

설계사양을 고려한 컨테이너 크레인의 RCGA기반 상태 관측기 설계

이수룡* · 안종갑** · 이윤형*** · 손정기**** · 소명옥†

*동명대학교 조선공학과 교수, **,***,****한국항만연수원 부산연수원 교수, †한국해양대학교 선박전자기계공학과 교수

RCGA-Based States Observer Design of Container Crane concerned with Design Specification

Soo-Lyong Lee* · Jong-Kap Ahn** · Yun-Hyung Lee*** · Jeong-Ki Son**** · Myung-Ok So†

*Department of Naval Architecture, Tong Myong University, Busan 608-711, Korea

** , *** , ****Korea Port Training Institute, Busan 606-791, Korea

† Division of Mechatronics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 대규모 컨테이너항만의 건설과 함께 컨테이너 크레인의 생산성 향상으로 선박 체항시간을 단축시켜 항만의 서비스 수준을 높이려는 노력이 가속화되고 있다. 컨테이너 크레인 시스템에 가해지는 입력에 대하여 바람직한 성능을 보이도록 설계사양을 고려한 상태 피드백 제어 시스템을 사용한다. 컨테이너 크레인에서 측정이 까다롭거나 측정 잡음이 클 것으로 예상되는 상태 변수를 추정하는 방법으로 상태 관측기를 설계하고자 한다. 기존의 연구에서는 상태 피드백 제어시스템의 피드백 이득행렬과 상태 관측기 이득행렬을 분리하여 구하였다. 그러나 본 연구에서는 피드백 이득행렬과 상태 관측기 이득행렬을 선정함에 있어 최근 강인한 탐색법으로 많이 사용되는 RCGAs를 사용해 설계사양을 만족하도록 동시에 구하고자 한다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 상태 피드백, 상태 관측기, 제약 조건, 실수코딩 유전알고리즘

Abstract : Construction of large-scale container ports with the productivity improvements in container cranes shortened time of staying port to increase the level of service it harbors efforts accelerated. About container crane system exerted on the input, which is designed to look good performance considering the states feedback control system. The states observer designed of container cranes state variables that are expected to measurement noise or particular measurement signal. In the status of existing research, the feedback gain matrix and the state observer gain matrix are searched by being separated solving. But the feedback gain matrix and the state observer gain matrix are searched by RCGAs at once that be used robust search method in this paper.

Key words : container crane, state feedback, state observer, constraints condition, real-coded genetic algorithm(RCGA)

1. 서 론

대규모 컨테이너항만의 건설과 함께 컨테이너 터미널의 생산성 향상으로 선박 체항시간을 단축시켜 항만의 서비스 수준을 높이려는 노력이 가속화되고 있다. 특히 대형 컨테이너 선박(8,000TEU~15,000TEU급)에 대한 체항시간을 단축시키기 위해 컨테이너 터미널의 하역시스템에 관한 연구는 기존의 포스트 파나막스 선박과 동일한 시간 내에 컨테이너를 하역하기 위해 필요한 시간당 안벽 생산성 300개 이상을 달성할 수 있는 새로운 하역 방식과 개념을 중심으로 연구되고 있다(남, 2006).

이러한 새로운 개념의 하역시스템이라 할지라도 컨테이너 크레인의 하역작업에서 이루어지는 주요동작 구성은 컨테이너

를 올리고 내리는 호이스트 동작과 컨테이너를 선박과 육상의 목표위치로 이동시키는 트롤리 동작으로 이루어진다. 컨테이너를 목표위치로 이동시킬 때 트롤리의 가·감속으로 화물의 흔들림이 발생하게 된다. 이때 트롤리가 목표지점에 도달했을 때 스프레더와 컨테이너의 흔들림을 가능한 짧은 시간 내에 제어하여 하역효율을 높이려는 많은 연구가 있었다(이, 2007; 이, 2007; 김, 2005).

컨테이너 크레인을 포함한 대부분의 제어시스템은 일반적으로 시스템에 가해지는 입력에 대하여 바람직한 성능을 보이고 설계 방법과 안정성에 대한 증명이 잘 정립되어 있어 폭넓게 사용되고 있는 상태 피드백 제어시스템을 사용한다. 이를 설계하기 위해서는 상태 변수들이 적절한 장치를 통하여 피드백될 수 있어야 한다. 그러나 시스템에 따라서는 상태 변수 중

* 대표저자 : 이수룡(정회원), lsyong@tu.ac.kr 051)620-3404

** 정회원, jjongabi@naver.com

*** 종신회원, domse54@daum.net

**** 정회원, flogging@hanmail.net

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

일부를 전혀 측정할 수 없거나, 측정된 상태 변수를 사용하여 제어시스템을 구성하기에는 경제적, 기술적인 이유로 측정하기가 어려운 상태 변수들이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 직접 측정된 상태 변수 대신에 상태 변수들을 추정하여 제어시스템을 구성하는 것이다.

기존의 연구에서는 상태 피드백 제어시스템의 피드백 이득행렬과 상태 관측기 이득행렬을 분리하여 구하였다(이, 2007; 안, 2007). 그러나 본 논문에서는 최근 강인한 탐색법으로 많이 사용되는 실수코딩유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithms ; RCGAs)을 사용해 피드백 이득행렬과 축소차수 상태 관측기 이득행렬이 설계사양을 만족하도록 동시에 구하고자 한다.

2. 컨테이너 크레인의 상태공간 해석

컨테이너 크레인 시스템(이, 2007)에서 컨테이너의 흔들림 θ 의 변화가 미소하다고 가정하고 $\theta \cong 0$ 근방에서 선형으로 근사화하면 식 (1)과 같은 시스템을 얻을 수 있다. 이때 트롤리의 이동속도에 비례한 마찰력과 호이스트용 와이어로프가 흔들림으로 발생하는 계수는 미소하므로 무시하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$y = Cx$$

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

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

상기 식에서 상태변수는 $x_1 = z, x_2 = \theta, x_3 = \dot{z}, x_4 = \dot{\theta}$ 로 정의한다. 컨테이너 크레인 시스템의 파라미터 값들은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of container crane 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]

3. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithm:GA)은 1975년 J. H. Holland(Holland, 1975)교수에 의해 처음 소개된 이후, Goldberg가 광범위하게 전파했으며, De Jong이 잠재적인 여러 탐색방향, GA의 성능에 영향을 미치는 동정 인자들의 영향력들을 요약하였다.

GA가 기존의 탐색법과 다른 점은 파라미터 자체를 사용하기 보다는 이를 기호로 표현하여 사용하며, 하나의 해를 다루기 보다는 해 집단을 취급한다. 그리고 연산자들이 확률에 기초하여 동작되므로 얻어지는 결과는 결정적이기 보다는 확률적이다.

다양한 최적화 문제를 해결하기 위하여 여러 종류의 유전알고리즘이 발표되었으나, 파라미터의 부호화, 초기 해 집단의 생성, 집단내 개체들의 적합도 평가, 기본 연산자의 사용과 같은 기본적인 메커니즘은 서로 유사하다(진, 2004).

유전알고리즘의 탐색 과정은 크게 집단의 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다.

본 논문에서는 변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고 BCGA에서 요구되는 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있는 실수코딩 탐색체를 다루는 RCGA를 사용하기로 한다.

집단의 초기화에서는 탐색 공간상의 점들을 표현하는 방법이 결정되면 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들이 유전 연산자를 통해 모의진화가 수행될 초기 개체집단이 형성된다.

적합도 평가는 식 (2)와 같은 최대화 형태를 사용한다.

$$f(s) = -F(x) - F_{\min} \tag{2}$$

여기서 $f(s)$ 는 적합도 함수, $F(x)$ 는 목적함수, F_{\min} 은 $f(s) \geq 0$ 을 보장하는 상수이다.

또한, 본 논문에서 다루는 RCGA는 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 기본 연산자로 채용하고 있다.

재생산은 구배와 유사한 재생산(Gradient-Like Reproduction), 교배는 수정단순교배(Modified Simple Crossover), 돌연변이는 동적돌연변이(Dynamic Mutation)를 사용하였다. 그리고 탐색성능을 높이기 위해 선형 스케일링(Linear Scaling)과 엘리티즘(Elitism) 전략을 사용한다.

복잡한 최적화 문제에 유전알고리즘을 적용할 때 고려되어야 할 사항 중 하나는 제약조건을 어떻게 다룰 것인가 하는 것이다. 왜냐하면 주어진 문제에는 제약조건이 수반될 수 있고 또한 유전 연산자들이 탐색체를 다루면서 부적합한 해를 생산할 수 있기 때문이다.

제약조건을 다루는 방법에는 크게 거부전략, 복구전략, 유전 연산자와의 보완 전략, 벌점전략으로 분류된다. 여기서는 본 논문에서 사용할 벌점전략 중 고정 벌점전략에 대해서 간단히 살펴보도록 한다.

흔히 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한

영역과 부적합한 영역으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 별점을 부과하고 이 별점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 다른 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있다.

대부분의 경우 시스템은 다음과 같은 몇 가지 고려되어야 할 요소들을 가진다.

- 계단함수 입력에서 정의되는 최대오버슈트(M_p)
- 지연시간(t_d)
- 상승시간(t_r)
- 정정시간(t_s)
- 제한된 입력(u) 등

이외에도 시스템 설계시 요구되는 사항들을 추가하여 고려되어야 할 요소로 선정할 수가 있다.

이러한 제약조건을 고려함으로써 제어기 설계문제는 복잡한 제약성 최적화 문제로 귀착되는데 그 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 이용한다. 유전알고리즘이 컨테이너 크레인 시스템의 제어변수를 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)할 때를 처리하기 위해 별점전략을 채용하고, 그 위반 정도에 따라 별점을 추가하도록 별점함수 $P(x)$ 를 정의하였다.

$$F(x) = J(x) + P(x) \tag{3}$$

$$\text{단, } P(x) = \begin{cases} 0 & , \chi \text{가 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2 & , \chi \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서 w_j 는 각 제약조건에 대응되는 별점상수로서 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이며 $J(x)$ 는 x 에 종속되는 목적함수 값이다.

이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하면서 $F(x)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다.

4. 상태 관측기

4.1 상태 관측기

상태 관측기(State Observer)는 출력 및 제어변수를 측정하여 상태 변수를 추정한다.

관측기는 식 (4)와 같이 정의되는 시스템의 부정확함이나 초기오차를 보상하기 위하여 추정오차를 포함하는 항이 추가된 부분시스템으로 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \tag{4}$$

여기서 \hat{x} 는 추정된 상태이고, $\hat{y} = C\hat{x}$ 로 추정된 출력이다.

관측기 이득행렬(Observer gain matrix)로 불리는 L 은 측정된 출력 y 와 추정된 출력 \hat{y} 의 차이로 구성된 보정항의 가중행렬(Weighting matrix)이다. 보정항이 계속적으로 모델의 출력을 보정함으로써 관측기의 성능을 향상시킨다.

4.2 축소차수 관측기

실제 시스템에서 몇 개의 상태 변수는 정확하게 측정할 수 있기 때문에 그러한 상태 변수는 추정할 필요가 없다.

상태벡터를 n -벡터라 하고, 출력벡터를 m -벡터라 하면 m 개의 출력변수는 추정할 필요가 없다. 단지 $n-m$ 개의 상태 변수만 추정하면 된다. 이와 같은 $(n-m)$ 차의 관측기를 축소차수 관측기(Reduced-order observer)라고 한다.

이 절에서는 축소차수 관측기의 기본적인 개념만 파악하기 위해 출력이 하나인 경우를 살펴보도록 한다.

식 (4)에 대해서 출력으로 직접 측정할 수 있는 부분(x_a)와 측정할 수 없는 상태벡터(x_b)로 식 (5)와 같이 구분할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \vdots \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u \tag{5}$$

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

식 (5)를 변형하여 전차수 상태 관측기를 설계하는 방식을 도입하면 식 (6)과 같은 축소차수 관측기의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}_b = (A_{bb} - LA_{bb})\hat{x}_b + A_{ba}x_a + B_b u + L(\dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u) \tag{6}$$

여기서 만약 x_a 에 잡음이 섞여 있다면 \dot{x}_a 을 사용하는 것은 바람직하지 않으므로 식 (7)과 같이 고쳐 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_b - L\dot{x}_a &= (A_{bb} - LA_{bb})(\hat{x}_b - Ly) \\ &+ [(A_{bb} - LA_{bb})L + A_{ba} - LA_{aa}]y + (B_b - LB_a)u \end{aligned} \tag{7}$$

그리고 $\eta = x_b - Ly$ 와 $\hat{\eta} = \hat{x}_b - Ly$ 를 정의하면 식 (7)은 식(8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\eta}} &= (A_{bb} - LA_{bb})\hat{\eta} \\ &+ [(A_{bb} - LA_{bb})L + A_{ba} - LA_{aa} \quad B_b - LB_a] \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

그리고 추정된 출력방정식은 식(9)이다.

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{n-1} \end{bmatrix} \hat{\eta} + \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ L \end{bmatrix} y \tag{9}$$

이때 관측기 오차방정식은 식 (5)로부터 식 (6)을 빼면 식

(10)과 같다.

$$\dot{\hat{x}}_b - \dot{x}_b = (A_{bb} - LA_{ab})(x_b - \hat{x}_b) \quad (10)$$

그리고 $e = x_b - \hat{x}_b = \eta - \hat{\eta}$ 와 같이 정의하면, 식 (10)은 식 (11)과 같아진다.

$$\dot{e} = (A_{bb} - LA_{ab})e \quad (11)$$

이것이 축소차수 상태 관측기의 오차방정식이다.

5. 제어기 및 관측기 설계

제어 환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있는 ISE, IAE, ITAE 세 가지의 일반적인 성능지수가 있다.

$$ISE; J_{ISE} = \int_0^{t_f} e^2(t)dt \quad (12a)$$

$$IAE; J_{IAE} = \int_0^{t_f} |e(t)|dt \quad (12b)$$

$$ITAE; J_{ITAE} = \int_0^{t_f} t|e(t)|dt \quad (12c)$$

ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 IAE는 오차의 절대 크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의 될 수 있다.

제어기 설계 파라미터 K 를 선정하는 방법에 RCGA를 이용하고 목적함수로는 세 가지 중 IAE 성능지수를 사용한다. 이는 세 가지 성능지수 중 오버슈트가 작으면서 빠른 시간에 목표위치를 추종하여 설계사양을 만족시키기 위한 가장 적합한 성능을 보이고 있기 때문이다.

5.1 RCGA 기반 상태관측기 설계

시스템 내부의 상태변수 중 직접 측정할 수 있는 상태변수의 경우 복잡한 수식을 이용하여 추정한다는 것은 아무런 의미가 없다. 따라서 이 절에서는 2개의 상태 즉, 트롤리 위치와 컨테이너 흔들림 각도를 측정하여 속도와 각속도를 추정하는 문제를 다룬다. 이 경우는 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림을 측정하는 장치를 설치하고, 신호 대 잡음비가 감소되지 않도록 각 신호를 미분하지 않고 속도와 각속도를 추정하여 컨테이너 크레인을 제어하고자 관측기를 설계한다.

여기서는 와이어로프의 길이 $l=1.2[m]$ 인 경우만을 고려한다. 식 (1)의 A, B, C, x 행렬을 측정할 수 있는 부분과 측정할

수 없는 나머지 부분으로 나누면 식 (13)과 같다.

A, B, C 의 가제어 행렬과 가관측 행렬을 구해보면 각각 $\rho=4$ 이므로 식 (13)은 제어가능하며 임의의 극배치에 의해 제어를 설계할 수 있다. 또한 시스템은 관측가능하다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ 0 & -4.566154 & \vdots & -16.883481 & 0 \\ 0 & -11.971795 & \vdots & -14.069567 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 3.777797 \\ 3.148164 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, x = [x_1 \ x_2 \ ; \ x_3 \ x_4]^T \quad (13)$$

관측기 이득행렬 L 을 탐색하기 위한 RCGA의 목적함수는 식 (14)와 같다

$$J_{obs} = \int_0^{t_f} (|x_3 - \tilde{x}_3| + |x_4 - \tilde{x}_4|)dt \quad (14)$$

5.2 설계사양을 고려한 RCGA 기반 상태관측기 설계

대부분의 경우 컨테이너 크레인은 설계시 몇 가지 고려되어야 할 요소를 가진다.

- 트롤리의 이동시 목표치를 초과하여 지나치는, 즉 오버슈트가 발생하지 않아야 한다.
- 최단시간 내에 목적지까지 트롤리의 이동을 통한 컨테이너의 이송이 가능해야 한다.
- 컨테이너의 흔들림 각속도는 가급적 작아야 한다.
- 트롤리의 급격한 이동은 피하여야 한다.
- 돌발적인 외란에 대해서도 컨테이너의 진동을 억제하여 원하는 목적지에 정상편차 없이 도달하여야 한다.

위의 요소를 기본적으로 만족시키기 위하여 본 연구에서는 시스템의 계단 응답에 대한 최대오버슈트(M_p), 상승시간(t_r), 정정시간(t_s), 컨테이너의 최대 흔들림(θ)에 대해 고려하고자 한다. RCGA가 피드백 이득 행렬 K 와 관측기 이득행렬 L 을 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반할 때는 그 위반 정도에 따라 벌점을 추가하도록 벌점함수 $F(K, L)$ 를 식 (15)과 같이 정의한다.

$$F(K, L) = J(K, L) + P(K, L) \quad (15)$$

$$\text{단, } P(K, L) = \begin{cases} 0 & , K \text{와 } L \text{이 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2 & , K \text{와 } L \text{이 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

또한 각 제약조건에 대응되는 벌점상수 w_j 는 다음과 같이 설정하였다.

$$w_1 (M_p \text{에 대한}); 1 \times 10^{50}, w_2 (t_r \text{에 대한}); 1 \times 10^{20}$$

$$w_3 (t_s \text{에 대한}); 1 \times 10^{20}, w_4 (\theta \text{에 대한}); 1 \times 10^{30}$$

그리고 K 와 L 에 종속되는 목적함수 $J(K, L)$ 는 식(16)과 같다.

$$J = \int_0^{t_f} (|y_r - x_1| + |x_2| + |x_4| + |x_3 - \tilde{x}_3| + |x_4 - \tilde{x}_4|) dt \quad (16)$$

여기서 t_f 는 최종적분시간으로 적절히 선정한다. RCGA에 의해 탐색될 때의 제어기 설계사양은

- 최대오버슈트(M_p) ; $g_1(K, L) = -M_p(K, L) \geq 0$
- 상승시간(t_r) ; $g_2(K, L) = 2.5 - t_r(K, L) \geq 0$
- 정정시간(t_s) ; $g_3(K, L) = 3.0 - t_s(K, L) \geq 0$
- 컨테이너 최대 흔들림(θ) ; $g_4(K, L) = 0.1 - \theta(K, L) \geq 0$

$$F(K, L) = \int_0^{t_f} (|y_r - x_1| + |x_2| + |x_4| + |x_3 - \tilde{x}_3| + |x_4 - \tilde{x}_4|) dt + w_1 g_1^2 + w_2 g_2^2 + w_3 g_3^2 + w_4 g_4^2 \quad (17)$$

Fig. 1은 RCGA를 이용하여 최적의 피드백 이득행렬과 상태 관측기 이득행렬을 동시에 구하는 블록선도를 나타낸다.

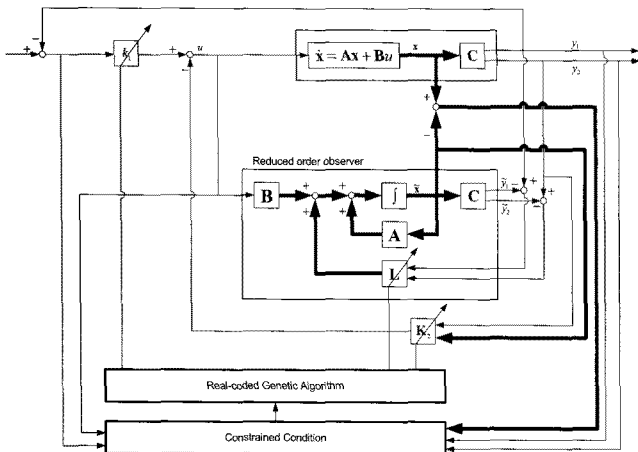


Fig. 1 Optimization of the feedback gain matrix and the state observer gain matrix using RCGAs

6. 시뮬레이션 및 고찰

설계사양이 고려된 피드백 이득 행렬 K 와 관측기 이득행렬 L 을 탐색하기 위한 RCGA의 제어 파라미터로는 집단의 크기 $N=80$, 재생산계수 $\eta=1.8$, 교배확률 $P_c=0.95$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 가 사용되었다.

$$K = \begin{bmatrix} 458.529498 & 561.619253 & 452.254772 & -361.607943 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 255.813293 & -343.925612 \\ 20.749023 & 0.000000 \end{bmatrix}$$

을 얻을 수 있었다. 식 (11)에서 $(A_{bb} - LA_{bb})$ 의 고유치를 구해 보면 $[-217.6864 -55.0103]$ 로 모두 복소평면의 좌반에 위치하고 있음을 알 수 있다.

6.1 기준입력 변화에 대한 검토

기준입력 변화에 대한 제어시스템의 목표위치 추종성능을 알아보기 위하여 트롤리 이동거리에 대해 계단상의 기준입력을 변경시켜 보았다.

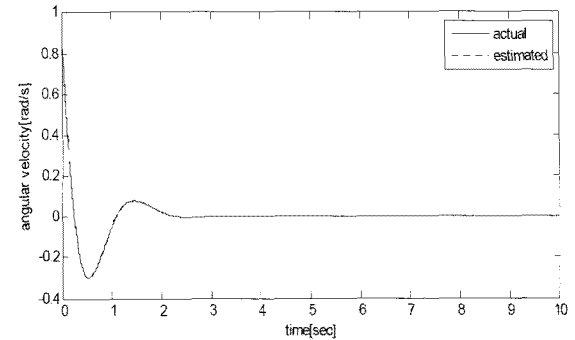
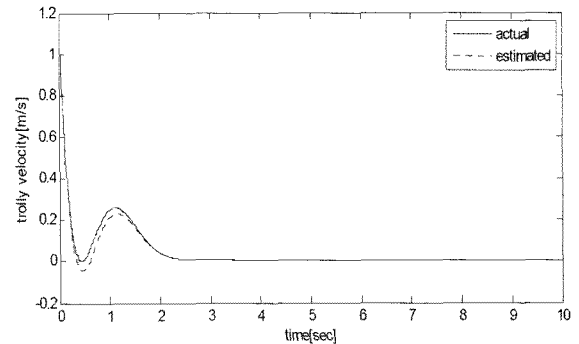
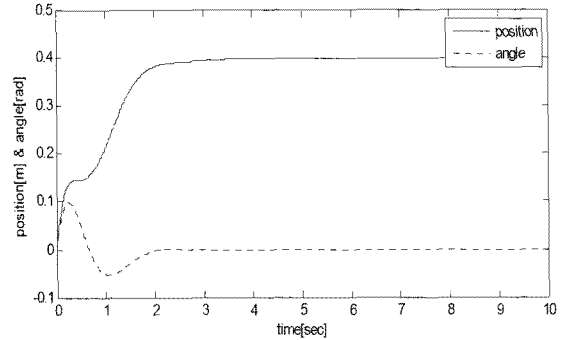


Fig. 2 Step responses of container crane system

제어 시작과 동시에 초기위치 0[m]에서 전진방향으로 목표 위치 0.4[m]의 기준입력을 가하여 정지하도록 하였다. 이때 상태관측기의 초기치는 모두 0으로 설정하였다. Fig. 2는 기준입력 변화에 대한 응답으로서 성능은 각각 $m_p=0.00$, $t_r=1.67$, $t_s=1.97$, $e_{ss}=0.00$ 이다. 이는 위치의 기준입력에 대한 정상상태오차 없이 설계사양을 모두 만족하면서 빠른 시간에 추종하고 있음을 알 수 있다.

6.2 외란에 대한 검토

컨테이너 크레인 운전 중 외란으로 돌풍에 의해 컨테이너 화물이 급격히 흔들린다고 간주하여 $+0.2[\text{rad}]$ 크기의 흔들림을 가하였다. Fig. 3은 외란에 대한 응답으로서 빠른 시간에 흔들림을 잡고 있다.

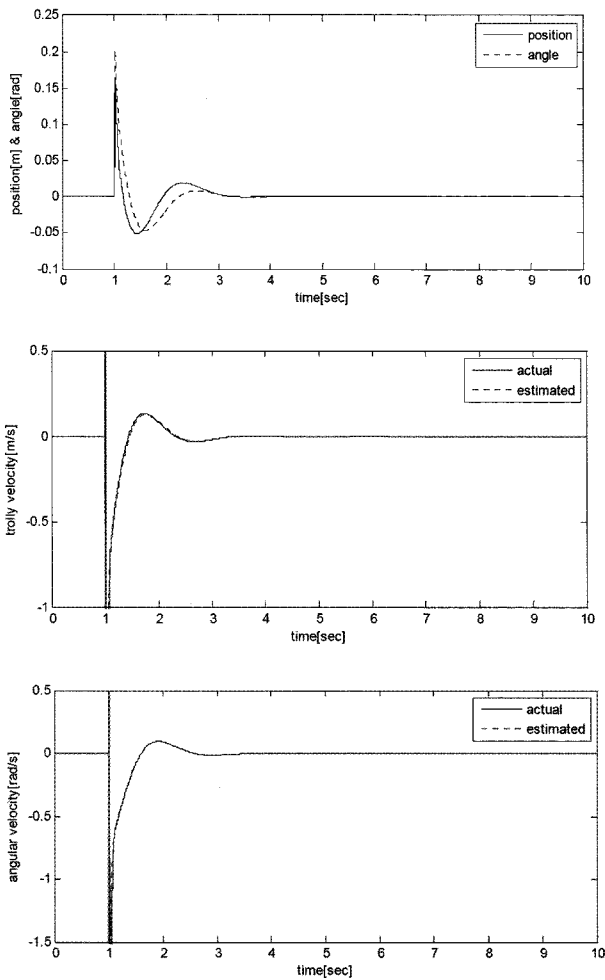


Fig. 3 Disturbance responses of container crane system

8. 결 론

본 연구에서는 설계사양을 고려한 컨테이너 크레인 시스템의 제어기 및 축소차수 관측기를 설계하기 위해 RCGA 기반의 설계방법을 모색하였다.

첫째, 상태 피드백 제어기(LQ제어기)를 설계함에 있어서 기존의 리카치방정식이 아닌 성능지수와 제약조건이 추가된 RCGA를 이용하여 제어기를 설계함으로써 설계사양을 만족시킬 수 있는 체계적인 방법을 모색하였다.

둘째, 컨테이너 크레인에서 측정이 까다롭거나 측정 잡음이 클 것으로 예상되는 상태 변수를 추정하는 방법으로 측정 가능한 상태 변수를 제외하고 단지 측정할 수 없는 상태 변수만 추정하는 축소차수 상태 관측기를 설계하였다. 이때 RCGA를 이용하여 실제 상태를 빠른 시간에 추정할 수 있도록 설계하였다.

셋째, 위의 제어기와 관측기의 이득행렬을 각각 탐색하지 않고 언제나라도 설계사양을 만족할 수 있도록 두 가지 이득행렬을 동시에 탐색할 수 있는 새로운 평가함수와 제약조건을 도입하였다.

설계된 제어기를 컨테이너 크레인에 적용하여 계단상 기준 입력 변화와 외란에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 관측기의 경우 빠른 시간에 상태를 추정하였다. 따라서 하드웨어적인 가속도 측정기, 각가속도 측정기의 추가적인 장착이 필요 없음을 확인하였다.
- 제어기의 경우 목표위치 수렴속도가 빠르고 정상편차 없이 안정된 제어결과를 보여 설계사양을 만족함을 알 수 있었다. 그리고 오버슈트가 없어 불필요한 트롤리 전·후진을 억제하여 운전자의 피로를 경감시키는 것이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2008년 동명대학교 항만물류사업단의 지원을 받아 연구되었음에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김영한, 장상목(2005), " l_1 -최적제어를 이용한 컨테이너 크레인의 운전", 한국항해항만학회지, 제29권 제5호, pp.409~413.
- [2] 남기찬, 최장림, 유주영, 송용석(2006), "초대형 컨테이너 선박에 대한 사용자 의향분석", 한국항해항만학회지, 제30권 제1호, pp.301~307.
- [3] 안종갑, 이윤형, 진강규, 소명옥(2007), "컨테이너 크레인을 위한 RCGA기반 상태관측기 설계", 한국마린엔지니어링학회, 2007 후기학술대회논문집, pp.33~34.
- [4] 이영재, 이윤형, 소명옥(2007), "항만효율향상을 위한 컨테이너 크레인의 강인한 제어기 설계", 한국항해항만학회지, 제31권 제6호, pp.531~536.
- [5] 이수룡, 안종갑, 최재준, 손정기, 이윤형, 소명옥(2007), "실수코딩유전알고리즘을 이용한 하역생산성 향상용 컨테이너 크레인의 안정화 제어기 설계", 한국항해항만학회, 제31권 6호, pp.515~521.
- [6] 진강규(2004), 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.
- [7] Holland, J. H.(1975), "Adaptation in natural and artificial systems", The university of michigan press, Michigan.

원고접수일 : 2008년 5월 2일

심사완료일 : 2008년 11월 18일

원고채택일 : 2008년 11월 24일