

# 정적 출력궤환 기반 강인 고장포용 제어기 설계

## Static Output-Feedback-Based Robust Fault Tolerant Controller Design

지 성 철, 문 지 현, 이 호 재\*  
(Sung Chul Jee<sup>1</sup>, Ji Hyun Moon<sup>1</sup>, and Ho Jae Lee<sup>1</sup>)  
<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Inha University

**Abstract:** This paper addresses the robust fault tolerant controller design problems of static output systems with disturbance. The fault is expressed by the abrupt chattering of system parameters. The design conditions are derived in terms of linear matrix inequalities and linear matrix equalities. An illustrative example is provided to verify performances of the proposed controller.

**Keywords:** fault tolerant control, static output feedback,  $\mathcal{H}_\infty$  performance, linear matrix inequality, linear matrix equality

### I. 서론

현대 제어시스템은 우수한 성능과 높은 신뢰도를 바탕으로 과거에 비해 더욱 다양한 환경에서 운용이 된다. 특히 높은 고도에서 정찰 임무를 수행하는 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)와 심해 탐사를 위한 무인 잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)은 높은 수준의 자율 제어기술을 적용한 시스템이다. 하지만 이러한 시스템은 사람이 접근할 수 없는 열악한 환경에서 임무수행을 하기 때문에 환경요인에 의한 고장 발생 가능성이 높다. 고장은 초기에 시스템 오동작을 일으키지만 방치될 경우 시스템 전역적 손상과 이로 인한 비용 손실을 유발할 수 있다[1,2].

고장포용제어(fault tolerant control)는 시스템에 고장이 발생하더라도 제어시스템의 안정도와 신뢰도를 유지하거나 회복하는 것을 목표로 하는 제어기술이다. 고장포용제어기는 크게 능동형과 수동형으로 나뉜다[3]. 능동형 제어기법은 고장 진단 시스템에 의해 고장을 검출하고 고장의 종류에 따라 제어를 적절히 변형시켜 시스템을 안정화하는 방법으로 대표적으로 적응제어기법이 있다[4]. 수동형 고장포용제어는 고장 유무와 상관 없이 시스템을 안정화하는 제어기법으로 강인제어기법이 대표적이다[3,5,6].

고장포용 제어기의 설계를 위해 상태궤환 제어기 설계 기법을 우선적으로 고려할 수 있다. 하지만 제어시스템의 모든 상태변수를 측정하기는 불가능한 경우가 대부분이며 가능하더라도 측정을 위한 비용이 크다. 해석적 등가 모델을 사용하는 동적 출력궤환 설계 기법 역시 고려할 수 있지만 이 방법은 구조적으로 복잡하며 페루프 시스템의 차수를 높인다[7,8]. 이러한 한계점 때문에 최근 정적 출력궤환 제어가 대안으로써 크게 주목을 받고 있다. 정적 출력궤환 기법은 차수가 낮을 뿐 아니라 동적 출력궤환 기법보다 구조적으로 간단하다. [6]에서는 정적 출력궤환 설계 기법을 사용한 고장포

용제어기 설계 문제를 제시하였다.

고장은 그 형태에 따라 합형 고장과 곱형 고장으로 나눌 수 있다. 다양한 연구에서 시스템의 동역학 방정식에 더해지는 형태의 합형 고장이 다루어졌으나 실제로 고장은 그 보다 더 복잡한 곱형 형태로 나타나기도 한다. 곱형 고장은 시스템의 성분에 직접적인 변화를 일으키는 파라미터 불확실성과 유사한 형태로 나타나며 제어시스템의 안정도와 신뢰도에 직접적인 영향을 미친다[9,10]. 이와 더불어 외부에서 유입되는 외란도 제어시스템의 성능을 저해하는 요소이다. [11-14]에서 외란에 대한 강인성을 보장하기 위한 방법으로  $\mathcal{H}_\infty$  제어 기법을 사용하였다.

본 논문은 외란을 포함한 정적 출력궤환 시스템의 강인 고장포용 제어기 설계 문제를 다룬다. 고장은 시스템 행렬 파라미터의 변화로 표현되며 외부에서 유입되는 외란을 가정한다. 외란에 대한  $\mathcal{H}_\infty$  성능을 보장하고 고장을 포용할 수 있는 제어기를 설계하기 위해 선형행렬부등식과 선형행렬방정식의 설계조건을 제시한다.

본 논문은 표준 표기법을 따른다.  $A = A^T < 0$ 는 음반정행렬을 뜻한다.  $\|x\|$ 와  $\|x\|_{\mathcal{L}_2}$  ( $\|x\|_{l_2}$ )는 각각 유클리디안 놈과  $\mathcal{L}_2(l_2)$  놈을 의미한다. 임의의 대각행렬  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 에 대하여  $|X| := \text{diag}\{|X_{11}|, \dots, |X_{nn}|\}$ 와 같이 정의한다. 대칭 행렬 표기에 대하여 다음과 같은 생략법을 사용한다.

$$K \begin{bmatrix} \text{He}\{S\} & * \\ M & Q^* \end{bmatrix} * := K \begin{bmatrix} S + S^T & M^T \\ M & QQ^T \end{bmatrix} K^T$$

### II. 연속시간 시스템

다음은 곱형 고장을 포함하는 연속시간 시스템의 동역학이다.

$$\begin{cases} \dot{x} = A(I + F)x + B_u u + B_w w \\ y = C(I + F)x \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $x \in \mathbb{R}^n$ 는 상태,  $u \in \mathbb{R}^p$ 는 입력,  $w \in \mathbb{R}^l$ 는 외란,  $y \in \mathbb{R}^m$ 는 출력,  $F = \text{diag}\{f_1, \dots, f_n\}$ 는 미지의 고장신호이다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 20, 2013 / revised May 28, 2013 / accepted May 28, 2013

지성철, 문지현, 이호재: 인하대학교 전자공학과  
(jeesch@inha.edu/moonjih87@gmail.com/mylchi@inha.ac.kr)

가정 1: 고장행렬  $F$ 에 대하여 다음을 가정한다.

$$|F| \leq \Delta = \text{diag}\{\delta_1, \dots, \delta_n\}, \delta_i \in \mathbb{R}_{\geq 0}, i \in \mathcal{I}_n := \{1, \dots, n\}$$

본 논문은 시스템 (1)이 출력회환 시스템을 가정한다. 제어 입력  $u := Ky$ 를 정의하면 다음과 같은 폐루프 시스템을 얻는다.

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + B_u KC)(I + F)x + B_w w \\ y = C(I + F)x \end{cases} \quad (2)$$

보조정리 1:  $|\Sigma| \leq U$ 를 만족하는 시변행렬  $\Sigma$ 와 대각행렬  $U$ 에 대하여 다음 부등식이 성립한다.

$$R_1 \Sigma R_2 + R_2^T \Sigma^T R_1^T \leq \alpha R_1 U R_1^T + \alpha^{-1} R_2^T U R_2$$

여기서  $R_1, R_2$ 은 임의의 상수 행렬이며  $\alpha \in \mathbb{R}_{>0}$ 이다.

정의 1: 가정 1을 만족하는 임의의 고장  $F$ 와 주어진 상수  $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여 다음을 만족한다면 폐루프 시스템 (2)는 고장포용제어 성능과 외란  $w$ 에 대한 출력  $y$ 의  $\mathcal{H}_\infty$  성능을 만족한다.

(C1)  $w = 0$ 에 대하여 (2)는 점근적으로 안정하다.

(C2)  $\|y\|_{\mathcal{L}_2} < \gamma \|w\|_{\mathcal{L}_2}$

### III. 주요결과

주어진  $\alpha \in \mathbb{R}_{>0}, \Delta$ 에 대하여 다음의 선형행렬부등식을 만족하는 행렬들  $P = P^T > 0, M, N$ 이 존재한다면 폐루프 시스템 (2)는 점근적으로 안정하며  $\mathcal{H}_\infty$  성능을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} \text{He}\{PA + B_u MC\} & * & * & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * & * & * \\ C & 0 & -I & * & * \\ A^T P + C^T M^T B_u^T & 0 & C^T & -\alpha^{-1} \Delta^{-1} & * \\ I & 0 & 0 & 0 & -\alpha \Delta^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (3)$$

$$PB_u - B_u N = 0 \quad (4)$$

여기서 제어이득행렬  $K = N^{-1}M$ 이다.

증명: 다음 형태의 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 가정하자.

$$V = x^T P x$$

여기서  $P = P^T > 0$ 이다. 정의 1의 (C1)은 다음으로부터 만족된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \text{He} \left\{ \begin{bmatrix} (A + B_u KC)(I + F) & B_w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} & * \\ B_w^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} < 0 \end{aligned}$$

$w = 0$ 인 경우 다음 조건을 만족한다면 리아푸노프 안정도 이론에 의해 폐루프 시스템 (2)가 점근적으로 안정하다.

$$\begin{aligned} x^T \text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} x &< 0 \\ \Leftrightarrow \text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} &< 0 \\ \Leftrightarrow (C1) \end{aligned}$$

이제 (C2)를 만족하는 설계조건을 구하기 위해 다음 해밀턴—자코비—벨만(Hamilton—Jacobi—Bellman) 부등식을 고려하자.

$$\|y\|^2 - \gamma^2 \|w\|^2 < 0 \quad (5)$$

위 식을  $t \in [0, T], T \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  구간에서 적분하면 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_0^T \|y\|^2 d\tau - \gamma^2 \int_0^T \|w\|^2 d\tau &< V(0) - V(T) \\ &\leq V(0) \\ &= 0 \\ &\Leftrightarrow (C2) \end{aligned}$$

따라서 (C2)  $\Leftrightarrow$  (5)의 관계가 성립한다. 식 (5)는 다음과 동치이다.

$$\begin{aligned} &[C(I + F) \quad 0]^T * \\ &+ \begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \\ \Leftrightarrow &\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * \\ C(I + F) & 0 & -I \end{bmatrix} \\ = &\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)\} & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * \\ C & 0 & -I \end{bmatrix} \\ &+ \text{He} \left\{ \begin{bmatrix} P(A + B_u KC) \\ 0 \\ C \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} < 0 \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 Schur complement를 사용하였다. 식 (1)에서  $|F| \leq \Delta$ 을 가정하였으므로 보조정리 1을 도입하면 다음 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} (6) \Leftrightarrow &\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)\} & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * \\ C & 0 & -I \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} P(A + B_u KC) & I \\ 0 & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \Delta & * \\ 0 & \alpha^{-1} \Delta \end{bmatrix} * < 0 \\ \Leftrightarrow &\begin{bmatrix} \text{He}\{P(A + B_u KC)\} & * & * & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * & * & * \\ C & 0 & -I & * & * \\ (A + B_u KC)^T P & 0 & C^T & -\alpha^{-1} \Delta^{-1} & * \\ I & 0 & 0 & 0 & -\alpha \Delta^{-1} \end{bmatrix} \\ = &\begin{bmatrix} \text{He}\{PA + B_u NKC\} & * & * & * & * \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & * & * & * \\ C & 0 & -I & * & * \\ A^T P + C^T K^T N^T B_u^T & 0 & C^T & -\alpha^{-1} \Delta^{-1} & * \\ I & 0 & 0 & 0 & -\alpha \Delta^{-1} \end{bmatrix} \\ &< 0 \\ \Leftrightarrow &(3) \end{aligned}$$

여기서 Schur complement와  $PB_u = B_u N$ 의 변수치환을 사용하였다.  $NK = M$ 의 변수치환을 하면 마지막 동치관계가 성립한다.

참고 1: 정리 1의 식 (4)는 매우 작은  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여

다음의 선형행렬부등식으로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon I & * \\ PB_u - B_u N & -\varepsilon I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (7)$$

참고 2: 정리 1의 선형행렬부등식 (3)은 페루프 시스템 (2)의  $\mathcal{H}_\infty$  성능뿐 아니라 고장포용제어 성능을 포함한다. 시스템 (2)의 점근적 안정성은  $\text{He}\{P(A + B_u KC)(I + F)\} \prec 0$  으로부터 만족되며 식 (6)에 나타나있다.

#### IV. 이산시간 시스템

다음 형태의 이산시간 시스템을 고려하자.

$$\begin{cases} x_{k+1} = A(I + F)x_k + B_u u_k + B_w w_k \\ y_k = C(I + F)x_k \end{cases} \quad (8)$$

제어입력  $u_k = Ky_k$ 을 사용하면 다음 형태의 페루프 모델을 얻는다.

$$\begin{cases} x_{k+1} = A(I + F)x_k + B_u KC(I + F)x_k + B_w w_k \\ y_k = C(I + F)x_k \end{cases} \quad (9)$$

이산시간 시스템의  $\mathcal{H}_\infty$  성능은 다음으로부터 만족된다.

$$\|y_k\|_{l_2} < \gamma \|w_k\|_{l_2} \quad (10)$$

정리 2: 주어진  $\alpha \in \mathbb{R}_{>0}$ ,  $\Lambda$ 에 대하여 다음의 선형행렬부등식을 만족하는 행렬들  $P = P^T \succ 0$ ,  $M$ ,  $N$ 이 존재한다면 페루프 시스템 (9)는 점근적으로 안정하며  $\mathcal{H}_\infty$  성능을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} -P & * & * \\ B_w^T PA + B_u MC & -\gamma^2 I & * \\ C & 0 & -I \\ PA + B_u MC & PB_w & 0 \\ 0 & A^T P + C^T M^T B_u^T B_w^T & C \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$PB_u - B_u N = 0 \quad (12)$$

여기서 제어이득행렬  $K = N^{-1}M$ 이다.

증명: 다음형태의 해밀턴-자코비-벨만 부등식을 고려하자.

$$\|y_k\|^2 - \gamma^2 \|w_k\|^2 + \Delta V_k < 0 \quad (13)$$

위 식을  $k$ 에 대하여 0에서  $K \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 까지 더하면 다음 관계를 얻는다.

$$\sum_{\tau=0}^K \|y_\tau\|^2 - \gamma^2 \sum_{\tau=0}^K \|w_\tau\|^2 < V_0 - V_K \leq V_0 = 0 \Leftrightarrow (10)$$

따라서 (10) $\Leftrightarrow$  (13)의 관계가 성립한다. 식 (13)은 다음과 동치다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -P & * \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C(I + F) & 0 \\ (A + B_u KC)(I + F) & B_w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I & * \\ 0 & P \end{bmatrix} * \prec 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} -P & * & * & * \\ B_w^T P(A + B_u KC)(I + F) & -\gamma^2 I & * & * \\ C(I + F) & 0 & -I & * \\ P(A + B_u KC)(I + F) & PB_w & 0 & -P \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$+ \text{He} \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ B_w^T P(A + B_u KC) \\ C \\ P(A + B_u KC) \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \prec 0 \quad (14)$$

여기서 Schur complement를 사용하였다. 보조정리 1을 도입하면 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} (14) \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} -P & * & * & * \\ B_w^T P(A + B_u KC) & -\gamma^2 I & * & * \\ C & 0 & -I & * \\ P(A + B_u KC) & PB_w & 0 & -P \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 & I \\ B_w^T P(A + B_u KC) & 0 \\ C & 0 \\ P(A + B_u KC) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \Delta & * \\ 0 & \alpha^{-1} \Delta \end{bmatrix} * \prec 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} -P & * & * \\ B_w^T P(A + B_u KC) & -\gamma^2 I & * \\ C & 0 & -I \\ P(A + B_u KC) & PB_w & 0 \\ 0 & (A + B_u KC)^T PB_w & C \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ -P & * & * \\ (A + B_u KC)^T P & -\alpha^{-1} \Delta^{-1} & * \\ 0 & 0 & -\alpha \Delta^{-1} \end{bmatrix} \\ = & \begin{bmatrix} -P & * & * \\ B_w^T PA + B_u NKC & -\gamma^2 I & * \\ C & 0 & -I \\ PA + B_u NKC & PB_w & 0 \\ 0 & A^T P + C^T K^T N^T B_u^T B_w^T & C \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ -P & * & * \\ A^T P + C^T K^T N^T B_u^T & -\alpha^{-1} \Delta^{-1} & * \\ 0 & 0 & -\alpha \Delta^{-1} \end{bmatrix} \prec 0 \\ \Leftrightarrow & (11) \end{aligned}$$

여기서 Schur complement, 변수치환  $PB_u = B_u N$ 을 사용하였다.  $NK = M$ 의 변수치환을 하면 마지막 동치관계가 성립한다.

#### V. 모의실험

다음 시스템 파라미터를 가지는 (1) 형태의 시스템을 고려하자[15].

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -3 & 2 \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 1 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0]$$

정의 1을 만족하는 제어를 설계하기 위해 주어진  $\alpha = 1$ ,  $\gamma = 0.7$ ,  $\varepsilon = 0.01$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = 0.0229$ 에 대하여 정리 1의 식 (3)과 참고 1의 식 (7)을 풀면 제어 이득  $K = -2429.01$ 을 얻을 수 있다. 시변 고장  $|F| \leq \text{diag}\{0.0229, 0.0229\}$ 는 그림 1과 같이 시간구간  $t \in [10, 30)$ 에서 불규칙하게 발생하고 외란  $w \in (-1, 1)$ 는  $t \in \{[0, 10), [20, 30)\}$ 에서 그림 2와 같이 불규칙하게 발생한다. 초기 값  $x = (0, 0)$ 을 선정하여 시간구간  $t \in [0, 30)$ 에서 모의실험을 실시한 결과 시스템의 출력은

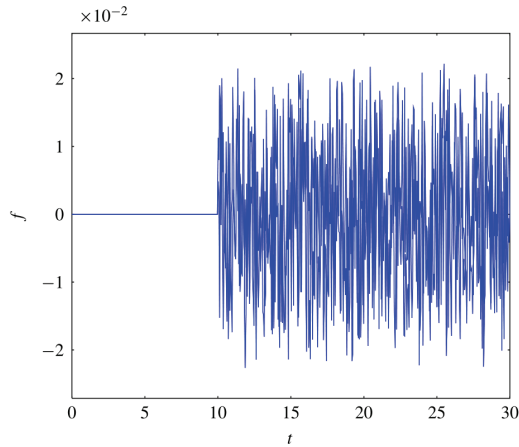


그림 1. 고장.  
Fig. 1. Fault.

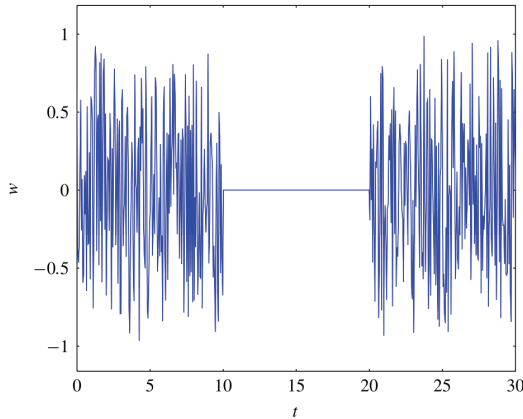


그림 2. 외란.  
Fig. 2. Disturbance.

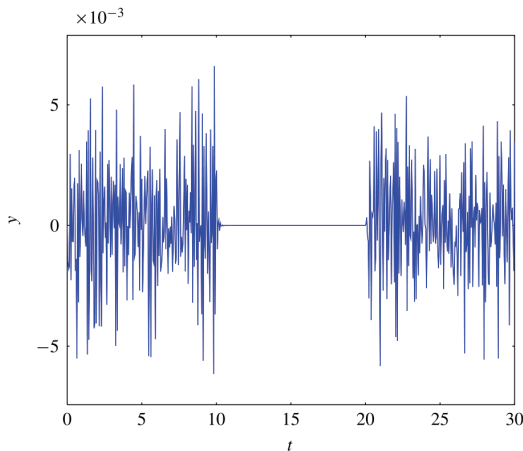


그림 3. 출력.  
Fig. 3. Output.

그림 3과 같이 나타난다.

먼저 시간구간  $t \in [10, 20)$  을 살펴보자.  $t \in [10, 20)$  에서 외란은 발생하지 않지만 고장은 불규칙한 모습으로 나타난다. 고장이 발생하였지만 그림 3에서 보여지듯이 출력  $y$  는 안정한 모습을 보인다. 시간구간  $t \in \{[0, 10), [20, 30)\}$  에서

는 외란이  $w \in (-1, 1)$  의 구간 내에서 불규칙적으로 발생하지만 출력은  $y \in (-0.01, 0.01)$  의 값을 가져 외란에 강인한 성능을 보인다.

## VI. 결론

본 논문은 외란을 포함한 연속/이산시간 시스템의 고장포용 제어기 설계 문제를 다루었다. 시변 고장을 가정하였으며 출력제한 시스템의 고장포용 제어 성능과 외란에 대한  $\mathcal{H}_\infty$  성능을 동시에 고려하였다. 이를 만족하는 제어기 설계 조건은 선형행렬부등식과 선형행렬방정식으로 제시하였다. 모의 실험을 통해 설계된 제어기의 강인 제어 성능을 검증하였다.

## REFERENCES

- [1] S. C. Jee, H. J. Lee, and D. W. Kim, "Observer-based fault tolerant controller design for multi-UAV systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 540-545, May 2012.
- [2] S. C. Jee, H. J. Lee, and D. W. Kim, "Observer-based fault tolerant controller design for T-S fuzzy systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 11, pp. 1154-1158, Nov. 2012.
- [3] X. Cai and F. Wu, "Robust parameter-dependent fault-tolerant control for actuator and sensor faults," *Internal Journal Control*, vol. 83, no. 7, pp. 1475-1484, Jun. 2010.
- [4] G. Tao, S. M. Joshi, and X. Ma, "Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, no. 1, pp. 78-95, Jan. 2001.
- [5] S. Ye, Y. Zhang, X. Wang, and B. Jiang, "Fault-tolerant control for a class of uncertain systems with actuator faults," *Innovative Computing, Information and Control (ICICIC), 2009 Fourth International Conference on*, pp. 1519-1522, Dec. 2009.
- [6] S. Ye, Y. Zhang, X. Wang, and Y. Li, "An improved LMI approach for static output feedback fault-tolerant control with application to flight tracking control," *Proc. of Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*, pp. 35-40, May 2009.
- [7] H. J. Lee and D. W. Kim, "Robust stabilization of T-S fuzzy systems: Fuzzy static output feedback under parametric uncertainty," *International Journal of Control Automation and Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 731-736, Oct. 2009.
- [8] X. G. Yan, C. Edwards, and S. K. Spurgeon, "Decentralised robust sliding model control for a class of nonlinear interconnected systems by static output feedback," *Automatica*, vol. 40, pp. 613-620, Apr. 2004.
- [9] W. H. Lee, C. G. Park, D. H. Lee, and K. H. Kim, "Improvement of the double fault detection performance of extended parity space approach," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 10, pp. 1002-1008, Oct. 2009.
- [10] H. J. Lee and D. W. Kim, " $\mathcal{H}_\infty$  fault detection observer design for large scale time-invariant systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 8, pp. 818-822, Aug. 2009.
- [11] J. Liu, J. L. Wang, and G-H. Yang, "An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection," *Automatica*, vol. 41, no. 11, pp. 1995-2004, Nov.

2005.

- [12] J. L. Wang, G-H. Yang, and J. Liu, "An LMI approach to  $\mathcal{H}_2$  index and mixed  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  fault detection observer design," *Automatica*, vol. 43, no. 9, pp. 1656-1665, Sep. 2007.
- [13] L. Bai, Z. Tian, and S. Shi, "Design of  $\mathcal{H}_\infty$  robust fault detection filter for linear uncertain time-delay systems," *ISA Transactions*, vol. 45, no. 4, pp. 491-502, Sep. 2006.
- [14] J. Guo, X. Huang, and Y. Cui, "Design and analysis of robust fault detection filter using LMI tools," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 57, pp. 1743-1747, Jun. 2009.
- [15] W. Xing, Q. Zhang, J. Zhang, and Q. Wang, "Some geometric properties of Lyapunov equation and LTI system," *Automatica*, vol. 37, no. 2, pp. 313-316, Feb. 2001.



### 지 성 철

2009년 인하대학교 전자공학부(공학사).  
2011년 인하대학교대학원 전자공학과  
(공학석사). 2011년~현재 동 대학원 전  
자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는  
고장 진단 시스템, 퍼지 시스템, 디지털,  
제어 시스템.



### 문 지 현

2012년 인하대학교 전자공학부(공학사).  
2012년~현재 동 대학원 전자공학과 석  
사과정 재학중. 관심분야는 퍼지 시스  
템, 디지털 재설계.



### 이 호 재

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사).  
2000년 연세대학교대학원 전기컴퓨터공  
학과(공학석사). 2004년 동 대학원 전기  
전자 공학과(공학박사). 2005년 Univer-  
sity of Houston, Houston, TX, USA 방문조  
교수. 현재 인하대학교 전자전기공학부  
부교수. 관심분야는 비선형 샘플치제어, 편대비행 제어, 디지  
털 재설계.