

위치제어 수렴구간 단축을 위한 연속 전향 보상 프로파일 기법

이충인, 박재용, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Recursive Feedforward Profile Method for Minimizing Settling Time in Position Control

Choongin Lee, Jaeyong Park, Jung Ik Ha

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

서보 시스템에서는 물리적인 제한조건을 반영하여 위치 프로파일을 그려왔다. 하지만 위치 프로파일이 종료된 시점 남아있는 오차를 기존의 오차 기반 제어기를 이용하여 수렴시키기엔 많은 시간이 소요되고 이는 위치제어 성능 문제로 직결된다. 본 논문에서는 기존의 프로파일이 끝난 시점에서 시스템 제한을 고려한 최대 전압과 최대 전류를 이용하는 프로파일을 연속적으로 그려 수렴구간을 단축시키는 방법을 제안한다. 1kW 용량 서보모터를 통해 수렴시간을 기존 프로파일 방식과 비교하여 알고리즘을 검증하였다.

1. 서론

매니퓰레이터를 포함한 다양한 위치제어 시스템에서 높은 위치제어 성능은 필연적이다. 제어기 성능을 제한하는 요소에는 여러 가지 요소가 있지만 기존 오차기반 제어기에서 수렴구간의 작은 오차는 위치 제어의 수렴 시간 증가에 큰 영향을 끼친다. 따라서 퍼지 로직과 PID제어기를 결합한 퍼지 PID 제어기와 같이 위치 오차 혹은 위치 오차의 기울기에 따라서 제어기 계수를 변화시키는 방법을 사용하여 수렴 시간을 줄이는 방법도 있지만^[1] 오버슈트가 발생하지 않는 최적의 계수를 정하는 것에 어려움이 있다. 또 다른 방법으로는 위치 지령을 저크 제한, 토크제한, 속도제한 등 물리적인 제한을 고려하여 프로파일을 그려서 위치 제어기 입력 오차를 최소화하며 제어하는 방식이 있는데^[2] 이 역시 전동기 제정수 오차와 전환 시점에 대한 샘플링 시간 지연 때문에 완벽한 위치 프로파일을 그리는 것이 불가능하여 프로파일이 끝난 이후의 미세한 오차가 발생하게 된다. 이 미세한 오차를 수렴시키기 위해서는 위에서 언급한 이유와 같은 이유로 많은 시간이 필요로 한다. 본 논문에서는 프로파일이 끝난 이후의 수렴 구간에 대해서도 최대 저크, 최대 토크, 최대 속도 제한을 고려한 프로파일을 연속적으로 적용하여 최종 수렴 시점까지 최적의 위치지령을 생성하여 수렴시간을 단축시키는 프로파일 기법을 제안하고자 한다.

2. 본론

2.1 제어기 구조

본 논문에서는 그림 1과 같은 형태로 위치제어기, 속도제어기, 토크제어기가 각각 상위제어기의 출력이 하위제어기의 지령으로 들어가는 형태의 직렬제어기를 사용하였으며 각각 PD, PI, PI형태로 제어기를 구성하였다.

이러한 직렬 형태 제어기의 단점으로는 하위제어기의 반응

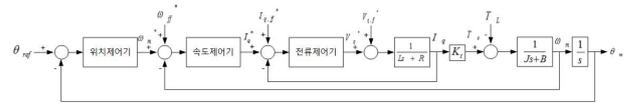


그림 1 직렬 위치-속도-전류 제어기 블록도

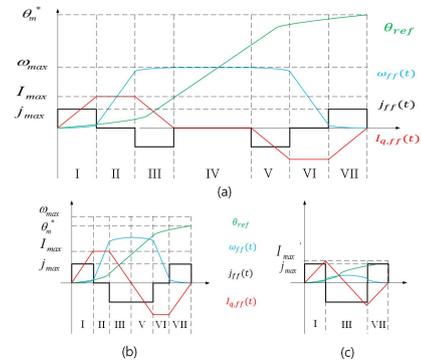


그림 2 상황별 위치 프로파일과 전향 보상 값. (a) 전체 모드 프로파일(방법A), (b) 최대 속도모드 제어 프로파일(방법B), (c) 최대 속도, 전류모드 제어 프로파일(방법C)

성이 상위제어기의 반응성에 영향을 끼친다는 점이다. 따라서 본 제어기에서는 하위제어기의 반응성을 보완하기 위하여 실시간으로 해당 시점의 위치 프로파일 통해 생성된 속도, 전류값을 그림 1과 같이 상위제어기의 출력에 전향 보상하였다.

2.2 위치지령 프로파일 생성

기존의 단일 횡수 프로파일 방식의 위치 지령 프로파일은 최대 저크, 토크, 속도구간을 고려하여 그림 2의 (a)와 같이 7가지 모드로 나뉠 수 있는데 1부터 7까지의 모드 중 남은 거리와 최소 제동 거리를 고려해 현 시점에 필요한 모드만을 선택하여 프로파일 한 주기를 방법 A,B,C 세 가지 방법 중 선택하여 완성한다.^[2] 제안하는 기법에서는 이전 주기가 완료된 시점에서 최종 위치 지령까지 남은 거리를 고려하여 세 가지 방법 중 한 가지를 선택하여 새로운 프로파일 주기를 시작한다.

프로파일 주기의 시작 전향 보상 값은 시작 시점의 속도, 토크에서부터 출발한다. 그림 3은 속도와 토크(q축 전류)의 부호에 따른 모드 I와 모드 II의 위치 프로파일과 전향보상 값을 나타낸 그래프이다. 시작 모드가 설정된 이후로 다음 모드로 전환하는 시점은 전환 조건에 의해 판별 후 넘어가기 때문에 메모리가 적게 사용되며 프로파일 중간에 목표 위치 지령이 변해도 적용 가능하다. 표1에 나타난 전환조건은 프로파일 방법 A에 해당하는 전환조건이며 방법 B와 C는 유사한 전환조건이 적용되므로 생략하였다.

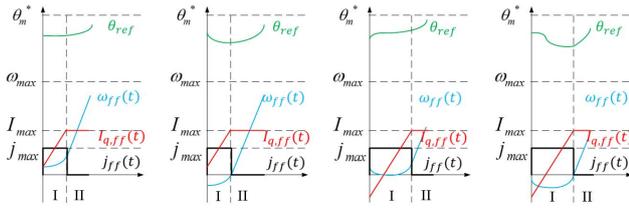


그림 3 프로파일 주기 시작 시점의 전류와 속도 부호에 따른 위치 프로파일과 전향 보상 값의 그래프

표 1 프로파일 방법 A의 모드 전환 조건

현재모드	전환모드	전환 조건
I	II	$I_{q,ff} \geq I_{q,ffmax}$
II	III	$w_{ff} \geq w_{max} - w_{ff,endmode1}$
III	IV	$I_{q,ff} \leq 0$
IV	V	$\theta_{ref} \leq \theta_m^* - \theta_{ref,endmode3}$
V	VI	$I_{q,ff} \leq -I_{q,max}$
VI	VII	$w_{ff} \leq w_{ff,endmode1}$

연속 프로파일 기법이 종료되는 시점은 현재위치가 충분히 목표위치에 수렴했다고 판단되는 임의로 설정한 거리에 도달하였을 때 종료되며 종료된 후의 위치지령은 최종 위치 지령 값 (θ_m^*)에 고정된다.

3. 모의실험 및 실험 결과

제안하는 연속 프로파일 기법을 기존 단일 프로파일 방식과 수렴 구간 성능을 비교하기 위하여 실험에 사용된 전동기 제정수(표1)와 같은 값으로 모의실험을 진행하였다. 제어기 계수는 두 기법 모두 같은 값을 사용하였으며 수렴 구간은 방법 A인 전체모드 프로파일(그림 2(a))을 동일하게 진행한 후 종료 시점부터 임의로 설정한 최종수렴각도(0.002rad)에 도달하는 시간을 비교하여 성능을 검증하였다.

3.1 모의실험 결과

모의실험 결과는 그림 4를 통하여 확인할 수 있다. 그림 4는 전체모드 프로파일이 모드 VI에 속해있는 순간부터 최종 수렴 구간에 돌입할 때까지 제안하는 프로파일 기법이 기존 단일 프로파일 기법에 비하여 빠르게 수렴하는 과정을 위치 그래프, q 축 전류 그래프, 모드 그래프를 통하여 표현하였다.

3.2 실험 결과

실험에서는 기존 단일 횡수 프로파일(그림 5(b))과 제안된 연속 횡수 프로파일(그림 5(c))을 비교하였으며 제안된 알고리즘의 시작시점부터 수렴시점까지 위치 프로파일, 위치, 모드변화를 그림 5(a)를 통해서 확인할 수 있다. 단일 횡수 프로파일은 300ms의 수렴시간이 소요되었고 연속 횡수 프로파일은 75ms가 소요되었다.

표 2 전동기(SPMSM) 제정수

Pole	8	P_{rated}	1[kW]
R	0.356 [Ω]	I_{rated}	5[A]
L_s	0.008 [H]	w_{rated}	3000 [r/min]
λ_f	0.08 [H]	J_m	0.000765[kg · m ²]

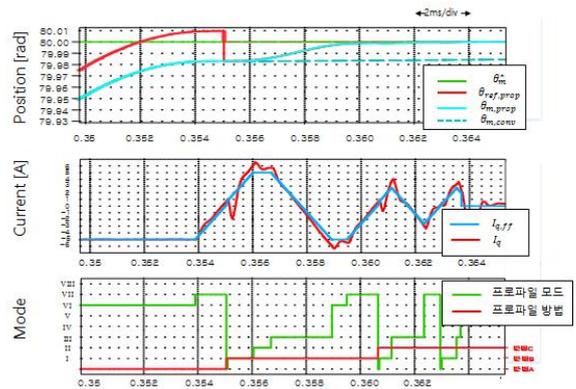


그림 4 단일 프로파일과 연속 프로파일 모의실험파형

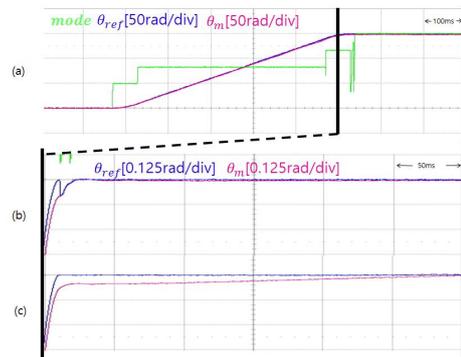


그림 5 단일 프로파일과 연속 프로파일 실험파형

4. 결론

본 논문에서는 수렴구간 성능을 향상시키기 위하여 최대 저크, 토크, 속도 조건을 고려한 연속 횡수 프로파일을 제안하였다. 기존의 단일 횡수 프로파일 방식은 프로파일이 종료된 시점 이후에 완전 수렴까지 작은 위치 오차에 기반한 작은 하위제어기 지령값으로 인하여 최대 토크를 사용하지 않았다. 본 논문에서는 목표 수렴 구간 전까지 최대 전류, 전압을 이용하였으며 최대 가속, 최대 감속을 연속적으로 수행하여 기존 알고리즘 대비 225ms 수렴시간을 단축하였다.

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업 [10060121]의 지원을 받아 연구됨.

참고 문헌

- [1] L. Xu, T. Xu, J. Wang and X. Li, "A Fuzzy PID Controller Based Two Axis Compensation Device for Airborne Laser Scanning," in IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 5, pp. 1353 1362, March1, 1 2017.
- [2] S. Liu, "An on line reference trajectory generator for smooth motion of impulse controlled industrial manipulators," 7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No.02TH8623), 2002, pp. 365 370.