

입력관측기의 정량적 성능지표 (II) - 정상상태 해석 -

정종철* · 이범석** · 허건수†

(2002년 2월 8일 접수, 2002년 7월 29일 심사완료)

A Quantitative Performance Index for an Input Observer (II) - Analysis in Steady-State -

Jongchul Jung, Boemsuk Lee and Kunsoo Huh

Key Words : Performance Index(성능지표), CSIO(Closed-loop State and Input Observer), Robustness(강인성), Condition Number, Steady-State(정상상태), Norm(크기)

Abstract

The closed-loop state and input observer is a pole-placement type observer and estimates unknown state and input variables simultaneously. Pole-placement type observers may have poor performances with respect to modeling error and sensing bias error. The effects of these ill-conditioning factors must be minimized for the robust performance in designing observers. In this paper, the steady-state performance of the closed-loop state and input observer is investigated quantitatively and is represented as the estimation error bounds. The performance indices are selected from these error bounds and are related to the robustness with respect to modeling errors and sensing bias. By considering both transient and steady-state performance, the main performance index is determined as the condition number of the eigenvector matrix based on L_2 -norm.

1. 서론

미지의 입력이 존재하는 시스템에 대한 극점배치기법의 입력관측기의 연구가 진행되어 왔다.^(1~3) Park and Stein⁽¹⁾은 더미변수를 이용한 극점배치 기법과 측정출력의 미분값을 이용하여 상태변수와 입력변수를 추정하는 관측기를 설계하였으며, Corless and Tu⁽²⁾는 불확실성이 존재하는 시스템에서 Lyapunov-type 조건에 의해 상태변수와 입력변수를 추정하는 관측기를 제안하였다.

그러나 임의의 극점배치에 의한 선형관측기는 미지의 초기 상태 추정값, 파라미터의 변화, round-off 오차나 센싱오차 같은 요소에 매우 민감하게 설계될 수 있으므로 이러한 요소들에 강인한 관측

기의 설계가 필요하다.

상태 관측기의 경우 불확실성 요소에 강인한 설계 기법들이 연구되었다. 고유값/고유벡터의 강인한 극점배치에 관한 다양한 연구가 이루어졌으며 고유벡터의 condition number의 크기가 성능에 큰 영향을 미침을 보았다.^(4~9) 또한, Fattouh 등⁽¹⁰⁾은 LMI(Linear Matrix Inequality)를 이용하여 불확실성이 존재하는 시스템의 추정오차를 줄이는 강인한 관측기를 설계하였다. 그리고 Huh and Stein⁽⁹⁾은 관측기 성능에 대한 ill-conditioning(성능을 강인하지 못하게 하는) 요소의 영향을 정량적으로 나타내었고, 이를 토대로 well-conditioned(성능이 강인한) 상태관측기를 설계하는 방법을 제안하였다.⁽¹¹⁾

본 논문에서는 입력변수와 상태변수를 동시에 추정하는 CSIO 입력관측기에 있어서 모델링오차와 센싱오차 등의 불확실성에 대한 정상상태의 성능지표를 결정하고자 한다. CSIO도 Luenberger 관측기⁽¹²⁾와 마찬가지로 극점배치 방법 때문에 모델링오차나 센싱오차 등의 ill-conditioning 요소로 인하여 정상상태에서 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 삼성테크윈(주)

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-4584

CSIO 관측기 설계시 ill-conditioning 요소들이 과도상태 성능에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는 성능지표가 이미 결정되었고,⁽¹³⁾ 본 논문에서는 이를 확장하여 정상상태에서의 성능지표를 구하고, 과도상태의 성능지표⁽¹³⁾와 정상상태의 성능지표를 하나의 주지표로 통합하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 CSIO를 소개하였고, 3장에서는 모델링오차와 센싱오차로 인한 정상상태 오차에 관한 CSIO의 성능지표를 결정하였다. 4장에서는 여러 성능지표들을 통합한 하나의 주지표를 제안하였고, 5장에서 예제를 통해 CSIO의 정량적 성능지표를 검증하였다.

2. Closed loop State and Input Observer⁽¹⁾

선형시불변 다중입출력 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y_1 = Cx$$

$$y_2 = Du$$

여기서 $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $y_1 \in \mathbb{R}^p$, $y_2 \in \mathbb{R}^q$ 이며 y_1 과 y_2 는 상태변수와 입력변수의 측정 출력이다.

특이값 분해⁽¹⁴⁾를 도입하여 더미변수(Dummy variable) ξ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\xi = {}_2V_N^T(I - LN)x$$

여기서, $L = B_2V_D$, $N = MC$, $M = (CL)^+$ 이다. 또한 더미변수를 이용하여 다음의 방정식을 유도할 수 있다.

System Equations :

$$\dot{\xi} = A'\xi + B'_1y_1 + B'_2y_2 \quad (2)$$

$$x = {}_2V_N\xi + LM y_1 \quad (3)$$

$$u = {}_2V_D M y_1 - {}_2V_D N A_2 V_N \xi - {}_2V_D N A L M y_1 + (I - {}_2V_D N B) D^+ y_2 \quad (4)$$

여기서, $A' = {}_2V_N^T(I - LN)A_2V_N$, $B'_1 = {}_2V_N^T(I - LN)A L M$, $B'_2 = {}_2V_N^T(I - LN)B D^+$ 이다.

Observer dynamics :

$$\dot{\hat{\xi}} = A'\hat{\xi} + B'_1y_1 + B'_2y_2 + K_2V_M^T(y_1 - C\hat{x}) \quad (5)$$

$$\hat{x} = {}_2V_N\hat{\xi} + LM y_1 \quad (6)$$

$$\hat{u} = {}_2V_D M y_1 - {}_2V_D N A_2 V_N \hat{\xi} - {}_2V_D N A L M y_1 + (I - {}_2V_D N B) D^+ y_2 \quad (7)$$

Error dynamics :

$$\dot{e} = (A' - KC')e \equiv A'_c e \quad (8)$$

$$e_x = {}_2V_N e \quad (9)$$

$$e_u = -{}_2V_D N A_2 V_N e \quad (10)$$

여기서, $C' = {}_2V_M^T C_2 V_N$, $A'_c = A' - KC'$ 이다. $e = \xi - \hat{\xi}$, $e_x = x - \hat{x}$, $e_u = u - \hat{u}$ 이며 각각 더미변수 오차, 상태변수 오차와 입력변수 오차로 정의한다. 식 (8)의 행렬의 고유값이 안정영역에 존재하도록 게인 K 를 설계하면 더미변수 오차, 상태변수 오차와 입력변수 오차는 영으로 수렴한다.

3. 정상상태의 성능지표

CSIO에서 두 ill-conditioning 요소에 대한 정상상태 성능 해석, 즉, 임의의 모델링오차와 센싱오차에 대한 관측기의 정상상태 오차의 성능지표에 대해 다룬다. 정상상태 오차에 대한 ill-conditioning 요소의 영향을 상대 추정오차의 크기로 표현하였고 정상상태 성능지표를 위해 더미/상태/입력 변수 각각 그 상한값이 유도되었다.

모델의 불확실성이 있는 실제 플랜트를 다음과 같이 가정한다.

Real Plant :

$$\dot{x} = \underline{A}x + Bu$$

Model :

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

여기서, \underline{A} 는 실제 플랜트 모델이고, A 는 시스템 모델이다. 또한 입출력 측정시 정적 측정 편차가 존재할 때 측정값은 다음의 형태로 표현할 수 있다.

Measurement :

$$y'_1 = y_1 + \delta y_1$$

$$y'_2 = y_2 + \delta y_2$$

여기서, δy_1 과 δy_2 는 입력과 출력에서의 정적 센싱 편차이다.

3.1 더미변수에 대한 정상상태 성능해석

식 (2)의 더미변수에 대한 미분방정식은 모델링 오차를 고려하면 다음 식과 같다.

$$\dot{\xi} = \underline{A}'\xi + \underline{B}'_1y_1 + B'_2y_2 \quad (11)$$

여기서 \underline{A}' 와 \underline{B}'_1 은 실제 플랜트 행렬(\underline{A})과 관련된 항이다. 관측기 방정식에 모델링오차와 입출력

센싱오차를 고려하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\xi}} = A' \hat{\xi} + B'_1 y'_1 + B'_2 y'_2 + K_2 V_M^T (y'_1 - C \hat{x}) \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 더미변수에 대한 오차 방정식을 구할 수 있으며 식 (13)과 같다.

$$\dot{e} = \dot{\xi} - \dot{\hat{\xi}} = A'_c e - \left\{ (A' - \underline{A}') \xi + (B'_1 - \underline{B}'_1) y_1 + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2 \right\} \quad (13)$$

정상상태에서는 $\dot{e} = 0$ 이므로 정상상태 오차는 다음과 같다.

$$e_{ss} = (A'_c)^{-1} \left\{ (A' - \underline{A}') \xi_{ss} + (B'_1 - \underline{B}'_1) y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2 \right\} \quad (14)$$

단, 행렬 A'_c 의 역행렬이 존재한다고 가정한다. 식 (14)에 L_2 -norm을 취하면 더미변수에 대한 상대 추정오차를 구할 수 있으며 그 상한값은 다음과 같다.

$$\frac{\|e_{ss}\|_2}{\|\xi_{ss}\|_2} \leq \kappa_2(A'_c) \left\{ \frac{\|A' - \underline{A}'\|_2}{\|A'_c\|_2} + \frac{\|(B'_1 - \underline{B}'_1) y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2\|_2}{\|A'_c\|_2 \|\xi_{ss}\|_2} \right\} \quad (15)$$

여기서 $\kappa_2(A'_c) = \|A'_c\|_2 \cdot \|A'_c^{-1}\|_2$ 이며 행렬 A'_c 의 L_2 -norm에 의한 condition number이다.

3.2 상태변수에 대한 정상상태 성능해석

상태변수에 대한 모델링오차와 센싱오차를 고려하면 상태변수의 실제값과 추정값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= {}_2V_N \xi + LM y_1 \\ \hat{x} &= {}_2V_N \hat{\xi} + LM y'_1 \end{aligned}$$

또한 상태변수 추정오차, e_x 는 다음과 같다.

$$e_x = x - \hat{x} = {}_2V_N e - LM \delta y_1 \quad (16)$$

식 (16)에 대한 정상상태 오차는 식 (17)과 같다.

$$e_{x,ss} = {}_2V_N e_{ss} - LM \delta y_1 \quad (17)$$

식 (17)에 식 (14)를 대입하면 상태변수에 대한 정상상태 오차를 구할 수 있다.

$$e_{x,ss} = {}_2V_N (A'_c)^{-1} \cdot \left\{ (A' - \underline{A}') \xi_{ss} + (B'_1 - \underline{B}'_1) y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2 \right\} - LM \delta y_1 \quad (18)$$

식 (18)에 L_2 -norm을 취하면 상태변수 추정오차의 상한값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \|e_{x,ss}\|_2 \leq & \frac{\kappa_2(A'_c) \|{}_2V_N\|_2}{\|A'_c\|_2} \cdot \left\{ \|A' - \underline{A}'\|_2 \cdot \|\xi_{ss}\|_2 \right. \\ & \left. + \|(B'_1 - \underline{B}'_1) y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2\|_2 \right\} \\ & + \|LM \delta y_1\|_2 \end{aligned} \quad (19)$$

또한 더미변수에 대한 정상상태에서의 L_2 -norm은 식 (20)과 같이 구할 수 있으므로

$$\|\xi_{ss}\|_2 \leq \|{}_2V_N^T (I - LN)\|_2 \cdot \|x_{ss}\|_2 \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 이용하여 상태변수에 대한 상대오차의 상한값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\|e_{x,ss}\|_2}{\|x_{ss}\|_2} \leq & \frac{\kappa_2(A'_c) \|{}_2V_N\|_2}{\|A'_c\|_2} \cdot \left\{ \|A' - \underline{A}'\|_2 \cdot \|{}_2V_N^T (I - LN)\|_2 \right. \\ & \left. + \frac{\|(B'_1 - \underline{B}'_1) y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T) \delta y_1 + B'_2 \delta y_2\|_2}{\|x_{ss}\|_2} \right\} \\ & + \frac{\|LM \delta y_1\|_2}{\|x_{ss}\|_2} \end{aligned} \quad (21)$$

3.3 입력변수에 대한 정상상태 성능해석

모델링오차와 입출력 센싱오차를 고려하여 실제 입력과 추정 입력에 관한 식을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} u &= {}_2V_D M y_1 - {}_2V_D N \underline{A}_2 V_N \xi - {}_2V_D N \underline{A} L M y_1 \\ & + (I - {}_2V_D N B) D^+ y_2 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \hat{u} &= {}_2V_D M y'_1 - {}_2V_D N \underline{A}_2 V_N \hat{\xi} - {}_2V_D N \underline{A} L M y'_1 \\ & + (I - {}_2V_D N B) D^+ y'_2 \end{aligned} \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)을 이용하여 입력 오차를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_u &= -{}_2V_D N \underline{A}_2 V_N e + {}_2V_D N (A - \underline{A}) x \\ & + ({}_2V_D N \underline{A} L M \delta y_1 - (I - {}_2V_D N B) D^+ \delta y_2 - {}_2V_D M \delta y_1) \end{aligned} \quad (24)$$

입출력 측정오차가 정적편향오차(static bias error)라 가정하였기 때문에 $\delta y_1 = 0$ 이며, 정상상태에서의 입력변수의 오차 방정식은 식 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} e_{u,ss} &= -{}_2V_D N \underline{A}_2 V_N e_{ss} + {}_2V_D N (A - \underline{A}) x_{ss} \\ & + {}_2V_D N \underline{A} L M \delta y_1 - (I - {}_2V_D N B) D^+ \delta y_2 \end{aligned} \quad (25)$$

또한 식 (25)에 L_2 -norm을 취하면 상대오차를 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\|e_{u,ss}\|_2}{\|u_{ss}\|_2} \leq \frac{\kappa_2(A'_c) \|V_D N A_2 V_N\|_2}{\|A'_c\|_2} \cdot \left\{ \frac{\|A' - A\|_2 \cdot \|\xi_{ss}\|_2}{\|u_{ss}\|_2} + \frac{\|(B'_1 - B'_1)y_{1,ss} + (B'_1 + K_2 V_M^T)\delta y_1 + B'_2 \delta y_2\|_2}{\|u_{ss}\|_2} \right\} + \frac{\|\Delta E\|_2}{\|u_{ss}\|_2} \quad (26)$$

where, $\Delta E = V_D N(A - A)x_{ss} + V_D N A L M \delta y_1 - (I - V_D N B) D^* \delta y_2$

식 (15), (21), (26)의 결과를 종합하면, 정상상태에서의 모델링오차나 센싱오차에 작은 민감도를 가지기 위한 성능지표는 $\kappa_2(A'_c)$ 이며, 이 지표를 줄임으로써 모델링오차나 센싱오차의 ill-conditioning 요소에 강인한 관측기를 설계할 수 있다.

4. CSIO의 성능 주지표

과도상태에서의 여러가지 ill-conditioning 요소에 대한 정량적 성능지표는 $\kappa_2(A'_c)$, $\kappa_1(P)$ 와 $1/|q_1^T p_1|$ 이며,⁽¹³⁾ 정상상태에서의 모델링오차와 센싱오차에 대한 성능지표는 $\kappa_2(A'_c)$ 이다. 관측기 성능 관점에서 이러한 성능지표는 최소화되도록 설계되어야 한다. 또한, 여러 성능지표들의 통합은 관측기 설계 시 설계인자를 줄여줌으로써 설계 절차를 단순화시킬 수 있다. Condition number의 특성에 의해 위의 성능지표들은 다음의 관계식들을 가지고 있으며⁽¹⁴⁾

$$\kappa_1(P) \leq n \cdot \kappa_2(P)$$

$$|q_1^T p_1|^{-1} \leq \kappa_2(P)$$

$$\kappa_2(A'_c) \leq \kappa_2^2(P) \frac{|\mu_1|}{|\mu_n|}$$

따라서 $\kappa_2(P)$ 를 하나의 주지표로 결정할 수 있다.

5. 예 제

스핀들 드라이브 시스템에서 ill-conditioning 요소와 성능지표 간의 관계를 알아보고, 상태변수와 입력변수에 대한 추정 성능을 살펴보았다. 고려된 시스템은 다음과 같으며 4차 선형 상태방정식으로 파라미터는 시뮬변으로 가정했다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y_1 = Cx$$

$$y_2 = Du$$

여기서, y_1 은 상태변수의 측정 출력이고, y_2 는 입력변수의 측정 출력이다. 또한 각각의 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} -R_b/I_g & k/I_m & 0 & -1/C \\ -k/I_g & -R_i/I_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_w/I_w & 1/C \\ 1/I_g & 0 & -1/I_w & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = [P_g \quad P_m \quad P_w \quad \theta]^T$$

$$u = [V \quad F]^T$$

위 모델에서 사용된 변수와 파라미터에 대한 정의는 다음과 같다.

- C : 파워 트레인의 컴플라이언스 (1/6000 rad/N·m)
- F : 부하(N·m)
- I_g : 기어 관성을 포함하는 모터 관성 (1/750 Kg·m²)
- I_m : 모터의 인덕턴스 (1/1000 H)
- I_w : 부하 관성 (1/600 Kg·m²)
- k : 모터 상수 (0.25 V·sec/rad or N·m/A)
- P_g : 아마추어(armature)와 기어의 모우멘텀
- P_m : Flux linkage
- P_w : 부하의 모우멘텀
- R_i : 모터의 전기저항(0.5Ω)
- R_b : 모터축상의 베어링 감쇠계수 (0.03 N·m·sec/rad)
- R_w : 부하축상의 베어링 감쇠계수 (0.1 N·m·sec/rad)
- θ : 파워 트레인의 각 변위(rad)
- V : 모터의 아마추어 전압 (100 DC volt)

주어진 모델은 CSIO의 필요충분조건을 만족하므로 CSIO 관측기 설계가 가능하다. 상태변수인 flux linkage(P_m)와 입력변수인 부하(F)를 추정하는 것을 목적으로 하였다. CSIO를 구성하면 3개의 고유값을 갖는 더미변수의 3차 시스템으로 변환된다. 두 종류의 CSIO가 Table 1과 같이 설계되었다. 고유값은 -50에 같은 대표극점을 갖고 나머지는 임의로 극점배치 하였다. 각각의 성능지표와 고유벡터도 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보여지는 것처럼 case 1은 큰 성능지표를 가지며 이와 반대로 case 2는 작은 성능지표 값을 갖는다.

스핀들 시스템에서 부하가 5 N·m로 시작하여 20 N·m로 변하는 경우에 대하여 시뮬레이션 하였고 두 경우에 대하여 ill-conditioning 요소에 대한 정상 상태의 성능 결과를 비교하였다.

Table 1 Performance Indices for two observers

| | Desired pole | Eigenvector (P) | $\kappa_2(A'_c)$ | $\kappa_2(P)$ |
|--------|-----------------|---|------------------|---------------|
| Case 1 | -50, -150, -200 | $\begin{bmatrix} -0.9467 & 0.9266 & 0.8796 \\ -0.3066 & 0.3614 & 0.4631 \\ -0.0984 & 0.1036 & 0.1093 \end{bmatrix}$ | 17303 | 1957 |
| Case 2 | -50, -500, -550 | $\begin{bmatrix} 0 & 0.8742 & 0 \\ 1 & -0.4856 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ | 12.52 | 1.7 |

Table 2 Comparison of the steady-state performance

| | Unit [%] | Case 1 [%] | | Case 2 [%] | |
|---|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Upper bound | Actual value | Upper bound | Actual value |
| Modeling error $\ A - \underline{A}\ _2 = 11.25$ | $\ e_{ss}\ _2 / \ \xi_{ss}\ _2$ | 3599 | 0.22 | 25.18 | $6.67e^{-3}$ |
| | $\ e_{x,ss}\ _2 / \ x_{ss}\ _2$ | 3599 | 0.15 | 25.18 | $4.69e^{-3}$ |
| | $\ e_{u,ss}\ _2 / \ u_{ss}\ _2$ | 4470 | 0.30 | 313 | $2.97e^{-5}$ |
| Input sensing bias (2% biased) | $\ e_{ss}\ _2 / \ \xi_{ss}\ _2$ | 2992 | 189 | 20.91 | 9.36 |
| | $\ e_{x,ss}\ _2 / \ x_{ss}\ _2$ | 2221 | 140 | 15.53 | 6.94 |
| | $\ e_{u,ss}\ _2 / \ u_{ss}\ _2$ | 376 | 262 | 2.65 | 1.96 |
| Output sensing bias (2% biased) | $\ e_{ss}\ _2 / \ \xi_{ss}\ _2$ | $5.52e^6$ | 190 | $1.27e^5$ | 9.40 |
| | $\ e_{x,ss}\ _2 / \ x_{ss}\ _2$ | $4.07e^6$ | 140 | $9.43e^4$ | 6.94 |
| | $\ e_{u,ss}\ _2 / \ u_{ss}\ _2$ | $6.90e^5$ | 261 | $1.59e^4$ | 0.62 |

정상상태의 추정성능 비교

플랜트 섭동과 입출력 측정오차가 존재하는 경우 이 요소들이 정상상태 성능에 미치는 영향이 조사되었고 성능지표에 대한 검증이 이루어졌다.

모터 축상의 감쇠계수가 작동 중 50% 감소된다고 가정한다. 이 모델링오차에 대한 실제 상대오차와 상한값이 Table 2에서 두가지 관측기에 대하여 비교되었다. 작은 성능지표값을 가지는 case 2의 관측기가 큰 값을 가지는 case 1의 경우보다 플랜트 섭동에 강인함을 볼 수 있다. 이것은 플랜트 섭동에 의한 정상상태 오차가 ill-conditioned 관측기의 경우에 매우 커질수 있음을 의미한다.

시스템 모델이 정확하지만($A=\underline{A}$), 입력 또는 출력에서 측정 오차가 있다고 가정한다. 입력 측정값인 전압이 2% 편향되었을 경우 두 관측기의 실제 상대오차와 상한값이 Table 2에서 비교되었고 상태변수와 입력변수에서의 상대 추정오차가 Fig. 3과 4에서 비교되었다. 성능지표 값이 작은 case 2의 관측기가 이러한 입력 측정값의 편향오차에 대하여 정상상태 성능 관점에서 훨씬 덜 민감함을 알 수 있다. 또한 출력 측정값에서 2%의 편향 오

차가 있는 경우 두 관측기의 정상상태 오차와 상한값이 Table 2에서 비교되었다. Fig. 5와 6에서 보여지는 것처럼 성능지표의 값이 작은 case 2의 관측기가 상태변수와 입력변수 추정에서 작은 정상상태 오차를 갖는다.

6. 결론

Closed-loop State and Input Observer (CSIO) 설계 시 과도상태의 오차 형상, 라운드오프 오차에 의한 고유값의 민감도, 모델링 오차와 측정 오차 등의 ill-conditioning 요소들에 대한 민감도를 정량적으로 표현하고 이로부터 성능지표를 구하였으며 이를 하나의 지표로 통합하였다. 이 지표는 관측기 행렬의 고유벡터의 condition number이며, 이는 상태관측기의 성능지표와 동일하다. CSIO 설계 시 이 성능지표 값을 줄이는 극점배치를 통하여 ill-conditioning 요소에 대한 강인성을 보장할 수 있었다. 결론적으로, 최소의 성능지표값을 갖는 CSIO는 관측기 성능에 대한 ill-conditioning 요소의 영향을 최소화시킨다는 관점에서 well-conditioned state and input observer 라 할 수 있다.

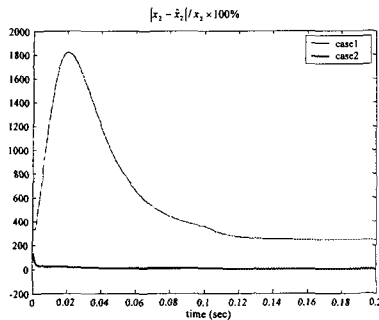


Fig. 1 Relative error of x_2 with input sensing bias

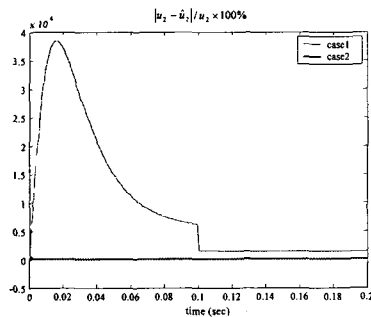


Fig. 2 Relative error of u_2 with input sensing bias

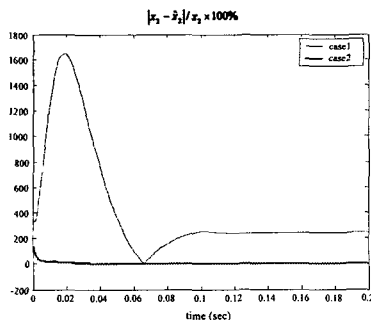


Fig. 3 Relative error of x_2 with output sensing bias

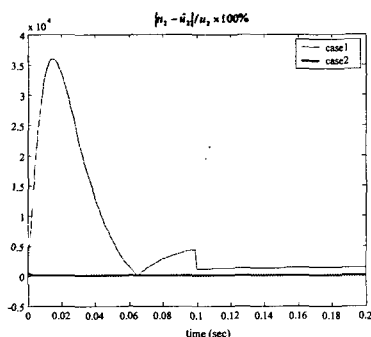


Fig. 4 Relative error of u_2 with output sensing bias

후기

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임 (과제번호 : 2000-2-30400-007-3)

참고문헌

- (1) Park, Y. and Stein, J. L., 1988, "Closed-Loop, State and Input Observer for Systems with Unknown Inputs," *Int. J. of Control*, Vol. 48, No. 3, pp. 1121~1136.
- (2) Corless, M. and Tu, J., 1998, "State and Input Estimation for a Class of Uncertain Systems," *Automatica*, Vol. 34, No. 6, pp. 757~764.
- (3) Xiong, Y. and Saif, M., 2000, "Output Derivative Free Design of Unknown Input Plus State Functional Observer," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 399~403.
- (4) Battacharyya, S. P., 1976, "The Structure of Robust Observers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 21, pp. 581~588.
- (5) Junkins, L. J. and Kim, Y., 1993, *Introduction to Dynamics and Control of Flexible Structures*, AIAA Education Series.
- (6) Liu, G. P. and Patton, R. J., 1998, *Eigenstructure Assignment for Control System Design*, John Wiley & Sons Ltd.
- (7) Seo, Y. B., Choi, J. W. and Lee, M. H., 2000, "Eigenstructure Assignment for LTI Systems with Stochastic Parameter Variations," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 3812~3816.
- (8) Patton, R. J. and Chen, J., 1997, "Observer-Based fault Detection and Isolation: Robustness and Applications," *Control Engineering Practice*, Vol. 5, No. 5, pp. 671~682.
- (9) Huh, K. and Stein, J. L., 1994, "A Quantitative Performance Index for Observer-Based Monitoring Systems," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 116, pp. 487~497.
- (10) Fattouh, A., Sename, O. and Dion, J., 2000, "A LMI Approach to Robust Observer Design for Linear Time-delay Systems," *Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1495~1500.
- (11) Huh, K. and Stein, J. L., 1995, "Well-Conditioned Observer Design for Observer-Based Monitoring Systems," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 117, pp. 592~599.
- (12) Luenberger, D. G., 1966, "Observers for Multivariable systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 11, pp. 190~197.
- (13) Jung, J., Lee, B. and Huh, K., 2002, "A Quantitative Performance Index for an Input Observer (I), -Analysis in Transient State," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 26, No. 10, pp. 2060~2066.
- (14) Golub, G. H. and Van Loan, C. F., 1989, *Matrix Computations*, 2nd Ed., The Johns Hopkins Univ. Press.