

정현파 엔코더를 이용한 정밀위치 측정방법에 관한 연구

金明煥[†], 金長睦^{*}, 金喆禹^{**}A Study on Precision Position Measurement Method
for Analog Quadrature Encoder

Myong-Hwan Kim, Jang-Mok Kim, and Cheul-U Kim

요 약

본 논문에서는 나노급 서보 전동기의 초정밀 위치제어를 위한 위치정보를 얻기 위하여 정현파 엔코더에 적용하기 위한 새로운 위치 보간 알고리즘에 대하여 기술한다. 기존의 정현파 엔코더에서 사인 및 코사인 파형에서 정밀 위치정보를 얻기 위하여 대용량의 메모리와 빠른 변환속도를 갖는 2개의 A/D를 이용하였다. 그러나 제안된 보간 방법을 이용할 경우에는 적은 용량의 메모리와 단지 하나의 A/D와 비교기만을 이용하여 정현파 엔코더에서 정밀 위치정보를 얻을 수 있다. 초정밀 제어를 위한 제안된 알고리즘의 유용성은 실험결과로부터 알 수 있다.

ABSTRACT

This paper presents a new interpolation algorithm for measuring high resolution position information which is prepared to a nano servo control motor using analog quadrature encoder. In the past, there are large capacity of memory(ROM or RAM) and two high price and resolution A/D(Analog-to-Digital Converter) for sensing two quadrature signals from a analog sinusoidal encoder interpolation. But high resolution of position from sinusoidal encoder can be obtained by using only small capacity of memory, one A/D converter and comparator. Experimental results show that the proposed algorithm is useful for measuring high resolution position.

Key Words : analog quadrature encoder, interpolation algorithm, high resolution position

1. 서 론

서보 시스템에서는 회전각 또는 선형적 위치 정보를 검출하기 위한 센서로서 레졸버, 홀 센서, 광학식 엔코더 등이 사용되고 있다. 주변 환경이 매우 열악한 경우 레졸버(resolver)나 싱크로(synchro)가 사용되

도 하지만 사용이 어렵고 고가이므로 일반적인 산업환경에서 주로 광학식 엔코더가 사용되고 있다^[1]. 광학식 엔코더에는 출력되는 데이터의 형태에 따라 이진수 또는 그레이 코드(gray code)등이 출력되는 절대 위치 엔코더(Absolute encoder)와 회전수에 비례하는 펄스가 발생하는 증분형 엔코더(Incremental encoder) 등이 사용되고 있다. 근래의 서보 시스템에서는 초정밀 가공을 위하여 고정도의 위치 및 속도제어, 특히 나노급 이상 서보 제어를 위하여 1회전당 10만 펄스 이상의 신호를 출력하는 엔코더의 필요성이 대두 되었다. 증분형 엔코더의 경우 1회전당 10만 펄스를 출력한다면

[†]교신저자 : LG전자 PDP사업부 품질보증그룹
E-mail : kcrys@netian.com

^{*}정회원, 부산대 전자전기정보통신공학부 조교수

^{**}정회원, 부산대 전자전기정보통신공학부 교수
접수일자 : 2004. 7. 22 1차 심사 : 2004. 8. 19
심사완료 : 2004. 8. 31

일반적인 서보 드라이버의 인터페이스에서는 대역폭의 문제로 300rpm 이상의 속도정보를 제어하기 어렵다. 이런 이유로 엔코더 자체적으로 위치 정보를 검출하고, 이를 통신이나 기타의 방법에 의하여 데이터를 전송하는 ABS(Absolute Encoder) 엔코더와 출력신호가 정현파로 출력되고 이를 보간(interpolation)하여 사용하는 정현파 엔코더가 그 대안으로 나타났다^{[2],[3]}. 정현파 엔코더의 경우 일반적인 엔코더에서 출력되는 디지털 신호가 아닌 아날로그 값으로 출력되므로 디지털 서보 제어기에서 사용하기 위하여 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환하고 체배된 효과를 얻기 위하여 보간기(interpolator)가 필요하다. 출력신호가 아날로그 값이므로 이론적으로 보간기를 구성하기에 따라 무한대의 체배수를 가질 수 있어 초정밀 나노급 서보전동기에 적합한 회전자의 위치정보를 얻을 수 있다. 정현파 엔코더의 보간기는 보통 두 가지의 형태로 사용되고 있는데 이중 하나는 정현파 엔코더에서 출력되는 정현파와 여현파의 값으로 테이블을 만들고 이를 이용하여 입력되는 값에 따른 위치 정보를 출력하는 형태이다^[4]. 또 다른 하나는 프로세서를 이용하여 입력되는 정현파와 여현파의 값을 이용하여 아크 탄젠트 연산을 이용하여 위치 정보를 출력하는 형태이다^[5-7]. 전자의 방식은 보간 시간이 빠른 반면 체배 수의 증가분에 비해 룩 업 테이블의 증가분이 기하 급수적으로 커지기 때문에 롬(ROM)등과 같은 메모리 소자의 용량이 커지는 단점이 있다. 후자의 방식은 구현하기가 쉬운 장점이 있는 반면 연산시간이 길어(atan2 연산을 150 MFLOPS의 고속 연산 속도를 가지는 DSP로 연산하면 약 1.5μs 소요) 고속의 프로세서를 요구하는 단점이 있다.

본 논문에서는 보간 시간이 짧으면서도 룩 업 테이블의 크기는 단지 체배 수에 정비례하고 쉽게 구현할 수 있으며 보간기를 구현함에 있어서 쉽게 구현가능하며 비용이 절감될 수 있는 새로운 보간 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 유용성을 검증하였다.

2. 기존의 보간 알고리즘

그림 1은 정현파 엔코더의 출력파형이다. 정현파 엔코더의 출력중 Va는 구형파 엔코더의 A상, Vb는 구형파 엔코더의 B상과 동일하며 다만 구형파를 대신하여 정현파와 여현파가 출력되는 것이 차이점이다.

$$\begin{aligned} V_a &= V_p \sin \theta \\ V_b &= V_p \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, θ : 엔코더 축의 회전각, V_p : 엔코더 출력 신호의 진폭.

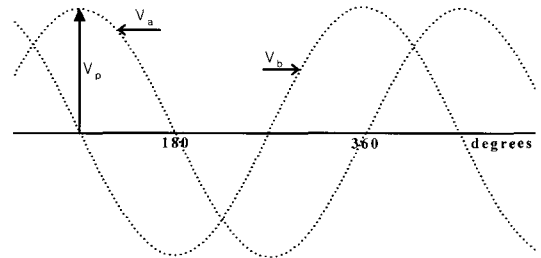


그림 1 정현파 엔코더의 출력 파형
Fig. 1 Analog quadrature encoder output

엔코더 축의 회전각 θ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_a}{V_b} \right) \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 프로세서 연산방식으로 보간기를 구성하는 경우 연산시간의 문제로 인해 현실적으로 적용하기에는 많은 비용이 수반된다. 기존의 보간기는 주로 그림 2와 같은 방식의 룩 업 테이블을 이용하여 보간기를 구성하고 있다.

그림 2에서 Da는 정현파를, Db는 여현파를 A/D 변환한 값에 매핑되며, 변환된 두 개의 값에 대응하여 룩 업 테이블에 저장된 θ 를 출력하는 방식이다.

3. 제안한 보간 알고리즘

정현파 엔코더에서 출력되는 신호 Vb를 식 (3)과 같이 아크 사인을 취하게 되면 그림 3과 같이 Y축 상으로 삼각파 형태의 $\theta \sin$ 을 얻을 수 있다.

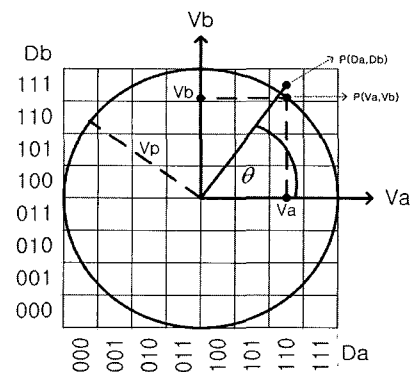


그림 2 일반적인 보간 방법
Fig. 2 General interpolation method

$$\theta_{asin} = \sin^{-1} V_b \quad (3)$$

그리고 V_a 의 zero-crossing을 검출하게 되면 그림 3과 같은 구형파와 V_{zc} 를 얻을 수 있다. 이는 일반적인 엔코더의 A상과 동일한 형태이다.

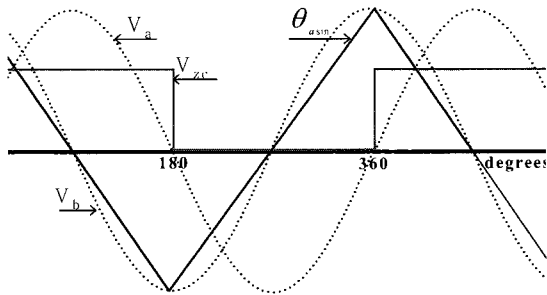


그림 3 θ_{asin} 과 V_{zc}
Fig. 3 θ_{asin} and V_{zc}

θ_{asin} 을 θ 의 값으로 사용하기 위하여 θ_{asin} 과 θ 사이의 관계를 그림 4에서 보면, θ_{asin} 의 값은 구간 1, 2에서 동일한 값이 두 번 나타나므로 사분면의 위치를 알 수 없다면 θ_{asin} 의 값을 θ 의 값으로 대응시켜 사용할 수 없다. $0 \sim 2\pi$ 사이의 값을 θ_{asin} 에서 알아내기 위해 정현파를 제로 크로싱(zero-crossing)한 V_{zc} 를 기준으로 1, 2의 두 구간으로 나눌 수 있고 이를 통하여 사분면의 위치를 얻어 낼 수 있다. 따라서 V_{zc} 의 값으로 θ_{asin} 이 위치한 사분면의 위치를 알아낸 뒤 2개의 룩 업 테이블을 사용하여 $0 \sim 2\pi$ 구간의 θ 값을 얻고 이를 이용하여 원하는 정밀도의 회전자 위치를 측정할 수 있다.

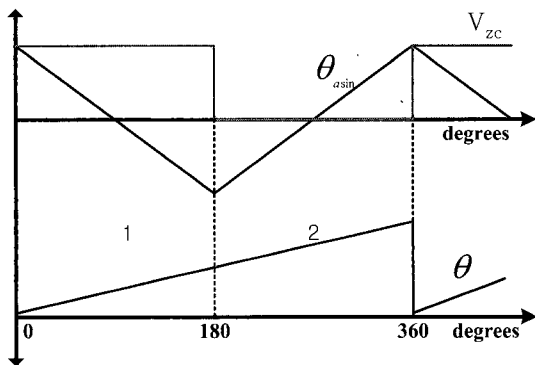


그림 4 제안한 보간 방법
Fig. 4 New interpolation method

제안한 방식과 기존의 방식에서 필요한 메모리의 용

량을 비교해 보면 다음과 같다. 그림 2와 같이 4분면 중에서 대칭성을 이용하여 1사분면만 고려하면 되므로 룩 업 테이블을 구성할 경우 식 (4)와 같이 필요한 메모리의 용량이 정해지게 된다.

$$m = \frac{i_m^2}{4} \quad (4)$$

여기서 m 은 메모리의 용량, i_m 은 체배수 ($2N$, $N = 1, 2, 3 \dots$)

아크 탄젠트는 각 사분면에 대칭이므로 비교기나 A/D를 이용하여 각 사분면의 위치를 알아낼 수 있다면 보간에 필요한 최종 메모리의 개수는 아래와 같이 결정된다.

$$m = \frac{i_m^2}{16} \quad (5)$$

만약 정현파 한 주기 동안 8,192체배를 하게 되면 기존의 방식에서 필요한 메모리는 4,096 Kword (4Mword)가 필요하게 된다. 제안한 보간 방법을 사용하여 보간기를 구성하게 될 경우 체배수와 필요한 메모리의 수가 동일하게 되므로 결국 8Kword의 메모리로 8,192체배가 가능하다. 따라서 체배수가 커질수록 메모리에 사용되는 비용의 차이가 기존의 방식에 비해 현저하게 줄어들게 된다. 또한 정현파와 여현파의 두 개의 값이 필요하므로 A/D 변환기는 2개가 필요하게 된다. 대부분의 A/D는 변환속도가 빠를수록 비트수가 클수록 가격은 기하급수적으로 비싸게 되므로 A/D 컨버터에 의하여 큰 원가 상승을 가져오게 된다.

따라서 제안하는 방식은 아크탄젠트를 사용하지 않고 아크사인을 사용하며 하나의 A/D 변환기와 비교기를 사용하여 보간을 수행하므로 메모리의 크기 또한 줄일 수 있어 실제 시스템 적용에 있어 간단한 회로의 구성과 함께 비용상에 상당한 이점이 있다.

4. 실험

정현파와 엔코더의 출력 정현파와 여현파에 해당되는 신호는 DSP를 이용하여 생성한 뒤 이를 보간하여 알고리즘의 정확도 및 유용성을 검증하였다. 그리고 실제로 실험에 사용될 A/D 변환기는 12bit이므로 해상도의 손실이 없다면 8,192체배가 가능하게 되므로 알고리즘 검증에 사용된 룩 업 테이블은 8,192체배가 가능하도록 설계하였다.

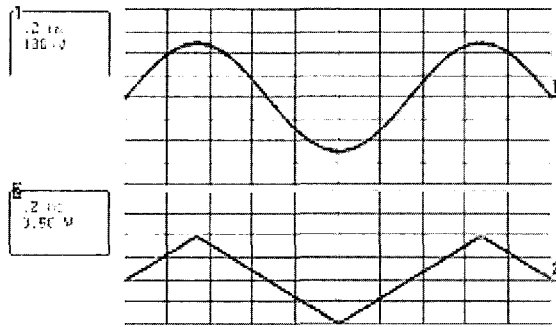


그림 5 Vb와 θ_{asin} 의 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveform of Vb and θ_{asin}

그림 5는 보간에 사용되는 룩 업 테이블중 여현파를 θ_{asin} 로 변환하기 위한 \sin^{-1} 테이블을 검증하기 위하여 이상적인 정현파를 만들어 θ_{asin} 을 얻은 파형이며 구성된 보간제어를 위한 실험장치들이 이상 없이 동작하고 있음을 보이고 있다.

그림 5에서 얻어진 θ_{asin} 과 앞에서 제안된 알고리즘을 이용하여 θ 를 구한 파형은 그림 6에서 보이고 있으며 $\pi \sim -\pi$ 구간에서 정확히 보간 되고 있음을 보이고 있다. 이상의 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안한 보간 방법이 이상 없이 동작하고 있음을 보였다.

다음에서는 실제 정현파 엔코더의 출력 신호로 보간한 실험 결과를 보인다. 여기서 사용한 정현파 엔코더는 하이덴하인(HEIDENHAIN)사의 ERN1387모델이다. 이 엔코더는 A, B, R, C, 그리고 D의 5개 신호를 출력하는데 A, B는 증분위치를 검출하기 위한 신호로 1회전당 2,048개의 정현파 및 여현파를 출력하며 R은 기준점을 나타내는 신호로 1회전당 1회가 발생하며 출력 파형은 삼각파와 비슷한 형태로 출력된다. C, D는 초기 위치를 파악하기 위한 신호로 1회전당 1주기의 정현파 및 여현파형을 출력한다. 엔코더 구동용 모터는 OTIS/LG의 서보 전동기를 사용하였다. 보간기의 체배수는 8,192 체배이며 이를 일반적인 광학식 엔코더의 펄스수로 환산하면 16,777,216 ppr(pulse per revolution)가 된다. 실험에 사용된 메모리의 크기는 8Kword이며 고속의 신호처리를 위하여 DSP의 내부 메모리를 이용하여 처리하였다. 12bit의 A/D 변환기와 비교기, 연산처리를 위한 DSP, 내부의 변수를 확인하기 위한 14bit D/A 등으로 구성되어 있다.

보간기 실험 장치의 블록다이어그램은 그림 7과 같다.

그림 8은 정현파 엔코더의 보간기와 이의 정상 유무를 확인하기 위하여 5만 펄스급 광학식 엔코더의 위치

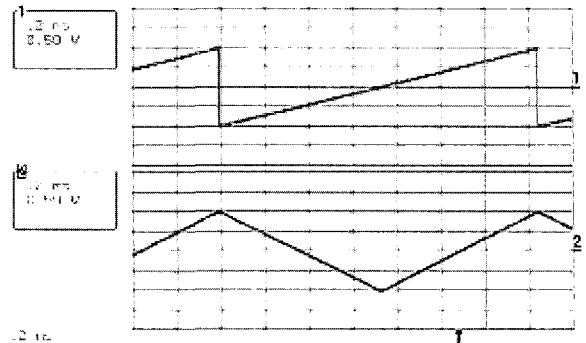


그림 6 θ_{asin} 과 θ 의 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform of θ_{asin} and θ

및 속도를 측정하기 위한 전용 DSP 보드이다. 실제 정현파 엔코더의 출력파형은 이상적이지 않으므로 본 실험에서는 A/D 입력되는 신호에 약간의 스캘링을 하여 정현파와 여현파의 진폭의 크기를 보정하였다.

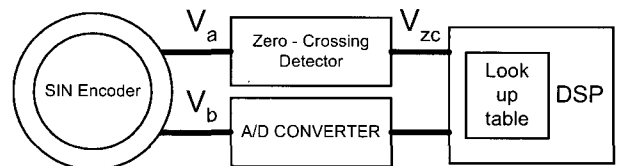


그림 7 보간기의 블록다이어그램
Fig. 7 Block diagram of interpolator

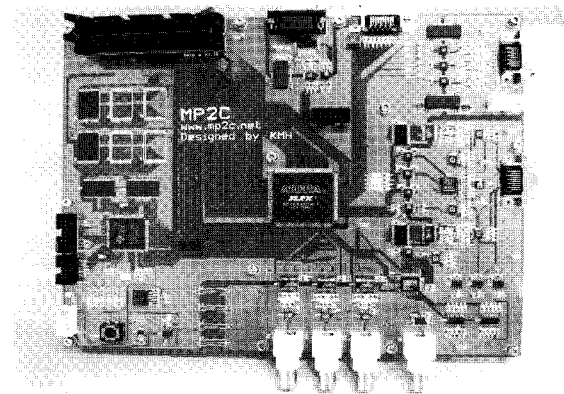


그림 8 보간기 전용 실험용 제어 보드
Fig. 8 Interpolation control board

그림 9에 보이는 것이 정현파 엔코더의 실제 출력 파형이다. 그림 9에서 인버터를 구동함으로써 발생하는 커먼 모드 노이즈(common mode noise)가 정현파 엔코더의 출력부분에 상당 부분 나타남을 알 수 있다. 이를 해결하기 위해 차동 입력형(differential input

type) A/D 변환기를 사용하여 커먼 모드 노이즈가 서로 상쇄되도록 A/D 변환기를 선택하여 제어보드를 설계하였다. 그래서 실제 위치 추정에는 거의 영향을 미치지 않도록 하였다.

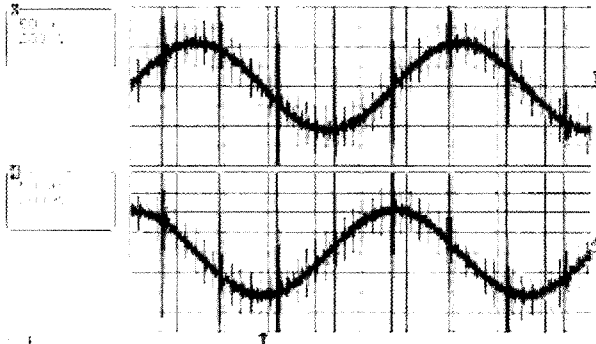


그림 9 정현파 엔코더의 출력 파형
Fig. 9 Output waveform of analog quadrature encoder

그림 10은 차동 입력형 A/D 변환기를 이용하여 A/D 변환을 한 후 D/A 변환기로 출력한 파형이다. 커먼 모드 노이즈가 제거된 것이 보이며 진폭에 대한 보정도 일정 부분 되어 있는 상태이다.

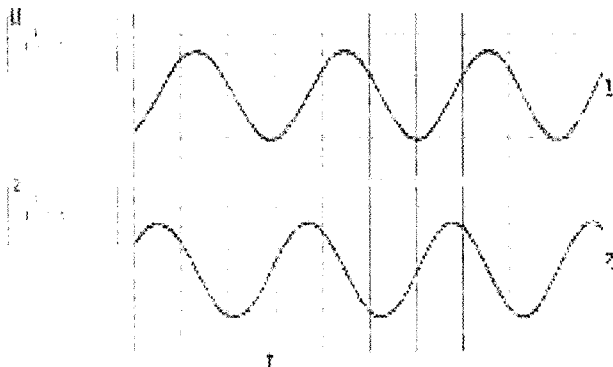


그림 10 A/D 컨버터의 출력파형
Fig. 10 Output waveform of A/D converter

그림 11은 정현파 엔코더의 출력파형을 보간 한 파형이다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 보간 됨을 볼 수 있다.

그림 12는 정현파 엔코더를 이용하여 정밀 위치신호를 얻기 위한 영구자석 동기전동기의 구동 시스템을 함께 구성한 전체 실험장치의 구성화면이다. 이 실험장치는 정현파 엔코더에서 정밀추정을 위한 보간 제어 전용 DSP 보드뿐만 아니라 전동기 제어를 위한 전동기 제어 전용 DSP 보드가 필요하다.

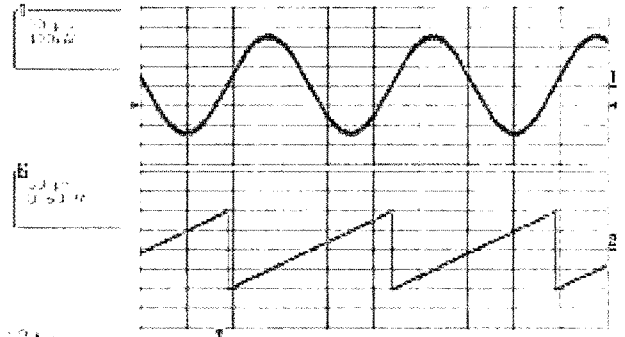


그림 11 A/D 컨버터의 출력파형
Fig. 11 Output waveform of V_a and θ

실제 시스템에서는 이러한 신호처리 DSP를 하나의 프로세서 내부에서 연산하게 하거나 그렇지 않으면 시스템 구성과 신뢰성 향상을 위하여 하나의 제어보드 두개의 DSP 프로세서를 장치하여 신호처리 속도의 향상 및 외부와의 통신전용 DSP로 사용하는 것도 전체 초정밀 전동기 제어시스템의 성능을 향상시키는 방법 중 하나이다. 이렇게 함으로써 정현파 엔코더 신호선에 위한 지연이나 노이즈를 제거할 수 있어 전동기 시스템의 전체 제어성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 정현파 엔코더를 이용하여 고속 운전영역 혹은 고속이동에 응용할 경우 본 논문의 실험부분에서 언급되었듯이 엔코더 C, D 신호를 이용하여 래졸버를 이용하듯이 대략적인 위치 정보와 속도정보를 계산하여 사용하고 원하는 위치 근처에서는 제안된 알고리즘을 이용하여 정밀한 위치제어에 사용할 수 있다.



그림 12 정현파 엔코더를 이용한 고정도 위치측정을 위한 전체 실험장치
Fig. 12 Experimental set-up with an analog quadrature encoder for high precision position detection

5. 결 론

본 논문은 정현과 엔코더를 이용하여 나노급 서보 전동기에 적합한 고정밀 위치 신호를 측정하기 위하여 새로운 보간 알고리즘이 제안되었다. 정현과 엔코더를 고해상도로 보간하기 위해서는 상당히 큰 메모리와 고가의 A/D 변환기 2개가 필요했으나 본 논문에서는 체 배수에 비례하는 메모리, 하나의 A/D 변환기 그리고 비교기만으로 고해상도의 보간을 쉽게 구현할 수 있음을 보였다. 고정밀 위치 측정을 위한 제안된 알고리즘의 유용성 및 실용성을 실험으로 확인하였다.

향후 연구과제로써는 정현과 엔코더를 이용하여 얻어진 고정밀 위치 정보신호가 신뢰할 만큼의 정밀도를 확보하였는지 확인하는 절차가 필요하다. 이를 위하여 고정밀 광학기계를 이용하여 나노급의 회전변위를 측정하여야하는 기술적인 어려움이 있다. 이를 위하여 학제간의 공동연구를 수행하여 정밀도를 증명하기 위한 추가적인 연구가 지속될 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Ramon Pallas-Areny, Sensors and signal conditioning, Wiley interscience, pp. 433~444, 2000.
- [2] 나노 구동용 서보 시스템 개발 (1단계 1차년도 중간 보고서) 산업자원부 pp. 64~65, 2003.
- [3] Heidenhain, Heidenhain General catalog, 2003.
- [4] N.Hafiwara, Y.Suzuki, and H.Murse, "A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique," IEEE Trans, Instrum. Meas, 41(1), pp. 98~101, 1992.
- [5] J.R.R.Mayer, "High-resolution of rotary encoder analog quadrature signals," IEEE Trans. Instrum. Meas. 43(3), pp. 494~498 1994.
- [6] John G. Webster, The measurement, instrumentation, and sensors handbook, CRC Press, pp. 6.98~6.119, 1999.
- [7] 홍정표, 박성준, 권순재, "디지털 아날로그 혼합형 엔코더 개발", 전력전자학회 논문지, 제8권, 제6호, pp. 512~518, 2003.

저 자 소 개



김명환(金明煥)

1976년 9월 2일생. 2002년 부경대 전기공학과 졸업. 2004년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 LG전자 PDP사업부 품질보증그룹 CS PART.



김장목(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 5월~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기정보컴퓨터 공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



김철우(金喆禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1981년 일본 동경 공업대 전기전자공학과 객원 교수. 1986 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수. 당 학회 자문위원.