저 분해능 엔코더를 사용한 정밀 속도 제어

Precise Velocity Control at Low Speed with a Low Resolution Encoder

서기원*, 강현재**, 이충우***, 정정주****
Ki Won Seo, Hyun Jae Kang, Choong Woo Lee and Chung Choo Chung

Abstract - This paper presents an effective method of precise velocity control at low speed with a low resolution encoder. Multirate observer to estimate the velocity at every DSP control period is used except a constant velocity mode. The observer corrects the estimation error when detects pulse signal. Unlike the conventional methods, the multirate estimator is stable at a low speed. However, the multirate estimator shows ripples at a constant velocity. Thus, in this paper we use a velocity prediction method which uses the present velocity from the previous average velocity to reject the ripple. In a summary, at a constant speed mode, the predicted velocity is used. Otherwise, the estimated velocity by the multirate obvserver is used. The effectiveness of the multirate observer and ripple rejection at low speed is verified through various simulations.

Key Words : Multirate observer, velocity estimation, low-resolution encoder, ripple rejection, stability

1. 서론

저분해능을 갖는 광학식 엔코더는 모터 트래킹 시스템에 널리 사용된다. 저속도에서는 매 샘플링 순간에 펄스를 검출하지 못하기 때문에 속도제어의 정확성이 현저하게 저하된다. 이 문제를 해결하기 위해 일정한 시간마다 발생되는 엔코터 펄스의 개수를 세어 속도를 측정하는 방법이 있다. 하지만 작은 펄스 수일 때 정확한 제어를 기대할 수 없다. 정확한 속도 측정을 하기 위한 다른 방법으로는 두 펄스들의 간격을 카운팅 펄스로 측정하여 분해능을 높이는 방법이 있다[1]. 이 방식은 저속도에서 분해능이 향상되지만 고속도에서는 제한적이다. 저속도, 고속도등 다양한 속도에서 사용할 수 있도록 위의 2가지 방법을 혼합한 방법이 제안되었다[2]. 하지만 이 방법은 시간 지연이 발생하는 결과를 야기한다. 지연 문제를 해결하기 위해 2개의 펄스간의 속도를 추정하는 방법이 필요하다. 속도를 추정하기 위해서 순간 속도 관측기(instantaneous speed observer)를 이용한다[3],[4]. 순간 속도 관측기는 매 샘플링 일 때마다 플랜트의 동력학 모델을 기반으로 속도를 예측하고 다음 펄스가 검출되었을 때 추정오차를 보상하는 이산시간 관측기이다. 하지만 순간속도 관측기는 상태추종 순간과 추정오차 순간이 매 펄스 구간마다 일정하지 않아 안정하게 추정하기 어렵다.

본 논문에서는 순간속도관측기를 높은 차수의 플랜트에서도 안정하게 추정할 수 있도록 일반화한다. 일반화된 멀티레이트 샘플링 관측기는 상태 추정과 추정오차의 시간 관계를 고려함으로써 저속도의 범위에서도 안정하게 속도를 추종할 수 있다. 멀티레이트 샘플링 관측기가 안정하게 속도를 추종하도록 이득행렬 계산을 유도한다[5],[6]. 펄스사이 구간에 위치보간기법을 적용한 방법과 연속적인 두 펄스사이의 시간을 고려하지 않는 일반적인 방법을 비교하여 관측기의 추종 성능을 모의실험으로 확인하였다. 하지만 상태변수 추정을 통해 등속 구간에 리플이 발생하여 등속구간에서 리플을 제거하는 방법을 제안한다. 다양한 모의 실험을 통하여 변속, 등속구간에서 목표속도에 이르도록 정밀 속도 제어가 가능한 결과를 얻었다.

2. 멀티레이트 샘플링 관측기와 평균 속도 추정 방법

2.1 멀티레이트 샘플링 관측기

멀티레이트 샘플링 관측기의 원리는 펄스가 검출되지 않을 때 상태 변수를 예측하고 엔코더에서 다음 펄스가 검출 될 때 추정 오차를 보상하는 것이다(그림1). 이절의 내용은 [6]에 발표된 내용을 요약해 놓은 것이다. 현재 측정 신호로 상태변수를 추정하기 위해서 현재 관측기를 사용한다(그림 2). 멀티레이트 샘플링 관측기의 상태 추종식과 오차수정 상태식은 식(1), 식(2)로 표현한다.

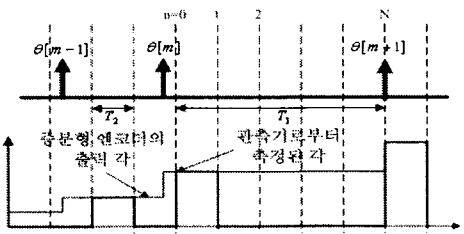

그림 1. 멀티레이트 샘플링 관측기 타이밍도

저자 소개
* 서기원 : 漢陽大學 電氣工學科 碩士課程
** 강현재 : 漢陽大學 電氣工學科 博士課程
*** 이충우: 漢陽大學 電子通信컴퓨터工學科 博士課程
**** 정정주: 漢陽大學 電氣制御生體工學部 正敎授 · 工博

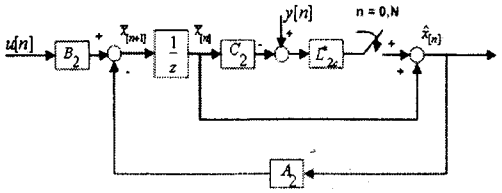

그림 2. 멀티레이트 샘플링 현재 관측기 블록도

$$\bar{x}[n] = A_2\hat{x}[n-1] + B_2u[n-1], \quad n = 1,2,\ldots,N \tag{1}$$

$$\hat{x}[n] = \begin{cases} \bar{x}[n] & n = 1,2,\ldots,N-1 \\ \bar{x}[n] + L_{2c}^{*}(y[n] - C\bar{x}[n]) & n = N(0\text{일 때}) \end{cases} \tag{2}$$

|기서, 관측기가 $n=N$일 때 즉 펄스가 검출 될 때 오차를 .상한다. 그러나 나머지 기간 ($n=1,\ldots,N-1$) 일 때 플 |트 모델을 기반으로 예측된 상태변수로 추정한다.
(1)과 식(2)을 이용하여 정리하면 식(3)과 같다.

$$\hat{x}[n] = \begin{cases} A_2\hat{x}[n-1] + B_2u[n-1] & n = 1,2,\ldots,N-1 \\ A_2\hat{x}[n-1] + B_2u[n-1] & n = N(0\text{일때}) \\ \quad + L_{2c}^{*}(y[n] - C_2(A_2\hat{x}[n-1] + B_2u[n-1])) \end{cases} \tag{3}$$

·점 배치를 이용하여 관측기 이득 행렬을 구하면

$$\prod_{i=1}^{n}(z-z_i) = |zI - (A_2^N - L_{2c}^{*}C_2A_2^N)| \tag{4}$$

다. $A_2^N = A_1$ 과 $C_2 = C_1$ 을 이용하면 식(5)로 표현할 · 있다.

$$\prod_{i=1}^{n}(z-z_i) = |zI - (A_1 - L_{2c}^{*}C_1A_1)| \tag{5}$$

·측기로 검출된 펄스 사이의 기간은 T_1이다.
|플링 시간을 T_1 라 할 때의 일반적인 현재 관측기 방정식 · 아래와 같다.

$$\hat{x}[n] = A_1\hat{x}[n-1] + B_1u[n-1] + L_{1c}(y[n] - C_1\bar{x}[n]) \tag{6}$$

의 식으로부터 관측기 이득을 구하면

$$\prod_{i=1}^{n}(z-z_i) = |zI - (A_1 - L_{1c}C_1A_1)| \tag{7}$$

다. $A_2^N = A_1$ 과 $C_2 = C_1$ 이라는 사실을 이용하여, 식)과 식(5)를 비교한다. $L_{2c}^{*} = L_{1c}$ 임을 알 수 있다.
일반적인 멀티레이트 이론은 T_1,T_2 비율 N이 일정하지만 .티레이트 샘플링 관측기는 T_1에 따라 다르다. 위식에서 알 · 있듯이 현재 멀티레이트 관측기 이득은 샘플링 시간 T_1 | 일반적인 현재 관측기 이득에서 간단하게 구할 수 있다.

2 평균 속도 추종 방법

속도 추종은 불연속적인 측정 펄스로 인해 리플이 생긴다. |플을 줄이기 위해 이전 펄스 구간에서 구한 평균 속도로부 | 현재 속도를 추정하는 방법이 제안되었다[7]. 평균 속도 |은 (8)과 같이 주어진다.

$$\hat{\omega}(k) = \frac{\theta(kT) - \theta((k-1)T)}{N_r} \tag{8}$$

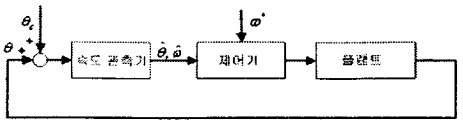

그림 3. 보상된 속도 관측기 블록도

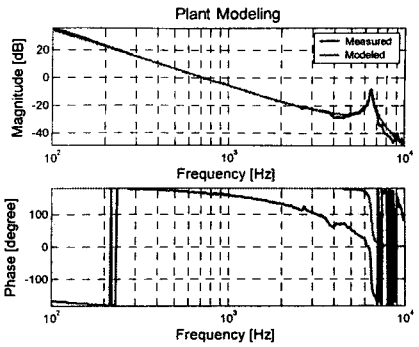

그림 4. 플랜트 모델링

여기서, $\hat{\omega}$: 추정된 평균 속도, θ :측정된 위치, kT : 현재 검출된 펄스 순간, $(k-1)T$: 검출된 이전 펄스 순간, N_r : 현재 펄스와 이전 펄스사이의 샘플링 개수이다. 관측기의 추정 위치는 측정된 위치(Θ)에 이전 펄스 구간의 평균속도로부터 계산된 샘플 당 평균 펄스(Θ_c)를 더하여 보상한다(그림 3). 평균 속도 추종 방법은 속도가 일정한 구간, 즉 등속 구간에서 보다 정확한 속도 추종이 가능하다.

3. 플랜트 모델링

VCM(Voice Coil Motor)를 이용하여 속도 추정 및 제어기를 구현한다. 본 장에서는 플랜트의 특성에 대해 알아보고, 그 특성을 고려한 플랜트 모델을 구성한다. VCM은 2차 적분기, 6.6KHz에 1차 공진을 가진다. 논문에서 적용한 플랜트는 특정 범위의 각을 회전하는 일반적인 VCM이다. 전기적인 모델링을 무시하고 기계적인 모델링과 1차 공진모드를 포함한 모델은 식 (9)과 같다.

$$G_p(s) = \frac{K_t}{J_m s^2} \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \tag{9}$$

K_t: Back emf constant, J_m: Inertia, ζ: Damping, w_n: Resonance frequency 이다. 연속 시간 모델을 구하면 특성은 그림 4와 같다.

4. 모의실험

모의실험은 MATLAB™을 이용하여 플랜트를 모델링 하고 관측기 알고리즘을 구현하여 모의실험을 하였다. 모의실험에서는 위치 보간기법을 사용한 싱글레이트 관측기, 일반적인 방법의 관측기와 비교하여 모의실험을 하였다. 그림 5는 일반적인 관측기로 속도 추종한 결과이다. 속도에 따른 펄스간의 시간을 고려하지 않아 N=∞ 일 때 (속도가 0으로 수렴할 때) 추종이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 식 (4)의 극점배치를 사용하지 않고 s-plane에서의 고정된 극점을 DSP 샘플링 시간(T_2)으로 이산화하여 관측기 이득을 구하였기 때문이다. 이러한 문제는 펄스간의 시간을 고려한 멀티레이트 샘플링 관측기로 속도 범위를 정하여 해결 할 수 있다. 그림 6는 엔코더 펄스간의 사이를 14비트 해상도로 보

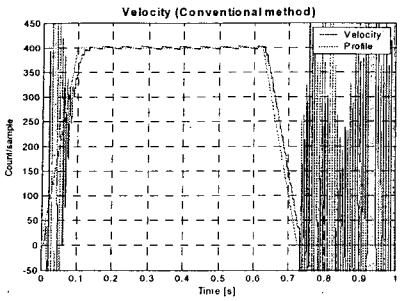

그림 5. 속도 제어 (기존 방법)

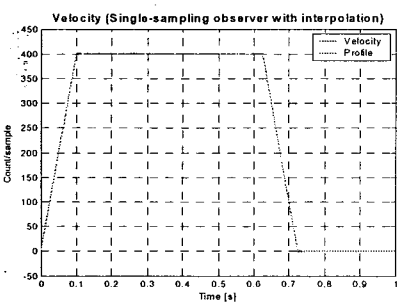

그림 6. 속도 제어 (위치 보간 방법)

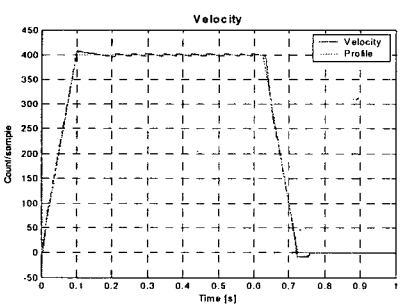

그림 7. 속도 제어 (멀티레이트 샘플링 관측기)

간하여 매 샘플링 때마다 속도를 추정하여 제어한 결과이다. 위치 보간기법을 사용하면 비교적 정확한 속도 추정 및 제어가 가능하지만 보간회로를 구성하고 논리적 연산의 부담이 있다.

멀티레이트 샘플링 관측기는 수렴하는 이득을 구하는 것이 중요하다. 이산시간에 따른 이득행렬을 table로 만들어 N을 카운트하면서 그에 맞는 계산된 이득을 사용한다. 추정된 상태변수로 PI 제어기를 사용하였다. 위치 보간기법(펄스당 14비트 분해능)을 사용한 결과 보다 정확한 제어를 못하지만 복잡한 위치 보간기법을 구현하지 않고 이와 유사한 성능을 얻을 수 있다는 것을 모의실험을 통해 알 수 있다(그림 7). 하지만 그림 7에서 보듯이 멀티레이트 샘플링 관측기를 사용하여 속도를 추정해도 등속도 구간에서는 리플이 발생한다. 실험결과 등속 구간에서는 펄스 당 약 12개의 샘플링을 가진다. 즉 이 구간에서는 펄스 당 샘플링 개수가 일정하고 등속운동을 하므로 모델 기반으로 상태변수를 추정하는 것보다 이 전 펄스 구간에서의 평균 속도를 구하여 다음 펄스가 검출 되었을 때 이전 평균 속도를 이용하여 추정하는 방법[7]이 효과적이다. 그림 8는 이전 평균 속도로 현재 속도를 추정하여 제어한 모의실험 결과이다. 등속 구간에서 리플이 약 70% 제거 되어 레귤레이션이 좋아진다는 것을 알 수 있다.

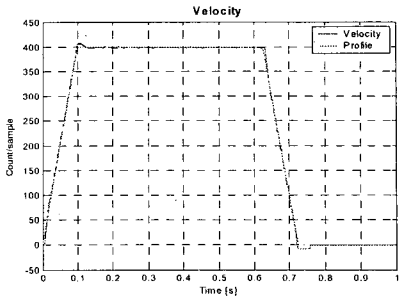

그림 8. 속도 제어 (리플제거)

5. 결론

본 논문은 멀티레이트 샘플링 관측기를 이용하여 저속도, 저분해능을 갖는 엔코더에서의 정확한 속도 추정 방법을 제안하였다. 멀티레이트 샘플링 관측기는 엔코더 펄스사이의 매 샘플링 때마다 플랜트의 특성을 기반으로 상태변수를 추정하고, 펄스가 검출 되었을 때 추정오차를 보상한다. 관측기 이득행렬을 간단하게 구할 수 있다. T_1,T_2 사이의 관계를 고려하여 다양한 속도에서도 관측기의 추정이 안정화되는 극점 배치를 하였다. 또한 등속도 구간에서 이전 샘플링구간의 평균 속도를 구해 속도를 추정하여 리플을 제거하였다. 제안된 관측기의 유효성은 여러 가지 모의실험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] R. D. Lorenz, "Microprocessor control of motor drive and power converters," Microprocessor Motion Control of AC and DC Drive, IEEE Tutorial Course Note Book from 1991, 1992 and 1993, IEEE, IAS Annual Meetings, IEEE Publishing Services #THO587-6.

[2] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, and M. Tachikawa, "A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-29, no. 3, pp. 207221, Aug. 1982.

[3] Y. Hori, "Robust motion control based on a two-degrees-of-freedom servosystem," Adv. Robot., vol. 7, no. 6, pp. 525546, 1993.

[4] S. Sakai and Y. Hori, "Ultra-low speed control of servomotor using low resolution rotary encoder," in Proc. 1995 IEEE IECON 21st Int. Conf. Ind. Electron., Control, Instrum., Orlando, FL, Nov. 1995, vol. 1, pp. 615-620.

[5] H. Fujimoto and Y. Hori, "High performance servo systems based on multirate sampling control," Int. Fed. Autom. Contrl J. Control Eng-Practice, vol. 10, no. 7, pp. 773-781, 2002.

[6] L.Kovudhikulrungsri and T.Koseki, "Precise Speed Estimation From a Low-Resolution Encoder by Dual-Sampling-Rage Observer," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.11, no.6, pp.661-670. Dec. 2006

[7] Sheng-Ming Yang,Shuenn-Jenn Ke, "Performance Evaluation of a Velocity Observer for Accurate Velocity Estimation of Servo Motor Drives," IEEE Trans. Industry applications, vol.36, no.1, pp.98-104. Jan. 2000

[8] G.F Franklin and J. D Powell, "Digital Control of Dynamic Systems. ADDISON-WESLEY", 1997.