2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

크레인 제어를 위한 적응 퍼지 제어기의 설계

이종혁*, 정희명*, 박준호*, 이화석**, 황기현***, 문경준§
*부산대학교, **거제대학, ***동서대학교, §한국원자력연구소

Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller for Crane System

J. Lee*, H. Jeong*, J. H. Park*, H. Lee**, G. Hwang***, K. Mun§
Pusan National Univ., ** Koje College, ***Dong-Seo Univ., §KAERI

Abstract - In this paper, we designed the adaptive fuzzy logic controller for crane system using neural network and real-coding genetic algorithm. The proposed algorithm show a good performance on convergence velocity and diversity of population among evolutionary computations. The weights of neural network is adaptively changed to tune the input/output gain of fuzzy logic controller. And the genetic algorithm was used to learn the feedforward neural network. As a result of computer simulation, the proposed adaptive fuzzy logic controller is superior to conventional controllers in moving and modifying the destination point

1. 서 론

크레인은 산업계 전반에 걸쳐서 중량물을 이동하는데 효율적으로 사용되고 있다. 그러나 중량물이 줄에 매달려 옮겨지므로 이송 도중에 흔들림이 발생하게 되어 작업 효율이 저하되고, 심한 경우에는 제품을 파손시키거나 안전사고를 일으킬 수 있다. 그리고 크레인 시스템의 특성으로 인해 전달 함수를 구하기 어려울 뿐만 아니라, 시스템이 주위 환경에 노출되어 사용되므로 시스템의 변형이나 마모를 피할 수 없다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 시스템의 전달함수 없이도 제어기를 설계할 수 있어야 하고, 시스템의 변형에 강인성을 가지거나 능동적으로 대처할 수 있는 제어기가 필요하다.

최근에는 전문가의 경험이나 지식을 바탕으로 인간의 의사결정을 모방한 퍼지 제어기와 인간의 두뇌 구조를 모의하여 인지적 정보 처리 구조를 갖는 신경회로망 제어기와 같은 지능제어 이론을 비선형 시스템에 적용하는 연구[1-4]가 진행되고 있다. 또한 전문가의 경험적 지식을 이용한 퍼지 제어기도 비선형시스템의 제어에 적용되고 있다. 그러나 퍼지 제어기가 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 퍼지 규칙과 퍼지 변수의 소속 함수 모양을 조정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식 없이는 적합한 소속 함수 및 규칙을 결정하기가 어려운 단점이 있었다. 따라서 근래에는 유전학과 진화이론에 바탕을 둔 확률적인 최적화 알고리즘인 진화연산을 이용하여 퍼지 규칙과 퍼지 변수의 소속 함수 모양을 튜닝하는 연구[5,6]도 진행되고 있다. 또한 시스템의 변화에 따라 PID형 퍼지 제어기의 이득을 적절히 조정하는 적응제어(adaptive control) 방법을 사용한 제어기를 설계하는 방법도 제안되었다.[7-9]

자연생태계의 진화를 모의한 확률적인 최적화 탐색 알고리즘인 진화연산(evolutionary computation : EC)은 유전알고리즘(genetic algorithm : GA), 진화 전략(evolution strategy : ES), 진화 프로그래밍(evolutionary programming : EP)등의 기법으로 대변된다.[10, 11] 진화연산 기법은 최적화 문제에 대해 하나의 해가 아닌 해집단(population)으로 탐색하며, 해집단 내에서 더 좋은 적합도(fitness)를 가지는 해들을 이용하여 새로운 해집단을 생성하므로 전역 최적해를 찾을 가능성이 높은 확률론적인 방법이다. 또한 적합도로 대변되는 목적함수의 미분가능, 연속성 등에 영향을 받지 않는다.

따라서 본 논문에서는 해의 다양성과 수렴 속도 측면에서 좋은 성능을 나타내는 실수형 유전알고리즘과 신경회로망을 이용하여 적응 퍼지제어기(adaptive fuzzy logic controller :AFLC)를 설계법을 제안하였다. 즉, 실수형 유전알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 입·출력 이득을 코딩한 후 이를 실시간으로 변화하도록 신경회로망의 가중치를 튜닝하였다.

본 논문에서 설계한 제어기의 성능을 평가하기 위하여 참고문헌[12]의 방법으로 설계된 제어기와 시지연을 갖는 제어시스템과 비교하였으며, 그 결과 본 논문에서 제안한 적응 퍼지제어기가 기존의 퍼지제어기보다 오버슈트의 크기, 정정시간, 상승 시간 면에서 더 우수한 제어성능을 나타내고, 외란에도 강인한 특성을 보임을 확인하였다. 또한, 크레인 제어기로서의 성능을 평가하기 위해 참고문헌[13, 14]에 주어진 시스템에 각각 적용하여 시뮬레이션한 결과, 제안한 적응 퍼지제어기가 기존의 퍼지 제어기보다 흔들림 정정시간과 흔들림 각도의 크기에서 더 우수한 성능을 나타내었으며, 외란에도 강인한 특성을 보였다.

2. 크레인 시스템 모델

2차원 평면크레인에 대한 좌표계를 그림 1에 나타내었다. 여기서, X는 트롤리 이동방향,Z는 호이스트 방향, $l(t)$는 로프 길이, $x(t)$는 트롤리 변위, $\theta(t)$는 흔들림 각도, F_x및 F_l은 트롤리 및 호이스트의 제어 입력이며, m_p는 화물의 질량, m_t와 m_l은 트롤리와 호이스트의 등가 질량, I는 화물의 질량관성모멘트, g는 중력가속도를 나타낸다.

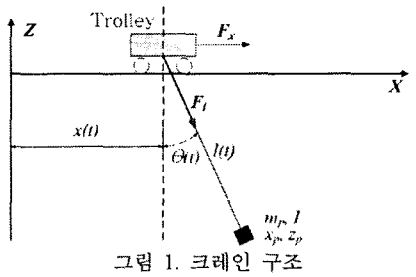

그림 1. 크레인 구조

라그랑지 방정식을 이용하여 컨테이너 크레인의 운동방정식을 구하면 식(1)~(3)과 같다.

$$(m_t + m_p)\ddot{x} + m_p \sin\theta \ddot{l} + m_p l \cos\theta \ddot{\theta} + 2m_p \cos\theta \dot{l}\dot{\theta} - m_p l \sin\theta \dot{\theta}^2 = F_x \quad (1)$$

$$m_p \sin\theta \ddot{x} + (m_p + m_l)\ddot{l} - m_p l \dot{\theta}^2 - m_p g \cos\theta = F_l \quad (2)$$

$$m_p l \cos\theta \ddot{x} + (m_p l^2 + I)\ddot{\theta} + 2m_p \dot{l}\dot{\theta}^2 - m_p g l \sin\theta = 0 \quad (3)$$

3. 실수형 유전알고리즘과 신경회로망을 이용한 적응 퍼지 제어기의 설계 및 성능 평가

3.1 실수형 유전알고리즘, 퍼지 및 신경회로망

유전학 및 자연도태의 원리에 근거한 유전알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보 교환을 통해 탐색 공간을 조사해 나감으로써 주위환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자 하는 최적화 알고리즘이다. 본 논문에서 사용한 유전알고리즘은 실변수형 코딩방식으로 해집단을 이진수의 스트링이 아닌 실변수로 부호화하였다.

퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나 얻어지는 정보가 정성적이고 불확실한 경우에 전문가의 지식을 활용하는 방법이다. 또한 기존의 수학적 모델링을 기초로 한 제어기와는 달리 시스템의 입·출력 관계만으로도 제어기를 설계할 수 있다. 퍼지제어기는 일반적으로 퍼지화, 퍼지추론 및 비퍼지화 과정으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 퍼지화 방법으로 이등변 삼각형 방법, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론 방법, 그리고 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다.

신경회로망은 인간의 두뇌 구조를 모의하여 인지적 정보 처리 구조를 갖는 시스템이다. 이는 주어진 입력들에 가중치를 조정하여 원하는 출력을 생성하는 학습 기능과 왜곡되거나 잡음을 가진 입력 및 불완전한 입력에 대해서도 학습에 의해 가장 유사한 출력값을 낼 수 있는 일반화 기능을 가지고 있다. 본 논문에서 이용한 전방향 신경회로망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성하였고, 수렴 속도를 개선하기 위해 바이어스 항을 첨가하였다.

전방향 신경회로망의 학습 알고리즘으로 실수형 유전알고리즘을 이용하여 출력층에서 실제로 계산된 출력값과 학습쌍에 의해 제시된 기준 출값과의 오차를 줄이도록 가중치를 조정하였다.

3.2 실수형 유전알고리즘과 신경회로망을 이용한 적응 퍼지 제어기의 설계

본 논문에서는 다양한 외란 및 제어시스템의 파라미터 변동에 대해서 퍼지 제어기의 입·출력 이득을 전방향 신경회로망으로 실시간으로 변경하는 적응 퍼지 제어기를 제안하였다. 이때, 퍼지 제어기의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 실수형 유전알고리즘을 이용하여 튜닝하였다. 그림 2에 실수형 유전알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 튜닝하기 위한 구성도를 나타내었다.

퍼지 제어기의 입력으로는 오차와 오차의 변화분을 사용하였고 이를 식 (4)에 나타내었다. 또한 전방향 신경회로망의 입력으로 시지연을 가지는 기준입력과 실제출력 사이의 오차를 이용하였다.

$$E(t) = SF_1(t)\, e(t)$$
$$DE(t) = SF_2(t)\, \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$
여기서, $e(t) = Ref(t) - Out(t)$

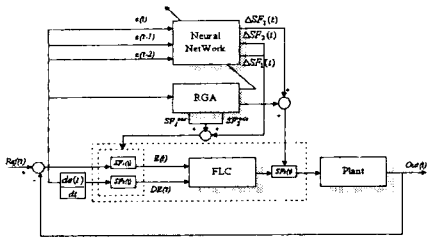

그림 2. 제안한 적응 퍼지 제어기의 구성도

3.3 제안한 제어기의 성능 평가

본 논문에서 제안한 적응 퍼지 제어기의 성능을 검증하기 위해 참고문헌 [12]의 퍼지 제어기를 식 (5)로 주어진 2차 비선형 시스템에 적용하여 제어 성능을 비교하였다.

적응 퍼지 제어기의 설계에 사용된 조건은 제어시스템에 대한 시지연 상수가 L=0.0, 0.2, 0.4[sec]를 이용하였고, 강인성 평가에 사용된 조건은 시지연 상수 L=0.3, 0.5[sec]와 L=0.3[sec]일 때 부하가 변동한 경우를 모의하였다.

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + 0.25\, y^2(t) = u(t-L) \quad (5)$$

표 1에 본 논문의 방법과 참고문헌의 방법과의 제어성능분석을 나타내었다. 표 1에 나타낸 바와 같이 시정수 L의 변동에 대해서 제안한 방법이 참고 문헌[12]의 퍼지 제어기보다 상승 시간 및 정정시간 측면에서 우수한 제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

표 1.제어 성능 분석

L	제어기 종류	최대 오버슈트 [%]	상승시간 [sec]	정정시간 [sec]
0.2	FLC	23.1	3.11	12
	AFLC	12.7	2.29	10
0.3	FLC	25.5	3.06	12
	AFLC	19.5	2.15	10
0.5	FLC	30.0	2.97	12
	AFLC	28.5	2.01	12

4. 적응 퍼지 제어기를 이용한 크레인 제어

제안한 적응 퍼지 제어기의 성능을 검증하기 위해 기존의 크레인 제어기와 제어 성능을 비교·분석 하였다.

4.1 사례연구 1

화물이 목표점으로 이동하는 가운데 호이스트 로프의 길이 변화가 있는 경우를 대상으로 한 참고 문헌[13]의 크레인용 비선형 제어기와 제어 성능을 비교하였으며, 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다,

m_p = 0.73 kg, m_t = 1.06 kg, m_l = 0.5 kg,

I = 0.005 kgm^2, x_d = 10m, $l(0)$ = 0.7 m

$$l_d = \begin{cases} 0.7 - 0.12t & (0 \le t < 5) \\ 0.7 + 0.12(t-10) & (5 \le t < 10) \\ 0.7 & (t \ge 10) \end{cases}$$

참고문헌 [13]과 제안한 방법에 의한 시뮬레이션 결과

를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 화물이 정상상태에 도달하는 시간은 비슷하지만, 제안한 제어기가 초기 흔들림 각도나 과도상태의 흔들림 각도와 흔들림 지속 시간과 같은 과도 상태 제어 측면에서 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

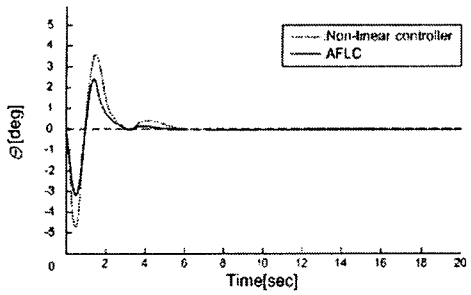

그림 3. 제어성능 분석: 사례연구 1

4.2 사례연구 2

이동 중에 외란이 발생한 경우를 대상으로 한 참고문헌[14]의 방법으로 설계된 GA-fuzzy제어기와 크레인 제어 성능을 비교하였다. 이때 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같으며, 이 경우 호이스트 로프의 변화는 없는 것으로 가정하였다.

m_p = 3.0 kg, m_t = 2.0 kg, m_l = 0.5 kg,
I = 0.005 kgm^2, x_d = 10m, l = 0.5 m

외란으로는 대상물체가 목표로 이동 중에 20초 지점에서 바람의 영향 혹은 외부 충격에 의해 화물의 각도가 진행방향의 반대쪽으로 0.03[rad]만큼 흔들린 경우를 상정하였으며, 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 GA-fuzzy제어기[14]에 비해 제안한 제어기가 초기 흔들림 각도나 편차와 같은 과도상태 제어 측면에서 우수한 성능을 나타내었을 뿐 아니라 이동시 발생한 외란에 대해서도 흔들림 각도 및 정정시간에서 안정적인 제어 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

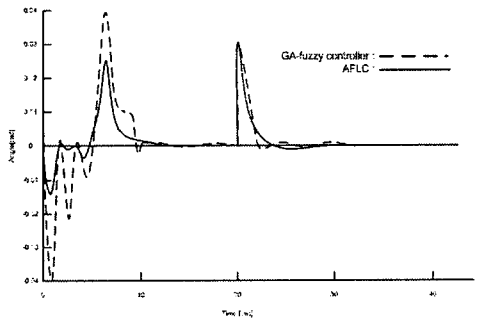

그림 4. 제어성능 분석: 사례연구 2

5. 결 론

본 논문에서는 크레인의 작업 속도 개선과 흔들림에 강인한 제어기를 설계하기 위해 유전 알고리즘과 신경회로망을 이용한 적응 퍼지 제어기를 설계하였다. 이를 위해 적합한 해집단 구성 및 적합도 선정 방법을 개발하였고, 실수형 유전알고리즘으로 전방향 신경회로망의 가중치와 퍼지 제어기의 입·출력 이득을 최적화하도록 실시간으로 매 샘플링 시간마다 적응적으로 변경시켰다.

제안한 제어기의 유용성을 평가하기 위해 일반적인 비선형 시스템에 대해 기존의 퍼지 제어기와 제안한 제어기의 제어 성능을 비교하여 그 우수성을 보였다.

또한, 크레인 제어기로서 제안한 제어기의 우수성을 입증하기 위해 기존의 방법으로 설계된 크레인용 제어기들과 본 논문에서 제안한 제어기의 제어성능을 비교하였다. 시뮬레이션을 통하여 이동중의 호이스트 로프 변화나, 외란이 발생하는 경우에 대해서 제안한 제어기가 기존의 방법으로 설계된 제어기보다 우수한 제어성능을 보임을 확인하였다.

향후 과제로서 멤버쉽 함수 및 퍼지 룰의 최적화, 그리고 최적화 알고리즘의 개선 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 황기현, 윤재영, 박준호, ""유전알고리즘을 이용한 HVDC 정전류 제어용 자기동조 퍼지제어기 설계", 대한전기학회 논문지, 46권 10호, pp. pp. 1461-1467, 1997.

[2] 황기현, 박준호, "적응진화연산을 이용한 퍼지-전력계통안정화장치 설계", 대한전기학회 논문지, 48권 6호, pp. 704-711, 1999.

[3] 황기현, 최재곤, 박준호, "적응진화알고리즘을 이용한 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계", 대한전기학회 논문지, 49권 5호, pp. 205-211, 2000.

[4] Siri Weerasoriya and Mohamed A. El-Sharkawi, "Laboratory Implementation of a Neural Network Trajectory Controller for a DC motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, pp. 107 - 113, March, 1993.

[5] Gi-Hyun Hwang, June Ho Park and Jae Young Yoon, "A Genetic Algorithm Approach to Design the Optimal Fuzzy Logic Controller for Rectifier Current Control in HVDC System", Journal of Electrical Engineering and Information Science, vol. 3 no. 6, pp. 792-797, 1998,

[6] Vittorio Maniezzo, "Genetic Evaluation of the Topology and Weight Distribution of Neural Networks", IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 5, no. 1, pp. 39 - 53, Jan., 1994.

[7] Emmanuel G. Collins, Jr. and Chun Fan, Richard Millett , "Automated PI Tuning for a Weigh Belt Feeder via unfalsified Control", Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 1, pp. 785-790, 1999.

[8] Dragan Kukolj, Filip Kulic and Emil Levi, "Artificial Intelligence Based Gain Scheduling of PI Speed Controller in DC Motor Drives", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 1, pp. 425-429, 1999.

[9] Fan JC, and Kobayashi T, "A Simple Adaptive PI Controller for Linear Systems with Constant Disturbances", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, no.5, pp. 733-736, May, 1998.

[10] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, ptimization, and Machine Learning, *Addison-Wesley publishing Company*, INC., 1989.

[11] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, *Springer-Verlag*, 1992.

[12] R. K. Mudi and N. R. Pal, "A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 7, no. 1, pp. 2 -16, Feb. 1999.

[13] 강민우, 홍경태, 홍금식, "컨테이너 크레인의 되먹임선형화 제어 및 자동랜딩", 제2회 로보틱스 및 응용연구회·지능시스템연구회 합동학술 발표대회논문지, 부산대학교, pp. 11-21, December 17-18, 2004.

[14] 정형환, 허동렬, 오경근, 주석민, 안병철, "유전알고리즘을 이용한 컨테이너 크레인 시스템의 위치제어 및 흔들림 억제를 위한 퍼지 제어기 설계" 한국박용기관학회논문지, 24권, 6호, pp. 725-732, 2000.