

컨테이너크레인 제어를 위한 최적제어기 설계에 관한 연구

A Study on Design of Optimal Controller for Container Crane

이영진, 조현철, 이진우, 이권순
동아대학교 전기공학과

Young J. Lee, Hyun C. Cho, Jin W. Lee, Kwon S. Lee
Dong-A University, Pusan, Korea

Abstract

PID controller has been used very widely in the industrial applications. But it is difficult to tune the PID gains. In this paper, we present a design of optimal 2-DOF PID controller for control of container crane which has to control swing motion and trolley position. For tuning of the 2-DOF PID control gains, we used hybrid evolution program(EP). During operate the crane system in yard, the goal is transporting the load to a goal position as quick as possible without rope oscillation. The crane is generally operated by an expert operator, but recently an automatic control system with high accuracy and rapid transportation is required. However, we developed an optimal controller which has to control the crane system with disturbance.

I. 서 론

최근 들어 효율적인 컨테이너 터미널 개발을 위한 일환으로써 항만하역장비에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있는 가운데 트롤리(Trolley), 스프레더(Spreader), Cable reels 등과 같은 선측장비의 각종 구성장비에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

특히, 부두에 정박된 배로부터 컨테이너를 양·하역시에는 바다로부터 불어오는 바람과 같은 외란에 의한 스프레더의 흔들림으로 시설물과의 충돌로 시설물이나 운반물체의 파괴 및 손상을 초래

하기도 할뿐만 아니라, 때에 따라서는 인명피해도 야기시킬 수 있는 원인이 되기도 한다. 때문에 이를 제어하기 위하여 다양한 제어기법들이 적용되고 있지만 아직까지도 실제 산업현장에서는 숙련자의 판단에 의존하고 있는 실정이다[1-3].

또한, 이러한 크레인 시스템은 항만하역장비 뿐만 아니라 산업현장에서도 다양한 형태 및 중량을 갖는 물체를 원하는 위치에 이송시키는데 폭넓게 사용되고 있으며, 주위의 작업환경에 따라서 물체를 이송하는 트롤리의 이동속도, 운반하고자 하는 물체의 무게 및 이송거리의 변화에 의한 흔들림과 그에 따른 위치오차등의 문제가 발생되고 있다.

이와 같은 크레인 시스템을 제어하기 위한 제어 변수로는 위치 및 흔들림 오차를 기본적으로 포함하여 이송시간, 에너지효율등이 고려될 수 있다. 크레인으로 물체를 이송시 발생하는 진동각과 위치오차는 서로 연관된 관계로서 이 두 가지 제어 변수를 함께 제어하기란 쉽지 않은 문제이다[3,4].

따라서, 본 연구에서는 먼저, 라그란지 방정식을 이용하여 크레인 시스템의 수학적 모델을 구하고, 이로부터 구해진 제어계는 진자운동등으로 인한 비선형특성이 강하여 제어방법이 간단하지 않으므로 설계된 제어기의 성능을 보다 효율적으로 평가하기 위하여 비선형시스템을 선형화하여 크레인의 다양한 설정위치와 주위 외란에 대한 성능을 평가하였다. 즉, 이송물체의 진동을 최소화하면서 최소의 시간 내에 설정된 위치에 도달할 수 있는 제어기로서, 제어기로는 설정치 변화와 외란제어에 강인한 2-DOF(Degree of freedom) PID 제어기를 적용하였으며, 제어기 파라미터의 자동동조(Auto tuning)를 위하여 개선된 ES (Evolution strategy)와 SA(Simulated annealing)을 병합 적용한 혼합형 알고리즘으로 구성하여 보다 빠른시간 내에 최적의 제어기 파라미터를 동조하여 실시간 제어가 될 수 있도록 연구하였다[5-7].

특히, 최근에는 GA(Genetic algorithm), SA, ES 및 TS(Tabu search)등을 복수의 탐색 알고리즘으로 조합하여 탐색의 정밀도와 효율성을 향상시킬 수 있는 기법등이 등장하고 있어 본 연구의 방향도 기존의 제어방식이 가지고 있는 국부 제어 방법에 의한 외란에 강인하지 못한 한계점을 극복할 수 있는 좋은 계기가 될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

II. 본 론

1. 제어계의 수학적 모델링

1.1 컨테이너 크레인 모델

컨테이너 크레인 시스템의 제어계는 그림 1과 같이 x축 방향의 트롤리의 주행속도 조작과 y축 방향의 로프의 조작으로 크게 나누어 간단히 생각

할 수 있다.

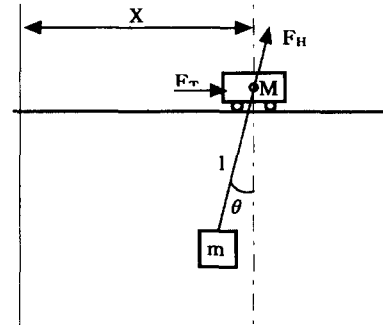


Fig. 1 Crane System Model.

x : 트롤리 위치[m]

l : 로프 길이[m]

θ : 진동각[deg]

g : 중력가속도[m/sec²]

M : 트롤리 질량[kg]

m : 운반물 질량[kg]

F_T : 트롤리에 인가되는 힘[Nm]

F_H : 호이스트에 인가되는 힘[Nm]

1.2 수학적 모델링

그림 1과 같은 크레인 시스템에 있어서 제어되어야 할 변수로는 트롤리의 위치 x , 로프의 길이 l , 물체의 진동각 θ 가 있으며, 제어 입력으로는 트롤리와 호이스트에 각각 인가되는 입력 F_T 와 F_H 로 하였다. 이러한 시스템의 수학적 모델링은 라그란지 방정식을 이용하여 다음과 같은 3개의 비선형 운동방정식을 얻을 수 있으며[8-10],

$$(M+m)\ddot{x} + m(l\dot{\theta}^2 \sin \theta - 2l\dot{\theta} \cos \theta) - ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml \sin \theta = F_T \quad (1)$$

$$m\ddot{x} \cos \theta - m\ddot{\theta} - 2ml\dot{\theta} - mg \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$m\ddot{x} \sin \theta - m\dot{l} + ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta = F_H \quad (3)$$

본 논문에서는 이상과 같은 제어계에 대하여 로프의 길이는 변하지 않고 고정되어 있다고 가정한 2 자유도의 시스템으로 선형화하여 트롤리의 속도만으로 주어진 위치까지 운반물체를 최소의 진동

으로 이송시킬 수 있는 시스템으로 구성하였다. 아울러, 운반물체의 진동각이 아주 작다고 가정하면 $\sin \theta \approx \theta$ 로 $\cos \theta = 1$ 로 가정할 수 있으며, 이로부터 다음과 같은 선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} = F_T \quad (4)$$

$$I\ddot{\theta} + g\theta = \ddot{x} \quad (5)$$

2. 최적제어기 설계

2.1 2-DOF PID 제어기

크레인 제어계에 대하여 외란을 고려하지 않은 일반적인 경우 P나 PI제어기와 같은 단순화된 제어기능만으로도 충분히 제어할 수 있지만, 설정치가 변화되거나 바람과 같은 주위의 예측할 수 없는 환경변화에 대해서는 원활한 제어가 어렵게 됨에 따라 운전자의 작업환경에 그만큼의 부담을 주게 된다. 따라서, 본 논문에서는 설정치 추종 성능뿐만 아니라 외란제거능력이 매우 우수한 것으로 알려진 2-자유도 PID제어기를 크레인의 위치 및 운반물의 흔들림 제어계에 적용하는 문제를 연구하고자 한다[5].

2.2 하이브리드 진화프로그램

본 연구에서는 PID제어기 파라미터를 동조하기 위하여 개선된 ES법과 SA법을 복합 적용하여 주어진 탐색공간내에서 초기의 전역적 탐색은 개선된 ES법으로 하고 최적점 근처에서는 SA법으로 국소탐색을 휴리스틱하게 수행하도록 알고리즘을 구성하였다. 일반적으로 ES는 주어진 표준편차내의 탐색공간에서만 해를 탐색하므로 국부수렴의 문제가 발생할 수 있으므로 복제 및 교배연산자를 도입하여 해의 탐색공간을 넓혀 국부수렴문제를 해결하였으며, 국소 탐색능력이 뛰어난 SA법을 복합 적용하여 해의 탐색능력을 높이고 탐색시간을 최소화하도록 하였다.

먼저, 개선된 ES는 식 8과 같이 주어진 탐색공간내에서 우수한 개체를 선택해 나감으로써 최적점 근처에서 최적 탐색능력이 뛰어난 특징을 가지고 있으며[11,12],

$$x^{t+1} = x^t + N(0, \sigma) \quad (6)$$

여기서, $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 독립적인 랜덤 가우시안 함수벡터로서 작은 변화들이 큰 변화들보다 좀 더 자주 발생하도록 하는 함수이며, x^{t+1} 은 목적함수가 $f(x^{t+1}) < f(x^t)$ 인 경우에 부모세대로 받아들여지는 다음 세대 개체이다.

또한, 본 논문에서 적용한 교배방법은 식 9와 같은 산술적 교배를 적용하였으며,

$$x_1^{t+1} = ax_1^t + (1-a)x_2^t$$

$$x_2^{t+1} = (1-a)x_1^t + ax_2^t \quad (7)$$

각 세대의 적합도를 평가하기 위한 평가함수는 시스템의 시간에 따른 위치오차 및 진동각 오차를 고려하여 식 10과 같이 설정하였다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (e_x(t) \cdot t \cdot w_1 + e_\theta(t) \cdot t \cdot w_2) \quad (8)$$

여기서, $e_x(t)$ 는 위치오차, $e_\theta(t)$ 는 진동오차, w_1 과 w_2 는 각각 위치와 진동의 가중치로서 두 오차의 스케일을 조정할 수 있도록 하였다.

또한, SA법의 개념은 야금학의 담금질로부터 도입되었으며, 이는 annealing의 과정이 고체를 가열하여 고체의 모든 분자가 자유롭게 임의로 배치되어 있는 액체상태에서 서서히 온도를 낮각시키면 모든 분자가 격자의 에너지 기저상태에 가깝게 재배치되는 현상을 이용한 것이다. 즉, SA법은 임의로 발생된 난수를 이용하여 다음과 같이 주어진 확률분포와 cooling schedule에 따라 해를 탐색해나가는 방법으로서 최적해 근방에서

$$p(t) = \exp(-\Delta E/T(t)) \quad (9)$$

$$T(t) = \frac{T_0}{\log t} \quad (10)$$

해를 탐색하도록 하였으며 평가함수는 식 8을 이용하였다[6,13].

2.3 최적제어기 구성

2-DOF PID제어기의 경우 설정치 변화에 대해서는 기존의 P, I, D 파라미터를 적절히 조정하고 외란에 대해서는 α , β 를 조정하면 되므로 본 논

문에서는 그림 2와 같이 2-DOF PID제어기의 파라미터를 하이브리드 진화프로그램을 이용하여 자동동조하여 위치오차 및 진동각이 최소가 되도록 제어하면서 외란에도 강인한 제어가 되도록 구성하였다.

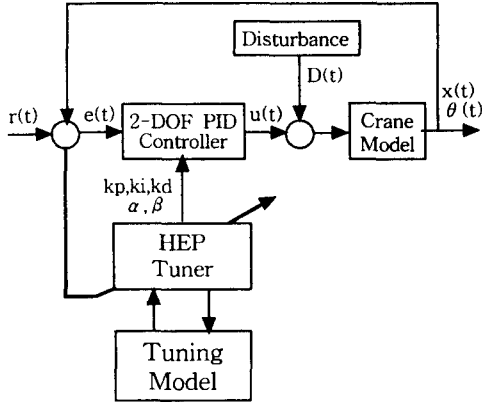


Fig. 2 Block diagram of the proposed control system.

3. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 표 1과 같은 시스템 파라미터를 갖는 pilot개념의 크레인 시스템에 대하여 그림 2와 같이 구성된 자동동조 2-DOF PID 제어를 적용하여 다음과 같이 운반물의 위치오차, 진동오차, 및 이송속도등을 구하여 제어성능을 관찰하여 보았다.

먼저, 그림 3은 일반적인 PID제어기의 경우로서 초기진동각을 2[deg]로 하였을 때 설정위치 추종시 과도한 진동이 발생하며, 외란이 인가시에도 설정위치로 복귀되는 시간이 다소 지연되고 있다.

Table 1. Simulation data of the crane system.

| Parameter | Value |
|-------------|--------------------------|
| 중력 가속도 [g] | 9.8[m/sec ²] |
| 트롤리 질량 [M] | 4.2[kg] |
| 운반물의 질량 [m] | 5.6[kg] |
| 로프의 길이 [l] | 0.86[m] |

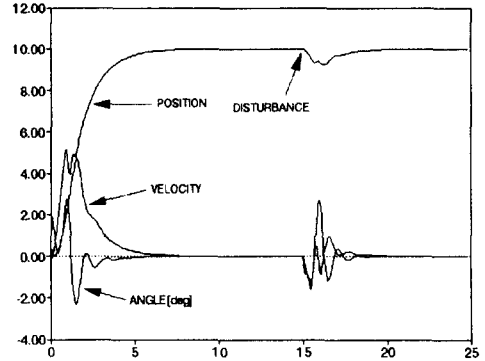


Fig. 3 Time response of the general PID control (initial angle = 2[deg], set position = 10[m])

그림4는 위치 설정치를 10[m]로 하고 초기진동각은 0[deg]로 하여 본 결과로서 외란이 인가되었을 때에도 상당히 좋은 특성을 보이고 있으며, 진동각제어 및 위치도달시간이 약 5초 이내로 안정되게 수렴함을 알 수 있다.

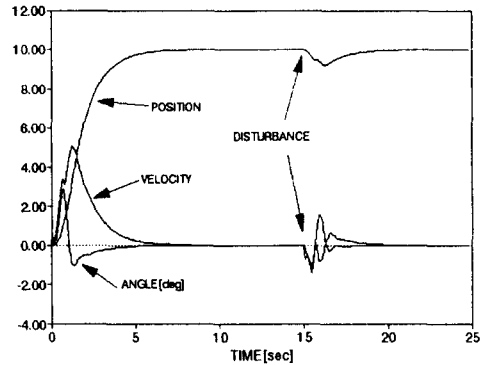


Fig. 4 Time response of the 2-DOF PID control (initial angle = 0[deg], set position = 10[m])

또한, 그림 5는 위치설정치를 10[m]로 하고 초기 흔들림을 약 2[deg]정도로 하였을 때의 결과로서 그림 3의 일반 PID 제어기보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 특히, 설정위치시까지 과도한 흔들림이 발생하지 않고 있으며, 도달 후에도 잔류진동이 발생하지 않으므로 이송물체가 설정위치에 도달되었을 때 불필요한 잔류 흔들림이 없으므로 작업 환경이 개선되고 작업자의 작업이 용이해지며, 생

산성이 높아질 수 있을 것으로 기대된다.

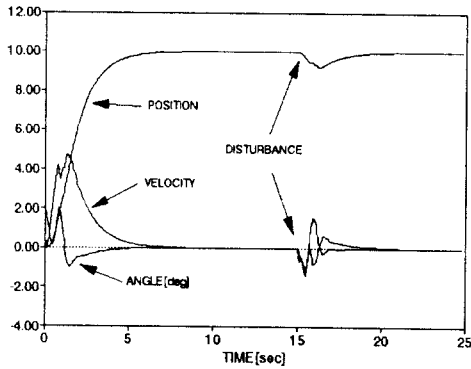
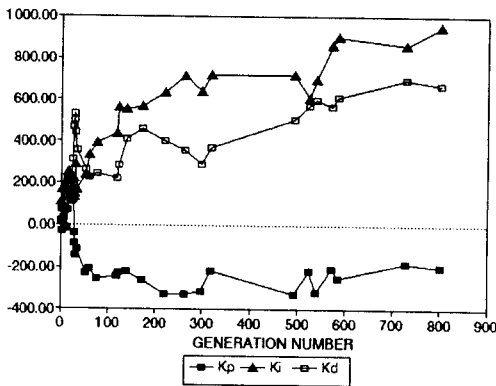
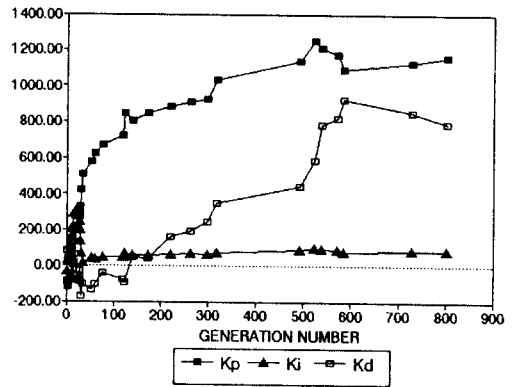


Fig. 5 Time response of the 2-DOF PID control (initial angle = 2[deg], set position = 10[m])

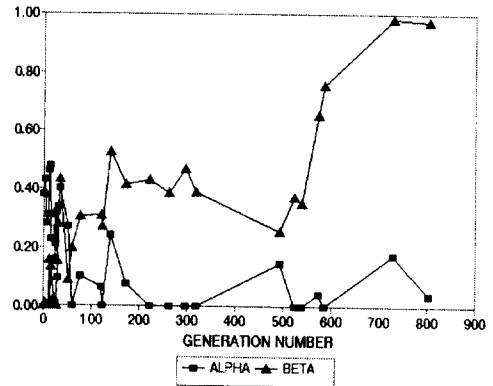
이상과 같이 구성된 제어기의 동조된 파라미터는 위치제어 파라미터 $Kp_x, Ki_x, Kd_x, \alpha_x, \beta_x$, 진동제어 파라미터 $Kp_\theta, Ki_\theta, Kd_\theta, \alpha_\theta, \beta_\theta$ 를 포함하여 모두 10개의 파라미터를 동조하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.



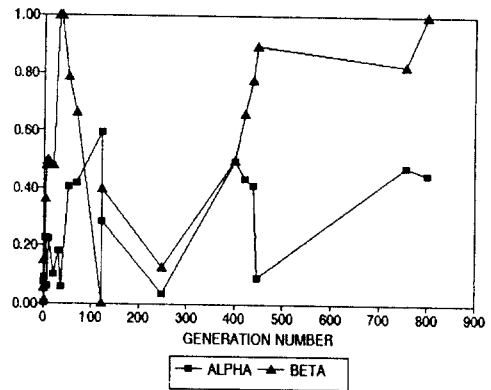
(a) PID parameter for trolley position control



(b) PID parameter for angle control



(c) α_x and β_x for trolley position control



(d) α_θ and β_θ for angle control

Fig. 6 Auto tuned parameters using HEP

III. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 진화프로그램(HEP)을 이용하여 최적의 2-DOF PID제어기를 설계한 후 Pilot 크기의 크레인 모델에 대하여 위치 및 진동을 동시에 제어 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론과 개선점을 발견할 수 있었다.

하이브리드 진화프로그램을 이용하여 PID제어기 파라미터를 복잡한 수식을 거치지 않고도 짧은 시간 내에 최적의 파라미터를 동조하여 진동각 및 위치를 동시에 제어할 수 있었으며, 특히, 물체 이송시의 흔들림도 최소화 할 수 있었으며, 물체의 잔류진동도 제어할 수 있었다. 아울러 이를 자동동조기로서 on-line으로 구성시키면 효과적인 제어기 구성이 될 것으로 기대되며, 향후의 과제로서는 첫째, 위치와 진동각오차의 상관관계를 명확히 밝혀 보다 신뢰성 있는 평가함수가 설정되어야만 최적제어기 설계가 가능할 것으로 판단되며, 둘째, on-line 구성에 필요한 시스템 동정에 관한 연구와 비선형성에 대한 고려도 함께 다루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Yasunobu, "Automatic Container Crane Operation Based on a Predictive Fuzzy Control," 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No. 10, pp. 60-67, 1986.
- [2] 정승현, 박정일, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, Vol. 3, No. 5, pp. 435-442, 1997.
- [3] M. Nomura, Y. Hakamada, and H. Saeki, "Anti-sway Position Control of Crane based on Acceleration Feedback and Predicted Pattern Following Method," Trans. of the Institute of Elec. eng. of Japan D, Vol. 117, No. 11, pp. 1341-1347, 1997.
- [4] A. Marttinen, J. Virkkunen, and R. T. Salminen, "Control Study with a Pilot Crane," IEEE Transactions on Education, Vol. 33, No. 3, pp. 25298-305, 1990.
- [5] 김동화, 이원규, "신경망 2-자유도 PID제어기를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위 제어," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 321-328, 1998.
- [6] D. P. Kwok and fang Sheng, "Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal Robot Arm PID Control," Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary computation, pp. 708-713, 1994.
- [7] 박진현, 김현식, 최영규, 이만형, "진화알리즘에 의한 온라인 제어방식," '95 KACC, pp. 906-910, 1995.
- [8] W. Li, X. Cheng, "Computer Control of High Speed Cranes," Proceedings of the American Control Conference, pp. 2562-2566, 1993.
- [9] S. Sagara, F. Ohkawa, "Adaptive Control for Crane," 日本機械學會論文集, Vol. 56, No. 526, pp. 150-154, 1990.
- [10] 윤지섭, 강이석, "천정크레인의 무진동/위치제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- [11] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," Sprigner-Verlag, 1994.
- [12] J. H. Park, H. S. Kim, Y. K. Choi, "Trajectory Optimization and Control for Robot Manipulator Using Evolution Strategy and Fuzzy Logic," Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 4320-4325, 1997.
- [13] I. K. Jeong, J. J. LEE, "Adaptive Simulated Annealing Genetic Algorithm for Control Applications," International Journal of Systems Science, pp. 241-253, 1996.