

피드포워드 적응제어를 사용한 위치제어기

윤명하*, 최남열, 이치환
위덕대학교 정보전자공학과

Position Controller with Adaptive Feedforward Control

Myung-Ha Yoon*, Nam-Yerl Choi, Chi-Hwan Lee
Uiduk University, Electronic Engineering

ABSTRACT

본 연구는 관성의 변화, 비선형 마찰 등에 건설한 피드포워드 적응 위치제어기를 제안한다. 제안된 적응 위치제어기의 특징은 제어기 적응파라미터가 위치오차에 기준모델의 속도 정보를 받아들여 셀프 튜닝된다. 이것은 과도응답 특성을 향상시키고, 정상상태의 수렴 시간을 줄여 시스템의 성능을 개선시킨다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 피드포워드 적응 위치제어기의 동작과 설계 방법의 타당성을 보였다.

1. 서론

오늘날 서보 모터는 다축 기계에 많이 적용되며, 서보 모터를 동기운전 해야 된다. 이러한 서보시스템은 최악의 조건에서도 정확성과 신뢰성을 요구하고, 부하의 변화는 서보시스템의 성능을 저하시킨다. 서보 모터의 응답 특성은 대부분 부하 관성 변화로 결정된다. 모터 축에 연결된 부하의 관성이 커지면 서보 시스템 주파수 대역이 좁아져 응답시간이 길어지고, 정확한 위치 추적을 할 수 없게 되며, 과도한 토크의 발생으로 인해 진동을 유발시켜 시스템을 불안정하게 한다. 위와 같은 문제점을 개선하기 위해 적응제어기를 사용한다. 직-간접 기준 모델 적응시스템은 장치와 제어기 파라미터 사이의 맵핑 문제로 인해 발생하는 안전성 문제와 최소 위상 시스템에서만 사용 가능한 문제점을 관측기를 도입하여 시스템의 안정성과 정확성을 보장하는 방식을 채택하였다. 그러나, 이 시스템은 구조가 복잡하고 과도응답의 특성이 입력 신호에 뒤져 응답 지연이 발생한다.[1]

본 논문에서 제시한 피드포워드 적응 위치제어기는 PI 제어기를 사용하여 정상상태 오차를 0으로 하고, 관성과 같은 시변 요소로부터 발생하는 과도

응답의 특성은 위치오차에 기준모델 속도를 받아들이는 적응제어기에 의해 개선된다. 제안된 위치제어기는 고전적인 PI 위치제어기와 함께 관성의 변화에 따른 과도응답을 비교하여 피드포워드 적응 위치제어기가 더욱 성능이 우수함을 시뮬레이션의 결과로 보인다.

2. 서보 DC 모터 구성 및 PI 제어기

2.1 서보 DC 모터 모델

모터의 등가 회로는 그림 1에서 보여준다.

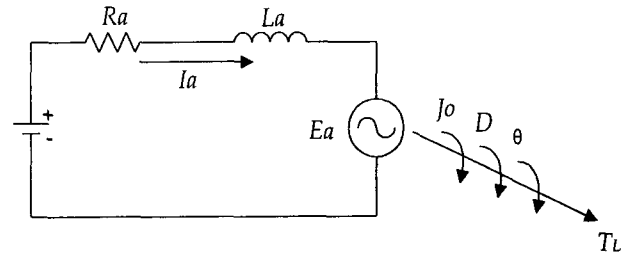


그림 1 모터 모델
Fig. 1 Motor modeling.

식 (1)은 모터의 전달함수를 나타낸다.

$$M(s) = \frac{\frac{k}{L_a J}}{\left[s^2 + \frac{L_a D + R_a J}{L_a J} s + \frac{R_a D + k k_a}{L_a J} \right]} \quad (1)$$

여기에서 R_a , L_a , D , J , k , k_a , T_L 는 각각 회전자 저항, 회전자 인덕턴스, 점성 마찰, 관성, 모터 토크상수, 모터 역기전력 상수, 부하 토크를 나타낸다. 전류 구동원 모터 전달함수는 그림 2의 블록 다이어그램으로 도식화 할 수 있다.

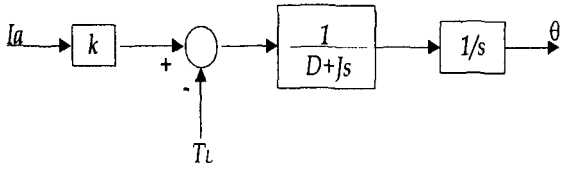


그림 2 모터 블록 다이어그램
Fig. 2 Motor block diagram

발생되는 토크와 관성 및 마찰의 관계는 식 (2)의 미분 방정식으로 표현된다.

$$T - T_L = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} - D \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

여기에서, T 는 모터의 발생 토크를 나타낸다. 식 (2)에 따르면, 속도 응답은 관성의 영향을 받는다. 시스템에서 관성의 변화를 추적하면 내·외부의 시변 파라미터의 영향을 시스템에서 최소화 시켜 정확한 위치제어가 가능해진다.

2.2 PI 위치제어기

PI 위치제어기는 비례와 적분의 요소를 사용한 제어기이다. 일반적인 PI 위치제어기는 목표치에 대한 비례요소에 적분요소를 추가하여 정상상태 오차를 누적하여 편차를 없애는 제어 방법이다. 그림 3은 PI 위치제어기를 사용한 위치 제어 시스템의 블록 다이어그램이다.

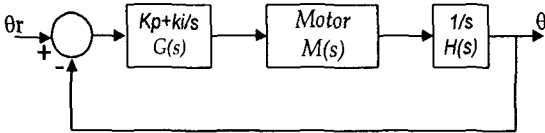


그림 3 PI 제어기
Fig. 3 PI control system.

PI 위치제어기를 사용한 전체 시스템의 전달함수는 식(3)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{PI}(s) = \frac{G(s)M(s)H(s)}{1 + G(s)M(s)H(s)} \quad (3)$$

PI 위치제어기는 시간에 따라 변하는 관성에 대해 일정한 응답 특성을 얻을 수 없다. 이러한 문제의 해결 방법으로 시변 요소에 셀프 튜닝이 가능한 적응제어 방법을 제시한다. 적응제어기에는 기준 모델 적응제어, 피드포워드 적응제어, 직접 적응제어, 간접 적응제어 등이 있다. 본 논문에서는 피드포워드 적응제어기법에 추가하여 기준모델

적응제어기법을 도입한 피드포워드 적응위치 제어기를 제안한다.

3. 피드포워드 적응 제어시스템

적응제어기의 주된 목적은 제어 대상의 정확한 파라미터를 알 수 없거나 시변 플랜트를 제어하는 것이 목적이다. 본 논문에서 제시한 디자인은 그림 4에서 자세히 나타내었다.

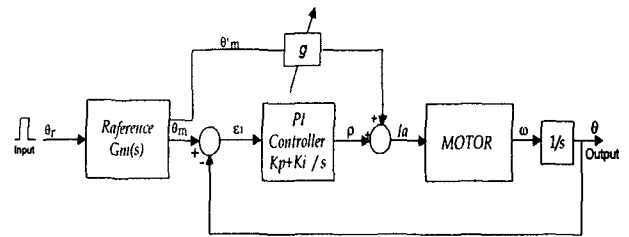


그림 4 피드포워드 적응 제어시스템
Fig. 4 Adaptive feed forward control system

식 (4)는 시스템의 전체 전달 함수이다.

$$P(s) = \frac{(G_1 G_2 G_3) + (G_1 G_4 G_3)}{1 + G_2 G_3 G_5} \quad (4)$$

여기에서 G_1 은 기준모델 전달함수, G_2 는 PI 제어기 전달함수, G_3 은 제어대상 장치의 전달함수, G_4 는 피드포워드 적응제어기의 전달함수, 그리고 G_5 는 적분기를 나타낸다. 식(4)를 상태 방정식 나타내면 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\tau k_a + k_p \tau + J}{\tau J} & -\frac{\tau k_i + k_a + k_p}{\tau J} & -\frac{k_i}{\tau J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{g'}{\tau J} & \frac{k_p}{\tau J} & \frac{k_i}{\tau J} \end{bmatrix}^T u \quad (5a)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1]^T x(t) \quad (5b)$$

여기에서 x 는 θ 이고, u 는 θ_r 이다. 그리고 k_p 와 k_i 는 PI 제어기의 비례, 적분이득이며, τ 는 기준모델의 시정수를 나타낸다. 전체 시스템을 제어하는 제어규칙은 아래와 같다.

$$I_a = (g(t) \cdot \varepsilon_2) + (\varepsilon_1 \cdot \rho) \quad (6a)$$

$$\psi(t) = \frac{1}{|\dot{\theta}_m + \alpha|} \quad (6b)$$

$$\tilde{g}(t) = \gamma \varepsilon_1 \psi(t) \dot{\theta}_m \quad (6c)$$

$$\dot{\rho} = [K_p, K_i] \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_1 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (6d)$$

여기에서 $\varepsilon_1 = (\theta_m - \theta)$, $\varepsilon_2 = (\dot{\theta}_m - \dot{\theta})$ 이며, ρ 는 PI 제어기의 출력을 나타내고, α 는 양의 상수를 나타낸다. 제어 규칙을 나타내는 식 (6)은 하나의 피드포워드 루프에 PI 제어기에 의한 위치 피드백을 받는다. 그리고 γ 는 양의 값을 갖는 적응파라미터 이득을 나타내며, $g(t)$ 는 적응파라미터를 나타낸다. 그림 5는 피드포워드 적응 위치제어 파라미터 $g(t)$ 의 블록 다이어그램을 나타낸다.

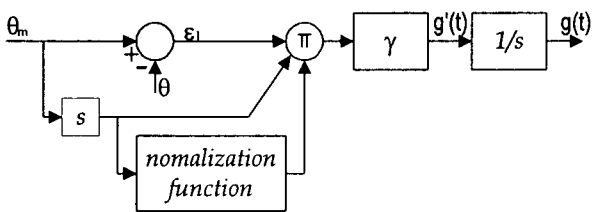


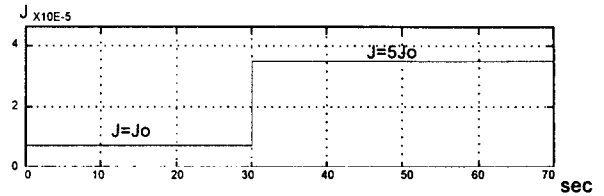
그림 5 피드포워드 적응 위치제어파라미터 $g(t)$ 의 블록 다이어그램
Fig. 5 Block Diagram for adaptive feed forward control position parameter $g(t)$

적응 파라미터 $g(t)$ 는 위치 오차값 과 기준 모델의 속도 정보로부터 계산되고, 정규화 함수는 θ_m 의 크기에 무관한 적응 성능을 갖도록 한다.

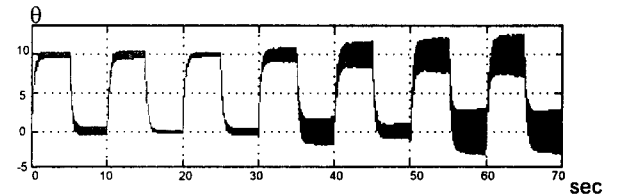
4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 실험에 사용한 모터의 회전자 저항 R_a , 회전자 인덕턴스 L_a , 토크상수 K_a , 점성 마찰 D , 관성 J_0 는 각각 1.5Ω , $14mH$, 0.19 , $6.98 \cdot 10^{-5} K_g \cdot m/s^2$, $0.1 \cdot 10^{-4} N$ 이다. PI 제어에 사용된 계수 K_p , K_i 는 각각 0.2 , 0.02 이며, PI 이득 값은 J_0 를 기준으로 적절히 조절한 값이다. 실험 방법은 J_0 에서 $5J_0$ 로 관성이 변할 때, 각각의 위치제어기 응답신호를 측정한다.

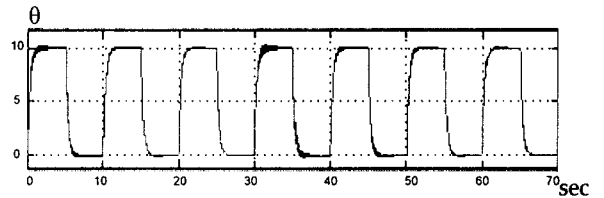
그림 6 a)는 실험에 사용된 관성의 변화시점을 나타내고, b)는 PI 제어기를 사용한 모터의 위치를 나타내며, c)는 적응 제어기를 사용한 모터의 위치를 나타낸다. 그리고 d)는 적응 제어기의 적응 파라미터 $g(t)$ 가 관성의 변화에 따른 적응 값을 보여준다.



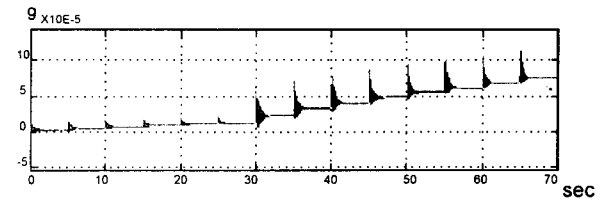
a) $t=30s$ 일 때, 관성변화



b) PI 제어기 출력



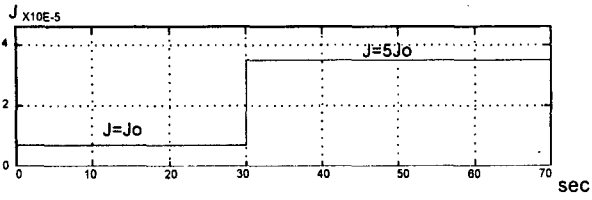
c) 피드포워드 적응제어기 출력



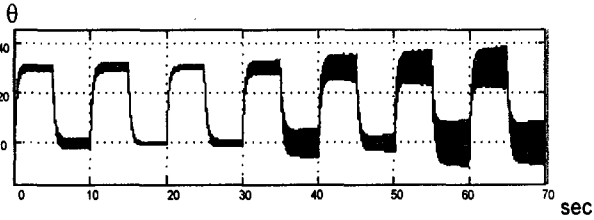
d) 피드포워드 적응 파라미터 $g(t)$

그림 6 관성의 변화에 따른 제어기의 출력 ($\theta = 10$)
Fig. 6 Controller outputs for changing rate the inertia ($\theta = 10$)

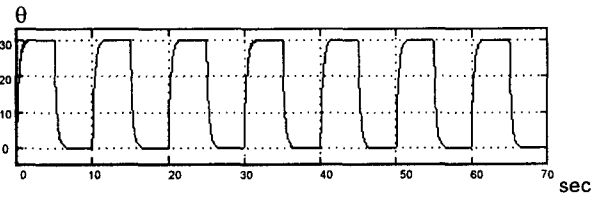
그림 7은 θ 를 30으로 하였을 때 나타나는 각각의 출력신호를 나타낸다. 그림 7 a)는 관성의 변화 시점을 나타내고, b)는 PI 위치 제어기를 사용한 모터의 위치를 나타내며, c)는 적응 제어기의 위치를 나타낸다. 그리고 d)는 적응 제어기의 적응 파라미터 $g(t)$ 가 관성의 변화에 따른 적응 값을 보여준다. 그림 8 a) 와 b)에서는 관성의 변화에 따른 PI 제어기의 보드 선도를 나타낸다.



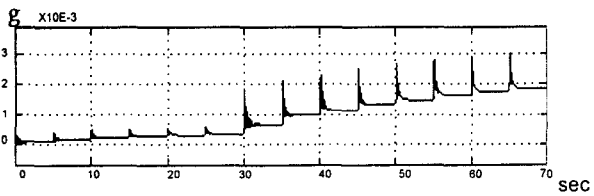
a) $t=30s$ 일 때, 관성변화



b) PI 제어기 출력



c) 피드포워드 적응 제어기 출력



d) 피드 포워드 적응 파라미터 $g(t)$

그림 7 관성의 변화에 따른 제어기 출력 ($\theta = 30$)
Fig. 7 Controller output for changing rate the inertia ($\theta = 30$)

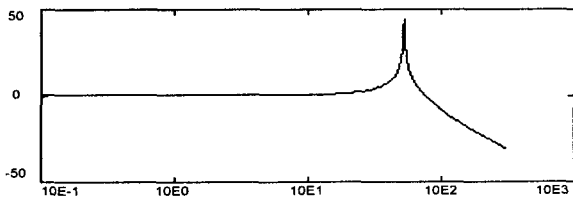
제어 대상 플랜트의 관성이 커짐으로 인해 주파수 대역이 좁아지고 공진 첨두치가 커져 큰 진동이 수반된다. 이것은 그림 6, 7 b)의 PI 위치 제어기 에서 보면 진동이 발산하는 형태로 나타난다.

5. 결 론

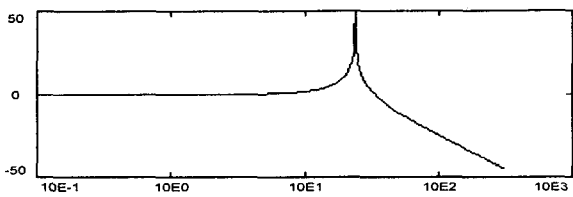
본 논문에서는 시변 특성을 가지는 관성이 나타날 때, 최적의 제어를 위해서 연속적으로 그 시스템의 응답으로부터 적응 파라미터 $g(t)$ 를 변화시켜 정확한 위치추적이 가능한 피드 포워드 적응 위치제어기를 제안하고, 시뮬레이션 실험을 통하여 타당함을 보였다. 시스템의 안정성을 보장하며, 동작에 영향을 미치는 가변적인 파라미터들에 관한 적응 제어법칙을 유도하기 위해 기준모델 적응제어 기법을 도입하였다. 적응 파라미터 $g(t)$ 는 위치의 오차 정보에 기준모델 속도 정보를 받아들여 과도응답의 특성을 개선시켰다. 이 결과 시변 특성을 가지는 관성 및 비선형 마찰이 나타날 때, 고전적인 PI 위치 제어기 보다 피드포워드 적응 위치제어기가 안정된 응답 특성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] K.S.Narendra and L. S. Valavani, "Direct and indirect model reference adaptive control," Automatica, vol. 15, pp. 653-664, 1979.
- [2] B. C. Kuo, Automatic Control Systems, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.
- [3] Naif B. Almutairi Mo-Yuen Chow, "A Modified PI Control Action with A Robust Adaptive Fuzzy Controller Applied to Dc motor," IEEE, Vol1, 503-508, 2001.
- [4] Baruch, I. S.; Garrido, R.; Flores. J. -M.; Martinez, J. -C. " An adaptive neural control of a DC motor." IEEE Trans. Automat. Contr., vol. A-30, no. 5, oct. 1985.



a) $J = J_o$



b) $J = 5J_o$

그림 8 PI 제어기 보드선도
Fig. 8 Bode plots of PI controller.