

미지입력을 포함한 시스템의 관측기 기반 견실고장진단 및 재구성 적응제어

Observer-Based Robust Fault Diagnosis and Reconfigurable Adaptive Control for Systems with Unknown Inputs

최재원, 이승우, 서영수

(Jae Weon Choi, Seung Woo Lee and Young Soo Suh)

Abstract : A natural way to cope with fault tolerant control (FTC) problems is to modify the control parameters according to an online identification of the system parameters when a fault occurs. However, due to not only difficulties inherent to the online multivariable identification in closed-loop systems, such as modeling errors, noise or the lack of excitation signals, but also long time requirement to identify the post-fault system and implementation of control problems during the identification process, we propose an alternative approach based on the observer-based fault detection and isolation (FDI) and model reference adaptive control (MRAC). The proposed robust fault diagnosis method is based on a bank of observers. We also propose a model reference adaptive control with changeable reference models according to the occurred faults. Simulation results of a flight control example show the validity and applicability of the proposed algorithms.

Keywords : observer-based robust fault detection and isolation, model reference adaptive control, unknown inputs, modeling errors

I. 서론

최근에 항공기, 핵발전소, 자동차 등의 분야가 급속히 발전하고, 또한 여러 시스템이 서로 통합되면서 시스템이 복잡, 대형화되고 자동화가 빠르게 이루어지고 있다. 이러한 시스템들에 있어서 발생하는 고장은 막대한 경제적 피해와 치명적인 인명피해를 발생시킬 수 있기 때문에 고장을 방지하는 것은 더욱 중요해지고 있다[1][2]. 따라서, 이러한 고장에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 고장 검출 및 분리에 관한 관심이 증대되고 있다. 아울러, 최근에는 고장을 극복하고 시스템의 성능을 가능한 원상태에 가깝게 회복하기 위하여 고장허용제어시스템에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

고장허용제어시스템(fault tolerant control systems)이란 견실하거나 재형상이 가능한(reconfigurable) 제어시스템이라고 정의될 수 있다[3]. 대개의 고장허용제어시스템은 매개변수 변화에 대해 어느 정도의 견실성(robustness)을 확보하도록 설계되지만 만약 심각한 고장이 발생하는 경우에는 제어기를 재구성하여 견실성을 가지면서 동시에 재구성 가능한 형태로 설계된다면 심각한 고장에도 대처가 가능할 것이다.

고장시스템에 대하여 제어기를 재구성하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 하나는 시스템을 식별(identification)하고 시스템 및 입력력 파라미터를 추정하므로써 실시간으로 상황에 적합한 제어기를 재구성하는 방법이고, 다른 하나는 충분한 고장상태를 고려하여 제어기 뱅크를 구성해 두고 고장진단을 통하여 적절한 제어기로 스위칭하는 방법이다. 첫 번째 방법은 고장이 발생한 시스템이 제어가능하고 관측가능하다면 모든 고장상태에 대하여 적용될 수 있다는 장점이 있지만 갑작스럽게 발

생한 고장시스템을 식별하는 과정에서 소요되는 시간이 길어질 수 있고 식별과정의 파라미터 추정치는 실제 파라미터 값과 크게 달라질 수 있어서 시스템의 안정성을 보장할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 반면, 두 번째 방법은 정확한 고장진단을 가정하면 완벽한 고장허용제어시스템이 될 수 있지만 모든 고장상태를 고려한 제어기 뱅크를 구성하는 것은 실제로 불가능하며 시스템 모델의 불확실성과 외란 및 잡음은 정확한 고장진단 및 제어를 어렵게 만든다.

Jiang과 Zhao[4]는 고장진단과 재구성 제어를 동시에 사용하는 방법을 제안하였다. 고장이 검출되면 파라미터 추정방식을 이용하여 고장 후의 시스템을 식별하는데, 이 때 식별된 정보를 이용하여 제어기를 재구성하고 실시간으로 갱신하므로써 시스템의 안정성을 유지하면서 성능을 서서히 보상하는 방법이다. 그러나 이 방법은 고장을 식별하는 과정에 많은 제한이 있고 파라미터를 추정하는데 긴 시간이 걸릴 수 있어서 시스템 동역학이 빨리 변화하는 항공기와 같은 시스템에는 적용하기 어렵다.

그림1에는 본 논문에서 제안하는 제어방법론이 도시되어 있다. 먼저, II장에서 제시하는 견실고장진단방법[5][6]을 기반으로 고장모델군을 이용한 가장 근사적인 고장모델을 찾으므로써 고장을 진단한다. 진단된 고장정보 (A, B) 는 오차를 가지고 있으므로 성능저하를 가져오는데 3.1절에서 소개하는 식별과정을 통하여 추정된 고장정보 (\hat{A}, \hat{B}) 를 얻게 된다. 이 정보는 실제값에 더욱 근접하게 되고 이를 바탕으로 3.2절의 적응제어과정을 수행하고, III장에서 가정된 상황을 고려하여 기준모델을 재구성하게 되면 모델기준형 적응제어기법(model reference adaptive-control method)을 수행하게 된다. 또한, IV장에서 제안된 적응이득은 적응제어 알고리즘의 작동을 조절하는 역할을 한다. 즉, 고장이 발생하면 적응알고리즘이 작동을 하고 식별과정에서 파라미터 추정오차가 영에 수렴하게 되면 제어기의 적응과정을

논문접수 : 2002. 2. 15., 채택확정 : 2002. 8. 19.

최재원 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소
(choijw@pusan.ac.kr)

이승우 : 부산대학교 기계공학부 대학원(acrosam@pusan.ac.kr)

서영수 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(suh@iceec.org)

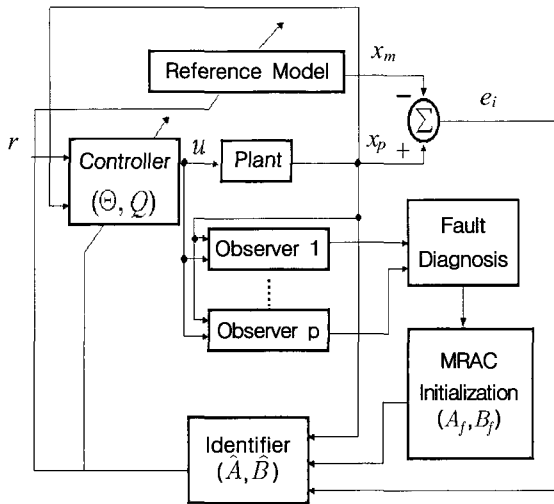


그림 1. 고장진단 및 재구성 적응제어기법.
Fig. 1. Fault diagnosis and reconfigurable adaptive control algorithm.

멈추게 된다.본 논문에서는 고장을 극복하는데 걸리는 시간을 최소화하고 미지입력을 포함한 시스템에 발생할 수 있는 시스템 및 구동기의 고장에 대하여 광범위하게 대처할 수 있는 제어기법을 제안하고자 한다.

II. 고장 검출 및 분리

고장 검출이란 고장의 발생유무와 발생시간을 알아내는 과정을 말하고, 고장 분리란 고장의 종류를 파악하는 과정을 일컫는다. 고장 검출 및 분리 과정은 잔차(residual)생성과 고장 여부에 대한 판단 단계로 구분된다. 잔차를 생성하는 방법은 크게 패리티 공간 방법(parity space method)[7], 관측기 방법(observer method)[8-11]과 파라미터 식별 방법(parameter identification method)[12]으로 나눌 수 있다. 최근에 단지 고장의 검출만이 아닌 다중 고장의 분리를 목적으로 하는 여러 연구에서 관측기 방법이 많이 사용되고 있으며 본 논문에서 제시하는 고장 분리 방법은 다중 관측기를 이용한 방법에 기반을 둔다.

1. 고장의 표현

본 논문에서는 시스템 고장 및 구동기 고장만을 고려하였다. 그리고 구동기의 고장은 그 구동기의 성능 저하를 의미하며 구동기가 파손되어 더 이상 제어불가능한 상태는 고려하지 않는다. 시스템 고장의 전통적인 표현 방식은 파라미터의 변화를 고장으로 나타내는 것이다. 그러므로 일반적인 선형시스템에 대한 모델식과 고장시스템에 대한 모델식은 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= A_p x_p(t) + B_p u(t), & x_p(t_0) &= x_{p0} \\ y_p(t) &= C_p x_p(t) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_f(t) &= A_f x_f(t) + B_f u(t), & x_f(t_0) &= x_{f0} \\ y_f(t) &= C_f x_f(t) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $x \in R^n, u \in R^q, y \in R^r$ 들은 각각 상태, 제어 입력, 그리고 센서 출력 벡터를 의미한다. A, B, C 는 적절한 차원의 상수 행렬들이고 아래첨자 p 와 f 는 각각 플랜트와 고장에 대한 표현이다. 시스템 고장과 구동기 고장을 고려할 때, 고장이 발생한 후의 시스템 행렬과 입력 행렬은 각각 다음과 같이 수정된다.

$$A_f = A + \Delta A, \quad B_f = B + \Delta B \tag{3}$$

여기서, A_f 와 B_f 는 고장이 발생한 후, 변화된 파라미터를 의미한다. 시스템 고장의 경우는 시스템에 따라서 그 형태가 매우 다양하다. 그러므로 본 논문에서는 시스템의 특성에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 파라미터를 선정하고 그 파라미터의 변화로 인한 고장으로 가정한다. 그리고 구동기의 고장은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$B_f = B(I + \text{diag}(\alpha(t))) \tag{4}$$

여기서, $\alpha(t) = [\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_m]$ 이고, i 번째 구동기가 완전히 그 기능을 상실하는 경우는 $\alpha_i = -1$ 이 된다.

2. 잔차의 생성

고장진단에 필요한 잔차를 생성하기 위하여 다음의 Luenberger 관측기를 도입한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_o(t) &= A_o \hat{x}_o(t) + B_o u(t) + K(y_p(t) - \hat{y}_o(t)), \\ \hat{y}_o(t) &= C_o \hat{x}_o(t), \quad \hat{x}_o(0) = \hat{x}_{o0}, \\ r(t) &= W e_y(t) = W(y_p(t) - \hat{y}_o(t)), \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, K 는 관측기 이득행렬이고 아래첨자 o 는 관측기에 대한 표현이다. 견실한 고장 진단의 관점에서 고장분리를 고려할 때 이상적인 방법은 검출 관측기군을 구성하는 것이다. 각각의 관측기는 모든 고장을 검출할 수 있어야 하고 또한 각 고장에 대하여 분리될 수 있도록 견실하게 설계되어야 한다.

3. 고장의 판단

고장 분리 논리는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$f_i = \begin{cases} 1, & |r_i| \geq \epsilon_i \\ 0, & |r_i| < \epsilon_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, p \tag{6}$$

여기서, ϵ_i 는 모델링되지 않은 동역학, 시스템의 비선형성이나 잡음과 같은 미지입력을 고려한 문턱값(threshold)이다. 고장 진단을 위한 판단 논리는 표 1에 나타나 있다. 이 표에서 고장은 고장 m_1 에서 고장 m_p 로 분류하고 p 개의 발생가능한 시스템 고장 및 구동기 고장을 모델링한다. 그리고 "1"은 특정 고장에 대응하는 관측기의 잔차 r_i 가 그 문턱값을 초과하였다는 것을 의미하고 "0"은 그 문턱값 아래에 머물러 있다는 것을 의미한다. 이 표를 바탕으로 p 번째까지 고장 신호는 (7)과 같이 정의될 수 있다.

표 1. 고장 판단 논리.
Table 1. Fault decision logic.

고장의 분류	관측기 1	...	관측기 i	...	관측기 p
고장 m_1	0		1		1
\vdots	1	\vdots	1	\vdots	1
고장 m_i	1		0		1
\vdots	1	\vdots	1	\vdots	1
고장 m_p	1		1		0

$$\begin{aligned}
 a_1 &= f_2 f_3 \cdots f_p, \\
 &\vdots \\
 a_i &= f_1 \cdots f_{i-1} f_{i+1} \cdots f_p, \\
 &\vdots \\
 a_p &= f_1 f_2 \cdots f_{p-1},
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, $a_i = 1$ 이면 i 번째 고장이 발생하였다고 판단한다.

III. 모델기준형 적응제어기법

시스템에 대한 적응제어기법은 플랜트를 알 수 없거나 파라미터들이 시간에 따라 변할 때 효과적인 제어방법 중의 하나이다. 모델기준형 적응제어(Model Reference Adaptive Control, MRAC)는 적응제어의 주요 접근방법 중의 하나이다. 기준모델은 바람직한 궤적을 생성하도록 설계자에 의해서 선택된다. 이 방법은 플랜트의 파라미터를 정확히 알 수 없는 상황에서 입출력 데이터를 이용하여 플랜트의 파라미터를 추정해 내는 식별기(identifiers)와 플랜트의 출력과 기준모델의 출력사이의 오차를 영(zero)으로 만들어 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 따라가게 하기 위하여 제어기 파라미터의 적응법칙(adaptive law)이 필요하다.

Lyapunov 방법은 안전한 적응법칙을 유도하기 위한 주요한 도구 중의 하나인데 전체시스템에 대한 안정성은 Lyapunov 함수의 존재를 보여줌으로써 보장받을 수 있기 때문에 그런 함수를 선택하는 것은 적당한 적응법칙을 찾는 데 있어서 중요하다 [13]. 하지만 이렇게 선택된 적응법칙도 초기조건과 입력조건 등에 따라서 전체시스템의 안정성을 보장하지 못할 수도 있다.

1. 식별기 설계

플랜트의 파라미터를 알 수 없는 다입력 다출력(MIMO) 선형 시불변 시스템을 아래와 같이 가정한다.

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) \tag{8}$$

여기서, $A_p \in R^{n \times n}$ 와 $B_p \in R^{n \times q}$ 는 각각 알려져 있지 않은 시스템과 입력행렬이며, 입력은 한정(bounded)되어 있다. 상태추정기는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = A_m \hat{x}_i(t) + [\hat{A}_i(t) - A_m] x_p(t) + \hat{B}_i(t) u(t) \tag{9}$$

여기서, A_m 은 점근적으로 안정한 $n \times n$ 행렬이고, 아래첨자 i

는 식별기에 대한 표현이다. 또한 $\hat{A}_i \in R^{n \times n}$ 과 $\hat{B}_i \in R^{n \times q}$ 는 식별기에 의해서 추정된다. 상태오차와 파라미터 오차는 다음과 같이 정의하고,

$$\begin{aligned}
 e_i(t) &\equiv \hat{x}_i(t) - x_p(t), \\
 \Phi_i(t) &\equiv \hat{A}_i(t) - A_p, \\
 \Psi_i(t) &\equiv \hat{B}_i(t) - B_p,
 \end{aligned}$$

그 오차방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{e}_i(t) = A_m e_i(t) + \Phi_i(t) x_p(t) + \Psi_i(t) u(t) \tag{10}$$

$e_i(t)$, $\Phi_i(t)$, $\Psi_i(t)$ 가 시간이 갈수록 영에 가까워지도록 $\hat{A}_i(t)$ 와 $\hat{B}_i(t)$ 를 갱신하고 그 적응법칙은 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{A}}_i(t) &= \dot{\Phi}_i(t) = -P e_i(t) x_p^T(t) \\
 \dot{\hat{B}}_i(t) &= \dot{\Psi}_i(t) = -P e_i(t) u^T(t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서, P 는 $n \times n$ 의 양의 대칭한정행렬로서 $A_m^T P + P A_m < 0$ 조건을 만족하는 설계파라미터 행렬이다. 식별기와 제어기의 안정성 해석에 관해서는 참고문헌 [13]을 참고하기 바란다.

2. 제어기 설계

제어의 대상이 되는 플랜트는 (1)에 나타나 있고 추종대상이 되는 기준모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \tag{12}$$

여기서, A_m 는 $n \times n$ 행렬이고, B_m 는 $n \times q$ 행렬이다. 또한 아래첨자 m 은 기준모델에 대한 표현이고 $r(t)$ 는 기준입력을 나타낸다. (1)의 선형시불변시스템이 제어가능하고 상태벡터 x_p 가 관측가능하면 이 플랜트의 출력값은 위에 표현된 기준모델의 출력값(궤적)을 추종할 수 있다. 그 결과 기준모델과 플랜트의 상태오차는 다음과 같이 점근적으로 영에 수렴한다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \tag{13}$$

제어입력 u 는 적응법칙에 의해 계속적으로 변하는 이득값 $\Theta(t)$ 와 $Q(t)$ 로 다음과 같이 구성한다.

$$u(t) = \Theta(t) x_p(t) + Q(t) r(t) \tag{14}$$

기준모델과 플랜트의 상태오차방정식과 오차방정식의 미분값을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e(t) &= x_p(t) - x_m(t) \\
 &= A_m (x_p(t) - x_m(t)) + (A_p + B_p \Theta(t) - A_m) \\
 &\quad \times x_p(t) + (B_p Q(t) - B_m) r(t) \\
 \dot{e}(t) &= A_m e(t) + B_p \Phi(t) x_p(t) + B_p \Psi(t) u(t)
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서, $\Phi(t) \equiv \Theta(t) - \Theta^*$ 이고, $\Psi(t) \equiv Q(t) - Q^*$ 라고 정의할 때 다음과 같은 매칭조건(matching conditions)이 성립한다.

$$\begin{aligned} \hat{B}_i \Theta^* &= A_m - \hat{A}_i \\ \hat{B}_i Q^* &= B_m \end{aligned} \quad (16)$$

$e(t), \Phi(t), \Psi(t)$ 가 점근적으로 영에 수렴하도록 $\Theta(t)$ 와 $Q(t)$ 를 갱신하는 적응법칙은 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}(t) = \dot{\Phi}(t) &= -\hat{B}_i^T P e(t) x_p^T(t) \\ \dot{Q}(t) = \dot{\Psi}(t) &= -\hat{B}_i^T P e(t) r^T(t) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, P 는 $n \times n$ 의 양의 대칭행렬로서 $A_m^T P + P A_m < 0$ 조건을 만족하는 설계파라미터 행렬이다.

IV. 고장진단 및 재구성 적응제어

본 장에서는 고장이 발생하였을 경우 III장에 기술된 모델기 준형 적응제어기법의 문제점을 지적하고 가변기준모델을 이용한 적응제어기법을 제안한다. 또한, 파라미터 추정오차의 norm값을 적응상수로 도입하고 그 효과를 검증한다.

고장이 발생하여 시스템 행렬이 변하였을 경우, 미리 설계된 기준모델을 사용하면 아래의 (18)과 같이 매칭조건을 만족하는 되먹임 이득을 구할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 즉, (16)의 매칭조건에서 다음과 같은 경우를 생각해 보자. \hat{B}_i 행렬의 첫 번째 열이 모두 영인 경우에 고장이 발생하기 전의 매칭조건은 다음의 식을 만족할 것이다.

$$\begin{aligned} \hat{B}_i \Theta^* &= A_m - \hat{A}_i \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \times & \times \\ \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그런데 \hat{A}_i 행렬의 첫 번째 열에 고장이 발생하면 다음의 (18)과 같이 되먹임 이득을 구할 수 없는 경우가 발생할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \times & \times \\ \times & \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \end{bmatrix} \quad (18)$$

이것은 고장이 발생하기 전의 시스템 행렬을 이용하여 기준 모델을 구성하였기 때문에 발생한 것이다. 따라서 고장 진단 후에 기준모델을 적절하게 바꾸어주므로써 기존의 성능을 회복할 수 있다. 그리고, 아래의 (19)에서 일반적으로 적응이득(γ)은 적응속도에 영향을 주는데, 상태추정오차가 시스템의 변화속도에 따라서 점근적으로 수렴한다는 사실을 이용하여 상태추정오차 값의 norm을 적응이득으로 사용하면 적응제어기의 작동을 조절할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}(t) = \dot{\Phi}(t) &= -\gamma(t) \hat{B}_i^T P e(t) x_p^T(t) \\ \dot{Q}(t) = \dot{\Psi}(t) &= -\gamma(t) \hat{B}_i^T P e(t) r^T(t) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, $\gamma(t) = \|e_i(t)\|_2$ 는 식별기의 상태추정오차의 norm값이다.

V. 시뮬레이션 결과 및 고찰

예제로 사용된 모델은 비행체의 단주기 근사화(short-period approximation) 모델이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -1.10188 & 0.90528 & -0.00212 \\ 4.0639 & -0.77013 & -0.16919 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 10 & 0 \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (20)$$

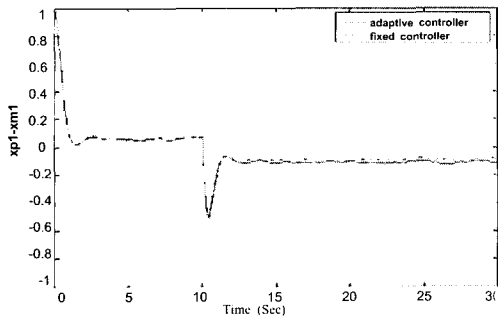
여기서, 상태변수는 $x = [\alpha \quad q \quad \delta_e]^T$ 로 설정하였으며 각각 받음각(angle of attack), 상승률(pitch rate), 승강타 굽힘각(elevator deflection)을 나타내고, 입력변수는 $u = [\delta_e \quad \delta_f]^T$ 로 각각 승강타 굽힘각, 플랩프론 굽힘각(flaperon deflection)을 나타낸다. (20)에는 승강타 구동기의 동역학 $10/(s+10)$ 이 포함되어 있다. 이 시스템의 고유치 $\lambda = [-2.8612, 0.9892, -10]$ 는 이고 비행조건을 만족하기 위한 원하는 고유치는 $\lambda^d = [-2+j2, -2-j2, -15]$ 로 선정하였다. 원하는 고유치를 만족시키는 기준모델은 다음과 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} A_m &= \begin{bmatrix} -1.1019 & 0.9053 & -0.0021 \\ 3.0435 & -5.0878 & 5.1389 \\ -21.3287 & 2.7433 & -12.8103 \end{bmatrix}, \\ B_m &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 10 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

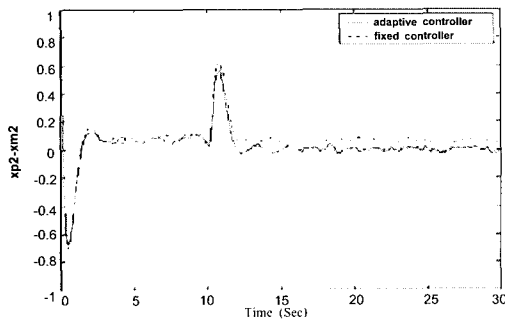
고장모델은 $dA_{\beta}, dA_{\rho}, dB_{\beta}, dB_{\rho}$ 와 같이 미리 구성되어 있고, 모델링 오차와 고장은 시스템 고장의 경우에는 dA_1, dA_{β} 이고 구동기 고장의 경우에는 dA_2, dB_{β} 로 가정하여 아래와 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} dA &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & -0.2 \\ 0 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix}, dA_2 = \begin{bmatrix} 0 & -0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.02 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ dA_{\beta} &= \begin{bmatrix} -1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, dA_{\rho} = \begin{bmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ dA_{\rho} &= \begin{bmatrix} -3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, dB_{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 8 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

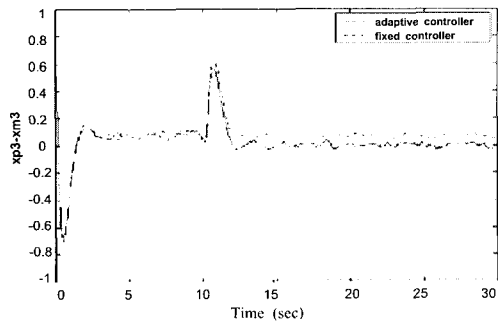
$$dB_{f_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad dB_{f_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 3 & 0 \end{bmatrix}$$



(a) 상태추정오차(받음각)의 비교



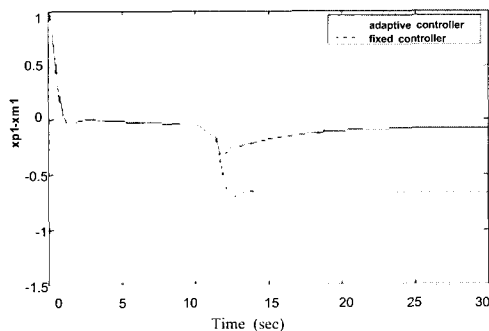
(b) 상태추정오차(상승률)의 비교



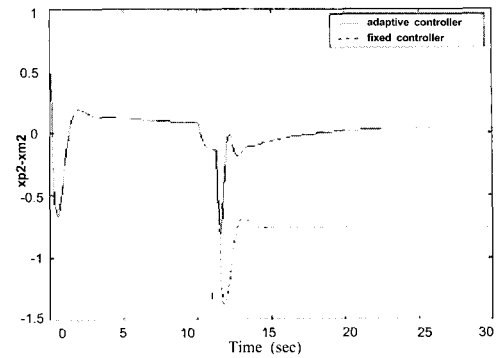
(c) 상태추정오차(승강타 급힘각)의 비교

그림 2. 시스템 고장에 대한 상태추정오차.

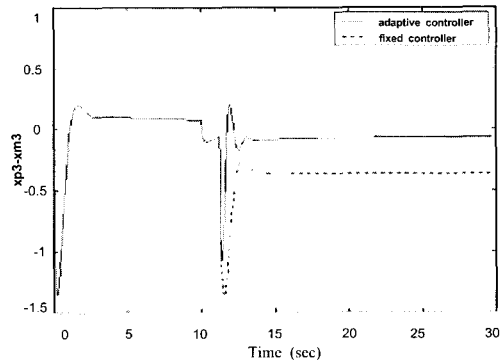
Fig. 2. State estimation errors due to the system failure.



(a) 상태추정오차(받음각)의 비교



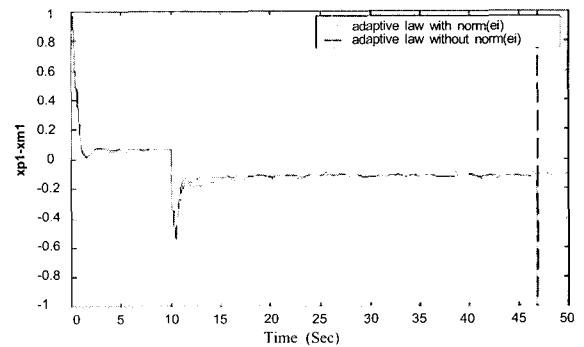
(b) 상태추정오차(상승률)의 비교



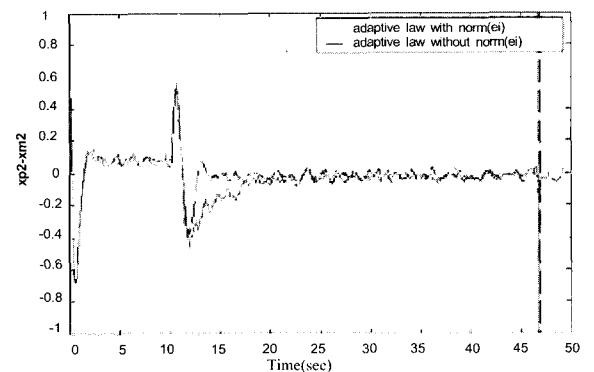
(c) 상태추정오차(승강타 급힘각)의 비교

그림 3. 구동기 고장에 대한 상태추정오차.

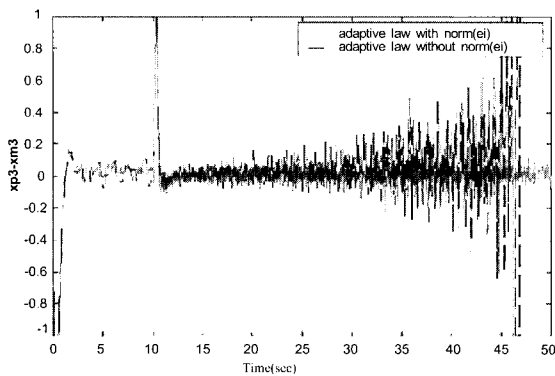
Fig. 3. State estimation errors due to the actuator failure.



(a) 상태추정오차(받음각)의 비교



(b) 상태추정오차(상승률)의 비교



(c) 상태추정오차(승강타 굽힘각)의 비교

그림 4. 제안된 적응이득에 대한 상태추정오차.

Fig. 4. State estimation errors in case of using the proposed adaptive gain.

고장은 10초 경과후 발생한다고 가정하였다. 시스템에 고장이 발생하였다고 가정하였을 경우 10.16초에 고장이 검출되었으며, 10.46초에 분리되었다. 이 때 고장모델 dA_1 의 잔차신호의 평균값(mean)은 -0.0165였고 dA_2 의 잔차신호의 평균값은 0.2979였다. 그리고 구동기에 고장이 발생하였다고 가정하였을 경우 10.45초에 고장이 검출되었으며, 11.05초에 분리되었다. 이 때 고장모델 dB_1 의 잔차신호의 평균값은 -0.0765였고 dB_2 의 잔차신호의 평균값은 0.0352였다. 고장진단 결과를 볼 때 각각 고장모델 dA_1, dB_2 이 실제로 발생한 고장과 가장 가까워 고장 모델로 선택되었다.

그림 2와 그림 3은 시스템 고장과 구동기 고장의 경우를 시뮬레이션한 결과이다. 실선은 고장이 발생하고 난 후 고장진단을 거쳐 적응제어기가 사용되었고 점선은 고장진단에 의해 선정된 고장모델을 가지고 직접 제어기를 재구성한 경우를 도시한 것으로 적응제어기를 이용한 경우에서 향상된 추종성능을 보여주고 있다.

그림 4는 임의의 고장상황에 적합한 γ 를 미리 지정한다는 것은 쉬운 일이 아니며, 경험적으로 선택되어야 하는데 적절하지 못한 γ 값에 의하여 시스템이 발산할 수도 있다는 것을 보여주고 있다 즉, 상태추정오차의 놈값을 적응이득으로 사용하면 시간이 경과함에 따라 제어이득이 고정된 제어기로 바뀐다는 것을 의미하며, 잡음과 외란이 존재하는 시스템에서 상태신호의 이상적인 증폭을 막고 안정성을 유지할 수 있도록하는 효과가 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 미지입력이 존재하는 제어시스템에 시스템 고장 혹은 구동기 고장이 발생하였을 경우 제어기를 재구성함으로써 고장에 대처하는 고장허용제어방법을 제안하였다. 고장으로 인하여 파라미터의 급격히 변화가 발생하였을 경우, 이에 대처하기 위하여 고장진단을 통한 고장발생후의 시스템을 식별하고 이 정보를 재구성 적응제어기에 이용하였다. 즉, 고장에 따른 영향으로 매칭조건을 만족하는 제어기이득을 구할 수 없거나 파

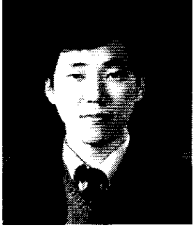
미터의 급격한 변화로 빠른 시간내에 기준모델에 적응할 수 없을 경우에, 기존의 기준모델과 같은 고유치를 가지는 새로운 기준모델을 구성함으로써 성능을 유지하면서 기준모델에 대한 고장시스템의 적응성을 향상시킬 수 있다. 또한, 식별기의 상태 추정오차의 놈값을 적응이득으로 사용하는 것을 제안하였다. 이것은 시스템의 불확실성, 외란 등이 적응제어기에 주는 영향을 줄이고 시간경과에 따라 제어기를 안정화시켜서 전체시스템의 안정성에 대한 견실성을 증대시키는 효과를 보여주었다.

참고문헌

- [1] J. Park, and G. Rizzoni, "An eigenstructure assignment algorithm for the design of fault detection filters," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, No. 7, pp. 1521-1524, 1994.
- [2] 최재원, 이대영, "좌 고유구조 지정기법을 이용한 고장분리 필터 설계," 제어.자동화.시스템공학 논문지, 제4권, 제6호, pp. 695-702, 1998.
- [3] D. A. Handelmann, and R. F. Stengel, "Combining expert system and analytical redundancy concepts for fault tolerance flight control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-45, 1989.
- [4] J. Jiang, and Q. Zhao, "Fault tolerant control systems synthesis using imprecise fault identification and reconfigurable control," *Proceedings of the IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, pp. 169-174, 1998.
- [5] M. Saif, and Y. Guan, "A new approach to robust fault detection and identification," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 685-693, 1993.
- [6] J. W. Choi, "Comment on 'A new approach to robust fault detection and identification'," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 32, No. 3, pp. 1137-1138, 1996.
- [7] L. Shen, and P. Hsu, "Robust design of fault isolation observer," *Automatica*, Vol. 34, No. 11, pp. 1421-1429, 1998.
- [8] L. Billmann, and R. Isermann, "Leak detection methods for pipelines," *Automatica*, Vol. 23, No. 3, pp. 381-385, 1987.
- [9] R. Isermann, "On the applicability of model based fault detection for technical process," *Proceedings of the 12th IFAC World Congress*, Vol. 9, pp. 195-200, 1993.
- [10] R. Isermann, and P. Balle, "Trends in the Application of Model Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes," *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, Vol. 7, pp. 1-12, 1996.
- [11] G. Merrington, and O.-K. Kwon, "Fault detection and diagnosis in gas turbines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 11, No. 3, pp. 277-282, 1991.
- [12] O.-K. Kwon, G. C. Goodwin and W. H. Kwon, "Robust fault detection method accounting for modelling errors in uncertain systems," *Control Engineering Practice*, Vol. 2, No. 5, pp. 763-771, 1994.
- [13] K. S. Narendra, and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice Hall, 1989.

최재원

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 5 호 참조.

**서영수**

1990년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1992년 동 대학원 제어계측공학과 졸업 (석사). 1997년 일본 동경대학교 Department of Mathematical Engineering and Information Physics 졸업 (공학박사). 1997년 4월~1999년 12월 일본 공업기술원 방문연구원. 2000년 1월~2000년 12월 부산대학교 기계공학부 기금교수 2000년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수. 관심분야는 시간지연시스템의 제어, 고장진단 및 검출 등.

이승우

1971년 2월 1일생. 2000년 부산대 항공우주공학과 졸업. 2002년 동대학원 지능기계공학과 석사. 관심분야는 고장검출 및 분리, 고장진단기반 제어기 재구성 적용 제어.

