

# 고정밀 운동제어를 위한 2축 서보메커니즘의 최적튜닝

성철모\*, 정성종<sup>+</sup>

(논문접수일 2008. 2. 19, 심사완료일 2008. 5. 23)

## Optimal Tuning of Bi-axial Servomechanisms for High-Precision Motion Control

Chul-mo Sung\*, Sung-Chong Chung<sup>+</sup>

### Abstract

In this paper, the optimal tuning of a cross-coupled controller linked with the feedforward controller is studied to reduce contouring and tracking errors of a bi-axial servomechanisms by using the previously developed integrated tuning method. The CCC system for an arbitrary curve, which is combined with the feedforward controller, is formulated by a state-space based on a series of linear motion trajectories. An optimal tuning problem is formulated as a nonlinear constrained optimization problem including relevant controller parameters of the servo. To verify the effectiveness of the proposed optimal tuning procedure, linear and circular motion experiments are performed on the xy-table. Experimental results confirm that both tracking and contouring errors are significantly reduced by applying the proposed control and tuning system.

**Key Words** : Countour Error(윤곽오차), Cross-coupled Controller(상호결합제어기), Feedforward Controller(앞먹임제어기), Integrated Design(통합설계), Optimal Tuning(최적튜닝), Servomechanisms(서보계), Tracking Error(추종오차)

## 1. 서론

고속 고정밀의 서보계(Servomechanism)는 공작기계, 반도체 및 평판디스플레이(flat panel display, FPD), 제조장비 등과 같은 자동화 시스템에 폭넓게 사용된다. 특히, 다축 제어 시스템의 경우 고정밀도에서 생산성 향상을 위해서는 위치결정 정밀도뿐만 아니라 추종정밀도(tracking accuracy)와 윤곽정밀도(contouring accuracy)를 향상시키는 것이 중

요하다.

따라서 Servo lag, 마찰력 및 외부부하와 관련된 서보의 추종정밀도를 높이기 위해 ZPETC<sup>(1)</sup>나 Optimal ZPETC<sup>(2)</sup>와 같은 앞먹임 방식의 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이러한 역 모델을 기반으로 한 앞먹임제어기(feedforward control)의 튜닝은 많은 수의 제어이득을 튜닝해야 하는 어려움이 있고, 제어 시스템의 모델링 오차 때문에 완벽한 추종성능을 기대하기 어려워 산업현장에 적용이 난해한 실정이다.

\* 한양대 대학원 기계공학과

+ 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (schung@hanyang.ac.kr)

주소: 133-791 서울시 성동구 행당1동 17번지

또한, 산업현장에서 사용하는 다축제어 시스템은 각 축을 별개로 제어하여 각각의 위치오차를 줄이는데, 이 경우 시스템의 윤곽정밀도를 만족시키기 위해서는 두 축을 교차시키고 다른 축의 거동을 고려하여 제어함으로써 직접적으로 윤곽오차를 줄이는 상호결합제어(Cross-coupled control) 방식<sup>(3)</sup>이 필요하다. 그러나 상호결합제어기로 이루어진 시스템은 다변수(multivariable), 비선형(nonlinear) 그리고 시변(time-varying) 시스템이기 때문에 제어이득을 선정하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 다축 제어시스템의 추종정밀도와 윤곽정밀도를 향상시키기 위해 이미 연구된 통합설계(integrated design) 방법론<sup>(4-9)</sup>과 최적튜닝(optimal tuning)방법론<sup>(10)</sup>을 바탕으로 상호결합제어기와 앞먹임제어기를 결합한 2축 서보메커니즘의 최적튜닝 시스템을 제안한다. 제어대상 시스템인 기계부 모델을 시스템 규명법<sup>(11)</sup>을 이용하여 규명하고, 통합설계 방법론에 근거한 최적화 작업을 통해 다중입출력 시스템에 적용 가능한 최적 제어이득을 얻어낸다. 그리고 제안된 시스템의 성능이 이전에 연구된 최적튜닝의 결과보다 개선된 효과를 검증하기 위해 xy 테이블을 대상으로 선형 및 코너운동과 원형운동의 실험을 수행하여 제안된 제어기와 최적튜닝법의 효율성을 검증한다.

## 2. 제어시스템

### 2.1 추종오차와 윤곽오차

운동 시스템에서 일반적으로 두 가지의 오차를 정의할 수 있다. 하나는 추종오차(tracking error)로써 제어 대상체의 기준위치와 실제 위치와의 차로써 정의되고, 또 다른 하나는 윤곽오차(contouring error)로써 기준궤적과 실제궤적과의 법선 방향의 차로 정의된다. Fig. 1과 Fig. 2는 선형운동과 원형운동을 각각 나타낸다. 선형운동과 원형운동을 하는 경

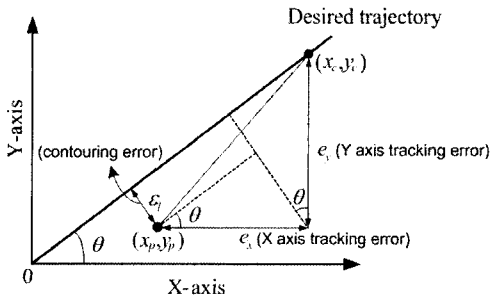


Fig. 1 Error model for a linear motion

우의 윤곽오차는 Fig. 1과 Fig. 2에서 보여진 관계로부터 다음 식과 같이 계산된다<sup>(10)</sup>.

$$e_l = -e_x \sin\theta + e_y \cos\theta \quad (1)$$

$$e_r = -e_x \left( \sin\theta - \frac{e_x}{2R} \right) + e_y \left( \cos\theta + \frac{e_y}{2R} \right) \quad (2)$$

### 2.2 앞먹임제어

Fig. 3은 추종오차를 줄이기 위해 앞먹임 제어가 추가된 제어 시스템이다. 그림에서와 같이 속도, 가속도 앞먹임제어기는 Servo lag, 마찰력 및 외부부하와 관련된 서보의 추종오차를 줄이기 위해 설계된다. 각 축에 구성된 속도 앞먹임 제어기와 가속도 앞먹임제어기는 다음과 같이 정의된다.

$$Feedforward)_x = K_{VF_x} \dot{x} + K_{AF_x} \ddot{x} \quad (3)$$

$$Feedforward)_y = K_{VF_y} \dot{y} + K_{AF_y} \ddot{y} \quad (4)$$

앞먹임제어기는 구동 프로파일을 수치미분하여 적정게인을 곱하여 제어기 출력이 더해주는 방법으로써 대부분의 경우에서 충분한 추종성능을 낼 수 있기 때문에 실제 산업계에서 많이 사용되고 있다. 앞먹임제어기를 이용하여 필요 전류

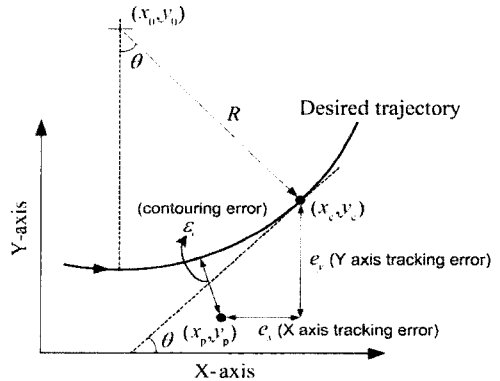


Fig. 2 Error model for a circular motion

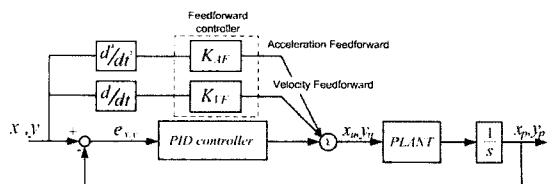


Fig. 3 Block diagram of the feedforward control system

의 Nominal값을 넣어주면 전체 제어기 출력에서 Feedback 제어기가 담당해야 할 양이 적어지므로 같은 피드백 제어 대역폭으로도 서보의 추종성능을 향상시킬 수 있다.

### 2.3 상호결합제어

상호결합제어 시스템의 목적은 각각의 축을 독립적으로 제어하여 추종오차를 줄이기 보다는 두 축을 교차시키고, 다른 축의 거동을 고려하여 제어함으로써 직접적으로 윤곽오차를 줄이는데 목적을 둔다. 여러 축을 제어해야 하는 시스템에서 하나의 축 운동이 전체 시스템에 영향을 미치기 때문에 상호결합제어기가 적용된 시스템이 일반적으로 교차되지 않은 제어기보다 더 좋은 윤곽정밀도를 보여준다.

Fig. 4는 윤곽오차를 줄이기 위한 상호결합제어 시스템이다. 각 축에 구성된 위치제어기와 상호결합제어기  $C_c$ 는 PID 제어기로 구성하였고, 상호결합계인(cross-coupling gain)  $C_x, C_y$ 는 지령궤적의 형태에 따라 값이 변하게 된다. 선형운동을 하는 시스템과 원형운동을 하는 시스템의 상호결합계인은 식 (1)과 (2)에 주어진 윤곽오차의 계산식에 의해 Fig. 4로부터 각각 다음과 같이 정의된다<sup>(10)</sup>.

$$C_x = \sin\theta, C_y = \cos\theta \quad (5)$$

$$C_x = \sin\theta - \frac{e_x}{2R}, C_y = \cos\theta + \frac{e_y}{2R} \quad (6)$$

## 3. 서보계 모델링

### 3.1 기계부 모델 규명

이미 연구된 통합설계 방법론과 최적튜닝 방법론을 적용시키기 위해서는 속도제어기를 포함하고 있는 기구부 모델

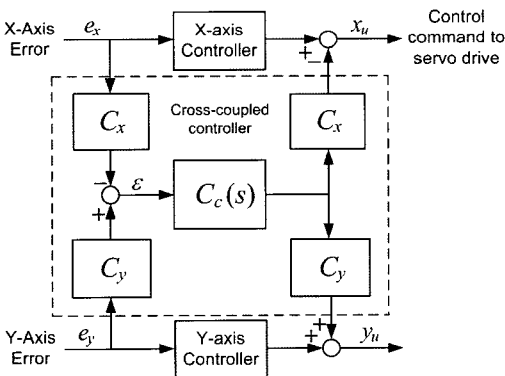


Fig. 4 Block diagram of the cross-coupled control system

의 규명(identification)이 선행되어야 한다.

기구부 시스템의 정밀한 다이나믹 모델을 유도하기 위해 입출력 데이터로부터 실험적으로 모델을 규명하였다. 시스템 규명은 1msec의 데이터 샘플링 주기와 함께 xy 테이블을 대상으로 수행한다. Fig. 5는 AC 서보모터, 볼나사(Ball-screw) 그리고 1 $\mu$ m의 분해능을 갖는 동산 제닉스의 JSSIL-300mm 리니어엔코더(linear encoder)로 구성된 xy 테이블을 나타낸 것이다.

특정한 주파수 영역에 가중치를 부여할 수 있는 가중 최소자승법<sup>(12)</sup>으로부터 2차 ARMAX 모델이 주어진다. 만약 시스템에 가할 수 있는 신호의 최대크기가 제한되어 있는 경우, PBRs(Gaussian Pseudo Random Binary Sequence) 신호는 백색잡음보다 파워 스펙트럼의 밀도가 더 높기 때문에 입력신호로서의 장점을 가지게 된다. 따라서, 입력신호인 속도지령은 대상시스템의 Nyquist 주파수까지 단위 스펙트럼을 가지는 PRBS를 사용하고, 모터의 회전속도를 출력으로 사용한다. 최적튜닝을 효과적으로 수행하기 위해 규명된 기계부 모델  $G_{mi}(s), G_{mj}(s)$ 은 식 (7)과 같이 2차로 유도되며, MATLAB의 toolbox<sup>(14)</sup>와 simulink<sup>(16)</sup>를 사용하여 시스템의 규명작업을 수행한다.

$$[G_{mi}(s)]_{i=x,y} = \frac{n_{i1}}{s^2 + m_{i1}s + m_{i2}} \quad (7)$$

Fig. 6은 규명된 기구부 모델의 Bode 선도이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 400rad/s 이상의 고주파 영역에서는 잡음 등의 영향으로 근사오차가 존재하지만, 실제 운동에서 큰 영향을 미치는 저주파 영역에서는 실제 모델과 잘 일치하고 있다. 따라서 최적튜닝을 위한 기계요소 모델은 신뢰성 있게 적용된다.

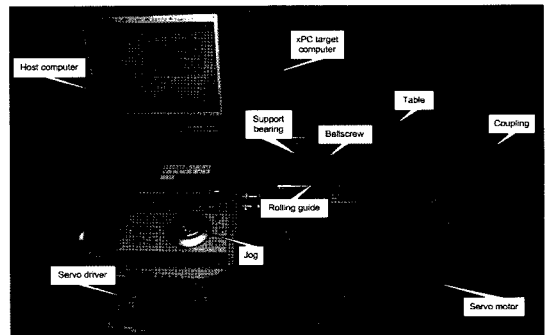


Fig. 5 Configuration of the xy table

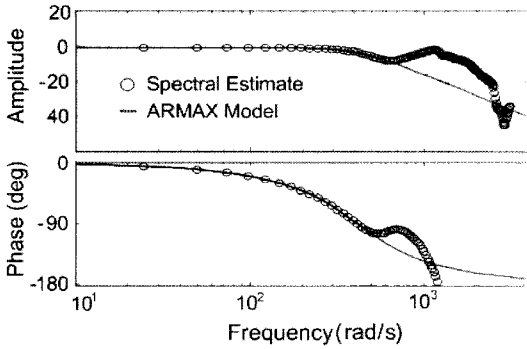


Fig. 6 Bode plot of the mechanical subsystem model

### 3.2 상태변수 모델링

Fig. 7은 앞먹입제어기와 상호결합제어기가 통합된 전체 서보제어 시스템의 구조이다. 여기서,  $P_x, P_y$ 는 각 축의 위치 제어기,  $FF_x, FF_y$ 는 대역폭을 제한하는 각 축의 속도, 가속도 앞먹입제어기,  $C_c$ 는 상호결합 제어기,  $C_{xy}$ 는 상호결합 게인으로 일반적인 곡선이 직선의 연속이라는 가정<sup>(10)</sup>하에 다음과 같이 정의된다.

$$P_{x,y}(s) = K_{px,py} + K_{ix,iy} \frac{1}{s} + \frac{K_{dx,dy}s}{\tau_{dx,dy}s + 1} \quad (8)$$

$$FF_x(s) = K_{ffvx} \left( \frac{s}{\tau_{ffvx}s + 1} \right) + K_{ffvx} \left( \frac{s}{\tau_{ffvx}s + 1} \right)^2 \quad (9)$$

$$FF_y(s) = K_{ffvy} \left( \frac{s}{\tau_{ffvy}s + 1} \right) + K_{ffvy} \left( \frac{s}{\tau_{ffvy}s + 1} \right)^2 \quad (10)$$

$$C_c(s) = K_{pc} + K_{vc} \frac{1}{s} + \frac{K_{dc}s}{\tau_{dc}s + 1} \quad (11)$$

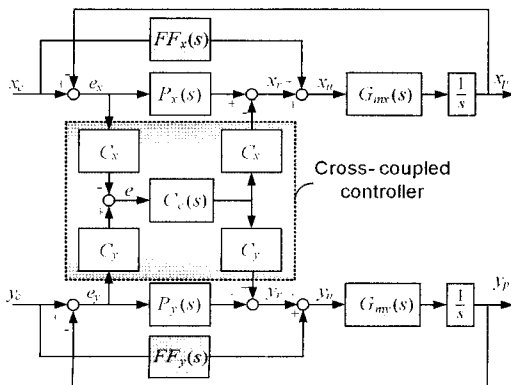


Fig. 7 Block diagram of the overall system

$$C_x = \sin\theta, C_y = \cos\theta \quad (12)$$

식 (7)과 위에 제시한 제어기를 통합한 전체 서보제어 시스템의 상태공간 모델은 식 (13)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_c X + B_c U \\ Y &= C_c X \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ \dot{x}_1 + a_8 x_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_{17} + f_1 x_1 + e_1 x_{10} - h_1 u_1 - g_1 u_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_c \\ y_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} -a_8 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -a_7 & 0 & 1 & \dots & 0 & -b_7 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -e_8 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -f_7 & 0 & 0 & \dots & 0 & -e_7 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ -f_6 & 0 & 0 & \dots & 0 & -e_6 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -f_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -e_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 & c_7 & c_6 & \dots & c_0 & 0 & h_7 & h_6 & \dots & h_0 \\ 0 & d_7 & d_6 & \dots & d_0 & 0 & g_7 & g_6 & \dots & g_0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{n_{c1}(K_{ix} + K_{ix}(1 - \cos^2\theta))}{\tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx}^2} \\ &\vdots \\ a_8 &= \frac{\tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx}m_{c1} + \tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx} + \tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx} + 2\tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx} + \tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx}}{\tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx}^2} \\ b_0 &= d_0 = \frac{n_{c1}K_{ix}\sin\theta\cos\theta}{\tau_{dx}\tau_{dx}\tau_{fx}\tau_{fx}^2} \\ &\vdots \\ b_7 &= d_7 = \frac{n_{c1}(K_{px}\tau_{dx} + K_{dx})\sin\theta\cos\theta}{\tau_{dx}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_0 &= \frac{n_{x1} \{K_{ix} + K_{ic}(1 - \cos^2 \theta)\}}{\tau_{dx} \tau_{dx} \tau_{fxx} \tau_{fxx}^2} \\
 &\vdots \\
 c_3 &= \frac{n_{x1} \{\tau_{dx} \tau_{dx} \tau_{fxx} \tau_{fxx}^2 (K_{fxx} + K_{px} + K_{dx})\}}{\tau_{dx} \tau_{dx} \tau_{fxx} \tau_{fxx}^2} \\
 &\quad + \frac{n_{x1} \{\tau_{dx} \tau_{fxx} \tau_{fxx}^2 \cos^2 \theta (-K_{dx} - K_{pc}) + \tau_{dx} \tau_{fxx}^2 (K_{fxx} \tau_{dx} + K_{dx} \tau_{fxx})\}}{\tau_{dx} \tau_{dx} \tau_{fxx} \tau_{fxx}^2} \\
 e_0 &= \frac{n_{y1} (K_{iy} + K_{ic} \cos^2 \theta)}{\tau_{dy} \tau_{dy} \tau_{fy} \tau_{fy}^2} \\
 &\vdots \\
 e_5 &= \frac{\tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy} \tau_{fy} m_{y1} + \tau_{dy} \tau_{fy} \tau_{fy} + 2\tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy} + \tau_{dx} \tau_{fy} \tau_{fy} + \tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy}}{\tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy} \tau_{fy}^2} \\
 f_0 = h_0 &= \frac{n_{y1} K_{ic} \sin \theta \cos \theta}{\tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy} \tau_{fy}^2} \\
 &\vdots \\
 f_6 = h_6 &= \frac{n_{y1} (K_{py} \tau_{dy} + K_{dy}) \sin \theta \cos \theta}{\tau_{dx}} \\
 g_0 &= \frac{n_{y1} (K_{iy} + K_{ic} \cos^2 \theta)}{\tau_{dy} \tau_{dx} \tau_{fy} \tau_{fy}^2} \\
 &\vdots \\
 g_3 &= \frac{n_{y1} \{\tau_{dx} (K_{py} \tau_{dy} + K_{dy}) + \tau_{dy} (K_{pc} \tau_{dx} + K_{dx}) \cos^2 \theta\}}{\tau_{dy} \tau_{dx}}
 \end{aligned}$$

#### 4. 최적튜닝 문제의 정식화

본 논문에서 고려한 최적튜닝의 목적은 앞먹임제어기와 상호결합제어기가 통합된 서보제어 시스템이 여러 성능조건과 제한조건들을 만족하면서 빠른 응답성과 정밀도를 향상시키기 위함이다. 따라서 식 (1)에서 정의된 윤곽오차와 식 (15)에서 정의한 정착시간의 최소화가 다목적 함수(multi-objective function)로 고려된다. 정착시간은 단위계단 입력에 대한 시스템의 응답곡선이 최종값의 ±2%내의 범위에 머물게 되는 시간으로 다음 식과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 t_{sx} &= \{t : x_p(t) = 0.98x_{ss}\} \\
 t_{sy} &= \{t : y_p(t) = 0.98y_{ss}\}
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기서  $t_{sx}$ ,  $t_{sy}$ 는 각 축의 정착시간이고,  $x_{ss}$ ,  $y_{ss}$ 는 각 축의 단위계단 입력에 대한 정상상태 응답이다.

또한 최적화 과정 중에 발생할 수 있는 설계변수의 발산 및 유효숫자 등과 관련된 계산오차를 최소화하기 위해 식 (15)와 같이 다목적 함수의 각 항을 무차원 변수로 변환하여

최적튜닝 과정에 사용한다.

$$F_n(X) = w_1 \varepsilon_l^n + w_2 t_s^n \tag{15}$$

$$\text{여기서, } \varepsilon_l^n = \left| \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{l0}} \right|, \quad t_s^n = \frac{t_{sx} + t_{sy}}{t_{sx0} + t_{sy0}}$$

여기서  $w_1$ 과  $w_2$ 는 목적함수의 가중치,  $\varepsilon_l$ 은 윤곽오차,  $\varepsilon_{l0}$ 는 윤곽오차의 초기값,  $t_{sx}$ ,  $t_{sy}$ 는 각 축의 정착시간,  $t_{sx0}$ ,  $t_{sy0}$ 는 각 축의 정착시간 초기값이다. 그리고 시스템의 응답성만을 고려하면 과도한 오버슈트가 발생하기 때문에 식 (16)에 정의한 최대 오버슈트가 제한조건으로 고려된다.

$$\begin{aligned}
 M_x &= \frac{\max\{x_p(t)\} - x_{ss}}{x_{ss}} \times 100\% \\
 M_y &= \frac{\max\{y_p(t)\} - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\%
 \end{aligned} \tag{16}$$

설계된 제어 시스템은 이동경로에 따라  $\theta$ 값이 달라지므로 그에 따른 오버슈트 역시 다른 결과를 보인다.  $\theta$ 가  $0^\circ$ 에 가까워질수록 Y축의 오버슈트가 증가하고 반대로 X축의 오버슈트가 증가하는 부분은  $90^\circ$ 에 가까워진다<sup>(10)</sup>. 따라서 본 논문에서는  $10^\circ$ 에서 Y축의 최대오버슈트를 제한조건으로 두고,  $80^\circ$ 에서 X축의 최대 오버슈트를 제한조건으로 고려한다. 또한, 시스템을 규명하는 과정에서 발생하는 모델링 오차, 이동경로에 따라 변하는  $\theta$ 의 영향에 따른 상호결합계인의 변동 등에 따라서 시스템에 불확실성이 존재하기 때문에 시스템의 안정도 확보를 위해 상대안정도가 고려되어야 한다. 상대안정도를 고려하기 위해 카리토노브 다항식<sup>(10)</sup>을 이용한다. 최적튜닝 시 고려되어야 할 제한조건들을 Table 1에 나타내었다.

그리고, 최적튜닝을 위한 설계변수로서 모든 제어기 파라미터인  $K_{px}$ ,  $K_{dx}$ ,  $K_{ix}$ ,  $K_{py}$ ,  $K_{dy}$ ,  $K_{iy}$ ,  $K_{pc}$ ,  $K_{dc}$ ,  $K_{ic}$ ,  $K_{ffvx}$ ,  $K_{ffvy}$ ,  $K_{ffax}$ ,  $K_{ffay}$ 를 선정한다. 서보계의 수학적 모델과 성능평가 함수들로부터 최적튜닝 문제는 다음 식과 같이 일반화된 비선형 최적화 문제로 정식화 된다<sup>(4-9)</sup>.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} \\
 &F_n(\mathbf{x}) = w_1 \varepsilon_l^n + w_2 t_s^n \\
 &\text{subject to} \\
 &g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1 \sim 6 \\
 &x_j^l \leq x_j \leq x_j^u, \quad j = 1 \sim 13 \\
 &\mathbf{x} = [K_{px}, K_{dx}, K_{ix}, K_{py}, K_{dy}, K_{iy}, K_{pc}, \\
 &K_{dc}, K_{ic}, K_{ffvx}, K_{ffvy}, K_{ffax}, K_{ffay}]
 \end{aligned} \tag{17}$$

Table 1 Constraints for optimal tuning

Description	Constraints
Relative stability	$g_1 : s_i^{++} < 0$
	$s_i^{++} = \{s : P^{++}(s) = 0\}, i = 1 \sim 18$
	$g_2 : s_i^{--} < 0$
	$s_i^{--} = \{s : P^{--}(s) = 0\}, i = 1 \sim 18$
	$g_3 : s_i^{+-} < 0$
	$s_i^{+-} = \{s : P^{+-}(s) = 0\}, i = 1 \sim 18$
Maximum overshoot	$g_5 : M_s(\theta) < 15\%, \text{ where } \theta = 80^\circ$
	$g_6 : M_s(\theta) < 15\%, \text{ where } \theta = 10^\circ$

Table 2 Optimal tuning results : design variables

Design variable	Unit	Initial design (uncoupled)	Optimal tuning
$x_1 (K_{px})$	V/V	100.000	153.680
$x_2 (K_{dx})$	V/V	0.100	0.32783
$x_3 (K_{rx})$	V/V	0.100	0.00259
$x_4 (K_{py})$	V/V	80.000	151.460
$x_5 (K_{dy})$	V/V	0.100	0.35974
$x_6 (K_{ry})$	V/V	0.100	0.00384
$x_7 (K_{pr})$	V/V	0.000	85.1120
$x_8 (K_{dr})$	V/V	0.000	0.49830
$x_9 (K_{ir})$	V/V	0.000	0.00025
$x_{10} (K_{ffvx})$	V/V	0.000	0.00590
$x_{11} (K_{ffvy})$	V/V	0.000	0.01980
$x_{12} (K_{ffox})$	V/V	0.000	0.00020
$x_{13} (K_{ffoy})$	V/V	0.000	0.00050

### 5. 최적튜닝 실험결과

본 논문에서는 제한조건이 있는 비선형 최적화 문제에 적합한 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘<sup>(13)</sup>과 MATLAB<sup>(15)</sup>을 사용하여 식 (17)로 표현된 최적화 문제의 해를 도출한다. 작동조건은 1m/min의 이송속도와 목적함수의 윤곽오차에 대한 가중치  $w_1$ 과 정착시간에 대한 가중치  $w_2$ 는 각각 0.5의 값을 사용한다. 3.1절의 방법으로 유도된 서보메커니즘의 수학적 모델은 (18), (19) 식과 같다.

$$G_{mx}(s) = \frac{206500}{s^2 + 696.9s + 238300} \quad (18)$$

$$G_{my}(s) = \frac{154800}{s^2 + 574s + 173400} \quad (19)$$

xy 테이블의 규명된 파라미터에  $\pm 1\%$ 의 불확실성이 존재한다고 가정하고, X축과 지령궤적 사이의 각이  $45^\circ$ 인 선형운동<sup>(10)</sup>에 대하여 최적튜닝을 수행한다. 최적튜닝의 수행에 필요한 초기값은 앞먹임제어기와 상호결합제어기를 사용하지 않는 경우에 시행착오법으로 튜닝한 x축과 y축의 제어이득을 사용한다.

Table 2는 최적튜닝의 결과이다. 최적튜닝 기법의 우수성과 실효성을 검증하기 위해 Fig. 5에서 제시된 xy 테이블을 대상으로 선형운동과 원형운동의 성능평가 실험을 수행한다.

#### 5.1 선형운동

최적튜닝 결과를 적용한 시스템의 성능을 알아보기 위해 앞먹임제어기와 상호결합제어기를 모두 사용하지 않은 시스

템과 시행착오법으로 튜닝한 상호결합제어 시스템, 그리고 이전에 연구된 CCC+PID의 최적튜닝<sup>(10)</sup>과 함께 비교하여 제안된 시스템의 우수성을 증명한다.

선형운동 결과인 Fig. 8을 살펴보면, 앞먹임제어기와 상호결합제어기를 사용하지 않은 시스템의 경우  $23\mu\text{m}$ 의 윤곽오차를 나타내었고, 시행착오법으로 튜닝된 상호결합제어기를 사용한 경우  $8\mu\text{m}$ 으로 윤곽오차가 감소되어 상호결합제어기의 효과를 살펴볼 수 있다. 또한 선형연구인 CCC+PID의 최적튜닝 결과를 적용한 시스템의 경우  $2\mu\text{m}$ 까지 윤곽오차가 감소되었다. 그러나, 제안된 CCC+FF+PID의 최적튜닝을 적용한 시스템의 결과는  $0.5\mu\text{m}$  이하의 윤곽오차를 보임으로서 보다 더 좋은 성능을 나타낸다. 즉, 개발된 제어시스템은 상호결합제어기를 사용하지 않은 시스템보다 98%, 시행착오법으로 튜닝된 상호결합제어 시스템보다 94%, 앞서 선형연구된 CCC+PID 시스템 보다 75%가 개선되는 우수한 성능을 보인다.

Fig. 9의 코너모션 결과를 살펴보면, 상호결합제어기를 사용하지 않은 시스템은 코너에서 완만한 곡선을 그리며 큰 오차를 나타내었고, 시행착오법으로 튜닝된 상호결합제어 시스템은 코너에서 과도한 오버슈트를 발생하였다. 하지만 최적튜닝 결과를 적용한 시스템인 CCC+FF+PID의 경우 경로가 갑자기 변하는 코너에서도 우수한 궤적 추종성능을 보인다.

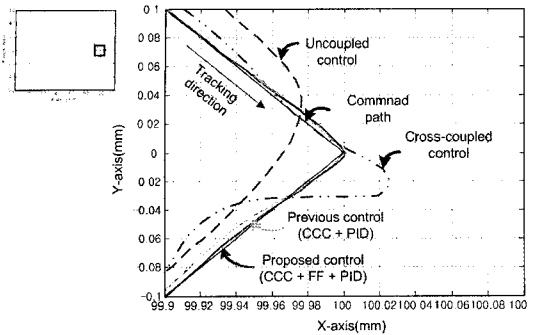


Fig. 8 Experimental results of the linear motion

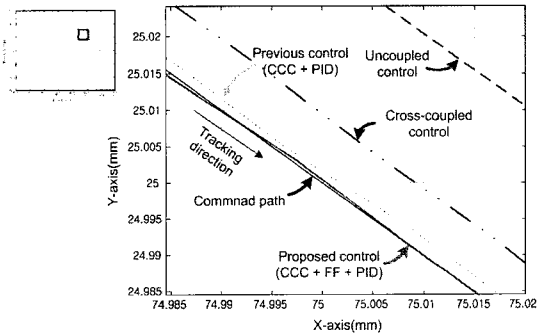


Fig. 9 Experimental results of the corner motion

### 5.2 원형운동

선형운동에서 튜닝된 결과를 원형운동에 적용시키기 위해, 3.2절에서 가정한 바와 같이 50mm의 반경을 갖는 1024 각형으로 원형운동을 수행한다<sup>(10)</sup>. Fig. 10은 원형운동의 실험결과이고, Fig. 11은 Fig. 10의 결과를 분석하여 각도에 따라 오차를 측정해낸 값이다. 여기에서도 개발된 CCC+FF+PID 시스템이 원형운동 전 범위에서 가장 오차가 적은 결과를 보여준다. 원형운동은 선형운동과 달리 운동방향이 실시간으로 바뀌기 때문에 위치에 따라 변하는  $\theta$ 를 적용하였음에도 불구하고 우수한 운동제어 결과를 보여준다. 이것은 제안된 제어기를 이용하는 경우에도 선형운동을 대상으로 최적 튜닝된 결과 값이 원형운동에도 적용될 수 있음을 증명한다.

Fig. 12는 원형운동의 실험결과 Fig. 10의 상한절환이 일어나는 90° 부분을 확대한 것이다. 운동방향이 반전되는 상한점에서 정지마찰력과 백래쉬로 인해 발생하는 상한절환오차는 앞먹임제어기와 상호결합제어기를 사용하지 않는 시스템에서 15 $\mu$ m, 시형착오법으로 튜닝한 상호결합제어 시스템에서 10 $\mu$ m, 선형연구인 CCC+PID의 최적튜닝<sup>(10)</sup>에서 7 $\mu$ m,

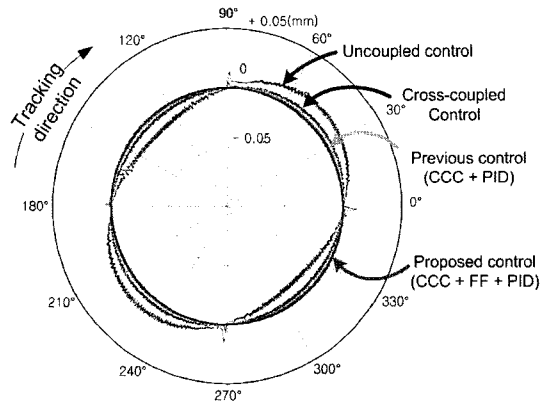


Fig. 10 Experimental results of the circular motion

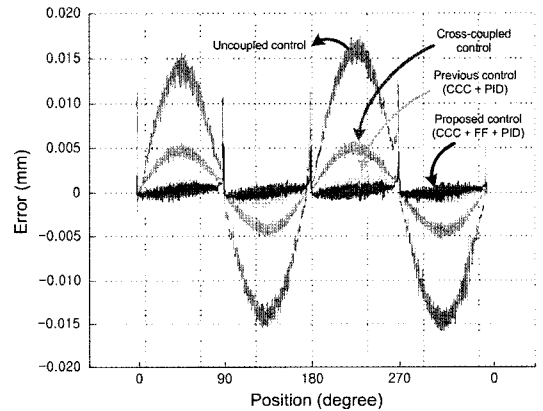


Fig. 11 Errors of the circular motion

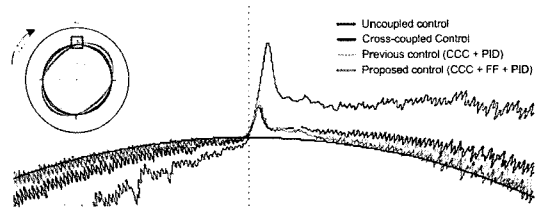


Fig. 12 Errors of the circular motion at the 90° position

제한된 CCC+FF+PID 시스템의 경우 7 $\mu$ m의 오차가 존재한다. 그러나 여기에서도 제안된 CCC+FF+PID 시스템이 상한절환이 일어나는 부분을 제외하고 가장 빨리 기준궤적을 추종하는 결과를 보여준다. 이 결과에서 알 수 있듯이 앞먹임제어기는 속도와 가속도의 변화가 급격히 일어나는 부분을 신속하게 보상해줌으로써 선형연구된 CCC+PID의 최적튜닝<sup>(10)</sup> 결과보다 더 우수한 윤곽 추종성능을 보인다.

## 6. 결론

본 연구에서는 정밀이송계의 추종오차와 윤곽오차를 줄이기 위해 상호결합제어기와 앞먹임제어기가 결합된 최적튜닝시스템을 연구하였다. xy 테이블을 이용하여 개발된 시스템을 구현하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 서보계 기계요소의 모델을 규명하였고, 앞먹임제어기를 갖는 상호결합제어 시스템의 수학적 모델을 선형운동에 근거하여 상태공간방정식으로 유도하였다.
- (2) 상대안정도와 오버슈트를 만족하면서 윤곽오차와 정착 시간을 최소화하는 최적튜닝문제를 정식화 하였다.
- (3) 성능실험을 통해 선형 및 코너운동과 원형운동에서 CCC+FF+PID의 결과는 앞먹임제어기와 상호결합제어기가 도입되지 않은 시스템보다 98%, 시행착오법으로 튜닝된 상호결합제어기 시스템보다 94%의 오차개선 효과를 보여주었고, 선형연구인 CCC+PID의 결과보다 약 75% 오차개선을 보였다.
- (4) 앞먹임제어기는 선형운동에서의 코너부분과 원형운동에서의 상한절환 부분에서와 같이 속도와 가속도의 급격한 변화가 존재하는 경우에도 윤곽오차를 빠르게 보상해줌으로써 선형 연구인 CCC+PID의 최적튜닝<sup>(10)</sup> 결과보다 더 우수한 궤적 추종성능을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Tomizuka, M., 1987, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 109, No. 1, pp. 65~68.
- (2) Yeh, S. S. and Hsu, P. L., 1999, "Analysis and Design of the Integrated Controller for Precise Motion System," *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 7, No. 6, pp. 706~717.
- (3) 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.

- (4) Jang, H. D. and Chung, S. C., 2002, "Integrated Design of Radial Active Magnetic Bearing System using Genetic Algorithm," *Mechatronics*, Vol. 12, pp. 19~36.
- (5) Kim, M. S. and Chung, S. C., 2005, "A Systematic Approach to Design High-Performance Feed Drive Systems," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 1421~1435.
- (6) Kim, M. S. and Chung, S. C., 2005, "Integrated Design Methodology for High-precision/speed Servomechanisms," *Proc. IMechE, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 219, pp. 843~852.
- (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., Sung, C. M., and Chung, S. C., 2007, "Integrated Design of High-performance Servomechanisms Using a Disturbance Observer," *Proceedings of the ASPE 2007 Annual Meeting*, pp. 171~174.
- (10) Bae, H. K. and Chung, S. C., 2006, "Optimal Tuning of Biaxial Servomechanisms using a Cross-Coupled Controller," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 30, No. 10, pp. 1209~1218. (in Korean).
- (11) Kim, M. S. and Chung, S. C., 2003, "Identification of Nonlinear Characteristics for Precision Servomechanism," *Proceedings of the ASPE 2003 Annual Meeting*, pp. 167~170.
- (12) Ljung, L., 1999, *System Identification-Theory for the User*, Prentice Hall PTR, New Jersey, pp. 79~246.
- (13) Arora, J.S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- (14) *MATLAB System Identification Toolbox User Guide*, 2000, Mathworks, Inc.
- (15) *MATLAB Optimization Toolbox User Guide*, 2000, Mathworks, Inc.
- (16) *MATLAB Simulink User Guide*, 2000, Mathworks, Inc.