韓國精密工學會 2002年度 春季學術大會論文集 pp.330~333 KSPE 02S120

Phase Map Unwrapping 향상에 관한 연구

조영학*(조선대 대학원), 김경석(조선대 기계공학부), 장호섭(조선대 대학원),
정승택(조선대 대학원)

A Study on the Improvement of Phase Unwrapping in Discontinuous Fringe Pattern

Y. H. Cho (Graduate School, Chosun Univ.), K. S. Kim (Mechanical. Eng. Dept. Chosun Univ.),
H. S. Jang (Graduate School, Chosun Univ.), S. T. Jung (Graduate School, Chosun Univ.)

ABSTRACT

This study presents improvement of precision in the non-contacted laser application measuring techniques. The phase map of deformation obtained by phase shifting method in Electronic Speckle Pattern Interferometry displays the wrapped image by the arctangent function, which is a characteristic of 4-step phase shifting method. To obtain deformation distribution from the results, the wrapped phase map is processed by an unwrapping method. But a previous method cannot apply discontinuous object as like plate with a circular hole to obtain precious deformation distribution To solve this problem, new algorithm is developed and the result is compared with previous method.

Key Words : ESPI, Phase Shifting Method, Unwrapping,

1. 서론

기계부품 및 구조물의 정밀계측은 성능 및 안전에 직결되므로 여러 가지 방법으로 안정성을 위한 정밀계측 방법이 제안되고 있다. 이러한 정밀 계측을 통한 안정성 평가 방법의 하나로 자연적 혹은 인위적인 충격, 하중 등의 외력이 발생하였을 때 생성되는 변위 정보를 레이저를 이용하여 측정하고, 영상처리를 통해 변위 정보의 신뢰성을 높이는 전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI) 기술이 있다. 이 방법은 가간섭성이 좋은 두 개의 광원이 광학적으로 거친 면에 반사되어 위상관계 혹은 광경로차에 따라 보강과 소멸간섭을 일으켜 스페클을 형성한다. 이러한 스페클은 측정 대상 체에 변화가 생기면 그에 따라 광 경로가 변경되어 각 상태에 따라 스페클 무늬(Fringe pattern)가 형성되며, 이 무늬는 물체표면의 거칠기, 변형 등의 정보를 가지게 된다. 일반적으로 ESPI 에서는 정량해석을 위해 위상이동 기법을 많이 사용하고 있으며, 획득된 위상정보는 광 경로변화에 대하여 위상변화가 톱니파 형태의 2π 단위의 연속적인 등고선 형태의 위상지도를 형성하여, 물체의 변형정보를 겹쳐진 형태(wrapped)로 나타낸다. 이를 정량화 하기 위하여 결펼침(unwrapping) 방법이 사용되고 있다. 결펼침은 위상이동으로 얻어진 페이지 맵을 한 라인씩 줄무늬의 차수를 세어 연속위상을 만들어 주어 변형정보를 정량화하는 것이다. 그러나, 기존 개발된 알고리즘은 크랙 이나 원공처럼 대상물체가 불연속점을 갖을 때, 불연속점에서 차수를 정확히 셀 수 없어 결펼침이 정확히 이루어지지 않는다. 본 논문에서는 이러한 불연속점을 갖는 물체의 결펼침 방법을 연구하여 변형 정보의 정밀도가 향상된 데이터를 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

2. 이론

2.1 Fringe Pattern 형성

ESPI 시스템은 변형 정보를 CCD 카메라를 통해서 받아 들여 실시간 처리 하는 시스템이다. CCD 카메라는 수광소자에 밝기 분포를 받아 들여 데이터 값을 저장 처리 하는 것이다. 물체광과 참조광의 간섭을 빛의 밝기 분포로 받아 들여 계산하면 다음 식 (1)과 같다.

$$I = (U_R \cos\phi_R + U_O \cos\phi_O)^2 + (U_R \sin\phi_R + U_O \sin\phi_O)^2$$
$$= U_R^2 + U_O^2 + 2U_R U_O \cos(\phi_R - \phi_O) \quad (1)$$

괄호 안의 $\phi_R - \phi_O$ 의 위상 차를 ψ 로 나타내고, $U_R^2 + U_O^2$ 를 α 라하고 $2U_R U_O$ 를 β 라한다면 (x,y) 좌표에 대한 최종적인 광의 세기 $I(x,y)$ 는 식(2)와 같이 정리 할 수 있다.

$$I(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos\psi(x,y) \quad \text{-------- (2)}$$

물체의 변형은 물체광에 대한 위상을 변화 시키며, 이러한 위상의 변화는 스페클 패턴에 반영되고, 위상이 바뀐 물체광과 참조광에 의한 간섭 결과로 기록되는 $I'(x,y)$ 는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I'(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos(\psi(x,y) + \Delta\phi_s(x,y)) \quad (3)$$

여기서, $\Delta\phi_s(x,y)$ 는 물체의 변형된 위상을 나타낸다. 이러한 위상 변형후의 밝기분포 $I'(x,y)$ 와 $I(x,y)$ 의 차를 구함으로서 관찰대상의 변화된 정도가 가시화 된다.

2.2 Phase Shifting Method

변형 정보를 추출하기 위하여 변형전과 변형후의 감산 처리로 얻어진 밝기 분포는 sine 함수에 비례하는 결과를 주지만 스페클 노이즈가 많고, 정확한 위상값을 주지 않는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 변형전과 변형후에 각각 위상이동을 시켜 위상값을 계산하여 정량적인 정보를 계산 할 수 있다. 위상 이동 방법에는 참조광의 위상을 $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ 씩 이동하는 3 단계 방법과 0, $\pi/2$, π, $3\pi/2$ 로 위상을 변화시키는 4 단계 방법, 분자와 분모가 0 이 되지 않도록 하기 위해 고안된 5 단계 방법이 있으며, 위상 이동값이 독립적인 Carre 방법 등이 있다. 본 논문에서는 위상을 계산하는데 가장 일반적으로 이용되고 있는 4 단계 방법을 이용하여 위상 이동을 시켰으며, 각각의 위상은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos\psi(x,y)$$

$$I_2(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos\left(\psi(x,y) + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_3(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos(\psi(x,y) + \pi)$$

$$I_4(x,y) = \alpha(x,y) + \beta(x,y)\cos\left(\psi(x,y) + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (4)$$

위상차에 따른 위상 $\psi(x,y)$ 를 구하기 위해 동일한 위상을 갖는 스페클 패턴들에 대해 각각 감산처리하여 계산하면 4 장의 스페클 패턴에 대한 위상 $\psi(x,y)$ 를 구할 수 있다.

$$\psi(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_3(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_2(x,y)}\right) \quad \text{---------- (5)}$$

위와 같이 얻어진 위상을 변형전과 변형후의 위상을 감산처리하면 변형만에 의한 위상 정보를 얻을 수 있다.

2.3 Unwrapping Method

결펼침(Unwrapping)의 기본적인 이론은 Wrapped phase 에서 불연속위상 $\psi = 2n\pi$ 를 연속위상으로 바꾸어 주는 것이다. 위상이동으로부터 구해진 위상은 Arctangent($\tan^{-1}$) 함수로 얻어진 값이기 때문에 0 에서 2π 사이의 값만 가지게 된다. 이 값들은 톱니 모양을 나타내고 매번 $\psi = 2n\pi$ 가 변화는 동안 불연속위상이 되고 이것을 그림으로 도식화 하면 아래 Fig. 1 과 같다. 불연속위상 값을 연속화 해주기 위해서는 불연속 차수를 구해야 한다. 위상 지도의 시작점에서의 차수를 N 으로 설정하고, 열방향으로 먼저 차수를 계산 후, 행 방향으로 스캔하여 이미지 전체 픽셀에 대한 차수를 구한다. 이렇게 구해진 차수를 각 위상에 대해 정규화하여 위상을 연결할 수 있다. 그 과정을 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다.

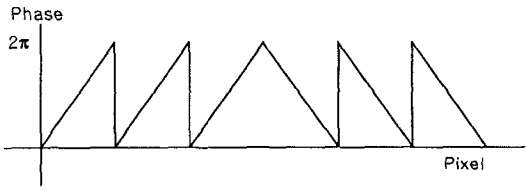

Fig. 1 Wrapped Phase

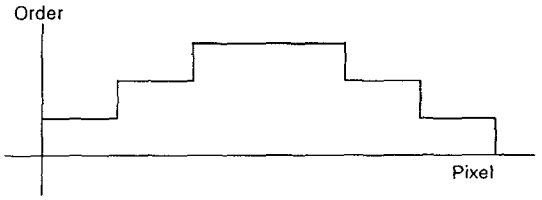

Fig. 2 Calculation of Fringe order

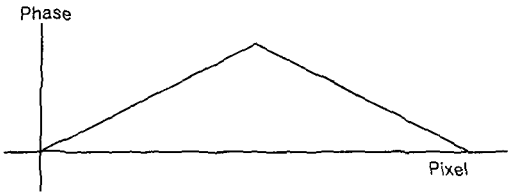

Fig. 3 Unwrapped phase distribution

3. 개발 알고리즘 적용

3.1 연속 위상맵에서 Unwrapping

알고리즘의 신뢰성을 확인하기 위하여 먼저 결함이 없는 평판을 뒤쪽에서 하중을 부가하고, 면외변위를 측정할 수 있도록 간섭계를 구성하고 위상이동 기법을 적용하여 Fig. 4 와 같이 위상맵(Phase map)을 획득하였다. 획득한 위상맵에서 결펼침 시작점을 이미지의 앞쪽에서 시작하여 차수를 계산한 언래핑한 결과가 Fig. 5 와 같다.

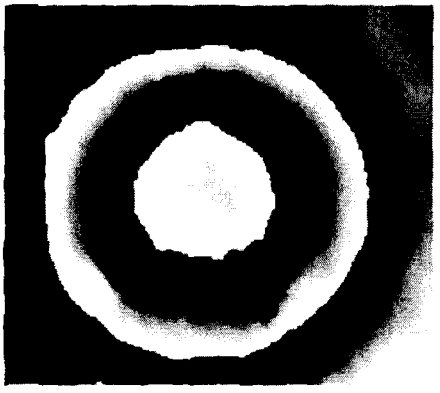

Fig. 4 Wrapped phase map of continuous phase

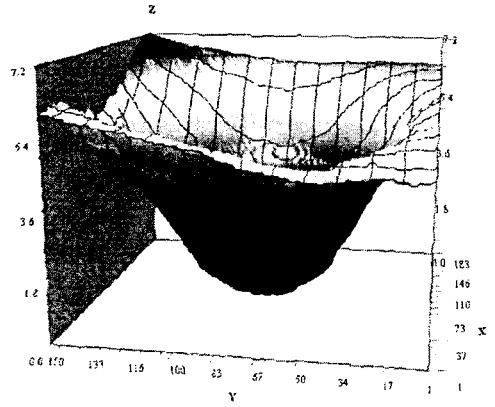

Fig. 5 Deformation distribution

3.2 불연속 위상맵에서 Unwrapping

불연속성이 있는 크랙이 있는 평판을 고정하여 인장력을 가하고 위상맵을 얻어 개발 알고리즘을 적용하여 변형을 정향화하였다. Fig. 6 은 면내변위 측정 간섭계를 구성하여 획득한 위상맵이다. 이를 해석하기 위해여 먼저 기존의 결펼침 알고리즘을 적용하여 결과를 얻고, 개발 알고리즘을 적용하여 그 결과를 비교하였다. 기존 알고리즘의 적용 결과에서는 Fig. 7 과 같이 크랙을 지나는 부분에서는 좌우의 언래핑 결과가 일치 하지 않는다. 이는 크랙 부분에서 차수를 정확히 세지 못하기 때문이며, 이 문제는 변형 정량해석에 심각한 영향을 주게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 위상맵의 여러 점에서 결펼침을 수행하고 이 값들을 서로 보정하고 치환함으로서 불연속점에서도 정확한 변형정보를 얻을 수 있도록 하였다. 개발알고리즘의 순서도를 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 6 Discontinuous phase map

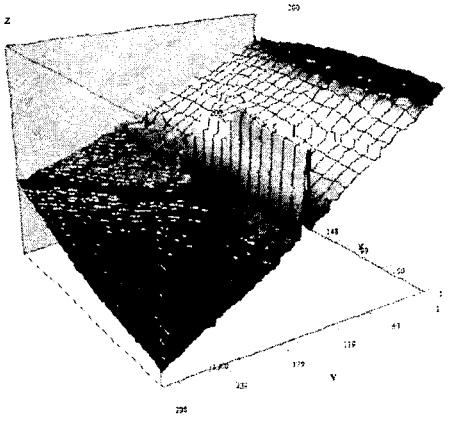

Fig. 7 Deformation distributions by previous algorithm

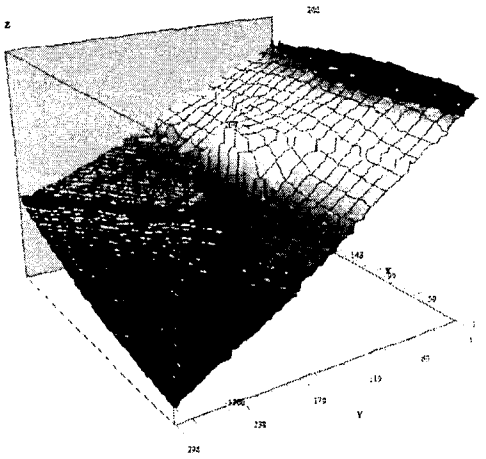

Fig . 8 Deformation distributions by developed algorithm

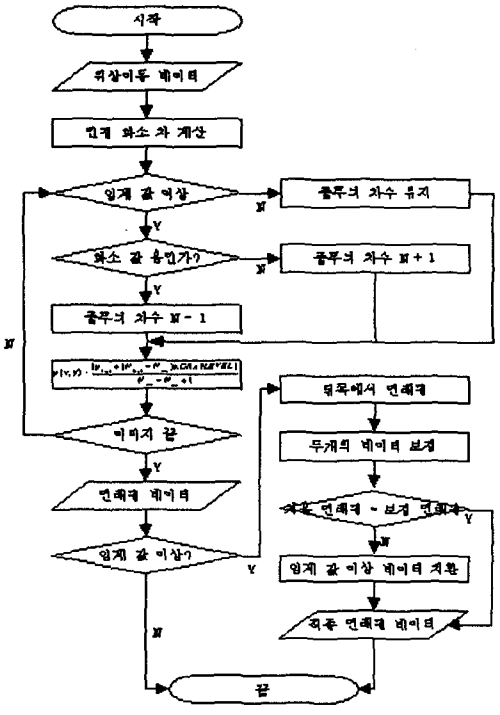

Fig. 9 Flowchart of developed algorithm

4. 결론

대상체에 불연속점이 있는 경우 Unwrapping 을 하면 불연속점과 불연속점을 지나는 곳에서는 위상값이 정확하지 않고, 불연속점 터 손실이 있었으나 본 논문의 방법으로는 불연속점에서의 데이터 손실은 줄일 수 있어, 변형량을 정량화 하는데 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 과학기술부•한국과학재단지정 지역협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2001 년도 연구비 지원에 의해 연구되었음

참고문헌

1. Xinjun Xie, Michalel J. Lalor, David R. Burton & Michael M. Shaw , "Phase-unwrapping Algorithm in the Presence of Discontinuities Using a System with Crossed Grating", Optics and Lasers in Engineering Vol. 29, pp. 49-59, 1998
2. Boxiong Wang, Yuquing Shi, T. Pfeifer, H. Mischo, "Phase unwrapping by blocks"Measurement, Vol. 25, pp. 285-190, 1999
3. Pierre Soille, "Morphological phase unwrapping", Optics and lasers in Engineering, Vol. 32, pp. 339-352, 2000
4. 이주성, 강영준, 백성훈, 박승규, "ESPI 를 이용한 변형 검출 및 측정 프로그램 개발", 비파괴학회 춘계 논문집, pp. 287-295, 2000
5. Sebastiano Stramaglia, Alberto Refice, Luciano Guerriero, "Statistical mechanics approach to the phase unwrapping problem", Physica A Vol. 276, pp. 521-534, 2000