

퍼지 모델 기반 다목적 제어기의 설계와 자기부상열차 자동운전시스템에의 적용

Design of Fuzzy Model-based Multi-objective Controller and Its Application to MAGLEV ATO system

강동오*, 양세현**, 변증남*

Dong-Oh Kang, Se-hyun Yang, and Zeungnam Bien

*한국과학기술원 전기 및 전자공학과

**Purdue University

요 약

Many practical control problems for the complex, uncertain or large-scale plants, need to simultaneously achieve a number of objectives, which may conflict or compete with each other. If the conventional optimization methods are applied to solve these control problems, the solution process may be time-consuming and the resulting solution would often lose its original meaning of optimality. Nevertheless, the human operators usually performs satisfactory results based on their qualitative and heuristic knowledge. In this paper, we investigate the control strategies of the human operators, and propose a fuzzy model-based multi-objective satisfactory controller. We also apply it to the automatic train operation(ATO) system for the magnetically levitated vehicles(MAGLEV).

One of the human operator's strategies is to predict the control result in order to find the meaningful solution. In this paper, Takagi-Sugeno fuzzy model is used to simulate the prediction procedure. Another strategy is to evaluate the multiple objectives with respect to their own standards. To realize this strategy, we propose the concept of a satisfactory solution and a satisfactory control scheme.

The MAGLEV train is a typical example of the uncertain, complex and large-scale plants. Moreover, the ATO system has to satisfy multiple objectives, such as speed pattern tracking, stop gap accuracy, safety and riding comfort. In this paper, the speed pattern tracking controller and the automatic stop controller of the ATO system is designed based on the proposed control scheme. The effectiveness of the ATO system based on the proposed scheme is shown by the experiments with a rotary test bed and a real MAGLEV train.

I. 서론

열차의 자동운전, 고가 크레인, 쓰레기 조각로 플랜트 등과 같이 많은 대규모의 실제 제어 문제들 중에는, 서로 상반되거나 상충될 수도 있는 여러 개의 목적을 동시에 만족시켜야 하는 예가 많다. 이러한 다목적 제어(MOC:MultiObjective Control)에서 한가지의 목적을 최적화하기 위한 제어 방법으로는 원하는 성능을 제공하지 못한다. 또한, 시스템이 복잡하고 불

확실성을 가지고 있으면 전통적인 최적화 방법에 바탕을 둔 제어는 나쁜 성능을 보인다. 반면, 숙련된 전문가의 휴리스틱과 정성적인 경험을 바탕으로 한 퍼지 제어기는 이러한 복잡하고 불확실성을 가진 다목적 제어 시스템에 쉽게 적용되고 원하는 성능을 제공하여 줄 수 있다.

Yasunobu는 숙련된 인간 동작자로부터의 규칙을 사용한 예측 퍼지 제어를 제안하고 자동 콘테이너 크레인과 자동 운전 동작 시스템에 적용하였다[1][2]. 제안된 제어기는 안전도, 목표속도와 위치의 추종성, 승차감, 정지 간격 정확도에 대한 퍼지 성능 지수를 사용하였다.

다목적 제어를 설계할 때 여러 가지 다른 근원으로부터 퍼지 if-then 규칙을 유도하기 때문에 불일치 규칙(inconsistent rule)이 존재하며 이를 처리하여야 한다. J.Kim은 certainty factor를 각 규칙에 할당하고 제어 입력을 계산하는 방법을 제안하였고 Ginsberg는 전통적인 인공지능 방법으로 보다 적은 전건부(antecedent)를 가진 규칙으로 정의 되는 덜 확실한 규칙을 제거하는 방법을 제안하였다[3][4]. Pedrycz는 불일치 척도(measure of inconsistency)를 이용하여 보다 불확실한 규칙을 제거하였다[5]. 그는 불일치 지수(index of inconsistency)와 불일치 정도(level of inconsistency)를 정의하고 낮은 불일치 정도를 가진 규칙들을 제거하였다. Yu와 Lim은 새로운 불일치 측정치를 정의하고 이를 제어에 적용하였다[6][7].

다목적 제어에 만족 제어 기법(satisficing control)을 적용할 수 있다. Goodrich는 지식 효용성 이론(epistemic utility theory)에 바탕을 둔 만족 제어(satisficing control)를 제안하였다[8]. 전통적인 결정 방법(decision making)은 계산의 복잡도와 다이내믹스에 대한 정보의 부족으로 인하여 한계가 있어, 결정의 새로운 패러다임으로 비교 결정법(comparative decision making)이 제안되었다. 비교 결정법은 복잡성과 불확실성이 존재하는 경우에도 최소한의 성능을 보장한다. 따라서, 복잡 불확실한 시스템에서는 오히려 만족 제어가 더욱 의미가 있고 시간이 덜 걸린다. 본 논문에서는 이러한 개념을 확장한 충분 제어(satisfactory control) 기법을 제안한다.

이러한 제어 이론들이 몇 가지의 예에서 원하는 결과를 내었을지라도 몇 가지의 단점들이 존재한다. 예로 제어 목적과 certainty factor간의 관계가 명확하지 않은 경우는 certainty factor를 결정하기 곤란하며 어떤 경우는 지나치게 certainty factor가 많다. 또한 중대한 단점은 안정성(stability) 등의 성능을 보장하는 체계적인 방법이 없다는 것과 입력의 수에 제한이 있다는 것이다. 이것은 인간 동작자의 정성적인 지식을 제어 알고리즘으로 변환하는 휴리스틱 때문에 발생한다. 따라서, 성능을 보장하는 보다 체계적인 방법이 필요하다. 이 논문에서는 다목적 제어 시스템의 퍼지 모델 기반 프로그래밍 제어 방법을 제안한다[18]. 우리는 제어되는 시스템의 타카기-수계노-강 모델을 이용하고 시스템을 위한 충분해를 구하기 위하여 최적 프로그래밍 기법을 사용하였다[13]. 이러한 방법은 다목적 제어 문제의 해를 구하는 체계적인 방법이다. 우리는 이 방법을 전통적인 다목적 제어 시스템인 자기부상열차의 자동 운전 동작 시스템에 적용하여 그 유용성을 실증하였다.

II. 다목적 제어와 최적화

다목적 제어 문제는 다음과 같이 수식화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & Q_1(x(\cdot), u(\cdot)), Q_2(x(\cdot), u(\cdot)), \dots, Q_K(x(\cdot), u(\cdot)) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x(\cdot), u(\cdot)) \leq 0, \quad i=1, \dots, I \\ & h_j(x(\cdot), u(\cdot)) = 0, \quad j=1, \dots, J \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $x(\cdot)$ 는 플랜트의 상태변수이고, $u(\cdot)$ 는 제어입력, $Q_i, i=1, \dots, K$ 는 목적함수, $g_i \leq 0, i=1, \dots, I$ 는 부등호 제한조건, $h_j = 0, j=1, \dots, J$ 는 등호 제한조건이다.

다목적 제어 문제는 주어진 제한조건에서 제어목적들을 최적화하는 제어 입력을 구하는 다목적 최적화 또는 결정 문제로 생각할 수 있다. 일반적인 다목적 최적화 문제는 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min & f_1(x), f_2(x), \dots, f_K(x) \\ \text{s.t. } & x \in X = \{x \in R^n | g_i(x) \leq 0, i=1, \dots, I, h_j(x) = 0, j=1, \dots, J\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $x \in R^n$ 는 결정변수이고, $f_k, k=1, \dots, K$ 는 목적함수, $g_i \leq 0, i=1, \dots, I$ 는 부등호 제한조건, $h_j=0, j=1, \dots, J$ 는 등호 제한조건이다.

다목적 결정 문제에 대하여 다양한 최적화 기법이 있다. 가중치(weighting) 방법, 흥정(trade-off) 방법, 목표 프로그래밍(goal programming) 방법, 계층(hierarchical) 또는 순서(sequential) 방법, 최소-최대(min-max) 방법 등이 있다[9][11][12].

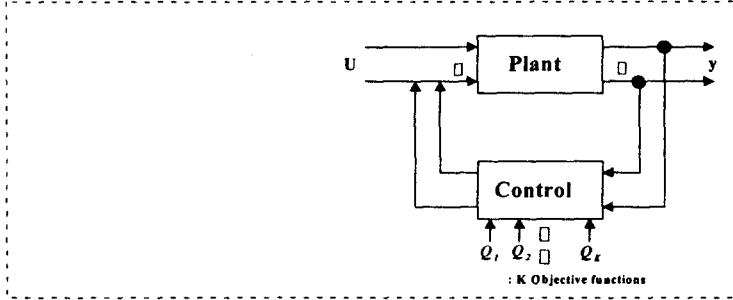


그림 1. 다목적 제어 시스템

III. 퍼지 모델 기반 다목적 제어

3.1 다목적 충분제어

2절에서 소개한 다양한 최적화 기법들이 있지만, 주어진 제한 조건이 대규모이고, 복잡하며 불확실한 경우에는 이상의 방법들은 해를 구하는 데 많은 시간이 걸리며 최적의 의미를 상실하게 된다. 따라서, 이러한 최적해를 대신하는 만족해(satisficing solution)라는 개념이 제안되었다[8][11].

[정의 1]만족해는 각 제어 목적들이 최소의 표준 또는 희망 정도를 넘어서는 허용해(feasible solution)의 부분 집합으로 정의된다.

이 정의에서 언급된 각 제어 목적들의 표준 또는 희망 정도들은 만족도(satisfaction degree)를 이용하여 쉽게 구성할 수 있다[16].

[정의 2]제어 목적의 만족도는 고려 중인 목적이 얼마나 만족되었는지를 표현하기 위하여 사용된 기준의 값으로 정의된다.

i 번째 제어 목적의 만족 정도를 $[0,1]$ 의 값으로 표시하는 만족도 함수를 고려하여 보자. 이것은 $P_i(Q_i(\cdot))$, $i=1, \dots, K$ 로 표시된다. 여기서, 만족도 함수는 보통 그림 2와 같은 함수를 이용한다. d_i 는 i 번째 목적 함수의 허용 범위를 표시하며, s_i 는 만족함을 표시하는 값이고, b_i 는 만족도가 1이 되는 값이다.

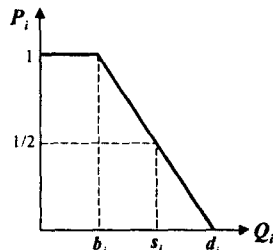


그림 2. 만족도 함수

이 값이 1에 가까울수록 더욱 만족스러운 값이며 모든 만족도가 0 이상이면 받아들일 수 있는 해(acceptable solution)이다. 이러한 받아들일 수 있는 해들 중에서 어느 정도의 희망

정도를 넘어서는 만족도를 가진 해가 만족해이다. 본 논문에서는 이 만족해보다 공학적인 측면에서 보다 유용한 충분해(satisfactory solution)를 제안한다.

[정의 3] x^* 가 다음을 만족하면 충분해이다.

1. x^* 는 만족해이다.(즉, 만족도가 일정 희망 정도를 넘어선다.)
2. x^* 는 더 이상 개선이나 수정이 필요 없다.

다양한 충분해의 형태가 있는데 그 중 한 예는 만족도의 최소값을 최대화하여 구하는 것이다.

$$x^* = \arg \max_x \min_{1 \leq i \leq I} P_i(x) \quad (3)$$

본 논문에서는 이러한 최대-최소의 방법으로 다목적 충분해를 구할 것이다. 공학적인 관점에서 최대-최소의 방법은 보수적인 해(conservative solution)를 구하게 되므로 해의 신뢰성을 증가시킨다. 따라서, 이 방법은 대규모의 시스템이나 위험이 있는 시스템에 적합하다.

충분 제어를 다목적 최적화의 문제로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{u(\cdot)} \quad & \min_{1 \leq i \leq I} P_i(Q_i(x(\cdot), u(\cdot))) \\ \text{s.t.} \quad & g_{j_1}(x(\cdot), u(\cdot)) \leq 0, \quad j_1 = 1, \dots, J_1 \\ & h_{j_2}(x(\cdot), u(\cdot)) = 0, \quad j_2 = 1, \dots, J_2 \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 퍼지 모델 기반 다목적 충분 제어

퍼지 모델 기반 다목적 충분 제어는 퍼지 모델을 사용하여 다단계(multi-step)의 예측을 행한다. 이 때 퍼지 모델은 플랜트의 다이내믹스에 대한 인간의 정성적인 지식을 표시하며 예측과 보수적인 결정(conservative decision-making)이 효과적으로 수행된다. 전체의 제어 구조는 그림 3과 같다.

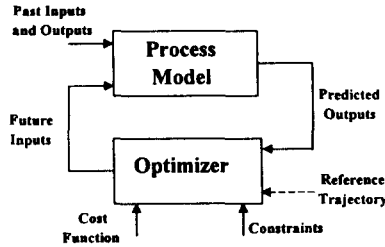


그림 3. 퍼지 모델 기반 다목적 충분 제어의 구조

퍼지 모델 기반 다목적 충분 제어기의 설계는 다음과 같은 순서로 수행된다.

[1단계] T-S-K 모델을 이용한 플랜트의 퍼지 모델을 구한다[13].

사용된 T-S-K 모델은 다음과 같은 규칙 집합으로 SISO시스템을 퍼지 모델링한다.

$$\begin{aligned} R_i: \text{ If } y(k) \text{ is } A_{i1} \text{ and } y(k-1) \text{ is } A_{i2} \dots \text{ and } y(k-n+1) \text{ is } A_{in}, \text{ then} \\ y^i(k+1) = a_i y(k) + b_i u(k) + c_i \\ \text{where } a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}), \quad b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}), \\ y(k) = (y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1))^T \in R^n \end{aligned} \quad (5)$$

[2단계] 목적 함수들을 이산화 시킨다.

목적 함수를 이산화시키고 제어 한계(control horizon)까지의 값으로 구한다.

[3단계] 만족도 함수를 설계한다.

제어기 설계자가 만족도 함수를 설계한다.

[4단계] 문제의 구성

이상의 3단계를 거치게 되면 전체의 문제는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{U}(k)} \min_{1 \leq i \leq I} P_i(q_i(\tilde{y}(k+1), \dots, \tilde{y}(k+N_p), \mathbf{U}(k))) \\
& \text{s.t. } \tilde{y}(k+n) = \tilde{f}^n(k) + \tilde{\mathbf{G}}^n(k) \mathbf{U}(k), 1 \leq i \leq N_p \\
& P_i(q_i(\tilde{y}(k+1), \dots, \tilde{y}(k+N_p), \mathbf{U}(k))) > 0, 1 \leq i \leq I \\
& \mathbf{u}(n-k+1) \in D, 1 \leq n \leq N_p
\end{aligned} \tag{6}$$

여기서, N_p 는 예측 경계(prediction horizon), $q(\cdot)$ 는 변환된 목적 함수, D 는 입력 변수들의 제한된 집합(constrained set of input variables)이다. 또, $\tilde{\mathbf{G}}^1 = [\tilde{g}_0^1(k), 0, \dots, 0]$, $\tilde{\mathbf{G}}^2 = [\tilde{g}_0^2(k), \tilde{g}_1^2(k), 0, \dots, 0]$, \dots , $\tilde{\mathbf{G}}^{N_p} = [\tilde{g}_0^{N_p}(k), \tilde{g}_1^{N_p}(k), \dots, \tilde{g}_{N_p-1}^{N_p}(k)]$, $\mathbf{U}(k) = (\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k+1), \dots, \mathbf{u}(k+N_p-1))$ 이다.

이것은 다음과 같은 최적화 프로그래밍 문제가 된다.

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{U}(k)} \lambda \\
& \text{s.t. } P_i(q_i(\tilde{y}(k+1), \dots, \tilde{y}(k+N_p), \mathbf{U}(k))) \geq \lambda > 0, 1 \leq i \leq I \\
& \tilde{y}(k+n) = \tilde{f}^n(k) + \tilde{\mathbf{G}}^n(k) \mathbf{U}(k), 1 \leq i \leq N_p \\
& P_i(q_i(\tilde{y}(k+1), \dots, \tilde{y}(k+N_p), \mathbf{U}(k))) > 0, 1 \leq i \leq I \\
& \mathbf{u}(n-k+1) \in D, 1 \leq n \leq N_p
\end{aligned} \tag{7}$$

이 문제에서 만약 목적함수가 부분 선형 함수(piecewise linear function)라면 문제는 선형 프로그래밍(linear programming) 문제가 되며 이차 함수(quadratic function)라면 이차 제한 선형 프로그래밍(quadratic constrained linear programming) 문제가 된다[18].

IV. MAGLEV ATO 시스템에의 적용

자기부상열차의 자동 운전 동작(ATO:Automatic Train Operation) 시스템은 승차감, 속도 추종성 등의 복수의 목적을 가지고, 선로의 상태, 차체와 레일간의 간격, 날씨, 바람의 방향 등의 불확실한 요소를 가지는 다목적 제어 시스템이다. 열차의 자동 운전 동작의 제어에는 Yasunobu가 예측 퍼지 제어를 적용한바 있다[2][17]. 본 논문에서는 Yasunobu가 이산적인 입력값에 대하여 결과를 예측하였던 것과는 달리 연속의 제어 입력에 대하여 최적화를 거쳐 충분해를 구한다.

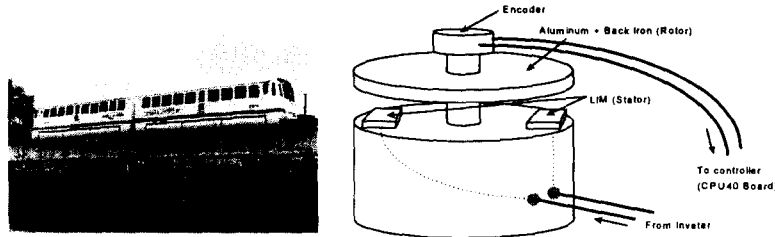


그림 4. 자기부상열차 플랫폼과 테스트 베드

본 논문에서 사용한 목적 함수는 다음과 같다. 각각 속도 패턴 추종성, 안정도, 정지 위치 정확도, 승차감을 표시하는 함수이다.

$$q_1 = \sup_{1 \leq i \leq N_p} |\tilde{y}(k+i) - y_{ref}(k+i)| \quad q_2 = \left| \sum_{i=1}^{N_p} \{\tilde{y}(k+i) - y_{ref}(k+i)\} \right| \cdot \Delta T \tag{8}$$

$$q_3 = \sup_{1 \leq i \leq N_p} \{y_{max}(k+i) - \tilde{y}(k+i)\} \quad q_4 = \sup_{1 \leq i \leq N_p} [\tilde{y}(k+i) + y(k-i) - 2y(k)]$$

그림 5는 테스트 베드에 적용한 예이다. 30회의 반복적인 실험을 통한 실험 결과는 표 1과 같다. 퍼지모델기반 다목적 충분제어가 전통적인 PID제어보다 성능이 우수함을 알 수 있다.

	proposed controller	conventional controller
Max speed error(Km/h)	1.50	3.21
Maximum speed(Km/h)	51.21	53.62
Maximum Jerk(Km/h ² s)	15.6	29.2
Average stop gap accuracy(cm)	-4	6

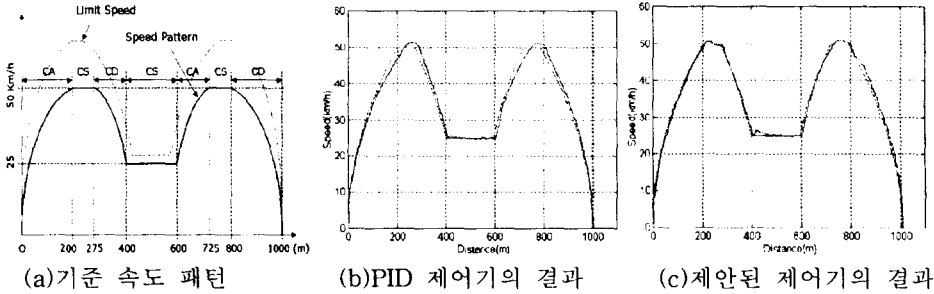


그림 5. 테스트 베드에서의 실험 결과

그림 6은 실제 차량에 적용한 예이다. 예측 스텝(prediction step) 수를 늘리면 더욱 좋은 성능이 나타남을 알 수 있다.

표 1. 테스트 베드에서의 실험 결과

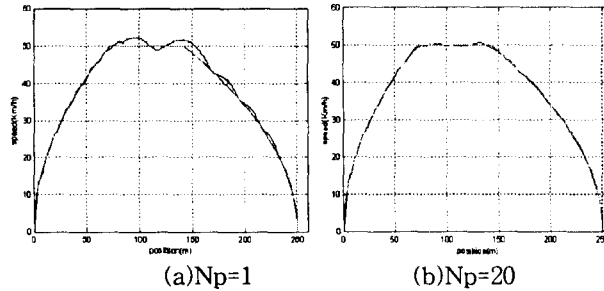


그림 6. 실제 차량에서의 실험 결과

V. 결론

본 논문에서는 프로그래밍 기법을 이용한 퍼지 모델 기반 충분 제어를 제안하였다.

인간의 실제 플랜트에 대한 제어 방법을 고찰하여 예측 구조를 분석하고 충분해를 제안하였다. 이를 바탕으로 퍼지 모델 기반 충분 제어를 제안하였다. 또한, 만족도 함수의 형태에 따른 제안된 방법의 복잡성을 분석하였다. 부분 선형 함수의 만족도 함수를 사용하면 선형 프로그래밍 방법을 이용하며 이차의 만족도 함수이면 이차 구속 선형 프로그래밍 방법을 사용한다. 제안된 방법은 자기부상열차의 자동 운전 동작에 적용되어 테스트 베드와 실차에서 그 유용성을 증명하였다.

앞으로 남은 문제는 제안된 방법의 안정성을 증명하는 것이다. 프로그래밍 방법을 사용하였으므로 차수의 증가에 따른 계산량이 증가하는 문제도 해결하여야 한다.

참고문헌

- [1] S.Yasunobu and T.Hasegawa, "Evaluation of an automatic container crane operation system based on predictive fuzzy control," *Control Theory and Advanced Technology*, vol. 2, pp. 419-432, 1986.
- [2] S.Yasunobu and S.Miyamoto, "Automatic train operation system by predictive fuzzy control," in *Industrial Application of fuzzy control* (M.Sugeno eds.), pp.1-18, North-Holland: Elsevier Science Publishers, 1985.
- [3] K.Kim and J.Kim, "Multicriteria fuzzy control," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 279-288, 1994.
- [4] A.Ginsberg, S.Weiss, P.Politakis, "Automatic knowledge base refinement for classification systems," *Artificial Intelligence*, vol. 35, pp. 197-226, 1988.
- [5] W.Pedrycz, ed., *Fuzzy control and fuzzy systems*, Research Studies Press, 1933.
- [6] W.Yu and Z.Bien, "Design of fuzzy logic controller with inconsistent rule base," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 147-159, 1994.
- [7] T.Lim and Z.Bien, "FLC design for multi-objective system," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 6, no. 3, pp. 565-580, 1996.
- [8] M.A.Goodrich, W.C.Stirling and R.L.Frost, "A satisficing approach to intelligent control of nonlinear systems," *Proc. IEEE Int'l Symposium on Intelligent Control*, Dearborn, MI, pp. 248-252, Sep. 15-18, 1996.
- [9] T.S.Lim and Z.Bien, "FLC Design with Multiple Control Objectives and Application to Overhead Crane Control," *Fuzzy Logic and Its Applications to Engineering, Intelligent System and Information Science* (Z.Bien, et al Ed.), Kluwer Academic Publisher, 1995.
- [10] Y.S.Song, "Design of Fuzzy Sensor-based Fuzzy Combustion Control System for Refuse Incinerator," Thesis paper of Korea Advanced Institute of Science and Technology, Dept. of Automation and Design Engineering, 1997.
- [11] Y.J.Lai and C.L.Hwang, *Fuzzy Multiple Objective Decision Making*, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [12] M.Sakawa, *Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization*, Plenum Press, New York, 1993.
- [13] T.Takagi and M.Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Tr. on Systems, Man, And Cybernetics*, Vol. SMC-15, No. 1, January/February, 1985.
- [14] Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," *IEEE Tr. on Systems, Man, And Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, May/June, 1993.
- [15] E.F.Camacho and C.Bordons, *Model Predictive Control in the Process Industry*, Springer-Verlag, London, 1995.
- [16] H.-J.Zimmermann, ed., *Fuzzy Set Theory - And Its Applications*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [17] L.M.Jia, J.H.Jhang, and X.D.Zhang, "Automatic Train Operation Systems," *Proc. of the 2nd Asian Control Conference*, July 22-25, 1997, Seoul.
- [18] S. Yang, Design of Fuzzy Model-based Multi-objective Controller and Its Application to MAGLEV ATO system, Master Thesis in the Electrical Engineering department of KAIST, Taejon, Korea, 1998.
- [19] Zenn Z.Bien, S. Yang, and D. Kang, "Programming Approach for fuzzy model-based Multiobjective Control Systems", *VJFUZZY 98 Proceedings*, Halong Bay, Vietnam, 1998.