

미세변위 측정을 위한 스펙클 간섭계의
구성과 자동 Fringe 해석

(Speckle Interferometry and Automatic Fringe Analysis
for Small Displacement Measurement)

金 聖 根,** 吉 相 瑾,* 朴 漢 奎*

(Seong Keun Kim, Sang Keun Gil, and Han Kyu Park)

要 約

물체의 표면 변위에 민감한 이중 스펙클-장 간섭계(dual field speckle interferometry)를 구성하고, 개인용 컴퓨터를 이용한 영상처리 기법으로 변위 정보를 갖는 줄무늬 (fringe) 패턴을 해석하였다. 물체 표면의 $10\mu\text{m}$ 에서 $80\mu\text{m}$ 까지의 각각의 변위에 대해서 이중 노출 기법을 사용하여 Specklegram을 제작하였고, 이것을 제안한 시스템과 알고리즘을 사용하여 해석하였다. 스펙클 간섭계의 측정 한 근처의 $\sim 10\mu\text{m}$ 까지의 변위는 줄무늬 밀도의 감소로 인하여 줄무늬의 가시도가 떨어지므로 10% 이상의 상대 오차가 발생 했으나, 그 이상의 측정 범위내에서는 5% 이하의 상대오차가 나타났다. 특히 각각의 변위에 대한 공간 주파수는 비교적 선형성이 유지됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

Dual field speckle interferometry that is sensitive to the surface displacement of the object is constructed, and fringe patterns that have the displacement-informations are analysed using digital image processing.

From $10\mu\text{m}$ to $80\mu\text{m}$ with respect to each specklegrams are obtained by double-exposure techniques, which are analysed by the proposed system and algorithm.

Up to $10\mu\text{m}$ displacement, near measurable lower bound of Speckle Interferometry, fringe visibility is decreased due to decreasing fringe density, therefore relative errors are produced over 10%. But over that displacement, relative errors are produced below 5%.

Particularly, It is observed that spatial frequencies of each displacement are comparatively linear.

*正會員, **準會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)
接受日字: 1989年 5月 8日

I. 서 론

물체의 변위와 변형을 측정하는 방법은 국소 측정을 위한 스트레인이계이지와 광역 측정을위한 광 단

성법(photoelastic method), 무아래 측정법 (moire method), 홀로그래픽 간섭계 그리고 스펙클 간섭계를 이용한다.

스펙클 간섭계는 하나의 스펙클 장과 평면 기준파 또는 다른 스펙클장의 간섭성 결합(interference)을 이용한 측정기술로서 간섭계의 기본 해상도와 광 파장의 관계에 의해서 관측 물체의 μm 단위의 미세변위를 비접촉, 비파괴 방식으로 측정할 수 있으며, 기록 방법과 줄무늬의 해석 방법에 따라서 변위와 변위의 1차 미분 성분에 민감한 줄무늬 간격을 얻을 수 있고, 특히 홀로그래픽 간섭계와 비교하여 시스템이 간소하며, 기계적 안정성을 덜 요하고 결과의 표시와 해석이 용이한 장점을 갖는다.¹²⁾

1969년 D. Gabor¹²⁾에 의하여 종래 홀로그래픽에서 잡음으로 간주되던 레이저 스펙클이 Coherence의 결과로 증명된 이래, 물체 표면에 대한 정보 캐리어로서 간섭계에 응용되기 시작했다. 1975년 K.A. Stetson¹³⁾에 의해 스펙클 사진법(speckle photography)과 스펙클 간섭법(speckle interferometry)이 광학적 도량형학(optical metrology)을 위한 광범위한 변위 측정 기술로 확립되었다. 1985년 F. P. Chiang⁴⁾은 스펙클 간섭계를 종래의 결정적 과정(deterministic process)에 의한 스펙클의 성질을 확률적 개념(stochastic process)으로 해석하였다.

한편, 1980년 이후 컴퓨터의 발달과 더불어 줄무늬 데이터 해석에 있어서 정확성과 안정성을 개선하기 위하여 자동 줄무늬 해석을 위한 연구가 진행되어 왔으며⁶⁾ 1983년 D. W. Robinson⁷⁾은 컴퓨터 영상처리 시스템을 이용하여 1차원 줄무늬 데이터를 해석하였고, 최근에는 FFT, FWT 등을 이용한 2차원 줄무늬 패턴의 해석⁸⁻¹¹⁾이 활발히 진행 중이다.

본 논문에서는 물체의 내면 변위에 민감한 두 개의 스펙클-장에 의한 간섭계를 구성하여 $10\mu\text{m}$ 에서 $80\mu\text{m}$ 까지의 물체 변위에 관한 정보를 기록하고 이에 따른 2차원 줄무늬 패턴을 PC를 이용한 영상처리 기법에 의해서 제안한 알고리즘으로 해석하였다.

II. 스펙클 간섭계의 원리

1. 스펙클 현상

광학적으로 거친면에 간섭성 광이 입사되었을 때에 나타나는 미세한 반전들을 스펙클 현상이라 하며, 이는 거친 표면상의 여러 기본 영역으로부터 나오는 파들 사이에서의 자기-간섭(self-interference) 현상이다. 이때, 거칠기는 광 파장보다 같거나 커야한다.

즉, 표면상의 각각의 점들은 빛을 흡수 또는 재방출하므로 Huygens-Fresnel 2차파와 유사한 구면파

의 점원으로 고려할 수 있다. 스펙클 현상은 확산되는 광의 경로가 교차되는 공간 전체를 채우는 3차원 간섭현상이며 Objective Speckle과 Subjective Speckle로 구분된다. 평균 스펙클 크기는 스펙클의 자기 상관 함수로부터

$$\frac{1.22 \lambda v}{a} \quad (1)$$

으로 주어지고, 이때 a 는 렌즈 개구면의 직경이고, v 는 렌즈에서 결상면사이의 거리이다. 따라서 Subjective Speckle 크기는 결상시스템에 의존하며, 스펙클 간섭계의 측정 한계를 결정한다. 그리고 이중노출에 의한 두 스펙클-장의 조합으로 광 세기 분포는 식(2)의 확률 분포를 갖는다.

$$P(I) = 4 (I/I_0^2) \exp(-2I/I_0) \quad (2)$$

2. 이중 스펙클-장 간섭계

스펙클 간섭계는 하나의 스펙클-장과 평면 기준파 또는 다른 스펙클-장의 Coherence 합(interference)을 이용한 측정기술로서 1978년 J. A. Leendertz¹⁴⁾는 두 스펙클 장이 서로 간섭하여 원래의 장의 상대 위상에 의존하는 세번째 스펙클 패턴을 만들 수 있음을 보였다. 본 논문에서 두 개의 스펙클 장을 조합하는 방법으로 거울이 교체된 Twyman-Green 간섭계의 원리를 이용하고 있다.

3. 스펙클 패턴의 기록과 해석

물체면(ξ_1, ξ_2)이 렌즈(r_1, r_2)면에 의해서 점상면(x_1, x_2)에 상을 맺고 $h(\xi_1, \xi_2)$ 가 물체면에서의 복소 광크기라하면, 결상면에서의 복소 광크기는 Fresnel-Kirchhoff 이론에 의하여

$$f(x_1, x_2) = k \iint \iint h(\xi_1, \xi_2) A(r_1, r_2) \times \exp\{jk[r_1(\frac{\xi_1 + x_1}{p} + \frac{x_1}{q}) + r_2(\frac{\xi_2 + x_2}{p} + \frac{x_2}{q})]\} d\xi_1 d\xi_2 dr_1 dr_2 \quad (3)$$

으로 주어지고, 이때 $A(r_1, r_2)$ 는 개구면에 대한 광조사함수이다. 이중노출(double-exposure) 기법과 현상(developing)에 의해서 specklegram의 복소크기 함수 $g(x_1, x_2)$ 는

$$g(x_1, x_2) = b - ct \{ |f(x_1, x_2)|^2 + |f(x_1 + d_1, x_2 + d_2)|^2 \} \quad (4)$$

으로 주어지고, 변위 정보는 식(4)의 light field 내에 포함되고, 공간 여파 기법(spatial filtering)인 whole Field Filtering 또는 Pointwise Filtering에 의해 해석된다.

Pointwise Filtering은 좁은 레이저 빔을 Speckle-gram상의 선택된 점에 조사함으로써 그점에서의 변위 벡터를 얻을 수 있다. Specklegram에 레이저빔을 조사하여 거리 L에서 얻은 결과적인 광세기는

$$I(u_1, u_2) = 4\cos^2 k \left(\frac{u_1 d_1 + u_2 d_2}{2L} \right) I_1(u_1, u_2) \quad (5)$$

으로 주어지고, 여기서 $I_1(u_1, u_2)$ 와 $G_1(u_1, u_2)$ 는 각각

$$I_1(u_1, u_2) = c^2 t^2 |G(u_1, u_2)|^2$$

$$G(u_1, u_2) = \left| \iint |f(x_1, x_2)|^2 \times \exp[jk(x_1 u_1 + x_2 u_2) / L] dx_1 dx_2 \right|^2$$

을 나타낸다. $I_1(u_1, u_2)$ 은 단일 노출 스펙클 패턴의 회절 패턴으로 간주할 수 있고, 따라서 $I(u_1, u_2)$ 는 Cosined Squared Fringe로 변조(modulation)된 Diffractor Halo 형태의 회절 패턴을 의미한다.

식(5)로부터 어두운 줄무늬는 $\cos k \frac{(u_1 d_1 + u_2 d_2)}{2L} = 0$ 즉

$$\bar{u} \cdot \bar{d} = (n + \frac{1}{2}) \lambda L, \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

일때 발생하고, 이것은 $(\lambda L) / |\bar{d}|$ 줄무늬 간격을 갖는 변위 벡터 \bar{d} 에 수직인 곧은 간섭 무늬군을 의미한다. 같은 개념으로 밝은 줄무늬 패턴은

$$\bar{u} \cdot \bar{d} = n \lambda L, \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (7)$$

으로 주어진다.

III. Fringe 패턴의 자동 해석

1. Fringe 패턴 해석 시스템

줄무늬 패턴의 해석 시스템은 데이터의 취득 방법에 의해서 아래와 같이 분류될 수 있다. 첫째로 원통형 렌즈를 사용하여 LPA(linear photodiode array)로 줄무늬 패턴을 압축하는 방법이 있고, 둘째로 LPA로 주사(Scanning)하여 2차원 영상으로 수록하는 방법이 있다. 셋째는 CCD(charge coupled device) 카메라 또는 TV 카메라를 이용하여 2차원 영상을 직접 수록하는 방법이 있다.

데이터의 신호 처리 방법에 따른 분류로는 1차원 또는 2차원 줄무늬 데이터를 FFT(fast fourier transformation), FWT(fast walsh transformation) 또는 Autocorrelation 방법을 이용하여 공간 주파수를 도출한다. 본 논문의 줄무늬 패턴의 자동 해석을 위한 전체 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다.

Specklegram에 He-Ne 레이저를 직접 조사하여 반투명막 위에 생긴 회절된 줄무늬 패턴의 영상을 CCD 카메라로 2차원 데이터 형태로 수록한다. 수록된 영

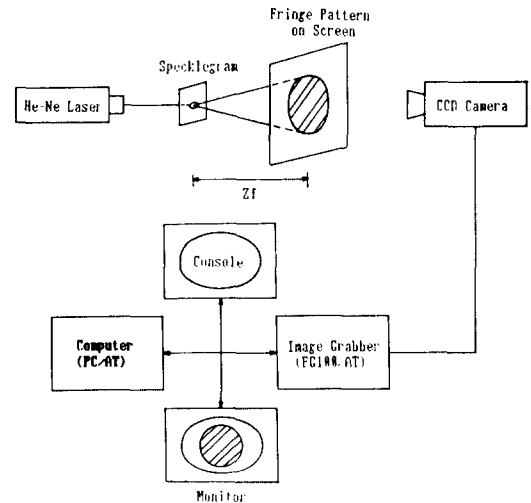


그림 1. 자동 fringe 해석을 위한 전체 시스템 구성도

Fig. 1. Structure of system for automatic fringe analysis.

상은 영상 취득기 FG100/AT로 A/D 변환되어 컴퓨터에 전송되고 신호처리된 후 물체의 변위량과 변위 방향이 계산된다. 이때 줄무늬 영상은 256×240 pixels로 구성되고 256 gray-level을 갖는다.

2. 스펙클 잡음(Speckle Noise)의 감소

여러가지 형태의 Interferogram은 상당히 높은 수준의 잡음을 포함하거나 줄무늬 대비도(Contrast)에 있어서 매우 심각한 변화를 나타내므로 전 처리(Pre-Processing) 단계가 필요하다. 특히, 스펙클 잡음이 존재할때, 즉 줄무늬 패턴보다 잡음의 공간 주파수가 상당히 클때는 Interferogram에 LPF(low pass Filter)를 수행하여 주파수 성분의 스펙클 잡음을 제거할 필요가 있다. LPF는 각 pixel들을 그 pixel과 이웃 pixel에서 측정된 Gray-level의 중앙값(median) 또는 가중 평균값(weighted average)으로 치환함으로써 수행된다.

이중 노출된 Specklegram으로부터 얻은 줄무늬 패턴의 스펙클 잡음을 감소시키는 방법으로서 분산적인 임펄스 잡음을 줄이는데 효과적이고 영상의 끝부분(edge)을 그대로 유지하는 장점을 가진 Median Filtering을 사용하였다.

3. 변위 방향의 결정

줄무늬 패턴의 방향은 가해준 변위 방향과 수직하

므로, 줄무늬 영상을 360°회전시키면서 각각의 각도에 대해서 1차원 투영(Projection)에 의한 영상의 대비도를 계산하여 최대 대비도를 갖는 방향을 90°회전시켜서 변위방향으로 결정한다. 그림 2에서는 줄무늬 패턴의 변위 방향을 결정하기 위한 해석 체계를 나타낸다.

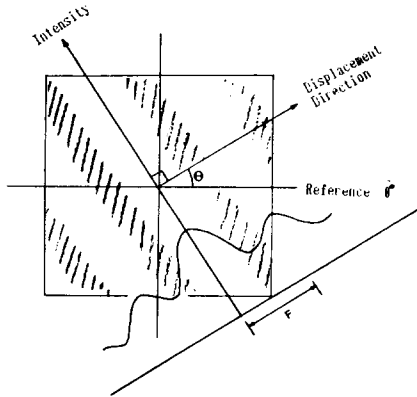


그림 2. 변위방향의 결정을 위한 해석
Fig. 2. Analysis for determination of displacement direction.

임의의 Pixel의 각각의 Gray-level을 $INT(i, j)$ 라 하고, θ 만큼 좌표변환한 Pixel의 Gray-level을 $INT(i', j')$ 라 하면,

$$\begin{pmatrix} i' \\ j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i-128 \\ j-120 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 128 \\ 120 \end{pmatrix} \quad (8)$$

의 변환 공식이 성립되며, 그림 2에서 이 각도는 줄무늬 패턴에 수직인 방향이 된다. Window를

$$INTSUM(i) = \sum_{j=0}^{239} INT(i, j) \quad (9)$$

으로 정의하여 회전 각도에 따라서 식(10)에 의한 대비도를 계산하여 최대 대비도를 갖는 각을 변위 방향에 수직 방향으로 결정한다.

$$Contrast = \sum_{i=0}^{238} \{INTSUM(i+1) - INTSUM(i)\}^2 \quad (10)$$

4. 변위량의 결정

줄무늬 패턴은 Cosine Squared Fringe에 의하여 변조된 Diffraction Halo 형태이므로 공간 주파수 성

분을 갖는다. 식(9)의 INTSUM(i)는 2차원 줄무늬 영상을 1차원 데이터 형태로 줄무늬 방향에 수직하게 투영한 결과이므로 평균 gray-level 분포 INTSUM(i)을 FFT 하여서 구한 Power Spectrum은 줄무늬 간격에 대응하는 공간 주파수 성분을 갖는다. 공간 주파수 U_p 로부터 모니터상의 줄무늬 간격 F' 은

$$F' = \frac{1}{U_p} \text{ (pixels)} \quad (11)$$

으로 주어지고, 스크린상의 실제 줄무늬 간격은 스크린과 모니터사이의 배율 척도, S_f 와 F' 을 곱함으로써 얻는다.

$$F = S_f \cdot F' \quad (12)$$

식(7)로부터 물체 변위는

$$d = \frac{\lambda z_f}{MF} \quad (13)$$

으로 주어진다.

그림 3에서는 변위량과 변위 방향을 결정하는 전체 줄무늬 패턴 해석 알고리즘을 도식화하였다.

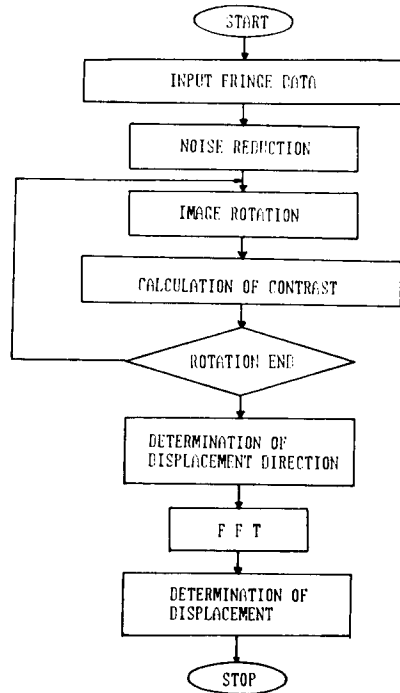


그림 3. fringe 패턴 해석을 위한 알고리즘
Fig. 3. Algorithm for fringe pattern analysis.

IV. 실험 및 결과 고찰

1. 이중 스펙클 - 장 간섭계의 구성

실제 출력이 5mW인 CW He-Ne 레이저의 빔을 공간 필터링 (spatial filtering)하여 평행광을 만든 후에 반 거울 (half mirror)을 이용하여 두 빔으로 나눈다. 거울 1과 거울 2에 의해 측정 물체 표면의 수직축에 대해서 각각 45°의 입사각도로 조절하여 그림 4와 같은 X-X'방향의 변위에 민감한 스펙클 간섭계를 구성했다.

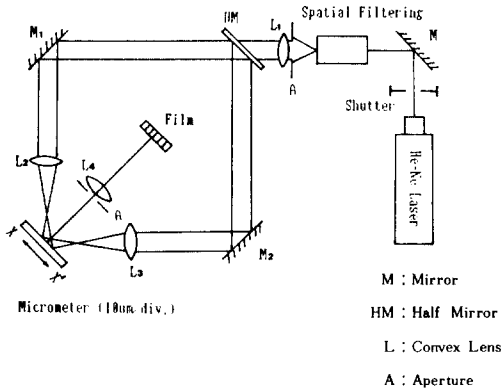


그림 4. X-X'의 변위에 민감한 스펙클 간섭계의 구성

Fig. 4. Construction of speckle interferometry sensitive to X-X' displacement.

특히 물체면에 입사되는 평행광을 렌즈 2,3을 사용하여 발산 빔 (divergent beam)을 만들어 사용함으로써 커다란 물체에 대해서 광역적 측정을 가능하게 하였고, 또 반대 경우로 작은 물체면에 대해서는 조사 영역을 작게하여 노출 시간을 줄이므로써 시스템의 안정성을 높인다. 스펙클 패턴의 기록을 위한 결상 시스템은 F수 3.57의 렌즈 4로 구성하여, 스펙클의 크기를 2.76µm로 정하였다. 결상 시스템의 상 배율을 1로 조정하여 렌즈 수차(Aberration)에 의한 오차를 최소화하였다. 기록 물질로는 적색 광에 대하여 5000lines/mm의 해상력을 갖는 Agfa-Gevaert 8E75를 사용하였다. 그리고 변위 정보를 가지는 스펙클 패턴을 이중 노출시켜서 기록하였는데, 물체 표면의 불균일한 산란율로 인한 회절 효율의 감소를 최소화하기 위하여 각각의 변위 측정시에 AN-DO AQ1111 Powermeter를 사용하여 노출량을 결정

하였다. 스펙클 패턴을 기록한 필름을 현상(Developing), 정착(Fixing) 그리고 표백(Bleaching) 과정을 거쳐서 Specklegram을 제작하였다.

2. 강체의 이동 변위 측정

테프론 기관을 측정 물체로 하여 10µm/div.의 이동 변위를 줄 수 있는 Micrometer에 부착하여 10µm에서 80µm까지 10µm 간격으로 X-X'의 물체면에 평행한 변위를 가해서 변위 전후에 이중 노출하여 변위 정보를 포함하는 Specklegram을 제작하였다. III에서 제안한 해석 시스템을 통하여 공간 주파수, 줄무늬 간격 그리고 이동 변위량을 계산하였다.

표 1에 각각의 변위에 대한 공간 주파수, 줄무늬 간격 그리고 측정결과에 대한 상대 오차를 분석하였다.

표 1. 강체의 이동변위에 따른 fringe 패턴의 해석 결과

Table 1. Analysis of fringe pattern according to rigid body translation displacement.

d mic. [µm]	Up(x 1/256) [pixels]	fr [pixels]	fr [mm]	d meas. [µm]	Relative Error(%)
10	9	28.4	14.2	11.1	11.0
20	17	15.0	7.5	21.0	5.0
30	26	10.2	5.1	30.9	3.0
40	34	7.5	3.8	42.0	5.0
50	43	6.0	3.0	53.2	6.4
60	51	5.0	2.5	63.0	5.0
70	59	4.3	2.2	72.9	4.1
80	67	3.8	1.9	82.8	3.5

실험 결과로부터 20µm 이상의 변위에서는 상대 오차 5% 이하의 비교적 정확한 측정이 가능했으나 10µm 이하의 변위 측정시에는 10% 이상의 상대 오차가 발생하여 정확성이 많이 떨어졌다. 10µm의 변위 측정에서는 실제 변위를 가하는데 있어서 목적에 의한 오차 요소가 많이 포함되었을 가능성이있고, 특히 작은 변위, 즉 줄무늬 밀도가 감소됨에 따라서 줄무늬 가시도가 떨어지므로 정확한 공간 주파수를 도출하는데 어려움이 많음을 알 수 있다.

그림 5, 그림 6, 그림 7은 각각 시스템의 오차에 대한 검증, 변위에 대한 공간 주파수의 선형성 그

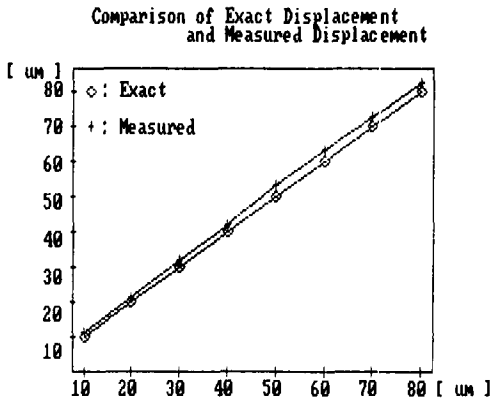


그림 5. 정 변위와 측정된 변위의 비교
Fig. 5. Comparison of exact displacement and measured displacement.

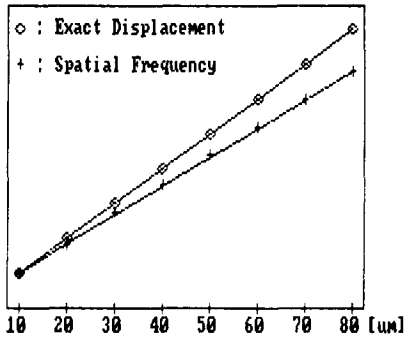


그림 6. 변위에 대한 공간 주파수의 선형성
Fig. 6. Linearity of spatial frequency for displacement.

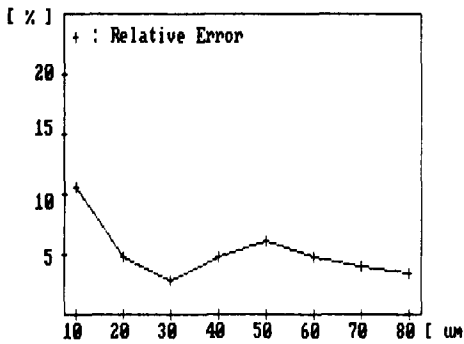
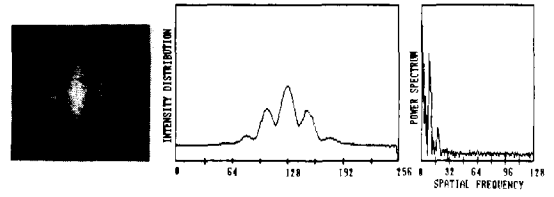
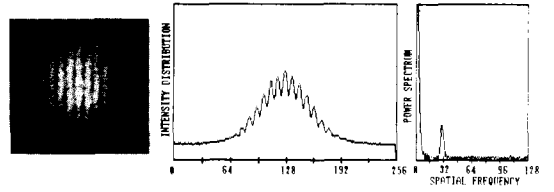


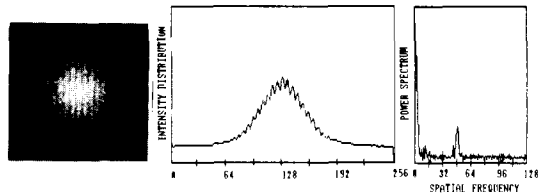
그림 7. 변위에 대한 상대 오차
Fig. 7. Relative error for displacement.



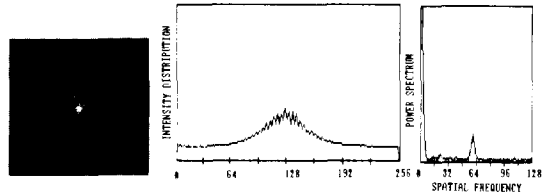
(a) 10 μm fringe pattern



(b) 30 μm fringe pattern



(c) 50 μm fringe pattern



(d) 70 μm fringe pattern

그림 8. 강체의 이동변위에 따른 fringe 패턴의 해석 결과

Fig. 8. Analysis of fringe pattern to rigid body translation displacement.

리고 변위에 따른 오차의 분포를 나타내고 있다.

그림 5와 그림 7로부터 작은 변위에 대해서 심각한 상대 오차가 발생됨을 알 수 있는데, 이는 줄무늬 밀도가 감소함에 따라서 줄무늬의 가시도 (visibility)가 저하되므로 정확한 공간 주파수를 도출하기가 어려울 것으로 사료된다. 그림 6에서는 측정된

변위외의 오차에도 불구하고, 공간 주파수의 단위에서는 상당한 선형성이 유지됨을 알 수 있고, 또 줄무늬 패턴의 취득시에 영상을 작게 수록하여 공간 주파수를 크게 하면 더 높은 시스템의 정확도를 얻을 수 있으며 반대로 큰 줄무늬 영상을 수록하면 측정 상한을 높일 수 있다. 그림 8에는 스펙클 간섭계로부터 얻은 각각의 변위에 대한 줄무늬 패턴과 해석 시스템에 의해서 구한 광세기 분포 그리고 이에 따른 power spectrum을 나타내었다.

실험 결과로부터 또는 이론적으로 예측된 오차의 원인은 기록 체계와 해석 체계에서의 오차로 나눌 수 있는데, 기록체계에서는 결상 시스템의 렌즈 수차에 의한 정보의 손실, 노출량 조절에 의한 회절 효율의 변화, 물체 표면과 필름에서의 축 방향의 미소 변형에 의한 비상관 요소 (decorrelation factor)의 첨가 그리고 화학적 처리 과정에서의 줄무늬 가시도의 감소가 주 원인으로 추정되며, 해석 체계에서는 speckle-gram위의 정확한 대응점을 찾는 문제와 회절 패턴의 크기를 결정하는 거리 그리고 CCD 카메라의 초점 거리와 노출량의 변화에 의한 줄무늬 대비도의 저하가 주 원인이며 또 줄무늬 밀도의 감소는 작은 변위에서의 중대한 오차의 원인으로 사료된다.

V. 결 론

본 논문에서는 물체의 이동 변위를 측정하기 위하여 이중 스펙클-장 간섭계를 구성하여 변위정보를 기록하였고, 이를 디지털 영상 처리 기법을 이용하여 줄무늬 패턴을 해석함으로써, 종래의 수동 작업에 의한 해석 방법과 비교하여 안정성, 반복성 그리고 정확성을 증가시켰다.

변위량 측정에 있어서 $20\mu\text{m}$ 이상의 변위에서는 상대 오차가 5% 이내로 발생하였는데 이것은 스펙클 패턴의 기록과 해석 시스템에서 포함되는 오차 요인에 의한 결과로 추정되며, 오차 요인에 대한 정확한 분석으로 개선될 수 있을 것이라 사료된다. 그리고 측정된 공간 주파수 사이의 관계가 비교적 선형성을 유지하므로, 구성한 스펙클 간섭계와 줄무늬 해석을 위한 알고리즘을 이용한 광 계측기로서의 실현이 가능하다.

본 시스템은 적합한 소프트웨어의 개발과 함께 온도, 압력 그리고 물리적 힘에 의한 물체의 국부적 또는 광역적 변위와 변형율을 측정하는데 응용할 수 있으며, 특히 열 역학, 유체 역학 그리고 광 도량형학 등에서 유용하게 응용되며, 최근에는 진단 의학 분야에서도 이용되고 있다.

앞으로의 과제는 통계 광학적 측면에서, 발생하는 오차 요인들을 분석함으로써 시스템의 오차를 감소시켜야하며, 다양한 형태의 변위 정보를 기록할 수 있도록 복합적 변위에 민감한 간섭계의 구성이 필요하다.

특히 완벽한 실시간 처리를 위하여 가열 가소성 (thermoplastic) 홀로그래프 물질과 광 굴절 (photorefractive) 매질을 이용하고, 광 간섭계를 집적화하면 실제 측정 시스템으로서 공장 자동화에 기여할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

- [1] R. Jones, C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge Univ. Press 1983.
- [2] J.C. Dainty, *Laser Speckle and Related Phenomena*, Springer-Verlag, 1975.
- [3] K.A. Stetson, "A review of speckle photography and interferometry," *Opt. Eng.* vol.14, no. 5, pp. 482-489 1975.
- [4] F.P. Chiang, D.W. Li, "Random speckle patterns for displacement and strain measurement," *Opt. Eng.* vol. 24, no. 6, pp. 936-943 1985.
- [5] D.W. Li, J.B. Chen, F.P. Chiang, "Statistical analysis of one beam subjective laser speckle interferometry," *JOSA*, vol. 2, no. 5, pp. 657-666, 1985.
- [6] G.T. Reid, "Automatic fringe pattern analysis: A review," *Optics and Lasers in Eng.*, vol. 7, pp. 37-68 1986.
- [7] D.W. Robinson, "Automatic fringe analysis with a computer image-processing system," *Appl. Opt.* vol. 22, no. 14, pp. 2169-2176 1983.
- [8] G.H. Kaufmann, "Digital analysis of speckle photography fringes: processing of experimental data," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 19, pp. 3411-3412 1982.
- [9] J.M. Huntley, "An image processing system for the analysis of speckle photographs," *J. Phys. E.*, pp. 43-49 1986.
- [10] J.M. Huntley, "Fast transforms for speckle photography fringe analysis," *Optics and lasers in Eng.*, vol. 7, pp. 149-161 1987.
- [11] V.I. Vlad, D. Popa, St. Solomon, "Hybrid holographic-digital processing system for 3-D displacement measurement," *SPIE*, vol. 700 pp. 343-351 1986. *

 著 者 紹 介



金 聖 根 (準會員)

1964年 6月 4日生. 1987年 2月 연세대학교 전자공학과 학사학위 취득. 1989年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 석사학위취득. 주 관심분야는 광정보처리 및 Neural Network Interferometry 등임.

吉 相 瑾 (正會員) 第26卷 第3號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 박사과정.

●

朴 漢 奎 (正會員) 第25卷 第8號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수
