

컨테이너 크레인의 흔들림 및 위치제어에 관한 연구

강 창 남

제주대학교 해양연구소

A Study on the Sway and Position Control of the Container Crain

Chang-Nam Kang

Marine Research Institute, Cheju National University, Cheju-do 695-810, Korea

The container crain system operated by a skilled driver is used for moving a container to the target position as quick as possible without any sway. But there is unavoidable swing motion of a moving container due to the acceleration and deceleration of the trolley which cause the serius safety problem to given system.

In this paper, we introduce the dynamic characteristic equations to depict a container crane for the automation system. Then an optimal controller of LQ regulator and a Fuzzy control system based on skilled operator action are made for the automatically operated crane system moving a container to the given position within the aiiowable time and minimum swing. The performance of both controllers are compared through the computer simulations to use the real system. The simulation results show that two controllers habe the similary good functions for the quick movement of a container to the given position with stable boundary sway angle. So both controllers are possible to apply the real control system of a container crane.

Key words : optimal controller, fuzzy control system

서 론

항만을 통한 수출이 대부분을 차지하며 이중 85%이상이 컨테이너 화물로 처리된다. 많은 국가들이 컨테이너 항만의 건설 및 운영 효율을 극대화 하는데 많은 투자를 하고 있다. 컨테이너 크레인을 이용하여 크레인을 운반시 가장 큰 문제점으로 속도변화와 외란등에 의하여 이송도중이나 목적지 부근에서 와이어 로프 끝에 매달려 있는 컨테이너의 진자운동이 일어난다는 것이다. 현재 상황으로는 경험과 숙련도에 의존하는 실정으로 천장 크레인을 자동으로 제어 할 수 있는 시스템 개발이 시급한 실정이다(변, 1997; 이, 1995). 본 논문에서는 퍼지 제어기법을 이용하여 컨테이너의 흔들림

현상을 최소화 하여 이송작업시 효율을 극대화하는데 있다. 시뮬레이션 모델은 현재 사용되는 컨테이너 크레인을 이용하였다. 먼저 컨테이너 및 트롤리의 비선형 방정식을 유도 하고 평형상태에서 선형화를 이루었으며 최적 제어기와 퍼지제어기를 설계하여 시뮬레이션을 통하여 두제어기의 성능을 비교하였다(Dorf et al., 1995).

컨테이너 크레인의 모델링

천장크레인은 천장에 설치된 레일을 따라 움직이는 이동기구에 크레인을 부착하여 물건을 옮기는데 사용하는 장치이다. 주요장치로는 주행장치, 횡행장치, 권

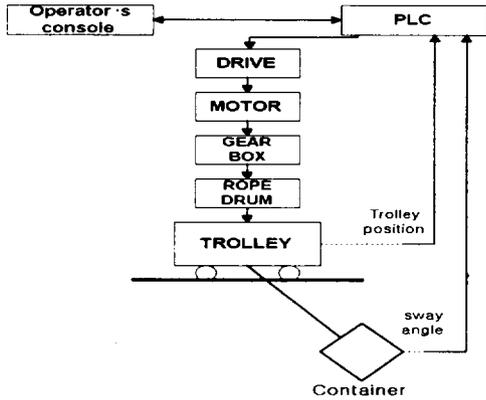


Fig. 1. Schematic diagram for the container crane operating system.

상·하장치, 볼장치 등으로 이루어져 있다. 컨테이너 크레인의 운전시스템은 Fig. 1 과 같다. 운전실에서 조이스틱을 이용하여 신호를 주면 PLC와 구동장치를 거쳐 모터를 구동시킨다. 트롤리 모터의 경우 조이스틱에 의한 전압변경으로 스피드를 조절한다. 모터의 출력은 기어박스를 거쳐 로프드럼을 회전시켜서 트롤리를 움직이게 한다(윤 등, 1990).

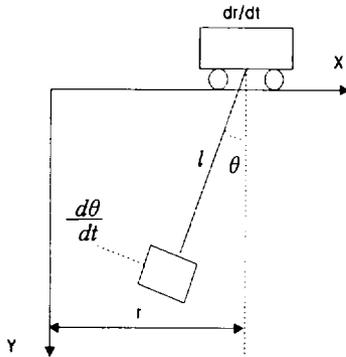


Fig. 2. X-Y coordinate system of the container crane system.

트롤리의 수평방향을 x 수직방향을 y로한 직교좌표계를 구성한다. 여기서 f는 트롤리에 작용하는 힘이고 r은 이동거리 θ 는 컨테이너의 흔들림 각도이다. Fig. 2는 트롤리와 컨테이너에 대한 직교좌표계이다. 직교좌표계로부터 Lagrange운동 방정식을 이용하여 운동방정식을 유도한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i$$

q_i = 일반좌표, T = 운동에너지, V = 포텐셜에너지, D = 소산에너지, Q_i = 일반화외력을 나타낸다. 트롤리에 대한 비선형 운동방정식은

$$(M+m) \frac{d^2 r}{dt^2} + ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} \cos \theta - ml \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \sin \theta + M \frac{dr}{dt} = f$$

컨테이너에 대한 비선형 운동방정식은

$$ml^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + ml \frac{d^2 r}{dt^2} \cos \theta + mgl \sin \theta = 0$$

이다.

상태변수퍼드백을 크레인 시스템에 적용하기 위하여 표준상태에서 선형화를 이루었다.

$\theta \approx 0$ 에서 선형근사화하면 선형화된 식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{f + mg\theta - M \frac{dr}{dt}}{M}$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{l} \frac{dr}{dt} - \frac{m(M+m)\theta}{Ml} - \frac{f}{Ml}$$

컨테이너 크레인시스템은 결국 r, θ 에 대한 선형2계 미분방정식으로 표현이 가능하다.

여기서

$$x_1 = r, x_2 = \frac{dr}{dt}, x_3 = \theta, x_4 = \frac{d\theta}{dt} \text{ 로}$$

상태변수를 택하면

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx \text{로 표현된다.}$$

단

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{l} & -g \frac{M+m}{ml} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{1}{Ml} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

제어기설계

동적시스템을 해석하는데 있어서 유용한 개념중의 하나가 가제어성(controllability)과 가관측성이다.

컨테이너 크레인 상태방정식의 물리적 파라미터는 다음과 같다.

$$m = 45.100\text{kg (Weight of the container)}$$

$$M = 9075\text{kg (Weight of the trolley)}$$

$$l = 10 \text{ m (Length from the trolley to the container)}$$

행렬 A의 고유값은 계수행렬에서 구해보면 $0, -0.1717, -0.4142 \pm 2.3530i$ 이며 최대 0의 값을 가지므로 트롤리에 외력을 가하기전에는 안정한계에 있다고 할 수 있다.

다시 가제어성행렬 $[B \ AB \ A^2B \ A^3B]$ 를 구해보면

$$1.0 \times 10^3 \begin{bmatrix} 0 & 0.1102 & -0.1102 & 0.4255 \\ 0.1102 & -0.1102 & -0.4255 & 0.9622 \\ 0 & -0.0110 & 0.0110 & 0.0533 \\ -0.0110 & 0.0110 & 0.0533 & -0.1070 \end{bmatrix}$$

이고 계급은 4이므로 가제어하다.

또 가관측성 행렬

$$[C \ CA \ CA^2 \ CA^3]^T \text{를 구해보면}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0.1 & 1 & -0.1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 48.703 & -5.8503 & -48.703 & 4.8703 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 48.703 & -5.8503 \end{bmatrix}$$

이고 계급은 4이므로 가관측하다.

가제어하고 가관측하므로 임의의 극배치에 의하여 제어기를 설계할 수 있고 관측기에 의한 상태추정이 가능하다.

최적제어란 상태방정식 구속조건하에서 평가함수를 최소화하는 제어입력 u 와 최적 상태 x 를 구하는 문제이다(Auerning and Troger.1987). 그러나 단순한 상태피드백 제어에서는 외란, 모델링 오차, 시간의 변화에 따른 파라미터 값의 변동에 의한 정상상태 편차 및 추종특성이 나쁜경향을 보이는데 이를 해결하기 위하여 오차제곱의 합에 의한 성능지수를 최소화 하는 방법으로 상태방정식의 오차 e 를 적분한 변수 $\eta' = e = y - y_r = Cx - y_r$ 를 취하면 새로운 상태방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{\eta}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} K \begin{bmatrix} x \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -y_r \end{bmatrix}$$

이때 평가함수는

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} x \\ \eta \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x \\ \eta \end{bmatrix} + u^T R u \right\} dt \text{ 이다}$$

여기서 Q와 R은 가중행렬이며 대칭 양의 반항행렬 및 대칭양의 한정행렬이다 평가함수에서 우변항에 u 는 과도한 제어입력을 피하기 위함이다.

K는 Q와 R을 선정후 Riccati 방정식으로 얻어진다. 사용된 가중행렬 Q와 R은

$$Q = 1.0 \times 10^5 \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix}, R = 0.5 \text{ 이다.}$$

이때 상태피드백이 실시된 폐루프제어계의 고유값은

$$E = [-1.3176 \pm 2.4008i, -0.1459 \pm 0.1624i, -0.1666]$$

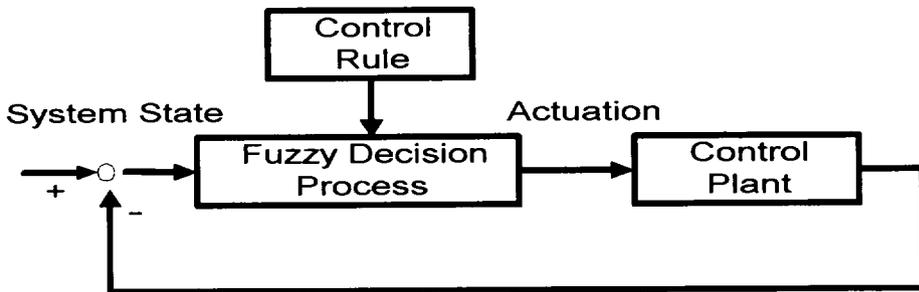


Fig. 3. Basic scheme of fuzzy control system.

으로 안정된 제어계로 되었다.

퍼지 제어기는 제어규칙에 해당하는 퍼지 규칙 기반과 계산장치에 해당하는 추론 장치를 주축으로 구성되어 있다. 기본구성은 Fig. 3 과 같다.

퍼지제어기는 플랜트 또는 운전자와 주고받는 데이터는 퍼지량이 아닌 크리스프(Crisp)한 수치적 데이터 이므로 퍼지량과 크리스프량을 상호 바꿔줄 수 있는 변환장치가 필요하게 되고, 구성도의 퍼지화기(Fuzzifier)와 비퍼지화기(Defuzzifier)가 그 변환을 담당하게 된다(Mamdani, 1974).

Fig. 4는 퍼지추론의 원리를 나타내고 있다. 퍼지

제어기의 입력 변수로는 트롤리의 목표점에 대한 위치오차 e_r 과 컨테이너 수직축에 대한 흔들림 각도 e_θ 로 정하였고 출력변수는 트롤리 모터에 의한 드럼에 인가되는 힘 f 를 u 로 사용하였다(坂和正敏, 1990). 입출력변수의 언어값은 각각 7개의 퍼지부분집합 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB로 분할한 후 정규화 하였으며 변수의 대집합은 $e_r = [-45, 45]$, $e_\theta = [-0.1, 0.1]$, $u = [-40000, 40000]$ 로 하였다. 소속함수 모양은 삼각형을 선택 하였다. Fig. 5~Fig. 7은 입출력변수의 퍼지분할과 소속함수의 모양을 나타낸다.

퍼지화는 싱글톤법(Singleton method)을 사용하였

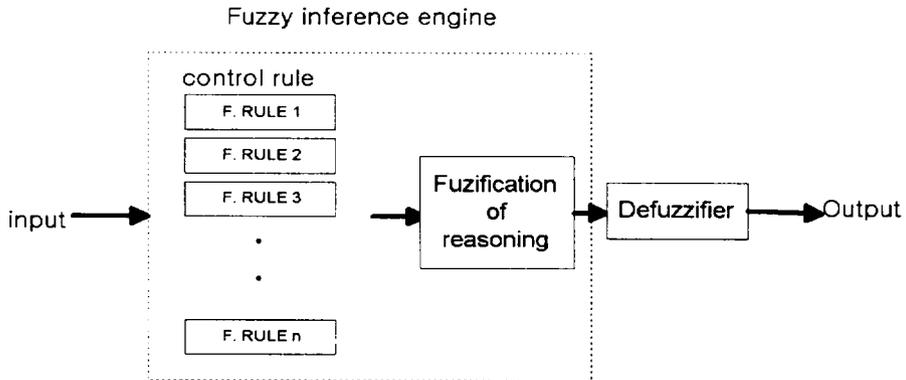


Fig. 4. Principle of fuzzy reasoning process.

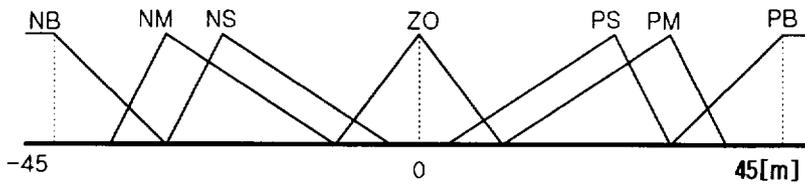


Fig. 5. Fuzzy sets and their membership function for the position.

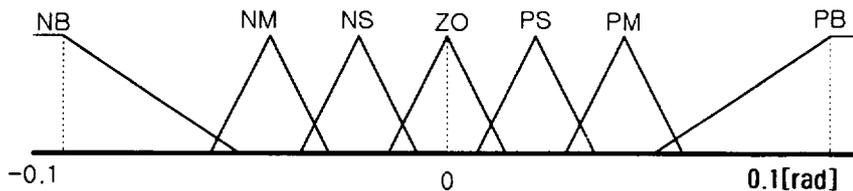


Fig. 6. Fuzzy sets and their membership function for the angle.

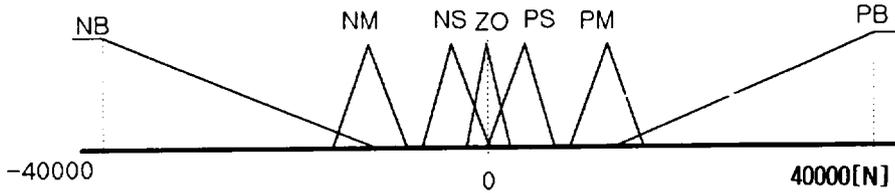


Fig. 7. Fuzzy sets and their membership function for the control outputs.

고, Mamdani의 min-max추론, 그리고 무게중심법 (Center of Gravity method)에 의한 비퍼지화를 행하였다. Table 1의 제어규칙은 숙련기술자의 운전방법을 기초로 하여 49개의 규칙을 사용하였다(Gulley et al. 1995).

NB : Negative Big NM : Negative Middle
 NS : Negative Small ZE : Zero
 PB : Positive Big PM : Positive Middle
 PS : Positive Small

Table 1. Rule of the Fuzzy Control

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	PS	PM
NM	NB	NB	NM	NS	NS	PS	PB
NS	NB	NB	NS	PS	PS	PM	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NB	NS	NS	NS	PS	PM	PB
PM	NB	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB
PB	NM	PS	PS	PM	PM	PB	PB

트롤리의 위치제어와 로프에 의해 발생하는 흔들림 제어는 서로 상호 간섭이 일어난다. 따라서 동시에 만족시키는 제어를 하기는 어렵다. Table.1 은 숙련기술자의 운전방법을 모델화 한 것으로서 목표지점까지 거리가 많이 남아 있을 경우에는 위치제어에 충실하고 흔들림이 크게 발생하면 거리오차 보다도 흔들림 오차에 충실하는 방법을 택하였다. 그리고 목표지점에 이르면 흔들림제어와 위치제어를 적절히 배분하여 제어한다. 예로서 우측칼럼은 위치오차가 크므로 흔들림에 관계없이 입력을 최대한으로 준 경우이다.

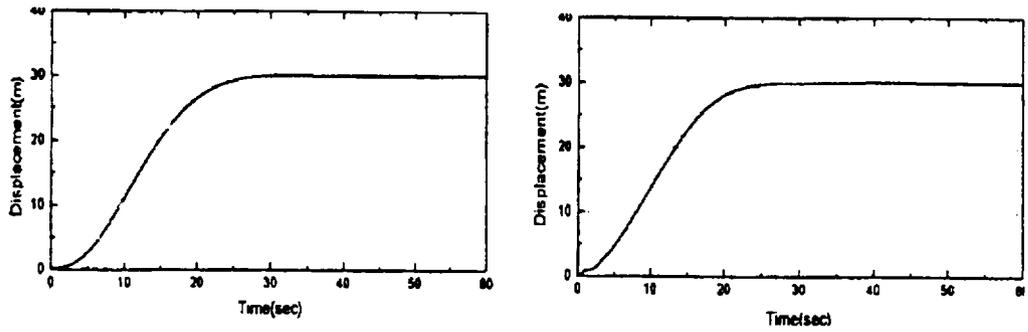
시뮬레이션 및 고찰

실제 터미널에서 사용되는 컨테이너 크레인을 모델 삼아 최적제어기와 퍼지제어기를 이용하여 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 8은 트롤리가 30m주행시 위치추종과 컨테이너의 흔들림 특성에 대한 결과이고 Fig. 9는 외란이 부가된 경우의 결과이다. 최적제어기가 더 양호한 제어결과를 나타냈다. 그러나 실제 시스템의 정확한 모델링이 현실적인 어려움이 있고 비선형이 강한 플랜트이기 때문에 만족시키는 최적제어기는 파라미터를 동정하여 제어를 재설계해야하는 어려움이 있다. 반면에 퍼지제어기는 모델링 오차에 대한 강인성을 가지며 비선형인 플랜트에 대해서 수학적 모델링을 필요로 하지 않으므로 제어를 간단하게 구성할수 있다는 장점을 가진다.

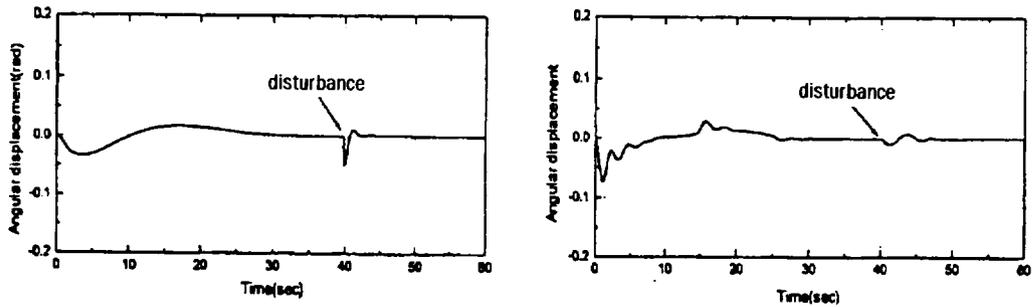
결론

현재 터미널에서 사용되는 컨테이너 크레인을 모델로 하여 시뮬레이션을 실행하였다. 크레인은 SIMO시스템으로 트롤리에 가해지는 힘으로 트롤리의 위치 및 컨테이너의 흔들림을 제어하는 시스템이다. 본 논문에서는 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림을 제어하기 위하여 퍼지제어기를 설계하고 최적제어기와 비교하였다. 초기운전시에는 트롤리의 가속으로 생기는 흔들림에는 구애를 안받고 위치제어에만 충실하였으며 목표지점근처에서는 위치제어와 흔들림을 적절히 배분하여 제어를 행하였으며 컨테이너의 안정 최대 흔들림각도는 0.05rad으로 정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 최적제어기의 경우 목표점 도달시간은 2sec정도 빨

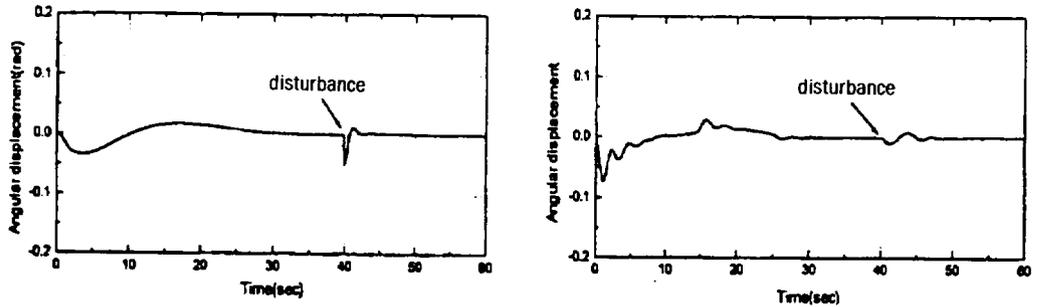


(a) horizontal displacement of the trolley

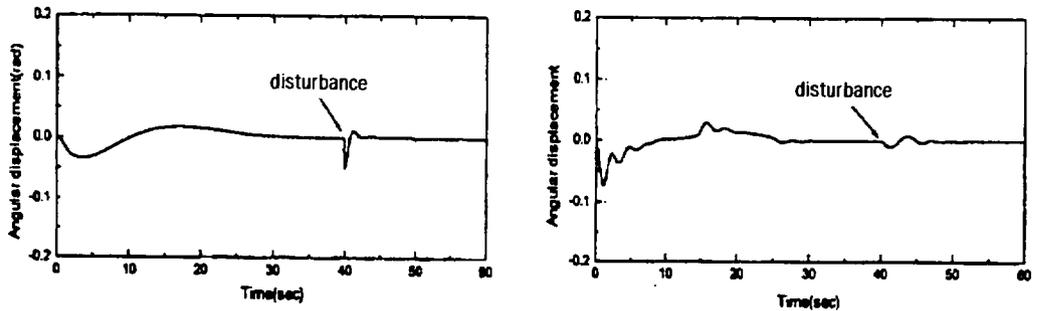


(b) angular displacement of the container

Fig. 8. Simulation results use the optimal and fuzzy control to reference.



(a) horizontal displacement of the container



(b) angular displacement of the container

Fig. 9. Simulation results using the optimal and fuzzy control when disturbance is applied.

- 랐고 외란에 조금더 강인한 모습을 보였는데 이는 미소한 차이로 간주할수 있었다.
2. 퍼지제어기는 초기진동을 빼고는 안정최대 흔들림 각도안에서 유지되었는데 초기진동은 규칙 베이스로 극복이 가능한 사항이다. 목표점 도달시는 최적제어기 보다 잔류흔들림이 우수한 특성을 나타내었다.
 3. 시뮬레이션 상에는 시변이나 모델링 오차를 고려하지 않은 결과이며 실제 대상 프랜트에서 운전시는 퍼지제어기가 더 나은 결과를 예상가능하다.
이들 대상으로 실험 및 규칙베이스의 변경 및 다른 제어기와 비교검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 변중남, 1997. 퍼지논리제어. 홍릉과학출판사, 76~78, 110~118.
- 윤지섭·박병석·이재철, 1990. 무진동크레인을 이용한 흔들림제어에 관한 연구. 90KACC, 1, 292~297
- 이태영, 1995. 퍼지이론을 적용한 Over-head Crane의 Anti-swing제어. 경북대학 석사학위논문.
- 坂和正敏, 1990. ファジィ理論の基礎と應用. 森北出版社, 44~57
- F.E. Kalman, 1960. A new approach to linear Filtering and prediction Problems. Trans. of the ASME, J of Basic Eng. 82, 35~45.
- J.W. Auernig and H. Troger, 1987. Time Optimal of Overhead Cranes with Hoisting of the Load. Automatica, 23(4), 437~447.
- E.H. Mamdani, 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. IEEE proc., control science, 12(12), 1585~1588
- Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, 1995. Modern Control System. Addison-Wesley, 421~446