

고속 권상운동과 흔들림억제 궤적추종을 위한 천정주행 크레인의 퍼지 비선형 적응제어

Fuzzy Nonlinear Adaptive Control of Overhead Cranes for Anti-Sway Trajectory Tracking and High-Speed Hoisting Motion

박문수, 좌동경, 홍석교

Mun-Soo Park, Dongkyoung Chwa, and Suk-Kyo Hong

아주대학교 전자공학과

요 약

천정주행 크레인의 고속 권상작업 및 흔들림 억제 궤적추종을 위한 비선형 적응제어 방법을 제시한다. 천정주행 크레인의 흔들림 운동은 트롤리의 가속도, 권상로프의 길이 및 권상속도와 강하게 결합되어 있다. 이는 비간섭 제어 기반의 흔들림 억제 궤적추종 제어법칙을 설계하는데 있어 장애요인으로 작용한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 트롤리의 가속도와 권상속도의 영향을 최소화하는 방법으로 불확실성이 존재하는 경우에도 흔들림 운동의 궁극적 균일 유계성을 보장하는 퍼지 비선형 적응형 흔들림 억제 궤적추종제어법칙을 제안한다. 특히, 제안한 방법은 파라미터 변화, 외란 등을 포함한 시스템 불확실성을 퍼지 불확실성 관측기를 이용하여 보상한다. 따라서, 퍼지 관측기의 근사화 오차가 영으로 수렴할 때 추종오차 및 흔들림 각도의 궁극적 한계치는 영으로 감소한다. 끝으로, 제안한 방법의 성능검증을 위한 모의실험 결과를 제시한다.

키워드 : 비선형 적응제어, 퍼지 관측기, 천정주행 크레인, 흔들림 억제 궤적추종

Abstract

Nonlinear adaptive control of overhead cranes is investigated for anti-sway trajectory tracking with high-speed hoisting motion. The sway dynamics of two dimensional underactuated overhead cranes is heavily coupled with the trolley acceleration, hoisting rope length, and the hoisting velocity, which is an obstacle in the design of decoupling control based anti-sway trajectory tracking control law. To cope with this obstacle, we propose a fuzzy nonlinear adaptive anti-sway trajectory tracking control law guaranteeing the uniform ultimate boundedness of the sway dynamics even in the presence of uncertainties in such a way that it cancels the effect of the trolley acceleration and hoisting velocity on the sway dynamics. In particular, system uncertainties, including system parameter uncertainty, unmodelled dynamics, and external disturbances, are compensated in an adaptive manner by utilizing fuzzy uncertainty observers. Accordingly, the ultimate bound of the tracking errors and the sway angle decrease to zero when the fuzzy approximation errors decrease to zero. Finally, numerical simulations are performed to confirm the effectiveness of the proposed scheme.

Key Words : Nonlinear adaptive control, Fuzzy observer, Overhead cranes, Anti-sway trajectory tracking.

1. 서 론

트롤리 주행 중 또는 목표위치 도달 시 발생하는 운반물체의 흔들림은 천정주행 크레인(overhead crane)을 이용한 하역작업의 신속, 정확한 운용에 있어 가장 큰 문제점으로 인식돼 왔고, 이러한 운반물체의 흔들림은 주로 트롤리의 주행 가속도와 권상로프의 길이 및 권상속도에 직접적인 영향을 받

는다[1,2]. 따라서, 천정주행 크레인의 자동화를 위해서는 트롤리의 이동 및 권상작업은 신속하게 함과 동시에 운반물체의 흔들림을 최소화하는 제어법칙의 설계가 필요하다. 뿐만 아니라, 실외에서 운용될 경우 크레인은 강풍등의 외란에 노출되기 쉽고, 이동물체의 무게에 따라 시스템의 파라미터가 가변적이기 때문에 외란 및 불확실성에 강인한 제어기법의 활용이 요구된다.

현재까지 크레인의 흔들림 억제 및 궤적추종제어에 관한 다양한 연구결과가 발표되었는데, 제어방법에 따라 크게 선형 제어를 이용한 방법[3-5], 비선형제어를 이용한 방법[6,7], 그리고 퍼지제어를 이용한 방법[8-10,14,16] 등이 있다. 그러나, 이처럼 다양한 연구결과에도 불구하고 현장에서는 아직

접수일자 : 2007년 7월 9일

완료일자 : 2007년 10월 5일

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

도 숙련된 조작자에 의한 수동작업이 주로 이루어 지고 있다. 숙련된 조작자는 경험적으로 강풍과 같은 외란이나 운반물체의 무게변화 등을 고려하여 가속, 감속, 그리고 등속구간을 따라 흔들림을 최소화하도록 크레인의 주행운동 및 권상운동을 조작한다[11]. 최근에 권상운동이 없는 천정주행 크레인에 대해 시스템 불확실성을 고려한 적응형 흔들림 억제 궤적추종 제어 방법이 연구되었는데, 운반물체의 흔들림에 대한 트롤리 가속도의 영향을 최소화하는 흔들림 억제 제어법칙을 제안하였다[12]. 그러나, 이 방법은 크레인의 권상운동을 고려하지 않아 일반적으로 고속 권상작업을 필요로 하는 경우에는 성능이 저하된다. 한편, [13]에서는 권상운동을 고려하여 크레인의 비선형 제어를 설계하였으나, 시스템의 불확실성을 고려하지 않았다.

이 논문에서는 [12]에서 제안한 방법을 확장하여 고속 권상운동을 갖는 천정주행 크레인의 흔들림 억제 궤적추종 제어방법을 제안한다. 제안하는 방법은 크게 트롤리의 주행운동 및 권상운동에 대한 궤적추종 제어법칙, 흔들림 억제 제어법칙, 그리고 시스템 불확실성 보상을 위한 퍼지 불확실성 관측기(FUO: Fuzzy Uncertainty Observer)로 구성된다. 먼저, 트롤리 주행운동과 권상운동에 대한 궤적추종 제어법칙을 피드백 선형화에 기초하여 설계하고, 트롤리의 주행 가속도, 권상로프의 길이 및 권상속도에 의한 운반물체의 흔들림을 최소화하는 흔들림 억제 제어법칙은 시변 경계층을 갖는 퍼지 가변구조제어(FVSC: Fuzzy Variable Structure Control) 방법을 이용한다. 또한, 흔들림 운동과 권상운동에 대한 FUO를 각각 설계하여 전체 시스템의 불확실성을 보상한다. 끝으로, 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 성능을 검증한다.

2. 배경 및 문제설정

2.1 퍼지시스템[16]

퍼지시스템은 일반적으로 퍼지화기, 퍼지규칙기반(fuzzy if-then rule base), 퍼지추론(fuzzy inference) 및 역퍼지화기를 포함하고, 이들의 조합에 따라 다양한 형태로 구현 가능하다. 먼저, 퍼지추론은 퍼지시스템의 가장 중요한 부분중의 하나로서, 퍼지규칙기반의 각 규칙과 조합된 추론규칙에 따라 입력벡터 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$ 를 출력변수 $y \in \mathbf{R}$ 로 사상(mapping)하는 기능을 수행한다. 예를 들면, r 개의 퍼지규칙 중에서 i 번째 퍼지규칙이 다음과 같이 주어진다고 가정하자.

$$\text{Rule}^i: \text{만약 } x_1 \text{ 이 } A_1^i \text{ 이고, } \dots, x_n \text{ 이 } A_n^i \text{ 이면 } y \text{ 는 } B^i \text{ 이다.} \quad (1)$$

여기서, A_j^i 와 B^i 는 각각 입력변수 x_j 와 출력변수 y 의 퍼지집합을 의미하고, $i = 1, 2, \dots, r$, $j = 1, 2, \dots, n$ 이다. 그러면, 중심평균(center-average) 역퍼지화기, 최소추론(minimum inference), 싱글톤(singleton) 퍼지화기를 사용하는 퍼지시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$y^a(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^r \bar{y}^i \left(\min_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \left(\min_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \quad (2)$$

여기서, $\mu_{A_j^i}(x_j)$ 는 퍼지집합 A_j^i 에 대한 소속함수의 값, \bar{y}^i 는 i 번째 퍼지집합의 중심이다. 또한, 주어진 입력벡터 \mathbf{x} 의 실수 값 \mathbf{x}^* 에 대한 퍼지집합 B^i 의 소속함수는 퍼지규칙 (1)로부터 최소추론을 적용하면 (1)과 같이 구할 수 있다.

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

한편, 출력변수 y 가 퍼지집합 B^i 대신 싱글톤 실수 값 y^i 를 갖는다고 가정하면, 중심평균 역퍼지화기, 싱글톤 퍼지화기 및 곱추론(product inference)을 사용하는 퍼지시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$y^b(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^r y^i \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} = \hat{\phi}^T \cdot \xi(\mathbf{x}) \quad (4)$$

여기서, $\hat{\phi}^T = (y^1, y^2, \dots, y^r)$ 는 조절 가능한 퍼지집합의 출력변수 벡터이고, $\xi^T = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^r)$ 는 퍼지기저함수 벡터(FBF: Fuzzy Basis Function)로 각 원소는

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

이고 i -번째 퍼지규칙에 대한 FBF 를 의미한다. 이 논문에서는 제어법칙의 천이를 매끄럽게 하기 위해 퍼지 시스템 (2) 를 이용하여 퍼지 가변구조제어규칙을 설계하고, (4)의 범용 근사화(universal approximation) 특성을 이용하여 퍼지 불확실성 관측기를 설계한다.

2.2 천정주행 크레인

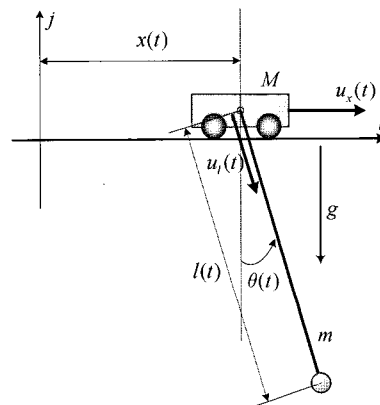


그림 1. 천정주행 크레인의 평면 모델
Fig. 1. Plane model of an overhead crane.

그림 1 은 1 차원 궤도를 왕복 주행하는 천정주행 크레인을 나타낸다. 그림에서 $x(t)$, $l(t)$, $\theta(t)$ 및 $u_x(t)$ 와 $u_i(t)$ 은 각각 트롤리의 위치, 권상로프의 길이, 운반물체의 흔들림

각도 및 트롤리와 호이스트(hoist)의 제어입력을 나타낸다. 일반적으로, 물체를 운반하고 있는 경우 권상로프는 탄성(elasticity)을 무시하여 강체막대(rigid rod)로 가정할 수 있고, 운반물체를 점 질량으로 간주하면 천정주행 크레인의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다[2].

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{x} + ml\cos(\theta)\ddot{\theta} + \\ m\sin(\theta)\dot{l} + 2m\cos(\theta)\dot{l}\dot{\theta} - ml\sin(\theta)\dot{\theta}^2 + d_{vx}\dot{x} - d = u_x \\ (m_l + m)\ddot{l} + m\sin(\theta)\ddot{x} - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos(\theta) + d_{vl}\dot{l} = u_l \\ ml^2\ddot{\theta} + ml\cos(\theta)\ddot{x} + 2ml\dot{\theta}\dot{x} + mgl\sin(\theta) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, M , m , m_l , g 는 각각 트롤리, 운반물체, 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 (5)에 대해 다음과 같이 가정한다.

가정 1. $|\theta(0)| < \pi/2$ 로 제한된다.

문제를 간단히 하기 위해, 상태벡터 q 와 입력벡터 u 를 각각 $q = [x \ l]^T$ 와 $u = [u_x \ u_l]^T$ 로 정의하면 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{D}\dot{q} + \mathbf{C}_g = u, \\ ml^2\ddot{\theta} + A\dot{q} + B = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} M + m\sin^2(\theta) & m\sin(\theta) \\ m\sin(\theta) & m + m_l \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{vx} & 0 \\ 0 & d_{vl} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_g &= \begin{bmatrix} -\sin(\theta)(ml\dot{\theta}^2 - mg\cos(\theta)) \\ -ml\dot{\theta}^2 - mg\cos(\theta) \end{bmatrix} \\ A &= [ml\cos(\theta) \ 0], \quad B = [2ml\dot{\theta}\dot{x} + mgl\sin(\theta)] \end{aligned}$$

이다. 또한, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려하면 (2)은 다음과 같이 제어가능 표준형으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= F_q + G_q u + \Omega_q(\mathbf{x}, u) \\ \ddot{\theta} &= F_\theta + G_\theta u + \Omega_\theta(\mathbf{x}, u) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 시스템 행렬 F_q , G_q , F_θ , G_θ 는 \mathbf{M} 의 딸림행렬(adjoint matrix)인 \mathbf{M}^A 에 대해

$$\begin{aligned} F_q &= \frac{-\mathbf{M}^A \mathbf{C}_q}{\det(\mathbf{M})}, \quad G_q = \frac{\mathbf{M}^A}{\det(\mathbf{M})}, \quad \Sigma_q = \frac{-\mathbf{M}^A \mathbf{D} \dot{q}}{\det(\mathbf{M})}, \\ F_\theta &= \frac{\mathbf{M}^A \mathbf{C}_g - B \det(\mathbf{M})}{ml^2 \cdot \det(\mathbf{M})}, \quad G_\theta = \frac{-\mathbf{M}^A}{ml^2 \cdot \det(\mathbf{M})}, \quad \Sigma_\theta = \frac{\mathbf{M}^A \mathbf{D} \dot{q}}{ml^2 \cdot \det(\mathbf{M})} \end{aligned}$$

와 같고, 모델 파라미터의 불확실성, 마찰력 및 외란을 포함한 시스템의 불확실 요소 $\Omega_q(\mathbf{x}, u)$ 와 $\Omega_\theta(\mathbf{x}, u)$ 는 $\mathbf{x} = [q \ \dot{q} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ 에 대해 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Omega_q(\mathbf{x}, u) &= [\Omega_x \ \Omega_l]^T = \Delta F_q(\mathbf{x}) + \Delta G_q(\mathbf{x})u + \Sigma_q(\mathbf{x}), \\ \Omega_\theta(\mathbf{x}, u) &= \Delta F_\theta(\mathbf{x}) + \Delta G_\theta(\mathbf{x})u + \Sigma_\theta(\mathbf{x}). \end{aligned}$$

(2)의 두 번째 식에서 알 수 있듯이, 천정주행 크레인의 흔들림 운동은 트롤리의 주행가속도, 권상로프의 길이 및 권상속도와 강하게 결합되어 있어 이들의 간섭을 받는다. 또한, 일반적으로 천정주행 크레인은 (7)과 같이 시스템의 불확실 요소 $\Omega_q(\mathbf{x}, u)$ 와 $\Omega_\theta(\mathbf{x}, u)$ 를 내포한다. 따라서, 이 논문에서는 흔들림 운동에 대한 간섭요소를 최소화하는 방법으로 천정주행 크레인에 대한 흔들림 억제 궤적추종 제어규칙을 제안한다. 또한 퍼지시스템을 이용한 관측기를 설계하여 불확실 요소를 추정하고 보상 함으로써 시스템의 불확실성에 대한 강인성을 확보한다.

3. 흔들림 억제 궤적추종 제어

3.1 되먹임 선형화를 이용한 궤적 추종제어

이 절에서는 (7)과 같이 시스템 불확실성을 포함한 천정주행 크레인에 대해 [12]의 결과를 확장하여 고속 권상운동을 고려한 궤적추종 제어법칙을 설계한다. 먼저, (7)에 대해 트롤리의 주행운동 및 권상운동의 기준궤적에 대한 위치오차벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$e \triangleq q - r \quad (3)$$

여기서, $r = [x_d \ l_d]^T$ 은 트롤리의 위치와 권상로프의 길이에 대한 기준궤적벡터이고, 다음을 만족한다.

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

이제, 궤적추종오차벡터 e 가 영으로 수렴하도록 하기 위해 다음과 같은 제어법칙을 설계한다.

$$u = [G_q]^{-1}(-X_e - F_q + u_c) \quad (4)$$

여기서, 가정 1에 대하여 $G_q > 0$ 이고, $X_e = [X_{e1} \ X_{e2}]^T = -\dot{r} + \mathbf{K}_d \dot{e} + \mathbf{K}_p e$, $\mathbf{K}_d = 2\mathbf{K}_e$, $\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_e^2$ 이고, 양의 상수 k_x 와 k_l 에 대하여 $\mathbf{K}_e = \text{diag}(k_x, k_l)$ 이다. 또한, u_c 는 다음 장에서 설계될 흔들림 억제 제어법칙이다. 그러면, 제어법칙 (4)에 의해 (7)은

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= \dot{r} - \mathbf{K}_d \dot{e} - \mathbf{K}_p e + u_c + \Omega_q \\ \ddot{\theta} &= -g_c \sin(\theta) - \Lambda(-\bar{X}_e + u_c) + \Omega_\theta \end{aligned} \quad (5)$$

이 되고, 여기서 $g_c = g/l > 0$,

$$\begin{aligned} \Lambda &\triangleq [\Lambda_1 \ \Lambda_2] = A/ml^2 = [\cos(\theta)/l \ 0], \\ \bar{X}_e &\triangleq [\bar{X}_{e1} \ \bar{X}_{e2}]^T = [(X_{e1} - 2l\dot{\theta}/\cos(\theta)) \ X_{e2}]^T \end{aligned}$$

이고, 가정 1에 대하여 $\Lambda_1 > 0$ 이다. 또한 (5)으로부터 궤적 추종 오차방정식은

$$\ddot{e} = -\mathbf{K}_d \dot{e} - \mathbf{K}_p e + u_c + \Omega_q \quad (6)$$

또는 $\mathbf{E} = [e, \dot{e}]^T$ 를 이용하면

$$\dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{A}\mathbf{E} + \mathbf{B}(u_c + \Omega_q) \quad (7)$$

이 된다. 여기서,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{K}_d & \mathbf{K}_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = [\mathbf{0}_{2 \times 2} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2}]^T$$

이고, $\mathbf{0}_{2 \times 2}$ 와 $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ 는 각각 2×2 영행렬과 항등행렬이다. 또한, (4)로부터 $\dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{A}\mathbf{E}$ 의 원점은 점근적으로 안정하고, 따라서 양수 k 와 λ , 그리고 $t \geq t_0 \geq 0$ 에 대하여 $\|e^{(t-t_0)\mathbf{A}}\| \leq ke^{-\lambda(t-t_0)}$ 을 만족함을 알 수 있다[14]. 그러면, (7)의 해는

$$\begin{aligned} \|\mathbf{E}(t)\| &= \|e^{(t-t_0)\mathbf{A}}\| \cdot \|\mathbf{E}(t_0)\| + \\ &\int_{t_0}^t \|e^{(t-\tau)\mathbf{A}}\| \cdot \|\mathbf{B}\| \cdot \|u_c(\tau) + \Omega_q(\tau)\| d\tau \quad (8) \\ &\leq ke^{-\lambda(t-t_0)} \|\mathbf{E}(t_0)\| + \frac{k\|\mathbf{B}\|}{\lambda} \sup_{t_0 \leq \tau \leq t} \|u_c(\tau) + \Omega_q(\tau)\| \end{aligned}$$

를 만족하고, 결국 제어기 (4)에 의해 트롤리의 주행운동과 권상운동에 대한 궤적추종 오차방정식은 제한된 강제입력 $u_c + \Omega_q$ 에 대해 선형 2 차 ISS(Input-to-State Stable) 시스템으로 표현됨을 (8)으로부터 알 수 있다. 이는 곧, $\|u_c + \Omega_q\|$ 이 유계이면 $\|\mathbf{E}(t)\|$ 도 유계이고, $\|u_c + \Omega_q\|$ 이 점근적으로 안정하면, $\|\mathbf{E}(t)\|$ 도 점근적으로 안정함을 의미한다 [14]. 만약, 제어법칙 u_c 가 불확실성 Ω_q 를 충분히 보상하면서 점근적으로 안정하면, 즉 $\|\varepsilon_c\| \ll 1$ 에 대하여 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $u_c(\tau) + \Omega_q(\tau) \rightarrow \varepsilon_c$ 이면, (7)로부터 $\|\mathbf{E}(t)\| \rightarrow (k/\lambda)\|\mathbf{B}\|\|\varepsilon_c\|$ 이다. 또한, k 가 λ 보다 충분히 크면 $\|\mathbf{E}(t)\| \rightarrow 0$ 이 가능하고 이는 다음 장에서 증명한다.

3.2 흔들림 억제를 위한 FVSC

제어법칙 (4)에 의한 흔들림 운동방정식은 (5)의 두 번째 식과 같고, 제어법칙 u_c , \bar{X}_e 및 Ω_q 에 의해 영향받는 것을 알 수 있다. 따라서, 이 논문에서는 궤적추종 제어를 위한 성분과 권상속도 성분을 포함한 \bar{X}_e 의 영향을 최소화 하면서 효과적으로 흔들림을 억제할 수 있는 제어법칙 u_c 를 다음과 같이 제안한다.

$$u_c = \left[\bar{X}_{e1} \cdot \text{sgn}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta} + k_\theta\theta) \frac{1}{\Lambda_1} \quad 0 \right]^T. \quad (9)$$

여기서, $X_\theta = 2\dot{\theta} + k_{\theta d}\theta$, $k_{\theta d}$ 와 k_θ 는 양의 상수이고, 스위칭 함수 $\text{sgn}(\eta)$ 는 η 가 양이면 1, η 가 음이면 -1, 그리고 η 가 영이면 영이다. 그러면, 제안한 흔들림 억제 제어법칙에 의한 흔들림 운동방정식의 안정성은 다음과 같이 정리된다.

보조정리 1. (5)의 두 번째 식으로 표현되는 흔들림 운동방정식을 고려하자. 만약 $\Omega_\theta = 0$ 일 때 제어법칙 u_c 가 (9)와 같으면 흔들림 운동방정식은 점근적으로 안정화 가능하다. 즉, $t \rightarrow \infty$ 일 때, $\theta, \dot{\theta} \rightarrow 0$ 이 된다.

증명) 먼저, (5)의 두 번째 식에 대하여 다음과 같이 미분 가능한 양한정 함수를 선정한다.

$$V_\theta = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})^2 + k_\theta\theta^2 + 2g_c(1 - \cos(\theta)) \quad (10)$$

그리고 $\bar{u}_c \triangleq |\bar{X}_{e1}| \cdot \text{sgn}(X_\theta)$ 와 (5)의 두 번째 식을 이용하여 (10)를 시간에 대해 미분하면,

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta &= X_\theta\ddot{\theta} + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + 2k_\theta\theta\dot{\theta} + 2g_c \sin(\theta)\dot{\theta} \\ &= X_\theta(-g_c \sin(\theta) - \Lambda(-\bar{X}_e + u_c)) + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + \\ &\quad 2k_\theta\theta\dot{\theta} + 2g_c \sin(\theta)\dot{\theta} \\ &= X_\theta(-g_c \sin(\theta) - [\Lambda_1 \quad 0](-\bar{X}_e + u_c)) + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + \\ &\quad 2k_\theta\theta\dot{\theta} + 2g_c \sin(\theta)\dot{\theta} \quad (11) \\ &= X_\theta(-g_c \sin(\theta) - \Lambda_1(-\bar{X}_{e1} + |\bar{X}_{e1}| \text{sgn}(X_\theta)) + (k_{\theta d}\theta + \\ &\quad k_\theta\theta)/\Lambda_1)) + (k_{\theta d}\theta + \dot{\theta})k_{\theta d}\dot{\theta} + 2k_\theta\theta\dot{\theta} + 2g_c \sin(\theta)\dot{\theta} \\ &= -k_\theta k_{\theta d}\theta^2 - k_{\theta d}\dot{\theta}^2 - k_{\theta d}g_c(\sin(\theta) \cdot \theta) - \Lambda_1 X_\theta(-\bar{X}_{e1} + \\ &\quad |\bar{X}_{e1}| \text{sgn}(X_\theta)) \end{aligned}$$

이 되고, 가정 1로부터 부등식 $\sin(\theta) \leq \theta$ 를 이용하면 $\theta^2 \geq \sin(\theta) \cdot \theta \geq 0$ 이므로

$$\dot{V}_\theta \leq -k_\theta k_{\theta d}\theta^2 - k_{\theta d}\dot{\theta}^2 \leq 0 \quad (12)$$

이 된다. 결국, (10)와 (12)로부터 $\theta, \dot{\theta} \in L_\infty$ 임을 알 수 있고, (12)의 양변을 적분하면

$$\int_0^\infty (k_\theta k_{\theta d}\theta^2 + k_{\theta d}\dot{\theta}^2) dt \leq V_\theta(0) < \infty \quad (13)$$

이므로 $\theta, \dot{\theta} \in L_2$ 이 된다. 또한, (5)의 두 번째 식과 (9)로부터 $\ddot{\theta} \in L_\infty$ 임을 알 수 있다. 따라서, Barbalat's lemma 에 의해 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0$ 이 된다.

참고 1. (5)으로부터 흔들림 운동방정식은 \bar{X}_{e1} 즉, 궤적추종 제어를 위한 성분 X_{e1} 과 권상속도 j 에 영향을 받음을 알 수 있다. 이에 대해, 제어입력 (9)는 \bar{X}_{e1} 에 상관없이 흔들림 운동의 점근적 안정성을 보장함을 (11)으로부터 알 수 있다. 따라서, 충분히 빠른 권상속도에 대해서도 흔들림 운동의 안정성이 보장된다.

참고 2. [12]에서 제안한 흔들림 억제 제어법칙은 흔들림 운동방정식(5)의 두 번째 식)에서 $-g_c \sin(\theta)$ 의 영향을 고려하지 않는다. 즉, $g_c = g/l$ 이므로 흔들림 운동방정식의 페루프 특성이 권상로프의 길이변화에 영향을 받는다. 반면, (9)는 $k_\theta\theta$ 이 추가되어 k_θ 를 충분히 크게 함으로써 흔들림 운동에 대한 권상로프의 길이의 영향을 충분히 줄일 수 있다. 따라서, 고속 권상운동을 하는 크레인 시스템의 경우, (9)는 [12]에서 제안한 흔들림 억제 제어법칙에 비해 우수한 흔들림 억제성능이 보장된다.

참고 3. (9)는 스위칭 함수 $\text{sgn}(\cdot)$ 를 사용하는 가변구조제어의 형태를 갖고 있다. 일반적으로 제어법칙의 매끄러운 천이(transition)를 위해 $\text{sgn}(\cdot)$ 는 임의의 경계층을 갖는 포화 함수(saturation function)로 대체 가능하고, 이때 X_θ 는 경

계층 내로 제한된다. 그러나, 이 경우 X_θ 이 유계임에 따라 제어법칙 u_c 도 영으로 수렴하지 않고 유계이므로, (6)로부터 궤적추종오차의 점근적 안정성이 보장되지 않는다는 것을 알 수 있다.

참고 3 에 설명된 문제를 해결하기 위해, 매끄러운 제어법칙의 천이와 함께 궤적추종오차의 점근적 안정성을 보장하는 퍼지시스템 기반 흔들림억제 제어법칙 u_c^{FVSC} 를 [12]에서와 같은 방법으로 설계할 수 있다. 먼저, (9) 로부터 다음과 같이 두 제어법칙을 고려하자.

$$\begin{aligned} u_{c1}^{IB} &= (k_{\theta d}\dot{\theta} + k_\theta\theta) \frac{1}{\Lambda_1} \\ u_{c1}^{OB} &= |\bar{X}_{c1}| \cdot \text{sgn}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta} + k_\theta\theta) \frac{1}{\Lambda_1} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, u_{c1}^{IB} 는 $X_\theta = 0$ 일 때의 제어규칙, u_{c1}^{OB} 는 $X_\theta \neq 0$ 일 때의 제어규칙이다. 그러면, [12]의 결과에 따라 FVSC 는

$$u_c^{FVSC} = \begin{bmatrix} u_c^{FVSC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\bar{X}_{c1}| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta) + (k_{\theta d}\dot{\theta} + k_\theta\theta) \frac{1}{\Lambda_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

이 되고, 여기서 $\mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta)$ 는 [12]에서 정의된 것과 같이 시변 경계층을 갖는 퍼지집합 X_θ^{OB} 의 소속함수이다. 따라서, u_c^{FVSC} 는 소속함수 $\mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta)$ 와 $\text{sgn}(X_\theta)$ 에 의해 (9)에 비해 제어법칙의 천이를 보다 매끄럽게 하는 것을 알 수 있다. 또한, 시변 경계층을 갖는 퍼지소속함수 $\mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta) = \exp(-0.5(X_\theta \cdot \kappa(t))^2 / \delta^2)$ 에 대하여, 스케일계수 $\kappa(t)$ 를 양의 상수 a, b, c, T 를 이용하여

$$\kappa(t) = \begin{cases} 1/(a+b) & 0 \leq t \leq T \\ 1/(a+be^{c(t-T)}) & t > T \end{cases} \quad (16)$$

와 같이 선정하면, $0 \leq t \leq T$ 일 때 $\text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta)$ 는 포화 함수와 유사한 형태가 되고, $t > T$ 일 때 $t \rightarrow \infty$ 에 대해 $\kappa(t)$ 는 영으로 수렴하고 $\text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{ob}}(X_\theta) = \text{sgn}(X_\theta)$ 이 된다. 즉, $0 \leq t \leq T$ 일 때 $|X_\theta| \leq 1/(a+b)$ 이고, $t > T$ 일 때 $t \rightarrow \infty$ 이면 X_θ 는 보조정리 1 에 의해 점근적으로 영으로 수렴한다. 일반적으로, 천정주행 크레인의 궤적추종제어에서 기준궤적은 출발점에서 목표점까지 가속구간, 등속구간, 감속구간으로 나뉘어 설정된다. 따라서, 이 경우 (16)의 상수 a, b, c, T 는 트롤리 및 권상로프의 길이에 대한 기준궤적이 목표점에 도달하는 시간에 $\kappa(t)$ 이 영으로 수렴하도록 설정한다.

참고 4. [12]에서와 같이, (15)은 입력변수는 X_θ 이고, 출력변수는 $u_c = [u_c^{IB} \ u_c^{OB}]^T$ 인 퍼지시스템 (2)를 이용하여 구현한다. 따라서 u_{c1}^{FVSC} 는 퍼지시스템 (2)의 출력이 된다.

4. 적응형 흔들림 억제 제어법칙

4.1 시스템 불확실성의 결합성

이 절에서는 퍼지시스템 (4)를 이용하여 천정주행 크레인의 불확실성을 추정하기 위한 퍼지관측기를 설계한다. 먼저, 시스템 불확실성을 포함한 천정주행 크레인 (7)을 고려하자. (7)은 두 개의 분리된 운동방정식으로 표현되고, 각각 불확실성 Ω_y 와 Ω_θ 를 포함한다. 그러나 이들은 천정주행 크레인의 부족구동 특성에 의해 서로 결합되어 있고 이런 특성은 [12]에서와 마찬가지로

$$\Omega_\theta = -\Lambda \cdot \Omega_y \quad (17)$$

또는,

$$\Omega_\theta = -\Lambda_1 \Omega_x \quad (18)$$

로 정리된다.

4.2 퍼지 불확실성 관측기(FUO)

흔들림 억제를 위한 FVSC (15)은 불확실성을 고려하지 않고($\Omega_\theta = 0$) 설계되었다. 이 절에서는 (5)의 두번째 식에 대하여 불확실성 Ω_i 를 추정하기 위한 FUO 를 [12]에서와 같은 방법으로 설계한다.

먼저, $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ 를 입력으로하는 퍼지시스템 (4)를 이용하여 Ω_i 의 추정치를 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{\Omega}_i \triangleq \hat{\phi}_i^T \xi_i(\mathbf{x}, u). \quad (19)$$

여기서, $\hat{\Omega}_i$ 는 퍼지시스템 (4)의 출력이고, [12]의 가정 4 를 만족하여 최적 출력벡터 ϕ_i^* 이 블록한 영역(convex region) $M_{\phi_i} = \{\phi_i \mid \|\phi_i\| \leq m_{\phi_i}\}$ 에 놓여 있다고 가정한다. 또한, 퍼지관측기 (19)의 동력학식은 다음과 같다.

$$\dot{\mu}_i = -\sigma_i \mu_i + p_i(\mathbf{x}, u, \hat{\phi}_i). \quad (20)$$

여기서, $p_i(\mathbf{x}, u, \hat{\phi}_i) \triangleq F_i + G_i u + \Omega_i(\mathbf{x}, u | \hat{\phi}_i) + \sigma_i i$ 이고, $\sigma_i > 0$ 는 관측기의 설계 파라미터이다. 그러면 퍼지관측기의 출력벡터 $\hat{\phi}_i$ 는 다음 조절법칙(update rule)에 의해 조절된다.

$$\dot{\hat{\phi}}_i = \gamma_i \zeta_i \xi_i(\mathbf{x}, u). \quad (21)$$

여기서, $\gamma_i > 0$ 는 설계 파라미터이고 $\zeta_i \triangleq i - \mu_i$ 로 정의한다. 그러면 [12]에서와 같이, 미지(unknown)의 불확실성 Ω_i 는 퍼지관측기의 출력 $\hat{\Omega}_i(\mathbf{x}, u | \hat{\phi}_i^*)$ 와 추정오차 $\varepsilon_i(\mathbf{x}, u)$ 을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Omega_i = \hat{\Omega}_i(\mathbf{x}, u | \hat{\phi}_i^*) + \varepsilon_i(\mathbf{x}, u). \quad (22)$$

여기서, $|\varepsilon_i(\mathbf{x}, u)| \leq \bar{\varepsilon}_i$ 를 만족한다. 따라서, 충분히 작은 $\bar{\varepsilon}_i$ 에 대하여 $\zeta_i \rightarrow 0$ 일 때, 즉 $\mu_i \rightarrow i$ 일 때, $\hat{\Omega}_i \rightarrow \Omega_i - \bar{\varepsilon}_i$ 이 된다 [16].

참고 5. 제어입력 u 는 시스템의 상태벡터 \mathbf{x} 의 함수이므로, (19)와 (21)을 각각 $\hat{\Omega}_i = \hat{\phi}_i^T \xi_i(\mathbf{x})$ 와 $\dot{\hat{\phi}}_i = \gamma_i \zeta_i \xi_i(\mathbf{x})$ 로 쓸 수 있다. 또한, (22)은 $\Omega_i = \hat{\Omega}_i(\mathbf{x} | \hat{\phi}_i^*) + \varepsilon_i(\mathbf{x})$ 가 된다.

참고 6. (7)에서 권상운동 방정식에 대한 불확실성 Ω_θ 는 위와

같은 방법으로 추정치가 가능하고, 그 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{\Omega}_\theta \triangleq \hat{\phi}_\theta^T \xi_\theta(\mathbf{x}) \quad (23)$$

그리고, $|\varepsilon_\theta(\mathbf{x})| \leq \bar{\varepsilon}_\theta$ 에 대하여 다음을 만족한다.

$$\Omega_\theta = \hat{\Omega}_\theta(\mathbf{x} | \hat{\phi}_\theta^*) + \varepsilon_\theta(\mathbf{x}) \quad (24)$$

또한, 퍼지관측기 (23)의 동력학식과 출력벡터 $\hat{\phi}_\theta$ 의 조절법칙은 각각 (20), (21)과 같은 방법으로 주어진다.

4.3 적응형 흔들림 억제 제어법칙

이제, 퍼지가변구조 흔들림 억제 제어법칙 (15)과 퍼지 불확실성 관측기 (19) 및 (23)를 이용한 적응형 흔들림 억제 제어법칙(AFVSC: Adaptive FVSC)을 다음과 같이 제안한다.

$$\mathbf{u}_c^{AFVSC} = \begin{bmatrix} u_{c1}^{AFVSC} \\ u_{c2}^{AFVSC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\bar{X}_{e1}| \cdot \text{sgn}(X_\theta) \cdot \mu_{X_\theta^{ps}}(X_\theta) + (k_{\theta d} \dot{\theta} + k_\theta \theta) \frac{1}{\Lambda_1} + \hat{\Omega}_\theta \frac{1}{\Lambda_1} \\ -\hat{\Omega}_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서, $\hat{\Omega}_\theta$ 와 $\hat{\Omega}_i$ 는 $\bar{\varepsilon}_\theta, \bar{\varepsilon}_i$ 에 대해 각각 (22)과 (24)를 만족한다고 가정한다. 그러면, 궤적추종 제어법칙 (4)와 적응형 흔들림 억제 제어법칙 (25)에 의한 천정주행 크레인 (7)의 안정성은 다음과 같이 정리된다.

정리 1. (7)과 같이 시스템 불확실성을 포함한 천정주행 크레인을 고려하자. 만약, 제어법칙 u 가 (4)와 같고 $u_c = u_c^{AFVSC}$ 로 주어지면, 궤적추종 오차방정식 (6)과 흔들림 운동방정식은 궁극적으로 균일하게 유계(uniformly ultimately bounded)이다. 또한, $\lambda_{\min}(\mathbf{K}_e)$ 와 $k_{\min} = \min\{k_\theta k_{\theta d}, k_{\theta d}\}$ 이 충분히 크고 $\bar{\varepsilon}_\theta, \bar{\varepsilon}_i$ 가 충분히 작도록 퍼지관측기를 구성하면, 궤적추종 오차방정식 (6)과 흔들림 운동방정식은 점근적 안정성을 지니게 된다 (즉, $\bar{\varepsilon}_\theta, \bar{\varepsilon}_i \rightarrow 0$ 이면 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0$ 이고, $\lim_{t \rightarrow \infty} q = q_d$ 이다).

증명: 먼저, (15)과 (25)으로부터

$$\mathbf{u}_c^{AFVSC} = u_c^{FVSC} + \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_\theta / \Lambda_1 \\ -\hat{\Omega}_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

이므로, (5)의 두 번째 식에 대하여 제어법칙 (25)을 적용하면

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -g_c \sin(\theta) - \Lambda(-\bar{X}_e + u_c^{AFVSC}) + \Omega_\theta \\ &= -g_c \sin(\theta) - [\Lambda_1 \ 0] \left(-\bar{X}_e + u_c^{FVSC} + \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_\theta / \Lambda_1 \\ -\hat{\Omega}_i \end{bmatrix} \right) + \Omega_\theta \\ &= -g_c \sin(\theta) - \Lambda(-\bar{X}_e + u_c^{FVSC}) - \hat{\Omega}_\theta + \Omega_\theta \end{aligned} \quad (27)$$

이 되고, (22)을 (27)에 적용하면

$$\ddot{\theta} = -g_c \sin(\theta) - \Lambda(-\bar{X}_e + u_c^{FVSC}) + \varepsilon_\theta \quad (28)$$

이 된다. 그러면 (10)의 미분은

$$\dot{V}_\theta \leq -k_\theta k_{\theta d} \theta^2 - k_{\theta d} \dot{\theta}^2 + |X_\theta| \bar{\varepsilon}_\theta \quad (29)$$

이고, $\boldsymbol{\theta} = (\theta, \dot{\theta})^T$ 와 $k_{\min} = \min\{k_\theta k_{\theta d}, k_{\theta d}\}$ 를 이용하면

$$\dot{V}_\theta \leq -k_{\min} \|\boldsymbol{\theta}\|^2 + |X_\theta| \bar{\varepsilon}_\theta \quad (30)$$

이 된다. 따라서, 꼭찬집합 $C_\theta = \{\boldsymbol{\theta} | \|\boldsymbol{\theta}\| \geq \sqrt{|X_\theta| \bar{\varepsilon}_\theta / k_{\min}}\}$ 밖에서 \dot{V}_θ 는 음이고, 이는 $\|\boldsymbol{\theta}\| < \sqrt{|X_\theta| \bar{\varepsilon}_\theta / k_{\min}}$ 이 됨을 의미한다. 또한, k_{\min} 이 충분히 크고 $\bar{\varepsilon}_\theta$ 가 충분히 작도록 퍼지관측기를 구성하면 C_θ 는 전체집합으로 확대될 수 있고, 결국 $\|\boldsymbol{\theta}\|$ 는 점근적으로 영으로 수렴한다. 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0$ 이고, 또한 $\theta, \dot{\theta} \rightarrow 0$ 일 때, (15)으로부터 $u_c^{FVSC} \rightarrow 0$ 임을 알 수 있다.

이제, 추종오차 방정식 (6)에 대해 다음과 같이 미분 가능한 양한정 함수를 고려하자.

$$V_e = \frac{1}{2} (\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T (\dot{e} + \mathbf{K}_e e) \quad (31)$$

그리고, (6), (15), (18), (25)과 $\varepsilon \triangleq [\varepsilon_\theta \ \varepsilon_i]^T$ 를 이용하여 (31)을 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= (\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T (-\mathbf{K}_e \dot{e} - \mathbf{K}_e e + u_c^{AFVSC} + \Omega_e + \mathbf{K}_e \dot{e}) \\ &= (\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T (-\mathbf{K}_e \dot{e} - \mathbf{K}_e^2 e + u_c^{AFVSC} + \Omega_e) \\ &= -(\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T \mathbf{K}_e (\dot{e} + \mathbf{K}_e e) + \\ &\quad (\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T \left(\begin{bmatrix} u_{c1}^{FVSC} + \hat{\Omega}_\theta / \Lambda_1 \\ -\hat{\Omega}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_\theta \\ \Omega_i \end{bmatrix} \right) \\ &= -(\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T \mathbf{K}_e (\dot{e} + \mathbf{K}_e e) + (\dot{e} + \mathbf{K}_e e)^T (u_c^{FVSC} + \varepsilon) \\ &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{K}_e) \|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\|^2 + \|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\| (\|u_c^{FVSC}\| + \|\varepsilon\|) \end{aligned} \quad (32)$$

이고, 여기서 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 은 고유치의 최소값을 의미한다. 또한, 위에서 $u_c^{FVSC} \rightarrow 0$ 이므로

$$\dot{V}_e \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{K}_e) \|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\|^2 + \|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\| (\sqrt{\bar{\varepsilon}_\theta^2 + \bar{\varepsilon}_i^2}) \quad (33)$$

이 된다. 따라서, $\|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\| < \sqrt{\bar{\varepsilon}_\theta^2 + \bar{\varepsilon}_i^2} / \lambda_{\min}(\mathbf{K}_e)$ 임을 알 수 있다. 뿐만 아니라, $\lambda_{\min}(\mathbf{K}_e)$ 이 충분히 크고 $\bar{\varepsilon}_\theta, \bar{\varepsilon}_i$ 가 충분히 작도록 퍼지관측기를 구성하면, $\|\dot{e} + \mathbf{K}_e e\|$ 는 점근적으로 영으로 수렴함을 알 수 있다. 즉, $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\dot{e} + \mathbf{K}_e e \rightarrow 0$ 이 되고, $q \rightarrow q_d$ 가 된다

5. 시뮬레이션

이 장에서는 제안한 적응형 흔들림 억제 궤적추종 제어법칙의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션에서 사용된 공칭(nominal)모델 파라미터의 값은 $M = 36.2\text{kg}$, $m = 15.6\text{kg}$, $m_i = 1.7\text{kg}$ 이고, 권상 로프는 0.1m 에서 1.5m 까지 조절된다. 제어기와 관측기의 설계 파라미터는 $k_x = 1$, $k_i = 20$, $k_{\theta d} = 3.4$, $k_\theta = 5$, $\sigma_\theta = \sigma_i = 30$, $\gamma_\theta = \gamma_i = 2000$ 이다. (15)에서 $\mu_{X_\theta^{ps}}(X_\theta)$ 의 시변 경계층을 위

한 $\kappa(t)$ 의 파라미터는 [12]로부터 $a=1, b=0.1, c=1, T=42$ 이다. 또한, FOU의 전제부(premise part)는 입력벡터 $\mathbf{x}=[x \dot{x} \theta \dot{\theta} l \dot{l}]^T$ 에 대해 각각 7개의 Gaussian 함수와 2개의 sigmoid 함수를 소속함수로 사용하여 구현하였고, 트롤리의 주행운동과 권상운동에 대한 기준궤적(r, \dot{r}, \ddot{r})은 각각 [12]에서와 마찬가지로 다음과 같은 속도 프로파일을 이용하여 설정하였다. 고속 권상운동에 대한 기준방법[12]과 제안한 방법의 성능비교를 위해, 기준방법의 권상운동에 대한 궤적추종제어는 (19)와 같이 설계하였다.

표 1. 트롤리 및 호이스트 기준궤적의 속도 프로파일.

Table 1. Velocity profiles for the trajectories of trolley and hoist.

기준속도	구간
$\dot{x}_d(t) = v_{x_{max}}(1 - \cos(\pi t / t_a)) / 2$	$0 \leq t \leq t_a$
$\dot{x}_d(t) = v_{x_{max}}(1 + \cos(\pi(t - t_a - t_c) / t_a)) / 2$	$t_a + t_c \leq t \leq t_d$
$\dot{l}_d(t) = v_{l_{max}}(1 - \cos(\pi t / t_{al})) / 2$	$0 \leq t \leq t_{al}$
$\dot{l}_d(t) = v_{l_{max}}(1 + \cos(\pi(t - t_{al} - t_{cl}) / t_{al})) / 2$	$t_{al} + t_{cl} \leq t \leq t_{dl}$

그리고, 트롤리의 이동거리 40m에 대한 속도 프로파일 파라미터는 $v_{x_{max}} = 1.5m/s, t_a = 10s, t_c = 16.7s, t_d = 10s$ 이고, 권상운동에 대한 파라미터는 $v_{l_{max}} = 0.667m/s, t_{al} = 0.8s, t_{cl} = 0.7s, t_{dl} = 0.8s$ 이다.

시스템 파라미터의 불확실성 및 외란에 대한 성능을 비교 분석하기 위해, 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

조건 1. 시스템 파라미터의 불확실성 및 외란이 존재하지 않아 실제 파라미터가 공칭모델 파라미터와 같고, 트롤리는 기준궤적 없이 목표위치까지 이동하고 권상운동은 수행하지 않는다, 즉, $x_d = 2m, l_d = 1.5m$ 이고 $\dot{x}_d = \ddot{x}_d = 0, \dot{l}_d = \ddot{l}_d = 0$ 이다.

조건 2. 조건 1에서, 기준궤적을 따라 트롤리는 40m까지 이동하고 호이스트는 1.5m에서 0.5m까지 권상운동을 수행한다. 또한, 시스템 파라미터의 불확실성 및 외란이 존재하여 실제 파라미터 값은 공칭 파라미터 값에 대해 $M_{act} = 0.7M, m_{act} = 0.7m, m_{lact} = 0.7m_l$ 과 같고 $d_{vx} = 2.5kg/s, d_{vl} = 0.1kg/s$ 와 같고, d 는 그림 2와 같이 주어진다.

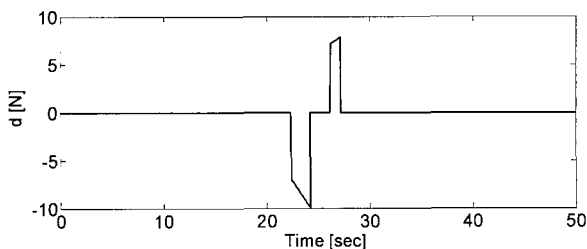


그림 2. 트롤리에 가해지는 외란

Fig. 2. Disturbance input to trolley

5.1 조건 1에 대한 성능비교

조건 1에 대한 기존 제어법칙([12])과 제안된 제어법칙(15)의 응답을 그림 3에 제시하였다. 먼저, 권상로프의 길이가 강제로 고정되지 않은 경우 권상운동을 하지 않더라도 권상운동에 대한 궤적추종 제어기의 성능에 따라 권상로프의 길이변화가 있을 수 있고, 이는 흔들림 운동에 직접적으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다 (그림 3에서 l 의 응답). 그 결과, 참고 2에서 설명한 것과 같이, 기존 제어법칙의 경우 흔들림 억제성능의 저하로 인해 권상로프의 길이 $l(t)$ 과 흔들림 각도 $\theta(t)$ 의 변화가 큰 반면, 제안된 제어법칙을 사용한 경우에는 향상된 흔들림 억제성능의 영향으로 권상로프의 길이 및 흔들림 각도의 변화량이 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

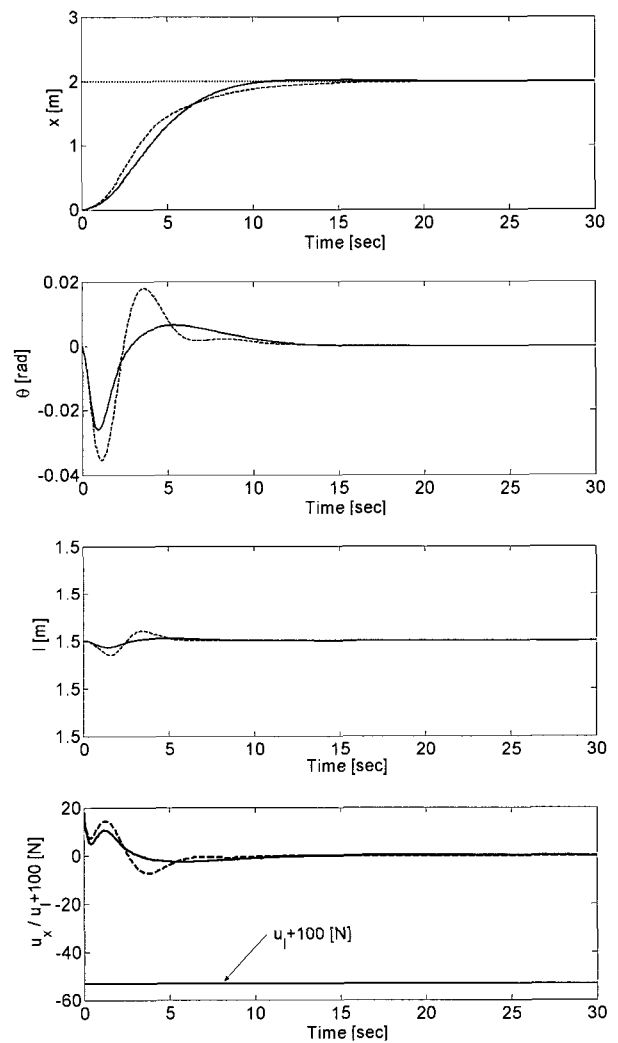


그림 3. 조건 1에서의 페루프 시스템 응답 (실선-제안한 방법; 점선-기존 방법[12]).

Fig. 3. Closed-loop system response of case 1 (solid-proposed; dotted-conventional[12])

5.1 조건 2에 대한 성능비교

조건 2와 같이 시스템의 불확실성을 포함한 경우, 기존 제어법칙과 제안된 제어법칙(15) 및 (25)의 성능을 그림 4에서 비교하였다. 먼저, 기존 제어법칙과 (15)의 경우, 시스템 불확실성 및 외란으로 인해 흔들림 억제능력이 저하됨을 알 수 있다. 그러나, 이 경우에도 제안된 제어법칙 (15)은 권상속도에 의한 흔들림 억제능력이 향상되어, 기존 제어법칙에 비해 시스템 불확실성에 의한 성능저하가 덜한 것을 알 수 있다. 한편, 퍼지 불확실성 관측기를 이용한 AFVSC (25)을 사용한 경우, 불확실성 및 외란을 충분히 보상하여 우수한 흔들림 억제성능을 보인다. 따라서, 제안된 AFVSC는 충분히 빠른 권상속도, 시스템 불확실성 및 외란에 강인함을 시뮬레이션 결과로부터 확인할 수 있다.

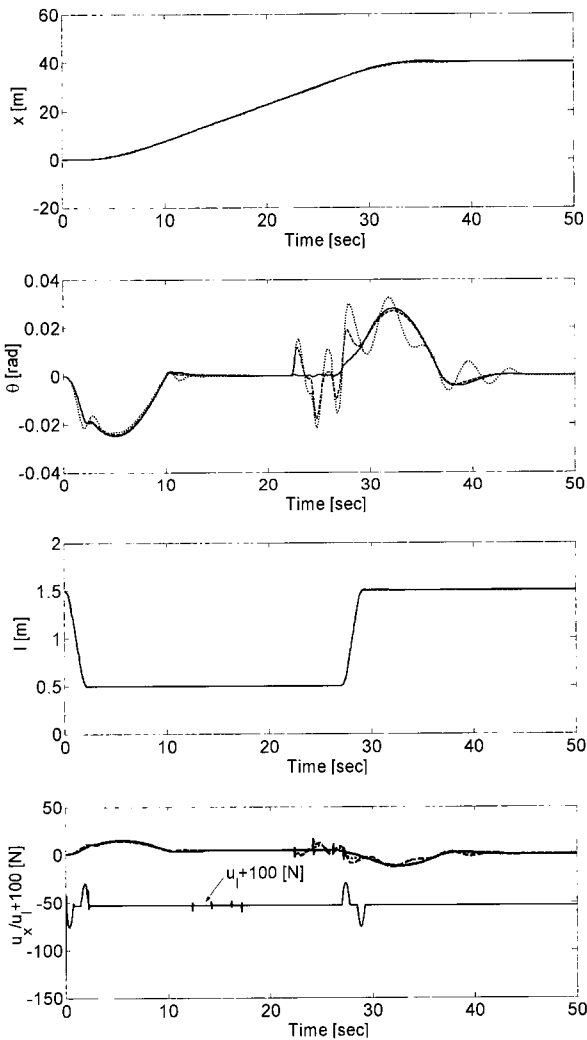


그림 4. 조건 2에서의 페루프 시스템 응답 (실선-제안한 방법 (25); 파선-제안한 방법 (15); 점선-기존 방법 [12]).

Fig. 4. Closed-loop system response of case 2 (solid-proposed (25); dashed-proposed (15); dotted-conventional [12])

6. 결론

이 논문에서는 고속 권상운동을 수행하는 천정주행 크레인에 대한 적응형 흔들림 억제 궤적추종 제어법칙을 제안하였다. 천정주행 크레인의 흔들림 운동은 트롤리의 주행가속도뿐만 아니라 권상속도에 의한 심한 간섭을 받으므로, 효과적인 흔들림 억제를 위해 이와 같은 간섭요인에 강인한 흔들림 억제 궤적추종 제어법칙을 퍼지 기반 가변구조 제어방법을 이용하여 구현하였다. 또한, 시스템 파라미터의 불확실성 및 외란에 강인한 제어법칙을 구현하기 위해 퍼지기반 시스템 불확실성 관측기를 설계하였다. 끝으로, 권상속도에 대한 흔들림 억제 성능 및 시스템 불확실성에 대한 강인성에 있어, 제안된 방법이 기존 방법보다 우수함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] I. Fantoni, R. Lozano, *Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems*, Springer, 2002.
- [2] 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.
- [3] 김환성, 김명규, 유삼상, "갠트리 크레인의 입력 보 상형 분산제어," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 7 권, 제 4 호, pp. 281-287, 2001. 4.
- [4] Y. Kim, K. Hong, 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.
- [5] 김영복, 정용길, " H^∞ Gain Scheduling 기법을 이 용한 컨테이너 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 7 권, 제 7 호, pp. 559-566, 2001. 7.
- [6] H. Lee, Y. Liang, and D. Segura, "A Sliding-Mode Antiswing Trajectory Control for Overhead Cranes with High-Speed Load Hoisting," *Trans. of ASME*, vol. 128, pp. 842-845, Dec. 2006.
- [7] 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.
- [8] 정경채, 홍진철 외, "천정 크레인의 진동 저감을 위한 퍼지 제어기 및 제어기 개발용 시뮬레이터 설계 에 관한 연구," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 2 권, 제 2 호, pp. 96-101, 1996. 6.
- [9] 정승현, 박정일, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 3 권, 제 5 호, pp. 96-101, 1997. 10.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 박문수, 좌동경, 홍석교, "퍼지 관측기와 퍼지 가변구조 제어를 이용한 천정주행 크레인의 적응형 흔들림 억제 궤적추종제어," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 13 권, 제 5 호, pp. 452-461, 2007. 5.

[13] H. Park, D. Chwa, and K. Hong, "A Feedback Linearization Control of Container Cranes: Varying Rope Length," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 379-387, Aug., 2007

[14] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 3rd edition, 2002.

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

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

[17] 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.

[18] 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.

저 자 소 개



박문수(Mun-Soo Park)

1998 년: 아주대 전자공학부 공학사
2000 년: 동 대학원 공학석사
2007 년: 동 대학원 공학박사
현재: 아주대 정보전자기술연구소 연구원.

관심분야 : 시스템 판별, 로봇 및 무인 비행체의 비선형 적응 제어 등.

Phone : +82-31-219-2489

Fax : +82-31-212-9531

E-mail : pms shark@ajou.ac.kr



좌동경(Dongyoung Chwa)

1995 년: 서울대 제어계측공학과 학사
1997 년: 서울대 제어계측공학과 석사
2001 년: 서울대 전기공학부 박사
2005 년~현재: 아주대 전자공학부 조교수

관심분야 : 비선형 적응제어 이론, 로봇 및 미사일 시스템 응용

Phone : +82-31-219-1815

Fax : +82-31-212-9531

E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr



홍석교(Suk-Kyo Hong)

1971 년: 서울대 전기공학과 졸업
1973 년: 동 대학원 석사
1981 년: 동 대학원 박사
1976 년~현재: 아주대 전자공학부 교수

관심분야 : 로봇제어, 컴퓨터 응용, 지능제어

Phone : +82-31-219-2478

Fax : +82-31-212-9531

E-mail : skhong@ajou.ac.kr