

삼타어뢰의 퍼지제어를 위한 실시간 시뮬레이션

남세규*, 원태현*, 구분순*, 이만형**, 유완석**
 * 국방과학연구소, ** 부산대학교

Real-Time Simulation for Fuzzy Control of Three Fin Torpedo

Sae-Kyu Nam*, Tae-Hyun Weon*, Bon-Soon Koo*, Man-Hyung Lee**, Wan-Suk Yoo**
 * Agency for Defence Development, ** Pusan National University

ABSTRACT

A fuzzy controller is designed for compensating the cross-coupling effect of induced roll due to the dynamic characteristics of three fin torpedo. Since the utilization of fuzzy-coprocessor has many interfacing problems with typical microprocessors of the guidance and control unit, the simplified fuzzy inference method based on nonfuzzy-processor is proposed to implement fuzzy controllers of three fin torpedo. This method provides a flexible rule-base design to guarantee the robust control. The good potential of the proposed design is shown through real-time simulations using both a mathematical model on AD-100 computer and an implemented controller on Intel 80C186/80C187 microprocessors employing 12bit A/D converter.

1. 서론

현재 운용중인 대부분의 어뢰는 열십자형으로 전개된 4개의 조종타로 제어된다. 그러나, 시스템의 경량 단순화 추세에 따라 조종타를 3개로 줄이는 연구가 최근 활발히 발표되고 있다. 이러한 연구들의 목적은 4개의 조종타가 장착된 어뢰에서는 수평타와 수직타의 직교성 때문에 문제가 되지 않던 결합(coupling)효과가 3개의 조종타를 사용하는 삼타어뢰(three fin torpedo)의 경우에는 성능에 심각한 영향을 주므로, 이를 보상할 수 있는 제어기를 설계하는 것이었다. 물론 삼타어뢰는 3개의 조종타만으로 피치(pitch), 롤(roll)과 요(yaw)운동을 충분히 제어할 수 있는 동특성을 갖지만, 이와 함께 요(yaw)평면 기동시에 미부(tail)에 발생하는 모우멘트가 물운동에 심하게 상호결합(cross coupling)되는 것으로 밝혀졌다. 단일입출력제어기는

상호결합때문에 제어성능이 만족스럽지 않아서, 사전보상기(pre-compensator)로 비결합(decouple)을 시도하였으나 평형점 근방에서 잘 선형화된 경우 외에는 좋은 성능을 얻기 어려웠다 [1]. 이러한 결과는 삼타어뢰의 상호결합 효과를 정확하게 수학적 모델링을 하기가 어려울 뿐만 아니라 전진속도와 부력상태에 따라 변하는 높은 비선형적인 동특성으로 인하여, 제한된 작동영역 일지라도 명확히 선형화한다는 것은 불가능하기 때문이다. 그리하여 Stacey는 상호결합 효과를 보상하기 위하여, 수학적 제어 대신에 퍼지제어를 적용하여서 설계사양을 강인하게 만족시킨 전산시뮬레이션 결과를 얻었다 [2]. 이는 운동방정식을 정확하게 따질 필요가 없이 정성적인 규칙들로 적합한 조작방법을 결정할 수 있는 퍼지제어의 특성에 기인하는 자연스러운 결과이다. 그러나, 지금까지의 삼타어뢰의 퍼지제어에 관한 연구들은 퍼지제어의 장점으로 일컬어지는 실용화에 필요한 제어기의 구현에 대해서는 아무런 논의가 없었다. 물론, 고속으로 제어를 행하는 빠른 동특성을 갖는 퍼지제어 시스템에서는 많은 계산량이 요구되는 퍼지추론을 일반적으로 퍼지칩을 사용하여 해결하고 있다. 그러나, 단일기능을 제어하는 가전제품과는 달리 삼타어뢰의 제어유니트는 복잡한 유도조종 논리의 구현에 필요한 마이크로프로세서들로 구성되어 있다. 그러므로 삼타어뢰의 제어기에 퍼지칩을 적용하려면 비퍼지칩과의 입출력 호환성과 통신의 원활함을 위한 별도의 하드웨어가 필요하게 되어서, '퍼지제어'의 적용이 원래의 경량단순화라는 목적과는 달리 오히려 하드웨어(hardware)적인 복잡함을 야기하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결을 위하여, 퍼지칩의 추론 기능을 소프트웨어적으로 처리가능하게 하는 '단순화된 퍼지추론기법'을 제안한다. 이 방법을 적용하여 인텔 80C186/80C187 마이크로프로세서에서 12비트의 A/D 및 D/A 변환기를 갖는 삼타어뢰의 퍼지제어기를 구현하고, AD100 컴퓨터에

서 실시간시뮬레이션으로 구현된 퍼지제어기의 성능을 확인한다.

2. 삼타 어뢰의 수학적 모델

Daiwley가 유도한 수중운동체의 6자유도 운동방정식을 Germann이 횡전속도(sideslip velocity) v , 롤각속도 p , 요각속도 r 의 3자유도로 축소한 운동방정식은 다음과 같다 [1]:

$$m_2 \dot{v} = \frac{1}{2} \rho A C_y V_n^2 - m_1 r u + m_2 p w - m h_z (q r - \dot{p}) \quad (1)$$

$$J_x \dot{p} = \frac{1}{2} \rho A d C_L V_n^2 + K_p p - w h_z \sin \phi + m h_z (\dot{v} - p w + r u) \quad (2)$$

$$J_z \dot{r} = \frac{1}{2} \rho A L C_N V_n^2 - (J_y - J_x) p q \quad (3)$$

여기서 롤각과 요각의 정의는 Fig. 1에서 보는 바와 같고, 1번째 조종타의 조타각 δ_1 는 날개축이 시계방향으로 회전하는 것을 양의 방향으로 정한다.

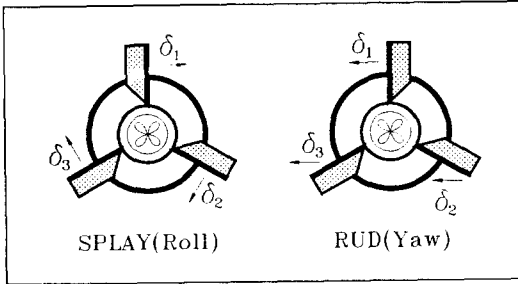


Fig. 1 Actuator positive sign convention

위의 비선형 상미분방정식을 주요 동작영역에서 선형화하여서, 상호결합이 심한 롤각속도와 요각속도에 대한 조종타와의 관계를 나타내는 전달함수로 축소하면 식 (4)가 된다.

$$\begin{bmatrix} p(s) \\ r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & g_{23}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1(s) \\ \delta_2(s) \\ \delta_3(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

조타각 δ_1, δ_2 과 δ_3 에 대한 롤각속도 p 에 필요한 회전 모멘트를 만들 수 있는, 조종타에 대한 제어입력인 SPLAY와 요각속도 r 에 필요한 횡력을 만드는 제어입력인 RUD와의 관계가 구동장치의 동특성과 함께 Fig. 1의 규약에 따라서 식(5)와 같은 전달함수로 주어진다:

$$\begin{bmatrix} \delta_1(s) \\ \delta_2(s) \\ \delta_3(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + T_D s} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -0.5 \\ 1 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SPLAY}(s) \\ \text{RUD}(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 T_D 는 구동장치의 시정수이다. 삼타어뢰와 구동장치의 동특성을 합친 전달함수는 식(5)을 식(4)에 대입하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} p(s) \\ r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SPLAY}(s) \\ \text{RUD}(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2입력 2출력인 다변수시스템의 전달함수의 행렬 요소는 참고문헌[1]에서 인용한 삼타어뢰의 제원을 이용하여 Table 1 과 같이 얻어진다.

Table 1. 전달 행렬의 요소

$g_{11}(s) = \frac{7600}{s(s+40)}$
$g_{12}(s) = \frac{6514(s+6.85)}{s(s+1.91)(s+12.5)(s+40)}$
$g_{21}(s) = 0$
$g_{22}(s) = \frac{1067(s+3.28)}{(s+1.91)(s+12.5)(s+40)}$

3. 퍼지제어기

삼타어뢰의 모델에서 요명령이 주어지면 상호결합 효과에 의하여 유도 롤(induced roll)과 롤각속도가 유발된다. 시스템의 불확실성에 대하여 종래의 수학적 제어보다 강한 특성을 갖도록 설계할 수 있는 퍼지제어를 이용하여 [3], 유도 롤을 보상하는 SPLAY명령을 롤각과 롤각속도의 측정값에서 구한다. 제어기의 전체적인 블록선도는 Fig.2에서 보인다. 적용된 퍼지제어의 특징은 수학적 제어방법으로 설계된 요-오토파일럿(yaw-autopilot)에 상호결합에 의한 유도 롤을 보상할 수 있는 퍼지제어기를 복합하는 것이다. 또한, 비퍼지 프로세서에 근거한 퍼지제어기의 실제구현을 위하여 퍼지추론을 단순화하는 방법을 제안한다. 궁극적으로, 퍼지제어는 언어변수를 이용한 다음의 입출력 관계식으로 제어값을 보간하는 비선형 디지털 제어기로 간주된다:

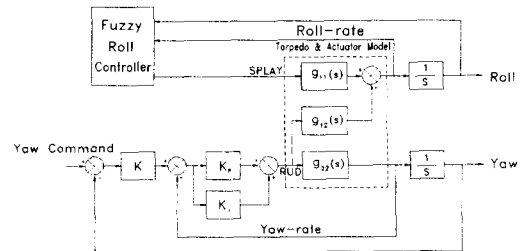


Fig. 2 System block diagram

$$\text{SPLAY}(k) = \text{FLC}(\text{R}(e(k)), \text{RR}(ec(k))) \quad (7)$$

FLC는 Table 2의 스케일링요소와 Fig.3의 규칙기반에 의하여 정의되는 퍼지제어기를 의미한다. 여기서, 물각의 오차 $e(k)$ 와 물속도의 오차 $ec(k)$ 는 크리스프한 값으로 측정된다. 그리고 R은 물의 언어변수이고 RR은 물속도의 언어변수이다.

Table 2. Scaling factor of fuzzy set

Adjective	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
roll	-2	-1.4	-0.7	0	0.7	1.4	2
roll rate	-4	-2.8	-1.4	0	1.4	2.8	4
splay	-9	-6	-3	$\frac{NZ}{-1}$	$\frac{PZ}{1}$	3	6

퍼지논리는 멤버쉽함수와 규칙기반을 이용한 퍼지합의와 규칙추론을 합성하여 가장 가능성이 높은 결론을 얻는 것이다. Mamdani형의 일반적인 퍼지규칙은 [4];

$$\text{IF}(R \text{ is } A_i \text{ AND } RR \text{ is } B_i), \text{ THEN}(\text{SPLAY is } C_i) \quad (8)$$

여기서, A_i , B_i 와 C_i 의 형용사는 "NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB" 인 속성으로 멤버쉽함수에 의하여 정의된다. 그리고, 하첨자 i 는 규칙의 번호이다. 퍼지제어기를 설계할 때, 고려할 중요한 점들은;

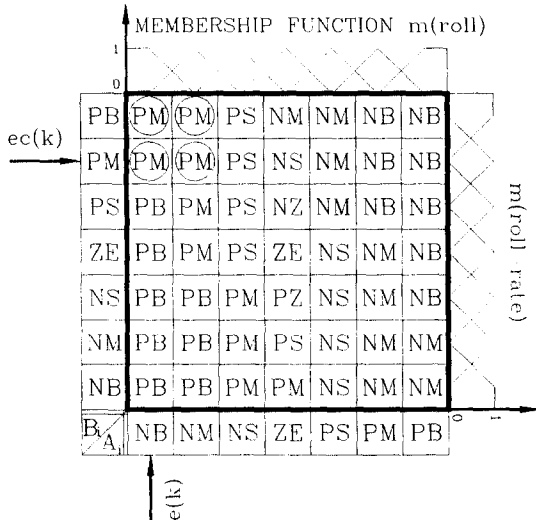


Fig. 3 Fuzzy rule base

1. 어떻게 정량적인 센서출력으로 부터 정성적인 지식을 뽑아내는가?
2. 어떻게 정성적인 추론결과를 정량화하고 구현하는가?

첫번째 고려에 대한 답은 "상황-행동" 짝을 반영하는 규칙기반의 설계이다. 경험이나 지식을 찾아서 이용하는 것이 퍼지논리의 이점이지만, 역설적으로 조직적인 설계법이 없다는 단점도 있다. 그러나, 좋은 규칙의 시발점은 설계를 쉽게 완료하게 하므로, 다음의 방법으로 규칙기반으로 가능한 후보를 얻는다:

- (a) $e(k)$ 와 $ec(k)$ 가 크면, PD제어의 지식을 따른다.
 - (b) $e(k)$ 와 $ec(k)$ 가 작으면, 슬라이딩제어에 따른다.
 - (c) $e(k)$ 가 정상상태의 경계역에 오면, smoothing한다.
- 이러한 방법으로 구한 기본규칙을 만족스러운 성능이 얻어질 때 까지 부분영역의 제어규칙을 설계자의 직관과 시행착오적인 방법으로 수정하여서, Fig. 3과 같은 규칙기반을 고안한다.

두번째 답은 비퍼지프로세서에서 퍼지시스템의 구현을 위한 퍼지추론의 단순화로, Fig. 4가 그 구조를 잘 설명하고 있다. 퍼지제어는 분할된 정보공간에 대한 if-then형식의 규칙들을 종합하여 제어값을 추론하는 병렬형식이므로, 퍼지집이 아닌 상용화된 마이크로프로세서로 구현하려면 많은 계산량이 문제가 된다. 계산량 감소를 위하여 퍼지규칙을 정량화한 참조표(look-up table)를 이용하면 정상상태에서 편차(offset)가 발생할 수 있고, 퍼지집합의 영역확장으로 규칙의 수를 축약하면 규칙수정이 곤란하였다 [5]. 본 연구에서는 주어진 상태에 가까운 카티지안(cartesian) 직곱형의 $A_i \times B_i \times C_i$ 트리플(triple)을 선정하고, 선정된 규칙만을 발화시키는 방법을 제안한다. $[e(k), ec(k)]$ 에 대한 4개의 트리플의 작동구간 설정은:

$$A_i(k) \langle e(k) \rangle A_{i+1}(k), \text{ and } B_i(k) \langle ec(k) \rangle B_{i+1}(k) \quad (9)$$

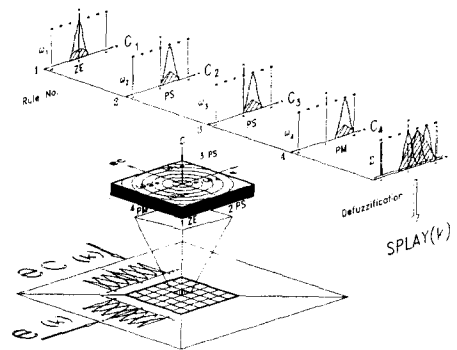


Fig. 4 Simplified fuzzy inference

작동역의 멤버십함수를 비작동구간과 분리되게 선정하면, 퍼지추론은 모든 규칙기반 대신에 지배역의 규칙만을 추론하여도 일반성을 잃지 않는다. $e(k)$ 와 $ec(k)$ 의 크리스프값에 대하여, Fig. 3과 같이 퍼지제어를 지배하는 다음의 4개의 규칙에 의하여 추론된다:

- Rule 1: IF R is NB AND RR is PM, THEN SPLAY is PM
- Rule 2: IF R is NM AND RR is PM, THEN SPLAY is PM
- Rule 3: IF R is NB AND RR is PB, THEN SPLAY is PM
- Rule 4: IF R is NM AND RR is PB, THEN SPLAY is PM

그리고, 조건문 연결어 AND 를 위하여 만족도의 대수곱을, 규칙문장간의 연결어 ALSO에는 대수평균을 이용한다. 무게중심법으로 역퍼지화하면, 단순화된 퍼지추론의 결과적인 형태가 만들어진다.

$$SPLAY(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(k) \cdot C_{id}}{\sum_{i=1}^4 w_i(k)} \quad (10)$$

C_{id} 는 멤버십함수 C_i 가 역퍼지화된, 언어변수를 가장 잘 나타내는 확정값이다 [6]. 조건문의 적합도 $w_i(k)$ 는 퍼지제어 행동에 대한 i 번째 규칙의 공헌도이다.

$$w_i(k) = A_i^m(e(k)) \cdot B_i^m(ec(k)) \quad (11)$$

규칙의 공백이 없는 전체공간을 N 개로 양자화하고 멤버십함수를 M 개로 이산화한 경우, 제안된 방법을 이용하면 퍼지추론의 계산량이 $4/(M \times N^2)$ 배 정도로 감소되므로 비퍼지프로세서에서 퍼지제어를 구현하는데 효과적이다 [7].

4. 실시간 시뮬레이션

퍼지제어기는 인텔 80C186 16비트 마이크로프로세서를 중심으로 80C187 NDP, 메모리(ROM 27C256, RAM 6116) 및 주변전자회로와 인터페이스용으로 ± 10 볼트를 사용하는 12비트 A/D 및 D/A변환회로로 구현하였다. A/D변환회로는 Analog Multiplexer와 Sample & Holder 및 A/D변환기로 구성되었다. 제어법칙은 계산정밀도의 향상을 위하여 부동소수점 연산을 택하여 Assembler로 프로그래밍하였다. 퍼지제어기의 입출력과 알고리즘의 실행시간은 3ms 이하이나, 샘플링시간은 여유를 두어 5ms로 잡았다. 단순화된 퍼지추론은 비퍼지 마이크로칩에서 퍼지논리의 구현을 가능케 하여 퍼지칩과 비퍼지칩간의 호환문제를 해결하였다.

타당성 검증을 위해, 구현된 제어기를 하드웨어 테스팅으로 삼타어피 모델과 함께 실시간시뮬레이션을 한

다. 제한가능한 환경하에서 제어기를 개선할 수 있도록 하는 실시간시뮬레이션은 수학적모델의 실시간으로 계산이 가능한 고속연산기능을 갖는 Applied Dynamics사의 AD100/AD10 컴퓨터로 수행하였고, 실시간시뮬레이션을 위한 삼타어피와 구동장치의 동특성모델은 ADSIM 언어로 작성하였다. Fig. 5는 실시간시뮬레이션의 개념적인 구성도이다.

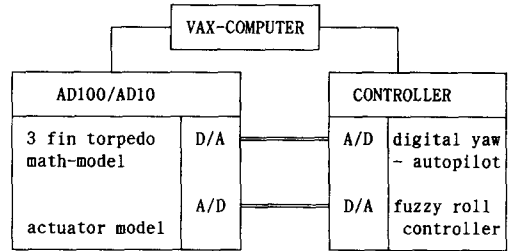


Fig. 5 Configuration of Real Time Simulation

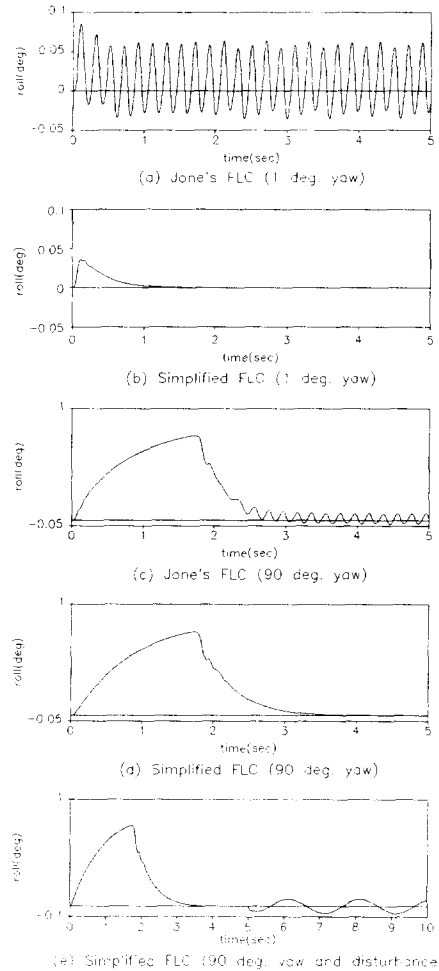


Fig. 6 Comparison of roll channel time response

AD100컴퓨터는 제어기에서 주어진 입력과 삼타어뢰와 구동장치의 수학적 모델로부터 삼타어뢰의 동특성을 실시간으로 시뮬레이션하여서 롤각과 롤각속도, 요각과 요각속도를 제어기에 전달한다. 구현된 제어기는 이러한 정보들을 이용하여 디지털 요-오토파일럿과 퍼지 롤 제어기를 함께 작동시켜 제어명령을 출력한다.

설계사양은 90도의 요 스템명령에서 유도 롤을 2도 이내로 유지하는 것이다. 성능비교를 위해서, 전진속도 30 m/s 인 작동조건에서 요방향으로 1도와 90도의 스템명령으로 Jones가 설계한 퍼지제어기 [2] 와 본 논문에서 제안된 퍼지제어기를 실시간시뮬레이션을 수행한 롤 채널의 응답들을 Fig. 6에 비교하여 정리하였다. 채터크기의 큰 감소가 제안된 퍼지제어로 얻어지는 데, 이는 퍼지규칙기반의 설계에 슬라이딩제어의 불연속제어를 경계역에서 선형 보간하는 방법에 착안한 부분적인 규칙의 수정 때문이다. 이 간단한 규칙의 수정이, 시뮬레이션으로는 만족스러운 정밀도 달성과 채터링(chattering)의 감소가 얻어지지만 규칙전환으로 인하여 실제 구현에는 효과적이지 못한 '규칙기반을 미세화'하는 방법보다 효과적임을 알 수 있다. 강인성을 검토하기 위하여 sin파형의 외란을 시뮬레이션 시작 5 초 후 부터 고려하면, Fig. 6 (d) 와 같이 채터크기는 약간 증가하지만 설정된 설계사양을 여전히 만족되고 있다. 이는 외란에도 불구하고, 제안된 제어방법이 설정역 내에서 유도 롤을 유지하는 데 성공적임을 보여주는 사례이다. 이 결과로부터 퍼지제어가 성능강인성을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 삼타어뢰의 요운동의 상호결합에 의한 유도 롤을 보상하기 위하여 퍼지제어기를 설계하고, 단순화된 퍼지추론 방법으로 퍼지칩보다 설계자유도가 많은 상용화된 마이크로프로세서를 이용하여 빠른 동특성을 갖는 삼타어뢰의 제어기를 실제로 구현하였다. 또한, 슬라이딩제어의 경계역의 불연속성을 선형보간하는 방법에서 따온 지식으로 부분영역의 제어규칙을 수정하여 정상상태 근방의 채터링을 없애는 규칙기반을 설계하였다. 실시간시뮬레이션을 수행한 결과, 구현된 퍼지제어기가 비퍼지칩에서도 충분히 짧은 샘플링시간 내에서 제어입력의 계산이 가능하였다. 그리고 타당성 있는 모델오차 아래에서도 유도 롤각도를 설계사양인 ± 2 도 안에서 강인하게 유지시키는 좋은 성능을 보였다. 그러므로, 제안된 퍼지제어의 방법이 삼타어뢰와 같은 다변수시스템의 상호결합 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 실용적이고 가능성이 있는 방법으로 판단된다.

참고문헌

1. B.A.Stacey and M.A.Smith, "Multivariable Control of A 3 Fin Torpedo", American Control Conference, pp.326~331, 1989
2. A.R.T.Jones, B.A.Stacey and M.A.Smith, "Fuzzy Control of Three Fin Torpedo", American Control Conference, pp.1474~1478, 1991
3. 久野治義, 海部匡夫, 大竹隆滋, "ファシィ制御の飛しょう體誘導航法への應用", 防衛技術, 7月, pp.41~47, 1990
4. E.H.Mamdani, "Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers", International Journal of Man-Machine Study, Vol.8, No.6, pp.669~678, 1976
5. 石丸直之, 花崎 泉, 秋月影雄, "ファシィ制御におけるルールの縮約とたばこ乾燥機制御への應用", T.IEE, Japan, Vol.110-C, No.7, pp.428~436, 1990
6. S.Chiu and S.Chand, "Fuzzy Controller Design and Stability Analysis for an Aircraft Model", American Control Conference, pp.821~826, 1991
7. 남세규, 김종식, 유완석, "퍼지제어 셀을 이용한 퍼지 논리제어기의 조직적인 설계방법", 대한기계학회논문집, 제16권 제7호, pp.1234~1243, 1992
8. B.K.Powell, G.P.Lawson and G.Hogh, "Advanced Real-Time Pwertrain Systems Analysis", ASME Vol.110 pp.325~333, 1988