

관측기 이론에 기초한 저속 모터 속도 추정 및 성능 개선

백린, 안현식
국민대학교 전자공학과

Enhanced Motor Speed Estimation in Low Speed Range Based on the Observer Theory

Lin Baek and Hyun-Sik Ahn
School of Electrical Engineering, Kookmin University
E-mail : lightlin@kookmin.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 저속으로 회전하는 모터의 속도를 추정함에 있어서 속도 관측기를 이용하고 적절한 보상을 통해 가속/감속 운전 시에도 속도 추정 성능을 개선시킨다. 가속도 정보를 이용한 보상을 통해, 모터 인코더 카운터 값으로부터 발생하는 양자화 오차를 줄인다. 가속/감속 운전시 인코더 펄스에 의한 평균속도는 펄스가 발생한 시점에서 불연속일 수 밖에 없게 된다. 제안된 방식은 이 불연속적인 평균속도를 가속도 보상을 통해 연속적으로 증감하는 보상된 속도를 얻고 이를 다시 관측기 입력에 보상하여 양자화 오차를 감소시킨다.

I. 서론

최근 산업 공정에서 로봇 또는 위치 제어 기계에 요구되는 위치 및 속도 정밀도가 크게 높아짐에 따라 직 접구동형 모터가 널리 쓰이게 되었고 모터의 정밀한 저속 운전이 필요하게 되었다.

일반적으로 모터의 속도를 알아내는데 산업 공정에서 가장 보편적으로 사용되는 것이 증분 인코더이다. 증분 인코더를 이용해 속도를 추출하는 방법은 측정된 위치의 역 차분법(Backward difference)을 이용함으로써 회전자 위치의 근사값을 얻을 수 있다. 이 방법을 이용하는 대표적인 방법이 M/T 방식[1]이다. 증분 인코더는 모터

속도에 비례하는 펄스 열을 제공하기 때문에, 저속 영역에서는 인코더 펄스의 낮은 진동수로 인해 속도 정보가 확보되기 힘들고 역 차분법으로 구해지는 속도 추정치는 양자화로 인하여 심각한 노이즈를 포함하게 된다. 이 노이즈를 줄이기 위해 관측기 이론이 연구되어 왔다.

Lorenz 와 Van Pattern 은 모터 속도 추정을 위한 페루프 관측기를 제안했다[2]. 여기서 역 차분법에 비하여 큰 토크 리플의 감소가 페루프 관측기에 의해서 달성되었다. Kim 과 Sul 은 모터 속도와 랜덤 외란을 추정하는데 칼만 필터를 사용했고[3], Yang 과 Ke 는 [2]에서 제안한 페루프 관측기에 보상 기법을 사용해 성능을 개선시켰으로써 저속도 추정의 정확도를 높였다[4].

본 논문에서는 Yang 과 Ke 가 제안한 관측기 모델을 모의 실험을 통해 성능을 비교해 보았으며, 등속도 뿐만 아니라 등가속도로 회전하는 모터의 속도를 추정하기 위하여 θ_0 보상 기법을 소개하고 모의 실험을 통해 속도 추정 성능을 확인해 보기로 한다.

II. M/T 방식을 이용한 모터 속도 측정

증분 인코더를 사용하는 서보 모터의 속도를 검출하는 방법으로 고속 측정 방식인 M 방식과 저속측정 방식인 T 방식을 겸용한 M/T 방식이 보편적으로 알려져 있다.

그림 2.1은 M/T 방식의 원리를 도식적으로 나타낸다.

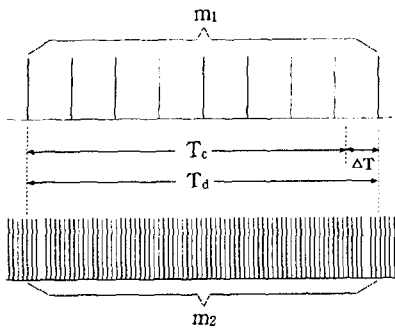


그림 2.1 M/T 방식의 원리.

M/T 방식의 원리는 카운터를 가지고 증가되는 m_1, m_2 를 이용하여 속도를 획득하는 것이다. 추출시간 사이에 모터 회전각의 변화로 속도를 정의하며, rpm 단위로 환산하면, 식 (2.1)과 같다.

$$N_f = \frac{60X}{2\pi T_d} = \frac{60X}{2\pi(T_c + \Delta T)} \quad (2.1)$$

여기서,

- N_f : 추출 시간 동안의 각 변위의 변화율.
 - X : 인코더로부터 발생된 펄스 수의 계산에 의해 얻어진 각 변위
 - T_c : 샘플링 주기
 - T_d : T_c 가 주어진 후에 발생한 첫 펄스 시간까지를 동조시킨 시간
 - m_1 : T_d 동안 카운터 된 인코더 펄스의 수
 - m_2 : T_d 동안 카운터 된 f_c 의 클럭 펄스의 수
- 이다.

위 식 (2.1)은 식 (2.2)와 같이 다시 쓸 수 있으며,

$$N_f = \frac{60f_c m_1}{P m_2} \quad (2.2)$$

여기서 P 는 인코더 펄스 발생기의 한 바퀴의 펄스 수이다. 1 회전에 대응되는 인코더 펄스 발생기의 펄스 수와 클럭 펄스 주파수는 일정하기 때문에, 속도는 m_1, m_2 의 비로 계산된다[1].

위의 방법은 산업분야의 대부분의 모터 드라이브 시스템에 증분 인코더로부터 모터 속도를 측정하기 위해 사용된다. 그러나 M/T 방식은 저속에서 좋지 않은 성능을 보인다. 첫째, 이 방법은 추출 시간(T_d) 동안의 평균 속도를 나타내고, 그래서 추출 시간 지연 $T_d/2$ 가 발생

한다. 즉 속도 측정이 현재 순시속도가 아닌 과거의 속도를 측정한다고 할 수 있다. 저속일 때는, 펄스 인코더의 낮은 진동수로 인해 추출 시간(T_d)이 길어지고, 모터 속도가 감소할수록 속도 추출 시간 지연은 급격히 증가한다. 둘째, 제한된 인코더 펄스 진동수에 의해 모터 속도의 추정속도도 제한되게 된다. 저속일 때는 속도 제어의 샘플링 주파수도 낮아지게 되어 속도 제어의 성능은 떨어지게 된다.

III. 관측기를 이용한 저속 모터속도 추정

저속으로 회전하는 모터의 속도를 추정하는 방법의 하나로 페루프 관측기를 사용한다. 그림 3.1의 직류 모터 모델에서 점성 계수를 고려한 시스템의 전달 특성을 살펴보고 이에 기초하여 페루프 관측기를 설계하기로 한다. 여기서, K_t 는 모터 토크 상수, J 는 관성 모멘트, B 는 점성계수, i 는 모터 전류, 그리고 T_d 는 외란 토크이다.

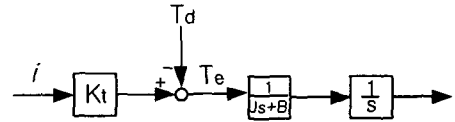


그림 3.1 직류 모터 모델의 블록 선도.

그림 3.1의 직류 모터 모델을 상태 변수 방정식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{J} \end{bmatrix} i + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} T_d \quad (3.1)$$

$$= \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}u + \mathbf{D}T_d$$

모터의 변위를 측정하는 것으로, 출력 방정식은 다음과 같다.

$$y = \theta = [1 \ 0] \mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (3.2)$$

Luenberger[5]에 의한 전차수 상태 관측기(Full-order state observer)는 아래와 같다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{G}u + \mathbf{K}(y - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}) \quad (3.3)$$

그림 3.2는 관측기를 이용한 피드백 제어 시스템의 블록선도를 나타낸다. 관측기에서 입력은 측정된 모터 변위와 모터 토크이고, 제어 루프는 미분, 비례, 적분

제어기로 이루어진다. 추정되는 속도는 다음과 같이 모터 파라미터와 관측기 이득의 함수로서 표현될 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{\left(\frac{\hat{k}_i}{k_i} \frac{J}{j} s^3 + \left(\frac{\hat{k}_i}{k_i} \frac{B}{j} + k_1 \right) s^2 + \frac{k_1 \hat{B} + k_2}{j} s + \frac{k_3}{j} \right) \omega + \frac{1}{j} \frac{\hat{k}_i}{k_i} s^2 T_d}{s^3 + \left(\frac{\hat{B}}{j} + k_1 \right) s^2 + \frac{k_1 \hat{B} + k_2}{j} s + \frac{k_3}{j}} \quad (3.4)$$

추정된 속도는 모터의 모든 파라미터 값이 정확하게 추정될 때 ($\hat{k}_i = k_i, \hat{j} = j, \hat{B} = B$) 외란 토크(T_d)를 제외하면 분자 항과 분모 항이 같아지게 된다. 즉, 관측기의 추정된 모터 속도는 실제 모터 속도와 동일하게 된다.

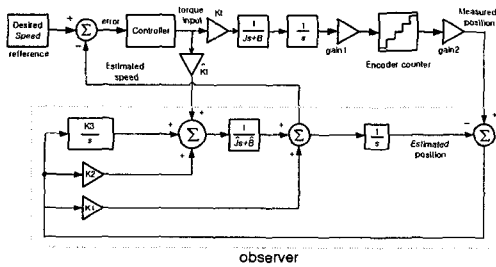


그림 3.2 관측기를 이용한 피드백 제어 시스템.

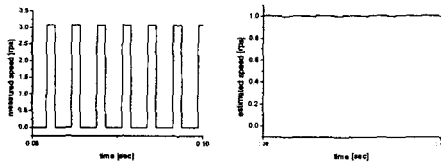


그림 3.3 1rps로 회전하는 모터의 관측기 응답.

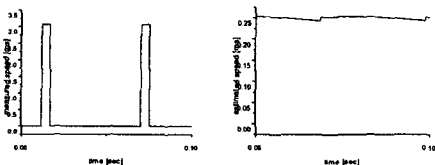


그림 3.4 0.25rps로 회전하는 모터의 관측기 응답.

그림 3.3 과 그림 3.4 는 각각 1rps 와 0.25rps 로 회전하는 모터의 관측기에 의한 추정 속도를 나타낸다. 추정된 속도는 관측기 입력인 인코더 카운터 값의 양자화로 인해 저속일수록 더 큰 오차를 가지게 된다.

Yang 과 Ke 는 추정속도의 오차를 줄이기 위해, 이전 펄스까지의 평균 속도를 매 샘플링 시간마다 인코더 카

운터 값에 더해주고, 새 펄스가 나오면 보상을 중지시키는 작업의 반복(θ_c 보상)을 통해 관측기 입력의 양자화 오차를 줄였다[4]. 이는 관측기 입력이 양자화 되지 않은 값으로 근사화 시키는 효과를 얻을 수 있다. 그림 3.5 는 θ_c 보상의 원리를 설명하고 있다. 모터가 등속 회전을 할 경우는 양자화 오차가 없는 효과를 얻을 수 있으나 모터가 등속이 아닌 경우에 대해서는 양자화 오차를 완전히 없앨 수는 없다.

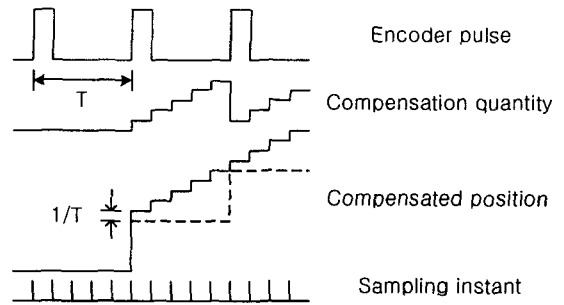


그림 3.5 Yang 과 Ke[4]가 제안한 θ_c 보상 원리.

IV. θ_a 보상에 의한 관측기 성능 개선

일정하지 않은 속도로 회전하는 모터상에서 인코더 카운터 값의 양자화 오차를 줄이기 위해서는 가속도에 의한 보상이 필요하다. 그림 4.1 은 제안된 θ_a 보상의 원리를 설명하고 있다. 점선은 평균 속도를 나타내고, 한 펄스 동안의 속도 변화율을 평균 가속도로 정의 하며, 평균 가속도를 매 샘플링 시간마다 평균 속도에 더해주고, 새 펄스가 나오면 보상을 중단 시키는 작업의 반복을 통해 평균 속도를 보상 시킬 수 있다.

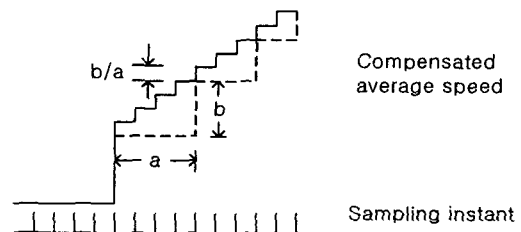


그림 4.1 제안된 θ_a 보상의 원리와 보상된 평균 속도.

등속일 경우의 평균 속도는 항상 일정한 값을 갖기 때문에, 보상을 시켰을 경우 양자화 오차를 없앨 수 있

었으나, 그림 4.2의 (a)와 같이 등가속 상에서는 평균 속도는 펄스가 발생한 시점에서 불연속일 수 밖에 없다. 그림 4.2의 (b)는 이 평균속도로 θ_c 보상 시킨 보상된 관측기 입력을 나타낸다. θ_c 에 의해 보상된 관측기 입력은 등속도에서는 양자화 오차를 없앨 수 있었으나 등가속도 상에서는 양자화 오차를 완전히 없앨 수는 없을 것을 알 수 있다.

제안된 θ_a 보상 방식은 그림 4.2의 (a)처럼 불연속적인 평균속도를 가속도 보상을 시켜 선형적으로 증감하는 보상된 평균속도를 얻도록 한다. 그림 4.3의 (a)는 θ_a 보상에 의해 보상된 평균 속도를 나타내고, 그림 4.3의 (b)는 보상된 평균 속도를 θ_c 보상을 시킨 관측기 입력이다. θ_a 보상에 의한 관측기 입력의 양자화 오차는 그림 4.2의 (b)보다 더욱 줄었음을 알 수 있다.

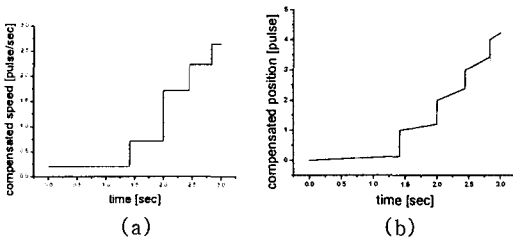


그림 4.2 θ_a 보상 전 평균 속도(a)와 관측기 입력(b).

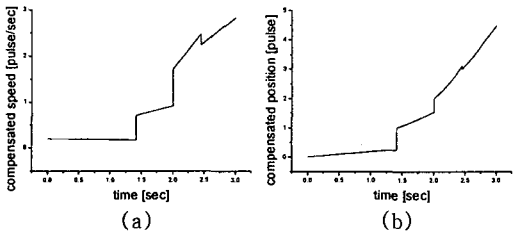


그림 4.3 θ_a 보상 후 평균 속도(a)와 관측기 입력(b).

그림 4.4는 θ_a 보상 전 관측기의 추정 속도와, θ_a 보상 후 관측기의 추정 속도이다. 제안된 방식에 의해서 속도가 더욱 잘 추정된다. 속도 추정 오차는 관측기 입력과 관측기의 극점 선정에 따라 변화되며, 관측기 입력에 대한 오차는 제안된 방식에서 감소되었음을 알 수 있다. 그림 4.5는 그림 4.4의 추정 속도를 제어기로 피드백 시켰을 때의 실제 속도를 모니터링 한 것이다. 제안된 방식이 속도 제어가 더 잘되고 있음을 볼 수 있다.

모의 실험에 사용된 모터는 2048 pulses/revolution의 증분 인코더를 사용한다.

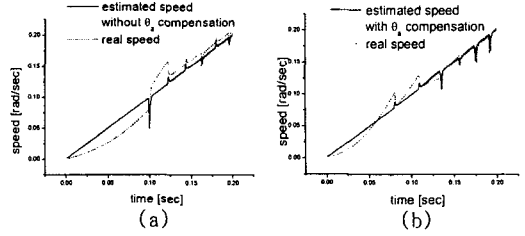


그림 4.4 θ_a 보상 전 추정속도(a)와 보상 후 추정속도(b).

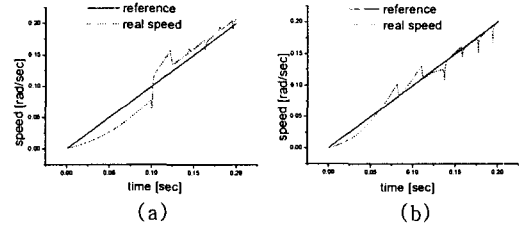


그림 4.5 θ_a 보상 전 실제속도(a)와 보상 후 실제속도(b).

V. 결론

본 논문에서 지금까지 제안된 관측기 모델에 대한 해석과 등가속 회전하는 모터에 대해서 인코더 카운터로부터 발생하는 양자화 오차를 줄일 수 있도록 θ_a 보상 방법을 제안하였고, 제안된 방법에 의해 관측기의 성능이 개선되며 우수한 속도제어 성능을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Ohmae et al. "A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. IE-29, no. 3, Aug. 1982.
- [2] R. Lorenz and K. Van Patten, "High-resolution velocity estimation for all-digital, ac servo drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 701-705, Aug. 1991.
- [3] Heui-Wook Kim and Seung-Ki Sul, "A new motor speed estimator using Kalman filter in low-speed range," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 4, Aug. 1996.
- [4] Sheng-Ming Yang and Shuenn-Jenn Ke, "Performance Evaluation of a Velocity Observer for Accurate Velocity Estimation of Servo Motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.36, no.1, pp. 98-104, Jan/Feb. 2000.
- [5] D.G. Luenberger, "An introduction to observers," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 16, pp. 596-602, Dec.1971