

딥러닝 기반 외란 관측기를 적용한 DC 모터 속도 제어

박웅희, 조현민*

경북대학교 로봇 및 스마트시스템공학과

rhkdwe23@knu.ac.kr, hmjoe@knu.ac.kr

DC Motor Speed Control Using a Deep Learning-Based Disturbance Observer

Woong-Hee Park, Hyun-Min Joe*

Department of Robot and Smart System Engineering, Kyungpook National Univ.

요약

본 논문에서는 DC 모터의 정밀한 속도 제어를 위해 딥러닝 기반 외란 관측기(Deep Learning-Based DOB)를 제안한다. 기존의 PID 제어는 외란 발생 시 반응 속도가 느리다는 단점이 있으며, 일반적인 외란 관측기(DOB)는 센서 노이즈 억제에 위한 Q-filter 사용으로 인해 위상 지연(Phase Lag)이 발생하는 구조적인 제약을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 모터의 오프라인 구동 데이터를 통해 외란(d)을 생성하고, 이를 심층 신경망(DNN)이 학습하도록 설계하였다. 제안하는 제어 시스템에서는 PID 제어기의 출력 신호를 모터의 기본 제어 입력으로 사용한다. 그리고 신경망이 추정된 외란(\hat{d})을 차감하여 최종 제어 입력을 모터에 인가한다. 실험 결과, 제안한 시스템은 기존 PID 제어 대비 계단과 응답에서 과도 응답 특성을 개선하였으며, 정현과 추종 실험에서도 위상 지연 및 추종 오차를 감소시키는 결과를 확인하였다. 향후 비선형 마찰 특성과 동적 특성을 더욱 정밀하게 반영하여 제어 성능을 향상시킬 계획이다.

I. 서론

최근 산업의 자동화 및 로봇 분야의 수요가 급증함에 따라 로봇 구동의 핵심 요소인 DC 모터 제어 기술의 중요성이 부각되고 있다. DC 모터 제어에는 전통적으로 구조가 간단하고 안정적인 PID 제어 기법이 많이 사용된다. 그러나 PID 제어는 Overshoot와 Settling time 사이의 Trade-off를 극복하는 데 한계가 있고, 오차가 발생한 이후에 제어 입력을 조정하는 방식이므로 외란(마찰, 부하 변동 등) 발생 시 반응 속도가 느린 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)를 도입하여 외란을 추정하고 보상하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 일반적인 DOB는 센서 노이즈 제거를 위해 Q-filter를 사용하며, 이로 인한 위상 지연이 발생하는 구조적 한계가 있다[1].

본 논문에서는 이러한 필터로 인한 위상 지연 문제를 완화하기 위해, 오프라인 데이터로 학습시킨 딥러닝 기반 외란 관측기를 제안한다[2]. 이를 통해 외란을 실시간으로 추정하고 PID 제어 출력에 보상함으로써 제어 성능이 개선됨을 보여준다.

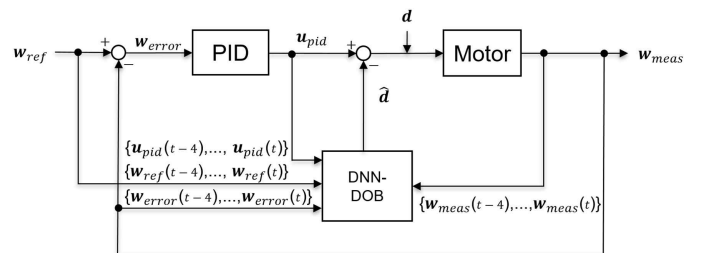
II. 본론

2.1 DC 모터 속도 제어 시스템 설계 및 구성

본 연구에서 구축한 DC 모터 속도 제어 시스템은 크게 제어부, 측정부, 구동부로 구성된다. 제어부는 마이크로컨트롤러인 Arduino Due를 사용하여 200 Hz 주기의 제어 루프를 구현하였으며, 측정부는 마그네틱 엔코더를 통해 모터의 회전 속도를 실시간으로 측정한다. 구동부는 21.3의 감속비를 가지는 DC 모터와 모터 드라이버로 구성된다.

[그림 1] 은 제안하는 제어 시스템의 블록 선도를 나타낸다. u_{pid} 는 주

제어기인 PID 제어기가 생성한 기본 제어 입력이다. w_{ref} , w_{meas} , w_{error} 는 각각 목표 속도, 측정된 속도, 속도 오차값이다. 제어 구조는 u_{pid} 에 DNN 외란 관측기(DNN-DOB)가 추정된 외란(\hat{d})을 차감하여 최종 제어 입력으로 모터에 인가한다. DNN 외란 관측기는 w_{ref} , w_{meas} , w_{error} , u_{pid} 의 현재 시점(t)을 포함하여 과거 4개 시점($t-1 \sim t-4$)까지 총 5개 시점의 데이터를 입력으로 받아 외란을 추정하고, 이 추정값을 이용해 모터를 제어한다.



[그림 1] 제안하는 DC 모터 속도 제어 시스템 블록 선도.

2.2 딥러닝 기반 외란 관측기 설계

본 논문에서 제안하는 신경망의 학습을 위한 정답 라벨(d)은 오프라인에서 수집된 모터의 구동 데이터를 기반으로 생성한 역모델의 출력값과 실제 제어 입력(u_{pid})의 차이로 정의하였다.

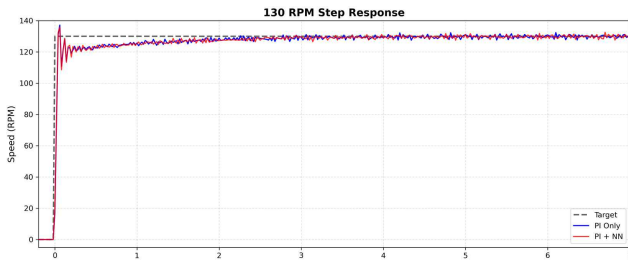
설계한 신경망의 입력층은 w_{ref} , w_{meas} , w_{error} , u_{pid} 의 현재 시점(t)을 포함하여 과거 4개 시점($t-1 \sim t-4$)까지 적용하여 총 20개의 노드로 구성하였다. 신경망의 은닉층은 2개의 층으로 구성하였으며 각 16개의 노드

를 할당하였고, 최종 출력층은 1개의 노드로 구성하여 \hat{d} 을 출력한다.

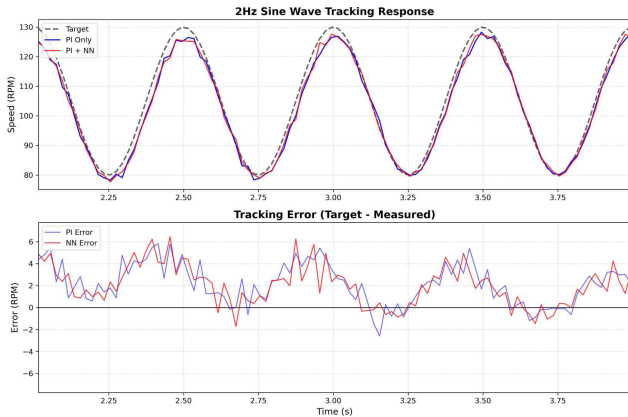
III. 실험 및 결과

3.1 실험 방법

본 논문에서 속도 w 는 RPM 단위로 표기한다. 제안하는 제어기의 성능 평가를 위해 두 가지 입력 조건에서 실험을 수행하였다. 첫째, 과도 응답 특성을 확인하기 위해 130 RPM의 계단파를 인가하였으며, 성능 지표로는 Overshoot, Rise time, Settling time을 사용하였다. 둘째, 동적 추종 성능을 확인하기 위해 2 Hz의 정현파를 인가하였으며 과도 응답 구간 이후의 정상 상태 성능을 평가하기 위해 정현파 입력 시작 2초 후부터 응답 데이터를 측정하였다. 성능 지표로는 평균제곱근 오차(RMSE), 평균절대 오차(MAE), 위상 지연, 그리고 최대 오차를 사용하였다.



[그림 2] 계단파 입력의 추종 성능 비교



[그림 3] 정현파 입력의 추종 성능 비교

3.2 실험 결과

계단파 응답 실험 결과([그림 2]), 기존 PID 제어기에 비해 Overshoot는 5.5%에서 4.3%로 약 21.8% 감소하여 과도 응답 특성이 개선되었다. 반면 Settling time(0.74초)과 Rise time(0.04초)은 기존 제어기와 유사한 수준을 유지하였다.

정현파 추종 실험 결과([그림 3]), 위상 지연은 12.01 ms에서 11.36 ms로 약 5.45% 감소하였고, RMSE는 3.00 RPM에서 2.88 RPM으로 3.92% 감소하였다. 또한 MAE는 2.59 RPM에서 2.49 RPM으로 약 3.81% 감소하여 전반적인 추종 정밀도는 향상되었으나, 최대 오차는 7.29 RPM에서 7.54 RPM으로 약 3.43% 증가하는 경향을 보였다.

3.3 고찰

계단파 입력 실험에서 제안한 딥러닝 기반 외란 관측기를 적용한 경우, PID 단독 대비 Overshoot가 감소하여 과도 응답 특성이 개선됨을 확인하였다. 반면, 정현파 추종 실험에서는 RMSE, MAE 및 위상 지연이 감소하는 경향을 보였으나, 최대 오차가 증가하여 순간적인 추종 오차가 커질 수

있음을 확인하였다. 또한, 본 실험 조건 외에 저속(50 RPM) 및 고속(260 RPM) 영역에서 추가 실험 결과, 제어 성능이 저하되는 현상이 관찰되었다. 이는 학습 데이터에 충분히 반영되지 못한 특정 구간의 비선형 마찰 특성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 현재 구동 범위를 포함하여, 더 넓은 속도 범위에서도 안정적인 제어 성능을 보장할 수 있도록 DNN 입력 변수의 구성을 변경하거나 학습 데이터를 보강하고 모델 구조를 최적화할 계획이다.

IV. 결론

본 논문에서는 Q-filter 기반 DOB에서 발생할 수 있는 위상 지연 문제를 완화하기 위해, 오프라인 데이터로 생성한 외란을 학습하는 딥러닝 기반 외란 관측기를 제안하고 DC 모터 속도 제어에 적용하였다. 실험 결과, 제안하는 제어기는 기존 PID 제어기에 비해 계단파 입력에서 Overshoot가 감소하였다. 또한 정현파 입력에서도 위상 지연과 추종 오차(RMSE, MAE)가 줄어드는 것으로 나타났다. 하지만 최대 오차는 증가하는 경향을 보였으며, 이는 시스템의 순간적인 안전성 측면에서 취약 요인으로 작용할 가능성이 있음을 확인하였다. 따라서 제어 성능을 향상시키고 시스템의 안전성을 확보하기 위해, 향후 연구에서는 비선형 마찰 특성을 더욱 정밀하게 반영할 수 있도록 신경망 구조를 최적화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설 장비진흥센터의 지원(No. RS-2024-00404084) 및 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국로봇산업진흥원의 지원(No. 2025-07011, 로봇 플래그쉽 사업)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] E. Sariyildiz, R. Oboe and K. Ohnishi, "Disturbance observer-based robust control and its applications: 35th anniversary overview," IEEE Trans. Ind. Electron. 67(3), pp. 2042-2053, 2020.
- [2] J. Hu and M. Zheng, "Disturbance observer-based control with adaptive neural network for unknown nonlinear system," Measurement and Control, 56(1 - 2), pp. 287 - 294, 2023.