

〈論 文〉

광삼각법에 의한 비접촉식 변위측정계의 설계

이재윤* · 김승우**

(1991년 9월 6일 접수)

Design of a Non-contact Type Displacement Measurement System Based on Optical Triangulation Method

Jae-Yoon Lee and Seung-Woo Kim

Key Words : Optical Triangulation Method(광삼각법), Displacement Sensor(변위 센서), Non-Contact Measurement(비접촉식 측정), Inspection Automation(검사 자동화), Optical Measurement(광학 측정)

Abstract

This paper presents a non-contact type displacement sensor designed based on optical triangulation method. The optical principles of the sensor are described in detail with aids of paraxial geometric optics. A prototype sensor is designed and fabricated by using modern optoelectronic hardware. Its measuring performances are evaluated and discussed through a series of calibration processes.

1. 서 론

비접촉 방법에 의한 변위측정기술은 공작물의 가공중(in-process) 형상 치수의 측정 그리고 각종 제측에 대한 자동화기술의 필요성이 증대됨에 따라 수요가 증가하고 있다. 이러한 비접촉식 변위측정에는 전통적으로 전기적인 방법이 주를 이루고 있으며 다양한 원리를 응용하여 가변리럭턴스(variable reluctance)형, 와전류(eddy current)형, 콘덴서(capacitance)형 등의 센서들이 개발되어 실용화되어 오고 있다.⁽¹⁻²⁾ 최근에는 이러한 광학식 방법들은 전기적인 센서들이 갖는 응용상의 문제점인 측정대상물의 재질이나 표면상태에 따라 측정밀도 감도가 변화하는 단점을 제거할 수 있는 가능성을 갖고있다.⁽³⁻⁵⁾

본 연구에서는 측정의 자동화 용도로 사용될 수

있는 광삼각법(optical triangulation method)에 의한 비접촉방식의 광학센서에 대한 기본연구 결과를 서술하였다. 세부적으로 광삼각 비접촉 측정의 기본원리를 제시하고 측정 범위 및 분해능 관점에서의 센서설계의 기본방법을 제시하였다. 최종적으로 실제적인 센서의 설계제작 과정과 시제품의 성능실험의 결과를 기술하였다.

2. 광삼각법 이론

광삼각법은 Fig.1에 보인바와 같이 기하광학원리(geometric optics)에 근거한 2차원 삼각법을 이용한 변위측정 기법이다. 광삼각법의 광학계는 한 평면내에 존재하게 되며 이는 서로 θ 의 각도로 교차하는 두개의 광축(optical axis)을 중심으로 구성된다. 두 광축중 하나는 측정표면에 광점(spot)을 형성하기 위한 집광렌즈(focusing lens)가 갖는 집광광축이며, 다른 하나는 광점의 영상을 수광소자에 투영하기 위한 수광부의 영상렌즈(condensing

*정회원, 삼성종합기술원

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

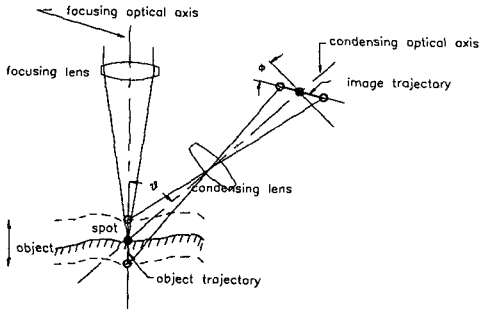


Fig. 1 Basic principle of optical triangulation

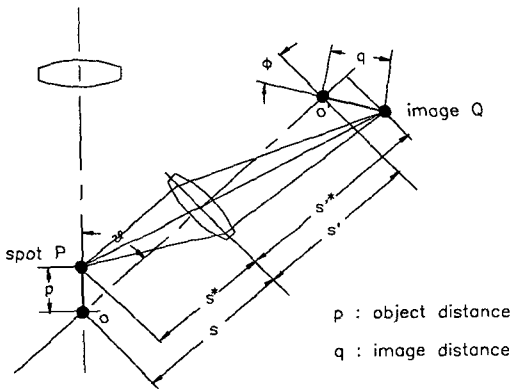


Fig. 2 Geometric optics of optical triangulation

lens)가 갖는 영상광축이다. 측정물의 표면에 형성된 광점은 측정물의 상대위치가 변화함에 따라 집광광축상에서 직선적으로 이동하게 되며 이때의 이동범위를 물체체적(object trajectory)이라 정의한다. 광점이 이동함에 따라 수광소자상의 영상점도 이동하게 되며 이때의 영상점이 이동하는 범위를 영상체적(image trajectory)라 정의한다. 일반적으로 영상체적은 직선으로 간주될 수 있으며 영상광축의 수직방향과 ϕ 의 각도를 갖는다.

Fig. 2는 광삼각법의 기하광학의 원리를 세부적으로 도시하고 있다. 영상렌즈의 초점거리를 f 라고 하면 주어진 물체거리 s 에 대한 영상거리 s' 은 근축광학(paraxial optics) 원리에 의해 다음과 같이 구해진다.⁽⁶⁾

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} \quad (1)$$

또는

$$s' = \frac{sf}{(s-f)} \quad (2)$$

물체체적상의 임의의 점 P 에 대한 영상렌즈로부터의 물체거리 s^* 는 기하학적 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$s^* = s - p \cos \theta \quad (3)$$

여기서 p 는 점 P 의 원점 O 으로부터의 거리이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 점 P 에 대응되는 영상점 Q 의 영상거리 s'^* 는 다음과 같이 얻어진다.

$$s'^* = \frac{(s - p \cos \theta) f}{s - p \cos \theta - f} \quad (4)$$

또한 영상점 Q 의 원점 O' 으로부터의 거리 q 는 영상렌즈의 배율의 관계로부터 다음의 관계를 만족시킨다. 즉

$$\frac{q \cos \phi}{p \sin \theta} = \frac{s'^*}{s^*} \quad (5)$$

식 (3)과 (4)를 식 (5)에 대입하면 물체체적상에서의 광점의 이동거리 p 와 이에 대응되는 영상점의 이동거리 q 는 다음의 관계식으로 구해진다.

$$p = \frac{q \cos \phi (s - f)}{f \sin \theta + q \cos \phi \cos \theta} \quad (6)$$

또한 각도 ϕ 는 식 (1)의 관계를 식 (5)와 (6)에 적용함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\phi = \tan^{-1} (f / (s - f) \tan \theta) \quad (7)$$

식 (6)에서의 p 와 q 의 관계는 Fig. 3에 보인바와 같이 주어진 기하학적 조건하에서 일대일의 대응관계를 가지나 비선형적으로 나타난다. 일반적으로 p 가 음의 값을 가질때, 즉 광점이 변위계로부터

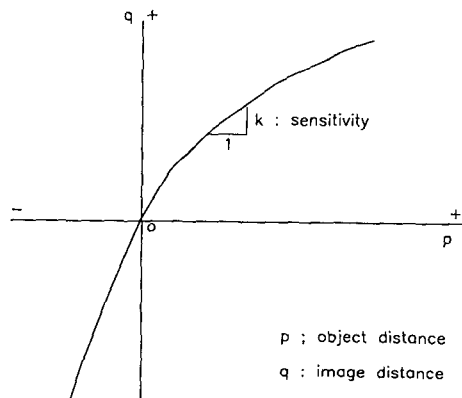


Fig. 3 Relationship between the object and image distance

멀어질 때 영상점의 변위의 민감도가 높으며, 반면 b 가 양의 방향으로 이동함에 따라 민감도가 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

3. 변위측정계의 설계

Fig. 4와 Table 1은 본 연구에서 광삼각법을 이용하여 제작된 변위센서의 외관과 주요설계 사양을 보여주고 있다. 본 변위센서의 광원으로는 크기의 제한에 의해 가급적 소형으로 5 mW의 출력을 낼 수 있는 레이저 다이오드(laser diode)를 사용하였다. 이로부터 출력되는 빛은 단파장(790 nm)으로 광학계의 렌즈들에서 발생하는 색수차(color aberration)를 제거할 수 있는 동시에 수광소자의 파장에 의한 감도변화의 요인을 최소화할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 측정계에서 요구되는 수광소자는 측정의 분해도를 높이기 위해 영상점의 이동을 μm 이하의 분해능으로 감지할 수 있는 고감도가 요구된다. 현재 이러한 성능을 만족시킬 수 있는 수광소자로는 전하연계소자(CCD : charged coupled device), 사분할 광다이오드(quadrant photodiode), 위치감별소자(PSD : position sensitive device)의 세 종류를 들 수 있다.

이중 위치감별소자는 영상점의 절대위치에 무관한 변위의 변화량을 측정할 수 있는 장점을 갖고 있으며, Fig. 5는 본 연구에서 사용된 위치감별소자의 측정원리를 보여주고 있다. 영상점이 감별소자 위에 위치하면 이로부터 광전류가 생성되어 양단자 방향으로 I_1 과 I_2 의 전류가 흐르게 된다.

이때 각각의 전류들은 영상점의 위치 q 와 단자간의 길이 L 에 의해 다음과 같이 결정된다.⁽⁷⁾ 즉

$$I_1 = I_0 \frac{(L+q)}{2L} \quad (8)$$

Table 1 Design Specifications of prototype Sensor

Measuring range	: 10 mm
Stand-off distance	: 31 mm
Repeatability (Peak-to-peak)	: 10 μm
Spot diameter at null point	: 1.5 mm
Focal length of condensing lens	: 21.0 mm
Diameter of condensing lens	: 14.0 mm

$$I_2 = I_0 \frac{(L-q)}{2L} \quad (9)$$

여기서 I_0 는 위치상별 소자에서 발생하는 광전류의 총량이며 이는 영상점의 강도에 비례한다. 위두식(8)과(9)로부터 영상점거리 q 는 다음과 같이 얻어진다.

$$q = L \cdot \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (10)$$

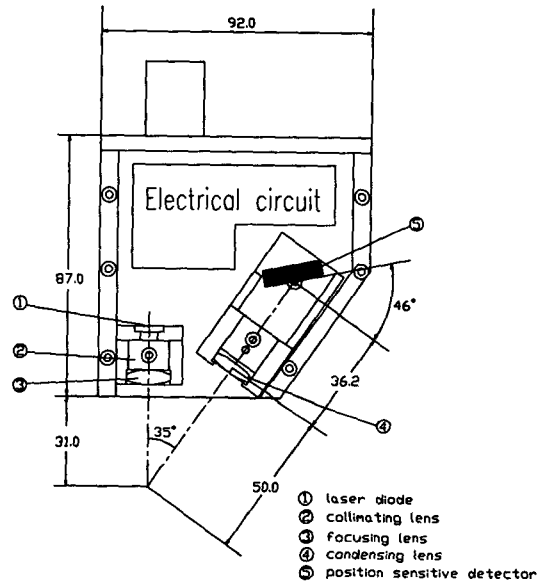
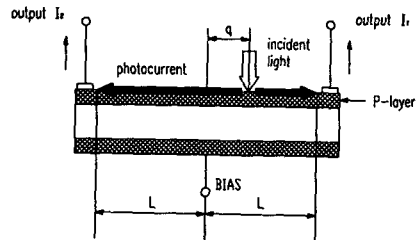


Fig. 4 Prototype design of optical displacement sensor



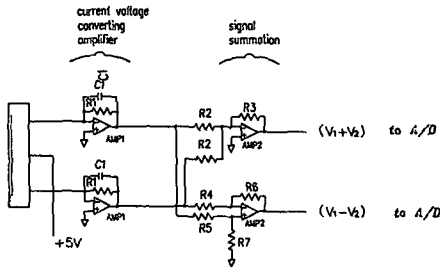
photocurrent $I_s = I_1 + I_2$

$$I_1 = I_s \frac{(L+q)}{2L}$$

$$I_2 = I_s \frac{(L-q)}{2L}$$

$$q = L \cdot \frac{(I_1 - I_2)}{(I_1 + I_2)}$$

Fig. 5 Operating principle of Position Sensitive Device



$$q = K \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)}$$

AMP1 : $\mu A741$ R1 = 200 K Ω C1 = 20 pF
 AMP2 : $\mu A741$ R6 = R7 = 25 K Ω
 R2 = R4 = R5 = 10 K Ω
 R3 = 6.2K Ω

Fig. 6 Electrical circuit of current amplification

Fig. 6은 광전류를 전압신호로 증폭변환하기 위한 전자회로를 보여준다. 증폭 회로는 수광소자로 부터 출력되는 전류 I_1 과 I_2 를 증폭하여 전압신호 V_1 과 V_2 로 변화 시키는 기능을 담당하며 측정의 분해도를 높이기 위한 외부 정전기 교란에 대한 특별한 고려를 필요로 한다.

최종적으로 수광소자의 전류출력은 전압신호로 변환되어 증폭되며 이는 60Hz의 저주파수 필터를 통과하여 출력된다. 출력전압 V_1 과 V_2 는 I_1 과 I_2 와 각각 비례관계를 유지하므로 식(10)을 다시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q = L \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (11)$$

식(11)을 최종적으로 식(6)에 대입하면 물체거리 p 는 다음과 같이 측정될 수 있다.

$$p = \frac{L \cos \phi (s-f)}{f \sin \theta + q \cos \phi \cos \theta} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (12)$$

4. 실험결과 및 토의

Fig. 7은 앞 절에서와 같이 설계제작된 비접촉 변위측정계의 정밀도를 검증하기 위해 사용된 자동 정밀 계측장치의 구조도를 보여준다. 변위계는 직류 모터에 의해 위치제어되는 직선구동축에 고정되어 측정시편과의 거리를 마이크로 컴퓨터(IBM AT/PC)의 지령에 의해 임의의 변환되도록 되어있다. 이때 변위계로부터 출력되는 전기적인 신호

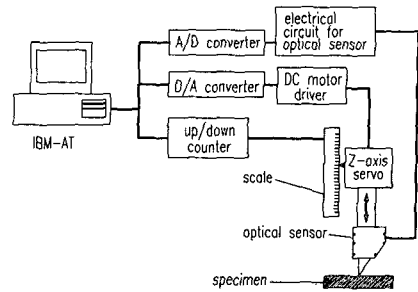
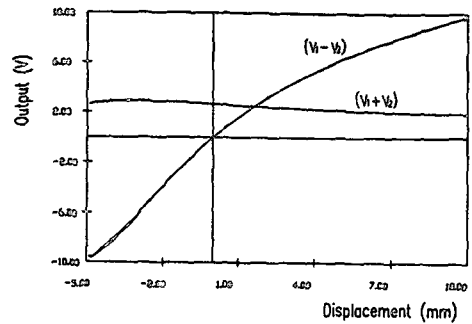
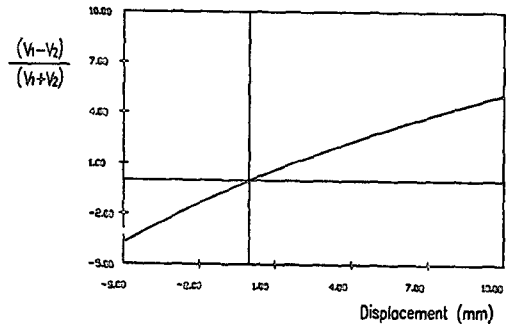


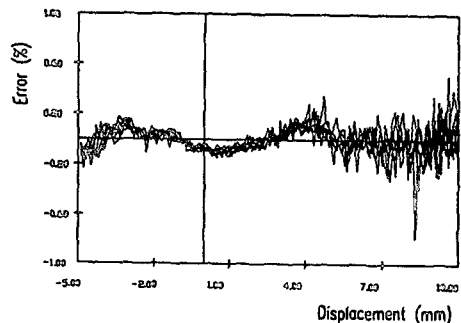
Fig. 7 Schematic diagram of sensor calibration system



(a) $v_1 + v_2$



(b) $(v_1 - v_2) / (v_1 + v_2)$



(c) measuring error

Fig. 8 Measuring accuracy of prototype sensor

V_1 과 V_2 는 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터에 입력된 후 측정거리로 환산된다. 변위계와 시편간의 실제거리는 직선 구동축에 부착된 광학스케일(optical scale)에 의해 측정되어, 변위계로 부터의 측정값과 비교 검증되었다. 본 계측장치의 광학스케일의 측정 분해능은 $1\ \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 8(a)은 변위계와 시편간의 거리에 따른 변위계로 부터의 전기적 신호 V_1 과 V_2 의 변화를 측정 한 결과이다. ($V_1 + V_2$)는 변위계의 수광소자에 받아들여지는 전체 광량에 비례하는 값으로 변위계와 시편간의 상대 거리의 변화에 따라 완만히 변화하는 경향을 유지한다. 반면, ($V_1 - V_2$)는 상대 거리에 따라 비선형적으로 증가함을 보여주고 있다.

변위계의 출력은 앞절에서 설명된 식 (12)에서와 같이 ($V_1 - V_2$)/($V_1 + V_2$)값을 이용하여 변위로 환산되며, 이의 결과는 Fig. 8(b)에 보인바와 같다. 환산된 값과 광학스케일의 값을 비교하여 변위계의 측정 정밀도 오차를 구한 결과가 최종적으로 Fig. 8(c)에 도시되어 있다. 결론적으로 변위계의 측정 정밀도 오차는 측정범위 10 mm(원점으로부터 전후 5 mm씩) 내에서 최대 0.2%를 갖는 것으로 검증되었다.

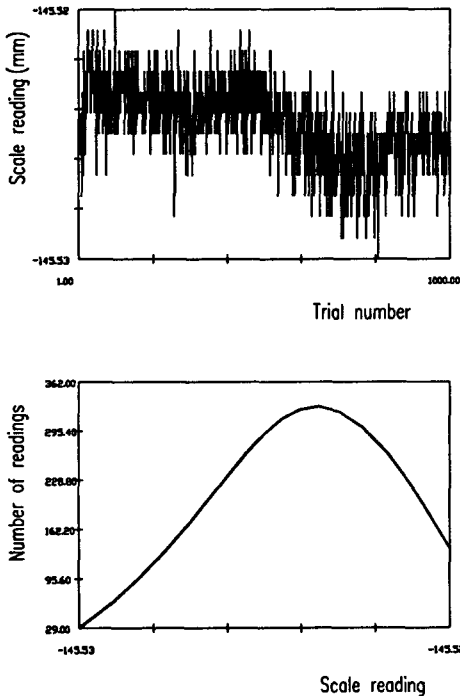
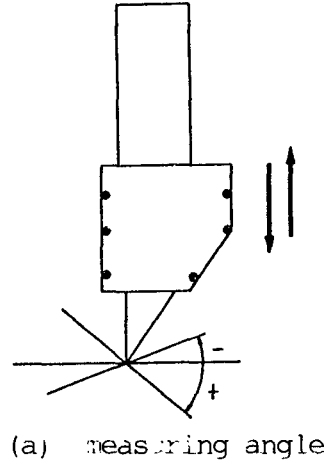


Fig. 9 Repeatability of prototype sensor

Fig. 9는 변위계의 반복능을 측정한 결과이다. 변위계를 시편으로 부터 원점에 위치하도록 1000회 연속적으로 반복시키며 이때의 실제 상대거리를 광학스케일로 부터 측정하여 기록하였다. 그림에서와



(a) measuring angle

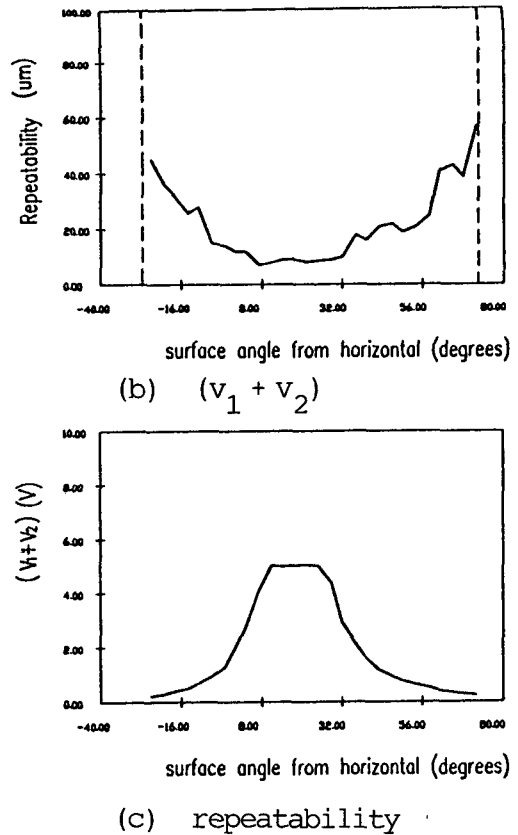


Fig. 10 Effects of measuring angle on repeatability

같이 이 경우 최대(peak-to-peak) 반복능오차는 $10\mu m$ 이며 평균 반복능 오차는 $3\mu m$ 로 검증되었다.

Fig. 10은 시편의 표면 경사도에 따른 변위계의 측정성능의 변화를 실험적으로 검증한 결과이다. 시편이 변위계의 영상축으로 부터 많은 경사를 갖게 되면 수광소자에 다다른 광량($V_1 + V_2$)의 감소가 야기된다.

식(14)에서 설명되는 바와 같이 (V_1 과 V_2)의 양이 감소되면 분모의 값이 0에 접근하여 측정이 불가능해짐과 동시에 반복능도 저하된다. Fig. 10(a)는 경사도에 따른 광량의 변화를 보여주며 이에 따른 반복능의 저하는 Fig. 10(b)에 측정되어 있다. 그림에서와 같이 경사도가 0도 일 때, 즉 시편이 변위계에 수직으로 위치하는 경우 최대 반복능이 $10\mu m$ 로 가장 우수하다. 반면, 경사도가 커지면 반복능도 저하되어 $50\mu m$ 까지 상승한 후 -40 도와 80 도를 넘는 경우에는 측정이 불가능한 것으로 검증되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 측정자동화 용도로 사용될 수 있는 비접촉방식의 광학센서에 대한 기본 연구 결과를 서술하였다. 광삼각법에 의한 비접촉 측정의 기본 원리를 정립하고 측정범위 및 분해능 관점에서의 센서설계의 기본방법을 제시하였다. 또한, 실제

적인 센서의 설계 및 제작을 통해 센서의 시제품에 대한 설계제작을 수행하였으며 최종적으로 실제적인 센서의 성능실험을 통한 응용 가능성을 검토하였다. 결론적으로 본 연구에서 설계제작된 변위계의 경우 측정범위 10 mm 에서 측정 정밀도는 0.2% 이며 평균반복능을 $3\mu m$ 를 갖는 것으로 실험 검증되었다. 또한 측정시편의 경사도는 -40 도에서 80 도까지 측정할 수 있음이 판명되었다.

참고문헌

- (1) Tse, F.S. and Morse, I.E. 1989, "Measurement and Instrumentation in Engineering," Dekker.
- (2) Bently, J.P. 1988, "Principle of Measurement Systems," Longman Scientific & Technical.
- (3) "變位計利用 比接觸形狀測定機", 應用機械工學, 5월호, 1990.
- (4) 정대중, 1989 "광학변위 센서를 이용한 곡면추적방법에 의한 삼차원 측정", 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (5) 이재운, 1990, "추적식 3차원 형상측정을 위한 광학식 변위센서", 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (6) Jenkins, F.A. and White, H.E. 1976, "Fundamentals of Optics," McGraw Hill.
- (7) Hamamatsu, 1990 "Catalog of Position Sensitive Devices".