

레이저응용계측에 의한 변위 정량화에 대한 연구

김경석(조선대학교 기계공학부), 홍진후(조선대학교 화학교분자공학부),
강기수(조선대학교 기계공학부 대학원), 최지은*(조선대학교 기계공학부 대학원)

A Study on the Determination of Displacement by Applied Laser Measurement

K. S. Kim(Mechanical. Eng. Dept., Chosun. Univ), J. H. Hong(Chemical. Eng. Dept., Chosun. Univ),
K. S. Kang(Mechanical. Eng. Dept., Chosun. Univ), J. E. Choi*(Mechanical. Eng. Dept., Chosun. Univ)

ABSTRACT

This study discusses a non-contact optical technique, phase shifting electronic speckle pattern interferometry, that is well suited for a deformation measurement. However, the phase shifting method has difficulties for determining a deformation quantitatively because of the characteristics of arctan function. In order to solve this problem, phase unwrapping methods has been studied during the last few years.

In this study, using phase unwrapping based on line by line scanning phase shifted fringe patterns are studied to determine a deformation quantitatively. Also, least square fitting method is applied to reduce noise and improve image resolution.

Key Words : Applied Laser Measurement(레이저응용계측) Phase Shifting Method (위상이동법), Unwrapping(결렬침).

1. 서론

레이저 응용계측은 레이저를 이용하여 측정 대상체 전체를 동시에 측정할 수 있으며 빛의 파장영역만큼의 나노단위 정밀도로 고 분해능을 가지며 대상체의 표면 상태에 대한 처리도 필요하지 않는다는 장점으로 물체의 진동이나 변형 상태에 관한 정보를 간편하고도 빠르게 얻을 수 있게 하는 광학적 측정 방법이다. 본 논문에서는 레이저 응용기법중의 하나인 ESPI 기법을 적용하여 얻은 줄무늬 패턴을 해석하여 변위 정량화를 하였다.

레이저 빛과 같은 가간섭성이 좋은 두 개의 광원이 거친면에서 반사되면 위상관계 혹은 광경로차에 따라 보강과 소멸간섭을 일으켜 스페클이 형성되는데 외부로부터 변형이 가해지면 이러한 스페클은 변형 정보를 가지고 있으므로 각 상태에 따른 스페클을 비교함으로써 변형을 검출할 수가 있다. 즉 측정 대상체에 변화가 생기고 그에 따라 광 경로에 변화가 생기므로써 각 상태에 따른 스페클이 달라지게 되므로 각 상태를 비교함으로써 변형을 검출할 수가

있는 것이다.

하지만 이렇게 영상을 기록하고 처리하는 기술적인 문제에서 물체의 불규칙한 빛의 세기와 위상의 큰 요동으로 인한 노이즈가 매우 심하여 측정의 정밀도 및 선명도에서 큰 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 간섭계에 참조광의 경로를 빛의 한 파장영역 내에서 미세하게 변형시켜 선명도와 정밀도를 크게 향상시킬 수 있는 위상이동법을 이용할 수 있다. 그러나 이러한 위상이동단계에서 얻어지는 위상정보는 광 경로변화(변형)에 의하여 위상변화가 사인파 형태로 반복하여 Saw-tooth 라 불리는 $2\pi n$ 단위의 등고선형태의 위상지도를 형성하게되므로 최종적인 변형을 얻기 위해서는 물체 변위 방향에 따라 $2\pi n$ 위상분포를 측정 영역전체로의 변형으로 이어주는 결렬침(Unwrapping) 기법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 지금까지 연구되어왔던 줄무늬 패턴에서 노이즈 제거와 함께 정확한 위상을 얻기 위한 위상이동방법의 알고리즘에 대해 연구하였으며 전체적인 변위의 정량화를 위하여 사인파형

대로 반복되어지는 Saw-tooth 라 불리는 $2n\pi$ 단위의 등고선형태의 위상지도에 결렬침(Unwrapping)의 알고리즘을 적용하여 변위의 정량화를 하였다.

2. 이론

2.1 Fringe 형성원리

스펙클 간섭 계에 있어서 화상은 CCD 카메라에 의해 검출된다. 두 장의 스펙클 패턴 $I_{before(x, y)}$ 와 $I_{after(x, y)}$ 는 수광된 빛의 분포를 나타내며 이들의 차를 구함으로써 관찰대상의 변화된 정도가 가시화 된다 즉 동일한 스펙클 패턴을 유지한 화상은 0의 값과 값을 갖게되며, 반면 변화된 영역은 θ 이 아닌 값을 갖게된다 만일 CCD 카메라의 수광소자에 입력되는 신호인 $V_{before(x, y)}$ 와 $V_{after(x, y)}$ 가 이미지의 세기에 비례한다면 감산된 신호는 다음과 같다⁽¹⁾

$$V_S(x, y) = I_1(x, y) - I_2(x, y) \\ = 2\beta(x, y) \sin \frac{\Delta\phi_S(x, y)}{2} \sin \left(\psi(x, y) + \frac{\Delta\phi_S(x, y)}{2} \right) \quad (1)$$

이 값을 모니터 상에 출력하면 물체의 변형된 정도를 관측할 수 있는데 모니터 상에서 음의 출력신호는 검은색으로 출력되기 때문에 신호의 손실을 피하기 위해 모니터로 출력하기 전에 절대값을 취해 V_S 값을 정류시킨다 따라서 모니터 한 점에서의 밝기 B는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_{(i, j)} = |V_S(x, y)| \\ = K \left| \beta(x, y) \sin \frac{\Delta\phi_S(x, y)}{2} \sin \left(\psi(x, y) + \frac{\Delta\phi_S(x, y)}{2} \right) \right| \quad (2)$$

여기서 (i, j) 는 CCD pixel array의 위치를 나타내는 Index를 나타내며, K 는 모니터 상수를 나타낸다. 결국 측정되어지는 줄무늬는 사인함수의 특성을 따르고 있음을 알 수 있다.

2.2. Phase stepping 원리

간섭무늬의 분석을 쉽고도 정밀하게 해주는 방법인 위상 이동 법은 한 장의 간섭무늬만을 이용하는 것이 아니라 간섭을 일으키는 빛 들 사이의 위상을 변화시켜가면서 여러 장의 간섭무늬를 얻고 이들을 이용하여 정량적인 정보를 계산하는 방법이다.

본 연구에서는 물체의 변형전후의 위상을 각각 $\pi/2$ 만큼 이동시켜 나타나는 변형정보를 4단계 위상 이동방법으로써 계산하였다. 변형 전의 위상변화에 대한 강의 세기를 $I_{1(i, j)}$, $I_{2(i, j)}$ 라하고 변형후의 위

상변화에 대한 강의 세기를 $I_{3(i, j)}$, $I_{4(i, j)}$ 라 하여 다음과 같이 변위에 대한 위상을 나타낼 수 있다.

$$\psi_{i, j} = 2 \tan^{-1} \frac{I_{2(i, j)} - I_{3(i, j)}}{I_{1(i, j)} - I_{4(i, j)}} \quad (3)$$

이렇게 얻어진 최종적인 변위 위상은 픽셀상의 물체에 대한 세기와 위상의 큰 요동으로 인해 매우 노이즈가 심하므로 노이즈를 감소시키기 위한 방안이 함께 다루어져야했다 이를 위해 한 화소부근에 있는 화소들의 밝기로부터 잡음이 제거된 위상 정보를 바로 계산하는 최소자승 위상 추정 방법을 이용하였다 이는 추정원도우 내의 픽셀들의 모든 변위 위상들은 일정하다고 가정하여 데이터 분포로부터 한 라인을 추정하고 그 라인과 데이터들의 거리의 제곱의 합을 최소화하므로 추정된 라인의 기울기 각의 두 배가 추정원도우의 중심픽셀의 변위 위상으로 지정될 수 있다 따라서 윗 식을 다음과 같이 바꿀 수가 있다

$$\psi_{LS} = \tan^{-1} \frac{2 \sum_{i, j} (X_{i, j} - Y_{i, j})}{\sum_{i, j} (X_{i, j}^2 - Y_{i, j}^2)} \quad (4)$$

$$X_{i, j} : I_{1(i, j)} - I_{4(i, j)}, \quad Y_{i, j} : I_{2(i, j)} - I_{3(i, j)}$$

여기서 추정 값을 얻기 위해 행해지는 단순조각은 추정 원도우의 크기와 관계가 있다 각각의 이미지의 면에서 주변 픽셀들과의 상호 밀접한 관계를 가지고 일의의 좌표에 대응하는 픽셀의 값을 최소자승 위상추정법에 의해 새로운 위상 도를 얻을 수 있다

2.3. 결렬침(Unwrapping)원리

앞에서와 같이 위상이동으로부터 구해진 위상은 Arctan 때문에 ϕ 에 대한 풀이는 Saw tooth 함수이고 2π 씩 매번 ϕ 가 변화는 동안 불연속성이 된다. ϕ 가 증가한다면 함수의 기울기는 양이 되고 감소하는 위상은 그 반대가 된다.

결렬침(Unwrapping)의 기본적인 이론은 Wrapped phase ϕ (2π 조합에서)의 통합이다. 따라서 오직 그 데이터를 통해서만 위상의 각각의 픽셀에서 위상기울기를 미분에 의해서 계산한다.

여기서 결렬침(Unwrapping)의 가장 중요한 부분은 위상의 불연속 점을 정확하게 발견하는 능력이다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 이를 위한 가장 기본적인 방법은 다음과 같다.

위상 불연속 점에서는 측정 파라미터에서의 급한 변화가 예상되므로 다음과 같은 식을 생각할 수 있

다

$$\Delta \phi = \phi_n - \phi_{n-1} \quad (5)$$

여기서 n 은 픽셀의 숫자이다 이를 이용하여 Fig. 1과 같이 4단계 방법을 통해서 결렬침(Unwrapping)이 이루어진다. 즉, 만약 $|\Delta \phi|$ 의 임의의 임계값을 넘으면 그 픽셀의 위치는 불연속점이라고 가정을 하고 이러한 위상의 급변 점에서 $\Delta \phi$ 의 신호에 2π 가 더해지거나 빼짐으로서 각각의 픽셀에 새로운 위상의 값을 얻게된다 다음그림과 같은 4단계 방법을 통해서 이루어진다.

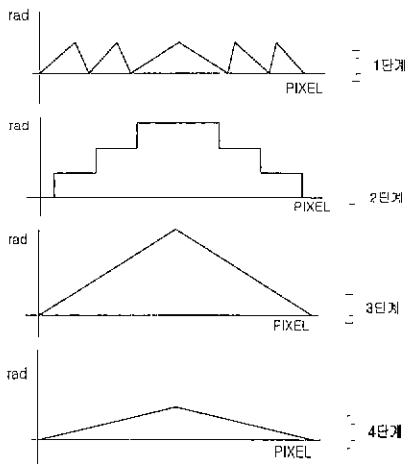


Fig. 1 Unwrapping process

3. 변위 정량화 알고리즘

3.1 변위 정량화 알고리즘

스펙클 상의 모든 점들은 참조 광에 대해 물체 표면의 정보를 위상 향으로 가지고 있으므로 물리량을 얻기 위해서는 변형에 의해서 발생한 위상정보를 추출해야 한다. 하지만 언급한 바와 같이 위상이동에서 얻어진 위상의 값은 불연속적인 값들이기 때문에 최종적인 변형은 물체 변위 방향에 따라 $2n\pi$ 위상분포를 측정영역 전체로의 변형으로 이어주는 최종적인 결렬침(Unwrapping) 단계를 통해서만이 얻을 수 있다.

스펙클의 노이즈는 성공적인 결렬침(Unwrapping)을 방해하므로 우선적으로 잡음이 적은 깨끗한 위상 지도를 얻어야 한다 이를 위해 Calibration 된 Voltage를 조절하여 PZT mirror를 움직여 위상을 이동시켰으며 최소자승알고리즘을 이용하여 보다 노이즈가 적은 부분의 위상을 추출하는데 성공하였다

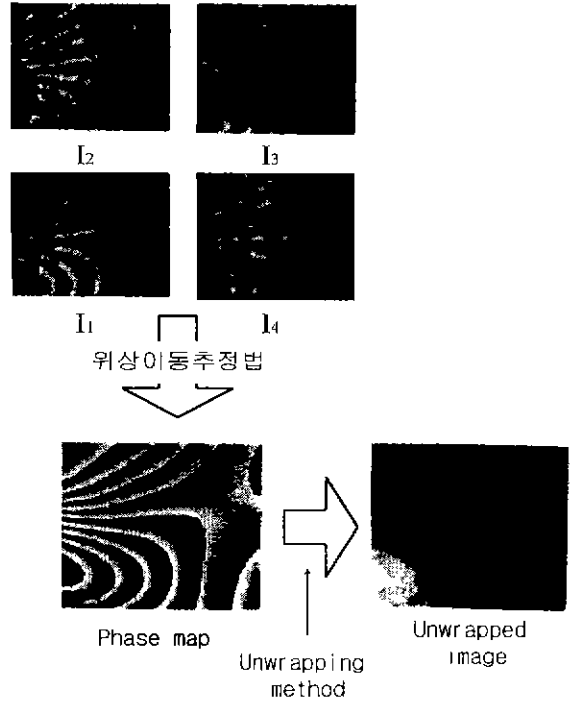


Fig 2 Processing scheme in phase sampling interferometry with $m=4$ Phase-shifted fringe patterns($\phi=90$ degrees)

다음으로 이렇게 얻어진 위상지도로부터 Line by Line알고리즘을 적용하여 인접한 픽셀을 검사하여 위상의 불연속지점을 찾았다 이렇게 찾아진 불연속 지점의 위상이 2π 에서 0으로 변화하면 2π 를 매번 더해주고 위상이 0에서 2π 로 변화하면 2π 를 빼주면서 불연속 위상을 연속위상으로 바꾼다

하지만 위상 불연속 점의 잘못된 추출에 있어 Unwrapping 된 위상의 데이터에는 노이즈가 더해지게 되는데 명백한 것은 노이즈의 진폭은 2π 에 접근함에 따라 실제 위상 불연속점이 불명확하게된다

이문제의 해결을 위하여 처리되지 않은 sin 곡선의 간섭무늬 데이터를 저주파 필터로 Smooth 하였다 하지만 이 필터링 적용 시 정보를 잃어버리는 경우도 있었다.

물체의 변위는 알려진 대로 위상의 정보로부터 얻어진다 따라서 임의의 (x, y) 에서의 위치에서의 그 물체의 변위 $d_z(x, y)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있었다.

$$d_z(x, y) = \frac{\Delta \phi(x, y)\lambda}{2\pi(\cos \theta_i + \cos \theta_v)} \quad (6)$$

있어 이를 위한 보정이 필요하다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 99 협동연구과제(과제번호: KRF-99-042-E00009) 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Smith howard Michael, "principles of Holography. 2nd Editton". john Wiley Sons.Inc, pp 220 ~ 267.1975.
2. Kjel J Gasvikl "Optical Metrology . 2nd Edition". John Wiley & Sons Ltd, pp 267 ~ 272,1995.
3. Andra,P.Mieth,U.and Osten,W, "Strategies for unwrapping noisy interferograms in phase-sampling interferometry. Proc, SPIE, Vol.1508.pp.50 ~ 601991
4. Charette, P G and Hunter, I.W, "Robust phase-unwrapping method for phase images with high nois content Appl Opt . Vol 35 No 29. pp.3506 ~ 3513. 1996

λ : 파장

θ, θ_0 : 표면 상태에 대하여 조사되어지고 보여지는 각도

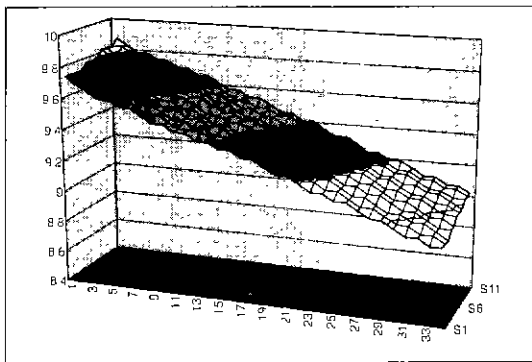
3.1 변위 정량화

본 연구에서는 열 하중이 가해졌을 때의 측정 대상체의 면외 변위 정보의 정량화를 위하여 본 알고리즘을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 3(a)는 ESPI 간섭계 개발로부터 얻은 ESPI Phase map image이며, Fig 3(b)는 개발된 결필침(Unwrapping) 기법 Image이다. Fig. 3(c)는 이 Image로부터 변위를 정량화한 결과이다



(a)

(b)



(c)

Fig 3(a) Phase map image (b) Unwrapping image (c) Displacement

4. 결론

본 연구에서는 변위의 정량적인 측정을 위하여 불연속적인 위상들을 통합한 결필침(Unwrapping)을 이용하여, 물체 변위의 정량적인 값을 얻는데 성공하였다. 그러나, 위상의 불연속적인 곳을 찾아 연속적인 위상으로 변환하는데 있어서 오차를 포함하고