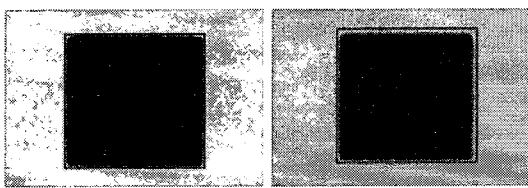
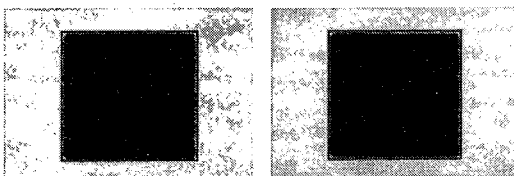


Fig. 8 Lens step vs. focusing distance



The first image The last image

Fig. 9 Images before calibration

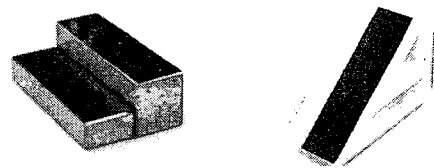


The first image The last image

Fig. 10 Images after calibration

4.3 측정 결과

본 논문에서는 DFF기반 삼차원 형상 측정을 위해 Fig. 11과 같이 깊이 5, 10, 15, 20mm인 계단형태의 블록게이지와 45°경사진 실험 물체를 제작하여 수행하였다. 영상의 해상도는 1024×768이고, 영상의 한 픽셀 당 길이는 0.01136mm/pixel이다. 각각의 영상은 0.5mm높이 간격으로 45개 취득하여 측정되었다. 계단형태 블록게이지의 측정은 5-10mm, 10-15mm, 15-20mm로 나눠서 하였다. Fig. 12는 계단형태 블록게이지의 각 단계에 대한 배율과 중심이동, 그리고 렌즈 스텝에 대한 초점이 맞는 거리가 보정된 영상이다. Fig. 13은 계단형태 블록게이지의 깊이 값을 나타낸 그래프이다. 세 번의 측정 결과를 하나의 그래프에 나타내었다. 그래프는 배율과 중심이동을 보정한 경우(AC)와 보정하지 않은 경우(BC)를 나타내었다. 측정값은 전체영역에서 절대평균 오차(mean absolute error; MAE)와 평균 제곱근 오차(root mean square error; RMS)를 Table 1에 나타내었고, 왜곡에 의한 영향을 최소화하기 위해, 단차영역인 H_a, H_b, H_c에서 중심으로부터 각각 50, 100pixel 범위의 깊이 평균을 Table 2에 나타내었다. 측정 결과 전체 영역에서 보정 후의 오차가 감소한 것을 확인할 수 있었고, 왜곡에 의한 영향이 작은 50pixel의 범위에서 깊이평균의 정확도가 향상되었으며, 단차가 커질수록 배율 보정에 의한 오차가 감소하므로 정확도가 점차 향상되는 것을 알 수 있었다. 계단형태의 물체 실험에서 보정후의 정확도가 최대 1.55% 향상되었다.



계단 형태 경사진 형태
Fig. 11 Measured objects

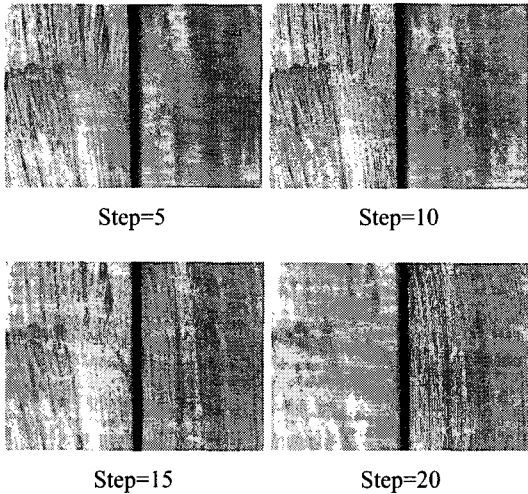


Fig. 12 Calibrated step images of a step shaped block

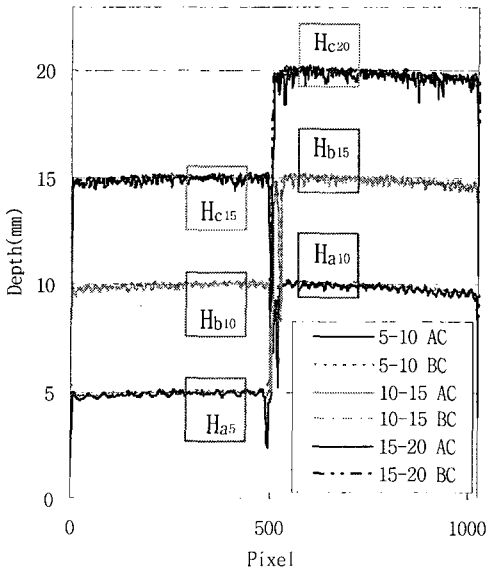


Fig. 13 Comparisons of measured depth values

Table 1 Computed means of depth errors

	5-10		10-15		15-20	
	AC	BC	AC	BC	AC	BC
MAE(%)	0.110	0.135	0.170	0.187	0.197	0.234
RMS(%)	0.161	0.197	0.194	0.214	0.214	0.240

Table 2 Comparisons of measured depth averages

Pixel	Depth (±0.02mm)	Measured depth averages		정확도 향상(%)	
		AC	BC		
50	H _a	5	5.04	5.12	1.55
		10	10.18	10.23	0.52
	H _b	10	10.21	10.27	0.57
		15	15.23	15.35	0.77
	H _c	15	15.19	15.29	0.67
		20	20.29	20.47	0.89
100	H _a	5	5.00	5.07	0.96
		10	10.07	10.11	0.40
	H _b	10	10.12	10.16	0.41
		15	15.09	15.19	0.66
	H _c	15	15.07	15.17	0.61
		20	20.10	20.24	0.73

Fig. 14는 45°경사진 실험 물체의 각 단계에 대한 배율과 중심이동, 그리고 렌즈 스텝에 대한 초점이 맞는 거리를 보정한 영상으로, 단계가 높아짐에 따라 초점이 맞는 부분이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 경사진 실험 물체의 깊이 값이 나타낸 그래프이다. 수평축에 대한 깊이 값이 처음과 끝으로 갈수록 작아지는 이유는 렌즈 왜곡에 의한 영향이다. 보정 전·후의 기울기는 왜곡에 의한 영향을 최소화하기 위해 영상중심을 기준으로 좌우 100pixel의 깊이 값으로 추정하였다. 원래 기울기(S)가 1일때, 측정된 기울기는 Table 3과 같다. 보정후의 정확도가 8.2% 향상된 것을 확인 할 수 있다.

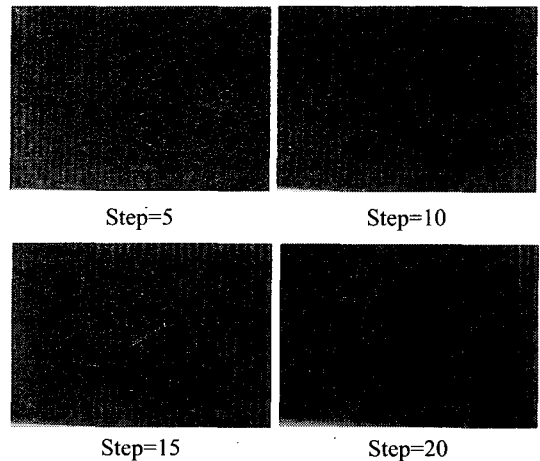


Fig. 14 Calibrated step images of a slanted object

참고문헌

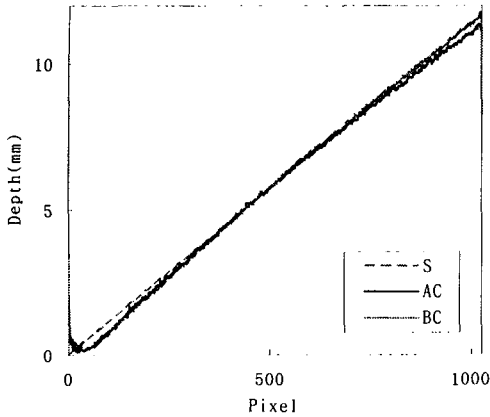


Fig. 15 A comparison of measured depth values

Table 3 Estimated slopes

	Slope
S	1
AC	1.011
BC	1.093

5. 결론

본 논문에서는 DFF기반 삼차원 형상측정을 위해 취득영상에 배율변화를 고려하는 선형배율 영상 보정법을 제시하였다. 계단형태 블록게이지의 측정 결과 선형배율보정 후가 선형배율보정 전보다 정확도가 최대 1.55% 향상되었고, 단차가 커질수록 정확도가 향상되었다. 이를 통해 단차가 큰 물체의 측정도 가능하다는 것을 알 수 있었다. 45° 경사진 물체의 측정 결과 기존 방법 대비 8.2%의 정확도가 향상됨으로써, 제안된 선형배율보정법은 기존의 방법보다 더 정확한 깊이측정이 가능함을 알 수 있다. 향후, 측정오차를 최대한 감소시키기 위해 정밀 스테이지 상에서 대상물체의 텍스처와 구조적 조명의 설계, 그리고 렌즈 보정에 대한 연구가 진행될 예정이다.

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단(R05-2004-000-1051 2-0)을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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. Kim, G. B., "A Variable Window Method for Three-Dimensional Structure Reconstruction in Stereo Vision," J. of KSPE, Vol. 20, No. 7, pp. 138-146, 2003.
3. Grossman, P., "Depth from Focus," Pattern Recognition Letters, 5, pp. 63-69, 1987.
4. 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.
5. Shree, K. Nayar and Yasuo, Nakagawa, "Shape from Focus," IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, No. 8, 1994.
6. Subbarao, M., 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.
7. Kim, C. S., Roh, K. W., Kim, C. W., "Depth Extraction from Focused Images Using The Error Interpolation," Proc. of IEEK Summer Annual Meeting, Vol. 22, No. 1, pp. 627-630, 1999.
8. Kim, G. B., "A Multiple Threshold Selection Algorithm Based on Maximum Fuzzy Entropy for the Final Inspection of Flip Chip BGA," J. of KSPE, Vol. 21, No. 4, pp. 202-209, 2004.
9. Lee, S., Ahn, S. C., Meyyappan, A., "Depth from Magnification and Blurring," Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Automation, 1997.
10. Lenz, R. K., Tsai, R. Y., "Techniques for Calibration of The Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and automation, Raleigh, NC, March 31-April 3, 1987.