

# 퍼지 관측기를 이용한 크레인의 흔들림 억제 제어

퍼지시스템은 시스템의 모델 파라미터를 식별하거나 불확실성을 관측, 보상함으로써 제어기의 성능을 향상시키기 위해 많이 활용되고 있다. 특히, T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지 시스템의 광범위 함수 근사기능을 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다.

■ 박문수, 좌동경, 홍석교  
(아주대학교 전자공학부)

## 1. 서론

퍼지시스템은 시스템의 모델 파라미터를 식별하거나 불확실성을 관측, 보상함으로써 제어기의 성능을 향상시키기 위해 많이 활용되고 있다. 특히, T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지 시스템의 광범위 함수 근사기능을 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다. 최근에는 제어 시스템의 구동기에 존재하는 불감대(dead-zone)와 같은 미지의 비선형성을 추정하고 보상하기 위해 퍼지 시스템을 이용하기도 하였다[1-5].

컨테이너 터미널 등에서 사용되는 크레인은 운송시스템의 한 부분으로서, 국제 교역 물류량이 날로 증가하는 현대 산업사회에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 크레인 시스템은 최근 제어분야 연구자들이 주목하고 있는 부족구동 시스템의 하나

로 [6-18], 자유도에 비해 제어입력의 수가 적기 때문에 시스템의 모든 구성변수를 직접 제어하기 어렵다[19,20]. 또한 주행운동과 권상운동을 목적에 맞게 제어하더라도 흔들림운동의 안정성은 보장하기 어렵다[4]. 따라서, 크레인 시스템의 효과적인 제어를 위해서는 시스템 구성변수들 간의 동적결합을 고려함으로써 모든 구성변수의 안정성을 보장하는 제어기의 설계가 요구된다[21].

본 고에서는 파라미터의 불확실성 및 구동기의 비선형성을 내포하는 천정주행 크레인의 흔들림 억제 궤적추종을 위한 퍼지 기반 적응제어 방법을 소개한다. 소개하는 방법은 크게 트롤리의 궤적추종 제어와 흔들림 억제제어로 구성되는데, 궤적추종은 되먹임 선형화를 이용하고, 흔들림 억제는 기존 방법[17]에 비해 매끄러운 제어규칙의 천이가 보장되는 퍼지 가변구조 제어를 이용한다. 또한, 시스템의 불확실성을 보상하기 위해 퍼지 불확실성 관측기를 이용한다.

## 2. 천정주행 크레인

그림 2는 지표면보다 높게 설치된 궤도를 왕복 주행하는 천정주행 크레인을 도시한 것이다. 그림 2에서 보듯이 크레인에 운반물체가 매달려 있어 트롤리 주행 시 운반물체의 흔들림이 발

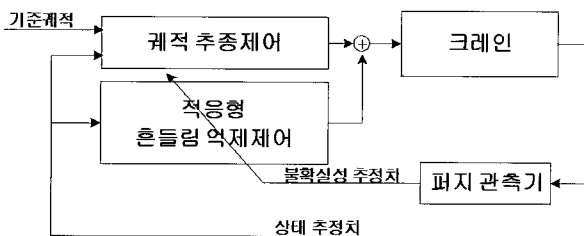


그림 1. 크레인의 퍼지 기반 적응제어

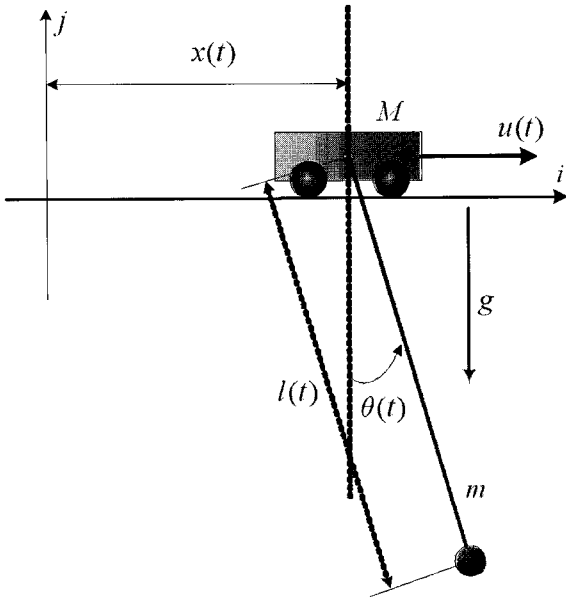


그림 2. 천정주행 크레인의 평면 모델

생한다. 그림에서  $x(t)$ ,  $l(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $u(t)$ 는 트롤리의 위치, 권상 로프의 길이, 운반물체의 흔들림 각도 및 제어입력을 각각 나타낸다. 문제를 간략히 하기 위해 권상운동을 고려하지 않으면 천정주행 크레인의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{x} + ml\cos(\theta)\ddot{\theta} - ml\sin(\theta)\dot{\theta}^2 - d_{vx}\dot{x} - d = u \\ ml^2\ddot{\theta} + ml\cos(\theta)\ddot{x} + mgl\sin(\theta) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

또한, 시스템 모델 파라미터의 불확실성을 고려하여 (1)을  $x$ -운동방정식과  $\theta$ -운동방정식으로 나누어 쓰면

$$\begin{aligned} \ddot{x} = F_x + G_x u + \Omega_x \\ \ddot{\theta} = F_\theta + G_\theta u + \Omega_\theta \end{aligned} \quad (2)$$

와 같고,  $\Omega_x$ 와  $\Omega_\theta$ 는 각각  $x$ 와  $\theta$ 의 운동방정식에 대한 불확실성으로, 시스템 파라미터의 불확실성 및 구동기의 비선형성을 모두 포함한다.

### 3. 궤적추종 제어와 흔들림 억제제어

#### 3.1 되먹임 선형화를 이용한 궤적 추종제어 [17]

이 절에서는 천정주행 크레인의 흔들림 억제 궤적추종 제어 방법 중에서 비선형 제어방법인 되먹임 선형화를 이용한 방법을 소개한다. [17]에서 제안한 방법은 다음과 같이 불확실성을 내포하지 않은 시스템을 고려하였다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} = F_x + G_x u \\ \ddot{\theta} = F_\theta + G_\theta u \end{aligned} \quad (3)$$

먼저, (3)에 대해 2차 미분까지 유계인 트롤리의 기준궤적에 대한 위치 오차를 다음과 같이 정의하면,

$$e \triangleq x - r \quad (4)$$

궤적추종오차  $e$ 가 영으로 수렴하도록 하기 위한 되먹임 선형화 제어법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$u = \left[ \frac{P}{\det(M)} \right]^{-1} \left( -X_e - \frac{W}{\det(M)} + u_c \right) \quad (5)$$

여기서,  $X_e = -\ddot{r} + k_e^2 e + 2k_e \dot{e}$ ,  $k_e$ 는 양의 상수이고  $u_c$ 는 다음 절에서 설계될 흔들림 억제를 위한 제어법칙이다. 그러면, 제어법칙 (5)에 의해 (3)은

$$\ddot{x} = \ddot{r} - k_e^2 e - 2k_e \dot{e} + u_c \quad (6)$$

$$\ddot{\theta} = -g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c) \quad (7)$$

이 되고, 여기서  $D = -(Q/P)^2 > 0$ ,  $g_c = g/l$ 이다. 또한 (6)으로부터 궤적추종오차 운동방정식은

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c \quad (8)$$

이 된다. 즉, 입력  $u_c$ 가 영이면 제어기 (5)에 의해 트롤리의 궤적 추종 오차는 점근적으로 영으로 수렴한다 [22].

#### 3.2 흔들림 억제제어

궤적추종 제어법칙 (6)에서 흔들림 억제를 위한 제어법칙  $u_c$ 는 (7)을 안정화 함과 동시에 (8)의 안정화 조건을 만족하여야 한다. 따라서 궤적추종을 위한 성분  $X_e$ 의 영향을 최소화 하면서 효과적으로 흔들림을 억제할 수 있는 가변구조 제어법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$u_c^{FVSC} = |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{\chi_\theta} (X_\theta) + (k_{\theta d} \dot{\theta}) / \sqrt{D} \quad (9)$$

여기서,  $X_\theta = 2\dot{\theta} + k_{\theta d}\theta$ ,  $k_{\theta d}$ 는 양의 상수이다.

### 4. 불확실성 관측기와 적응제어

#### 4.1 불확실성의 결합성

천정주행 크레인 (2)는 두 개의 분리된 운동방정식으로 구성

되고, 각각 불확실성  $\Omega_x$ 와  $\Omega_\theta$ 를 포함한다. 그러나 이 둘은 서로 서로 결합되어 있고

$$\Omega_\theta = -\sqrt{D}\Omega_x - g_c \sin(\theta) \quad (10)$$

를 만족하므로 이러한 특성을 활용하면 둘 중 하나만 추정하여 모두를 보상할 수 있다.

### 4.2 퍼지 불확실성 관측기

흔들림 억제에 위한 가변구조 제어법칙 (9)는 시스템의 불확실성을 고려하지 않은 제어법칙이다. 이 절에서는 (2)에서  $\Omega_\theta$ 를 추정하기 위한 퍼지 관측기를 소개한다. 즉, 불확실성  $\Omega_\theta$ 를 T-S 퍼지시스템을 이용하여 추정하면 그 추정치  $\hat{\Omega}_\theta$ 는 다음과 같이 정의되고,

$$\hat{\Omega}_\theta \triangleq \hat{\phi}^T \xi(\mathbf{x}) \quad (11)$$

퍼지관측기의 출력  $\hat{\phi}$ 는 다음 식에 의해 조정된다.

$$\dot{\hat{\phi}} = \gamma \zeta \xi(\mathbf{x}) \quad (12)$$

여기서,  $\xi(\mathbf{x})$ 는 퍼지기저함수 벡터,  $\gamma > 0$ 는 관측기 설계 파라미터이고  $\zeta \triangleq \dot{\theta} - \mu$ 이다.

### 4.3 퍼지기반 적응형 흔들림 억제제어

퍼지 관측기 (11)을 이용하면, (2)의 두 번째 식에 대한 퍼지기반 적응형 흔들림 억제제어 법칙은 다음과 같다.

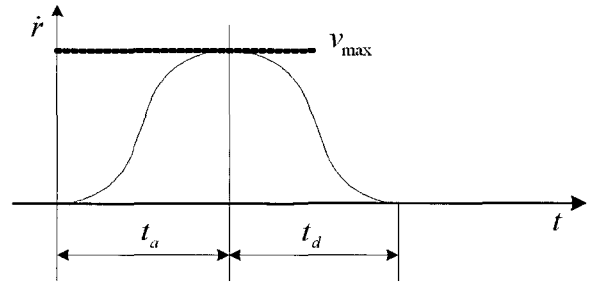
$$u_c^{AFVSC} = |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{x_{ob}}(X_\theta) + (k_{\theta d} \dot{\theta} + \hat{\Omega}_\theta + g_c \sin(\theta)) / \sqrt{D} \quad (13)$$

즉, 제어법칙 (13)은 시스템 (2)의 불확실성  $\Omega_\theta$ 와  $\Omega_x$ 를 퍼지 관측기의 추정치  $\hat{\Omega}_\theta$ 를 이용하여 보상하는 적응형 제어법칙이다.

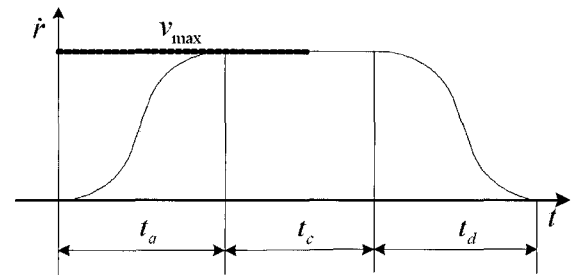
## 5. 기준 궤적

이 장에서는 [15]에서 제안한 트롤리의 주행에 대한 기준궤적 설계방법을 소개한다.

그림 3에서  $v_{\max}$ 는 최대속도 값이고,  $t_a$ ,  $t_c$ ,  $t_d$ 는 각각 가속 구간, 등속구간, 및 감속구간을 나타낸다. 가속구간 ( $0 \leq t \leq t_a$ )과 감속구간 ( $t_a + t_c \leq t \leq t_d$ )의 속도는 각각 (14)과 (15)로 정의된다.



(a) 짧은 거리 이동을 위한 속도 프로파일



(b) 긴 거리 이동을 위한 속도 프로파일

그림 3. 기준궤적 생성을 위한 속도 프로파일

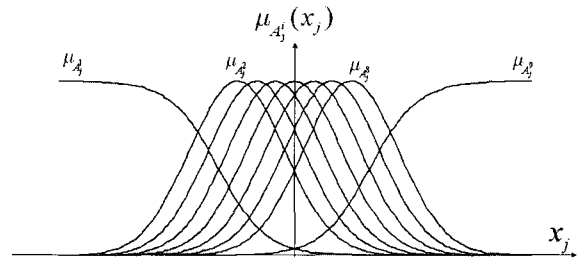


그림 4. FUO의 입력에 대한 소속함수

표 1. 소속함수의 파라미터

i	$\mu_{A_j}(\theta)$		$\mu_{A_j}(\dot{\theta})$	
	a	c[rad]	a	c[rad/s]
1	-10.0	-0.300	-5.0	-0.4
2	0.2	-0.225	0.3	-0.3
3	0.2	-0.150	0.3	-0.2
4	0.2	-0.075	0.3	-0.1
5	0.2	0.000	0.3	0.0
6	0.2	0.075	0.3	0.1
7	0.2	0.150	0.3	0.2
8	0.2	0.225	0.3	0.3
9	10.0	0.300	5.0	0.4

$$\dot{r}(t) = \frac{v_{\max}}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_a} t\right) \right) \quad (14)$$

$$\dot{r}(t) = \frac{v_{\max}}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{\pi}{t_a} (t - t_a - t_c) \right) \right) \quad (15)$$

그리고 기준계적  $r$ 과 기준 가속도  $\ddot{r}$ 은 기준속도를 각각 적분 및 미분하여 계산한다.

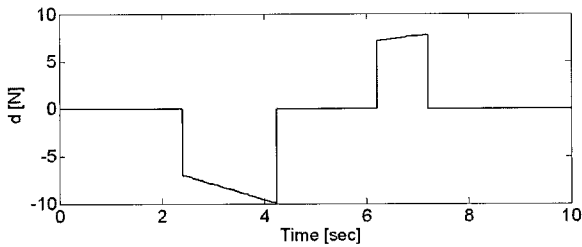


그림 5. 트롤리에 가해지는 외란

## 6. 시뮬레이션

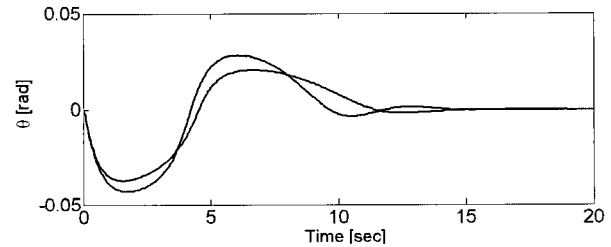
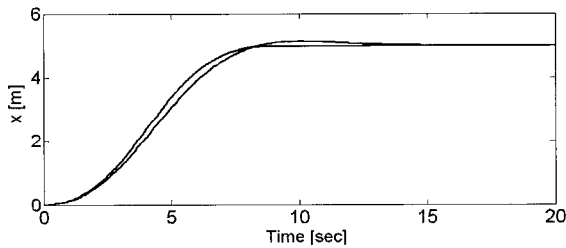
이 장에서는 퍼지기반 적응형 흔들림 억제제어의 성능 검증 을 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 퍼지 관측기의 소속함수 로는 다음과 같이 각각 7개의 Gaus-sian 함수와 2개의 sigmoid 함수를 사용하였다.

$$\mu_{A_j^\alpha}(x_j) = \frac{1}{1 + e^{(-\alpha(x_j - c))}}, \quad \mu_{A_j^\beta}(x_j) = e^{-0.5(x_j - c)^2 / a^2}$$

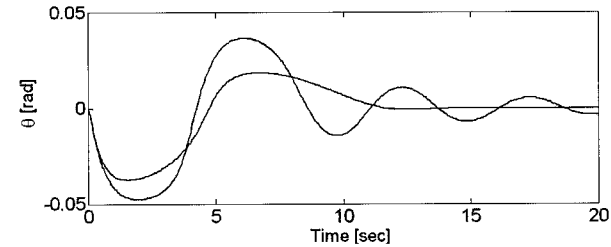
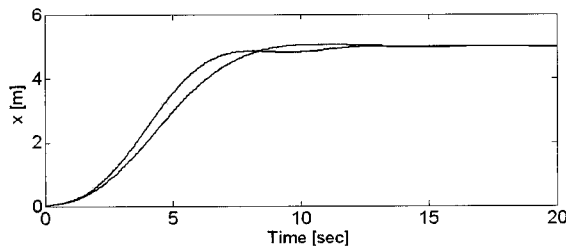
여기서,  $j=1,2$ 이고,  $\alpha=1,9$ ,  $\beta=2,\dots,7$  이고, 그림 4와 같이 배치한다. 각 소속함수들의 파라미터는 표 1과 같다.

시뮬레이션에서 사용한 제어기 및 관측기 설계 파라미터는  $k_e=1$ ,  $k_{\theta\theta}=3.4$ ,  $\sigma=10$ ,  $\gamma=10000$ 이다.

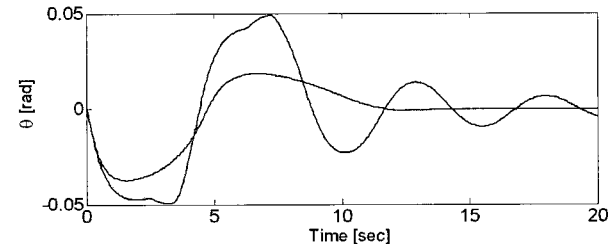
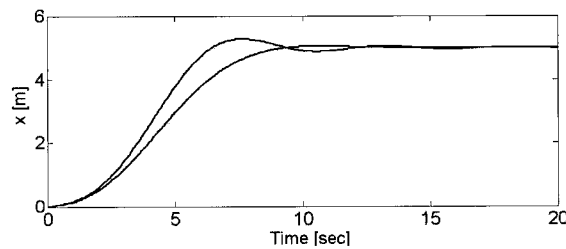
시스템 파라미터의 불확실성 및 외란에 대한 성능을 비교 분석하기 위해, 다음 조건에 제시된 환경에서 시뮬레이션을 수행 하였다.



(a) 시스템 불확실성 및 외란이 없는 경우(조건 1)

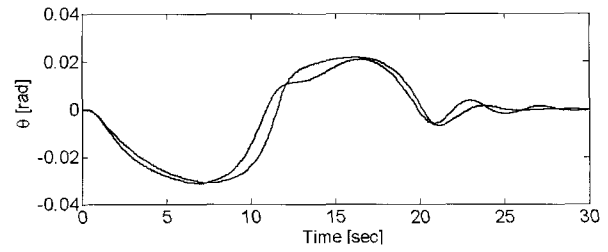
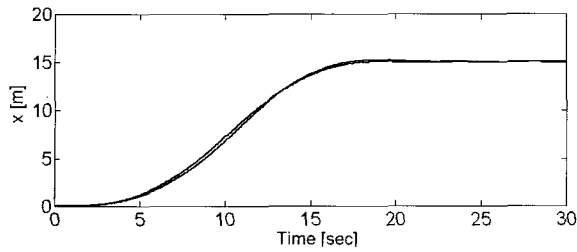


(b) 시스템 불확실성만 있는 경우(조건 2)

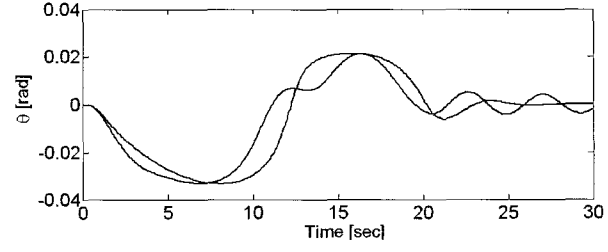
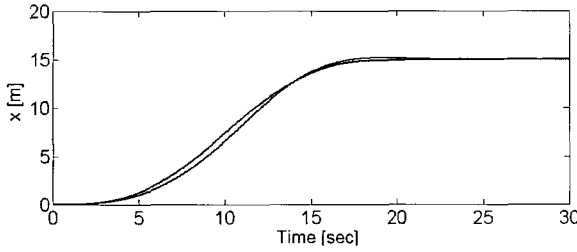


(c) 시스템 불확실성 및 외란 둘 다 있는 경우(조건 3)

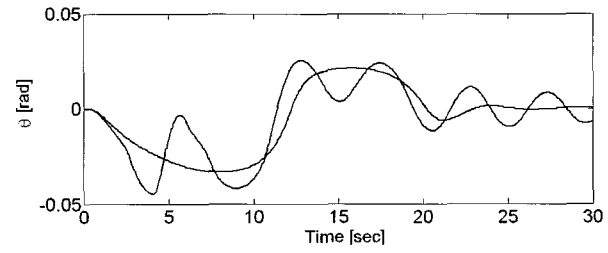
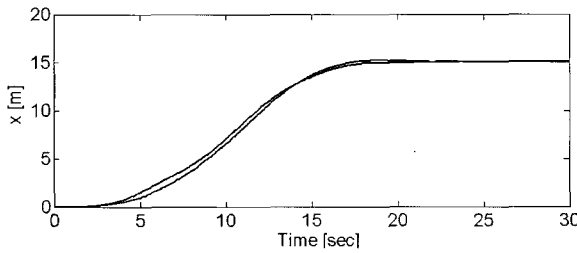
그림 6. 기준계적 없이 목표위치로 이동할 때의 응답(실선-제한한 방법; 점선-기준 방법)



(a) 시스템 불확실성 및 외란이 없는 경우(조건 1)



(b) 시스템 불확실성만 있는 경우(조건 2)



(c) 시스템 불확실성 및 외란 둘 다 있는 경우(조건 3)

그림 7. 짧은 거리에 대한 기준계적 추종응답(실선-제한한 방법; 점선-기준 방법)

**조건 1:** 시스템 파라미터의 불확실성 및 외란이 존재 하지 않아, 실제 파라미터가 공칭 모델의 파라미터와 같다.

**조건 2:** 시스템 파라미터의 불확실성이 존재하여, 실제 파라미터 값은 공칭 모델의 파라미터 값에 대해  $M_{act} = 0.7M$ ,  $m_{act} = 0.7m$ ,  $l_{act} = 1.4l$  와  $d_{vx} = 2.5kg/s$  로 주어진다.

**조건 3:** 시스템 파라미터의 불확실성과 외란이 모두 존재하여, 조건 1의 실제 파라미터와 트롤리에 가해지는 외란  $d$  가 그림 5와 같이 주어진다.

또한 각 조건에 대하여, 제안한 (13)을 사용했을 때의 응답과 기준 제어방법 [17]을 사용했을 때의 응답을 비교한다.

### 6.1 기준계적 없이 목표위치로 이동

그림 6에 기준계적 없이 트롤리가 5m 이동할 때의 응답을 제시하였다. 기준 방법에서는 시스템의 불확실성과 외란이 존재할 경우, 트롤리의 위치 및 흔들림 각도에 대한 응답특성이 악화

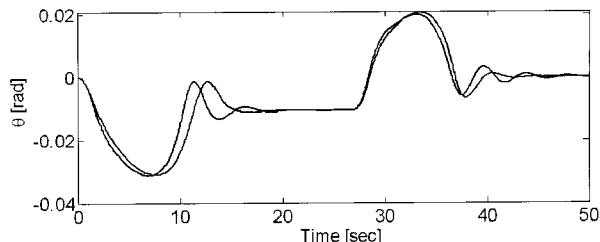
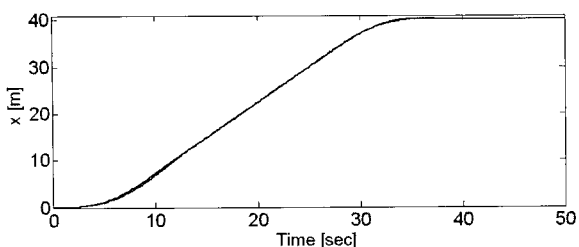
되는 반면, 제안된 방법의 경우에는 거의 일정한 성능을 보인다.

### 6.2 짧은 거리에 대한 기준계적 추종

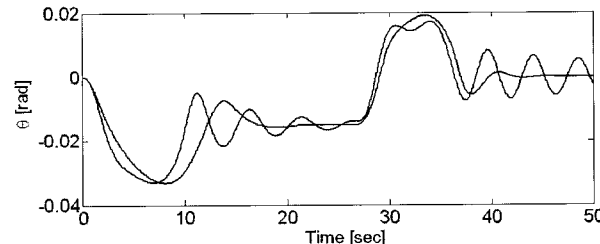
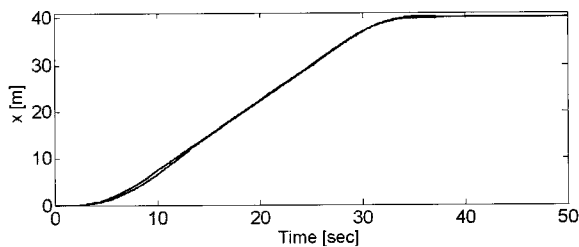
5장에서 설명한 방법으로 트롤리의 위치에 대한 기준계적을 설정하고, 이 궤적에 대한 추종응답을 그림 7에 제시하였다. 15m를 이동하기 위한 기준계적은 (14)와 (15)를 이용하여 설계하였다. 기준 방법은 시스템 불확실성 및 외란이 존재함에 따라 흔들림 억제 성능이 저하되는 반면, 제안한 방법은 궤적추종 성능 및 흔들림 억제 성능에 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

### 6.3 긴 거리에 대한 기준계적 추종

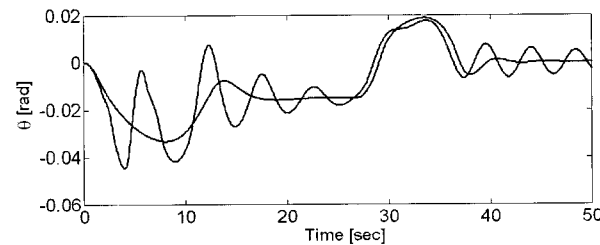
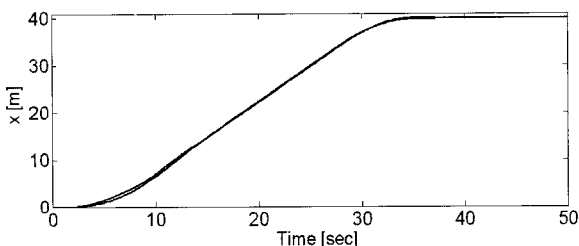
긴 거리의 이동성능을 분석하기 위해, 5장에서 설명한 방법으로 설계된 궤적에 대한 추종응답을 그림 8에 제시하였다. 총 40m를 이동시키기 위해 (14), (15)와  $v_{max} = 1.5m/sec$ ,  $t_a = 10sec$ ,  $t_d = 10sec$ ,  $t_c = 16.7sec$ 를 이용하였고, 긴 거리를 이



(a) 시스템 불확실성 및 외란이 없는 경우(조건 1)



(b) 시스템 불확실성만 있는 경우(조건 2)



(c) 시스템 불확실성 및 외란 둘 다 있는 경우(조건 3)

그림 8. 긴 거리에 대한 기준계적 추종응답(실선-제안한 방법; 점선-기존 방법)

동하므로 가속, 감속구간 외에 등속구간을 두었다. 기존 방법을 사용한 경우, 짧은 거리를 이동할 때 보다 흔들림의 크기는 전반적으로 감소하지만 여전히 시스템 불확실성 및 외란이 존재함에 따라 성능 저하가 발생한다. 반면, 제안된 방법의 경우에는 짧은 거리를 이동할 때와 비슷한 성능을 보인다. 따라서 제안된 방법은 추종하는 궤적의 형태에 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 제안된 방법은 기존 방법에 비해 불확실성 및 외란에 의한 성능저하가 거의 없고, 또한 기존 방법과 달리 기준궤적의 유형에 따른 성능 변화가 적음을 알 수 있다.

## 7. 결론

퍼지 관측기를 이용한 시스템 불확실성 추정 및 보상의 응용으로서, 천정주행 크레인에 대한 적응형 흔들림 억제제어 방법을

소개하였다. 소개한 방법에서는 천정주행 크레인의 흔들림 운동에 대한 불확실성 성분을 퍼지 관측기를 이용하여 추정하고, 시스템 불확실성의 결합성을 이용함으로써 전체 시스템의 불확실성을 모두 보상할 수 있었다. 소개한 방법은 외란 및 시스템 불확실성에 대한 궤적추종 성능 및 흔들림 억제 성능에 있어 기존 방법에 비해 우수함이 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] M. Hojati and S. Gazor, "Hybrid Adaptive Fuzzy Identification and Control of Nonlinear Systems," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 198-210, Apr. 2002.
- [2] Y. Gao and M. Er, "Online Adaptive Fuzzy Neural Identification and Control of a Class of MIMO Nonlinear Systems," *IEEE*

*Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 462-477, Aug. 2003.

[3] E. Kim, "A Fuzzy Disturbance Observer and Its Application to Control," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 77-84, Feb. 2002.

[4] M. El-Hawwary, A. Elshafei, H. M. Emara, H. A. Abdel Fattah, "Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 1135-1144, Nov. 2006.

[5] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, 1997.

[6] H. Lee, "Modeling and Control of a Three-Dimensional Overhead Crane," *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol. 120, no. 4, pp. 471-476, 1998.

[7] 김환성, 김명규, 유삼상, "갠트리 크레인의 입력 보상형 분산제어," 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제 7 권, 제 4 호, pp. 281-287, 2001. 4.

[8] Y. Kim, K. Hong, S. Sul, "Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclination, Observer, and State Feedback," *International Journal of Control, Automation and System*, vol. 2, no. 4, pp. 435-449, 2004.

[9] 김영복, 정용길, " $H^\infty$  Gain Scheduling 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제 7 권, 제 7 호, pp. 559-566, 2001. 7.

[10] H. Lee, Y. Liang, and D. Segura, "A Sliding-Mode Anti-swing Trajectory Control for Overhead Cranes with High-Speed Load Hoisting," *Trans. of ASME*, vol. 128, pp. 842-845, Dec. 2006.

[11] H. Lee, Y. Liang, and D. Segura, "A New Approach for the Anti-swing Control of Overhead Cranes with High-Speed Load Hoisting," *International Journal of Control*, vol. 76, no. 15, pp. 1493-1499, 2003.

[12] 정경채, 홍진철 외, "천정 크레인의 진동 저감을 위한 퍼지 제어기 및 제어기 개발용 시뮬레이터 설계에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 2 권, 제 2 호, pp. 96-101, 1996. 6.

[13] 정승현, 박정일, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어," 제어·자동화·시스템공학회논문지, 제 3 권, 제 5 호, pp. 96-101, 1997. 10.

[14] J. Yi, N. Yubazaki, K. Hirota, "Anti-swing and Positioning Control of Overhead Traveling Crane," *Information Science: an International Journal*, vol. 155, no. 1-2, pp. 19-42, 2003.

[15] H. Lee, "Motion planning for three-dimensional overhead cranes

with high-speed load hoisting," *International Journal of Control*, vol. 78, no. 12, pp. 875-886, Aug., 2005.

[16] C. Chang and G. Huang, "Fuzzy based Variable Structure Control of the 3D Crane System," *Proc. Automatic Control Conference*, pp. 1214-1219, Nov. 2006.

[17] 박한, 좌동경, 홍금식, "컨테이너 크레인의 되먹임 선형화 제어," 한국해양공학회지, 제19권, 제5호, pp 58-64, 2005.

[18] H. Omar and A. Nayfeh, "Anti-swing control of gantry and tower cranes using fuzzy and time-delayed feedback with friction compensation," *Shock and Vibration*, vol. 12, pp. 73-89, 2005.

[19] M. Reyhanoglu, A. van der Schaft, N. H. McClamroch, "Dynamics and Control of a Class of Mechanical Systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, no. 9, pp. 1663-1671, Sep. 1999.

[20] M. Jain, G. Rodriguez, "An Analysis of the Kinematics and Dynamics of Underactuated Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 4, pp. 411-422, Sep. 1993.

[21] M. W. Spong, "Partial Feedback Linearization of Under-actuated Mechanical Systems," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 314-321, 1994.

[22] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 3<sup>rd</sup> edition, 2002.

○ 저자약력



**박문수**

- 1998년 아주대 전자공학부 졸업.
- 2000년 동 대학원 석사.
- 2002년 동 대학원 박사수료.
- 2002년~현재 아주대 정보전자기술연구소 연구원.
- 관심분야 : 시스템 판별, 로봇 및 무인 비행체의

비선형 적응제어.



**홍석교**

- 1971년 서울대학교 전기공학과 졸업.
- 1973년 동 대학원 석사.
- 1981년 동 대학원 박사.
- 1976년~현재 아주대학교 전자공학부 교수.
- 관심분야 : 로봇제어, 컴퓨터 응용, 지능제어.



**좌동경**

- 1995년, 1997년 서울대 제어계측공학과 학사, 석사.
- 2001년 서울대 전기공학부 박사.
- 2005년~현재 아주대 전자공학부 조교수.
- 관심분야 : 비선형 적응제어 이론, 로봇 및 미사일 시스템 응용.