

모바일 로봇의 선도-추종 제어 시스템을 위한 학습 모델 예측 제어기

김기후*, 이상문*
경북대*

Learning Model Predictive Controller for Leader-Following Control Systems of Mobile Robots

Gihu Kim*, Sangmoon Lee*
Kyungpook National University*

Abstract - 본 논문에서는 모바일 로봇의 선도-추종 시스템을 위한 학습 모델 예측 제어기 (learning model predictive control, LMPC) 설계 방법이 제안된다. 모바일 로봇의 선도-추종 시스템은 선도 로봇과 추종 로봇이 존재하며, 추종 로봇이 선도 로봇의 궤적을 추적할 수 있도록 제어하는 것이 목표이다. 제안하는 학습 모델 예측제어기는 선도-추종 로봇의 궤적 데이터를 이용하여 추종 로봇이 선도 로봇을 추적할 수 있는 제어 신호를 만들어 내고, 학습 횟수가 증가할수록 더 나은 제어 성능을 보장한다. 제안된 제어기 설계 방법의 효율성은 시뮬레이션 결과로부터 검증된다.

1. 서 론

최근 이동형 로봇의 선도-추종 제어 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 선도-추종 제어 시스템은 선도 로봇이 주어진 궤적에 따라 이동하면 추종 로봇이 이를 따라가는 시스템이다. 이러한 제어 시스템은 선도 로봇의 추적 궤적만 설정하면 되기 때문에 정찰, 감시와 같은 반복적인 작업을 수행하는 경우에 효율적이다. 하지만, 추종 로봇들을 제어하기 위해서는 비선형적인 선도-추종 제어 시스템의 안정성과 제어 성능을 보장할 수 있도록 제어기를 설계해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 반복적으로 임무를 수행할 때 저장된 로봇의 궤적을 이용하여 시스템의 안정성과 성능을 향상시킬 수 있는 모바일 로봇의 선도-추종 시스템을 위한 학습 모델 예측 제어기 설계 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 문제 제기

논문 [4]에서는 아래와 같이 선도-추종 제어 시스템을 선형 파라미터 변화 시스템으로 모델링한다.

$$\dot{e} = A(v_t)e + Bu. \quad (1)$$

여기에서 $e = [x_e, y_e, \theta_e]^T$, $u = [v_f - v_t, w_f - w_c]^T$ 이고,

$$A(v_t) = \begin{bmatrix} 0 & w_c & 0 \\ -w_c & 0 & v_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

이다.

2.2 학습 모델 예측 제어기

이 절에서는 선도-추종 이동형 로봇들의 궤적 데이터로 생성되는 안정한 집합의 정의와 안정한 집합을 이용한 학습 모델 예측제어기 설계 조건에 대하여 설명한다.

2.2.1 안정한 집합

선도 로봇은 주어진 궤적에 따라 움직이고 추종 로봇은 이를 따라가는 태스크를 반복적으로 수행한다고 하자. 이때, 첫 번째 횟수에서는 선도-추종 로봇들의 궤적 데이터를 알고 있다고 가정하면 아래와 같은 안정한 집합을 생성할 수 있다.

정의 1 [5]: 반복 횟수는 j 로 표현되고 상태 x_t^i 는 아래와 같은 집합에 속한다고 하자.

$$SS^j = \left\{ \bigcup_{i \in M^j} \bigcup_{t=0}^{\infty} x_t^i \right\},$$

여기에서, 집합 M^j , Q^j , F^j 는 아래와 같이 정의된다.

$$M^j = \left\{ k \in [0, j] : \lim_{t \rightarrow \infty} x_t^k = x_F \right\},$$

$$Q^j(x) = \begin{cases} \min_{(i,t) \in F^j(x)} J_{t \rightarrow \infty}^i(x), & \text{if } x \in SS^j \\ +\infty, & \text{if } x \notin SS^j \end{cases},$$

$$F^j(x) = \left\{ (i, t) : i \in [0, j], t \geq 0 \text{ with } x_t^i = x; \text{ for } x_t^i \in SS^j \right\}.$$

2.2.2 제어기 설계 조건

제안된 학습 모델 예측 제어기 설계 조건은 아래와 같은 유한 시간의 최적 제어 문제와 같으며, 매 샘플링 시간마다 최적의 제어 입력을 계산한다.

주요 정리 1: 모바일 로봇의 선도-추종 제어 시스템을 위한 학습 모델 예측제어기 설계 조건은 아래와 같다.

$$J_{t \rightarrow t+N}^{LMPC,j}(x_t^j) = \min_{u_{t|t}, \dots, u_{t+N-1|t}} \left[\sum_{k=t}^{t+N-1} h(x_{k|t}, u_{k|t}) + Q^{j-1}(x_{t+N|t}) \right],$$

여기에서

$$x_{k+1|t} = f(x_{k|t}, u_{k|t}) \quad \forall k \in [t, \dots, t+N-1],$$

$$x_{k|t} \in \chi, u_{k|t} \in \mu \quad \forall k \in [t, \dots, t+N-1],$$

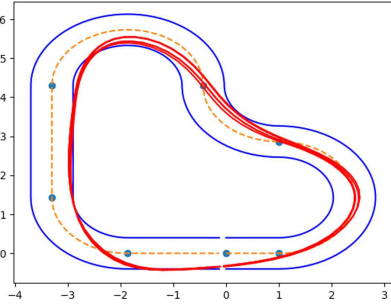
$$x_{t+N|t} \in SS^{j-1},$$

$$x_{t|t} = x_t^j,$$

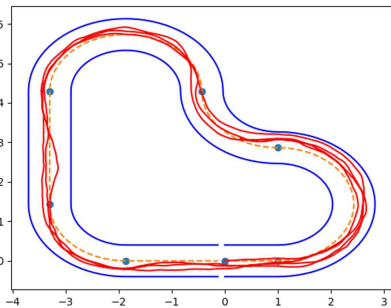
그리고 $f(\cdot)$ 대신에 식 (1)을 고려한다.

3. 실험 결과

제안된 LMPC의 우수성을 입증하기 위해서 시뮬레이션을 진행하였다. 선도 로봇의 궤적은 설계자가 미리 결정한 상황에서 특정 트랙을 반복 주행하는 임무에 적용하였다. 그림 1에서는 LMPC를 적용하여 반복 횟수가 40회 이상일 때 얻어진 상태 궤적이며, 그림 2는 PID를 이용하여 얻어진 상태 궤적이다. 표 1을 통해서 반복 횟수가 증가될수록 더 나은 제어 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 제어 성능을 나타내는 비용 값은 65에서 수렴한다.



〈그림 1〉 LMPC를 이용한 상태 궤적



〈그림 2〉 PID를 이용한 상태 궤적

〈표 1〉 주어진 임무의 반복 횟수에 따른 비용

횟수	비용(cost)
j=0	201
j=10	89
j=20	76
j=30	66
j=41	65

4. 결 론

본 논문에서는 모바일 로봇의 선도-추종 제어 시스템을 위한 학습 기반 모델 예측 제어기법을 제안하였다. 제안된 제어기법은 감시, 정찰, 레이싱 경주 등 반복적으로 주어진 임무를 수행해야 하는 경우에 반복 횟수가 증가 될수록 더 나은 제어 성능을 얻을 수 있다. 다음 연구에서는 제안된 방법을 모델의 불확실성이 존재하는 상황에서 적용될 수 있도록 확장하는 것이 목표이다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2019R111A3A01060151).

[참 고 문 헌]

- [1] Han, S. and Lee, S., "Sampled-Data MPC for Leader-Following of Multi-Mobile Robot System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 67(2), 308-313, 2018
- [2] Dierks, T. and Jagannathan, S., "Control of nonholonomic mobile robot formations: Backstepping kinematics into dynamics", In 2007 IEEE International Conference on Control Applications, 94-99, 2017
- [3] Shao, J., Xie, G., and Wang, L., "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles", IET Control Theory & Applications, 1(2), 545-552, 2007
- [4] 예동희, 한승용, 이상문, "시간 종속적인 리아프노프 함수를 이용한 모바일 로봇의 선도-추종 샘플 데이터 제어", 대한임베디드공학회논문지, 16(4), 119-127, 2021
- [5] Rosolia, U. and Borrelli, F., "Learning model predictive control for iterative tasks. a data-driven control framework", IEEE Transactions on Automatic Control, 63(7), 1883-1896, 2017