

외란관측기를 이용한 리니어 서보메커니즘의 최적튜닝

홍승환[†] · 정성종^{*}

Optimal Tuning of Linear Servomechanisms using a Disturbance Observer

Seong-Hwan Hong and Sung-Chong Chung

Key Words : Contour Error(윤곽오차), Cross-coupled Controller(상호결합제어기), Disturbance Observer(외란관측기), Feedforward Controller(앞먹임제어기), Linear motor(리니어모터), Optimal Tuning(최적튜닝), Tracking Error(추종오차)

Abstract

In order to design a high-performance controller with excellent positioning and tracking performance, an optimal tuning method based on the integrated design concept is studied. DOBs, feedforward controllers and CCC are applied to control the bi-axial linear servomechanism. To derive accurate dynamic models of mechanical subsystems equipped with linear servos for the integrated tuning, system identification processes are conducted through the sine sweeping. An optimal tuning problem with stability, robustness and overshoot constraints is formulated as a nonlinear constrained optimization problem. Optimal gains are obtained through the SQP method. Experimental results confirm that both tracking and contouring errors are significantly reduced by applying the proposed controller and integrated tuning method.

기호설명

$C_c(s)$: 상호결합제어기
 C_x, C_y : 상호결합게인(V/V)
 d : 외란, N·m
 e_x, e_y : 각 축의 위치오차, mm
 $G_{mx,my}(s)$: 각 축의 기계부 전달함수
 $G_{pc}(s)$: 외부루프 제어기 전달함수
 $G_{mx,my}^n(s)$: 각 축의 공칭모델 전달함수
 K_{pc} : 상호결합제어기 비례이득,(V/V)
 K_{px}, K_{py} : 각 축 제어기의 비례이득,(V/V)
 $K_{ppx,ppy}$: 각 축 속도제어기의 비례이득,(V/V)
 $K_{ddx,ddy}$: 각 축 속도제어기의 미분이득,(V/V)
 K_{ffx}, K_{ffy} : 속도 앞먹임제어기의 비례이득, (V/V)

K_{ffax}, K_{ffay} : 가속도 앞먹임제어기의 비례이득, (V/V)
 M_x, M_y : 각 축의 최대 오버슈트, %
 $P_{x,y}(s)$: 각 축의 위치제어기
 $PD_{x,y}(s)$: 각 축의 위치제어기
 $Q(s)$: Q-필터 전달함수
 t_s : $\pm 2\%$ 정착시간
 w_i : 다목적 함수의 가중치, $i=1,2$
 $W_1(s)$: 민감도 전달함수
 $W_2(s)$: 여민감도 전달함수
 x_c, y_c : 각 축의 지령위치, mm
 x_p, y_p : 각 축의 실제위치, mm
 x_u, y_u : 각 축의 속도입력, mm
 ε_l : 선형윤곽오차, mm
 τ_{qx}, τ_{qy} : 각 축 Q-필터의 미분 시정수, sec
 ω_q : Q-필터의 대역폭, rad/sec
 ζ : 측정잡음, m/sec
 θ : X 축과 지령궤적 사이의 각, degree

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : tttaa1@hanmail.net

TEL : (02)2220-0444 FAX : (02)2298-4634

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

1. 서론

오늘날 반도체, 정보통신, 항공 등과 같은 첨단 산업에서 고속·고정밀 서보계는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 고속·고정밀 서보계를 설계하기 위해서는 윤곽 및 위치 정밀도를 향상시키는 것이 중요하다. Koren⁽¹⁾은 이송계의 윤곽오차(contour error)를 감소시키기 위해 상호 결합 제어기(cross-coupled controller)를 제안하였다. Umeno⁽²⁾는 외란에 강인하고 위치 정밀도가 높은 외란 관측기(disturbance observer)를 사용한 2 자유도 제어기를 제안하였다. 이러한 시스템들은 다변수, 비선형, 시변형 시스템이기 때문에 최적의 제어 이득을 선정하는 것이 어렵고, 제어 시스템의 모델링 오차 때문에 완벽한 윤곽 정밀도를 기대하기 어렵다. Tarn⁽³⁾은 윤곽 오차를 줄이기 위해 상호 결합 제어기와 앞먹임 제어기(feedforward controller)를 구성하여 유전 알고리즘을 이용한 제어 이득의 최적화 선정 방법을 수행하였다. 하지만 이 연구에서는 전체 시스템의 모델을 제공하지 못하였고, 상대 안정도, 응답성 등의 중요 요소를 고려하지 않았다.

본 논문에서는 다축 제어시스템의 윤곽 및 추종 오차(tracking error)를 줄이고 외란에 강인한 제어기를 설계하는 것을 목적으로 한다. 따라서 상호결합 제어기, 앞먹임 제어기, 외란관측기를 구성하고, 통합설계 방법론에 근거한 최적 튜닝에 관한 연구를 수행한다.^(4,6,7-9) 그리고 제한 조건이 있는 비선형 최적화 문제에 적합한 SQP 알고리즘을 사용하여 최적 제어기 이득 값들을 도출하였다. 마지막으로 제안된 최적 튜닝 방법의 효용성을 입증하기 위해, 2 축 Linear stage 를 대상으로 선형 모션 실험을 수행한다.

2. 제어시스템

2.1 윤곽오차와 추종오차

서보 시스템의 동적 성능을 향상시키기 위해서는 윤곽 및 추종오차를 줄여야 한다. 윤곽 오차는 제어 대상물의 기준 궤적과 실제 궤적과의 범선 방향 차로 정의되며, 추종오차는 기준 위치와 실제 위치와의 차로 정의된다. 다음은 선형 운동시 윤곽 및 추종 오차의 관계를 나타낸 식이다.⁽⁴⁾

$$e_l = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_l = -e_x \sin \theta + e_y \cos \theta \quad (2)$$

2.2 상호결합제어기

일반적인 다축 제어기는 각각의 축을 독립적으로 제어하여 추종오차를 줄이는 것을 목적으로 한다. 따라서 각 축의 동적 변수와 루프 이득의 불일치로 인해 윤곽 정밀도 성능이 감소된다. 하지만 상호결합 제어기는 각 축을 서로 교차시킴으로써, 각 축의 위치 정보 오차를 동시에 이용, 윤곽 오차를 줄이는 제어 방법이다. 따라서 상호결합제어기가 적용된 시스템이 각축 제어기에 비해 더 좋은 윤곽정밀도 성능을 보여준다. Fig. 1 는 상호결합 제어시스템이다. 지령궤적의 형태에 따라 변하는 상호결합게인(cross-coupled gain) $C_{x,y}$ 은 윤곽 오차의 계산식에 의해 다음과 같이 정의된다.^(4-5,11)

$$C_x = \sin \theta, \quad C_y = \cos \theta \quad (3)$$

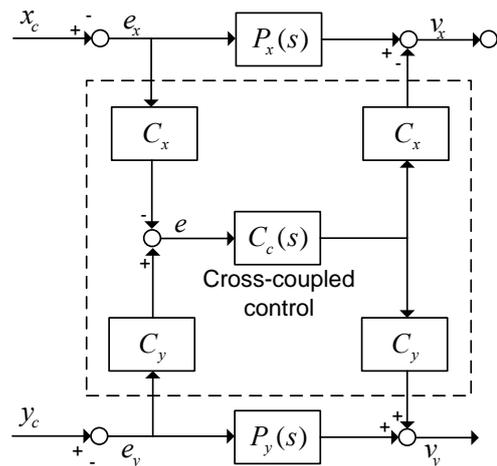


Fig. 1 Block diagram of the cross-coupled controller

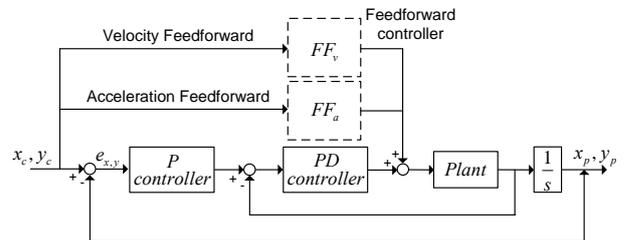


Fig. 2 Block diagram of the feedforward controller

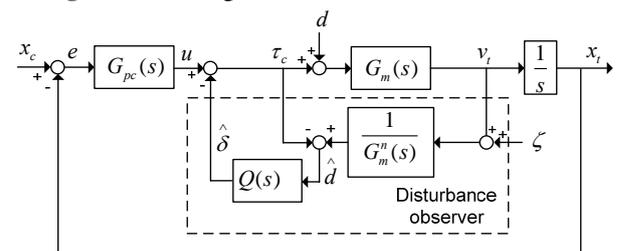


Fig. 3 Block diagram of the disturbance observer

2.3 앞먹임 제어기

앞먹임제어기는 Servo lag, 마찰력 및 외부부하와 관련된 서보의 추종 오차를 줄이기 위해 설계된다. 시스템 내에 앞먹임 제어기를 이용하여 필요 전류의 Nominal 값을 넣어주면, 전체 제어기 출력에서 피드백 제어기가 담당해야 할 양이 적어지므로, 그만큼 같은 피드백 제어 대역폭으로도 서보의 추종 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 앞먹임 제어기는 실제 산업계에서 많이 사용되고 있다. Fig. 2는 앞먹임 제어기로 각 축은 속도 및 가속도 앞먹임 제어기(velocity and acceleration feedforward controller)로 구성되어 있으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Feedforward})_x = K_{VF_x} \dot{x} + K_{AF_x} \ddot{x} \quad (4)$$

$$\text{Feedforward})_y = K_{VF_y} \dot{y} + K_{AF_y} \ddot{y} \quad (5)$$

2.4 외란관측기

외란관측기는 Fig. 3 와 같이 제어기의 실현성(causality)을 위해 구조가 간단하고 실제 시스템의 적용에 유연성을 가지는 Q-필터와 공칭모델 G_m^n 을 이용하여 외란을 추정한다.⁽¹⁾ Fig. 3에서 서보계의 속도출력 v_t 는 외부루프 제어기로부터의 제어 입력 u , 외란 d , 측정잡음 ζ 에 대하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$v_t = G_{w_t}(s)u + G_{d_t}(s)d + G_{\zeta v_t}(s)\zeta \quad (6)$$

$$G_{w_t}(s) = \frac{G_m(s)G_m^n(s)}{G_m^n(s) + \{G_m(s) - G_m^n(s)\}Q(s)}$$

$$G_{d_t}(s) = \frac{G_m(s)G_m^n(s)\{1 - Q(s)\}}{G_m^n(s) + \{G_m(s) - G_m^n(s)\}Q(s)}$$

$$G_{\zeta v_t}(s) = -\frac{G_m(s)Q(s)}{G_m^n(s) + \{G_m(s) - G_m^n(s)\}Q(s)}$$

만약 $|Q(j\omega)|=1$ 이면 식 (6)은 다음 식과 같이 표현된다.

$$G_{w_t}(s) \approx G_m^n(s), G_{d_t}(s) \approx 0, G_{\zeta v_t}(s) = -1 \quad (7)$$

이러한 경우 실제 시스템 G_m 은 공칭모델 G_m^n 처럼 거동하고 외란의 영향이 상쇄된다.

반면 $|Q(j\omega)|=0$ 이면 식 (6)은 다음 식과 같이 표현된다.

$$G_{w_t}(s) \approx G_m(s), G_{d_t}(s) \approx G_m(s), G_{\zeta v_t}(s) = 0 \quad (8)$$

이러한 경우 측정잡음이 억제되어 측정잡음에 대한 강인성이 향상된다. 따라서 저주파역에서는 외란 억제를 위해 $|Q(j\omega)|=1$, 고주파역에서는 측정잡음 억제를 위해 $|Q(j\omega)|=0$ 의 특성을 가지도록 Q-필터를 설계해야 한다. 이러한 외란 억제 성능과 측정 잡음 억제 성능에 대한 상충 조건(trade-off)이 Q-필터에 설계에 가장 중요한 고려사항이다. 이를 위해 다음과 같은 Q-필터가 도입된다.⁽¹⁾

$$Q(s) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-r} a_k (\tau s)^k}{1 + \sum_{k=1}^N a_k (\tau s)^k} \quad (9)$$

식 (9)의 계수 a_k 를 결정하기 위해 다음과 같은 최적화 문제가 일반적으로 사용된다.⁽¹⁾

$$\min_{a_k} \left[\left| W_1^{-1}(j\omega) \cdot \{1 - Q(j\omega)\} \right|^2 + \left| W_2^{-1}(j\omega) \cdot Q(j\omega) \right|^2 \right] \quad (10)$$

식 (10)에 대한 최적해로서 본 논문에서는 외란 억제 성능과 잡음 억제 성능 사이의 상충 관계를 고려하기 위해 $|Q(j\omega)|$ 의 고주파역 기울기와 $|1 - Q(j\omega)|$ 의 저주파역 기울기가 동일한 식 (11)과 같은 Q-필터를 도입한다.

$$Q(s) = \frac{4(s\tau) + 1}{(s\tau)^4 + 4(s\tau)^3 + 4(s\tau)^2 + 4(s\tau) + 1} \quad (11)$$

3. 서보 메커니즘 모델링

3.1 기계부 모델 규명

설계된 제어 시스템의 안정도 해석과 최적튜닝을 수행하기 위해 속도 제어기를 포함하고 있는 기계부 모델 및 외란 관측기의 공칭 모델이 규명되어야 한다.

본 논문에서는 서보계의 정확한 독특성을 파악하고, 비선형 특성들이 규명작업에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 모델을 유도하기 위해 sine-sweep signal을 입력신호로 사용하였으며, 특정한 주파수 영역에서 가중치를 부여할 수 있는 가중 최소 자승법을 사용하여 선형 요소를 규명한다.⁽¹⁰⁾

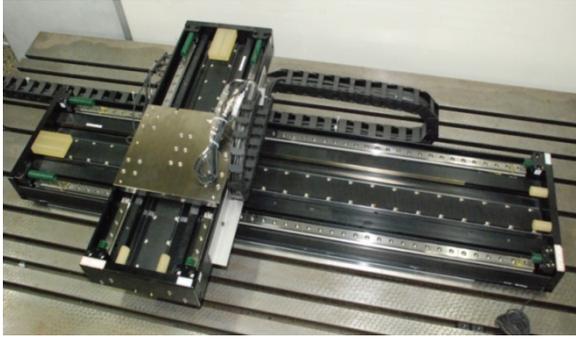


Fig. 4 Bi-axial linear stage

시스템 규명은 1msec 의 데이터 샘플링 주기와 함께 Fig. 4 의 Linear stage 에서 수행되었으며, 리니어 엔코더(linear encoder)는 50nm 의 분해능을 갖는 RSF 사의 MS 30.93 를 사용하였다. Fig. 5 는 시스템 규명작업을 통해서 얻은 주파수 응답 선도이며, 시스템 모델은 다음과 같다.

$$G_{mx}(s) = \frac{539553045.8103}{s(s^2 + 470.8727s + 139836.9465)}$$

$$G_{my}(s) = \frac{99838644.669}{s(s^2 + 427.8734s + 130129.9787)}$$

$$G_{mx}^n(s) = \frac{1165363.6706}{s(s + 290.1445)}, \quad G_{my}^n(s) = \frac{111555.4817}{s(s + 128.8477)} \quad (12)$$

3.2 시스템 모델링

Fig. 6 은 앞먹임 제어기와 상호 결합 제어기, 외란 관측기가 통합된 전체 리니어 서보시스템의 구조이다. 여기서 각 축의 위치 제어기 $P_{x,y}$ 및 상호 결합제어기 C_c , 속도 제어기 $PD_{x,y}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{x,y}(s) = K_{px,py} \quad (13)$$

$$C_c(s) = K_{pc} \quad (14)$$

$$PD_{x,y}(s) = K_{ppx,ppy} + K_{ddx,ddy}s \quad (15)$$

이 시스템의 수학적 모델은 선형운동에 근거하여 다중 입출력 시스템에 적합한 상태 공간 방정식(state space equation)으로 정의할 수 있다.^(2,4)

4. 최적튜닝

4.1 최적튜닝의 목적 및 고려사항

본 논문에서 최적튜닝의 목적은 설계된 서보계가 여러 성능 및 제한 조건을 만족하면서 빠른 응답성과 윤곽정밀도를 향상시키기 위함이다. 이를

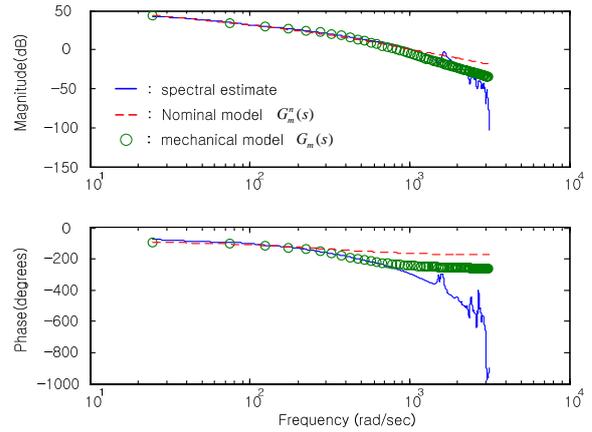


Fig. 5 Frequency responses of the mechanical models

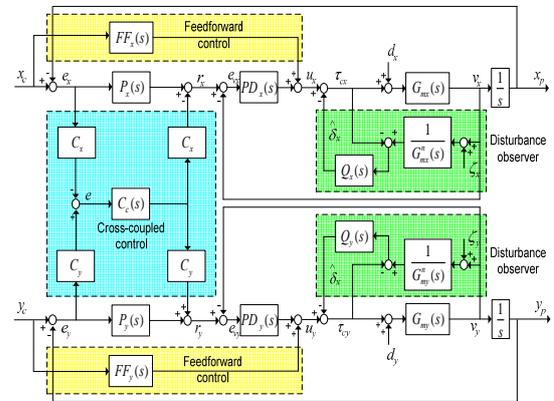


Fig. 6 Block diagram of the overall system

위해 식 (1)에서 정의된 윤곽오차와 2% 기준 정착 시간의 최소화가 다목적 함수(multi-objective function)로 고려되었다.^(4,6)

4.2 구속 조건

제어이득을 튜닝하기 위해서는 시스템의 안정성을 반드시 고려해야 한다. 하지만 시스템을 규명하는 과정에서 발생하는 모델링 오차, 상호결합제인의 변동으로 인해 시스템에 불확실성이 존재하고 안정성에 영향을 미친다. 따라서 시스템의 안정성을 확보하기 위해 상대 안정도가 구속 조건으로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 상태 공간 방정식으로 수립된 시스템의 상대 안정도를 고려하기 위해서 카리토노브 정리⁽⁴⁾를 적용한다.

또한, 시스템의 응답성만을 고려하면 과도한 오버슈트가 발생하기 때문에 최대 오버슈트가 구속 조건으로 고려된다. 그러나 최대 오버슈트는 설계된 시스템의 이동경로에 따른 θ 값의 변동에 의해 값이 변화한다. 만약 θ 가 0° 도에 가까워지면 Y 축의 오버슈트가 증가하고, 90° 도에 가까워지면 X 축의 오버슈트가 증가한다. 따라서 본 논문에서

는 10°에서 Y 축의 최대오버슈트를 제한조건으로 두고, 80°에서 X 축의 최대 오버슈트를 제한조건으로 고려한다.

4.3 최적 튜닝 문제의 정식화

서보계의 수학적 모델과 성능평가 함수들로부터 최적 튜닝 문제는 식 (16)와 같이 일반화된 비선형 최적화 문제로 정식화된다. 또한, 최적 튜닝을 위한 설계변수는 모든 제어기 파라미터인 $K_{px}, K_{py}, K_{pc}, K_{ppx}, K_{ddy}, K_{ppy}, K_{ddy}, K_{ffvx}, K_{ffvy}, K_{ffax}, K_{ffay}, \tau_{qx}, \tau_{qy}$ 로 선정한다. Table 1 은 최적 튜닝 시 고려되어야 할 구속 조건이다.

Minimize

$$F_n(\mathbf{x}) = w_1 \varepsilon_1^n + w_2 t_s^n$$

subject to

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1 \sim 7 \quad (16)$$

$$x_j^l \leq x_j \leq x_j^u, \quad j = 1 \sim 12$$

$$\mathbf{x} = [K_{px}, K_{py}, K_{pc}, K_{ppx}, K_{ddy}, K_{ppy}, K_{ddy}, K_{ffvx}, K_{ffvy}, K_{ffax}, K_{ffay}, \tau_{qx}, \tau_{qy}]$$

5. 최적튜닝 실험결과

본 논문에서는 제한조건이 있는 비선형 문제에 적합한 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘과 MATLAB 을 사용하여 식 (16)에 표현된 최적화 문제의 해를 도출한다. 작동 조건으로 1m/min 의 이송속도와 1%의 불확실성, 다목적 함수의 가중치 $\omega_{1,2} = 0.5$ 인 값을 사용한다. 최적 튜닝에 필요한 초기값은 각축 위치제어기 및 각축 속도제어기만 사용한 경우에 시행착오법으로 튜닝한 x 축과 y 축의 제어이득을 사용한다.

Table 2 는 최적 튜닝의 결과이다. 최적 튜닝 방법의 우수성과 실효성을 검증하기 위해 Linear stage 를 대상으로 1msec 의 샘플링 주기를 가지는 성능평가 실험을 수행한다. 성능 평가 실험은 반경 50mm 의 사각 모션으로 수행되었다. 실험 결과는 Fig. 7,8 에 나타내었다.

선형운동 결과인 Fig. 7 을 보면 앞먹임 제어기와 상호결합제어기 그리고 외란관측기를 사용하지 않는 uncoupled system 의 경우 15 μm 의 윤곽 오차를 나타내었으며, 상호결합제어기를 사용한 경우 7 μm , CCC+FF 인 경우 3.5 μm 까지 윤곽 오차가 줄어들었다. 그러나, 제안된 CCC+FF+DOB 의 최적튜닝을 적용한 시스템의 결과는 150nm 이하의

Table 1 Constraints for optimal tuning

Description	Constraints
Relative stability	$g_1 : s_i^{++} < 0$ $s_i^{++} = \{s : P^{++}(s) = 0\}, i = 1 \sim 20$
	$g_2 : s_i^{--} < 0$ $s_i^{--} = \{s : P^{--}(s) = 0\}, i = 1 \sim 20$
	$g_3 : s_i^{+-} < 0$ $s_i^{+-} = \{s : P^{+-}(s) = 0\}, i = 1 \sim 20$
	$g_4 : s_i^{-+} < 0$ $s_i^{-+} = \{s : P^{-+}(s) = 0\}, i = 1 \sim 20$
Maximum overshoot	$g_5 : M_x(\theta) < 15\%$, where $\theta = 80^\circ$ $g_6 : M_y(\theta) < 15\%$, where $\theta = 10^\circ$

Table 2 Optimal tuning results : control gains

Design variable	Unit	Initial design (uncoupled)	Optimal tuning
$x_1(K_{px})$	V/V	180.000	199.895
$x_2(K_{py})$	V/V	180.100	200.002
$x_3(K_{pc})$	V/V	0.000	200.038
$x_4(K_{ppx})$	V/V	4.000	4.012
$x_5(K_{ddy})$	V/V	0.010	0.0095
$x_6(K_{ppy})$	V/V	10.000	10.003
$x_7(K_{ddy})$	V/V	0.050	0.06
$x_8(K_{ffvx})$	V/V	0.000	0.001
$x_9(K_{ffvy})$	V/V	0.000	0.0004
$x_{10}(K_{ffax})$	V/V	0.000	0.001
$x_{11}(K_{ffay})$	V/V	0.000	0.0005
$x_{12}(\tau_{qx})$	V/V	0.000	0.02
$x_{13}(\tau_{qy})$	V/V	0.000	0.02

윤곽 오차를 보임으로서 다른 제어기에 비해 월등히 뛰어난 성능을 나타낸다. 즉, 개발된 제어기는 선형 운동에서 uncoupled system 에 0.01 배, CCC 인 경우 0.02 배, CCC+FF 인 경우 0.04 배의 윤곽 오차 감소율을 보였다. 코너 모션 결과인 Fig. 8 를 보면, uncoupled system 은 코너 부분에서 command path 를 제대로 추종하지 못하고, 큰 오차를 나타낼 수 있다. CCC 와 CCC+FF 의 경우, uncoupled system 에 비해 상당히 개선된 결과를 보였지만, 어느 정도 오차가 존재함을 알 수 있다.

하지만 CCC+FF+DOB 의 경우, 코너부근에서 오차가 존재하긴 하지만, 이전 제어기들에 비해 코너오차 성능이 월등히 향상된 것을 알 수 있다.

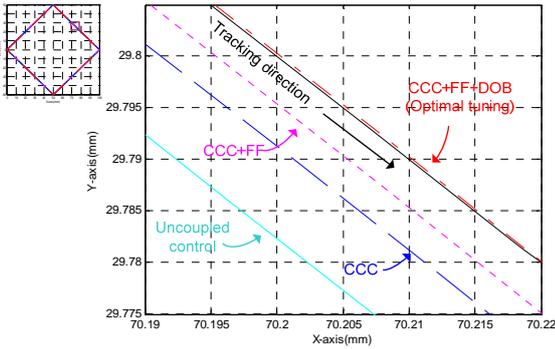


Fig. 7 Experimental results of the linear motion

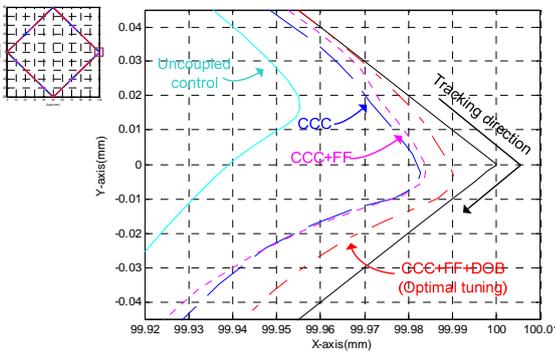


Fig. 1 Experimental results of the corner motion

6. 결론

본 논문에서는 리니어 서보시스템의 추종 및 윤곽 오차의 감소와 외란에 대한 강인성을 향상시키기 위하여 상호결합제어기와 앞먹임제어기 그리고 외란관측기를 적용한 시스템을 개발하였다. 또한, 통합 설계를 기반으로 한 최적튜닝 제어 기법이 적용하였다. 제안된 시스템의 우수성을 검증하기 위해 Linea stage 를 대상으로 개발된 시스템을 구현하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 상대안정도와 오버슈트 등의 구속조건을 만족시키면서 윤곽오차와 정착시간을 최소화하는 최적튜닝 문제를 정식화하였다.

(2) 서보계 기계요소 모델 및 공칭 모델을 시스템 규명법을 사용하여 규명하였으며, 전체 시스템의 수학적 모델을 선형 운동에 근거하여 상태공간 방정식으로 유도하였다.

(3) 통합설계에 의해 설계된 CCC+FF+DOB 시스템은 성능 실험을 통해, 선형 모션 및 코너 모션에서 uncoupled controller, CCC, CCC+FF 에 비해 월등히 뛰어난 오차개선 효과를 나타냄을 확인하였다.

- (1) Kim, M. S. and Chung, S. C., 2005, "Integrated Design of Servomechanisms using a Disturbance Observer," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 29. No. 4, pp. 591~599(in Korea).
- (2) Kim, M. S., Sung, C. M. and Chung, S. C., 2007, "Integrated Design of High-performance Servomechanisms Using a Disturbance Observer," *Proceedings of the ASPE, Annual Meeting*, pp. 171~174.
- (3) Umeno, T., Kaneko, T. and Hori, Y., 1993, "Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot manipulators," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, pp. 473-485.
- (4) Bae, H. K. and Chung, S. C., 2006, "Optimal Tuning of Biaxial Servomechanisms using a Cross-Coupled Controller," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 34, pp. 603~610.
- (5) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265~272.
- (6) Sung, C.M., Kim K.D., Kim and Chung S.C., 2007, "Intergrated Tuning of Bi-axial Servomechanisms for Precise Motion Control," *Proceedings of the ASPE, Annual Meeting*, pp. 183~186.
- (7) Kim, M.S. and Chung, S.C., 2006, "Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers. Part I: Modeling and performance analysis," *Mechatronics*, Vol. 16, pp. 491~502.
- (8) Kim, M.S. and Chung, S.C., 2006, "Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers. Part II: Formulation and synthesis of the integrated design," *Mechatronics*, Vol. 16, pp. 503~512.
- (9) Kim, M.S. and Chung, S.C., 2005, "Integrated design methodology for high-precision/speed servo mechanisms," *Proc. ImechE, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 219, pp. 843~852.
- (10) Kim, M.S. and Chung, S.C., 2006, "Friction Identification of Ball-screw Driven Servomechanisms through the Limit Cycle Analysis," *Mechatronics*, Vol. 16, pp. 131~140.
- (11) Tarn, Y. S., Ghuang, H. Y. and Hsu, W. T., 1997, "An Optimization Approach to the Contour Error Control of CNC Machine Tools Using Genetic Algorithms," *International of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 359~366.