

論 文
A3-2

유전프로그래밍에 의한 겐트리 크레인의 최적제어에 관한 연구

이영진* · 배종일** · 이권순***

Optimal Control of Gantry Crane Using Genetic Programming

Y.J. Lee · J.I. Bae · K.S. Lee

Key Words : 유전프로그래밍(Genetic programming), 진화전략(Evolution strategy), 2 자유도 PID 제어기(2-DOF PID controller), 겐트리 크레인(Gantry crane), 자동동조(Auto Tuning)

Abstract

In this paper, we present a design of optimal 2-DOF PID controller for control of gantry crane which has to control swing motion and trolley position. For tuning the parameter of 2-DOF PID controller, we used evolution strategy(ES). 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 speed and rapid transportation is required. However, we developed an optimal controller which has to control the crane system with disturbance.

1. 서 론

최근 들어 컨테이너 터미널의 운영효율을 향상시키고 해상수송 물류비용을 절감하기 위하여 항만시설의 자동화에 관한 필요성이 전세계적으로 증가되고 있는 추세에 있다. 따라서, 새로운 최적의 컨테이너 터미널 개발을 위한 일환으로써 항만하역장비에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있는 가운데 트

롤리(Trolley), 스프레더(Spreader), Cable reels등과 같은 선측장비의 각종 구성장비에 대한 다양한 연구도 진행되고 있다. 항만부두에 인접되어 컨테이너 하역시에 사용되는 겐트리(Gantry)형의 컨테이너 크레인도 그 대표적인 예로써 부두주위의 작업환경에 따른 영향을 받고 있어 물체 이송시 요구되는 안정성을 고려한 최적제어기법들이 많이 등장하고 있다. 또한, 항만부두에서 사용되는 크레인은 정박된 선박으로부터

* 동아대학교 전기공학과 대학원
** 부경대학교 전기공학과 교수
*** 동아대학교 전기공학과 교수

터 컨테이너를 하역하는 시간은 비용과 직결되는 생산성 문제로서 이를 고려한 제어방법도 최근에 많은 요구가 되고 있는 실정이다[1,2].

이와 같은 크레인 시스템은 항만하역장비 뿐만 아니라 산업현장에서도 다양한 중량의 물체를 이송시키는데 이용되는 것으로서 주위의 작업환경에 따라서 크레인을 이송하는 트롤리(Trolley)의 이동속도, 운반하고자 하는 물체의 무게 및 이송거리의 변화에 의하여 진자운동과 같은 흔들림과 그에 따른 위치오차도 함께 발생하고 있어, 생산성이 저하되거나 작업성이 크게 떨어지는 문제를 야기시키기도 한다. 특히, 부두에 정박된 배로부터 컨테이너를 하역시에는 바다로부터 불어오는 바람과 같은 외란에 의한 스프레더의 흔들림으로 시설물과의 충돌로 시설물이나 운반물체의 파괴 및 손상을 초래하기도 할 뿐만 아니라, 때에 따라서는 인명피해도 야기시킬 수 있는 원인이 되기도 한다. 때문에 이를 제어하기 위하여 퍼지이론, 유전알고리즘을 포함한 각종 PID 제어와 같은 많은 제어기법들이 적용되고 있지만 아직까지도 실제 산업현장에서는 숙련자의 판단에 의존하고 있는 실정이다[3-6].

크레인 시스템을 제어하는 방법에는 속도제어에 의한 방법과 토크 제어에 의한 두 가지로 제어방법으로 나눌 수 있는데 이는 제어입력이 각각 속도와 토크인 경우로서 두 가지 제어시스템 모두 위치제어와 진동억제제어 변수를 갖는다. 크레인의 물체를 이송시 발생하는 진동각과 위치오차는 서로 연관된 관계로서 위치제어에 비중을 두게되면 진동제어에 소홀해지고 진동제어에 비중을 두게되면 위치제어에 문제가 될 수 있는 관계로서 이 두 가지 제어변수를 함께 제어하기란 쉽지 않은 문제이다[6,7].

따라서, 본 연구에서는 크레인 시스템에 대하여 다양한 설정위치와 주위의 외란이 인가되었을 경우에도 효과적인 제어가 될 수 있도록 위치오차 및 진동각의 두 가지 제어변수를 동시에 제어할 수 있는 최적의 제어기를 설계하고자 한다. 즉, 이송물체의 진동을 최소화하면서 최소의 시간 내에 설정된 위치에 도달할 수 있는 제어기로서, 제어기로는 설정치 변화와 외란 제어에 강인한 2 자유도 PID(2-DOF PID) 제어기를

적용하였으며, 제어기 파라미터 자동동조(Auto tuning)를 위하여 유전프로그래밍의 한 방법으로서 그 적용이 간단하면서도 최적의 값을 구하기 쉬운 진화전략(Evolution strategy, ES)을 이용하여 구현하여 보았다.

특히, 진화전략을 비롯한 휴리스틱 알고리즘은 최근에 여러 가지 병합제어 형태로 다양한 제어대상에 적용되어 그 우수성이 입증되고 있어 본 연구의 방향도 기존의 제어방식이 가지고 있는 국부 제어방법에 의한 외란에 강인하지 못한 단점과 같은 한계점을 극복할 수 있는 좋은 계기가 될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한, 본 연구에서 시뮬레이션한 결과 ES로 동조된 제어기의 제어특성이 우수함이 확인됨에 따라 실제 산업현장에서도 손쉽게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 본 론

1. 제어계의 수학적 모델링

1.1 컨테이너 크레인 모델

센터리 크레인 시스템의 제어계는 그림 1과 같이 x축 방향의 트롤리의 주행속도 조작과 y축 방향의 로프의 조작으로 크게 나누어 생각할 수 있다.

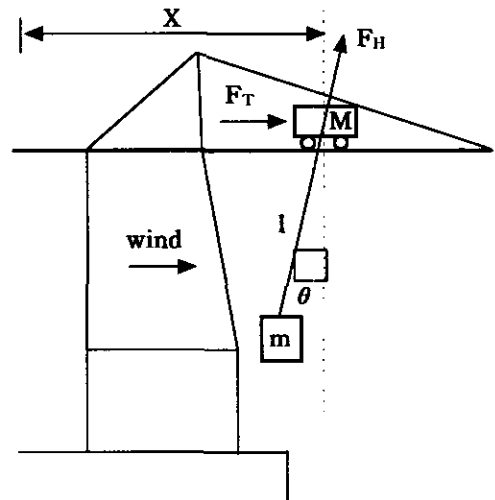


Fig. 1 Gantry Crane System.

x : 트롤리 위치[m]

\dot{x} : 트롤리 속도[m/sec]

\ddot{x} : 트롤리 가속도[m/sec²]

l : 루프 길이[m]

\dot{l} : 루프 속도[m/sec]

θ : 진동각[deg]

$\dot{\theta}$: 진동각속도[deg/sec]

$\ddot{\theta}$: 진동각 가속도[deg/sec²]

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 제어계의 선형화

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

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

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

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

이상과 같은 시스템에 대하여 본 논문에서는 루프의 길이는 변하지 않고 고정되어 있다고 가정 한 2자유도의 시스템으로 선형화하여 트롤리의 속도만으로 주어진 위치까지 운반물체를 최소의 진동으로 이송시킬 수 있는 시스템으로 구성하였다.

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + m\dot{\theta}^2 \sin \theta = F_T \quad (4)$$

$$m\dot{x} \cos \theta - ml\dot{\theta} = mg \sin \theta \quad (5)$$

여기서, 운반물체의 진동각이 아주 작다고 가정하면 $\sin \theta \cong \theta$ 로 $\cos \theta = 1$ 로 가정할 수 있으며, 이로부터 다음과 같은 선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} = F_T \quad (6)$$

$$l\dot{\theta} + g\theta = \dot{x} \quad (7)$$

2. 최적제어기 설계

2.1 2-DOF PID 제어기

본 논문에서 연구한 크레인 제어계는 외란을 고려하지 않은 일반적인 경우 P나 PI제어기와 같은 단순화된 제어기능으로도 충분히 제어할 수 있지만, 설정치가 변화되거나 바람과 같은 주위의 예측할 수 없는 환경변화에 대해서는 원활한 제어가 어렵게 됨에 따라 운전자의 작업환경에 그만큼의 부담을 주게된다. 따라서, 본 논문에서는 설정치 추종 성능 뿐만 아니라 외란제거능력이 매우 우수한 것으로 알려진 2-자유도 PID제어기를 크레인의 위치 및 운반물의 흔들림 제어계에 적용하는 문제를 연구하고자 한[11].

2.2 진화전략

제어기 파라미터들을 동조하기 위하여 도입된 진화전략은 식 8과 같이 주어진 탐색공간내에서 우수한 개체를 선택해 나감으로써 최적점 근처에서 최적 탐색능력이 뛰어난 특징을 가지고 있다[12-14].

$$x^{t+1} = x^t + N(0, \sigma) \quad (8)$$

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, 진화전략은 주어진 표준편차내의 탐색공간에서만 해를 탐색하므로 국부수렴의 문제가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 GA법에 적용되는 교배연

산자 및 돌연변이 연산자를 도입하여 해의 탐색공간을 넓혀 국부수렴문제를 해결하였다. 본 논문에서 적용한 교배방법은 식 9와 같은 산술적 교배를 적용하였으며,

$$\begin{aligned} x_1^{t+1} &= ax_1^t + (1-a)x_2^t \\ x_2^{t+1} &= (1-a)x_1^t + ax_2^t \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \{e_x(t) \cdot t \cdot w_1 + e_\theta(t) \cdot t \cdot w_2\} \quad (10)$$

여기서, $e_x(t)$ 는 위치오차, $e_\theta(t)$ 는 진동오차, w_1 과 w_2 는 각각 위치와 진동의 가중치이다.

2.3 최적제어기 구성

2-자유도 PID제어기의 경우 설정치 변화에 대해서는 기존의 P, I, D 파라미터를 적절히 조정하고 외란에 대해서는 α , β 를 조정하면 되므로 본 논문에서는 그림 3과 같이 2-자유도 제어기의 파라미터를 진화전략으로 자동동조하여 위치오차 및 진동각이 최소가 되도록 제어할 수 있고 외란에도 강인한 제어가 되도록 구성하였다.

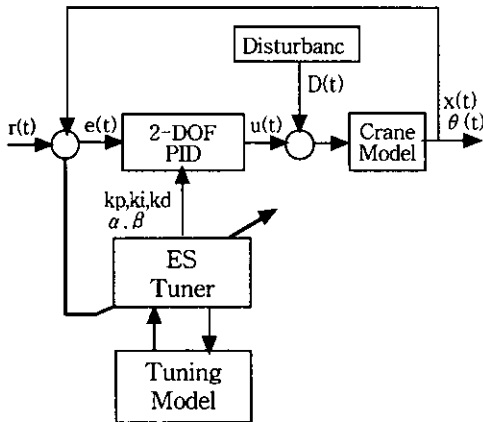


Fig. 3 Block diagram of the proposed control system.

3. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 표 1과 같은 시스템 파라미터를 갖는 크레인 시스템에 대하여 그림 3과 같이 구성된 자동동조 2-자유도 PID 제어기를 적용하여 다음과 같은 경우에 대하여 운반물의 위치오차, 진동오차, 및 이송속도등을 구하여 제어성능을 관찰하여 보았다.

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]

case 1) 위치 설정을 10[m]로 하고 초기 진동각을 0[deg]로 하고 외란을 가하지 않은 경우

case 2) 위치 설정을 10[m]로 하고 초기 진동 2[deg]로 하고 외란을 가하지 않은 경우

case 3) 위치 설정을 10[m]로 하고 초기 진동각을 0[deg]로 하고 외란을 가한 경우

case 4) 위치 설정을 10[m]로 하고 초기 진동각을 0[deg]로 하고 외란을 가한 경우

그림 4는 case 1의 경우로 초기 진동각이 없으므로 설정된 위치에 빠르게 수렴하는 특징을 보이고 있으며, 그림 5는 case 2의 경우로 외란은 인가되지 않았지

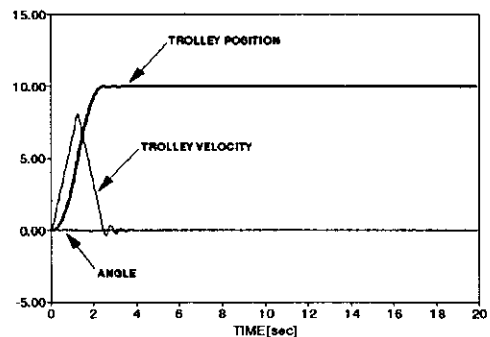


Fig. 4 Time response of the crane system(case 1).

만 초기의 진동각이 주어짐에 따라 case 1보다 설정된 위치에 수렴하는 시간이 다소 지연되고 있다. 그림 6과 7은 case 3, 4의 경우로서 case 1과 2의 경우에 외란을 인가한 응답특성으로써 외란제거시간이 약 5초 이내로 상당히 우수함을 알 수 있다.

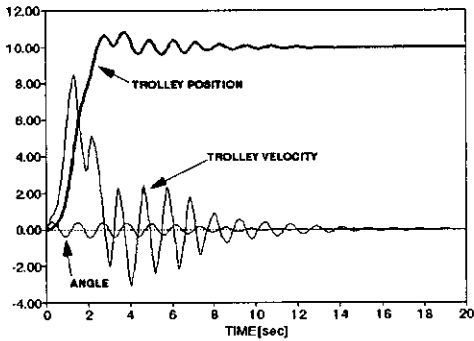


Fig. 5 Time response of the crane system(case 2).

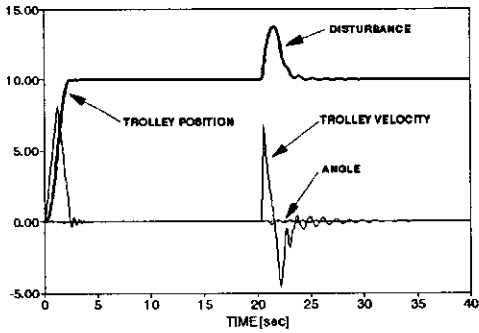


Fig. 6 Time response of the crane system(case 3)

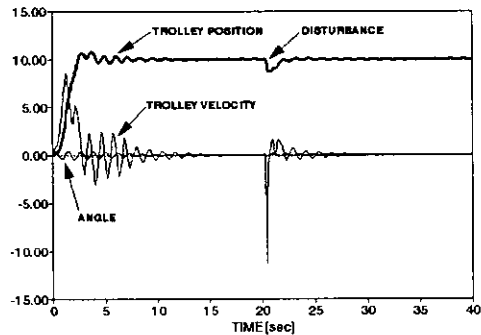
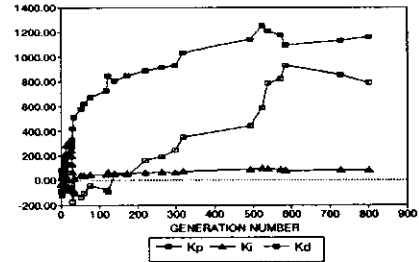
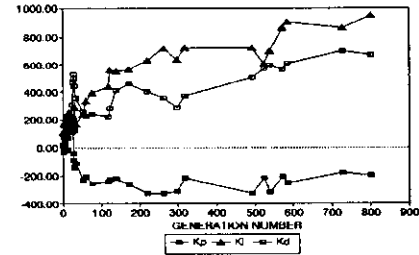


Fig. 7 Time response of the crane system(case 4)

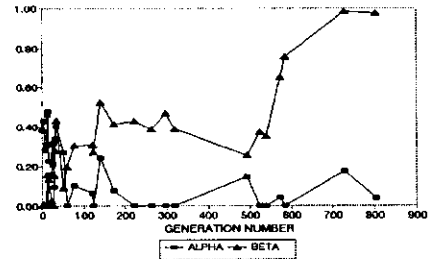
각 경우에 대하여 적용된 제어기는 동일한 파라미터를 적용하였으며, 자동동조된 각 파라미터는 위치 제어 파라미터 Kp_x, Ki_x, Kd_x , 진동제어 파라미터 $Kp_\theta, Ki_\theta, Kd_\theta$ 및 α, β 를 포함하여 모두 8개의 파라미터를 동조하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다.



(a) PID parameter for trolley position control



(b) PID parameter for payload angle control



(c) α and β of the 2-DOF PID controller parameter

Fig. 8 Auto tuned parameters using ES

III. 결 론

본 논문에서 추구하고자 하는 바는 실제 산업현장에서 발생하는 다양한 환경변화와 같은 외란에 강인

하고 보다 안정된 최적의 크레인 제어 시스템을 개발하는데 있다. 따라서, 본 연구에서는 우선 선형화된 크레인 수학 모델에 대하여 위치 및 진동을 동시에 제어할 수 있는 최적의 2-자유도 PID제어기를 설계하여 시뮬레이션 해본 결과 다음과 같은 결론과 새로운 문제점을 발견할 수 있었다.

첫째, 진화전략을 이용하여 PID제어기 파라미터를 복잡한 수식을 거치지 않고도 짧은 시간내에 최적의 파라미터를 동조할 수 있으므로, 이를 on-line으로 구성하여 자동동조시키면 효과적일 것으로 기대되며,

둘째, 크레인 제어변수는 크게 위치와 진동각으로 나누어 생각할 수 있는데 본 논문에서 제안한 식 10의 평가함수를 사용하므로써 가중치 w_1 과 w_2 의 변화에 따라 위치 및 진동각 오차를 운전자가 선택적으로 가중을 두어 제어할 수 있다는 장점이 있다.

아울러, 향후의 과제로서는 첫째, 위치와 진동각오차의 상관관계를 명확히 밝혀 보다 신뢰성 있는 평가함수가 설정되어야만 최적제어조건을 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 둘째, on-line 구성에 필요한 시스템 동정에 관한 연구와 실제 산업현장에서 바로 적용될 수 있도록 비선형성을 고려한 실용화 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [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] 손정기, "컨테이너 크레인 스프레더의 흔들림 제어," 부경대학교 석사논문, 1997.
- [3] M. sakumoto, T. Kayashi, "Application of Fuzzy Control to Anti-Sway System of Container Crane," 日本機械學會論文集, Vol. 58, No. 550, pp. 106-111, 1992.
- [4] J. W. Auernig, H. troger, "time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load," Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 437-447, 1987.
- [5] 정승현, 박정일, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, Vol. 3, No. 5, pp. 435-442, 1997.
- [6] 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.
- [7] A. Martinen, J. Virkkunen, and R. T. Salminen, "Control Study with a Pilot Crane," IEEE Transactions on Education, Vol. 33, No. 3, pp. 25298-305, 1990.
- [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/위치 제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- [11] 김동화, 이원규, "신경망 2-자유도 PID제어기를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 321-328, 1998.
- [12] 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.
- [13] 박진현, 김현식, 최영규, 이만형, "진화알고리즘에 의한 온라인 제어방식," '95 KACC, pp. 906-910, 1995.
- [14] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," Sprigner-Verlag, 1994.