

## 레이저 스펙클과 1차원 CCD소자를 이용한 물체의 미소변위측정에 관한 연구\*

우창현 · 민동현 · 김수용

한국과학기술원 물리학과

(1993년 11월 2일 받음)

거친 표면을 가진 물체의 미소변위를 1차원 CCD소자와 레이저 스펙클(laser speckle) 방법을 이용하여 측정하였다. 거친 표면에서 산란된 레이저 광이 이루는 스펙클 무늬를 물체의 이동 전후에 얻고, 그것의 상호상관함수(cross-correlation)를 계산하여 스펙클 변위를 계산한다. 1차원 CCD소자를 이용하여 물체 이동 전후의 스펙클 무늬를 측정하고, 레이저 스펙클 변위값을 386 PC로 인터페이스하여 PC에서 계산한다. 사용한 CCD 소자의 화소 간격은 15  $\mu\text{m}$ 이고, 화소의 갯수는 1728개이다. 스펙클 변위와 물체의 이동거리와의 비는 레이저 빔의 파면의 곡률에따라 1.03으로부터 5.20까지 변화한다. CCD 픽셀의 간격이 15  $\mu\text{m}$ 이므로 물체의 3  $\mu\text{m}$  이동을 감지해 낼 수 있다.

### I. 서 론

레이저 스펙클(Laser speckle)<sup>[1,2]</sup>은 거친 표면의 물체에 레이저를 입사했을 경우 레이저가 갖는 좋은 간섭성(coherence) 때문에 상면이나 회절면에서 형성되는 불규칙한 작은반점들을 일컫는 말이다. 이 레이저 스펙클은 간섭계에서는 잡음으로 생각되어, 옛날에는 그것을 제거하는데 중점을 두어 연구해왔으나,<sup>[3]</sup> 최근에 이러한 레이저 스펙클을 이용하여 물체의 이동 및 변형을 측정하는 방향으로도 많은 연구가 진행되고 있다.

종래에 레이저 스펙클의 변형을 측정하기 위해서 스펙클의 사진을 찍어 비교하는 형태로 연구가 행해졌으나,<sup>[4,5]</sup> 이것은 시간이 너무 오래 걸린다는 단점을 가지고 있었다. 최근에 CCD와 같은 이미지 센서와 컴퓨터가 등장함에 따라 그 스펙클 패턴을 얻는 것이 쉬워졌고, 또 그것을 이용하는 계산도 빨라지게 되어 실제 측정 장치에 많이 응용되고 있다.<sup>[6-8]</sup>

본 연구에서는 본 실험실에서 직접 제작한 1차원 CCD 구동장치<sup>[9]</sup>를 이용하여 레이저 스펙클의 공간적인 분포를 측정하고, 이것을 컴퓨터에 인터페이스하여 이동 전후의 스펙클 변위를 계산하였다. 스펙클 변위와 물체의

변위와의 관계를 알아내기 위하여 물체를 매우 정확한 X-Y 이동판(stage)에서 이동시켜 스펙클 변위를 계산, 보정하였다.

본 연구의 내용을 서술하면 2장에서는 스펙클을 이용한 측정의 기본이론을 서술 하였으며, 3장에서는 1차원 CCD 구동장치와 컴퓨터를 이용한 스펙클 변위 측정 장치와 실험방법, 4장에서는 실험결과를 렌즈가 있을 경우와 없을 경우로 나누어 살펴보고, 5장에서는 이 실험에 대한 결론과 앞으로의 발전방향에 대해 언급하였다.

### II. 스펙클 변위에 관한 이론

거친 표면을 갖는 물체에 레이저를 비추면 회절면상에 불규칙한 반점무늬가 생긴다. 이것을 레이저 스펙클이라 하는데 물체가 이동을 하면 이 무늬도 물체를 따라서 이동을 하는 경향이 있다. 그러므로 레이저 스펙클의 이동을 측정하면 물체의 변위를 측정할 수 있게 된다. 물체의 변위와 레이저 스펙클의 이동과의 관계를 알아 보았다. 레이저로부터 출발하여 물체 표면에 도착한 빛의 복소수 진폭(complex amplitude)은 다음식과 같이 주어진다.

$$u[r + a, (r)] = \exp[ik|L_s(r) - a, (r)|] \sqrt{I_0[r + a, (r)]} \zeta(r) \exp[i\phi(r)] \quad (1)$$

\* 이 연구는 한국과학기술원의 기본 연구비에서 지원을 받았음.

여기서  $\mathbf{r}$ 은 평균 물체면 위의 점이고,  $\mathbf{a}_i(\mathbf{r})$ 은  $\mathbf{r}$ 로부터의 변위,  $L_s$ 는  $\mathbf{r}$ 로부터 레이저 빔의 곡률 중심까지의 거리,  $\zeta(\mathbf{r})$ 은 물체의 거시적 반사함수,  $\phi(\mathbf{r})$ 은 물체의 미시적 랜덤 함수(random function)이다. 관측면에서의 복소수 진폭은 물체 표면에서의 복소수 진폭의 선형 중첩(linear superposition)으로 주어진다.

$$U_i(\mathbf{R}) = \int K[\mathbf{R}; \mathbf{r} + \mathbf{a}_i(\mathbf{r})] u_i[\mathbf{r} + \mathbf{a}_i(\mathbf{r})] d^2r \quad (2)$$

여기서  $K[\mathbf{R}; \mathbf{r} + \mathbf{a}_i]$ 는  $\mathbf{r} + \mathbf{a}_i$ 로부터  $\mathbf{R}$ 까지의 전달함수(transmission function)이다. 이 식에 의해 관측되는 빛의 형태가 바로 레이저 스펙클 무늬이다. 레이저 스펙클의 이동을 조사하기 위해서 관측면에서의 세기 상호상관함수(intensity cross-correlation)을 계산한다. 세기 상호상관함수는 물체의 표면에서 미시적으로 반사된 빛의 세기  $I_1, I_2 (I_i \equiv U_i \cdot U_i^*)$ 의 앙상블 평균(ensemble average)으로 정의된다. 만약 미시적 랜덤함수  $\phi(\mathbf{r})$ 가 복소 가우시안 랜덤 함수(complex Gaussian random function)일 경우  $I_1, I_2$ 의 앙상블 평균을 계산하면

$$\begin{aligned} \langle I_1(\mathbf{R}_a) I_2(\mathbf{R}_b) \rangle \\ = \langle |U_1(\mathbf{R}_a)|^2 \rangle \langle |U_2(\mathbf{R}_b)|^2 \rangle + |\langle U_1(\mathbf{R}_a) U_2^*(\mathbf{R}_b) \rangle|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

결과적으로  $\Delta I(\mathbf{R}) = I(\mathbf{R}) - \langle I(\mathbf{R}) \rangle$ 로 두면 마지막 항은 세기 요동(intensity fluctuation)  $\Delta I$ 의 상호상관함수에 해당한다.

$$\langle \Delta I_1(\mathbf{R}_a) \Delta I_2(\mathbf{R}_b) \rangle = |\langle U_1(\mathbf{R}_a) U_2^*(\mathbf{R}_b) \rangle|^2 \quad (4)$$

그림 1과 같은 좌표계에서 이동 전후의 규격화(normalized)된 세기 상호상관함수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \langle I_1(x, y; L_0) I_2(x+X, y+Y; L_0) \rangle \\ = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left| \iint [I_0(x, y) I_0(x+a_x, y+a_y)]^{1/2} \right. \\ \left. \exp[ik\{x(X-A_x) + y(Y-A_y)\}/L_0] dx dy \right|^2 / \\ \left| \iint I_0(x, y) dx dy \right|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $x, y$ 는 물체좌표계에서의 좌표,  $X, Y$ 는 관측좌표계에서의 좌표이고,  $a_x, a_y$ 는 물체의  $x$ 축,  $y$ 축 이동변위를 나타낸다. 그 경우 관측좌표계에서의 스펙클의 이동변위  $A_x, A_y$ 는

$$\begin{aligned} A_x &= -\frac{a_x}{\cos\theta_0} \left[ \frac{L_0}{L_s} (\sin^2\theta_s - 1) + \sin^2\theta_0 - 1 \right] \\ &= a_x \left( \frac{L_0 \cos^2\theta_s}{L_s \cos\theta_0} + \cos\theta_0 \right) \end{aligned}$$

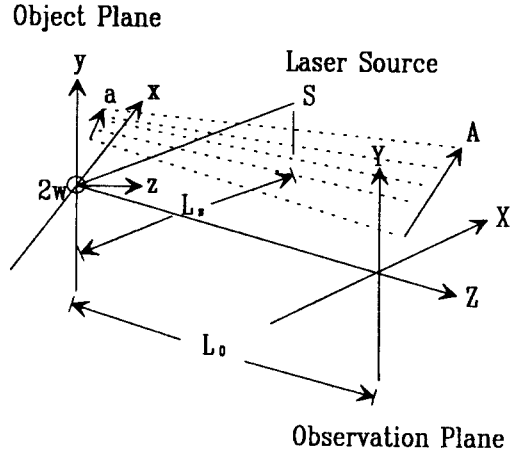


그림 1. 자유공간에서의 스펙클을 관측하기 위한 좌표계.  $(x, y, z)$ : 물체 좌표계,  $(X, Y, Z)$ : 관측좌표계, S: 입사광의 곡률중심,  $a$ : 물체의 변위, A: 스펙클의 변위,  $w$ : 물체면에서의 레이저의 빛의 크기(spot size),  $L_s$ : 물체와 입사광의 곡률중심과의 거리,  $L_0$ : 물체와 관측좌표계의 원점까지의 거리.

$$A_y = a_y \left( \frac{L_0}{L_s} + 1 \right) \quad (6)$$

로 주어지게 된다. 여기에서  $\theta_s$ 는 입사하는 레이저와 물체표면의 법선과 이루는 각이고,  $\theta_0$ 는 산란된 레이저 빛과 물체표면의 법선과 이루는 각이다.

이 식에서 볼 수 있듯이  $X=A_x$ 에서 최대가 된다. 이 값은 물체의 이동전후의 세기상관함수의 최대값으로 관측면상의 스펙클들이 평균적으로  $A_x$ 만큼 이동했다는 것을 의미한다. 이  $A_x$ 를 스펙클 변위(speckle displacement)라고 한다. 이 결과에서 스펙클 변위  $A_x$ 는 물체의 이동 변위  $a_x$ 와 비례관계가 있음을 알 수 있다. 비례상수를  $\sigma$ 라고 하면

$$\sigma = \frac{L_0 \cos^2\theta_s}{L_s \cos\theta_0} + \cos\theta_0 \quad (7)$$

가 되어 입사광의 곡률 중심까지의 거리와 그 각도, 관측면과의 거리 및 각도에 따라 민감하게 변화한다. 이 수식에서 볼 수 있듯이 곡률 중심까지의 거리가 작을 수록, 관측면까지의 거리가 길수록 스펙클 변위는 커진다. 물체가 조금 움직이더라도 이러한 변수들을 조정함으로써 화소의 간격이  $15 \mu\text{m}$ 인 CCD를 이용해서 매우 정밀한 측정이 가능하다.

### III. 레이저 스펙클을 이용한 변위 측정 실험 장치와 실험방법

#### 1. 실험장치

변위 측정을 위해 He-Ne 레이저를 거친 표면을 갖는 물체에 쏘아서 반사된 빛을 직접 제작한 CCD 측정 시스템으로 받아들이는 장치를 구성하였다(그림 2). 먼저 광원으로는 파장이  $6328\text{\AA}$ 인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 거친 표면을 갖는 물체는 직육면체의 황동을 사포(mesh #120)를 이용하여 표면을 거칠게 하였다. 이 황동 덩어리는 정밀한 X-Y 이동판 위에서 움직여 물체에 변위 이동을 주게된다. 이 변위 이동은 스펙클 변위를 보정하기 위한 목적으로 사용되므로 매우 정확한 것이 요구된다. 본 실험에서는 Orieli사의 X-Y 이동판을 사용하였는데 그 정밀도가  $0.1\ \mu\text{m}$ 임을 보증한다. 물체 변위와 스펙클 변위와의 비례상수  $\sigma$ 는 입사광의 빛의 곡률중심과 물체면 사이의 거리  $L_s$ 에 의해 가장 민감하게 변화한다. 따라서  $\sigma$ 에서의 다른 변수는 고정시키고  $L_s$ 를 변화시켜 측정하였다. 즉  $L_0=180\text{ cm}$ ,  $\theta_s=18.16^\circ$ ,  $\theta_0=16.69^\circ$ 로 고정시켰다. 레이저는 거의 평행광이므로 그냥 물체에 입사시킬 때에는  $L_s=\infty$ 로 볼 수 있다. 여기에  $L_s$ 를 주기 위해서는 레이저와 물체의 사이에 렌즈를 두어 빛에 곡률을 주게된다. 렌즈를 쓸경우 렌즈의 성질상 레이저가 초점에 모여 퍼져나가므로 물체에 입사할 때의 레이저의 곡률중심  $s$ 는 렌즈의 초점이라고 보아도 무방하다. 실험에서 사용한 렌즈는 초점거리가 78 mm인 것을 사용하였다. 그리고 물체에서 산란되어 나온 빛은 실험실에서 제작한 1차원 CCD 구동 시스템을 통하여 전기 신호로 바뀌고, 디지털화 되어, 호스트 컴퓨터에 입력된다.

1차원 CCD 구동시스템은 CCD소자를 제어하는 부분과 CCD 출력을 일시저장하는 프레임 그래프(frame grab) 부분, 그리고 컴퓨터의 병렬 I/O에 맞게 인터페이스를 해주는 부분으로 이루어져 있다(그림 3). CCD소자를 제어하는 부분은 사용하는 CCD를 제어하는 신호를 발생시켜 주는 부분으로 쉬프트 게이트 펄스(shift gate pulse), 전달클럭(transfer clock), 리셋펄스(reset pulse)<sup>[9]</sup>를 정확한 시간에 CCD에 공급하는 부분이다. 프레임 그래프 부분은 CCD의 아날로그 출력을 A/D 변환기를 이용, 디지털화하여 외부 메모리 소자에 그값을 저장하는 부분이다. PC와의 인터페이스는 PC의 병렬 I/O 포트를 이용하여 외부메모리 소자에 저장된 값을 읽을 수 있게 하였다

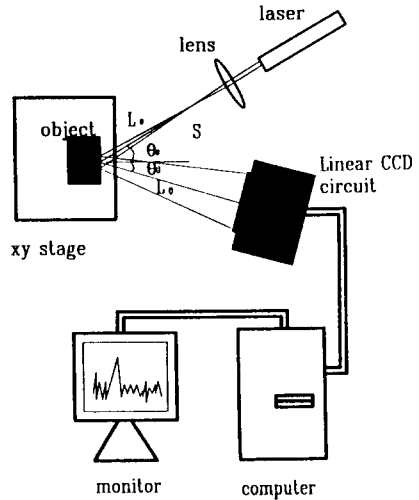


그림 2. 변위 측정 실험 장치.

$L_s$ : 물체로 부터 입사광의 곡률중심까지의 거리,  
 $L_0$ : 물체로부터 CCD까지의 거리,  $\theta_s$ : 입사광과 물체 표면의 법선이 이루는 각도,  $\theta_0$ : 물체로부터 CCD 방향과 물체 표면의 법선이 이루는 각도.  
 $S$ : 입사광의 곡률중심의 위치.

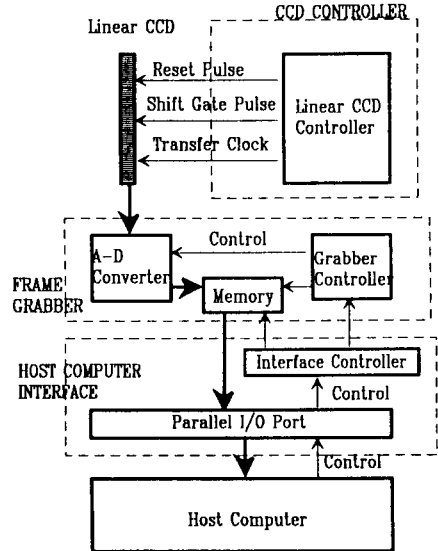


그림 3. 일차원 CCD 구동 시스템.

#### 2. 스펙클 변위 계산

스펙클 변위는 이동전의 스펙클 신호와 이동후의 스펙클 신호의 상호상관함수에 의해서 결정된다. 이동전의 스펙클 신호의 자기상관함수(auto-correlation) 최고점

위치와 이동전후의 스펙클 신호의 상호상관함수 최고점 위치와의 차이가 바로 스펙클 변위이다. 컴퓨터에서 외부메모리를 액세스(access)하여 읽어들이 스펙클 데이터를 이용하여 스펙클 변위를 계산한다. 먼저 이동 전의 데이터로부터 자기상관함수를 계산하고, 이동 후의 데이터와의 상호상관함수를 계산한다. 그리고 상관함수를 계산한 후 최고점의 위치를 찾아내어 그 차이를 계산하면 이것이 스펙클 변위이다. 컴퓨터를 이용 상호상관함수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$C(j) = \frac{1}{N} \sum_i B(i) * B(i+j) \tag{9}$$

여기에서  $N$ 은 규격화 상수(normalization constant)로 여기서는 계산에 참여하는 화소의 갯수이고,  $B$ 는 CCD에서 얻은 빛의 세기값이며,  $C$ 는 그것의 상호상관함수 값이다.

그리고 스펙클 변위의 분해능은 CCD 소자의 화소 간격과 같다. 즉 화소 하나 하나의 위치에서의 빛의 세기를 이용하여 상관함수를 계산하는 것이므로 그보다 작은 스펙클 변위는 고려하지 않았다. 그러므로 보다 정밀한 측정을 위해서는 보다 작은 화소 간격을 가지는 CCD 소자가 요구된다. 실험에서 사용한 CCD 소자의 화소 간격은  $15 \mu\text{m}$ 로서 이보다 작게 스펙클이 이동하였을 경우 그 이동을 알아낼 수 없다.

#### IV. 변위 측정 실험 결과

##### 1. 렌즈가 없을 경우의 스펙클 변위( $L_s = \infty$ )

이론식 (6)에서부터 렌즈를 통하지 않고 입사하는 경우를 생각해 보면, 물체로부터 입사광의 곡률중심까지의 거리가 레이저를 평행광으로 가정했으므로  $L_s = \infty$ 이다. 이 경우 비례상수  $\sigma$ 의 값이  $\cos\theta_0$ 가 된다. 그래서 이론적인 비례상수  $\sigma = \cos 16.69^\circ = 0.96$ 이 되어 거의 1에 가깝게 된다. 즉 물체가  $10 \mu\text{m}$  이동하면 스펙클도  $9.6 \mu\text{m}$  이동하게 되어 CCD에서 2/3화소 정도 이동된다. 물체를  $10 \mu\text{m}$ 씩 이동시키면서 스펙클 변위를 계산해 보았다. 그 결과 물체의 이동에 따른 스펙클 변위를 그려보면 그림 4와 같이 된다. 실험적으로 얻은 결과는  $\sigma = 1.06$ 으로서 레이저에서 나온 빛이 약간 퍼져나간다고 생각하면 아주 자연스러운 결과가 된다.

##### 2. 렌즈가 있는 경우

렌즈를 통하여 레이저가 입사하는 경우 물체로부터 입사광의 곡률중심까지의 거리  $L_s$ 가 유한한 값을 가지

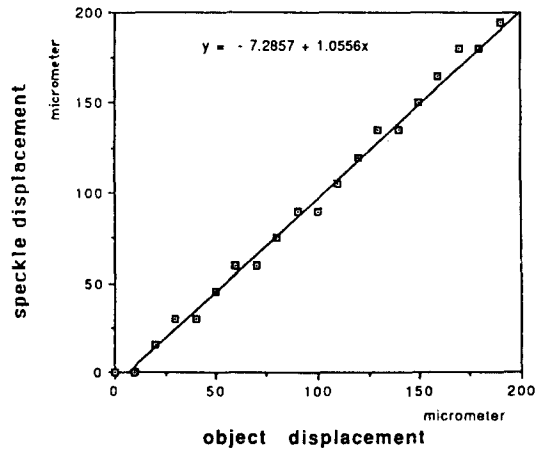


그림 4. 렌즈가 없을 경우 물체의 변위에 따른 스펙클의 변위 ( $\sigma=1.06$ ). 실선은 다항식 커브 맞추기(polynomial curve fitting) 결과

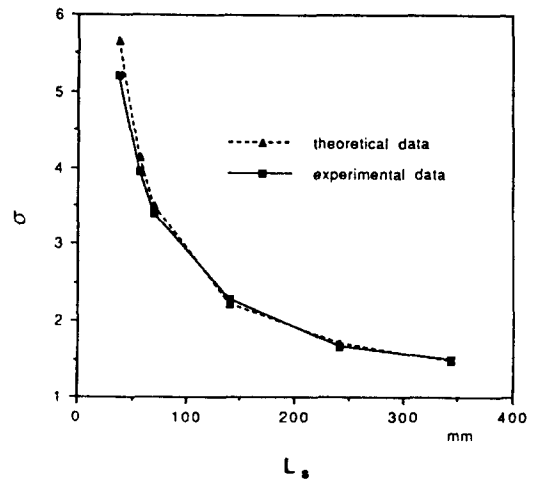


그림 5. 물체와 입사광의 곡률중심과의 거리  $L_s$ 에 대한 비례상수  $\sigma$ 의 변화. 점선은 계산하여 얻은 값이고 실선은 직접 실험한 결과

므로 비례상수  $\sigma$ 에 매우 큰 영향을 끼친다. 입사하는 레이저의 발산도(divergence)가 크면 클수록 스펙클 변위는 더욱 더 커지게 된다.  $L_s$ 에 의한  $\sigma$ 값을 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 계산한 것이 그림 4의 점선이고, CCD를 통해 실제로 측정된 값이 그림 5의 실선으로 표시되어 있다. 이론적으로  $\sigma$ 값이  $L_s$ 에 반비례하는 것으로 나타났는데 실험 결과를 이용하여 계산한 값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이  $\sigma$ 값 중 가장 크게 나온 경우의 물체의 이동에 대한 스펙클 변위의 변화를 그린

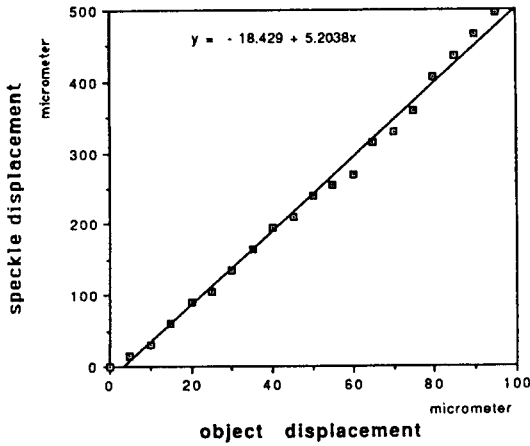


그림 6. 렌즈가 있을 경우 물체의 변위에 따른 스펙클 변위 ( $\sigma=5.20$ ). 실선은 다항식 커브 맞추기 결과

것이 그림 6이다. 이때의 비례상수  $\sigma$ 의 값이 5.20이므로 물체  $3\mu\text{m}$  이동할 때 스펙클은 CCD 1 화소 거리인  $15\mu\text{m}$ 를 이동하게 된다. 실험에 쓰인 장치의 분해능이 CCD의 1 화소 간격인  $15\mu\text{m}$ 이므로 물체가  $3\mu\text{m}$  이동한 것을 감지해 낼 수 있다.

### V. 결 론

거친 표면을 가지는 물체의 미세한 이동을 레이저 스펙클을 이용하여 측정하였다. 측정 기구는 일차원 CCD를 이용하여 구동회로를 제작하였고, 그 결과는 컴퓨터에 입력이 된다. 변위측정방법은 물체의 이동전후의 스펙클 신호간의 세기 상관함수를 계산하여 스펙클 무늬의 이동을 계산해 내었다. 레이저 빔의 발산도를 렌즈를 이용하여 다르게 조정하였으며, 그 경우 렌즈를 넣지 않을 때와 넣을 때의 물체의 변위에 대한 스펙클

변위가 1% 이내의 오차로 1.03배에서 5.20배까지 나타났다. 측정 분해능인 CCD 1화소의 간격이  $15\mu\text{m}$ 이므로 최소  $3\mu\text{m}$ 의 물체이동을 감지할 수 있었다. 그리고 물체가 렌즈의 초점 근처에 있는 경우 매우 급격하게 그 비례상수  $\sigma$ 가 커졌다. 이것은  $\sigma$ 가 빛의 곡률중심으로부터 물체까지의 거리  $L$ 에 반비례해서 물체가 초점근처에 있을 경우 발산하게 된다.

거친 물체의 변위측정을 공장의 자동화에 도입하려면 빠른 계산과 변위값의 정확성이 요구된다. 하지만 두 요구가 서로 상충되어 동시에 두가지를 만족시키기는 힘들다. 변위값의 정확성을 유지하면서 DSP 등의 빠른 소자를 이용하여 계산시간을 빨리하는 방법이 그것의 적절한 해결책으로 생각된다. 또한 물체의 변위측정능력이 비례상수  $\sigma$ 값에 좌우되기 때문에  $\sigma$ 의 값을 증가시키는 적절한 광학 시스템의 설계도 고려해야할 중요한 요소라고 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. C. Dainty ed., *Laser Speckle and Related Phenomena* (Springer-Verlag, 1984).
- [2] 이상수, 레이저 스펙클과 홀로그래피 (교학연구사, 1988).
- [3] J. S. Lim and H. Nawab, "Applications of Speckle Phenomena", Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng., **243**, 35(1980).
- [4] J. M. Huntley, J. Phys. E., **19**, 43(1986).
- [5] J. Zhang, P. Sun, J. Chen, and B. Ding, Opt. Eng., **30**, 382(1991).
- [6] I. Yamaguchi, Optica Acta, **28**, 1359-1376(1981).
- [7] I. Yamaguchi, J. Phys. E: Sci. Instrum., **19**, 944 (1986).
- [8] N. Takai, Sutanto, and T. Asakura, Jpn. J. Appl. Phys., **19**, L75(1980).

## Measurement of Micro-displacement of an Object by Laser Speckle using Linear Array CCD Detection System

C. H. Woo, D. H. Min and S. Y. Kim

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
Taejon 305-701, Korea*

(Received: November 2, 1993)

A speckle correlation method was applied to measure the in-plane translation of a diffuse object which has rough surface using a linear CCD sensor and personal computer. Displacement of a speckle pattern produced from the object illuminated by a laser beam was measured by the cross-correlation functions between the 1-D speckle profiles before and after the object translation, which were measured by linear CCD array sensor to be sent to IBM 386 personal computer. The sensitivity of the measurement was dependent on the radius of the wavefront curvature of incident beam as well as the spatial resolution of linear CCD array. A linear CCD array had  $15\ \mu\text{m}$  pitch and 1728 pixels. The ratio of the speckle displacement and object translation varied from 1.03 to 5.20. The object translation of  $3\ \mu\text{m}$  can be measured by the linear CCD sensor of which pitch was  $15\ \mu\text{m}$ , when the ratio of the speckle displacement and object translation was 5.20.