

위치 제어를 기반으로 한 기계 시스템의 제정수 추정 알고리즘

유민식*, 김재형**, 운영두*

*한양대학교, **한화테크윈

Estimation algorithm for mechanical system parameters based on position control

Min Sik Yoo*, Jae Hyung Kim**, Young-Doo Yoon*

*Hanyang Univ., **Hanwha Techwin

ABSTRACT

본 논문은 위치 제어 시스템의 기계 제정수 추정 알고리즘을 제안한다. 추정 대상 제정수는 관성모멘트와 점성 마찰계수, 쿨롱 마찰계수이다. 제정수 추정에 대한 오차를 줄이기 위해, 적분 연산과 정현파의 위치 명령을 사용하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 이의 유효성을 입증하였다.

1. 서론

반도체 및 LCD 패널 제조 장비, 공작 기계 및 용접 로봇 등은 높은 생산성 및 제조 정확도를 위해 정밀하고 역동적인 제어가 필요하다^[1]. 위치 및 속도 제어기의 이득은 기계 시스템의 제정수가 반영^[2]되며, 제어 성능을 향상시키기 위해 보다 정확한 제정수를 알아야 한다. 또한 속도 제어기 이득 설정에 반영되지 않는 마찰성분을 보상하여 제어 성능을 향상시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 기계 제정수 추정 알고리즘에 대해 제안하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 제안된 기계 제정수 추정 알고리즘

제정수 추정 알고리즘은 직렬(cascaded) 구조의 위치 제어 시스템을 기반으로 한다. 만약 전류 제어 시스템의 동특성이 속도 제어 시스템보다 충분히 빠르다면, 속도 제어기의 출력인 토크 명령은 실제 토크와 근사하다고 볼 수 있다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 실제 토크 대신에 토크 명령을 사용하여, 제정수를 추정한다.

1.1 관성모멘트 추정

쿨롱 마찰력을 포함한 기계 시스템의 미분 방정식은 식 (1)과 같다. 기계 시스템의 미분방정식 양변에 $\theta(t)$ 를 곱하면, 식 (2)와 같고, (2)를 $T_1 \sim T_2$ 구간에 대해 정적분하면 식 (3)과 같이 표현된다.

식 (3)에서 점성 마찰계수, B_{eq} 와 쿨롱 마찰계수, C_{eq} 의 영향을 제거하기 위해, 식 (4)의 조건을 적용하면, 식 (5)와 같이 간략화된다. 관성모멘트, J_{eq} 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e(t) = J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} + B_{eq}\omega(t) + C_{eq} \text{sign}(\omega(t)) \quad (1)$$

$$T_e(t) \cdot \theta(t) = J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \theta(t) + B_{eq}\omega(t) \cdot \theta(t) + C_{eq} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \theta(t) \quad (2)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} T_e(t) \cdot \theta(t) dt = J_{eq} \omega(T_2)\theta(T_2) - J_{eq} \omega(T_1)\theta(T_1) - J_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \omega(t)^2 dt + B_{eq} \frac{1}{2} \theta(T_2)^2 - B_{eq} \frac{1}{2} \theta(T_1)^2 + C_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \theta(t) dt \quad (3)$$

$$\theta(T_1) = \theta(T_2), \quad \omega(T_1) = \omega(T_2), \quad \int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \theta(t) dt = 0 \quad (4)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} T_e(t) \cdot \theta(t) dt = -J_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \omega(t)^2 dt \quad (5)$$

$$J_{eq} = - \frac{\int_{T_1}^{T_2} T_e(t) \cdot \theta(t) dt}{\int_{T_1}^{T_2} \omega(t)^2 dt} \quad (6)$$

1.2 마찰계수 추정

식 (1)의 기계 시스템 미분방정식 양변에 $\omega(t)$ 를 곱하면, 식 (7)와 같이 나타난다. 식 (7)을 $T_1 \sim T_2$ 구간에 대해 정적분하면 식 (8)과 같이 표현된다.

관성 모멘트, J_{eq} 에 대한 항을 제거하기 위해 식 (9)의 조건을 적용하면, 식 (10)와 같이 간략화된다. 식 (10)에 나타난 세 개의 적분항은 모두 추정 구간 동안에 연산이 가능한 값이다. 따라서, 두 개의 미지수, B_{eq} 와 C_{eq} 가 있는 방정식이 된다. 식 (10)와 같은 형태의 방정식이 여러 개가 존재한다면, 식 (10)을 이용하여, 마찰 계수, B_{eq} 와 C_{eq} 를 구할 수 있다.

$$T_e(t) \cdot \omega(t) = J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \omega(t) + B_{eq}\omega(t)^2 + C_{eq} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \omega(t) \quad (7)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} T_e(t) \cdot \omega(t) dt = J_{eq} \frac{1}{2} \omega(T_2)^2 - J_{eq} \frac{1}{2} \omega(T_1)^2 + B_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \omega(t)^2 dt + C_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \omega(t) dt \quad (8)$$

$$\omega(T_1) = \omega(T_2) \quad (9)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} T_e(t) \cdot \omega(t) dt = B_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \omega(t)^2 dt + C_{eq} \int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \omega(t) dt \quad (10)$$

1.3 알고리즘의 조건을 만족하는 위치 명령

식 (4)와 식 (9)의 조건을 모두 만족하는 위치 명령은 여러 가지 형태가 존재한다. 본 논문에서는, 식 (4)의 세 번째 조건을 만족하고, 추정 오차를 줄이기 위해서, 정현파의 위치 명령을 사용한다. 위치 명령은 식 (11)와 같이 표

현할 수 있다. 적분 구간 동안에 N 주기의 위치 명령이 나타남을 의미한다. 위치 제어가 정상상태라면, T_1 시점에서 속도는 위치의 미분 형태이므로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (12)의 속도를 이용하면, 식 (10)의 우변에 나타난 두개의 적분항들은 각각 식(13)과 식(14)와 같이 나타낸다.

$$\theta_{rm}^*(t) = A \cos \omega_{ID} t, \theta_{rm}^*(T_1) = A, \omega_{ID} = 2\pi f_{ID}, T_2 = T_1 + N \cdot T_{ID} \quad (11)$$

$$\omega_{rm}(t) = -A\omega_{ID} \sin \omega_{ID} t, \omega_{rm}(T_1) = 0 \quad (12)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \omega_{rm}(t)^2 dt = 2A^2\pi^2 f_{ID} N \quad (13)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \omega(t) dt = 4NA \quad (14)$$

식 (13)이 위치 명령의 진폭의 제곱에 비례하고, 식 (14)가 위치 명령의 진폭에 비례한다. 따라서 진폭을 변경함으로써, 식 (10)의 형태의 방정식을 여러 개 얻을 수 있다. 두개의 실험 결과를 이용하여, B_{eq} , C_{eq} 를 구할 수 있다. 또한, 추정 오차를 줄이기 위해, 다수의 실험 결과를 이용하여, 최소제곱근사를 적용할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 시뮬레이션의 경우, MATLAB을 이용한 시뮬레이션 연구를 수행하였으며, 실험의 경우, 전동기와 감속기, 편심 부하로 구성된 플랜트를 사용하였다. 감속기로 인해, 쿨롱 마찰이 존재하였다.

시뮬레이션 상에 설정된 기계 시스템의 관성모멘트와 점성 마찰계수, 쿨롱 마찰계수는 각각 $0.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.35 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, $0.0261 \text{ N} \cdot \text{m}$ 로 설정하였다. 그림 1은 위치 명령의 진폭의 크기(A)가 $\pi/2$ 인 경우, 추정된 관성모멘트를 나타낸다. 그 값은 $0.362 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 으로 나타나서, 추정 오차가 작았다.

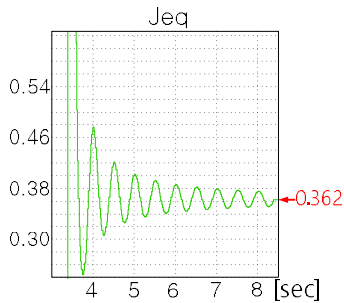


그림 1 관성 모멘트의 추정

표 1 마찰계수를 구하기 위한 데이터

A	$\int_{T_1}^{T_2} T_c(t) \cdot \omega(t) dt$	$\int_{T_1}^{T_2} \omega_{rm}(t)^2 dt$	$\int_{T_1}^{T_2} \text{sign}(\omega(t)) \cdot \omega(t) dt$
$\pi/2$	52.102128	150.472879	24.693493
$\pi/4$	13.186679	37.618213	12.345935
$\pi/6$	5.932340	16.719201	8.23008

표 1은 식 (10)의 적분항들의 값을 나타내며 데이터를 얻기 위하여, 진폭의 크기, A를 3회 변경하여, 시뮬레이션을 진행하였다. 데이터들을 이용하여, 최소제곱근사를 적용할 경우, 추정된 점성 마찰계수와 쿨롱 마찰계수는 각각 $0.352 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, $0.0262 \text{ N} \cdot \text{m}$ 로 나타나서, 추정 오차가 작

았다. 이를 통해, 제정수 추정 알고리즘이 타당함을 확인할 수 있다.

그림 2은 제정수 추정 알고리즘에 대한 실험 결과를 나타내는 실험 파형이다. 추정 구간을 나타내는 플래그와 추정된 관성 모멘트를 나타낸다. 플랜트의 관성모멘트에 대한 CAD 설계 값은 $0.0000304 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이며, 실험 결과, 추정된 관성모멘트의 값은 $0.0000334 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이어서, 약 10 %의 오차가 나타났다.

알고리즘 적용 결과, 추정된 점성 마찰계수와 쿨롱 마찰계수는 각각 $0.000203 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, $0.02498 \text{ N} \cdot \text{m}$ 로 나타났다. 마찰 계수에 대한 추정 결과를 확인하기 위해, 그림 3과 같이, 속도 별 무부하 토크를 측정하였다. 마찰계수는 속도의 방향에 따라 다르게 나타났다. 이는 감속기의 비선형성에 따라 나타난 것이라 판단할 수 있다. 그림 3의 결과를 바탕으로, 추세선을 통해 계산한 마찰 계수들은 그림 3과 같이 나타났다. 추정 결과와 유사한 값을 나타내고 있다.

시뮬레이션과 실험 결과를 통해, 제안된 제정수 추정 방법의 타당성을 확인할 수 있다.

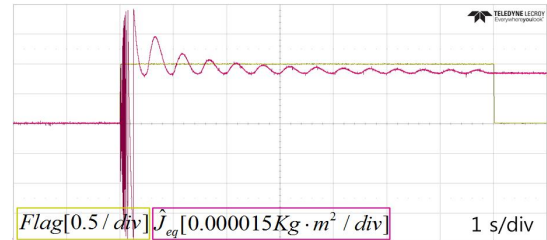


그림 2 제정수 추정 동작 플래그와 관성모멘트

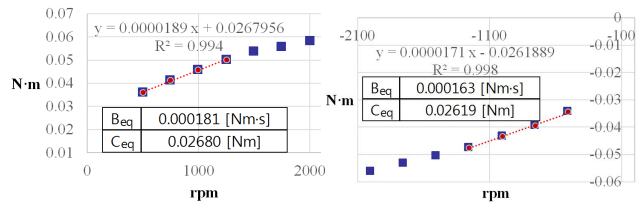


그림 3 속도 별 무부하 마찰력 측정

4. 결론

본 논문은 위치 제어를 기반으로 한 기계 시스템의 제정수 추정 알고리즘에 대해 제안하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 유효성을 입증하였다. 쿨롱 마찰이 존재하는 경우에도, 적절한 추정 성능이 나타났다. 추정된 기계 시스템의 제정수를 이용하여, 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

- [1] S. K. Kuo and C. H. Menq, "Modeling and control of a six-axis precision motion control stage," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 10, No. 1, pp. 50-59, Feb. 2005.
- [2] 설승기, 전기기기 제어론. 홍릉과학 출판사, 제 4장.
- [3] Howard Anton, 최신선형대수. 교보문고, 2008, 제 7장.