

지능형 제어 기법에 의한 공정 제어

○ 채창현 이창훈 임은빈 우광방

(연세대학교 전기공학과)

Process Control Utilizing the Method of Intelligent Control

Chang Hyun Chae, Chang Hoon Lee, Eun Bin Yim, and Kwang Bang Woo

Yonsei University, Dept. of Electrical Engineering

ABSTRACT

This paper demonstrates an AI application for representing operator's heuristic knowledges in implementing process control. AI controller constitutes servo and regulatory controller, respectively. The knowledge base for servo controller was designed to obtain the process output with respect to the desired set-point in short period. The regulatory controller was to provide smooth output near the set-point. The AI controllers was implemented in Turbo-PROLOG on IBM-PC. For the parallel processing, Turbo-C was linked to calculate the process output. The result shows that this AI controller can be well suited not only for minimum phase but also for non-minimum phase. This controller may be used as a back-up controller for rather extensive expert system.

1. 서론

최근 공정 제어 분야에서 향상된 제어물 수행하기 위하여 다양한 제어가 제안되고 있다. 실제 공정에 있어서의 많은 문제점의 극복을 위하여 숙련된 전문가의 경험적 지식이 절실히 요구되고 있다. 이와같은 경험적 지식(Heuristic Knowledge)이 제어 알고리즘에 내장되도록 기존의 언어로 수식화 하는 데 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 제어 시스템에 AI 기법을 도입하는 전문가 제어가 활발히 진행되고 있다.

제어 시스템에 AI 기법을 도입하는 방법에는, 첫째 기존의 제어 알고리즘에 의한 출력물 감시하여 문제점 발생 시 경험적 지식에 의해 처방을 하는 관리 제어(Supervising Control) [1-14]와, 둘째 제어 알고리즘 자체에 AI 기법을 도입하는 지능형 제어기(Intelligent Controller) [15, 16]를 설계하는 방법이다. Aström 등 [1, 2]은 전자의 방법을 단일 페루프 시스템에 적용하여 제어가 수동, 동조, 고전 PID 모드가 선정되도록 약 70여개의 규칙을 적용하였다. 이 경우에는 대형 컴퓨터에 의해 시행되어 PC-Level에서 적용하기에는 문제점이 있다. Jiang 등 [11, 12]은 전문가 시스템을 계층적 구조로 구성하여 모든 의사 결정과 오점 탐지(Fault Detection)를 관리 구조에서 수행하고, 제어 구조로는 PID 제어를 사용하여 실시간에 적용하였으나, 페루프 극점을 미리 알아야 하며, 페루프 극점이 복소 쌍대값을 가져야 감시할 수 있다는 단점이 있다. 후자에 의한 방법으로 Sripatha 등 [15, 16]은 AI 기법과 Fuzzy 논리방법을 결합하여 프로세스의 실시간 제어에 적용하였으나, Fuzzy 집합 구성에 문제가 많다.

본 연구에서는 지능형 제어물 목적으로 AI 제어기를 설계하고자 한다. Sripatha 등이 제안한 AI 제어기는

- (1) Servo 제어기와 조절 제어기로 분리되며,
- (2) 대상 프로세스에 따라 Fuzzy 논리를 위한 Fuzzy Set Membership 함수를 정의하여야 하고,
- (3) 규칙 적용마다 정의된 변수의 결정에 따른 불확실성(Uncertainty)이 발생하는 단점이 있다.

본 연구에서 AI 제어기는 Servo 제어 및 조절 제어물 순차적으로 수행하여 Set-Point, 제어 오차 $e(k)$, 최대 제어 입력 U_{max} 만으로 제어 입력을 조정하며, 별도의 Fuzzy Set Membership 함수의 정의 없이 규칙을 적용하여, 불확실성이 발생하지 않도록 한다. 이러한 제어기는 앞으로 구성될 전문가 제어 시스템에서 Back-Up 제어기로서 사용될 수 있을 것이다.

2. 지식 기반의 설정

2-1 Servo 제어물 위한 지식 기반

서어보 제어의 목적은 프로세스 출력을 원하는 Set-Point 까지 최대한 시간내에 이동시키는 데 있다.

기존 입력이 양의 Set-Point 변화가 생기게 되면 Two-Level Bang Bang 제어 이론을 적용하여 제어 입력은 초기값 U_0 에서 U_{max} 로 전환되고 이 값은 제어 오차 $e(k)$ 가 e^* 이내로 될 때까지 유지된다. 제어 오차가 e^* 내로 되면 제어 입력은 U_{min} 으로 전환되어 최대로 프로세스의 차수 N번의 샘플링 시간동안 유지된 후에 바로 조절 제어물 시작한다. 음의 Set-Point 변화가 생기면, 제어 입력은 부의 $U_{max}(-U_{max})$ 으로 전환되어 제어 오차 $e(k)$ 가 e^* 가 되면 부의 $U_{min}(-U_{min})$ 으로 전환된다. 만일 e^* 값이 너무 크면 출력에는 Underdamping 현상이 생기게 되고, e^* 값이 너무 작으면 Overshoot 현상이 생기게 된다. 따라서 Servo 제어용 지식 베이스는 크게 제어입력을 조절하는 규칙군과 전환 요소 e^* 를 조절하는 규칙군으로 구분된다.

제어 입력을 조절하는 규칙군은 다음과 같다.

- (1) 양의 Set-Point 변화시
 - i) If $e(k) \leq e^*$, then $u(k) = U_{max}$
 - ii) If $e(k) > e^*$, then $u(k) = U_{min}$
 during N sampling times
- (2) 부의 Set-Point 변화시
 - i) If $e(k) \leq e^*$, then $u(k) = -U_{max}$
 - ii) If $e(k) > e^*$, then $u(k) = -U_{min}$
 during N sampling times

이 규칙군은 Set-Point 변화시에만 순차적으로 작동된다. 또한 전환 요소를 조절하는 규칙군은 양의 Set-Point 변화시에 선정되면, 음의 변화시에는 작동되지 않는 규칙군으로 다음과 같다.

- (1) 출력 $y(k)$ 가 Set-Point보다 크면 overshoot이므로 $e^* = e^* - \Delta e$
 - (2) 출력 $y(k)$ 가 Set-Point보다 작으면 underdamping이므로, $e^* = e^* + \Delta e$
- 여기서 Δe 는 설계자가 정하는 값으로 Set-Point 값의 1/10 정도로 한다.

2-2. 조절 제어물 위한 지식 기반

조절 제어는 출력이 Set-Point를 벗어나지 않도록 제어 변수의 외란을 보상한다. 프로세스의 현재의 상태는 현재의 Set-Point의 지식, 제한값, 프로세스 출력의 과거와 현재의 값, 경사도 등으로 직렬히 서술된다. 현재의 제어 오차 $e(k)$, 출력의 경사도에 관한 정보는 최근의 출력 3 개치에 적용하여 구해진다. 조절 제어를 위한 지식은 단순히 제어 변수에 대한 외란을 보상하는 것으로 출력이 Set-Point 값보다 크면 제어 입력을 작게하고 Set-Point 값보다 작으면 제어 입력을 크게한다. 본 연구에서 제어 입력을 결정하기 위하여 조절 제어용 지식 베이스를 다음과 같이 2개의 규칙군으로 분류한다.

- (1) 활성 규칙군 : 매 제어 구간에서 하나 이상 항상 사용되는 규칙군
- (2) 프로세스의 출력이 제한값 근처에 있을 때에만 적용되는 규칙군

이중 활성 규칙군은 상황 묘사를 규칙화한 것으로 다음과 같이 분류되고 각 규칙에 대한 부규칙은 그림 1과 같다.

- (1) 오차에 관한 규칙
- (2) 경사도에 관한 규칙
- (3) 제어 행위 증감에 관한 규칙

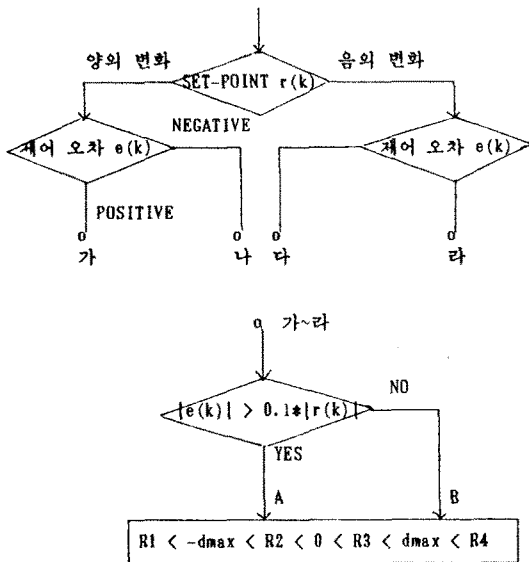


그림 1. 활성 규칙군의 세부 규칙

프로세스 출력이 제한값에 접근하고 있을 때에 적용되는 규칙은 다음의 세가지로, 첫째 규칙은 제한 영역에서 더해지는 부가적인 제어 행위의 양을 명시한다. 나머지 2개의 규칙군은 프로세스 출력이 제한 영역에 도달했을 때, 제한 영역을 벗어날 때, 그리고 제한 영역에 머물러 있을 때 발생하는 전체 행위에 대한 것이다.

- (1) 출력 $y(k)$ 가 제한 영역에 머물러 있을 때, 제어 입력의 큰 변화,
- (2) 출력 $y(k)$ 가 제한 영역으로 들어올 때, 제어 입력의 큰 변화를 누진,
- (3) 출력 $y(k)$ 가 제한 영역에서 벗어 나갈 때, 누진된 제어 입력의 변화를 감소

모든 규칙들은 If <Situation>, then <Action>의 형식으로 구성되며 <Situation>은 오차와 경사도에 관한 규칙의 결합으로 프로세스의 상태를 기술한다. <Action>은 제어 입력의 적절한 변화를 지시한다.

3. AI 제어기의 구성

3-1 서버보 제어의 Scheduler

2-1 절에서 살펴본 바와 같이 제어 입력을 조절하는 규칙군은 양의 Set-Point 변화시와 부의 Set-Point 변화시로 구분되거나 규칙을 줄이고, 제어 입력을 결정하는 시간을 줄이기 위하여 하나의 규칙으로 통합시킨다. 즉

- i) If $e(k) \leq e^*$, Then $u(k) = U_{max} * r(k)$
 - ii) If $e(k) > e^*$, Then $u(k) = U_{min} * r(k)$
- during N sampling times

Servo 제어시 U_{max} , U_{min} 의 크기와 e^* 의 선정은 서버보 제어를 성공적으로 수행하기 위한 중요한 요소이다. e^* 의 보정은 집한 요소를 조절하는 규칙군으로 쉽게 적용될 수 있으나, U_{max} , U_{min} 의 보정은 개루프 시행에 의한 입-출력 관계에서 유도하여야 한다.

3-2 조절 제어의 Scheduler

Servo 제어의 Scheduler는 간단한 반면, 조절 제어의 Scheduler는 다소 복잡하여 AI 기법을 사용하면 효과적이다.

Sripada 등은 AI 제어기에 If <Situation>, then <Action> + Fuzzy Logic의 Heuristic 규칙을 적용하기 위하여 각 <Situation>과 <Action>을 변수로 정의하고, 각 변수 값에 Membership 값을 지정하여 <Situation>의 조합에서 생성되는 Membership 값에 따라 제어 입력을 증감하였다.

본 연구에서는 AI 시스템 개발용 언어인 Turbo-PROLOG를 사용하여 Breadth-First 기법으로 제어 입력을 tracking 하여 제어 입력의 선정 시간을 단축하였다. 조절 제어를 하기 위한 AI 제어기의 동작 순서는 그림 2와 같다.

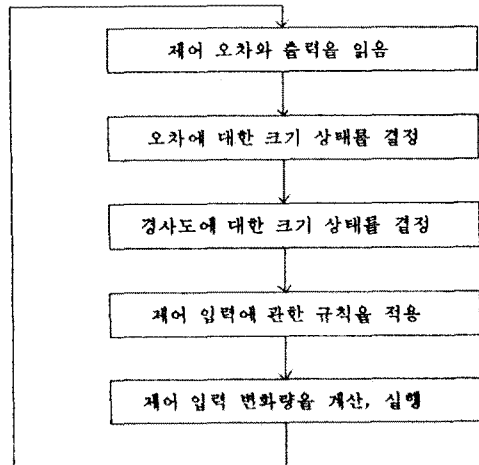


그림 2. AI 제어기의 동작 순서

그림 1에서와 같이 Set-Point 변화시 부호에 따라 활성 규칙군은 반으로 감소되고, 제어 오차의 부호에 따라 활성 규칙이 반으로 감소되고, 제어 오차의 범위에 따라 활성 규칙이 반으로 감소된다. 따라서 AI 제어기는 Breadth-First 기법으로 최대 7번의 Tracking, 최소 4번의 Tracking으로 제어 입력의 변화량을 계산, 실행하여 규칙 적용에 따른 결정(Decision) 시간을 단축한다. 서버보 제어와 조절 제어에 관한 프로그램 흐름도는 그림 3과 같다.

4. 실험 및 결과 고찰

4-1 제어 대상 시스템의 설정

위에서 설계된 AI 제어기의 입력과 출력 응답 특성을

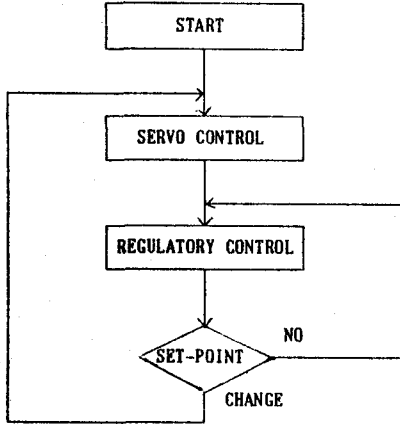


그림 3. AI 제어기의 프로그램 흐름도

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토한다.

AI 제어기의 성능을 살펴보기 위하여 다음과 같이 차분 방정식으로 표시된 3 종류의 시스템을 제어 대상으로 선정하여 수행한다.

$$y(k) = 1.5832 * y(k-1) - 0.5866 * y(k-2) + 0.028 * u(k-1) + 0.0234 * u(k-2) \quad (4-1)$$

$$y(k) = 0.857 * y(k-1) - 0.548 * y(k-2) + 0.381 * u(k-1) + 0.31 * u(k-2) \quad (4-2)$$

$$y(k) = 1.5852 * y(k-1) - 0.5866 * y(k-2) - 0.0231 * u(k-1) + 0.0745 * u(k-2) \quad (4-3)$$

식 (4-1)의 시스템은 [17], 식 (4-2)의 시스템은 [18]에서 제시된 시스템으로 극점과 영점이 모두 안정한 시스템이다. 식 (4-3)의 시스템은 역시 [17]에서 제시된 시스템으로 극점은 안정하고, 영점이 단위 원 밖에 존재하는 비최소 위상 시스템이다.

4-2. 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞 절에서 설정한 세 시스템을 제어 대상으로 제어기의 출력 응답 특성을 알아보기 위하여 IBM-PC/XT 컴퓨터에서 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서는 Turbo-PROLOG를 이용하여 40개 내외의 규칙으로 지식 기반을 형성하였고, 이를 Breadth-First 기법에 의해 <Situation>을 Tracking 하여 제어 입력을 선정하도록 하였다. 또한 Turbo-C에서는 시스템의 출력을 계산하도록 하여 이를 Turbo-PROLOG와 link시키고, 구형파를 기준 입력으로 하여 수행하였다.

먼저 식 (4-1)의 최소 위상 시스템을 제어 대상으로 하여 출력 응답 특성을 알아보았다. 그림 4-1은 Servo 제어에서 집한 요소 e*를 조절하는 과정과 조절된 집한 요소를 사용한 Servo 제어 및 조절 제어의 출력 응답 특성이다.

식 (4-2)의 최소 위상 시스템을 제어 대상으로 한 출력 응답 특성은 그림 4-3이다.

식 (4-3)의 비최소 위상 시스템을 제어 대상으로 한 출력 응답 특성은 그림 4-4이다.

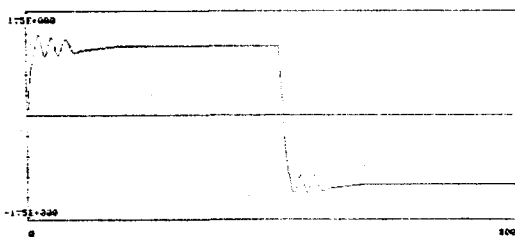


그림 4-1. e*를 조절하지 않은 식(4-1)의 출력

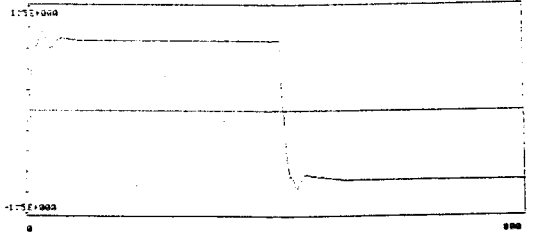


그림 4-2. e*를 조절한 식(4-1)의 출력

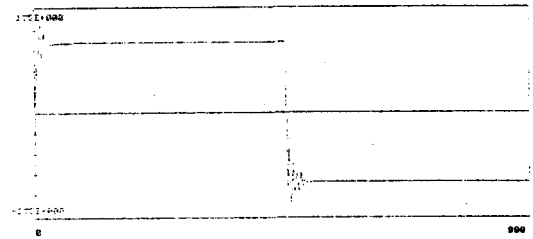


그림 4-3. e*를 조절한 식(4-2)의 출력

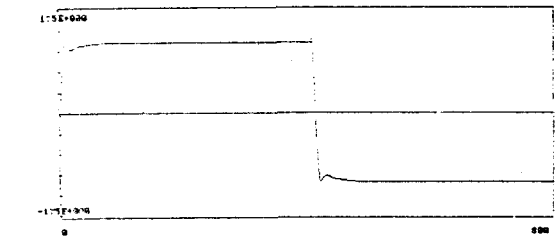


그림 4-4. e*를 조절한 식(4-3)의 출력

그림에서 보는 바와 같이, 제안된 AI 제어기를 최소 위상 및 비최소 위상 시스템에 적용한 결과, 초기에 servo 제어만 정확히 수행되면 조절제어가 고전 PID 제어보다 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

그러나, 식(4-2)와 같이 프로세스의 이득이 큰 경우, Servo 제어에서 제어입력 Umax와 Umin을 적절히 선정해야 하며, 개루프에서 Umax와 Umin에 대한 고찰이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 제어하고자 하는 시스템이 단위 시간 지연 2차 선형 시불변 모델로 근사화 된다고 가정하여 AI 제어기의 설계를 제안하였다.

제안된 AI 제어기는

- (1) Servo 제어와 조절제어를 순차적으로 수행하며,
- (2) Fuzzy Logic에 의한 Membership 함수의 도입을 지양하여 Set-Point와 제어오차 e(k) 및 최대 제어 입력 Umax만으로 제어입력을 조정하여, 대상 프로세스마다 Membership 함수를 정해야 하는 단점을 보완하였으며,
- (3) 각 규칙을 적용할 때 발생하는 불확실성(Uncertainty)을 방지하여 Breadth-First Tracking법으로 최대 7번, 최소 4번만에 제어 입력의 변화율 계산, 실행하여 제어 입력 결정 시간을 단축하며,
- (4) 최소 위상뿐만 아니라 비최소 위상 시스템까지 확대 적용하여 좋은 출력 응답 특성을 보였다.

그러나, 불안정 극점을 갖는 시스템에서는 페루프 시스템에서의 극점 이동이 가능하도록 적절한 보상기 동을 도

입해야 할 것이며, 잡음이나 외란 등이 존재하는 시스템에 대한 검토가 되어야 한다.

또한, 이러한 AI 제어기는 앞으로 구성될 전문가 제어 시스템에서 고전 PID 제어기를 대체하는 Back-up 제어기로 사용될 수 있다.

6. 참고 문헌

1. K. E. Arzen, " Use of Expert Systems in Closed Loop Feedback Control ", ACC., 1986.
2. K. J. Astrom, J. J. Anton, & K. E. Arzen, " Expert Control ", Automatica, Vol. 22, No 5, 1986
3. R. L. Moor, L. B. Hawkinson, & G. Knickerbocker, " Expert Control ", ACC., 1985.
4. S. A. EL Ata-Doss, & J. Brunet, " On-Line Expert Supervision for Process Control ", Proc. of 25th Conf. on Decision and Control., 1986
5. D. Ionescu, Ph. Lethébinh, & I. Trif, " Expert System for Computer Process Control Design ", Proc. IEEE. Int. Sym. on Intelligent Control, 1987
6. K. K. Gidwani, "The Role of Artificial Intelligence Systems in Process Control ", Proc. ACC., 1985
7. D. D. Freeman, " Artificial Intelligent Applications in Process Control ", Proc. ACC., 1985
8. W. F. Kaemmerer, & P. D. Christopherson, " Using Process Models with Expert Systems to aid Process Control Operators ", Proc. ACC., 1985
9. M. Beaverstock, E. H. Bristol, & D. Fortin, " Expert Systems as a Stimulus to Improved Process Control ", Proc. ACC., 1985
10. T. L. Trankle, P. Sheu, & U. H. Rabin, "Expert System Architecture for Control System Design ", Proc. ACC., 1986
11. J. Jiang & R. Doraiswami, " Performance Monitoring in Expert Control Systems ", IFAC 10th. World Cong. on Automatic Control, 1987
12. J. Jiang & R. Doraiswami, " Information Acquisition in Expert Control System Design Using Adaptive Filters ", Proc. IEEE Int. Sym. on Intelligent Control, 1987
13. B. Porter, A. H. Jones, & C. B. Mckeown, "Real-Time Expert Controllers for Plants with Actuator Non-linearities ", Proc. IEEE Int. Sys. on Intelligent Control, 1987
14. B. Porter, A. H. Jones, & C. B. Mckeown, "Real-Time Expert Tuners for PI Controllers " IEEE. Proc. vol. 134. July. 1987
15. N. R. Sripada, D. G. Fisher, & A. J. Morris, "AI Applications for Process Regulation and Servo Control ", IEEE. Proc. vol. 134. July. 1987
16. N. R. Sripada, D. G. Fisher, & A. J. Morris, "Application of Expert Systems to Process Problems", Energy Processing, 1985
17. S. Tjokro & S. L. Shah, " Adaptive PID Control ", Proc. ACC., 1986
18. R. Ortega & R. Kelly, " PID Self-Tuners : Some Theoretical and Practical Aspects", IEEE Trans. Ind. Elec. vol. IE-31. No. 4., 1984