

강인 반복 제어를 이용한 비선형 유도탄 자동조종장치

A Robust Recursive Control Approach to Nonlinear Missile Autopilot

남 헌 성, 유 준

(Heon Seong Nam and Joon Lyou)

Abstract : In this paper, a robust recursive control approach for nonlinear system, which is based on Lyapunov stability, is proposed. The proposed method can apply to extended systems including cascaded systems and the stability is guaranteed in the sense of Lyapunov. The recursive design procedure so called "robust recursive control approach" is used to find a stabilizing robust controller and simultaneously estimate the uncertainty parameters. First, a nonlinear model with uncertainties whose bounds are unknown is derived. Then, unknown bounds of uncertainties are estimated. By using these estimates, the stabilizing robust controller is updated at each step. This approach is applied to the pitch autopilot design of a nonlinear missile system and simulation results indicate good performance.

Keywords : robust recursive control approach, nonlinear system, unknown uncertainty, stabilizing robust control, pitch autopilot design

I. 서론

비선형 시스템에 대하여 반복적(recursive)으로 제어를 설계하는 방법이 1990년대 초반에 Kokotovic 등에 의하여 제안되었다[1]-[3]. 제안된 제어기 설계방법은 Backstepping 개념을 이용한 제어기 설계방법으로서 시스템의 차수와 상대차수가 같아야 하고, 시스템이 cascaded 형태로 되어 있어야만 설계가 가능하다. 상대차수가 시스템의 차수보다 적고 시스템이 cascaded 형태로 되어 있지 않을 경우 반복적인 제어기 설계방법을 1997년에 Hull과 Qu가 제안하였다[4]. 제안된 제어기 설계방법에 의해 설계된 제어기는 Dynamic 형태의 제어기로서 외란을 고려하지 않은 공칭(nominal) 시스템에서는 제어기 이득을 양수로 선정하면 항상 안정성을 보장한다. Hull과 Qu는 Matching Condition을 만족하지 않는 외란이 존재할 경우에도 반복적으로 외란에 강인한 Dynamic 제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 외란에 강인한 Dynamic 제어기는 Matching Condition을 만족하는 외란 뿐만 아니라 만족하지 않는 외란에도 제어기가 강인하도록 stabilizing robust control을 첨가하였으나, stabilizing robust control을 선정하기 위해서는 외란의 크기를 알아야 하고, 또한 외란을 고려한 Dynamic 제어기의 안정성은 보장하지 못하였다.

본 논문에서는 Lyapunov Stability에 근거하여 반복적으로 Dynamic 제어를 설계하는 방법을 제시하고, 제시된 방법이 Cascaded system을 포함한 보다 확장된 system군에 적용가능할 뿐만 아니라 안정성이 보장됨을 보인다. 제시된 방법에는 모델 불확실성의 크기를 추정하는 추정기가 포함되어 있으며 그 추정치가 제어기에 사용된다.

유도탄의 운동방정식은 속도, 고도, 동압, 마하수, 받음각 등의 비선형함수로서 시간에 따라 변한다. 기존에 널리 이

용되어 온 유도탄 제어기 설계방법은 여러 비행조건에서 유도탄의 운동방정식을 선형화하여, 이 선형모델을 이용하여 각각의 비행조건에서 제어변수를 선정하고, 이 제어변수들을 스케줄링하는 하는 방법을 사용하여 왔다. 이러한 Gain Scheduling 방법은 외란에 대한 강인성을 보장하지 못한다. 특히, 고기동이 요구되는 유도탄은 양각의 영역이 커지고, 이에 따라 공력의 비선형 특성도 커지게 되므로 Gain Scheduling 방법에 의해 제어기를 설계할 경우 성능 및 안정성을 보장하지 못한다. 이러한 유도탄의 성능을 높이기 위해서는 넓은 범위의 비행조건에 대해 안정도 및 강인성이 보장되는 제어기를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 반복적으로 Dynamic 제어를 설계하는 방법을 이용하여 유도탄의 양각 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인한다.

II. 강인 반복 설계기법

반복적으로 불확실성에 강인한 제어기를 설계하기 위하여 [4]의 불확실성을 포함한 2차시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) + \Delta f_1(x_1, x_2) \\ &\quad + [g_1(x_1, x_2) + \Delta g_1(x_1, x_2)]u \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + \Delta f_2(x_1, x_2) \\ &\quad + [g_2(x_1, x_2) + \Delta g_2(x_1, x_2)]u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_1, x_2 는 상태변수이고, u 는 제어입력이고, y 는 출력이다. 위의 시스템의 상대차수는 1이므로 시스템 차수 2보다 작기 때문에 Backstepping을 이용하여 반복적으로 제어를 설계하는 것은 불가능하다. Dynamic 제어를 설계하기 위하여 (1)에서 u 를 상대변수로 취급하고, 외란항들은 [3]의 Triangular Bounds를 만족한다고 가정한다.

Triangular Bounds

$$|\Delta_i| \leq \Psi_i^* \zeta_i(x_1, x_2, u), \quad i=1,2. \quad (2)$$

여기서 $\Delta_i = \Delta f_i(x_1, x_2) + \Delta g_i(x_1, x_2)u$ 이고, $\zeta_i(\cdot)$ 는 양의 smooth 함수이고, Ψ_i^* 는 미지의 양의 상수로서 유일하지는 않으나 (2)의 부등식을 만족하는 최소값으로 정의한다.

출력 y 가 계단입력 x_1^d 를 추종하도록 새로운 상태변수를 z_1 을 정의한다.

$$z_1 = x_1 - x_1^d \tag{3}$$

z_1 은 추종오차에 해당하며, 제어기의 목적은 z_1 을 0으로 보내는 것이다. (3)을 시간에 대해 미분하면 (1)의 \dot{x}_1 과 같다.

$$\dot{z}_1 = f_1(x_1, x_2) + \Delta f_1(x_1, x_2) + [g_1(x_1, x_2) + \Delta g_1(x_1, x_2)]u \tag{4}$$

(4)의 불확실성 항들을 감쇄시키기 위한 robust control, β_1 을 다음과 같이 정한다[3].

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \Psi_1 \omega_1 \\ \omega_1 &= \zeta_1 \tanh \frac{z_1 \zeta_1}{\varepsilon_1} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, ε_1 는 양의 상수로서 설계 변수이고, Ψ_1 은 Ψ_1^* 의 추정치로서 뒤에서 설계되는 추정법칙에 의해서 구해지고, $\tanh(\cdot)$ 은 hyperbolic tangent 함수이다.

(4)의 외란항들을 (5)로 대치한 새로운 상태변수를 z_2 를 정의한다.

$$z_2 = f_1(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)u + k_1 z_1 + \beta_1 \tag{6}$$

이제, Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{z}_1^2 \tag{7}$$

여기서 $x_1 = [\Psi_1 - \Psi_1^M]$, $\Psi_1^M := \max\{\Psi_1^*, \Psi_1^0\}$, $\Psi_1^0 \geq 0$ 인 설계상수이다.

(7)을 시간에 대해 미분하면

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 + \frac{1}{\gamma_1} \dot{z}_1 \dot{\dot{z}}_1 \tag{8}$$

Ψ_1^* 를 추정하기 위한 추정법칙을 다음과 같이 정한다[3].

$$\dot{\Psi}_1 = \gamma_1 [z_1 \omega_1 - \sigma_1 (\Psi_1 - \Psi_1^0)] \tag{9}$$

여기서, $\sigma_1 > 0$, Ψ_1^0 는 σ -modification에 근거한 설계상수이다.

(8)에 (5), (6)과 (9)를 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_1 \Delta_1 \\ &\quad - z_1 \Psi_1^M \omega_1 - \sigma_1 z_1 (\Psi_1 - \Psi_1^0) \end{aligned} \tag{10}$$

[3]의 증명방법을 이용하여 (10)을 정리하면

$$\dot{V}_1 \leq z_1 z_2 - cV + \lambda \tag{11}$$

여기서 $c := \min\{2k_1, \sigma_1 \gamma_1\}$, $\lambda := \frac{1}{2} \varepsilon_1 \Psi_1^M + \frac{1}{2} \sigma_1 (\Psi_1^M - \Psi_1^0)^2$.

z_2 가 0이라고 하면, [3]에 의해 z_1 과 Ψ_1 은 globally uniformly ultimately bound된다.

z_2 가 0이 아니므로, (6)을 시간에 대해 미분하면

$$\begin{aligned} z_2 &= (k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1})(f_1 + g_1 u + \Delta_1) \\ &\quad + (\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial g_1}{\partial x_2} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2})(f_2 + g_2 u + \Delta_2) \\ &\quad + g_1 \dot{u} + \frac{\partial \beta_1}{\partial \Psi_1} \dot{\Psi}_1 \end{aligned} \tag{12}$$

(12)의 불확실성 항들을 감쇄시키기 위한 robust control, β_2 을 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \Psi_2 \omega_2 + \Psi_3 \omega_3 \\ \omega_2 &= (k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}) \zeta_1 \\ &\quad + z_2 (k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}) \zeta_1 \\ &\quad \times \tanh \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \\ \omega_3 &= (\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial g_1}{\partial x_2} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2}) \zeta_2 \\ &\quad + z_2 (\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial g_1}{\partial x_2} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2}) \zeta_2 \\ &\quad \times \tanh \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \end{aligned} \tag{13}$$

여기서, ε_2 와 ε_3 는 양의 상수로서 설계 변수이고, Ψ_2 은 Ψ_2^* 의 추정치이다.

(12)의 외란항들을 (13)으로 대치한 새로운 상태변수를 z_3 로 정의한다.

$$\begin{aligned} z_3 &= (k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1})(f_1 + g_1 u) \\ &\quad + (\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial g_1}{\partial x_2} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2})(f_2 + g_2 u) \\ &\quad + g_1 \dot{u} + \frac{\partial \beta_1}{\partial \Psi_1} \dot{\Psi}_1 + k_2 z_2 + \beta_2 \end{aligned} \tag{14}$$

z_2 를 고려하여 새로운 Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{z}_2^2 \tag{15}$$

여기서 $x_2 = [\Psi_2 - \Psi_2^M]$, $\Psi_2^M := \max\{\Psi_2^*, \Psi_2^0\}$, $\Psi_2^0 \geq 0$ 인 설계상수이다.

새로운 추정법칙을 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_1 &= \gamma_1 [z_1 \omega_1 + z_2 \omega_2 - \sigma_1 (\Psi_1 - \Psi_1^0)] \\ \dot{\Psi}_2 &= \gamma_2 [z_2 \omega_3 - \sigma_2 (\Psi_2 - \Psi_2^0)] \end{aligned} \tag{16}$$

여기서, $\sigma_2 > 0$ 이다.

(15)를 시간에 대해 미분하여 (13), (14)와 (16)을 대입하여 첫 번째 단계에서의 같이 정리하면

$$\dot{V}_2 \leq (z_1 + z_3)z_2 - cV + \lambda \quad (17)$$

여기서,

$$c = \min\{2k_1, 2k_2, \sigma_1\gamma_1, \sigma_2\gamma_2\}$$

$$\lambda = \frac{1}{2}((\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\Psi_1^M + \varepsilon_3\Psi_2^M) + \frac{1}{2}[\sigma_1(\Psi_1^M - \Psi_1^0)^2 + \sigma_2(\Psi_2^M - \Psi_2^0)^2]$$

(17)에서 $z_1 + z_3 = 0$, $\rho = \frac{\lambda}{c} > 0$ 로 정의하면 (17)은 다음을 만족한다.

$$0 \leq V(t) \leq \rho + [V(0) - \rho]e^{-ct} \quad (18)$$

(18)이 성립하면, [3]에 의해 z_1, z_2, Ψ_1 과 Ψ_2 는 globally uniformly ultimately bound된다. (4), (6), (12), (14)와 $z_1 + z_3 = 0$ 를 이용하면 다음과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -1 & -k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_1 - \beta_1 \\ \Delta_2 - \beta_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

외란이 없을 경우에는 (19)의 오른쪽의 두 번째항이 0이므로 k_1 과 k_2 를 양의 상수로 선정하면 항상 stable하다. 외란이 존재할 경우에는 (15), (17)과 (18)에 의해 z_1 과 z_2 가 globally uniformly ultimately bound되므로 (1)의 시스템은 stable하다.

$z_1 + z_3 = 0$ 으로부터 Dynamic 제어가 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\frac{1}{g_1} \left\{ z_1 + \left(k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1} \right) (f_1 + g_1 u) \right. \\ & + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \frac{\partial g_1}{\partial x_2} u + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_2} \right) (f_2 + g_2 u) \\ & \left. + \frac{\partial \beta_1}{\partial \Psi_1} \Psi_1 + k_2 z_2 + \beta_2 \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

III. 유도탄 피치채널 비선형 운동방정식

본 논문에서는 유도탄의 비선형 운동방정식으로 널리 알려진 [4]의 피치채널 운동방정식을 이용한다. [4]의 피치채널 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \left(\frac{fgQS}{mV} \right) \cos(\alpha) [\phi_z(\alpha) + B_z \delta] + q \\ \dot{q} &= \left(\frac{fQSd}{I_{yy}} \right) [\phi_m(\alpha) + B_m \delta] \\ B_z &= -0.034, \quad B_m = -0.206 \\ \phi_z(\alpha) &= 0.000103\alpha^3 - 0.00945\alpha^2 - 0.170\alpha \\ \phi_m(\alpha) &= 0.000215\alpha^3 - 0.0195\alpha^2 + 0.051\alpha \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 α 는 받음각으로서 $\pm 20^\circ$ 범위에서 유효하고, q 는 피치 각속도, δ 는 제어편 변위각으로서 $\pm 50^\circ$ 로 제한되고, g 는 중력가속도, m 는 유도탄 질량, V 는 유도탄 속도, I_{yy} 는 피치 방향의 관성모멘트, Q 는 동압, S 는 기준면적, d 는

기준길이, f 는 radian을 degree로 변환시켜 주는 상수이다.

$x_1 = \alpha, x_2 = q$ 로 놓으면, (21)은

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + x_2 + g_1(x_1) \delta \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1) + g_2 \delta \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f_1(x_1) &= C_1 \cos(x_1) \phi_z(x_1), \\ f_2(x_1) &= C_2 \phi_m(x_1) \\ g_1(x_1) &= C_1 \cos(x_1) B_z, \\ g_2 &= C_2 B_m \\ [C_1 &= \left(\frac{fgQS}{mV} \right), C_2 = \left(\frac{fQSd}{I_{yy}} \right)] \end{aligned} \quad (23)$$

(21)을 유도탄의 공칭 피치채널 운동방정식이라 할 때 공력학적 힘과 모멘트에 대한 불확실성을 고려하여 [4]와 같이 표현하면 불확실성을 포함한 유도탄 피치채널 운동방정식은 다음과 같이 썬여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + x_2 + \Delta f_1(x_1) + [g_1(x_1) + \Delta g_1(x_1)] \delta \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1) + \Delta f_2(x_1) + [g_2 + \Delta g_2] \delta \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_1(x_1) &= \cos(x_1) [c_1 \Delta \phi_z(x_1) + \Delta c_1 \phi_z(x_1) + \Delta c_1 \Delta \phi_z(x_1)] \\ \Delta g_1(x_1) &= \cos(x_1) [c_1 \Delta b_z + \Delta c_1 b_z + \Delta c_1 \Delta b_z] \\ \Delta f_2(x_1) &= [c_2 \Delta \phi_m(x_1) + \Delta c_2 \phi_m(x_1) + \Delta c_2 \Delta \phi_m(x_1)] \\ \Delta g_2 &= [c_2 \Delta b_m + \Delta c_2 b_m + \Delta c_2 \Delta b_m] \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Delta \phi_z &= p_2 \phi_z, \quad \Delta \phi_m = p_3 \phi_m, \quad \Delta b_z = p_4 b_z, \quad \Delta b_m = p_5 b_m \\ \Delta c_1 &= \frac{fg\Delta QS}{WV}, \quad \Delta c_2 = \frac{f\Delta QSd}{I_{yy}} \\ \Delta Q &= p_1 Q, \end{aligned}$$

이고, $p_1 \sim p_5$ 를 불규칙 섭동(random multiplicative perturbation)이라고 가정한다.

(24)의 불확실성의 항들을 정리하면

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \Delta f_1(x_1) + \Delta g_1(x_1) \delta \\ &= (p_2 + p_1 + p_1 p_2) C_1 \cos(x_1) \phi_z(x_1) \\ &\quad + (p_4 + p_1 + p_1 p_4) C_1 \cos(x_1) B_z \delta \\ \Delta_2 &= \Delta f_2(x_1) + \Delta g_2 \delta \\ &= (p_3 + p_1 + p_1 p_3) C_2 \phi_m(x_1) \\ &\quad + (p_5 + p_1 + p_1 p_5) C_2 B_m \delta. \end{aligned} \quad (25)$$

(25)는 다음의 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\leq \max[(p_2 + p_1 + p_1 p_2), (p_4 + p_1 + p_1 p_4)] \\ &\quad \times C_1 \cos(x_1) (|\phi_z(x_1)| + |B_z \delta|) \\ \Delta_2 &\leq \max[(p_3 + p_1 + p_1 p_3), (p_5 + p_1 + p_1 p_5)] \\ &\quad \times C_2 (|\phi_m(x_1)| + |B_m \delta|) \end{aligned} \quad (26)$$

(26)을 이용하여 (2)를 만족하는 $\xi_1(x_1, \delta)$ 를 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} \xi_1 &= C_1 (|\phi_z(x_1)| + |B_z \delta_{\max}|) \\ \xi_2 &= C_2 (|\phi_m(x_1)| + |B_m \delta_{\max}|) \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 $\delta_{\max} = 50^\circ$ 이다.

(3)과 같이 추종오차인 z_1 을 정의하고, 시간에 대해 미분하면,

$$\dot{z}_1 = f_1(x_1) + x_2 + g_1(x_1)\delta + \Delta_1 \quad (28)$$

(28)의 불확실성 항들을 감쇄시키기 위한 β_1 을 (5)와 같이 정하고, (28)의 외란항들을 β_1 으로 대체한 새로운 상태변수 z_2 를 정의한다.

$$z_2 = f_1(x_1) + x_2 + g_1(x_1)\delta + k_1 z_1 + \beta_1 \quad (29)$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2\gamma_1} x_1^2 \quad (30)$$

(30)을 시간에 대해 미분하고, 추정법칙을 (9)와 같이 정하여 정리하면,

$$\dot{V}_1 \leq z_1 z_2 - cV + \lambda \quad (31)$$

z_2 가 0이 아니므로, (29)를 시간에 대해 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = & \left(k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}\right)(f_1 + x_2 + g_1 \delta + \Delta_1) \\ & + f_2 + g_2 \delta + \Delta_2 + g_1 \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial \psi_1} \dot{\psi}_1 \end{aligned} \quad (32)$$

(32)의 불확실성 항들을 감쇄시키기 위한 β_2 을 (13)과 같이 정하고, (32)의 외란항들을 β_2 로 대체한 새로운 상태변수 z_3 를 정의한다.

$$\begin{aligned} z_3 = & \left(k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}\right)(f_1 + x_2 + g_1 \delta) \\ & + f_2 + g_2 \delta + g_1 \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial \psi_1} \dot{\psi}_1 + k_2 z_2 + \beta_2 \end{aligned} \quad (33)$$

z_2 를 고려하여 새로운 Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\gamma_2} z_2^2 \quad (34)$$

(16)과 같이 추정법칙을 정하고, (34)를 시간에 대해 미분하여 정리하면

$$\dot{V}_2 \leq (z_1 + z_3)z_2 - cV + \lambda \quad (35)$$

(35)에서 $z_1 + z_3 = 0$, $\rho = \frac{\lambda}{c} > 0$ 로 정의하면 (35)는 다음을 만족한다.

$$0 \leq V(t) \leq \rho + [V(0) - \rho]e^{-ct} \quad (36)$$

$z_1 + z_3 = 0$ 으로부터 Dynamic 제어가 다음과 같이 설계된다.

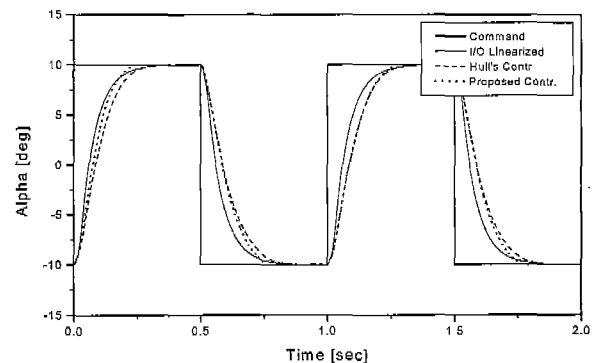
$$\begin{aligned} \delta = & -\frac{1}{g_1} \left\{ z_1 + \left(k_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial x_1}\right)(f_1 + x_2 + g_1 \delta) \right. \\ & \left. + f_2 + g_2 \delta + \frac{\partial \beta_1}{\partial \psi_1} \dot{\psi}_1 + k_2 z_2 + \beta_2 \right\} \end{aligned} \quad (37)$$

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

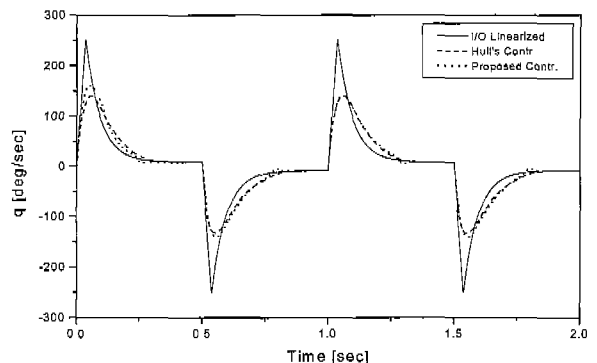
시뮬레이션에 사용된 유도탄 모델의 파라미터 값들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} m &= 450 \text{ lbs}, & V &= 3109.3 \text{ ft/sec} \\ I_{yy} &= 182.5 \text{ slug ft}^2, & Q &= 6132.8 \text{ lb/ft}^2 \\ S &= 0.44 \text{ ft}^2, & d &= 0.75 \text{ ft} \end{aligned}$$

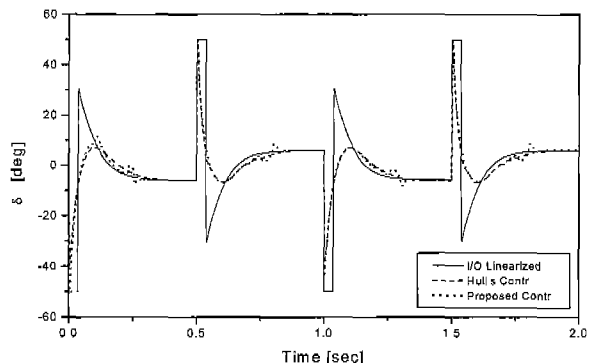
시뮬레이션은 다음과 같은 경우에 대하여 수행하였다.



(a) 받음각 응답

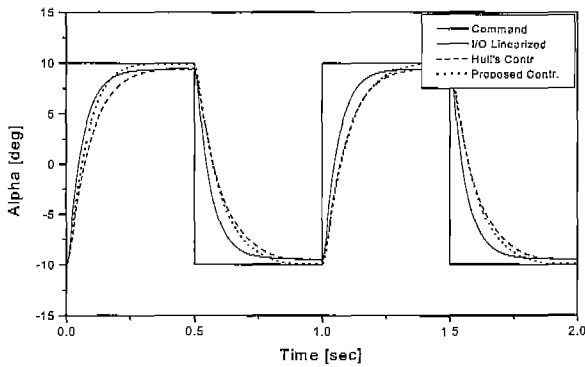


(b) 피치 각속도 응답

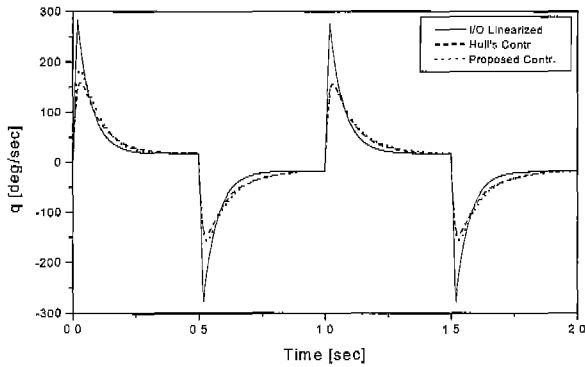


(c) 제어입력

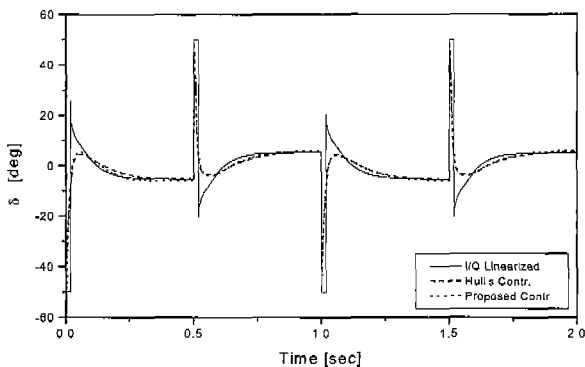
그림 1. 외란이 존재하지 않는 경우.
Fig. 1. No uncertainty case.



(a) 받음각 응답



(b) 피치 각속도 응답



(c) 제어입력

그림 2. 50% 외란이 존재하는 경우.

Fig. 2. 50% uncertainty case.

- 외란이 존재하지 않는 경우 (불규칙 섭동 $p_1 \sim p_5 : 0.0$)
- 50% 외란이 존재하는 경우 (불규칙 섭동 $p_1 \sim p_5 : 0.5$)

설계된 제어기와 성능비교를 위하여 공칭시스템에 대하여 설계된 (38)의 Input/Output Linearized Controller와 Hull의 Dynamic 제어기[4]에 대해서 위의 두가지 경우에 대하여 시

뮬레이션을 수행하였다.

$$\delta = -\frac{1}{g_1(x_1)} (f_1(x_1) + x_2 + k_1 z_1) \quad (38)$$

시뮬레이션 결과는 그림 1~그림 2와 같다. 그림 1은 불확실성이 존재하지 않는 공칭 플랜트에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이고, 그림 2는 50% 외란이 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 결과를 보면, Input/Output Linearized Controller는 공칭시스템에 대하여 제어기를 설계하였으므로 응답특성은 빠르나 외란이 존재할 경우 외란의 크기에 따라 정상상태오차가 커짐을 알 수 있고, [4]의 Dynamic 제어기는 외란의 크기를 임의로 가정하여 이를 Dynamic 제어기에 반영하므로 응답특성이 Input/Output Linearized Controller보다는 느리나 정상상태오차가 약간 개선됨을 알 수 있다. 설계된 제어기는 추정법칙에 의하여 외란의 크기를 추정하여 이를 제어기에 반영하므로 응답특성은 [4]의 Dynamic 제어기와 유사하나 정상상태 오차가 거의 없음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 Lyapunov Stability에 근거하여 반복적으로 Dynamic 제어기를 설계하는 방법을 제시하였고, 제시된 방법이 Cascaded system을 포함한 보다 확장된 system군에 적용가능할 뿐만 아니라 안정성이 보장됨을 보였다. 제시된 방법에는 모델 불확실성의 크기를 추정하는 추정기가 포함되어 있으며 그 추정치가 제어기에 사용된다. 본 논문에서는 반복적으로 Dynamic 제어기를 설계하는 방법을 이용하여 유도탄의 양각제어기를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, and A. S. Morse, "Systematic design of adaptive controllers for feedback Linearizable system," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 36, pp. 1241-1253, 1991.
- [2] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. V. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] M. M. Polycarpou and P. A. Ioannou, "A robust adaptive nonlinear control design," *Automatica*, vol. 32, no. 3, pp. 423-427, 1996.
- [4] R. A. Hull and Z. Qu, "Dynamic robust recursive control design and its application to a nonlinear missile autopilot," *Proc. of American Control Conference*, pp. 833-837, 1997.



남 현 성

1968년 9월 17일생. 1991년 충남대 전 자공학과 졸업. 동대학원 석사(1993). 동대학원 박사과정. 1996~현재 국방과학연구소 선임 연구원, 관심분야는 미션형제어, 적응제어, 자동조종장치.

유 준

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제7권, 제4호, 참조.