

컨테이너 크레인을 위한 RCGA기반 상태관측기 설계

안종갑* · 이윤형* · 류기탁** · 유희한*** · 소명옥†

(원고접수일 : 2007년 12월 27일, 심사완료일 : 2008년 3월 10일)

RCGA-Based State Observer Design for Container Cranes

Jong-Kap Ahn* · Yun-Hyung Lee* · Ki-Tak Ryu** · Heui-Han Yoo*** · Myung-Ok So†

Abstract : This paper presents a scheme for designing a state observer for container cranes. If the system is completely observable with a given set of outputs, then it is possible to determine the states that are not directly measured. We consider the reduced-order states observer with only trolley position detection and with trolley position and container angle detection. The gain matrix of the each state observer is adjusted using a RCGAs. A set of simulation works is carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

Key words : Container crane(컨테이너 크레인), State observer(상태 관측기), Reduced-order state observer(축소차수 상태 관측기), Real-Coded Genetic Algorithm(실수코딩 유전 알고리즘)

1. 서 론

전체 해상운송 물류에서의 병목현상이 선박과 육상의 컨테이너를 적화 및 양화하는 컨테이너 크레인에서 나타나고 있다. 이런 체화현상을 효율적으로 감소시키기 위한 하나의 방법으로 컨테이너 크레인의 트롤리가 목표지점에 도달했을 때 스프레더와 컨테이너의 흔들림을 가능한 짧은 시간 내에 제어하는 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}.

컨테이너 크레인을 포함한 대부분의 제어 시스템은 일반적으로 시스템에 가해지는 입력에 대하여 바람직한 성능을 보이고 설계 방법과 안정성에 대

한 증명이 잘 정립되어 있어 폭넓게 사용되고 있는 상태 피드백 제어 시스템을 사용한다. 이를 설계하기 위해서는 상태 변수들이 적절한 장치를 통하여 피드백될 수 있어야 한다. 시스템에 따라서는 상태변수 중 일부를 전혀 측정할 수 없거나 측정된 상태변수를 사용하여 제어 시스템을 구성하기에는 경제적, 기술적인 이유로 측정하여 사용하기가 어려운 상태변수들이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 직접 측정된 상태변수 대신에 상태변수들을 추정(estimation)하고, 추정된 상태변수들을 이용하여 제어 시스템을 구성하는 것이다.

* 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부), E-mail: smo@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4248

* 한국항만연수원 부산연수원

** 한국해양수산연수원

*** 한국해양대학교 선박전자기계공학부

본 논문에서는 컨테이너 크레인에서 측정이 까다롭거나 측정 잡음이 클 것으로 예상되는 상태변수를 추정하는 방법으로 상태관측기를 설계하고자 한다. 이를 위해 측정가능한 상태변수를 제외하고 단지 측정할 수 없는 상태변수만 추정하는 축소차수 상태관측기(Reduced-order state observer)에 대해서 알아본다. 축소차수 상태관측기의 경우 컨테이너 크레인의 트롤리 위치만 측정 가능한 경우, 트롤리 위치와 컨테이너의 흔들림을 측정 가능한 경우로 나누어 설계한다.

그리고 상태관측기 이득행렬 즉, 측정된 출력과 추정된 출력의 차이로 구성된 보정항의 가중행렬을 선정함에 있어 최근 강인한 탐색법으로 많이 사용되는 실수코딩유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithms : RCGAs)을 사용한다.

2. 컨테이너 크레인 시스템

컨테이너 크레인의 흔들림 각 θ 의 변화가 미소하다고 가정하여 $\dot{\theta} \approx 0$ 근방에서 선형화한다. 트롤리의 이동속도에 비례하는 마찰력 $c_1\dot{z}$ 와 호이스트용 와이어로프가 흔들림으로 발생되는 마찰력 $c_2\dot{\theta}$ 는 미소하므로 이를 무시하면 운동방정식은 (1), (2)와 같다^[1].

$$\ddot{z} = -\frac{K_g^2 K_m^2}{M R_a r_d^2} \dot{z} - \frac{mg}{M} \theta + \frac{K_g K_m}{M R_a r_d} u \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_g^2 K_m^2}{M R_a r_d^2} \dot{z} - \frac{(M+m)g}{M} \theta + \frac{K_g K_m}{M R_a r_d} u \quad (2)$$

상기 식에서 $x_1 = z$ (트롤리 위치), $x_2 = \theta$ (흔들림 각), $x_3 = \dot{z}$ (트롤리 속도), $x_4 = \dot{\theta}$ (흔들림 각속도)로 상태변수를 정의하고, 상태방정식으로 간단히 표현하면 (3)과 같다. 여기서 u 는 구동모터에 인가되는 전압이다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

$$y = Cx$$

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

$$C = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1]), \ x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$$

제어기 설계를 위한 컨테이너 크레인 시스템의 파라미터 값들은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of container cranes system

Parameters	Value	Unit
K_g	3.7	
K_m	0.00767	[V/rad/s]
m	0.21	[kg]
M	0.455	[kg]
R_a	2.6	[Ω]
r_d	0.00635	[m]
g	9.8	[m/s ²]
l	1.2	[m]

컨테이너 크레인의 가관측행렬을 구성했을 때 랭크(Rank)가 $\rho=4$ 로 가관측함을 알 수 있다.

3. 실수코딩 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithm:GA)은 1975년 J. H. Holland 교수에 의해 처음 소개되었다^[3].

GA가 기존의 탐색법과 다른 점은 파라미터 자체를 사용하기보다는 이를 기호로 표현한다는 것과, 하나의 해를 다루기보다는 해 집단을 취급한다는 점이다. 그리고 연산자들이 확률에 기초하여 동작되므로, 얻어지는 결과는 결정적이기보다는 확률적이라는 특징도 가진다. 다양한 최적화 문제를 해결하기 위하여 여러 종류의 유전알고리즘이 발표되었으나, 초기 해 집단의 생성, 집단내 개체들의 적합도 평가, 기본 연산자의 사용과 같은 기본적인 메카니즘은 서로 유사하다. 유전알고리즘의 탐색

과정은 크게 집단의 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다^[4].

본 논문에서는 변수(표현형)와 유전자(유전자형) 간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있는 실수코딩 염색체를 다루는 RCGAs를 사용하기로 한다. 기본 유전 연산자^[5]로는 구배와 유사한 재생산, 수정단순교배, 동적돌연변이를 사용한다. 또한, 초기 세대에서는 우량 개체의 적합도 영향을 줄일 수 있도록 개체들의 적합도 값을 넓은 범위의 값 위로 분포시키고, 후기 세대에는 더 적합한 개체들이 더 많이 선택될 수 있도록 분포시키는 선형 스케일링을 사용한다. 그리고 탐색 성능을 높이기 위해 엘리티즘 전략을 사용하였다.

4. RCGA 기반의 관측기 설계

(3)과 같은 컨테이너 크레인 시스템에 대하여 모든 상태 변수를 측정할 수 있고, (4)와 같은 상태 피드백 제어법칙을 사용한다.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4)$$

여기서 K 는 (1×4) 제어이득행렬로서 시행착오에 의해 (5)와 같이 선정하였다.

$$K = [14.142136 \ 31.634058 \ 9.395075 \ -2.479388] \quad (5)$$

또한, 관측기의 수학적 모델은 (6)과 같이 정의 된다.

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} + Bu + Ly \quad (6)$$

여기서 L 은 관측기 이득행렬이다.

상태관측기에는 계측된 상태변수를 비롯한 시스템의 모든 상태변수를 관측하는 전차수 상태관측기와 직접 계측할 수 있는 상태변수를 제외하고 단지 계측할 수 없는 상태변수만을 관측하는 축소차수 상태관측기가 있다. 본 논문에서는 컨테이너 크레인의 컨테이너 흔들림 측정 센서의 부착여부에 관심을 갖고 축소차수 상태관측기 부분만 다루기로 한다.

4.1 축소차수 상태관측기

시스템 내부의 상태변수 중 직접 측정할 수 있는 상태변수의 경우 복잡한 수식을 이용하여 추정한다는 것은 아무런 의미가 없다. 따라서 이 절에서는 트롤리의 위치를 정확하게 측정하여 3개의 상태변수를 추정하는 문제와 2개의 상태 즉, 위치와 각도를 측정하여 속도와 각속도를 추정하는 문제를 다룬다.

본 논문에서 다루는 계측가능한 상태변수가 두 개인 경우도 하나인 경우와 유사하므로, 시스템의 계측가능한 상태변수가 하나인 경우에 대하여 간단하게 살펴본다. (3)에서 상태벡터 x 를 직접 측정할 수 있는 x_a 와 측정할 수 없는 x_b 로 (7)과 같이 두 부분으로 나눌 수 있으며,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dots \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ \dots \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ \dots \\ B_b \end{bmatrix} u \quad (7)$$

$$y = [1 : 0] \begin{bmatrix} x_a \\ \dots \\ x_b \end{bmatrix}$$

(8)의 축소차수 상태관측기 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_b &= (A_{bb} - LA_{ab})\tilde{x}_b + A_{ba}x_a + B_bu \\ &\quad + L[x_a - A_{aa}x_a - B_a u] \end{aligned} \quad (8)$$

(8)에서 보면 $\dot{\tilde{x}}_b$ 를 추정하기 위해서는 x_a 의 미분치를 필요로 한다. 미분치 \dot{x}_a 를 직접 사용하면 잡음의 영향이 커질 수 있어 바람직하지 않으므로 (9)와 같이 새로운 변수를 정의한다.

$$\eta = x_b - Lx_a, \quad \dot{\eta} = \dot{x}_b - L\dot{x}_a \quad (9)$$

그러면 (8)은 (10)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\eta}} &= (A_{bb} - LA_{ab})\tilde{\eta} \\ &\quad + [(A_{bb} - LA_{ab})L + A_{ba} - LA_{aa}]y \\ &\quad + (B_b - LB_a)u \end{aligned} \quad (10)$$

최종적으로 추정된 상태변수는 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{x}_b = \tilde{\eta} + Ly \quad (11)$$

그리고 관측기 오차방정식은 (12)로 쓸 수 있다.

$$e = x_b - \tilde{x}_b = \eta - \tilde{\eta} \quad (12)$$

$$\dot{e} = (A_{bb} - LA_{ab})e$$

오차벡터(e)의 동역학이 점근안정하고 충분히 빨리 수렴하도록 RCGAs를 이용하여 관측기 이득행렬 L 을 구한다. 이때 L 은 (13)의 목적함수 값이 최소가 되도록 선정된다.

$$J = \int_0^{t_f} \|e(t)\| dt \quad (13)$$

4.2.1 3개의 상태변수 추정

이 경우는 컨테이너의 트롤리 위치만을 측정하여 시스템을 제어하고자 관측기를 설계한다.

(3)의 A , B , C , x 행렬을 측정할 수 있는 트롤리 위치와 측정할 수 없는 나머지 부분으로 나누면 (14)와 같다.

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

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad x = [x_1 : x_2 : x_3 \ x_4]^T \quad (14)$$

관측기 이득행렬 L 을 탐색하기 위한 RCGAs의 목적함수는 (15)와 같다.

$$J_1 = \int_0^{t_f} (\|x_2 - \tilde{x}_2\| + \|x_3 - \tilde{x}_3\| + \|x_4 - \tilde{x}_4\|) dt \quad (15)$$

4.2.2 2개의 상태변수 추정

이 경우는 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림을 측정하는 장치를 설치하고, 신호 대 잡음비가 감소

되지 않도록 각 신호를 미분하지 않고 속도와 각속도를 추정하여 컨테이너 크레인을 제어하고자 관측기를 설계한다.

(3)의 A , B , C , x 행렬을 측정할 수 있는 트롤리 위치와 측정할 수 없는 나머지 부분으로 나누면 (16)과 같다.

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

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x = [x_1 \ x_2 : x_3 \ x_4]^T \quad (16)$$

관측기 이득행렬 L 을 탐색하기 위한 RCGAs의 목적함수는 (17)과 같다.

$$J_2 = \int_0^{t_f} (\|x_3 - \tilde{x}_3\| + \|x_4 - \tilde{x}_4\|) dt \quad (17)$$

5. 시뮬레이션

5.1 RCGA를 이용한 관측기 이득행렬 탐색

■ 3개의 상태관측기 이득행렬 탐색

사용된 RCGAs의 제어변수로는 집단의 크기 $N=50$, 재생산계수 $\eta=1.8$, 교배확률 $P_c=0.95$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 가 사용되었다. 미지의 이득행렬 탐색구간은 $-100 \leq L \leq 100$ 으로 한다. 이때 시스템의 초기값 $x=[0 \ 0.5 \ 0 \ 0]$ 로 하고, 관측기의 초기값은 모두 0으로 한다.

(18)의 탐색 결과를 얻었다.

$$L = [-48.661120 \ -0.051734 \ 29.897404]' \quad (18)$$

(12)에서 $(A_{bb} - LA_{ab})$ 의 고유치를 구해보면 $[-8.41 \pm 12.69i \ -0.00878]$ 로 모두 복소평면의 좌반에 위치하고 있음을 알 수 있다.

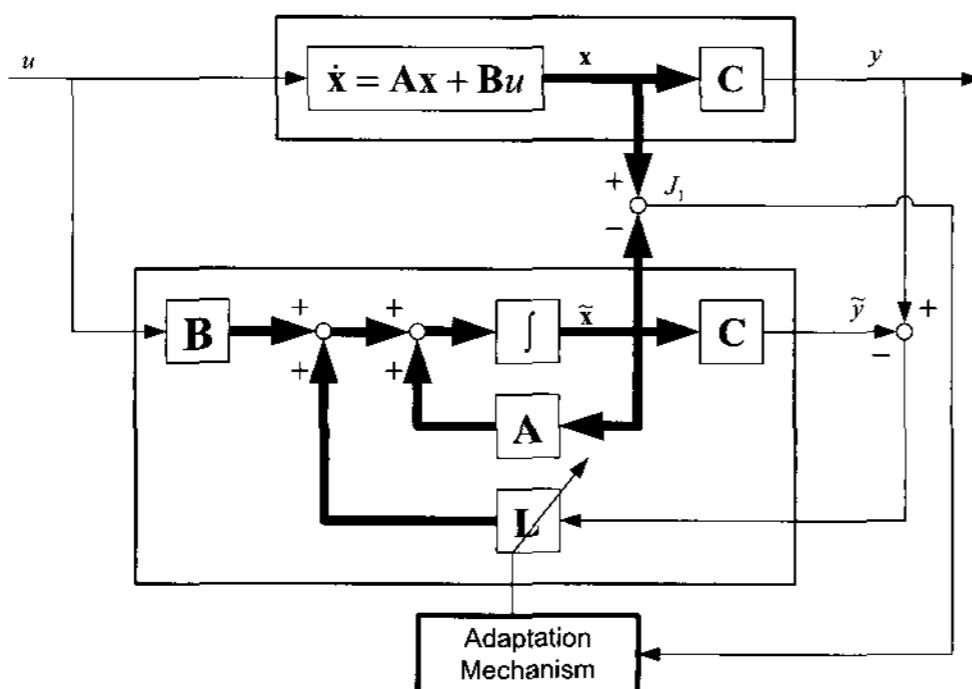


Fig. 1 Optimization of the state observer gain matrix using RCGAs(x_1 detection)

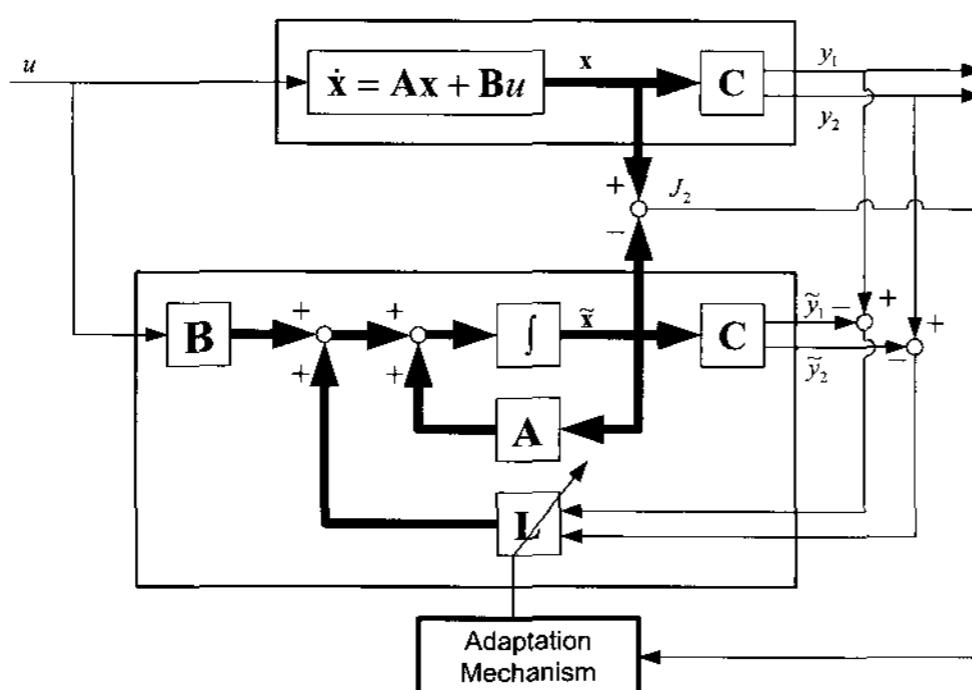


Fig. 2 Optimization of the state observer gain matrix using RCGAs(x_1, x_2 detection)

■ 2개의 상태관측기 이득행렬 탐색

사용된 RCGAs의 제어변수 및 탐색구간은 모두 앞서 언급한 3개의 상태관측기 이득행렬을 탐색할 때와 동일하게 사용하였다. 시스템의 초기값과 관측기의 초기값은 모두 0으로 한다.

(19)의 탐색 결과를 얻었다.

$$L = \begin{bmatrix} 39.224282 & 12.796620 \\ -28.629656 & -0.000005 \end{bmatrix} \quad (19)$$

(12)에서 $(A_{bb} - LA_{ab})$ 의 고유치를 구해보면 $[-52.56 -3.54]$ 로 모두 복소평면의 좌반에 위치하고 있음을 알 수 있다.

5.2 응답

컨테이너 크레인의 초기조건을 $x = [0 \ 0.1 \ 0 \ 0]$ 로 하고, 트롤리의 위치를 0.4m 움직이도록 계단입력

을 가했다. 바람의 영향을 고려하여 15초경 외란으로 -0.2 rad 의 흔들림을 주었다. 탐색된 모든 관측기 이득행렬의 안정함은 고유치 검토뿐만 아니라 응답특성에서도 쉽게 알 수 있다.

■ 3개의 상태추정

Fig. 3은 3개의 상태를 추정하고, 트롤리의 위치만 측정하여 $u = -K[x_1 \ \tilde{x}_2 \ \tilde{x}_3 \ \tilde{x}_4]$ 의 제어를 한 결과이다. 트롤리의 위치 및 컨테이너의 각도 모두 기준입력에 잘 추종하고 있다. 또한 흔들림 외란에 대한 성능도 만족할 만하다.

■ 2개의 상태추정

Fig. 4는 2개의 상태를 추정하고, 트롤리의 위치와 컨테이너 각도는 측정하여 $u = -K[x_1 \ x_2 \ \tilde{x}_3 \ \tilde{x}_4]$ 의 제어를 한 결과이다. 트롤리의 위치 및 컨테이너의 각도 모두 기준입력에 잘 추종하고 있다. 또한 흔들림 외란에 대한 성능도 만족할 만하다.

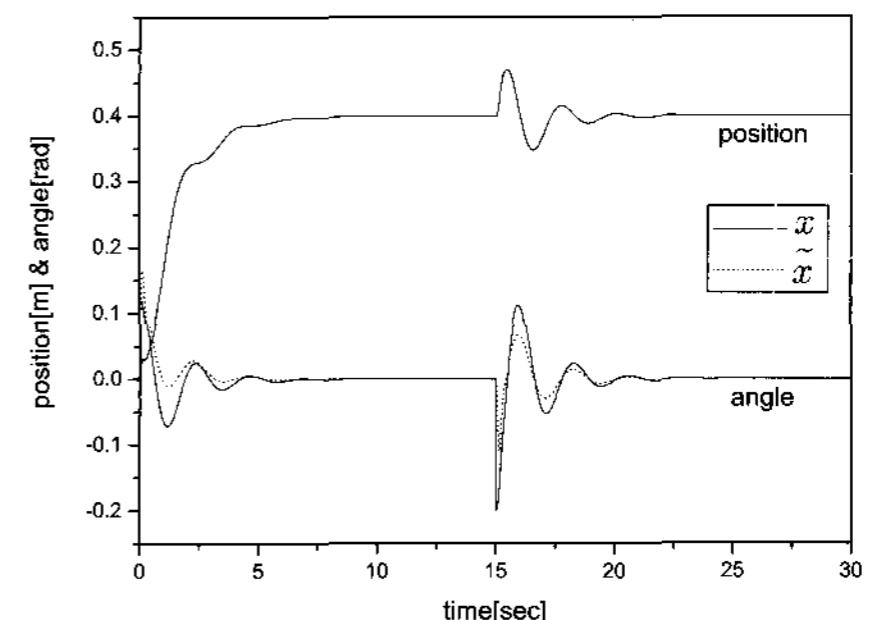
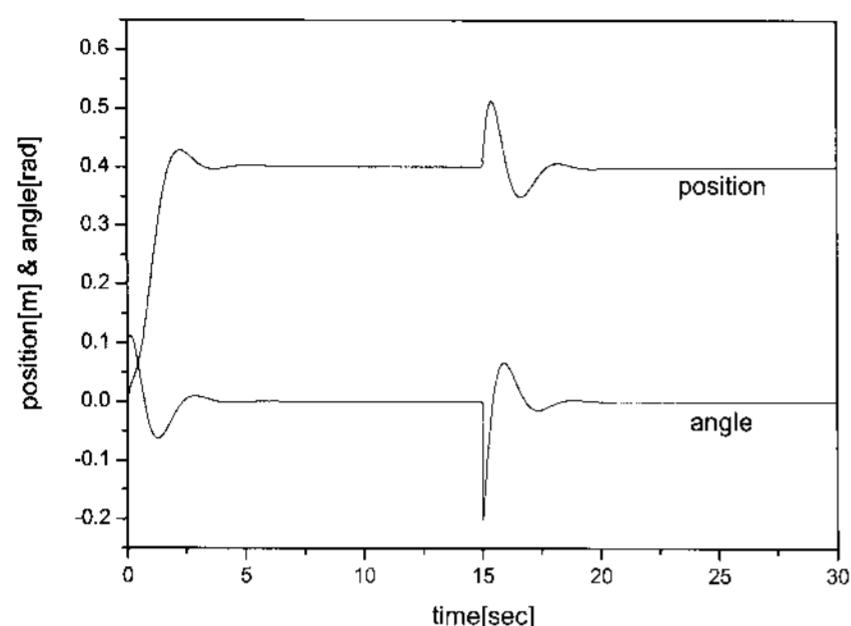


Fig. 3 Step and disturbance response of the reduced-order observer-based system(x_1 detection)

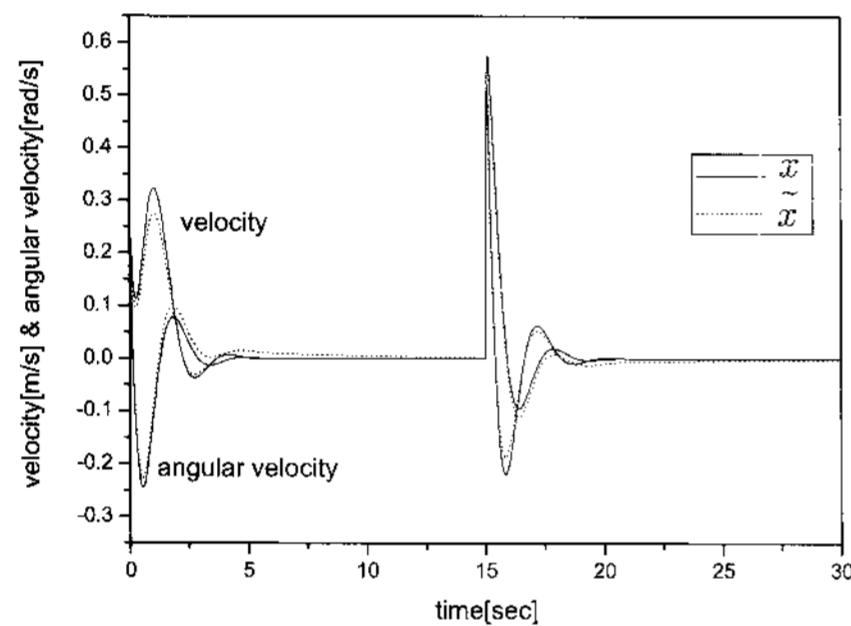
4. 결 론

컨테이너 크레인에 각 측정 장치의 설치여부에 따른 두 가지(트롤리 위치만, 트롤리 위치와 컨테이너 흔들림)의 상태 관측기를 설계하였다. 상태관측기 이득행렬 즉, 측정된 출력과 추정된 출력의 차이로 구성된 보정항의 가중행렬을 선정함에 있어 RCGAs를 사용하였다. RCGAs를 통해 탐색된 각각의 관측기 이득행렬을 시뮬레이션을 통해 컨테이너 크레인을 점근안정하고 충분히 빨리 수렴시키는 것을 확인하였다.

이 후 과제로는 관측기와 상태 피드백 제어가 설계사양에 맞도록 각 이득행렬을 동시에 구하고자 한다.



(a) Trolley position and container angle



(b) Trolley velocity and angular velocity

Fig. 4 Step and disturbance response of the reduced-order observer-based system(x_1 , x_2 detection)

참고문헌

- [1] 소명옥 외, “퍼지제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계”, 한국마린엔지니어링학회지, 1226-9549, 제27권6호, pp.759-766, 2003
- [2] 정형환 외, “유전알고리즘을 이용한 컨테이너 크레인 시스템의 위치제어 및 흔들림 억제를 위한 퍼지 제어기 설계”, 한국마린엔지니어링학회지, 1226-9549, 제24권6호, pp.725-732, 2000
- [3] J. H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- [4] 진강규 외, “최적화기법으로서의 유전알고리즘과 그 응용”, 한국마린엔지니어링학회지, 1226-9549, 제21권2호, pp.108-116, 1997
- [5] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2004.

저자소개



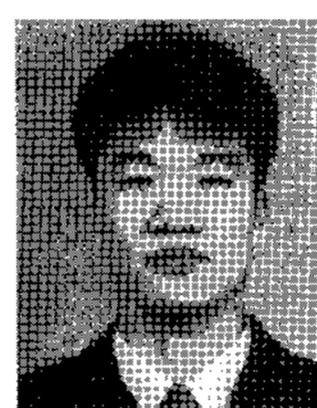
안종갑(安鍾甲)

2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사). 2006년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(석사). 2006~동대학원 메카트로닉스 공학과 박사과정. 현재 한국항만연수원 교수. ※관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



이윤형(李潤炯)

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사). 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사). 2007년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과(박사). 현재 한국항만연수원 부교수. ※관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



류기탁(柳基焯)

1979년 1월생. 2001년 한국해양대학교 기관시스템공학부 선박항만전자기계공학전공 졸업(공학사). 2008년 동대학원 졸업(공학석사). 2001년~2005년 현대상선 근무. 현재 한국해양수산연수원교관



유희한(柳熙漢)

1956년 1월생. 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사). 1982~1989년 한국기계연구소 선임연구원. 1991~1998년 포항공대 가속기 연구소 선임연구원. 1998~현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 부교수



소명옥(蘇明玉)

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과(석사). 1997년 동대학원(박사). 한국항만·운송노동연구원 연구위원. 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수. 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수. ※관심분야 : 퍼지제어, 최적제어