

적응진화 알고리즘을 이용한 항공기의 고공격각 비행 제어를 위한 퍼지 제어기 설계

A Design of Fuzzy Logic Controllers for High-Angle-of-Attack Flight Control of Aircraft Using Adaptive Evolutionary Algorithms

원 태 현, 황 기 현, 박 준 호, 이 만 형
(Tae-Hyun Won, Gi-Hyun Hwang, June Ho Park, and Man Hyung Lee)

Abstract : In this paper, fuzzy logic controllers(FLC) are designed for control of flight. For tuning FLC, we used adaptive evolutionary algorithms(AEA) which uses a genetic algorithm(GA) and an evolution strategy (ES) in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary computations. We used AEA to search for optimal settings of the membership function's shape and gains of the inputs and outputs of FLC. Finally, the proposed controller is applied to the high-angle-of-attack flight system for a supermaneuverable version of the F-18 aircraft and compares with other methods.

Keywords : fuzzy logic controller, adaptive evolutionary algorithms, high-angle-of-attack flight

I. 서론

항공기의 비행운동에 있어서 직선비행을 제외한 모든 비행운동을 기동비행(maneuvering)이라고 하며, 전술적인 비행을 수행하는 전투기들은 유리한 위치를 먼저 선정하여 선제 공격하거나 적기의 요격을 피하기 위해서 이러한 기동비행이 요구된다. 특히 급격한 피치올림(pitch up)과 피치내림(pitch down)과 같은 비행운동을 수행하는 고공격각(high angle-of-attack) 비행제어를 위한 비행제어 시스템의 설계는 중요한 문제이다. 시변, 비선형 동특성을 가지고 있는 전투기의 고공격각 비행 제어기의 설계에서 기존의 고전인 선형제어기법에 의해 고정된 이득을 가지는 제어기로는 좋은 제어성능을 얻을 수 없다. 이러 문제점을 해결하기 위해서 저공격각 또는 중공격각 비행영역에 대한 선형제어기법을 이용하여 설계한 후, 게인 스케줄링(gain scheduling) 방법[1][2]을 추가로 이용하여 제어를 하였다. 이러한 설계 방법은 여러 개의 선형 플랜트에 대하여 각각의 제어이득을 설계한 후, 보간법을 이용하여 제어이득을 가변하는 방법으로 각각의 선형 플랜트에 대한 제어이득 설계시 많은 설계 절차가 필요하게 되는 문제점이 있다. 그리고 강인 다변수 제어기법을 항공기의 비행제어 시스템에 적용한 방법[3]은 비선형성이 심하지 않은 항공기에 대해서는 효과적인 설계 방법이지만 비행상태의 빠른 변화를 무시한 국부적인 선형화 모델을 사용하여 설계되었기 때문에 아주 심한 비선형성을 가지는 항공기의 고공격각 비행제어에서는 최적의 제어성능을 기대하기가 어렵다.

최근에는 퍼지제어기와 신경회로망제어기 등과 같은 지능제어기법을 비선형 시스템에 적용하여 좋은 성능을 얻고 있다[4][5]. 그러나 퍼지제어기가 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 조정해야하는데, 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식 없이는 시스템에 적합한 소속함수를 결정하기가 어려웠다. 그래서 최근에는 자연의 유전학과 진화이론에 바탕을 둔 확률적인 최적화 알고리즘인 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 튜닝하여 좋은 성능을 얻고 있다 [6]-[8].

본 논문에서는 기존의 진화연산을 개선하여 최적해 탐색능력을 향상시킨 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수 모양, 입·출력 이득을 최적화하였다. 적응진화 알고리즘은 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘이다. 제안한 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위해 F-18 항공기의 고공격각 비행제어에 적용하였고, 그 결과를 기존의 방법[2][9][11]과 비교, 검토하였다. 피치 올림과 피치 내림 기동명령에 대한 명령추종성을 검토한 결과 제안한 퍼지제어기가 더 빠른 기동시간을 나타내었으며, 최적화에 사용되지 않은 다른 기동명령에 대해서도 강인한 성능을 나타내었다.

II. 항공기 모델

F-18 항공기와 같은 전투기들은 실제 공중전시 상대 항공기 보다 먼저 좋은 위치를 선정하거나 상대 항공기의 공격을 피하기 위해 고기동성이 요구되며 특히, 빠른 회전운동이 요구되는 고공격각 비행 제어는 매우 중요한 문제이다. 이러한 고공격각 비행 제어를 항공기는 아주 강한 비선형성 특성을 지닌 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 비행상태의 빠른 변화를 무시한 국부적인 선형화 모델을

접수일자 : 2000. 1. 3., 수정완료 : 2000. 7. 1.

원태현 : 동의공업대학 전기과

황기현 : 부산대학교 전기공학과

박준호 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학부

이만형 : 부산대학교 기계공학부

※ 이 논문은 1998년 부산대학교 학술연구조성비를 지원 받아 수행된 연구임.

사용하여 설계된 순수한 선형 제어기만을 가지고서는 효과적으로 고기동하는 항공기를 제어할 수 없다. 그림 1에서는 항공기의 수직 운동(Longitudinal motion)에 관련된 상태, 힘 및 모멘트를 나타내고 있다. 여기서, 항력(drag force) D , 양력(lift force) L , 추력(thrust) T , 무게(weight) W 그리고 피칭모멘트(pitching moment) M 이 항공기에 작용하는 힘과 모멘트이다.

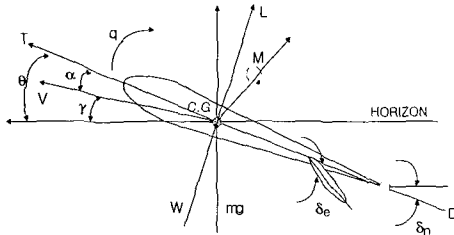


그림 1. 항공기에 작용하는 힘과 모멘트.
Fig. 1. Aircraft force and moment diagram.

단주기 수직 운동 모드의 일반적인 6자유도 운동 방정식은 Etkin[12]에 의해 유도된 5개의 상태변수, 즉 공격각(α), 속도(V), 피치각(θ), 피치각속도(q), 고도(h)를 이용하여 (1) ~ (5)와 같이 비선형 미분방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$I_{yy} \dot{q} = M + D(l_2 \sin \alpha - l_1 \cos \alpha) + L(l_x \cos \alpha + l_z \sin \alpha) + (l_{z1} T_x - l_{x1} T_z) \quad (1)$$

$$m \dot{\alpha} = mq + [mg(\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha) - L - T_x \sin \alpha + T_z \sin \alpha] / V \quad (2)$$

$$I_{yy} \dot{q} = M + D(l_x \sin \alpha - l_z \cos \alpha) + L(l_x \cos \alpha + l_z \sin \alpha) + (l_{z1} T_x - l_{x1} T_z) \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (4)$$

$$\dot{h} = V \sin \gamma \quad (5)$$

여기서, g 는 중력 가속도, (l_x, l_z) 은 항공력학 중심이 중력 중심점으로부터 떨어져 있는 위치 벡터이고, (l_{x1}, l_{z1}) 는 추력엔진 중심이 중력 중심점으로부터 떨어져 있는 위치 벡터이고 δ_e 는 엘리베이터(elevator) 변위각, δ_n 은 추력 벡터(thrust vectoring) 노즐의 변위각이다. 상승각 γ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \theta - \alpha \quad (6)$$

엔진 추력 T 를 구성하고 있는 성분은 피치 축에서 추력 벡터 노즐이 편향된 각도 δ_n 에 의해 (7)과 (8)로 표현되어 진다.

$$T_x = T \cos \delta_n \quad (7)$$

$$T_z = T \sin \delta_n \quad (8)$$

III. 적응진화 알고리즘과 퍼지제어기를 이용 항공기의 고공격각 제어

1. 적응진화 알고리즘

적응진화 알고리즘의 과정[10]은 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0(유전알고리즘의 개체) 또는 1(진화전략의 개체)을 임의로 대응시킨 후, 각 개체의 적합도를 계산하고 료울렛휠(roulette wheel)을 사용하여 적합도에 따라 복제한다. 복제된 개체는 태그변수에 따라 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단을 분리한 후, 유전알고리즘의 해집단에 대해 교배 및 돌연변이를 수행하고 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이를 수행한다. 이때 부모해집단에서 적합도가 가장 높은 개체는 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리티즘을 사용하였다.

적응진화 알고리즘의 주요 과정은 개체의 구분(초기화), 평가 및 복제, 최소해집단 수의 보장, 유전알고리즘과 진화전략의 연산, 엘리티즘으로 구성되어 있으며, 각각의 특성은 아래와 같다.

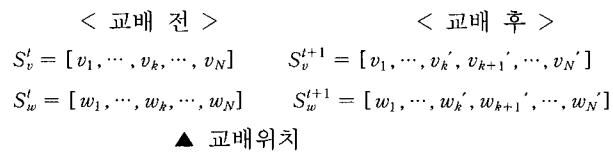
1) 개체의 구분(초기화) : 주어진 문제의 제약조건을 고려하여 임의로 각 스트링을 생성하여 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0 또는 1을 임의로 대응시킨다. 태그변수 0은 유전알고리즘을 적용할 개체이고 태그변수 1은 진화전략을 적용할 개체이다.

2) 평가 및 복제 : 각 스트링을 평가하기 위해서 본 논문에서 사용한 적합도 함수는 목적함수가 최소가 되면 적합도가 최대가 되도록 선정하였다. 복제방법은 적합도에 비례하여 복제하는 료울렛휠을 사용하였다. 복제 후 태그변수가 0인 개체들은 유전알고리즘의 교배 및 돌연변이 과정을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 0을 대응시킨다. 그리고 태그변수가 1인 개체들은 진화전략을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 1을 대응시킨다. 다음 세대의 각 개체는 0 또는 1의 태그변수에 대응되고 이를 통해 각 개체가 유전알고리즘으로부터 파생되었는지 또는 진화전략에 의해 파생되었는지를 알 수 있다. 그리고 태그변수는 현 세대에서 어떤 진화연산기법이 적합도를 더 많이 개선시키는지를 알 수 있는 지표가 되고, 다음 세대에서는 유전알고리즘과 진화전략의 해집단 수를 결정할 때 사용된다.

3) 최소해집단 수의 보장 : 세대가 진행됨에 따라 어떤 경우에는 유전알고리즘 또는 진화전략 중 어느 하나의 역할이 너무 커져서 나머지 방법에 의한 자손이 소멸될 수 있다. 이를 방지하기 위해서 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 대해 전체 해집단의 일정비율 이상을 개체를 대응시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 료울렛휠에 의해서 복제된 유전알고리즘의 해집단이 전체 해집단의 일정비율 이하가 되면 상대 해집단인 진화전략의 해집단으로부터 임의로 선택된 개체를 유전알고리즘의 해집단에 편입한다. 유전알고리즘의 해집단이 전체 해집단의 최소비율이 될 때까지 이런 과정을 반복한다. 복제 후 진화전략의 해집단이 전체 해집단의 일정비율 이하이면 마찬가지로 유전알고리즘의 해집단에서 임의

로 편집하여 최소비용을 맞추어 준다. 본 논문에서 최소해집단의 수를 보장하기 위해 사용한 일정비용은 전체해집단의 20[%]로 설정하였다.

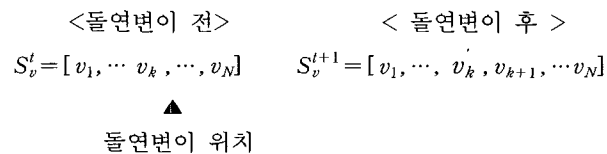
4) 유전알고리즘과 진화전략 연산 : 본 논문에서는 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실변수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 복제방법으로 룰렛휠, 교배 및 돌연변이 방법으로 변경된 단순교배(modified simple crossover)와 균일 돌연변이(uniform mutation)를 사용하였다[13][14]. 변경된 단순교배 방법은 부모해집단에서 두 개의 스트링을 임의로 선택하여 그림 2와 같이 자손해집단을 생성하는 방식이다. 그림 2에서 보는 것처럼 t 세대에서 두 개의 스트링 $S_v^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 와 $S_w^t = [w_1, \dots, w_k, \dots, w_N]$ 를 임의로 선택하였을 때, k 번째 변수의 위치에서 교배가 발생했다면 t+1 세대의 자손은 그림 2와 같다.



여기서, $v_j = \alpha_1 \times v_j + \alpha_2 \times w_j$
 $w_j = \alpha_1 \times w_j + \alpha_2 \times v_j$
 α_1, α_2 : 0과 1사이의 임의의 수
 v_i, w_j : 각 변수의 상한치와 하한치사이의 값
 N : 각 스트링을 구성하는 변수의 개수

그림 2 변경된 단순교배 방법.
 Fig. 2 Modified simple crossover method.

균일 돌연변이 방법은 t 세대의 해집단 중에서 하나의 스트링 $S_v^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 의 k 번째 변수가 돌연변이를 수행한다면, t+1 세대의 자손은 그림 3과 같다.



여기서, v_k' : k 번째 변수의 상한치와 하한치사이의 임의의 수

그림 3. 균일 돌연변이 방법.
 Fig. 3. Uniform mutation method.

본 논문에서는 사용한 진화전략은 부모해집단으로부터 자손해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거하고 자손해집단을 다음 세대의 부모해집단으로 선택하는 방법을 사용하였고, 돌연변이 방법은 (9)와 같이 가우시안 정규난수(gaussian random variable)를 이용하여 자손해집단을 생

성하는 방법을 사용하였다. 이때 표준편차는 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이 연산자의 적용한 후 개선된 개체수의 비가 δ 보다 적으면 다음 세대의 표준편차는 표준편차의 감소율(c_d)에 비례하여 감소하고, 반면에 개선된 개체수의 비가 δ 보다 크면 표준편차의 증가율(c_i)에 비례하여 증가하도록 (10)과 같이 선정하였다.

$$v_k^{t+1} = v_k^t + N(0, \sigma^t) \tag{9}$$

$$\sigma^{t+1} = \begin{cases} c_d \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) < \delta \\ c_i \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) > \delta \\ \sigma^t & \text{if } \phi(t) = \delta \end{cases} \tag{10}$$

여기서, $N(0, \sigma^t)$: 정규난수
 v_k^t : t 세대에서의 k 번째 변수
 σ^t : t 세대에서의 표준편차
 $\phi(t)$: t 세대에서 진화전략의 해집단에 대한 돌연변이 연산자의 적용 후 개선된 개체수의 비
 c_d, c_i : 표준편차의 감소율과 증가율
 δ : 0과 1사이의 상수

5) 엘리티즘 : 본 논문에서는 전체 해집단에서 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하였다. 이때 유전알고리즘의 해집단에 대해서는 태그변수를 0으로, 진화전략의 해집단에 대해서는 태그변수를 1로 두었다.

2. 적응진화 알고리즘을 이용한 퍼지제어기 설계
 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)가 뛰어난 제어성을 가지기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 적절히 결정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 지식 또는 시행착오법을 이용하였다. 그리고 최근에는 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 튜닝하는 방법들이 많이 제안되고 있다[6-8]. 본 논문에서는 방법론에서 상이한 탐색과정을 가지고 있는 유전알고리즘과 진화전략을 적응적으로 이용하는 적응진화 알고리즘을 퍼지제어기의 소속함수 모양과 임·출력 이득을 튜닝하였다. 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제

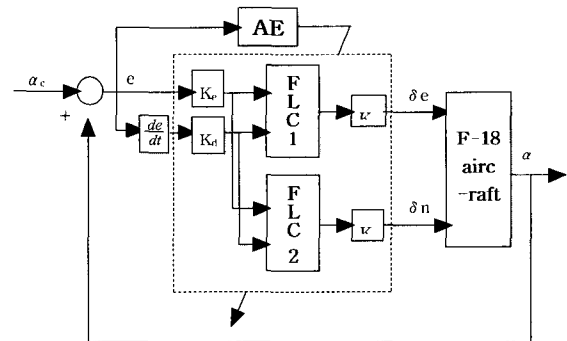


그림 4. 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기를 튜닝하기 위한 구성도.
 Fig. 4. Block diagram of tuning FLC using AEA.

여기를 최적화하기 위한 구성도는 그림 4에 나타내었다. 여기서, Ke, Kde, Ku1, Ku2는 퍼지제어기의 입·출력변수의 스케일링 상수를 나타낸다. 퍼지제어기의 입력으로 기준입력(αc)과 실제 공격각과의 오차(e)와 그 변화량을 사용하였으며, 출력은 각각 엘리베이터의 변위각(δe)과 추력벡터 노즐의 변위각(δn)으로 하였다. 본 논문에서는 퍼지제어기의 입·출력변수 소속함수로 각각 7개의 퍼지변수를 사용하였으며, 퍼지추론 방법으로 Mamdani의 최대-최소 퍼지추론 방법을 사용하였다. 그리고 비례-적분 형태의 퍼지규칙과 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다.

그림 5는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었으며, 제로(ZO) 소속함수의 모든 꼭지점을 영점에 고정시켰고, 각 소속함수의 폭은 모두 대칭으로 두었으며, 영점을 기준축으로 하여 모든 소속함수들을 대칭으로 구성하였다. 여기서, NB는 Negative Big, NM는 Negative Medium, NS는 Negative Small 등을 나타내는 언어적인 변수이다.

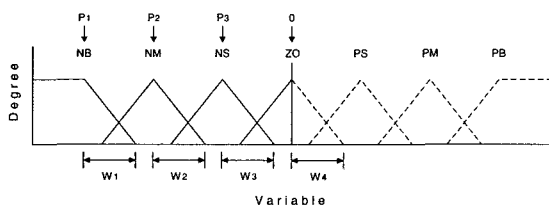


그림 5. 대칭형 이등변 삼각형 소속함수.
Fig. 5. Symmetrical membership function.

따라서 입·출력변수의 소속함수를 튜닝하는데 필요한 적응진화 알고리즘의 해집단의 구성은 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 것처럼 두 개의 퍼지제어기가 같은 입력변수의 소속함수를 사용함으로써 오차 소속함수의 꼭지점이 3개, 폭이 4개, 오차 변화분의 소속함수의 꼭지점이 3개, 폭이 4개와 각각의 출력변수에 대해 소속함수의 꼭지점이 3개, 폭이 4개를 포함해서 총 28개와 입·출력 스케일링 상수 4개로 하나의 스트링을 구성하였다.

해집단의 각 스트링을 평가하기 위한 적합도를 선정하는 방법은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 (11)과 같이 T시간 동안에 취득한 기준입력과 실제출력간의 오차의 절대치 합과 추력 벡터 노즐의 변위각의 절대치 합을 이용하였다.

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘을 이용하여 항공기의 고공격각 비행제어를 위한 퍼지제어기 설계 과정은 아래와 같고, 전체 흐름도는 그림 7에 나타내었다.

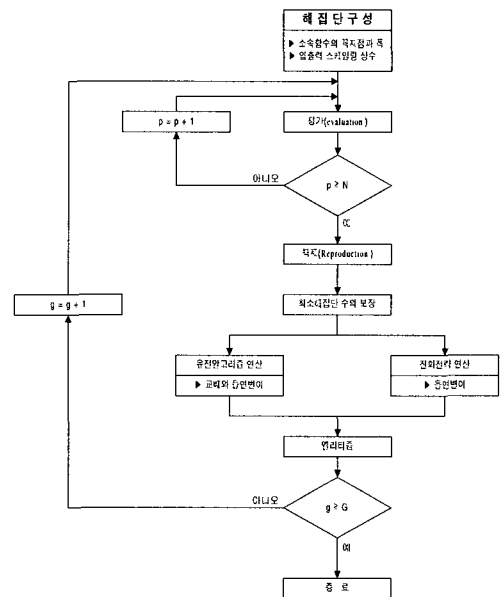
$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N (|e(t)| + \beta |\delta_n(t)|)} \quad (11)$$

여기서, $e(t)$: $\alpha_c(t) - \alpha(t)$
 $\delta_n(t)$: 추력벡터 노즐의 변위각
 β : 상수
 N : T시간 동안에 취득한 데이터 개수

String 1	$P_{1,1}$	...	$P_{1,12}$	$W_{1,1}$	...	$W_{1,16}$	$K_{e,1}$	$K_{de,1}$	K_{u1}	$K_{u2,1}$	*
String 2	$P_{2,1}$	...	$P_{2,12}$	$W_{2,1}$	...	$W_{2,16}$	$K_{e,2}$	$K_{de,2}$	K_{u1}	$K_{u2,2}$	*
...
String n	$P_{n,1}$	...	$P_{n,12}$	$W_{n,1}$	...	$W_{n,16}$	$K_{e,n}$	$K_{de,n}$	K_{u1}	$K_{u2,n}$	*

여기서, $P_{i,j}$: 소속함수의 꼭지점
 $W_{i,j}$: 소속함수의 밑변길이의 1/2
 n : 스트링 개수
 $*$: 태그변수

그림 6. 해집단의 구성.
Fig. 6. Configuration of population.



여기서, N : 해집단의 크기
 G : 특정한 세대수

그림 7. 적응진화 알고리즘을 이용한 퍼지제어기 설계.
Fig. 7. A design of FLC using AEA.

단계 1 : 해집단 구성

그림 6과 같이 퍼지제어기의 꼭지점과 폭 및 입·출력변수의 스케일링 상수를 이용하여 해집단 구성하고, 각 스트링이 유전알고리즘의 개체인지 진화전략은 개체인지를 판단하기 위한 태그변수를 임의로 설정한다.

단계 2 : 평가

(11)의 적합도 함수를 이용하여 단계 1에서 생성된 각 스트링을 평가하기 위한 해석과정은 다음과 같다.

- ① 비선형 미분방정식 해석시 필요한 초기치 계산을 한다.
- ② 퍼지각속도의 오차 및 오차의 변화분을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지화 과정을 거쳐서 퍼지제어기의 출력을 계산한다.
- ③ 항공기 비선형 미분방정식 ((1)~(5))을 해석한다.
- ④ 시뮬레이션 시간 30 sec 동안 ②~③을 반복한다.

단계 3 : 복제

적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하여

복제한 후, 태그변수가 0인 개체는 유전알고리즘을 해집단에 편입하고 1인 개체는 진화전략의 해집단에 편입을 한다.

단계 4 : 최소해집단 수의 보장

유전알고리즘 또는 진화전략 중 어느 하나의 역할이 우세하여 나머지 방법에 의해서 자손이 소멸되는 것을 방지하기 위해 최소해집단 수를 보장하였다.

단계 5 : 유전알고리즘 및 진화전략의 연산

태그변수가 0인 개체에 대해서는 유전알고리즘의 연산자인 교배와 돌연변이를 수행하여 자손을 생성하고, 태그변수가 1인 개체에 대해서는 진화전략의 연산자인 돌연변이를 수행하여 자손을 생성한다.

단계 6 : 엘리티즘

적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리티즘을 사용하였다.

단계 7 : 수렴조건

특정한 세대수를 만족할때까지 단계 2~단계 6을 반복한다.

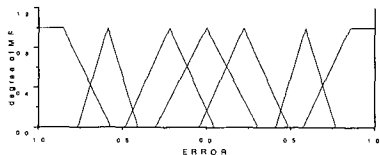
IV. 사례 연구

본 논문에서는 제안한 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위해 F-18 전투기의 고공격각 비행 제어에 적용하였다. 비선형 시뮬레이션에 사용된 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같으며, 그림 8은 최적화된 퍼지제어기의 소속함수 모양을 나타내었다. 그림 9는 각 세대별 적합도 수렴특성 및 적응진화 알고리즘에서의 유전알고리즘과 진화전략의 개체 수를 나타내었다. 그림 9의 (b)에서 보는 바와 같이 초기 세대에서는 유전알고리즘의 개체 수가 진화전략의 개체 수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체 수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적응적으로 수행함을 나타낸다.

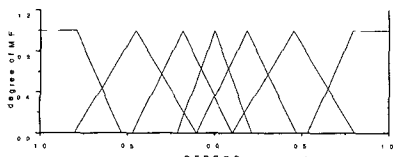
표 1. 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수.

Table 1. Coefficients of simulation for AEA.

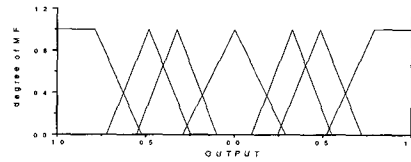
적용 방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	δ	C_d	C_i	실행 시간
AEA	50	0.95	0.005	0.5	0.95	1.05	60분



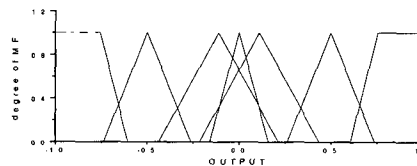
(a) 오차의 소속함수



(b) 오차 변화분의 소속함수



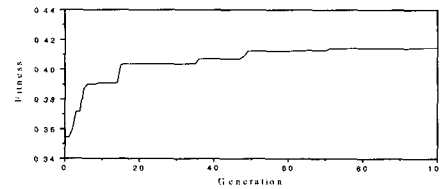
(c) 엘리베이터 변위각의 소속함수



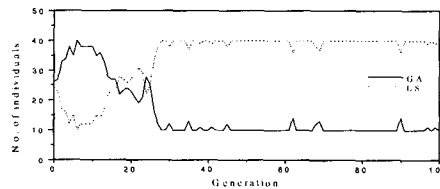
(d) 추력벡터 노즐 변위각의 소속함수

그림 8. 최적화된 소속함수.

Fig. 8. Tuned membership functions.



(a) 적합도



(b) 적응진화 알고리즘에서의 GA, ES의 개체수

그림 9. 각 세대별 적합도 수렴특성 및 GA, ES의 개체 수.

Fig. 9. Fitness and number of individuals of GA and ES in each generation.

그림 10은 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기 설계에 사용된 급격한 피치 올림(pitch up)과 피치 내림(pitch down) 기동명령으로 구성된 시나리오에 대해 결과를 나타내고 있으며 고공격각 비행을 요구하는 기준입력에 대하여 빠른 시간내에 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 10에서 보는 것처럼 고공격각 비행을 요구하는 기준입력에 대하여 빠른 시간내에 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 10(b)~그림 10(c)에서 피치각속도와 피치각을 나타내었으며, 피치각속도는 65[deg/sec]이내이다. 그림 10(d)는 비행 속도로서 저동압, 중동압, 고동압과 같은 과도 모드를 포함하고 있음을 보여주고 있다. 그림 10(e)~그림 10(f)는 엘리베이터 변위각 및 벡터추력 노즐의 변위각을 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 급격한 피치 올림이나 피치 내림이 요구되는 과도상태에서는 엘리베이터의 효과에 비해 벡터추력 제어의 역할이 더 크고 정상상태에

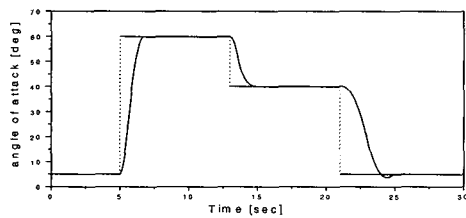
도달할수록 벡터추력의 제어량은 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 11은 적응진화 알고리즘을 퍼지제어기 설계에 사용되지 않은 새로운 시나리오에 대한 퍼지제어기의 성능을 보였다. 그림 8에서 보는 것처럼 적응진화 알고리즘 이용하여 최적 설계된 제어기가 새로운 시나리오에 대해서도 잘 추종함을 알 수 있다. 표 2는 제안한 퍼지제어기와 기존의 방법[2][9][11]에 대해서 55[deg]와 60[deg]에 도달하는 시간을 비교하였다. 표에서 보는 것처럼 제안한 퍼지제어기가 도달시간면에서 기존 방법보다 더 나은 성능을 보임을 알 수 있다.

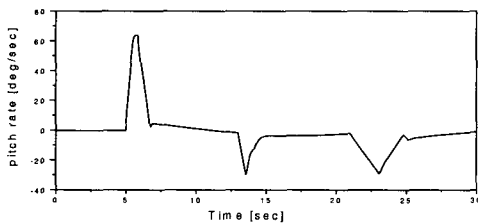
표 2. 제어기의 성능비교.

Table 2. Performance comparisons of controllers.

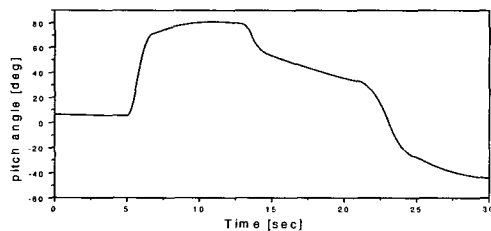
제어기 성능	가변제어 게인 피드백 제어[2]	최소시간 최적제어 [9]	적응제어 [11]	제안한 방법
5° 도달 시간 (초)	3.5	1.8	2.0	1.3
60° 도달 시간 (초)	6.0	-	3.0	1.6
최대 피치 각속도 [deg/sec]	38	-	48	64



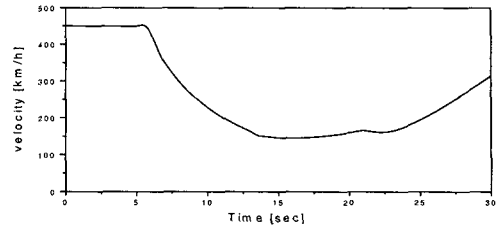
(a) 공격각



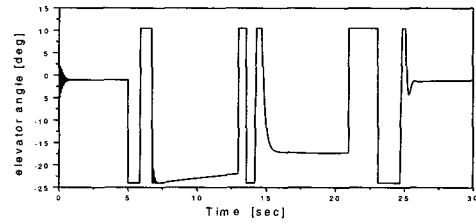
(b) 피치각속도



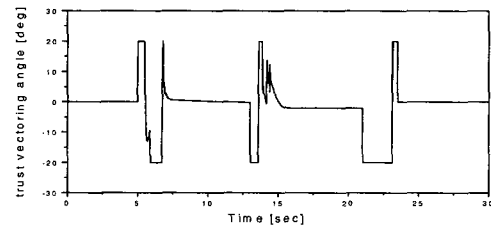
(c) 피치각



(d) 속도



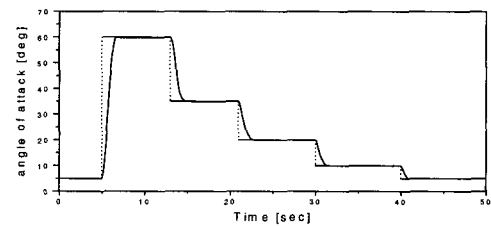
(e) 엘리베이터 변위각



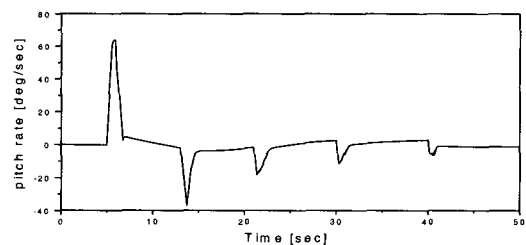
(f) 추력벡터 노즐의 변위각

그림 10. 퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과.

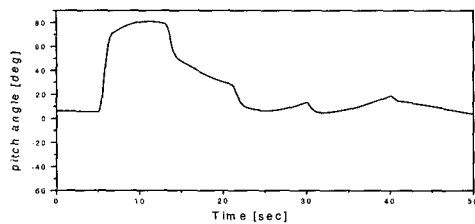
Fig. 10. Simulation results of fuzzy controller.



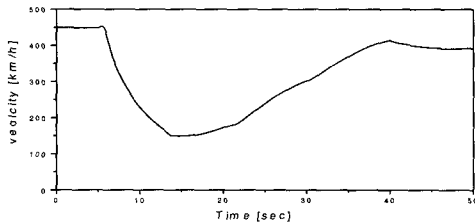
(a) 공격각



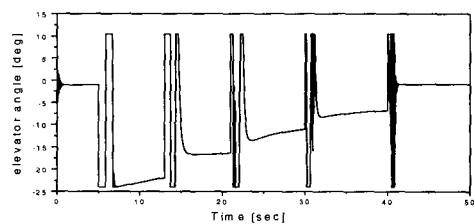
(b) 피치각속도



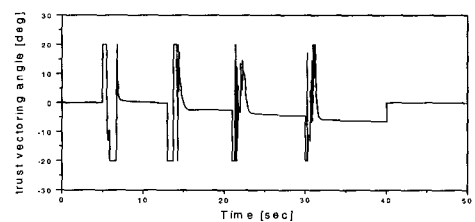
(c) 피치각



(d) 속도



(e) 엘리베이터 변위각



(f) 추력벡터 노즐의 변위각

그림 11. 새로운 시나리오에 대한 퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과.

Fig. 11. Simulation results of fuzzy controller for another synario.

V. 결론

본 논문에서는 F-18 전투기의 고공격각 비행제어를 위한 퍼지제어기를 설계하였다. 퍼지제어기의 소속함수 모양 및 입·출력 스케일링 상수를 최적화 하기 위해서 적응진화 알고리즘을 사용하였다. 제안한 퍼지제어기의 성능을 평가하기 위해 F-18 전투기의 고공격각 비행제어에 적용하여 비선형 시뮬레이션 해본 결과, 제안한 퍼지제어기가 기존의 방법보다 더 나은 제어성능을 나타내었다. 본 논문의 연구결과 및 성과를 요약하면 다음과 같다.

① 초기 세대에서는 유전알고리즘의 개체 수가 진화전략의 개체 수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체 수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기 세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적용적으로 수행함을 나타낸다.

② 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위해 피치 올림과 피치 내림 기동명령에 대한 F-18 항공기의 추종성을 살펴 본 결과 제안한 제어기는 통상적인 비행에서는 엘리베이터로서 제어를 하고, 고공격각 비행이 요구될 때에 벡터 추력 제어를 수행하여 과도 비행 모드에 대한 적응성을 향상시켰다. 그리고 이를 기존의 방법[2][4]과 비교, 분석 한 결과 적응진화연산에 의해 최적 설계된 제어기는 강인성과 제어 성능면에서 기존 제어기에 비해 향상되었음을 알 수 있다.

참고문헌

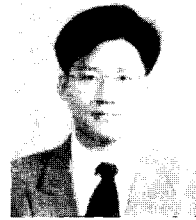
- [1] N. Halyo and D. D. Moerder, "A variable gain output feedback control design methodology", ASA CR-4226, 1989.
- [2] A. J. Ostroff, "High-alpha application of variable gain output feedback control," *AIAA Jour. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 15, no. 2, pp. 491-497, 1992.
- [3] R. J. Adams, J. M. Buffington, and S. S. Banda, "Implementation of a full-envelop controller for a high performance aircraft", *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vl. 17, n. 3, pp. 578-580, 1994
- [4] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and cntrol of dnamicl sstems using nural ntworks," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, 1990.
- [5] F. C. Chen, "Back-popagation nural ntworks for nnnlinear slf-tning aaptive cntrol," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 44-48, 1990.
- [6] Wen-Ruey Hwang and Wiley E. Thompson, "Design of itelligent fzy lgic cntrollers using gnetic agorithm," *Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vl. 2, pp. 1383-1388, 1994.
- [7] M. Maeda, T. Sato, and S. Murakami, "Design of the slf-tning fzy cntroller", *Proc. of International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks*, pp. 393-396, Iizuka(Japan), July, 1990.
- [8] B. M. Chung and J. H. Oh, "Autotuning mthod of mmbership fnction in a fzy larning cntroller", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vl. 1, pp. 335-349, 1994
- [9] R. R. Mohler, S. Cho, C. S. Koo, and R. R. Zakrzewski, "Nonlinear stability and control study of highly maneuverable high performance aircraft,"

- OSU-ECE Report NASA 9201, Corvallis, OR., 1993.
- [10] 황기현, 문경준, 박준호, 정정원, "진화전략과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", 대한전기학회, 47권 8호, pp. 1262-1268, 1998. 8.
- [11] S. Cho and K. R. Cho, "Adaptive control of highly maneuverable high performance aircraft", 한국항공우주학회 논문지 제22권, 제5호, 1994.
- [12] B. Etkins, *Dynamics of flight: Stability and Control*, John Wiley & Sons, 1982.
- [13] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1992.
- [14] Mitsuo Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, A Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [15] D. Gong, G. Yamazaki, and M. Gen, "Evolutionary program for Optimal Design of Material Distribution System," *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.139-143, 1996.
- [16] 원태현, 송달섭, 이만형, "F-18 항공기를 위한 퍼지가변 구조 제어기 설계", 대한기계학회, 23권, 12호, pp. 2109-2119, 1999.



원 태 현

1986년 부산대 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1988), 동 대학원 박사 과정 수료. 1988년~1997년 국방과학연구소 선임연구원, 1998년~현재 동의공업대학 전기과 전임강사. 관심분야는 퍼지 제어 및 지능제어, 마이크로 프로세서 응용 및 전동기 제어.



황 기 현

1968년 3월 1일생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대 BK21 지역대학 육성사업단 연수 연구원.



박 준 호

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1978 ~ 1981년 한국전기연구소 연구원. 1981년 ~ 1984년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.



이 만 형

1969년 부산대 전기공학과 졸업 및 동 대학원 석사(1971), 미국 오리건 주립대 · 컴퓨터공학과 박사(1983). 1975년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 석좌교수, 관심분야는 메카트로닉스 및 확률제어, 비선형제어, 랜덤 프로세스 및 파라메타 추정기법.