

◎ 速報研究論文

하역효율 향상을 위한 컨테이너 크레인의 제어기 설계

신선근* · 최재준** · 소명옥***

Design of a Container Crane Controller for High Efficiency in Cargo Handling

S. G. Shin* · J. J. Choi** · M. O. So***

Key words : Container Crane(컨테이너 크레인), Trolley(횡행 장치), Spreader(스프레더), Optimal Controller(최적 제어기), Fuzzy Controller(퍼지 제어기)

Abstract

The amount of container freight is continuously increasing recently, but freight congestion problem frequently occurs at ports due to low efficiency of container crane in transportation and cargo handling. In this paper, a method for designing a fuzzy controller of the container crane system is presented. In this scheme a mathematical model for the system is obtained in state space representation. The response of the proposed fuzzy controller is compared with that of the optimal controller at the same condition. Through the simulation results, the performance of the fuzzy controller was observed better than that of optimal controller in respect of reference change, disturbances and parameter change. The fuzzy controller was also more stable and robust than the optimal controller.

1. 서 론

컨테이너가 가지는 운송과 하역의 장점 때문에 세계적으로 컨테이너 화물이 급증하고 있는 추세에 있으며, 이로 인해 항만에서는 컨테이너 크레인의 하역부분에서 화물의 병목현상이 심하게 나타나고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 크레인의 하역효율을 높이는 것으로서 크레인의 권상·

권하 및 횡행 동작의 속도를 높이면서 목표위치에 도달했을 때 스프레더의 흔들림을 짧은 시간에 제어하는 것을 생각할 수 있다.

컨테이너 크레인의 제어에 관련된 연구에 있어서 Manson은 속도제어 모터를 이용한 시간에 대한 최적해를 구했으며¹⁾ Yamaguchi는 목표값의 흔들림 제적과 결과값의 흔들림각 오차를 피드백하여 오차를 최소화하는 방법을 발표하였다²⁾. 또한, 국

* 한국해양대학교 대학원 박사과정(원고접수일: 2000년 4월)

** 한국항만연수원 교수

*** 한국해양대학교 조교수

내에서는 운, 박 등이 로프 길이가 일정한 화물의 흔들림을 제어할 목적으로 화물의 흔들림 각을 피드백하고, 단진자 운동에 감쇠 효과를 부여하여 트롤리의 이송속도 유형을 “최고속도 이송 및 흔들림 제어구간-예비 감속구간-정지위치 제어구간”으로 할 것을 제안하였다⁹⁾. 이러한 최적제어 기법은 와이어 로프의 길이나 화물의 질량이 변하면 다시 최적해를 구해야 하는 단점이 있다. 이에 반해 퍼지제어 기법은 규칙베이스 제어의 특수한 형태로서 불명확한 정보를 효율적으로 취급할 수 있고 전문가의 지식에 기초한 언어적 제어전략을 구체적으로 표현할 수 있는 언어적 제어의 특징을 가지고 있다. 특히, 논리와 추론의 기능을 가지고 있고, 병렬형 제어기로서 기존의 제어기에 비해 간단하면서도 외란에 대하여 강인하며 비선형 시스템에 적용이 용이한 제어 기법이다.

따라서, 본 연구에서는 비선형성이 매우 강한 컨테이너 크레인의 위치제어 및 흔들림 제어에 퍼지 이론을 적용하여 트롤리의 횡행속도를 높이면서 목표위치 도달시 필연적으로 존재하게 되는 화물의 흔들림을 짧은 시간내에 제어할 수 있는 계층구조의 퍼지제어기를 제안하고, 계단상 기준 입력변화에 대한 추종성과 외란에 대한 강인성 등을 모의 실험을 통해 최적제어기와 비교하여 그 우수성을 입증하고자 한다.

2. 시스템 모델링

Fig. 1은 트롤리와 컨테이너에 대한 직교좌표계를 나타낸 것이며, 트롤리의 질량을 M , 컨테이너 화물의 질량을 m , 트롤리 바퀴의 마찰계수를 C_t , 트롤리와 컨테이너 화물의 거리를 l , 트롤리의 수평위치를 r , 컨테이너의 흔들림 각도를 θ , 트롤리용 와이어 로프에 작용하는 수평방향의 힘을 u 라고 정의하고 Lagrange 운동방정식을 이용하여 크레인 시스템을 모델링하면 다음 식과 같다.

$$(M+m)\ddot{r}+m l \ddot{\theta} \sin \theta-m l \dot{\theta}^2 \cos \theta+C_t \dot{r}=u \quad (1)$$

$$m l^2 \ddot{\theta}+m l \ddot{r} \cos \theta+m g l \sin \theta=0 \quad (2)$$

윗 식에서 θ 의 변화가 미소하다고 가정하고 $\sin \theta \cong \theta$, $\cos \theta \cong 1$, $\sin^2 \theta \cong 0$, $\cos^2 \theta \cong 1$ 라 하여 선형화

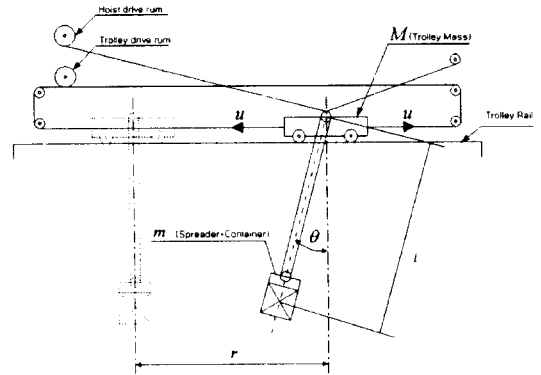


Fig. 1 Coordinate of a container crane system

하여 정리하면 식 (3), (4)와 같다.

$$\ddot{r}=\frac{u+m g \theta-C_t \dot{r}}{M} \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}=-\frac{u+m g \theta-C_t \dot{r}}{M l}-\frac{g}{l} \theta \quad (4)$$

여기에서 $x_1=r, x_2=\dot{r}, x_3=\theta, x_4=\dot{\theta}$ 와 같이 상태변수를 정의하면 다음 식 (5)와 같은 동적 방정식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$\dot{x}=A x+B u, \quad y=C x \quad (5)$$

$$\text{단, } A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_t}{M} & \frac{m g}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_t}{M l} & -\frac{(M+m) g}{M l} & 0 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{M l} \end{bmatrix}$$

$$C=[1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

여기서, $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 는 상태 벡터이고 y 는 출력이다.

3. 최적제어기 설계

식 (5)의 동적 방정식에서 식 (6)과 같은 2차 형식의 평가함수를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 최적제어 법칙은 아래 식 (7)로 주어진다.

$$J=\int_0^{\infty}\left(x^T Q x+u^T R u\right) d t \quad (6)$$

$$u=-k_1\left(x_1-y_r\right)-k_2 x_2-k_3 x_3-k_4 x_4 \quad (7)$$

$$\text{단, } K=\left[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4\right]=R^{-1} B^T P$$

여기서, y_r 는 기준입력이고, P 는 다음 식 (8)과 같은 Riccati 방정식의 해행렬이며 K 는 피드백 이득행렬이다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

본 논문에서는 트롤리 질량 $M=12000$ [kg], 컨테이너 화물의 질량 $m=40000$ [kg], 트롤리 바퀴의 마찰 계수 $C_f=3350$ [kg · m²/s], 트롤리와 컨테이너의 거리 $l=20$ [m], 중력 가속도 $g=9.8$ [m/s²]을 식 (5)에 대입하여 시스템행렬 A 와 입력행렬 B 를 다음과 같이 얻었다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.279 & 44.916 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.025 & -4.974 & 0 \end{bmatrix}, B = 1.0 \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.833 \\ 0 \\ -0.075 \end{bmatrix} \quad (9)$$

한편, 행렬 Q 와 R 은 상태벡터와 제어입력의 상대적인 중요성에 근거를 두고 설계자가 선정하는 하중행렬과 하중계수로서 $Q \geq 0, R > 0$ 인 관계를 가지는데 본 논문에서는 하중행렬 Q 와 하중계수 R 을 바라는 제어응답이 되도록 다음과 같이 선정하여 최적제어기의 이득 K 를 다음 식 (11)과 같이 얻었다.

$$Q = 1.0 \times 10^5 \begin{bmatrix} 40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 700 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{11} \end{bmatrix}, R = 0.1 \quad (10)$$

$$K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4] = 1.0 \times 10^4 [0.0632 \ 0.3791 \ -3.6899 \ -3.9009] \quad (11)$$

Fig. 2는 이렇게 구성한 컨테이너 크레인의 최적 제어 시스템을 나타내고 있다(여기서, 첨자 r 이 붙은 각 변수는 정상상태를 나타내며 $x_{1r}=y_r, x_{2r}=$

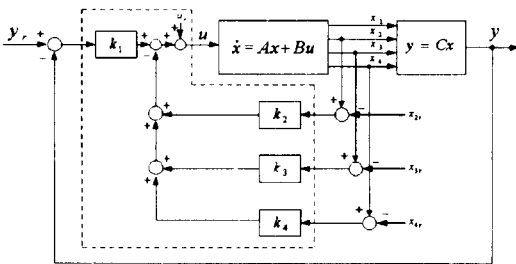


Fig. 2 Block diagram of optimal control system for container crane

$x_{3r}=x_{4r}=0, u_r=0$ 이다).

4. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 일반적인 구조는 퍼지화부, 지식 베이스부, 퍼지추론부 및 비퍼지화부로 이루어져 있는데, 본 논문의 퍼지화부에서는 입력측정에 잡음이 많이 포함되어 있지 않는 것으로 가정하여 각 입력 신호를 퍼지단일값(Fuzzy singleton)으로 변환하였다. 그리고 지식베이스부에서는 전건부의 퍼지변수를 x_1, x_2, x_3, x_4 로 네 개 정의하고 후건부는 퍼지변수와 파라미터 $\alpha_{j,i}$ 의 1차 결합으로 되어 있는 1차 Sugeno 퍼지모델을 선택한다. 전건부의 퍼지변수인 x_1 은 대차의 현재위치 y 와 기준입력위치 y_r 과의 차를, x_2 는 대차의 속도 \dot{y} 를, x_3 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각도 θ 를, x_4 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각속도 $\dot{\theta}$ 를 나타낸다. x_1 의 입력공간은 $-40 \sim 0.1$ [m]로 정의하여 NB, NS, ZE로, x_2 의 입력공간은 $-0.1 \sim 4.5$ [m/s]로 정의하여 SM, LG로, x_3 의 입력공간은 $-0.2 \sim 0.1$ [rad]로 정의하여 NS, PS로, x_4 의 입력공간은 $-0.2 \sim 0.1$ [rad/s]로 정의하여 NS, PS로 퍼지분할한다. 그리고 퍼지규칙은 식 (12)와 같이 네 개의 입력신호 x_1, x_2, x_3, x_4 와 한 개의 출력 u_i 를 가진 "If-then" 문장으로 구성되어 있으며 총 규칙수는 24개이다.

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{1,i} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2,i} \text{ and } x_3 \text{ is } A_{3,i} \text{ and } x_4 \text{ is } A_{4,i} \\ \text{then } u_i = \sum_{j=1}^4 \alpha_{j,i} x_j + \alpha_{0,i} \quad \text{단, } i=1, 2, \dots, 24 \quad (12)$$

여기서, R_i 는 i 번째의 퍼지제어 규칙이고 x_j 는 전건부에 있는 변수이다. $A_{j,i}$ 는 삼각형의 소속함수로서 전건부 변수의 퍼지집합을 나타내며, Fig. 3은 전건부 변수 x_1, x_2, x_3, x_4 에 대한 소속함수를 도시한 것이다. 그리고 u_i 는 i 번째 제어규칙 R_i 에 대한 출력이고 $\alpha_{j,i}$ 와 $\alpha_{0,i}$ 는 후건부에 포함되어 있는 파라미터로서 Table 1과 같다.

상기의 퍼지제어 규칙을 이용해서 원하는 제어 입력을 구하기 위한 본 논문에서의 퍼지추론 과정은 다음과 같이 여섯 단계로 구성되어 있고, Fig. 4는 퍼지제어기의 내부구조와 추론과정을 간단히 나타내고 있다. 첫 번째 단계에서는 입력 측정에 잡음이 많이 포함되지 않는 것으로 가정하여 각 입

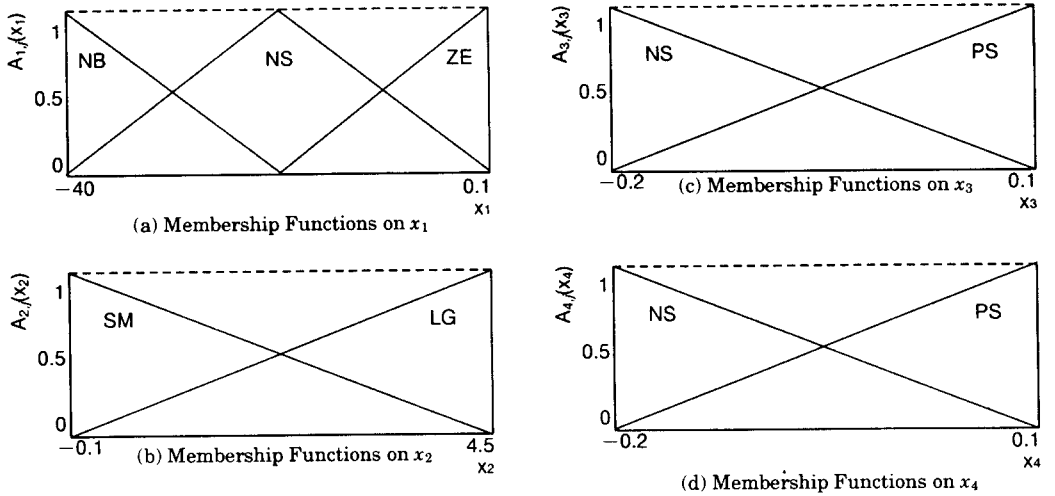


Fig. 3 Membership functions of fuzzy sets in the antecedent part

Table 1. Parameter values in the consequent parts

Antecedents					Consequents $\{a_{j,i}\}$				
i	x_1	x_2	x_3	x_4	j				
					0	1	2	3	4
1	NB	SM	NS	NS	1666	-7960	-470	344	6745
2	NB	SM	NS	PS	5587	-6513	-320	173	5897
3	NB	SM	PS	NS	55	-1564	-109	120	-31
4	NB	SM	PS	PS	-161	-100	-16	37	935
5	NB	LG	NS	NS	-5079	-22039	-3084	7529	-14273
6	NB	LG	NS	PS	2291	-18026	-1769	3450	60511
7	NB	LG	PS	NS	-1786	1058	-762	3090	-28573
8	NB	LG	PS	PS	-2699	-3648	-582	1465	15802
9	NS	SM	NS	NS	798	-857	-44	6	261
10	NS	SM	NS	PS	-442	720	40	-4	116
11	NS	SM	PS	NS	-2139	-122	-15	12	-212
12	NS	SM	PS	PS	-33	-697	-38	13	66
13	NS	LG	NS	NS	711	-302	-14	44	456
14	NS	LG	NS	PS	973	-1223	-67	29	253
15	NS	LG	PS	NS	-2392	806	22	5	178
16	NS	LG	PS	PS	1206	406	30	-7	-85
17	ZE	SM	NS	NS	-3457	930	68	-4	-150
18	ZE	SM	NS	PS	-1869	178	-31	21	36
19	ZE	SM	PS	NS	-86	-504	-46	-12	51
20	ZE	SM	PS	PS	2158	-339	30	12	17
21	ZE	LG	NS	NS	-8470	-273	-51	-15	-104
22	ZE	LG	NS	PS	-6507	-341	21	-4	-161
23	ZE	LG	PS	NS	-5680	273	28	10	-179
24	ZE	LG	PS	PS	-3939	263	-21	-11	-81

력신호를 퍼지단일값으로 변환한다. 두 번째 단계는 퍼지집합에 대한 소속함수 $A_{j,i}(x_j)$ 를 정의하는

단계이며 소속함수 $A_{j,i}(x_j)$ 를 간단히 A 로 표시했다. 이 단계의 출력은 퍼지규칙의 전건부에 있는 소속함수의 값으로서 x_j 가 주어질 때 x_j 가 정량자 $A_{j,i}$ 를 만족하는 정도를 나타낸다. 세 번째 단계에서는 i 번째 규칙의 적합도 w_i 를 구하기 위해서 식 (13)과 같이 각 입력신호들에 대한 소속정도의 값을 대수적으로 곱하며, 기호로 간단히 D 로 표시했다.

$$w_i = A_{1,k_1}(x_1) \cdot A_{2,k_2}(x_2) \cdot A_{3,k_3}(x_3) \cdot A_{4,k_4}(x_4) \quad (13)$$

$A_{j,k_j}(x_j)$ 는 퍼지 입력값 x_j 에 대한 k_j 번째 소속정도를 나타낸다. 네 번째 단계에서는 전체 규칙의 적합도의 합에 대한 i 번째 규칙의 적합도의 비를 구하여 정규화된 적합도 \bar{w}_i 를 출력시키며 간단히 E 으로 표시했다.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{24} w_i} \quad (14)$$

다섯 번째 단계에서는 각각의 제어규칙에 대한 출력을 구하는 과정으로 i 번째 규칙에 대한 정규화된 적합도 \bar{w}_i 와 i 번째 규칙의 후건부 값 u_i 를 대수적으로 곱하며, 간단히 F 로 표시했다.

$$\bar{w}_i \cdot u_i = \bar{w}_i \cdot \left(\sum_{j=1}^4 \alpha_{j,i} x_j + \alpha_{0,i} \right) \quad (15)$$

여섯 번째 단계는 반드시 비퍼지화라고는 할 수 없지만 식 (16)과 같이 모든 규칙에 대한 후건부의

값을 적합도 w_i 로 가중평균하여 하나의 출력으로 내보내며 이것이 제어기의 출력인 제어입력이다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{24} w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^{24} w_i} \quad (16)$$

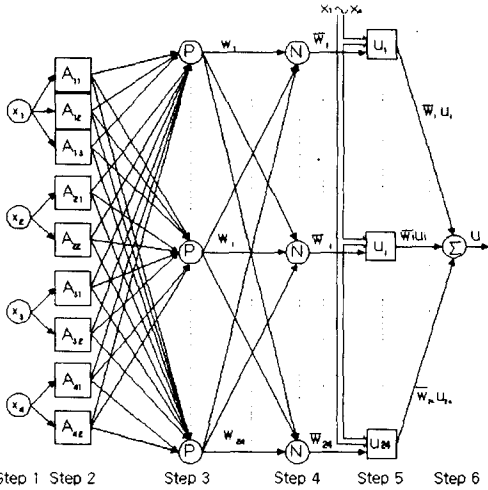
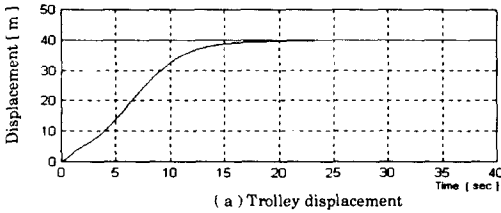
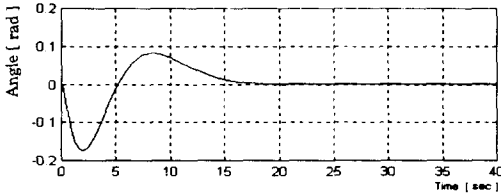


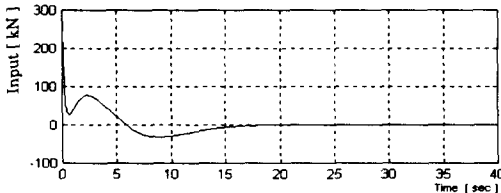
Fig. 4 Structure of the fuzzy controller for a container crane



(a) Trolley displacement



(b) Swing angle



(c) Control input

Fig. 5 Step response using optimal control (Reference input 0→40[m])

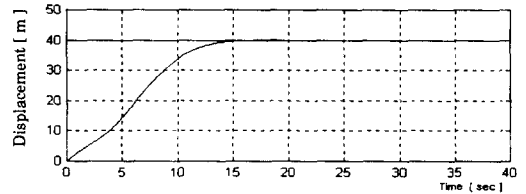
5. 모의실험 및 고찰

5.1 계단상 기준입력에 대한 검토

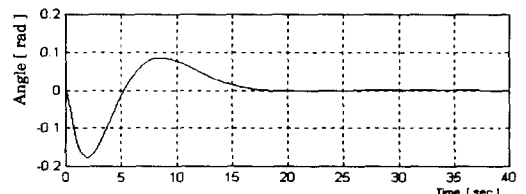
본 모의실험에서는 제안한 제어기의 추종성능을 보이기 위해 이동거리 40[m]의 계단상 기준입력을 가했다. Fig. 5의 최적제어에 의한 것은 약 20초 지점에서 흔들림 각은 거의 '0'이 되나 목표위치 도달 시간이 약 27초가 됨으로 제어시작 후 27초에 컨테이너 화물을 선박이나 야드 트레일러에 적하할 수 있다. Fig. 6의 퍼지제어에 의한 것은 약 17초에 목표지점에 도달하고, 도달한 후 약 1초후인 18초에서 흔들림 각이 거의 '0'이 됨으로 제어시작 후 18초에 컨테이너 화물을 선박이나 야드 트레일러에 적하할 수 있다. 따라서, 퍼지제어에 의한 방법이 최적제어에 의한 방법보다 컨테이너 화물을 일회 이송하는데 약 9초 정도 이송시간을 단축할 수 있다.

5.2 외란에 대한 검토

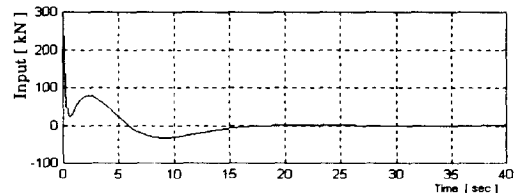
일반적으로 제어시스템은 운전중 외란이 가해



(a) Trolley displacement



(b) Swing angle



(c) Control input

Fig. 6 Step response using Fuzzy control (Reference input 0→40[m])

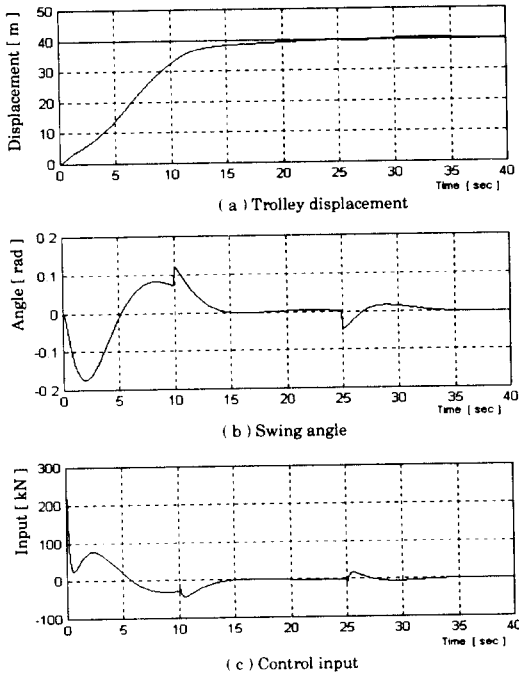


Fig. 7 Step response using optimal control (Disturbance ± 0.05 [rad])

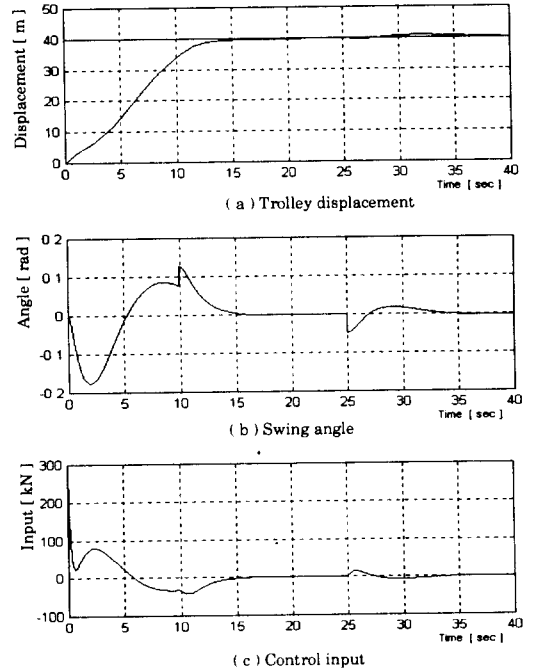


Fig. 8 Step response using Fuzzy control (Disturbance ± 0.05 [rad])

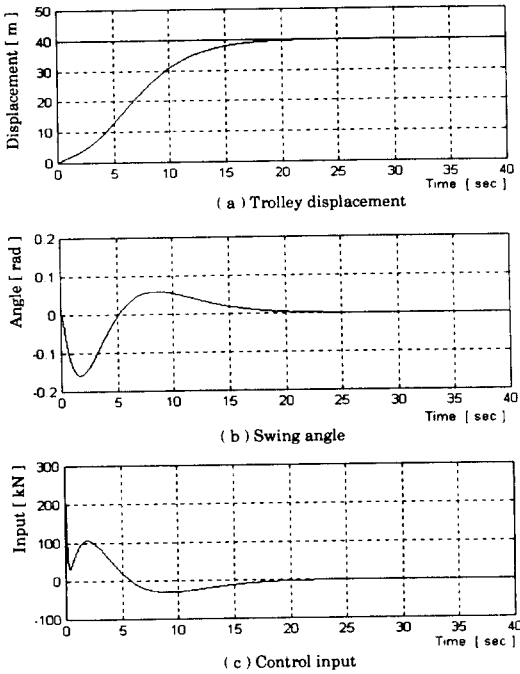


Fig. 9 Step response using optimal control (Cargo mass change +20[%])

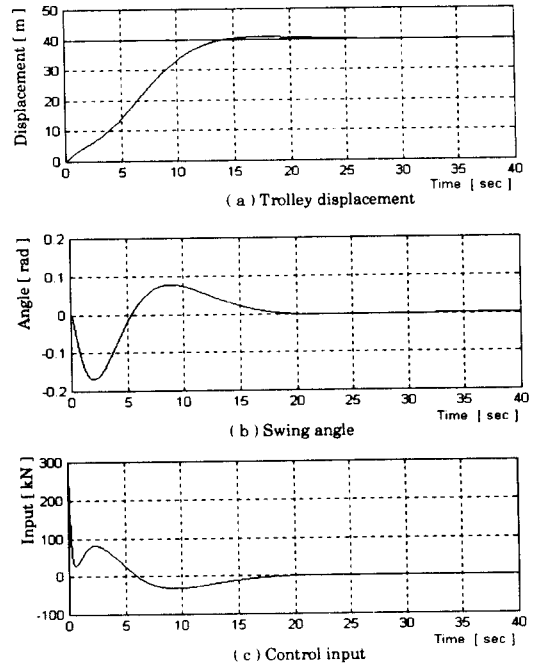


Fig. 10 Step response using Fuzzy control (Cargo mass change +20[%])

지거나 부하가 변동될 수도 있으므로 본 연구에서는 10초 시점에서 +0.05[rad], 25초 시점에서 -0.05[rad] 크기의 각도 외란을 각각 0.02초 동안 부여하였다. Fig. 7과 8에서 두 제어기 모두 오버슈트나 정상상태 오차가 크지는 않지만, 최적제어기에 의한 방법은 약 25초 경과 후 목표위치에 도달하고 약간의 편차가 있다. 그러나 퍼지제어기에 의한 방법은 약 18초에 목표점에 도달했으며 그 후 다음 외란이 들어올 때까지 편차도 별로 없는 것을 볼 수 있다.

5.3 파라미터 변화에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 제어기 설계시 파라미터의 값이 정확하게 선정된다 하더라도 주위환경에 따라 운전 중 파라미터의 값이 변할 수도 있으므로 화물의 질량을 40,000[kg]에서 48,000[kg]으로 +20[%] 변화시켜 모의실험을 실시했다. Fig. 9의 최적제어에 의한 방법은 오버슈트는 없으나 도달시간이 22초로 다소 늦으며, Fig. 10의 퍼지제어에 의한 방법은 오버슈트는 다소 크지만 목표점 도달시간이 약 15초로 매우 빠르다.

6. 결 론

본 연구에서는 하역효율을 높이기 위해서 트롤리를 가능한 고속으로 주행시키고, 트롤리가 목표점에 도달했을 때 화물의 흔들림을 빠른 시간 내에 제어하는 퍼지제어기의 설계 기법을 제안하였다. 그리고 제안한 퍼지제어기를 종래의 제어기와 비교하기 위해서 최적제어기를 설계하였으며 여러 가지 모의 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

계단상 기준입력에 대해서는 퍼지제어기가 최적제어기에 비해 목표치 도달시간이 상당히 단축되었으며 정상편차 없이 안정한 제어 결과를 얻을 수 있었다. 외란에 대해서도 퍼지제어기는 최적제어기에 비해 외란이 가해진 후 목표치 도달시간이 상당히 단축되었다. 파라미터 변화에 대해서는 퍼지제어기가 최적제어기 보다 오버슈트가 다소 크나 도달시간은 거의 비슷했다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 본 연구에서 제안한 퍼지제어기를 좀 더 개선하여 실용화하면 컨테이너 크레인의 하

역효율 향상에도 큰 도움을 주리라 생각한다.

참고문헌

- [1] G. A. Manson, "Time optimal control methods arising from the study of over head cranes", Ph. D. Thesis, Univ. of Strathclyde, Glasgow, U.K., 1977
- [2] O. Yamaguchi, "Anti-swing control of overhead crane", 材料また Process, Vol. 7, pp. 347, 1994
- [3] 윤지섭, 박병석, 이재설, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구", KACC, Vol. 1, pp. 292~297, 1990
- [4] 홍금식, 이신섭, "크레인 진자계의 최적 제어", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 832~837, 1995
- [5] M. Sugeno and K. Muramaki, "Fuzzy Parking Control of Model Car", in 23th IEEE Conf. on Decision and Control, Lasvegas, 1984

저 자 소 개



신선균(辛善均)

1973년 4월생. 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 2000년 동 대학원 기관공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 기관공학과 박사 재학 중.



최재준(崔在俊)

1959년 5월생. 1985년 한국방송통신대학교 졸업. 1989년 고려대학교 대학원 졸업(석사). 현재 한국항공연구원 교수.



소명옥(蘇明玉)

1958년 6월생. 1980년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 동 대학원 기관공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 기관공학과 졸업(박사). 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 조교수.