

초정밀 광학식 변위 측정을 위한 센서 구조 및 신호 처리 시스템

오세백*, 김경찬*, 김수현*, 곽윤근*

Sensor Structure and Signal Processing System for Precision Optical Displacement Measurement

Se Baek Oh*, Kyung-Chan Kim*, Soo Hyun Kim*, and Yoon Keun Kwak*

ABSTRACT

Optical measurement methods make it possible to detect object displacements with high resolution and noncontact measurements. Also, they are very robust against EMI noises and have long operation range. An optical triangulation sensor is one of widely used displacement measurement sensors for its sub-micron resolution, fast response, simple structure, and low cost. However, there are several errors caused by inclinations of a surface, speckle effects, power fluctuations of light sources, and noises of detectors. In this paper, in order to minimize error effects, we performed error analysis and proposed a new structure. Then, we setup a new modeling method and verify it through simulations and experiments. Based on the new model, we propose a new sensor structure and establish design criteria. Finally, we design a signal processing system to overcome a resolution-limited problem of light detectors. The resolution of the proposed system is $0.2\mu\text{m}$ in 5 mm operating range.

Key Words : Optical Sensor (광센서), Noncontact Measurement (비접촉 측정), Displacement Measurement (변위 측정), Optical Triangulation Sensor (광 삼각법 센서), Error Analysis (오차 해석)

1. 서론

광학식 변위 측정은 비 접촉성, 높은 거리 대 분해능 비, EMI 잡음에의 강인성 등으로 인해 주목 받아 왔다. 여러 광학식 변위 측정 방법 중 광 삼각법을 이용한 방법은 수 밀리미터 측정 범위, 마이크로 미터 이하 분해능, 빠른 응답 속도, 간단한 구조, 저가 구현 가능성의 장점을 지녀 산업계, 학계에서 널리 채택되고 있다¹⁾. 광 삼각법을 이용한 변위 측정의 원리는 Fig. 1 과 같이 간단히 도

식화 할 수 있다. 광 삼각법을 이용한 변위 측정은 여러 장점에도 불구하고, 측정 표면의 기울어짐, 스펙클 현상, 광원의 출력 변화, 수광 소자 잡음, 측정 표면에서의 반사 조건 등에 기인하는 오차로 인해 정밀 측정을 위해서는 세심한 주의가 요하고, 이는 광범위한 사용에 제한을 가져왔다^{2, 3)}. 상기 문제를 해결하기 위해서는 오차 요인들에 대한 분석이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 오차 최소화가 가능한 구조를 제안하고, 제안된 변위 측정 시스템의 타당성을

2000년 12월 8일 접수
* 한국과학기술원 기계공학과

분석할 수 있는 모델을 제시한다. 또한 측정 시스템을 효과적으로 구현할 수 있는 설계 방법론을 제안하며, 높은 분해능 구현에 필수적인 신호 처리 시스템을 설계한다.

2. 오차 요인 분석 및 오차 최소화 구조

광 삼각법을 이용한 변위 측정에 있어, 서론에서 언급한 오차 요인들은 Fig. 1 의 수광 소자 (spot position detector) 상의 광 강도 분포 (light intensity distribution) 에 영향을 끼친다^[4].

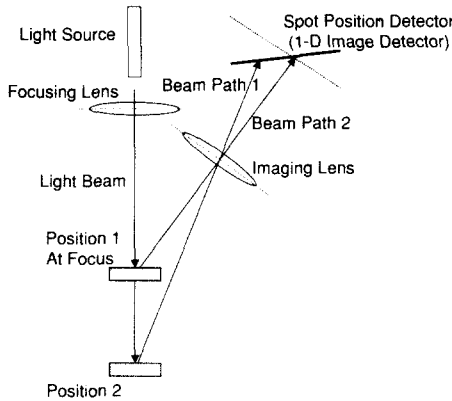


Fig. 1 An Ideal Model of Precision Optical Triangulation Displacement Sensors

초점 심도 (depth of focus) 내에서 초점이 맞는 상을 얻기 위해 샤임플러 조건^[5]을 적용하여, 수광 소자가 결상 렌즈에 대해 기울어져 있기 때문에 광 강도 분포는 비대칭 형상이다. 또한 제한된 측정 범위 내에서, 광 강도 분포 최대 위치는 측정 표면의 변위와 선형 관계를 지닌다. 측정 표면의 기울어짐과 광원의 출력 변화는 광 강도 분포의 최대값은 변화시키지만 최대 위치는 변화시키지 않는다^[6]. 대부분의 상용 제품에서 수광 소자로 사용되고 있는 PSD (position sensitive device) 의 경우, 광 강도 분포의 무게 중심 값을 측정 표면 변위로 환산하므로 오차가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 광 강도 분포의 최대 위치를 이용하여 측정 표면의 변위를 검출하며, 이를 위해 CCD (charge coupled device) 사용을 제안한다. 그러나 이 경우 간섭성 광원을 사용하게 되면 스펙클 현상으로 인한 오차가 심각해진다. 본 논문에서는 광 강도 분

포의 비대칭성과 스펙클 현상이 유발하는 오차를 최소화하기 위하여, 아래와 같이 광 삼각법을 이용한 새로운 변위 측정 시스템의 구조를 제안한다.

- 비 간섭성 LED 를 광원으로 사용
- 수광 소자로 1 차원 CCD 를 사용

1 차원 CCD 는 단위 화소 (pixel) 를 일렬로 배열한 것으로, 광 강도 분포의 전체 형상을 획득할 수 있기 때문에 광 강도 분포의 모양에 관계없이 최대 위치 추출이 가능하다. 하지만, CCD 를 수광 소자로 채택하게 되면 CCD 단위 화소 크기와 화소 사이 간격에 의해 센서 시스템의 분해능에 제한되게 되므로 부가적 신호 처리 시스템이 필요하다^[5].

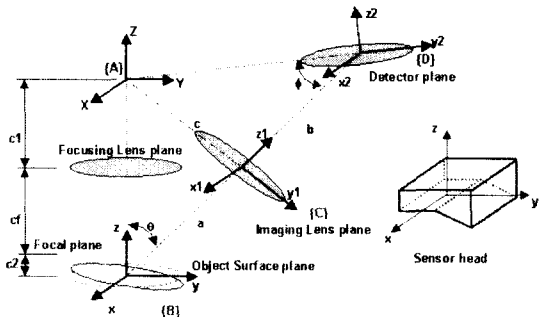


Fig. 2 Definition of Coordinate Frames for Modeling

3. 센서 구조 모델링

제안된 구조의 타당성을 검증하고, 변위 분해능 향상을 위한 신호 처리 시스템을 설계하기 위하여 광 강도 분포에 대한 해석이 필수적이다. 이를 위한 시도가 있었지만^[7-9], 실제 거동과 흡사한 경향을 보이는 모델은 수립되지 않았다. 본 논문

에서 모델링을 위한 좌표계는 Fig. 2 와 같다.

Fig. 2 에서 cf 는 집광 렌즈로부터 측정 표면까지의 거리이며, 측정 표면에서 결상 렌즈까지의 거리는 a , 결상 렌즈로부터 광점 검출 소자까지의 거리는 b 이다. 또한 측정 표면의 기울어짐 각 α , β 를 Fig. 2 와 같이 정의 하였다. 이와 같이 정의된 α , β 를 실험에서도 사용하였다. 광 강도 분포의 거동 해석을 위한 모델링에서, 기본 가정은 아래와 같다.

- 빛은 무수한 광선 요소로 이루어져 있다.
- 광선 요소들은 서로 영향을 주지 않는다.
- 광속 (light beam) 은 단면에서 가우시안 강도 분포 (Gaussian intensity distribution)를 지닌다.

광선 추적의 과정은 다음과 같다. 광원으로 부터의 광선 요소들은 집광 렌즈의 초점을 향해 직진하며 측정 평면에 도달한다. 광선 요소의 직선 방정식과 측정 평면 방정식을 이용하여 측정 평면과 광선 요소의 교점 (P)의 좌표를 알 수 있다.

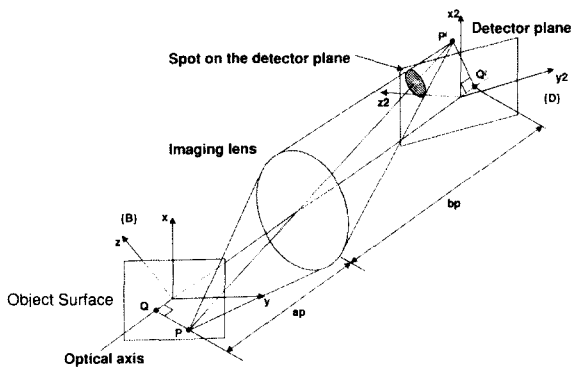


Fig. 3 Relation between Object Point P & Image Point P'

측정 평면에서 반사된 광선 요소는 난반사를 일으키며 Fig. 3 과 같이 결상 렌즈에 의해 수광 소자에 상을 맺는다. 집광 렌즈에서 출발하여 측정 표면에서 반사된 광선 요소들에 대하여, 측정 표면에서의 반사점(P)을 물체 (object) 로 가정하고, 얇은 렌즈의 방정식을 이용하여 결상 렌즈에 의한 상 (image)의 위치(P')를 구한다. 다음으로 Fig. 3 과 같이 수광 소자에 의한 초점의 벗어남 (defocus)을 고려하여 광점의 크기를 계산한다. 이후 수광 소자의 화소 크기와 화소 사이 간격을 고려하고, 모

든 광선 원소들에 대해 중첩의 원리를 적용하여, 광 강도 분포를 구할 수 있다.

Fig. 4 는 측정 표면이 서로 다른 세 위치에서, 기울어짐 각 β 를 변화시킨 경우, 광점 검출 소자 상에서 광 강도 분포의 거동을 시뮬레이션을 통하여 예측한 결과이다. 수직축은 모두 상대적 광 강도 분포이다. Fig. 2 와 같이 정의된 α , β 에 대하여, $\alpha=90^\circ$ 로 고정하고 β 를 100° 부터 10° 간격으로 감소시킨 경우이며, 네번째 그림은 세 경우를 모두 나타낸 것이다. β 가 감소하면 (측정 표면이 결상 렌즈 쪽으로 기울어지면) 강도 분포의 최대 값 크기가 커지고 β 가 증가하면 (측정 표면이 결상 렌즈와 반대쪽으로 기울어지면) 최대 값 크기는 감소한다. β 가 변함에 따라 광 강도 분포의 최대 값 크기는 변화하지만 최대 위치는 불변하며, 광 강도 분포 형상은 비 대칭임을 관찰할 수 있다. 또한 네번째 그림에서는, 측정 표면의 변위에 따라 광 강도 분포가 광점 검출 소자 상에서 이동을 하며, 그 최대값이 변하는 것을 알 수 있다.

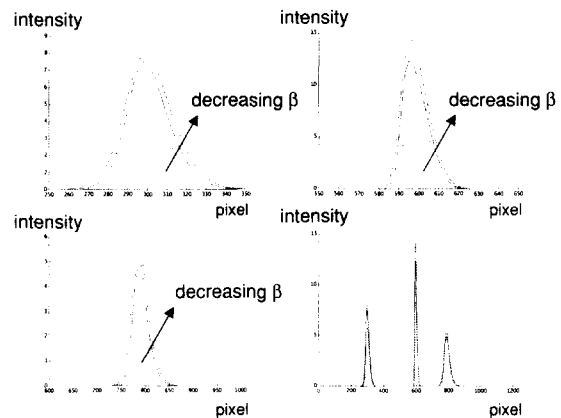


Fig. 4 Simulation Results-Light Intensity Distributions with Object Displacements

4. 측정 시스템 설계 방법론

본 장에서는 제안된 광 삼각법 구조를 이용한 변위 측정 시스템의 설계 방법론에 관해 논한다. Fig. 5 와 같은 광 삼각법 구조에서 초점 심도를 높이기 위해 적용한 샤임플러 조건의 기하학적 관계로부터 식 (1)의 유도가 가능하다^[10].

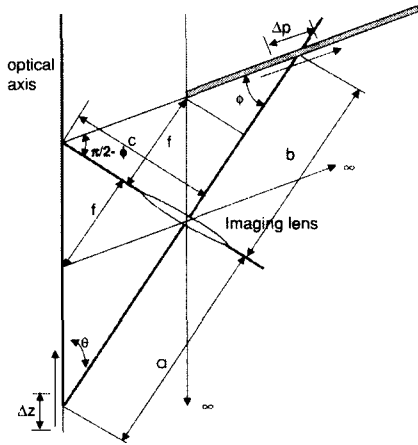


Fig. 5 Scheimpflug's Geometry

$$\frac{\pi}{2} - \phi = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a \tan \theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{f \cdot a}{a(a-f) \tan \theta}\right) \quad (1)$$

식 (1)로부터 얻어지는 광학계의 종배율(M_R), f , a , θ 의 관계는 다음과 같다.

$$M_R = \frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{b \sin \theta}{a \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{b}{a \tan \theta}\right)\right)} \quad (2)$$

$$= \frac{f \cdot a \sin \theta}{a(a-f) \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{f \cdot a}{a(a-f) \tan \theta}\right)\right)}$$

식 (2)를 b 에 대해 풀고 무연근을 제외하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있고 이로부터 결상 렌즈의 초점 거리 f 를 정할 수 있다.

$$b = \sqrt{\frac{1}{2} a^2 \sec^2 \theta \sqrt{4M_R^2 \cos^2 \theta + \sin^4 \theta} - \frac{1}{2} a^2 \tan^2 \theta} \quad (3)$$

$$f = \frac{ab}{a+b} \quad (4)$$

본 논문에서 제안하는 설계 방법론은 설계 사양, CCD의 검출 가능 길이, 측정 범위 및 위치, 센서 헤드의 크기, 그리고 식 (1)~(3)를 고려하여 다음과 같이 정리된다.

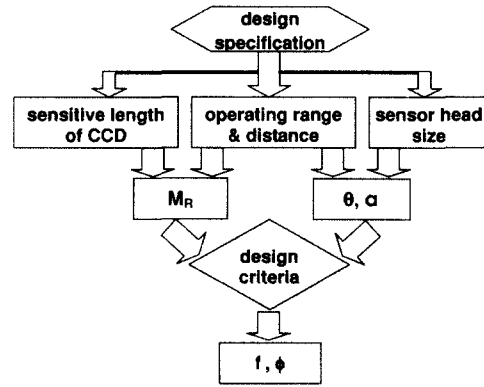


Fig. 6 Flow Chart of Design Scheme

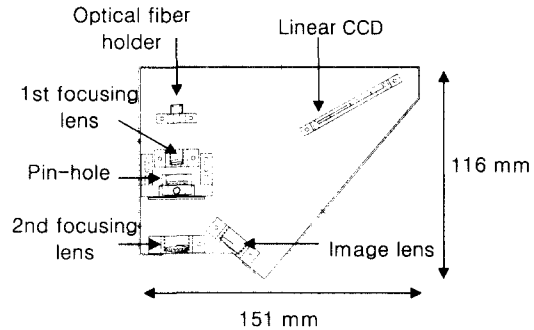


Fig. 7 Mechanical Drawing of the Prototype

Fig. 6의 설계 방법론을 바탕으로 제작된 시제품의 조립도는 Fig. 7과 같다. 종배율은 4.1, $a = 45\text{mm}$, $\theta = 40^\circ$ 로 각각 설정하였으며 식 (2)와 식 (3)으로부터 구한 f 와 ϕ 는 각각 31.1 mm, 20.5° 이다. 시제품은 신호 처리 알고리즘을 가지지 않을 경우 시제품은 5 mm의 측정 범위에서 $5 \mu\text{m}$ 의 화소 단위 분해능을 지닌다.

Fig. 8은 제작된 시제품을 이용한 실험 장치의 구성도이다. 측정 표면을 2축 직선 운동과 1축 회전 운동이 가능한 스테이지에 장착하고 스테이지는 스텝모터를 이용하여 제어한다. Fig. 9와 Fig. 10은 실험 결과이다. Fig. 9는 측정 표면이 여러 위치에 있을 경우, 측정 표면의 기울임 각 (β)를 $-10^\circ, 0^\circ, +10^\circ$ 로 변화시킨 결과이다. 측정 표면 위치가 고정되어 있다면 기울어짐 각에 의해 광 강도 분포 최대값은 변하지만, 최대 위치는 변하지 않

음을 확인할 수 있다. 이로부터, 본 논문에서 제안한 모델링 방법으로 예상한 광 강도 분포의 거동과 실제 거동이 일치함을 확인할 수 있다.

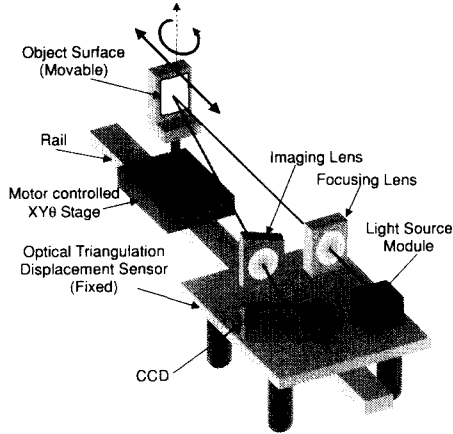


Fig. 8 Experimental Setup

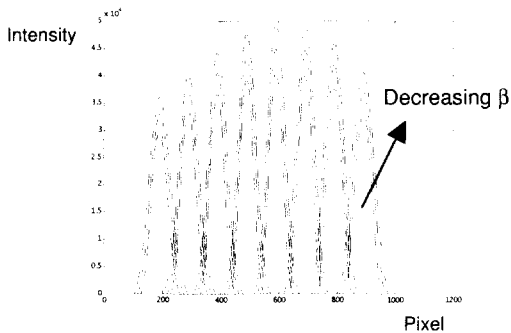


Fig. 9 Experimental Results with the Prototype: Intensity Distributions at Different Positions

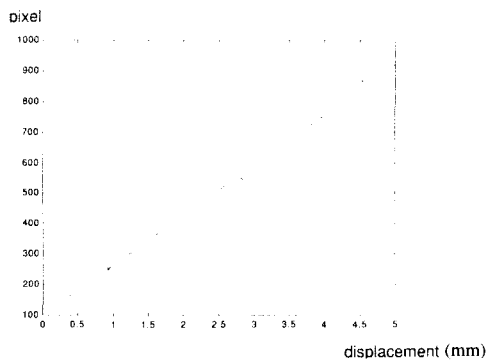


Fig. 10 Experimental Results with the Prototype: Displacement vs. Sensor Output (Pixel Resolution)

Fig. 10 은 광 강도 분포 최대 위치와 측정 표면 변위와의 관계를 도시한 것이다. 수직축은 16bit A/D 의 출력으로서, 상대적 광 강도이다. 설계시 예상한 대로 5 mm 의 측정 범위에서 5 μm 의 분해능을 얻을 수 있었다.

5. 신호 처리 시스템

가장 단순한 신호 처리 시스템으로 광 강도 분포를 최대화 하는 CCD 화소를 찾아내고 해당 화소 위치를 변위로 환산하는 것이다. 이 경우, 광 강도 분포의 최대 위치가 단위 화소 길이 이상으로 이동하여야 검출이 가능하므로, CCD 단위 화소 길이가 작아져야 하는데 이는 제조 공정상 한계가 있다.

대안으로 화소 미만 분해능을 가능케 하는 서브 픽셀 알고리즘 (sub pixel algorithm)을 적용할 수 있다. 대표적인 서브 픽셀 알고리즘으로 무게 중심법 (centroid method), 내삽법 (interpolation method), 그리고 상관법 (correlation method)을 들 수 있다^[11]. 무게 중심법은 2 장에서 살펴본 바와 같이 광 강도 분포의 무게 중심값은 측정 표면의 변위를 대변하지 못하므로 적용할 수 없다. 내삽법의 경우 잡음이 존재하는 상황에서 광 강도 분포를 정확히 나타낼 수 있는 다항 함수를 찾고 계수를 실시간으로 구하기 어렵다. 상관법은 신호 잡음에 강한 특성을 지니며 상대적으로 화소 단위 분해능을 얻기 쉬워 널리 사용되고 있다. 두 개의 이산 신호에 대한 상관 함수 (generalized cross correlation: GCC)는 다음과 같이 정의된다^[12].

$$\tilde{R}_{GCC}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_1(n) \cdot x_2(n+m) \quad (5)$$

여기서 비교 대상인 두 신호 $x_1(n)$, $x_2(n)$ 은 각각 임의의 샘플링 타임과 그 다음 샘플링 타임에서 얻어지는 신호이다. GCC 의 최대 위치는 두 신호 최대 위치 이동량과 일치하며, 이를 통해 측정 표면 변위를 구할 수 있다. 그러나 GCC 는 이산 함수이므로 신호 이동량이 정수가 아닌 경우 최대 위치가 정수로만 추출 가능하다. 따라서 최대 위치 근처에서 2 차 곡선 맞춤법 (curve fitting method)을 이용한다^[13].

그러나 식 (5)와 곡선 맞춤법을 적용함에 있어

여러 가지 문제점이 있다. 첫째, 식 (5)와 곡선 맞춤법을 이용하여 측정 표면 변위를 구할 경우, 매 샘플링 타임마다 CCD 화소 개수 만큼의 계산을 행해야 하므로 매우 비 효율적이다. 둘째, 식 (5)는 양의 신호 이동량에 대해서만 정의되어 있으므로 음의 신호 이동량에 대해 적용이 불가능하다. 마지막으로 신호 이동량의 값에 따라 식 (5)의 계산량이 변하는 문제이다. 예를 들어 CCD 의 화소 개수가 1024 이고, 신호 이동량이 10 화소에 해당할 경우 식 (5)는 1014 번의 계산을 행하지만, 신호 이동량이 500 화소에 해당할 경우 식 (5)는 524 번의 계산을 수행한다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 Fig. 11 과 같은 신호 처리 시스템을 제안한다.

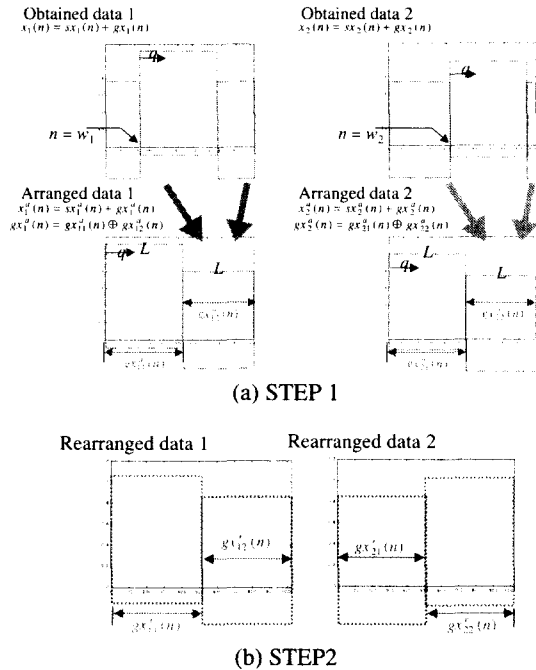


Fig. 11 The Signal Processing System

CCD 의 화소 개수를 N 이라 하고, $L=0.5N$ 이라 정의한다. Fig. 10 에서 데이터 개수 L 인 임의의 두 신호를 합성하여 데이터 개수 N 인 신호를 만들어 내는 연산자 \oplus 를 다음과 같이 정의한다.

$$d_1(n) \oplus d_2(n) = \begin{cases} d_1(n) & n \in [0, L), n \in \mathbf{N} \\ d_2(n-L) & n \in [L, N), n \in \mathbf{N} \end{cases}$$

신호 처리 시스템은 먼저 CCD 로 부터 얻어진 신호의 최대 위치를 화소 단위 분해능으로 찾는다. 그 후 신호에 대해 사각 윈도우를 적용하고 재 정렬하여 정렬된 데이터 (arranged data) 를 다음과 같이 얻는다.

$$x_i^p(n) = sx_i^p(n) + gx_i^p(n) = x_i^f(n) * p(n) \quad i=1,2$$

$$\text{where } \begin{cases} x_1^f(n) = x_1^a(n) \\ x_2^f(n) = \{w(n)x_2^a(n+L)\} \oplus \{w(n)x_2^a(n)\} \\ p(n) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta(n-rN) \end{cases} \quad (7)$$

사각 윈도우 $w(n)$ 에서 정렬된 데이터들의 최대 위치는 좌측으로부터 q 만큼 떨어져 있고, 이 때 w_i 는 사각 윈도우의 좌측 한계이다. 신호 처리 과정은 정렬된 데이터를 반으로 분할하여 Fig. 11 (b) 와 같이 서로 위치를 바꾼 뒤 마지막으로 컨벌루션을 행하여 다음과 같은 주기 신호를 얻으면 완료된다.

$$x_i^a(n) = sx_i^a(n) + gx_i^a(n) \quad i=1,2$$

$$\text{where } \begin{cases} sx_1^a(n) = \{w(n)sx_1(n+w_i)\} \oplus z_L(n) \\ gx_1^a(n) = gx_{11}^a(n) \oplus gx_{12}^a(n) \\ gx_2^a(n) = \begin{cases} gx_2(n) & n \in [0, w_i) \\ gx_2(n+L) & n \in [w_i, L) \end{cases} \\ z_L(n) = 0 & n \in [0, L) \end{cases} \quad (8)$$

그 후 두 주기 신호에 대해 GCC 를 적용하여 최대 위치를 얻는다. 신호 $x_2^p(n)$ 는 메모리에 저장되어 다음 샘플링 타임의 계산에서 $x_1^p(n)$ 로 변환된다. 전술한 신호 처리 시스템은 화소 단위 분해능을 통해 최대 위치를 추정하고, 추정된 최대 위치를 중심으로 신호를 재 배치하는 과정으로 요약된다. 이를 통해 신호 이동량 값에 무관하게 상호 상관 함수 계산량이 동일하고, 계산량도 줄이는 효과를 기대할 수 있다. 음의 신호 이동량에 대해서도 상호 상관 함수 적용이 가능하다. Fig. 12 는

CCD 상에서 광 강도 분포 최대 위치가 한 화소 크기 미만으로 운동할 경우, 즉 측정 표면이 5 μ m 미만의 변위를 가질 경우, 제안된 신호 처리 시스템을 이용한 측정 결과의 오차를 도식한 것이다. 최대 오차는 약 0.17 μ m 정도인 것을 관찰할 수 있다.

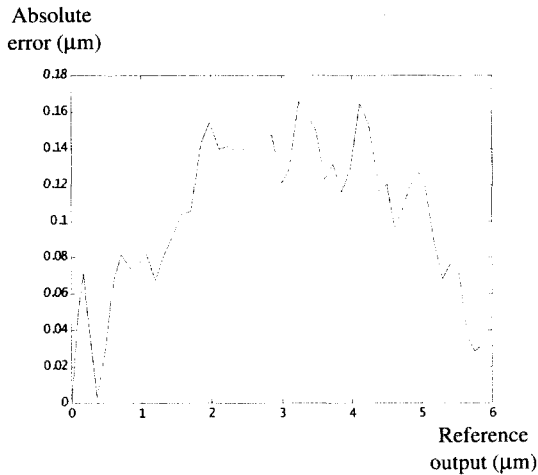


Fig. 12 Error of Displacement Measurement

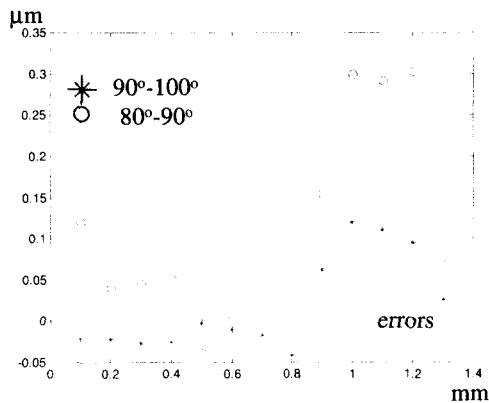


Fig. 13 Error by Inclination Effects

Fig. 13 는 측정 표면의 여러 위치에 대해 기울어짐에 의한 출력 차를 나타낸 실험 결과이다. 측정 표면 기울어짐에 의한 출력 변화는 0.40 μ m 이내인 것을 역시 확인할 수 있다. 이상으로부터 얻을 수 있는 시스템의 성능은 5mm 의 측정 범위에서 분해능 약 0.20 μ m, 기울어짐 오차 약 0.80 μ m 이다. 최종 제작된 시제품의 성능을 상용 변위 센서와 비교하면 Table 1 과 같다.

Table 1 Comparison of Various Displacement Sensors

	Operating Range (mm)	Resolution (μ m)	Range / Resolution	Detector
KEYENCE LK031	10.0	1.00	10,000	CCD
BANNER LG5	60.0	3.00	20,000	PSD
ACUTTY AR600	3.175	3.81	833	PSD
MTI Microtrak 7000	2.55	0.127	20,079	PSD
PROTOTYPE	5.00	0.200	25,000	CCD

6. 결론

비 간섭성 광원인 LED 와 광 강도 분포 전체 형상 획득이 가능한 CCD 를 이용하여 각종 환경적 오차 요인에 강인하고 측정 표면의 기울어짐 효과를 최소화 한 광 삼각법을 이용한 변위 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템에 대한 수학적 모델과 이를 통한 설계 방법론을 유도하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과, 광 강도 분포 최대 위치만이 오차 요인과 무관하게 측정 표면 변위를 정확히 대변할 수 있었다. 하지만, CCD 를 사용함으로써 인해 분해능이 화소 크기에 의해 결정되는 단점을 지닌다. 이를 해결하기 위해 GCC 상관 함수와 2 차 곡선 맞춤법을 이용한 신호 처리 시스템을 설계하였다. 신호 처리 시스템은 계산 시간 단축과 표준화, 음의 이동량 추출 등의 목적을 위해 데이터 재 정렬과 컨벌루션 연산 기능을 하는 전 처리 시스템을 포함하고 있다. 최종 제작된 시제품은 5mm 측정 범위에서 0.20 μ m 의 분해능을 지닌다.

후 기

본 연구는 BK21 사업에서 일부 지원을 받아 수행되었습니다.

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. 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.
3. 박승규, 백성훈, 김대규, 장원석, 이일근, 김철중, “선형레이저빔의 적응적 패턴 분할을 이용한 3 차원 표면형상 측정 장치의 성능 향상에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 10 호, pp. 119-124, 2000.
 4. K. C. Kim, J. A. Kim, S. B. Oh, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, “Accuracy Enhancement of Point Triangulation Probes for Linear Displacement Measurement,” Proc. of SPIE Vol. 3945, pp. 88-95, 2000.
 5. K. C. Kim, J. A. Kim, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, “A Robust Signal Processing Algorithm for Linear Displacement Measuring Optical Triangulation Sensors,” Rev. Sci. Instrum., Vol. 71, No. 8, 2000.
 6. 오세백, “기구학적 커플링 최소화된 다자유도 광학식 변위 센서의 개발,” 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문, 2001.
 7. K. B. Smith, “Modeling, Performance Evaluation, Calibration, and Path Planning of Point Laser Triangulation Probes in Coordinate Metrology,” Ph. D. Thesis, The Ohio State University, Ohio, 1996.
 8. H. Aoyama, K. Yamazaki, and M. Sawabe, “Optical Sensor for Detecting a Position and an Inclination,” Trans. of the ASME, J. of Manufacturing Sci. and Eng., Vol. 118, pp. 400-405, 1996.
 9. J. Liu, L. Tian, and L. Li, “Light Power Density Distribution of Image Spot of Laser Triangulation Measuring,” Optics and Lasers in Engineering, Vol. 29, pp. 457-463, 1998.
 10. M. Rioux, G. H. Bechthold, D. G. Taylor, and M. D. Duggan, “Design of a Large Depth of View Three-Dimensional Camera for Robot Vision,” Optical Engineering, Vol. 26, pp. 1245-1250, 1987.
 11. G. A. W. West and T. A. Clarke, “A Survey and Examination of Subpixel Measurement Techniques,” Proc. of SPIE, Vol. 1395, pp. 456-463, 1990.
 12. D. Hertz, “Digital Correlator for Measuring the Velocity of Solid Surface,” Proc. of IEEE Instrum. and Measurement Tech. Conf. pp. 490-495, 1996.
 13. G. Jacovitti and G. Scarano, “Discrete Time Techniques for Time Delay Estimation,” IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 41, pp. 525-533, 1993.