

## 서보 모터의 제어성능 향상을 위한 외란 관측기 구현 및 속도검출방법 개선

### (Disturbance Observer Implementation and Speed Detection Improvement for Control Performance Enhancement of the Servo Motor)

朴 楨 日 \*

(Jung Il Park)

#### 要 約

서보모터 드라이버에 적합한 아날로그 외란 관측기를 Impact Drop성 외란의 억제제어에 도입하였다. 이 외란 관측기의 이점은 검출한 모터전류와 모터의 속도로부터 빠르게 외란 추정을 할 수 있다는 것이다. 그리고 모터속도를 검출하는 새로운 M/T 방식을 제안하였다. 이 방식은 Ohmae의 M/T 방식에 비해서 검출 Dead Time을 줄일 수 있다. 또 순시속도 검출방식을 사용한 서보모터의 저속제어를 수행하였다. 평균속도로 부터 순시속도를 추정하기 위해서 1차의 속도 추정기를 제안하였다. 실제로 실험으로써 이러한 방식들이 서보 시스템의 속도 제어 성능을 개선하는 것을 확인하였다.

#### Abstract

An analog disturbance observer, which is suitable for servo motor drive, was employed to suppression control of the impact drop disturbance. The main advantage of the observer is that a fast response disturbance estimation is obtained using the detected motor current and speed. And the new M/T method for motor speed detection is proposed. This method should be able to reduce the detection dead time compared with the Ohmae's M/T method. Also, the low speed control of a servo motor using instantaneous speed detection method is described. To estimate the instantaneous speed from the average speed, the speed estimator of the first order is proposed.

Actually we confirmed that these methods improve the speed control performance of the servo system with experiments.

#### 1. 서론

\*正會員, 嶺南大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Yeongnam Univ.)  
接受日字 : 1993年 11月 20日

본 논문에서는 서보모터를 제어함에 있어서 제어 성능을 향상 시키기 위한 여러가지 방안들을 복합적

으로 고찰하여 보고 실제로 구현하여 그 효과를 살펴 보고자 한다.

공작기계나 로봇 매니플레이터의 서보계는 그 동작에 동반해서 여러 종류의 외력이 인가된다. 매니플레이터의 고정도 위치 제어나 토크 제어를 실현하기 위해서 이들의 외력에 대해서 서보계의 강인성을 향상시키는 방법이 연구되고 있다. 예를들면 외란 관측기로 대표되는 가속도 제어보상의 방법이 지금까지 제안되고 있고<sup>[1,2]</sup> 로봇 매니플레이터의 궤적 추종동작이나 토크제어에 있어서 큰성과를 거두고 있다.<sup>[3]</sup> 지금까지 외란을 관측하여 가속도를 보상하는 방법을 실제 하드웨어로 구현한 실에는<sup>[1,2]</sup> 방법이 조금씩 다르고 속도가 빠른 마이크로프로세서를 이용하여 소프트웨어로 구현하거나 소프트웨어와 아날로그회로가 결합된 방식이다. 서보 모터의 가속도(전류)제어 루프는 빠른응답이 아주 중요한 관건이 되므로 본 논문에서는 이러한 외란 관측기를 아날로그 회로만을 이용하여 간단하게 구현함으로써 샘플링 시간에 무관한 빠른 응답을 갖는 외란 관측기를 구현하고자 한다.

디지털 제어 시스템에서 인크리멘탈 엔코더를 사용하여 속도를 검출하는 방법으로는 고속과 저속에서 각각 다른 방법이 사용된다. 고속에서는 속도가 빨라서 단위 시간당 카운트되는 엔코더의 펄스 갯수가 많기 때문에 엔코더의 펄스수를 일정시간마다 헤아려서 속도를 검출하는 M 방식이 이용된다. 또 저속에서는 속도가 느려서 단위시간당 카운트할 수 있는 엔코더의 펄스 갯수가 적기 때문에 검출 분해능이 떨어지게 된다. 그래서 매우 높은 주파수를 이용하여 엔코더의 펄스 간격을 측정하여 속도를 검출하는 T 방식이 이용된다. Ohmae등이 이 두가지 방법을 결합하여 고속이나 저속에서 동시에 사용할 수 있는 M/T 방식을 제안하였다.<sup>[4]</sup> 그러나 이 논문에서 제안한 M/T 방식은 하드웨어로 구현함에 있어서 엔코더의 펄스와 샘플링 시각을 동기화시켜야 하기 때문에 초저속에서는 샘플링 구간이 가변되는 현상이 발생하게 된다. 또한 이 논문의 방법으로는 초저속제어를 수행하기 위해서는 제어시스템의 Dead Time이 길어지게 된다. 그래서 본 논문에서는 샘플링 시각과 검출구간이 동기화될 필요성이 없으면서 Dead Time을 줄일 수 있는 새로운 M/T 방식을 제안한다. 이 방식은 한 샘플링 구간 내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 초저속에서는 엔코더 펄스가 발생하는 시점 바로 다음의 샘플링 시점에서 속도를 검출하는 T방식으로 전환시킬 수 있는 장점이 있다.

또한 펄스수가 많지 않은 엔코더를 사용할 경우 특히 초저속에서는 펄스간격이 길어지게 되어서 순시

속도를 검출하는데 애로점이 발생한다.<sup>[3]</sup> 그러므로 저속에서의 속도제어시에는 속도검출 지연시간이 증가해서 속도제어계가 불안정해지기 쉽다. 그래서 초저속에서 안정하게 응답성이 좋은 속도제어계를 실현하기 위해서는 검출지연이 적은 속도 검출치를 얻을 필요가 있다. 그래서 근래에 와서 순시속도를 검출하기 위한 여러 방법들이 연구 되고 있는데, 대표적으로 속도 관측기를 이용하는 방법이 연구되고 있다.<sup>[3,5]</sup> 위에서 언급한 M/T 속도검출방법은 속도검출을 할 때 순간의 실제속도가 아니라 평균속도를 검출하게 되어 검출 지연이 존재하게 되며, 또 초저속 제어를 수행하기 위해서는 Dead Time 이 길어지는 문제점이 있다.<sup>[9]</sup> 그래서 본 논문에서는 복잡하지 않고 마이크로프로세서 레벨에서 구현이 가능한 방법을 모색하여 순시속도를 검출할 수 있는 방법을 제시한다. 이 방법은 1차의 추정기를 이용하여 순시속도를 추정하는 것이다. 대부분의 속도제어계는 속도 Profile로 사다리꼴의 모양을 사용하고 있기 때문에 가속이나 감속이 되는 저속구간에서는 Ramp 지령이므로 1차의 추정기는 순시속도를 검출하는데 탁월한 효과를 갖게 된다.

## II. 외란 관측기 설계 및 실험

### 1. 외란 추정 원리

그림1은 외란추정의 원리도로 가속도(전류) 검출결과와 실제 출력을 입력으로해서 외란 관측기를 구성한다.

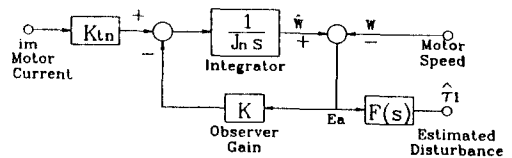


그림 1. 외란 관측기의 블록도

Fig. 1. Block diagram of disturbance observer.

전류와 속도를 입력요소로 하고 추정 외란  $\tau_1(s)$  까지의 전달함수를 나타내면 (1)식과 같이 쓸 수 있다. 여기에서  $K_m$ 은 모터의 노미널(nominal) 토크상수이고  $J_n$ 은 모터의 노미널 관성 모멘트.  $\omega$ 는 관측기가 추정한 모터의 속도이며,  $\omega$ 는 모터의 실제속도이다. 또  $K$ 는 관측기의 이득이다.

$$\hat{\tau}_1(s) = [K_m I_m(s) - J_n s \omega(s)] \cdot \frac{F(s)}{J_n s + K} \quad (1)$$

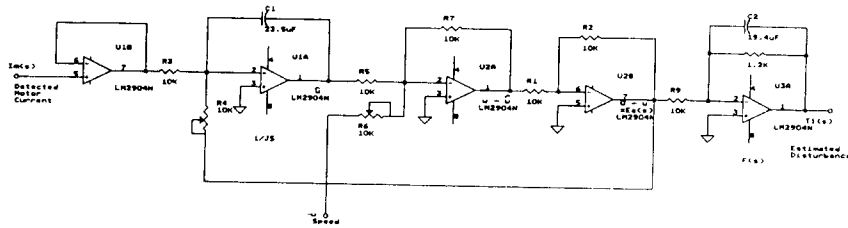


그림 2. 외란 관측기의 회로 구성도  
Fig. 2. Circuit configuration of the disturbance observer.

F(s)는 필터인데 1차의 지연요소를 갖는 저역 필터로 하면 추정외란 (1)식은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{t}_i(s) = \frac{K_m I_m(s) - J_n s \omega(s)}{(J_n s + K)(1 + T_f s)} \quad (2)$$

여기서  $T_f$ 는 필터의 시정수이다. (2)식을 보면 외란 관측기는 결과적으로  $T_f$ 와  $J/K$ 의 두개 시정수를 갖는 모양으로 되는데 이 두 시정수의 결정은 전자는 추정값의 리플 형태를 보고 이 보다 낮은 주파수로 결정하며 후자는 상태 관측기의 응답 속도와 관계한다.

2. 외란 관측기 구현

앞절에서 논한 외란 관측기는 OP Amp. 소자를 이용하여 그림2와 같이 구현할 수 있다.

그림2를 살펴보면 U1B는 전류를 검출할 때 버퍼 목적으로 사용 되었으며, U1A는 감산을함과 동시에 모터의 관성 모멘트량 만큼 적분을 하도록 한다. 이 때 감산을 행할 때 R4의 가변 저항으로 관측기의 이득 K 를 조절할 수 있다. U2A는 실제 속도와 추정된 속도의 오차를 구하는 기능을 수행하는 소자이며 이 소자에 연결된 가변저항 R6는 속도를 추정된 전압과 실제의 속도인 F/V Converter 출력 전압과의 DC 레벨을 조정하는 역할을 한다. U2B는 관측기의 위상을 고려하기 위하여 삽입한 인버터이다. U2B의 출력은 R4 저항을 통하여 U1A 소자로 피드백이 된다. U3A 소자는 추정된 외란의 리플 성분을 고려하여 저역 필터로 첨가 한 것이다.

3. 제어계 구성 및 외란 억제제어

여기에서 말하는 외란이라함은 서보계에서 하중토크, coriolis힘, 원심력, 중력, 관성력으로 이루어지는 간섭토크와, 관성모멘트 변동분의 토크, 점성토크, 쿨롱마찰 토크, 토크리플등을 총체적으로 합한 것을 의미한다.

이 외란 관측기는 참고문헌 [7] 의 논문에서 논하

고 있는 외란 상태 관측기와 등가인 관측기가 되며, (1)식을 보면 K의 이득이 양이면 외란 관측기의 극점이 항상 음이므로 안정하며 그 수렴속도는  $K/J_n$ 의 값, 즉 고유치의 위치에 따라서 결정된다. 다시 말하면 이 외란 관측기의 성능은 관측기의 극위치에 따라서 결정된다. 이렇게 추정한 외란을 피드포워드 보상을하면 노미널 관성모멘트항만을 서보모터에 존재하도록 하여 노미널 관성모멘트로 가속 제어할 수 있다. 즉, 이 외란 관측기를 이용하여 추정한 외란 양만큼의 가속도 성분을 속도 제어기에서 서보 모터로 인가된 값에 더함으로써 외부에서 인가된 외란 성분을 보상할 수 있는 속도 제어 시스템을 구성할 수 있다.

속도검출은 엔코더의 펄스를 F/V(Frequency to Voltage)변환을 하여 검출하였다. 속도제어기로는 아날로그 PI 제어기를 이용하였다.

그림3과 그림4는 실제로 서보 모터에 마찰 부하가 인가되어 있을 때에 처음에는 외란을 보상치 않고 있다가 어느정도 시간이 지난후에 보상을 행한 결과를 나타낸 것이다. 부하를 인가하는 방법은 1000rpm으로 회전하는 모터의 회전축에 약 1 oz-in의 마찰부하를 걸었다. 그림상의 왼쪽을 기준 시점으로 하면 약 3초 이후에 부하가 인가되고 5초 이후부터 관측기로 추정된 량으로 토크 지령을 보상하기 시작하였으며 약 8초가 되었을 때 부하를 해제하였다.

그림 3은 실제 속도와 추정된 외란을 나타낸 것이다. 외란 억제제어를 수행하는 시점부터 속도가 보상이 되며 외란이 보상됨을 알 수 있다. 보상되기 전에는 외란에 의하여 속도가 870rpm으로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 모터에 인가 되는 전류와 추정된 외란을 나타낸 것이다. 외란을 보상하는 시점 부터 인가된 외란을 보상하기 위하여 전류가 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기에서 사용된 전류 드라이버의 이득은 0.25A/V이다. 무부하시에 모터로 주입되는 전류

의 양은 150mA [600mV] 이며 부하가 인가 되었을 때는 282.5mA [1.13V] 로 전류가 증가 되었으며, 관측기의 보상이 시작되면 300mA [1.2 V] 로 전류가 더 증가됨을 알 수 있다.

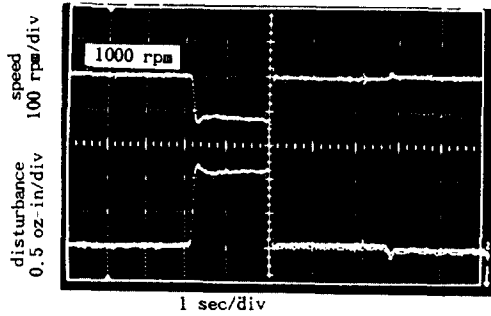


그림 3. 외란 인가시의 속도응답과 추정외란  
Fig. 3. Speed response and estimated load when the load is applied.

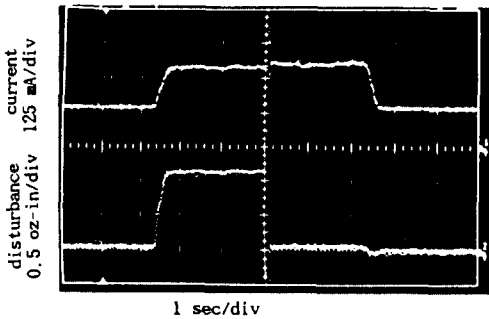


그림 4. 외란 인가시의 모터 전류와 추정외란  
Fig. 4. Motor current and estimated load when the load is applied.

### III. 속도 검출방법 개선

#### 1. 기존의 속도검출 방식의 원리

그림 5은 Ohmae의 M/T방식의 속도 검출원리를 설명한 그림이다.<sup>[4]</sup>

검출시간( $T_d$ )과 샘플링시간( $T_s$ )의 시작점과 엔코더 펄스는 동기가 되어 있다. 위 그림은 엔코더 펄스를 엔코더 펄스의 상승에지에서 시작하여 짧은 펄스폭을 갖도록 파형정형한 그림이고 아랫쪽 그림은 엔코더 펄스폭을 측정하는데 이용되는 주파수가 높은 클럭 파형이다. 그림5에서 측정된 회전속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(rpm) = \frac{60 f_c m_1}{P m_2} \quad (3)$$

여기에서 P는 엔코더의 한바퀴당 발생하는 펄스수이고,  $f_c$ 는 클럭펄스의 주파수이며,  $m_1$ 과  $m_2$ 는 각각 검출시간( $T_d$ )동안 카운트된 엔코더 펄스수와 클럭 펄스수이다.

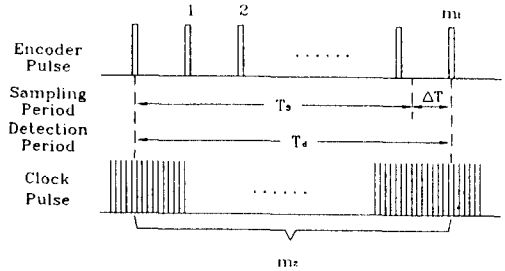


그림 5. Ohmae의 M/T 방식의 속도 검출 원리  
Fig. 5. Speed detection principle of the Ohmae's M/T method.

#### 2. 제안 속도 검출 방법 원리<sup>[9]</sup>

이 절에서는 같은 精度를 가지면서 검출 Dead Time을 줄일 수 있는 M/T 방식을 설계하기로 한다.

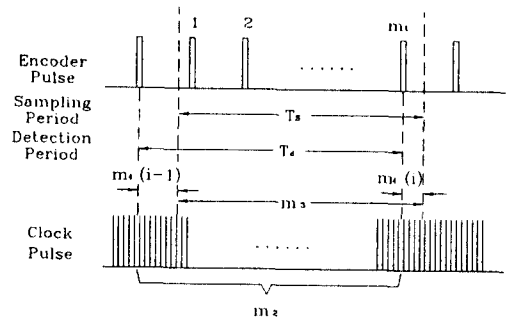


그림 6. 제안한 M/T방식의 속도검출 원리  
Fig. 6. Speed detection principle of the proposed M/T method.

그림 6를 살펴보면 엔코더 펄스와 샘플링 시점을 동기시키지 않고 그 사이의 폭을 측정함으로써 Ohmae의 방법과 같은 精度로 속도를 검출할 수 있다. 그림 6에서 측정된 회전속도도 (3)식과 같이 쓸 수 있다. 단, 이 때의  $m_2$ 는 아래의 식과 같이 계산된다. 여기에서  $m_3$ 는 샘플링구간 동안의 클럭펄스 카운트수이고,  $m_4(i)$ 는 현재 샘플링 시각과 바로 직전의

엔코더 펄스 사이에 클럭 펄스를 카운트한 값이고,  $m_4(i-1)$ 은 지난번 샘플링 시각에서의 값이다. 또  $j$ 는 한 샘플링 구간내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 초저속인 경우를 고려하기 위하여 도입한 것으로 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이 엔코더 펄스 사이에 샘플링 구간이 몇개 인가를 카운트한 값이다. 한 샘플링 구간 내에 엔코더 펄스가 발생하는 초저속이 아닌 경우는  $j$ 의 값이 항상 1이다.

$$m_2 = j \cdot m_3 - m_4(i) + m_4(i-1) \quad (4)$$

제한한 속도검출회로는 그림 12에서 PPI와 D/A 변환기를 제외한 부분의 하드웨어로 구성할 수 있다. 카운터1은 높은 입력 주파수를 분주하여 원하는 일정 시각 마다 샘플링 시점을 발생시키기 위한 카운터이다. 카운터2는 그림 6에서의  $m_4(i)$ 와  $m_4(i-1)$ 의 폭을 측정하기 위한 것이다. 카운터2에 카운트된 카운터 값을 읽어 들이기 위해서 CPU는 인터럽트가 걸리면 첫 순간에 래치의 값을 읽어들이며 샘플링 이전의 엔코더 펄스와 샘플링 펄스 사이의 폭이 측정되게 된다. 카운터3는 샘플링 구간 동안의 엔코더 펄스 수를 카운트하기 위한  $m_1$  카운터이다.

측정한 값을 읽어서 속도를 계산하는 과정은 그림 13의 순서도에서 순시속도 추정과 제어입력 인가 부분을 제외한 나머지의 부분으로 나타낼 수 있다. 이 순서도에서  $j$ 는 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이 모터의 속도가 초저속이어서 한 샘플링 구간내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 경우를 고려하기 위하여 도입된 것이다. 즉, 초저속인 경우에 엔코더 펄스 사이에 몇개의 샘플링 구간이 들어가는가를 카운트하는 인자이다. 원리는 엔코더 펄스가 발생할 때 까지 샘플링 구간이 몇구간 인가를 세어서 속도를 판단하는 것이다. 한 샘플링 구간내에 여러개의 엔코더 펄스가 발생하는 경우의  $j$ 는 항상 1이고, 모터의 속도가 아주 느려서 한 샘플링 구간내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 경우에는 엔코더 펄스가 발생할 때 까지 샘플링 구간이 몇 구간 인가를 카운트한 값이다. 이 경우는 결국 T 방식과 등가로 되고 엔코더 펄스가 발생한 바로 다음의 샘플링 시점에서 속도를 계산한다.

3. 기존 방식과 제안 속도검출방식의 비교

그림 7과 그림 8에서 Ohmae가 구현한 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방식을 비교하였다. 그림 7의 경우는 저속이며 그림 8의 경우는 하나의 샘플링 구간내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 초저속의 경우의 타이밍시퀀스를 나타낸 것이다. 그림 9를 살펴

보면 본 논문에서 제안한 방식이 짧은 시간내에 속도를 검출해서 샘플링 구간마다 새로운 제어입력을 인가할 수가 있다. 이에 비해서 아래의 그림은 검출구간이 길고 매번 마다 하나의 엔코더 펄스폭은 측정할 수가 없도록 되어 있으며 외부 변화에 대해서 빠르게 제어입력을 인가할 수 없는 구조로 되어 있다. 즉, 속도를 검출해서 이에 대응한 제어입력을 인가하는 구간이 길어서 검출 Dead Time이 길어지는 효과로 나타난다. 특히 그림 8과 같은 초저속에서는 이러한 현상이 더 심해져서 속응성 있게 제어를 수행할 수 없게 된다. 표 1은 이 검출 Dead Time의 길이를 속도에 따라서 정량적으로 비교한 것이다. 여기에서 검출 Dead Time은 그림 7.8에서 검출구간이후 시점부터 제어입력 인가완료 구간까지로 정의한 것이다. 예를들면 그림 7.8의 (a)에서는 제어입력이 인가되는  $u_1$ 구간과 바로 그 앞시점의 엔코더 펄스 발생구간을 포함한 전체구간을 말하며 (b)의 경우는  $u_1$ 이 인가되는 구간을 나타낸다.

표 1. 검출 Dead Time 길이의 비교

Table 1. Comparison of the detection dead time length.

	Low Speed	Very Low Speed
Proposed Method	$T_s + 1T_s$ ( $T_s(1+1/m_1)$ )	$T_s + 1T_s$
Ohmae's Method	$T_s + \Delta T + 1T_s$ ( $T_s(1+2/m_1)$ )	$2T_s$

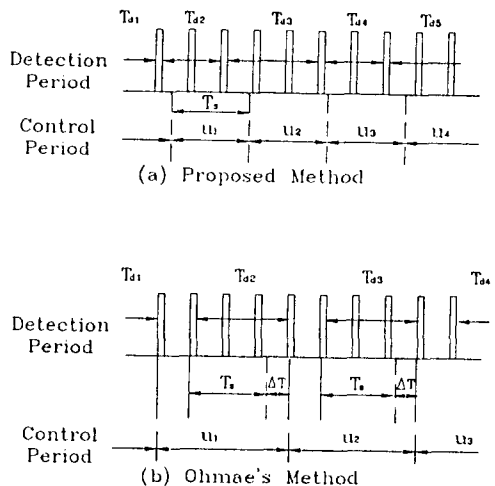


그림 7. 저속에서의 타이밍 시퀀스의 비교  
Fig. 7. Comparison of the timing sequences at low speed.

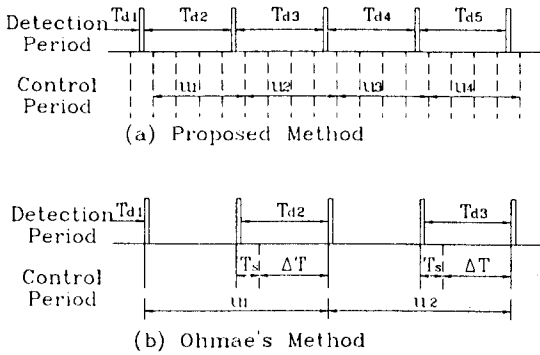


그림 8. 초저속에서의 타이밍 시퀀스의 비교  
 Fig. 8. Comparison of the timing sequences at very low speed.

그림 9는 표 1에서 최악의 경우의 Dead Time 길이를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 샘플링 구간내의 엔코더 펄스수가 적은 초저속일 수록 본 논문에서 제안한 방식의 Dead Time이 짧아지는 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

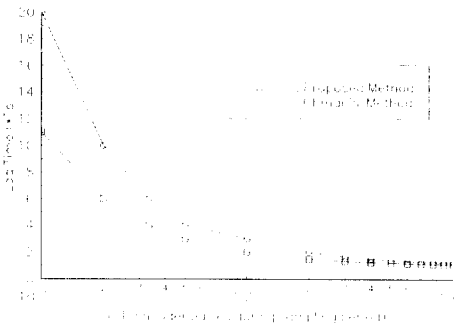


그림 9. 최악의 경우에서의 Dead Time의 비교 그래프  
 Fig. 9. Comparison graph of the dead time at worst case.

4. 제안 순시 속도 검출 방법<sup>[10]</sup>

서론에서 언급한바와 같이 펄스수가 많지 않은 엔코더를 사용할 경우 초저속에서는 앞절에서의 검출방식으로는 평균속도 밖에 검출할 수가 없다. 그래서 좋은 제어성능을 달성하기 위해서는 순시속도를 추정할 필요가 있다. 순시속도는 다음에서 설명하는 바와 같이 한스텝 전의 값을 이용하여 추정할 수 있다.

1) 저속인 경우

샘플링 구간내에 엔코더의 펄스가 1개 이상인 저속인 경우에 순시속도를 추정하는 원리를 그림10에서 설명한다. 순시속도를 추정하는 방법은 먼저 식(3.4)에 의해서 평균속도를 계산한 후, 다음과 같은 1차 추정기를 이용하여 순시속도를 추정한다.

저속에서는 검출구간 끝에서의 순시속도와 샘플링 시점에서의 순시속도의 차이가 상당하므로 i번째 샘플링 시각에서의 순시속도(■표시)는 평균속도(□표시)를 이용하여 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{n}_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{T_{di} + T_{d(i-1)}} \left[ \frac{T_{d(i-1)} + T_{di} + m_4(i)}{2} \right] + N_{i-1} \quad (5)$$

식(5)에서  $T_{di} \approx T_{d(i-1)}$ 로 가정하고  $T_{di}$ 구간동안 카운트 한 값이  $m_2$ 이므로 다음식으로 된다.

$$\hat{n}_i = \frac{3N_i - N_{i-1} + \frac{m_4(i)}{m_2} \cdot (N_i - N_{i-1})}{2} \quad (6)$$

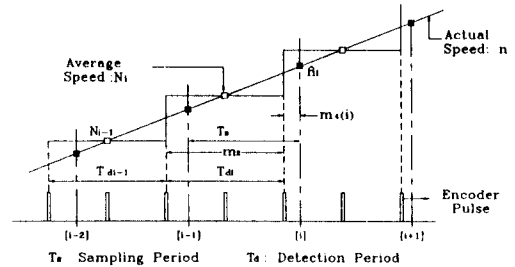


그림 10. 저속영역에서의 순시속도의 검출  
 Fig. 10. Instantaneous speed detection at low speed region.

2) 초저속인 경우

속도가 초저속이어서 1샘플링 구간내에 엔코더 펄스가 카운트 되지 않을 경우를 그림 11을 이용하여 설명한다. 그림 11의 경우는 1차의 추정기를 사용하여 순시속도를 검출하는 원리를 나타낸 것이다. 먼저 (3.4)식을 이용하여 평균속도를 구한다음 이 평균속도  $N_i$ 를 이용해서  $j=1, 2, \dots$  인 샘플링 순간에서의 순시속도를 1차로 확장 추정할 수 있지만 검출구간  $T_{di}$ 에 비해서 추정해야 할 구간이 길기 때문에 불확실한 추정이 될 가능성이 많다. 그래서 그림 11과 같은 초저속인 경우에는 (6)식을 이용하여  $[i]$  번째 엔코더 펄스 시점에서의 순시속도를 추정하여  $[i+1]$  번째 구간( $j=1, 2, \dots$ )까지 같은 속도로 간주한다.

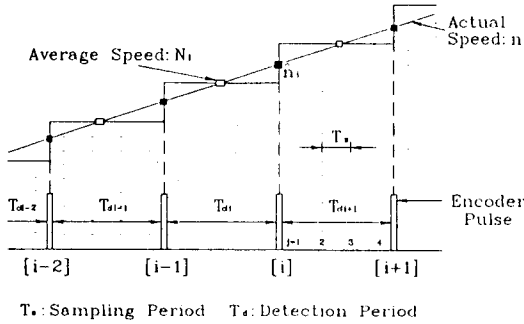


그림 11. 초저속영역에서의 순시속도의 검출  
Fig. 11. Instantaneous speed detection at very low speed region.

5. 속도제어 시스템 구성 및 실험  
1) 속도제어 시스템 구성

앞에서 설명한 대로 순시속도를 검출해서 저속제어를 하기 위하여 그림12와 같은 하드웨어를 구성할 수 있다.

실험을 하기 위한 하드웨어는 TTL소자와 LSI소자(8253, 8255), D/A변환기를 사용하여 구성하였으며 IBM-PC/AT의 슬롯에 장착할 수 있도록 카운터들과 래치, PPI(8255)등을 PC에서 이용하지 않고 있는 I/O 번지로 할당하였다.

속도를 읽어들이서 속도를 검출하고 제어입력을 계산, 인가하는 모든 알고리즘은 그림 13의 순서도에 나타난 대로 C 언어를 사용하여 작성하였으며 컴파일 한 수행파일을 수행시켜 속도제어를 수행하였다. 카운터1(8253)로 들어오는 PC의 1MHz의 클럭 주파수를 분주하여 10msec마다 인터럽트를 걸어 샘플링을 하였다. 엔코더의 펄스간격을 측정하기 위한 카운터2로 들어가는 높은 주파수클럭도 1MHz의 PC 클럭을 이용하였다. 카운터 3로는 샘플링 구간 동안의 엔코더 펄스 수 즉,  $m_1$ 을 카운트 한다.

이렇게 측정된 값을 이용하여 (3.4)식으로 먼저 평균속도를 검출하고, 순시속도를 추정한 다음 제어입력은 Digital PI(Proportional-Integral) 제어입력을 계산하여 그림 12의 PPI(8255)를 통하여 D/A 변환기로 내보낸다.

카운터 1과 카운터 3은 8253을 이용하였으며 카운터2는 TTL을 사용하여 16비트의 동기카운터로 구성하였다. 모터는 ELECTRO-CRAFT 회사의 150W 급의 DC 서보 모터를 이용하였는데, 엔코더의 1회전당 펄스수가 800개의 것을 이용하였다.

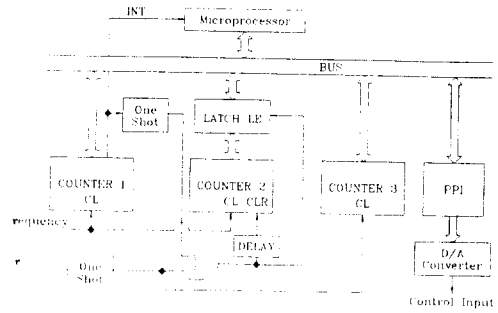


그림 12. 저속제어를 위한 디지털 하드웨어 블록도  
Fig. 12. Digital hardware block diagram for the low speed control.

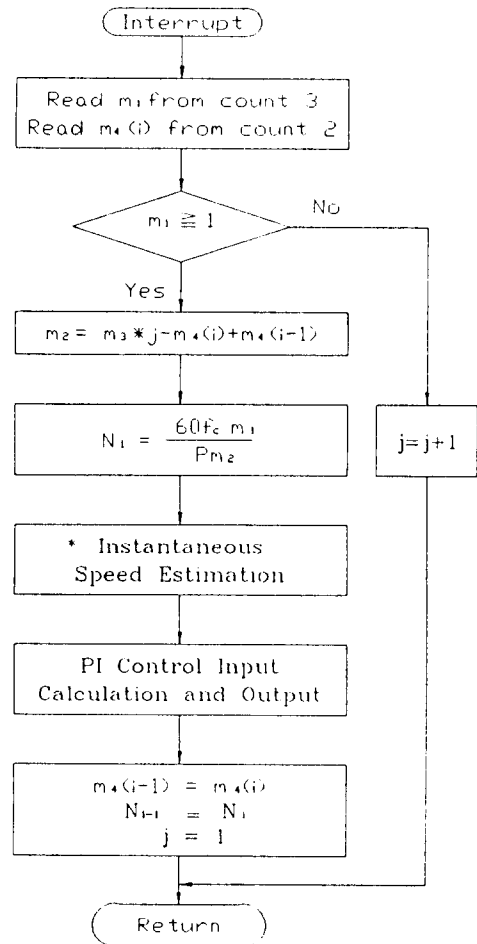


그림 13. 순시속도 추정 및 속도제어 순서도  
Fig. 13. The flowchart of the instantaneous speed estimation and speed control.

2) 실험 및 고찰

그림 14에서 그림 16까지는 실험으로 검출한 속도이다. 모터에는 타코제너레이터가 부착되어 있어서 실제의 순시속도를 알 수가 있다. 먼저 속도제어를 수행하기전에 이 타코제너레이터의 출력과 본 논문에서 다루고 있는 각종 디지털 속도 검출방식을 이용하여 10 msec마다 속도를 검출하여 D/A 변환기로 출력하여 얼마나 순시속도에 가까운가를 비교하였다. 초저속의 경우에는 타코제너레이터의 출력에 잡음이 많이 섞여 비교가 곤란하여 60rpm에서 200rpm내에서 비교를 하였다. 오실로스코프의 가로축 1 눈금은 10 msec이다.

그림 14의 결과는 모터의 회전속도가 최고 200rpm 이었으며 최저가 60rpm 이었다. 그림 14의 (a)는 순시속도를 추정하지 않은 평균속도와 타코제너레이터의 값을 비교한 것이며, (b)는 (6)식의 1차 추정기를 이용하여 순시속도를 추정한 것이다. 예상대로 순시속도를 추정하지 않은 평균속도는 순시속도에 비해서 10msec정도의 검출지연이 존재한다는 것을 알 수 있다. 아울러 (6)식으로 추정한 방식이 순시속도에 근접함을 알 수 있다.

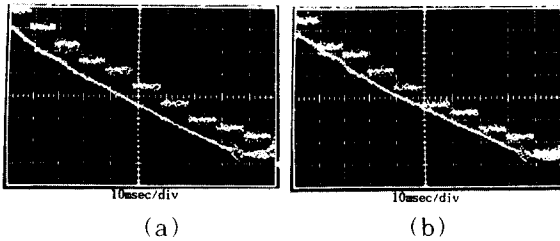


그림 14. 실제속도와 검출속도의 비교 (a) 평균검출, (b) 1차 추정기를 사용한 검출  
Fig. 14. Comparison between the real speed and the detection speed. (a) Average detection, (b) Detection using first order estimator.

그림 15는 Ohmae의 M/T 방식을 실제 하드웨어로 구현하는 것은 번거로워서, 엔코더 펄스주기동안 높은 클럭펄스를 카운트하는 T방식과 본 논문에서 제안한 M방식으로 저속에서의 속도를 검출한 결과이다. 결과를 보면 두 방식의 차이점은 거의 없고, T방식 보다 본 논문에서의 M/T방식의 결과가 약간 지연되어 있음을 알 수 있는데 이것은 T방식이 매 엔코더 펄스마다 속도를 검출할 수 있는데 비해서 M/T방식은 샘플링 시점까지 기다려야 하기 때문이다. 또 고

주파 성분이 약간 제거되어 있음을 볼 수 있는데 이것은 T방식은 매 엔코더 펄스마다 속도를 검출하지만 M/T방식은 몇개의 엔코더 펄스구간의 평균속도를 검출하는데 기인한 것 같다. 그림 16은 한 샘플링 구간 동안에 엔코더 펄스가 카운트 되지 않는 초저속의 경우에 속도를 검출한 결과이다. 분해능이 7.5 rpm 이지만 본 논문에서 제안한 프로그램을 이용하면 7.5rpm이하의 속도도 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 엔코더 펄스가 발생할 때까지 샘플링 구간을 연장시키는 효과때문이다. M/T방식으로는 이러한 초저속 검출은 불가능하다.

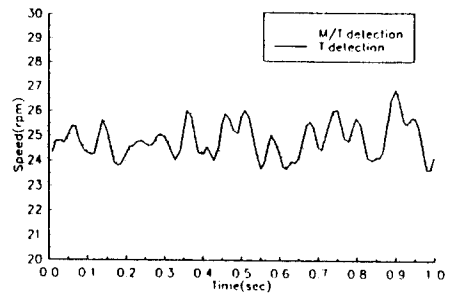


그림 15. 저속에서의 T방식과 제안한 M/T방식을 사용한 속도 검출  
Fig. 15. Speed detection using the T method and the proposed M/T method at low speed.

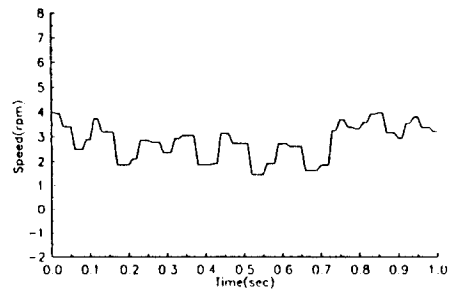


그림 16. 초저속에서의 제안한 M/T 방식을 사용한 속도검출  
Fig. 16. Speed detection using the proposed M/T method at very low speed.

그림 17은 12rpm과 20rpm사이를 속도제어한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 (6)식을 사용하여 순시속도 추정한 결과를 이용한 (c)의 경우가 가장 좋



은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또 그림 18은 엔코더의 분해능인 7.5rpm 보다 저속인 5rpm의 일정속도로 속도제어를 수행한 결과이다. 여기에서도 (6)식을 이용하여 1차로 순시속도를 추정하여 제어를 수행한 (b)의 경우가 좋은 결과를 얻었다. 대체로 실험결과 데이터의 리플이 심한 것은 샘플링 시간이 10msec로 너무 길고, 엔코더의 회전당 펄스수가 800개로 너무 적고, 모터에 연결된 관성모멘트가 너무적으며, D/A 변환기의 분해능(8비트)이 낮은데 기인한 것 같다. 초저속제어를 더 견실하게 수행하려면 이러한 점을 고려할 필요가 있을 것 같다. 여기의 모든 그림은 속도감출 값을 실시간으로 PC의 RAM에 저장한 다음 플로팅한 것이다.

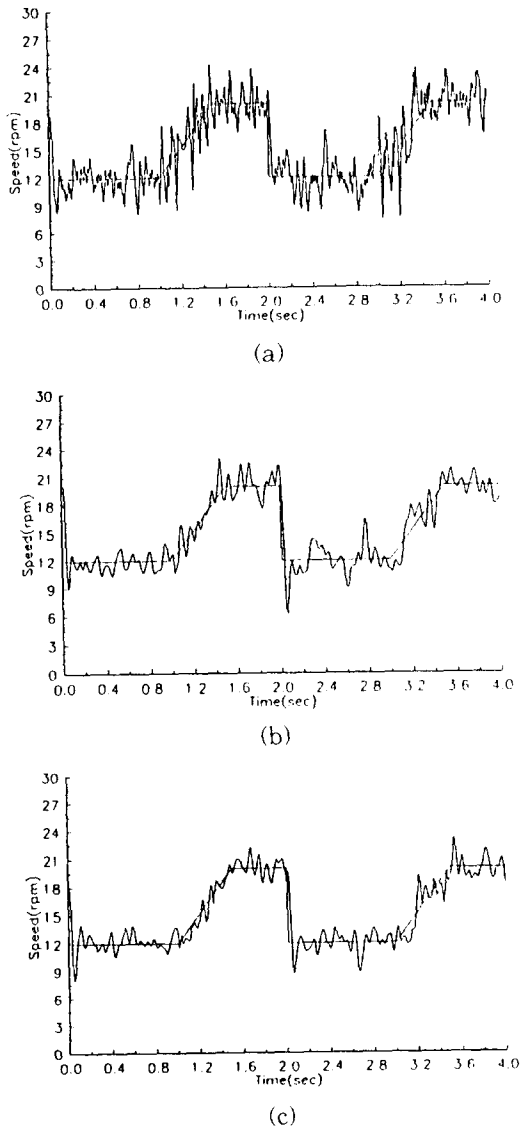


그림 17. 저속제어 실험결과  
(a) M 방식을 사용 (b) (3,4)식을 이용한 평균 M/T방식을 사용 (c) (6)식을 사용한 1차 추정방식 사용

Fig. 17. Experimental results at low speed control. (a) M method (b) Average M/T method with eq.(3,4) (c) First order estimation with eq.(6)

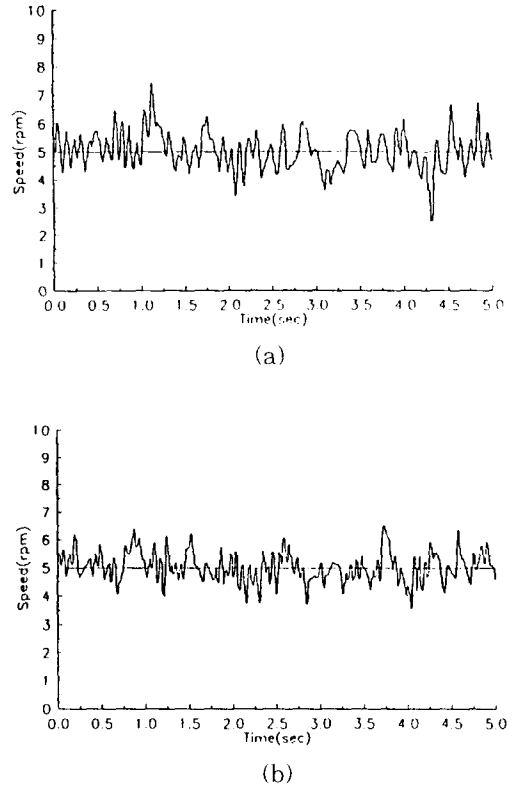


그림 18. 초저속제어 실험결과  
(a) (3,4)식을 이용한 평균 M/T방식 사용 (b) (6)식을 이용한 1차 추정방식 사용

Fig. 18. Experimental results at very low speed control. (a) Average M/T method with eq.(3,4) (b) First order estimation with eq.(6)

IV. 결론

빠른 응답특성을 갖는 외란 관측기를 아날로그 소자만을 이용하여 구현하여 외란이 갑작스럽게 인가되

있을 때 이의 영향을 억제할 수 있음을 실험을 통하여 보였다. 구현된 외란 관측기의 특성은 빠른 응답 특성을 갖는다.

또한 엔코더를 이용하여 모터의 속도를 검출함에 있어서 기존 Ohmae의 M/T 방식보다 Dead Time을 줄일 수 있는 M/T 방식을 제시하였으며, 제시한 방식과 기존의 M/T 방식의 Dead Time의 길이를 정량적으로 비교하였다. 본 논문에서 제시한 방식이 기존의 방식에 비해서 Dead Time이 훨씬 짧음을 보였다.

또한 이 방식은 한 샘플링 구간 내에 엔코더 펄스가 발생하지 않는 초저속에서도 엔코더 펄스가 발생하는 시점 바로 다음의 샘플링 시점에서 속도를 검출하는 T방식으로 전환할 수 있는 장점이 있다.

그리고 제한한 M/T 속도 검출방법을 이용하여 정확한 속도검출과 속도제어를 할 수 있음을 실험을 통하여 보였다.

또한 순시속도 검출에 의한 저속제어도 수행하였다. 저속에서나 엔코더 분해능 이하의 초저속에서 순시속도를 검출하기 위하여 1차 추정기를 제안하였으며, 이를 이용하여 속도제어를 수행하는 것이 평균속도 검출에 의한 속도제어 보다도 우수한 성능을 나타낸다는 것을 확인하였다.

아울러 본 논문에서 구현한 인터페이스 회로는 모터 제어에 국한된 것이 아니라 Linear Motion 일지라도 속도 센서로 광학 엔코더를 사용하는 모든 시스템에 적용할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방식은 서보 드라이버의 성능향상에 이바지 할 것으로 기대 된다.

#### 參 考 文 獻

- [1] S.Ozaki, M.Ohara and K.Ishida, "A Microprosser Based DC Motor Drive with a State Observer for Impact Drop Suppression", *IEEE/IAS Annual Meeting*, pp.771-775,1983.
- [2] T.Ohmae, T.Matsuda, M.Kanno, K. Saito and T.Sukegawa, "A Microprocessor -Based Motor Speed Regulator using Fast-Response State Observer for Reduction of Torsional Vibration", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.1A-23, No.5, pp.863-871, September/October 1987.
- [3] 土手康彦, *ロバスト 高速 サーボ 制御技術*, トリケップス出版部, PP. 251 - 266, 1991.
- [4] T.Ohmae et al., "A Microprocessor-Controlled High Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol.1E-29, no. 3, pp.207-211, Aug.1982.
- [5] K.Fujita et al., "Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for ac Servo Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 1A-28, no.4, pp.864-872, July/August 1992.
- [6] 渡邊, "速度推定 オブザーバを用いた デジタル サーボ," *電氣學會 論文誌 D*, vol.107, no.12, pp.1468-1474, 1987.
- [7] 川路茂保, "オブザーバ 理論の 實用化への 展開," *電學誌*, Vol.110, No.8, pp. 645-648, 1990.
- [8] 大西公平, "電動機 およびロボットの制御," *電學誌*, Vol.110, No.8, pp. 657-660, 1990.
- [9] 채상락, 박정일, 이석규, "서보모터의 고정도 속도 검출을 위한 M/T 방식의 하드웨어 구현," *한국자동제어 학술회의 국내편*, pp.365-369,1993
- [10] 류재규, 박정일, 이석규, "PC 기반의 순시속도 검출에 의한 서보모터의 저속 제어," *한국 자동제어 학술회의 국내편*, pp.377-382,1993
- [11] *IBM Technical Reference Personal Computer AT*, International Business Machines Corporation,1986.

## 著者紹介



朴 楨 日(正會員)

1958年 4月 8日生. 1981年 2月 경북 대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1983年 2月 서울 대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1989年 2月 서울 대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1983年 4月 ~ 1984年 12月 삼성전자 종합 연구소 연구원. 1989年 4月 ~ 1992年 2月 삼성 종합 기술원 선임 연구원 1992年 3月 ~ 현재 영남대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 적응 제어, 퍼지 제어, 신경망 제어, 공장 자동화 및 컴퓨터 제어 등임.