

정현파 엔코더를 이용한 정밀위치 측정 방법에 관한 연구

김명환, 김장목, 김철우
부산대학교

A study on precision position measurement method for analog quadrature encoder

Myong-hwan Kim, Jang-mok Kim, and Cheul-u Kim
Pusan national university

ABSTRACT

This paper presents new interpolation algorithm for measuring high resolution position information which is propered to nano servo control motor using analog quadrature encoder. In the past, there is a large memory and two high price A/D converter for high resolution analog quadrature encoder interpolation. but this paper show that it can make high resolution interpolate using small memory, one A/D converter and comparator. Experimental results show that the proposed algorithm for high resolution position is useful.

1. 서 론

서보 시스템에서는 회전각 또는 선형적 위치 정보를 검출하는 센서로서 레졸버, 홀 센서, 광학식 엔코더 등이 사용되고 있다. 주변 환경이 매우 열악한 경우 레졸버(Resolver)나 싱크로(Synchro)가 사용되기도 하지만 사용이 어렵고 고가이므로 일반적인 산업환경에서는 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 일반적인 서보 드라이버의 인터페이스에서는 대역폭의 문제로 300rpm 이상을 처리하기 어렵다. 이런 이유로 엔코더 자체적으로 위치 정보를 검출

하고, 이를 통신이나 기타의 방법에 의하여 데이터를 전송하는 ABS엔코더와 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 채배하는 보간기(interpolator)가 필요하다. 출력신호가 아날로그 값이므로 이론적으로는 보간기를 구성하기에 따라 무한대의 채배수를 가질 수 있다. 정현파 엔코더의 보간기는 보통 두 가지의 형태로 사용되고 있는데 이 중 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][6]} 전자의 방식은 보간 시간이 빠른 반면 채배수의 증가분에 비해 록업 테이블의 증가분이 기하급수적으로 커지기 때문에 롬등과 같은 메모리 소자의 용량이 커지는 단점이 있다. 후자의 방식은 구현하기가 쉬운 장점이 있는 반면 연산시간이 길어 (atan2 연산을 150MFLOPS의 연산속도를 가지는 DSP로 연산하면 약 1.5 μ s 소요.) 고속의 프로세서를 요구하는 단점이 있다. 본 논문에서는 보간 시간이 짧으면서도 록업 테이블의 크기는 채배수에 비례하고 쉽게 구현할 수 있으며 보간기를 구현하는데 사용되는 비용을 절감할 수 있는 새로운 보간 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다.

2. 기존의 보간 알고리즘

그림 1 은 정현파 엔코더의 출력과형이다. 정현

파 엔코더의 출력중 V_a 는 구형파 엔코더의 A상, V_b 는 구형파 엔코더의 B상과 동일하며 다만 구형파를 대신하여 정현파와 역현파가 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.

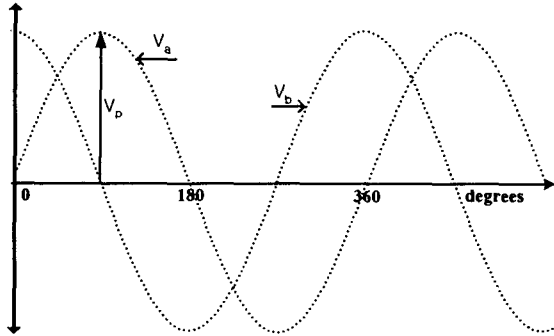


그림 1 정현파 엔코더의 출력 파형
Fig. 1 Analog quadrature encoder output

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 연산 시간의 문제로 인해 사용하는 경우가 드물고 기존의 보간기는 주로 그림 2와 같은 방식의 룩업 테이블을 이용하여 보간기를 구성하고 있다. 그림 2에서 D_a 는 정현파를, D_b 는 역현파를 A/D 변환한 값이며, 변환된 두 개의 값으로 룩업 테이블에 저장된 θ 를 출력하는 방식이다.

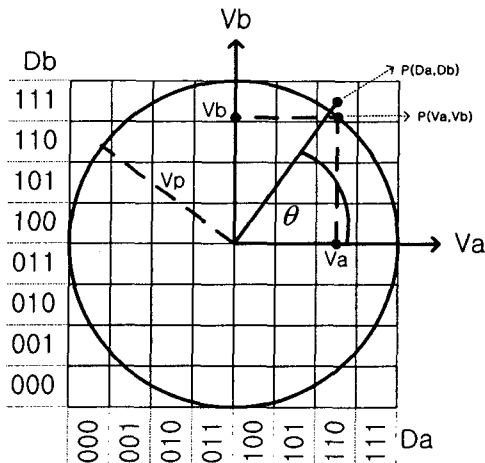


그림 2 일반적인 보간 방법
Fig. 2 General interpolation method

3. 제안한 보간 알고리즘

정현파 엔코더에서 출력되는 신호 V_b 를 식(3)과 같이 아크 사인을 취하게 되면 그림 3과 같은 삼각파 형태의 θ_{asin} 을 얻을 수 있다.

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

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

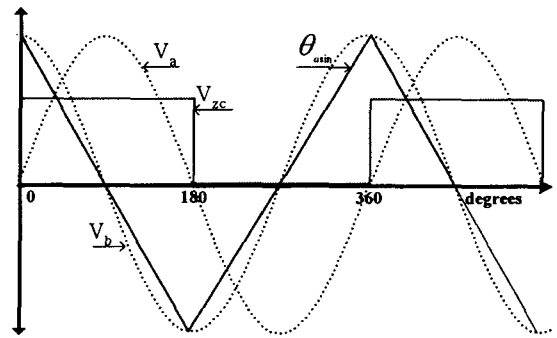


그림 3 θ_{asin} 과 V_{zc}
Fig. 3 θ_{asin} and V_{zc}

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 없다. 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, 2 두 구간으로 나눌 수 있고 이를 통하여 사분면의 위치를 얻을 수 있다. 따라서 V_{zc} 의 값으로 θ_{asin} 이 위치한 사분면의 위치를 알아낸 뒤 2개의 룩업 테이블을 사용하여 $0 \sim 2\pi$ 구간의 θ 값을 얻고 이를 이용하여 원하는 정밀도의 회전자 위치를 측정할 수 있다.

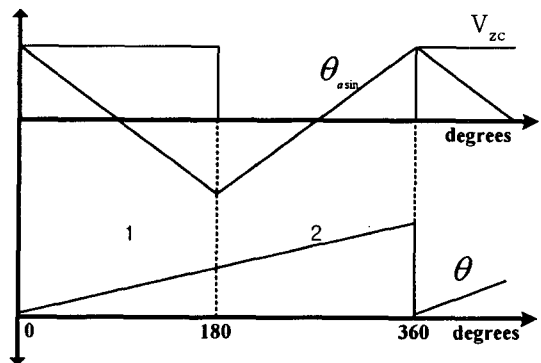


그림 4 제안한 보간 방법
Fig. 4 New interpolation method

제안한 방식과 기존의 방식에서 필요한 메모리의 개수

를 비교해 보면 다음과 같다. 그림 2와 같은 방식으로 룩 업 테이블을 구성할 경우 식(4)와 같이 필요한 메모리의 개수가 정해지게 된다.

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

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

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

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

만약 8192 채배를 하게 되면 기존의 방식에서 필요한 메모리는 4096Kword(4Mword)가 필요하게 된다. 제안한 보간 방법을 사용하여 보간기를 구성하게 될 경우 채배수와 필요한 메모리의 수가 동일하게 되므로 결국 8Kword의 메모리로 8192채배가 가능하다. 따라서 채배수가 커질수록 메모리에 사용되는 비용의 차이가 기존의 방식에 비해 현저하게 커지게 된다.

또한 정현파와 여현파의 두 개의 값이 필요하므로 A/D 변환기는 2개가 필요하게 된다. 이 A/D 컨버터의 가격으로 인해 비용의 상승을 가져오게 된다. 제안하는 방식은 아크탄젠트를 사용하지 않고 아크사인을 사용하며 하나의 A/D 변환기와 비교기를 사용하여 보간을 수행하며 메모리의 크기 또한 줄일 수 있어 실제 적용에 있어 간단한 회로의 구성과 함께 비용상에 상당한 이점이 있다.

4. 실험

정현파와 여현파를 DSP를 이용하여 생성한 뒤 이를 보간하여 알고리즘의 검증에 선행하였다. 실제로 실험에 사용될 A/D 변환기는 12bit 이므로 해상도의 손실이 없다면 8192채배가 가능하게 되므로 알고리즘 검증에 사용된 룩 업 테이블은 8192 채배가 가능하도록 하였다.

그림5는 보간에 사용되는 룩 업 테이블중 여현파를 θ_{asin} 로 변환하기 위한 \sin^{-1} 테이블을 검증하기 위하여 이상적인 정현파를 만들어 θ_{asin} 을 얻은 파형이며 이상 없이 동작하고 있음을 보이고 있다.

그림5에서 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, D의 5개 신호를 출력하는데 A, B

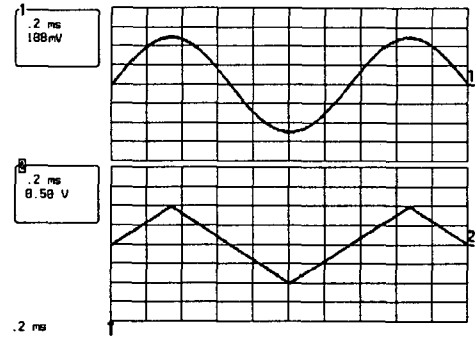


그림 5 V_b 와 θ_{asin} 의 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveform of V_b and θ_{asin}

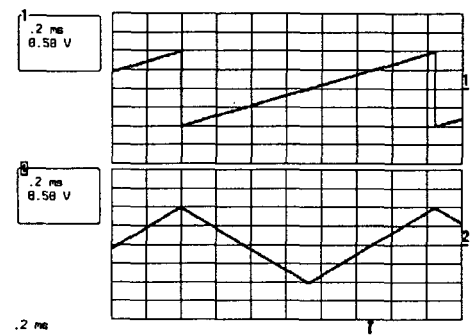


그림 6 θ_{asin} 과 θ 의 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation waveform of θ_{asin} and θ

는 증분위치를 검출하기 위한 신호로 1회전당 2048개의 정현파 및 여현파를 출력하며 R은 기준점을 나타내는 신호로 1회전당 1회가 발생하며 출력파형은 삼각파와 비슷한 형태로 출력된다. C, D는 초기 위치를 파악하기 위한 신호로 1회전당 1주기의 정현파 및 여현파형을 출력한다. 엔코더 구동용 모터는 OTIS/LG의 서보 모터를 사용하였고 모터의 회전속도는 50rpm이다. 보간기의 채배수는 8192채배이며 이를 일반적인 디지털 엔코더의 펄스수로 환산하면 16777216ppr가 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 있으며 보간기 실험 장치의 다이어그램은 그림7과 같다.

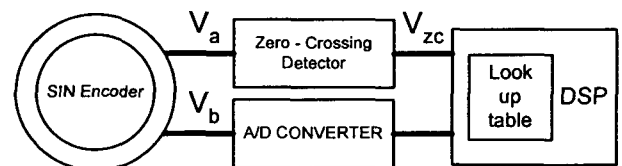


그림 7 보간기의 블록다이어그램
Fig. 7 Block diagram of interpolator

그림 8은 정현파 엔코더의 보간기와 5만 펄스급 디지털 엔코더의 위치 및 속도를 측정하기 위한 전용 DSP 보드이다.

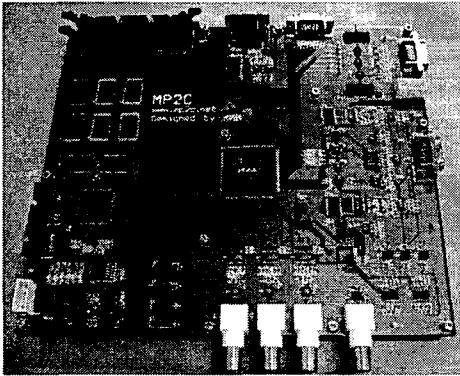


그림 8 보간기 실험용 보드
Fig. 8 Interpolation board

실제 정현파와 엔코더의 출력파형은 이상적이지 않으므로 본 실험에서는 gain controller를 이용하여 정현파와 여현파의 진폭의 크기를 보정하였다. 그림9에 보이는 것이 정현파와 엔코더의 실제 출력 파형이다. 그림9에서 인버터를 구동함으로써 발생하는 커먼 모드 노이즈(common mode noise)가 정현파와 엔코더의 출력부분에 상당 부분 나타남을 관찰 할 수 있다. 이를 해결하기 위해 차동 입력형(differential input type) A/D 변환기를 사용하여 커먼 모드 노이즈가 서로 상쇄되어 실제 A/D 변환을 한 결과값에는 영향을 미치지 않도록 하였다.

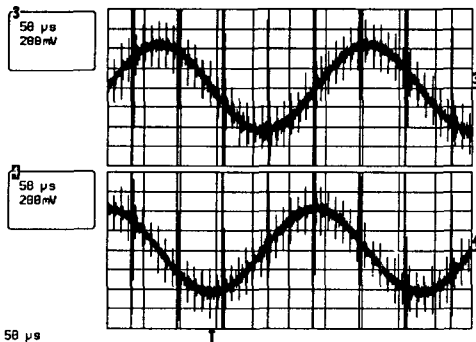


그림 9 정현파 엔코더의 출력 파형
Fig. 9 Output waveform of analog quadrature encoder

그림10은 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.

그림11은 정현파와 엔코더의 출력파형을 보간 한 파형이다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 보간 됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 정현파 엔코더를 이용하여 나노급 서보 전

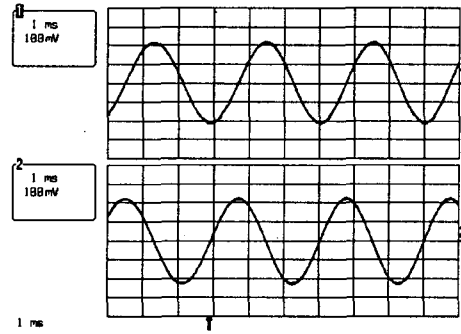


그림 10 A/D 컨버터의 출력파형
Fig. 10 Output waveform of A/D converter

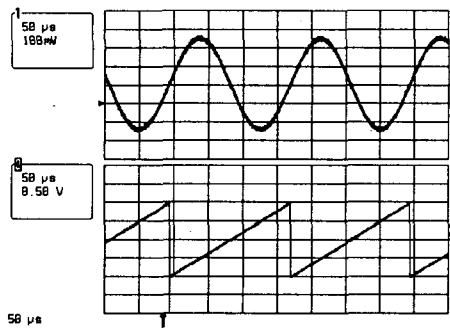


그림 11 A/D 컨버터의 출력파형
Fig. 11 Output waveform of V_a and θ

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

참 고 문 헌

- [1] Ramon Pallas-Areny, Sensors and signal conditioning, Wiley interscience, 433 - 444, 2000.
- [2] 나노구동용 서보 시스템 개발 (1단계 1차년도 중간 보고서) 산업자원부 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), 98 - 101, 1992.
- [5] J.R.R.Mayer, High-resolution of rotary encoder analog quadrature signals, IEEE Trans. Instrum. Meas. 43(3), 494 - 498 1994.
- [6] John G.Webster, The measurement, instrumentation, and sensors handbook, CRC Press, 6.98 - 6.119, 1999.