

선형 테이블 보상법을 이용한 마그네틱-옵티컬 엔코더의 절대 위치 검출에 관한 연구

Detection of Absolute Position for Magneto-Optical Encoder Using Linear Table Compensation

김슬기¹, 김형준¹, 이석¹, 박성현², 이경창^{3,✉}
Seul Ki Kim¹, Hyeong Jun Kim¹, Suk Lee¹, Sung Hyun Park², and Kyung Chang Lee^{3,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² ㈜오토닉스 제어계측연구소 (Control and Measurement R&D Institute, Autonics Co., Ltd.)

³ 부경대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University)

✉ Corresponding author: gcleee@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6332

Manuscript received: 2016.3.23. / Revised: 2016.6.15. / Accepted: 2016.8.23.

This paper presents the development of a magneto-optical encoder for higher precision and smaller size. In general, optical encoders can have very high precision based on the position information of the slate, while their sizes tend to be larger due to the presence of complex and large components, such as an optical module. In contrast, magnetic encoders have exactly the opposite characteristics, i.e., small size and low precision. In order to achieve encoder features encompassing the advantages of both optical and magnetic encoders, i.e., high precision and small size, we designed a magneto-optical encoder and developed a method to detect absolute position, by compensating for the error of the hall sensor using the linear table compensation method. The performance of the magneto-optical encoder was evaluated through an experimental testbed.

KEYWORDS: Magneto-Optical encoder (마그네틱-옵티컬 엔코더), Absolute encoder (절대치 엔코더), Linear table compensation (선형 테이블 보상), Position detection (위치 감지)

1. 서론

자동화 산업기기는 제품의 특성상 높은 성능의 정밀도와 다양한 환경에서 구동할 수 있는 안정성을 요구한다. 이러한 기기의 성능은 기구부의 액추에이터와 센서에 의해 좌우되며, 특히 기구부의 상태를 인식하기 위한 위치 인식센서는 가장 중요한 기술 중 하나이다. 위치 인식센서의 하나인 엔

코더는 정밀기기에서 구동부의 위치를 파악하기 위해 사용되며, 산업기기뿐만 아니라 전기자동차, 소형로봇 등 다양한 시스템에 적용되고 있다.^{1,2}

액추에이터의 위치를 측정하기 위하여 위치센서인 엔코더는 크게 마그네틱 (Magnetic) 엔코더와 광학식 (Optical) 엔코더로 나뉜다. 마그네틱 엔코더는 충격, 습도, 먼지와 같은 주위 환경에 강인하고 소형화가 가능하나, 광학식에 비하여 분해능이

낮고 고속회전이 필요한 시스템에 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 이와 반대로 광학식 엔코더의 경우 높은 분해능을 가지고 고속 회전이 가능하다는 장점이 있으나, 외부 환경에 영향을 많이 받고 구조의 특성상 소형화가 어렵다는 단점이 존재한다.

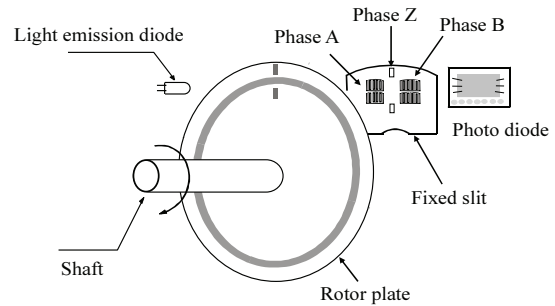
광학식 앵슬루트 엔코더의 각도 정밀도를 높이기 위한 방법으로는 회전 슬릿 (Slit)의 격자 간격을 줄여 회전당 출력 신호 수를 늘리는 방법이 있으며, 회전 슬릿에 시리얼 코드를 각인하는 방법이 있다. 첫 번째 방법은 슬릿의 격자 간격이 줄어드는 만큼 트랙 나열이 비례적으로 늘어나기 때문에 구성이 복잡하며, 신호들의 위상차이를 맞추기 위한 과정이 필요하다. 두 번째 방법은 고 분해능의 설계가 어렵고 초기 동작 시 각인된 시리얼 코드만큼 회전을 해야 얻을 수 있다는 단점이 존재한다. 마그네틱-옵티컬 엔코더는 홀센서에서 발생하는 오차를 보상하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 홀 센서의 아날로그 출력 신호를 하드웨어를 통해 보상하는 방법이 많이 사용되고 있다.^{3,4}

본 논문에서는 광학식 엔코더와 마그네틱 엔코더의 장점을 이용한 마그네틱-옵티컬 엔코더를 설계하고 선형의 절대 각도를 획득하기 위한 위치 추적 방안을 제안한다. 논문은 총 5장으로 구성하였다. 2장에서는 두 가지 방식 엔코더의 구조와 원리에 대해 설명하고, 3장에서는 마그네틱-옵티컬 엔코더의 하드웨어 구성 및 제안하는 방안에 대해 언급한다. 4장에서는 실험을 통해 엔코더의 성능 평가하고 마지막 5장에서 결론을 언급함으로써 논문을 마무리한다.

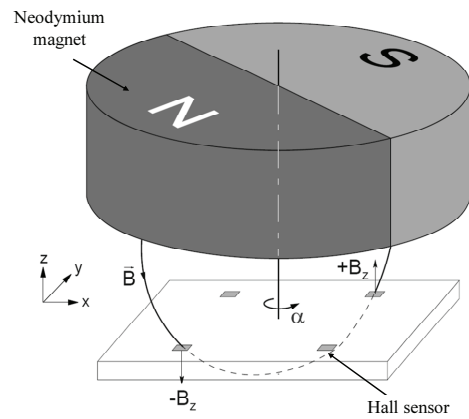
2. 엔코더의 구조와 원리

2.1 광학식 엔코더

광학식 엔코더는 구조에 따라 절대 각도를 직접 검출할 수 없지만 구조가 간단한 인크리멘탈 형과 절대각도를 알 수 있는 앵슬루트 형으로 분류된다. 먼저 광학식 엔코더는 빛을 발생하는 광원과 빛을 모으기 위한 렌즈, 전기신호로 변환하는 수광소자 (Photo Diode Array)로 구성된다. 그중 광학식 인크리멘탈 엔코더는 발광소자와 수광소자 사이에 패턴이 그려져 있는 슬릿을 설치한 후 축을 회전시키면 발광 소자의 빛이 투과되거나 차단된다. 투과된 빛은 수광 소자에 의해 전류로 변환되고 이 전기 신호는 출력회로를 거쳐 정형파 또는 디지털 펄스 형태로 출력된다. 광학식 인크리멘



(a) Structure of optical encoder



(b) Structure of magnetic encoder

Fig. 1 Comparison between optical type encoder and magnetic type encoder

탈 엔코더는 90°의 위상차를 가진 A, B, Z 상의 출력 신호를 이용하여 회전 방향과 위치 정보를 획득할 수 있을 뿐만 아니라 더 높은 분해능이 필요할 경우 기본 출력의 4배까지 분해능을 높일 수 있다. 광학식 인크리멘탈 엔코더의 광학 구조는 비교적 간단하기 때문에 고속 회전 및 고분해능의 제품으로 소형화가 가능하다는 장점이 있으나, 초기 동작 시 절대 위치 추정이 불가능하다. Fig. 1(a)는 광학식 엔코더의 구조를 나타낸 그림이다.

광학식 앵슬루트 엔코더의 경우 회전축 (Shaft)의 중심선을 기준으로 회전 슬릿에 인식이 가능한 전기적인 디지털코드 (BCD, Binary Gray Code)를 일정한 간격으로 각인한다. 이 각인된 코드를 통해 회전 위치에 따라 지정된 디지털 코드가 출력되기 때문에 절대 회전각도 검출이 가능하며, 회전각도에 대한 출력 데이터는 환경적 요인으로 변경되지 않으므로 원점보상이 불필요하다. 그러나 엔코더의 분해능을 높이기 위해서 슬릿의 크기

가 커져야 하고, 신호처리가 복잡해진다는 단점이 있다.⁵⁻⁷

2.2 마그네틱 엔코더

Fig. 1(b)는 마그네틱 엔코더에서 신호가 발생하는 원리를 나타낸 그림이다. 마그네틱 엔코더는 자석이 회전할 때 발생하는 자기장의 흐름에 따라 홀 센서의 저항 값이 변하는 원리를 이용하여 위치를 검출한다. 홀 센서는 자기저항 효과를 이용한 센서로 강자성 금속을 주성분으로 하는 합금 박막이 외부 자기 강도에 따라 저항치가 변화는 성질을 이용한다. 이 때 발생하는 저항 변화는 전 자회로를 이용하여 \sin 신호와 \cos 신호와 같은 정 현과 신호를 얻을 수 있으며, 이를 삼각함수법 (Trigonometry), 테이블 보상법 (Table Compensation), ATO (Angle Tracking Observe)와 같은 방법에 적용하여 회전 속도 및 회전 방향을 검출 할 수 있다. 또한 출력 신호는 홀 센서 자체 오차 및 외부 자기장에 의한 오차가 포함되기 때문에 이를 보상하는 과정이 반드시 필요하다.^{8,9}

마그네틱 엔코더는 광학식 엔코더와 비교하여 슬리트와 발광소자, 수광소자 등의 유리 재질의 기구적 구조물 대신 자석과 홀 센서로 이루어졌기 때문에 소형 엔코더 개발이 가능하며, 유리로 되어 있는 기구부가 없기 때문에 내부 진동과 외부 충격 및 이물질에 강인한 특징이 있다. 그러나 광학식 엔코더에 비하여 고분해능 구현이 어렵고 고속 회전이 필요한 시스템에서는 사용이 힘들다는 단점이 있다.

본 논문에서 구현한 마그네틱-옵티컬 엔코더는 1회전(360°) 당 총 1024개의 측정 영역을 이용하여 절대 회전 각도를 추정하였다.

3. 애플루트형 마그네틱-옵티컬 엔코더

3.1 마그네틱-옵티컬 엔코더의 구조

본 장에서는 기존 엔코더의 단점을 해결하기 위하여 광학식 엔코더와 마그네틱 엔코더의 기술을 통해 설계한 마그네틱-옵티컬 엔코더의 구조와 이를 구성하는 엔코더의 하드웨어 순서에 대해 설명한다. Fig. 2는 마그네틱-옵티컬 애플루트 엔코더의 구조를 표현한다. 두 개의 베어링과 결합되어 있는 회전축을 몸체에 고정한 후 회전축 중심에 지름 6 mm의 홀에 네오뮴 (Neodymium) 자석을 조립하여 마그네틱 애플루트 엔코더를 설계하였다.

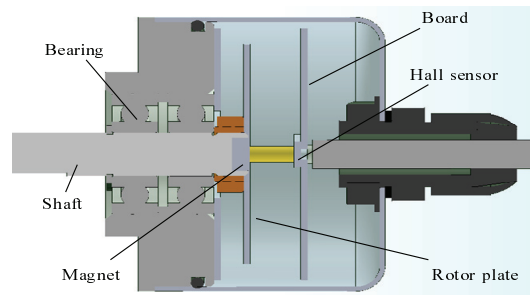


Fig. 2 Structure of converged absolute encoder based magnetic sensor

이 때 홀 센서와 네오뮴 자석이 일직선상에 위치해야 홀 센서의 출력 왜곡에 의해 발생하는 엔코더의 정도 오차를 막을 수 있다. 따라서 보드의 중앙부에 홀 센서를 결합하여 자석과 홀 센서가 일직선상에 놓이도록 설계하였다. 그리고 광학식 엔코더의 회전 슬리트를 추가하여 고분해능, 고속 회전에 대응 할 수 있도록 마그네틱-옵티컬 엔코더를 구현하였다.¹⁰⁻¹²

Fig. 2는 마그네틱-옵티컬 엔코더의 하드웨어 구성도를 나타낸다. 자석의 회전 시 4개의 홀 센서에 의해 변화하는 저항 값은 아날로그 회로를 거쳐 위상차 90°를 가지는 Sin과 Cos 신호가 출력된다. 두 신호는 FPGA (Field Programmable Gate Array) 내부의 2채널 ADC (Analog to Digital Converter) 단자에 입력되어 디지털 필터 신호처리 및 삼각함수 법을 이용하여 절대 각도를 추적할 수 있게 설계하였다. 이 때 자석의 착자 상태와 홀 센서의 자체 오차에 따라 위상오차, 오프셋 오차 등이 발생하므로 적절한 보상법을 적용해야 신뢰할 수 있는 위치 신호를 획득할 수 있다. 본 논문에서는 선형 테이블 보상법을 이용하여 오차를 개선함으로써 높은 정도의 출력 신호를 얻을 수 있음을 증명하였다.

제안하는 마그네틱-옵티컬 엔코더의 구동은 다음과 같다. 먼저 발광부의 빛은 Fig. 1(a)에 보인 것처럼 A, B, Z가 각인된 코드 디스크와 마스크를 통해 수광된다. 이때 수광소자에서 측정된 빛의 양에 따라 전류의 크기가 변하고 이 전류 크기를 아날로그 비교기 (Comparator)의 입력 신호로 이용한다. 아날로그 비교기의 기준 신호는 외부 교정기를 사용하여 DAC (Digital to Analog Converter) 출력 값으로 교정 할 수 있도록 하였다. 마지막으로 마그네틱 부에서 받은 절대 위치 값과 현재 위치 값을 계산하여 기구부의 현재 위치를 감지한다.

마그네틱-옵티컬 엔코더 동작 흐름은 다음과 같다. 먼저 초기 전원 공급 시 2극 네오뎀 자석이 회전 할 때 발생하는 신호를 삼각함수법과 선형 테이블 보상법을 이용하여 초기 절대 위치를 계산한다. 이후 광학식 인크리멘탈 카운트 값을 이용하여 고속, 고분해능의 애플루트 데이터를 출력한다.

3.2 엔코더의 절대위치 검출법

마그네틱 엔코더를 통한 절대 위치를 계산하기 위해 홀 센서의 출력 신호를 이용하여 삼각함수법을 적용하였다. 홀 센서의 출력은 아날로그 신호이기 때문에 이론상으로는 보간 (Interpolation) 후 무한대의 체배가 가능하지만 대부분의 시스템에서는 ADC를 이용하여 보간을 수행하기 때문에 제한된 체배를 가진다. 홀 센서의 출력 중 Sin 신호는 엔코더의 A상과 같고 Cos 신호는 엔코더의 B상과 동일하다는 성질을 이용하여 아래와 같은 식(1)에 적용한다.

$$\begin{aligned} \sin &= V_p \sin \theta \\ \cos &= V_p \cos \theta \end{aligned} \tag{1}$$

θ : Angle of rotation
 V_p : Amplitude of output signal

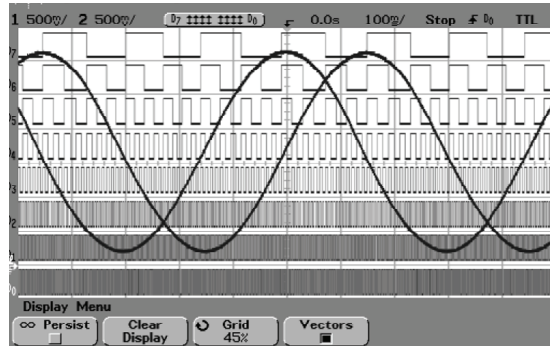
두 출력 신호로부터 초기 절대 위치를 산출하기 위해서 식(2)와 같은 간단한 삼각함수법을 이용하였다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \tag{2}$$

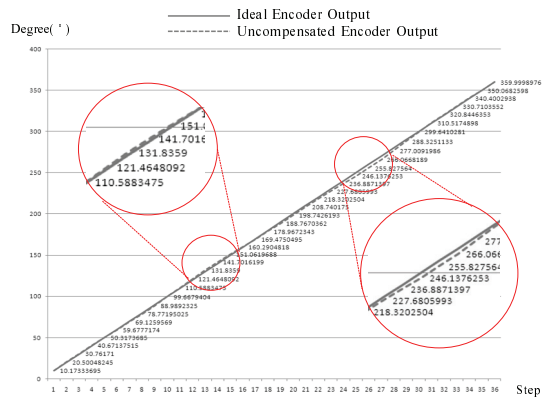
$$1 \text{ step} = 65536 / \text{Res} \tag{3}$$

Res: Resolution of Encoder

삼각함수법을 통해 얻어진 결과는 적절한 보상을 통하여 한 주기에 따라 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 의 각도를 출력한다. 삼각함수법을 이용하여 계산된 출력 값의 범위는 0 - 65536 범위의 값을 취하게 되며, 10 bit 분해능의 애플루트 엔코더를 구현하기 위해 아래와 같은 식(3)을 통해 1 Step 당 ADC 출력값을 계산할 수 있다. 이 때 데이터를 일정하게 유지 하지 못하고 흔들리는 현상이 발생하며 이를 해결하기 위해 5%의 히스테리시스 범위를 적용하여 Fig. 3(a)과 같이 안정적인 Sin 값과 Cos 값을 얻을 수 있다. 이렇게 구해진 각도 값은 삼각함수법을 적용하여 절대 각도를 계산할 수 있으나, 엔코더의



(a) Output waveform of absolute encoder



(b) Encoder output before removing the error

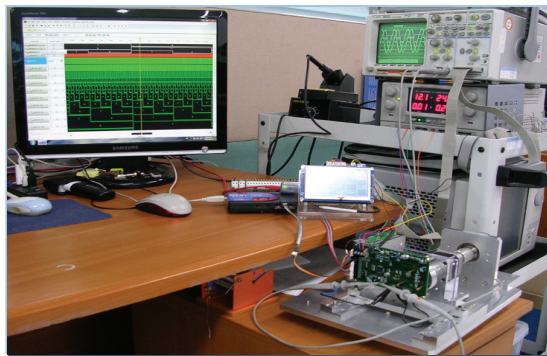
Fig. 3 Output signal of absolute encoder using trigonometry method

홀 센서 오차로 인하여 특정 구간에서 오차가 발생함을 Fig. 3(b)를 통해 확인할 수 있다. 측정을 통해 얻어진 신호에서는 130°와 260° 부근에서 가장 큰 오차를 가졌으며 이때 발생하는 최대 오차는 약 5°가 됨을 확인하였다. 이 오차는 선형테이블 보상법을 통하여 보상할 수 있으며 선형테이블을 통한 보상결과는 4장에서 진행한 실험을 통하여 확인할 수 있다.

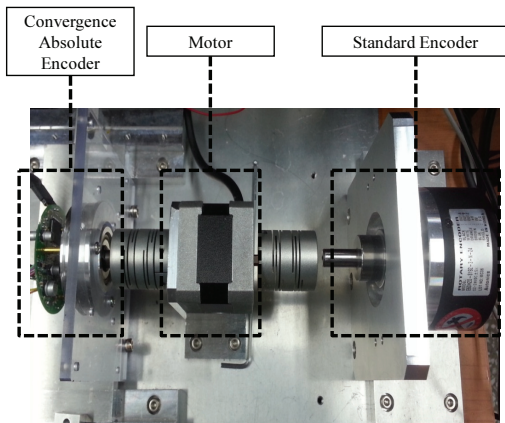
4. 실험

4.1 실험 환경

제안하는 마그네틱-옵티컬 엔코더의 위치 추적 방안을 검증하고 상용 엔코더로서 성능을 확인하기 위해 Fig. 4와 같은 실험 환경을 구축하였다. 엔코더의 회전 속도 제어를 위하여 5,000 rpm까지 가변이 가능한 모터 제어기를 제작하였고, 회전 슬리트와 자석이 조립되는 엔코더 몸체의 바깥지름



(a) Experiment environment



(b) Test bed for experiment

Fig. 4 Experiment environment for converged absolute encoder

은 50파이로 제작하였다. 엔코더에서 출력되는 각도는 케이블을 통하여 교정기와 신호 분석기 (Logic Analyzer)를 사용하여 측정하였다.

선형테이블 보상에서 사용할 기준 엔코더는 고분해능의 엔코더가 필요하기 때문에 162,000 P/R의 분해능을 가지는 Canon 사의 Laser Rotary Encoder를 선정하였다. 또한 설계한 엔코더의 아날로그 신호를 처리를 위해서는 시스템에 적합한 신호처리 보드를 설계해야 할 필요가 있다. 실험을 위해 설계한 신호처리 보드의 제어기는 FPGA를 사용하였으며, White Noise를 제거하기 위해 Linear Regulator를 실장하였다. 또한 실험이 용이하도록 홀 센서의 신호는 자동 조정이 되도록 4 Ch Digital Potentiometer를 적용하였다.

4.2 실험 결과

본 논문에서 제안하는 선형 테이블 보상법의

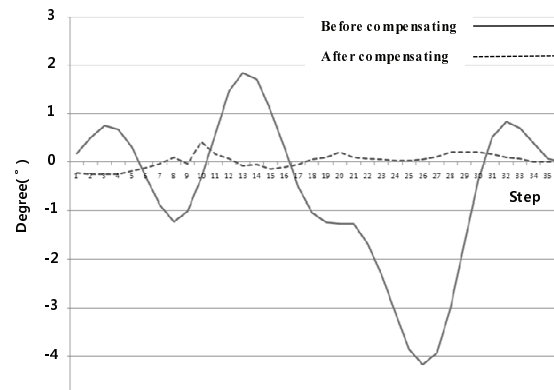


Fig. 5 Experiment result about position error using linear table compensation

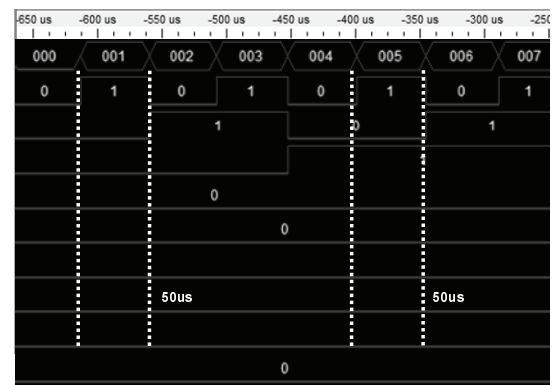


Fig. 6 Absolute position output using linear table

성능을 검증하기 위해 보상법 적용 전의 절대위치와 적용 후의 절대위치를 그래프화 하여 비교 분석하였다. 선형 테이블 보상법은 입력신호를 분석하여 보상하는 방법이 아닌 특정 메모리에 저장된 보상값을 읽어오는 방법으로 융합형 앵솔루트 엔코더와 고분해능의 기준 엔코더와의 비교 분석이 필요하다. 본 논문에서는 설계한 엔코더와 기준 엔코더를 함께 동작 시켜 0°- 360° 범위의 실제 각도 오차를 구하고 그 결과를 테이블화 하여 특정 메모리에 저장하였다. Fig. 5는 선형 테이블 보상법을 적용하기 전과 적용 후 절대 위치오차를 비교한 결과이다. 보상 전 최대 각오차는 5.5°로 발생하였으며, 보상 후 오차는 0.5°로 최대 5.0°의 오차가 보상되었음을 확인 할 수 있다. 또한, 선형테이블 보상법이 적용되기 전의 경우 마그네틱-옵티컬 엔코더를 정속으로 회전할 때 일정한 간격의 펄스를 가진 출력 신호가 발생해야 함에도 불구하고

고 특정 펄스에서 서로 다른 주기를 가진 신호가 발생한다. 이러한 오차는 360° 회전 시에는 정상 펄스 개수를 출력하지만 90° 회전 시에는 89°의 펄스가 출력되는 문제를 야기한다.

Fig. 6는 선형 테이블 보상법을 적용한 실험 결과로 엔코더의 정속 회전 시 일정한 주기의 펄스가 출력되는 것을 확인 할 수 있다. 결국 펄스 위치에 대한 절대 값이 일정하기 때문에 위치에 대한 각도 누적오차를 최소화하여 $\pm 0.2^\circ$ 의 오차를 가지는 R 사의 상용 광학식 엔코더와 유사한 정도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 절대위치 추정이 가능한 마그네틱 애플루트 엔코더를 설계하고 홀 센서 자체의 위상오차와 오프셋 오차를 보상하기 위해 구현한 선형 테이블 보상법의 성능을 실험을 통해 검증하였다. 선형 테이블 보상법을 구현하기 위해 고성능 상용 엔코더를 기준값으로 사용하였으며, 초기 홀 센서의 위상 오차와 오프셋 오차를 선형 테이블 값과 비교한 차이를 메모리에 저장하여 보상은 방법을 통해 마그네틱-옵티컬 엔코더의 절대 각도를 고속으로 추적 할 수 있다. 엔코더 출력 신호의 절대 각도 오차를 보정하기 위하여 선형 테이블 오차 보상법을 통하여 오차를 최소화 하였다. 이렇게 구해진 절대 각도는 광학식 인크리멘탈 방식 엔코더의 초기 위치로 사용되며 고 분해능, 고속 회전이 가능한 애플루트형 마그네틱-옵티컬 엔코더를 구현하였다.

기존의 광학식 엔코더의 장점과 마그네틱 엔코더의 장점을 융합하여 기계식 엔코더를 설계 하였으며, 이를 위한 추적 방안을 설계하고 제안하였다. 마그네틱 엔코더는 기존의 광학식 엔코더의 사용이 어려운 진동 및 분진이 많은 산업 분야에 적용이 가능하여 다양한 적용이 가능하다. 향후 본 논문에서 제안하는 마그네틱-옵티컬 엔코더를 이용하여 실제 현장에서의 성능을 검증하고 더욱 효율적인 알고리즘 개발에 대한 연구와 선형 테이블 보상법을 적용한 엔코더 생산기술이 필요하다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kikuchi, Y., Nakamura, F., Wakiwaka H., Yamada, H., and Yamamoto, Y., "Consideration for a High Resolution of Magnetic Rotary Encoder," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 4959-4961, 1996.
2. Miyashita, K., Takahashi, T., and Yamanaka, M., "Features of a Magnetic Rotary Encoder," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 23, No. 5, pp. 2182-2184, 1987.
3. Tsukada, T. and Kanada, T., "The Development of a Multi-Turn Absolute Encoder-A New Concept in Accordance with a Design Insensitive to Accuracy," Precision Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 66-70, 1988.
4. Cosijns, S. and Jansen, M., "Advanced Optical Incremental Sensors: Encoders and Interferometers," in: Smart Sensors and Memes, Nihtianov, S. and Luque, A., (Eds.), Woodhead Publishing, pp. 230-277, 2014.
5. Nam, Y. S. and Park, H. K., "Error in Incremental Encoder due to Vibration and Its Solution," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 6, pp. 55-61, 2008.
6. Ahn, K. H., Kim, S. H., Yang, Y. G., and Lee, C. S., "An Improved Phase Error Compensation for an Absolute Position Detector Using Table Method," Journal of Institute of Control, Robotics and System, Vol. 16, No. 10, pp. 975-981, 2010.
7. Joo, J. H., Kim, D. H., and Choi, J. K., "Analysis of Encoder Composite Signal for a Absolute Position Detection of the Synchronous Motor," Journal of Korea Institute of Maritime Information and Communication Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 1018-1024, 2011.
8. Ye, G., Liu, H., Fan, S., Li, X., Yu, H., et al., "Precise and Robust Position Estimation for Optical Incremental Encoders Using a Linearization Technique," Sensors and Actuators a Physical, Vol. 232, pp. 30-38, 2015.
9. Lee, S. H., "Development of a High-Resolution Encoder System Using Dual Optical Encoders," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 9, pp. 76-85, 2007.
10. Mar, A., "Digital Signal Processing Applications Using the ADSP-2100 Family," Prentice Hall, 1992.

11. Hwang, J. H. and Chung, C. S., "DSP Implementation of a Sinusoidal Encoder Using Linear Hall Sensor," Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 2, pp. 298-302, 2012.
12. Ahn, H. J. and Kim, K. R., "2D Hall Sensor Array for Measuring the Position of a Magnet Matrix," Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech., Vol. 1, No. 2, pp. 125-129, 2014.