

# 정지 속도 검출 가능한 이중 증분 엔코더 센서 알고리즘 개발

## Development of a Zero Velocity Detectable Sensor Algorithm with Dual Incremental Encoders

이 세 한\*, 김 병 창  
(Se-Han Lee and Byoung-Chang Kim)

**Abstract :** The output of the encoder is a digital pulse, which is also easy to be connected to a digital controller. There are various angular velocity detecting methods of M, T, and M/T. Each of them has its own properties. There is a common limitation that the angular velocity detection period is strongly dependent on the destination velocity magnitude in case of ultimate low range. They have ultimately long detection period or cannot even detect angular velocity at near zero velocity. This paper proposes a zero velocity detectable sensor algorithm with the dual encoder system. The sensor algorithm is able to keep detection period moderately at near zero velocity and even detect zero velocity within nominal period. It is useful for detecting velocity in case of changing rotational direction at which there occurs zero velocity. In this paper, various experimental results are shown for the algorithm validity.

**Keywords :** incremental encoder, M/T method, zero velocity detection

### I. 서론

전기식 모터를 구동 장치로 채용한 응용 시스템의 성능은 고급 제어 기술에 힘 입어 발전되어 왔다. 특히, 모터의 센서로 주로 사용되는 광학식 증분 엔코더는 높은 해상도와 디지털 제어기와 연결이 용이한 특성 때문에 제어 시스템에서 속도 검출 용도에 폭 넓게 사용되고 있다[1].

광학식 증분 엔코더를 이용한 회전 속도 검출법은 크게 고정주기 혹은 고정변위에 기준한 기법으로 분류된다. 고정주기 기법은 'M'법으로 알려져 있으며, 고정된 검출 주기 동안에 입력된 펄스를 계수하여 회전속도를 산출한다. 고정변위 기법은 'T'법으로 알려져 있으며, 펄스의 폭을 검출하여 회전 속도에 상응하는 값을 산출한다. 고정주기 기법과 고정변위 기법은 각각 저속과 고속 영역에서 정밀도가 가변되는 특징을 갖고 있다.

이러한 단점을 개선하고자 Ohmae[2]는 2가지 기법을 혼합하여 각각의 장점을 갖는 M/T를 제안하였다. 그렇지만 M/T법은 여전히 속도 검출 주기가 가변 되는 단점을 갖고 있다.

기존의 M/T법을 채용한 제어기는 저속 영역에서 속도 검출 주기가 극단적으로 증가되어 제어주기가 늘어나는 효과를 갖게 된다. 그러므로 저속 영역에서 증가되는 마찰력의 영향을 제대로 보상할 수 없게 된다. 뿐만 아니라 속도 검출 주기의 증가는 정밀 위치 제어기에 효과적인 가속도[3,4] 검출에 악영향을 미치게 된다.

광범위 속도 영역에 대하여 광학식 엔코더를 이용한 효율적인 속도 검출 알고리즘에 관한 연구들이 수행되었다. Belanger[5] 등은 속도 및 가속도 검출성능 개선에 엔코더의 오차와 Kalman 필터를 이용하는 연구를 수행하였다.

Dunworth[6]는 엔코더 펄스의 주파수를 검출하기 위해서 추가 하드웨어를 사용하였지만 속도 검출 주기가 길어져 정밀 제어에 필수적인 짧은 샘플링 주기에 부적합한 경향이 있다. Saito[7] 등은 속도 분포를 다항식으로 근사화 하여 순간 속도를 추정하였지만 장기간 엔코더 펄스가 입력되지 않을 경우 추정 오차가 발생하게 된다. Hori[8]와 Lee[9] 등은 제어 대상의 모델 정보를 요구하는 추정기를 이용하여 엔코더 펄스가 입력되지 않는 구간에도 주기적으로 외란을 추정함으로써 순간 속도를 양호하게 추정한 연구를 수행하였다. Hori와 Lee 방법은 엔코더 펄스가 입력되지 않는 구간에서 외란이 지속적으로 임의 가변 되는 경우는 순간 속도 추정 성능이 저하될 우려가 있을 뿐만 아니라 추정기 구성에 검출 대상의 동역학적 파라미터를 요구하는 제한이 있다. Kim[10] 등은 초정밀 엔코더를 반도체 상에서 구현하는 연구를 수행하였다. Kim 등의 방법은 저속 검출에 유리한 초미세 변위 검출에 목적을 두고 있지만, 여전히 초저속 영역에서 성능이 감소 되는 기존 엔코더 특징을 그대로 승계하고 있다. 또한, 검출대상과 엔코더 사이에 감속기를 경유한 경우는 매우 직관적이고 확실한 방법인 반면에 감속기를 사용하지 않는 경우 혹은 감속기에 백래시가 존재하는 경우, 정지속도 검출에 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 초저속 및 정지속도 상태를 안정적으로 고속 검출할 수 있는 알고리즘을 구체적으로 구현하고 정지속도의 검출 성능을 확인하기 위해서 2개의 단순 광학식 증분 엔코더[11]의 구조를 차용하여 엔코더 센서 처리 알고리즘을 구성하였다. 본 연구에서는 II 장에 엔코더 기반의 기존 속도 검출법의 특징 및 문제점에서 대해서 살펴보고, III 장에서는 채용된 이중 엔코더 센서의 원리와 특징을, IV 장에서는 구체적인 실험결과 및 토론을 서술하고 마지막으로 V 장에서는 결론을 제시하도록 한다.

### II. 엔코더 기반 속도 검출법의 특징

광학식 증분 엔코더는 디지털 형태의 펄스를 주로 출력하

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 7. 16., 채택확정 : 2008. 8. 22.

이세한 : 경남대학교 기계자동화공학부(leesehan@kyungnam.ac.kr)

김병창 : 경남대학교 기계자동화공학부(bckim@kyungnam.ac.kr)

※ 본 연구는 2006학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 수행되었습니다.

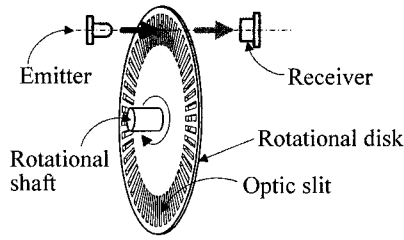


그림 1. 광학식 증분 엔코더 구조.  
Fig. 1. An optical incremental encoder.

므로 디지털 제어기와 접속이 용이하기 때문에 메카트로닉스 분야의 구동장치로서 모터의 각도검출 센서에 주로 사용된다. 그림 1은 광학식 증분 엔코더 기본 구조를 나타내고 있다. 엔코더의 회전축이 회전함에 따라서 광 슬릿이 형성된 회전판은 회전하면서 발광부와 수광부의 사이의 광 흐름을 단속한다.

엔코더의 회전축이 회전함에 따라서 엔코더 내부에서 광 흐름의 단속이 반복되면, 부착된 전기회로에서 광 흐름의 단속에 동기 되는 펄스 형태의 전기 신호가 출력되게 된다. 즉, 상위 디지털 제어기가 엔코더에서 출력되는 전기 신호의 변화를 계수하면 엔코더 회전축의 회전상태를 검출할 수 있다.

1. 속도 검출법

엔코더의 출력펄스를 이용하여 회전속도를 검출하는 방법은 M 법과 T 법으로 나누어 볼 수 있다. M 법은 고정된 샘플링 주기 동안에 입력된 엔코더 펄스를 계수하여 속도를 산출하는 방법으로, 고속회전의 경우 한 샘플링 주기 동안에 입력되는 엔코더 펄스 수가 많으므로 정확한 속도를 얻을 수 있다. 한편, 저속회전의 경우에는 한 주기 동안에 입력되는 엔코더 펄스의 개 수가 감소하여 검출 속도의 정밀도가 감소하는 특징이 있다. T 법은 엔코더 펄스 폭을 검출하는 방법이며, 저속의 경우 펄스 폭이 길어져 정확한 값을 검출할 수 있는 반면에, 고속의 경우 펄스 폭이 짧아져서 정확한 값을 검출이 곤란하여 속도 검출 속도의 정밀도가 감소한다.

일반적으로 M 법과 T 법의 장점을 혼합한 M/T 법이 널리 사용되고 있다. 그림 2는 M/T 법의 개략도를 나타내고 있다.

검출 샘플링 주기  $T_s$  동안에  $m$ 개의 엔코더 펄스가 입력되었다고 가정하자. 그림 2에서 보듯이 샘플링 주기의 종료 시점과 엔코더 펄스의 상승 에지(펄스 상승 에지에서 계수 동작이 실행된다고 가정)는 일반적으로 서로 일치하지 않는다.

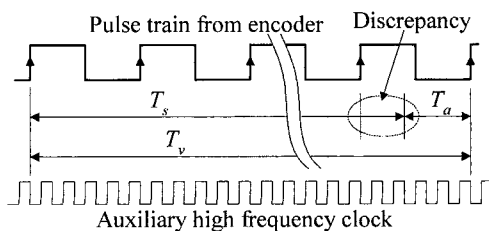


그림 2. M/T 법을 이용한 속도검출 시간 다이어그램.  
Fig. 2. Timing diagram of velocity measurement using M/T method.

따라서  $T_s$  의 종료 시점부터 이 후에 최초로 입력되는 엔코더 펄스 상승 에지 사이의 간격을  $T_a$  라 하고,  $T_v = T_s + T_a$  에 해당하는 새로운 주기를 고주파수를 갖는 보조 클럭(Auxiliary high frequency clock)을 사용하여 검출한다. 결과적으로  $T_v = T_s + T_a$  구간 내에서 검출된 완성된 엔코더 펄스는  $(m + 1)$ 개가 되며, 이상의 정보를 사용하여 이 구간에 대하여 평균 속도  $v_{avg}$  를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$v_{avg} = \frac{\Delta\theta \cdot (m+1)}{T_v} = \frac{\Delta\theta \cdot (m+1)}{T_s + T_a}, \text{ for } T_v \leq T_f \quad (1)$$

여기서,  $\Delta\theta$ 는 엔코더 출력 펄스 1주기에 해당하는 회전각으로 주어진 엔코더의 분해능에 해당하고,  $T_v$ 는 측정용 카운터의 최대값  $T_f$  이하가 되어야 한다.

본 연구에서 제안하는 정지속도 검출 가능 엔코더 시스템은 T 법의 일부 개념을 사용하며, 본 연구에서 디지털 제어기로 사용하는 DSP (Digital Signal Processor)는 내장된 캡처 및 타이머 기능을 이용하여 대상 엔코더 펄스들의 주기를 검출하도록 한다.

2. 속도 검출법의 특징

M 법 혹은 T 법은 속도 영역에 따라서 서로 상반된 검출 성능을 나타내지만 특정 크기 이하의 초저속 영역에서는 두 기법 모두 동일하게 검출 성능이 감소하는 특징이 있다.

그림 3은 수치 시뮬레이션을 이용하여 각 방법에 따른 정밀도 변화를 나타내고 있다. 이 때, 엔코더는 1회전에 100펄스 출력형용, M 법 적용 샘플링 주기는 0.1s를, T 법에 사용된 보조 펄스 주파수 10KHz를 사용, 그리고 적용 기준 회전 각 속도는 10초 동안에 0 에서 10 rps (revolution per second)로 선형으로 증가하는 파형을 사용하였다. 널리 알려져 있듯이, M 법은 저속 회전 영역에서 검출 오차가 증가하는 반면 고속 회전 영역에서 검출 오차가 감소하는 경향을 보이고 있으며, T 법은 반대 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. M/T 법은 전반적인 영역에서 양호한 검출 성능을 보이고 있으나, 저속 영역에서는 T 법과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그렇지만, M 법, T 법, M/T 법 모두 초저속 영역에서 문제를 발생하고 있다. T 법과 M/T 법은 속도 검출이 개시 후부터  $t = 0.14s$

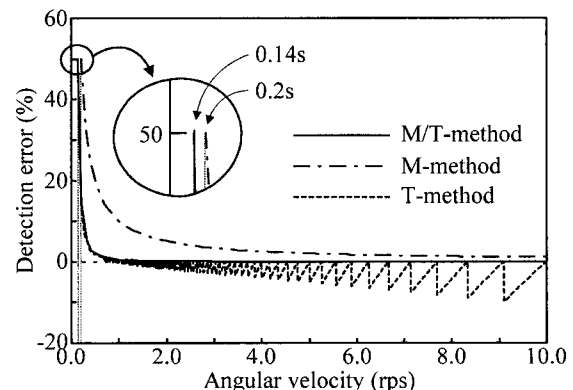


그림 3. M-, T-, M/T 기법을 이용한 속도 검출 예제.  
Fig. 3. An example of the counting encoder pulse methods with M-, T-, M/T.

에서 비로서 50%의 오차가 포함된 검출값을 얻을 수 있는 반면에 M 법의 경우  $t = 0.2s$  에서 비로서 50%의 오차가 포함된 검출값이 얻어진다.

3. 속도 검출 주기의 영향

현대 제어 시스템의 대부분이 채용하고 있는 디지털 제어기의 성능은 센서의 검출 오차뿐만 아니라 제어 주기 변화에도 영향을 받는다. 특히, 제어 주기의 증가는 제어기 이득의 제한을 초래하므로 제어 성능을 감소시킬 뿐만 아니라 안정성까지 훼손하게 된다. 특히, 저속에서 마찰력의 영향이 상대적으로 증가되므로 제어 주기의 증가는 제어 성능의 급격한 감소를 초래하게 된다. 마찰력을 보상하기 위해서 엔코더 정보를 이용할 수 없는 구간에서 마찰력 같은 외란을 추정하는 연구가 있지만, 지속적으로 가변되는 외란에 대해서 양호한 추정은 곤란하게 된다.

M 법, T 법 및 MT 법에서는 검출 주기가 주어졌을 때, 최소 검출 주기는 엔코더의 정밀도에 반비례한다. 즉, 최소 검출 가능 속도를  $1/N$ 로 감소시키기 위해서는  $N$ 배의 정밀도를 갖는 엔코더가 요구된다.

이동로봇 혹은 매니플레이터의 구동부가 동작 중에 회전 방향을 빈번하게 전환할 필요가 있는데, 회전 방향이 전환될 때, 정지 속도는 필연적으로 발생하게 된다. 앞에서 기술한 바와 같이 초저속 혹은 정지 속도 상태는 속도 검출이 시작될 때에도 필연적으로 발생하지만, 작업 중에서 빈번한 회전 방향의 전환 시에도 발생하게 된다.

다음의 그림 4는 오실로스코프(TDS3034B) 측정 데이터를 기반으로 회전 방향이 전환될 때의 회전 방향 검출 신호, 엔코더 펄스 출력을 나타내고 있다. 방향이 전환되면 정지 속도 영역에 해당하는 펄스 폭은 12.4ms로 극단적으로 증가하게 된다. 그림 4의 전반부에 표시된 감속 영역 초기에는 0.95ms 펄스가 관찰되며, 후반부에 표시된 가속 영역 후기에는 0.82ms 주기의 펄스가 관찰된다. 반면에, 회전 방향이 전환되는 것으로 예상되는 중반부에는 정지 속도 상태를 명확하게 알 수 없을 뿐만 아니라 얻을 수 있는 속도 정보도 12.4ms만에 얻어진다. 그에 따라 그 구간 도중에서는 어떠한

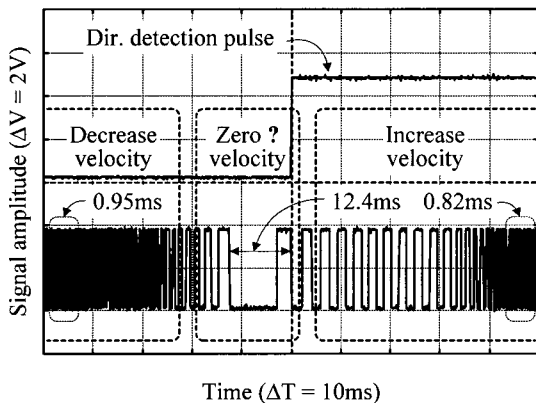


그림 4. 오실로스코프를 이용한 회전 방향 검출 신호와 엔코더 펄스의 측정 화면.

Fig. 4. Rotational direction detection pulse and its corresponding pulse train from an encoder in an oscilloscope screen.

속도 정보를 얻을 수 없게 된다. 이러한 현상은 M, T, MT 법에 공히 동일하게 발생한다. 이러한 상황은 감속기를 사용하여 초저속 검출 성능을 향상시키더라도 감속기 적용은 속도 검출 빈도 향상에는 도움이 되지 않는다.

III. 이중 증분 엔코더 센서 구현

검출 대상의 속도 범위에 상관없이 항상 엔코더 펄스가 검출 대상의 속도 정보를 명확하게 포함하면서 적절한 빈도로 출력될 필요가 있다. 본 연구에서는 이중 증분 엔코더 시스템[11]을 응용하도록 한다.

1. 엔코더 수광부의 회전

검출 대상이 매우 저속으로 회전하고 있을 때, 연결된 엔코더에서 펄스가 출력되는 순간  $t_1$  와 회전 속도 검출용 샘플링 펄스가 생성되는 순간  $T_1$ 가 그림 5에 표시되어 있다. 엔코더 펄스 출력 개시 순간을  $t_1$ , 검출 개시 순간을  $T_1$ 으로 설정한 경우를 고려하도록 한다.

펄스 입력 여부를 검출하는 순간  $T_1$ 에서 펄스의 출력 순간  $t_1$ 을 검출할 수 있음은 명확하다. 그리고 검출 주기  $T_S$  후의 시점인  $T_2$ 에는 펄스를 검출할 수 없다. 왜냐하면, 엔코더의 회전판이 매우 저속으로 회전하고 있어서 다음의 광 슬릿이 미처 수광부를 통과하지 못했기 때문이다. 그림5에 의하면, 미래의 4번째 검출 시점인  $T_4$ 순간이 되어야 비로서 2번째 펄스의 출력 순간  $t_2$ 를 인지할 수 있다. 만일, 먼 미래에 2번째 펄스가 출력될 시점  $t_2$  혹은 심지어 엔코더가 정지하여 검출이 불가능할 것으로 예상되는 시점  $t_2$ 를 정해진 가까운 미래의 시점  $T_2$ 에서 미리 검출할 수 있다면, 초저속 및 정지 속도 검출 문제가 해결될 것이다.

그렇지만, 이것은 미래 시점을 정확하게 측정하는 문제에 해당되고 물리적으로 불가능하다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 엔코더의 발광부와 수광부 조합을 알려진 속도로 회전판 위로 이동하면서 초저속으로 회전 혹은 정지한 회전판의 상태를 검출하고자 한다.

2. 이중 증분 엔코더 원리 및 특징

그림 5에서, 엔코더의 회전판이 매우 저속으로 회전하거나 정지되어 있을 때,  $t_1$  과  $t_2$  사이의 시간 차이는 일정하지 않을 수 있다. 심지어 무한대 값을 가질 수 있다. 문제 제기상  $T_S \ll t_2 - t_1$  로 그 차이값은 속도 검출 주기  $T_S$  보다는 극단적으로 길어질 수 있는 반면에 엔코더 제조 원리상 어떠한 상황에 대해서도 엔코더의 물리적인 기본 각도  $\Delta\theta$ 는 일정

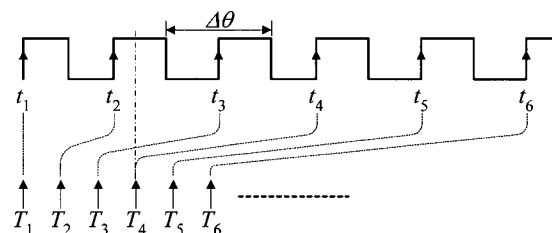


그림 5. 저속에 해당하는 펄스 신호의 샘플링.

Fig. 5. Sampling instant and pulse train for slow velocity.

하다고 가정할 수 있다.

펄스 출력 순간  $t_1$  과 속도 검출 순간  $T_1$  을 일치시킨 상태에서, 다음 번 펄스가 출력되는 순간  $t_2$  까지 소요되는 시간은  $\Delta t = t_2 - t_1$  에 해당한다. 그렇지만,  $t_2 - t_1 = \Delta t$  는  $T_S$  보다 상대적으로 매우 길어질 수 있기 때문에  $T_S$  가 경과된 후에도  $\Delta t = t_2 - t_1$  에 해당하는 정보를 얻기에는 현실적으로 불가능할 수 있다. 그러므로 그림 1에 표시된 발광부(emitter) 및 원형의 수광부(receiver)를 회전 시키는 아이디어를 생각해 볼 수 있다. 물론 수광부 회전 속도는 미리 알려져 있다. 속도 검출 주기  $T_S$  경과후에 매우 저속이거나 정지 속도  $\omega_1$  을 갖는 광 슬릿과 회전하는 원형 수광부가 일치할 수 있는 수광부의 각속도  $\omega$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\theta = \omega_1 T_S + \omega T_S \rightarrow \omega = \frac{\Delta\theta}{T_S} - \omega_1 \quad (2)$$

이 때,  $\omega_1$  는 광 슬릿이 형성되어 있는 회전판의 각속도이며, 정지 상태, 즉, 0이 될 수도 있다. 식 (2)는 엔코더 회전판의 회전 방향과 수광부 회전 방향이 서로 반대인 경우에 해당한다. 측정 대상은 회전하는 광 슬릿과 반대 방향으로 원형 수광부가 일치할 때까지 소요되는 시간이 되며, 임의의 값  $\Delta T \ll \Delta t = t_2 - t_1$  가 될 수 있다. 즉, 엔코더의 수광부가 회전함에 따라서 새롭게 입력되는 펄스 검출에 소요되는 시간  $\Delta T$  는 실제 수광부가 고정된 상태에서 새로운 펄스 검출에 소요되는 시간  $\Delta t = t_2 - t_1$  보다 짧을 것이다. 검출 대상을  $\omega$  에서  $\omega_1$  로 전환하면 식 (2)는 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$\omega_1 \Delta T = \Delta\theta - \omega \Delta T \rightarrow \omega_1 = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} - \omega \quad (3)$$

이 때,  $\omega$  는 주어진 검출 가능  $\omega_1$  범위에 대하여  $\Delta T$  가 제 어기에서 요구하는  $T_S$  에 근접할 수 있도록 하는 적절한 범위에서 선정될 필요가 있다.

이중 증분 엔코더의 핵심은 원형 수광부를 일정한 속도로 회전 시키는 것이다. 엔코더 내부의 수광부 회전을 구현하기 위해서 2개의 일반 증분 엔코더를 결합하여 시스템을 구성하였다. 2개의 엔코더는 편의상 Enc. #1과 Enc. #2로 구분되며, Enc. #1의 몸체는 Enc. #2의 회전축에 연결되어 있다. 이때, Enc. #2의 몸체는 실험장치 고정부에 부착되어 있으며, Enc. #2의 회전축(Enc. #1의 몸체)은 외부 구동모터에 의해서 일정한 속도로 회전 제어 되고 있다.

그림 6에 각 엔코더 펄스 출력 예를 나타내었다. 먼저, 그림 6(c)의 Enc. #2는 1회전에 1000개의 펄스가 출력되므로 펄스의 간격  $\Delta\theta$  는 0.36도에 해당된다. Enc. #2가 1rps로 회전 제어 될 때,  $\Delta\theta$  에 해당하는 펄스는 약 1msec 간격으로 출력될 것이다. 만일, Enc. #1의 회전축이 고정되어 있다면, 즉, 회전 각속도가 0이라면, Enc. #1의 펄스 출력은 그림 6(a)와 동일할 것이다. 물론 정확하게 Enc. #2의 펄스와 동기 되어 있지 않을 수 있으므로 그림 6(a) 과 같이 Enc. #2 출력 펄스와의 위상 차이가 표시될 것이다. 만일, Enc. #1이 초저속으로 회전하

게 되면 Enc. #1의 펄스 출력의 주기는 그림 6(b)와 같이  $T \rightarrow T_1$  으로 조금 늘어나게 될 것이다. Enc. #1 펄스 출력의 주기 변경은 Enc. #1의 회전에 기인한 것임을 쉽게 이해될 수 있다.

그림 6에 해당하는 실제의 엔코더 내부 동작을 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 수광부만 시계방향으로 회전한 경우를 나타내고 있다. 수광부가 엔코더의 광 슬릿 1개 분에 해당하는  $\Delta\theta$  만큼 회전한 시점  $t_3$  에 발광부의 광을 검출하여 새로운 펄스를 출력할 것이다. 이 상황은 그림 6(a)의 Enc. #1의 펄스 출력에 해당한다. 한편, 그림 7(b)는 광 슬릿이 형성되어 있는 회전판이 시계방향으로 초저속  $\omega_1$  로 회전하고 있는 경우를 나타낸다. 엔코더의 회전판이 시계방향으로 회전하고 있을 경우, 광 슬릿이 전진하고 있으므로 수광부가 발광부의 광을 검출하는 시점은  $t_3$  이 아닌 약간 지연된  $t_4$  가 된다.

Enc. #2 펄스가 출력되는 시점  $T_{\#2}$  와 Enc. #1의 펄스가 출력되는 시점  $T_{\#1}$  이 서로 다르기 때문에 문제가 발생할 수 있다. 그렇지만, Enc. #2는 적극적인 속도 제어를 통해서 매우 미세한 오차를 갖고 일정 속도로 회전하고 있으므로 개략적인 상수  $T$  값이 알려져 있다고 가정할 수 있다. 그림 6(b)에서  $T_1$  동안에 수광부는 시계방향으로  $\omega = 2\pi/s = 1rps$  로 회전하고 있으며, 회전판 역시 시계방향으로  $\omega_1$  로 회전하고

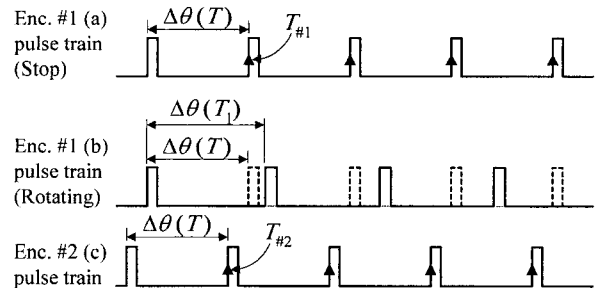


그림 6. 각 엔코더에서 출력되는 펄스 신호.

Fig. 6. Pulse train from each encoder.

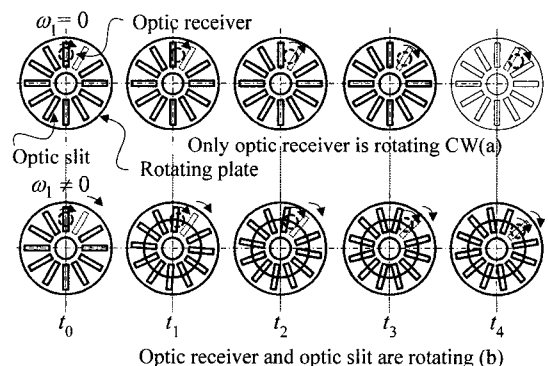


그림 7. 그림 6에 해당하는 엔코더 내부 동작.

Fig. 7. A view of inside the encoder corresponding to Fig. 6.

있다. 그러므로  $T_1$  동안 회전판이  $\omega_1$  속도로 이동하는 동안에 수광부가 이동한 각도  $\Delta\theta_1$  은 각각 다음과 같다.

$$\Delta\theta_1 = \omega \cdot T_1 \tag{4}$$

이 때,  $\Delta\theta_1$  는 엔코더 정밀도  $\Delta\theta$  와 다름에 유의한다.

한편, Enc. #1 회전축이 시계방향으로 회전할 경우, 즉, Enc. #1과 Enc. #2가 동일한 방향으로 회전할 때,  $\Delta\theta_1$  와 엔코더의 정밀도  $\Delta\theta$  는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta\theta_1 \geq \Delta\theta \tag{5}$$

식 (5)와 같이 발생하는 차이값은 Enc. #1 회전판이 시계방향으로 회전하였기 때문이므로 그 차이값과 Enc. #1 회전축의 각속도  $\omega_1$  와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 - \Delta\theta &= \omega_1 \cdot T_1 \\ \Delta\theta_1 &= \omega_1 \cdot T_1 + \Delta\theta \end{aligned} \tag{6}$$

이미 알고 있는 Enc. #2 각속도  $\omega$  와 검출된  $T_1$  의 관계식 (4)를 (6)에 대입하면, Enc. #1 회전판 각속도  $\omega_1$  의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega \cdot T_1 &= \omega_1 \cdot T_1 + \Delta\theta \\ \omega \cdot T_1 - \Delta\theta &= \omega_1 \cdot T_1 \\ \omega_1 &= \frac{\omega \cdot T_1 - \Delta\theta}{T_1} = \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 Enc. #1의 회전축의 각속도를 계산할 수 있다. 다음과 같이 수치 예제를 들어 본다. Enc. #1 펄스간격이  $T_1 = 0.00105s$  로 검출되었다. 즉, 엔코더 펄스 검출 주기가 약 5% 증가하였다. Enc. #1 축의 각속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} \\ &= 2\pi - \frac{2\pi}{1000 \times 0.00105} \\ &= 0.0476 \times 2\pi(\text{rad/s}) \end{aligned} \tag{8}$$

일반적인 증분 엔코더가 정지 속도에서 성능이 열화 되는 반면, 이중 증분 엔코더는 수광부 회전을 통해서 파생되는 수광부의 각속도  $\omega$  때문에 식 (7)에서 알 수 있듯이 검출 대상 각속도  $\omega_1$  가  $\omega$  에 근접함에 따라서 검출되는 주기  $T_1$  이 극단적으로 길어지게 되어 검출 성능이 열화 될 수 있는 특징을 갖는다. 이러한 특징은 수광부의 각속도  $\omega$  를 시스템 설계 단계에서 측정 관심 영역보다 충분히 높여서 설정함으로써 개선될 수 있다.

**IV. 실험결과 및 토론**

본 연구의 핵심인 이중 증분 엔코더 센서의 정지 속도 검출 성능을 확인하기 위하여 그림 8과 같은 실험장치를 구성하였다. 본 연구의 주제는 엔코더의 출력 펄스를 처리 알고리즘 이므로 제어기 및 알고리즘 처리용으로, 증분 엔코더 처리에 특화된 TI (Texas Instrument)의 150MHz로 동작하는 32

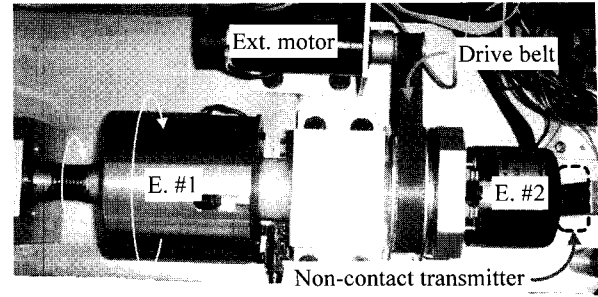


그림 8. 실험장치 구성.  
Fig. 8. Experimental setup.

비트 DSP TMS320F2812를 사용하였다. 이중 엔코더 시스템의 Enc. #2를 정해진 속도로 구동하기 위하여 외부 구동모터 (Ext. motor)와 Enc. #2의 회전축은 4:1 감속장치로 연결되어 있다. 한편, Enc. #1의 하우징은 Enc. #2의 회전축과 연결되어 회전하고 있으므로 Enc. #1의 펄스 신호는 비접촉으로 외부에 전송될 필요가 있다.

이중 엔코더 시스템은 엔코더 출력 펄스에 포함된 매우 정밀한 시간 정보를 이용하고 있으므로 무선 전송에 따른 지연을 최소한으로 감소 시키기 위해서 적외선 다이오드와 포토 트랜지스터를 이용한다. 실험 결과, 이러한 광통신은 수 나노(nano)초의 지연을 나타내고 있었으며, 엔코더 펄스 처리에 수 마이크로( ) 초 정도를 이용하고 있으므로 수 나노초 수준의 지연은 무시될 수 있다.

**1. 가변속 초저속 상태 검출**

본 연구의 이중 증분 엔코더 센서의 초저속 검출 성능을 확인하기 위해서 초저속 영역에서 속도가 다양하게 변하는 경우에 대하여 해당 속도를 검출하도록 한다. 정확한 속도 확인을 위해서 별도 외부 구동모터와 246:1감속기를 이용하여 이중 증분 엔코더 센서를 구동하도록 한다. 이 때, 구동모터가 엔코더 펄스 검출에 적절한 수준으로 회전하더라도 모터의 회전은 감속기를 통하여 최종 출력되어 최종 회전 상태는 초저속 상태가 되는 반면에 구동 모터에 연결된 엔코더

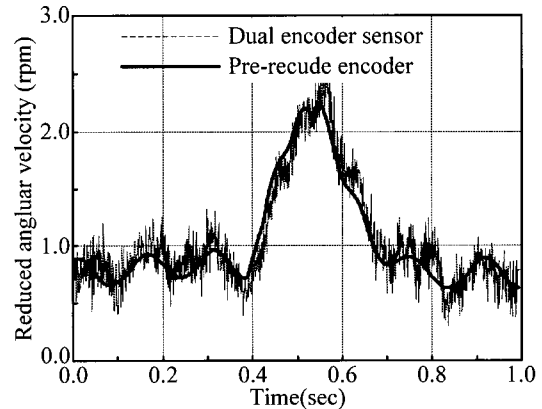


그림 9. 가변 속도에 대한 이중 엔코더 센서의 검출 속도와 감속기 전단 엔코더의 검출 속도.  
Fig. 9. Velocity profiles from the dual encoder sensor and pre-reduced encoder for various velocities.

의 펄스는 정상적으로 출력된다. 해당 실험 결과를 다음의 그림 9에 표시 하였다.

그림 9에서 감속기 전단에 부착된 엔코더에 의해서 측정된, 실선으로 표시된 감속된 속도는 전반부에 약 0.8rpm로 관찰되지만 감속기 전단의 엔코더는 약 197rpm으로 회전하고 있다. 이 때, 감속기 전단 엔코더는 500PPR (pulse per revolution)의 정밀도를 갖고 있으므로 속도 검출 주기는 약 0.61 ms가 됨을 알 수 있다. 한편, 본 연구의 이중 엔코더 센서를 246:1의 감속기를 통해서 감속된 초저속 축에 직접 부착하여 측정된, 점선으로 표시된 속도는 감속기 전단 엔코더의 결과와 유사함을 보이고 있으며, 식 (3)에서  $T_S$ 가 0.5ms에 근접하도록  $\omega$ 를 2rps로 설정하였기 때문에 검출 주기는 오히려 0.5ms에 근접하고 있다. 이러한 특징은 감속기를 경유하지 않고 초저속 상태로 회전하는 회전축의 속도를 직접 측정하는데 매우 유용하다.

2. 정지 속도 상태 검출

속도 검출이 개시되는 초반부뿐만 아니라 회전 방향이 빈번하게 전환되는 상황에서 정지 속도가 순간적으로 발생하게 된다. 순간적으로 발생하는 정지 속도 검출 성능을 확인

하게 위해서 회전 방향 전환을 반복함으로써 정지 속도를 빈번하게 발생 시켜서 그 검출 성능을 확인하는 실험을 수행하였다.

계속해서 빈번하게 회전 방향의 전환이 발생하여 정지 속도가 발생할 때, 속도 검출실험 결과를 그림 10에 표시한다. 이 때, 속도 검출 실험 결과는 순간적으로 정지 속도 영역에서 기존의 속도 검출법을 이용한 감속기 전단 엔코더의 결과는 외형적으로 유사한 검출 성능을 나타내고 있다. 본 연구의 이중 증분 엔코더 센서 알고리즘의 유효성을 강조하기 위해서 그림 10에서 점선 사각형으로 표시된 Z-region을 확대하여 그림 11에 표시 하였다.

감속기 전단의 엔코더 결과는 속도가 제로 영역으로 진입하면서 검출 빈도가 급격하게 줄어드는 현상이 관찰되고 있다. 검출 주기는 극단적으로 약 14ms로 증가하고 있다. 반면에 본 연구에서 제안된 이중 증분 엔코더 센서는 그 동일 구간에 대해서 29회의 검출 빈도를 보이며 이것은 약 0.48ms의 검출 주기에 해당하게 된다. 반면에 수광부 각속도  $\omega$ 의 제어 정밀도 때문에 검출 결과의 흔들림이 관찰되는데, 이 문제는 수광부 회전장치의 기구적 정밀도와  $\omega$  제어기 성능 향상으로써 검출 결과의 개선이 예상된다.

V. 결론

본 연구에서는 기존의 보통 정밀도급 광학식 증분 엔코더 2개로 이중 엔코더 센서를 구성하여 회전 방향이 전환될 때 발생하는 정지 속도 상태를 검출할 수 있는 알고리즘을 제시하고 그 유효성을 확인하였다.

전용의 DSP 제어기를 이용하여 이중 엔코더 센서의 펄스 처리 알고리즘을 간편하게 구현할 수 있었다. 초저속에서 속도 검출 주기가 현저하게 훼손되는 기존 엔코더의 신호처리 알고리즘 특성과는 달리 초저속 상태에서도 본 연구에서 제시한 이중 엔코더 기반의 검출 알고리즘은 속도 검출 주기를 훼손하지 않았으며, 정지 속도가 발생하는 회전 방향이 전환되는 순간에도 안정된 검출 주기 성능을 얻을 수 있었다. 이러한 성능은 초저속에서 고속의 속도 검출 주기를 유지하는 특징은 특히, 마찰력의 영향력이 상대적으로 증가하는 초저속에서 매우 유용한 장점이 될 수 있다.

이중 엔코더 센서 기반의 검출 알고리즘은 그 시스템 구성하고 있는 엔코더의 물리적인 정밀도에도 영향을 받지 않고, 기존에 제어기로 사용되고 있는 제어기에 수치 알고리즘 형태로 추가될 수 있다. 이중 엔코더 센서는 펄스 폭 정보를 취급하고 있으므로 주변의 전기적인 잡음, 온도, 전압 변화 등 주변 환경의 변화에 매우 강한 디지털 특성을 그대로 승계하고 있다.

참고문헌

[1] R. H. Brown and S. C. Schneider, "Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 11-19, 1992.  
 [2] T. Omac, T. Matsuda and K. Kamiyama, "A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. IE-29, pp. 207-211, 1982.  
 [3] J. Ishikawa and M. Tomizuka, "Pivot friction compensation

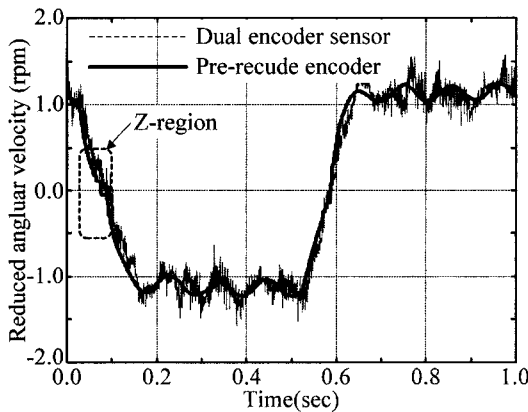


그림 10. 내부 엔코더가 고정된 경우, 이중 엔코더 센서 및 감속기 전단 엔코더에 의한 검출 속도.

Fig. 10. Velocity profiles from the dual encoder sensor and pre-reduced encoder for locked inner encoder axis.

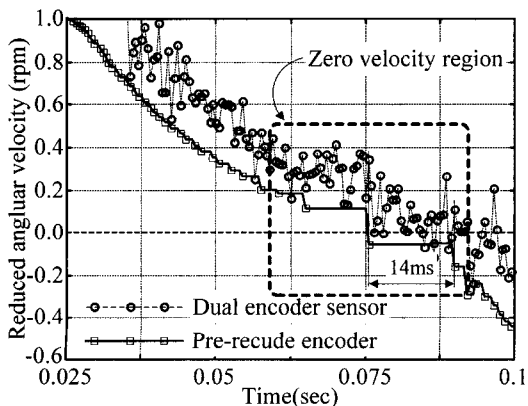
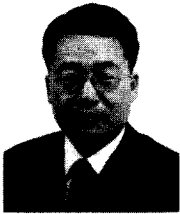


그림 11. Fig. 10의 Z-region 상세 확대도.

Fig. 11. The magnified of the Z-region in the Fig. 10.

- using an accelerometer and a disturbance observer for hard disk drives," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 3, no. 3, pp. 194-201, 1998.
- [4] S. H. Lee and J. B. Song, "Acceleration estimation for low-velocity and low-acceleration regions based on encoder position data," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-64, 2001.
- [5] P. R. Belanger, P. Bobrovolny, A. Helmy, and X. Zhang, "Estimation of angular velocity and acceleration from shaft-encoder measurements," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 17, no. 11, pp. 1225-1233, 1998.
- [6] A. Dunworth, "Digital instrumentation for angular velocity and acceleration," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-18, pp. 1322-139, 1969.
- [7] K. Saito, K. Kamiyama, T. Omae, and T. Matsuda, "A microprocessor controlled speed regulator with instantaneous speed estimation for motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 35, pp. 95-99, 1988.
- [8] Y. Hori, "Robust and adaptive control of a servomotor using low precision shaft encoder," *IEEE IECON'93*, nov. 15-19, Hawaii, pp. 73-78, 1993.
- [9] S. H. Lee, T. A. Lasky, and S. A. Velinsky, "Improved velocity estimation for low-speed and transient regimes using low-resolution encoders," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 9, no. 3, pp. 553-560., 2004.
- [10] 김근주, 김윤구, "발광다이오드를 이용한 초정밀 변위 측정용 마이크로 엔코더 칩 제작," 한국정밀공학회지, 제 16권 제2호, pp. 74-81, 1999.
- [11] 이세한, "이중 광학식 회전 엔코더 구조를 이용한 고정밀도 엔코더 시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제24권 제9호, pp. 76-85, 2007.



### 이 세 한

68년 4월 22일생. 1989년 고려대학교 기계공학과(공학사). 1991년 고려대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 경남대학교 기계자동화공학부 조교수.

관심분야는 자동화로봇 시스템의 설계 및 제어, 모터 제어 시스템, 생산자동화 기구, 메카트로닉스.



### 김 병 창

71년 1월 10일생. 1996년 부산대학교 기계공학과(공학사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 2003년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2005년~현재 경남대학교 기계자동화공학부 조교수. 관심분야는 삼차원 형상 정밀

측정, 시스템 설계 및 보정, 메카트로닉스.