

고체배 알고리즘을 이용한 초정밀 위치측정기술 개발

이종혁[#], 배준영^{*}, 이상룡^{**}Development of Ultra-precision Positioning Technology
Using High-resolution Interpolation AlgorithmJong-Hyuck Lee[#], Joon-Young Bae^{*} and Sang-Ryong Lee^{**}

ABSTRACT

Recently, nano-methodology is increasingly important as the ruler for measuring nano-technology, and we applied the linear encoder to nano-methodology. The quadrature output in the linear encoder has an effect on increasing the resolution in some techniques. Already, various interpolation techniques based on the quadrature signal have applied to the precision servo system. In this paper, we propose a new interpolation algorithm for ultra-precision positioning in the low speed with simulation by MATLAB SIMULINK. This method modified previous methods and was properly designed for some given control system. To verify, we first fulfilled the encoder signal test to find main parameters for the signal transformation, then we proved the proposed interpolation algorithm by experiments, which show that the result of the interpolation algorithm corresponds with the measurement of the laser interferometer in 100 nm unit approximately. In addition, we can get more precise measurement by more accurate and noise-free signal. So we need to compensate imperfections in the encoder signal. After that, we will apply this algorithm to nano positioning system.

Key Words : High-resolution interpolation (고체배), Quadrature signal (90°위상 정현파), Linear encoder (리니어 엔코더), Ultra-precision positioning (초정밀 위치결정), Nano-methodology (나노측정학)

기호설명

$AD_{A,B}$ = encoder signals after AD conversion

$AD_{Amax, Bmax}$ = maximum of encoder signals

$AD_{Amin, Bmin}$ = minimum of encoder signals

A_{offset}, B_{offset} = offset of encoder signals

AD_K = gain for the signal transformation

I_{gain} = gain for the position index

I_{offset} = offset for the position index

Q = quadrant with encoder signals

접수일: 2004년 4월 8일; 게재승인일: 2004년 9월 9일

교신저자: (주)메트로닉스 기술연구소

E-mail chuncha97@hotmail.com Tel. (053) 952-2229

* 저장기능대학 메카트로닉스과

** 경북대학교 기계공학과

1. 서론

나노기술은 전자분야, 생명공학, 초정밀기계 등 21세기를 주도할 주요 핵심기술로 다양한 과학 기술분야에서 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 나노기술이 나노미터 크기 또는 변위를 제어해야 하는 기술이라면, 나노측정학은 그 나노기술의 대상에 대한 양들을 관측하고 다룰 수 있는 정밀한 자와 측정기를 제공하는 기반기술이며, 본 논문에서는 이송장치의 미세 이동량을 측정하는 초정밀 위치측정기술에 대해 다루고자 한다.

일반적으로 나노단위의 변위 측정을 위해서, 레이저 파장의 간섭현상을 이용한 레이저 간섭계가 대표적인 측정장치로 이용된다. 레이저는 미터 표준에 직접 소급이 되고 긴 거리를 측정할 수 있으며, 파장이 μm 이하이기 때문에 고분해능을 얻을 수 있다.¹ 하지만 레이저 간섭계는 가격과 설치 장소에 제약을 받으며, 특히 외부환경에 따라서 정확도가 변화하기 때문에 온도와 압력, 습도에 대한 공기 굴절률의 보상이 필요하다. 이에 비해 또다른 측정장치로 리니어 엔코더가 이용되고 있다. 이는 설치가 간편하고 부착되는 재료의 열팽창과 동일 조건으로 온도에 대한 자동적인 보상이 이루어지며, 장착 전 필요한 정밀도 보정이 가능하여 10~100nm 정도의 범위에서 레이저 간섭계와 거의 동등하게 사용될 수 있다.²

이와 더불어 회전을 측정하는 로터리 엔코더 신호의 분해능을 증가시키는 체배 방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며, Phase Locked Loop, 디지털 체배, Phase Encoding 등의 다양한 체배 알고리즘이 개발되었다.³⁻¹⁴ 90도 위상차를 지닌 엔코더의 두 정현파 신호를 각각의 방식에 따라 신호 처리하여 고분해능, 방향 판단, 절대 위치 및 상대 위치 판별 등의 다양한 기능 및 분해능을 향상시킬 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 마이크로미터 단위의 리니어 엔코더 신호를 제안된 소프트웨어적인 체배 알고리즘 통해 복잡한 회로의 구성없이 나노미터 단위의 초정밀 위치측정기술을 실현하고자 한다. 기존 체배 방식의 문제점을 보완한 새로운 방식의 체배 알고리즘을 제안하며, 시뮬레이션과 실험을 통해 성능을 검증하고자 한다.

2. 제안된 고체배 알고리즘

2.1 고체배 응용기술

2.1.1 고체배 알고리즘의 개요

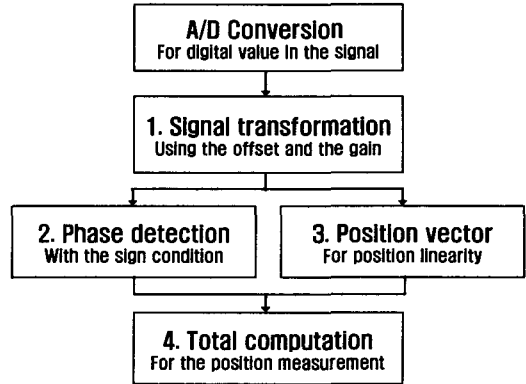


Fig.1 Overview of the proposed interpolation algorithm

제안된 리니어 엔코더의 고체배 알고리즘은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 이송시 직선이송장치에 부착된 엔코더의 90도 위상을 지닌 두 아날로그 정현파 신호는 A/D 변환 후, PC 내에서 신호변환 과정, 상(phase)위치 검출과정, 위치벡터 계산과정, 위치결정 연산과정의 4단계 소프트웨어적인 신호처리과정으로 고체배 알고리즘을 구현하여 최종적인 미소 이송량을 측정하고자 한다. 제안된 체배 알고리즘의 각각의 구성요소들에 관한 구체적인 내용은 다음절에서 다루기로 한다.

2.1.2 신호변환 과정

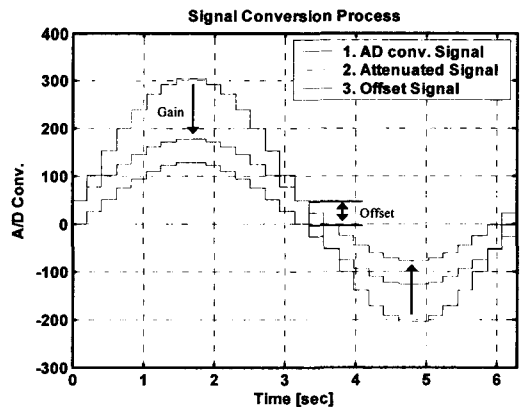


Fig. 2 Signal transformation process

신호변환 과정은 A/D 변환한 후 엔코더의 아날로그 신호를 정현화 하는 과정이다. Fig. 2와 같이 엔코더 신호는 A/D 변환을 통해 디지털 신호로 변환되었지만, 노이즈에 의해 신호의 정확한 위치를 파악하기 어려우며, 실제 두 디지털 신호의 진폭, DC 성분, 위상의 차이가 있으므로 식(1), 식(2)와 같이 엔코더 신호 테스트 결과를 바탕으로 개인과 옵셋을 이용하여 신호를 정현화하는 과정이다.

$$AD_A = AD_A \times \frac{AD_K}{AD_{Amax} - AD_{Amin}} + A_{offset} \quad (1)$$

$$AD_B = AD_B \times \frac{AD_K}{AD_{Bmax} - AD_{Bmin}} + B_{offset} \quad (2)$$

이 과정에서 노이즈의 영향을 감소시키기 위해 측정분해능을 낮추더라도 적절히 양자화 시키는 과정이 필요하며, 신호변환시 신호의 크기를 증폭할 경우, 존재하지 않는 데이터의 생성으로 인한 왜곡이 일어날 수 있으므로 반드시 신호의 감쇄를 통해 두 신호를 정현화시켜야 한다. 또한 시시각각 변화하는 두 엔코더 신호의 위상차를 보상하는 것은 어려우나, 삼각함수의 합성법칙을 이용하면 평균적인 두 신호의 위상차는 보상될 수 있다. 이와같은 신호변환과정에서 이루어지는 신호의 정현성은 결국 최종적인 측정분해능에 결정적인 영향을 끼치며, 신호변환을 통해 일정한 진폭과 부호 변화를 지니므로써 다음 과정인 상위치 검출시 효율적으로 이용될 수 있다.

2.1.3 상위치 검출과정

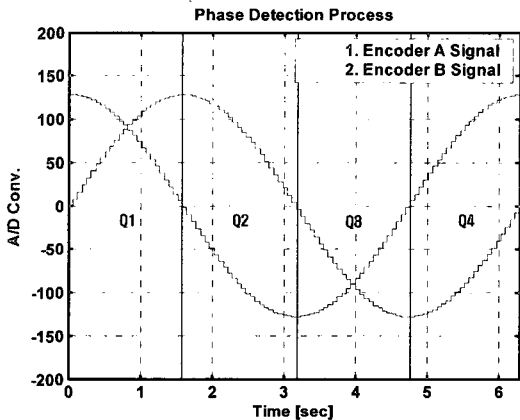


Fig. 3 Encoder signals with the quadrant

상위치 검출과정에서는 신호변환 과정을 통해 정현화된 두 엔코더 신호의 상관관계를 해석함으로써 4사분면 내의 현재 위치와 이동하는 방향을 검출할 수 있다. Fig. 3은 이송시 발생하는 두 엔코더 신호의 각도에 따른 사분면의 변화를 나타내며, Table 1과 같이 두 신호의 부호 판별을 통하여 각 조건에 따라 해당 사분면을 결정할 수 있고 사분면이 증가하는 순서에 따라 회전 방향이 결정된다.

이송에 따라 엔코더 신호값이 1-2-3-4-1 순으로 사분면이 변화할 경우, 반시계 방향이고 4-3-2-1-4 순으로 변화할 경우, 시계 방향으로 표현할 수 있다. 따라서, 상위치 검출을 통해 얻은 정보는 다음 체배 과정에서 룩업테이블의 위치지수를 결정하며, 최종 위치결정에서 중요인자로 이용된다.

Table 1 Condition of the quadrantal decision

Quadrant	A signal(x)	B signal(y)
1	$x \geq 0$	$y > 0$
2	$x > 0$	$y \leq 0$
3	$x \leq 0$	$y < 0$
4	$x < 0$	$y \geq 0$

2.1.4 위치벡터 계산과정

2.1.4.1 위치지수

신호변환 과정과 상위치 검출과정을 거친 두 정현파 신호를 하나의 대표 값으로 부호화하는 과정이다. 한 상내의 현재 위치를 나타내는 지표를 위치지수라고 하며, 이는 각 사분면에 따른 두 정현파 신호의 상대적인 비를 이용하여 얻을 수 있다. 위치지수로 이용될 수 있는 많은 함수가 존재하지만, 실제 엔코더 신호에는 노이즈가 필수적으로 포함되어있기 때문에 이를 최소화시킬 수 있는 지수가 필요하다. 예를 들어, 두 신호의 절대적인 차이 값을 위치지수로 이용하면 거의 선형적인 구간을 얻을 수 있지만, 이 경우 노이즈 성분이 그대로 위치지수에 영향을 주기 때문에 원하지 않는 오차가 발생한다. 따라서, 노이즈의 영향을 최소화시킬 수 있도록 두 신호의 상대적인 크기 비를 위치지수로 이용하였다. Fig. 4는 두 신호간에 상대적인 비를 나타낸 그래프이며, 90도를 기준으로 S형태의 거의 일정한 구간을 얻을 수 있다. 각 사분면에 대한 위치지수는 다음 식(3)으로 표현할 수 있다. 결국 주

어진 식은 삼각함수 합성법칙을 이용하면, 90도 위상차를 지닌 두 정현파의 상대적인 비는 45도 이동된 Tangent 곡선을 나타내며, 이를 위치벡터 계산을 위한 위치지수로 사용한다.

$$\begin{aligned}
 &1\text{사분면} \quad \frac{\sin(t) - \cos(t)}{\sin(t) + \cos(t)} \times I_{gain} + I_{offset} \\
 &2\text{사분면} \quad \frac{-\sin(t) - \cos(t)}{\sin(t) - \cos(t)} \times I_{gain} + I_{offset} \\
 &3\text{사분면} \quad \frac{-\sin(t) + \cos(t)}{-\sin(t) - \cos(t)} \times I_{gain} + I_{offset} \\
 &4\text{사분면} \quad \frac{\sin(t) + \cos(t)}{-\sin(t) + \cos(t)} \times I_{gain} + I_{offset} \quad (3)
 \end{aligned}$$

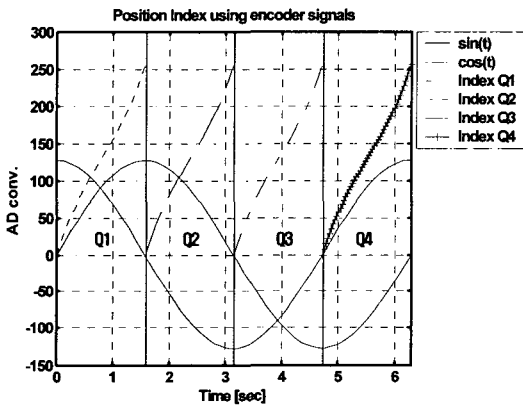


Fig. 4 Position index of quadrature signals

2.1.4.2 위치벡터와 온도보상

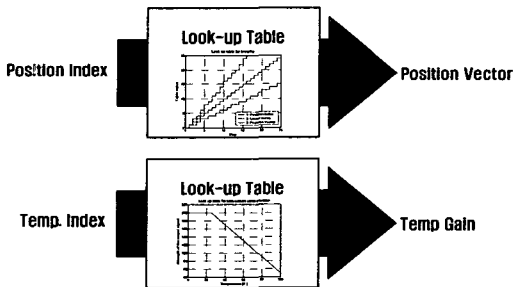


Fig. 5 Concept of the temperature compensation and position linearity

위치지수가 S형태의 비선형적인 구간을 포함하

며 실질적인 위치 결정에 있어 오차를 발생시키는 중요 요인이 된다. 따라서, Fig. 5와 같이 각각의 위치지수에 해당하는 선형화된 위치벡터를 메모리에 Look-up table형식으로 저장하면, 엔코더의 두 정현파 신호를 대표할 수 있는 선형적인 위치벡터를 출력할 수 있다. 위치지수의 선형화를 위해서 Fig. 6의 그래프와 같이 두 정현파 신호를 0~90도까지의 위치를 분해능에 맞게 일정한 크기로 나누고 구간에 해당하는 위치지수를 계산하여 y=x축을 기준으로 대칭 시키면 위치지수에 해당하는 선형화된 위치벡터 Look-up table이 생성된다. 다른 한편으로 온도에 따른 엔코더의 신호 변화를 보상하기 위하여, Fig. 7과 같이 실험을 통해 온도에 대한 Look-up table을 구성할 수 있으며, 신호변환 과정에서 해당 온도에 따른 신호의 변화를 보상하고자 한다.

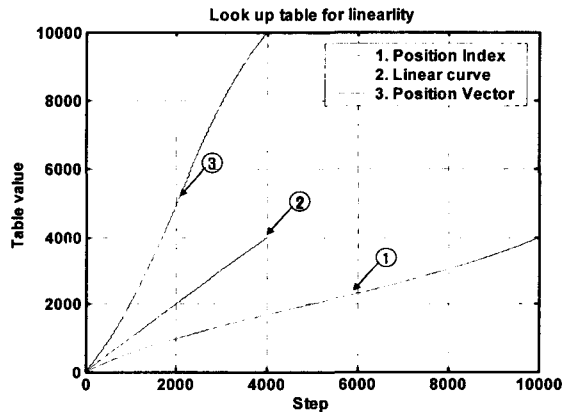


Fig. 6 Linearity with the position index

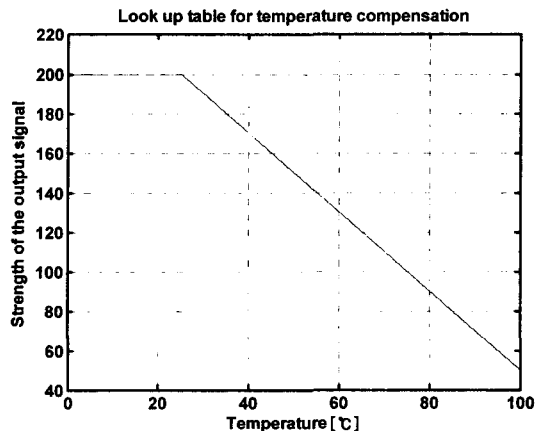


Fig.7 Look-up table for the temperature compensation

2.1.5 위치결정 연산과정

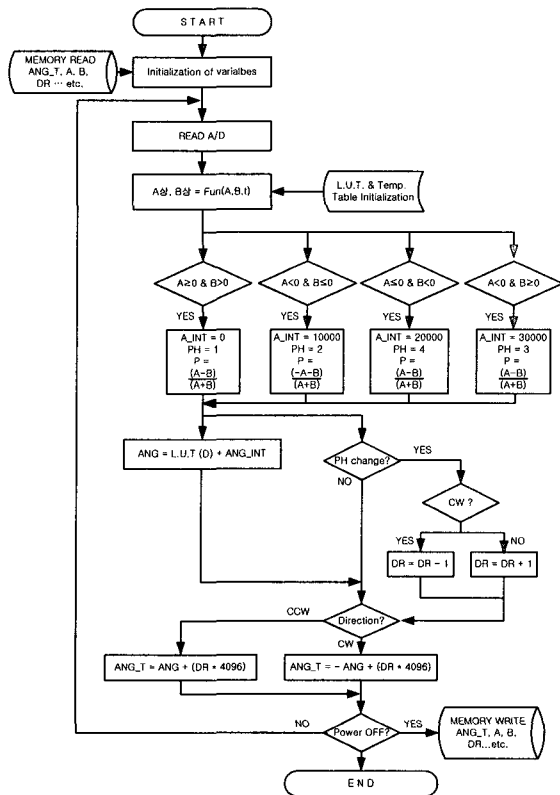


Fig. 8 Total computation process

실행 과정에서 획득한 위치벡터, 상위치, 이동 방향 등에 대한 정보와 메모리에 저장되어있는 변수들의 값을 이용하여 최종적으로 이동 거리를 계산하는 연산처리 과정을 나타낸다. 상위치 검출과정에서 현재의 사분면과 이동방향을 알 수 있고, 메모리에 저장되어 있는 초기 위치와 위치벡터를 이용하여 한 사분면 내의 위치를 알 수 있으며, 두 결과를 종합적으로 계산하면 최종적으로 이동한 위치벡터의 합을 얻을 수 있다. 결국 엔코더의 한 주기당 20 μm 전진하는 정보를 이용하여 획득한 위치벡터를 길이 단위로 환산하면 최종적인 이동 거리를 측정할 수 있다.

2.2 고체배 알고리즘의 시뮬레이션

앞서 제시한 엔코더 신호의 고체배 알고리즘 전 과정을 MATLAB SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 이를 통해 제안된 고체배 알고리즘의

오차 요인, 문제점, 개선안 등을 찾고자 하였다. 전체 시스템은 Fig. 9와 같이 알고리즘의 구성요소별로 SIMULINK 모델을 구성하였다. 요구하는 이송 경로는 주기신호 생성함수를 이용하여 입력으로 주어지며, 이동량에 따라 엔코더의 정현파 신호를 출력한다. 이 신호는 각각의 A/D 변환, 신호변환, 상위치 검출, 위치벡터 계산, 위치결정 연산과정을 거쳐 최종적으로 이동거리가 출력되며, 각각의 요소마다 배치된 Scope함수를 이용하여 신호의 출력값을 비교·분석하면서 체배 알고리즘의 성능을 높이기 위해 노력하였다. 시뮬레이션을 통해 오차의 요인이 될 수 있는 노이즈, 진폭변화, 위상오차, 양자화 오차에 대해 리자주 선도와 통계량을 이용하여 정량적으로 평가하였으며, 이를 보상하기 위해 실험치를 바탕으로 삼각함수나 통계적인 방법을 적용하였다. 제안된 고체배 알고리즘의 시뮬레이션에 사용된 각종 파라미터의 사양은 Table 2와 같다.

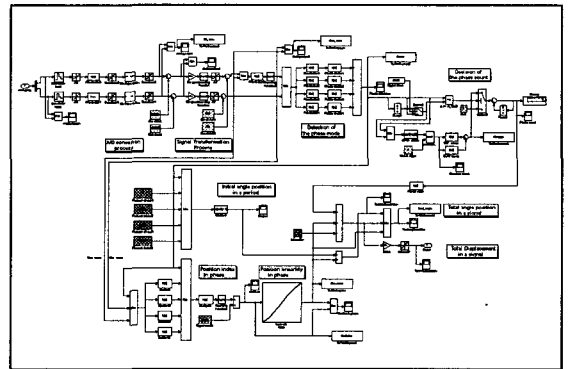


Fig. 9 Total structure of the proposed interpolation algorithm

Table 2 Range of parameters in the simulation

Parameters	Specification
A/D conversion bit	16bit, ±5 V
Sampling time	0.001 sec
Range of encoder signals	0 ~ 1.25 V
Movement	20 μm
Range of signal transformation	-4096 ~ 4096
Range of Position index	0 ~ 4000
Range of Position vector	0 ~ 10000

3. 실험 및 고찰

3.1 실험장치의 구성

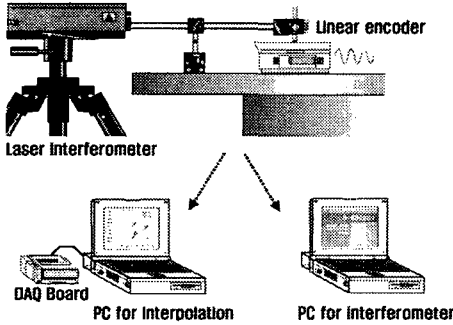


Fig. 10 Overview of the measurement system

Fig. 10은 전체적인 측정 실험의 구성도를 나타낸 것으로, 마이크로스텝 기술을 이용하여 스텝모터를 회전시키면, 커플링과 마이크로헤더를 거쳐 XY stage의 미세 직선이동이 가능하며, 이러한 미세 이동은 각각의 리니어 엔코더 신호의 체배와 레이저 간섭계에 의해 측정된다. XY stage는 0.1Hz 근방의 저속으로 구동되며, 엔코더 신호는 16비트 DAQ(DT9804)보드를 통해 A/D변환되어 PC로 입력된다. 최종적으로 레이저 간섭계의 측정 결과를 기초로 제안된 체배 알고리즘의 성능을 평가하였다. Fig. 11은 실제적으로 구성된 실험장치를 나타내며, 광학 테이블 위에 제작된 2축 미세 이송장치, 스텝모터 및 드라이브, 미세 이동을 측정하는 리니어 엔코더와 레이저 간섭계로 구성되어 있다.

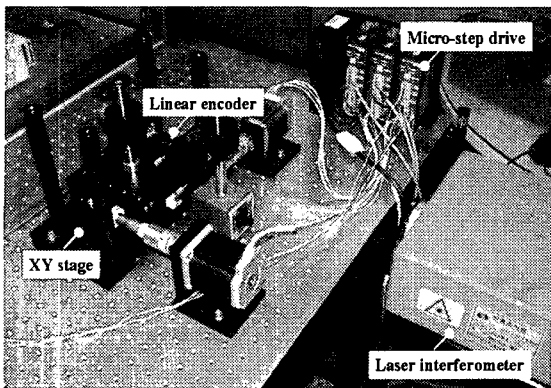


Fig. 11 Real measurement system on the optical table

3.2 실험결과 및 분석

본 논문에서는 리니어 엔코더의 한 주기에 해당하는 단방향 $20\mu\text{m}$ 이동시 측정된 엔코더 신호를 기준으로 실험하였으며, 마이크로스텝 기술을 이용한 XY stage의 고속 이동시 체배 결과에 대한 성능 평가가 어려우므로 0.1 Hz의 저속에서 진행하였다. Fig. 12는 측정된 엔코더 신호를 나타내며, 실험 전 엔코더 신호의 테스트를 통해 획득한 크기 및 위상 정보를 이용하여 중요 신호변환 파라미터들을 결정하였다. 특히 노이즈의 영향을 없애기 위하여 신호 변환과정에서 이동평균 및 분해능을 낮추어 Fig. 13과 같은 신호변환 결과를 얻었다. 이 신호는 상위치 검출과정을 거쳐 사분면과 이동방향을 결정하며, Fig. 14와 같은 결과를 얻었다. 3-2-1-4의 시계방향의 후진 이동하고 있으며, 6초 부근에서는 노이즈나 실제 이동변화로 인해 사분면이 순간적으로 방향이 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 그 이후에 상위치를 바탕으로 위치벡터 계산과정을 통해 Fig. 15와 같이 위치지수와 해당 위치벡터를 구할 수 있으며, 이론과는 달리 위치벡터가 선형이 아닌 S형태의 곡선을 관찰할 수 있다. 이는 시스템이 마이크로스텝에 의한 스텝모터 회전으로 나타나는 현상이며 시간에 따라 순간 회전속도가 변화하기 때문에 발생된다. 최종적으로 위치결정 연산과정에서는 Fig. 16과 같이 각각 한 상내의 위치벡터, 한 주기 내의 위치벡터, 전체 위치벡터를 구할 수 있으며, 위치측정은 전체 위치벡터를 길이단위 변환함으로써 얻을 수 있다. Fig. 17은 체배 알고리즘을 통해 최종적으로 측정된 이동거리와 레이저 간섭계의 결과를 나타낸다. 레이저 간섭계인 경우 외부 온도, 공기 굴절률, 습도 등의 주위환경에 영향을 받기 때문에 실제로 20nm 이하인 경우 진공상태에서 측정하도록 되어있다. 따라서, 20nm 이상의 단위로 측정하는 것이 타당성이 있다고 판단하였으며, 100nm 단위로 측정된 결과를 비교하였을 경우, 레이저 간섭계의 측정결과와 체배를 이용한 측정결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안된 고체배 알고리즘이 $100\pm 50\text{nm}$ 단위의 분해능을 가지며, 이는 $20\mu\text{m}$ 단위의 원신호를 1/200한 결과이다. 결국 실제적으로 엔코더 신호의 노이즈, 위상차, 진폭변화의 영향으로 인해 측정분해능을 증가시키는 데에는 한계를 가지며, 신호의 정현성이 개선된다면 보다 향상된 분해능을 얻을 것으로 기대한다.

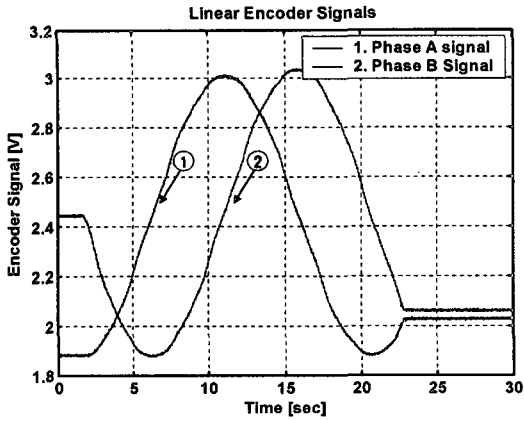


Fig. 12 Encoder signals of 20 μm movement

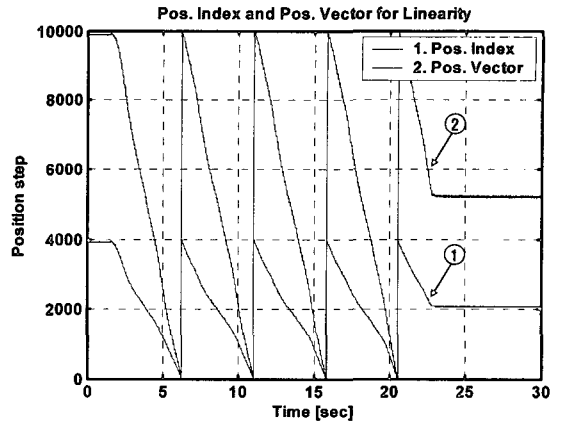


Fig. 15 Result of the phase encoding process

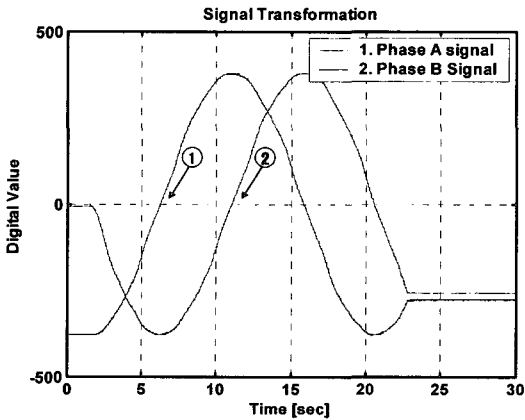


Fig. 13 Result of the signal transformation process

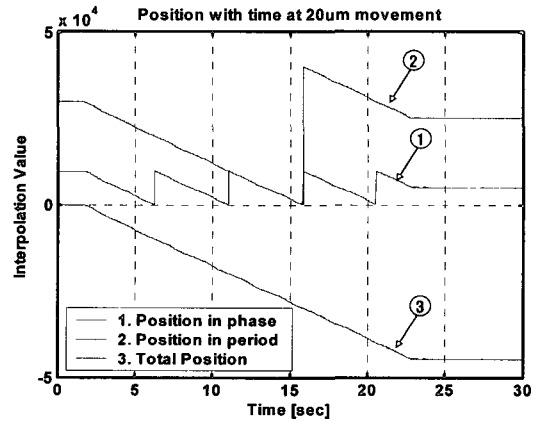


Fig. 16 Result of the interpolation computation

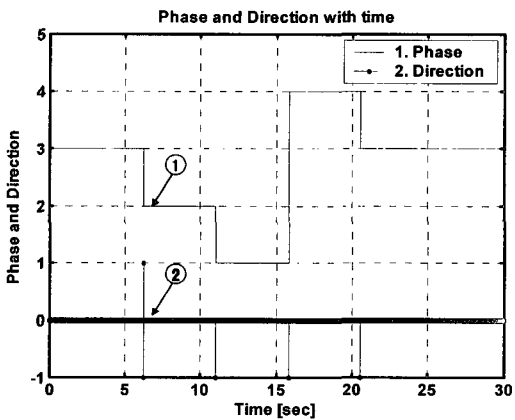


Fig. 14 Result of the phase detection process

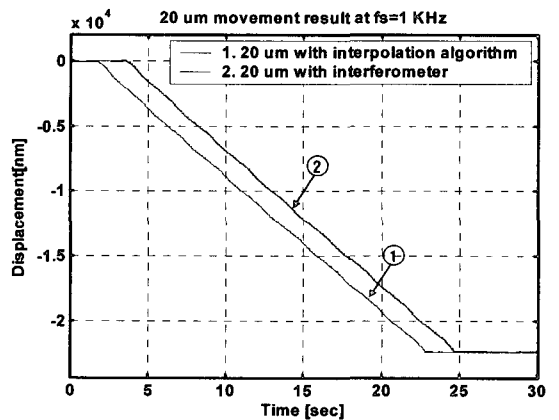


Fig. 17 Comparison of results by the interpolation algorithm and the laser interferometer

4. 결론

최근 나노기술의 발달과 더불어 이를 측정하는 나노측정기술 역시 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이에 본 논문은 리니어 엔코더 신호에 체배 알고리즘을 적용하여 이동하는 스테이지의 변위 측정 기술을 개발하고자 하였다. 제안된 체배 알고리즘의 연구를 통해 복잡한 회로구성 없이 소프트웨어적인 방법을 이용하여 다양한 위치정보를 획득할 수 있었으며, 레이저 간섭계의 측정결과와 비교하여 0.1Hz 근방의 저속영역에서 $100\pm 50\text{nm}$ 측정 분해능을 얻을 수 있었다. 이는 $20\ \mu\text{m}$ 이동시 발생하는 한 주기의 엔코더 신호를 1/200 체배한 결과를 나타낸다. 이 결과는 레이저 간섭계를 이용한 변위 측정시 요구되는 공간적, 가격적, 환경적 제약에 비해, 체배 알고리즘을 이용한 간단한 측정시스템의 구성으로 나노단위의 측정이 용이한 장점을 나타낸다. 또한 연구 결과를 바탕으로 엔코더 신호의 순수성을 향상시킴으로써 보다 더 높은 분해능을 기대할 수 있으며, 향후 위상오차나 노이즈를 근본적으로 개선시킬 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 결과를 기초로, 향후 진행 될 마이크로스테핑을 이용한 XY stage의 나노단위 이송제어장치 개발을 실현하기 위한 위치측정기술로 이용될 것이다.

참고문헌

- Eom, T. B., Park, B. C., Kim, J. W., Eom, C. I., "Technical Trends of Nanometrology," J. of KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 25-32, 2002.
- Kim, K. H., Keem, T. H., Song, C. K., Lee, H. S., Kim, S. W., "Straightness Measurement Error Compensation of the Laser Interferometer," Proc. of KSPE, pp. 114-118, June 2001.
- Cheung, N. C., "An innovative method to increase the resolution of optical encoders in motion servo systems," IEEE International conference on power electronics and drive systems, pp. 797-802, July 1999.
- Emura, T., Wang, L., "A high resolution interpolator for incremental encoders based on the quadrature PLL method," IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 47, No. 1, pp. 84-90, 2000.
- Hagiwara, N., Suzuki, Y., Murase, H., "A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation," IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 41, No. 1, pp. 98-101, 1992.
- Hagiwara, N., Nishitani, Y., Yanase, M., Saegusa, T., "A phase encoding method for improving the resolution and reliability of laser interferometer," IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 38, No. 2, pp. 548-551, 1989.
- Mayer, J. R. R., "High resolution of rotary encoder analog quadrature signals," IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 43, No. 3, pp. 494-498, 1994.
- Tan, K. K., Zhou, H. X., Lee, T. H., "New interpolation method for quadrature encoder signals," IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 51, No. 5, pp. 1073-1079, 2002.
- Emura, T., Wang, L., "High precision interpolation using two phase type PLL for encoders that have distorted waveforms," IEEE international conference on intelligent processing systems, pp. 82-87, Oct. 1997.
- Marek, D., "High-resolution laser linear encoder with numerical error compensation," SPIE Opt. Eng. Vol. 38, No. 6, pp. 968-973, 1999.
- Godler, I., "A method to compensate periodic errors by gain tuning in instrument," IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 51, No. 1, pp. 37-42, 2002.
- Kavanagh, R. C., "Probabilistic learning technique for improved accuracy of sinusoidal encoders," IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 48, No. 3, pp. 673-681, 2001.
- Peter, V., "Novel method of A/D conversion for incremental position sensors," Proceedings of the IEEE International Symposium on industrial electronics, Vol. 1, pp. 444-446, June 1996.
- Burke, J., Moynihan, J. F., Unterkofler, K., "Extraction of high resolution position information from sinusoidal encoders," PCIM 2000 Conference, Intelligent Motion Proceedings, pp. 217-222, Feb. 2000.