

# 퍼지 관측기와 퍼지 가변구조제어를 이용한 천정주행 크레인의 적응형 흔들림 억제 궤적추종제어

## Adaptive Anti-Sway Trajectory Tracking Control of Overhead Crane using Fuzzy Observer and Fuzzy Variable Structure Control

박문수, 좌동경, 홍석교\*  
(Mun-Soo Park, Dong-kyoung Chwa, and Suk-Kyo Hong)

**Abstract :** Adaptive anti-sway and trajectory tracking control of overhead crane is presented, which utilizes Fuzzy Uncertainty Observer(FUO) and Fuzzy based Variable Structure Control(FVSC). We consider an overhead crane system which can be decoupled into the actuated and unactuated subsystems with its own lumped uncertainty such as parameter uncertainties and external disturbance. First, a new method for anti-sway control using FVSC is proposed to improve the conventional method based on Lyapunov direct method, while a conventional trajectory tracking control law using feedback linearization is directly adopted. Second, FUO is designed to estimate one of the two lumped uncertainties which can compensate both of them, based on the fact that two lumped uncertainties are coupled with each other. Then, an adaptive anti-sway control is proposed by incorporating the proposed FVSC and FUO. Under the condition that the observation error is Uniformly Ultimately Bounded(UUB) within an arbitrarily shrinkable region, the overall closed-loop system is shown to be Globally Uniformly Ultimately Bounded(GUUB). In addition, the Global Asymptotic Stability(GAS) of it is shown under the vanishing disturbance assumption. Finally, the effectiveness of the proposed scheme has been confirmed by numerical simulations.

**Keywords :** adaptive, fuzzy uncertainty observer, fuzzy variable structure control, overhead crane, anti-sway, trajectory tracking

### I. 서론

컨테이너 터미널(container terminal) 등에서 사용되는 크레인 은 운송시스템의 한 부분으로서, 국제 교역 물류량이 날로 증가하는 현대 산업사회에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 크레인 시스템은 최근 제어분야 연구자들이 주목하고 있는 부족구동(underactuated) 시스템의 하나로, 자유도(degree of freedom)에 비해 제어입력의 수가 적기 때문에 시스템의 모든 구성변수(configuration variable: 주행운동, 권상운동, 흔들림운동)를 직접 제어하기 어렵다[1,2]. 또한 구동변수(actuated variable: 주행운동과 권상운동)를 목적에 맞게 제어하더라도 비구동변수(unactuated variable: 흔들림운동)의 안정성은 보장하기 어렵다[3]. 따라서, 크레인 시스템의 효과적인 제어를 위해서는 시스템 구성변수들 간의 동적결합(dynamic coupling)을 고려함으로써 모든 구성변수의 안정성을 보장하는 제어기의 설계가 요구된다[4-6].

천정주행 크레인(overhead crane)은 대표적인 크레인 시스템의 하나로, 크게 트롤리(trolley)의 주행운동 및 권상운동(hoisting)에 해당하는 병진운동(translational motion)과 로프 또는 운반물체의 흔들림(sway)을 나타내는 회전운동(rotational motion)으로 구성되고, 이들은 서로 강하게 결합(coupling)되어 있다[7]. 이런 특징으로 인해 크레인의 하역작업에서 발생하는 가장 큰 문제점은, 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 로프의 끝에 매달린 운반물체의 흔들림이 발생하게 되고, 그 결과 다음

작업을 신속히 수행할 수 없다는 데 있다. 따라서, 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 트롤리의 이동은 신속하게 합과 동시에 이동물체의 흔들림을 최소화 하는 연구가 필요하다. 뿐만 아니라, 크레인은 실외에서 운용되는 시스템으로 강풍 등의 외란에 노출되어 있고, 이동물체의 무게에 따라 시스템의 파라미터가 가변적인 시스템이기 때문에 외란 및 불확실성에 강인한 제어기법의 활용이 필요하다.

최근 들어, 크레인의 흔들림 억제 및 궤적추종제어에 관한 다양한 연구결과가 발표되었는데, 제어방법에 따라 크게 선형제어를 이용한 방법, 비선형제어를 이용한 방법, 그리고 퍼지제어를 이용한 방법으로 나누어 볼 수 있다. 이 중에서 선형제어를 이용한 방법은 흔들림 운동과 주행운동 그리고 권상운동간의 간섭을 무시(또는 선형화)하고 제어기를 설계한 후 이를 추정하여 보상하거나[8,9], 외란(disturbance)으로 취급한 후 이에 영향을 받지 않는 강인한 제어기를 설계하는 방법이 주로 사용된다[10]. 반면, 비선형제어를 이용한 방법에서는 이러한 간섭을 포함한 비선형모델에 대해 제어기를 설계함으로써 보다 넓은 영역에서의 안정성(stability)을 확보할 수 있고[11], 적응제어법칙을 이용하여 모델의 불확실성에 대해 강인한(robust) 제어법칙의 설계가 가능하다[12]. 한편, 퍼지제어를 이용한 방법은 수학적 모델 없이 전문가의 지식만을 활용하여 제어기를 구현하는 방법[13-15]과 주행운동에 대한 선형제어기와 흔들림 억제를 위한 퍼지 보상기(compensator)를 결합하는 방법이 주로 사용된다[24]. 최근에는 선형모델을 이용한 퍼지 기반 가변구조 제어기가 제안되기도 하였으나, 이런 방법들은 시스템의 안정성을 증명하기 어렵거나 주로 선형화에 의한 좁은 동작영역에 대해서만 안정성이 해석된다[18].

이처럼 다양한 제어연구에도 불구하고 현장에서는 아직도 숙련된 조작자(operator)에 의한 수동작업이 효과적으로 사용

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 19., 채택확정 : 2007. 2. 16.

박문수, 좌동경, 홍석교 : 아주대학교 전자공학부

(pmsark@ajou.ac.kr/dkchwa@ajou.ac.kr/skhong@ajou.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 R01-2006-000-11373-0 지원으로 수행되었음.

되고 있다[12]. 능숙한 크레인 조작자는 경험적으로 강풍과 같은 외란이나 이동물체의 무게변화 등을 고려하여 흔들림을 최소화하는 가속, 감속구간, 그리고 등속구간을 따라 크레인의 주행운동을 조작한다. 이는 다시 말해서 흔들림 억제는 주행궤적 추종제어로서 구현되어야 하고, 고속 권상작업은 가감속 구간에서 이루어져야 함을 의미한다[12]. 뿐만 아니라, 크레인 시스템의 자동화에 있어서 외란에 강인한 제어기법이 필수적임을 의미한다.

최근, 퍼지시스템을 이용하여 시스템의 모델 파라미터(model parameter)를 식별(identification)하거나 불확실성을 관측, 보상함으로써 제어기의 성능을 향상시키는 연구가 많이 발표되고 있다. [20]에서는 적응형(adaptive) 퍼지 제어기와 적응형 퍼지 모델 파라미터 식별을 이용하여 비선형 시스템을 제어하였고, [21]에서는 빠른 오차수렴 속도를 갖도록 하기 위해 학습능력을 갖춘 적응형 퍼지 신경망 제어기(adaptive fuzzy neural controller)를 제안하였다.

또한 [22]에서는 퍼지기저함수(FBF: Fuzzy Basis Function)를 이용한 퍼지 외란 관측기(fuzzy disturbance observer)를 설계하였고, [3]에서는 이를 이용하여 시스템 불확실성을 추정하고 보상함으로써 제어시스템의 성능을 향상시켰다. 두 논문에서 이용한 퍼지 외란 관측기는 1차 관측오차 운동방정식을 이용함으로써 시불변 외란 뿐만 아니라 시간에 따라 변화하는 외란까지도 관측이 가능하여 적응 제어기의 설계에 활용 가능하다.

이 논문에서는 시스템 불확실성을 갖는 천정주행 크레인의 흔들림 억제 궤적추종(anti-sway trajectory tracking)을 위한 적응 제어 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 크게 트롤리의 궤적추종 제어와 흔들림 억제제어로 구성된다. 먼저, 궤적추종은 되먹임 선형화(feedback linearization)를 이용한 기존 방법[19]을 그대로 이용하고, 흔들림 억제는 기존 방법[19]에 비해 매끄러운 제어규칙의 천이가 보장되는 퍼지 가변구조제어(FVSC: Fuzzy Variable Structure Control)를 이용한다. 또한, 시스템의 불확실성을 보상하기 위해 퍼지 불확실성 관측기(FUO: Fuzzy Uncertainty Observer)를 설계한다. 시스템 불확실성은 트롤리의 운동방정식과 흔들림 운동방정식에 대해 분리된 형태로 존재하고, 설계된 관측기는 분리된 두 시스템 불확실성 중 하나만 관측하여 전체 시스템 불확실성의 보상이 가능하다. 끝으로, FVSC와 FUO를 결합함으로써 흔들림 억제를 위한 퍼지 가변구조 적응제어법칙(AFVSC: Adaptive Fuzzy Variable Structure Control law)을 제안한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서, 불확실성을 포함한 천정주행 크레인의 운동방정식과 흔들림 억제 궤적추종 제어 문제를 살펴보고, 3장과 4장에서 흔들림 억제를 위한 FVSC와 불확실성 추정을 위한 FUO, 그리고 AFVSC를 설계한다. 시뮬레이션을 위한 기준궤적의 생성방법을 5장에서 소개하고, 6장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 방법과 기존 방법의 성능을 비교함으로써 제안한 방법의 우수성을 검증한다. 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

**II. 운동 방정식 및 문제설정**

이 논문에서는 지표면보다 높게 설치된 궤도를 왕복 주행하는 천정주행 크레인을 다루고자 한다(그림 1).

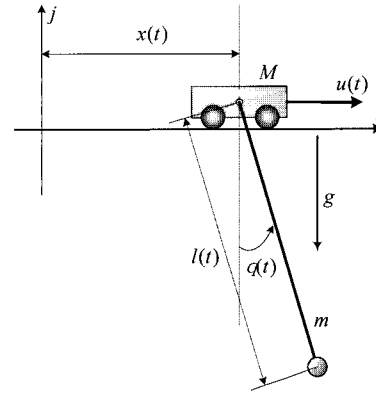


그림 1. 천정주행 크레인의 평면 모델.  
Fig. 1. Plane model of an overhead crane.

그림 1에서 보듯이 크레인에 운반물체가 매달려 있어 트롤리 주행 시 운반물체의 흔들림이 발생한다. 그림에서  $x(t)$ ,  $l(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $u(t)$  는 트롤리의 위치, 권상로프의 길이, 운반물체의 흔들림 각도 및 제어입력을 각각 나타낸다. 그리고 대부분의 경우와 마찬가지로, 권상로프의 경도는 무시하고, 운반물체는 점 질량으로 간주한다. 그러면 천정주행 크레인의 운동방정식은 다음과 같다[7].

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

여기서,  $M$ ,  $m$ ,  $m_l$ ,  $g$  는 각각 트롤리, 운반물체와 권상로프의 무게, 그리고 중력가속도를 나타내고,  $d_{vx}$ ,  $d_{vl}$ ,  $d$  는 각각 트롤리의 주행운동과 권상운동에 관련된 점성 감쇠계수(viscous damping coefficient)와 외부에서 트롤리에 가해지는 외란이다. 그리고 (1)에 대해 다음과 같이 가정한다.

가정 1: 항상  $l(t) = l$  이고  $u_l = 0$  이다.

가정 2:  $|\theta(0)| < \pi/2$  로 제한된다.

이제, 가정 1과 같이 권상운동을 고려하지 않으면 (1)은 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 시스템 모델 파라미터의 불확실성을 고려하여, (2)를  $x$ -운동방정식과  $\theta$ -운동방정식으로 나누어 쓰면

$$\begin{aligned} \ddot{x} = F_x + G_x u + \Omega_x \\ \ddot{\theta} = F_\theta + G_\theta u + \Omega_\theta \end{aligned} \tag{3}$$

이 되고 여기서,

$$G_x = \frac{P}{\det(M)}, F_x = \frac{W}{\det(M)}, G_\theta = \frac{Q}{\det(M)}, F_\theta = \frac{V}{\det(M)},$$

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \Delta G_x u + \Delta F_x + (G_x + \Delta G_x)(d + d_{vx}\dot{x}), \\ \Omega_\theta &= \Delta G_\theta u + \Delta F_\theta + (G_\theta + \Delta G_\theta)(d + d_{v\theta}\dot{\theta}), \\ W &= m^2 l^3 \sin\theta \dot{\theta}^2 + m^2 l^2 g \cos\theta \sin\theta, \\ V &= -m^2 l^2 \sin\theta \cos\theta \dot{\theta}^2 - ml(M+m)g \sin\theta \end{aligned}$$

이고,  $\det(M) = ml^2(M + m(\sin\theta)^2)$ ,  $Q = -ml \cos(\theta)$ ,  $P = ml^2$  이다. 또한,  $\Delta F_x$ ,  $\Delta F_\theta$ ,  $\Delta G_x$ ,  $\Delta G_\theta$  는 각각  $F_x$ ,  $F_\theta$ ,  $G_x$ ,  $G_\theta$  의 불확실성이고,  $\Omega_x$  와  $\Omega_\theta$  는 각각  $x$ -운동방정식과  $\theta$ -운동방정식에 대해 하나로 뭉쳐진(lumped) 불확실성을 나타낸다.

(1), (2) 또는 (3)에서 알 수 있듯이, 천정주행 크레인 은 자유도에 비해 제어입력 개수가 하나 적은 부족구동 시스템이다. 이러한 크레인 시스템에서 제어기의 중요한 목적은 트롤리가 목표위치까지 이동하는 동안, 혹은 이동 후에 운반물체의 흔들림을 최소화 하는 것이라 할 수 있다. 또한 (3)과 같이 시스템의 불확실성 및 외란이 존재할 때, 이러한 요소에 영향 받지 않는 강인한 제어기의 설계가 필요하다.

III. 궤적추종 제어와 흔들림 억제를 위한 FVSC

1. 되먹임 선형화를 이용한 궤적 추종제어[19]

이 절에서는 (4)와 같이 시스템 불확실성  $\Omega_\theta$  와  $\Omega_\theta$  를 고려하지 않은 경우에 대해 [19]에서 제안한 되먹임 선형화를 이용한 궤적추종제어를 간단히 소개한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F_x + G_x u \\ \ddot{\theta} &= F_\theta + G_\theta u \end{aligned} \tag{4}$$

먼저, (4)에 대해 트롤리의 기준궤적에 대한 위치 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e \triangleq x - r \tag{5}$$

여기서,  $r$  은 트롤리의 위치에 대한 기준궤적이고, 다음 가정을 만족한다.

가정 3: 기준궤적  $r$  과 그 1, 2차 미분값  $\dot{r}$ ,  $\ddot{r}$  는 유계(bounded)이다.

이제, 궤적추종오차  $e$  가 영(zero)으로 수렴하도록 하기 위해 다음과 같은 제어법칙을 설계한다.

$$u = \left[ \frac{P}{\det(M)} \right]^{-1} \left( -X_e - \frac{W}{\det(M)} + u_c \right) \tag{6}$$

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 (6)에 의해 (4)는

$$\ddot{x} = \ddot{r} - k_e^2 e - 2k_e \dot{e} + u_c \tag{7}$$

$$\ddot{\theta} = -g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c) \tag{8}$$

이 되고, 여기서  $D = (-Q/P)^2 > 0$ ,  $g_c = g/l$  이다. 또한 (7)로부터 궤적추종오차 운동방정식은

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c \tag{9}$$

이 된다. 즉, 제어기 (6)에 의해 트롤리의 궤적추종 오차방정식은 강제입력  $u_c$  를 갖는 선형 2차 ISS 시스템으로 표현되고 추종오차에 대한 점근적 안정성을 얻을 수 있다[17].

2. 흔들림 억제를 위한 FVSC

2.1 퍼지논리와 근사추론(approximate reasoning)[23]

근사추론은 퍼지논리의 가장 중요한 개념중의 하나 다. 퍼지논리에서는 고전논리(classical logic)와 달리, 추론을 위해 퍼지집합을 이용한다. 이를테면, 퍼지집합  $A$  와  $B$  에 대하여 소속함수  $\mu_A$  와  $\mu_B$  은 퍼지명제 “ $x$  는  $A$  이다”와 퍼지규칙(if-then rule) “만일  $x$  가  $A$  이면  $y$  는  $B$  이다”를 각각 의미한다. 그러면 결론 “ $y$  는  $B$  이다”를 의미하는 소속함수  $\mu_B$  를 구할 수 있다. 예를 들어, 입력 벡터  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$  를 출력  $y \in \mathbf{R}$  로 사상(mapping)하는  $r$  개의 퍼지규칙을 다음과 같이 고려하자.

*Rule<sup>i</sup>*: 만약  $x_1$  이  $A_1^i$  이고, ...,  $x_n$  이  $A_n^i$  이면  $y$  는  $B^i$  이다 (10)

여기서,  $i=1, \dots, r$ ,  $j=1, \dots, n$  이고,  $A_j^i$  는 변수  $x_j$  의 퍼지 집합,  $B^i$  는 출력  $y$  에 대한 싱글톤(singleton) 실수 값이다. 주어진 변수 벡터  $x$  의 실수값(crisp value)  $x^*$  에 대한 퍼지집합  $B^i$  의 소속함수는 퍼지규칙 (10)으로 부터 최소 추론(minimum inference)을 적용하면 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_B(y) = \max_{i=1}^r \min \left( \min_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j), \mu_{B^i}(y) \right), \quad \forall y \tag{11}$$

그리고 역퍼지화(defuzzification) 과정을 통해 (11)로부터  $y$  의 실수 값  $y^*$  를 계산할 수 있다. 퍼지시스템에서 가장 많이 사용되는 역퍼지화 방법인 면적중심법(COA: Center-of-Area)을 (11)에 적용하면

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^r \bar{y}^i \left( \min_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \left( \min_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \tag{12}$$

이고, 여기서  $\mu_{A_j^i}(x_j)$  는 퍼지변수  $x_j$  에 대한 소속함수의 값이고,  $\bar{y}^i$  는 소속함수  $\mu_{B^i}$  가 최대가 되는 실수값을 의미한다.

2.2 FVSC

제어법칙 (6)에 의한 흔들림 운동방정식은 (8)과 같고, 제어법칙  $u_c$  와  $X_e$  에 의해 영향 받는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 논문에서는 트롤리의 궤적추종을 위한 성분  $X_e$  의 영향을 최소화 하면서 효과적으로 흔들림을 억제할 수 있는 FVSC, 즉  $u_c^{FVSC}$  를 제안한다. 먼저, (13)과 같이 두 제어법

칙을 고려하자.

$$\begin{aligned} u_c^{IB} &= (k_{\theta d}\dot{\theta})/\sqrt{D} \\ u_c^{OB} &= |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta})/\sqrt{D} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $X_\theta = 2\dot{\theta} + k_{\theta d}\theta$ ,  $k_{\theta d}$  는 양의 상수이고,  $u_c^{IB}$  는  $X_\theta = 0$  일 때의 제어규칙,  $u_c^{OB}$  는  $X_\theta \neq 0$  일 때의 제어규칙을 각각 의미한다. 그리고 변수  $X_\theta$  가 경계층 안에 있음을 의미하는 퍼지집합  $X_\theta^{IB}$  와 경계층 밖에 있음을 나타내는 퍼지집합  $X_\theta^{OB}$  에 대한 소속함수를 다음과 같이 설정한다.

$$\mu_{X_\theta^{IB}}(X_\theta) = \begin{cases} 1, & X_\theta = 0 \\ \in [0,1), & X_\theta \in [-\phi, 0) \cup (0, \phi] \\ 0, & X_\theta \notin [-\phi, \phi] \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta) = 1 - \mu_{X_\theta^{IB}}(X_\theta) \quad (15)$$

여기서,  $\mu_{X_\theta^{IB}}(X_\theta)$  는 퍼지집합  $X_\theta^{IB}$  의 소속함수이고

$\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta)$  는 퍼지집합  $X_\theta^{OB}$  의 소속함수이다. 그런 다음 (14)와 (15)로 표현되는 두 퍼지집합에 대해 다음과 같이 퍼지규칙을 적용하면

$$\text{Rule}^1: \text{만약 } X_\theta \text{ 가 } X_\theta^{IB} \text{ 이면, } u_c^{FVSC} \text{ 는 } u_c^{IB} \text{ 이다} \quad (16a)$$

$$\text{Rule}^2: \text{만약 } X_\theta \text{ 가 } X_\theta^{OB} \text{ 이면, } u_c^{FVSC} \text{ 는 } u_c^{OB} \text{ 이다} \quad (16b)$$

(10),(11) 및 (12)로부터 FVSC는

$$u_c^{FVSC} = \frac{\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta)u_c^{OB} + \mu_{X_\theta^{IB}}(X_\theta)u_c^{IB}}{\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta) + \mu_{X_\theta^{IB}}(X_\theta)} \quad (17)$$

과 같고, (15)를 이용하여 다시 쓰면

$$u_c^{FVSC} = |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta})/\sqrt{D} \quad (18)$$

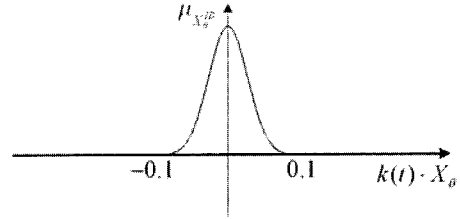
이 된다.  $u_c^{FVSC}$  는 퍼지집합의 소속함수  $\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta)$  와  $\text{sgn}(X_\theta)$  에 의해 가변구조 형태로 나타나며, [19]에서 제안한 방법에 비해 제어법칙의 천이(transition)를 보다 매끄럽게 한다. (17)에 사용된 각 퍼지집합의 소속함수는 그림 2와 같이 정의한다.

그림 2에서  $k(t)$  는 FVSC에 대한 경계층을 나타내는 시변 스케일 상수(scale factor)로 (19)와 같이 정의한다.

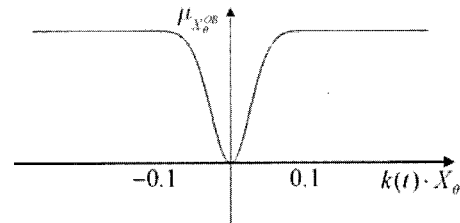
$$k(t) = \begin{cases} 1/(a + be^{ct}), & 0 \leq t \leq T \\ 1/(a + be^{cT}), & t > T \end{cases} \quad (19)$$

여기서,  $a, b, c$  는 양의 상수이고,  $T$  는  $\delta \ll 1$  일 때,  $1/(a + be^{cT}) < \delta$  을 만족하도록 설정한다.

참고 1: 그림 2에서 퍼지 소속함수의 스케일 상수  $k(t)$  는



(a)  $X_\theta^{IB}$  의 소속함수



(b)  $X_\theta^{OB}$  의 소속함수

그림 2. 각 퍼지 집합의 소속함수.

Fig. 2. Member functions for each fuzzy set.

(19)에 의해 시간이 지남에 따라 0으로 수렴하게 되고, 퍼지 집합  $X_\theta^{OB}$  는 충분히 작은  $\delta$  에 대해 {0} 이 되므로

$$\mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta) = \begin{cases} 0, & X_\theta = 0 \\ 1, & X_\theta \neq 0 \end{cases}$$

을 얻는다.

이제 제안한 FVSC에 의한 흔들림 운동방정식의 안정성은 다음과 같이 정리된다.

보조정리 1: (8)로 표현되는 흔들림 운동방정식을 고려하자. 만약 제어법칙  $u_c$  가 (18)과 같으면 (8)은 점근적으로 안정화 가능하다. 즉,  $t \rightarrow \infty$  일 때,  $\theta, \dot{\theta} \rightarrow 0$  이 된다.

증명: 먼저, (8)에 대하여 다음과 같이 미분가능양항정 함수를 선정한다.

$$V_\theta = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})^2 + 2g_c(1 - \cos\theta) \quad (20)$$

그리고  $u_c = u_c^{FVSC}$  일 때,  $\bar{u}_c \triangleq |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta)$  와 (8)을 이용하여 (20)을 시간에 대해 미분하면,

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta &= X_\theta\ddot{\theta} + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + 2g_c \sin\theta\dot{\theta} \\ &= X_\theta(-g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c)) \\ &\quad + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + 2g_c \sin\theta\dot{\theta} \\ &= -k_{\theta d}g_c\theta \sin(\theta) - k_{\theta d}\dot{\theta}^2 - \sqrt{D}X_\theta(-X_e + \bar{u}_c) \\ &= -k_{\theta d}g_c\theta \sin(\theta) - k_{\theta d}\dot{\theta}^2 \\ &\quad - \sqrt{D}(-X_\theta X_e + |X_\theta||X_e| \cdot \mu_{X_\theta^{OB}}(X_\theta)) \end{aligned} \quad (21)$$

이 되고, 참고 1과 부등식  $\sin(\theta) \leq \theta$  (가정 2)을 이용하여 (21)을 다시 쓰면

$$\dot{V}_\theta \leq -k_{\theta d} g_c \theta^2 - k_{\theta \dot{\theta}} \dot{\theta}^2 \leq 0 \tag{22}$$

이 된다. 결국, (20)과 (22)로부터  $\theta, \dot{\theta} \in L_\infty$  임을 알 수 있고, (22)의 양변을 적분하면

$$\int_0^\infty (k_{\theta d} g_c \theta^2 + k_{\theta \dot{\theta}} \dot{\theta}^2) dt \leq V_\theta(0) < \infty$$

이므로  $\theta, \dot{\theta} \in L_2$  이고, 또한 (8)과 (9)로부터  $\ddot{\theta} \in L_\infty$  임을 알 수 있다. 따라서,  $\theta, \dot{\theta} \in L_2 \cap L_\infty$  이고  $\ddot{\theta} \in L_\infty$  이므로 Barbalat's lemma에 의해  $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0$  이 된다. ■

**IV. 불확실성 추정을 위한 FUO 와 AFVSC**

**1. FBF를 이용한 적응형 퍼지시스템**

3장의 2.1절에서 소개한 퍼지논리에 대하여 곱추론 (product inference), 싱글톤 퍼지화기 (singleton fuzzifier)와 중심평균법 (center-average) 역퍼지화를 적용하면, 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 정의된다[23].

$$y(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^r y^i \left( \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \left( \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} = \hat{\phi}^T \xi(\mathbf{x}) \tag{23}$$

여기서,  $\hat{\phi}^T = (y^1, y^2, \dots, y^r)$  는 조절 가능한 퍼지집합의 출력 변수 벡터이고, FBF 벡터  $\xi^T = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^r)$  에서  $\xi^i = (\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j)) / (\sum_{i=1}^r [\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j)])$  이고  $i$ -번째 퍼지규칙에 대한 FBF를 의미한다. 결국, (23)은 FBF 벡터  $\xi(\mathbf{x})$  와 가변 출력 변수 벡터  $\hat{\phi}$  로 표현되는 적응형 퍼지시스템을 나타낸다.

**2. FUO**

이 절에서는 퍼지시스템 (23)을 이용하여 천정주행 크레인의 불확실성을 추정하기 위한 퍼지관측기를 설계한다.

**2.1. 불확실성의 결합성**

천정주행 크레인 (3)은 두 개의 분리된(decoupled) 운동방정식으로 구성되고, 각각 불확실성  $\Omega_x$  와  $\Omega_\theta$  를 포함한다. 그러나 이 둘은 서로 결합되어 있어서 둘 중 하나만 추정하더라도 모두 보상이 가능하고 이런 특성은 다음과 같이 정리된다.

보조정리 2: 불확실성을 포함한 천정주행 크레인 (3)을 고려하자. (3)에서  $x$ -운동방정식과  $\theta$ -운동방정식에 대한 불확실성  $\Omega_x$  와  $\Omega_\theta$  는 서로 결합되어 있고, (24)를 만족한다.

$$\Omega_\theta = -\sqrt{D} \Omega_x - g_c \sin(\theta) \tag{24}$$

증명: 먼저, (3)으로부터  $\Omega_x$  와  $\Omega_\theta$  는 각각 가속도  $\ddot{x}$  과 각가속도  $\ddot{\theta}$  에 대한 불확실성으로 간주할 수 있다. 따라서  $\Omega_x$  와  $\Omega_\theta$  는 (2)의 두 번째 식을 만족해야 하므로  $m\ddot{x}^2 \Omega_\theta + m\ddot{x} \cos(\theta) \Omega_x + mg\ddot{\theta} \sin(\theta) = 0$  이 된다. 결국 (8)을 참고하여 이 식을 정리하면 (24)가 됨을 알 수 있다. ■

**2.2 흔들림 운동방정식에 대한 불확실성 추정**

흔들림 역제를 위한 FVSC (18)은 불확실성을 고려 하지 않은 (4)를 대상으로 설계되었다. 이 절에서는 (3)의 두 번째 식에 대하여 불확실성  $\Omega_\theta$  를 추정하기 위한 FUO를 설계한다 [22]. (3)에서 설명한 것 같이  $\Omega_\theta = \Delta G_\theta u + \Delta F_\theta + (G_\theta + \Delta G_\theta)(d + d_{vx} \dot{x})$  로 흔들림 운동방정식에 대한 모든 불확실성을 포함한다. 이제  $\Omega_\theta$  에 대해 가정 4를 만족하는 추정치  $\hat{\Omega}_\theta$  을 고려하자.

가정 4: (23)에서 입력변수 벡터  $\mathbf{x} = \{\theta, \dot{\theta}\}$  가 콤팩트 집합 (compact set)에 속한다고 하자. 그러면 퍼지관측기의 최적 (optimal)의 출력 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi^* \triangleq \arg \min_{\phi \in M_\phi} \left( \sup_{\mathbf{x} \in M_x} |\Omega_\theta(\mathbf{x}, u) - \hat{\Omega}_\theta(\mathbf{x}, u | \hat{\phi})| \right)$$

여기서, 최적 출력 벡터  $\phi^*$  는 볼록한 영역(convex region)  $M_\phi \triangleq \{\phi | \|\phi\| \leq m_\phi\}$  에 놓여 있다고 가정한다. 그러면  $\hat{\Omega}_\theta$  를 추정하기 위한 퍼지시스템은 영차(zero-order) Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지시스템으로, (23)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\Omega}_\theta \triangleq \hat{\phi}^T \xi(\mathbf{x}) \tag{25}$$

그리고, [22]에서 제안한 것 같이 (26)의 퍼지관측기 운동방정식을 사용한다.

$$\dot{\mu} = -\sigma \mu + p(\theta, \dot{\theta}, \hat{\phi}) \tag{26}$$

여기서,  $p(\theta, \dot{\theta}, \hat{\phi}) \triangleq F_\theta + G_\theta u + \Omega_\theta(\theta, \dot{\theta}, u | \hat{\phi}) + \sigma \theta$  이고, 양의 상수  $\sigma$  는 관측기 설계 파라미터이다. 그러면 조절 가능한 퍼지관측기의 출력 벡터  $\hat{\phi}$  는 조절법칙(update rule) (27)에 의해 조절된다.

$$\dot{\hat{\phi}} = \gamma \zeta \xi(\mathbf{x}) \tag{27}$$

여기서,  $\gamma > 0$  는 설계 파라미터이고  $\zeta \triangleq \hat{\theta} - \mu$  로 정의 한다. 이제, 가정 4와 퍼지시스템의 근사화(approximation) 기능에 의해, 미지(known)의 불확실성  $\Omega_\theta$  는 퍼지관측기의 출력  $\hat{\Omega}_\theta(\mathbf{x}, u | \hat{\phi}^*)$  와 추정오차  $\varepsilon(\mathbf{x}, u)$  을 이용하면 다음과 같이 표현 된다.

$$\Omega_\theta = \hat{\Omega}_\theta(\mathbf{x}, u | \hat{\phi}^*) + \varepsilon(\mathbf{x}, u) \tag{28}$$

여기서,  $|\varepsilon(\mathbf{x}, u)| \leq \bar{\varepsilon}$  를 만족한다. 따라서, 충분히 작은 값  $\bar{\varepsilon}$  에 대하여  $\zeta \rightarrow 0$  일 때 즉,  $\mu \rightarrow \hat{\theta}$  일 때,  $\hat{\Omega}_\theta \rightarrow \Omega_\theta - \bar{\varepsilon}$  이 된다[22]. 또한  $\bar{\varepsilon}$  는 퍼지관측기의 구성에 따라(퍼지집합의 수가 증가함에 따라)  $\bar{\varepsilon} \rightarrow 0$  이 가능하고 결국  $\hat{\Omega}_\theta \rightarrow \Omega_\theta$  이 된다[23].

**3. AFVSC**

이제 (3)의 두 번째 식에 대하여 (29)와 같이 퍼지 관측기 (25)를 이용한 AFVSC'법칙을 고려하자.

$$u_c^{AFVSC} = |X_e| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta}^{OB}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta} + \hat{\Omega}_\theta + g_c \sin(\theta)) / \sqrt{D} \quad (29)$$

여기서,  $\hat{\Omega}_\theta$  는  $\bar{\varepsilon} \approx 0$  에 대해 (28)을 만족한다고 가정 한다. 그러면 제어법칙 (29)에 의한 흔들림 운동방정식의 안정성은 다음과 같이 정리된다.

보조정리 3: (3)의 두 번째 식으로 표현되는 흔들림 운동방정식을 고려하자. 만약  $\bar{\varepsilon} \rightarrow 0$  일 때, 제어법칙  $u$  가 (6)과 같고 제어법칙  $u_c$  가 (29)를 만족하면 보조 정리 1의 결과로부터 흔들림 운동방정식은 점근적으로 안정하다. 즉,  $\lim_{t \rightarrow 0} \theta = 0$  이 된다.

증명: 먼저, (3)의 두 번째 식에 대하여 제어법칙 (6)을 적용하면 흔들림 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c) + \Omega_\theta \quad (30)$$

또한, (18)과 (29)로부터

$$u_c^{AFVSC} = u_c^{FVSC} + (\hat{\Omega}_\theta + g_c \sin(\theta)) / \sqrt{D}$$

임을 알 수 있고,  $u_c = u_c^{AFVSC}$  일 때, 이를 (30)에 적용 하면

$$\ddot{\theta} = -2g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c^{FVSC}) + \Omega_\theta - \hat{\Omega}_\theta \quad (31)$$

이 되고, (28)을 (31)에 적용하면

$$\ddot{\theta} = -2g_c \sin(\theta) - \sqrt{D}(-X_e + u_c^{FVSC}) + \bar{\varepsilon} \quad (32)$$

이 된다. 만약  $\bar{\varepsilon} \rightarrow 0$  이면 (32)는 보조정리 1에 의해 점근적으로 안정함을 알 수 있다. ■

참고 2: FVSC (18)과 비교했을 때, AFVSC (29)에  $-g_c \sin(\theta)$  항이 추가됨으로써, (21)과 (22)로부터  $\theta$  의 수렴속도가 증가하여 흔들림 억제 효과가 향상됨을 알 수 있다.

결론적으로, 보조정리 1, 2, 3으로부터 이 논문의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

정리: (3)의 천정주행 크레인을 고려하자. 만약, (6)과 (29)로 표현되는 제어법칙이 보조정리 1, 2, 3의 조건을 모두 만족하면 (3)에 대한 트롤리의 궤적추종 오차 방정식과 흔들림 운동방정식은 점근적으로 안정하다.

증명: 먼저, 보조정리 3으로부터 (3)의 흔들림 운동방정식은 점근적으로 안정함이 증명되고, (29)로부터 제어 법칙  $u_c^{AFVSC}$  는 영으로 수렴함을 알 수 있다. 이제 (3)의 트롤리 주행 운동방정식에 대해 제어법칙 (6)을 적용하면 다음과 같다.

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c + \Omega_x \quad (33)$$

그리고  $u_c = u_c^{AFVSC}$  일 때,

$$u_c^{AFVSC} = u_c^{FVSC} + (\hat{\Omega}_\theta + g_c \sin(\theta)) / \sqrt{D}$$

를 이용하여 (33)을 다시 쓰면

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c^{FVSC} + \Omega_x + (\hat{\Omega}_\theta + g_c \sin(\theta)) / \sqrt{D} \quad (34)$$

이 된다.  $\hat{\Omega}_\theta \rightarrow \Omega_\theta$  일 때 (24)를 이용하면

$$\hat{\Omega}_\theta = -\sqrt{D}\hat{\Omega}_x - g_c \sin(\theta) \quad (35)$$

이 성립하고, (35)를 (34)에 적용하면

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c^{FVSC} + \Omega_x - \hat{\Omega}_x \quad (36)$$

또는,

$$\ddot{e} + 2k_e \dot{e} + k_e^2 e = u_c^{FVSC} + \bar{\varepsilon} \quad (37)$$

이 된다. 즉, 보조정리 3의 결과로부터  $u_c^{FVSC} \rightarrow 0$  임을 알 수 있고, 결국,  $\bar{\varepsilon} \rightarrow 0$  이면 트롤리의 궤적추종 오차방정식 (37)은 점근적으로 안정하다[19]. ■

### V. 기준 궤적

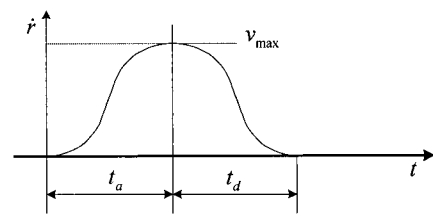
이 논문에서는 트롤리의 주행에 대한 기준궤적을 [16]과 같은 방법으로 생성한다.

먼저 그림 3과 같이 매끄러운 속도 프로파일을 트롤리의 기준속도궤적으로 선정한다.

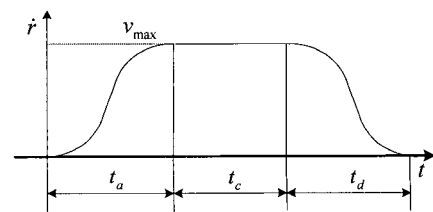
그림 3에서  $v_{max}$  는 최대속도 값이고,  $t_a$ ,  $t_c$ ,  $t_d$  는 각각 가속구간, 등속구간, 및 감속구간을 나타낸다. 가속구간 ( $0 \leq t \leq t_a$ ) 과 감속구간( $t_a + t_c \leq t \leq t_d$ )의 속도는 각각 (38)과 (39)로 정의된다.

$$\dot{r}(t) = \frac{v_{max}}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_a} t\right) \right) \quad (38)$$

$$\dot{r}(t) = \frac{v_{max}}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{\pi}{t_a} (t - t_a - t_c)\right) \right) \quad (39)$$



(a) 짧은 거리 이동을 위한 속도 프로파일



(b) 긴 거리 이동을 위한 속도 프로파일

그림 3. 기준궤적 생성을 위한 속도 프로파일.  
Fig. 3. Velocity profile for reference trajectories.

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

**VI. 시뮬레이션**

제안한 AFVSC의 성능을 검증하기 위해 불확실성을 포함한 천정주행 크레인의 운동방정식 (3)에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용된 공칭(nominal) 모델 파라미터는  $M = 36.2kg$ ,  $m = 17.3kg$ ,  $l = 1.5m$  이다[12]. FOU의 전제부(premise part)를 구성하기 위해, 입력변수  $x_1 = \theta$  와  $x_2 = \dot{\theta}$  에 대해 다음과 같이 각각 7개의 Gaussian 함수와 2개의 sigmoid 함수를 소속함수로 사용하였다.

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

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  $k_e = 1$ ,  $k_d\theta = 3.4$ ,  $\sigma = 10$ ,  $\gamma = 10000$  이다.

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

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

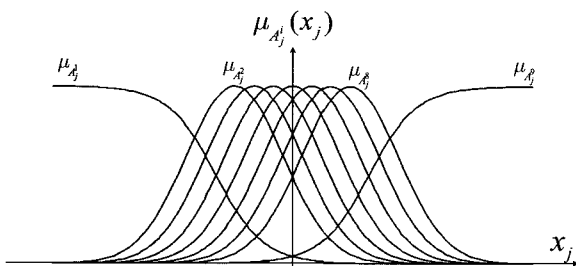


그림 4. FOU의 입력에 대한 소속함수.  
Fig. 4. Membership functions for the input of FOU.

표 1. 소속함수의 파라미터.

Table 1. Parameters of membership functions.

i	$\mu_{A_j^i}(\theta)$		$\mu_{A_j^i}(\dot{\theta})$	
	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

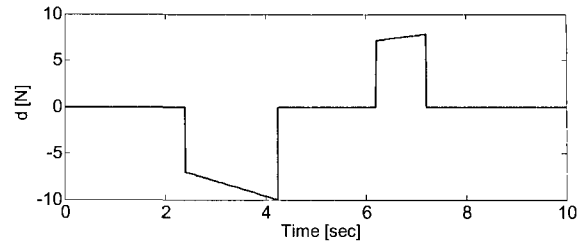


그림 5. 트롤리에 가해지는 외란.  
Fig. 5. Disturbance input to trolley.

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 AFVSC를 사용했을 때의 응답과 기존 제어방법[19]을 사용했을 때의 응답을 비교한다.

1. 기준궤적 없이 목표위치로 이동

그림 6에 기준궤적 없이 트롤리가 5m 이동할 때의 응답을 제시하였다. 참고 2에서 설명한 것 같이, 시스템 불확실성이 나 외란이 없는 경우에도 기존 방법보다 제안된 방법을 사용했을 때 흔들림 억제 성능이 개선됨을 확인 할 수 있다(그림 6(a)). 뿐만아니라, 기존 방법에서는 시스템의 불확실성과 외란이 존재할 경우, 트롤리의 위치 및 흔들림 각도에 대한 응답 특성이 악화되는 반면, 제안된 방법의 경우에는 거의 일정한 성능을 보인다.

2. 짧은 거리에 대한 기준궤적 추종

5장에서 설명된 방법으로 트롤리의 위치에 대한 기준궤적을 설정하고, 이 궤적에 대한 추종응답을 그림 7에 제시하였다. 15m를 이동하기 위한 기준궤적은 (38)과 (39)를 이용하여 설계하였고, 그 파라미터는  $v_{max} = 1.5 m/sec$ ,  $t_a = 10sec$ ,  $t_d = 10sec$ ,  $t_c = 0sec$  와 같다. 시스템 불확실성과 외란이 없는 경우(그림 7(a)), 트롤리의 궤적추종 성능에서는 제안한 방법과 기존 방법의 차이가 적으나, 흔들림 억제 성능은 제안한 방법이 우수함을 분명히 알 수 있다. 또한, 기존 방법은 시스템 불확실성 및 외란이 존재함에 따라 흔들림 억제 성능이 저하되는 반면, 제안한 방법은 궤적추종 성능 및 흔들림 억제 성능에 변화가 거의 없음을 보인다.

3. 긴 거리에 대한 기준궤적 추종

긴 거리의 이동성능을 분석하기 위해, 5장에서 설명한 방법으로 설계된 궤적에 대한 추종응답을 그림 8에 제시하였다. 총 40m를 이동시키기 위해 (38), (39)와  $v_{max} = 1.5m/sec$ ,  $t_a = 10sec$ ,  $t_d = 10sec$ ,  $t_c = 16.7sec$  를 이용하였고, 긴 거리를 이동하므로 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 받

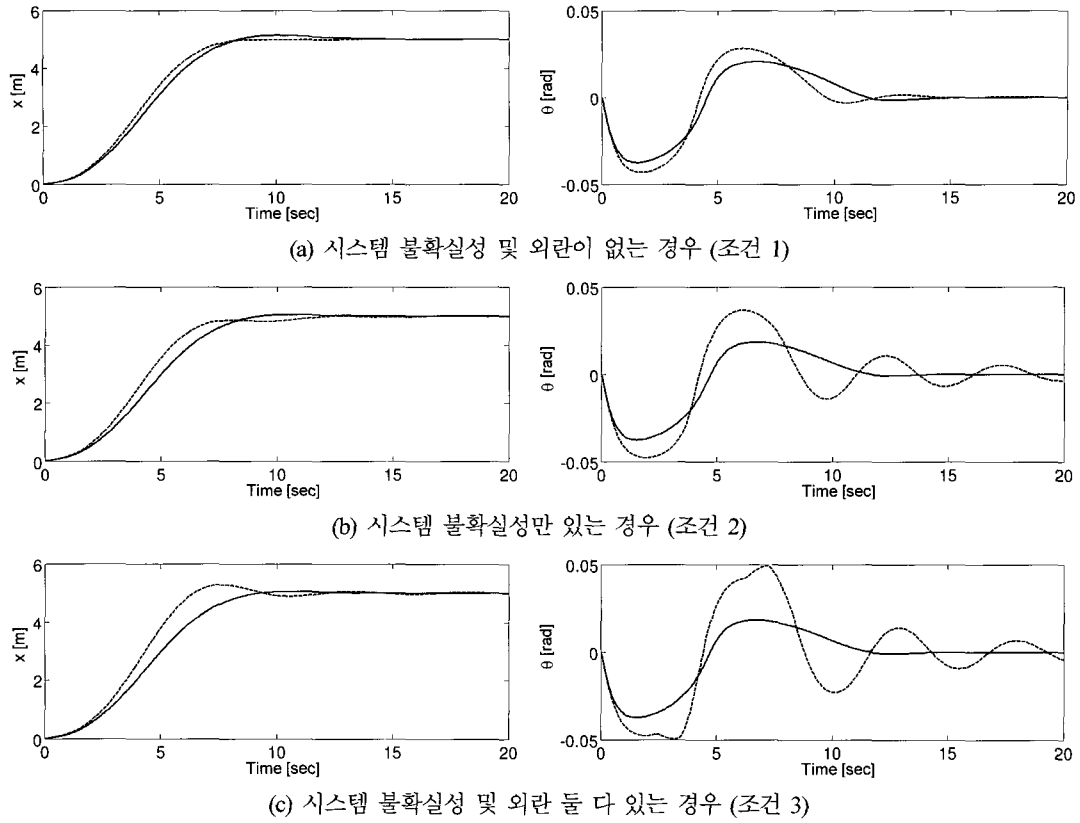


그림 6. 기준궤적 없이 목표위치로 이동할 때의 응답(실선-제안한 방법; 점선-기존 방법).

Fig. 6. Response of moving to target position without reference trajectory(solid-proposed; dotted-conventional).

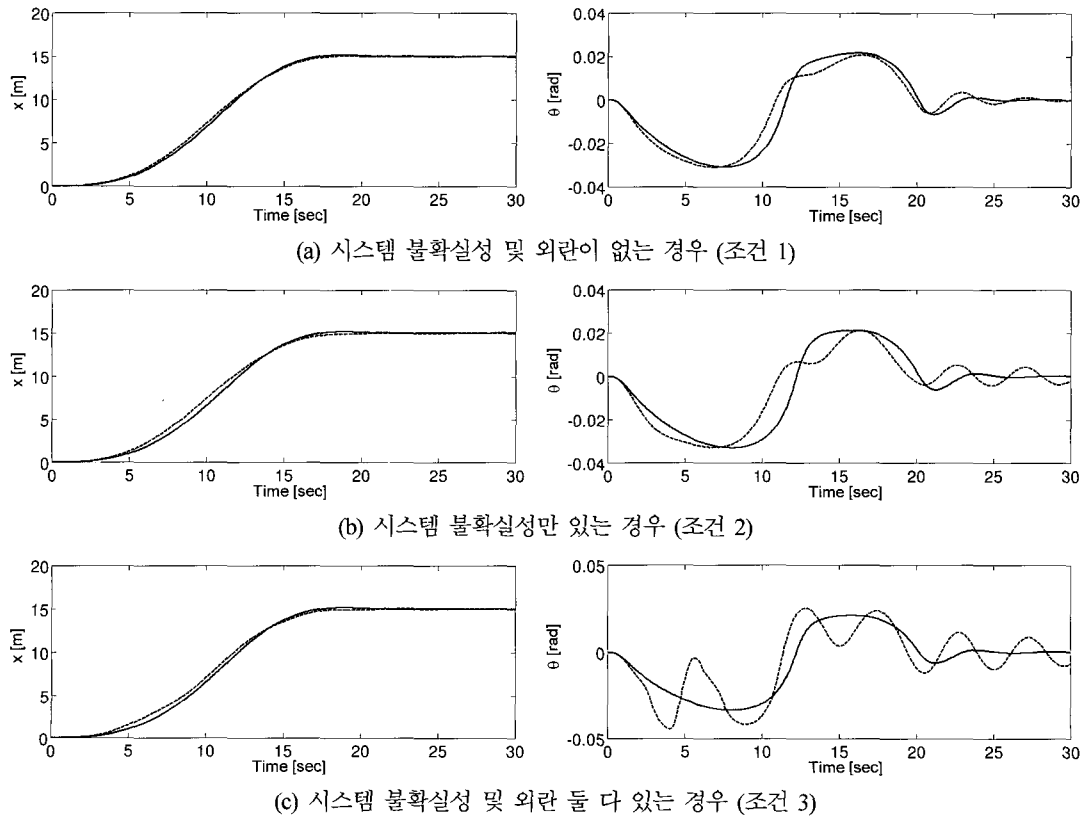


그림 7. 짧은 거리에 대한 기준궤적 추종응답(실선-제안한 방법; 점선-기존 방법).

Fig. 7. Response of trajectory tracking for short distance traveling(solid-proposed; dotted-conventional).



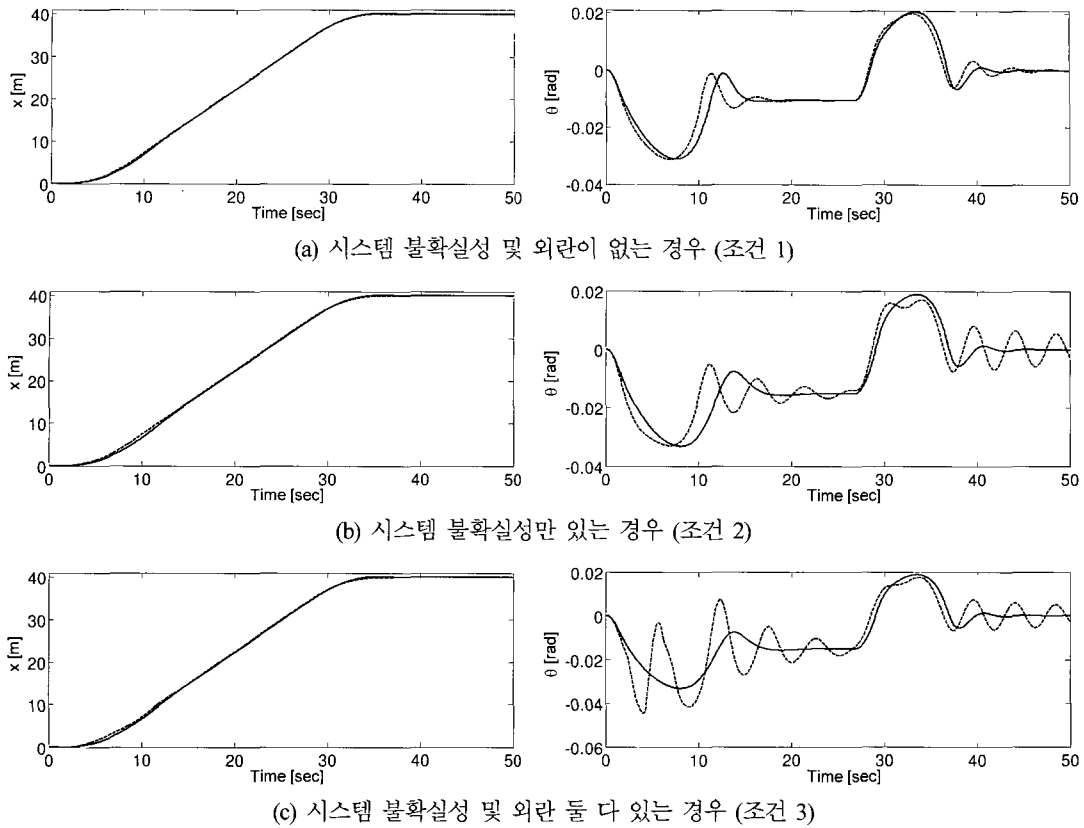


그림 8. 긴 거리에 대한 기준궤적 추종응답(실선-제안한 방법; 점선-기존 방법).  
 Fig. 8. Response of trajectory tracking for long distance traveling(solid-proposed; dotted-conventional).

는다는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 제안된 방법의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 제안된 방법은 시스템 불확실성 및 외란이 없는 경우에도 기존 방법보다 흔들림 억제 성능이 좋다(그림 6(a), 7(a), 8(a)).
- 2) 제안된 방법은 기존 방법에 비해 불확실성 및 외란에 의한 성능저하가 거의 없다.
- 3) 제안된 방법은 기존 방법과 달리 기준궤적의 유형에 따른 성능변화가 거의 없다.

**VI. 결론**

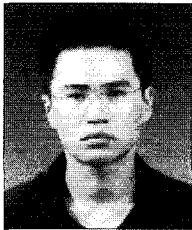
이 논문에서는 천정주행 크레인의 흔들림 억제 궤적추종을 위해 FUO와 FVSC를 이용한 적응제어방법(AFVSC)을 제안하였다. 먼저, 매끄러운 천이구조를 갖는 FVSC를 이용하여 기존 흔들림 억제 제어의 성능을 개선하였다.

또한, 천정주행 크레인의 불확실성을 트롤리의 주행에 대한 성분과 흔들림 운동에 대한 성분으로 나누어 고려하였고, 흔들림 운동에 대한 성분을 FUO를 설계하여 추정함으로써 전체 시스템의 불확실성을 모두 보상할 수 있음을 보였다. 그리고 이러한 특성을 바탕으로 FUO와 FVSC를 이용한 AFVSC를 제안하였고, 제안된 방법은 외란 및 시스템 불확실성에 대한 궤적추종 성능 및 흔들림 억제 성능이 기존 방법에 비해 우수함을 해석적으로 증명하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

**참고문헌**

- [1] 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.
- [2] M. Jain and 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.
- [3] M. E. Hawwary, A. Elshafei, H. M. Emara, and 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.
- [4] R. Lozano, I. Fantoni, and D. J. Block, "Stabilization of the inverted pendulum around its homoclinic orbit," *Systems & Control Letters*, vol. 40, pp. 197-204, 2000.
- [5] M. W. Spong, "Partial feedback linearization of underactuated mechanical systems," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 314-321, 1994.
- [6] I. Fantoni and R. Lozano, *Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems*, Springer, 2002.
- [7] 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.
- [8] 김환성, 김명규, 유삼상, "갠트리 크레인의 입력보상형 분산제어," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 7 권, 제 4 호, pp. 281-287, 2001. 4.
- [9] Y. Kim, K. Hong, and S. Sul, "Anti-sway control of container

- cranes: Inclinometer, observer, and state feedback," *International Journal of Control, Automation and System*, vol. 2, no. 4, pp. 435-449, 2004.
- [10] 김영복, 정용길, " $H^\infty$  gain scheduling 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 7 권, 제 7 호, pp. 559-566, 2001. 7.
- [11] H. Lee, Y. Liang, and D. Segura, "A sliding-mode antishwing trajectory control for overhead cranes with high-speed load hoisting," *Trans. of ASME*, vol. 128, pp. 842-845, Dec. 2006.
- [12] 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.
- [13] 정경채, 홍진철 외, "천정 크레인의 진동 저감을 위한 퍼지제어기 및 제어기 개발용 시뮬레이터 설계에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 2 권, 제 2 호, pp. 96-101, 1996. 6.
- [14] 정승현, 박정일, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3 권, 제 5 호, pp. 96-101, 1997. 10.
- [15] J. Yi, N. Yubazaki, and 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.
- [16] 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.
- [17] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 3<sup>rd</sup> edition, 2002.
- [18] C. Chang and G. Huang, "Fuzzy based variable structure control of the 3D crane system," *Proc. Automatic Control Conference*, pp. 1214-1219, Nov. 2006.
- [19] 박한, 좌동경, 홍금식, "컨테이너 크레인의 되먹임 선형화 제어," 한국해양공학회지, 제 19 권, 제 5 호, pp 58-64, 2005.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, 1997.
- [24] 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.



박문수

1998 아주대 전자공학부 졸업. 2000년 동 대학원 석사. 2002년 동 대학원 박사수료. 2002년~현재 아주대 정보전자기술연구소 연구원. 관심분야는 시스템 판별, 로봇 및 무인 비행체의 비선형 적응제어.



좌동경

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

### 홍석교

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 11 권 제 10 호 참조.