

# 불확실한 로봇 시스템의 적응제어

## Adaptive Tracking of Uncertain Robotic Systems

金 弘 錫\* · 崔 棕 鎬\*\*  
(Hong-Seok Kim · Chong-Ho Choi)

### 요 약

불확실성의 상한이 부분적으로 알려져 있는 불확실한 시스템의 궁극적 유계성을 보장하는 적응제어 방법을 사용하여, 불확실한 로봇에 대한 고성능의 로봇 제어 방법을 제안한다. 제안된 로봇 제어 방법에서는, 비선형 되먹임에 의해 선형화된 로봇 시스템에 성능향상을 위해 선형보상기를 도입하고, 위의 적응제어 방법을 사용하여 추적오차의 궁극적 유계성을 보장한다. 불확실한 상황에서 제안된 방법을 시뮬레이션하여, 계산토크법에 비해 그 성능이 우수함을 보였다. 제안된 방법은 추정해야 할 매개변수의 수가 적기 때문에 기존의 다른 적응제어 방법들에 비해 제어기 구성이 비교적 간단하다. 그러므로, 제안된 제어 방법은 불확실한 로봇 시스템의 고성능 제어 방법으로 적합할 것으로 기대된다.

**Abstract-** A high-performance robotic controller is proposed for uncertain robots by using an adaptive control method, which guarantees the boundedness of uncertain systems with partially known uncertainty bounds. In order to improve the tracking performance of the robotic controller, a linear compensator is introduced to the robotic system which has been linearized via a nonlinear feedback. The above adaptive method is then utilized to guarantee the ultimate boundedness of the tracking errors. The performance of the robotic controller is compared with that of the computed torque method by computer simulations under uncertain environments. The simulation results show that the proposed method gives better performance than the computed torque method. Since the proposed method has a small number of parameters to be estimated, the controller is simpler to implement than other existing adaptive controller for robots. Hence, the proposed robotic control method is expected to be well suited for high-performance operation of robots under uncertain environment.

\*正 會 員 : KIST 應用物理電子研究部 Post-Doc. 工博  
 \*\*正 會 員 : 서울大 工大 制御計測工學科 副教授  
 · 工博

接受日字 : 1989年 11月 18日  
 1次修正 : 1990年 7月 26日

### 1. 서 론

로봇 제어 방법은 고정확도, 고성능이어야 하고 또한 불확실한 운용상황하에서도 견실해야 한

다. 그러나 이러한 제어의 목표는, 다음의 몇 가지 원인으로 인하여 만족되기가 대단히 어렵다. 즉, 로봇의 운동방정식이 비선형이며 심하게 결합되어 있는 (highly coupled) 점, 모델링 오차에서 기인하는 관성상수들 (inertial parameters)의 불확실성과 미지의 부하에 의한 역학적 불확실성, 제어기 실현시 필수적으로 수반되는 계산시간 지연 등이 그것이다. 그러므로 견실한 고성능 제어기의 설계는 복잡하고 해석이 어려울 뿐 아니라, 실제로는 실현이 거의 불가능한 경우도 있으며, 적당한 타협점을 추구하는 일련의 제어기 설계방법도 제시하기가 대단히 어렵다. 널리 사용되고 있는 계산토크법 (computed torque method)은, 비선형 되먹임을 도입하여 비선형의 로봇 시스템을 비결합선형 시스템 (decoupled linear system)으로 변환시키는 간단한 방법이지만, 계산에 이용되는 공칭모델 (nominal model)과 실제로봇의 관성상수들간에 큰 차이가 있는 경우에는 경로추적 성능이 크게 저하된다[5].

비선형제어이론을 적용한 로봇의 경로추적제어방법[2], [5]은, 비선형 변환에 의해 비선형성과 상호작용 (interaction) 등을 제거하는데 기초하고 있지만, 이 방법의 주된 문제점은 로봇의 동적 모델을 정확히 알고 있어야 하고 미지의 부하에 대한 정확한 예측을 해야 하므로, 제어기 실현에 많은 제약조건이 따른다. 로봇의 적응제어방법들[3], [9]-[11], [13], [15]은 대부분 엄밀한 해석이 어렵거나 실현이 복잡한 경우가 많다. 한편 관성상수들이 불확실하거나 미지의 부하가 있는 경우의 로봇 시스템은 불확실한 시스템으로 볼 수 있는데, 이에 대한 가변구조제어이론[8], [14], [16], [22]이나 불확실한 시스템에 대한 제어이론[7], [12], [17], [18]의 적용에도 많이 발표되었다. Singh[13]은, 불확실한 시스템의 적응제어방법[2]을 로봇에 적용한 방법을 발표하였으나, 성능향상을 위한 사전보상 (precompensation)을 고려하지 않았으므로 경로 추적성능이 좋지 않다.

본 논문에서는, 불확실성의 상한이 미지의 상수와 알고 있는 연속함수의 선형결합 형태로 주어진 불확실한 시스템의 궁극적 유계성 (ultimate boundedness)을 보장하는 적응제어방법[23]을, 불확실한 로봇 시스템의 경로추적제어에 적용하는 방법을 제시한다. 불확실한 로봇 시스템은 공칭로봇과 불확실성으로 나눌 수 있는데, 우선 공칭 로봇의 안정화 및 경로추적성능을 향상시키기 위하여, 기존의 PD 및 PID제어기를 특별한 경

우로 포함하는 선형보상기를 도입한다. 이렇게 사전보상된 로봇시스템의 관절변수 (joint-variable)와 원하는 경로간의 차이로써 경로추적 오차방정식을 유도하고, 이 오차를 줄이며 또한 오차방정식의 해의 궁극적 유계성을 보장하기위하여 위의 적응제어방법을 적용한다. 결과적으로 얻어지는 적응제어방법은, 추정해야 할 매개변수의 갯수를 관절의 수에 관계없이 적게할 수 있으며, 계산시간지연이 있는 경우에도 제어기에 포함된 설계정수 (design parameter)들을 적절히 선정하여 좋은 추적성능을 갖게 할 수 있다. 이것은 실제로 제어를 실현할 때 필수적인 사항이며, 제안된 방법의 장점이다. 제안된 로봇 제어방법을 PUMA 560로봇 팔의 경로추적제어에 적용하여 시뮬레이션함으로써, 이 방법의 성능평가 및 응용가능성을 보인다.

본 논문에서 사용될 기호 및 함수들은 다음과 같다.

$R$ 은 실수집합이며,  $R_+ := (0, \infty)$ 이다.  $f \in C^n(X, Y)$ 이면,  $f: X \rightarrow Y$ 는  $n$ 차 도함수가 연속임을 나타내고,  $n=0$ 일때는  $n$ 을 생략한다. 즉,  $C^n(X, Y)$ 는  $C(X, Y)$ 로 쓰고, 이것은 연속함수들의 집합을 말한다.  $f \in BC^n(X, Y)$ 는  $f \in C^n(X, Y)$ 이며 유계인 (bounded) 함수이다.  $\lambda_i(A)$ 는 행렬  $A \in R^{n \times n}$ 의  $i$ 번째 고유치이고,  $\lambda_m(A)$ 와  $\lambda_M(A)$ 는 각각 행렬  $A$ 의 고유치의 실수부중에서 최소치와 최대치로서  $\lambda_m(A) := \min\{\lambda_i(A) : A \in R^{n \times n}, i=1, \dots, n\}$ ,  $\lambda_M(A) := \max\{\lambda_i(A) : A \in R^{n \times n}, i=1, \dots, n\}$ 이다.  $\|x\|$ 는 벡터  $x$ 의 Euclidean norm으로,  $\|x\| := (x^T x)^{1/2}$ 이고,  $\|A\|$ 는 행렬  $A$ 의 norm으로서,  $\|A\| := \max\{\|Ax\| : \|x\|=1\} = \lambda_M^{1/2}(A^T A)$ 이다.  $m(A)$ 는  $A \in R^{n \times n}$ 의 행렬측도 (matrix measure)<sup>21)</sup>로,  $m(A) := \lambda_M^{1/2}(A + A^T)$ 이다.  $Tr(A)$ 는 행렬  $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$ 의 trace로  $Tr(A) := \sum_{i=1}^n a_{ii}$ 이다. 끝으로, 포화함수  $\text{sat}: R^n \rightarrow R^n$ 는 다음과 같다.

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x, & \|x\| \leq 1, \\ x/\|x\|, & \|x\| > 1. \end{cases}$$

그러면, 선형구간이  $\epsilon$ 인 포화함수는  $\text{sat}(x/\epsilon)$ 로 나타낼 수 있다.

## 2. 불확실한 시스템의 적응제어[23]

불확실한 로봇에 대한 경로추적제어를 논하기에 앞서, 본 절에서는 다음과 같이 표현되는 불확

실한 시스템의 제어(regulation)에 대한 결과를 기술한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\{[I + E(t, x(t))]u(t) + v(t, x(t))\}. \quad (2.1)$$

여기서,  $x(t) \in R^n$ 은 상태변수,  $u(t) \in R^m$ 은 제어 입력이며,  $E \in C(R_+ \times R^n, R^{m \times m})$ 와  $v \in C(R_+ \times R^n, R^m)$ 는 미지의 함수들이다. 또한  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ 는 상수행렬이고,  $(A, B)$ 는 안정가능한 쌍(stabilizable pair)이다.

시스템(2.1)이 만족해야할 가정들은 다음과 같다.

가정 2.1: 행렬  $A$ 의 모든 고유치는 음의 실수부를 갖는다.

가정 2.2: 어떤 상수  $\gamma \in R_+$ 가 존재하며, 부등식

$$1 + \lambda_m[F(t, x)] \geq \gamma \quad \forall (t, x) \in R_+ \times R^n \quad (2.2)$$

을 만족한다. 여기서,

$$F(t, x) = -1/2[E(t, x) + E^T(t, x)]$$

이다.

가정 2.3: 함수  $\rho_v \in C(R_+ \times R^n, R_+)$ 가 존재하여 다음의 부등식을 만족한다.

$$\gamma^{-1} \|v(t, x)\| \leq \rho_v(t, x) \quad (t, x) \in R_+ \times R^n \quad (2.3)$$

특히,  $\rho_v(t, x)$ 는 다음과 같이 매개변수화된다.

$$\rho_v(t, x) = \theta^T \Psi(t, x) =: \rho(t, x, \theta) \quad (2.4)$$

여기서,  $\theta \in R_+^p$ 는 미지의 상수벡터이고,  $\Psi \in C(R_+ \times R^n, R_+^p)$ 는 알고 있는 연속함수이다.

가정 2.1로부터 대칭 정치(symmetric positive-definite)행렬  $Q$ 가 주어졌을 때 Lyapunov방정식

$$A^T P + PA = -Q \quad (2.5)$$

을 만족하는 정치행렬  $P$ 가 유일하게 존재함을 알 수 있다.

불확실성의 상한함수를 완전히 알지는 못하더라도 그 상한함수가 가정 2.3에서 언급한 형태이면, 매개변수화되어 있는 미지의 상수  $\theta$ 를 추정하는 적응법칙을 도입할 수 있는데, 기존의 적응제어방법들이 플랜트(plant)나 제어기의 매개변수를 추정하는데 비해, 제안된 적응제어방법은 제어입력의 이득을 구하기 위해 불확실성의 상한에 포함되어 있는 미지의 상수를 추정하는 것이다. 즉, 추정하려는 상한함수가 항상 양의 값을 취해야 하고, 불확실성의 크기를 제한하는 부등식을 만족해야 하는 점 등으로 인하여, 매개변수 추정치의 수렴성을 증명하기 어렵다. 이러한 적응제어 방법들

은하는데 필요한 함수들과 상수들을 정의하자.

실계정수인 포화함수의 선형구간을  $\varepsilon (> 0)$ ,  $\theta$ 의 추정치를  $\hat{\theta}(t)$ 라 하고,

$$a(t, x) = B^T P x(t), \quad (2.6)$$

$$\eta(t, x, \hat{\theta}) = \varepsilon^{-1} \rho(t, x, \hat{\theta}) a(t, x), \quad (2.7)$$

$$K(t, x, \hat{\theta}) = -\rho(t, x, \hat{\theta}) \text{sat}[\eta(t, x, \hat{\theta})] \quad (2.8)$$

등을 정의하자. 그리고, 제어입력과 매개변수추정식은 다음과 같이 주어진다.

$$u(t) = K(t, x(t), \hat{\theta}(t)), \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}(t) &= -\lambda \hat{\theta}(t) + L \Psi(t, x(t)) \|a(t, x(t))\|, & \hat{\theta}(t_0) \\ &\in R_+^p & (2.10) \end{aligned}$$

여기서,  $\lambda \in (0, \infty)$ ,  $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_p\}$ ,  $l_i \in (0, \infty)$ ,  $i = 1, \dots, p$ 이고,  $t_0$ 는 초기시간이다.

또한,  $l_m, l_M, \mu, \bar{\varepsilon}, d_0, d_1, d_2$  등의 상수들을 다음과 같이 정의하자.

$$l_m = \lambda_m(L) = \min l_i, \quad l_M = \lambda_M(L) = \max l_i, \quad (2.11)$$

$$\mu = 1/2 \min\{\lambda_m(P^{-1}Q), \lambda\}, \quad (2.12)$$

$$\bar{\varepsilon} = \gamma[\varepsilon/4 + \lambda \|\theta\|^2 / (2l_m)], \quad (2.13)$$

$$d_0 = \left[ \frac{\bar{\varepsilon}}{\mu \cdot \max\{\lambda_m(P), \gamma l_m^{-1}\}} \right]^{1/2}, \quad (2.14)$$

$$d_1 = \left[ \frac{\bar{\varepsilon}}{\mu \cdot \lambda_m(P)} \right]^{1/2}, \quad (2.15)$$

$$d_2 = [l_M \bar{\varepsilon} / (\gamma \mu)]^{1/2}, \quad (2.16)$$

제어법칙에 포함된  $\varepsilon, \lambda, L$  등은 모두 설계정수들로써, 이들의 적절한 선정에 의해 상태변수 오차의 크기를 충분히 작게 할 수 있다.

다음의 보조정리는, 적응제어법칙(2.9)과(2.10)에 의해 시스템(2.1)의 해가 궁극적으로 유계(ultimately bounded)임을 보인다[23].

보조정리 2.1: 시스템(2.1)이 가정 2.1~2.3을 만족한다고 하자. 또한, 적응제어법칙이(2.9)와(2.10)으로 주어졌을 때, 초기상태  $x(t_0) \in R^n$ 에 대하여 시스템(2.1)의 해  $x: R_+ \rightarrow R^n$ 가 존재한다고 하자. 그러면,  $t \in [t_0, \infty)$ 에 대하여

$$\|x(t)\| \leq \begin{cases} d_1, & \|z(t_0)\| > d_0, \\ d_1 \{1 + [\|z(t_0)\|^2 / d_0^2 - 1] e^{-2\mu(t-t_0)}\}^{1/2}, & \|z(t_0)\| \leq d_0, \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\|\hat{\theta}(t)\| \leq \begin{cases} d_2, & \|z(t_0)\| > d_0 \\ d_2 \{1 + [\|z(t_0)\|^2 / d_0^2 - 1] e^{-2\mu(t-t_0)}\}^{1/2}, & \|z(t_0)\| \leq d_0, \end{cases} \quad (2.18)$$

이다. 단,

$$\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta, z(t) = [x^T(t) \tilde{\theta}^T(t)]^T$$

이다.

증명 : [23]을 볼것.

보조정리의 결과인 (2.17), (2.18)로부터 상태변수와 매개변수의 오차 한계는 각각  $d_1, d_2$ 로 결정됨을 알 수 있는데,  $\lambda_m(P^{-1}Q) \geq \lambda$ 라고 가정하면 (2.12)에서  $\mu = \lambda/2$ 이고, (2.13)의  $\varepsilon$ 를 (2.15)와 (2.16)에 대입하여 각각

$$d_1 = \left[ \frac{\gamma}{\lambda_m(P)} \left( \frac{\varepsilon}{2\lambda} + \frac{\|\theta\|^2}{l_m} \right) \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

$$d_2 = \left[ \frac{\varepsilon l_m}{2\lambda} + \frac{l_m}{l_m} \|\theta\|^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

를 얻는다. 위의 (2.19)에서  $l_m$ 을 크게 하면  $d_1$ 에 대한  $\|\theta\|$ 의 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한  $\varepsilon$ 를 작게 하고  $\lambda_m(P)$ 를 크게 함으로써  $d_1$ 을 원하는만큼 작게 할 수 있다. 그러나  $d_2$ 는  $\|\theta\|$ 의 영향을 거의 그대로 받게 되며, 적응이득  $L$ 이 큰 경우  $(\varepsilon l_m / 2\lambda)$ 항도  $d_2$ 를 크게 하는 요인이 된다. 그러므로  $\|\tilde{\theta}(t)\|$ 의 크기는 설계정수들의 값에 의해 임의로 조정될 수 없다.

### 3. 로봇트의 경로추적제어

#### 3.1 로봇트의 운동역학 및 문제의 설정

관절의 수가  $n$ 개인 로봇트의 운동방정식은 다음과 같다.

$$D(q(t))\ddot{q}(t) + N(q(t), \dot{q}(t)) = \tau(t) \quad (3.1)$$

여기서,  $q: R_+ \rightarrow R^n$ 는 로봇트의 관절변수벡터,  $D(\cdot) \in C^1(R^n, R^{n \times n})$ 는 대칭 정칙의 관성행렬,  $N(\cdot, \cdot) \in C(R^n \times R^n, R^n)$ 은 비선형 벡터항,  $\tau: R_+ \rightarrow R^n$ 는 각 관절에 가해지는 입력토크 벡터이다. 이 운동방정식에서 마찰력과 구동장치(actuator)의 동특성은 무시되었다.

로봇트가 추적해야할 경로  $q_a \in BC^2(R_+, R^n)$ 이 주어졌을 때, 이상적인 제어목표는, 초기시간  $t_0 \in R_+$ 에 대하여

$$q(t) = q_a(t) \quad \forall t \in [t_0, \infty)$$

이다.

$D(\cdot)$ 와  $N(\cdot, \cdot)$ 은 각각 다음과 같이 세부분으로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned} D(q) &= D_0(q) + D_u(q) + D_p(q), \\ N(q, \dot{q}) &= N_0(q, \dot{q}) + N_u(q, \dot{q}) + N_p(q, \dot{q}). \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서, 첨자  $(\cdot)_0, (\cdot)_u, (\cdot)_p$ 등은 각각 무부하 로봇트, 파라미터(관성상수와 링크상수)의 불

확실성, 부하만의 역학적인 효과에 기인한 양이다. 관성상수 및 링크상수들을 완전히 알고 있다면  $D_u(\cdot) \equiv 0, N_u(\cdot) \equiv 0$ 이고, 부하가 없는 경우에는  $D_p(\cdot) \equiv 0, N_p(\cdot) \equiv 0$ 이다. 설계자는 오직  $(\cdot)_0$ 부분만을 알고 있는 것이다.

한편,  $(\cdot)_u$ 와  $(\cdot)_p$ 는 모두 로봇트 시스템의 불확실성을 나타내므로,

$$\begin{aligned} \Delta D(q) &= D_u(q) + D_p(q), \\ \Delta N(q, \dot{q}) &= N_u(q, \dot{q}) + N_p(q, \dot{q}) \end{aligned}$$

라 하면 (3.2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} D(q) &= D_0(q) + \Delta D(q), \\ N(q, \dot{q}) &= N_0(q, \dot{q}) + \Delta N(q, \dot{q}). \end{aligned} \quad (3.3)$$

비선형 벡터인  $N(q, \dot{q}), N_0(q, \dot{q}), \Delta N(q, \dot{q})$ 은 각각 다음과 같이 두개의 항으로 나누어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} N(q, \dot{q}) &= h(q, \dot{q}) + c(q), \\ N_0(q, \dot{q}) &= h_0(q, \dot{q}) + c_0(q), \\ \Delta N(q, \dot{q}) &= \Delta h(q, \dot{q}) + \Delta c(q). \end{aligned} \quad (3.4)$$

여기서,  $h(q, \dot{q})$ 는 Coriolis힘과 원심력을,  $c(q)$ 는 중력을 나타내며[4],  $h(q, \dot{q})$ 의  $i$ 번째 성분  $h_i(q, \dot{q})$ 는 2차식(quadratic form)

$$h_i(q, \dot{q}) = \dot{q}^T H_i(q) \dot{q} \quad (3.5)$$

으로 주어지며,  $D(q)$ 의  $ij$ 번째 성분을  $D_{ij}(q)$ 라 할때, 행렬  $H_i(q)$ 의  $jk$ 번째 성분

$$H_{ijk}(q) = 1/2 \left[ \frac{\partial D_{ij}(q)}{\partial q_k} + \frac{\partial D_{ik}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial D_{jk}(q)}{\partial q_i} \right], \quad (3.6)$$

$$i, j, k = 1, 2, \dots, n$$

으로 정의된다(Christoffel symbol[6]).

본 논문에서 다루는 로봇트는 다음의 가정들을 만족한다.

가정 3.1 : 상수  $\gamma \in (0, 1]$ 가 존재하여, 모든  $q \in R^n$ 에 대하여

$$\|D^{-1}(q) \cdot \Delta D(q)\| \leq 1 - \gamma \quad (3.7)$$

이다.

가정 3.2 : 상수  $b_1, b_2 \in R_+$ 가 존재하여, 모든  $q \in R^n$ 에 대하여

$$\|D^{-1}(q) \cdot \Delta N(q, \dot{q})\| \leq b_1 \|\dot{q}\|^2 + b_2 \quad (3.8)$$

이다.

모든 관절이 회전형인 로봇트의 역학모델에서 관절변수  $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ 는 단독으로 나타나지 않

고 반드시  $\cos(q_i)$ ,  $\sin(q_i)$ 의 형태로 나타난다. 즉,  $s(q)=[\cos(q_1) \cos(q_2)\cdots\cos(q_n) \sin(q_1) \sin(q_2)\cdots\sin(q_n)]^T$ 라 하면, 관성행렬  $D(q)=\bar{D}(s(q))=\bar{D}(s)$ 로 쓸 수 있다. 여기서,

$$\|s\|=[\sum_i |\cos(q_i)|^2 + \sum_i |\sin(q_i)|^2]^{1/2} = n^{1/2}$$

이므로, 연속함수  $\bar{D}(\cdot)$ 의 정의구역은 유계인 폐집합(즉, compact set)이다. 따라서  $\|\bar{D}(s)\| (= \|D(q)\|)$ 의 최대값과 최소값이 (상수로서) 존재함을 의미한다.  $D(q)$ 뿐만 아니라,  $H_i(q)$ ,  $c(q)$ 등  $q$ 만의 함수들도 상수인 최대값과 최소값을 가진다. 또한,

$$\begin{aligned} \|h(q, \dot{q})\|^2 &= \sum_i |h_i(q, \dot{q})|^2 = \sum_i |\dot{q}^T H_i(q) \dot{q}|^2 \\ &\leq \sum_i (\|H_i(q)\| \cdot \|\dot{q}\|)^2 = (\sum_i \|H_i(q)\|^2) \cdot \|\dot{q}\|^4 \end{aligned}$$

이므로

$$\|h(q, \dot{q})\| \leq (\sum_i \|H_i(q)\|^2)^{1/2} \|\dot{q}\|^2 \quad (3.9)$$

이다. 유사한 과정에 의해  $\|\Delta h(q, \dot{q})\|$ 의 상한도 (3.9)에서와 같이  $\|\dot{q}\|^2$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로, 모든 관절이 회전형인 로봇트에 대해서는 (3.7)과 (3.8)의 우변이 관절변수  $q$ 와 무관하게 표현된다.

### 3.2 고성능 로봇트 제어기의 설계

로봇트의 운동방정식이 (3.1)로 주어졌을 때, 비선형 되먹임

$$\tau(t) = N_0(q, \dot{q}) + D_0(q) \bar{u}(t) \quad (3.10)$$

을 가하고, (3.3)을 이용하면 다음과 같이 변환된다.

$$\ddot{q}(t) = -D^{-1}(q) \cdot \Delta N(q, \dot{q}) + D^{-1}(q) D_0(q) \bar{u}(t). \quad (3.11)$$

경로추적성능을 향상시키기 위해 선형보상기

$$\bar{u}(t) = \ddot{q}_d(t) + K_v \dot{e}(t) + K_p e(t) + \pi[\dot{e}(t) + \beta x_f(t)] - u(t) \quad (3.12)$$

를 도입한다(그림 1 참조). 여기서,

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (3.13)$$

$$\dot{x}_f(t) = -\alpha x_f(t) + K_v \dot{e}(t) + K_p e(t) \quad (3.14)$$

이고,  $u(t)$ 는 보상된 시스템의 새로운 제어입력이며,  $K_v = \text{diag}\{K_{v1}, K_{v2}, \dots, K_{vn}\}$ 와  $K_p = \text{diag}\{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pn}\}$ 는 정치행렬, 그리고  $\alpha, \beta, \pi, \in R_+$ 이다.

잘 알려진 계산토크법은, 비선형 되먹임 (3.10)에 의해 로봇트 운동방정식의 공칭부분을 선형화

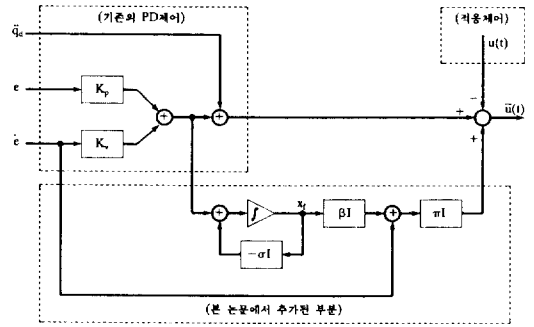


그림 1 제안된 선형보상기의 구조

Fig. 1 Structure of the proposed linear compensator.

하고, (3.12)에서  $\pi=0$ ,  $u(t)=0$ 으로 놓은 선형보상기를 사용한 로봇트제어방법이다.

경로추적오차에 대한 방정식을 얻기 위해, (3.12)를 (3.11)에 대입하면

$$\begin{aligned} \ddot{q}(t) &= D^{-1}(q) D_0(q) [\ddot{q}_d(t) + (K_v + \pi I) \dot{e}(t) \\ &\quad + K_p e(t) + \beta \pi x_f(t)] \\ &\quad - D^{-1}(q) D_0(q) u(t) - D^{-1}(q) \cdot \Delta N(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

이 된다. 또한, (3.3)으로부터  $D^{-1}(q) D_0(q) = I - D^{-1}(q) \cdot \Delta D(q)$ 이므로, (3.15)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{e}(t) + (K_v + \pi I) \dot{e}(t) + K_p e(t) + \beta \pi x_f(t) \\ = [I + \bar{E}(q)] u(t) + \bar{v}(q, \dot{q}, q_a, \dot{q}_a, \ddot{q}_a, x_f). \end{aligned} \quad (3.16)$$

단,

$$\bar{E}(q) = -D^{-1}(q) \cdot \Delta D(q), \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}(q, \dot{q}, q_a, \dot{q}_a, \ddot{q}_a, x_f) = D^{-1}(q) \cdot \Delta N(q, \dot{q}) \\ + D^{-1}(q) \cdot \Delta D(q) [\ddot{q}_d(t) + (K_v + \pi I) \dot{e}(t) \\ + K_p e(t) + \beta \pi x_f(t)] \end{aligned} \quad (3.18)$$

이다. 여기서, (3.16)은 로봇트 (3.1)이 사전보상된 후 경로를 따라가면서 발생하는 경로추적오차를 기술하고 있는데, 이 오차방정식을 간단하게 표현하기 위하여 새로운 상태변수  $x(t) = [e^T(t) \dot{e}^T(t) x_f^T(t)]^T$ 를 정의한다. 그러면, (3.17)의  $\bar{E}$ 와 (3.18)의  $\bar{v}$ 는 모두  $(t, x)$ 의 함수임을 알 수 있다. 즉,  $\bar{E}(q(t)) = \bar{E}(q_d(t) - e(t)) = E(t, x(t))$ 로,  $\bar{v}(q(t), \dot{q}(t), q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t), x_f(t)) = v(t, x(t))$ 로 쓸 수 있다. 행렬  $A$ ,  $B$ 를 각각

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ -K_p & -(K_v + \pi I) & -\beta\pi I \\ K_p & K_v & -\alpha I \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

로 정의하면, (3.16)은 간단히 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\{[I + E(t, x(t))]u(t) + v(t, x(t))\} \quad (3.20)$$

이 식은 (2.1)과 같은 형태이다. 경로추적오차  $x(t)$ 의 궁극적 유계성을 보장하기 위해 보조정리 2.1을 적용한다. 다음의 보조정리들에서는, 정리 2.1에서 전제한 세개의 가정을 검토한다.

보조정리 3.1: 위의 (3.19)에 주어진 행렬  $A$ 는,  $\beta \in [0, 1]$ 이면 안정하다.

증명: 행렬  $A$ 의 특성다항식  $\phi(s)$ 는,  $K_p, K_v$ 가 모두 대각행렬이므로

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -K_{p_i} & -(K_{v_i} + \pi) & -\beta\pi \\ K_{p_i} & K_{v_i} & -\alpha \end{bmatrix}, i = 1, \dots, n$$

이라 하면,

$$\begin{aligned} \phi(s) &= \prod_{i=1}^n \det(sI - A_i) \\ &= \prod_{i=1}^n \{s^3 + (\alpha + \pi + K_{v_i})s^2 + [K_{p_i} + K_{v_i}(\alpha + \beta\pi) + \alpha\pi]s + K_{p_i}(\alpha + \beta\pi)\} \end{aligned}$$

이며, 행렬  $A$ 가 안정하기 위해서는 Routh-Hurwitz 판별법에 의해,  $i = 1, \dots, n$ 에 대하여 부등식

$$(\alpha + \pi + K_{v_i})[K_{p_i} + K_{v_i}(\alpha + \beta\pi) + \alpha\pi] > K_{p_i}(\alpha + \beta\pi),$$

을 만족하면 된다. 그런데,  $K_v$ 와  $K_p$ 가 정치행렬이고  $\beta \leq 1$ 이므로, 행렬  $A$ 는 위의 부등식을 항상 만족한다. (중명끝)

보조정리 3.2: 가정 3.1이 만족되면, 모든  $(t, x) \in \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n$ 에 대하여

$$1 + \lambda_m\{1/2[E(t, x) + E^T(t, x)]\} \geq \gamma \quad (3.21)$$

이다.

증명: 행렬측도  $m(\cdot)$ 의 정의와 성질을 이용하면,  $\lambda_m\{1/2[E(t, x) + E^T(t, x)]\} = -\lambda_m\{-1/2[E(t, x) + E^T(t, x)]\} = m\{-E(t, x)\} \geq -\|E(t, x)\|$  이므로 [21], (3.7)이 만족되면 (3.21)이 성립한다. (중명끝)

보조정리 3.3: 가정 3.1과 가정 3.2가 만족된다

고 하자. 그러면, 양의 정수  $p$ , 상수벡터  $\theta \in \mathbf{R}^p$ , 함수  $\phi \in C(\mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n, \mathbf{R}_+^p)$ 가 존재하여, 부등식

$$\gamma^{-1}\|v(t, x)\| \leq \theta^T \phi(t, x) = \rho(t, x, \theta)$$

을 만족한다.

증명: 함수  $\zeta$ 를

$$\zeta(t, x) = \ddot{q}_a(t) + (K_v + \pi I)\dot{e}(t) + K_p e(t) + \beta\pi x(t) \quad (3.22)$$

라 하면, (3.18)로부터

$$\|v(t, x)\| \leq \|D^{-1}(q) \cdot \Delta N(q, \dot{q})\| + \|D^{-1}(q) \cdot \Delta \Delta(q)\| \cdot \|\zeta(t, x)\|$$

이다. 가정 3.1과 가정 3.2를 이용하면

$$\|v(t, x)\| \leq b_1 \|\dot{q}\|^2 + b_2 + (1 - \gamma)\|\zeta(t, x)\|$$

을 얻고, 이 부등식의 양변에  $\gamma^{-1}$ 을 곱하여 정리하면

$$\gamma^{-1}\|v(t, x)\| \leq \gamma^{-1}b_1 \|\dot{q}_a(t) - \dot{e}(t)\|^2 + \gamma^{-1}(1 - \gamma)\|\zeta(t, x)\| + \gamma^{-1}b_2$$

이 된다. 이때,  $p=3$ ,  $\theta = \begin{bmatrix} \gamma^{-1}b_1 \\ \gamma^{-1}(1 - \gamma) \\ \gamma^{-1}b_2 \end{bmatrix}$ ,  $\phi(t, x) =$

$\begin{bmatrix} \|\dot{q}_a(t) - \dot{e}(t)\|^2 \\ \|\zeta(t, x)\| \\ 1 \end{bmatrix}$  라 하면, 원하는 결과를 얻는다.

여기서,  $\theta$ 는 미지의 상수벡터이다. (중명끝)

보조정리 3.3의 증명으로부터, 다루는 로봇의 모든 관절이 회전형이면 제안된 적응제어방법에서 추정해야 할 매개변수(미지의 상수)의 수는 관절의 수에 관계없이 항상 3개임을 알 수 있다. Slotine과 Li[15]의 적응제어방법에서는, 로봇의 운동방정식을 재정리하여 적절히 선정된 역학적 매개변수에 대하여 선형으로 매개변수와 하였으므로 추정해야 할 매개변수의 수가 본 논문에서 제안된 적응제어방법에서보다 많아진다. 관절의 수가 2개인 로봇의 예로부터, 운동방정식을 정리하여 매개변수의 수를 4개로 줄여 놓은 것을 볼 수 있다[15]. 그러나, 관절의 수가 늘어나면 매개변수의 수도 이에 비례하여 증가한다.

보조정리 3.1~3.3에서는, 사전보상된 로봇 시스템의 경로추적오차방정식 앞절의 정리 2.1의 가정들(가정 2.1~2.3)을 모두 만족함을 보였다. 이로써 정리 2.1을 적용하여, 그 결과로 추적오차의 궁극적 유계성을 보장하는 제어를 실현할 수 있게 된다. 앞 절에서 논한 바와 같이, 제어기에 포함된 설계정수들을 적절히 선정하여 추적오차를

충분히 작게 할 수 있으며, 따라서 좋은 추적성능을 보장할 수 있다. 다음의 정리에서는 이러한 결과를 요약한다.

정리 3.1: 상수  $\beta \in [0,1]$ 이라 하고, 주어진 로봇 시스템이 가정 3.1과 가정 3.2를 만족한다고 하자. 그러면, 사전보상된 로봇 시스템의 경로 추적오차방정식 (3.20)은 적응제어법칙 (2.9)와 (2.10)에 의해 궁극적으로 유계인 해를 갖는다.

선형보상기 (3.12)는 기존의 PD 및 PID제어를 특별한 경우로 포함한다. 즉, (3.12)에서  $u(t) = 0$ 이라 하자. 이때,  $\pi = 0$ 이라 하면,  $\bar{u}(t)$ 는 로봇 제어기로 널리 쓰이고 있는 PD제어기로 귀착된다. 한편, (3.12)의 양변을 Laplace 변환하면

$$\begin{aligned} \bar{U}(s) &= s^2 Q_d(s) + sK_v E(s) + K_p E(s) = \pi [sE(s) + \beta X_f(s)], \\ sX_f(s) &= -\alpha X_f(s) + sK_v E(s) + K_p E(s) \end{aligned}$$

이다. 여기서,  $X_f(s)$ 를 소거하면

$$\bar{U}(s) = s^2 Q_d(s) + [(K_v + \pi I)s + (K_p + \beta\pi K_v) + \beta\pi(K_p - \alpha K_v)/(s + \alpha)]E(s)$$

이 되며,  $K_1 = K_v + \pi I$ ,  $K_2 = K_p + \beta\pi K_v$ ,  $K_3 = \beta\pi(K_p - \alpha K_v)$ 라 하면

$$\bar{U}(s) = s^2 Q_d(s) + [K_1 s + K_2 + K_3/(s + \alpha)]E(s) \tag{3.23}$$

을 얻는다. 특히, (3.23)에서  $\alpha = 0$ 으로 두면,  $\bar{u}(t)$ 는 PID제어기이다.

또한, (3.19)의 행렬  $A$ 에서,  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$ 로 하면,  $A$ 의 특성방정식은

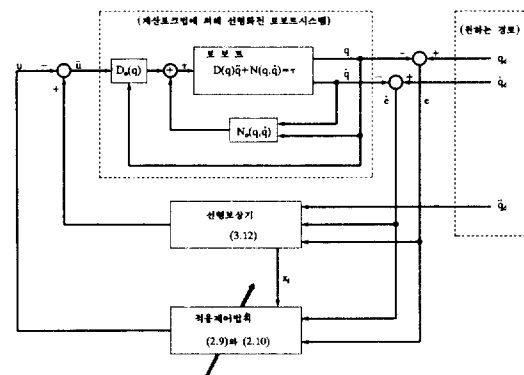


그림 2 제안된 로봇트 제어기의 블럭선도  
Fig. 2 Block diagram of the proposed robot controller.

$$\det(sI - A) = \prod_{i=1}^n (s^2 + K_{vi}s + K_{pi})(s + \pi)$$

이다. 이것은 각 관절당 PD제어로 도입된 극점에 안정한 극점  $-\pi$ 가 추가된 것으로 볼 수 있다.

그림 2는 결과적으로 얻게 되는 로봇트 제어기의 구조를 보인다.

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 시뮬레이션조건

컴퓨터 시뮬레이션으로, 제안된 적응제어방법을 사용했을 때 로봇트의 경로추적 성능을 평가하였다. 로봇트의 제어는 관절변수공간(joint-variable space)에서 수행되었다. 여러가지 실제적으로 가능한 상황에서 제안된 방법과 계산토크법의 성능을 비교했는데, 실제적으로 가능한 상황이란, 미지의 부하(payload)가 있는 경우, 관성상수와 링크상수에 불확실성이 있는 경우, 제어대상인 로봇트 시스템과 제어기간에 계산시간지연이 있는 경우 등이다. 이 세가지는 모두 제어기 실현시 피할 수 없는 상황들이다.

시뮬레이션을 위한 로봇트의 링크상수 및 관성상수는 PUMA 560의 아래쪽 3개의 축에 대한 것(관성상수는 윗쪽 3개의 축, 즉 4, 5, 6축은 정지된 채로 3번째 축에 붙어 움직이지 않는 것으로 하여 환산된 것)을 사용하였다(표 1, 2참조). 각 축(3개의 축)은 1초동안 4-3-4경로[4]를 따라 90°씩 움직이게 하였고( $q_d(0) = [0^\circ \ 45^\circ \ 45^\circ]^T$ ,  $q_d(0, 2) = [9^\circ \ 36^\circ \ 54^\circ]^T$ ,  $q_d(0, 8) = [81^\circ \ -36^\circ \ 126^\circ]^T$ ,  $q_d(1) = [90^\circ \ -45^\circ \ 135^\circ]^T$ ), 1초 후에는 각 관절변수의 값을 1초동안 유지하여 ( $q_d(t) = q_d(1)$ ,  $1 \leq t \leq 2$ ), 2초간의 추이를 관찰하였다. 표본주기를 0.05초로 하여 각 관절당 400개씩의 데이터를 얻었다.

표 1 PUMA 560의 관절변수 및 링크상수 [19]

Table 1 Joint variables and link parameters of PUMA 560 [19]

관절 (i)	$q_i$	$\alpha_i$ [deg]	$d_i$ [m]	$a_i$ [m]
1	$q_1$	-90	0	0
2	$q_2$	0	0	0.4318
3	$q_3$	90	0.1505	-0.0191
4	$q_4^*$	-90	0.4331	0
5	$q_5^*$	90	0	0
6	$q_6^*$	0	0	0

\* 마지막 3개의 관절은 정지되어 있음.

표 3은, 세가지의 기본적인 불확실성으로 조합된 불확실한 상황하에서, 세가지 제어방법, 즉 제안된 적응 제어 방법(ACM, Adaptive Control Method), 비적응 제어 방법(NAM, Non-Adaptive Method; 제안된 제어방법에서 선형보상기만으로 제어한 경우), 계산토크법(CTM, Computed Torque Method)의 시뮬레이션 명칭을 설명하고 있다. 제어기에 포함된 설계정수들은 각각  $K_v=40I$ ,  $K_p=400I$ ,  $\alpha=0.01$ ,  $\beta=0.9999$ ,  $\pi=100$ 으로 하였고,  $\epsilon$ ,  $\lambda$ ,  $L$  등은 시뮬레이션조건에 따라 다르게 선정하였는데, 구체적인 값은 표3에서 찾아볼 수 있다. 계산시간지연이 있는 경우,  $\epsilon$ 과  $\lambda$ 는 계산시

간 지연이 없는 경우보다 큰 값을 취하였고,  $L$ 은 작은 값을 취하였는데, 그 이유는  $\epsilon=0.01$ ,  $\lambda=1$ ,  $L=10^3I$ 에 대해서는 떨림현상이 일어났기 때문이었다. 즉, 설계정수들을 조절하여 떨림현상이나 추적성능의 악화 등을 방지할 수 있다.

**4.2 시뮬레이션결과 및 검토**

각 관절별 시뮬레이션 결과는 미지의 부하만이 있는 경우에 대한 것만을 그림 2~6에 보였다. 그림 2와 그림 4(그림 3과 그림 5)는 각각 ACM/L(CTM/L)에 대한 추적오차와 입력토크이다. 이 시뮬레이션의 경우, ACM의 추적오차의 최대치는

**표 2 PUMA 560의 관성상수[20]**  
**Table 2 Inertial parameters of PUMA 560[20]**

Link	질량	질량중심			회전반경 (radii of gyration)		
	$m_i$ [kg]	$\bar{x}_i$ [m]	$\bar{y}_i$ [m]	$\bar{z}_i$ [m]	$k_{ixx}$ [m <sup>2</sup> ]	$k_{iyy}$ [m <sup>2</sup> ]	$k_{izz}$ [m <sup>2</sup> ]
1	12.96	0.0000	0.3088	0.0389	0.1816	0.0152	0.1811
2	22.37	-0.3289	0.0050	0.2038	0.0596	0.1930	0.1514
3	5.01	0.0204	0.0137	0.0037	0.0151	0.0155	0.0021
3*	6.97	0.0136	0.0092	0.1522	0.0783	0.0786	0.0021
4	1.18	0.0000	0.0863	-0.0029	0.0119	0.0029	0.0118
5	0.62	0.0000	-0.0102	0.0013	0.0009	0.0009	0.0009
6	0.16	0.0000	0.0000	0.0029	0.0008	0.0008	0.0004

\* 마지막 3개의 관절이 정지된 상태에서 세번째 관절에 가산된 경우임.

**표 3 여러가지 다른 상황하에서의 세가지 제어방법의 명명법**  
**Table 3 Designation of the three control methods under several different environments.**

제어방법 ( $K_v=40I$ , $K_p=400I$ )			부하 <sup>1)</sup>	관성상수와 링크상수의 불확실성 <sup>2)</sup>	계산시간 지연 <sup>3)</sup>
ACM	NAM	CTM			
$(\alpha=0.01, \beta=0.9999, \pi=100)$					
ACM/P*	NAM/P*	CTM/P*	무	유	무
ACM/PD <sup>+</sup>	NAM/PD <sup>+</sup>	CTM/PD <sup>+</sup>	무	유	유
ACM/L*	NAM/L*	CTM/L*	유	무	무
ACM/LD <sup>+</sup>	NAM/LD <sup>+</sup>	CTM/LD <sup>+</sup>	유	무	유
ACM/LP*	NAM/LP*	CTM/LP*	유	유	무
ACM/LPD <sup>+</sup>	NAM/LPD <sup>+</sup>	CTM/LPD <sup>+</sup>	유	유	유

\* ( $\epsilon=0.01$ ,  $\lambda=1$ ,  $L=10^3I$ )  
+ ( $\epsilon=1$ ,  $\lambda=2.5$ ,  $L=10^2I$ )  
# ( $\epsilon=1$ ,  $\lambda=1.5$ ,  $L=10^2I$ )

- 1) 로봇의 손끝(6번째 축)에 미지의 부하(5Kg의 점질량)를 부착시킨다(L).
- 2) 관성상수 및 링크상수들을 반올림하여 유효숫자를 1개로 줄인다(P).
- 3) 로봇 시스템의 제어입력에 0.05초의 시간지연을 준다(D).



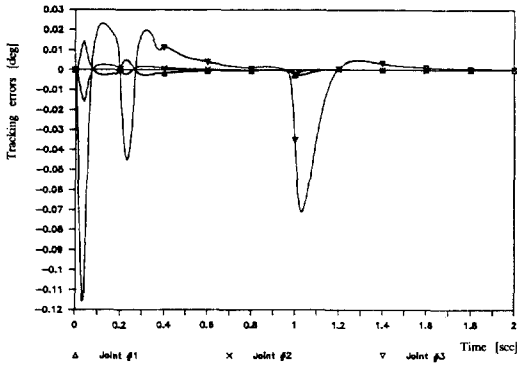


그림 3 ACM/L의 추적오차[deg]  
Fig. 3 Tracking errors for ACM/L [deg]

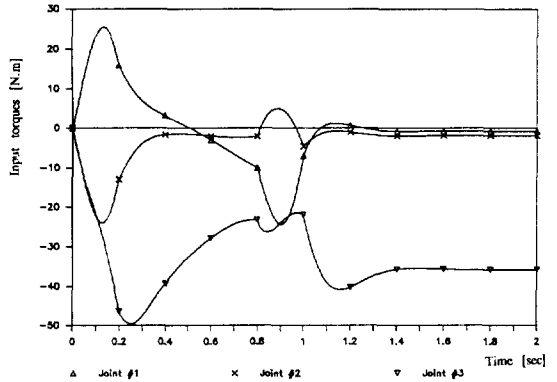


그림 6 CTM/L의 입력토크[N·m]  
Fig. 6 Input torques for CTM/L[N·m]

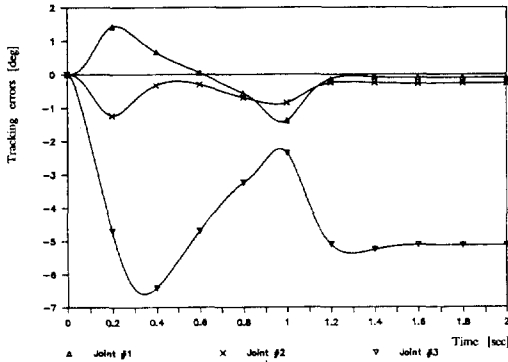


그림 4 CTM/L의 추적오차[deg]  
Fig. 4 Tracking errors for CTM/L[deg]

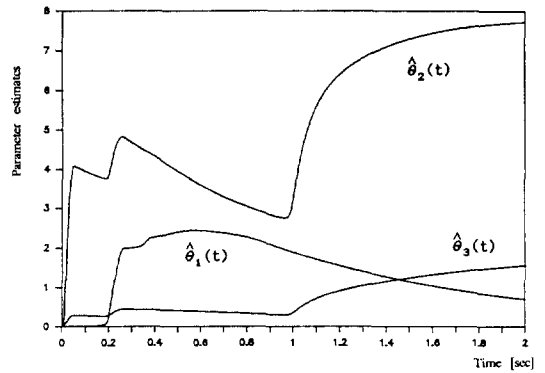


그림 7 ACM/L의 매개변수 추정치  
Fig. 7 Parameter estimates for ACM/L

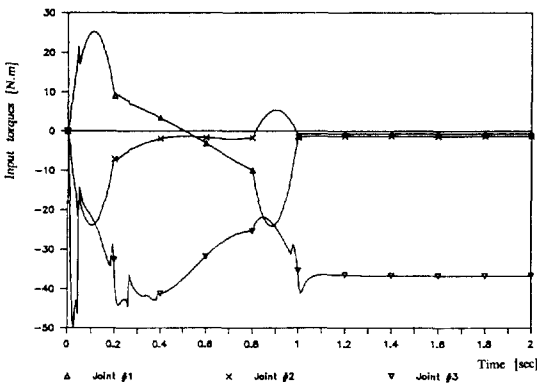


그림 5 ACM/L의 입력토크[N·m]  
Fig. 5 Input torques for ACM/L[N·m]

CTM에 대하여약 1/50 정도로, 대단히 작은 추적 오차를 보이고 있다. CTM은 제어기에 적분항이

없기 때문에 offset이 크게 나타난다. 입력토크는 두 방법 모두 비슷한 양상으로 변하고, 크기도 거의 같다. 즉, ACM에서 요구되는 입력토크는 계산토크법에 비하여 결코 크지 않음을 관찰할 수 있다. 각 관절이 정지해 있는 동안( $1 \leq t \leq 2$ )에도 입력토크가 일정하고 가해지고 있는 이유는, 관절의 마찰 및 구동장치에 대한 동특성을 완전히 무시했기 때문이다. 실제로는 로봇트의 각 관절과 감속기어에 마찰력이 존재하므로, 입력토크가 전혀 가해지지 않더라도 정지된 위치에서 움직이지 않을 것이다. ACM/L의 매개변수추정치를 그림 6에 보였다. 로봇트가 정지하면 ( $t \geq 1$ 일 때), 각 관절변수 및 입력토크는 일정하게 유지되므로 매개변수추정치도 어떤 값에 수렴하고 있는데, 참값에 수렴하는 것은 아니다. 제안된 적응제어방법에서는 매개변수추정치가 유한하다고 표현하는 것이

더 합당하다.

이밖에 부하는 없고, 관성상수 및 링크상수의 불확실성만이 있는 경우(ACM/P와 CTM/P)에 대해서도 시뮬레이션 했는데, 위의 경우(ACM/L)와 유사하다.

또한 표 3에 열거한 각 경우에 대하여, 로봇트 손끝의 위치의 원하는 위치에 대한 차이에 대하여 시뮬레이션하였다. 기본좌표계(base coordinate system)에 대한 로봇트 손끝의 위치벡터를  $p(q(t))$ 라 할 때 이를 이용하여, 시간  $t \in R_+$ 에서의 위치오차  $P_E(t)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$P_E(t) = \|p(q(t)) - p(q_d(t))\|$$

표 4는 각 시뮬레이션조건하의 세가지 제어방법에 대하여,  $P_E(t)$ 의 대표적인 값 세가지를 보여주고 있다. 이로부터, ACM과 NAM은 CTM보다 대단히 좋은 경로추적성능을 가짐을 알 수 있다. 또한 ACM의 경우, 계산시간지연이 있을 때(ACM/PD, ACM/LD, ACM/LPD)의 위치오차(최대치)가, 없는 경우(ACM/P, ACM/L, ACM/LP)에 비해 2~3배 정도로 커지지만, 각 시뮬레이션 조건하에서의 CTM에 비해서는 여전히 작은 값이다.

세가지 제어방법의 성능비교로부터 계산시간지연에 대해서는, 비적용방법들인 NAM과 CTM은 위치오차의 최대치가 계산시간지연의 유무에 따라

표 4 로봇트 손끝의 위치오차[mm]  
Table 4 Position errors of the robot hand[mm]

시뮬레이션명칭	$\max P_E(t)$	$P_E(1)$	$P_E(2)$
ACM/P	0.2275	0.1213	$1.029 \times 10^{-3}$
ACM/PD	0.6029	0.1104	$6.782 \times 10^{-4}$
ACM/L	1.085	0.2939	$3.076 \times 10^{-3}$
ACM/LD	2.488	0.5011	$5.029 \times 10^{-4}$
ACM/LP	1.012	0.2147	$2.912 \times 10^{-3}$
ACM/LPD	2.140	0.4855	$2.313 \times 10^{-3}$
NAM/P	0.6241	0.0804	$7.212 \times 10^{-4}$
NAM/PD	0.6241	0.0804	$7.212 \times 10^{-4}$
NAM/L	4.652	0.8694	$4.232 \times 10^{-3}$
NAM/LD	4.590	0.9575	$4.231 \times 10^{-3}$
NAM/LP	3.577	0.7516	$3.420 \times 10^{-3}$
NAM/LPD	3.526	0.8319	$3.420 \times 10^{-3}$
CTM/P	8.549	6.482	7.209
CTM/PD	8.531	6.492	7.209
CTM/L	62.82	33.99	42.39
CTM/LD	63.09	33.99	42.39
CTM/LP	49.14	26.93	34.21
CTM/LPD	49.35	26.90	34.21

크게 변동하지 않으나, ACM의 최대 위치오차는 2배 정도로 커짐을 관찰할 수 있다. 그런데, 적응 제어입력  $\bar{u}(t)=0$ 으로 하면 (3.12)의  $u(t)$ 는 선형성만을 가진다(위의 비적용제어방법들은  $\bar{u}(t)$ 가 선형인 경우임). 매개변수추정식 (2.10)에서  $\lambda \gg 1$ ,  $l_M = \lambda_M(L) \ll 1$ ,  $\hat{\theta}(t_0)=0$ 으로 두면,  $\hat{\theta}(t)$ 는  $t \geq t_0$ 에 대하여 작은 값을 가지며 (2.8)과 (2.9)에 의하여  $u(t)$ 의 크기도 작아지고, 이에 따라  $\bar{u}(t)$ 는 거의 선형성만을 갖는다. 즉, 설계정수  $\lambda$ 과  $L$ 을 조정하여, 시간지연에 대하여 견실성을 갖는 선형보상기와 시스템의 불확실성을 효과적으로 제거하는 적응제어기의 역할을 배분할 수 있다. 이 점은 계산 시간지연이 있을 때 설계정수를 선정하는 기준이 될 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는, 불확실성의 상한이 미지의 상수에 의해 매개변수화되어 있는 시스템에 대하여 폐루프 시스템의 궁극적 유계성을 보장하는 적응제어방법을 모든 관절이 회전형인 로봇트의 경로추적제어에 적용하여 좋은 결과를 얻었다. 제어하려는 로봇트는 관성상수 및 링크상수들의 불확실성과 미지의 부하가 있는 경우에, 로봇트의 공칭부분에 대한 안정화 및 경로추적성능의 향상을 위하여 비선형 되먹임과 선형보상기로 사전보상한 후, 위의 적응제어방법을 적용하였다. 도입된 선형보상기는, 기존의 PD 및 PID제어기를 특별한 경우로 포함하며, 효과적으로 불확실성을 제거하는 한편, 로봇트의 성능을 향상시킨다. 적응제어기는 로봇트의 성능을 더 좋게 할 뿐만 아니라 추적오차의 궁극적 유계성을 보장한다. 또한, 설계정수  $\lambda$ 와  $L$ 을 조정함으로써 선형보상기와 적응제어기의 역할을 배분할 수 있다. 이 사실은 계산시간 지연이 있는 경우에 효과적으로 이용될 수 있는데, 적응제어기가 시간지연에 큰 영향을 받고, 선형보상기는 크게 영향을 받지 않기 때문이다. 이와 같이, 제안된 적응제어방법을 로봇트 제어에 적용했을 때 기존의 적응제어방법들에 비해 추정해야 할 매개변수의 수가 로봇트 관절의 수에 비례하여 증가하지 않으므로 계산량이 적을 뿐아니라, 제어기에 포함된 설계정수들을 적절히 선정하여 경로추적성능을 조절할 수 있는 장점이 있다.

이상과 같이 제안된 로봇트의 적응제어방법을, 회전형 로봇트인 PUMA 560의 경로추적제어 문제에 적용하여 그 성능을 평가하고 계산토크법과 비교하였다. 원하는 경로는 관절변수공간에서 주어

졌으며, 마찰력 및 구동장치의 역학적 특성은 무시하였고, 입력토크는 크기의 제한이 없다고 가정하였다. 미지의 부하와 파라미터의 불확실성 및 계산시간 지연 등 실제로 로봇 시스템 제어할 때 일어날 수 있는 상황을 고려하여 실험한 결과, 계산토크법으로는 정상상태에서의 위치오차가 커지거나 불안정해지는 반면, 제안된 방법으로는 경로 추적오차를 극히 작게 할 수 있었다. 특히, 계산시간 지연이 있는 경우에도, 설계정수들을 적절히 선정하여 만족할만한 추적성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원으로 이루어진 것입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] A.K. Bejczy, T.J. Tarn, X. Yun, and S. Han, "Nonlinear feedback control of PUMA 560 robot arm by computer," *Proc. IEEE Conf. on Decision Contr.*, Ft. Lauderdale, FL, pp. 1680 ~ 1688, Dec. 1985.
- [2] M.J. Corless and G. Leitmann, "Adaptive control of systems containing uncertain functions and unknown functions with uncertain bounds," *J. Optimiz. Theory Appl.*, Vol. 41, pp. 155 ~ 168, Sep. 1983.
- [3] J.J. Craig, P. Hsu, and S.S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 6, no. 2, pp. 16 ~ 28, 1987.
- [4] K.S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, *Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [5] E.G. Gilbert and I. J. Ha, "An approach to nonlinear feedback control with applications to robotics," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-14, pp. 879 ~ 884, Dec. 1984.
- [6] D.T. Greenwood, *Classical Dynamics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1977.
- [7] I.J. Ha and E.G. Gilbert, "Robust tracking in nonlinear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-32, pp. 763 ~ 771, Sep. 1987.
- [8] M. Hached, S.M. Madani-Esfahani, and S.H. Zak, "Stabilization of uncertain systems subject to hard bounds on control with application to a robot manipulator," *IEEE J. Robotics Autom.*, Vol. RA-4, pp. 310 ~ 323, June 1988.
- [9] R. Horowitz and M. Tomizuka, "An adaptive control scheme for mechanical manipulators-compensation of nonlinearity and decoupling control," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 108, pp. 127 ~ 135, June 1986.
- [10] K.Y. Lim and M. Eslami, "Robust adaptive controller designs for robot manipulator systems," *IEEE J. Robotics Autom.*, Vol. RA-3, pp. 54 ~ 66, Feb. 1987.
- [11] R.H. Middleton and G.C. Goodwin, "Adaptive computed torque control for rigid link manipulators," *Systems & Control Letters*, 10, pp. 9 ~ 16, 1988.
- [12] E.P. Ryan, G. Leitmann, and M. Corless, "Practical stabilization of uncertain dynamical systems: application to robotic tracking," *J. Optimiz. Theory Appl.*, Vol. 47, pp. 235 ~ 252, Oct. 1985.
- [13] S.N. Singh, "Adaptive model following control of nonlinear robotic systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-30, pp. 1099 ~ 1100, Nov. 1985.
- [14] J.-J. E. Slotine, "The robust control of robot manipulators," *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 4, no. 2, pp. 49 ~ 64, 1985.
- [15] J.-J. E. Slotine and W. Li, "Adaptive manipulator control: A case study," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-33, pp. 995 ~ 1003, Nov. 1988.
- [16] J.-J. E. Slotine and S.S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators," *Int. J. Contr.*, Vol. 38, no. 2, pp. 465 ~ 492, 1983.
- [17] M.W. Spong, J.S. Thorp, and J.M. Kleinwaks, "The control of robot manipulators with bounded input, Part II : Robustness and disturbance rejection," *Proc. IEEE Conf. on Decision Contr.*, Las Vegas, NV, pp. 1047 ~ 1052, Dec. 1984.
- [18] M.W. Spong and M. Vidyasagar, "Robust linear compensator design for nonlinear robotic control," *IEEE J. Robotics Autom.*, Vol. RA-3, pp. 345 ~ 351, Aug. 1987.

- [19] T.J. Tarn, A.K. Bejczy, S. Han, and X.P. Yun, "Inertia parameters of PUMA 560 robot arm," Robotics Lab. Report SSM-RL-85-01, Dept. of Systems Science and Mathematics, Washington Univ., St. Louis, MO, July 1985.
- [20] T.J. Tarn, A.K. Bejczy, S. Han, and X.P. Yun, "Dynamic equations for PUMA 560 robot arm," Robotics Lab. Report SSM-RL-85-02, Dept. of Systems Science and Mathematics, Washington Univ., St. Louis, MO, July 1985.
- [21] M. Vidyasagar, *Nonlinear Systems Analysis*, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1978.
- [22] K.-K D. Young, "Controller design for a manipulator using theory of variable structure systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-8, pp. 101~109, Feb. 1978.
- [23] 김홍석, 최종호, "불확실한 시스템의 적응제어," 전기학회논문지, 38권, 11호, pp.905~912, 1989년 11월.