

ESP I 에서의 이상적인 위상도 추출과 필터링 방법

유원재(전북대학교 대학원), 이주성(삼성 탈레스(주)),
강영준, 채희창 (전북대학교 기계공학부

Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry

Won Jae Ryu (Mech. Eng. Chnobuk. Univ.), Ju Sung Lee(Samsung Tales co.) ,
Young June Kang, Hee Chang Chae (Mech. Eng. Chonbuk. Univ.)

ABSTRACT

Deformation phase can be obtained by using Least-Square Fitting. In extraction of phase values, Least-Square Fitting is superior to usual method like as 2, 3, 4-Bucket Algorithm. That can extract almost noise-free phase and retain 2π discontinuities. But more fringe in phase map, 2π discontinuities is destroyed when that is filtered and reconstruction of deformation is not reliable. So, we adapted Least-Square Fitting using an isotropic window in dense fringe. Using Sine/Cosine filter give us perfect 2π discontinuities information. We showed the process and result of extraction of phase map and filtering in this paper.

Key Words : ESPI(전자 스페클 패턴 간섭법), Phase Shifting Method(위상이동법),
Least Square Fitting(최소자승법), Sine/Cosine Filter

1. 서론

1970년대에 ESPI⁽¹⁾가 처음 소개된 이후로, 비접촉이며 넓은 영역에 대해 실시간으로 nm단위의 정밀도를 가지고 측정할 수 있는 장점 때문에 ESPI는 광계측의 여러 분야에 널리 활용되고 있으며 현재는 펄스 기술을 이용하여 진동의 측정과 순간 이동의 계측에도 응용되고 있다. 계측의 기본이 되는 위상정보의 획득은 주로 수 개의 프레임을 사용하는 위상 이동방법⁽²⁾이 이용되고 있고 이들은 \arctan 함수를 이용해 위상을 얻으므로 modulo 2π 불연속성을 지니게 된다. 따라서 전체적인 위상분포를 얻기 위해선 이러한 2π 불연속성을 제거하는 연속화 과정을 거쳐야 한다⁽³⁾. 그러나 ESPI는 빛의 간섭을 이용하므로 스페클 특성상 많은 노이즈를 포함하게 되며 이들 노이즈는 2π 불연속성과 함께 위상맵 내에서 높은 공간 주파수의 성격을 띠므로 간단한 필터링등의 과정으로는 연속화에 필요한 위상맵을 얻을 수가 없다. 특히, 위상맵에서 프린지의 수가 적을 때는 보통

의 위상이동 방법으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으나 프린지의 수가 많아지면 2π 불연속성의 위치가 모호해지며 연속화 이전에 필터링 과정에서 많은 정보 손실을 감수해야 하므로 예리를 많이 포함하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 두가지 방법을 제시한다.

첫째, 최소자승법(Least-Square Fitting)을 이용하여 위상 추출에 필요한 프레임수를 줄여 PZT의 위상 이동 오차에 따른 예리를 줄이며 인접 위상의 분포로부터 최적화된 위상을 계산하며 프린지가 밀집된 지역에서도 프린지 형태에 따라 비등방향을 사용하여 프린지가 많은 위상맵의 연속화를 가능하게 한다.

둘째, 위상맵의 필터링 과정에서 2π 불연속성을 가진 \arctan 의 위상을 직접 필터링하지 않고 Sine위상과 Cosine위상으로 분리해 연속적인 위상으로 만든 다음 필터링을 실시하여 2π 불연속 정보를 최대한 보존하도록 한다.

2. Principle

측정하고자 하는 표면의 거칠기 정도, 즉 표면의 높이분포함수 $h(x, y)$ 와 위상과의 관계는 식(1)과 같다.

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (1)$$

물체의 변형으로 인하여 생기는 높이변화는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta h(x, y) &= h'(x, y) - h(x, y) \\ &= \frac{\lambda}{4\pi} (\phi'(x, y) - \phi(x, y)) \quad (2) \end{aligned}$$

따라서 변형전과 변형후의 위상을 비교함으로써 변형을 알수가 있다.

간섭무늬 상의 강도분포는

$$I(x, y) = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi(x, y)) \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며 위 식에서 미지수가 3개이므로 직접적으로 $\phi(x, y)$ 를 계산할 수는 없다. 따라서 간섭무늬를 형성하는 두 간섭광 사이에 위상변화를 주어 변화된 간섭무늬를 원래의 간섭무늬와 비교하여 위상차를 구할수 있는 Phase Shifting 방법을 사용한다.

이러한 방법은 얻는 영상의 수에 따라 3, 4, 5-Bucket Algorithm^(4,5,6)과 그리고 변형전과 변형후의 영상을 한번에 계산해서 변형위상만을 추출하는 2-Bucket Algorithm⁽⁷⁾이 있다.

그러나 ESPI는 외부환경에 민감해서 노이즈를 많이 가지고 있기 때문에 영상의 획득과정 중에 그러한 노이즈로 인한 계산에러를 줄일 수 있는 2-Bucket 알고리즘과 Least Square Fit을 조합한 방법을 구원하였다^(8,9).

2.1 Least-Square Fitting

2-Bucket 알고리즘은 다른 방법과는 달리 변형전과 후의 영상을 모두 이용해서 계산하는 방식이다. 이 알고리즘은 PZT를 사용하여 얻는 영상이 적기 때문에 영상을 얻을 때 PZT의 비선형 에러, 공기와의류, 시간이 지남에 따라 decorrelation으로부터 발생하는 에러를 줄일 수 있고 보다 빠른 계산을 가능하게 한다. 위상 이동량은 $\frac{\pi}{2}$ 를 가지며 그 때의 간섭무늬 분포는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_b + I_m \cos \phi \\ I_2(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\ I_3(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \phi + \frac{\pi}{2}) \\ I_4(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \phi + \pi) \end{aligned} \quad (4)$$

이 때의 변형 위상은 식(5)과 같이 구할 수 있다.

$$\Psi(x, y) = 2 \tan^{-1} \left[\frac{I_2 - I_3}{I_1 - I_4} \right] \quad (5)$$

그러나 식(5)을 이용해서 얻은 변형 위상에도 노이즈가 포함되어 있다. 위상 이동수를 줄여 PZT의 비선형 에러와 공기 유동에 의한 에러를 줄였다고는 하나 완전히 제거 할 수는 없기 때문이다. 즉 위의 에러요인 외에도 ESPI의 스펙클 특성에 기인하는 스펙클 노이즈와 양자화 노이즈, 전기적 노이즈등도 위상값의 에러에 포함되기 때문이다. 따라서 여기에 Least-Square Fit을 이용해서 강도차들의 분포를 통해 각각의 위상값을 계산하면 계산중에 노이즈 요소를 고려해 최적의 위상값을 계산하므로 노이즈를 줄일 수 있다.

간섭무늬 상에서 노이즈의 분포는 Fig. 1과 같이 임의 픽셀에 대응되는 강도 분포의 2차원 도식을 통해 알 수 있는데 그 때의 x, y 좌표는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} x &= I_1 - I_4 = 2I_m \cos(\phi + \frac{\Psi}{2}) \cos(\frac{\Psi}{2}) \\ y &= I_2 - I_3 = 2I_m \cos(\phi + \frac{\Psi}{2}) \sin(\frac{\Psi}{2}) \quad (6) \end{aligned}$$

만약 I_3 과 I_4 에서 변형위상 Ψ 가 zero라면 점의 위치는 원점이 되어야 한다. 그러나 변형과 다른 노이즈의 요소로 인해 원점으로부터 멀어지게 되는데 이때의 원의 반경은 변형과 노이즈에 비례한다.

Fig. 1은 $m \times m$ window의 픽셀들에 대해 강도차의 분포를 2차원으로 보여주고 있고 그 점들은 일정 분포를 가지게 되며 그것을 가로지르는 최적선(best-fit line)을 긋는다면 그때의 각 ϕ 은 window의 평균위상과 비례한다. ($2\phi = \Psi$)

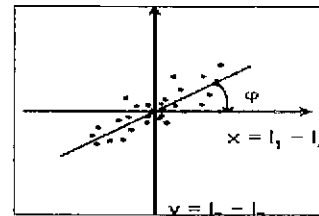


Fig. 1 Phase Distribution

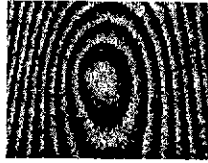
그 최적선의 기준은 원점으로부터 점들까지의 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 것으로

$$\sum (x_k^2 \sin^2 \phi \cos \phi + y_k^2 \cos^2 \phi) \quad (7)$$

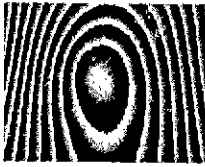
와 같이 같고, 식(7)에서 \sum 의 미분이 zero가 되어야 한다. 그 각 $2\phi_{\min}$ 을 창의 중심 픽셀에 넣는다. 그러면 그 변형 위상은 식(8)으로 얻을 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{2 \sum_{k,l} (x_{k,l} y_{k,l})}{\sum_{k,l} (x_{k,l}^2 - y_{k,l}^2)} \right] \quad (8)$$

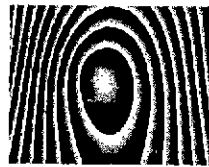
Fig. 2(a)처럼 PZT의 2차 에러가 없어진 2-Bucket에서의 결과엔 많은 에러가 포함되어 있으며 여기에 최소자승법을 도입한 Fig. 2(b)에는 거의 노이즈가 없는 깨끗한 위상을 얻을 수 있다. 또한 Fig. 2(c)처럼 윈도우의 크기가 커질수록 위상맵의 필터링 효과가 커짐을 알 수 있다.



(a) 2-Bucket



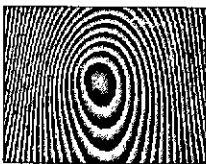
(b) 5x5 Least-Square Fit



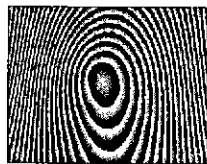
(c) 9x9 Least-Square Fit

Fig. 2 Phase Map Example (I)

하지만 프린지가 Fig. 3(a)처럼 많아지면 최소자승법으로도 정확한 위상의 계산이 어렵게 된다. 이러한 위상맵은 연속화시에 부정확한 2π 불연속 정보로 인하여 많은 에러를 포함하게 된다. 하지만 여기에 정방향의 윈도우가 아닌 비등방의 창을 사용함으로써 Fig. 3(b)처럼 해결할 수 있다. 이러한 비등방 창의 형태는 프린지의 형태에 따라 결정되어야 한다.



(a) 5x5 Isotropic Window

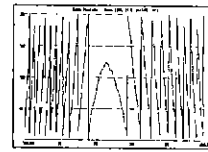


(b) 3x11 Anisotropic Window

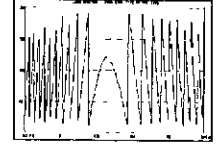
Fig. 3 Phase Map Example (II)

2.2 Sine/Cosine Filter

위상맵에서 노이즈와 2π 불연속 정보는 일반적으로 높은 공간주파수 특성을 갖는다. 따라서 평균이나 메디안 필터를 사용하는 것은 노이즈를 줄일 뿐만 아니라 2π 불연속 정보도 함께 잃게 하는 효과를 지닌다. π -Shifting 필터 또한 내부적으로 메디안 필터를 사용하므로 약간의 정보를 소실한다. Fig. 4는 5x5크기의 윈도우를 사용하여 얻은 위상맵과 필터링된 위상맵의 라인 프로파일을 보여주고 있으며 원래의 위상맵과는 달리 필터링이 되면 그 정보가 많이 소실됨을 볼 수 있으며 프린지가 많아질수록 그 현상이 두드러진다.



(a) Raw Phase Map



(b) Filtered Phase Map

Fig. 4 Line Profile

따라서 틱니파의 모양을 같은 위상맵을 필터링하지 않고 위상맵을 Sine과 Cosine의 위상으로 분리하면 연속적인 위상이 되는데 그 각각의 위상을 필터링하면 2π 불연속정보의 소실이 훨씬 줄어들게 된다. 그러한 과정을 Fig. 5에 나타내었고 Fig. 6에 원래의 위상과 Arctan의 위상을 분리한 Sine과 Cosine의 위상을 보여주고 있다.

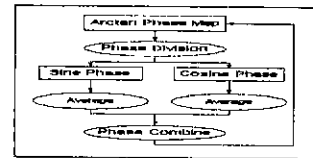
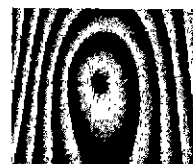
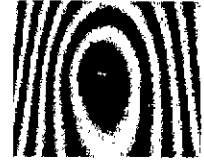


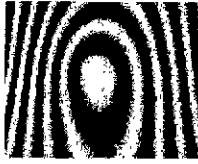
Fig. 5 Sine/Cosine Filtering Diagram



(a) Raw Phase Map



(b) Sine Phase Map



(c) Cosine Phase

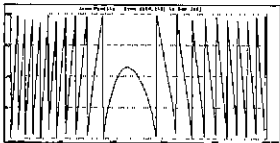
Fig. 6 Raw and Sine/Cosine Phase

Sine과 Cosine의 위상을 필터링할 때는 평균필터나 메디안 필터를 사용하였는데 실험 결과 평균 필터가 더 양호한 결과를 보여 주었으며 프린지 간격이 좁을수록 필터 커널이 작은 것을 사용해야 한다. 필터링된 Sine과 Cosine의 위상을 이용해 Arctan의 위상으로 바꾸면 필터링된 위상맵을 얻을 수 있으며 이러한 과정을 여러번 반복하면 거의 노이즈가 완전하게 제거 될 뿐 아니라 2π 불연속정보를 거의 이상적인 형태로 지나는 위상맵을 얻을 수 있다⁽¹⁰⁾.

Fig. 7는 3×11 의 비등방 창을 사용하여 얻은 위상맵에 Sine/Cosine 필터를 적용한 위상맵과 그의 라인 프로파일인 Fig. 7에 나타나 있으며 그림처럼 2π 불연속 정보가 거의 이상적인 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Filtered Phase Map : 20회



(b) Line Profile

Fig. 7 Filtered Phase Map using Sin/Cos Filter And Line Profile

3. 결과

본 연구에서 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수가 있다.

위상이동애러, 공기와의류, 진동, 비정적 레이저 출

력등의 원천적인 애러요소를 같은 ESPI에서 프레임 수를 줄이고 최소자승법을 적용하여 거의 노이즈가 없는 위상맵을 얻을 수 있으며 프린지가 밀집한 지역에서 프린지 형태에 따라 비등방 창을 사용함으로써 측정의 폭을 넓혔으며 Sine/Cosine 필터를 같이 사용함으로써 원래의 2π 불연속 정보를 소실시키지 않아 연속화시에 발생할 수 있는 애러를 줄였다. 이러한 방법들은 변위 구배가 0인 프린지가 밀집되어 나타내는 Shearography와 진동 진폭의 추출등에 사용하면 더욱 더 훌륭한 효과를 낼 수 있을 것이며 다른 많은 광계측 방법에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. A.E. Ennos, "Speckle Interferometry". in : J.C.Dainy(Ed), Laser Speckle and Related Phenomena , Springer, Berlin, 1984, pp.203-253
2. K. Creath, "Phase Shifting Speckle Interferometry", Appl. Opt. Vol.24. pp3053-3058, 1985
3. E.Vikhagen, "Non Destructive Testing by use TV-Holography and deformation phase gradient calculation", Appl. Opt. 29, 137, 1990
4. D.W. Robinson and D.C. Williams "Digital Phase Stepping Speckle Interferometry", Opt.Comm 57, 26, 1986
5. Katherine Creath, "Phase-Shifting Speckle Interferometry", Appl. Opt. 24(18), 3053, 1985
6. P. Hariharan , "Digital Phase-Stepping Interferometry : A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm", Appl. Opt. 22, 2054, 1987a
7. Meinhard Sesselmann et al, "Single phase-step algorithm for phase difference measurement using ESPI", SPIE Vol.3478, pp.153-159, 1998
8. Meinhard Sesselmann et al, "Single phase-step algorithm for phase difference measurement using ESPI", SPIE Vol.3478, pp.153-159, 1998
9. Chung K.H et al, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase shifting electronic speckle pattern interferometry", Opt. Soc. Am 931, 1994
10. Hubert A. Aebischer et al, "A simple and effective method for filtering speckle interferometric phase fringe patterns", Opt.Comm 162, pp.205-210