

디지털 홀로그래피를 위한 정밀측정에서 광학장치의 오차보정 From the precision measurement for a digital holography error revision of optical device

*이성훈¹, #최우천²

*S. H. Lee¹(dtdream79@korea.ac.kr) #W. C. Choi (wcchoi@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Key words : 디지털 홀로그래피, Stepping mirror, HTM(homogeneous transformation matrix)

1. 서론

디지털 홀로그래피(digital holography)에서는 기존의 홀로그래피에서 필요한 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략할 수 있어서 결과를 빨리 얻을 수 있다. 컴퓨터 연산 속도가 증가하고 홀로그래피 영상 획득 장치의 발전으로 인해 디지털 홀로그래피 기술은 여러 분야에 매우 유용한 측정도구가 되고 있다.

기존의 연구[1]에서는 레이저 스캐닝 시스템을 활용하여 일반적인 조형물과 같은 물체의 표면형상을 측정하고, 3차원 영상으로 물체의 형상을 복원하였다. 그러나 복잡하고 정밀한 3차원 물체의 경우에는 시간적 제약이 있고 수~수십 μm 에 해당하는 표면 형상에 대한 미세한 측정이 어렵다.

디지털 홀로그래피에서 일반적으로 마이크로미터 이하의 문양을 3차원 측정하기 위하여 공초점 현미경을 사용하고 있다. 공초점 현미경은 평면 해상도가 매우 좋고 3차원 측정도 가능하기 때문에 많이 사용되나, 측정 시간이 길다는 것과 복잡한 광학 시스템으로 측정 장비가 복잡하다는 단점이 있다.[2-3]

본 연구에서는 기존의 비접촉식 3차원 측정기가 가지고 있는 광학시스템의 복잡성과 백색광 방식의 느린 측정속도를 개선하기 위해 홀로그래피 방식을 채택했다. 홀로그래피 방식은 빠른 측정 속도와 시스템의 간편성 그리고 정확한 3차원 상을 구현할 수 있는 장점이 있으나 아직 높은 해상도를 구현하지 못한다.

이러한 해상도 문제를 해결하기 위하여 많은 간섭패턴을 얻는 방법을 제안하는데 있어서 정밀한 측정을 위해 물체광에 stepping mirror를 설치하여 렌즈를 통과한 후 물체를 비추고, 물체에서 반사된 빛이 mirror에 반사하여 CCD에 도착하는 형태로 물체광을 미세하게 다른 각도로 변화시켜서 동일한 측정물에 대해 많은 홀로그램 정보를 얻고자 할 때 이를 이용하여 형상변화에 따른 오차 파라미터를 구현하고 광학 장비에 형상 및 치수를 이미 알고 있는 표준시편을 정해진 위치에 두고 측정하여 물체광의 입사각도, 렌즈의 위치, 틸팅각 등에 설치 오차가 포함되어 알고 있는 시편을 측정하여 미지의 오차들을 결정하고자 한다.

2. 장치구성

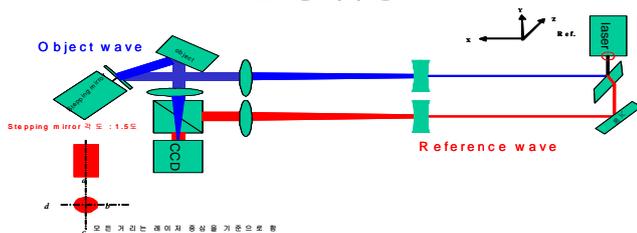


Fig. 1 Schematic of digital holographic

본 연구에서 구성하고자 하는 장치의 개념도가 Fig. 1에 나타나있다. 레이저를 나온 빔을 빔스플리터로 두 개의 빔, 즉 참조광과 물체광으로 나누고 참조광은 미러, 렌즈

를 거쳐 CCD에 다다른다. 이에 반해 물체광은 stepping mirror를 거치고 렌즈를 통과한 후 물체를 비추고, 물체에서 반사된 빛이 빔스플리터를 통과하여 CCD에 도착한다. 두 빛이 합쳐져서 간섭무늬에 해당하는 홀로그램을 만들고, 이 CCD 이미지가 컴퓨터로 전달되어 분석된다.

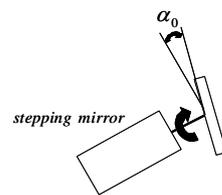


Fig. 2 stepping mirror

기존의 홀로그래피 방법과 다른 점은 스텝핑 미러를 사용한다는 점이다. Fig. 2에 나타난 스텝핑 미러 평면이 스텝핑 모터의 축에 수직인 평면과 α_0 만큼 기울어지게 설치되어 있다. 이로 인해 stepping motor의 회전에 따라 미러 평면의 각도가 변한다. stepping motor로 일정한 각도 간격으로 회전한 후 정지하고 측정을 하며 이 과정을 반복한다. 예를 들어 10° 간격으로 회전시킨다면 모터축 1회전 동안 36번 측정이 이루어진다. 미러의 기울어진 각도 α_0 는 적절한 값을 여러 실험을 통하여 결정한다. 이렇게 각도가 달라진 미러에 물체광이 입사되면 각도에 따라 반사각이 달라진다. 반사된 물체광은 물체에 비추지며 물체로부터 반사된 빛이 참조광과 합쳐진다. 이렇게 하여 수십 개의 정보를 얻을 수 있고, 이와 같이 많은 정보로부터 측정 정밀도를 향상시킬 수 있다.

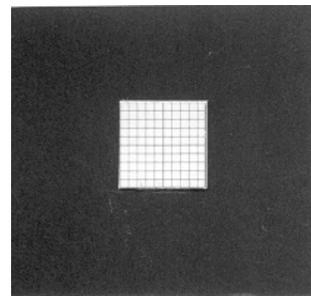


Fig. 3 standard block

Fig. 3에서와 같이 오차보정 알고리즘에서 기구의 파라미터 오차를 특정점과의 거리를 측정하여 장치 오차를 구하기 위해 특정한 시편을 구성하여 측정에 사용하였다.

3. 오차보정 알고리즘

각각의 렌즈간의 관계식을 구성함에 앞서서 알고리즘의 구성을 볼 때 다음과 같다.

$$f_{for}(pr_{ini}, q) = T_r \quad (1)$$

pr_{ini} : 알고는 있지만 정확하지 못한 파라미터의 값의 벡터
 pr : 파라미터의 값의 벡터
 q : 렌즈 간의 위치
 T : 위치와 자세를 나타내는 동차행렬
 T_r : 값을 역기구학 함수에 대입하면 측정길이를 계산할 수 있으나 실제 측정값과 차이가 생긴

$$f_{inv}(T_r) = l_c \quad (2)$$

f_{inv} : 역기구학 함수
 $l_c = f_c(pr_{ini}, q)$: 원점에서 특정점까지의 계산된 길이
 $l = f_c(pr, q)$: 원점에서 특정점까지의 측정된 길이

l_c 와 l 차이는 pr_{ini} 와 pr 사이의 차이에 의해 발생하는데 l_c 와 l 사이의 값의 차이를 줄임으로써 기구의 파라미터 오차를 줄여나가는 구성으로 이루어져 있다.

각각의 볼록렌즈, 오목렌즈, 거울간의 상호관계식을 구하는 식으로는 HTM (homogeneous transformation matrix) 구성식을 렌즈에 따라 적용하였는데 식으로는 다음과 같다.

$${}_{R_0}T_{R_n} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x \cos \theta_z & & -\cos \theta_x \sin \theta_z & \sin \theta_y & P_x \\ \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \cos \theta_x \sin \theta_z & & -\sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z + \cos \theta_x \cos \theta_z & -\sin \theta_x \cos \theta_y & P_y \\ -\cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_x \sin \theta_z & & \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z + \sin \theta_x \cos \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_y & P_z \\ 0 & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} O_{ix} & O_{iy} & O_{iz} & P_x \\ O_{jx} & O_{jy} & O_{jz} & P_y \\ O_{kx} & O_{ky} & O_{kz} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{R_0}T_{E_n} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_x \cos \varepsilon_z & & -\cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_z & \sin \varepsilon_y & 0 \\ \sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_y \cos \varepsilon_z + \cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_z & & -\sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_y \sin \varepsilon_z + \cos \varepsilon_x \cos \varepsilon_z & -\sin \varepsilon_x \cos \varepsilon_y & 0 \\ -\cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_y \cos \varepsilon_z + \sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_z & & \cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_y \sin \varepsilon_z + \sin \varepsilon_x \cos \varepsilon_z & \cos \varepsilon_x \cos \varepsilon_y & 0 \\ 0 & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & 0 \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x & 0 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

모든 광학기기에서 6 자유도 ($\delta_x, \delta_y, \delta_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$)를 가지고 있고 각각의 오차의 영향을 미치는 요소성분만을 본다.

Fig. 4에서 보듯이 각각의 광학기기 사이에서 렌즈와 거울의 반사와 굴절특성을 고려하였다. 또한 레이저의 경로를 기준좌표에서 렌즈의 특성에 의해 좌표가 결정되지만 오차성분을 포함하면 다른 경로의 특성이 발생한다. 예를 들어 C_2 에서 C_3 로 가는 경로가 달라졌을 때 다른 경로의 점을 구하기 위해선 C_3 에 가상의 평면이 있다고 가정한다 후 변화된 각도에서의 평면과 C_2 에서 시작되는 좌표에서의 만나는 점을 구하는 방식으로 경로를 추정하였다.

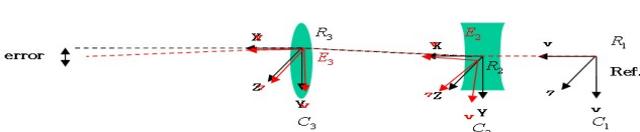


Fig. 4 Change of the laser course which it follows in error

이에 대한 식으로, 공간상의 평면의 식은 $ax + by + cz + d = 0$

이고, 공간상의 직선의 식은 다음과 같다. $(m_x, m_y, m_z)t + (A, B, C)$

여기서 m_x, m_y, m_z 는 레이저의 경로상의 기울기이다.

교점의 좌표는 다음 식으로 구할 수 있다. $(m_x t + A, m_y t + B, m_z t + C)$

이 교점은 이상적인 좌표계의 원점이 되나 실제의 좌표는 오차를 포함하고 있으므로, 실제 원점은 다음과 같다.

$$(m_x t + A + \delta_{x_n}, m_y t + B + \delta_{y_n}, m_z t + C + \delta_{z_n})$$

여기서

δ_{x_n} : optic 설치오차로 인한 x 방향 선형오차
 δ_{y_n} : optic 설치오차로 인한 y 방향 선형오차
 δ_{z_n} : optic 설치오차로 인한 z 방향 선형오차

또한 각 광학기기에서의 가상의 평면을 둔다고 하였을 때 stepping mirror 에서 각이 변하면서 공간 상의 평면의 식이 각각 변하게 되는데, 이것도 고려해야 한다.

파라미터 차이에 의해 발생하는 l_c 와 l 사이의 값의 차이를 줄임으로써 기구의 파라미터 오차를 줄여나가는 보정알고리즘으로 아래 Fig. 5 에서와 같이 보정횟수와 오차보정 함수의 그래프로 나타내게 된다. 이 그래프는 이전의 역기구학적 함수의 알고리즘 결과를 나타낸 것이다.

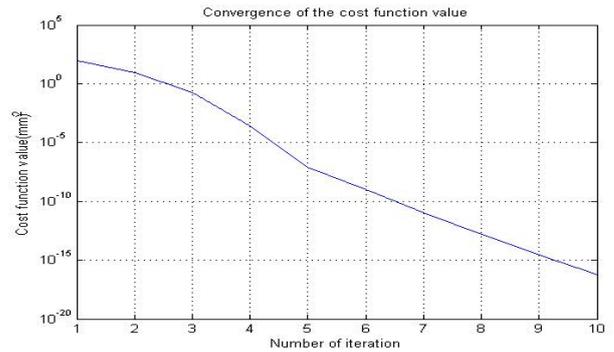


Fig. 5 Convergence of the cost function value

4. 결론

HTM (homogeneous transformation matrix)와 기구학적 해석을 이용하였으며 알고는 있지만 정확하지 못한 파라미터의 길이와 계산된 길이의 차를 반복하면서 0 에 수렴하는 형식으로 오차를 보정하였다. 디지털 홀로그래피 광학요소의 셋업오차를 찾고 보정하여 정밀한 측정을 하게 된다.

참고문헌

1. C. H. Chen, and A. C. Kak, "Modeling and Calibration of a Structured Light Scanner for 3-D Robot Vision," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 807-815, March 1987.
2. 김성규, 최현희, 손정영, "디지털 홀로그래피에서의 공초점 렌즈계를 이용한 보다 큰 물체의 기록," 한국광학회지, 제 14 권, 3 호, pp. 244-248, 2003.
3. 조형준, 김두철, 유영훈, 정원기, 신상훈, "디지털 홀로그래피 현미경과 위상 필름을 이용한 3 차원 측정" 한국광학회, 한국광학회지 제 17 권 제 4 호, 2006. 8, pp. 329 ~ 334.