

# 로봇 시스템에 대한 PID 궤적추종 제어기의 자동 성능동조

## Automatic Performance Tuning of PID Trajectory Tracking Controller for Robotic Systems

최 영 진\*  
(Youngjin Choi)

**Abstract** : The PID trajectory tracking controller for robotic systems shows performance limitation imposed by inverse dynamics according to desired trajectory. Since the equilibrium point can not be defined for the control system involving performance limitation, we define newly the quasi-equilibrium region as an alternative for equilibrium point. This analysis result of performance limitation can guide us the auto-tuning method for PID controller. Also, the quasi-equilibrium region is used as the target performance of auto-tuning PID trajectory tracking controller. The auto-tuning law is derived from the direct adaptive control scheme, based on the extended disturbance input-to-state stability and the characteristics of performance limitation. Finally, experimental results show that the target performance can be achieved by the proposed automatic tuning method.

**Keywords** : PID control, performance limitation, auto-tuning law, robotic systems

### I. 서론

PID 제어는 다양한 사용법을 가지며 널리 이용되고 있다. 로봇과 같은 기계시스템에 대해서 PID 제어기가  $H_\infty$  최적 제어기가 될 수 있다는 것이 참고문헌 [1,2]에서 증명되었으며, PID 제어기 성능동조(performance tuning)에 관한 방법론으로 '제곱동조(square tuning)'와 '선형동조(linear tuning)' 라는 두 가지 방법론이 제시되었다. 그러나 제시된 동조 방법들은 모두 제어 변수와 성능 변수 사이를 비례 관계로 설정한 수동적인 동조 방법들이다.

PID제어에 관한 많은 자동 성능동조 방법들이 참고문헌 [3-5]에 제시되어 있지만, 그것들은 대부분 화학공정 제어방법에 관한 것이다. 대부분의 화학공정 제어시스템은 시간 지연을 가지며 매우 느린 응답 특성을 보이기 때문에 공정시스템에 대해서 개발된 자동동조 방법들이 기계 시스템에 직접적으로 이용될 수 없다. 제어기 이득(gain) 변화에 따른 제어 성능동조 방법이 많은 관심을 끌어온 것은 사실이지만, 아직도 로봇과 같은 기계시스템에 일반적으로 적용될 수 있는 자동 성능동조 방법은 제시되지 못하고 있다. 본 논문에서는 직접 적응제어(direct adaptive control) 방법을 이용하여 기계시스템에 대한 자동 성능동조 방법을 제시하고자 한다.

최근에 참고문헌 [6-9]에서 비선형 시스템에 대한 직접 적응제어 방법이 제시되었다. 특별히, 참고문헌 [7]에서 Haddad와 Hayagawa가 비선형 시스템에 대해서  $L_2$ -이득 외란 감쇠(attenuation)를 갖는 직접 적응제어 방법을 제시하였다. 직접 적응제어 방법은 제어 변수들이 시스템 변수들에 대한 중간 추정 계산 없이 직접적으로 추정된다는 점에서 간접 적응제어(indirect adaptive control) 방법과 구별된다. 엄밀하게 말해서 로봇 동작 제어에서 사용되고 있는 적응제어 방법들은 로봇

의 각 관절의 무게나 관성을 추정하여 동역학적 보상기(compensator)를 구성하기 때문에 간접 적응제어 방법에 속한다. 본 논문에서는 직접 적응제어의 관점에서 로봇 시스템에 대한 PID 궤적추종 제어기의 자동 성능동조 방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 준-평형 영역이라는 개념이 새롭게 II장에서 도입되며, 직접 적응제어 방법에 의한 자동 성능동조 방법이 III장에서 유도된다. 자동 성능동조를 사용함에 의한 성능 향상 정도가 IV장에 제시되며, V장에서는 자동 성능동조 방법의 효율성을 실험결과를 통해서 입증하고, VI장에서 본 논문의 성과를 정리한다.

### II. 준-평형 영역

로봇의 궤적추종 제어시스템을 엄밀하게 구분해보면 비선형 시변(time-varying) 시스템에 속한다. 시변 시스템의 특성은 로봇의 목표궤적이 일반적으로 시간의 함수로 주어지기 때문에 생기는 특성이다. 이를 다루기 위하여 다음 장에서 로봇 궤적추종 시스템의 상태방정식을 먼저 얻고, 이를 바탕으로 해서 준-평형 영역의 개념을 도입하고자 한다.

#### 1. 로봇 궤적추종 시스템의 상태방정식

로봇과 같은 전기-기계 시스템은 특성이 다른 두 시스템의 합성으로 이루어진다. 사실, 전기시스템과 기계시스템은 본질적으로 가지고 있는 주파수 대역폭(bandwidth)이 크게 차이가 난다. 그리고 로봇 시스템의 대역폭은 두 시스템 중 대역폭이 작은 쪽인 기계시스템의 운동 방정식에 의해 전체적인 지배를 받는다. 이와 같은 관점에서  $n$  자유도를 갖는 로봇에 대한 운동방정식을 기술해 보면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(t) = \tau \quad (1)$$

여기서  $q \in \mathcal{R}^n$  는 로봇 시스템의 운동을 기술하기 위한  $n$  차 generalized coordinate 벡터를,  $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  는 관성행렬을,  $C(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^n$  는 코리올리와 구심 토크 벡터를,  $g(q) \in \mathcal{R}^n$

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 10. 8., 채택확정 : 2004. 3. 29

최영진 : 한국과학기술연구원 지능로봇 연구센터(cyj@kist.re.kr)

는 중력 토크벡터를,  $d(t)$  는 마찰이나 외부에서 인가되는 미지의 토크벡터를,  $\tau \in \mathfrak{R}^n$  는 제어기에서 인가되는 제어입력 토크벡터를 나타낸다. 상태방정식 형태의 로봇 궤적추종 운동방정식을 얻기 위해서 다음과 같은 확장 외란을 정의해보자.

$$w(t, e, \dot{e}, \int e) = M(q)(\ddot{q}_d + K_p \dot{e} + K_i e) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + K_p e + K_i \int e) + g(q) + d(t) \quad (2)$$

여기서  $K_p, K_i$  는 상수 대각 양의 한정 이득행렬을,  $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t)$  는 로봇의 수행작업에 해당하는 각 구동관절 별 목표궤적(desired trajectory)을 나타내며, 이는 일반적으로 사용자에게 의해 시간의 함수로 설정되며,  $e(\triangleq q_d - q)$  는 목표궤적과 실제궤적 사이의 오차를 나타낸다. 또한  $q(\triangleq q_d(t) - e)$  와  $\dot{q}(\triangleq \dot{q}_d(t) - \dot{e})$  는 시간과 오차, 미분오차의 함수이기 때문에, 확장 외란  $w$  는 시간, 오차, 미분오차, 적분오차의 함수가 된다. 위에서 정의된 확장 외란 (2)를 운동방정식 (1)에 적용한다면 다음과 같은 궤적추종 시스템 모델을 얻을 수 있다.

$$M(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s = w(t, e, \dot{e}, \int e) + u \quad (3)$$

여기서  $u = -\tau$  이고  $s = \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt$  이다.

위의 궤적추종 시스템 모델의 상태방정식을 얻기 위해서 다음과 같은 상태변수 벡터를 정의해보자.

$$x \triangleq \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int e dt \\ e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3n} \quad (4)$$

이때, 로봇 궤적추종 시스템의 상태방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)w + B(x, t)u \quad (5)$$

여기서,

$$A(x, t) = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ -M^{-1}CK_i & -M^{-1}CK_p - K_i & -M^{-1}C - K_p \end{bmatrix}$$

$$B(x, t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

사실, 위의 상태방정식은 참고문헌 [10]에서 제시된 일반적인 기계시스템에 대한 것들 중의 하나이다. 또한, 로봇시스템에 대해서 중요한 역학적 특성 중의 하나는  $\dot{M}(q) = C(q, \dot{q}) + C^T(q, \dot{q})$  이 언제나 만족된다는 것이다. 이 특성은 로봇시스템의 안정성 문제를 판단하는 데 중요한

단서를 제공해주고 있다.

**첨언 1 :** 어떤 제어기가 로봇 궤적추종 시스템의 상태방정식 모델 (5)를 안정화시킨다면, 사용된 제어기는 원래 로봇 운동방정식 (1)을 안정화시킨다. 그러나 그 역은 참(True)이 아니다.

**증명 :** (5) 속의 상태변수 벡터  $x$  의 한정(bound)은 (1) 속의  $q$  와  $\dot{q}$  의 한정을 의미하지만,  $q$  와  $\dot{q}$  의 한정이 상태변수 벡터  $x$  속의 적분 항의 한정을 의미하지 않기 때문에 그 역은 사실이 아니다.

**첨언 2 :** 로봇에 궤적추종 제어방식이 아닌 set-point regulation 제어를 하고자 할 때, 시스템 모델은 상태변수  $\dot{q}$  을 사용하여 다음과 같이 쓰여진다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = w_1(t, q) + \tau \quad (6)$$

여기서  $w_1(t, q) = -g(q) - d(t)$ . 한편 궤적추종 제어시스템에 대해서는 상태변수  $s$  를 사용하여 (3)의 시스템 모델을 얻었다. 사실, 궤적추종 시스템 모델 (3)과 set-point regulation 시스템 모델 (6)은 같은 동역학적 특성 ( $M^{-1}(q)C(q, \dot{q})$ )을 갖는다

## 2. 준-평형 영역 (Quasi-equilibrium Region)

로봇 궤적추종 시스템의 상태공간 표현을 얻는 과정에도 도입된 확장 외란 (2)는 많은 특성을 내포하고 있다. 사실, 확장 외란 (2)에서 외부에서 인가된 외란을 구분하고 regressor를 사용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$w(x, t) = Y(x, t)\theta + d(t) \quad (7)$$

여기서, regressor 행렬  $Y(x, t)$  는 밑의 식에서 제시된 것과 같이 로봇시스템의 기계적 특성을 결정 짓는 무게, 관성모멘트와 같은 물리적 상수로 구성된 파라미터 벡터  $\theta$  를 확장 외란에서 분리시킴으로써 얻을 수 있다.

$$Y(x, t)\theta = M(q)(\ddot{q}_d + K_p \dot{e} + K_i e) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + K_p e + K_i \int e) + g(q)$$

(7)로 표현된 확장 외란을 상태 방정식 (5)에 적용한다면 다음의 로봇 궤적추종 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)Y(x, t)\theta + B(x, t)d + B(x, t)u \quad (8)$$

여기서, 중력의 영향이 없고 set-point regulation 제어가 아니면,  $x = 0$  에서 regressor 행렬  $Y(0, t)$  는 0이 아니다. 다시 말해서,  $g(q) \neq 0$  이거나 목표궤적  $\dot{q}_d \neq 0, \ddot{q}_d \neq 0$  이면,  $x = 0$  에서  $Y(x, t) \neq 0$ . 그러므로 외부에서 인가되는 외란이 없다고 하더라도 ( $d(t) = 0$ ), 점  $x = 0$  은 상태 방정식 (8)에 대해서  $B(0, t)Y(0, t)\theta$  가 목표궤적  $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t)$  에 따라서 변하는 시변 특성을 가지기 때문에 평형점(equilibrium point)이 될 수 없다. 이와 같이,

로봇의 궤적추종 제어 시스템의 상태방정식 (8)에 대해서 평형점이 정의되지 않기 때문에 준-평형 영역이라는 개념을 새롭게 도입하고자 한다.

우선, 외부에서 인가되는 외란이 없다고 가정한다. 다시 말해서  $d(t) = 0$ . 또한 참고문헌 [2]에서 제시된 PID 제어를 아래와 같이 도입한다.

$$u \triangleq -\left(K + \frac{1}{\gamma^2} I\right) (\dot{e} + K_p e + K_I \int e dt) \tag{9}$$

$$= -(K + \gamma^{-2} I) [K_I \quad K_p \quad I] x$$

참고문헌 [2]에 따르면 제어기 이득들  $K, K_p, K_I$ 와  $\gamma$ 는 양의 상수들이며,  $K_p^2 > 2K_I$  을 만족하도록 설계되어야 한다. 이때, 상태방정식 (8)에 제어기를 포함하여 얻어진 폐루프 시스템은 아래와 같이 얻어진다.

$$\dot{x} = A_c(x, t)x + B(x, t)Y(x, t)\theta \tag{10}$$

여기서

$$A_c = A - B(K + \gamma^{-2}) [K_I \quad K_p \quad I].$$

앞에서 설명되었듯이 위의 시스템은 어떤 평형점도 가질 수 없기 때문에, 다음의 정리에서 준-평형 영역을 정의하고 폐루프 시스템 (10)에 그것을 적용해보고자 한다.

**정리 1:** 준-평형 영역을  $\dot{x} = 0$  을 만족시키는 상태변수 벡터 중에서 가장 큰 볼(ball)로 정의해보자. 이때 준-평형 영역은 다음과 같은 수학적 표현이 가능하다.

$$|x| \leq \|x_e\|_\infty = \sup_{0 \leq t \leq t_f} |x_e(t)|$$

여기서  $x_e(t)$ 는  $\dot{x} = 0$  를 만족시키는 상태변수 벡터를 의미한다. 위의 정의를 (10)에 적용하면, 준-평형 영역의 유클리디안 놈(Norm)은 아래와 같이 얻어진다.

$$|x_e(t)| = \left| K_I^{-1} [K + \gamma^{-2} I]^{-1} Y_e(t)\theta \right| \tag{11}$$

여기서

$$Y_e(t)\theta = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q_d).$$

**증명 :** 첫째,  $\dot{x} = 0$ 은  $\dot{x}_1 = x_2 = e = 0$ 와  $\dot{x}_2 = x_3 = \dot{e} = 0$  을 의미하기 때문에, 우리는 다음의 두 가지 사실을 쉽게 알 수 있다.

$$x_e = \begin{bmatrix} x_{e1} \\ x_{e2} = 0 \\ x_{e3} = 0 \end{bmatrix} \rightarrow |x_e| = |x_{e1}|$$

와  $e = \dot{e} = 0$ 로부터  $q = q_d$ 와  $\dot{q} = \dot{q}_d$ 임을 알 수 있다.

둘째,  $x_{e1}$ 을 결정하기 위해서는 다음의 방정식을 풀어야 한다.

$$0 = A_c(x_e, t)x_e + B(x_e, t)Y(x_e, t)\theta \tag{12}$$

여기서,  $A_c(x_e, t)$ 를 계산해보면 다음과 같이 얻어진다.

$$A_c(x_e, t) = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ A_{c31} & A_{c32} & A_{c33} \end{bmatrix}$$

$$A_{c31} = -M^{-1}(q_d) [C(q_d, \dot{q}_d) + K + \gamma^{-2} I] K_I,$$

$$A_{c32} = -M^{-1}(q_d) [C(q_d, \dot{q}_d) + K + \gamma^{-2} I] K_p - K_I,$$

$$A_{c33} = -M^{-1}(q_d) [C(q_d, \dot{q}_d) + K + \gamma^{-2} I] - K_p$$

또한,  $B(x_e, t)$ 와  $Y(x_e, t)\theta$ 를 계산하면 다음과 같이 얻어진다.

$$B(x_e, t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & M^{-1}(q_d) \end{bmatrix}^T$$

$$Y(x_e, t)\theta = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)(\dot{q}_d + K_I \int e dt) + g(q_d)$$

$$= Y_e(t)\theta + C(q_d, \dot{q}_d)K_I x_{e1}$$

여기서,  $Y_e(t)\theta$ 는 목표궤적( $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ )에 따라 결정되는 역 동역학(inverse dynamics) 식이다. 그러므로, (12)는 다음과 같이 단순화된다.

$$0 = -M^{-1}(q_d) [C(q_d, \dot{q}_d) + K + \gamma^{-2} I] K_I x_{e1} + M^{-1}(q_d) [Y_e(t)\theta + C(q_d, \dot{q}_d)K_I x_{e1}]$$

그러므로  $x_{e1}$ 은 다음과 같이 결정된다

$$x_{e1} = K_I^{-1} [K + \gamma^{-2} I]^{-1} Y_e(t)\theta$$

최종적으로, 준-평형 영역은 정의에 의해서 다음과 같이 얻어진다.

$$|x| \leq \|x_e\|_\infty = \sup_{0 \leq t \leq t_f} \left| K_I^{-1} [K + \gamma^{-2} I]^{-1} Y_e(t)\theta \right|.$$

■

(11) 속에서 보여지듯이, 준-평형 영역의 크기는 제어기의 적분 이득  $K_I$  값에 반비례한다. 또한 큰  $K$ 와 작은  $\gamma$  값은 준-평형 영역을 작게 만든다. 만약에 PID 제어기만을 사용해서 동역학적 파라미터 벡터( $\theta$ )나 목표궤적( $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ )에 상관없이 준-평형 영역을  $x_e = 0$ 과 같은 한 점으로 접근시키고자 한다면, 다음 세가지 조건 중에서 하나는 만족되어야 한다.

- 1)  $K_I \rightarrow \infty$
- 2)  $\gamma \rightarrow 0$
- 3)  $K \rightarrow \infty$

그러나, 위의 조건들은 실현 불가능한 조건들이기 때문에 로봇시스템 모델에 대한 PID 궤적추종 제어 방법은 광역 점근 안정성(global asymptotic stability : GAS)을 가질 수 없다는 것을 간접적으로 보여주고 있다. 사실, 정리의 준-평형

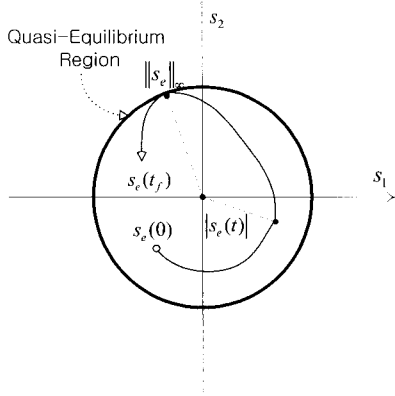


그림 1. 준-평형 영역.  
Fig. 1. Quasi-equilibrium region.

영역은 PID제어의 성능한계와 밀접한 관련이 있다. 정리1에서는 준-평형 영역은  $3n$  차원의 상태변수 벡터  $x$  에 대해서 얻어졌다. 다음 첨언에서는  $n$  차원의 복합 오차 벡터  $s$  를 이용하여 준-평형 영역의 다른 표현을 얻어보고자 한다.

**첨언 3 :** 복합 오차를  $s = \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt$  로 정의하고, 정리1에서 정의된  $x_e$  를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$s_e(t) \triangleq [K_i \quad K_p \quad I] x_e(t) = [K + \gamma^{-2} I]^{-1} Y_e(t) \theta \quad (13)$$

이때, 복합 오차 벡터로 표현된 준-평형 영역은 다음과 같이 얻어진다.

$$|s| \leq \|s_e\|_\infty = \sup_{0 \leq t \leq t_f} |s_e(t)|.$$

위의 첨언 3에서 복합 오차 벡터를 이용하여 준-평형 영역을 나타낼 수 있다는 것을 보였다. 또한 그림 1에서 준-평형 영역을 도식적으로 나타내었다. 첨언 3과 그림 1에서 표현된 준-평형 영역의 크기는 제어 이득  $K$  와  $L_2$  이득  $\gamma$  와 목표 궤적에 따른 역 동역학 식  $Y_e(t)\theta$  에 의존한다. 실질적인 관점에서, 준-평형 영역은 사용자에 의해서 선정되는 목표성능(target performance)의 기준으로 사용될 수 있다. 또한, 준-평형 영역의 존재는 역으로 목표성능을 달성할 수 있게 하는 제어기 이득 값이 존재한다는 것을 알려준다. 사실, 정확한 역 동역학을 알 수 있다면, 목표성능을 달성할 수 있게 하는 PID 제어기 이득 값들을 정리1과 첨언 3에 의해서 정확하게 환산할 수 있다. 그러나 일반적인 로봇 시스템에 대하여 역 동역학을 정확하게 알아내는 것은 힘든 작업이므로, 다음 장에서 우리는 목표성능의 달성을 도울 수 있는 자동 성능동조 방법을 제시하고자 한다.

**III. 자동 성능동조 방법**

로봇시스템에 대한 PID 궤적추종 제어의 자동 성능동조 방법을 직접 적응제어의 개념을 이용하여 목표성능을 달성할 수 있도록 이번 장에서 제시하고자 한다. 여기서 목표성

능( $\Omega$ )은 복합 오차가 사용자에 의해서 선택된 볼(ball)내부에 머무른다는 것으로 정의하며, 이를 수학적으로 표현하면, 모든 시간  $t$  에 대해서 복합 오차가  $|s(t)| \leq \Omega$  를 만족한다는 것이다.

**1. 자동 성능동조 방법**

첨언 3에서 제시되었듯이, 준-평형 영역의 크기가 PID제어기의 이득 값과 목표궤적에 따른 역 동역학에 의해서 결정되기 때문에, 이를 정확하게 계산하기 위해서는 regressor와 파라미터 벡터( $\theta$ )를 정확하게 알아야 한다. 그러나, 파라미터 벡터를 정확하게 알아내는 것은 어렵기 때문에, 역으로 준-평형 영역을 목표성능의 기준(criterion)으로 사용하고자 한다. 예를 들어 목표성능이 결정된다면 준-평형 영역의 크기는 목표성능을 달성할 수 있도록 동조되어야 한다. 다시 말해서 제어기의 이득 값이 목표성능을 달성할 수 있도록 동조되어야 한다. 먼저 준-평형 영역의 크기를 나타내는 첨언 3의 (13)으로부터 자동 동조 변수를  $K$  로 결정한다. 그리고 참고문헌 [2,11]에 설명된 ISS 안정성을 기반으로 로봇 시스템에 대한 PID 궤적추종 제어기의 자동 성능동조 방법이 다음 정리에서 제시된다.

**정리 2 :** 복합 오차를  $s = \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt$  로 정의하고, 아래와 같이 목표성능( $\Omega$ )을 달성할 수 있는 가장 작은 상수 대각 이득 행렬(gain matrix)  $K_\Omega > 0$  가 존재한다고 가정해보자.

$$\sup_{0 \leq t \leq t_f} |s(t)| \leq \Omega$$

$K_\Omega > \hat{K}(t)$  에 대해서, 아래와 같은 자동 성능동조 방법을 사용하는

$$\frac{d\hat{K}_i}{dt} = \Gamma_i s_i^2(t) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

아래와 같은 자동 동조 PID 제어기가

$$\tau = (\hat{K}(t) + \gamma^{-2} I) s \quad (15)$$

(3)과 같은 로봇의 궤적추종 시스템 모델에 적용된다면, 그때 페루프 제어시스템은 확장 외란 입력에 대한 상태변수 안정성 (extended disturbance input-to-state stability: ISS)을 갖는다. 여기서  $s_i$  는  $n$  차 복합 오차 벡터의  $i$  번째 성분이며,  $\hat{K}_i$  는 시변 대각 이득 행렬  $\hat{K}(t)$  의  $i$  번째 대각 성분이며,  $\Gamma_i$  는 대각 갱신 이득 행렬  $\Gamma$  의  $i$  번째 대각 성분이다.

**증명 :** 우선, 다음 형태의 Lyapunov 함수를 설정한다.

$$V(s, \hat{K}, t) = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} tr [(\hat{K}(t) - K_\Omega) \Gamma^{-1} (\hat{K}(t) - K_\Omega)] \quad (16)$$

여기서  $tr[\cdot]$  는 행렬의 trace를 의미한다. 궤적추종 시스템 모델 (3)에 자동 동조 PID 제어기 (15)를 적용하면, Lyapunov 함수 (16)의 시간 미분을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^T \left( \hat{K}(t) + \frac{1}{2\gamma^2} I \right) s - \frac{\gamma^2}{2} \left| \frac{1}{\gamma^2} s - w \right|^2 + \frac{\gamma^2}{2} |w|^2 \\ &\quad + tr \left[ (\hat{K}(t) - K_\Omega) \Gamma^{-1} \hat{K}(t) \right] \\ &= -s^T \left( K_\Omega + \frac{1}{2\gamma^2} I \right) s - \frac{\gamma^2}{2} \left| \frac{1}{\gamma^2} s - w \right|^2 + \frac{\gamma^2}{2} |w|^2 \\ &\quad - s^T (\hat{K}(t) - K_\Omega) s + tr \left[ (\hat{K}(t) - K_\Omega) \Gamma^{-1} \hat{K}(t) \right] \end{aligned}$$

여기서 다음의 행렬 trace 특성이 위의 방정식에 이용된다면,

$$s^T (\hat{K}(t) - K_\Omega) s = tr \left[ (\hat{K}(t) - K_\Omega) s s^T \right]$$

아래와 같은 Lyapunov 함수의 시간 미분을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^T \left( K_\Omega + \frac{1}{2\gamma^2} I \right) s - \frac{\gamma^2}{2} \left| \frac{1}{\gamma^2} s - w \right|^2 + \frac{\gamma^2}{2} |w|^2 \\ &\quad + tr \left[ (\hat{K}(t) - K_\Omega) (\Gamma^{-1} \hat{K}(t) - s s^T) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

또한, 위의 식 안의  $(\hat{K}(t) - K_\Omega)$  이 대각 행렬이기 때문에  $(\Gamma^{-1} \hat{K}(t) - s s^T)$  의 대각 성분들이 0이 된다면, (17)의 trace 항은 0이 된다. 다시 말해서, 자동 성능동조 방법 (14)는 다음의 관계로부터 얻어진다.

$$\begin{aligned} \text{if } \frac{d\hat{K}_i}{dt} &= \Gamma_i s_i^2(t) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \\ \text{then } tr \left[ (\hat{K}(t) - K_\Omega) (\Gamma^{-1} \hat{K}(t) - s s^T) \right] &= 0 \end{aligned}$$

그러므로, 자동 동조 PID 제어기 (15)를 궤적추종 제어시스템 (3)에 적용한다면, 우리는 (17)로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\dot{V} < -s^T \left( K_\Omega + \frac{1}{2\gamma^2} I \right) s + \frac{\gamma^2}{2} |w|^2 \quad (18)$$

또한, 위 (18)의 오른쪽 항들은 각각  $s$  와  $w$  에 대한 비한정(unbounded) 함수들이기 때문에 위의 부등식은 참고문헌 [2,11]에서 설명된 ISS 안정성을 가진다. 그러므로, 로봇의 궤적추종 제어시스템에 대해서 자동 동조 PID제어 방법을 이용하면 확장 외란 입력에 대한 상태변수 안정성을 갖는다. □

만약에 초기에 설계된 PID 제어기가 목표성능을 달성할 수 없다면 ( $K_\Omega > \hat{K}$ ), 정리 2에서 제시된 자동 성능동조 방법은 목표성능을 달성하는 데 도움을 줄 수 있다. 반대로, 초기에 설계된 PID 제어기가 목표성능을 달성할 수 있다면 ( $K_\Omega \leq \hat{K}$ ), 자동 성능동조 방법을 사용하지 않고 목표성능을 달성할 수 있다( $\dot{\hat{K}} = 0$ , if  $K_\Omega \leq \hat{K}$ ). 또한 자동 성능동조 방법을 사용하지 않을 경우, Lyapunov 함수의 시간 미분은  $\dot{\hat{K}} = 0$  를 사용하여 다음과 같이 얻어지기 때문에,

$$\dot{V} < -s^T \left( \hat{K} + \frac{1}{2\gamma^2} I \right) s + \frac{\gamma^2}{2} |w|^2$$

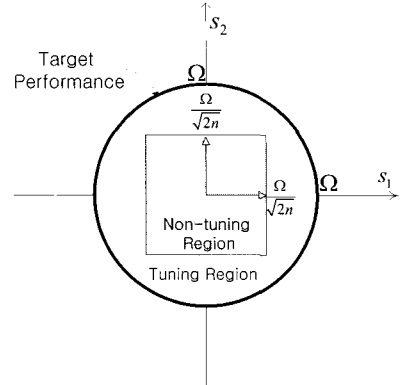


그림 2. 목표성능과 비동조 영역.  
Fig. 2. Target performance and non-tuning region.

ISS 안정성은  $K_\Omega \leq \hat{K}$  조건 안에서도 증명된다.

그러나 여기에는 한가지 문제점이 내재되어 있다. 우리에게 목표성능의 달성 여부를 알려줄 기준인  $K_\Omega$  를 정확히 알 수 없다는 것이다. 우연히 초기 이득  $(\hat{K}(0))$  설정 값이 목표성능을 달성할 수 있는 제어기 이득 값으로 설정될 수도 있고, 아닐 수도 있다. 다음 장에서 자동 성능동조 방법을 언제 사용해야 하는가에 대한 기준을 제시하고자 한다.

2. 자동 성능동조에 대한 기준

정리 2에서 제시된  $K_\Omega$  의 정의가 목표성능을 달성할 수 있는 가장 작은 상수 대각 이득 행렬이기 때문에 실험을 통해서 아래와 같이 목표성능이 달성될 때까지는 정확한  $K_\Omega$  값을 알 수 없다.

$$\sup_{0 \leq t \leq t_f} |s(t)| = \Omega$$

그러나, 복합오차의 크기는 언제든지 계산할 수 있으며, 또한 정리 2에서 제시된 자동 성능동조 방법이 로봇의 각 관절 별로 독립적으로 구성되어 있기 때문에 우리는 자동 성능동조의 기준을 각 구동 관절 별로 다음과 같은 기준을 제시한다.

$$|s_i| > \frac{\Omega}{\sqrt{2n}} \quad (19)$$

여기서,  $n$  은 configuration coordinate의 차수, 즉 로봇시스템 속에서 제어를 수행하고 있는 관절의 수에 해당한다. 자동 성능동조의 기준과 목표성능(target performance) 사이의 관계를 그림 2에 나타내었다. 복합 오차가 그림 2의 동조 영역(tuning region)에 도달하면, 자동 성능동조 방법이 목표성능의 달성을 위해서 작동되어야 한다. 이를 위해서 그림 2의 비동조 영역(non-tuning region)이 목표성능의 영역보다 작게 설정되었다.

비록 목표성능을 달성하게 하는 정확한 이득  $K_\Omega$  를 모르지만, 자동 성능동조 PID 제어기는 (18)에서 보였듯이 동조 영역 ( $|s_i| > \Omega/\sqrt{2n}$ )에서 이득  $K_\Omega$  를 사용한 효과를 제어 시스템에 가져온다. 반대로, 복합 오차가 그림 2의 비동조 영역 ( $|s_i| \leq \Omega/\sqrt{2n}$ )에 머무른다면, 자동 동조 방법은 사용되

지 않는다. 이런 경우에는 자동 동조 방법에 의해 갱신된 이득  $\hat{K}$ 의 값이 목표성능을 달성하게 하는 이득  $K_\Omega$ 보다 크거나 같은 값이기 때문이다. 사실, 자동 성능동조 방법은 참고문헌 [12]에 제시된 비선형 댐핑 (nonlinear damping)의 특성을 갖는다. 엄격하게 말해서, 자동 성능동조 PID 제어기 식 (15)의 첫 번째 항 ( $\hat{K}(t)s$ )은 외란에 대항하여 제어시스템을 안정화시키는 데 도움을 주는 비선형 댐핑의 효과를 가져오며, 두 번째 항 ( $\gamma^{-2}s$ )은 선형 제어를 의미한다. 다음 장에서는 자동 성능동조 방법을 사용함에 의해서 향상된 성능을 해석하고자 한다.

3. 자동 동조 방법에 의해 향상된 성능 해석

정적인 PID 제어기 (9)를 로봇시스템에 적용하여 얻어진 복합 오차의 상한 경계 (upper bound)는 참고문헌 [13]에 나타나 있다. 이번 장에서는 자동 성능동조 PID 제어기 (15)를 이용하여 얻어진 복합 오차의 상한 경계를 다음에 제시될 정리에서 얻고자 한다. 사실, 다음 정리에서 얻어진 상한 경계는 자동 동조 PID 제어기의 성능한계 (performance limitation)을 의미한다.

**정리 3 :** 대각 갱신 이득 행렬  $\Gamma$ 와 대각 제어 이득행렬의 초기치  $\hat{K}(0)$ 가 다음의 부등식 조건을 만족시킬 수 있도록 충분히 크게 설정되었다고 가정해보자.

$$\hat{K}(t) > \frac{1}{2} Y(x,t) Y^T(x,t) \quad (20)$$

자동 동조 PID 제어기 (15)를 로봇 궤적추종 모델 (3)에 적용한다면, 복합 오차의 상한 경계 (upper bound)는 다음과 같이 얻어진다.

$$|s(t)| \leq |s(0)| e^{-\frac{1}{2\lambda\gamma^2}t} + \gamma^2 \|d\|_\infty + \gamma|\theta| \quad (21)$$

여기서,  $s(0)$ 는 초기 복합오차를,  $\lambda$ 는 관성 행렬  $M(q)$ 의 최대 고유치(eigenvalue)를,  $\theta$ 는 로봇의 물리적 특성을 결정짓는 파라미터 벡터를 나타낸다.

**증명 :** 먼저, 자동 동조 PID제어기 (15)와 확장 외란 (7)을 사용하여 로봇의 궤적추종 시스템 모델 (3)에 적용하면, 페루프 제어시스템의 방정식을 얻을 수 있다. 이때 앞에서 얻어지는 페루프 제어 시스템이 갖는 궤적을 따라서 양의 실수 값을 갖는 함수 ( $1/2 s^T M s$ )의 시간 미분을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} s^T M s \right) &= -s^T \left( \hat{K} + \frac{1}{\gamma^2} I \right) s + s^T Y \theta + s^T d \\ &= -\frac{1}{2\gamma^2} |s|^2 - \frac{\gamma^2}{2} \left| \frac{1}{\gamma^2} s - d \right|^2 + \frac{\gamma^2}{2} |d|^2 \\ &\quad - s^T \left( \hat{K} - \frac{1}{2} Y Y^T \right) s - \frac{1}{2} |Y^T s - \theta|^2 + \frac{1}{2} |\theta|^2 \\ &\leq -\frac{1}{2\gamma^2} |s|^2 - s^T \left( \hat{K} - \frac{1}{2} Y Y^T \right) s + \frac{\gamma^2}{2} |d|^2 + \frac{1}{2} |\theta|^2 \end{aligned}$$

여기서, 관성행렬  $M$ 의 최대 고유치를  $\lambda$ 로 놓고, 가정 (20)을 사용한다면, 위의 부등식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\lambda}{2} |s|^2 \right) \leq -\frac{1}{2\gamma^2} |s|^2 + \frac{\gamma^2}{2} |d|^2 + \frac{1}{2} |\theta|^2$$

위의 식 양변에  $e^{\frac{1}{\lambda\gamma^2}t}$ 를 곱하면, 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\lambda}{2} |s(t)|^2 e^{\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} \right) \leq \frac{\gamma^2}{2} |d|^2 e^{\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} + \frac{1}{2} |\theta|^2 e^{\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} \quad (22)$$

위의 (22)에서 적분변수  $dt$ 를  $d\tau$ 로 치환하고, 구간  $[0, t]$ 에 대해서 정적분을 하면, 우리는 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |s(t)|^2 &\leq |s(0)|^2 e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} + \frac{\gamma^2}{\lambda} \int_0^t e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}(t-\tau)} |d(\tau)|^2 d\tau \\ &\quad + \frac{|\theta|^2}{\lambda} \int_0^t e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}(t-\tau)} d\tau \\ &\leq |s(0)|^2 e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} + \frac{\gamma^2}{\lambda} \sup_{\tau \in [0,t]} \{ |d(\tau)|^2 \} \int_0^t e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}(t-\tau)} d\tau \\ &\quad + \frac{|\theta|^2}{\lambda} \int_0^t e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}(t-\tau)} d\tau \\ &= |s(0)|^2 e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} + \gamma^4 \|d\|_\infty^2 \left( 1 - e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} \right) + \gamma^2 |\theta|^2 \left( 1 - e^{-\frac{1}{\lambda\gamma^2}t} \right) \end{aligned}$$

또한,  $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \leq |a| + |b| + |c|$ 와 같은 부등식 특성을 위의 식에 이용하면, 복합 오차에 대한 상한 경계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$|s(t)| \leq |s(0)| e^{-\frac{1}{2\lambda\gamma^2}t} + \gamma^2 \|d\|_\infty + \gamma|\theta| \quad \blacksquare$$

목표궤적을 부드럽게 만듦에 의해서 초기 복합 오차는 0으로 설정할 수 있기 때문에, 복합 오차의 상한 경계 (21)은 외부에서 인가되는 외란의  $L_\infty$  놈과 파라미터 벡터의 크기에 의해서 다음과 같이 상한 경계될 수 있다.

$$|s(t)| \leq \gamma^2 \|d\|_\infty + \gamma|\theta| \quad (23)$$

그러나, 위의 상한 경계 특성은 (20)이 성립된다는 가정아래서 만족되는 것이다. (20)속에서 regressor  $Y(x,t)$ 행렬의 크기는 목표궤적과 오차들에 의존하며, 또한 자동 동조되는 이득 행렬  $\hat{K}(t)$ 는 갱신 이득 행렬  $\Gamma$ 와 초기치  $\hat{K}(0)$ 에 의해서 영향을 받는다. 기본적으로, 자동 동조되는 이득 행렬의 초기치는 다음의 조건을 만족하도록 설정되어야 한다.

$$\hat{K}(0) > \frac{1}{2} Y(0,0) Y^T(0,0)$$

여기서,  $Y(0,0)$ 는 로봇시스템 중에서 중력에 의한 토크  $g(q)$ 에서 파라미터 벡터를 분리하여 얻어진 간단한 regressor와 같다. 만약에 로봇이 중력의 영향을 받지 않는다면, 즉  $g(q) = 0$ 이면,  $\hat{K}(0) > 0$ 이 되도록 초기치를 설정하

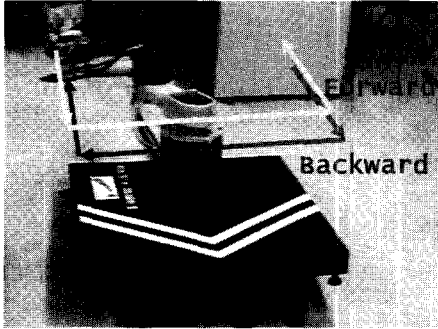


그림 3. 실험에 사용된 로봇 시스템.  
Fig. 3. Robotic system for experiments.

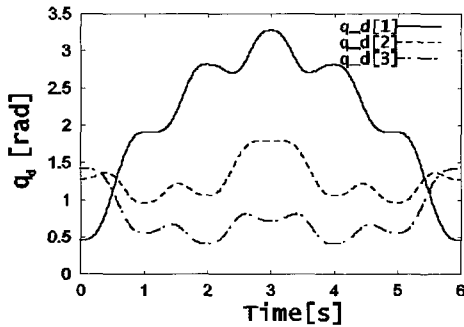


그림 4. 실험에 사용된 목표 궤적.  
Fig. 4. Desired trajectory.

면 된다. 또한 갱신 이득 행렬의 크기는 자동 동조되는 이득들의 변화 속도를 결정하기 때문에, 갱신 이득 행렬은 가정 (20)이 만족되도록 충분히 크게 설정되어야 한다.

만약에 외부에서 인가되는 외란이 없다면, 복합 오차의 상한 경계를 나타내는 (23)은 다음과 같이 단순화된다.

$$|s(t)| \leq \gamma |\theta| \quad (24)$$

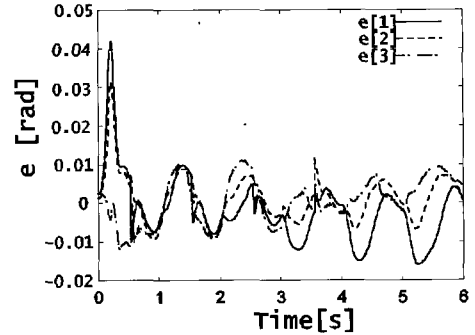
사실, 위의 상한 경계는 자동 성능 PID 제어기의 성능한계를 나타내고 있다. 우리는 위의 (24)에서 자동 동조 PID 제어기의 또 하나의 특성을 발견할 수 있는데, 복합 오차의 크기는 제어기 속에서 설정된  $L_2$  이득  $\gamma$ 에 의해서 동조될 수 있다는 것이며, 이는 참고문헌 [1,2,13]에서 제시된 ‘선형동조 (linear tuning)’의 특성과 같다.

**첨언 4 :** 근본적으로 자동 성능 PID 제어기도 동역학적 보상기(dynamic compensator)는 아니기 때문에 성능 한계를 갖게 되며, 이를 극복하고 광역 점근 안정성(GAS)을 갖기 위해서는 로봇 시스템의 모델을 적용하여 보상하는 방법이 구현되어야 한다. 이는 본 논문의 관심 범위를 벗어난다.

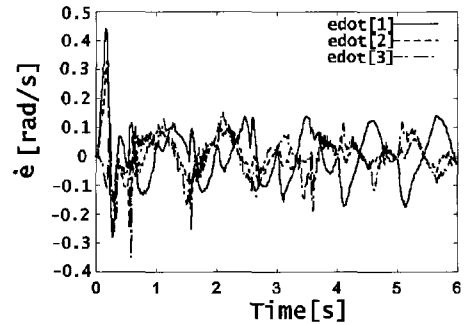
**IV. 실험 결과**

로봇시스템에 대한 자동 성능 PID 제어기의 효율성을 확인하기 위해, 다음 그림 3에 보이는 3축 로봇에 적용하였다.

그림 3축의 로봇은 3개의 직접 구동 모터들로 구성되었으며, 평면 작업을 수행할 수 있도록 설계되었다. 로봇에 사용된 모터들의 성능은 1축이 200[Nm], 2축이 55[Nm], 3축이 18[Nm]



(a) 위치 오차



(b) 속도 오차

그림 5. 자동 동조 PID 제어기의 실험 결과.

Fig. 5. Experimental results of auto-tuning PID controller.

를 갖는다. 목표궤적은 그림 3에서 제시된 것을 사용하였으며, 이의 역기구학을 풀어서 각 관절 별 목표궤적을 그림 4와 같이 얻었다. 그림 4에 보이는 목표궤적은 빠른 궤적 (최대 속도: 3[rad/s]) 과 느린 궤적을 혼합하여 구성된 것이다. 제어기에 사용되는 이득들은 (9)에서 제시된 조건들을 만족시키는  $K_p = 20I, K_i = 100I, \gamma = 0.5$  로 결정하였다. 그러므로 실험에 이용될 자동 동조 PID 제어기는 다음과 같이 얻어진다.

$$\tau_i = (\hat{K}_i(t) + 4) s_i \quad \text{for } i=1,2,3$$

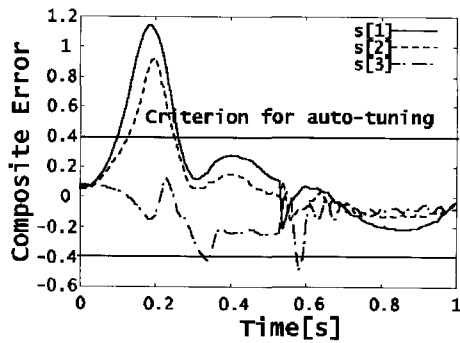
$$s_i = \dot{e}_i + 20e_i + 100 \int e_i dt$$

$$\frac{d\hat{K}_i}{dt} = \Gamma s_i^2, \quad \text{if } |s_i| > \frac{\Omega}{\sqrt{2n}}$$

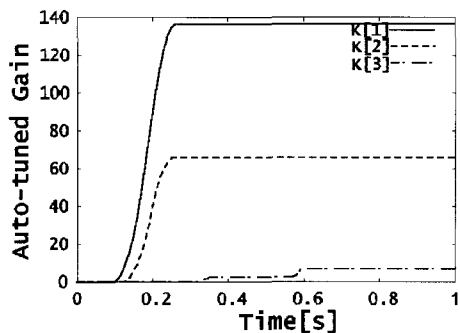
$$\frac{d\hat{K}_i}{dt} = 0, \quad \text{else if } |s_i| \leq \frac{\Omega}{\sqrt{2n}}$$

여기서 갱신이득  $\Gamma = 1000I_{3 \times 3}$ , 관절 수  $n=3$  이다. 또한, 자동 동조 이득의 초기치는 중력의 영향을 받지 않기 때문에  $\hat{K}(0) = 0.1$  의 작은 값으로 결정하였다. 또한 복합 오차는 근사적으로 비례 이득  $K_p$ 의 비율을 가지고 위치 오차와 비례하기 때문에 목표성능은 다음과 같이 근사적으로 얻어질 수 있다.

$$\Omega = \sqrt{2n} \cdot |s_i|_r \approx \sqrt{6} \cdot K_p \cdot |e_i|_r \quad (25)$$



(a) [0~1] 초 사이의 복합오차



(b) [0~1]초 사이의 자동 동조 이득

그림 6. 복합오차와 자동 동조 이득의 변화.

Fig. 6. Composite error and auto-tuned gain.

여기서  $|s_i|$  와  $|e_i|$  는 목표 복합오차와 목표 위치오차를 의미한다. 예를 들어, 각 구동 관절에 대해서  $|e_i| < 0.02[rad]$  의 성능을 얻고자 한다면, 이때 목표성능은 (25)에 따라서  $\Omega = 1.0$  으로 결정되며, 이를 실험에 사용하였다.

위에서 설계된 자동 동조 PID 제어기를 사용하여 다음 그림 5와 같은 실험 결과를 얻었다.

그림 5의 실험결과에서 보여지듯이 실험 초기에 위치오차와 속도오차가 크다는 것을 알 수 있다. 이 큰 오차들은 시간이 경과됨에 따라서 자동 동조 PID 제어기에 의해서 줄어들어 목표성능을 달성하게 된다. 자동 동조되는 이득의 변화를 자세히 살펴기 위해서 위의 실험 중에서 [0~1]초 사이의 구간을 확대하고 이 구간에서의 자동 동조 이득의 변화를 다음 그림 6에 나타내었다.

사실, 자동 동조는 그림 6(a)에 있는 두 개의 점선(점선:  $1/\sqrt{6} = 0.408$ ) 바깥 부분에서 이루어진다. 자동 동조가 완성된 후에 자동 동조 이득들은 그림 6(b)에 알 수 있듯이 다음의 값으로 수렴한다.

$$\hat{K}_1 = 136.98, \hat{K}_2 = 65.60, \hat{K}_3 = 6.83$$

실험결과를 자세히 살펴보면, 첫 번째 구동 관절은 0.11초에 자동 동조가 시작되어 0.26초에 끝난다. 또한 두 번째 구동 관절은 0.13초에 시작하여, 0.24초에 끝나며, 세 번째 구동 관절은 자동 동조 기준인 아래쪽 점선을 두 번 넘어가기 때문에 그림 6(b)에서 보이듯이 두 번의 자동 동조가 이루어진

다. 최종적으로 위의 실험을 종합해보면, 0.6초까지는 자동 동조가 이루어지며, 이후부터는 목표성능이 달성된다.

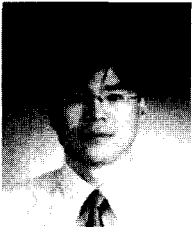
### V. 결론

로봇 궤적추종 제어시스템에 사용되는 PID 제어기는 성능한계를 가지며, 평형점이 정의되지 않기 때문에, 본 논문에서 준-평형 영역이라는 새로운 개념을 도입하였다. 사실, 이 준-평형 영역은 목표성능을 달성하게 하는 PID 제어기의 이득들이 존재한다는 것을 의미한다. 또한 목표성능의 성취를 도울 수 있는 PID 제어기의 자동 성능동조 방법을 유도하였으며, 실험을 통하여 이의 효율성을 보였다.

### 참고문헌

- [1] Y. Choi and W. K. Chung, "On the optimality and performance of PID controller for robotic manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp. 1142-1148, 2001.
- [2] Y. Choi, W. K. Chung and I. H. Suh, "Performance and  $H_\infty$  optimality of PID trajectory tracking controller for lagrangian systems," *IEEE Trans. On Robotic and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 1142-1148, 2001.
- [3] K. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, Instrument Society of America: Research Triangle Park, 1995.
- [4] J. B. He, Q. G. Wang and T. H. Lee, "PI/PID controller tuning via LQR approach," *Chemical Engineering Science*, vol. 55, pp. 2429-2439, 2000.
- [5] C. C. Yu, *Autotuning of PID Controller: Relay Feedback Approach*, Springer, 1999.
- [6] V. Chellaboina, W. M. Haddad and T. Hayakawa "Direct adaptive control for nonlinear matrix second-order dynamical systems with state-dependent uncertainty," *Proc. Of the American Control Conference*, pp. 4247-4252, 2001.
- [7] W. M. Haddad and T. Hayakawa "Direct adaptive control for nonlinear systems with bounded energy  $L_2$  disturbances," *Proc. Of IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2419-2423, 2000.
- [8] W. M. Haddad and T. Hayakawa "Direct adaptive control for nonlinear uncertain systems with exogenous disturbances," *Proc. Of the American Control Conference*, pp. 4425-4429, 2000.
- [9] A. V. Roup and D. S. Bernstein, "Stabilization of a class of nonlinear systems using direct adaptive control," *Proc. Of the American Control Conference*, pp. 3148-3152, 2000.
- [10] J. Park, W. K. Chung and Y. Youm, "Analytic nonlinear  $H_\infty$  optimal control for robot manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp. 2709-2715, 1998.
- [11] M. Krstic and Z. H. Li, "Inverse optimal design of input-to-state stabilizing nonlinear controller," *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 43, no.3, pp. 336-350, 1998.
- [12] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. V. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley and Sons, 1995.
- [13] Y. Choi and W. K. Chung, "PID performance tuning methods for a robotic manipulator," *Asian Journal of Control*, vol. 5, no.2, pp. 206-216, 2003.



**최영진**

1970년 5월 12일생. 1994년 한양대학교  
정밀기계공학과 졸업(학사). 1996년 포  
항공과대학교 대학원 기계공학과 졸업  
(석사). 2002년 동 대학원 기계공학과  
졸업(박사) 현재 한국과학기술연구원  
(KIST) 지능로봇연구센터 연구원. 관심

분야는 Humanoid Robot Walking, Human Modeling, 선형/비선형  
강인 제어, 자동동조 PID제어, 디스크 구동 시스템의 제어.