

안정화된 간섭계와 FFT를 이용한 표면 측정

류진, 김현수, 박종락, 김진태*

Surface profile measurement with FFT method and stabilized interferometer

Zhen Liu⁺, Hyun Su Kim⁺⁺, Jong Rak Park⁺⁺, Jin-Tae Kim^{*}

Abstract

The moduled interferometer with waveplates, polarizing beam splitter, etc. for four phase shifted interference patterns was stabilized with the and Fast Fourier Transform (FFT) method was used to investigate the surface profile measurement from the interference pattern from Twyman-Green interferometer using a mathcad.

Key Words : Interferometer, surface profile, stabilization

1. 서론

최근 각종 산업이 자동화, 소형화됨에 따라 초정밀 가공품의 생산과 개발이 매우 필요하다. 또한, 다양한 여러 가지 산업에서 제품의 생산속도를 높이고 생산된 제품의 품질 확인 및 개선을 위해서 물체의 정확한 3차원 형상 측정 [1] 이 요구되며, 부품의 성능과 수명은 표면 조도 및 형상 오차에 의해 크게 좌우 되어 진다. 정밀 부품 검사 등을 신속하면서도 자동으로 수행하기 위한 비접촉 초정밀 표면형상 측정 시스템의 필요성이 날이 증대 되고 있다 [2]. 이러한 정밀 표면 측정을 위해 간섭계 등을 이용한 측정기술은 나노미터 정밀도로 매우 정밀하게 표면, 길이 등을 측정할 수 있는 중요한 기술로 비접촉 검사 장치로 각광을 받고 있다. 이중 대표적인 방법인 광위상간섭계를 이용한 [3] 측정에는 PSI(Phase Shift Interferometry)와 WSI(White Light Scanning Interferometry) 등이 있다. 광위상 간섭계는 참조 거울을 위상 이동 시킴으로써 만들

어진 영상들을 이용하여 위상 결별침하고 분석하여 형상 정보 등을 얻을 수 가 있다. 이러한 간섭계는 구성 방법에 따라 마이켈슨(Michclson), 트와이만-그린(Twyman-Green), 미라우(Mirau), 리닉(Linnik) 등 [4-6] 많은 형태의 간섭계가 사용 되어지고 있다. 본 논문에서는 Twyman-Green 간섭계 안정화를 구현하였다.

형상 측정을 위한 트와이만-그린(Twyman-Green) 위상 이동 간섭법을 사용하여 거리 이동을 자동화 하기 위한 수단으로 PZT(Pizeo-electric Transducer) 구동을 PC상에서 자동제어 할 수 있도록 하여 위상 정보를 정량화 하고 위상 이동 간섭계 알고리즘과 위상 펼침(Phase unwrapping)을 통해 측정물체의 표면 형상을 구현하는 경우에 위상이동에 따른 안정화 인자들이 변화하기 때문에 안정화된 간섭계를 이용하기가 용이하지 않다.

본 논문에서는 이러한 인자변화를 주지 않기 위해 일체형 위상 측정기의 제작에 대해 논의 하고, 안정화된 간섭계를 사용하여 위상이동 없이 표면 형상을 측정하기 위해

* 교신저자. 조선대학교 광기술공학과 (kimjt@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375 조선대학교
광기술공학과

+ 조선대학교 대학원 광응용공학과

++ 조선대학교 공과대학 광기술공학과

Fast Fourier Transform 방식을 채택하여 안정화된 간섭계에서 표면 형상을 측정하는 방법에 대해 기술한다.

2. 안정화된 간섭계용 표면 형상 측정법

레이저 간섭계에 의한 물체의 결함 측정 원리는 매우 단순하다. 레이저의 간섭 현상은 두 레이저 파들이 상호작용할 때, 두 파간의 위상 차이에 의해 생기는 간섭무늬를 분석함에 의해 가능하다. 즉, 이러한 간섭무늬는 레이저 기준 빔과 물체에 의한 반사된 레이저 빔 간의 상호 작용 때문에 생긴다. 이렇게 생긴 간섭모양으로부터 위상결편침, FFT 방법을 이용하여 변형되지 않은 기준품으로부터 얼마나 위상이 변형되었는가를 알 수가 있다. 이러한 위상 변이로부터 표면 품질을 알 수가 있다. 이러한 위상 처리 기술들은 위상이동없이 푸리에 급수를 이용하거나 PZT 등의 위상이동자와 최소 자승법 fitting 방법 등을 결합하여 해석 할 수 있다. 이러한 계측 기술의 정밀도는 계측 레이저의 정밀도에 의존하며 최근에는 이러한 위상이동 보전방식, 간섭무늬로부터 위상을 추출하는 기술의 정밀도를 개선하기 위한 연구가 수행되어져 왔다.

2.1 안정화 및 편광 간섭계 모듈

표면 측정용 간섭계의 안정화는 표면 측정을 위하여 간섭계 안정화에 대해 이미 보고[7] 한바와 같이 생성된 프린지 신호 안정화 방법을 이용하였다. 이러한 안정화 방식은 외부 진동, 공기유동 등 외부 환경에 기인한 프린지의 요동을 할때 두개의 포토다이오드를 사용하여 기준 신호에 대한 요동에 따른 전압 변화에 기인한 오차 전압을 증폭하여 간섭계의 참조경을 변화 시킴으로서 이러한 오차 신호를 영점화 함으로서 얻어질 수 있다. 그러나 이렇게 간섭계가 안정화되더라도 표면형상 측정을 위해서는 위상 이동 방법을 이용하는 경우 PZT등을 이용하여 참조경을 이동하여야 한다. 그러나 참조경을 이동하는 경우 간섭계의 안정화를 위한 인자들의 적정 조건 인자들이 변화하게 되어 표면 측정을 할 수가 없게 된다. 이러한 인자 변화를 주지 않기 위해 일체형 위상 측정용 모듈화된 안정화 위상기 안정화를 기술하기 전에 일반 광학부품으로 구성된 편광간섭계 안정화에 대해 설명하면 다음과 같다. 기 보고된 안정화 방식에서는 모듈형 위상 측정기를 사용하지 않고 직접 간섭무늬를 포토다이오드로 측정하여 안정화를 이루었다. 안정화에 있어 시상수와 오차 신호를 증폭해 주기 위한 증폭인자는 위상 안정화를 위해 중요하다. 이러한 안정화시 적정화된 시상수 값을 얻

기 위하여 안정화 정도를 오실로스코프로 확인하면서 간섭무늬의 안정화가 이루어 질때까지 조절하면서 적정한 시상수 값을 얻었다. 이러한 시상수 값은 참조경에 장착된 PZT의 반응속도에 영향을 준다. 본 실험에서 사용한 안정화 회로를 사용하여 얻은 안정화 정도는 Newport사 레이저 무진동 테이블 기능을 대체할 정도의 안정화 정도를 보여주며 그림1과 같은 안정화 정도를 나타내고 있다. 본 실험에서는 일반적으로 실험실 외부 환경이 좋은 경우 프린지 무늬는 많은 용돈을 보이지 않고 있었으며, 본 실험의 목적은 외부 환경적 요소에 둔감한 간섭계 모듈을 만들어 산업현장에서 에어콘등과 외부 공기 위동에 둔감한 시스템 개발에 있다. 이러한 외부환경을 형성하기 위해 실험실내에 에어콘을 사용하여 공기 유동을 인위적으로 유발시켰다.

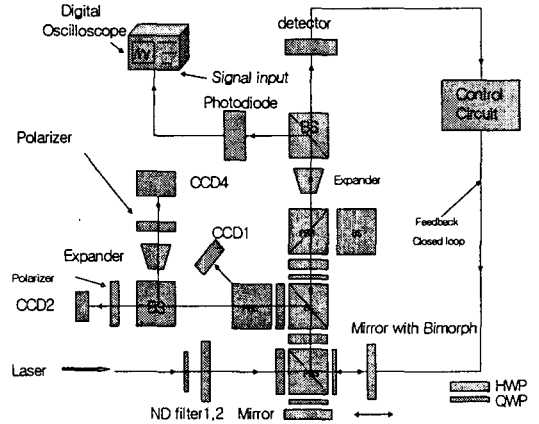


그림1 편광간섭계 및 측정 시스템

본 실험에서 사용한 모듈화된 편광간섭계에 대해 기술하면 다음 그림1과 같다. 사용된 레이저는 Mellis Griot 안정화된 He-Ne laser(파장=632.8 nm) 이 레이저는 수직으로 편광 되어 있다. 그림1에 보인 바와 같이 수직으로 편광된 레이저 빔은 반파장 편광기에 의해 S,P 성분으로 분리된다. 또한 분리된 S,P 성분은 각각 PBS를 통해 참조경과 물체면으로 분리된다. 1/4파장 편광기에 의해 원형 편광으로 되며 참조경과 물체면을 통해 반사된 레이저 빔은 다시 편광 빔분할기를 통해 다시 결합된다. 결합된 두 빔은 빔 분할기에 의해 분리된다.

이렇게 분리된 두빔은 다시 하나는 반파장 편광기와 PBS를 통해 반파장 편광기와 1/4 파장 편광기를 통해 PBS

로 입사되어 분리되어 각각의 CCD 카메라에 입사되는 간섭무늬를 이용 표면 측정을 하기 위해서는 각각의 간섭무늬가 광학 부품들에 의해 생기는 간섭무늬의 변형, 편광변화 등을 얻어진 간섭 무늬의 정렬을 통해 수정되어야 한다. 현재 이러한 수정이 진행되고 있으며, 이러한 수정이 보완된 후 표면 측정후의 결과들은 차후 보고될 예정이다. 제작된 모듈화된 간섭계와 위상이동용 측정 모듈의 크기가 6 cm×6 cm 로 매우 소형으로 광학부품들이 장착되었음을 알 수 있다.

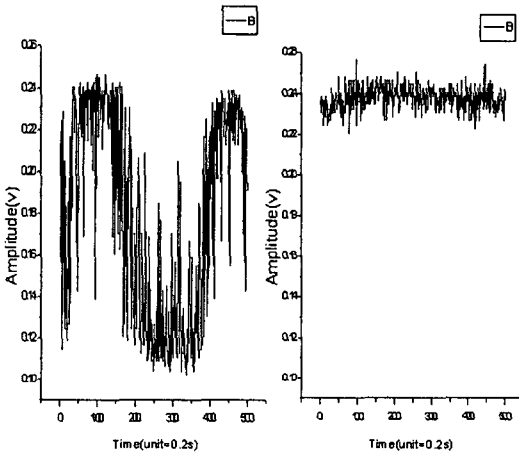


그림2 (a) 안정화전 (b) 안정화 후

이렇게 모듈화된 편광 간섭계를 사용하여 이미 구현된 안정화 방법을 이용 안정화 정도를 확인한다. 그림2는 안정화 회로가 작동되지 않을때 프린지의 흐름이 하나의 프린지 거리 이상 요동함을 알 수 있다. 이러한 프린지 이동이 있는 경우 정밀거리 측정이나 표면측정을 하기가 곤란하면 측정하였다고 해도 큰 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다.

2.2 FFT 표면 측정 알고리즘 전산모사

캐리어 주파수 u_0 를 가진 등간격 정현파 프린지들에 실린 표면은 트와이만-그린 간섭계의 경우 참조경을 기울임으로서 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$f(x) = a(x) + b(x) \cos [2\pi u_0 x + \varphi(x)] \quad (1)$$

위상이동 방법을 이용하여 위 방정식에 나타난 세 개의 변수를 얻어진 간섭무늬로부터 얻기 위해선 PZT 등을 사용

하여 3번 이상의 참조경 길이를 변화시켜 얻어진 방정식들을 이용한다. 그러나 이렇게 위상 이동을 하는 경우 위상이동 시마다 안정화 인자들이 변화하여 안정화된 간섭계를 이룰수가 없다. 그래서 이러한 단점을 보완하기 위해 특별한 위상 검출기를 사용하여 자동화가 가능하나 특별한 경우에만 표면 측정 방식이 적용되는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위하여 위에서 기술한 일체형 위상 측정기를 이용한 방법과 4-버킷 위상 동시 측정 방법을 사용 표면 측정 방법을 기술하였다. 그러나 현재 간섭무늬 정렬 등의 문제점을 해결하기 위한 작업이 진행되고 있어 본 논문에서는 4-버킷 방법보다는 하나의 간섭무늬를 사용 표면 측정을 하는 방법을 위해 다음과 같이 FFT 방법을 이용하여 표면을 추출하는 방법을 전산 모사하였다.

Takeda 등[8,9]이 고안한 FFT 표면 추출 방식은 방정식 (1)을 지수 함수로 다음과 같이 변화 시킨다.

$$f(x) = a(x) + c(x) \exp(i 2\pi u_0 x) + c^*(x) \exp(-i 2\pi u_0 x) \quad (2)$$

여기서 $c(x) = \frac{1}{2} b(x) \exp [i \varphi(x)]$ 이고

별표는 복소수 공액을 나타낸다.

위식을 푸리에 변환을 하면 다음식이 된다.

$$F(u) = A(u) + C(u - u_0) + C^*(u + u_0) \quad (3)$$

$a(x)$, $b(x)$, $f(x)$ 의 공간 변위는 공간 캐리어 주파수 u_0 에 비해 느리기 때문에 캐리어 주파수 u_0 와는 서로 분리 가능하다. 여기서 $A(u)$ 는 저주파수 배경 조명에 기인한다.

$C^*(u + u_0)$ 와 $A(u)$ 는 대역 필터링에 의해 제거 한 후 $C(u - u_0)$ 를 원점으로 u_0 만큼 이동 시키면 $C(u)$ 를 얻을 수 있다. u_0 에 대한 $C(u)$ 의 역 FFT를 수행하면 $c(x) = \frac{1}{2} b(x) (-i\varphi(x))$ 가 얻어진다. 이 방정식으로부터 위상 $\varphi(x)$ 가 다음과 같이 얻어진다.

$$\tan \varphi(x) = \frac{\text{Im}(c(x))}{\text{Re}(c(x))} \quad (4)$$

위 방정식에 의해 계산된 위상은 $-\pi$ 와 π 사이의 값을 가지게 된다. 연속 위상 할 수 $\varphi(x)$ 를 얻기 위해 결별침 작업을 통해 연속 위상을 얻을 수 있다. 얻어진 연속 위상과 각 정의 높이는 다음과 같이 표현된다.

$$h(x) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(x) \quad (5)$$

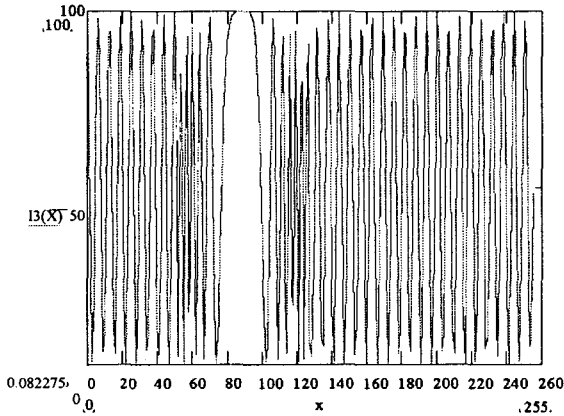


그림3 간섭계로부터 얻어질수 있는 간섭무늬

본 논문에서는 참조경에 대해 상대적으로 기울임으로서 캐리어 프린지를 형성할 수 있으며 임의의 표면 형상을 경사진 표면의 중앙부위에 임의의 굴곡을 줌으로서 형성할 수 있다. 경사진 표면 위의 굴곡에 기인한 간섭무늬가 그림3에 나타나 있다.

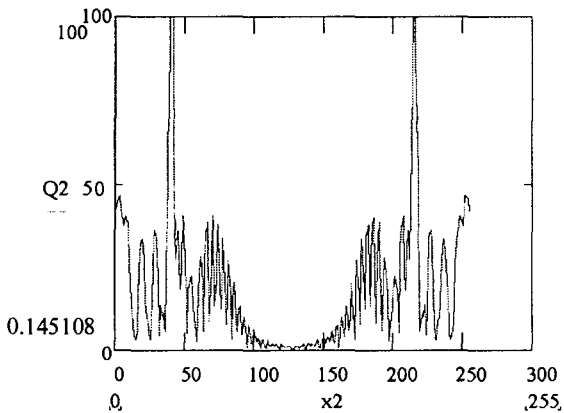


그림4 FFT 후 얻은 공간 주파수 공간에서의 모양

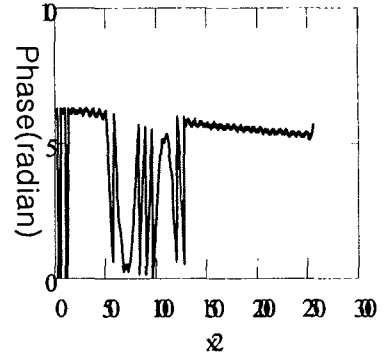


그림 5 0와 π 사이의 계산된 위상지도

이러한 간섭무늬를 FFT를 수행하여 얻어진 주파수 공간에서의 모양이 그림4에 보여진다. 주파수 공간에서의 $C^*(u+u_0)$ 와 $A(u)$ 에 해당하는 영역은 대역 필터링에 의해 제거 한 후 $C(u-u_0)$ 를 원점으로 u_0 만큼 이동시키면 $C(u)$ 를 얻은 후 u_0 에 대한 $C(u)$ 의 역 FFT를 수행 후 방정식 (4)에 의해 계산된 위상은 $-\pi$ 와 π 사이의 값을 가지게 된다. 연속 위상 할 수 $\varphi(x)$ 를 얻기 위해 결별침 작업을 통해 연속 위상을 얻을 수 있다. 이러한 표면 위상에 대한 결별침되지 않은 0와 2π 사이의 계산된 위상지도가 그림 5에 나타나 있으며 이를 결별침 한 후 원래 형상과 비교된 결과가 그림6에 나타나 있다.

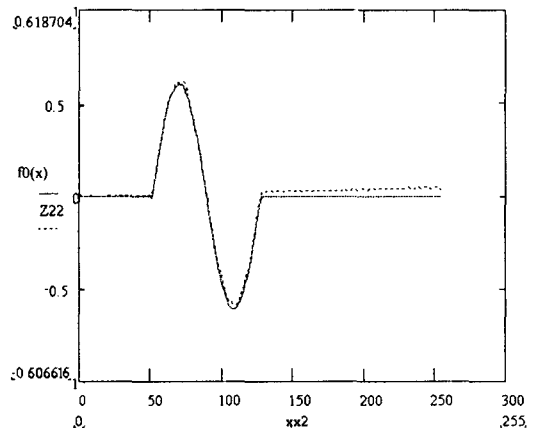


그림 6 계산된 결과(점선) 원래 형상(실선)과의 비교
 얻어진 형상의 원래 모습과 복원된 형상은 굴곡의 형상
 부위는 잘 일치하나 굴곡 이 후의 부분이 잘 일치 하지 않
 는데 이것은 굴곡의 봉우리 부분에서의 위상 결 펄침 작업
 이 잘 이루어 지 지 않아서 일어나는 것으로 보인다. 안정
 화된 간섭계와 FFT를 이용한 표면 측정과 일체형 위상 측
 정기를 이용한 보고는 간섭 무늬 정렬 방법이 완성 된 후
 차후에 발표될 예정이다.

3. 결 론

모듈화된 간섭계 및 4-버킷 위상 측정을 참조경을 역학
 적으로 이동하지 않고 동시에 측정하기 위한 일체형 위상측
 정기를 사용하여 간섭계 안정화가 이루어졌으며, 안정화된
 간섭계에서 표면 측정을 위하여 Takeda 등이 사용한 FFT
 표면 측정 알고리즘을 mathcad를 사용하여 전산모사 하였
 다.

참 고 문 헌

(1) Chen, F., Brown, G. M. and Song, M., 2000, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods" Optical Engineering Vol. 39, pp. 10~22.

(2) Udupa, G., Singaperumal, M. R., Siroshi S. and Kothiyal, M. P., 2000, "Characterization of surface topography by confocal microscopy: II. The micro and macro surface irregularities ", Measurement Science Technology, Vol. 11, pp. 305~330.

(3) Malacara,, D., 1978, "Optical Shop Testing", John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 77~86.

(4) Kato, J. and Yamaguchi, I., 2000, "Phase-shifting fringe analysis for laser diode wavelength-scanning interferometer", Optical Review, Vol. 7, pp. 158~163.

(5) Yamaguchi, I., Liu, J. and Kato, J., 1996, "Active phase-shifting interferometers for shape and deformation measurements", Optical Engineering, Vol. 35, pp.2930 ~2937.

(6) Wyant, J. C., 2002, "Advances in interderometric metrology", Photonics Asia 2002 pp. 2002~2011.

(7) Kim, D. H. Kim, H. S. Kim, Park, J. R. and Kim, J. T., 2003, "Stabilized Twyman-Green Interferometer "Proceedings of International Laser Spectroscopy, Vol. pp. 95~96.

[8]Takeda, M., Ina, H., Kobayashi, S., 1982," Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", Journal of Optical Society of America. Vol. 72, pp. 156~159.

[9] Karaalioglu, C. and Skarlatos, Y., 2003, "Fourier transform method for measurement of thin film thickness by speckle interferometry ", Optical Engineering. Vol. 42, pp. 1694~1698.