
강인한 성능을 가지는 모델추종형 H_∞ 제어 시스템의 설계

황현준*

A Design on Model-Following H_∞ Control System Having Robust Performance

Hyun-Joon Hwang*

요 약

본 연구에서는 강인한 성능을 가지는 해집단내에서 기준모델의 출력을 최적으로 추종하도록 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타 γ 를 동시에 최적화함으로써, 강인한 성능에 관한 필요충분조건식을 만족함은 물론 설계사양에 따른 만족스러운 응답특성을 보이는 강인한 성능을 가지는 모델추종형 H_∞ 제어기의 설계법을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인한다.

ABSTRACT

This paper suggests a design method of the model-following H_∞ control system having robust performance. This H_∞ control system is designed by applying genetic algorithm(GA) with reference model to the optimal determination of weighting functions and design parameter γ that are given by H_∞ control theory. These weighting functions and design parameter γ are optimized simultaneously in the search domain guaranteeing the robust performance of closed-loop system. The effectiveness of this H_∞ control system is verified by computer simulation.

키워드

Model-Following H_∞ Control System, Robust Performance, Genetic Algorithm(GA),
Weighting Functions, Design Parameter γ

I. 서 론

1980년대 초반 G. Zames[1]에 의해 개발된 H_∞ 제어 이론은 가중치 함수(weighting function)와 설계 파라메타 γ 를 적절히 선정함으로써 주어진 설계사양을 만족하고 비구조적 불확실성(unstructured uncertainty)[2]에 대한 강인한 안정성(robust stability)[2]을 가지는 제어 시스템을 설계하는 것이다.

이러한 H_∞ 제어이론의 문제점은 다음과 같다. 첫 번째는 구조적 불확실성(structured uncertainty)[3]에 대한 강인한 성능(robust performance)[3] 문제를 루프형상(loop-shaping)법에 기초한 기존의 방법으로는 해결할 수 없다는 것이고 두 번째는 제어 시스템의 성능 및 안정성을 결정하는 가중치 함수 및 설계 파라메타 γ 의 선정이 대부분 시행착오적(trial-and-error)인 방법[4-6]에 크게 의존함으로써 시스템에 따른 최적의 응답특성을 보장할 수 없다는 것이다.

일반적으로 가중치 함수 $W_1(s)$ 의 이득을 크게 하면 시스템의 성능이 향상되지만 안정성이 나빠진다. 또한 가중치 함수 $W_2(s)$ 의 이득을 크게 하면 시스템의 안정성이 향상되지만 성능이 떨어지고 설계 파라메타 γ 도 비슷한 특성을 가진다. 따라서 이러한 구속조건(trade-off)[7]에도 불구하고 설계사양에 따른 최적의 응답특성을 가지며 강인한 안정성은 물론 μ -합성법(μ -synthesis)[3]과 같이 복잡한 과정을 거치지 않고 간단히 강인한 성능을 보장할 수 있는 H_∞ 제어기의 설계법이 요구된다.

1970년대 초반 J. Holland에 의해 제시된 유전 알고리즘(genetic algorithm : GA)[8]은 적합도(fitness)가 큰 문자열(string)을 다음 세대에 복제함으로써 전역해를 찾아 가는 최적화 기법으로 특히 다수의 변수들을 하나의 문자열로 부호화(coding)함으로써 병렬연산 및 동시최적화가 가능하다. 따라서 최근까지 많은 적용사례들[9-11]이 발표되고 있다.

본 연구에서는 동시최적화가 가능한 GA를 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타 γ 를 선정함으로써, 구속조건에도 불구하고 최적의 응답특성을 가짐은 물론 강인한 성능까지 보장하는 H_∞ 제어 시스템의 설계법을 제시하고자 한다. 이를 위해 강인한 성능을 보장하는 해집단(population)내에서 설계사양에 따른 기준모델(reference model)의 출력을 최적으로 추종하도록 GA

를 사용하여 가중치 함수의 게인(gain) 및 동특성(dynamics) 파라메타 그리고 설계 파라메타 γ 를 동시에 최적화하고 제시된 모델추종형 H_∞ 제어기 설계법을 다변수 항공기 모델에 적용, 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 확인한다.

II. AIRC H_∞ 제어 시스템

1982년 Hung과 MacFarlane이 제시한 항공기 모델 AIRC[7]는 각각 3개의 입력과 출력, 그리고 5개의 상태 변수를 가지는 다변수입출력(multi-input multi-output : MIMO) 시스템이다. 여기서 입력변수 $u_1 \sim u_3$ 는 다음과 같다.

- u_1 : spoiler angle (measured in tenths of a degree)
- u_2 : forward acceleration (ms^{-2})
- u_3 : elevator angle (degree)

또한 상태변수 $x_1 \sim x_5$ 및 출력변수 $y_1 \sim y_3$ 는 각각 다음과 같다. 그리고 AIRC의 상태공간모델(state-space model)은 식(1) ~ 식(4)와 같다.

- $x_1 = y_1$: altitude relative to some datum (m)
- $x_2 = y_2$: forward speed (ms^{-1})
- $x_3 = y_3$: pitch angle (degree)
- x_4 : pitch rate ($degs^{-1}$)
- x_5 : vertical speed (ms^{-1})

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.1320 & 0 & -1.000 \\ 0 & -0.0538 & -0.1712 & 0 & 0.0705 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0.0485 & 0 & -0.8556 & -1.013 \\ 0 & -0.2909 & 0 & 1.0532 & -0.6859 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.120 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4.4190 & 0 & -1.665 \\ 1.5750 & 0 & -0.0732 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

H_∞ 제어이론은 주어진 가격함수의 ∞ -노름(norm)을 최소화하여 모델링 오차에 대한 시스템의 안정성을 보장하며 만족스러운 명령추종성을 가지는 강인한 제어를 설계하는 것이다. AIRC H_∞ 제어 시스템을 설계하기 위한 가중치 함수의 상태공간모델을 $W_i(s) : (A_i, B_i, C_i, D_i) (i = 1, 2)$ 라고 하면 식(1) ~ 식(4)의 항공기 모델에 대한 일반화플랜트(generalized plant) $P(s) : (A_p, B_p, C_p, D_p)$ 는 다음과 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ B_1C & A_1 & 0 \\ B_2C & 0 & A_2 \end{bmatrix} \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 & B \\ -B_1 & B_1D \\ 0 & B_2D \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} -D_1C & -C_1 & 0 \\ D_2C & 0 & C_2 \\ -C & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D_p = \begin{bmatrix} D_1 & -D_1D \\ 0 & D_2D \\ I_3 & -D \end{bmatrix}$$

또한 항공기 모델 AIRC에 대한 설계사양[7]은 다음과 같다.

- 대역폭(bandwidth)은 10[rad/sec] 정도로 한다.
- 입·출력의 결합으로 인한 상호작용(interaction)은 가능한 없어야 한다.
- 스텝응답에서의 오버슈트(overshoot)는 최대한 억제한다.
- 정상상태오차(steady-state error)는 0으로 한다.

참고문헌 [7]에서 J. M. Maciejowski는 이러한 설계사양을 만족하는 AIRC H_∞ 제어 시스템을 시행착오적인 방법에 의해 설계하였으며 선정된 가중치 함수들과 설계 파라미터 γ 는 다음과 같다. 설계된 AIRC 제어 시스템의 시뮬레이션 결과는 IV장에서 나타낸다.

$$W_1(s) = \frac{(s+6)^2}{(s+0.00006)(s+0.6)} \quad (6)$$

$$W_2(s) = \frac{2000(s+10)(s+50)}{(s+1000)^2} \quad (7)$$

$$\gamma = 7.8 \quad (8)$$

III. GA를 이용한 강인한 성능을 가지는 H_∞ 제어기의 설계

3.1 유전 알고리즘의 개요

유전 알고리즘[8]은 적자생존에 따른 확률적인 방법에 기초한 최적화 기법중의 하나로서 복제(reproduction), 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation)의 3개의 유전 연산자(genetic operator)를 사용하며 일반적으로 문자열의 크기(m), 해집단의 크기(p), 세대수(z) 그리고 교배 확률(P_c) 및 돌연변이 확률(P_m) 등은 경험적인 방법에 의해 적절히 선정한다.

3.2 강인한 성능을 위한 조건

지금까지 강인한 제어는 주로 비구조적 불확실성에 대한 안정성 측면에서 다루어져 왔으나 최근에는 강인한 안정성뿐만 아니라 구조적 불확실성에 대한 강인한 성능이 요구되고 있다. 강인한 성능의 중요성 및 이에 관한 구체적인 내용은 참고문헌 [3]에 제시되어 있으므로 본 연구에서는 이를 생략한다.

강인한 성능을 얻기 위한 필요충분조건식은 식(9)와 같다.

$$\| \frac{W_1(s)S(s)}{1+W_2(s)T(s)} \|_\infty < 1 \quad \text{and} \quad \| W_2(s)T(s) \| < 1 \quad (9)$$

또한 제어 시스템이 강인한 성능에 관한 조건식 식(9)를 만족한다는 것은 각각의 전달함수 $G_1(s) \triangleq W_1(s)S(s)[1+W_2(s)T(s)]^{-1}$ 와 $G_2(s) \triangleq W_2(s)T(s)$ 에 대한 해밀토니안 행렬(Hamiltonian matrix) $H_i (i = 1, 2)$ 의 고유치(eigenvalue) $\lambda_{ij} (j = 1, 2 \dots N)$ 의 실수부 $\lambda_{ij}^R = \text{Re}[\lambda_{ij}]$ 에 대해 식(10)[3]을 만족하는 것이다.

$$\prod_{j=1}^N \lambda_{ij}^R = \prod_{j=1}^N \text{Re}[\lambda_{ij}] \neq 0 \quad (10)$$

따라서 본 연구에서는 반복적인 H_∞ 제어기의 설계 과정을 포함하는 복잡한 μ -합성법을 사용하지 않고 강인한 성능에 관한 필요충분조건식 (10)을 만족하고 설계사양에 따른 기준모델의 응답특성을 잘 추종하는 강인한 성능을 가지는 H_∞ 제어 시스템을 설계하고자 한다.

3.3 강인한 성능을 가지는 **AIRC H_∞** 제어기의 설계 유전 알고리즘을 사용하여 강인한 성능을 가지는 모델 추종형 **AIRC H_∞** 제어 시스템을 설계하기 위하여 먼저 강인한 성능을 보장하는 해집단내에서 식(6) ~ 식(8)로 주어지는 가중치 함수와 설계 파라메타 γ 를 동시에 최적화해야 한다. 이를 위해 주어진 가중치 함수에 크기와 형태를 결정하는 계인 및 동특성 파라메타를 변수로 주고 식(11) 및 식(12)와 같이 가중치 함수의 매개변수화를 행한다. 여기서 g_{w1} , g_{w2} 와 $p_{w1} \sim p_{w5}$ 는 각각 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 의 계인 및 동특성 파라메타들을 나타낸다.

$$W_1(s) = \frac{g_{w1} \times (s + p_{w1})^2}{(s + 0.0001 \times p_{w2})(s + p_{w2})} \quad (11)$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s + p_{w3})(s + p_{w4})}{(s + p_{w5})^2} \quad (12)$$

최적화를 위해 선정된 계인 파라메타의 탐색구간 (search domain) D_1 과 D_2 는 식(13) 및 식(14)와 같다.

$$D_1 = g_{w1} \mid L_1 = 0.1 \leq g_{w1} \leq 50 = U_1 \quad (13)$$

$$D_2 = g_{w2} \mid L_2 = 100 \leq g_{w2} \leq 10000 = U_2 \quad (14)$$

또한 최적화를 위해 선정된 동특성 파라메타의 탐색구간 $D_3 \sim D_7$ 은 식(15) ~ 식(19)와 같다. 그리고 설계 파라메타 γ 에 대한 탐색구간 D_8 은 식(20)과 같다.

$$D_3 = p_{w1} \mid L_3 = 0.1 \leq p_{w1} \leq 50 = U_3 \quad (15)$$

$$D_4 = p_{w2} \mid L_4 = 0.01 \leq p_{w2} \leq 5 = U_4 \quad (16)$$

$$D_5 = p_{w3} \mid L_5 = 0.1 \leq p_{w3} \leq 100 = U_5 \quad (17)$$

$$D_6 = p_{w4} \mid L_6 = 0.1 \leq p_{w4} \leq 100 = U_6 \quad (18)$$

$$D_7 = p_{w5} \mid L_7 = 100 \leq p_{w5} \leq 10000 = U_7 \quad (19)$$

$$D_8 = \gamma \mid 0 < L_8 = 0.1 \leq \gamma \leq 10 = U_8 \quad (20)$$

단 탐색구간의 하한치 L_8 은 Glover-Doyle 알고리즘[2]의 안정제어기 조건식 식(21)을 만족하는 범위내에서 적절히 결정하였다.

$$\bar{\sigma}(D_{1112}) = 0 < \gamma \quad (21)$$

여기서 $D_{1112} = D_1 = 0$ 이며 D_1 은 가중치 함수 $W_1(s)$ 의 상태공간모델식 $W_1(s) : (A_1, B_1, C_1, D_1)$ 으로부터 구할 수 있다.

일반적으로 한정된 탐색구간의 선정은 탐색의 수렴성 문제를 가져올 수 있다. 반면에 광범위한 탐색구간의 선정은 과도한 계산량 문제를 발생시킨다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 식(6) ~ 식(8)을 기준으로 $D_1 \sim D_8$ 과 같은 구체적인 탐색구간들을 지정하여 빠른 시간내에 보다 정밀한 탐색을 하도록 하였다. 또한 시스템이 발산하면 개별 문자열의 적합도가 급격히 감소하므로 이러한 적합도의 성질을 이용하여 탐색구간의 선정에서 제어 시스템의 공칭 안정도(nominal stability)[2]는 따로 보장하지 않는다. 그리고 유전 알고리즘에서의 탐색은 불균일 탐색[9-11]을 주로 하므로 탐색구간의 크기가 서로 다름에도 불구하고 별도의 스케일링은 하지 않는다.

가중치 함수의 계인, 동특성 파라메타 및 γ 를 동시에 최적화하기 위해 이들 8개의 변수를 그림 1과 같이 하나의 문자열에 적절한 크기($m_i, i = 1, 2 \dots 8$)의 비트(bit)수로 부호화한다.

여기서 비트수 m_i 로 부호화된 임의의 i 번째 파라메타 X_i 에 대하여 탐색구간 D_i 와의 관계식을 유도하면 식(22)와 같다.

g_{w1}	g_{w2}	p_{w1}	p_{w2}	p_{w3}	p_{w4}	p_{w5}	γ
00101	11000	110111	101001	101100	010011	110110	1000101
$m_1=5 \quad m_2=5 \quad m_3=6 \quad m_4=6 \quad m_5=6 \quad m_6=6 \quad m_7=6 \quad m_8=7 \text{ bits}$							
$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 = 47$							

그림 1. 계인, 동특성 파라메타 및 γ 의 부호화
Fig. 1. Coding of Gain, Dynamics Parameters and γ

$$X_i = L_i + \frac{x_i}{2^{m_i} - 1} (U_i - L_i) \quad (22)$$

단 x_i 는 m_i 의 비트수를 가지는 2진수의 현재 정수값이며 D_i 의 상·하한치는 각각 U_i 와 L_i 이다. 따라서 탐색구간 D_i 는 $(2^{m_i} - 1)$ 개로 분할되고 비트수 m_i 는 탐색의 정밀도(resolution)를 나타내게 된다. 일반적으로 m_i 를 크게 하면 정밀탐색이 가능하지만 탐색시간이 많이 걸리므로 수렴시간 및 해집단의 크기 등을 고려하여 결정한다.

본 연구에서는 강인한 성능을 가지는 H_∞ 제어 시스템이 설계사양에 따른 최적의 명령추종성을 가지도록 식(23)과 같이 적절한 기준모델을 선정한 후 그림 2와 같이 유전 알고리즘을 사용하여 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하였다. 기준모델은 설계사양에 따른 최적의 응답특성을 가지도록 ITAE의 최소표준형 2차 모델[12] ($\omega_o = 10[\text{rad/sec}]$)로 선정하였다. 즉 시스템의 응답속도를 고려하여 대역폭 ω_b 가 $10[\text{rad/sec}]$ ($\cong \omega_o = 10[\text{rad/sec}]$) 정도이며 최대 오버슈트는 10% 이내가 되도록 하였다.

$$M_o(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + 1.4 \times \omega_o s + \omega_o^2} \quad (23)$$

또한 기준모델 및 유전 알고리즘에 따른 개별 문자열의 적합도 fit_{weight} 는 적절한 가중치(weight value)를 도입하여 식(24) 및 식(25)와 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} err_{fit,weight} &= w_{ij} \times \sum_{t=0}^n \text{abs}[err_{ij}(k(t))] \\ &= w_{ij} \times \sum_{t=0}^n \text{abs}[y_{ij}^m(k(t)) - y_{ij}(k(t))] \end{aligned} \quad (24)$$

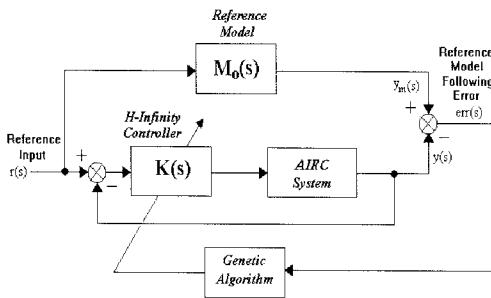


그림 2. GA를 이용한 모델추종형 H_∞ 제어 시스템
Fig. 2. Model-following H_∞ Control System Using GA

여기서 $n = 60, k(t+1) = k(t) + T_s, k(0) = 0[\text{sec}]$ 이며 $T_s = 0.05[\text{sec}]$ 는 샘플링 시간(sampling time)을 나타낸다.

$$fit_{weight} = \frac{1}{1 + err_{fit,weight}} \quad (25)$$

단 가중치는 기준모델에 대한 추종성을 고려하여 i 번째 입력에 대한 j 번째 출력에 대해 $w_{ij} = 2(i \neq j$ 의 경우는 1)로 선정하였다. 여기서 $y_{ij}(k(t)), y_{ij}^m(k(t))$ 는 각각 설계된 H_∞ 제어 시스템 및 기준모델의 i 번째 입력에 대한 j 번째 출력을, $err_{ij}(k(t)) = \text{abs}[y_{ij}^m(k(t)) - y_{ij}(k(t))]$ 는 이에 따른 기준모델 추종오차를 나타낸다. 또한 $\text{abs}[\cdot]$ 는 절대값을 의미한다. 한편 식(25)로부터 적합도 $fit_{weight}(\leq 1)$ 는 기준모델추종오차 $err_{fit,weight}$ 의 역수로 정의되어 있으므로 설계결과 적합도가 높을수록 기준모델에 보다 최적으로 추종하고 설계사양(오버슈트 및 응답속도)을 잘 만족시킨다.

유전 알고리즘을 사용하여 강인한 성능을 가지는 AIRC H_∞ 제어 시스템을 설계하기 위한 흐름도는 그림 3과 같다.

IV. 시뮬레이션 및 비교고찰

본 장에서는 III장에서 제시한 설계 순서에 따라 강인한 성능을 가지는 AIRC H_∞ 제어를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 성능을 비교고찰한다.

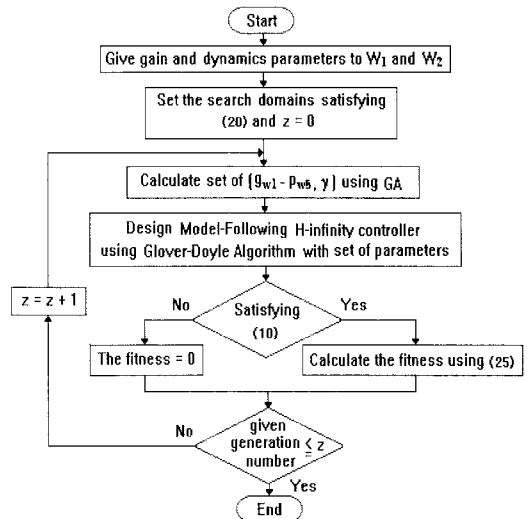


그림 3. 강인한 성능을 가지는 H_∞ 제어기의 설계 순서

Fig. 3. Procedure for Design of H_∞ Controller Having Robust Performance

유전 알고리즘에서 사용된 파라메타들과 계산시간 및 적합도는 표 1과 같고 이에 따라 선정된 가중치 함수의 계인, 동특성 파라메타 그리고 설계 파라메타 γ 와 강인한 성능을 위한 필요충분조건식 (10)의 결과는 표 2와 같다. 본 연구에서는 Intel Atom CPU 230 1.6GHz (RAM 1GB) 기종의 컴퓨터를 사용하였다.

표 1. GA에서 사용된 파라메타들과 설계시간 및 적합도
Table 1. Parameters in GA, Computation Time and Fitness

	String length (nbits)	Population size (p)	Generation no. (z)	Computation time (min./sec.)	Pc [practical value]	Pm [practical value]	errfit, weight	fitweight
Ref. [7]	-	-	-	-	-	-	0.3439	0.7441
Proposed method	47	20	100	9.1013/546.078	0.7 [696/10000 =0.6960]	0.03 [2870/94000 =0.0305]	0.0078	0.9923

표 2. GA에 의해 선정된 파라메타들과 강인한 성능 조건식

Table 2. Design Parameters Selected by GA and Conditions for Robust Performance

	gw1	gw2	pw1	pw2	pw3	pw4	pw5	γ	$\prod_{i=1}^N A_{ii}^k (=0)$
Ref. [7]	1.0000	2000.0	6.0000	0.6000	10.0000	50.0000	1000.0	7.8	-
Proposed method	2.9516	651.6129	9.33333	3.1952	11.1905	66.2698	414.2857	7.1937	S(s): -1.0191e5 T(s): -1.0074e5

따라서 제시된 방법과 같이 강인한 성능을 보장하는 해집단내에서 최적화 알고리즘을 사용하여 제어 시스템의 출력을 기준모델의 출력에 추종하도록 가중치 함수의 계인과 동특성, 설계 파라메타 γ 를 동시에 최적화하는 것이 필요하다. 즉 표 2로부터 설계된 AIRC H ∞ 제어 시스템은 식(10)의 강인한 성능을 위한 조건식을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 유전 알고리즘에 의한 최적화시 세대수의 증가에 따른 적합도의 변화추이를 나타낸 것이다. 그림으로부터 세대수 z가 증가함에 따라 적합도 $fit_{weight} (\rightarrow 0.9929)$ 가 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5 ~ 그림 6은 최적화에 따라 선정된 가중치 함수들의 주파수 응답과 설계된 모델추종형 H ∞ 제어기의 주파수 특성을 각각 나타낸 것이다.

그림 7은 설계된 H ∞ 제어 시스템의 감도함수 S(s) 및

상보감도함수 T(s)의 주파수 응답을 각각 나타낸 것이다. 그림으로부터 설계된 AIRC H ∞ 제어 시스템은 II장에서 제시된 설계사양($w_b = 10[\text{rad/sec}]$)을 만족시킴을 알 수 있다.

그림 8 ~ 그림 16은 3장에서 설계된 다변수 AIRC H ∞ 제어 시스템의 3개의 출력(y_1 : 고도[m], y_2 : 속도 [ms^{-1}], y_3 : 피치각[degree])에 대한 스텝응답을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제시된 방법 ($fit_{weight} = 0.9923$)이 참고문헌 [7] ($fit_{weight} = 0.7441$)의 시행착오적인 방법보다 설계사양에 따른 기준모델의 출력에보다 잘 추종하고 따라서 만족스러운 응답특성을 가짐을 알 수 있다.

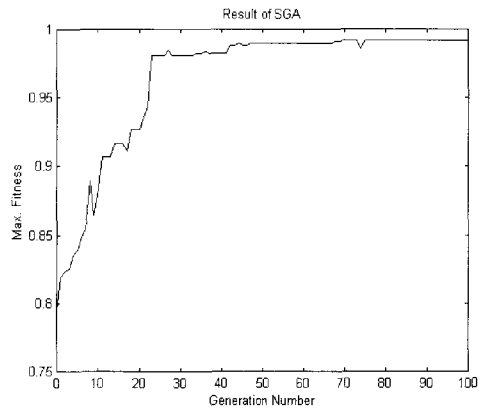


그림 4. 제시된 방법에 따른 최적화시 적합도의 변화
Fig. 4. Variance of Fitness by Proposed Method

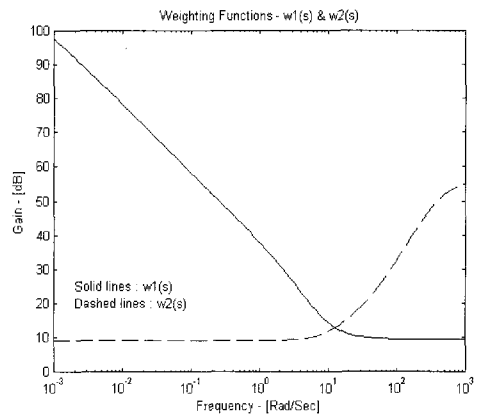


그림 5. 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$
Fig. 5. Weighting Functions $W_1(s)$ and $W_2(s)$

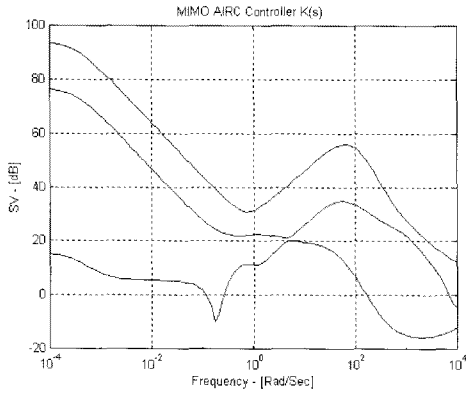


그림 6. 모델추종형 H_∞ 제어기 $K(s)$
Fig. 6. Model-following H_∞ Controller $K(s)$

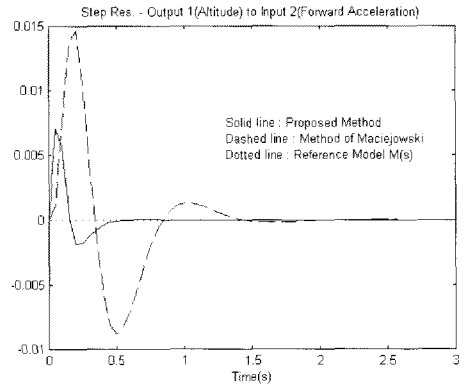


그림 9. 입력 1에 대한 출력 2(속도)의 응답
Fig. 9. Step Res. of Output 2(Speed) to Input 1

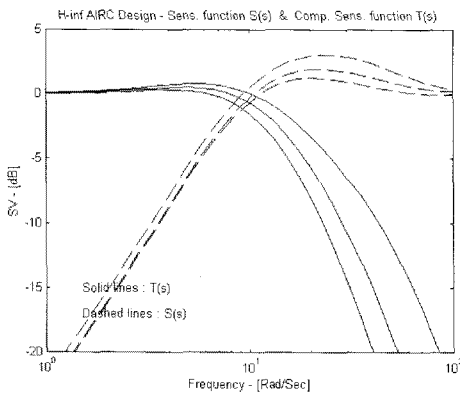


그림 7. 감도 함수 $S(s)$ 와 상보감도 함수 $T(s)$
Fig. 7. Sensitivity Function $S(s)$ and Comp. Sensitivity Function $T(s)$

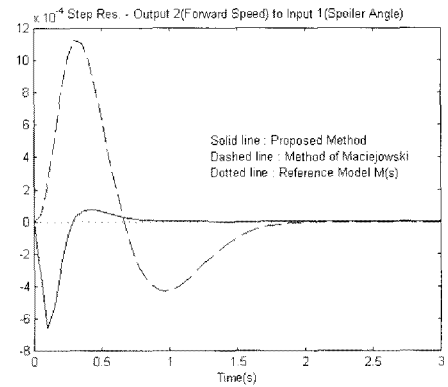


그림 10. 입력 1에 대한 출력 3(피치각)의 응답
Fig. 10. Step Res. of Output 3(Pitch Angle) to Input 1

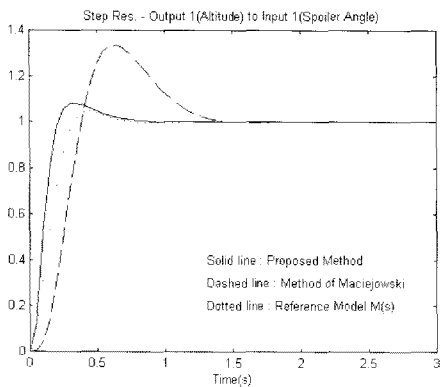


그림 8. 입력 1에 대한 출력 1(고도)의 응답
Fig. 8. Step Res. of Output 1(Altitude) to Input 1

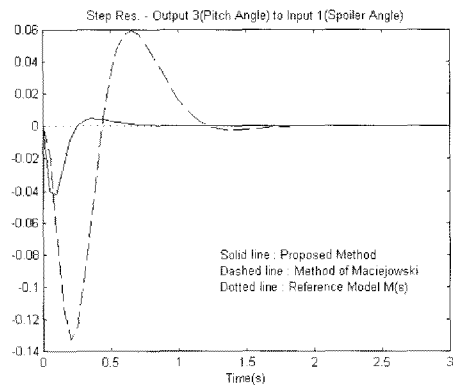


그림 11. 입력 2에 대한 출력 1(고도)의 응답
Fig. 11. Step Res. of Output 1(Altitude) to Input 2

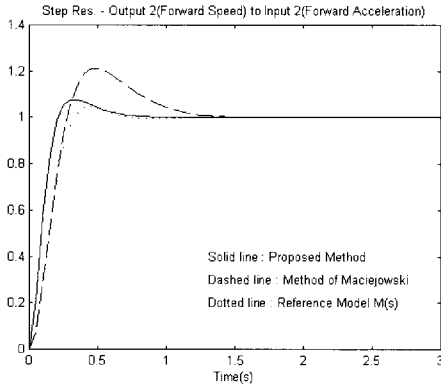


그림 12. 입력 2에 대한 출력 2(속도)의 응답
 Fig. 12. Step Res. of Output 2(Speed) to Input 2

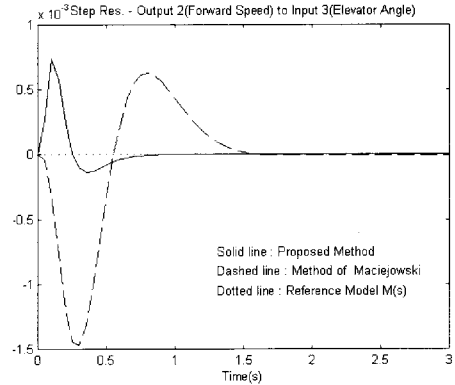


그림 15. 입력 3에 대한 출력 2(속도)의 응답
 Fig. 15. Step Res. of Output 2(Speed) to Input 3

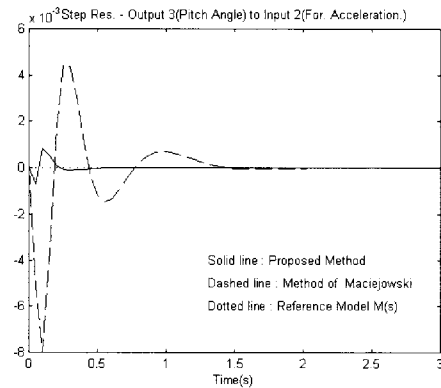


그림 13. 입력 2에 대한 출력 3(피치각)의 응답
 Fig. 13. Step Res. of Output 3(Pitch Angle) to Input 2

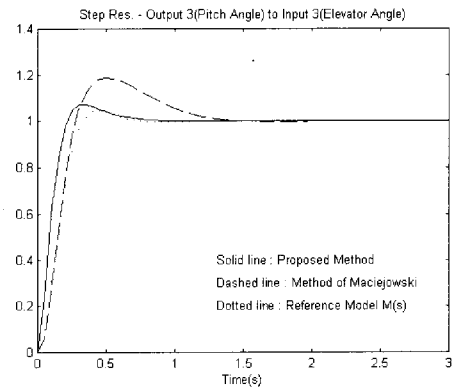


그림 16. 입력 3에 대한 출력 3(피치각)의 응답
 Fig. 16. Step Res. of Output 3(Pitch Angle) to Input 3

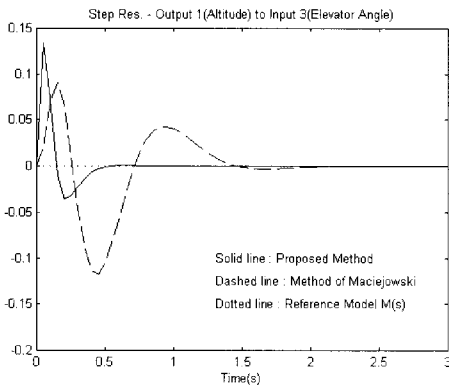


그림 14. 입력 3에 대한 출력 1(고도)의 응답
 Fig. 14. Step Res. of Output 1(Altitude) to Input 3

V. 결 론

본 연구에서는 강인한 성능을 가지는 해집단내에서 기준모델의 출력을 최적으로 추종하도록 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타 γ 를 동시에 최적화함으로써, 강인한 성능에 관한 필요충분조건식을 만족함은 물론 설계사양에 따른 만족스러운 응답 특성을 보이는 강인한 성능을 가지는 모델추종형 H_{∞} 제어기의 설계법을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

설계된 H_{∞} 제어 시스템(적합도 = 0.9923)은 오버슈트 (10% 이내)와 상승시간(대역폭 = 10[rad/sec])이 설계사

양을 만족함은 물론 시행착오적인 방법(적합도 = 0.7441)에 비해 기준모델의 출력을 보다 잘 추종한다. 또한 제시된 설계방법은 μ 합성법에 비해 복잡한 최적화의 과정이 없으므로 비교적 쉽게 실제의 제어 시스템 설계에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] G. Zames, "Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverses", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Vol. 26, No. 2, pp. 301-320, 1981.
- [2] J. C. Doyle, B. A. Francis, A. R. Tannenbaum, "Feedback Control Theory", Dover, 2009.
- [3] D. W. Gu, P. H. Petkov, M. M. Konstantinov, "Robust Control Design with Matlab", Springer, 2005.
- [4] Y. Suozhong, Y. Yidong, "Design of Automatic Carrier Landing System using H_∞ Control", *Intelligent Control and Automation Conference, Proceedings on*, Vol. 5, No. 28, pp. 3449-3451, 2000.
- [5] R. Fales, A. Kelkar, "Robust Control Design for a Wheel Loader using Mixed Sensitivity H_∞ and Feedback linearization Based Methods", *American Control Conference, Proceedings on*, Vol. 6, pp. 4381-4386, 2005.
- [6] M. F. Khelfi, A. Abdessameud, "Robust Hinfinitiy Trajectory Tracking Controller for a 6D.O.F PUMA 560 Robot Manipulator", *Electric Machines & Drives Conference, Proceedings on*, Vol. 1, pp. 88-94, 2007.
- [7] J. M. Maciejowski, "Multivariable Feedback Design", Addison-Wesley, 1989.
- [8] S. N. Sivanandam, "Introduction to Genetic Algorithms", Springer, 2007.
- [9] M. Wang, X. Gao, "The Optimization of Genetic Algorithm Control Parameters", *Intelligent Control and Automation Conference, Proceedings on*, Vol. 3, No. 3, pp. 2504-2507, 2002.
- [10] I. Kitsios, T. Pimenides, "Structured Specified Robust Multivariable Controller Design for Practical Applications using Genetic Algorithms", *Control Theory and Applications Conference, Proceedings on*, Vol. 150, No. 3, pp. 317-323, 2003.
- [11] S. C. Duong, H. Kinjo, E. Uezato, T. Yamamoto, "A Switch Controller Design for the Acrobot using Neural Network and Genetic Algorithm", *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, Proceedings on*, pp. 1540-1544, 2008.
- [12] W. Hansheng, "Adaptive Control Tracking and Model Following of Uncertain Dynamical Systems with Multiple Time Delays", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Vol. 49, No. 4, pp. 611-616, 2004.

저자소개



황현준(Hyun-Joon Hwang)

1992년 부산대학교 전기공학과
졸업(공학사)

1995년 부산대학교 대학원
전기공학과 졸업(공학석사)

1999년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1998년~현재 포항대학 전기소방계열 교수

※ 관심분야: Robust Control, Genetic Algorithm