

난반사형 광삼각법 변위 센서의 모델링 및 거동 해석

오세백*(한국과학기술원 기계공학과), 김경찬(한국과학기술원 기계공학과),
김수현(한국과학기술원 기계공학과)

Modeling and Analysis of Diffuse-type Optical Triangulation Displacement Sensor

S.B. Oh(Mechanical Eng., KAIST), K.C. Kim(Mechanical Eng., KAIST), S.H. Kim (Mechanical Eng., KAIST)

ABSTRACT

Optical triangulation displacement sensors(OTDSs) are widely used for their simple structure, high resolution, and long operating range. However, there are several factors that must be taken into account in order to obtain high accuracy and reliability: Measurement errors from inclinations of an object surface, probe signal fluctuations generated by speckle effects, power variation of a light source, electronic noises, and so on. Previous models of OTDSs can not show reasonable behavior as change of surface inclination and shape of light intensity distribution on the detector. In this paper, we propose a new and reasonable modeling for diffuse-type OTDSs based on a geometrical optics. To verify propriety of new modeling, we take basic experiments. Shape of light intensity distribution is asymmetric in both simulation result and experimental result. Both simulation result and experimental result show same tendency of light intensity distribution movement as changing surface inclination

Key Words : Optical Triangulation Displacement Sensor (광삼각법 변위 센서), Light Intensity Distribution (광강도 분포), 측정 표면 기울어짐 (surface inclination)

1. 서론

광삼각법 변위 센서(optical triangulation displacement sensors; OTDSs)는 비접촉식 측정 방식을 사용하며 서브미크론의 분해능 측정이 가능하기 때문에 여러 분야에서 널리 쓰이고 있다. 더욱이 빠른 응답, 간단한 구조, 우수한 반복성, 높은 감도, 그리고 넓은 측정범위를 가진다.^[1-3] 그러나 측정 표면의 기울어짐, 스펙클 현상, 광원의 출력 변화, 광점 검출 소자의 잡음 등에 의한 오차로 인해 OTDS의 성능이 제한된다.^[4-6]

이러한 광삼각법 변위 센서의 오차들이 센서의 거동에 미치는 영향에 대해 고찰하기 위하여 광점 검출 소자 상에서의 광 강도 분포에 대한 연구가 행하여 졌으나 난반사형 광삼각법 변위 센서의 실제 거동을 제대로 묘사하는 연구는 없었다. Smith^[7]의 모델에서는 광점 검출 소자 상에서의 광 강도 분포 모양이 실제 모양과는 다르며 Kim^[8]의 모델에서는 측정 표면의 기울어짐에 따른 광 강도 분포의

변화가 실제 경향과는 일치하지 않는다. 본 논문에서는 기존 모델의 모델링 방식에 더하여 기하 광학적 원리를 도입하여 새로운 모델을 제안한다. 또한 새롭게 제안한 모델의 타당성을 검증하기 위하여 기본적인 실험을 행하였다. 2 장에서는 난반사형 광삼각법 변위 센서의 기본 측정 원리와 기존 의 불충분한 모델들에 대해 설명하고 3 장에서는 새롭게 제안한 모델에 대해서 논한다. 4 장에서는 타당성 검증을 위해 수행한 실험 결과에 대해 설명하며 마지막으로 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 난반사형 광삼각법 변위 센서

2.1 기본 측정 원리

난반사형 광삼각법 변위 센서는 측정 표면으로 난반사 표면을 사용하며 그림 1 과 같이 측정 표면에서 반사된 빛이 광점 검출 소자 위에서 점으로 결상된다는 가정 하에 광점 검출 소자 상의 광점의 위치 차이를 변환하여 측정 표면의 변위를 측정한다

다. 그러나 실제로는 측정 표면에서 반사된 빛이 광점 검출 소자 상에서 점으로 결상되지 않고 광강도 분포(light intensity distribution)를 갖게 된다. 표면의 기울어짐, 스펙클 현상, 광원의 출력 변화, 광점 검출 소자의 잡음 등이 광강도 분포의 성질을 변화시키는 요인이다. 따라서 정확하고 정밀한 측정을 위해서는 광점 검출 소자 상의 광강도 분포가 반드시 고려되어야 한다.

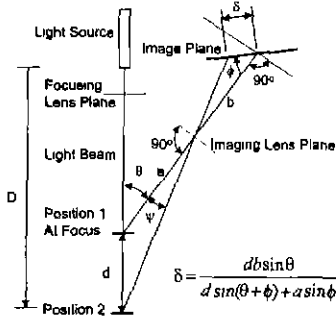


Fig. 1 Principle of OTDS

2.2 기존 난반사형 광삼각법 변위 센서 모델

광점 검출 소자 상의 광강도 분포의 모양과 측정 표면의 기울어짐에 대한 변화 경향에 대해 고찰하기 위하여 많은 연구가 이루어졌으나 실제 경과와는 다른 결과를 보여주고 있다.

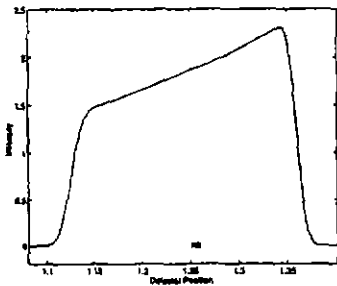


Fig. 2 Result of Smith's Model

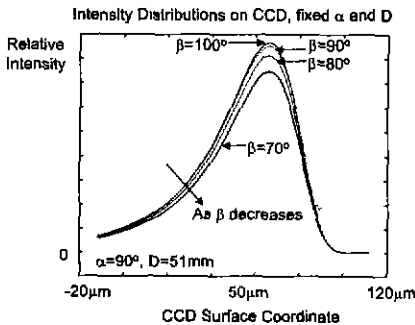
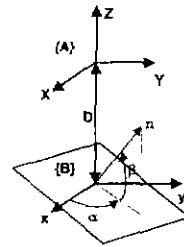
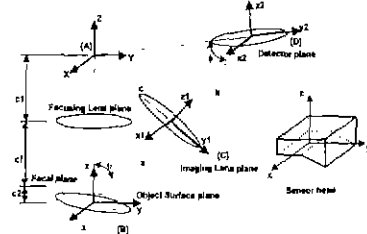


Fig. 2 Result of Kim's Model

그림 2는 Smith의 모델로 실제 광강도 분포의 모양과는 다르며 그림 3은 Kim의 모델로서 측정 표면의 기울어짐에 대하여 실제와는 다른 경향을 보여준다.

3. 새로운 모델링



3.1 기본 가정 및 좌표계 정의

새롭게 제안한 난반사형 광삼각법 변위 센서의 모델링에 사용된 기본 가정은 다음과 같다.

- 빛은 무수한 광선 다발로 이루어져 있다.
- 광선 다발들은 서로 영향을 끼치지 않는다.
- 광속은 가우시안 강도 분포를 갖는다.
- 렌즈의 수차는 존재하지 않는다.

또한 사용한 좌표계는 그림 4와 같다.

Fig. 4 (a) Definition of coordinate frames and variables

Fig. 4 (b) Definition of object surface parameters

3.2 모델링 과정

광선 다발은 집광 렌즈 평면으로부터 (1)식과 같이 가우시안 광강도 분포를 갖고 출발하는 것으로 간주한다.

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{a^2}\right) \quad (1)$$

광선 요소들은 집광 렌즈의 초점을 향해 직진하며 측정 평면에 도달한다. 광선 요소의 진행 직선 방정식과 측정 평면의 방정식을 이용하여 측정 평면과 집광 렌즈로부터 출발할 광선 요소의 교점을 알 수 있다. 측정 평면에서 반사된 광선 요소는 난

반사를 일으키며 결상 렌즈에 의해 결상 평면에 상을 맺게 된다. 이 과정에서 기존 연구와 달리 기하광학적 원리인 얇은 렌즈의 방정식을 이용하여 그림 5 와 같이 측정 평면과 집광 렌즈로부터 출발한 광선 요소의 교점을 물체(object)로 하여 결상 렌즈에 의한 상(image)의 위치를 구한다. 그리고 광점 검출 소자에 의한 초점의 벗어남(defocus)을 고려하여 광점의 크기를 계산한다. 이후 광점 검출 소자로서 검출 소자의 픽셀의 크기와 픽셀과 픽셀 사이의 불검출 구간을 고려하여 전체적인 광 강도 분포의 모양을 계산한다.

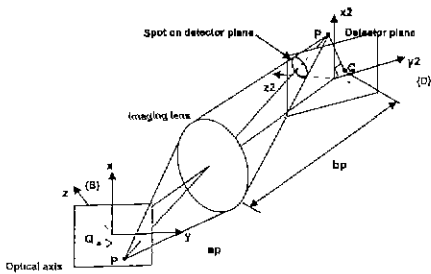


Fig. 5 Relation between object point P and image point Q

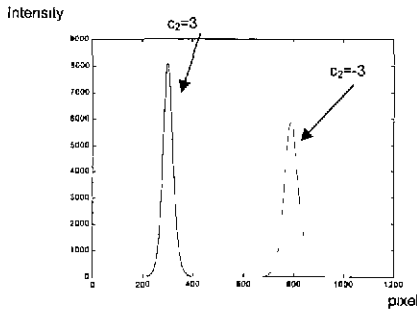


Fig. 6 Simulation Result when $c_2=3$ and $c_2=-3$ mm

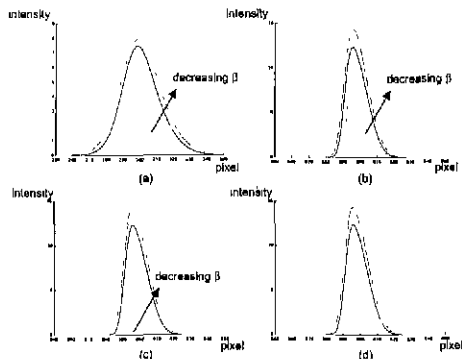


Fig. 7 Simulation Result (a) $c_2=3$ (b) $c_2=-1$ (c) $c_2=3$ mm (d) all together (a),(b), and (c) when $\alpha=90^\circ$ and $\beta=80^\circ, 90^\circ$ and 100°

4. 실험

4.1 실험 장치

새롭게 제안한 난반사형 광삼각법 변위 센서 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 행하였다. 실험 장치는 그림 8 과 같다.

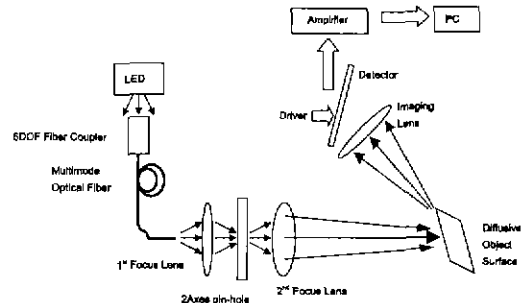


Fig. 8(a) Schematic diagram of experimental setup

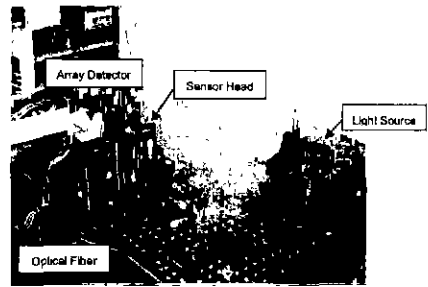


Fig. 8(b) Real whole view of experimental setup

4.2 실험 결과

그림 8 의 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 9 는 측정 평면을 세가지 다른 위치에 위치시키고 얻은 결과이다. 광강도 분포가 비대칭 형상이며 측정 평면의 변위에 따라 최대값과 최대값 위치, 형상이 바뀌는 것을 볼 수 있다.

그림 10 은 세가지 다른 위치에서 $\alpha=90^\circ$ 로 고정되고 β 가 70° 에서 110° 로 변환에 따른 실험 결과이다. β 가 90° 에서 작아지면 광강도 분포의 최대값이 커지며 β 가 90° 에서 커지면 광강도 분포의 최대값이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 β 가 90° 에서 작아지면 측정 평면의 법선 벡터가 광점 검출 소자 쪽으로 향하게 되기 때문에 광강도가 세지는 효과에 따른 것이다.

실험 결과와 3 장의 새롭게 제안한 모델에 의해 얻은 결과 모두 광강도 분포는 비대칭 형상이며 측정 평면의 기울어짐에 따른 광강도 분포의 변화 양상 또한 같은 경향임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 난반사형 광삼각법 변위 센서의 새로운 모델링 방법을 제안하였다. 이는 난반사형 광삼각법 변위 센서의 오차 요인 해석에 있어 필수적인 광점 검출 소자 상의 광강도 분포의 경향을 알아보기 위한 것으로서 기존의 모델링이 실제 광삼각법 변위 센서의 거동과는 다른 경향을 보여주고 있기 때문이다. 새로운 모델링 방법은 빛을 무수히 많은 광선 다발로 나누고 광선 추적을 행하며 기하 광학적 원리를 도입하여 광점 검출 소자 상의 광강도 분포를 계산한다. 또한 제안한 새로운 모델링의 타당성 검증을 위하여 난반사형 광삼각법 변위 센서 실험 장치를 꾸미고 기본적인 실험을 행하였다. 실험 결과, 제안한 모델링에 의한 결과는 광강도 분포의 모양이 비대칭 형상이며 측정 평면의 기울기 변화에 대해 실제 결과와 같은 경향을 보인다. 추후 연구 과제는 제안한 모델링에 의한 결과를 이용하여 난반사형 광삼각법 변위 센서의 오차 요인 해석을 행하고 난반사형 광삼각법 변위 센서의 성능 향상 방법을 모색하는 것이다.

후 기

본 연구는 BK21 사업에서 일부 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. T.A.Clarke, K.T.V.Grattan, and N.E.Lindsey, "Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures" Proc. of SPIE, Vol. 1332, pp.474-486, 1990
2. H.Wang and D.Malacara, "Optical triangulation: A dual-channel configuration" Rev. of Sci. Instrum., Vol. 67, pp.2606-2611, 1996
3. M.C.Leu and Z.Ji, "Non-linear displacement sensor based on optical triangulation principle" U.S.Patent 5113080, 1992
4. D.T.T.Kilgus and D.J.Svetkoff, "Imaging geometry and error sensitivity in triangulation-based optical receivers" Proc. of SPIE, Vol. 2599, pp.106-119, 1996
5. H.Rothe, M.Tuerschmann, P.P.Mager, and R.Endter, "Improved accuracy in laser triangulation by variance-stabilizing transformations" Optical Eng. Vol.31, pp.1538-1545, 1992
6. T.Kanade and T.M. Sommer, "An Optical proximity sensor for measuring surface position and orientation", Technical Report CMU-RI-TR-83-15, Robotics

Institute of Carnegie Mellong Univ. Pittsburgh, 1983

7. K.B.Smith, "Modeling, performance evaluation, calibration, and path planning of point laser triangulation probes in coordinate metrology" Ph.D. Dissertation, The Ohio State Univ. Columbus, 1996
8. K.C.Kim, "System design and signal processing algorithm for precision optical displacement probes" Ph.D. Disseration Proposal, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, Korea, 1999