

통신 지연 보상을 위한 선형 매개 변수 가변 기법

박채훈, 정철민, 김건태 강창묵[†]
인천대학교

pch96@inu.ac.kr, cmin@inu.ac.kr, rjsxo0303@naver.com, mook@inu.ac.kr

Linear Parameter Varying Design for Communication Delay System Compensation

Chaehun Park, Cheolmin Jeong, Guntae Kim, Chang Mook Kang[†]
Incheon National Univ.

요약

시스템과 원격지 운전자 사이 통신 지연은 정보를 지연시켜 운전자의 제어 신뢰도를 낮춘다. 본 논문에서는 원격지 통신지연을 보상하기 위해 기존 시스템과 지연이 발생한 시스템의 관계를 정의하고, 이를 필터 모델로 구성하여 지연된 정보를 복원했다. 그리고 가변 통신지연을 고려해 복수의 필터 모델을 연계해 단일 필터 보다 개선된 결과를 확인했다.

I. 서론

자율주행 차량 연구개발이 진행되었지만, 혼잡하고, 돌발상황이 발생할 수 있는 도심 환경에서는 아직 극복해야 될 문제가 많다. 따라서 충분하지 않은 자율주행 기능을 고려해 관리자 감독과 같은 제약이 요구되며, 이때 인력을 효율적으로 배분할 수 있는 원격지 차량 제어가 제안된다. 원격지 차량을 공유할 경우 돌발 상황 대비할 수 있을 뿐만 아니라, 충전, 주차와 같은 주행 서비스 인력을 효율적으로 분배할 수 있다[1].

이러한 서비스는 원격지에 지연 없이 차량 정보가 전달되었을 때 가능하다. 흔히 원격지 운전자는 실제 차량의 카메라 이미지 정보를 전달받고, 이미지는 높은 데이터 용량으로 통신 과정에 지연을 발생시킨다. 통신 지연은 원격지로 전달되는 정보를 지연시켜 원격지 운전자 제어 신뢰도를 낮출 뿐만 아니라, 시스템 특성을 변경하여 기존 시스템에 최적화된 제어기는 더 이상 안정하게 시스템을 제어할 수 없다[2].

본 논문에서는 고 밀도의 정보를 수신하는 원격지 운전자 제어를 돕기 위해 지연된 정보로 실제 시스템 상태를 예측 즉, 복원하는 칼만 필터(Kalman filter)를 설계했다. 칼만 필터 모델은 통신 지연 시스템을 1 차 지연 문제로 근사화해 유도했고, 실 환경에서 나타나는 가변 통신 지연을 다루기 위해 통신지연에 최적화된 필터들을 선형 매개변수 가변(linear parameter varying)기법으로 발생한 시간 지연에 따라 조정하는 방법을 제안한다[3].

제안된 방법은 통신 지연을 상태 피드백 지연이 발생한 문제로 근사화해 DC 모터에서 검증했고, 가변 통신 지연 환경에서 단일 필터 모델을 활용했을 때 보다 안정하고, 빠른 반응을 나타냈다.

II. 본론

통신 지연은 시스템의 특성을 그림 1 과 같이 변경하여, 통신 지연이 고려되지 않은 제어기를 사용할 수 없다.

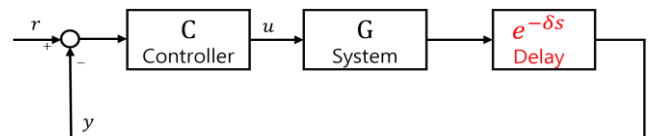


그림 1. 통신 지연 δ 가 발생할 때, 시스템 구조

그림 1 통신지연이 발생한 시스템과 기존 시스템(G)의 관계를 나타내고, 통신 지연의 영향을 모터의 속도(ω)에 대해 정리하면 식 (1)과 같다.

$$y = G(s)e^{-\delta s}u \approx G(s)\frac{1}{\delta s + 1}u \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{k+1} \\ \omega_{d,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ T_c & 1 - T_c/\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_k \\ \omega_{d,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \end{bmatrix} u_k$$

식 (1)은 통신 지연을 원래의 시스템에 1 차 지연 모델이 추가된 문제로 근사화해 유도한 결과이다. ω 는 실제 동작하는 시스템의 상태, ω_d 는 통신 지연이 발생해 원격지에서 관측되는 상태, T_c 는 식 (1) 모델을 활용하는 칼만 필터의 동작 주기 그리고 a_{11}, b_{11} 는 기존 모터 시스템 변수를 나타낸다.

시간 지연은 상태 벡터를 $x = [\omega_d \ \omega_{d,k}]^T$ 로 설정할 때 식 (1)과 같이 선형 모델로 근사화 할 수 있고, 칼만 필터는 식 (1)의 모델과 지연된 정보 ω_d 를 활용해 ω 를 예측할 수 있다. 또한 본 논문에서는 가변 통신 지연 환경에 대응하기 위해 통신 지연 상한과 하한 $\delta, \underline{\delta}$ 으로 식 (1)의 선형 모델들 유도하고, 측정된 통신 지연

$\delta(t)$ 에 따라 상한과 하한 모델 필터를 선형 매개변수 가변기법으로 연계했다.

$$\begin{bmatrix} \delta(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

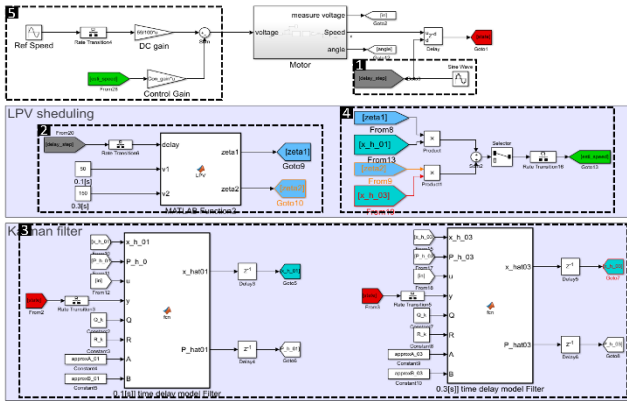


그림 2. 가변 통신지연을 보상하기 위한 선형 매개변수 기법 적용 실험 구조

식 (2)와 그림 2는 관측된 $\delta(t)$ 에 따라 선형 매개변수 가변기법의 interpolation parameter ζ_1, ζ_2 를 계산한 결과와 ①로 모델링된 가변통신지연 모터 제어과정을 나타낸다. ①로 통신지연이 관측되면 ②에서 식 (2)의 과정으로 interpolation parameter를 연산하고, 이 정보는 ④에서 ③의 필터 예측 정보를 통신 지연에 따라 조정해 실제 모터 상태를 예측한다. ⑤제어기는 이 결합된 정보를 전달받아 시스템을 제어하고, 이 방법은 단일 통신 지연 모델을 활용할 때 보다 개선된 안정도와 반응을 나타낸다.

III. 실험 및 결과

본 논문은 선형 매개변수 변동기법을 활용해 가변통신지연 환경의 시스템 보상 알고리즘을 설계했고, 그림 3의 DC 모터 센서 지연으로 가변 통신지연을 모델링해 제안된 알고리즘을 검증했다.



그림 3. QUANSER사의 DC 모터

그림 3은 QUANSER사의 DC 모터로 엔코더(encoder)가 내장되었어 실시간으로 각도와 속도를 측정할 수 있다. 실험은 엔코더로 측정된 속도에 0.1~0.3[s]사이의 가변 시간지연을 발생시키고, 단일 칼만필터와 제안된 알고리즘의 결과를 비교했다.

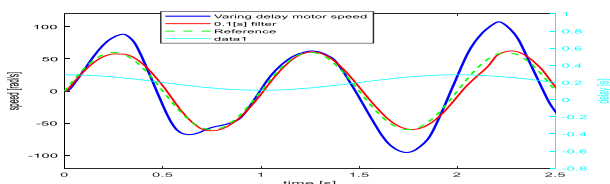


그림 4. 가변 통신지연이 발생할 때 0.1[s]지연 모델 단일 필터를 활용한 지령 속도 추적 제어

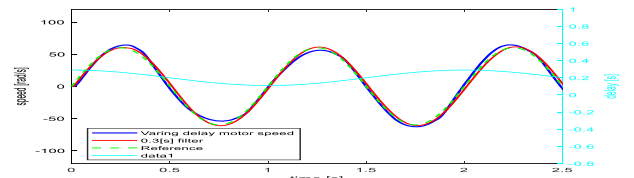


그림 5. 가변 통신지연이 발생할 때 0.3[s]지연 모델 단일 필터를 활용한 지령 속도 추적 제어

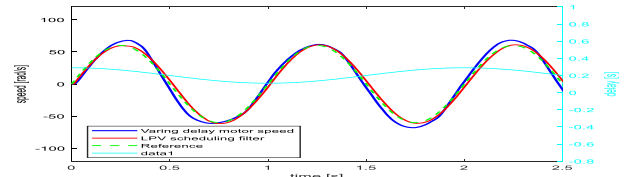


그림 6. 가변 통신지연이 발생할 때 가변 필터 모델을 활용한 지령 속도 추적 제어

그림 4 그림 6은 가변통신지연(mint)가 발생할 때, 각 필터 모델을 활용해 실제 모터 속도(blue) 지령 속도(green)를 추종하는 제어 결과로, 0.1[s], 0.3[s] 단일 통신지연필터는 상반되는 지연이 관측될 때, 불안정하거나 지연된 반응을 나타냈다. 반면 2개의 필터모델을 연계한 가변 필터 모델은 개선된 안정도와 반응을 나타냈고, 이는 시간지연에 적합한 필터 모델을 변경해 적응적으로 활용했기 때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 가변 통신지연이 발생하는 원격지 운용자를 보조하기 위해 선형매개변수 기법으로 필터 모델들을 연계했고, DC 모터에 시간지연을 발생시켜 검증했다. 실험 결과 선형매개변수 기법은 통신지연에 따라 적합한 필터 모델을 활용해 단일 필터 보다 개선된 결과를 확인했지만, 가변 필터 모델이 0.3[s] 단일 필터보다 불안정한 결과도 나타났다.

이는 1 차 지연 모델로 근사화한 필터 모델의 한계로, 향후 보다 정확한 시간 지연 근사화 기법을 연구해 가변 통신지연의 반응도를 개선할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2020R1F1A1071547)과 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(20018144)을 받아 수행된 연구임,

참 고 문 헌

- [1] Kettwich, C, et al. "A Helping Human Hand: Relevant Scenarios for the Remote Operation of Highly Automated Vehicles in Public Transport." *Applied Sciences*, 12, 4350, 2022.
- [2] Normey-Rico, J., & Camacho, E. (2007) *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media.
- [3] Kang, C. M., Lee, S. H., and Chung, C. C., "Discrete-time LPV H_2 observer with nonlinear bounded varying parameter and its application to the vehicle state

observer," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 11, pp. 8768-8777, 2018.