

전자 스페클 패턴 간섭계를 이용한 형상 측정 Surface contouring using Electronic Speckle Pattern Interferometry

김계성*, 유원재(전북대 대학원), 강영준(전북대 공대)

G. S. Kim, W. J. Ryu (Graduate School, Chonbuk Univ.),

Y. J. Kang (Chonbuk Univ.)

ABSTRACT

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) is an optical technique to measure surface deformation of engineering components and materials in industrial areas. This optical method is capable of providing full-field results with high spatial resolution, high speed and is the non-contact technique. One of important application aspects using electronic speckle pattern interferometry is to generate contours of a diffuse object in order to provide data for 3-D shape analysis and topography measurement. The contouring method by modified dual-beam speckle pattern interferometry is proposed. We introduce a shift of the illumination beams through optical fiber in order to obtain the contour fringe patterns. The speckle pattern correlation technique is suitable for providing measurement range from millimeters to several centimeters. The complete geometric analysis of the contouring method by shifting illumination beams is also presented. An excellent agreement between the theoretical and experimental results are obtained.

Key Words : ESPI(전자 스페클 패턴 간섭법), non-contact technique(비접촉 방법), contouring method(등고선 추출법), optical fiber(광섬유), dual-beam(이중빔), geometric analysis(기하학적 해석)

1. 서 론

전자 스페클 패턴 간섭계⁽¹⁾는 1969년에 물체의 전체 변위장을 관찰하기 위한 비접촉, 비파괴 방법으로서 Butters와 Leendertz에 의해 개발되었다. 그리고 스페클 간섭무늬의 정량적 해석을 위해 각 화소의 상대적 위상값을 계산하는 위상 이동법⁽²⁾은 1984년에 K. Creath에 의해 처음 소개되었다. 스페클 간섭법을 이용한 측정방법은 레이저 파장을 단위로 하기 때문에 측정 민감도가 우수하고, 비접촉식으로 검사대상에 대해 전혀 영향을 주지 않는다. 실시간 측정이 가능하고 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분 전면적이 측정가능하다는 장점을 가지고

있다. 또한, 전자 스페클 패턴 간섭계는 측정 물체의 변형이나 형상에 대한 정보를 갖고 있는 간섭 무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 이용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 전자 스페클 패턴 간섭계를 이용한 측정방법은 홀로그래피 간섭법의 필름 처리과정이 제거되었고 재생과정이 불필요해졌다. 그러나 정보 전달자로서 스페클을 이용하는 이 방법은 스페클이 간섭무늬를 형성한 뒤에는 노이즈로서 작용되기 때문에 홀로그래피 간섭법에 비해 빈약한 질의 간섭무늬의 갖는다는 것과 진동과 외란 등에 의해 영향을 받고, 물체의 많은 변형에 대해서는 간섭무늬의 스페클 비상관 관계가 발생하는 단점이 있다.

전자 스페클 간섭법을 이용한 등고선 추출법

(Contouring method)은 대상 물체의 높이와 형상에 대한 일정 등고선 간격(Contour interval)의 간섭무늬를 얻고, 이를 통하여 3차원 물체의 형상에 대한 정보를 얻는 광학적 방법이다.⁽³⁾ 현재 존재하는 등고선 추출법은 거시적으로 무아래 방법, 홀로그래피 방법, 전자 스펙클 패턴 간섭법이 있다. 본 실험에서 이용한 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 방법은 다시 두 파장의 조사빔을 이용한 방법, 물체 조사빔을 변화시키는 방법, 물체를 변화시키는 방법, 두 물체빔을 이동시키는 방법이 있다.^{(4),(5),(6)} 본 연구는 면내 변형을 측정하는 전자 스펙클 패턴 간섭계를 약간 변조하여 두 물체빔을 이동시키는 방법에 의해 3차원 물체의 형상측정을 하였다. 물체빔의 이동은 마이크로미터 위에 설치되어 있는 광섬유에 의해 수행되었다. 등고선 간섭무늬(Contour fringe)를 통한 물체의 높이와 형상에 대한 정보를 얻기 위하여 간섭계의 두 물체빔 중 하나에 PZT를 부착하여 정량화를 수행하였다. 그리고 본 연구에서는 조사빔의 이동에 의한 등고평면(Contour plane)의 형성을 벡터와 기하학적으로 완전히 해석하였다.⁽⁷⁾

2. 스펙클 패턴의 상관 간섭

그림 1을 보면 두 조사빔은 물체상의 점 M을 통하여 P점으로 들어오게 된다. 이때 각 빔의 진폭과 위상을 u 와 ϕ 라 하면

$$\begin{aligned} U_1 &= u_1 \exp i(\phi_{s1} + \phi_{m1}) \\ U_2 &= u_2 \exp i(\phi_{s2} + \phi_{m2}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

u_1, u_2 : random amplitudes

ϕ_{s1}, ϕ_{s2} : random phases

ϕ_{m1}, ϕ_{m2} : M에서 P까지의 광경로와 연관된 phases

P점에서의 빔의 강도 $I_A(P)$ 는

$$I_A(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + \psi_m] \quad (2)$$

여기에서,

$$I_1 = U_1 U_1^*$$

$$I_2 = U_2 U_2^*$$

$$\psi_m = \phi_{m1} - \phi_{m2}$$

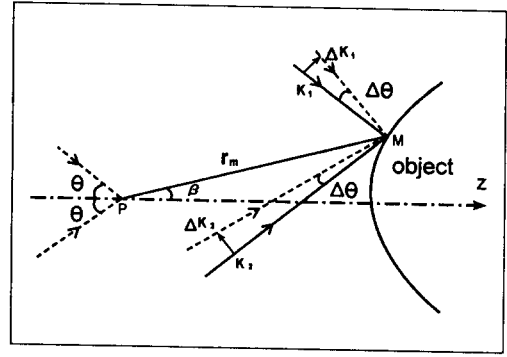


Fig 1. Geometry of dual-beam-shifted ESPI contouring

두 조사빔의 상 ϕ_{m1} 과 ϕ_{m2} 가 ϕ'_{m1} 와 ϕ'_{m2} 로 이동되었다면 P점에서의 빔의 강도 $I_B(P)$ 는

$$I_B(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + \psi'_m] \quad (3)$$

$$\psi'_m = \phi'_{m1} - \phi'_{m2}$$

강도 I_A 와 I_B 사이의 상관관계는 CCD 카메라의 비디오 신호의 차이에 의해서 표현된다. 간섭계 상면의 스펙클 패턴 I_A 는 전기적인 신호로 바뀌어 Frame grabber내로 들어와 디지털 정보로 저장되고, 변화된 스펙클 패턴 I_B 와의 차에 의해 간섭무늬가 생성되어 모니터상에 나타나게 된다. CCD 카메라를 통한 간섭무늬의 강도는 출력 전압의 변화에 비례하기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_s &= (V_A - V_B) \propto (I_A - I_B) \\ &= 4\sqrt{I_A I_B} \sin[(\phi_{s1} - \phi_{s2}) + (\psi_m + \psi'_m)/2] \\ &\quad \times \sin(\Delta\psi_m/2) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서, $\Delta\psi_m = \psi'_m - \psi_m$

모니터상의 밝기 B는

$$B \propto \langle (V_1 - V_2)^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

와 같이 정의되고, 식(4)에서 ϕ_{s1} 과 ϕ_{s2} 를 포함한 불규칙 위상항은 평균법과 고역 필터링(high pass filtering)에 의해 제거되고 다음과 같이 된다.

$$B \propto \left(I_A I_B \sin^2 \frac{\Delta\psi_m}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

위의 식(6)으로부터 $\Delta\psi_m = 2n\pi$ 일 때는 극소

의 상관관계로서 어두운 상관 간섭무늬가 발생하고

$\Delta\psi_m = 2(n+1)\pi$ 일때는 극대의 상관관계가 발생함을 알 수 있다.

3. 기하학적 해석

간섭무늬 간격은 두 간섭 스펙클 패턴의 위상차에 의해 결정된다. 이 위상차가 물체의 높이와 관계가 있을 때 물체의 형상은 간섭무늬의 해석을 통하여 얻을 수 있다. 조사빔의 이동을 바탕으로 한 변조된 이중빔 전자 스펙클 간섭계에 의한 등고선 추출법에서 물체의 형상과 위상차 사이의 관계를 다음의 완전한 기하학적 해석을 통하여 알아본다.

그림 1을 보면 물체는 관찰 방향축 Z에 대해 같은 각도로 양쪽에서 두 파에 의해 조사되어 진다. K_1 과 K_2 는 이 두 파의 단위 방향 벡터이다. M은 물체상의 임의의 점이고, P는 CCD카메라의 관찰점이다. r_m 은 M에서 P까지의 위치벡터이고, β 는 r_m 과 Z축사이의 각도이다. K_1' 과 K_2' 은 조사빔이 이동된 후의 단위벡터이며, $\Delta\theta$ 는 변화된 후의 두 스펙클 패턴에 대한 조사빔의 각도차이다. 두 조사빔은 같은 광경로를 가지고 조사되며 M을 통하여 P로 들어오게 되는데, 이 때의 두 빔의 위상은

$$\phi_{m1} = \frac{2\pi}{\lambda}(r_m + r_m \cdot K_1)$$

$$\phi_{m2} = \frac{2\pi}{\lambda}(r_m + r_m \cdot K_2) \quad (7)$$

으로 주어진다. 여기에서 r_m 은 r_m 의 스칼라 크기이고, λ 는 사용된 레이저의 파장이다.

간섭 스펙클 패턴의 위상 ψ_m 은

$$\begin{aligned} \psi_m &= \phi_{m1} - \phi_{m2} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1 - K_2) \end{aligned} \quad (8)$$

으로 주어지고, 이동된 후의 간섭 위상은

$$\psi'_m = \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1' - K_2') \quad (9)$$

으로 주어진다. 그리하여 변화된 전과후의 위상차는

$$\begin{aligned} \Delta\psi_m &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (\Delta K_1 - \Delta K_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_m| |\Delta K_1 - \Delta K_2| \cos\beta \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 여기에서,

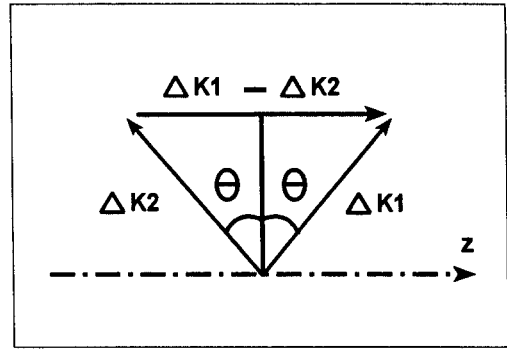


Fig 2. Vector geometry of the contouring

$$\Delta K_1 = K_1' - K_1$$

$$\Delta K_2 = K_2' - K_2$$

$$|\Delta K_1| = |\Delta K_2| = \Delta\theta |K_1| = \Delta\theta |\Delta K_2| = \Delta\theta$$

$$|K_1| = |K_2| = 1$$

그림 2로부터

$$|\Delta K_1 - \Delta K_2| = 2 \sin\theta |\Delta K_1| = 2 \sin\theta \Delta\theta \quad (11)$$

이 되고, 최종적으로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\psi_m = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin\theta) h \Delta\theta \quad (12)$$

$$h = r_m \cos\beta \quad (13)$$

여기에서, ΔK_1 과 ΔK_2 가 축대칭일 때 h 는 Z축을 따라 물체의 높이를 나타낸다. 그리하여 등고선 간격은 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin\theta \Delta\theta} \quad (14)$$

4. 실험 구성 및 방법

그림 3은 실험에 사용되어진 전자 스펙클 간섭계와 화상 획득 및 데이터 처리 시스템의 구성도이다. 파장 532 nm의 CW 500 mW Nd:YAG 레이저가 간섭 광원으로 사용되었고, CCD 카메라는 Interline 방식의 단색 비디오 카메라인 PULNiX TM-7EX 카메라를 사용하였다. 두 물체빔 중 하나에 PZT를 부착하여 일정 크기의 전압을 주어 $\pi/2$ 씩 위상차를 가지도록 PZT driver를 컴퓨터와 연결하여 자동적으로 위상 이동이 실행되도록 시스템을 구성하였다. 획득된 화상은 DT2861 Frame grabber

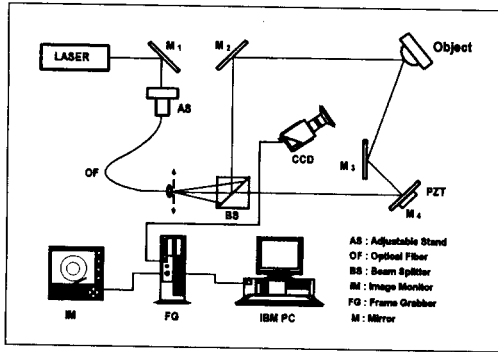


Fig 3. Experimental arrangement for dual-beam-shifted ESPI contouring

board가 부착된 컴퓨터에 의해 처리되었다.

그림 3의 실험 개략도를 보면 레이저 빔은 광섬유를 통하여 전달되고, 광분할기에 의하여 2개의 물체 빔으로 나뉘어 같은 각도로 물체를 조사하게 된다. 물체 조사빔은 마이크로미터 위에 부착된 광섬유에 의하여 축에 수직인 방향으로 이동되었다. 빔의 두 경로중 한 경로에 다르게 설치된 미러 M3는 같은 방향으로 K벡터를 이동하도록 함으로써 정확한 등고평면(Contour plane)을 형성하기 위한 방향 보정자의 역할을 한다. 두 빔의 조사각 θ 는 23.5° 이고 두 빔의 광경로는 $l_1 = l_2 = 141 \text{ cm}$ 이다.

4. 실험 결과

본 실험에서는 기존의 변위 측정 전자 스펙클 간섭계를 변형하여 물체의 형상을 측정하는 법을 연구하였다. 미러 M3를 사용하여 적절한 등고선 간섭무늬와 등고평면의 방향을 보정하였다. 광섬유를 사용하여 물체빔의 전달과 이동을 간편하고 편리하게 하였으며 빔의 이동으로 등고선 간섭무늬를 얻기 위하여 물체를 움직일 필요가 없다. 스펙클 패턴의 상관 간섭을 이용하였을 때의 적정 측정 범위는 밀리미터에서 수센티미터까지이다. 그림 4의 결과는 마이크로미터에 의한 광섬유의 $1050 \mu\text{m}$ 이동에 의해서 변화된 각도 $\Delta\theta$ 가 0.75 mrad 일때로서 등고선 간격 $d = 0.893 \text{ mm}$ 이다. (a)는 0.75 mrad 의 변화에 의해 생긴 등고선 간섭무늬를 보여주고 있으며, (b)는 그림 3의 M4에 부착된 PZT에 의해 정량적 해석

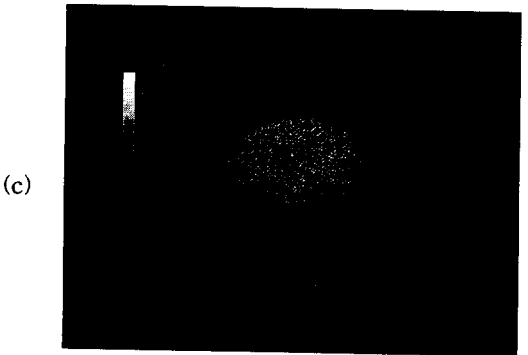
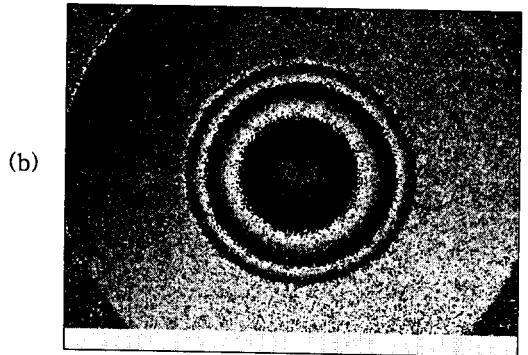
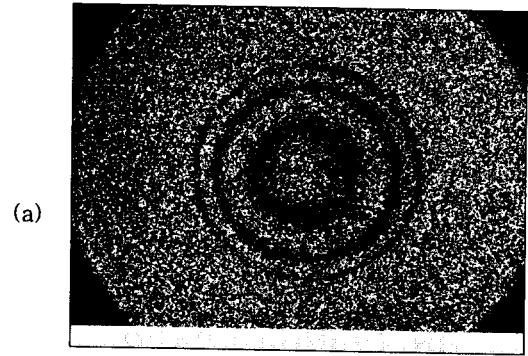


Fig 4. Results obtained when the illumination angle θ is 23.5° and the angle difference $\Delta\theta$ is 0.75 mrad : (a) contour fringes, (b) phase map, (c) three-dimensional plot.

을 위해 $\pi/2$ 씩 위상이동되었던 변형전과 후의 각각 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 조합하여 구한 위상도를 보여주고 있다. (c)는 위상도를 위

상도 펼침작업을 통해 얻은 3차원 형상을 보여준다.

그림 4의 결과들은 벡터와 기하학적 해석을 근거로 하여 얻은 결과들로 정확한 등고평면의 형성을 통하여 물체의 형상에 맞는 등고선 간섭무늬를 얻고, 이를 이용하여 3차원 물체의 형상을 측정할 수 있음을 잘 보여주고 있다. 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 등고선 추출법의 민감도(sensitivity)와 측정 정밀도는 조사각 θ 와 변화되는 각 $\Delta\theta$ 에 의존한다. 그리고 간섭무늬의 질은 두 조사빔의 빔비율 (beam ratio), 스펙클 크기, 비상관 효과 (decorrelation effect), 카메라로 들어오는 이미지의 강도, 그리고 물체와 카메라 사이의 정확한 이미지 형성관계 등에 의해 영향을 받는데, 그 최적 조건은 실험을 통하여 알 수가 있다.

5. 결 론

본 실험은 기존의 면내 변형 측정 간섭계를 약간 변형하여 조사빔의 이동을 통해 물체의 등고선을 추출함으로써 3차원 물체의 형상을 측정할 수 있음을 보였다. 완전한 기하학적 해석을 바탕으로 물체의 형상에 맞는 등고선 간섭무늬를 얻었다. 물체를 변화시키거나 두 파장의 조사빔을 사용하거나 물체빔을 변화시키는 등 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용한 다른 등고선 추출법보다 훨씬 더 쉽게 물체의 등고선 패턴을 얻을 수 있었고, 실제적 응용의 관점에서 볼 때 더 유용한 방법이 될 것으로 생각된다. 마이크로 미터가 부착된 광섬유를 사용하여 등고선 간섭무늬를 얻기 위해 두 조사빔 미러를 연속적으로 움직일 필요가 없었고, 광섬유 자체가 공간 필터의 기능도 할 수 있기 때문에 공간 필터를 사용할 필요가 없었다.

본 연구는 물체에 대한 정확한 형상정보를 바탕으로 물체의 형상학적 특성을 요구하는 로보틱스, CAD/CAM, On-line inspection 등에 그 응용분야를 들 수 있다.

REFERENCE

1. R. Jones and C. Wykes, 1989, " Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed.", Cambridge Univ. Press, PP. 165-196.

2. K. Creath, 1985, "Phase-shifting speckle interferometry.", Appl. Opt., Vol. 24, pp. 3053-3058.
3. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, 1992, "Contouring by modified dual-beam ESPI based on tilting illumination beams.", Optik(Stuttgart), Vol. 90, pp. 61-64.
4. C. Joenathan, B. Pfister, and H. Tiziani, 1990, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual-beam illumination.", Appl. Opt., Vol. 29, pp. 1905-1911.
5. R. Rodriguez-Vera, D. Kerr, and F. Mendoza-Santoyo, 1992, "Electronic speckle contouring.", Opt. Soc. Am., Vol. 9, pp. 2000-2008.
6. B. D. Bergquist and P. Montgomery, 1985, "Contouring by electronic speckle pattern interferometry.", Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Vol. 599, pp. 185-195.
7. X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou, and H. Tiziani, 1992, "Geometry for contouring by electronic speckle pattern interferometry based on shifting illumination beams.", Appl. Opt., Vol. 31, pp. 6616-6621.