

내부루프 보상기를 가지는 강인 동작 제어기의 설계

김 봉 근[†] · 정 완 군^{*}

(2000년 6월 3일 접수, 2001년 8월 1일 심사완료)

Design of Robust Motion Controllers with Internal-Loop Compensator

Bong Keun Kim and Wan Kyun Chung

Key Words: 2-Loop Structure(2-루프 구조), Robust Internal-Loop Compensator(강인 내부루프 보상기), Disturbance Observer(외란관측기), Adaptive Robust Control(적응 강인제어), H_{∞} Mixed Sensitivity Method(H_{∞} 혼합감도 방법)

Abstract

Disturbance observer, adaptive robust control, and enhanced internal model control are model based disturbance attenuation methods famous for robust motion controller which can satisfy desired performance and robustness of high-speed/high-accuracy positioning systems. In this paper, these are shown to be the same scheme with different parameterizations. To do this, a generalized framework, called as RIC(robust internal-loop compensator) is proposed and the conventional schemes are analyzed in the RIC framework. Through this analysis, it can be shown that there are inherent similarities between the schemes and advantages of the RIC in the viewpoint of controller design. This is verified through simulations and experiments.

1. 서 론

동작제어 시스템의 성능에 대한 관심도가 증가하면서 좀더 정확하고 강인한 움직임을 위한 제어기법의 개발이 요구되어지고 있다. 그러나 실제 시스템은 매우 비선형적이고 서로 연관된 동특성을 가지고 있으며, 더욱이 시스템 매개변수의 변화와 외부에서 시스템에 인가되는 외란을 정확히 측정될 수 없으므로 고성능의 제어기준을 만족시키기는 점점 어려워지고 있다. 지금까지

이러한 문제점을 극복하기 위하여 다양한 형태의 진보된 제어방법이 제안되었다. 외란관측기(disturbance observer, DOB),⁽¹⁻⁷⁾ 적응 강인제어(adaptive robust control, ARC),^(8,9) 모델에 기초한 외란억제(model based disturbance attenuation, MBDA),⁽¹⁰⁾ 그리고 강화된 강인성을 가지는 내부모델 제어(enhanced internal model control, EIMC)⁽¹¹⁾ 등이 좋은 예이다. 이러한 방법들은 일반적으로 2-루프(loop) 구조를 가지는 제어기 설계를 요구한다. 첫 번째는 강인성을 보장하기 위한 내부루프(internal-loop) 보상기의 설계이고, 두 번째는 원하는 성능기준을 만족시키기 위한 외부루프(external-loop) 제어기의 설계이다. 여기서, 내부루프 보상기는 외란을 가능한 상쇄시켜 실제 시스템을 주어진 공칭모델과 일치시키기 위한 제어입력을 만들어 내는데, 여기서 외란이란 모델

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
E-mail : kbk@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2844 FAX : (054)279-5899

^{*} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

링에 있어서의 불확실성이나 매개변수 변화와 같은 실제 시스템과 공칭모델의 차이로 인해 생길 수 있는 모든 외란과 외부에서 들어오는 외란의 합으로 정의된다. 따라서 이러한 내부루프 보상기를 가지는 실제 시스템은 내부루프 보상기가 정확하게 기능을 한다면 공칭모델로 생각될 수 있다. 반면에 외부루프 제어기는 전체 시스템의 성능 향상을 위해 설계되어지며, 제어기 설계는 공칭모델에 대하여 이루어진다.

DOB에 기초한 제어기는 간단한 구조와 강인성으로 실제 산업분야에 널리 응용되고 있다. 공칭모델의 역과 저주파역 통과 필터를 이용하여 DOB는 등가의외란을 추정하고, 추정한 외란을 상쇄신호로 사용한다. DOB의 성능향상을 위해 ARC가 제안되었으며, 이 방법은 적응제어와 슬라이딩 모드 개념에 기초한 강인제어의 장점을 모두 가지고 있는 것이 특징이다. 모델에 기초한 강인제어 방법의 하나로써 MBDA 방법이 제안되었고, DOB 및 ARC와 비교되었다. 그리고 기존 IMC 구조에 기초하여 시스템의 불확실성 감소와 강인성 향상을 위하여 수정된 EIMC 방법도 제안되었다.

그러나 불행히도 위에서 기술한 2-루프 구조의 강인제어 방법들은 제어기의 구조적 관점에서 비교되지 못하였다. 이것은 이러한 제어기들을 통합해서 해석할 수 있는 단일형태의 제어구조가 없었으며 등가형태로 만들기도 어려웠기 때문이다. 이것이 본 논문의 동기이며, 본 논문의 목적은 고정밀 위치제어 시스템을 위하여 강인 내부루프 보상기(robust internal-loop compensator, RIC)에 기초한 강인 동작 제어기를 설계하고, 기존의 외란보상 방법들과 정성적·정량적으로 비교하는데 있다. RIC는 이러한 방법들을 해석적으로 포함할 수 있는 일반화된 구조를 가지고 있으므로 2-루프 구조의 강인 제어기들은 RIC 구조에 의해 해석되고 구조적 연관성이 분석될 수 있다. 2장에서는 2-루프 구조의 제어 시스템을 기술하고 RIC를 제안한다. 3장에서는 RIC에 기초한 제어와 기존의 모델기초 강인제어를 비교하여 모의실험 결과를 보이고, Q 함수의 최적설계 방법을 제시한다. 다음으로 4장에서는 고정밀 이송 시스템을 위하여 RIC에 기초한 강인 동작 제어기를 설계하고 실험결과를 보이며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

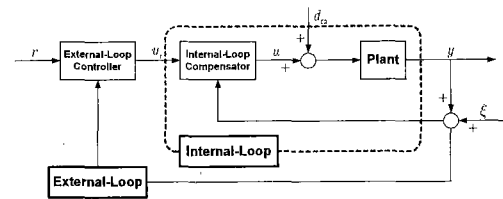


Fig. 1 Robust control system with 2-loop structure

2. 내부루프 보상에 기초한 강인제어

2.1 2-루프 구조의 강인제어 시스템

DOB, ARC, EIMC 같은 모델에 기초한 강인제어 방법은 서로 다른 기준에 대해 설계되지만 Fig. 1에서 보이는 2-루프 구조의 설계를 요구한다. 내부루프는 제어기보다는 외란보상기로 이용되므로 내부루프 보상기라 부르고, 외부루프는 제어기로 이용되므로 외부루프 제어기라 부른다. 이러한 내부루프 보상기를 가지는 실제 시스템은 내부루프 보상기가 정확히 역할을 한다면 주어진 공칭모델로 생각될 수 있고, 전체 시스템의 성능은 공칭모델에 기초하여 설계되는 외부루프 제어기에 의해 결정된다. 그러므로 모델에 기초한 강인제어 방법들의 중요한 구조적 특성은 각 방법들의 내부루프 구조를 비교함으로써 평가될 수 있다. 이제, 비교를 위한 수단으로써 RIC라는 일반화된 제어구조를 제안한다.

2.2 강인 내부루프 보상기

Fig. 2는 RIC를 이용하여 Lyapunov 재설계의 제어입력을 유도할 제어구조를 보여주고 있다.^(12,13) 플랜트는 $P(s)$ 로 표현하고 출력은 y 로 표현한다. u_r 은 기준 제어입력이고 u 는 제어입력이다. d_{ex} 는 외부에서 인가되는 외란을 나타내고 ξ 는 측정잡음이다. $P_m(s)$ 과 $K(s)$ 는 설계되는 매개변수로 각각 기준모델과 RIC의 제어기를 나타낸다. 플랜트 출력 y 와 기준모델 출력 y_r 의 차이는 모델 추종오차로 정의된다.

$$e_r = y_r - y \tag{1}$$

따라서 제어입력은

$$u = u_r + K(s)e_r \tag{2}$$

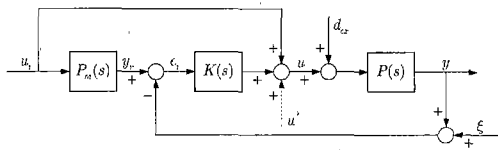


Fig. 2 Robust internal-loop compensator structure

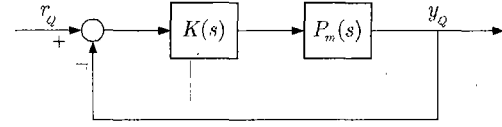


Fig. 3 Imaginary transfer function $Q(s)$

로 표현되고, 여기서 오른쪽의 두 번째 항은 Lyapunov 재설계에 의해 주어진다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 본 논문에서는 식 (2)의 제어입력을 가지는 구조를 RIC라 정의한다.

Fig. 2의 블록선도로부터 u_r , d_{ex} , ξ 에서 y 까지의 입출력 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$y = G_{u,y}(s)u_r + G_{d_{ex},y}(s)d_{ex} + G_{\xi,y}(s)\xi \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} G_{u,y}(s) &= \frac{P(s)[1 + P_m(s)K(s)]}{1 + P(s)K(s)}, \\ G_{d_{ex},y}(s) &= \frac{P(s)}{1 + P(s)K(s)}, \\ G_{\xi,y}(s) &= -\frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)}. \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하면 다음 식이 유도되며

$$e_r = S(s)[\{P_m(s) - P(s)\}u_r - P(s)d_{ex}] + T(s)\xi, \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} S(s) &= \frac{1}{1 + P(s)K(s)}, \\ T(s) &= \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} \end{aligned} \quad (6)$$

는 전형적인 되먹임 시스템의 감도함수, 보감도함수를 각각 나타낸다.

Remark 1. 비선형 외란의 보상을 위해 다음과 같이 식 (2)에 부가적인 입력을 첨가할 수 있다.

$$u = u_r + K(s)e_r + u^* \quad (7)$$

여기서 u^* 는 비선형 외란을 억제하기 위한 강인 또는 적응제어 알고리즘이 된다.⁽¹⁷⁾

2-루프 구조를 가지는 기존의 강인 제어방법은 적당한 제어구조의 선택으로 RIC의 형태로 표현될 수 있으므로 그들의 구조적 연관성을 다음 장에서 살펴본다.

3. 외란억제 방법의 분석과 설계

3.1 RIC 구조에서의 DOB

식 (5)에서 e_r 을 최소화시키기 위해서는 $K(s)$ 를 식 (6)이 최적이 되도록 설계하여야 한다. 그러나 $P(s)$ 를 정확히 알 수 없으므로, Fig. 3에 보여지는 것처럼, $P(s)$ 대신 $P_m(s)$ 을 $K(s)$ 를 이용하여 되먹임 제어하는 다음과 같은 가상의 전달함수 $Q(s)$ 를 생각하여보자.

$$Q(s) = \frac{P_m(s)K(s)}{1 + P_m(s)K(s)} \quad (8)$$

이 방정식을 $K(s)$ 에 대해 다시 쓰면

$$K(s) = \frac{Q(s)}{P_m(s)[1 - Q(s)]} \quad (9)$$

가 얻어지고 여기서 구해진 $K(s)$ 를 Fig. 2에 대입하면 Fig. 4(a)를 얻게 되고, 다시 이 그림은 DOB의 잘 알려진 형태인 Fig. 4(b)로 표현될 수 있다⁽¹⁸⁾. 즉, $K(s)$ 를 식 (9)처럼 선택하면 RIC는 DOB가 되고 그 특성이 일치함을 의미한다.

$Q(s)$ 함수에 기초한 RIC의 해석을 위하여 식 (9)를 가지고 식 (4)를 다시 표현하면

$$\begin{aligned} G_{u,y}(s) &= \frac{P(s)P_m(s)}{P_m(s) + [P(s) - P_m(s)]Q(s)}, \\ G_{d_{ex},y}(s) &= \frac{P(s)P_m(s)[1 - Q(s)]}{P_m(s) + [P(s) - P_m(s)]Q(s)}, \\ G_{\xi,y}(s) &= -\frac{P(s)Q(s)}{P_m(s) + [P(s) - P_m(s)]Q(s)}. \end{aligned} \quad (10)$$

가 얻어지고, $Q(s)$ 의 절점주파수 내에서는 $Q(s) \approx 1$ 이 만족된다. 따라서 $G_{d_{ex},y}(s) \approx 0$ 이 얻어지고, 이것은 저주파 외란이 억제되고 실제 플랜트와 기준모델 사이의 차이가 저주파 영역에서 보상됨을 의미한다. 그러므로 실제 플랜트의 거동은 기준모델의 거동과 일치하게 되고, 이것은 RIC의 외란에 대한 강인성을 보장한다.

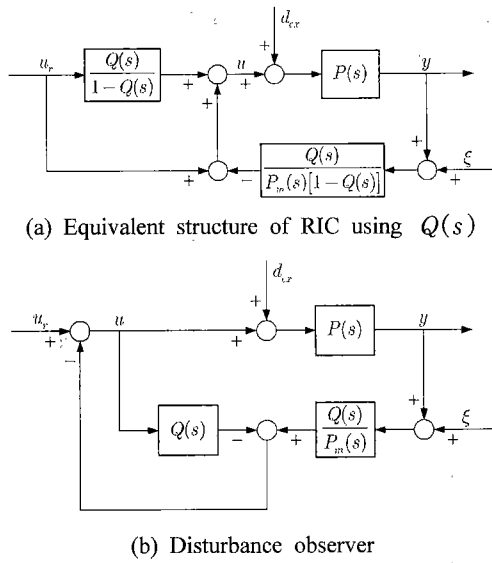


Fig. 4 Equivalent structure of RIC using $Q(s)$

DOB의 주된 관심사는 $|Q(j\omega)|$ 와 $|1 - Q(j\omega)|$ 를 동시에 최소화시키는 문제이고, 따라서 가장 중요한 설계변수는 $Q(s)$ 이다. 하지만 주어진 작업의 성능과 강인성 기준을 고려하여 $Q(s)$ 자체를 최적화시키기는 어렵다.^(2,19) 반면에, 제안된 RIC 구조는 $Q(s)$ 를 $P_m(s)$ 과 $K(s)$ 로 분리하여 표현할 수 있으므로 $Q(s)$ 의 체계적인 설계가 가능한 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 다음의 $P_m(s)$ 과 $Q(s)$ 를 생각해보자.

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s}, \quad Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (11)$$

식 (9)에 의해 다음의 $K(s)$ 를 얻을 수 있다.

$$K(s) = \left(\frac{B_m}{\tau}\right) + \left(\frac{J_m}{\tau}\right)s \quad (12)$$

반면에 $K(s)$ 를 PID 제어기로 선택하면

$$K(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s, \quad (13)$$

$Q(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Q(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{J_m s^3 + (B_m + K_d)s^2 + K_p s + K_i} \quad (14)$$

따라서 $K(s)$ 는 $Q(s)$ 를 외란억제 특성을 나타

내는 설계기준으로 선택하여 체계적으로 설계될 수 있음을 알 수 있다. 또한 다양한 $Q(s)$ 가 $K(s)$ 를 최적 설계함으로써 얻어질 수 있다.

3.2 RIC 구조에서의 ARC

DOB의 성능 향상을 위해 ARC가 Yao 등에 의해 제안되었다.⁽⁸⁾ Fig. 5는 고정밀 위치제어 시스템을 위한 ARC를 보여주고 있다. 이 시스템에 대한 동작방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J\ddot{y} + B\dot{y} + F_r(\dot{y}) - d_{ex} = u \quad (15)$$

여기서 J 는 관성, B 는 감쇠계수, $F_r(\dot{y})$ 는 정지 마찰력과 Coulomb 마찰력을 포함하는 마찰력, d_{ex} 는 제한된 크기를 가지는 불확실한 외란이다. 제어목적은 비선형 $F_r(\dot{y})$ 과 d_{ex} 가 존재하더라도 기준입력 μ 에서 플랜트 출력 y 까지의 시스템이 공칭모델처럼 거동하도록 제어입력을 만들어내는 것이다. 그러므로 이상적인 기준입력은

$$J_m \ddot{y} + B_m \dot{y} = \mu \quad (16)$$

가 되며, J_m 과 B_m 은 각각 J 와 B 의 공칭값이 된다. 스위칭함수 같은 변수 p 는

$$p = \dot{y} + \lambda y - \frac{1}{J_m} \int_0^t \mu(\tau) d\tau \quad (17)$$

로 정의되고, $\lambda = (B_m/J_m)$ 이다. 따라서 ARC는

$$u = \mu + \widehat{F}_r(\dot{y}) - \widehat{d}_{ex} - K_a p \quad (18)$$

의 형태를 가지게되며, 여기서 $K_a > 0$, $\widehat{F}_r(\dot{y})$ 은 마찰보상을 위한 입력, \widehat{d}_{ex} 은 보상되지 않은 외란 d_{ex} 의 추정입력이다. d_{ex} 는 제한되어 있고

$$d_{ex} \in [d_m, d_M] \quad (19)$$

로 가정할 수 있으며, d_m 과 d_M 은 알려진 상수이다. $(\widehat{F}_r(\dot{y}) - \widehat{d}_{ex})$ 를 부가적인 추정항 u^* 로 정의하면, ARC의 제어입력은

$$u = \mu - K_a p + u^* \quad (20)$$

로 표현된다. 여기서 μ 는 임의의 기준입력임에 주목하자. 식 (16)에서, μ 를 주어진 공칭모델에

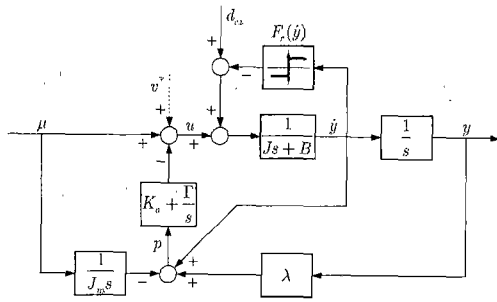


Fig. 5 Simple adaptive robust controller structure

적용하면 공칭모델의 출력이 플랜트의 출력과 일치한다고 가정하였다. 즉,

$$y = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s} \mu \quad (21)$$

이 성립한다고 가정하였다. 그러나 식 (16) 또는 (21)은 모델링 불확실성이 없다는 가정하의 이상적인 식이므로, 이상적인 경우와 실제 경우를 구별하기 위해 새로운 변수 y_r 을 공칭모델의 출력으로 정의하자. 따라서

$$y_r = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s} \mu \quad \text{또는} \quad J_m \ddot{y}_r + B_m \dot{y}_r = \mu \quad (22)$$

로 표현되고, 변수 p 는 다음과 같이 된다.

$$p = -\dot{e}_r - \lambda e_r \quad (23)$$

여기서 $e_r = y_r - y$ 로 식 (1)과 같이 정의된다.

이제, 식 (22)와 (23)으로부터 RIC의 매개변수를 유도할 수 있다. 기준모델과 RIC 제어기는

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s}, \quad K(s) = K_a(s + \lambda) \quad (24)$$

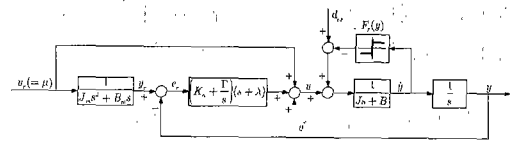
이 되고, 식 (8)을 이용하여 $Q(s)$ 는

$$Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (25)$$

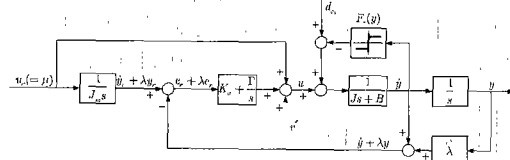
로 얻어지고, 여기서 τ 는 $\tau = J_m / K_a$ 이다.

좀 더 향상된 성능을 위해 다음의 적응제어 방법이 소개되었다.

$$\hat{d}_{ex} = \begin{cases} 0, & \text{if } \begin{cases} \hat{d}_{ex} = d_M \text{ and } p > 0 \\ \hat{d}_{ex} = d_m \text{ and } p < 0 \end{cases} \\ \Gamma p, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$



(a) Representation of ARC using (29)



(b) Representation of ARC using (31)

Fig. 6 Equivalent representation of ARC structure

여기서 Γ 는 적응이득이다. 만약

$$d_m < \hat{d}_{ex}(t) < d_M \quad (27)$$

이라고 가정하면, ARC는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \mu - K_a p - \Gamma \int_0^t p d\tau + v^* \quad (28)$$

여기서 v^* 는 $\hat{F}_r(y)$ 이다. 그러므로 $P_m(s)$ 과 $K(s)$ 는 다음과 같이 주어지고

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s}, \quad (29)$$

$$K(s) = \left(K_a + \frac{\Gamma}{s} \right) (s + \lambda),$$

다음과 같은 차수가 2인 $Q(s)$ 함수가 얻어진다.

$$Q(s) = \frac{K_a s + \Gamma}{J_m s^2 + K_a s + \Gamma} \quad (30)$$

Fig. 6은 ARC의 등가구조를 보여주고 있고, 구조적 관점에서 RIC와 등가이다. 실제로, $Q(s)$ 를 식 (25) 또는 (30)처럼 선택하면 모의실험에서 보여질 것처럼 ARC는 RIC뿐만 아니라 DOB와도 그 성능이 일치하게 된다. 이것은 중요한 의미를 내포하고 있다. 즉, DOB보다 향상된 ARC의 성능은 ARC의 강인제어 알고리즘 때문이 아니라 부가적인 비선형 적응제어 알고리즘 때문임을 알 수 있다. ARC의 적응제어 알고리즘은 강인제어 알고리즘으로 제거되지 못하는 비선형 외란을 포함한 알려지지 않은 외란을 제거할 수 있다. 반면에, DOB 자체로는 이 문제를 해결할 수 없으며, 이러한 단점을 보완하기 위해서는 식 (7)의

구조를 가지는 알고리즘이 사용되어야 한다.

Remark 2. Fig. 6(b)에 보인 것처럼,

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s}, \quad K(s) = K_a + \frac{\Gamma}{s} \quad (31)$$

로 선택되어도 결과적인 $Q(s)$ 는 식 (30)과 같아진다. 이것은 ARC가 제안된 RIC의 구조적 특성에 기초하여 체계적으로 분석되었기 때문이다.

3.3 RIC 구조에서의 EIMC

Fig. 7(a)의 기존 IMC 구조에 기초하여 향상된 강인성을 가진 Fig. 7(b)의 EIMC 구조가 Zhu에 의해 제안되었다.⁽¹¹⁾ 기존의 IMC에 기초하여 랜트와 모델의 병렬구조 내의 기존 시스템에 추가적인 경로가 덧붙여진다. 여기서 $C_I(s)$ 는 IMC의 제어기이고 $K_I(s)$ 는 보완적인 IMC 보상기이다. 추가적인 IMC 보상기의 역할은 플랜트를 외란뿐만 아니라 시스템의 불확실성에 대하여 강인하게 만들어 준다. $K_I(s)$ 는 $C_I(s)$ 와는 직접적인 연관성이 없기 때문에 $C_I(s)$ 와는 독립적으로 분석될 수 있다. 따라서 EIMC 시스템을 재구성하여 Fig. 7(c)의 구조를 가지는 EIMC의 등가구조를 얻을 수 있다. $C_I(s)$ 가 없는 내부루프 부분은 RIC와 등가구조를 가지고 있고, $C(s)$ 는

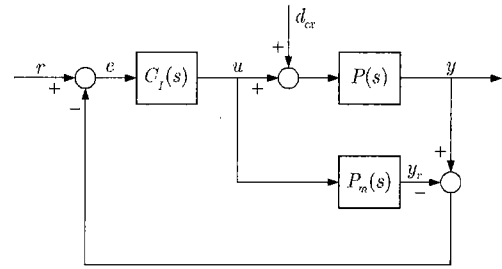
$$C(s) = \frac{C_I(s)}{1 - P_m(s)C_I(s)} \quad (32)$$

로 표현될 수 있다. 결과적으로, EIMC 제어 시스템은 식 (32)의 관계를 가지는 RIC에 기초한 제어기로 재구성될 수 있다.

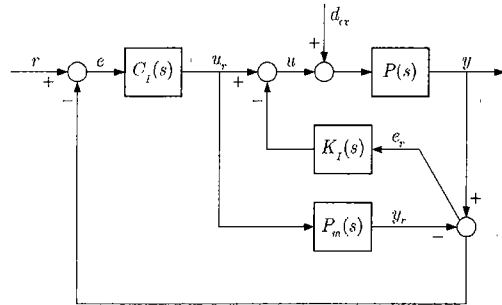
3.4 RIC, DOB, ARC의 비교 모의실험

제안된 제어 시스템을 MATLAB을 이용하여 모의실험하였다. 플랜트는 식 (15)와 같이 선택되었고, 여기서 J 는 $0.25\text{V}/(\text{m/s}^2)$, B 는 $0.2\text{V}/(\text{m/s})$ 이고, 정지마찰력과 Coulomb 마찰력은 Fig. 8(a)에 보여지는 것처럼 플랜트에 더해진다. 정지마찰력과 Coulomb 마찰력의 크기는 각각 0.2V , 0.1V 이다. Fig. 8은 내부루프 보상기와 제어기로 구성되는 전체 제어구조를 보여주고 있다. 되먹임 제어기 $C(s)$ 는 PD 제어기의 형태를 가지고 있다.

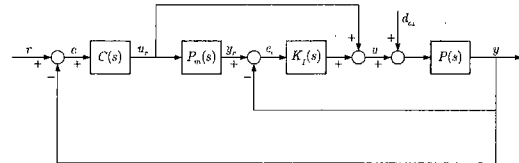
$$C(s) = K_p + K_d s \quad (33)$$



(a) Structure of the typical IMC



(b) Structure of the EIMC



(c) Equivalent representation of the EIMC structure

Fig. 7 EIMC and its equivalent structure

여기서 K_p 는 5000이고 K_d 는 300이다. 내부루프 보상기에서 이용되는 되먹임 신호는 $2\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지는 센서를 통해 측정되는 위치신호이다. 5차 다항식이 경로의 시작과 끝에서의 위치, 속도, 가속도를 지정하기 위하여 사용되었다. 제어주기는 1kHz 이고 제어기는 쌍일차변환(bilinear transformation)을 이용하여 이산화 되었다.

기준모델은 이중적분기로 선택하였다.

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s^2} \quad (34)$$

여기서 J_m 은 0.25 이다. 그리고 Fig. 8(b)에서, RIC의 제어기 $K(s)$ 는

$$K(s) = \frac{J_m}{\tau} s \quad (35)$$

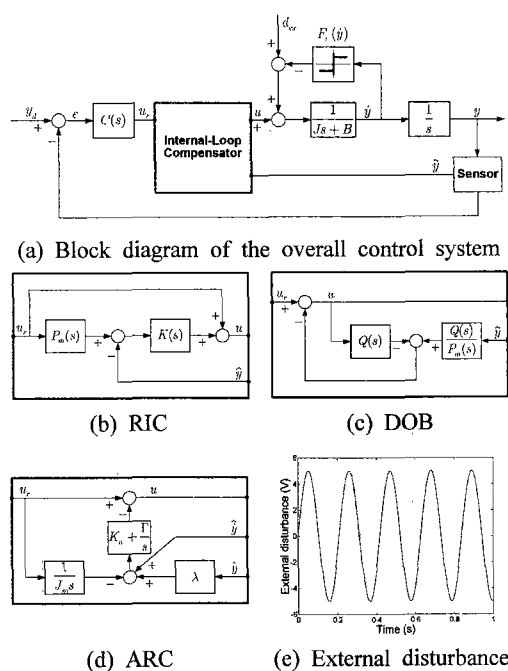


Fig. 8 Overall system and internal-loop compensator

로 선택되었고, τ 는 0.005이다. Fig. 8(c)에 있는 DOB의 $Q(s)$ 는 똑같은 제어환경을 위하여 식 (8)을 이용하여 다음과 같이 설계하였다.

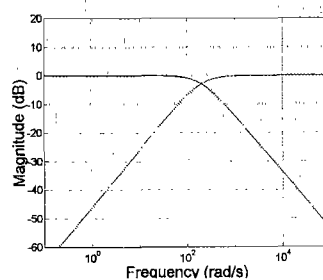
$$Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (36)$$

위와 같은 RIC와 DOB 매개변수의 선택은 전체 제어 시스템이 같은 특성을 가지도록 만들어 줄 것이다. 또한 Fig. 8(d)에서, ARC의 Γ 와 K_a 를

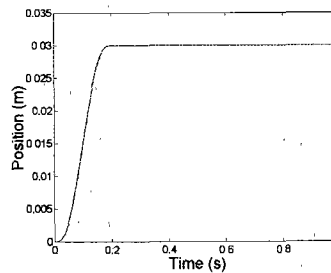
$$\Gamma = 0, \quad \tau = \frac{J_m}{K_a} \quad (37)$$

로 선택하면, 식 (30)으로부터 RIC, DOB, ARC를 가지는 전체 시스템의 특성은 같아질 것이다.

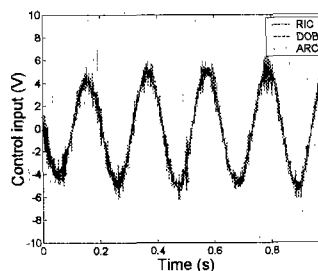
세 종류의 내부루프 보상기의 결과를 비교, 검증하기 위하여 Fig. 8(e)에서 보여지는 30rad/s의 정현파를 제어입력에 더하였다. Fig. 9는 이러한 경우의 모의실험 결과를 보여주고 있다. Fig. 9 (a), (b), (c), (d)는 Fig. 8(a)의 시스템에 세 종류의 내부루프 보상기들을 각각 적용하였을 경우의 $Q(s)$ 와 $1 - Q(s)$, 원하는 궤적, 제어입력, 추종 오차를 나타낸다. 따라서 RIC, DOB, ARC는 구조적인 동가성으로 인하여 정확히 일치하는 결과를



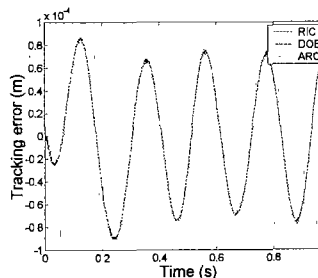
(a) $Q(s)$ and $1 - Q(s)$



(b) Desired trajectory



(c) Control input



(d) Tracking error

Fig. 9 Simulation results of RIC, DOB, and ARC

보이고 있음을 알 수 있다.

물론, 좀더 향상된 성능과 외란억제를 위하여 DOB의 최적화된 $Q(s)$ 나 ARC의 Γ 와 K_a 가 선택될 수 있다. 하지만 주목해야 할 것은 식 (8)이나 식 (30)과 같이 제안된 RIC 구조를 이용하여

제어기들 사이에 등가성이 있음을 항상 보일 수 있다는 것이다. 그러므로 주파수 영역이나 시간 영역에서의 단순한 DOB와 ARC의 비교는 중요한 의미를 가지지 못한다. 오히려 주어진 시스템에 대하여 제어기의 설계가 구조적으로 최적화되어 있는지를 파악하는 것이 더욱 중요하다.

3.5 최적 $Q(s)$ 설계

DOB 설계에서 더욱 향상된 안정성과 성능을 얻기 위해 다음과 같은 $Q_{31}(s)$ 을 선택하였다.^(2,8)

$$Q_{31}(s) = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (38)$$

여기서 τ 는 0.0035이다. $Q_{31}(s)$, $1 - Q_{31}(s)$ 의 Bode 크기 선도와 $Q_{31}(s)$ 을 가지는 DOB가 Fig. 8(a)의 시스템에 적용되었을 때의 궤적오차가 Fig. 10에 보여지고 있다. 이번 모의실험 결과로부터 제안된 $Q_{31}(s)$ 이 앞 절의 $Q(s)$ 보다 더 큰 대역폭과 주파수 영역에서 더욱 최적화된 특성을 가지고 있더라도 $Q(s)$ 자체를 최적화시키는 어렵다는 것을 쉽게 알 수 있다.

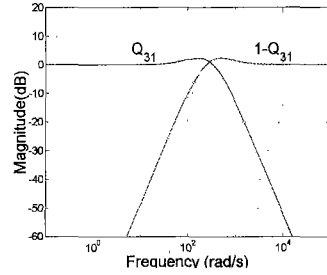
반면에, $Q(s)$ 는 RIC 구조에 함축적인 형태로 포함되어 있고 RIC의 매개변수에 의해 표현되어 지므로 외란과 실제 플랜트의 특성을 고려하여 최적화될 수 있다. 예로써, H_∞ 혼합감도 방법을 이용하여 보자. 따라서 최적 RIC 제어기 $K(s)$ 가 $Q(s)$ 를 외란억제 특성을 나타내는 성능조건으로 이용함으로써 설계될 수 있다. Fig. 3으로부터 $Q(s)$ 의 감도함수와 보감도함수는

$$\begin{aligned} S_Q(s) &= \frac{1}{1 + P_m(s)K(s)}, \\ T_Q(s) &= \frac{P_m(s)K(s)}{1 + P_m(s)K(s)} \end{aligned} \quad (39)$$

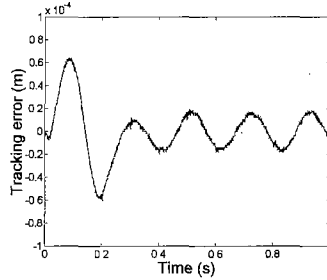
로 구해진다. 혼합감도 문제에서는 공칭 외란억제 조건 $\|W_1 S_Q\|_\infty < 1$ 과 안정성 여유 조건 $\|W_2 T_Q\|_\infty < 1$ 이 하나의 무한 놈 조건으로 결합된다. 따라서 H_∞ 혼합감도 방법은

$$\min_K \left\| \begin{bmatrix} W_1(j\omega) S_Q(j\omega) \\ W_2(j\omega) T_Q(j\omega) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (40)$$

로 표현된다. 식 (40)은 설계되는 매개변수를 이



(a) $Q_{31}(s)$ and $1 - Q_{31}(s)$



(b) Tracking error

Fig. 10 Bode plots of Q_{31} and tracking error

용하기 때문에 쉽게 풀릴 수 있고, $Q(s)$ 의 주파수 특성은 외란의 특성을 고려하여 주어질 수 있다.⁽¹²⁾ 이것은 RIC 구조가 $Q(s)$ 또는 $K(s)$ 를 설계하는 과정에 최적 개념을 도입할 수 있다는 점에서 강인성과는 다른 RIC 구조의 또 다른 장점이 된다. Fig. 11은 제안된 H_∞ 혼합감도 설계 방법을 보여주고 있다.

앞의 결과로부터 Fig. 8(e)의 30 rad/s의 정현파 외란이 주요 문제점임을 알 수 있다. 그러므로 이 주파수의 외란을 고려하여 좀 더 향상된 성능을 얻기 위한 최적화된 RIC 매개변수들을 설계하여보자. 물론 외란의 주파수 특성을 알 수 있다면 이러한 문제를 다룰 수 있는 방법은 주파수 shaping과 같은 여러 가지의 제어방법이 있다. 그러나 여기서는 DOB, ARC, RIC의 구조 내에서 외란억제를 위한 성능을 비교하기로 한다.

기준모델은 식 (34)의 시스템으로 선택하였다. 가상적인 모델 극점 문제는 축 이동을 이용하여 해결하였다. 따라서 가중함수 $W_2(s)$ 는

$$W_2(s) = \frac{s^2}{4 \times 10^5} \quad (41)$$

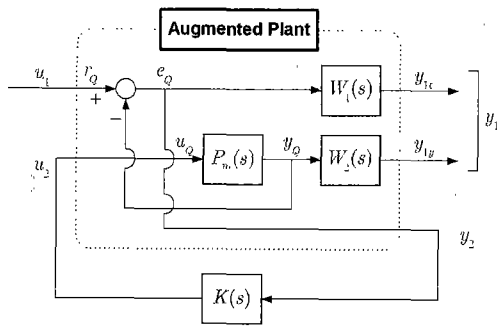


Fig. 11 Mixed H_∞ sensitivity method

로 선택한다. 가중함수 $W_1(s)$ 을 선택함에 있어서, 30 rad/s의 외란억제와 적분 기능이 이 주파수에서 약하게 감소된 극점과 원점 근처의 극점을 배치함으로써 얻어진다. 따라서 $W_1(s)$ 은

$$W_1(s) = \frac{(s + 100.0)(s^2 + 300.0s + 1.0 \times 10^4)}{(s + 0.01)(s^2 + 3.5s + 9.0 \times 10^2)} \quad (42)$$

로 선택한다. 가중함수에 대한 Bode 크기 선도도 Fig. 12(a)에 보여진다.

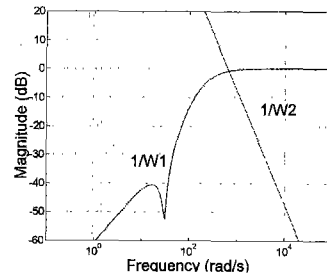
식 (34), (41), (42)를 이용하여, 다음과 같은 최적 RIC 제어기를 얻을 수 있다.

$$K(s) = \frac{(6.99 \times 10^9)s^3 + (6.26 \times 10^{11})s^2}{s^4 + (9.24 \times 10^4)s^3 + (9.71 \times 10^7)s^2 + (1.58 \times 10^{13})s + (4.63 \times 10^{12})} + \frac{(4.41 \times 10^8)s + (8.71 \times 10^{10})}{(4.41 \times 10^8)s + (8.71 \times 10^{10})} \quad (43)$$

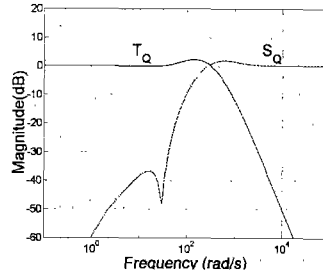
구해진 감도와 보감도함수가 Fig. 12(b)에 보여지고 있다. 보감도함수 $T_Q(s)$ 가 $Q(s)$ 이고 감도함수 $S_Q(s)$ 가 $1 - Q(s)$ 라는 것과 이 경우의 $Q(s)$ 가 앞의 $Q_{31}(s)$ 과 같은 대역폭과 rolloffs를 가짐에 주목하자. Fig. 9(d)와 Fig. 10(b)의 모의실험 결과와 Fig. 12(c)의 결과를 비교함으로써, 다른 방법들이 이러한 문제를 다룰 수 있는 체계적인 설계방법을 제시하지 못한 반면에 제안된 RIC 구조를 이용한 최적 $Q(s)$ 설계방법은 지정된 주파수에서 보다 향상된 외란 억제 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 고정밀 위치제어 시스템의 동작 제어

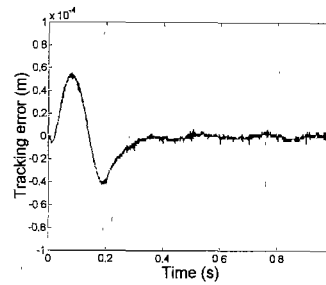
일반적으로 DOB와 ARC를 포함하는 내부루프 보상기는 불확실한 외란을 제거하기 위하여 먼저



(a) $1/W_1(s)$, $1/W_2(s)$



(b) $S_Q(s)$ and $T_Q(s)$



(c) Tracking error

Fig. 12 Design results and tracking error

설계되고, 외부루프에 되먹임 제어기가 덧붙여진다. 따라서 설계된 제어기는 복잡한 제어기 형태와 같은 부차적인 문제점을 발생시킬 수 있다. 그러나 RIC 구조에서 제어기가 구성되면, RIC의 강인한 특성을 위와 같은 2 단계의 과정을 거치지 않고도 제어기의 설계에 포함시킬 수 있다.

특정한 응용분야의 하나로써 고정밀 위치제어 시스템을 고려해보자. 동작방정식은 식 (15)에서와 같이 주어진다.

$$J\ddot{y} + B\dot{y} + F_r(\dot{y}) - d_{ex} = u \quad (44)$$

추종오차는

$$e = y_d - y \quad (45)$$

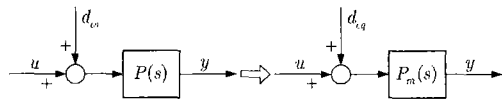


Fig. 13 Reconstruction of plant using d_{eq}

로 정의되고, 여기서 y_d 는 원하는 궤적이다.

이제, RIC 구조에서 강인 동작 제어기를 설계하기 위해 다음과 같은 식 (44)에 대한 기준모델을 생각해보자.

$$J_m \ddot{y} + B_m \dot{y} = u \quad (46)$$

따라서 Fig. 13의 등가외란을 이용하여, 식 (44)는 J_m 과 B_m 의 항으로 다시 쓰여질 수 있다.

$$J_m \ddot{y} + B_m \dot{y} = u + d_{eq} \quad (47)$$

여기서 등가외란은

$$d_{eq} = (J_m - J)\ddot{y} + (B_m - B)\dot{y} - F_r(\dot{y}) + d_{ex} \quad (48)$$

로 주어진다. 식 (46)의 기준모델을 안정화시킬 수 있는 기준 제어입력은

$$u_r = J_m \ddot{y}_r + B_m \dot{y}_r \quad (49)$$

로 선택될 수 있다. 위 식에서 주목할만한 특징은 기준입력이 내부모델의 상태를 생성시키는데 사용된다는 것이다. 즉, J_m 과 B_m 이 설계되어지는 매개변수이므로 y_r 은 식 (49)의 함축적인 내부모델의 상태변수가 된다. 그리고 다음과 같은 기준 상태변수를 선택하여보자.

$$y_r = y_d + \Lambda \int_0^t e \, d\tau \quad (50)$$

여기서 Λ 는 적절한 이득을 나타낸다. 따라서 모델 추종오차는 다음과 같이 얻어진다.

$$e_r = e + \Lambda \int_0^t e \, d\tau \quad (51)$$

그러므로, 식 (2)로부터 RIC에 기초한 강인 동작 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$u = J_m(\ddot{y}_d + \Lambda \dot{e}) + B_m(\dot{y}_d + \Lambda e) + K(s)\left(e + \Lambda \int_0^t e \, d\tau\right) \quad (52)$$

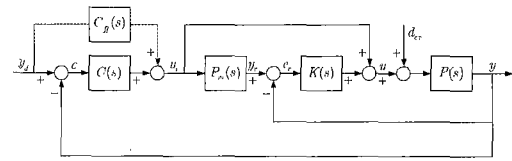


Fig. 14 Robust control structure based on RIC

4.1 외란억제 특성 분석

식 (49)로부터 $P_m(s)$ 은

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s^2 + B_m s} \quad (53)$$

로 얻어지고, 따라서 다양한 $Q(s)$ 가 $K(s)$ 에 의해 식 (8)을 이용하여 설계될 수 있다. 예를 들어, 제어기가

$$K(s) = (J_m s + B_m)D \quad (54)$$

로 선택되면, $Q(s)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$Q(s) = \frac{D}{s + D} \quad (55)$$

그러므로 식 (55)의 절점주파수($\omega_c = D \text{rad/s}$) 이하에서는 외란이 억제될 수 있음을 알 수 있다.

4.2 성능 분석

입출력 관계를 이용하여 Fig. 14의 RIC를 가지는 제어 시스템의 성능을 분석하여보자. Fig. 13 으로부터 오차는 y_d 와 d_{eq} 의 항으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e = \frac{1}{1 + P_m(s)C(s)} \left[[1 - P_m(s)C_{ff}(s)]y_d - \frac{P_m(s)}{1 + P_m(s)K(s)} d_{eq} \right] \quad (56)$$

만약 앞먹임 보상기 $C_{ff}(s)$ 를 기준모델의 역으로 선택하면, 즉 $C_{ff}(s) = 1/P_m(s)$ 이 만족되면 식 (56)은

$$e = - \left[\frac{P_m(s)d_{eq}}{1 + P_m(s)C(s)} \right] \frac{1}{1 + P_m(s)K(s)} \quad (57)$$

이 된다. 앞먹임 보상덕분에 식 (57)은 식 (56)과는 다르게 기준입력 y_d 의 함수가 아니다. 따라서 오차의 높에 대한 부등식은

$$|e(j\omega)| \leq |W(j\omega)| \times \frac{1}{|1 + P_m(j\omega)K(j\omega)|} \quad (58)$$

로 얻어지고, $W(s) = P_m(s)d_{eq}/[1 + P_m(s)C(s)]$ 이다. 여기서 $W(s)$ 는 단지 $P_m(s)$ 과 $C(s)$ 에 관련된 함수임을 주목하자.

식 (52)로부터 Fig. 14의 외부루프 제어기와 앞먹임 보상기는 다음과 같이 주어진다.

$$C(s) = (J_m s + B_m)\Lambda \quad (59)$$

$$C_{ff}(s) = J_m s^2 + B_m s \quad (60)$$

위의 식으로부터 앞먹임 보상기는 $C_{ff}(s) = 1/P_m(s)$ 의 조건을 만족하므로, 식 (58)로부터 다음과 같은 부등식이 만족된다.

$$|e(j\omega)| \leq |W(j\omega)| \times \frac{1}{\left|1 + \frac{D}{j\omega}\right|} \quad (61)$$

그러므로 $C(s)$ 의 이득 Λ 를 고정하고 식 (54)의 D 의 크기를 N 배만큼 증가시키면, $|e(j\omega)|$ 는 $[1 + D/(j\omega)]/[1 + (N \times D)/(j\omega)]$ 의 크기만큼 근사적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히 D 가 충분히 크거나 시스템이 저주파수 영역에서 거동되는 경우, D 가 N 배가 되면 오차는 $1/N$ 만큼 근사적으로 줄어드는 것을 예측할 수 있다.⁽²⁰⁾

결과적으로, 제안된 제어방법은 불확실성이 존재하는 시스템의 강인 안정성과 성능요건의 문제에 대한 체계적인 접근방법을 제시하고 있다. 더욱이, 강인 안정성과 성능 사이의 관계를 하나의 간단한 조율문제로 정량화시킴으로써 강인 동작 제어기의 체계적인 설계과정을 제시하고 있다.

Remark 3. RIC의 제어기 $K(s)$ 의 이득 D 에 따라서 성능이 변화하는 것은 그 만큼 외란에 대한 시스템의 강인성이 변화한다는 것을 식 (55)로부터 잘 알 수 있다. 즉, 식 (61)과 같이 D 의 크기에 따라 오차의 크기가 달라지며, 동시에 식 (55)에서 $Q(s)$ 함수의 절점주파수가 D 이므로 D 가 증가하면 외란 억제 특성을 나타내는 절점주파수가 또한 증가하게 된다.

4.3 실험 결과

본 논문에서 다루는 시스템은 반도체 칩 마운

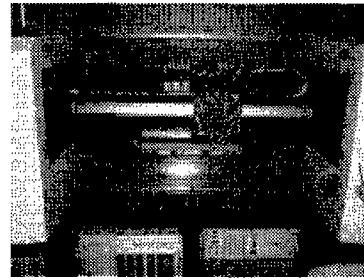


Fig. 15 High accuracy XY positioning system

터로 사용되는 고정밀 XY 이송 시스템으로, Y축이 일차(primary)와 이차(secondary)시스템으로 구성되는 트윈서보(twin-servo) 시스템이다.⁽²¹⁾ Fig. 15는 실험장비를 보여주고 있다. 식 (52)의 뒤먹임 제어기가 전체 시스템을 안정화시키고 원하는 위치를 정확히 추종하기 위해 사용되었다.

$$\begin{aligned} u^x &= J_m^x(\ddot{x}_d + \Lambda^x \dot{e}^x) + B_m^x(\dot{x}_d + \Lambda^x e^x) \\ &\quad + K^x \left(e^x + \Lambda^x \int_0^t e^x d\tau \right) \\ u^y &= J_m^y(\ddot{y}_d + \Lambda^y \dot{e}^y) + B_m^y(\dot{y}_d + \Lambda^y e^y) \\ &\quad + K^y \left(e^y + \Lambda^y \int_0^t e^y d\tau \right) \end{aligned} \quad (62)$$

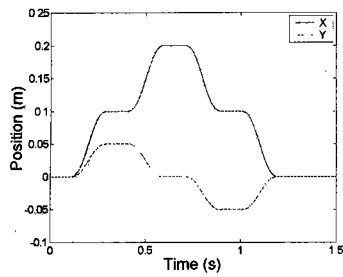
X축에 대하여 J_m^x 는 0.075, B_m^x 는 0.4, Λ^x 는 250이다. Y축에 대하여 J_m^y 는 0.04, B_m^y 는 0.3, Λ^y 는 200이다. 그리고 RIC 제어기는 식 (54)에서와 같이 선택되었다.

$$\begin{aligned} K^x(s) &= (J_m^x s + B_m^x)D^x \\ K^y(s) &= (J_m^y s + B_m^y)D^y \end{aligned} \quad (63)$$

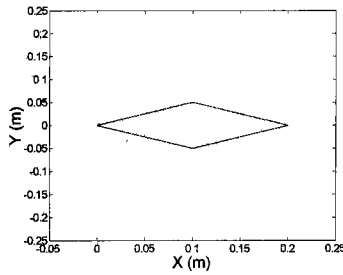
여기서 D^x 는 400이고 D^y 는 250이다.

5차 다항식이 원하는 궤적을 나타내기 위해 사용되었고, Fig. 16은 원하는 궤적의 그래프를 보여주고 있다. 제어주기는 1kHz이고, 위치는 X축과 Y축의 직선움직임에 대해 각각 5 μ m, 1.25 μ m의 분해능을 가지는 모터에 부착된 회전식 엔코더에 의해 측정된다. 속도는 위치신호를 뒤쪽 미분하여 얻는다.

식 (62)로부터, RIC의 기준모델은 식 (53)으로 주어지고 $Q(s)$ 는 식 (55)로 얻어진다. Fig. 17은 실험결과를 보여주고 있다. Fig. 17(a), (b)는 각각 X축과 Y축의 추종오차를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있듯이, 트윈서보 시스템의 간섭력 같은 매우 비선형적인 외란이 존재하더라도 추종오차

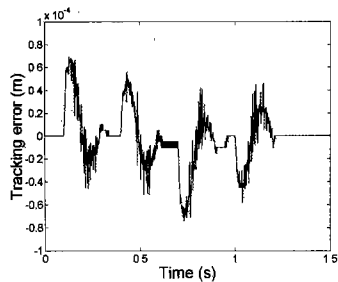


(a) Desired trajectory

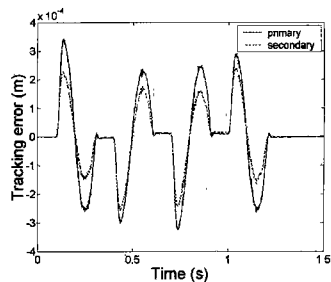


(b) Trajectory in XY plane

Fig. 16 Desired trajectory graph



(a) Tracking error of X-axis



(b) Tracking error of Y-axis

Fig. 17 Experimental results of XY system

는 좋은 성능을 보여주고 있다. 따라서 제안된 제어기법이 전체 시스템의 안정성을 성공적으로 유지하고 있고 고정밀 움직임에 대한 성능기준을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

2-루프 제어구조를 가지는 강인 동작 제어기들의 통합된 해석과 최적설계 방법을 제안하였다. 제안된 RIC는 일반화된 구조를 가지고 있어서, 2-루프 구조를 가지는 강인 제어기들은 RIC 구조 내에서 해석될 수 있고 구조적 연관성을 찾을 수 있다. RIC의 설계 여유를 이용하여 H_∞ 혼합감도 방법에 기초한 최적 $K(s)$ 와 $Q(s)$ 의 설계 방법이 제안되었다. 세 종류의 내부루프 보상기들의 등가 특성을 모의실험을 통해 검증하였고, 제안된 설계방법을 이용하여 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있음을 보였다. RIC의 성능은 궤적추종 제어 모의실험과 실험을 통해 검증되었고, 반도체 칩 마운터로 이용되는 트윈서보 고정밀 위치 제어 시스템을 이용한 실험결과는 다양한 비선형 마찰 특성과 외란 조건 하에서도 좋은 성능을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Nakao, M., Ohnishi, K., and Miyachi, K., 1987, "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation," *Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 326~331.
- (2) Lee, H. S. and Tomizuka, M., 1996, "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, pp. 48~ 55.
- (3) Ohnishi, K., Shibata, M., and Murakami, T., 1996, "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56~67.
- (4) 김준식, 오준호, 1996, "불확실한 선형시스템에 대한 강인 외란관측기," *대한기계학회논문집*, Vol. 20, No. 9, pp. 2731~2743.
- (5) Iwasaki, M., Shibata, T., and Matsui, N., 1999, "Disturbance-Observer-Based Nonlinear Friction Compensation in Table Drive System," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 4, No. 1, pp. 3~8.
- (6) Kempf, C. J. and Kobayashi, S., 1999, "Disturbance Observer and Feedforward Design for

- a High-Speed Direct-Drive Positioning Table," *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 513~526.
- (7) Choi, H. T., Kim, B. K., Suh, I. H., and Chung, W. K., 2000, "Design of Robust High-Speed Motion Controller with Actuator Saturation," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 122, No. 3, pp. 535~541.
- (8) Yao, B., Al-Majed, M., and Tomizuka, M., 1997, "High Performance Robust Motion Control of Machine Tools: An Adaptive Robust Control Approach and Comparative Experiments," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 2, No. 2, pp. 63~76.
- (9) Yi, L. and Tomizuka, M., 1999, "Two-Degree-of-Freedom Control with Robust Feedback Control for Hard Disk Servo Systems," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 4, No. 1, pp. 17~24.
- (10) Choi, B. K., Choi, C. H., and Im, H., 1999, "Model-Based Disturbance Attenuation for CNC Machining Centers in Cutting Process," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 157~168.
- (11) Zhu, H. A., Hong, G. S., Teo, C. L., and Poo, A. N., 1995, "Internal Model Control with Enhanced Robustness," *Int. J. Systems Sci.*, Vol. 26, No. 2, pp. 277~293.
- (12) Kim, B. K., Chung, W. K., Choi, H. T., Suh, I. H., and Chang, Y. H., 1999, "Robust Optimal Internal Loop Compensator Design for Motion Control of Precision Linear Motor," *Proc. 1999 IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1045~1050.
- (13) Kim, B. K., Choi, H. T., Chung, W. K., Suh, I. H., Lee, H. S., and Chang, Y. H., 1999, "Robust Time Optimal Controller Design for HDD," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 3598~3600.
- (14) Corless, M. J. and Leitmann, G., 1981, "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Boundedness for uncertain Dynamic Systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 24, No. 5, pp. 437~443.
- (15) Khalil, H. K., 1992, *Nonlinear Systems*, Macmillan.
- (16) Qu, Z., 1993, "Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems under Generalized Matching Condition," *Automatica*, Vol. 29, No. 4, pp. 985~998.
- (17) Kim, B. K., Chung, W. K., and Suh, I. H., 2001, "Performance Tuning of Sliding Mode Controllers : Structural Analysis Approach," *Proc. 2001 American Control Conference*, pp. 1513~1518.
- (18) Kim, B. K., Chung, W. K., 2001, "Unified Analysis and Design of Robust Disturbance Attenuation Algorithms Using Inherent Structural Equivalence," *Proc. 2001 American Control Conference*, pp. 4046~4051.
- (19) Yamada, K., Komada, S., Ishida, M., and Hori, T., 1998, "Analysis and Classical Control Design of Servo System Using High Order Disturbance Observer," *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 4~9.
- (20) Kim, B. K., Chung, W. K., 2001, "Performance Predictable Design of Robust Motion Controllers for High-Precision Servo Systems," *Proc. 2001 American Control Conference*, pp. 2249~2254.
- (21) Kim, B. K., Chung, W. K., and Suh, I. H., 2000, "Robust Synchronizing Motion Control of Twin-Servo Systems Based on Network Modeling," *Proc. 2000 IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 1019~1024.