

RCGA 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 최적 상태 피드백 제어

이윤형* · 유희한** · 조권희*** · † 소명옥****

*한국해양대학교 대학원, **, ****한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수, ***한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

Optimal State Feedback Control of Container Crane Using RCGA Technique

Yun-Hyung Lee* · Heui-Han Yoo** · Kwon-Hae Cho*** · † Myung-Ok So****

*Graduate school of National Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

** , ****Division of Mechatronics engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

***Division of Marine system engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요 약 : 항만의 하역 향상성을 위해 그동안 컨테이너 크레인의 작업효율을 높이는 연구가 진행되어 왔다. 특히 화물이 목표치에 도달했을 때 흔들림을 단시간에 제어하는 데 초점이 맞추어져 왔다. 일반적으로 컨테이너 크레인을 제어하기 위해서 PID 제어나 LQ제어가 주로 사용되었는데, 이는 제어기 설계가 용이하고, 주어진 제어 환경 하에서 우수한 제어성능을 발휘하기 때문이다. 본 연구에서는 LQ 제어의 관점에서 실수코딩 유전알고리즘을 이용한 상태 피드백 제어기의 설계 방법을 제안한다. 즉, 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 상태 피드백 이득을 탐색하는 방법이다. 실수코딩 유전알고리즘은 주어진 목적함수가 최소가 되도록 상태 피드백 이득을 최적으로 탐색한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 이렇게 탐색한 상태 피드백 이득을 컨테이너 크레인의 선형 및 비선형 모델에 적용하여 그 유효성을 확인한다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 실수코딩 유전알고리즘, 상태 피드백 제어, 목적함수

Abstract : The container crane is one of the most important equipments at container terminal. If its working time in cycle could be reduced then container terminal efficiency and service level can be increased. So there are many efforts to reduce working time of container cranes. It means how to design the controller with good performance which has small overshoot and swing motion of container crane. We, in this paper, present a state feedback controller based on LQ theory incorporating a RCGA which means real-coded genetic algorithm. RCGA can search state feedback gains under given objective function. A set of simulation works are carried out in order to prove the control effectiveness of the proposed methods.

Key words : Container crane, Real-coded genetic algorithm, State feedback control, Objective function

1. 서 론

전체 컨테이너 항만의 하역효율은 컨테이너 크레인(Container crane)의 작업효율에 전적으로 의존한다. 작업효율을 높일 수 있는 방법은 화물이동 속도를 높이는 방법과 화물의 목표위치 근처에서 감·가속으로 인해 발생하는 화물의 흔들림을 단시간에 제어하는 방법이 있다. 전자의 방법은 전동기의 용량 및 크레인 조건 등으로 현재 한계에 이르렀고, 후자의 방법으로 효율을 높이기 위해 흔들림 방지장치(Anti-sway device)를 개발하여 설치하고 있다.

컨테이너 크레인의 흔들림 제어를 위한 초기의 연구 형태로는 크레인의 로프 길이가 일정일 경우의 흔들림 방지 최단시간 제어(美多, 1979)와 진동 각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 궤환시켜 제어한 피드백 제어(Ridout, 1987)가 있

다. 또한 크레인의 진동과 위치제어에 모델기준 적응제어(Sagara, 1990; 相良愼, 1990)등이 있다. 최근에는 PID 제어나 LQ 제어(손, 2002)를 많이 사용하는데, 이는 제어기 설계가 용이하고 주어진 제어환경 내에서 어느 정도 우수한 제어성능을 발휘하기 때문이다.

본 논문의 목적은 트롤리를 신속하게 목표위치로 이동하게 하면서 목표치 도달 시 화물의 흔들림을 단시간에 제어하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm ; RCGA)을 이용한 상태 피드백 제어를 사용한다. 상태 피드백 제어는 상태피드백 이득행렬을 구하는 문제로 귀착되는데, 그 대표적인 LQ 제어에서는 Riccati 해 행렬을 구해 이득행렬을 구한다. 그러나 본 연구에서는 기존의 LQ 제어에 사용하는 2차형식의 평가함수를 RCGA의 목적함수 형태로 채택하여 이득행렬을 탐색하는 기

* 대표저자 : 이윤형(정회원), domse54@hanmail.net 051)410-4877

** 정회원, yoohh@mail.hhu.ac.kr 051)410-4841

*** 정회원, khcho@hhu.ac.kr 051)410-4252

† 교신저자 : 소명옥(종신회원), smo@hhu.ac.kr 051)410-4248

법을 제안한다. 편의상 컨테이너 크레인 시스템을 호이스트 와이어 로프의 길이에 따라 3개의 서브-시스템으로 구분하여 상태 피드백 제어기를 설계한다.

이와 같이 설계된 상태 피드백 제어기를 선형 및 비선형 모델에 적용하고, 시뮬레이션을 실시하여 제안한 방법의 유효성을 입증한다.

2. 컨테이너 크레인 모델

여기서는 컨테이너 크레인의 실제 제어대상이 되는 트롤리와 컨테이너 운동에 대해서만 고려한다. 또한 트롤리 모터 구동부까지 모델링하여 보다 더 산업현장의 플랜트와 가까운 모델이 되도록 한다.

2.1 비선형 모델

트롤리와 컨테이너의 비선형 운동방정식을 구하여 트롤리의 가속도 \ddot{z} , 컨테이너의 흔들림 각가속도 $\ddot{\theta}$ 에 관하여 정리하면 아래의 식과 같다(손, 2002).

$$\ddot{z} = \frac{-lF}{ml \cos^2 \theta - l(M+m)} + \frac{mlg \sin \theta \cos \theta}{ml \cos^2 \theta - l(M+m)} + \frac{ml^2 \sin \theta \dot{\theta}^2 + lc_1 \dot{z} - \cos \theta c_2 \dot{\theta}}{ml \cos^2 \theta - l(M+m)} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(M+m)mlg \sin \theta - ml \cos \theta (F - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta - c_1 \dot{z}) - (M+m)c_2 \dot{\theta}}{m^2 l^2 \cos^2 \theta - ml^2 (M+m)} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로 나타나는 비선형 운동 방정식에서 트롤리에 미치는 힘 F 와 구동 모터에 인가되는 전압 u 의 관계를 구하고, 감속 기어박스도 제어대상에 포함시켜 모델링하면 다음과 같은 식 (3)과 (4)를 얻을 수 있다(손, 2002). Table 1은 컨테이너 크레인 시스템 파라미터 및 상수를 표시한 것이다.

$$\ddot{z} = \frac{-l}{ml \cos^2 \theta - l(M+m)} \left(\frac{K_g K_m}{R_a r_d} u - \frac{K_g^2 K_m^2}{R_a^2 r_d^2} \dot{z} \right) + \frac{mlg \sin \theta \cos \theta + ml^2 \sin \theta \dot{\theta}^2 + lc_1 \dot{z} - \cos \theta c_2 \dot{\theta}}{ml \cos^2 \theta - l(M+m)} \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mlg \sin \theta (M+m)}{m^2 l^2 \cos^2 \theta - ml^2 (M+m)} - \frac{ml \cos \theta \left\{ \left(\frac{K_g K_m}{R_a r_d} u - \frac{K_g^2 K_m^2}{R_a^2 r_d^2} \dot{z} \right) - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta - c_1 \dot{z} \right\}}{m^2 l^2 \cos^2 \theta - ml^2 (M+m)} - \frac{(M+m)c_2 \dot{\theta}}{m^2 l^2 \cos^2 \theta - ml^2 (M+m)} \quad (4)$$

Table 1 Parameters of container crane system

Parameters & constants	Description	Value[unit]
K_g	기어박스 기어비	3.7
K_m	모터 토크 상수	0.00767[V/rad/s]
m	컨테이너 질량	0.21[kg]
M	트롤리 질량	0.455[kg]
R_a	모터 전기자 저항	2.6[Ω]
r_d	와이어 드럼 반경	0.00635[m]
g	중력가속도	9.8[m/s ²]
l	와이어 로프 길이	0.4, 1.2, 2.0 [m]

2.2 선형 모델의 상태공간 해석

컨테이너 크레인의 수학적 비선형 모델 식 (3)과 (4)에서 $c_1 \dot{z}$ 와 $c_2 \dot{\theta}$ 는 미소하므로 무시하고, $\theta \cong 0$ 근방에서 선형으로 근사화 한 후, 상태변수 $x_1 = z$, $x_2 = \dot{z}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$ 로 정의하여 상태 방정식 형태의 동적방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5)$$

$$y = Cx$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{MR_a r_d^2} & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{MR_a r_d^2} & -\frac{(M+m)g}{M} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_g K_m}{MR_a r_d} \\ 0 \\ \frac{K_g K_m}{MR_a r_d} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$$

동적시스템을 해석하고 설계하기 위해서는 해당 시스템의 제어 가능성과 상태 관측 가능성을 조사하는 것이 필요한데, 식 (5)로 표현되는 컨테이너 크레인 선형 모델은 가제어하고, 가관측하다.

컨테이너 크레인은 호이스트 와이어로프의 길이 l 에 따라서 시스템이 변하므로 본 연구에서는 l 의 변동 폭을 편의상 0.4[m]에서 2.0[m]로 가정한다.

$l = 0.4$ [m]일 때를 서브-모델(Sub-model) SM1, $l = 1.2$ [m]일 때를 SM2, $l = 2.0$ [m]일 때를 SM3라 정의하고, Table 1의 파라미터 및 상수를 이용하면 호이스트 와이어로프의 길이 l 에 따른 컨테이너 크레인의 선형 서브-모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{SM1 ; } A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -16.883 & -4.566 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -42.208 & -35.915 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.777 \\ 0 \\ 9.444 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{SM2 ; } A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -16.883 & -4.566 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -14.069 & -11.971 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.777 \\ 0 \\ 3.148 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{SM3 ; } A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -16.883 & -4.566 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -8.441 & -7.183 & 0 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.777 \\ 0 \\ 1.888 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_i = [1000] \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

이제 식 (5)로 표현되는 컨테이너 크레인 시스템을 목표위치 추적(tracking) 문제로 가져가기 위해 상태 x_1, x_2, x_3, x_4 와 그것의 각 정상상태의 값 $x_{1r}, x_{2r}, x_{3r}, x_{4r}$ 와의 오차신호를 식 (10)과 같이 정의하고, 오차시스템에 대한 동적방정식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\Delta x = x - x_r, \quad \Delta u = u - u_r, \quad \Delta y = y - y_r \quad (10)$$

단, $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$, $x_r = [x_{1r} \ x_{2r} \ x_{3r} \ x_{4r}]^T$ 이고 y_r 은 트롤리 위치에 대한 기준입력이다.

$$\Delta \dot{x} = A_i \Delta x + B_i \Delta u_i \quad (11)$$

$$\Delta y = C_i \Delta x \quad (i=1, 2, 3)$$

식 (10)의 x_r 과 u_r 은 식 (12)로부터 구할 수 있으며, 이때 정상상태 초기값은 $x_{1r} = y_r, x_{2r} = x_{3r} = x_{4r} = 0$ 이다.

$$\begin{bmatrix} x_r \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ y_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. RCGA에 기초한 상태 피드백 제어기

3.1 최적 상태 피드백 제어

오차시스템에 대한 동적방정식에서 식 (13)과 같은 2차 형식의 평가함수를 최소화 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 제어 입력은 식 (14)와 같이 주어진다.

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta x^T Q_i \Delta x + \Delta u_i^T R_i \Delta u_i) dt \quad (13)$$

$$\Delta u_i = -K_i \Delta x \quad (14)$$

여기서, Q_i 와 R_i 은 각각 하중행렬과 하중계수이다.

본 연구에서는 식 (14)의 상태 피드백 이득 K_i 를 결정하기 위해서 Riccati 방정식의 해 행렬을 구하는 대신에 Fig. 1과 같이 RCGA(진,2004)를 이용한다.

일반적으로 유전알고리즘(genetic algorithms ; GAs)은 이진코딩 유전알고리즘(Binary-coded genetic algorithm ; BCGA)을 많이 사용해 왔다. 그러나 BCGA는 실수를 이진수로 변환시키는 부호화 과정과 진화 후 다시 이진수를 실수로 변환시키는 복호화 과정이 있어 연산시간이 오래 걸리고, 해의 정밀도를 높이기 위해서는 비트(bit)의 길이를 늘려야 하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 개선시킨 RCGA를 사용한다. RCGA는 실수코딩을 채용하기 때문에 탐색하는 파라미터와 염색체의 유전자가 바로 일대일로 대응되며, 염색체는 $s = (k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4})$ 이 된다.

RCGA는 진화를 거듭하면서 집단 내 우열을 판단하기 위해서 목적함수가 필요하게 되는데 식 (13)과 같은 2차 형식을 사용하며, 최종 적분시간은 시스템의 특성과 연산시간을 고려하여 적절이 선택된다.

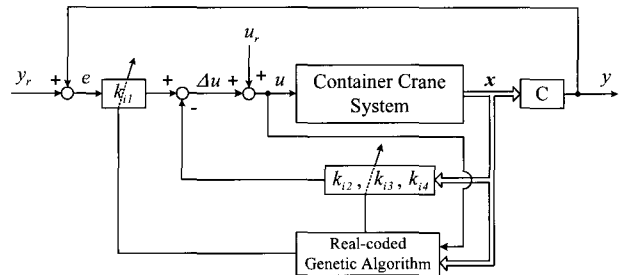


Fig. 1 Optimization of state feedback gain using RCGA

RCGA의 목적함수에서 하중행렬 Q_i 와 하중계수 R_i 는 상태벡터와 제어입력의 상대적인 중요성에 근거를 두어 바라는 제어응답이 되도록 다음과 같이 선정하였다.

$$Q_1 = \text{diag}(8.5, 1, 5, 1), R_1 = 0.05 \quad (15)$$

$$Q_2 = \text{diag}(10, 3.5, 40, 2), R_2 = 0.05 \quad (16)$$

$$Q_3 = \text{diag}(12, 7, 120, 9), R_3 = 0.05 \quad (17)$$

3.2 RCGA에 기초한 피드백 이득 행렬 탐색

컨테이너 크레인의 제어에 앞서 RCGA를 이용해서 상태 피드백 이득 행렬 K_i 를 탐색한다.

RCGA의 유전 연산자로는 구배와 유사한 재생산(진, 2004), 수정단순교배, 동적돌연변이를 사용하였고, 탐색압(Selection pressure)을 높이기 위하여 스케일링 윈도우법(Grefenstette, 1986), 한 세대의 최적 개체 소멸을 방지하여 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장하기 위해 엘리트전략을

사용하였다. 이때 RCGA의 제어변수는 집단의 크기 $N=20$, 재생산계수 $\eta=1.8$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 가 사용되었다. K_i 는 독립된 씨드(seed)로 프로그램을 3번 실행하고 구한 값들을 평균하여 사용한다.

Fig. 2에서 Fig. 4는 각각 K_1 , K_2 , K_3 을 탐색하는 과정을 보인다.

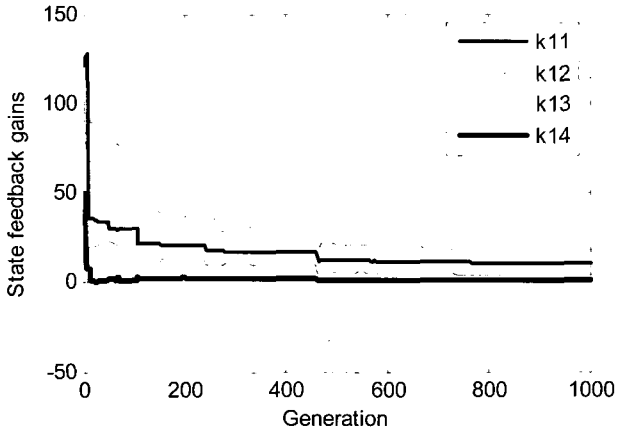


Fig. 2 Searching process of K_1

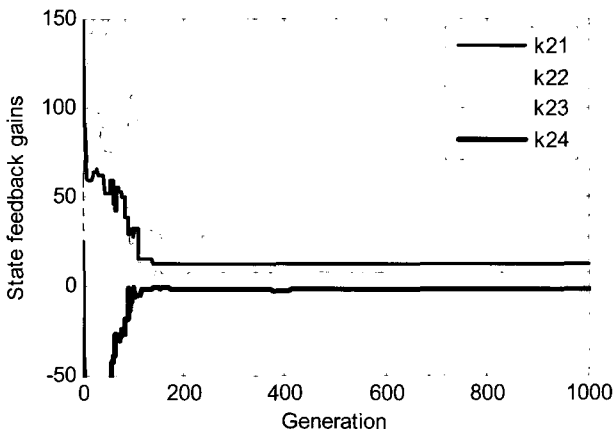


Fig. 3 Searching process of K_2

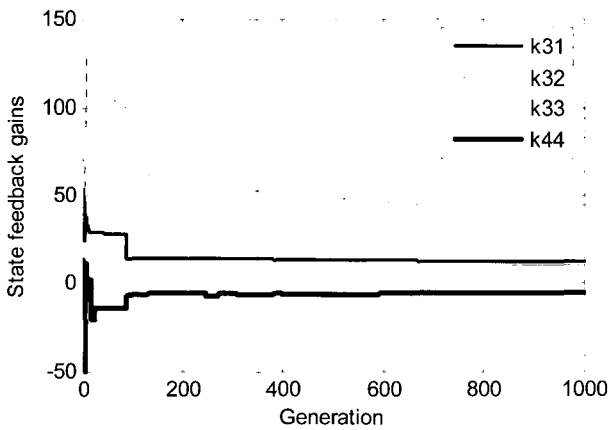


Fig. 4 Searching process of K_3

최종적으로 얻어진 서브-모델(SM1, SM2, SM3)에 대한 상태 피드백 이득 행렬은 다음과 같다.

$$K_1 = [10.910 \ 4.305 \ 17.996 \ 1.357] \quad (18)$$

$$K_2 = [12.334 \ 7.688 \ 27.518 \ -2.014] \quad (19)$$

$$K_3 = [12.737 \ 10.824 \ 44.370 \ -5.402] \quad (20)$$

4. 시뮬레이션 및 고찰

4.1 기준입력 변화에 대한 고찰

시뮬레이션은 0.01[s]의 샘플링 시간으로 비선형 모델 (Nonlinear model ; NLM)과 서브-모델(SM1, SM2, SM3)에 대해 실시하였다. 기준입력 변화에 대한 제어기 성능을 알아보기 위하여 초기위치 0[m]에서 전진방향으로 목표위치 3[m]의 기준입력을 가하고, 다시 10초 후에 후진방향으로 3[m]의 제단상 기준입력을 가하였다.

Fig. 5는 서브-모델 SM1에 대해 설계된 제어기 이득 K_1 을 SM1에 적용하여 시뮬레이션 한 경우이다. Fig. 6은 서브-모델 SM2에 대해 설계된 제어기 이득 K_2 를 SM2에, Fig. 7은 서브-모델 SM3에 대해 설계된 제어기 이득 K_3 를 SM3에 적용한 것이다. 각 그림에서 (a)는 트롤리의 위치, (b)는 컨테이너의 흔들림 각도, (c)는 구동모터에 인가되는 제어입력인 전압을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이, 각각의 서브-모델에 대해 각각의 상태 피드백 제어기는 만족스러운 응답특성을 보이고 있다.

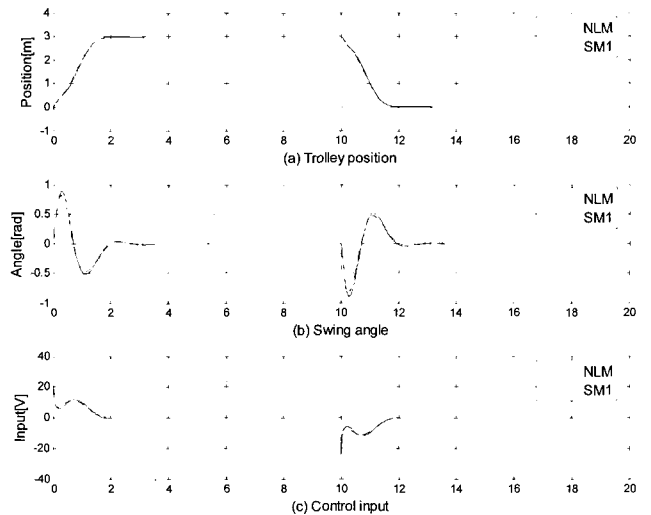


Fig. 5 Step responses and control inputs with K_1 and SM1

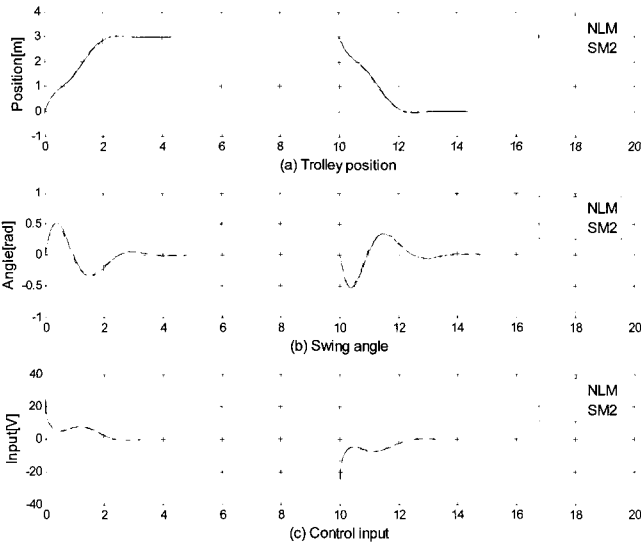


Fig. 6 Step responses and control inputs with K_2 and SM2

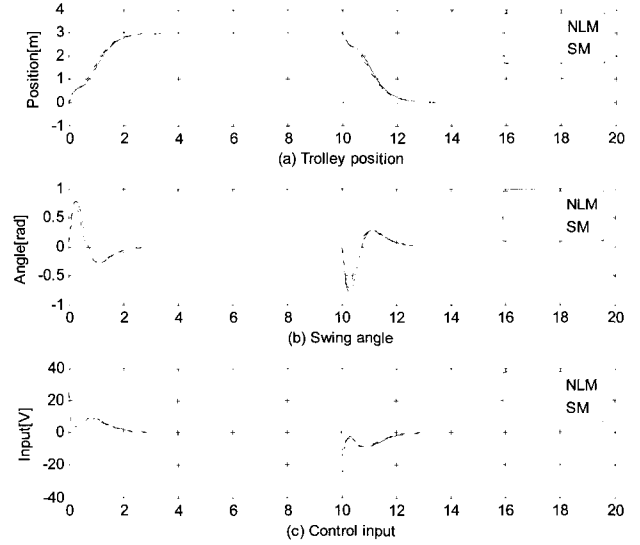


Fig. 8 Step responses and control inputs (Stepwise change of parameter l : -50%)

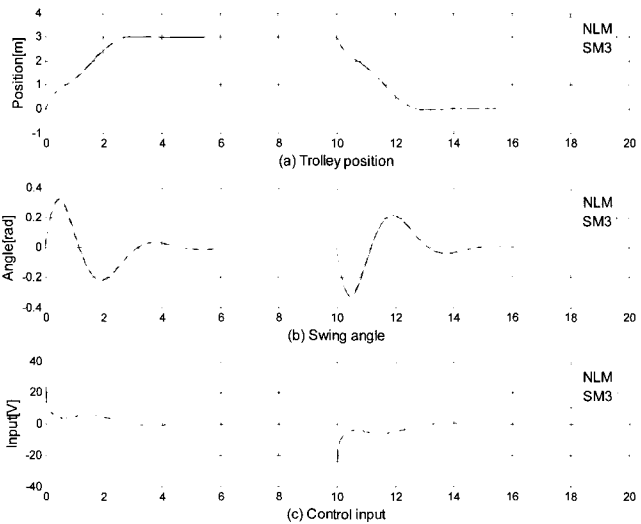


Fig. 7 Step responses and control inputs with K_3 and SM3

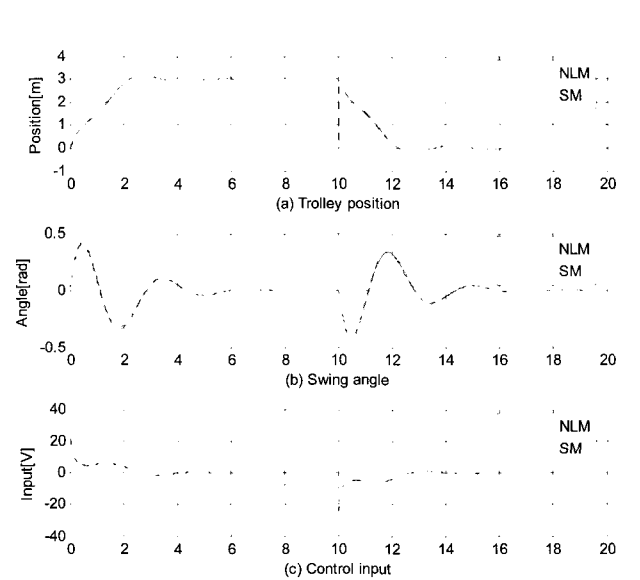


Fig. 9 Step responses and control inputs (Stepwise change of parameter l : +50%)

4.2 파라미터 변화에 대한 고찰

다음으로 파라미터 변화에 대해서 고려해보기로 한다. 파라미터 변화는 트롤리 와이어 로프 길이의 변화나, 화물 질량 변화가 대표적이거나 여기서는 와이어 로프 길이의 변화만을 생각한다. 여기서는 와이어 로프 길이가 기준(1.2[m])보다 각각 $\pm 50\%$ 로 변하는 경우로 가정한다.

Fig. 8은 와이어 로프가 50[%] 감소한 시스템에 서브-모델 SM2에서 설계된 제어이득 K_2 를 적용하여 시뮬레이션 한 것이다. 이 경우 정상상태 도달시간이 약 3[s]가 되어 Fig. 5의 도달시간 1.7[s]에 비해 1.3[s] 정도 늦다.

Fig. 9는 와이어 로프가 50[%] 증가한 시스템에 서브-모델 SM2에서 설계된 제어이득 K_2 를 적용하여 시뮬레이션 한 것으로서 Fig. 7에 비해 오버슈트가 상당히 크게 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 컨테이너 크레인의 수학적 모델을 바탕으로 기존의 Riccati 방정식을 풀지 않고 제어기의 이득을 구하는 RCGA에 기초한 최적 상태 피드백 제어기를 설계하였다. 시뮬레이션 결과 서브-모델로부터 설계된 제어기는 각각의 모델에 대해서 양호한 응답특성을 나타내어 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있었다. 그러나 각 서브-모델에서 설계한 제어기는 호이스트 와이어 로프 길이가 변화한 경우 만족스러운 응답을 나타내지 못했다. 따라서 향후 각각의 서브-모델에서 구한 제어기 이득을 융합하여 파라미터 변화에 대해서도 양호한 제어성능을 보이는 제어기 설계에 관한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

후 기

이 연구는 한국해양대학교 신진교수연구비의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] 손정기, 최재준, 소명옥, 남택근, 권순재(2002), "LQ 제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계", 한국박용기관학회지, 제26권, 5호, pp. 544-553.
- [2] 진강규(2004), "유전알고리즘과 그 응용", 교우사
- [3] 多美, 金井(1979), "トロリの最大速度に注目したクレーンの最適運轉法", 計測自動制御學會論文集, 1-6, pp.833-838.
- [4] 相良慎, 大川不二夫(1990), "クレーンの最適制御", 日本機械學會論文集(C編), No.56, pp.1443-1447.
- [5] Grefenstette, J. J.(1986), "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-16, No. 1, pp. 122-128.
- [6] Ridout, A. J.(1987), "New Feedback Control System for Overhead Cranes", Electric Energy Conference, Adelaide, pp.135-140.
- [7] Sagara, S. and Ohkawa, F. (1990) "Adaptive Control for Cranes", 日本機械學會論文集(C編), No.89, pp.150-154.

원고접수일 : 2006년 12월 28일

원고채택일 : 2007년 3월 20일