

패리티 공간 기법을 이용한 위치 서보계의 최적 잔차 발생

Optimal Residual Generation using Parity Space Approach  
for a Position Servo System

최경영, 박태건, 이기상

단국대학교 전기공학과(Tel:+82-2-709-2581; Fax:+82-2-795-8771; E-mail : keesang@ns.dankook.ac.kr)

**Abstracts** The optimal residual generator based on parity relation approach for the fault detection and isolation of a large diesel engine actuator position servo system is presented. The closed-loop residual generator is designed to have robustness against modeling errors and noise. Main purpose of the fault detection and isolation system in the process is to detect and isolate two important faults, i.e., actuator fault and fault of speed sensor, that, if not detected and compensated, degrade the overall control system performance. Simulation results are given to show the practical applicability of the fault detection and isolation scheme.

**Keywords** Observer, Robustness, Structured Residual Generation, Actuator fault, Fault Detection and Isolation.

1. 서론

본 논문에서는 계통의 수학적 모델에 근거한 고장 검출 진단 기법 중 패리티 공간 (Parity Space) 에 기반을 둔 최적 잔차 생성 기법을 이용하여 선박용 대형 디젤 엔진의 위치 서보계를 위한 고장 검출 식별 시스템을 설계하고 그 성능을 개루프 구조적 잔차 발생 기법과 비교 검토하였다. 대상 프로세스인 위치 서보계에서 검출 식별 되어야 할 고장으로는 구동장치의 고장과 제환정보를 제공하는 측정장치의 고장으로 선정하였다. 이들 고장은 일차적으로 위치 서보계의 성능 감퇴를 초래할 뿐만 아니라 신속히 검출 보상하지 않을 경우 엔진 성능을 저하시키는 원인이 된다. 패리티 공간 기법에 근거한 고장 검출 시스템에서 패리티 함수는 검출 대상이 아닌 외란, 모델링 오차 그리고 잡음에 대한 강인성과 검출 대상 고장에 대한 민감성을 가져야 한다. 또한 발생하는 최적 잔차 벡터는 각 고장마다 독립적인 방향성을 가지도록 설계되어야 한다. 본 논문의 내용은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 패리티 공간 기법에 근거한 최적 잔차 생성 방법을 서술하고, 3절에서는 대상 계통에 대한 고장 검출 계통을 설계하고 그 성능을 검토하였으며, 4절에서는 결론을 기술했다.

2. 최적 잔차 발생

2.1 고장 표현

구동 장치 고장, 센서 고장, 모델링 오차를 포함한 다음의 선형 이산치 계통을 고려하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_2u(k) + Ef(k) + B_1w(k) \tag{1}$$

$$y(k) = Cx(k) + Dw(k) + Ff(k)$$

여기서  $x \in \mathbf{R}^n$ 는 상태 벡터이고  $E$ 와  $F$ 는 고장 행렬이며 기저로 가정한다.  $u$ 는  $k$ 차원의 입력 벡터이고,  $y$ 는  $m$ 차원의 출력 벡터,  $f$ 는 구동장치 고장과 센서 고장을 포함한 고장 벡터이다. 그리고  $w$ 는 모델링 오차 및 측정 잡음을 반영하는 외란 벡터이다.

2.2 관측기 구성

설계자의 의도에 부합되는 잔차를 발생하기 위하여 다음의 관측

기를 설계한다. 관측기 편차는 (2)와 같고,

$$o(k) = y(k) - C\hat{x}(k) \tag{2}$$

관측기 추정치  $\hat{x}$ 는 (3)을 만족한다.

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B_2u(k) + L_o(k) \tag{3}$$

관측기 편차의  $s$ -step 시간 장은 다음처럼 얻을 수 있다.

$$O(k+s) = \begin{bmatrix} o(k) \\ o(k+1) \\ \vdots \\ o(k+s) \end{bmatrix} = Z[x(k) - \hat{x}(k)] \tag{4}$$

$$+ W \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+s) \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} f(k) \\ f(k+1) \\ \vdots \\ f(k+s) \end{bmatrix}$$

여기서

$$Z = \begin{bmatrix} C \\ CA_L \\ \vdots \\ CA_L^s \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB_{1L} & D & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA_L^{s-1}B_{1L} & CA_L^{s-2}B_{1L} & \cdots & CB_{1L} & D \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} F & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CE_L & F & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA_L^{s-1}E_L & CA_L^{s-2}E_L & \cdots & CE_L & F \end{bmatrix}$$

여기서  $s$ 는  $[C : A_L]$ 의 가관측지수이고,  $L$ 은 관측기 이득,  $A_L = A - LC$ ,  $B_{1L} = B_1 - LD$  그리고  $E_L = E - LF$ 이다.

$$r(k+s) = v^T O(k+s) \tag{5}$$

(4)의  $O(k+s)$ 는 패리티 벡터  $v$ 와 결합하여 상태 추정의 편차와 외란 및 잡음의 영향을 최소화하면서 상대적으로 고장의 영향을 최대화하는 최적 잔차 (5)를 생성해야 한다. 이 설계 목적을 달성하기 위한 한 방법으로 다음의 평가 지표를 최소화하는 패리티 벡터  $v$ 를 구한다.

$$J = \frac{1}{2} [\|v^T [ZW]\|_F^2 - \|v^T [V]\|_F^2] \tag{6}$$

여기서  $\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius Norm이다. (6)을 최소화하는 패리티 벡터  $v$ 는  $V$ 의 동일 방향 성분을 가지는 동시에  $[ZW]$ 에 직교해야 하는 제한 조건을 가진다. 그러나 이 조건을 완전히 만족시키는 해를 구하기 매우 어렵고, 다음과 같이 관측기 이득  $L$ 을 선정함으로써 실제 목적을 달성할 수 있다. 따라서 실제 목적은 (4)에서 처럼 모두  $L$ 의 함수인  $Z, W, V$ 로 구성되는 (6)의 평가 지수를 최소로 하는  $L$ 을 찾는 문제로 귀결된다.

관측기 이득과 잔차를 발생하는 패리티 벡터의 선정은 다음의 조건을 만족하는 최적화 문제로 고려될 수 있다.

$$\min_{\substack{v, \|v\| = 1 \\ L, \text{stable}}} J \quad (7)$$

(6)의 평가지표는 특이값 분해를 이용한 최적 패리티 벡터를 생성하기 위해서 다시 다음과 같이 표현될 수 있고,

$$J^* = \|v^T [Z W V]\|_F^2 \quad (8)$$

(7)의 제한 조건에 따라  $v^T v = 1$ 이므로

$$J^* = \|v^T [Z W V]\|_F^2 = \text{tr}[v^T [Z W V][Z W V]^T v] \quad (9)$$

가 되며,  $[Z W V]$ 를 특이값 분해하면,

$$[Z W V] = U \Sigma V^T \quad (10)$$

여기서,

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)$$

이때,  $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_l$ 이면  $J$ 의 최소값은,

$$J = \sum_{i=1}^l \sigma_i^2, \quad \rho: \text{패리티 공간의 차원}. \quad (11)$$

가 된다.  $(A - LC)$ 의 모든 고유치들의 절대값이 1보다 작도록 관측기 이득이 선정되었다고 가정하면, 패리티 벡터는 패리티 공간의 차원에 대응되는  $\Sigma$ 의 대각 요소에 관계된 직교 행렬  $U$ 의 열 벡터로 구성되어 지고, (7)의 조건을 만족하게 된다.

### 2.3 최적 이득의 해

$\lambda_1(L)$ 을  $[Z W V][Z W - V]^T$ 의 가장 작은 고유값이라 할 때 (4)에서 처럼 이 고유값은 관측기 이득에 관계되어 있고, (12)를 최소화시키도록 선정되어야 한다.

$$\min_v J = \frac{1}{2} \lambda_1(L) \quad (12)$$

$\frac{\partial \lambda_1}{\partial L}$ 가  $\lambda_1(L)$ 의 기울기를 나타낼 때,

$$L_{i+1} = L_i - \rho \frac{\partial \lambda_1}{\partial L} \Big|_{L_i}, \quad \rho > 0, \quad L_i \text{ stable} \quad (13)$$

를 통하여 평가 지표를 최소화시키는 관측기 이득을 구할 수 있다. 하지만 위의 경사법(gradient method)을 적용하는데는 다음의 문제점이 있다. 첫째, 관측기 이득에 대하여 볼록형(convexity)을 가정할 수 없어 전역 최소치를 구하기 어렵고, 둘째, 전역 최소치를 구할 수 있더라도 안정 영역으로의 제한을 보장할 수 없다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 관측기 이득이 안정 영역에 놓여야 하는 제약을 완화시켜, 원하는 성능을 갖는 관측기를 구성하는 다음의 알고리즘을 적용한다[7].

$(A - LC)$ 의 모든 고유값의 절대치는 1보다 작다고 가정한다:  $\{s_i: |s_i| < 1, i = 1, 2, \dots, n\}$ . 모든 고유치  $s_i$ 는 실수이고,  $A$ 의 고유값과 다르다고 가정하자.  $A = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 이라 하고,  $[A, C]$ 가 관측 가능하다면,

$$TA - AT = GC \quad (14)$$

(14)는 거의 모든  $G$ 에 대하여 유일한 비특이 행렬  $T$ 를 갖는다.

(14)의 해인  $T$ 가 존재한다면, 구해진  $T$ 는  $L$ 을 결정하고,

$$\begin{aligned} L &= T^{-1}G \\ A - LC &= T^{-1}AT \end{aligned} \quad (15)$$

결정된  $L$ 은  $[Z W V][Z W - V]^T$ 을 결정하며, 이 행렬에 대한 특이값 분해를 이용하여 패리티 벡터를 얻는다. 패리티 벡터는

$$G_{i-1} = G_i - \rho \frac{\partial \lambda_1}{\partial G}, \quad \rho > 0 \quad (16)$$

의 계산에 사용되며, 여기서

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial g_{ab}} = C_b (A - s_a I)^{-1} (\Sigma_{k=0}^s (Q_k)_a) + (\Sigma_{k=0}^s R_k) \quad (17)$$

(17)은  $\frac{\partial \lambda_1}{\partial G}$ 의  $(a, b)$  번째 요소를 말하며,  $C_b$ 는 행렬  $C$ 의  $b$

번째 행을,  $(Q_k)_a$ 는  $Q_k$ 의  $a$  번째 열을 말한다.

$$Q_k = \Sigma_{i=1}^{s-1} \{ Z^T v v_i^T C T^{-1} A^i - A_L^i Z^T v v_i^T C T^{-1} \} \quad k = 0,$$

$$\begin{aligned} &= \Sigma_{i=k}^s \{ B_1 W_k^T v v_i^T C T^{-1} A^{i-k} \\ &\quad - A_L^{i-k} B_{1L} W_k^T v v_i^T C T^{-1} \\ &\quad - E V_k^T v v_i^T C T^{-1} A^{i-k} \\ &\quad + A_L^{i-k} E_L V_k^T v v_i^T C T^{-1} \} \quad k > 0. \end{aligned}$$

$$R_k = 0 \quad k = 0,$$

$$= -\Sigma_{i=k}^s \{ v_i^T C T^{-1} A^{i-k} E_{ab} D W_k^T v \\ v_i^T C T^{-1} A^{i-k} E_{ub} F V_k^T v \} \quad k > 0.$$

행렬  $E_{ub}$ 의  $(a, b)$  번째 요소는 0인 경우 1이라고 한다.  $W_k$ 는 행렬  $W$ 의  $k$  번째 열이고,  $V_k$ 는 행렬  $V$ 의  $k$  번째 열이다. 이상의 절차는  $\lambda_1$ 이 설계자가 원하는 충분히 작은 값을 가질 때 까지 반복된다.

### 2.4 고장의 식별

(2)의 관측기 편차는 (5)에서처럼 패리티 벡터와 결합하여 잔차를 발생시키지만, 관측기의 구조상 각 고장의 영향이 잔차 벡터의 모든 요소에 나타나게 되므로 (5)를 이용한 고장의 식별은 곤란하다. 이 문제의 해결을 위해 방향성을 갖는 구조적 잔차를 도입한다.

(2)의 관측기 추정편차를  $o(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 라 정의하면,

$$\begin{aligned} o(t+1) &= x(t+1) - \hat{x}(t+1) \\ &= (A - LC)o(t) + E f(t) \end{aligned} \quad (18)$$

$$r(t) = C o(t) + F f(t) \quad (19)$$

(18), (19)를 입력력 형태의 ARMA등가 모델로 표현하면,

$$\begin{aligned} r(t) &= C(zI - [A - LC])^{-1} E f(t) + F f(t) \\ &\triangleq S_f(z) f(t) + F f(t) \end{aligned} \quad (20)$$

이고, (20)의 오른쪽 항에 검출하고자 하는 고장에만 영이 아닌 잔차를 발생시키는 특성 방정식 변환 행렬  $W(z)$ 을 구하여 고장을 식별한다.

#### 2.4.1 방향성을 갖는 구조적 잔차

검출 식별하고자 하는 두 개 또는 그 이상의 고장이 동일한 set에서 영이 아닌 잔차를 발생하는 경우에는 각 고장으로 인한 잔차 벡터가 패리티 공간 내에 미리 결정된 방향에 놓이게 함으로써 각 고장을 식별할 수 있다. 이와 같이 미리 결정된 방향성을 갖는 잔차를 구조적 잔차라 하며 그 표현은 다음과 같다. 전개의 편리상 다음의 두 고장만을 고려한다.

$$r^*(t|p) = d \gamma(z) p(t) \quad (21)$$

$$r^*(t|q) = c \delta(z) q(t) \quad (22)$$

여기서  $r^*(t|p)$ 는 고장  $p(t)$ 에 의한 잔차 벡터이다. \*는 방향성을 의미하고  $d$ 와  $c$ 는 검출하고자 하는 고장  $p(t)$ 와  $q(t)$ 에 대한 패리티 공간 내에서 미리 선정된 잔차의 방향이며 고장 출력 행렬인  $CE$ 와  $CF$ 에서 얻어진다.  $\gamma$ 와  $\delta$ 는 고장  $p(t)$ 와 고장  $q(t)$ 에 대한 잔차의 동특성을 규정하는 전달함수이며 (20)과 등가이다. 잔차의 방향  $d$ 와  $c$ 는 서로 독립적이어야 하고, 그렇지 않다면 식별 가능한 고장의 수는 감소된다. (20)의 패리티 관계함수는 고장  $p(t)$ 와 고장  $q(t)$ 에 대한 함수의

함으로 쓸 수 있다.

$$o^*(t) = o^*(t|p) + o^*(t|q) \quad (23)$$

$$o^*(t|p) = sf(z)p(t) \quad (24)$$

$$o^*(t|q) = f'q(t) \quad (25)$$

여기서  $sf(z)$ 와  $f'$ 는  $S_f(z)$ 와  $F$ 의 열 벡터이다. (20)에 (23)을 대입하면,

$$r^*(t) = W(z)o^*(t) \quad (26)$$

$$= W(z)sf(z)p(t) + W(z)f'q(t)$$

이를 (21), (22)와 비교해보면,

$$W(z)sf(z) = d\gamma(z) \quad (27)$$

$$W(z)f'(z) = c\delta(z) \quad (28)$$

(27), (28)을 행렬 형태로 표현하면,

$$W(z)[S_f(z) F] = [D'(z) C'(z)] \quad (29)$$

여기서  $[S_f(z) F]$ 은  $sf(z)$ 와  $f'(z)$ 로 이루어진 행렬이고,  $[D'(z) C'(z)]$ 는  $d\gamma(z)$ 와  $c\delta(z)$ 의 열 벡터로 이루어진 행렬이다. 변환 행렬  $W(z)$ 는 (29)로부터 구할 수 있다.

$$W(z) = [D'(z) C'(z)][S_f(z) F]^{-1} \quad (30)$$

식(30)을 식(26)에 대입하여 방향성을 갖는 구조적 잔차를 표현하며,

$$r^*(t) = W(z)[S_f(z)f(t) + Ff(t)] \quad (31)$$

이것은 다음과 등가이다.

$$r^*(t) = [D'(z) C'(z)] \begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} \quad (32)$$

(32)의 잔차 벡터는 고장량에 비례하며 해당하는 고장의 방향에 관계되어 있어 입출력 경로로 전파되는 고장의 식별을 가능하게 한다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과 검토

디젤 엔진의 속도 제어를 위한 서보 시스템은 기준 속도와 부하 외란을 입력으로, 전동기 속도와 기어 위치를 측정 출력으로 하며 속도 제어를 위한 PI제어기를 포함한다. PI제어기를 포함한 대상 계통의 상태 공간 표현은 다음과 같다[1].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) + E_c d(t) + F_{ac} f_a(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \end{aligned} \quad (33)$$

여기서  $x = [i_2, n_m, s_o]^T$ ,  $u = n_{ref}$ ,  $d = Q_l$ 이며,  $f_a = \Delta i_m$ 의 구동기 고장이고  $f_s = \Delta s_o$ 의 측정 장치 고장이다.

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_v}{T_v} & 0 \\ \frac{K_q \eta}{I_{tot}} & -\frac{f_{tot} - K_v K_q \eta}{I_{tot}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{N} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} \frac{K_v}{T_v} \\ \frac{K_v K_q \eta}{I_{tot}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{NI_{tot}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{ac} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_q \eta}{I_{tot}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.978 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.978 \end{bmatrix}, \quad D = 0.$$

이산치 계통으로의 변환시 Sampling 주기는 0.01 [sec] 이다.

표 1 선형 위치 서보계의 파라미터 값.

TABLE 1 Parameter Values of Linear Position Servo System.

파라미터	값	단위	비고
$f_{tot}$	$19.7 \cdot 10^{-3}$	Nm/rad/s	서보 모터로의 총 마찰계수
$I_{tot}$	$2.53 \cdot 10^{-3}$	kgm <sup>2</sup>	서보 모터로의 총 관성계수
$K_q$	0.54	Nm/A	서보모터의 토크 상수
$K_v$	0.9	A/rad/s	조속기 이득
$N$	89		기어비
$\eta$	0.85		기어 효율
$T_v$	$8.8 \cdot 10^{-3}$	s	조속기의 계산 주기
$\alpha_s$	0.978		측정 scale factor

표 2 선형 위치 서보계의 변수 범위.

TABLE 2 Range of Variables in Linear Position Servo System.

변수	범위	단위	비고
$i_m$	-30 ~ 30	A	서보 모터 전류
$n_m$	-314 ~ 314	rad/s	서보모터의 축 속도
$n_{ref}$	-314 ~ 314	rad/s	서보모터의 기준 축 속도
$Q_{lm}$	-6 ~ 6	Nm	서보모터로의 부하 토크
$Q_m$	-16 ~ 16	Nm	서보 모터에 의해 생성되는 토크
$s_o$	-0.4 ~ 0.4	rad	기어를 통한 축의 위치

고장 시나리오는 다음과 같다.

1. 캐환 요소의 일시적 고장  $\Delta s_o$ ; 먼지 등의 외부 오염물질 또는 측정 장치의 마모로 인한 캐환 요소로부터 잘못된 정보 유입을 말하며, 시뮬레이션에서 +10 %의 bias 고장으로, 0.7초에서 0.9초까지 주어졌다.
2. 구동장치 고장  $\Delta i_m$ ; 기계적인 진동으로 인한 전류 제한 개폐기의 고장을 의미하며, 고장의 결과로 구동기는 양의 전류를 흐른다. 시뮬레이션에서 12 [A] 고장전류로, 2.7초에서 주어졌다. 또한, 시뮬레이션에서 위의 고장들과 함께 입력 측정장치 및 출력 측정장치에 Gaussian 잡음을 두었었다.

본 연구에서는 패리티 공간에 기반을 둔 최적 잔차 발생기법과 [9]의 구조적 잔차 발생기법을 잡음이 존재하는 상황에서 각 고장에 대하여 비교 분석하였다. 최적 잔차 발생 기법과 개루프 구조적 잔차 발생기 모두 출력 측정 장치 고장  $q(t)$ 에 대하여 그림 2와 그림 4에서 처럼 신속한 검출과 식별 성능을 가지지만, 구동장치 고장  $p(t)$ 에 대하여 최적 잔차 발생 기법이 그림 1과 그림 3의 결과에서처럼 상대적으로 우수한 검출 성능을 보인다.

### 4. 결론

본 논문에서는 패리티 공간 개념에 근거한 최적 잔차 발생 기법을 이용하여 선박용 대형 디젤 엔진의 조속기 제어를 위한 위치 서보 시스템의 고장 검출 진단 시스템을 설계하고, 잡음이 존재하는 상황에서 대상 계통에 발생할 수 있는 구동장치 고장, 센서 고장에 대한 검출 식별 성능을 분석하였다. 사용된 기법은 구동 장치 고장에 대하여 개루프 구조적 잔차 발생기보다 우수한 고장 검출 성능을 가짐을 확인하였다. 향후 연구과제는 같은 경로를 통해 들어오는 고장 및 동시에 발생하는 고장, 모델링 오

차, 파라미터 변동등의 비선형성을 갖는 Benchmark Data Set에 대한 패리티 공간 기법의 확장이다.

## 참고문헌

- [1] M. Blanke, S. A. Bogh, R. B. Jorgensen, R. Patton, "Fault Detection for a Diesel Engine Actuator a Benchmark for FDI", *IEEE Control Eng. Practice*, Vol. 3, No. 12, pp. 1731-1740, 1995.
- [2] J. Gertler, "Residual Generation in Model Based Fault Detection", *Control Theory and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 259-285, March, 1993.
- [3] J. Gertler, R. Monajemy, "Generating Directional Residual with Dynamic Parity Relations", *Automatica*, Vol. 31, No. 4, pp. 627-635, 1995.
- [4] R. Patton, P. Frank, R. Clark(ed), "Fault Diagnosis in Dynamic Systems", PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, N J, 1989.
- [5] E. Y. Chow, A.S. Willsky, "Analytical Redundancy and Design of Robust Failure Detection Systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-29, No. 7, pp. 603-614, 1984.
- [6] X. C. Lou, A.S. Willsky, G. C. Verghese, "Optimally Robust Redundancy Relations for Failure Detection in Uncertain System", *Automatica*, Vol. 22, No. 3, pp. 333-344, 1986.
- [7] N. Eva Wu, "Some Extension to the Generalized Parity Space Method For FDI", IFAC System Identification, 1994
- [8] V. C. Klema, A. J. Laub, "The Singular Value Decomposition: Its Computation and Some Applications", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-25, No. 2, pp. 164-176, April, 1980
- [9] 최경영, 박태건, 이기상, "패리티 공간기법을 이용한 위치 서보계의 고장검출", 대한 전기학회, 하계학술 대회 논문집, 제 B권, pp. 746-748, 1997.

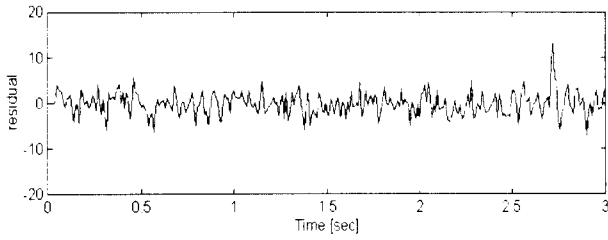


그림 1 출력 측정 고장과 구동 장치 고장 발생시, 최적 구조적 잔차  $r_{opt}^*(t|p)$

Fig 1 Optimal structured residual,  $r_{opt}^*(t|p)$

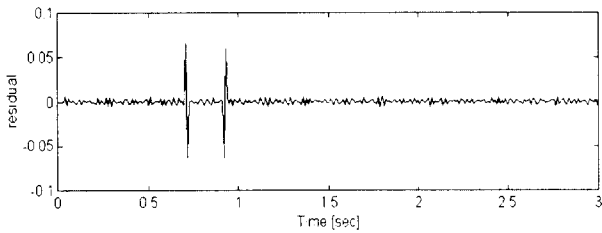


그림 2 출력 측정장치 고장과 구동 장치 고장 발생시, 최적 구조적 잔차  $r_{opt}^*(t|q)$

Fig 2 Optimal structured residual,  $r_{opt}^*(t|q)$

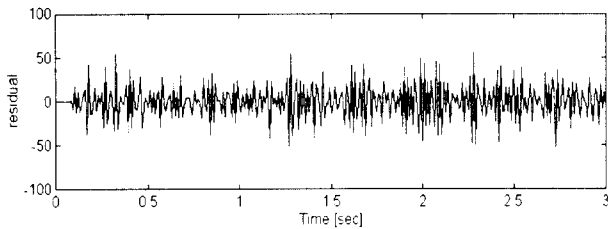


그림 3 출력 측정장치 고장과 구동 장치 고장 발생시, 개루프 구조적 잔차  $r_{ol}^*(t|p)$

Fig 3 Open-loop structured residual,  $r_{ol}^*(t|p)$

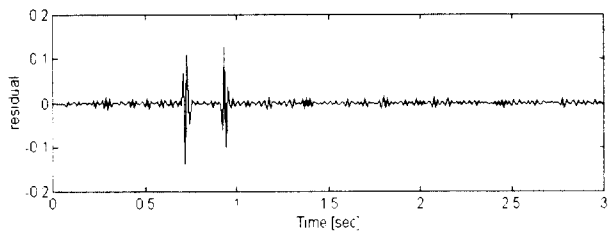


그림 4 출력 측정장치 고장과 구동 장치 고장 발생시, 개루프 구조적 잔차  $r_{ol}^*(t|q)$

Fig 4 Open-loop structured residual,  $r_{ol}^*(t|q)$