

## 횡방향 주사를 이용한 광위상 간섭계의 페이즈 언래핑 향상에 대한 연구

박도민\* · 박성림\* · 권대갑\*\*

(1997년 8월 30일 접수)

### Phase Unwrapping Enhancement of Phase Shift Interferometry by Using Lateral Scanning

Domin Park, Sunglim Park and DaeGab Gweon

**Key Words :** Phase Shift Interferometry(광위상 간섭계), Phase Unwrapping(페이즈 언래핑),  
 $2\pi$  Ambiguity ( $2\pi$  모호성)

#### Abstract

The biggest problem common on to all forms of Phase Shift Interferometer is unwrapping the phase. Simple phase unwrapping algorithms assume that every pixel is within radians of its neighbors. If this is true, any reasonable algorithm will return the correct unwrapped phase. If not, correct unwrapped phase will not be obtained. In rough surface, frequently, neighboring pixels have phase steps greater than. This paper proposes the new method which makes phase steps smaller than by sub-pixel step movement.

#### 1. 서 론

17세기초 광위상 간섭현상이 발견된 이후로 간섭 무늬는 광학부품 등의 표면상태를 검사하는데 유용한 방법으로 사용된 이후 레이저의 출현과 컴퓨터의 발달로 광위상 간섭법은 그 응용범위가 단순한 검사에서 표면의 형상을 직접 측정할 수 있는 측정기로 변천되어 왔다. 광위상 간섭법은 측정시스템의 구성이 용이하면서도 높은 분해능을 얻을 수 있고, 비접촉식으로 3차원 형상을 빠른 시간에 측정할 수 있는 장점때문에 사용범위가 광범위하고 초정밀 표면의 측정에도 다양하게 이용된다. 그러나 광위상 간섭법을 이용할 경우  $2\pi$  모호성(ambiguity) 때문에  $\lambda/4$ ( $\lambda$ 는 측정광원의 파장)의 측정한계가

생겨서 거친 표면은 복구할 수 없다. 보통의 경우 측정한계는 수백 나노미터이다. 이 측정한계를 줄이기 위해서 광원으로 파장의 길이가 큰 등가파장을 만들어 측정을 수행하는 방법<sup>(1)</sup>도 있다.

표면 형상측정을 위한 측정 알고리즘에는 한 주기를 등간격으로 나누어 측정하는 R-bucket,<sup>(2)</sup> 기준위상변화를  $\pi/2$  등간격으로 하는 4-bucket, R-bucket의 특수한 경우인 3-bucket,<sup>(3)</sup> 5-bucket<sup>(4)</sup> 등이 있다. 페이즈 언래핑방법에는 오차의 전파를 막기위해 수학적 모폴로지를 이용한 다단계 페이즈 언래핑방법(phase unwrapping method), 페이즈 정보를 부드럽게 연결시키는 최소오차자승법 등 페이즈 언래핑을 향상시키기 위한 여러 방법들이 있다. 그러나 이러한 방법들도  $2\pi$  모호성때문에 표면의 정확한 형상을 알아낼 수는 없다.

본 논문에서는 하드웨어를 이용하여  $\lambda/4$ 의 측정한계를 극복하여 페이즈 언래핑을 향상시키는 방법

\*한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

을 제시하고자 한다.

## 2. 페이즈 언래핑

광위상 간섭법을 이용하여 임의의 점  $i$ 에서 측정된 위상  $\phi_i$ 는  $\tan^{-1}$ 의 계산에 따른 modulo  $2\pi$  때문에  $2\pi$  모호성이 발생한다. 예를 들어  $\tan(\pi/4)$ 와  $\tan(5\pi/4)$ 의 값은 모두 1이다. 그러므로  $\tan^{-1}$ (1)의 값은  $\pi/4$ 도 될수 있고,  $5\pi/4$ 도 될수 있다. 그러나 정의역의 한 값에 대해 2개 이상의 값이 대응되면 함수가 성립되지 않으므로  $\tan^{-1}$ 의 값을 특정한 구간 사이로 정하여 그 구간에서만은 일대일 대응이 되게 한 것이  $\tan^{-1}$ 함수이다.

$$\phi_i = \phi_i + 2\pi K_i \quad (1)$$

( $K_i=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $\phi_i$ : 실제위상,  $\phi_i$ : 측정위상)

앞에서 설명한 바와 같이 광위상 간섭법으로 표면을 측정할 경우  $\tan^{-1}$ 의 계산때문에 표면의 높이가  $-\pi$ 에서  $\pi$  사이의 값들로 대응이 된다. 그러므로 실제위상과 측정위상과의 관계는 식 (1)과 같다. 식 (1)으로부터 실제위상  $\phi_i$ 를 구하기 위해서는  $K_i$ 의 값을 구해야 하는데 그 유일해는 존재하지 않는다. 그러나 연속위상  $\phi_i$ 는 다른 측정점들과의 상대적인 값만을 알면 되므로 인접한 두 측정점의 위상을 계속 비교해 가면 적당한  $K_i$ 를 선정할 수 있다. 이 과정을 페이즈 언래핑(phase unwrapping)이라고 하며 간략하게 설명하면 다음과 같다.

측정표면의 인접한 두 측정점 사이의 위상차가  $\pi$ 보다 작다고 가정하면  $K_i$ 와  $K_{i-1}$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta K_i = K_i - K_{i-1} = 0, \pm 1 \quad (2)$$

식 (2)에서  $\Delta K_i$ 는  $(\phi_i - \phi_{i-1}) < -\pi$ 이면 1이고,  $(\phi_i - \phi_{i-1}) > \pi$ 이면 -1이다. 그리고  $|\phi_i - \phi_{i-1}| \leq \pi$ 이면 0이다. 이러한 관계를 이용하여 최초의 측정점  $\phi_0$ 의  $K_0$ 를 0으로 한 후에 인접한 두 측정점의 위상을 계속 비교해 가면 모든 측정점의  $K_i$ 를 선정할 수 있으므로 연속위상  $\phi_i$ 를 구할 수 있다. 그러나 측정표면의 인접한 두 측정점 사이의 위상차가  $\pi$ 보다 클 경우 식 (2)의 관계는 성립하지 않으므로 Fig. 1과 같이 페이즈 언래핑하여 구한 위상은 실제위상과 다르게 된다. 따라서 광위상 간섭법의 측정한계는 위상거리  $\pi$ 로 정의할 수 있으며

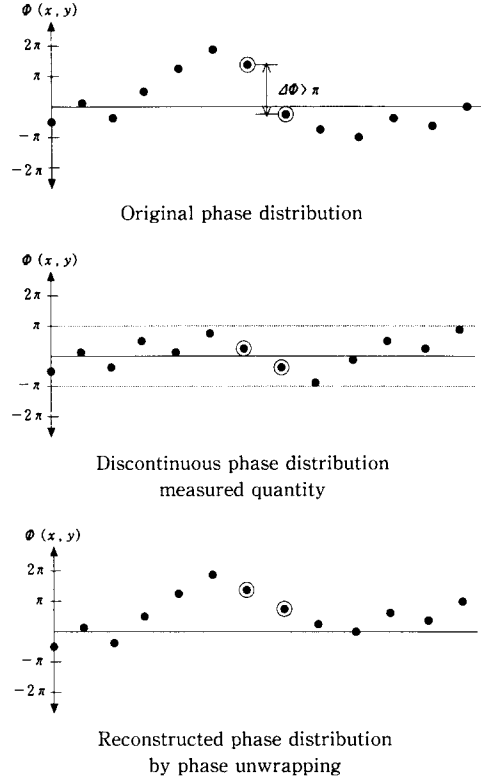


Fig. 1 Limitation of measurement

측정표면의 높이 차이로 보면 다음과 같다.

$$|\Delta h| \leq \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

여기서,  $\Delta h$ 는 인접한 두 측정점 사이의 표면높이 차이이다.

## 3. 소자분할 미세이동법

CCD 소자는 그면적 만큼에 들어오는 광량을 평균화하므로 Fig. 2의 그림과 같이 표현할 수 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 위의 Fig. 2처럼 첫번째 CCD 소자와 두번째 CCD 소자의 값인 a와 b의 차이가  $\lambda/4$  보다 클 경우에는 페이즈 언래핑을 할 수 없게 된다. 그러나 Fig. 2에서 보는 바와 같이 시편을 CCD 소자 크기의 반만큼 움직여서 첫번째 소자와 두번째 소자의 사이값인 c를 측정하면 a와 b 사이에 새로운 c값이 들어가서 a와 c, c와 b의 차이를  $\lambda/4$ 이하로 줄이므로 페이즈 언래핑이 가능하게 된다. 만약 표면의 경사가 더 급할 경우에는

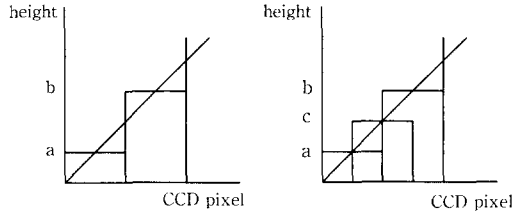


Fig. 2 Feature of CCD.

시편 이동량을 적당히 조절하여 첫번째 소자와 두 번째 소자의 사이를 여러번 측정하면 페이즈 언래핑이 가능하게 된다. 만약 인접한 두 측정점 사이의 높이 차이가  $s$ 일 때 측정횟수는  $4 * s / \lambda$ 가 된다. 본 논문에서는 시편을 미세하게 이동시켜서 인접한 두 측정점 사이의 거리를 좁혀  $\lambda/4$  이상의 점핑이 발생하지 않도록 하여 실제 표면형상을 복원할 수 있도록 하고자 한다.

### 4. 시뮬레이션

일반적인 광위상 간섭계의 구조는 다음과 같다.

먼저, 광원으로부터 나온 광속이 광분할기를 통해 기준경과 시편 방향으로 나누어지고, 각각에서 반사되는 광속을 다시 광분할기로 더하여 간섭시킨 후 CCD 카메라를 통해 각각의 소자로 들어오는 광강도를 측정한다. 측정된 광강도를 소형 컴퓨터를 이용하여 계산하면 표면의 정보를 얻게 된다.

이 계통도를 따라 기존의 페이즈 언래핑방법으로 복구가 불가능했던 표면 형상을 앞에서 제시한 방법으로 시뮬레이션해 보겠다. Fig. 3과 같은 구조로 모델링을 하고, 광강도로부터 표면정보를 얻는데는 4-bucket 알고리즘을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 식들은 다음과 같다.

- 기준 거울면에서 반사되어 들어오는 파면방정식

$$W_r(x, y) = A(x, y) \exp [j(2kl - \delta_j)]$$

- 시편에서 반사되어 들어오는 파면방정식

$$W_t(x, y) = B(x, y) \exp [2jk(l - h(x, y))]$$

- CCD에서 검출되는 간섭무늬의 강도방정식

$$I_j(x, y) = [W_r(x, y) + W_t(x, y)] \cdot [W_r^*(x, y) + W_t^*(x, y)]$$

(\*는 complex conjugate)

$$= A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A(x, y)B(x, y) \cdot \cos [2kl(x, y) - \delta_j]$$

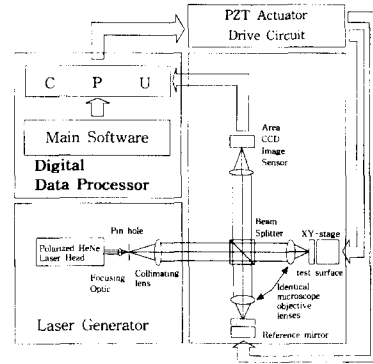


Fig. 3 Configuration of phase shift interferometer.

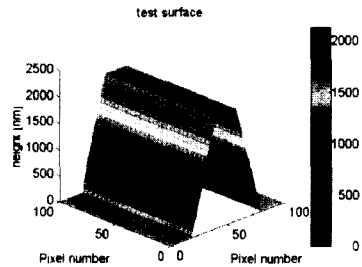


Fig. 4 Tested surface.

$$\delta_j = \frac{2\theta}{N} (j-1) \quad (j=1, 2, 3, 4 \quad N=4)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$$

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

여기서,  $A, B$ 는 파의 강도(wave amplitude)이고,  $k$ 는  $2\pi/\lambda$ ,  $l$ 은 파의 경로길이(wave path length),  $h(x, y)$ 는 시뮬레이션할 표면의 높이,  $\delta_j$ 는 기준 위상변위량(reference phase shift)이다.

시뮬레이션결과는 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에 나타나 있다. 먼저 Fig. 4와 같은 경사가 급한 표면을 가로와 세로 각각 100픽셀씩의 넓이로 생성시키고 앞의 조건들을 기초로 하여 시편의 표면을 측정하였다. 그리고, CCD의 한 소자가 Fig. 4의 가로 세로 5픽셀에 해당하는 크기로 가정하였다. 기존의 방법으로 시뮬레이션한 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 3장에서 설명한 것처럼 가로 세로 5픽셀 부분의 평균값을 CCD의 한 소자가 나타내므로 가로와 세로가 각각 20소자의 크기로 측정되고, 인접한 두 소자 사이의 높이 차이가  $\lambda/4$  이상이므로 왜곡된 형상을 보인다. 그러나 앞에서 제안한 소자분할 미

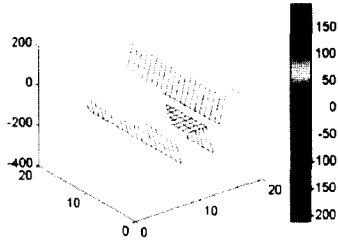


Fig. 5 Reconstructed surface without sub-pixel movement.

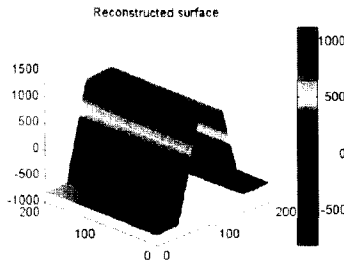


Fig. 6 Reconstructed surface using sub-pixel movement.

소이동(sub-pixel movement)법을 사용하여 CCD의 소자 사이의 값들을 가로와 세로 방향으로 각각 10번씩 나누어 시뮬레이션할 경우 Fig. 6과 같은 왜곡없는 표면을 얻을 수 있다. 이때 소자와 소자 사이를 10구간으로 나누어 측정하였으므로 Fig. 6은 Fig. 5에 비해 가로 및 세로방향으로 각각 10배의 정보량을 가지게 된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 하드웨어를 사용하여 인접한 두 소자의 광강도 값 사이에 또 다른 측정값들을 넣어서  $2\pi$  모호성을 없애고 케이즈 언래핑을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고 시뮬레이션하였다. 여기서 제안한 소자분할 미소이동법(sub-pixel move-

ment)은 시뮬레이션결과와 같이 만족할만한 성능을 가지고 있다. 그러나, 이론적으로는 3장에서 설명한 것처럼 측정 표면이 소자당  $s$ 의 기울기를 가질 경우  $4 * s / \lambda$ 번 구간을 나누어 측정하면 되지만, 회절의 영향때문에 아주 경사가 급한 표면의 경우에는 적용이 불가능할 것이다.

보통의 경우 CCD의 소자 하나의 크기는 가로 세로 10마이크로미터 정도이다. 그리고, 렌즈를 써서 10배를 확대할 경우 CCD의 한 소자가 나타내는 범위는 가로 세로 1마이크로가 된다. 앞의 시뮬레이션과 같이 소자간을 10번 나눌 경우 1번에 100나노미터씩 이동시켜 측정하면 된다. 일반적인 압전구동기의 경우 분해능이 10나노미터 정도이므로 압전구동기 같은 초정밀위치 제어기구를 이용하면 실제로도 구현이 가능할 것이다.

### 참고문헌

- (1) Wyant, J. C. and Creath, K., 1987, "Advances in Interferometric Optical Profiling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 32.
- (2) Bruning, J. H., Herriott, D. R., Gallagher, J. E., Rosenfeld, D. P., White, A. D. and Brangaccio, D. J., 1974, "Digitek Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Appl. Opt.* 13, pp. 2693~2703.
- (3) Wyant, J. C., 1982, *Interferometric Potical Metrology : Basic Principles and New Systems*, Laser Focus, 65 71.
- (4) Schwider, J., Burow, R., Elssner, K. E., Grzanna, J., Spolaczyk, R. and Merkel, K., 1983, "Digital Wave Front Measuring Interferometry : Some Systematical Error Source," *Appl. Opt.* 22, pp. 3421~3432.