신경회로망을 이용한 레이저 간섭계 정밀도 향상†

Accuracy improvement of laser interferometer with neural network

이우람(*), 허건행(**), 홍민석(*), 최인성(*), 유관호(***)
Woo-Ram Lee, Gun-Hang Heo, Min-Suk Hong, In-Sung Choi, Kwan-Ho You

Abstract - In this paper, we propose an artificial intelligence method to compensate the nonlinearity error which occurs in the heterodyne laser interferometer. Some superior properties such as long measurement range, ultra-precise resolution and various system set-up lead the laser interferometer to be a practical displacement measurement apparatus in various industry and research area. In ultra-precise measurement such as nanometer or subnanometer scale, however, the accuracy is limited by the nonlinearity error caused by the optical parts. The feedforward neural network trained by back-propagation with a capacitive sensor as a reference signal minimizes the nonlinearity error and we demonstrate the effectiveness of our proposed algorithm through some experimental results.

Key Words : Nonlinearity, laser interferometer, artificial intelligence compensation, capacitive displacement sensor

1 장 서론

레이저 간섭계는 넓은 측정범위, 거의 무한대의 분해능, 설치의 다양성 등의 장점으로 인해 반도체 재작 공정을 비롯한 여러 산업 및 연구 분야에서 사용·연구되고 있다.[1] 하지만 레이저 간섭계에도 -일반적인 경우에서처럼- 측정 정밀도를 저하시키는 요소들이 존재하고 있다. 우선 레이저 헤드의 안정화, 정확한 레이저 간섭계의 설치와 같은 기초적인 문제들이 발생한다. 만약 이러한 문제들이 충분히 해결되었다고 한다면, 레이저 간섭계의 정밀도에 주된 영향을 미치는 것은 잡음과 비선형성이다.[2] 잡음은 진동, 기온의 변화, 공기의 흐름과 같은 주로 환경적 요인에 의해 발생하는 오차이다. 잡음은 일반적으로 레이저 간섭계를 외부와 격리시키거나 정밀 측정 센서를 이용하는 것으로 그 영향을 최소화 할 수 있다. 또 다른 요인인 비선형성은 레이저의 비직교성, 타원회와 편광분리기에서의 불완전한 분리와 같이 광학장비 자체에서 생기는 것이다.[3] 비선형성에 의한 오차는 나노미터 이하의 초정밀 측정의 경우 더욱 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 인공지능 기법을 이용하여 헤테로다인 간섭계로부터 발생하는 비선형성을 보정하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 역전파(back-propagation) 방식으로 훈련된 전방향(feedforward)신경회로망이 사용된다.

우선 정전용량센서의 출력을 목적신호로, 레이저 간섭계의 출력을 측정신호로 정한다. 두 신호를 이용해서 신경회로망을 만든다. 그리고 역전파 방식의 훈련을 통해 최적의 보정 신경회로망을 구한다. 이렇게 훈련된 신경회로망을 사용하여 레이저 간섭계의 비선형성 오차를 최소화할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 레이저 간섭계에서 발생하는 비선형성에 대해 설명한다. 신경회로망을 이용한 비선형성 오차 보정은 3장에서 다룬다. 4장의 실험결과를 통해 제안한 알고리즘의 효과를 입증하고, 5장에서 결론을 내린다.

2 장 헤테로다인 레이저 간섭계에서의 비선형성

헤테로다인 레이저 간섭계는 서로 주파수가 다르고, 직교 편광되는 두 광원을 사용한다. 레이저는 편광분리기를 통과하면서 기준 신호(reference signal, Af_1)와 측정 신호(measurement signal, Bf_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. 즉, 고정된 기준 경로(L_1)를 지나는 빔(Af_1)에 주파수 f_2에 의한 성분인 βf_2가 혼합되고, 측정 경로(L_2)에서는 주파수 f_1의 성분인 $\alpha f_1'$이 혼합된다.[4] 그림 1은 주파수 혼합을 고려한 헤테로다인 레이저 간섭계를 나타낸 것이다. 여기서 f_1' 와 f_2' 는 각각 f_1 과 f_2 에 도플러 효과를 고려한 주파수, A, B, α 그리고 β 는 진폭을 의미한다.

검출기 A와 B에서 발생되는 전기장의 세기는 각각 다음과 같다.[5]

$$E_{A1} = (1/\sqrt{2})A\exp[i(f_1 t + \Phi_A)]$$
$$E_{A2} = (1/\sqrt{2})B\exp[i(f_2 t + \Phi_B)] \quad (1)$$

저자 소개
* 準 會 員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程
** 準 會 員 : 成均館大學 電子電氣學科 學士課程
*** 正 會 員: 成均館大學 電子電氣學科 副敎授 · 工博

†본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2004-000-10338-0(2005))지원으로 연구되었음.

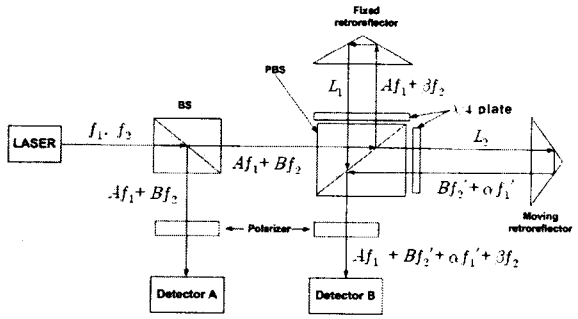

그림 1. 주파수 혼합을 고려한 헤테로다인 레이저 간섭계

$$E_{B1} = A\exp[i(f_1 t + \Phi_A)] + \beta\exp[i(f_2 t + \Phi_\beta)]$$
$$E_{B2} = B\exp[i(f_2' + \Phi_B)] + \alpha\exp[i(f_1' t + \Phi_\alpha)]$$

Φ_A와 Φ_B는 초기 위상을 의미한다. 따라서 검출기 A와 B에서 발생되는 전기장의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_r &\propto (E_{A1}+E_{A2})(E_{A1}+E_{A2})^* \\ &= \frac{1}{2}(A^2+B^2) + AB\cos[\Delta\omega t + (\Phi_B - \Phi_A)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_m &\propto (E_{B1}+E_{B2})(E_{B1}+E_{B2})^* \\ &= \frac{1}{2}(A^2+B^2+\alpha^2+\beta^2) + AB\cos[(\Delta f+\psi)t + (\Phi_B - \Phi_A)] \\ &+ A\beta\cos[\Delta f t + (\Phi_\beta - \Phi_A)] + B\alpha\cos[\Delta f t + (\Phi_B - \Phi_\alpha)] \\ &+ A\alpha\cos[\psi t + (\Phi_\alpha - \Phi_A)] + B\beta\cos[\psi t + (\Phi_B - \Phi_\beta)] \\ &+ \alpha\beta\cos[(\Delta f+\psi)t + (\Phi_\beta - \Phi_\alpha)] \end{aligned}$$

여기서 Δf는 두 주파수의 차이 $f_2 - f_1$, ψ는 도플러효과에 의한 주파수 차이($\psi = f'_2 - f_2 = f'_1 - f_1$)이다. 그리고 $\Delta\Phi = \psi t$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\Phi \approx \frac{4\pi n(L_2 - L_1)}{\lambda} = \frac{4\pi n \Delta L}{\lambda} \quad (3)$$

여기서 λ는 f_1과 f_2의 평균 파장을 나타내고 n은 굴절률(refractive index)을 의미한다. ΔL은 고정경로와 이동경로 사이의 차($\Delta L = L_2 - L_1$)이다. 식(3)을 통해서 위상과 거리와의 관계를 알 수 있다.

식 (2)에서 H_m의 DC 성분과 준 DC 성분을 분리하기 위해 고대역 통과필터를 사용한다. 그리고 비선형성을 고려할 때 무시할 수 있는 초기 위상 Φ_A, Φ_B, Φ_α, Φ_β를 생략하여 위 식을 다시 표현하면 다음과 같이 표현 가능하다

$$H_m \propto \cos(\Delta f t + \phi) + \Gamma_1\cos(\Delta f t) + \Gamma_2\cos(\Delta f t - \phi) \quad (4)$$

여기서 $\Gamma_1 = (A\beta + B\alpha)/(AB)$, $\Gamma_2 = (\alpha\beta)/(AB)$, $\phi = \psi t$ 이다. 식(4)에서 첫 번째 항을 제외한 두 번째 항($\Gamma_1\cos(\Delta f t)$)과 세 번째 항($\Gamma_2\cos(\Delta f t - \phi)$)은 비선형성 요소이다. 이 두 항으로 인해 일차위상오차(first order phase error)와 이차위상오차(second order phase error)가 발생하여 레이저 간섭계의 측정 길이가 왜곡된다.

식 (2)의 H_r을 0 와 90 위상천이(phase shift)하여 H_m의 신호와 서로 곱해주면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} H_m H_r &= \cos(\Delta f t)[AB\cos(\Delta f t + \Phi) \\ &+ (A\beta + B\alpha)\cos(\Delta f t) + \alpha\beta\cos(\Delta f t - \Phi)] \\ H_m H_r \exp(j\pi/2) &= \sin(\Delta f t)[AB\cos(\Delta f t + \Phi) \\ &+ (A\beta + B\alpha)\cos(\Delta f t) + \alpha\beta\cos(\Delta f t - \Phi)] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 저대역 통과필터에 통과시켜 최종적으로 H_x, H_y를 얻을 수 있다.

$$H_x = \frac{AB+\alpha\beta}{2}\cos\Phi + \frac{A\beta+\alpha B}{2} \quad (6)$$
$$H_y = \frac{AB-\alpha\beta}{2}\sin\Phi$$

3 장 신경회로망을 이용한 비선형성 오차 보정

신경회로망은 특유의 학습능력으로 인해 복잡한 고차의 시스템을 단수하게 근사시킬 수 있고, 시스템의 불확실성과 외부 잡음에 강인한 시스템 모델을 만들 수 있는 강점을 가지고 있다. 이러한 이유로 신경회로망은 비선형 모델링과 동적 시스템 식별(dynamic system identification) 부분에서 널리 사용되고 있다.

이 장에서는 신경회로망을 기반으로 한 헤테로다인 레이저 간섭계의 비선형성 보정 알고리즘에 대하여 다룬다. 레이저 간섭계의 비선형성 오차를 최소화하기 위해 정전용량센서의 위상정보를 기준신호로, 신경회로망 역전파 방식(the neural network back-propagation, NNBP)을 훈련방식으로 사용한다. 정전용량센서에서 측정된 거리는 식(3)을 이용하여 위상정보 Φ로 전환된다.

$$\Phi = \frac{4\pi n L}{\lambda}$$

위상 Φ를 통해 기준 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$H_x^* = \frac{AB}{2}\cos\Phi^* \quad (8)$$
$$H_y^* = \frac{AB}{2}\sin\Phi^*$$

식 (6)에서 살펴본 것처럼, 레이저 간섭계의 신호는 다음과 같다.

$$H_x = \frac{AB}{2}\cos\hat{\Phi} \quad (9)$$
$$H_y = \frac{AB}{2}\sin\hat{\Phi}$$

신경회로망을 이용하여 비선형성에 의한 오차를 줄이기 위

해 NNBP를 수행한다. 여기에 사용되는 목적함수는 정전용량 센서와 레이저 간섭계로부터 얻어진 신호들 사이의 오차를 최소화하는 방식으로 정할 수 있다.

$$E=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{c}\|(H_x^*-H_x)+(H_y^*-H_y)\|^2 \qquad (10)$$

여기서 H_x^*, H_y^*는 정전용량센서로부터의 기준신호, H_x, H_y는 레이저 간섭계로부터의 측정신호이고 c는 샘플 데이터의 수이다. 신경회로망 내의 가중치들은 다음의 the gradient descent method에 의해 계산·갱신된다.

$$w_j^{t+1}=w_j^t+\eta\cdot(-\frac{\partial E}{\partial w}) \qquad (11)$$

여기서 η는 학습률이고, $-\frac{\partial E}{\partial w}$는 the chaining rule에 의해 도출된다.

입력 데이터와 목적 데이터를 이용한 NNBP 방식에 따른 반복적으로 학습을 통해 신경회로망의 가중치와 문턱값이 결정되어진다. 사용되는 입력과 목적 데이터는 $H=[H_x, H_y]$과 $O=[H_x^*, H_y^*]$이다.

학습은 학습 입력 데이터 H에 포함된 위상정보 Φ와 학습 목적 데이터 O의 위상정보 Φ^* 사이의 오차를 최소화하는 방향으로 진행된다. 이때 히든 레이어에는 log sigmoidal neurouns가 사용되었다.

식 (11)의 자승오차를 이용하여 구해진 신경회로망 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi=NN(H_x, H_y) \qquad (12)$$

NNBP의 과정이 모두 이루어져 신경회로망이 완성되면 이후에 입력되어지는 데이터 H_x, H_y에 대해 보정된 위상 Φ를 도출할 수 있다.

4 장 실험결과

이 장에서는 실험을 통해 제안된 보정 알고리즘의 효과를 증명할 것이다. 원래의 레이저 간섭계의 출력 신호와 보정된 출력 신호의 성능을 비교함으로써 보정 알고리즘의 우수성을 증명한다. 보다 명확하게 보정 알고리즘의 성능을 알아보기 위해 정전용량센서를 기준으로 하여 보정 전후를 비교하였다. 실험에서 사용된 ω_A, ω_B의 진폭 A, B는 1(V), 굴절률 n은 1.00000026654516, 그리고 평균파장(λ)는 0.6329912(μm)이다.

그림 2는 헤테로다인 레이저 간섭계에 제안된 신경회로망 보정 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 나노 단위의 위치 이동이 가능한 압전변환기(piezo-electirc transducer)를 이용하여 10nm, 100nm 두 고정 위치로 움직이는 스테이지를 구성하여 그 위치를 측정하였다. 가는 실선은 정전용량센서, 점선은 레이저 간섭계 그리고 굵은 실선은 보정된 레이저 간섭계의 측정값을 의미한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 신경회로망을 이용하여 보정을 시작한 이후에는 출력 신호의 출렁임이 감소하였다. 또한 출력 신호의 최고점이 현저하게 낮아

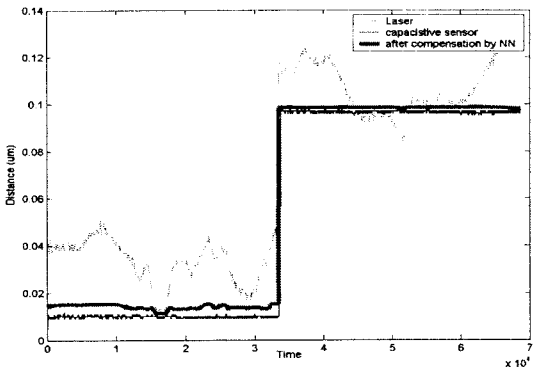

그림 2. 보정 전·후의 측정 결과치 비교

지는 것을 볼 때 적응성 보정 알고리즘이 결과값을 개선하는데 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

5 장 결론

헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 초정밀 위치 측정을 하려고 할 때, 광학기기 자체의 불완전함에서 발생하는 비선형성 오차는 가장 큰 제한요소 중 하나다. 본 논문을 통해 신경회로망을 이용한 새로운 비선형성 오차 보정 알고리즘을 제안하였다. 정전용량센서의 신호와 레이저 간섭계의 신호를 이용하여 신경회로망을 구성·학습 시키고, 이후에 들어오는 새로운 자료들을 완성된 신경회로망으로 보정하였다.

제안된 알고리즘의 성능과 효과를 알아보기 위해 실험을 하였다. 비선형성이 포함된 레이저 간섭계의 측정 결과와 제안된 보정 알고리즘을 적용한 레이저 간섭계의 측정 결과를 비교해 보았을 때, 보정 알고리즘을 적용한 것이 원래의 시스템보다 좋은 성능을 나타내며, 불안정한 레이저 측정 결과를 현저히 개선시켰다.

참 고 문 헌

[1] Eom, T. B. and Kim, J. Y. and Jeong, K. W., "The dynamic compensation of nonlinearity in a homodyne laser interferometer", Meas. Sci. Technol., 2001

[2] Rosenbluth, A. E. and Bobroff, N. "Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometer" Precision Eng. 12, pp. 7-11, 1990

[3] Wu, C. M. and Su, C. S., and Peng, G. S,. "Correction of nonlinearity in one ferquency optical interferometry" Meas. Sci. Technol. 7, pp. 520-524, 1996

[4] Augustyn, W. and Davis, P. "An analysis of polarization mixing errors in distance measuring interferometers" J. Vac. Sci. Technol. B 8, pp. 2032 2036, 1990

[5] Wu, C. M. and Su, C. S."Nonlinerity in measurements of length by optical interferometer", Meas. Sci. Technol., 7, pp. 62-68, 1996