

오차 최소화된 정밀 광삼각법 프로브의 해석 및 설계

김경찬* · 오세백* · 김종안* · 김수현* · 곽윤근*

Design & Analysis of an Error-reduced Precision Optical Triangulation Probes

Kyung-Chan Kim*, Se-baek Oh*, Jong-Ahn Kim*, Soohyun Kim*, and Yoon Keun Kwak*

Key Words : Triangulation Sensor, Displacement Measurement, Optical Position Sensor, Measurement Errors, Inclination Errors

Abstract

Optical Triangulation Probes (OTPs) are widely used for their simple structure, high resolution, and long operating range. However, errors originating from speckle, inclination of the object, source power fluctuation, ambient light, and noise of the detector limit their usability. In this paper, we propose new design criteria for an error-reduced OTP. The light source module for the system consists of an incoherent light source and a multimode optical fiber for eliminating speckle and shaping a Gaussian beam intensity profile. A diffuse-reflective white copy paper, which is attached to the object, makes the light intensity distribution on the charge-coupled device (CCD). Since the peak positions of the intensity distribution are not related to the various error sources, a sub-pixel resolution signal processing algorithm that can detect the peak position makes it possible to construct an error-reduced OTP system

1. 서론

광삼각법 프로브(optical triangulation probes; OTPs)는 서브미크론의 분해능으로 비접촉으로 측정이 이루어진다는 특징으로 인해 변위 측정, 3차원 측정기 등 여러 분야에서 널리 쓰이고 있다. 더욱이 빠른 응답, 간단한 구조, 우수한 반복성, 높은 감도, 그리고 넓은 측정범위를 가진다. 그러나 측정 표면의 기울어짐, 스팟클 현상, 광원의 출력 변화, 광점 검출 소자의 잡음 등에 의한 오차로 인해 OTP의 성능이 제한된다.^[1,2]

이와 같은 오차를 줄이기 위해 많은 연구가 행해졌다. 제안된 방법 중의 하나는 측정 표면 주위에 여러 개의 광점 검출 소자를 설치하고 공간적 평균화(spatial averaging)를 통하여 더욱 정확한 출력을 얻는 것이다.^[3] 또 다른 방법은 광점 검출 소자 상에서 광점의 위치만을 검출하는 것이 아니라

광점 검출 소자 상의 모든 광강도의 총량을 측정하고 처리하는 새로운 OTP를 설계하는 것이다.^[4] 그러나 이 방법은 광강도의 총량이 광원의 출력 변화와 잡음에 민감하기 때문에 실제 응용에 적합하지 않다. 본 논문에서 우리는 OTP의 구성 요소들에 대한 재해석과 시뮬레이션을 통하여 구조가 간단하고 실제 구현 가능한 OTP에 대한 새로운 설계 기준을 제안하였다. 또한 제안한 시스템의 가능성을 증명하기 위해 기본적인 실험을 수행하였다.

2. 오차 최소화 시스템 구조

OTP의 측정 원리를 도시하면 그림 1과 같다. 측정 표면에서 반사된 빛이 광점 검출 소자 위에서 점으로 결상된다는 가정하에 광점 검출 소자 상의 광점의 위치 차이를 변환하여 측정 표면의 변위를 측정한다. 그러나 실제로는 측정 표면에서 반사된 빛이 광점 검출 소자 상에서 점으로 결상

* 한국과학기술원 기계공학과

되지 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. 또한 신호 처리 알고리즘도 변화시켜주는 요인이다. 또한 신호 처리 알고리즘도 변화시켜주는 요인이다. 또한 신호 처리 알고리즘도 변화시켜주는 요인이다.

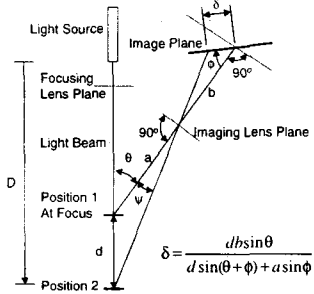


Fig. 1 Principle of OTP

2.1 광원과 반사 표면

광강도분포에 영향을 미치는 요인 중 하나는 간섭성 빛이 거친 표면 위에서 산란될 때 일어나는 스펙클 현상이다.^[5] 이것을 제거하기 위하여 우리는 레이저 광원을 비간섭성 광원인 LED 로 대체하였다. 또한 대상 표면의 반사 특성도 광강도 분포에 영향을 미친다. 대상 표면의 반사 특성은 예측할 수 없기 때문에 오직 실험을 통해서만 결정할 수 있다. 따라서 대상 표면의 종류에 상관 없이 대상 표면의 변위를 측정할 수 있는 OTP 는 존재할 수 없다. 그러므로 정확하고 정밀한 측정을 위해서는 대상 표면에 표면의 반사 특성을 알고 있는 작은 조각을 부착하여 측정을 한다. 우리는 작은 조각으로서 난반사 표면인 백색 복사 용지를 선택하였는데 백색 복사 용지는 쉽게 구할 수 있고 두께 80μm, 단위면적당 질량 6.4mg/cm² 으로 대상 표면에 대한 물리적 영향이 매우 작기 때문이다.

2.2 광점 검출 소자와 신호 처리 알고리즘

OTP 에 많이 사용되고 있는 광점 검출 소자로서 PSD (Position Sensitive Device)와 CCD (Charge Coupled Device)를 들 수 있다. 이 중 PSD 는 광강도 분포의 중심점 위치만을 검출해 내는데 비해 CCD 는 전체 분포 형상을 얻을 수 있다. 광점 검출 소자 상의 광강도분포가 대칭이라면 최대값 위치는 중심점 위치와 일치하지만 렌즈의 수차와 샤임플러그 조건(Scheimplug condition)에 의하여 광강도 분포는 대칭이 아니다. 따라서 PSD 는 무한대의 분해능과 빠른 시간 응답을 가지지만 정확한 측정을 보장할 수 없다. 반면 CCD 는 픽셀 크기로 인

하여 분해능이 제한된다. 이 단점을 극복하기 위하여 서브 픽셀의 분해능을 구현할 수 있는 신호 처리 알고리즘이 반드시 필요하게 된다. 또한 섹션 3 과 4 에서 서술하겠지만 광강도 분포의 여러 변수들 중 표면의 기울어짐, 광원의 출력 변화, 주변광에 민감하지 않은 변수는 오직 광강도 분포의 최대값 위치뿐이다. 따라서 오차 최소화된 OTP 는 반드시 CCD 광점 검출 소자 상의 최대값 위치를 검출하여 변위로 환산하는 서브 픽셀 알고리즘을 필요로 한다.

3. 시뮬레이션

광강도분포의 형상과 제안된 OTP 시스템의 유효성에 대해 고찰하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 스미스는 OTP 에 대해서 중첩의 원리와 광선 추적을 이용한 시뮬레이션 모델을 제안하였다.^[6] 스미스의 모델에서는 광원, 반사 표면, 광선의 전과 구조들이 지나치게 단순화되었다. 결과적으로 시뮬레이션 결과가 실제 상황을 적절히 반영하지 못하였다. 본 연구에서 우리는 OTP 의 새로운 모델을 제안하였다. (그림 2)^[7] 광원에서 방출된 비간섭성 빛들은 m 개의 광 요소로 나누어 진다. 이 빛들은 방사상 방향으로 지속적으로 감쇄하기 때문에 이 광 요소들 중 대부분이 초점 렌즈 평면의 중심에 집중된다.

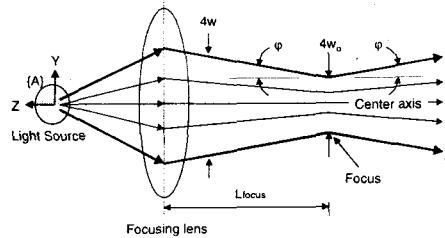


Fig. 2 Light beam propagation model

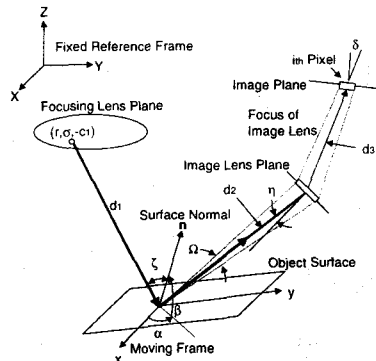


Fig. 3 Proposed simulation model

그림 3 은 시뮬레이션을 위한 광선 전파 모델이다. 초점 렌즈를 통과한 광 요소들은 초점을 향하여 직진하고 유한한 면적의 초점을 지난 후 그림 3 에서와 같이 전파 방향이 바뀐다고 가정하고 광선의 광강도 프로파일은 가우시안으로 가정한다. 어레이 광점 검출 소자의 i 번째 픽셀 상에서의 강도는 중첩의 원리에 의하여 아래와 같이 가정할 수 있다.

$$I(i) = \sum_r \sum_o k \cdot I_m \exp\left(-\frac{2r^2}{4R^2}\right) \Omega \frac{\cos\eta}{d_o^2}$$

여기서 k , I_m , 그리고 R 은 각각 비례 상수, 광원의 광강도 파워, 그리고 초점 렌즈 평면 상에서 광점의 반경이다. 그림 4 는 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 변수들은 $a=35.0\text{mm}$, $b=48.1\text{mm}$, $L_{\text{focus}}=38.1\text{mm}$, $w_o=5\mu\text{m}$, $\theta=30^\circ$, $\phi=22.8^\circ$, $\varphi=1.72^\circ$ 이다. 광점 검출 소자는 1024 개의 픽셀을 갖고 있고 픽셀 하나의 크기는 $12\mu\text{m}$ 라 가정했다. 그림 4 의 왼쪽 그림은 대상 표면의 변위와 광강도분포 사이의 관계이다. 광강도 분포의 최대값과 최대값 위치가 변위에 따라 변하고 광강도분포는 비대칭 형상을 알 수 있다. 광강도분포가 비대칭이기 때문에 오프셋값이 변한다면 광강도분포의 중심점 또한 변한다. 그림 4 의 오른쪽 그림에서는 고정된 변위에 대해 각 β 가 변함에 따라 최대값은 변하지만 광강도분포의 최대값 위치는 일정함을 알 수 있다. 따라서 오차에 강한 OTP 를 설계하기 위해서는 광강도분포의 최대값 위치를 검출하고 대상 표면의 변위로 변환해야만 한다.

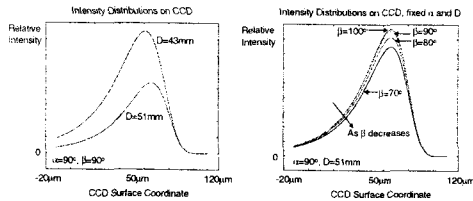


Fig. 4 Simulation Results

4. 실험 결과

그림 5 는 α 는 고정된 상태에서 여러 가지 β 에 대한 실험 결과이다. 실험 변수들은 $a=65.9\text{mm}$, $b=46.3\text{mm}$; $L_{\text{focus}}=38.1\text{mm}$, $w_o=12.5\mu\text{m}$, $\theta=48^\circ$, $\phi=42^\circ$, $\varphi=2.0^\circ$ 이고 픽셀 크기 $12\mu\text{m}$, 1024 픽셀 어레이 광점 검출 소자를 사용하였다. 표면이 센서 헤드에서 멀어짐에 따라 광점 검출 소자의 픽셀 위의 광강도 분포의 최대값 위치는 오른쪽으로 이동하고 최대값은 커진다. 또한 변위가 고정되어 있다면 표면의 기울기 변화에 따라 광강도 분포의 최대값

은 변하지만 최대값 위치는 일정하다

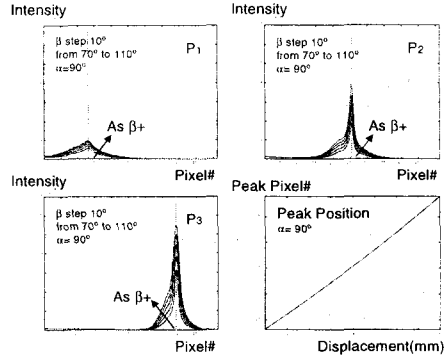


Fig. 5 Experimental Results

그림 5 에서 광강도분포의 경향은 시뮬레이션 결과와 일치한다. 또한 그림 5 에서 최대값 위치와 변위 사이의 관계가 선형적이고 기울기 변화에 강인함을 알 수 있다. 그러나 광강도분포의 비대칭성 때문에 광강도 분포의 중심점 위치로부터 대상 표면의 변위를 계산한다면 센서 출력과 실제 변위 사이의 관계가 기울기 각 β 에 따라 변하게 된다. 또한 변위가 일정해도 광원의 출력 변화나 주위 빛의 레벨의 변화에 따라 중심점 위치가 변하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 비간섭성 광원인 LED 와 난반사 표면, 그리고 어레이 광점 검출 소자를 사용하여 성능이 향상되고 오차가 최소화된 OTP 시스템을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 광강도 분포의 최대값 위치만이 대상 표면의 변위에 정확히 비례함을 알 수 있었다. 광강도 분포의 최대값 위치는 대상 표면의 기울기 변화, 광원의 출력 변화, 주위 빛의 세기와 같은 OTP 의 여러 오차 요인에 영향을 받지 않으며 또한 광강도분포는 비대칭이고 변위가 변함에 따라 광강도분포의 최대값도 변함을 알 수 있었다. 따라서 오차 최소화된 OTP 시스템을 구현하는데 있어, 어레이 광점 검출 소자로 광강도분포의 최대값 위치를 변위로 변환시키는 신호 처리 알고리즘은 필수적이다. 앞으로는 어레이 광점 검출 소자의 제한된 분해능을 극복하기 위해서, 광강도분포의 특성을 고려하여 서브 픽셀 분해능으로 광강도분포의 최대값 위치를 검출할 수 있고 실시간 구현 가능한 개선된 서브 픽셀 신호 처리 알고리즘에 대해서 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) T. A. Clarke, K. T. V. Grattan, and N. E. Lindsey: *Proc. SPIE 1367, San Diego, 1990*, p. 474
- (2) D. B. T. Kilgus and D. J. Svetkoff: *Proc. SPIE 2599, Philadelphia, 1995*, p. 106
- (3) D. Hüser and H. Rothe: *Meas. Sci. Technol.* **9** (1998), 1017
- (4) H. Aoyama, K. Yamazaki, and M. Sawabe: *ASME Trans. Manufacturing Sci. & Eng.* **118** (1996), 40
- (5) R. G. Dorsch, G. Häusler, and J. M. Herrmann: *Applied Optics* **33** (1994), 1306
- (6) K. B. Smith and Y. F. Zhang: *ASME Trans. Manufacturing Sci. & Eng.* **120** (1998), 736
- (7) K. C. Kim: Ph.D. Thesis Proposal, Dept. of Mechanical Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, 1999