

광 간섭계의 측정 정밀도와 구동 정밀도의 관계

박민철*(KAIST 기계공학과), 엄창용(㈜인텍 플러스), 김승우(KAIST 기계공학과)

The effects of moving accuracy on inteferometric 3D shape measurement

M.C.Park* (Mech. Eng. Dept. KAIST), C.Y. Eom(Intekplus Corp),

S.W.Kim(Mech. Eng. Dept. KAIST)

ABSTRACT

We present an interferometer system, which is able to perform both the phase shifting interferometry and white light interferometry. The interferometer system uses a d.c. motor to control the probe position with an accuracy of 10 nm, which shows an outstanding performance on white light interferometry. However, the moving mechanism of d.c. motor is not accurate enough for the phase shifting interferometry that requires a moving precision less than 1 nm. We therefore propose a Fourier transform technique to calculate the phase of interferograms, which is strongly resistant to calibration errors and external vibration. Experimental results show that the Fourier transform technique is capable of reducing the measurement error caused by inaccurate movement within 0.1nm.

Key Words : Phase Shifting Interferometry(광 위상 간섭법), White-light Scanning Interferometry(백색광 주사 간섭법), Phase Calculation(위상 계산)

1. 서론

초정밀 3 차원 형상 측정에 크게 이용되는 광 간섭계는 사용하는 광원의 파장 대역에 따라 광 위상 간섭법과 백색광 주사 간섭법으로 나뉜다. 단색광 광원을 사용하는 광 위상 간섭법은 매우 빠르고 정확한 측정 성능을 갖지만, 측정 표면의 절대 위상의 산출 시 2π -모호성(ambiguity)의 문제점을 갖게 되어, 약 150nm 이상의 단차 측정이 불가능한 단점을 갖는다. 반면, 백색광주사간섭계는 백색광의 넓은 주파수 영역으로 인한 짧은 가간섭 거리를 활용하는 것으로, 단색광 광원과 비교하여 백색광의 가간섭 거리는 수 μm 범위로 한정되며, 가시도의 최대정점의 위치가 분명하여 측정표면의 절대위상의 산출 시 2π -모호성의 문제점이 없다. 따라서, 수 μm 의 정밀 형상 측정에 매우 적합한 방법으로 활용된다. 반면, 백색광 주사 간섭계는 광 위상 간섭계에 비하여 100nm 이하의 형상 측정에 속도와 정확도가 낮은 단점을 갖는다. 따라서,

근래에는 하나의 광 간섭 광학계에 간단한 조명 방법의 교체로 두 간섭법을 모두 활용한다[1-3].

백색광 주사 간섭법의 경우, 측정 영역이 수십 nm 에서 수 mm 까지 매우 넓어 그 구동 방식으로 모터를 이용한 주사 방식을 택한다. 하지만, 광 위상 간섭법에서는 구동 영역이 수백 nm 이하로 제한되고, nm 수준의 정밀 구동을 필요로 하기 때문에 PZT 를 이용한 주사 방식을 택하는 것이 일반적이다. 결국, 두 광 간섭법을 모두 활용하려면 2 개의 서로 다른 구동 방식을 택해야 하는 단점을 갖게 된다. 본 논문에서는 2 개로 나누어진 구동부를 DC 모터를 이용한 하나의 구동 방식으로 교체하고, 이에 적합한 위상 측정 알고리즘을 제안한다.

2. 광 간섭법을 이용한 형상 측정

2.1 광 위상 간섭법

광 위상 간섭은 마이클슨(Michelson). 미라우

(Mirau), 리닉(Linnik) 등 여러 형태의 간섭광학계를 통해 구현될 수 있다. 단색 조명광이 분광기(beam splitter)에 의해 기준광속과 측정광속으로 분리되고, 두 광속이 각각 반사되어 이루는 간섭무늬의 방정식은 다음과 같다.

$$I(z) = I_0 [1 + \gamma(z) \cos(2k_0(z-h) + \alpha)] \quad (1)$$

여기서 $\gamma(z)$ 는 간섭무늬의 가시도함수(coherence envelop function)를 의미한다. 또한, 위식에서 I_0 는 배경광의 강도, k_0 는 조명광의 파장 λ_0 에 의해 결정되는 파동상수(wavenumber, $k_0=2\pi/\lambda_0$)이다. 위상 α 는 측정 대상물이 급속일 경우 발생하는 위상 변화값이다. 단색광 조명을 사용하는 광 위상 간섭법에서는 가간섭 거리가 수십 μm 에서 수 mm의 값을 갖게 된다. 이로 인하여 식(1)의 가시도 함수 $\gamma(z)$ 는 이송 방향 z 에 대하여 매우 길게 분포하고, 측정물의 영상을 초점 부근에 위치시키면 간섭무늬가 나타난다. 간섭무늬의 해석을 위해서 위치 $-2k_0h + \alpha$ 를 식(2)와 같이 ϕ 로 치환한다.

$$I(z) = I_0 [1 + \gamma(z) \cos(2k_0z + \phi)] \quad (2)$$

식(2)에서, 위상 ϕ 를 계산하고, 이를 언래핑(Unwrapping)하여 3-D 형상을 복원한다. 위상 ϕ 를 계산하는 방법은 3-Bucket을 비롯한 수 많은 알고리즘이 제안되어 왔다. 알고리즘들은 계산 속도와 정확도에 대하여 각각의 장점을 갖는다[4].

2.2 백색광 주사 간섭법

조명광이 가시광선 영역을 모두 포함하는 백색광인 경우, 가간섭 거리가 $2\sim 4\mu\text{m}$ 정도로 식(1)의 가시도 함수 $\gamma(z)$ 는 매우 짧은 구간에서 나타나고, 간섭무늬는 그림 1과 같이 물체의 정확한 초점 위치에서 나타난다.

$$I(z) = I_0 [1 + \gamma(z) \cos(2k_0(z-z_m) + \alpha)] \quad (3)$$

백색광 조명에 의해 물체의 위치 h 가 정점에서 벗어나기 때문에, 식(3)에서 정점을 z_m 으로 표현하였다. 백색광 간섭무늬의 정점은 그림 1과 같이 가시도 함수의 최고점인 가시도 정점(Envelope Peak)과 간섭무늬가 최대값을 갖는 위상 정점(Fringe Peak)으로 나뉜다[5]. 가시도 정점은 가시도 함수 $\gamma(z)$ 의 최고점으로 $z_{env} = z_m$ 로 표현되고, 위상 정점은 이로부터 위상 변화 α 의 값만큼 이동한 것으로 $z_{fringe} = z_m - \alpha/2k_0$ 로 표현된다. 위상

정점은 2.1 절에서 설명한 광 위상 간섭법의 위상 측정법과 같은 방식으로, 가시도 정점에 비하여 우수한 정밀도를 갖는다. 하지만, 위상 정점은 가시도 정점을 기준으로 계산되어, 가시도 정점의 정확도에 크게 의존하는 단점을 갖는다.

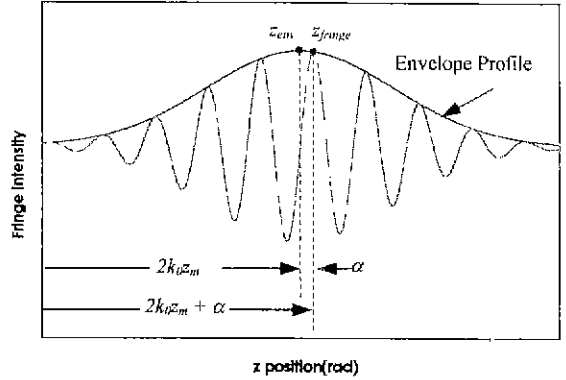


그림 1. 백색광 간섭무늬

3. 주사형 광 간섭계 장치

3.1 주사형 간섭계 장치

2장에서 설명한 바와 같이, 광 위상 간섭법과 백색광 주사 간섭법은 같은 광학계에 조명광의 파장 대역을 조절함으로써 구분된다. 광 위상 간섭법은 nm 이하의 고정밀도를 갖는 반면, 2π -

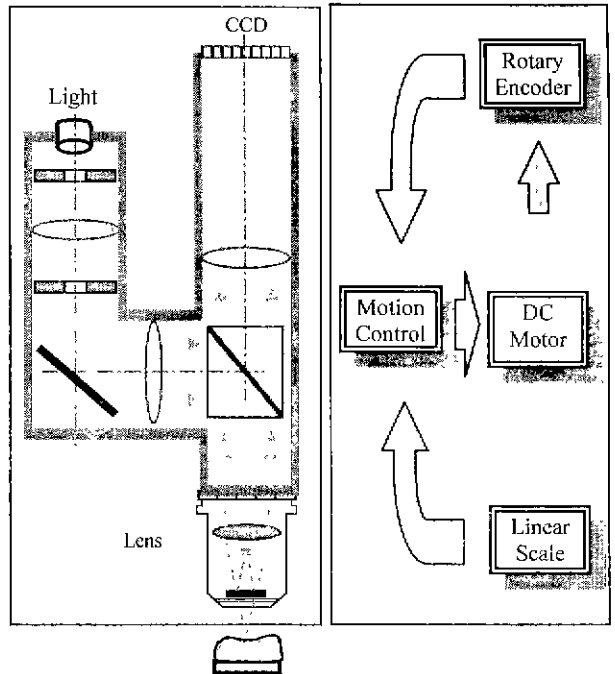


그림 2. 주사형 간섭계 장치

모호성의 문제로 측정 단차가 $\lambda/4$ 이하로 제한된다. 백색광 주사 간섭법은 측정 높이의 제한이 없는 반면, 측정 정확도가 구동부의 오차에 크게 영향을 받는 단점을 갖는다. 두 간섭법을 하나의 광학계에서 구현하려면, 광 위상 간섭법을 위하여 nm 수준의 구동 정밀도를 갖는 PZT와 백색광 주사 간섭법에 적합한 수 mm 구동 행정의 DC 모터를 모두 장착하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 DC 모터를 이용하여 광 위상 간섭법과 백색광 주사 간섭법을 모두 구현하는 간섭계 장치와 이에 적합한 위상 측정 알고리즘을 소개한다. 그림 2는 개발한 간섭계로서, 간섭 대물렌즈를 이용한 광학계를 DC 모터로 제어하는 방식이다. 모터에는 구동 정밀도를 높이기 위해 100:1 감속기를 장착하였고, 이로부터 0.83nm의 구동 분해능을 획득하였다. 아울러, 수 mm의 긴 행정에 대한 위치 정밀도를 보장하기 위하여 50nm 분해능의 Linear Scale을 위치 검출 센서로 사용하였다.

위의 장치에서 백색광 조명을 사용하면, 바로 백색광 주사 간섭계가 구현된다. 영상 획득 속도인 30Hz를 기준으로 약 $2.8\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 구동 속도가 결정된다. 획득한 백색광 간섭무늬의 정점 검출 알고리즘은 계산속도가 매우 빠르고, 외부 교란에 강인한 것으로 알려진 2차 다항식 맞춤법[5]을 이용하였다. 그림 3은 동전에 새겨진 '9'자의 측정 결과로 약 $63\mu\text{m}$ 의 높이를 갖는 것으로 확인된다.

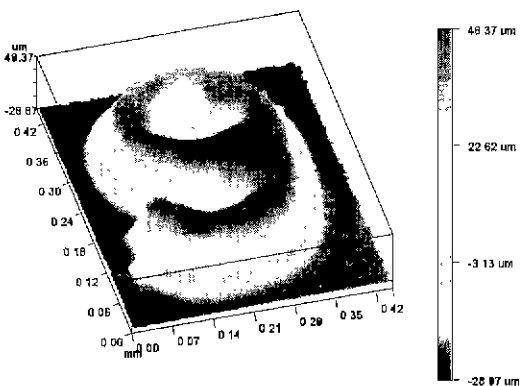


그림 3. 백색광 주사 간섭계를 이용한 동전 형상 측정 결과

3.2 푸리에 변환법을 이용한 광 위상 계산

그림 2의 간섭계 장치에 단색광 조명을

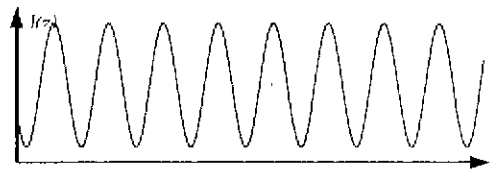
가함으로써, 광 위상 간섭법을 구현할 수 있다. 일반적인 위상 계산법은 구동 간격을 $\lambda/8(\approx 75\text{nm})$, $\lambda/10(\approx 60\text{nm})$ [4] 등으로 결정하여 산출된 것으로, 이와 같은 방법들은 정확한 구동 메커니즘을 필요로 한다. 구동 시 오차가 발생하면 이는 바로 측정 오차로 연결되어 수 nm의 측정 오차 값을 유발한다. 이를 최소화 하는 A-Bucket 알고리즘[6]이 쓰이고 있지만, 이 알고리즘 역시 구동 오차가 심한 경우, 오차가 발생한다.

본 연구에서 개발한 간섭계 장치는 DC 모터를 이용한 주사 방식(Scanning)을 택하였는데, 주사 방식은 스테핑 방식에 비해 속도가 빠르고, 간섭 신호를 안정적으로 받는 장점을 갖는다[4]. 하지만, 모터의 구동 정밀도는 nm 수준의 PZT와 비교하여 현격히 떨어지므로, 정확한 구동 정도를 요구하는 기존의 위상 계산 알고리즘을 적용할 경우, 매우 큰 측정 오차가 발생한다.

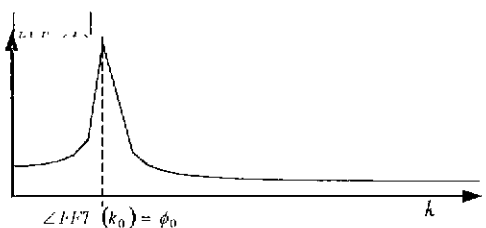
이러한 구동 오차의 영향을 최소화 하기 위하여 본 연구에서는 푸리에 변환법을 이용한 위상 계산 알고리즘을 제안하고, 이를 이용하였다. 식(2)의 간섭무늬 방정식에서 배경광 성분 I_0 를 무시하고, 가시도 함수 $\gamma(z)$ 를 일정한 값으로 가정하면, 이의 푸리에 변환은 다음과 같이 표현된다.

$$FFT[I] = \frac{I_0}{2} [e^{i\phi_0} \delta(k - k_0) + e^{-i\phi_0} \delta(k + k_0)] \quad (4)$$

식(4)에서 측정 위상 ϕ_0 는 광원의 중심 주파수 k_0 에서의 위상과 일치함을 확인할 수 있다. 그림 4(a)와 같은 광 간섭무늬를 푸리에 변환하면, 이는 그림 4(b)와 같이 주파수 k_0 에 최대값을 갖는



(a) 8~9 주기의 간섭무늬



(b) 획득한 간섭무늬의 푸리에 변환

그림 4. 푸리에 변환법을 이용한 광 위상 계산

형태를 갖고, 이 위치에서의 위상은 ϕ_0 와 같다.

푸리에 변환법은 기존의 알고리즘이 한 주기의 간섭무늬만을 획득하여 이용하는 반면, 여러 주기의 간섭무늬를 획득하여 활용하는 장점을 갖는다. 많은 수의 영상 획득은 외부 교란에 강인한 것이 일반적인데[7], 특히 푸리에 변환법은 주파수 별로 외란을 분리 시키는 장점을 갖는다. 아울러, 광원의 파장을 주파수 영역에서 검출하므로, 기존의 알고리즘들이 겪는 보정 오차(Calibration Error)를 원천적으로 해결한다. 결국, 푸리에 변환법을 이용하여, DC 모터의 불안정한 구동의 영향을 최소화 시키며 위상을 계산할 수 있다. 그림 5 는 VLSI Corp 에서 제작한 85.5nm 표준 단차 시편의 측정 결과로서, 단차 값을 85.4nm 로 계산한다.

4. 결론

DC 모터를 이용하여 광 위상 간섭법과 백색광 주사 간섭법의 주사 방식에 적합한 구동 장치를 구현하였다. 이 장치는 두 간섭법에 PZT 와 DC 모터를 별도로 적용하는 기존의 방법에 비하여 간단한 장점을 갖는다. 백색광 주사 간섭법의 경우, 2.8 μ m/sec 의 정속 구동으로 μ m ~ mm 영역의 3D 형상을 측정한다. 하지만, DC 모터는 nm 수준의 높은 위치 정밀도가 요구되는 광 위상 간섭법에 적용이 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 푸리에 변환법을 이용하여 구동 오차에 강인한 위상 계산법을 제안하고 이를 적용하였다. 푸리에 변환법은 기존의 알고리즘이 갖는 보정 오차의 영향을 완전히 제거하고, 외부 교란에 강인한 특징을 갖는다. 실험에 의해 85.5nm 의 표준 단차 시편을 0.1nm 이하의 오차로 측정함을 보였다.

참고문헌

1. G. Kino, S. Chim, "The Mirau correlation microscope," *Applied Optics*, **29**(26), 3775-3783, 1990
2. P. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces," *Applied Optics*, **32**(19), 3438-3441, 1993
3. P. Groot, L. Deck, "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms," *Optics Letters*, **18**(17), 1462-1464, 1993
4. D.Malacara, *Optical Shop Testing*, John Willey & Sons, pp501-598
5. M.C.Park, S.W.Kim, "Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms", *Optical Engineering*, **39**(4), pp952-959, 2000
6. I.B.Kong, S.W.Kim, "General algorithm of phase-shifting interferometry by iterative least square fitting", *Optical Engineering*, **34**(1), pp183-188, 1995
7. P.Groot, "101-frame algorithm for phase shifting interferometry", *Proceedings of SPIE*, **3098**, pp283-292, 1997

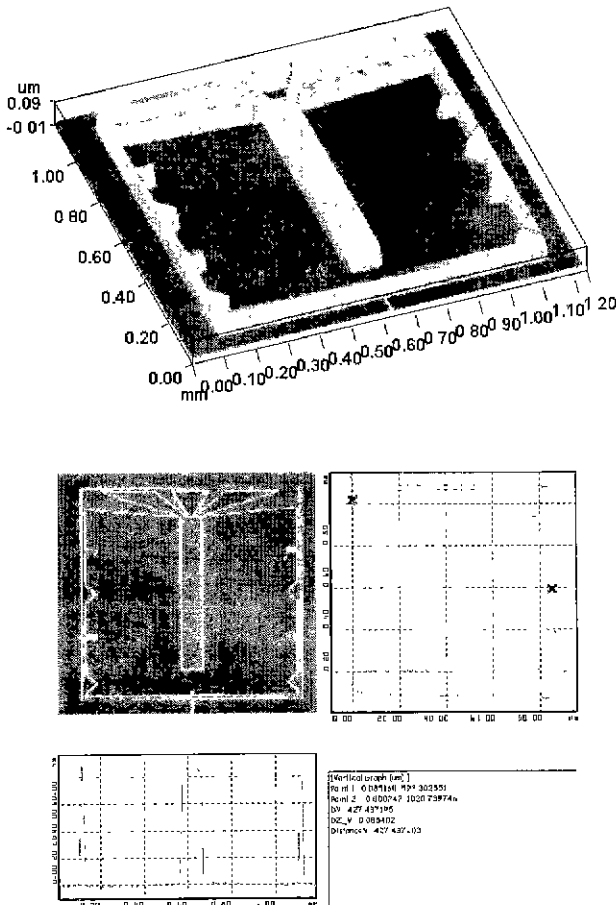


그림 5. 85.5nm 의 표준 단차 시편 측정 결과