

폐회로 제어시스템의 강인한 고장진단 및 고장허용제어 기법 연구

A Study on the robust fault diagnosis and fault tolerant control method for the closed-loop control systems

이 종 효* 유 준**
Lee, Jong-Hyo, Lyou, Joon

ABSTRACT

This paper presents a robust fault diagnosis and fault tolerant control method for the control systems in closed-loop affected by unknown inputs or disturbances. The fault diagnostic scheme is based on the disturbance-decoupled state estimation using a 2-stage state observer for state, actuator bias and sensor bias. The estimated bias show the occurrence time, location and type of the faults directly. The estimated state is used for state feedback to achieve fault tolerant control against the faults. Simulation results show that the method has definite fault tolerant ability against actuator and sensor faults, moreover, the faults can be detected on-line, isolated and estimated simultaneously.

주요기술용어 : fault diagnosis(고장진단), fault tolerant control(고장허용제어), unknown inputs(미지입력), disturbance-decoupled(외란 분리), 2-stage state observer (2-단계 상태 관측기)

1. 서 론

시스템의 신뢰도와 안정성을 확보하기 위해서는 고 신뢰성 부품을 사용하여 완벽한 설계 및 제조과정을 거쳐 생산하고, 운용전/중/후 예방정비를 철저히 수행함으로써 원천적으로 시스템의 고장발생 확률을 제거하려는 고장회피방법을 고려할 수 있으나, 많은 경제적인 문제와 기술적인 한계로 인하여 이러한 구현방법은 거의 불가능하다 할 수 있다. 현실적으로 개별 부품의 고장발생확률은 항상 존재하고, 고

장발생시간의 예측에도 어려움이 있으므로 부품별 고장에 따른 장비의 고장이 발생되고, 이로 인해 전체 시스템의 신뢰도가 저하되며 심지어는 시스템의 안전성을 해치게 되어 가용성을 떨어뜨리게 된다.

특히 무기체계의 구동시스템은 고장이 발생될 경우 전체 시스템의 안전성과 가용성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 반응시간의 증가 및 구동오차의 발생으로 인한 정확도에 심각한 문제점을 야기하게 되므로 실시간 고장진단대책, 즉 고장검출 및 분리(FDI, Fault Detection and Isolation)를 통한 고장의 보정 및 정비 대책이 강구되고 있다. 이러한 고장의 대부분은 갑자기 발생하기보다는 초기에 고장의 징후가 나타난 후

* 국방과학연구소 선임연구원

** 충남대학교 전자공학과 교수

시간이 지남에 따라 점차 다른 부품으로 파급되어 결국 치명적인 고장상태로 천이하는 경우가 많다. 따라서 고장진단의 일차적인 목적은 치명적인 고장이 발생하기 이전에 이를 검출하고 고장부품을 분리해 내는 것이다.

여러 가지 FDI기법 중에는 일반적으로 해석적 중복(Analytical redundancy) 기법으로 간주되는 모델에 근거한(Model-based) 접근방법⁽¹⁻³⁾이 있다. FDI를 위한 해석적 중복기법의 적용에 있어서 주요한 단점중의 하나는 시스템의 모델링 오차 또는 동작간 파라메타 변화의 문제이며, 만약 이들 문제가 상태추정 과정에서 적절히 처리되지 못하면 많은 오경보(False Alarm)가 일어날 수 있다. 이러한 상황에서 강인한 FDI기법이 필요하게 되며, 이에 대한 접근방법중의 하나로 추정된 상태로부터 미지입력, 즉 외란을 분리해 내도록 설계되는 UIO (Unknown Input Observers) 기법^(3,4)이 있다. 이러한 접근방법은 모델링 오차 또는 파라메타 변화가 존재하는 시스템의 모델을 UIO기법이 적용가능한 형태로 변환될 수 있다는 사실에 근거를 둔다.

고장허용제어(FTC, Fault Tolerant Control) 는 이러한 FDI 결과에 근거하여 고장의 원인이 되는 징후, 즉 시스템의 이상동작을 미리 파악하여 이것이 다른 부분으로 파급되지 않도록 적절하게 제어를 수행하여 부분적 고장이 발생하더라도 전체 시스템의 운용 중단을 막고 수용가능한 성능을 유지하도록 함으로써 시스템의 가용성, 안전성 및 정비성을 확보할 수 있는 기법이다. FDI에 근거한 FTC기법의 특징은 시스템의 고장을 실시간으로 진단하고, 진단결과를 이용하여 시스템을 안정하게 유지하게 하기 위하여 제어법칙을 수정하거나 재설계하는 것이다.

그러나 폐회로 제어시스템에서는 귀환에 따른 제어성능으로 작고 서서히 증가하는(Incipient) 초기고

장이 묻혀버릴 수도 있다. 따라서 폐회로 제어 시스템에서는 어떤 특별한 기법이 채택되지 못하면 그러한 고장을 검출하지 못하게 될 지도 모른다.

본 연구의 목적은 모델링 오차 또는 파라메타 변화가 존재하는 시스템에 대하여 동일한 FTC기법의 체계내에 강인한 FDI기법을 결합하는 FDI에 근거한 FTC기법을 제안하는 것이다. FDI기법은 Keller[6-8] 등에 의하여 제안된 2-단계 상태추정, 즉 시스템의 고장을 이에 상응하는 바이어스(Bias)로 가정하고, 바이어스가 존재하지 않는다는 가정에 근거하여 설계된 Bias-free 상태추정기와 별도의 바이어스 추정기를 병렬로 작동한 후 시스템의 상태를 상기 2개의 추정값으로부터 선형결합하는 기법을 사용하였다. 본 연구에서는 폐회로로 제어되는 확정적 시스템(Deterministic System)에 대하여 구동기(Actuators) 및 센서(Sensors)의 고장에 대한 바이어스 추정기를 분리하여 3개의 관측기로 설계하였다. 추정가능한 바이어스의 수는 외란을 분리한 후에 남은 설계자유도, 즉 측정의 개수(m)로부터 외란의 개수(q)를 뺀 값($m - q$)으로 된다. 이렇게 하여 추정된 바이어스는 고장검출 및 분리를 위하여 사용되며, 추정된 시스템의 상태는 고장허용제어를 위한 새로운 제어법칙을 재설계하는데 사용된다. 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 일반적인 DC모터 모델로 표현되는 위치제어 구동시스템에 대하여 구동기와 위치센서에 여러가지 형태의 고장을 모의하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 FDI에 근거한 FTC 시스템의 구동기 및 센서 고장에 대한 고장진단 및 고장허용제어 성능을 확인할 수 있었다.

2. 강인한 상태추정 기법

다음과 같은 이산시간 시스템을 고려하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + Ed(k) \quad (1a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (1b)$$

여기서 $x(k) \in R^n$ 는 상태벡터, $y(k) \in R^m$ 는 출력벡터, $d(k) \in R^q$ 는 미지입력 벡터(이하 외란)이며, E 는 완전한 열 랭크를 가진 행렬로 가정한다.

시스템 (1)에 대하여 Kitanidis⁽⁵⁾에 의해 제안된 관측기를 적용한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + \Gamma_x(y(k+1) - CA\hat{x}(k)) \\ &= (I_n - \Gamma_x C)A\hat{x}(k) + \Gamma_x y(k+1) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\Gamma_x \in R^{n \times m}$ 는 관측기의 이득행렬이다. 이 때 상태추정오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e_x(k+1) &= \hat{x}(k+1) - x(k+1) \\ &= (I_n - \Gamma_x C)Ae(k) + (\Gamma_x CE - E)d(k) \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 상태추정오차는 외란 $d(k)$ 항을 포함하고 있으며, 다음과 같은 조건하에서 외란이 분리될 수 있다.

$$\Gamma_x CE - E = 0_{n \times q} \quad (4)$$

만약 $rank(E) = rank(CE) = q$, $q < m$ 이면 식 (4)는해를 가질 수 있으며, 이와 같은 조건하에서 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_x = E\Pi + K_x T \quad (5)$$

여기서 K_x 는 관측기를 안정하게 하기 위해 자유롭게 선택될 수 있는 파라메타이며, Π 와 T 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Pi = (CE)^+ \in R^{q \times m} \quad (6a)$$

$$T = Q(I_m - \Pi^+ \Pi) \quad (6b)$$

식 (6a)의 Π 는 $\Pi \Pi^+ = I_q$ 으로 입증되는 행렬 CE 의 Pseudo-inverse이며, 식 (6b)에서의 임의행렬 $Q \in R^{(m-q) \times m}$ 는 행렬 T 가 완전한 행 랭크를 가지며, 행렬 $[\Pi \ T]^T$ 가 nonsingular가 되도록 선택되어야 한다.

3. FDI에 근거한 FTC 기법

3.1 2-단계 상태추정

일반적으로 구동기의 고장은 시스템에 외란과 같은 형태로 작용하며, 센서의 고장은 측정값이 실제 시스템의 출력값으로부터 벗어나게 한다. 이러한 구동기 및 센서의 고장은 고장이 발생하지 않을 경우 0의 값을 갖는 고장벡터를 사용하여 시스템의 상태방정식 또는 측정방정식에 더해지는(Additive) 형태로 표현될 수 있다.

따라서 시스템 (1)을 궤환제어를 위한 입력벡터 및 크기가 일정한 구동기 및 센서의 고장벡터를 고려하여 표현하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + Fb_a(k) \quad (7a)$$

$$b_a(k+1) = b_a(k) \quad (7b)$$

$$b_s(k+1) = b_s(k) \quad (7c)$$

$$y(k) = Cx(k) + Gb_s(k) \quad (7d)$$

여기서 $u(k) \in R^r$ 는 입력벡터, $b_a(k) \in R^l$ 및 $b_s(k) \in R^p$ 는 구동기와 센서의 고장에 상응하는

바이어스 벡터이다.

우선 시스템에 고장이 존재하지 않는다는 가정에 근거하여 식 (2)와 동일한 형태로 구성된 n 차원의 Bias-free 상태관측기 및 상태추정오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= A\bar{x}(k) + Bu(k) \\ &+ \Gamma_x(y(k+1) - C(A\bar{x}(k) + Bu(k))) \\ &= (I_n - \Gamma_x C)A\bar{x}(k) + (I_n - \Gamma_x C)Bu(k) \\ &+ \Gamma_x y(k+1) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} e_x(k+1) &= \bar{x}(k+1) - x(k+1) \\ &= (I_n - \Gamma_x C)Ae_x(k) - (I_n - \Gamma_x C)Fb_a(k) \\ &+ \Gamma_x Gb_s(k) + (\Gamma_x CE - E)d(k) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 상태 추정오차는 식 (4)와 동일한 조건하에서 외란이 분리될 수 있다.

다음은 구동기의 고장을 추정하기 위한 l 차원의 바이어스 관측기는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \hat{b}_a(k+1) &= \hat{b}_a(k) + \Gamma_{ba}(y(k+1) - \\ &- C(A\hat{x}(k) + Bu(k) + F\hat{b}_a(k)) - G\hat{b}_s(k)) \\ &= (I_l - \Gamma_{ba}CF)\hat{b}_a(k) - \Gamma_{ba}CA\hat{x}(k) \\ &- \Gamma_{ba}CBu(k) - \Gamma_{ba}G\hat{b}_s(k) + \Gamma_{ba}y(k+1) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\hat{x}(k)$ 는 시스템에 고장이 있을 경우 실제의 상태추정값으로서, 만약 고장이 없을 경우에는 식 (8)의 $\bar{x}(k)$ 와 같아진다.

구동기 바이어스 추정오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{ba}(k+1) &= \hat{b}_a(k+1) - b_a(k+1) \\ &= (I_l - \Gamma_{ba}CF)e_{ba}(k) - \Gamma_{ba}CAe_x(k) \\ &- \Gamma_{ba}Ge_{bs}(k) + \Gamma_{ba}CEd(k) \end{aligned} \quad (11)$$

구동기 바이어스 추정오차에서도 외란 $d(k)$ 항을 포함하고 있으며, 다음과 같은 조건하에서 외란이 분리될 수 있다.

$$\Gamma_{ba}CE = 0_{l \times q} \quad (12)$$

상기 식의 해는 식 (4)에서와 동일한 조건하에서 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{ba} = K_{ba}T \quad (13)$$

여기서 K_{ba} 는 구동기 바이어스 관측기를 안정하게 하기 위해 자유롭게 선택될 수 있는 파라메타이다.

동일한 방법으로 센서의 고장을 추정하기 위한 p 차원의 바이어스 관측기, 추정오차, 외란분리 조건 및 해는 다음과 같이 유도된다.

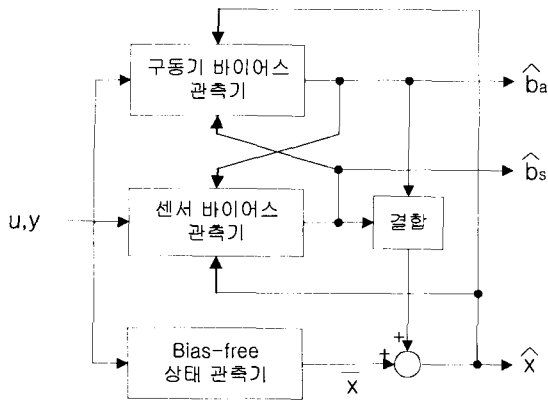
$$\begin{aligned} \hat{b}_s(k+1) &= \hat{b}_s(k) + \Gamma_{bs}(y(k+1) \\ &- C(A\hat{x}(k) + Bu(k) + F\hat{b}_a(k)) - G\hat{b}_s(k)) \\ &= (I_p - \Gamma_{bs}G)\hat{b}_s(k) - \Gamma_{bs}CA\hat{x}(k) \\ &- \Gamma_{bs}CBu(k) - \Gamma_{bs}CF\hat{b}_a(k) + \Gamma_{bs}y(k+1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} e_{bs}(k+1) &= \hat{b}_s(k+1) - b_s(k+1) \\ &= (I_p - \Gamma_{bs}G)e_{bs}(k) - \Gamma_{bs}CAe_x(k) \\ &- \Gamma_{bs}CFe_{ba}(k) + \Gamma_{bs}CEd(k) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Gamma_{bs}CE = 0_{p \times q} \quad (16)$$

$$\Gamma_{bs} = K_{bs}T \quad (17)$$

이제 시스템 (7)에서 상태추정값 $\hat{x}(k)$ 는 식 (9)의 Bias-free 상태 관측기의 추정오차 $e_x(k+1)$ 와 구동기 바이어스 $b_a(k)$ 및 센서 바이어스 $b_s(k)$ 의 관계



(그림 1) 2-단계 상태추정기법

로부터 이들 바이어스의 추정값을 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{x}(k+1) = \bar{x}(k+1) + (I_n - \Gamma_x C) F \hat{b}_a(k+1) - \Gamma_x G \hat{b}_s(k+1) \quad (18)$$

만약 Bias-free 상태 관측기와 구동기 및 센서 바이어스 관측기가 안정하게 동작할 경우 식 (18)은 정상 상태에서 뿐만 아니라 과도기간에서도 큰 무리없이 성립될 수 있다. 따라서 $\hat{x}(k)$ 는 Bias-free 상태 추정값 $\bar{x}(k)$ 에 대하여 구동기 바이어스 추정값 $\hat{b}_a(k)$ 및 센서 바이어스 추정값 $\hat{b}_s(k)$ 으로 보정되는 선형 결합식으로 표현될 수 있다. 이와 같은 2-단계 상태 추정 기법을 그림 1에서 도해적으로 보여준다.

3.2 FDI에 근거한 FTC 기법

전술한 외란분리 및 2-단계 상태추정을 통한 구동기 바이어스 추정값 $\hat{b}_a(k)$ 및 센서 바이어스 추정값 $\hat{b}_s(k)$ 으로부터 구동기 및 센서의 고장을 검출하고 분리해내며, 나아가 고장의 형태 및 크기를 정확하게 추정해낼 수 있는 FDI결과로 이용된다.

본 연구에서는 폐회로 제어 시스템의 고장허용제어를 위한 제어법칙으로서 상태제환을 적용한다. 식 (18)로 표현되는 상태추정값 $\hat{x}(k)$ 는 고장허용제어를 위한 제환 제어입력으로서 제공된다.

$$u_c(k+1) = -L_x \hat{x}(k+1) \quad (19)$$

이 제환 제어입력은 다음과 같이 Bias-free 상태추정값에 의한 제어입력과 고장으로 인하여 공칭값으로부터 벗어난 상태추정값에 의한 보정입력으로 구분하여 표현될 수 있다.

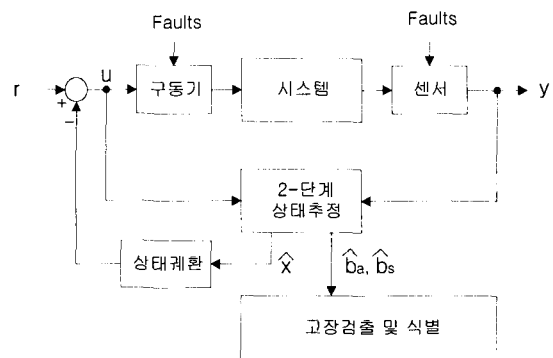
$$u_c(k+1) = u_f(k+1) + \delta u(k+1) \quad (20)$$

여기서 $u_f(k+1)$ 및 $\delta u(k+1)$ 는 다음과 같다.

$$u_f(k+1) = -L_x \bar{x}(k+1) \quad (21a)$$

$$\delta u(k+1) = -L_x (I_n - \Gamma_x C) F \hat{b}_a(k+1) + L_x \Gamma_x G \hat{b}_s(k+1) \quad (21b)$$

따라서 제안된 기법은 동일한 FTC기법의 체계내에 강인한 FDI기법이 결합되는 FDI에 근거한 FTC기법으로서, 이를 개념적으로 도해하면 그림 2와 같다.



(그림 2) FDI에 근거한 FTC 기법

4. 시뮬레이션 및 결과

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같이 모델링되는 위치제어 구동시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b w_m(t) \quad (22a)$$

$$K_t I_a(t) = J \frac{dw_m(t)}{dt} + Bw_m(t) + F \operatorname{sgn}(w_m(t)) \quad (22b)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = w_m(t) \quad (22c)$$

여기서 상태벡터 및 입력벡터를 다음과 같이 정의하고

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta_m(t) \\ w_m(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} \quad (23a)$$

$$u(t) = V_a(t) \quad (23b)$$

구동속도에 따라 방향이 반대가 되는 마찰력을 모델링 오차 즉, 외란으로 가정하였다.

$$Ed(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left\{ -\frac{F}{J} \operatorname{sgn}(w_m(t)) \right\} \quad (24)$$

이제 연속시간 시스템 식 (22)를 2.5KHz로 샘플링한 후, 구동기와 센서에 고장을 고려하여 이산시간 시스템으로 나타내면 식 (7)과 같은 형태로 표현된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + Ff_a(k) \quad (25a)$$

$$y(k) = Cx(k) + Gf_s(k) \quad (25b)$$

여기서 시뮬레이션에 적용한 시스템의 실제 행렬 값 및 외란은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0004 & 0.0000 \\ 0 & 1.0007 & 0.0000 \\ 0 & -0.0143 & 0.9125 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.1911 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0004 \\ -0.0000 \end{bmatrix},$$

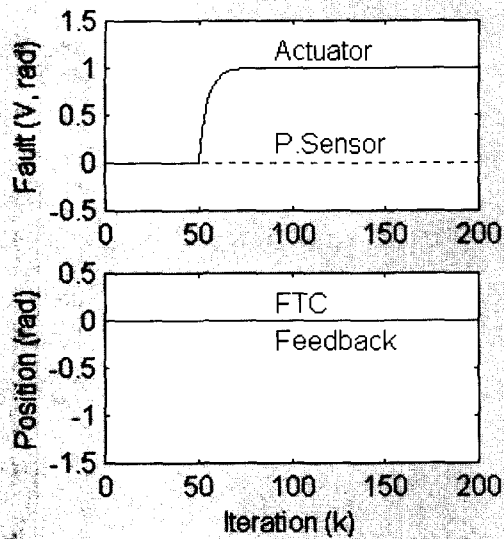
$$F = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.1911 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26a)$$

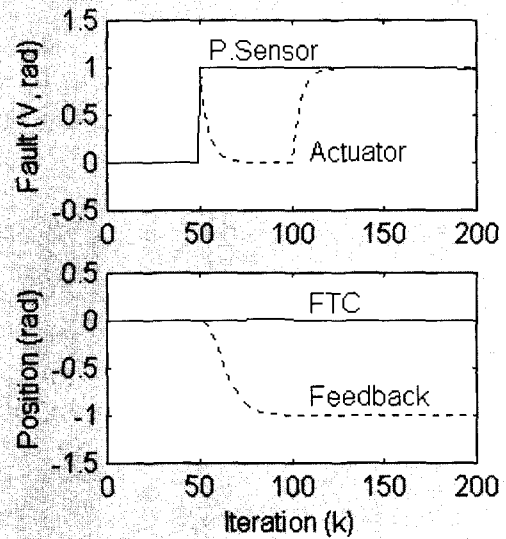
$$d(k) = -0.0035 \operatorname{sgn}(w_m(k)) \quad (26b)$$

본 연구에서는 추정가능한 고장의 수 ($m-q=3-1=2$)에 따라 구동기 및 위치센서에 대해서만 고장을 고려하였으며, 제어입력, 속도 및 전류는 직접 측정 가능한 것으로 가정한다.

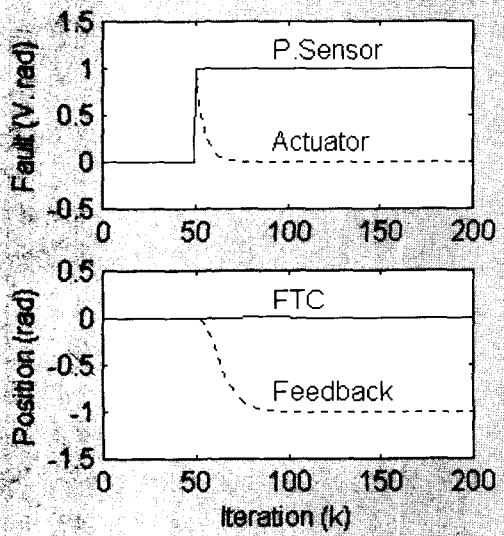
시뮬레이션은 구동기와 위치센서에 여러 가지 형태의 고장이 발생하였을 경우에 대하여 수행하였다. 그림 3은 구동기에 크기가 1V인 스텝형태의 고장이 발생하였을 경우, 그림 4는 위치센서에 크기가 1rad인 스텝형태의 고장이 발생하였을 경우, 그림 5는 구동기와 위치센서에 시간을 달리하여 크기가 1V와 1rad인 스텝형태의 고장이 동시에 발생하였을 경우 외란분리를 통한 고장진단 및 고장허용제어 성능을 보여준다. 또한 공칭모델에 대한 일반적인 궤환 제어 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 6은 램프형태의 위치센서 고장에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다.



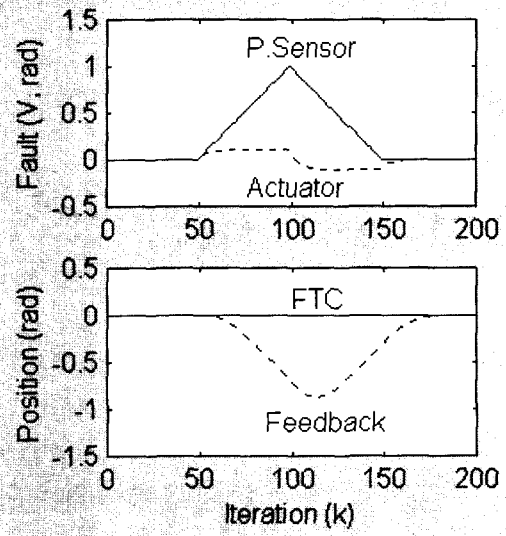
(그림 3) 구동기 스텝 고장시 고장추정 및 고장허용제어



(그림 5) 구동기 및 위치센서 동시 스텝 고장시 고장추정 및 고장허용제어



(그림 4) 위치센서 스텝 고장시 고장추정 및 고장허용 제어



(그림 6) 위치센서 램프 고장시 고장추정 및 고장허용 제어

시뮬레이션 결과 제안된 FDI에 근거한 FTC 시스템이 외란이 존재하는 상황에서 구동기 및 센서의 고장에 대한 고장진단 및 고장허용제어 성능을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 시스템의 수학적 모델링으로 인한 오차 또는 운용적인 환경으로 인한 파라메타 변화등과 같은 모델의 불확실성이 존재하는 상황에서 이를 UIO 기법이 적용가능한 외란의 형태로 변환함으로써 구동기 및 센서에 고장이 발생하였을 경우 외란분리 및 2-단계 상태추정을 통한 강인한 FDI에 근거한 FTC 기법을 제안하였다.

시뮬레이션을 통하여 측정의 개수(m)로부터 외란의 개수(q)를 뺀 값($m - q$)만큼의 구동기와 센서의 고장에 대하여 바이어스 추정을 통하여 동시에 검출 및 분리가 가능하고, 상태추정값을 궤환제어함으로써 고장허용제어 성능이 달성될 수 있음을 확인하였다.

제안된 기법은 실제 시스템에 적용할 경우 측정가능한 출력과 입력값을 이용하여 관측기 형태로 구현함으로써 실시간 적용에 중요한 특성을 가지며, 구동기와 센서의 초기고장에 대해 신속하고 강인한 고장진단이 가능하고, 부분적인 고장에 대해서도 수용 가능한 성능으로 시스템을 안정하게 유지시킴으로써 시스템의 가용성, 안전성 및 정비성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. R.Isermann, 'Process fault detection based on modeling and estimation methods-A survey', *Automatica*, 20, pp. 387~404, 1984.
2. P.M.Frank, 'Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-redundancy -A survey and some new results', *Automatica*, 26, pp. 459~474, 1990.
3. R.J.Patton, P.M.Frank, R.N.Clark, 'Fault diagnosis in dynamic systems-theory and application', Prentice Hall, 1989.
4. Y.Guan, M.Saif, 'A novel approach to the design of unknown input observers', *IEEE trans. on Automat. control*, AC-36, pp. 632~635, 1991.
5. P.K.Kitanidis, 'Unbiased minimum-variance linear state estimation', *Automatica*, 23, pp. 775~778, 1987.
6. J.Y.Keller, L.Summerer, M.Darouach, 'Extension of Friedland's bias filtering technique to discrete-time systems with unknown inputs', *Int. J. of Systems Science*, Vol. 27, No. 12, pp. 1219~1229, 1996.
7. M.Darouach, M.Zasadzinski, 'Unbiased minimum variance estimation for systems with unknown exogenous inputs', *Automatica*, Vol. 33, No. 4, pp. 717~719, 1997.
8. D.H.Zhou, P.M.Frank, 'Fault Diagnostics and Fault Tolerant Control', *IEEE AES*, Vol. 34, No. 2, pp. 420~427, 1998.