

다중 환경에서의 최적화 기법을 이용한 레이저 시스템의 비선형성 보정

홍민석★, 이우람★, 최인성★, 허건행\*, 김종을\*, 유관호†  
 ★ 성균관대학교 석사과정, \* 성균관대학교 학부과정, † 성균관대학교 부교수

Compensation of Laser system using Optimization Methods in Multiple Environments

Min-suk Hong★, Uram Lee★, Insung Choi, Gunhang Heo\*, Jong-eul Kim\*, Kwanho You†  
 ★ Sungkyunkwan Univ. master course,  
 \* Sungkyunkwan Univ. bachelor course, † Sungkyunkwan Univ. associate professor.

**Abstract** - 나노 기술의 급격한 발달에 따라 나노미터 수준의 정밀도를 갖는 초정밀 측정 기술이 여러 분야에서 요구되고 있다. 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 초정밀 위치 측정을 하려고 할 때, 광학기기 자체의 불안전환에서 발생하는 비선형성 오차는 주요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 헤테로다인 레이저 간섭계 시스템에서의 비선형성을 보정해 주기 위해 적용형 알고리즘을 제안한다. 기준 입력인 정전용량센서와 최소자승법을 이용하여 보정변수를 구한 후, 반복 최소자승법을 이용하여 비선형성에 따른 타원 위상을 비선형성이 보정된 원 위의 위상으로 사상시킨다.

1. 서 론

여러 측정기기 중에서 레이저를 광원으로 한 간섭계는 파장을 이용한 길이 측정, 간섭효과를 이용한 긴 측정거리(대략 1nm에서 60nm까지), 고주파 안정도에 따른 높은 반복 정밀도와 같은 여러 장점을 갖추고 있어, 초정밀 측정 장치로서 널리 사용되고 있다[1]-[2].

나노 기술에 대한 연구가 지난 몇 년 동안 진행되면서 수 나노급의 정밀도를 가지며, 동시에 대변위의 거리측정이 가능한 레이저 간섭계가 학계 및 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 그러나 레이저 간섭계는 측정 환경변화, 설치 상태, 장비 고유의 에러에 의해 다양한 오차 요인을 갖고 있다. 지금까지 대부분의 관련 연구는 이러한 오차 요인을 줄이고 레이저 간섭계의 측정 정밀도를 높이기 위한 방법으로 시스템을 구성하고 있는 각 부분들의 개별적인 오차를 최소화하는데 초점을 맞추었다 [3]-[4]. 이런 노력에도 불구하고 각 부분들이 측정을 위해서 시스템으로 구성되면 나노급의 정밀도를 유지하는데 방해가 되는 오차는 여전히 존재하게 마련이다. 레이저 간섭계를 판매하는 세계적인 업체들도 Air 센서를 이용하여 Edlen 공식으로 공기 굴절률을 계산하여 보상하는 초장기 방법에서 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Air 센서를 이용하여 보정하는 측정 방법과는 달리, 레이저 간섭계 시스템과 비선형성 오차에 최적화 기법을 적용하여 레이저 간섭계의 정밀도를 향상시키고자 한다. 즉, 최적화 기법을 이용하여 비선형성에 의한 오차를 보정해 줌으로서 헤테로다인 레이저 간섭계의 측정 정밀도를 향상하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 비선형성이 포함된 헤테로다인 간섭계에 관하여 설명하고, 논문에서 제안한 최적화 기법을 이용한 비선형성 제어에 대해서 살펴본다. 3장에서는 보정되지 않은 레이저 데이터 값과 제안된 방법을 사용한 모의실험 결과를 비교 분석하며, 4장에서는 논문의 결론에 대해 정리하였다.

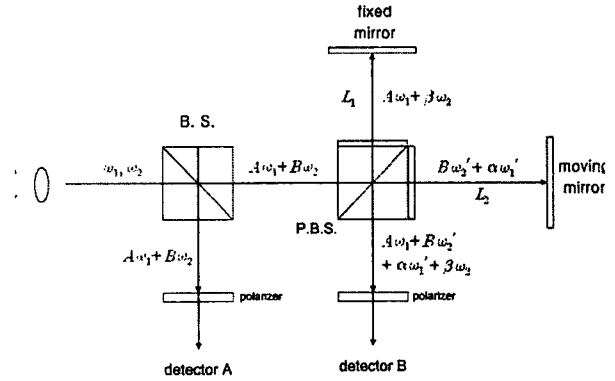
2. 본 론

2.1 헤테로다인 레이저 간섭계

헤테로다인 레이저 간섭계는 직교편광되고, 서로 주파수가 다른 두 광원을 사용한다. 레이저는 편광분리기를 통과하면서 기준 신호(reference signal,  $A\omega_1$ )와 측정 신호(measurement signal,  $B\omega_2$ )의 두 빔으로 나누어져 각기 고정 반사경과 이동 반사경에 반사되어 다시 편광분리기를 통해 재결합된 후 검출기 A, B에서 수집된다. 이렇게 편광분리기를 통해 분리되고 재결합되는 과정에서 주파수 혼합이 발생한다.

그림 1은 주파수 혼합을 고려한 헤테로다인 레이저 간섭계를 나타낸 것이다. 여기서  $\omega_1'$ 와  $\omega_2'$ 는 각각  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 에 도플러 효과를 고려한 주파수,  $A, B, \alpha, \beta$ 는 진폭을 의미한다.

검출기 A와 B에 발생하는 전기장의 세기를 DC 성분과 준 DC 성분을 분리하기 위해 고대역 통과필터를 사용하면 다음과 같은 식(1)로 표현 가능하다.



<그림 1> 비선형성을 고려한 헤테로다인 레이저 간섭계

$$I_x \propto AB \cos[\Delta\omega t]$$

$$I_m \propto \cos(\Delta\omega t + \phi) + \Gamma_1 \cos(\Delta\omega t) + \Gamma_2 \cos(\Delta\omega t - \phi) \quad (1)$$

여기서  $\Gamma_1 = (A\beta + B\alpha)/(AB)$ ,  $\Gamma_2 = (\alpha\beta)/(AB)$ ,  $\phi = \psi t$ 이다. 그리고  $\Delta\omega$ 는 두 주파수의 차이  $\omega_2 - \omega_1$ ,  $\psi$ 는 도플러효과에 의한 주파수 차이( $\psi = \omega_2' - \omega_2 = \omega_1' - \omega_1$ )를 의미한다. 그리고  $\phi = \psi t$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi \approx \frac{4\pi n(L_2 - L_1)}{\lambda} = \frac{4\pi n\Delta L}{\lambda} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 의 평균 파장을 나타내고  $n$ 은 굴절률(refractive index)을 의미한다.  $\Delta L$ 은 고정경로와 이동경로 사이의 차이( $\Delta L = L_2 - L_1$ )이다. 식(3)을 통해서 위상과 거리와의 관계를 알 수 있다.

식 (1)의  $I_x$ 을 0°와 90° 위상천이(phase shift)하여  $I_m$ 의 신호와 서로 곱해주고 난 뒤, 저대역 통과필터에 통과시켜 최종적으로  $I_x$ ,  $I_y$ 를 얻을 수 있다.

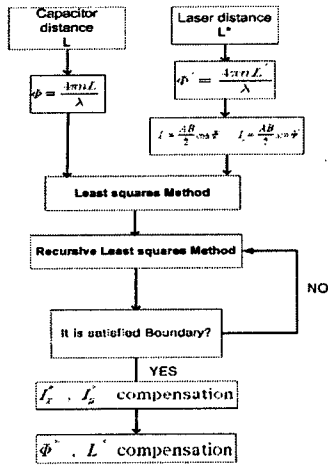
$$I_x = \frac{AB + \alpha\beta}{2} \cos \phi + \frac{A\beta + \alpha B}{2}$$

$$I_y = \frac{AB - \alpha\beta}{2} \sin \phi \quad (3)$$

2.2 최적화 기법을 이용한 비선형성 보정

이 장에서는 최적화 기법인 최소자승법과 반복최소자승법을 이용해서 레이저 시스템의 비선형성을 보정하는 방법을 알아본다. 최적화 기법을 이용한 비선형성 보정의 전체적인 flow chart는 그림 2와 같다.

정전용량센서에서 측정된 거리  $L$ 을 위상  $\phi$ 로 변환하기 위해 식 (2)를 이용한다. 그림 2에서  $\phi$ 는 레이저 간섭계로부터 측정된 위상이다.  $I_x$ 과  $I_y$ 을 정전용량 센서의 위상  $\phi$ 에 관한 식으로 표현하면 다음 식(4)와 같다.



〈그림 2〉 최적화 기법을 이용한 비선형성 보정 flow chart.

$$\begin{aligned} \hat{I}_x &= \frac{AB + \alpha\beta}{2} \cos \phi + \frac{AB + \alpha\beta}{2} = a \cos \phi + c \\ \hat{I}_y &= \frac{AB - \alpha\beta}{2} \sin \phi = b \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 비선형성을 나타내는 변수이다. 최적 상태라면  $\hat{I}_x$ 와  $\hat{I}_y$ 는  $AB/2$ 를 반지름으로 갖는 원을 그려야 한다. 하지만 식 (4)에서 볼 수 있듯이 비선형성 오차로 인해 타원의 형태를 가지게 된다. 만일 타원상의 점을 원으로 옮길 수 있는 특정한 보정변수를 찾았다면 비선형성을 보정할 수 있을 것이다.

보정변수  $a, b, c$ 를 찾기 위해 최적화기법인 최소자승법과 반복최소자승법을 사용한다. 먼저 정해진 상수  $K$ 개의 자료를 이용하여 최소자승법을 적용한다.

$$\begin{aligned} Yx &= m \\ x &= (Y^T Y)^{-1} Y^T m \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $m = [\hat{I}_x \ \hat{I}_y]^T$ ,  $Y = [\cos \phi \ 1]$  또는  $[\sin \phi \ 1]$  그리고  $x = [a \ b]^T$  또는  $[c]$ 이다. 이렇게 구해진 보정변수  $a, b, c$ 는 최종적으로 정해진 값이 아니다. 초기의  $K$ 개의 자료에 의한 보정변수이기 때문에 최적의 보정변수가 아닐 가능성이 있기 때문에 새로운  $Q$ 개의 자료를 반복최소자승법에 사용해서 최적의 보정변수를 구하도록 한다.  $P_k^{-1} = Y^T Y$ 와 최소자승법에서 얻은 보정변수  $x$ 를 반복최소자승법에 적용시킨다.

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= P_k - P_k Y_{k+1}^T (I + Y_{k+1} P_k Y_{k+1}^T)^{-1} Y_{k+1} P_k \\ x^{(k+1)} &= x^{(k)} + P_{k+1} Y_{k+1}^T (b^{(k+1)} - Y_{k+1} x^{(k)}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 새로운 보정 변수  $a, b, c$ 를 찾아낸다. 이 새로운 보정변수( $a_1, b_1, c_1$ )와 이전의 보정변수( $a_2, b_2, c_2$ )를 비교하여 일정한 경계값보다 작아질 때까지 반복최소자승법으로 보정변수를 갱신하는 작업을 수행한다.

$$\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2} < \epsilon \quad (7)$$

구해진 최적의 보정변수  $a, b, c$ 를 이용해서 타원 위의 점  $\hat{I}_x$ 와  $\hat{I}_y$ 를 원에 위치한  $I_x^*$ 와  $I_y^*$ 로 옮길 수 있다.

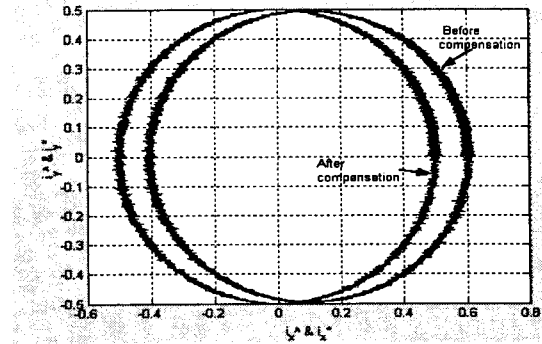
$$I_x^* = \frac{\hat{I}_x - c}{2a} AB, \quad I_y^* = \frac{\hat{I}_y}{2b} AB \quad (8)$$

이렇게 구해진  $I_x^*$ 와  $I_y^*$ 를 이용해서 보정된 위상인  $\phi^*$ 와 보정된 측정거리  $L^*$ 를 구할 수 있다.

$$\phi^* = \tan^{-1} \left( \frac{I_y^*}{I_x^*} \right), \quad L^* = \frac{\phi^* \lambda}{4\pi n} \quad (9)$$

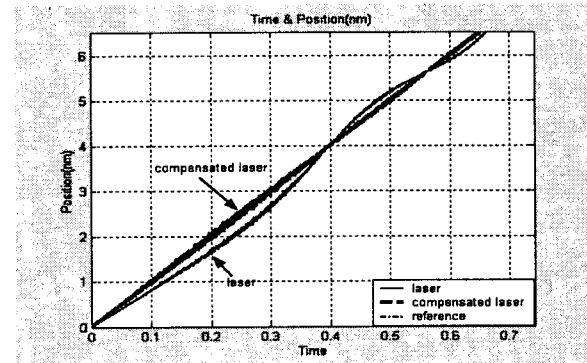
### 3. 모의실험

실험에서 사용된  $\omega_A, \omega_B$ 의 진폭  $A, B$ 는 1(V), 굴절률  $n$ 은 1.0000 0026654516, 그리고 주파수는 200(kHZ)이다. 경계값  $\epsilon$ 는 0.05이고,  $K$ 는 30,  $Q$ 는 5로 모의 실험하였다.



〈그림 3〉 보정된 레이저 간섭계의 위상 도형.

그림 3은 이동하는 목표물에 대해서 잡음이 들어간 임의의  $I_x, I_y$  값을 나타낸 것이다. 횡축이 긴(중심점 (0.07,0)) 타원의 위상을 갖는 레이저 값을 최적화 기법을 이용해서 보정하면, 레이저 값은 비선형성이 보정된 원(중심점 (0,0)) 위상으로 사상된다는 것을 알 수 있다. 즉, 제안된 방법에 의해서 원래의 레이저 값보다 더 나은 성능을 갖는다는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 최적화 기법을 이용한 실험결과.

그림 4는 시간에 따른 목표물의 이동을 나타낸 것이다. 그림 4와 같이 레이저 값은 기준 신호가 되는 정전용량센서의 거리 값보다 출렁 거린다는 것을 알 수 있다. 그러나 최적화 기법을 이용하여 보정한 레이저 값은 기준 신호를 잘 따라가는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 정밀 위치 측정을 하려고 할 때, 레이저 간섭계의 비선형성 오차는 큰 제한요소이다. 본 논문을 통해 최적화 기법(최소자승법, 반복최소자승법)을 이용하여 새로운 비선형성 오차 보정 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 적은 시간과 자료로 높은 보상효과를 얻을 수 있다. 비선형성이 포함된 레이저 간섭계의 실험 결과와 제안된 방법을 적용한 레이저 간섭계의 실험 결과를 비교해 보았을 때, 보정 방법을 적용한 것이 원래의 시스템보다 좋은 성능을 나타내며, 불안정한 레이저 측정 결과를 현저히 개선시킨다는 것을 알 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] N. Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry," Meas. Sci. Vol.4, pp.907-925, 1993.
- [2] S. Cosijns, H. Haitjema, and P. Schellekens, "Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry," Precision Engineering, Vol.26, pp.448-455, 2002.
- [3] A.E. Rosenbluth and N. Bobroff, "Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometers", Precision Eng, Vol. 12, pp.7-11.
- [4] P. Heydemann Peter, "Determination and correction of quadrature fringe measurement error in interferometers", Appl. Opt, Vol. 20, pp.3382-3384.

본 연구는 과학 기술부 특정 기초 연구 (과제번호: R01-2004-000-10338-0) 지원으로 수행되었음.