

구동기 고장과 불확실성으로 인한 성능 저하를 가지는 로봇 매니플레이터에 대한 강인한 적응 내고장 제어

論 文

53D-3-6

Robust Adaptive Fault-Tolerant Control for Robot Manipulators with Performance Degradation Due to Actuator Failures and Uncertainties

申 鎮 鎬* · 白 雲 普**
(Jin-Ho Shin · Woon-Bo Baek)

Abstract - In normal robot control systems without any actuator failures, it is assumed that actuator torque coefficients applied at each joint have normally 1's all the time. However, it is more practical that actuator torque coefficients applied at each joint are nonlinear time-varying. In other words, it has to be considered that actuators equipped at joints may fail due to hardware or software faults. In this work, actuator torque coefficients are assumed to have non-zero values at all joints. In the case of an actuator torque coefficient which has a zero value at a joint, it means the complete loss of torque on the joint. This paper doesn't deal with the case. As factors of performance degradation of robots, both actuator failures and uncertainties are considered in this paper at the same time.

This paper proposes a robust adaptive fault-tolerant control scheme to maintain the required performance and achieve task completion for robot manipulators with performance degradation due to actuator failures and uncertainties. Simulation results are shown to verify the fault tolerance and robustness of the proposed control scheme.

Key Words : robot, actuator failures, uncertainties, actuator torque coefficients, robust adaptive fault-tolerant control.

1. 서 론

자율적인 지능 로봇 시스템의 동작에 있어서 고장 검출 및 대응에 기반한 신뢰성과 안정성은 매우 중요하다. 내고장성은 특히, 우주, 심해, 원전과 같은 원격 지역이나 위험한 환경에서 작업하는 로봇 시스템에 대해 중요하며, 로봇공학에서 점차적으로 그 중요성이 증대되어져 왔다. 로봇은 즉각적인 인간의 조정 또는 개입 없이 주어진 작업을 계속 수행하기 위하여 내부 고장을 효과적으로 검출하고 고장에 대처하기 위한 능력을 가져야 한다[1-3].

또한, 로봇 시스템은 매우 비선형성을 가진 시스템이며, 동적 파라미터 변동이나 외란과 같은 불확실성에 노출되어진다. 이들 불확실성을 극복하면서 원래 주어진 성능을 얻도록 하는 강인 제어가 설계되어질 필요가 있다. 그러나, 구동기 자체에 하드웨어 및 소프트웨어적인 고장이 일어날 수 있다. 이런 고장은 불확실성보다 더 심각한 성능 저하를 일으키거나 심지어 시스템 오류 및 사고를 일으킬지도 모른다. 따라서, 불확실성과 구동기 고장(actuator failures) 또는 관절 고장(joint failures)을 모두 제어 시스템 설계 과정에서 고려해 주어야 한다.

로봇 매니플레이터에 대해 불확실성을 극복하는 제어 기법 연구는 강인 제어 기법[4] 및 적응 제어 기법 연구[5]에서 연구되어져왔다. 또한, 이 각각의 두 가지 기법의 단점을 보완한 강인한 적

응 제어 기법들이 제안되어져왔다[6-10].

또한, 로봇 매니플레이터에 대한 구동기 고장이 있을 때, Visinsky의 2인의 논문[1]에는 고장 검출 방법이 제안되었으며, 이를 이용한 계층적 내고장 제어 구조가 제시되었다. 그러나, 구체적인 강인 제어 기법이 제시되지 않았으며, English와 Maciejewski의 논문[2]에서는 여유자유도 매니플레이터에 대한 자유 진동 관절 고장(free-swinging joint failures)에 대한 내고장성에 대하여 논하였으나, 불확실성과 구동기 고장에 대한 강인 제어기 설계에 대한 기법이 제시되지 않았다. 또한, Groom의 2인의 논문[3]에서 여유자유도 매니플레이터에 있어서, 고정 관절 고장(locked-joint failures)에 대한 실시간 내고장 제어 기법을 논하였으나, 역시 불확실성을 극복하는 강인 제어기 설계 기법이 제시되지 않았다. 논문 [2]와 논문 [3]에서 다루어졌던 "자유 진동 관절 고장"과 "고정 관절 고장"은 토크 또는 힘의 완전한 손실로 인하여 구동기에 토크가 0이 가해진다는 것을 의미한다. 이 때, 자유 진동 관절은 고장난 관절이 자유롭게 움직이는 것이며, 고정 관절 고장은 고장 이후에 관절이 고정되어 지는 것을 뜻한다. Dixon의 3인의 논문[11]과 Vemuri의 2인의 논문[12]에서 로봇 매니플레이터에 대한 고장 검출 방법이 제시되었으나, 구체적인 제어기 설계 기법은 제시되지 않았다.

따라서, 기존의 논문 결과들에서는 불확실성과 구동기 고장이 동시에 고려되지 않았으며, 온라인으로 구동기 고장으로 인한 성능 저하를 보상하고, 주어진 로봇의 작업을 성공적으로 완수하는 구체적인 강인한 적응 제어가 설계되지 못하였다. 본 논문에서 관심을 가지는 구동기 고장 또는 관절 고장은 위에서 언급되어졌던 자유 진동 관절 고장과 고정 관절 고장은 아니다. 로봇과 제어기 사이의 구동기 토크 계수들이 정상적인 상태의 일정한 1의 값을 가지지 않으며, 비선형 시변으로 고장이 나는 경우를 본 논문

* 正 會 員 : 東 義 大 메카트로닉스工學科 助教授 · 工博

** 正 會 員 : 東 義 大 메카트로닉스工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2003年 9月 23日

最終完了 : 2003年 11月 30日

에서 다룬다.

본 논문에서는, 동적 파라미터의 불확실성과 외란의 존재에서, 구동기 고장을 가지는 로봇 매니플레이터에 대하여 불확실성과 구동기 고장을 동시에 극복하는 강인한 적응 내고장 제어 기법을 제시하며, 모의 실험을 통하여 그 타당성과 강인성 및 내고장성을 알아본다.

2. 구동기 고장을 가지는 로봇의 동역학 모델

구동기 고장이 있는 n -링크 다관절 로봇 매니플레이터의 동역학 모델은 다음 식에 의해 기술된다.

$$M(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) = u + d(t) = K_a u_c + d(t) \quad (1)$$

여기서, $q \in R^n$ 는 관절 좌표의 위치 벡터, $M(q)$ 는 대칭 양한정 관성 행렬(symmetric positive definite inertial matrix), $F(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F_f(\dot{q}) + G(q)$ 는 각각 원심력, 코리올리력, 마찰력, 중력 토크에 대한 각 항들의 총 합이며, 마찰력 $F_f(\dot{q}) = F_v\dot{q} + F_d(\dot{q}) + F_s(\dot{q})$ 으로서 점성, 쿨롱, 정적 마찰력의 합이며, u 는 실제 관절의 토크 벡터(torque vector), u_c 는 명령 토크(commanded torque) 또는 제어기 출력 벡터(controller output vector), 그리고 $d(t)$ 는 유계 외란 벡터(bounded external disturbance vector)이다. 현재의 관절 고장의 상황을 나타내는 미지의 고장 벡터(unknown fault matrix) $K_a \in R^{n \times n}$ 는 구동기 토크 계수들(actuator torque coefficients)로 구성되는 유계 비선형 시변 대각 행렬(bounded nonlinear time-varying diagonal matrix)이다. 다시 말해서, $K_a(t) = \text{diag}(K_{a1}(t), K_{a2}(t), \dots, K_{an}(t))$ 이며, 그리고 양수 \bar{k}_a 를 가진 $\|K_a\| \leq \bar{k}_a$ 이다.

위의 동역학 방정식 (1)에서 보인 바와 같이, 제어기로부터 구동기를 통해 로봇으로 가는 신호들의 연결 관계 및 제어루프는 그림 1에서 보인다.

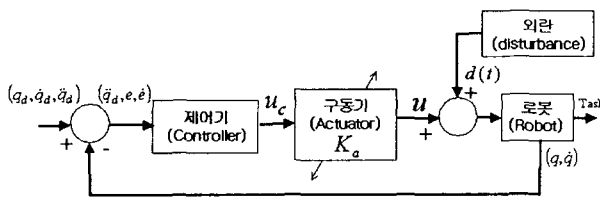


그림 1 명령 제어 신호와 구동기 토크 신호사이의 관계 및 로봇 제어 시스템: e 는 관절 위치 오차 벡터를 나타낸다.

Fig. 1 The relationship between the commanded control signal and the actuator torque signal, and the robot control system: e denotes the joint position error vector.

위의 동역학 방정식 (1)에서 나온 각각의 동역학 항들의 경계값 성질은 성질 1에서 나타내어진다.

성질 1: 다음과 같은 방정식 $m_{\min} \leq \|M(q)\| \leq m_{\max}$, $\|C(q, \dot{q})\| \leq c_{\max} \|\dot{q}\|$, $\|F_f(\dot{q})\| \leq f_{m1} + f_{m2} \|\dot{q}\|$, $\|G(q)\| \leq g_{\max}$, $\|F(q, \dot{q})\| \leq f_g + f_f \|\dot{q}\| + f_c \|\dot{q}\|^2$ 이 성립하는 양의 정수 m_{\min} , m_{\max} , c_{\max} , f_{m1} , f_{m2} , g_{\max} , f_g , f_f , 그리

고 f_c 가 존재한다[13].

이상적인 경우로서, 행렬 K_a 는 $n \times n$ 단위 행렬이며, 그 때 $u = u_c$ 이다. 따라서, 명령 토크 벡터 u_c 는 로봇 구동기에 정확히 전달된다. 이런 이상적인 경우에서, 로봇은 구동기 고장을 가지지 않으며, 로봇 구동기 또는 로봇 관절은 정상적이라고 생각되어질 수 있다.

반면에, 실제 로봇 시스템에서 명령 토크 u_c 는 구동기 및 드라이버 전자회로 다이내믹스(dynamics) 과열 등의 원인으로 인하여 로봇 구동기에 정확히 전달되지 않을지도 모른다. 실제적으로, 어떤 구동기에서는 구동기 고장으로 인하여 $u \neq u_c$ 가 될 수 있다.

이러한 구동기 고장은 시스템에 성능 저하를 가져올 수 있다. 시간이 지날수록 구동기 고장은 제어 시스템에서 고장 극복을 고려해주지 않으면 점점 더 시스템 성능을 저하시켜 결국 원하는 작업 성능을 성취하지 못할 수 있다.

본 논문에서는 구동기 토크 계수 행렬 K_a 가 정확히 단위행렬이 되지 않는 구동기 고장(actuator failure)이 일어나는 경우를 고려한다. 단, K_a 는 대각 행렬이며, 대각 원소 중 하나라도 0이 되어 0으로 머물러 있지 않는다고 가정한다. 만약, K_a 의 i 번째 대각 원소, K_{ai} 가 계속 0으로 되는 경우에는 i 번째 관절의 토크 $u_i = 0$ 이 되며, 이 관절은 수동 관절(passive joint) 또는 비구동 관절(unactuated joint)이라고 하며, 로봇 매니플레이터는 부족 구동을 가진 로봇 매니플레이터 또는 수동 관절을 가진 로봇 매니플레이터(underactuated robot manipulator)가 된다[14-16]. 이 때, 이 수동 관절은 자유 진동 관절이 될 수도 있고, 고정 관절도 될 수 있다. 이런 두 가지 종류의 고장이 난 후의 이러한 로봇에 대한 제어는 본 논문에서는 고려의 대상이 아니다.

3. 강인한 적응 내고장 제어기 설계

본 논문에서는 로봇 매니플레이터에 동적 파라미터 불확실성이 있으며, 또한 입력 외란이 부가되는 상황에서, 구동기 토크 계수 행렬 K_a 가 고장이 일어나지만, 대각 원소 중 0은 되지 않는 경우에, 로봇의 성능 저하를 개선하며, 원하는 작업을 완수하도록 하는 강인한 적응 내고장 제어기를 설계한다.

관절 벡터의 위치 오차(position error)와 확장 오차(augmented error)는 $e = q - q_d$ 와 $s = \dot{e} + \Lambda e$ 에 의해 표현하며, q_d 는 목표 관절 위치 벡터(desired joint position vector)이며, 이득 행렬(gain matrix) Λ 는 양한정 상수 대각 행렬(positive definite constant diagonal matrix)이다.

구동기 고장과 불확실성을 극복하는 제안된 강인한 적응 내고장 제어기는 다음과 같이 요약된다.

$$u_c = K_a^{-1} v_c = K_a^{-1} \left(-K_c s - \hat{\rho} \frac{s}{\|s\| + \epsilon} \right) \in R^n, \quad (2)$$

$$\hat{\rho} = \theta^T \psi, \quad \psi = (1, \|\dot{q}\|, \|\dot{q}\|^2, \|\ddot{q}_d\|, \|\dot{q}_d\|, \|s\|, (\|\dot{q}\| \|s\|))^T, \quad (3)$$

$$\theta = \Gamma \left(\frac{\psi \|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} - \sigma \theta \right) \in R^7, \quad (4)$$

여기서, K_a^{-1} 는 K_a^{-1} 에 대한 추정 공칭 모델(guessed nominal model)을 나타낸다. 이 추정 공칭 모델은 적응 법칙(adaptation law)

또는 추정 법칙(estimation law)에 의하여 계산되어지는 것이 아니라, 사용자가 파라미터를 실험적으로 측정(measurement)하거나 근사적으로 추정(guess)하여 설정한다. $\theta \in R^7$ 은 파라미터 불확실성과 외란에 의해 생기는 불확실성 항들을 모아 만든 노름(norm)의 상한 경계값(upper-bound) 성질에서 나온 파라미터 벡터 $\theta \in R^7$ 에 대한 추정 벡터(estimation vector)이다. 따라서, θ 은 식 (4)의 적응 법칙으로부터 추정된 파라미터들로 이루어진 벡터이다. 이 추정 벡터가 식 (2)의 로봇에 대한 강인한 적응 내고장 제어기에 쓰인다. 이것의 유도 과정 및 안정도 해석은 앞으로 Lyapunov 안정도 해석을 이용하여 전개되어진다. 이득 K_c 와 Γ 는 양한정 상수 대각 행렬이며, ϵ 과 σ 는 작은 양수들(small positive constants)이다.

확장 오차 s 에 대한 페루프 오차 동역학 방정식은 s 를 시간에 대하여 미분하여 명령 제어 입력 식 (2)를 로봇 동역학 방정식 (1)에 대입하여 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$Ms = v_c + \eta_1 = -K_c s - \rho \frac{s}{\|s\| + \epsilon} + \eta_1 \quad (5)$$

여기서, $\eta_1 = (K_a K_a^{-1} - I_n)v_c + (d(t) - F - M \dot{q}_d + M \Lambda \dot{e})$ 은 임시 집중 불확실성 항(temporary lumped uncertainty term)이며, I_n 은 $n \times n$ 단위 행렬(identity matrix)이다.

다음의 Lyapunov 함수 후보 V_1 을 생각해 보자. $V_1 = \frac{1}{2} s^T M(q)s$. 시스템의 해를 따라 V_1 의 시간에 대한 미분은 반대칭 성질(skew-symmetric property)에 의해 $\dot{V}_1 = s^T M(q)\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q)s = s^T M(q)\dot{s} + s^T C(q, \dot{q})s$ 이 된다. 이 때, s 에 대한 동역학 방정식 (5)를 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$\dot{V}_1 = -s^T K_c s - \rho \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + s^T \eta \quad (6)$$

여기서, $\|s\|^2 = s^T s$ 이며, $\eta = \eta_1 + Cs$ 은 최종 집중 불확실성 항을 나타낸다.

가정 1: $\|K_a K_a^{-1} - I_n\| \leq c_0 < 1$ 이 되도록 미지의 양수 (unknown positive constant) c_0 가 존재한다고 가정한다.

첨언 1: K_a 은 가정 1이 만족하도록 추정(guess)하여 설정한다. 바꾸어 말하면, 제어 대상의 로봇이 주어진다면, K_a 가 결정되어지며, 이 때, K_a 이 잘 설정되어져서 강인한 적응 내고장 제어가 운용이 되어진다는 것은 주어진 로봇과 이 주어진 로봇에 대해 야기된 구동기 고장에 대한 강인한 내고장 제어 시스템은 가정 1이 성립되어지고 있다는 것이다.

첨언 2: 가정 1에 나오는 수식은 입력 행렬(제어 명령 벡터의 앞에 곱해지는 행렬)이 불확실성을 가질 때 보통 나타나는 가정으로서 불확실성을 극복하는 강인 제어기 설계 기법에서 자연스러운 가정이다. 불확실성에 제어 입력 자체가 함께 포함되어 있기 때문에 그 제어 입력을 불확실성으로 같이 고려하여 극복하기 위해 나타나는 현상이다. 개념은 불확실성을 억제하기 위해 그것보다 더 큰 제어 입력을 가 해주어야 한다는 가정이다. 정성적으로 말하면, 방정식 (5)에서 제어기 v_c 가 구동기 토크 계수의 실제값과 추정 공칭값 간의 편차와 그 제어기 v_c 값 자체를 또한 포함하는 $(K_a K_a^{-1} - I_n)v_c$ 를 극복하기 위해서는 제어기 설계에서 위의 가정

은 필요하다.

성질 2: 성질 1, 외란과 K_a 의 노름값(norm value)의 상한 경계 성질에 의해, $\|d(t) - F - M \dot{q}_d + M \Lambda \dot{e}\| \leq c_1 + c_2 \| \dot{q} \| + c_3 \| \dot{q} \|^2 + c_4 \| \ddot{q}_d \| + c_5 \| \ddot{e} \|$ 이 되도록 미지의 양수 c_1, c_2, c_3, c_4 와 c_5 가 존재한다.

성질 3: 제어기의 정의에 의해, $\|v_c\| \leq c_6 \|s\| + \rho$ 이 되도록 미지의 양수 c_6 이 존재한다.

성질 4: Lyapunov 함수 후보 V_1 의 시간에 대한 미분에서 파생되는 Cs 에서, $\|Cs\| \leq \|C\| \|s\| \leq c_7 \| \dot{q} \| \|s\|$ 가 되도록 미지의 양수 c_7 이 존재한다.

위의 집중 불확실성 항 η 는 다음과 같이 상한되어진다 (upper-bounded): $\|\eta\| \leq \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2 \rho + \bar{\theta}_3 \| \dot{q} \| + \bar{\theta}_4 \| \dot{q} \|^2 + \bar{\theta}_5 \| \ddot{q}_d \| + \bar{\theta}_6 \| \ddot{e} \| + \bar{\theta}_7 \|s\| + \bar{\theta}_8 \| \dot{q} \| \|s\|$, 여기서, $\bar{\theta}_1 = c_1, \bar{\theta}_2 = c_0, \bar{\theta}_3 = c_2, \bar{\theta}_4 = c_3, \bar{\theta}_5 = c_4, \bar{\theta}_6 = c_5, \bar{\theta}_7 = c_0 c_6, \bar{\theta}_8 = c_7$ 이다.

정리 1: 가정 1의 성립하에서, 위의 제안된 제어 시스템 (2)~(4)는 관절의 위치 및 속도 추종 오차값들이 전역균등 궁극유계(Globally Uniformly Ultimately Bounded: GUUB) 됨을 보장한다.

증명: Lyapunov 함수 후보를 다음과 같이 고려해 보자.

$$V = V_1 + \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_2) \theta^T \Gamma^{-1} \theta = \frac{1}{2} \{ s^T M s + (1 - \bar{\theta}_2) \theta^T \Gamma^{-1} \theta \} = \frac{1}{2} z^T P z \quad (7)$$

여기서, $\theta = \theta - \theta \in R^7$ 과 $z = (s^T \theta^T)^T \in R^{(n+7)}$ 이다. 또한, $P = \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & (1 - \bar{\theta}_2) \Gamma^{-1} \end{pmatrix} \in R^{(n+7) \times (n+7)}$. 식 (7)에서 당연히 미지의 양수 $\bar{\theta}_2 = c_0$ 이므로 가정 1에서와 같이 $\bar{\theta}_2 < 1$ 로 가정되어진다.

식 (7)로부터 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} \lambda_{\min}(P) \|z\|^2 \leq V \leq \frac{1}{2} \lambda_{\max}(P) \|z\|^2 \quad (8)$$

여기서, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 과 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 는 각각 인수의 최소 고유값과 최대 고유값을 나타낸다.

시스템의 해를 따라 위의 방정식 (7)의 시간에 대한 미분 \dot{V} 은 식 (6)을 대입하여 정리하면,

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + (1 - \bar{\theta}_2) \theta^T \Gamma^{-1} \dot{\theta} \leq -s^T K_c s - \rho \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + \|s\| \|\eta\| + (1 - \bar{\theta}_2) \theta^T \Gamma^{-1} \dot{\theta} \quad (9)$$

이제, 위의 집중 불확실성의 노름 $\|\eta\|$ 의 유계성질을 위의 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &= -s^T K_c s - \rho \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + (1 - \bar{\theta}_2) \|s\| \left(\frac{\bar{\theta}_1}{(1 - \bar{\theta}_2)} + \frac{\rho \bar{\theta}_2}{(1 - \bar{\theta}_2)} \right) \\ &+ \frac{\bar{\theta}_3}{(1 - \bar{\theta}_2)} \| \dot{q} \| + \frac{\bar{\theta}_4}{(1 - \bar{\theta}_2)} \| \dot{q} \|^2 + \frac{\bar{\theta}_5}{(1 - \bar{\theta}_2)} \| \ddot{q}_d \| \\ &+ \frac{\bar{\theta}_6}{(1 - \bar{\theta}_2)} \| \ddot{e} \| + \frac{\bar{\theta}_7}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|s\| + \frac{\bar{\theta}_8}{(1 - \bar{\theta}_2)} \| \dot{q} \| \|s\| \\ &+ (1 - \bar{\theta}_2) \theta^T \Gamma^{-1} \dot{\theta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -s^T K_c s - \bar{\rho}(1 - \bar{\theta}_2) \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + \bar{\rho} \bar{\theta}_2 \left(\|s\| - \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} \right) \\
 &+ (1 - \bar{\theta}_2) \|s\| \left(\frac{\bar{\theta}_1}{(1 - \bar{\theta}_2)} + \frac{\bar{\theta}_3}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|q\| + \frac{\bar{\theta}_4}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|q\|^2 \right. \\
 &+ \frac{\bar{\theta}_5}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|\ddot{q}_d\| + \frac{\bar{\theta}_6}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|\dot{e}\| + \frac{\bar{\theta}_7}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|s\| \\
 &\left. + \frac{\bar{\theta}_8}{(1 - \bar{\theta}_2)} \|q\| \|s\| \right) + (1 - \bar{\theta}_2) \sigma^T \Gamma^{-1} \sigma \\
 &= -s^T K_c s - \bar{\rho}(1 - \bar{\theta}_2) \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + \bar{\rho} \bar{\theta}_2 \left[\|s\| - \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} \right] \\
 &+ \rho(1 - \bar{\theta}_2) \|s\| + (1 - \bar{\theta}_2) \sigma^T \Gamma^{-1} \sigma \\
 &= -s^T K_c s - \bar{\rho}(1 - \bar{\theta}_2) \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} + \rho(1 - \bar{\theta}_2) \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} \\
 &+ \rho(1 - \bar{\theta}_2) \left[\|s\| - \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} \right] + \bar{\rho} \bar{\theta}_2 \left[\|s\| - \frac{\|s\|^2}{\|s\| + \epsilon} \right] \\
 &+ (1 - \bar{\theta}_2) \sigma^T \Gamma^{-1} \sigma \tag{10}
 \end{aligned}$$

여기서, $\theta_1 = \frac{\bar{\theta}_1}{1 - \bar{\theta}_2}$, $\theta_i = \frac{\bar{\theta}_{i+1}}{1 - \bar{\theta}_2}$, $i = 2, 3, \dots, 7$, $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_7)^T$, $\psi = [1 \|q\| \|q\|^2 \|\ddot{q}_d\| \|\dot{e}\| \|s\| (\|q\| \|s\|)]^T$, $\rho = \theta^T \psi$, $\hat{\rho} = \sigma^T \psi$, $\bar{\rho} = \hat{\rho} - \rho = (\sigma - \theta)^T \psi = \sigma^T \psi$, 그리고 $\sigma = \sigma$. 따라서, 적응 법칙 (4)를 식 (10)에 대입해서 정리하면, 다음과 같다.

$$V \leq -s^T K_c s - (1 - \bar{\theta}_2) \sigma^T \sigma + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) \tag{11}$$

여기서, $\bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) = \left(\frac{\|s\| \epsilon}{\|s\| + \epsilon} \right) [\bar{\rho} \bar{\theta}_2 + \rho(1 - \bar{\theta}_2)]$. 또한, 다음 관계가 성립한다. $\frac{1}{2} \sigma(\sigma + \theta)^T(\sigma + \theta) \geq 0$. 따라서, 결국 $\sigma \sigma^T \sigma + \sigma \sigma^T \theta = \sigma \sigma^T \sigma \geq \frac{1}{2} \sigma(\sigma^T \sigma - \theta^T \theta)$. 이제 다음 부등식이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 V &\leq -s^T K_c s - \frac{1}{2}(1 - \bar{\theta}_2) \sigma \sigma^T \sigma + \frac{1}{2}(1 - \bar{\theta}_2) \sigma \theta^T \theta \\
 &+ \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) = -\frac{1}{2} z^T Q z + w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) \\
 &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) \tag{12}
 \end{aligned}$$

여기서, $Q = \begin{pmatrix} 2K_c & 0 \\ 0 & (1 - \bar{\theta}_2) \sigma I_7 \end{pmatrix}$, $I_7 \in R^{7 \times 7}$ 은 단위 행렬이며, $w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) = \frac{1}{2}(1 - \bar{\theta}_2) \sigma \theta^T \theta + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)$ 이다. Lyapunov 함수 후보 (7)과 부등식 (8)로부터, 식 (12)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \leq -\mu V + w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) \tag{13}$$

여기서, $\mu = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)}$ 이며, Q 와 P 는 양한정 행렬이다.

미분 부등식 (13)은 다음 해를 가진다.

$$\begin{aligned}
 V(t, z(t)) &\leq \frac{w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)}{\mu} \\
 &+ \left[V(0, z(0)) - \frac{w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)}{\mu} \right] \exp(-\mu t) \tag{14}
 \end{aligned}$$

여기서, $z(0)$ 는 $z(t)$ 의 초기값을 나타내며, $V(0, z(0))$ 는

$V(t, z(t))$ 의 초기값을 나타낸다. 또한, $\exp(\cdot)$ 는 지수함수(exponential function)를 나타낸다. 이 때, $z(t)$ 는 Dawson과 Qu의 방법[17]을 따르면, 다음과 같이 전역균등궁극유계(globally uniformly ultimately bounded: GUUB)되어진다.

$$\begin{aligned}
 \|z(t)\| &\leq \left(\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} \|z(0)\|^2 \exp(-\mu t) \right. \\
 &\left. + \frac{2w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)}{\lambda_{\min}(P)\mu} [1 - \exp(-\mu t)] \right)^{\frac{1}{2}} \tag{15}
 \end{aligned}$$

Lyapunov 함수 후보 (7)로부터, $V(t, z(t)) \geq \frac{1}{2} s^T M s \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}(M) \|s\|^2$ 이며, $V(t, z(t)) \geq \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_2) \sigma^T \Gamma^{-1} \sigma \geq \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_2) \lambda_{\min} \Gamma^{-1} \|\sigma\|^2$ 이기 때문에, 확장 추종 오차 $s(t)$ 와 파라미터 오차 $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 유계되어진다.

$$\begin{aligned}
 \|s(t)\| &\leq \left[\frac{2V}{\lambda_{\min}(M)} \right]^{\frac{1}{2}}, \\
 \|\sigma(t)\| &\leq \left[\frac{2V}{(1 - \bar{\theta}_2) \lambda_{\min}(\Gamma^{-1})} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{16}
 \end{aligned}$$

확장 추종 오차 $s(t)$ 와 파라미터 오차 $\sigma(t)$ 는 식 (15)에 의해서도 GUUB되어지며, 식 (14)와 (16)에 의해서도 GUUB가 증명되어진다. 이제, 위치 추종 오차 e 와 속도 추종 오차 \dot{e} 의 GUUB의 보장인데, 이것은 Dawson과 Qu의 논문[17]에서의 Remark 6과 Remark 7에서도 언급이 되어 있듯이, $s(t)$ 의 동역학적 성질, 즉 $s = \dot{e} + \Lambda e$ 의 필터 방정식에 의해 당연히 e 와 \dot{e} 는 각각 GUUB가 된다. 이 필터의 벡터 방정식에서 문제를 더 간단히 하기 위하여, $\Lambda = \lambda_0 \cdot I_n$, $\lambda_0 > 0$ 은 스칼라이며, I_n 은 $n \times n$ 단위 행렬로 놓음으로써, 위치 추종 오차의 노름 $\|e(t)\|$ 의 상한 경계값은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \|e(t)\| &\leq n \exp(-\lambda_0 t) \|e(0)\| \\
 &+ n \int_0^t \exp[-\lambda_0(t - \beta)] \|s(\beta)\| d\beta \tag{17}
 \end{aligned}$$

이 때, $e(0)$ 은 $e(t)$ 의 초기값을 나타내며, n 은 로봇의 관절 개수를 나타낸다. 식 (17)의 적분에 $\|s\|$ 를 대입하여 정리하면, $\|e(t)\|$ 의 상한 경계값을 구할 수 있다. $\|s\|$ 는 위의 식 (15)의 $\|s\|$ 의 일부분이 $\|s\|$ 이므로, $z(t)$ 가 GUUB이므로, 더 작은 $s(t)$ 는 당연히 GUUB이다. 따라서, $\|e\|$ 이 식 (17)에 대입하여 계산하면, $\|e(t)\|$ 의 상한 경계값이 결정되어지며, $e(t)$ 의 GUUB도 보장되어진다. 다시 말해서, 식 (17)은 $e(t)$ 의 GUUB를 보여준다.

또한, $\dot{e}(t)$ 의 GUUB도 Dawson과 Qu의 논문[17]에서의 Remark 7에서처럼, $\dot{e}(t) + \Lambda e(t) = s(t)$ 의 성질을 이용하여 다음과 같은 부등식을 이용하여 유계성질(boundedness)을 보장한다.

$$\|\dot{e}(t)\| \leq \|\Lambda\| \|e(t)\| + \|s(t)\| \leq \lambda_0 \|e(t)\| + \|s(t)\| \tag{18}$$

식 (18)에서 위에서 구한 $\|z(t)\|$, $\|s(t)\|$, $\|e(t)\|$ 가 모두 GUUB이므로, $\|\dot{e}(t)\|$ 도 GUUB라고 말할 수 있다.

따라서, 결론적으로, Lyapunov 안정도 해석을 통하여, Lyapunov 함수 V 가 유계되어지며, $z(t)$ 가 GUUB되어지며,

따라서, $s(t)$ 와 $\theta(t)$ 도 GUUB이다. 따라서, 결과적으로 $s = \dot{e} + \Lambda e$ 의 동역학적 성질에 의해, 로봇의 관절 추종 오차 $e(t)$ 와 $\dot{e}(t)$ 도 GUUB된다. ■

첨언 3: 제어기 (2)에서, 보통 추정 공칭 구동기 토크 계수 행렬 \hat{K}_a 은 사용자가 초기에 로봇 시스템에서 어떤 구동기 고장들을 예상할 수 없기 때문에 단위 행렬, 즉 $\hat{K}_a = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1\} \in R^{n \times n}$ 으로 정의할 수 있다. 물론, 다른 방법으로 추정 공칭 모델로 \hat{K}_a 을 정의할 수도 있다. 예를 들어, $\hat{K}_a = \text{diag}\{1.7, 0.5, \dots, 1 + 0.5 \sin(t)\} \in R^{n \times n}$ 이다. 그러나, 이 방법은 이미 로봇 구동기에 고장이 있는 상태이다. 제어기 관점에서 보면, \hat{K}_a 은 가정 1이 성립하도록 정해주어야 한다. 그러기 위해서는, $\hat{K}_a \approx K_a$ 이 되도록 해 주어야 좋은데, K_a 는 미지의 값(unknown value)이기 때문에 \hat{K}_a 의 값을 미리 정확히 설정해 줄 수는 없다. 또한, 로봇의 초기 상태에서는 로봇 구동기 상태가 이미 고장 상태라고 예측하기에는 상당히 어렵다. 그리고 고장 상태라고 본다 하더라도 초기에 어떤 구동기에 고장의 정도가 어떤지 예측하기도 상당히 어렵다. 따라서, 로봇을 제어할 초기 단계에서는 로봇의 모든 구동기가 정상 상태라고 생각하고 \hat{K}_a 을 단위 행렬로 정의하고 제어기에 설정하는 것이 합당하다.

첨언 4: Lyapunov 안정도 해석에서 만약, Lyapunov 함수 (7) 대신에 다음과 같은 Lyapunov 함수 $V = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \theta^T \Gamma^{-1} \theta$ 를 설정해보자. 이 때, $\theta = (\bar{\theta}_1 \ \bar{\theta}_3 \ \bar{\theta}_4 \ \bar{\theta}_5 \ \bar{\theta}_6 \ \bar{\theta}_7 \ \bar{\theta}_8)^T \in R^7$ 이다. 이 때, $V \leq -\frac{1}{2} z^T Q z + w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)$, 여기서, $z = (s^T \ \theta^T)^T \in R^{(n+7)}$, $Q = \begin{pmatrix} 2K_c & 0 \\ 0 & \sigma I_7 \end{pmatrix}$, $I_7 \in R^{7 \times 7}$ 은 단위 행렬이며, $w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) = \frac{1}{2} \sigma \theta^T \theta + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|s\|) = \frac{1}{2} \sigma \theta^T \theta + \frac{\rho \|s\| \epsilon}{\|s\| + \epsilon} + \hat{\rho} \bar{\theta}_2 \|s\|$ 이다. 이 때, 문제는 $w(\rho, \hat{\rho}, \|s\|)$ 항 중에, $\hat{\rho} \bar{\theta}_2 \|s\|$ 때문에 오차 경계를 줄이는 것을 조절하는 것이 어렵게 된다.

만약, $\epsilon \rightarrow 0$, $\sigma \rightarrow 0$ 일 때, $V \leq -s^T K_c s + \hat{\rho} \bar{\theta}_2 \|s\|$ 가 된다. 이 때, 매우 큰 양한정 이득 행렬 K_c 가 설정되면, $V \leq -s^T K_c s + \hat{\rho} \bar{\theta}_2 \|s\| < -\lambda_{\min}(K_c) \|s\|^2$ 이 될 가능성이 있지만, 그렇지 않으면, V 이 양수가 될지도 모른다. 따라서, 이런 경우에는 K_c 의 값에 무관하게 안정도를 항상 보장하는 것은 어렵게 된다. K_c 가 양수가 됨에 따라 항상 안정도를 보장하게 하려면, Lyapunov 함수를 식 (7)과 같이 설정해주어 본문에서와 같이 Lyapunov 안정도 해석을 해주어야 할 것이다.

4. 모의 실험 연구

모의 실험 연구에서 이용되는 로봇 시스템은 그림 2에서 보이

는 것과 같이, 수평 평면 위에서 움직이는 3개의 링크를 가지는 평면 로봇 매니퓰레이터이다. 길이(L_i), 질량(m_i), 관성모멘트(I_i), 그리고 질량 중심 위치(L_{ci})와 같은 로봇 파라미터 값들은 각 관절 $i=1, 2, 3$ 에 대하여 $L_i=0.5(m)$, $m_i=1(kg)$, $I_i=0.02083(kgm^2)$, 그리고 $L_{ci}=0.25(m)$ 이다. 마찰항 $F_{fr}(\dot{q})$ 은 또한 모의 실험에서 고려되어진다. 각 관절에서 점성, 쿨롱, 정적 마찰 계수들은 각각 0.05 ($Nmsec/rad$), 0.01 (Nm), 0.02 (Nm)로 할당되어진다. 각 관절은 각각의 구동기(모터)를 가진다.

본 모의 실험에서 사용된 불확실성량은 다음과 같다. 제어기들에서 이용된 공칭 동적 파라미터들은 실제 동적 파라미터들의 50%까지 설정되어진다. 각 관절로 삽입되는 외부 외란은 랜덤 잡음(random noise)이며, 그것의 각 크기가 0.25 이내로 제한되어지는 데, 즉 $i=1, 2, 3$ 에 대해 $|d_i(t)| \leq 0.25$ 이다.

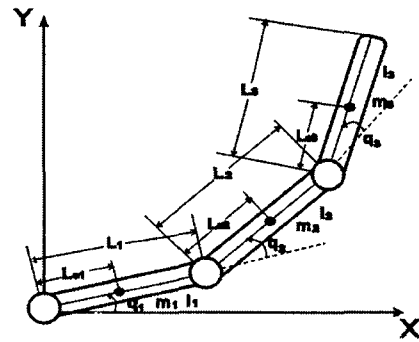


그림 2 3개의 링크를 가진 평면 로봇 매니퓰레이터
Fig. 2 A three-link planar robot manipulator

제어 목적은 초기 위치 $q_1(0) = q_2(0) = q_3(0) = 0(deg) = 0(rad)$ 으로부터 최종 위치 $q_1(0) = 120(deg) = 2.0933(rad)$, $q_2(0) = 90(deg) = 1.57(rad)$, $q_3(0) = -120(deg) = -2.0933(rad)$ 까지의 각 관절의 위치 제어이다. 모든 목표 관절 속도 및 가속도들은 0의 값으로 설정되어진다.

본 모의 실험 시나리오는 시간의 경과에 따라 다음과 같다: 전체 실행 시간은 8초이다. 초기에 구동기 고장이 없다고 가정한다. 초기 시간으로부터 2초까지 로봇은 어떠한 구동기 고장도 경험하지 않아 정상 상태를 가진다. 다시 말해서, $0 \leq t < 2$ 에 대해, 각 관절의 구동기 토크 계수인 $K_{a1}(t) = K_{a2}(t) = K_{a3}(t) = 1$ 이 된다. 모든 관절들에서 구동기 고장이 2초에서 일어난다. 2초부터 종료 때까지, 세 관절에 대한 각각의 구동기 토크 계수들은 다음과 같다. 첫 번째 관절, 두 번째 관절 및 세 번째 관절에 대한 구동기 토크 계수들은 각각 다음과 같다. $K_{a1}(t) = 1 + 0.8 \sin(\pi t)$, $K_{a2}(t) = 1 + 0.8 \cos(\pi t/2)$, $K_{a3}(t) = 1 - 0.8 \sin(\pi t)$ 이다. 따라서, 로봇의 성능은 불확실성뿐만 아니라 구동기 고장에 의해 저하된다. 샘플링 시간은 0.01초이다.

그림 3-(a)에서, 고장 상황을 나타내는 구동기 토크 계수 K_{ai} 가 나타내어진다. 동역학 방정식 (1)에서 보이는 바와 같이 명령 토크 또는 제어 법칙 (u_c)과 실제 토크 (u) 사이의 관계는 $u = K_a \cdot u_c$

이다. 고장이 없는 정상 상태에서, 구동기 토크 계수는 $K_{a1} = K_{a2} = K_{a3} = 1$ 이다.

제어기 (2)에서 사용되어진 추정된 공칭 구동기 토크 계수 행렬 K_a 은 점원 3에서 언급되어졌듯이, 보통 로봇 시스템은 초기에 어떠한 구동기 고장도 예상하는 것이 어렵다. 따라서, 본 모의 실험에서는 그림 3-(b)에서 보이듯이 추정 공칭 구동기 토크 계수 K_{ai} 이 모든 구동기에 대하여 '1'로 설정되어지며, 그 로봇이 정상 상태에서 동작되어진다고 기대되어질 수 있다.

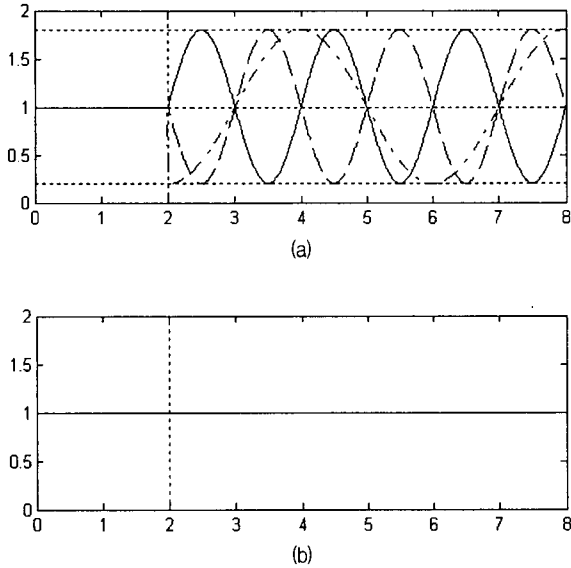


그림 3 모의 실험에서 사용되는 구동기 토크 계수와 추정 공칭 구동기 토크 계수: (a) 모델에서 사용되는 구동기 토크 계수 (K_{ai}), (b) 제어기에서 사용되는 추정 공칭 구동기 토크 계수 (K_{ai}).

{ (a),(b): 실선: 구동기 1, 파선-점: 구동기 2, 파선: 구동기 3 }

Fig. 3 Actuator torque coefficients and guessed nominal actuator torque coefficients used in this simulation: (a) Actuator torque coefficients (K_{ai}) used in the model, (b) Gussed nominal actuator torque coefficients (K_{ai}) used in the controller.

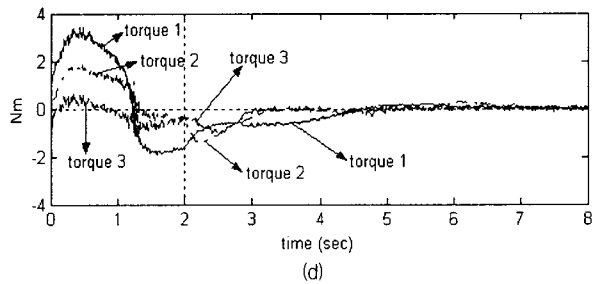
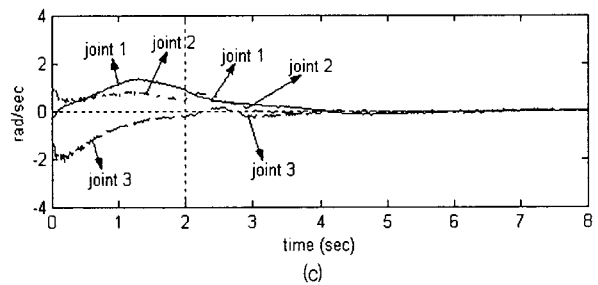
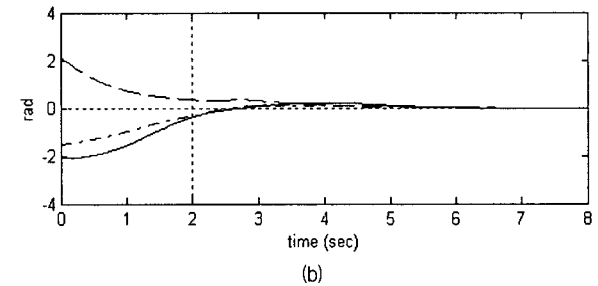
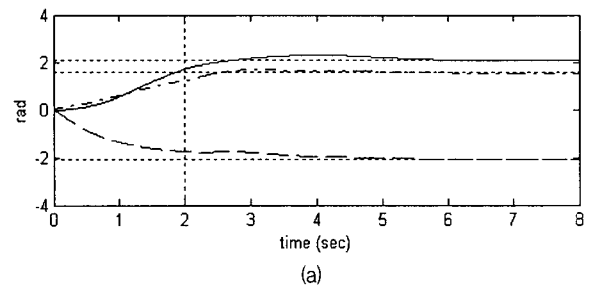
{ (a),(b): solid line: actuator 1, dashdotted line: actuator 2, dashed line: actuator 3 }

구동기 고장과 불확실성으로 인한 성능 저하를 가지는 로봇 시스템에 대한 모의 실험 결과를 그림 4와 그림 5에 제시하여 비교해본다. 그림 4의 결과는 제안된 제어기 (2)에서 보이듯이 $\hat{p} \neq 0$ 일 때, 다시 말해서, 제안된 제어 시스템 (2)~(4)가 동작할 때의 모의 실험 결과이다. 한편, 제어기 (2)에서 $\hat{p} = 0$ 일 때, 결국 이 경우는 PD 제어기 ($u_c = -K_a^{-1}K_c s$)가 된다. 이 경우의 모의 실험 결과는 그림 5에서 나타내어진다.

그림 4-(a) ~ 그림 4-(c)를 통해 보인 모의 실험 결과에서, 상존하는 불확실성과 2초 이후에 발생한 구동기 고장을 만족스럽게 극복하여 관절의 위치 오차 및 속도 오차가 0의 근방으로 매우 작아짐을 알 수 있다. 이것은 그림 4-(g)와 그림 4-(h)에서 보인 파

라미터 벡터 $\hat{\theta}$ 으로 만들어지는 그림 4-(f)의 \hat{p} 을 가진 강인한 적응 내고장 제어 법칙을 나타낸 그림 4-(d)의 u_c 가 로봇에 존재하는 성능 저하를 성공적으로 극복하기 때문이다. 파라미터 벡터 $\hat{\theta}$ 는 (4)의 적응 법칙으로 새로운 값으로 갱신되어 \hat{p} 값으로 되며, 다시 명령 토크 u_c 가 되므로 내고장성과 안정도가 보장이 되도록 PD 제어기 ($-K_a^{-1}K_c s$) 이외에 \hat{p} 값에 의해 보정이 될 수 있다. 따라서, 앞에서 증명했듯이 이 경우에 구동기 고장과 불확실성을 극복할 수 있다.

그림 4-(d)의 제어 법칙과 그림 4-(e)의 실제 구동기 토크가 2초 이후에는 값이 다른 이유는 구동기 고장이 일어나서 각 관절에 정확하게 제어기의 값이 고장으로 인하여 전달되지 않기 때문이다.



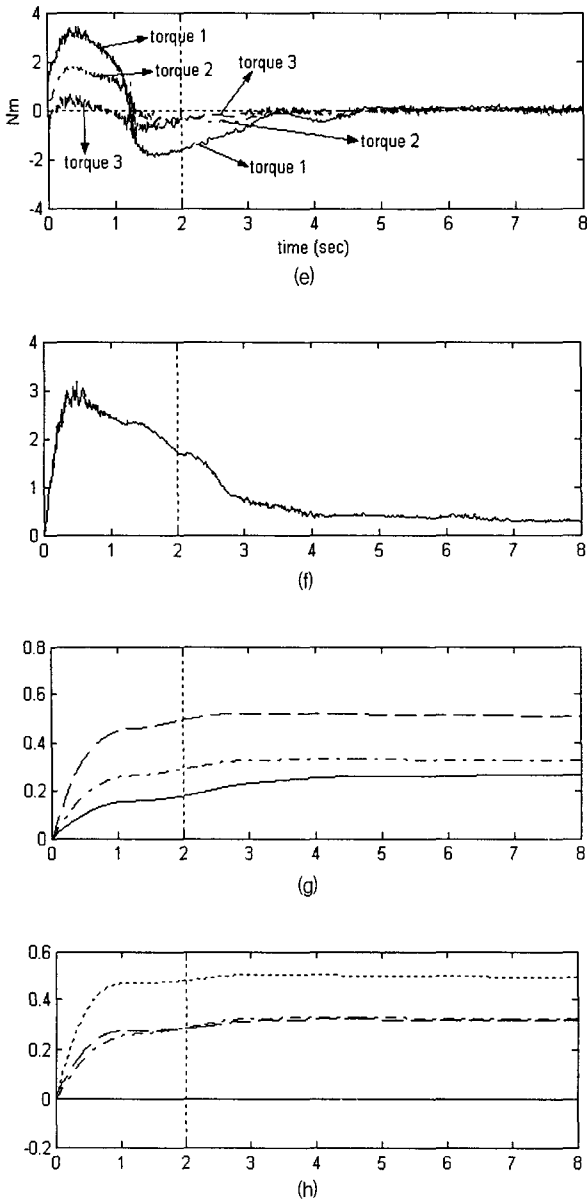


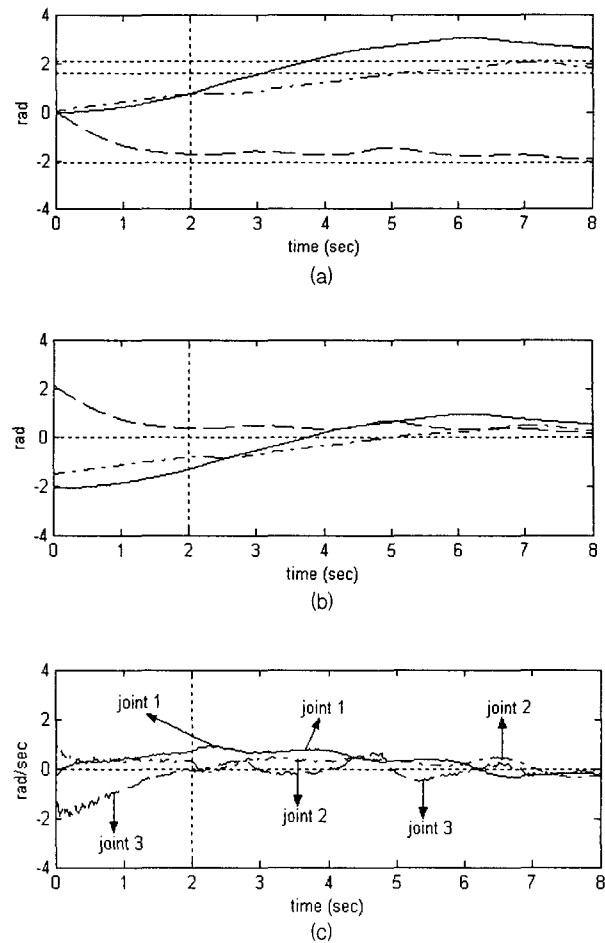
그림 4 구동기 고장과 불확실성에 대한 모의 실험 결과($\hat{\rho} \neq 0$): (a) 관절의 각도 (q), (b) 관절의 위치 오차 (e), (c) 관절의 속도 오차 (\dot{e}), (d) 제어 법칙 (명령 토크) (u_c), (e) 실제 구동기 토크 (u), (f) 강인 적응 제어기 이득 함수 ($\hat{\rho}$, $\hat{\rho} = \theta^T \psi$, $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_7)^T \in R^7$), (g) 파라미터 벡터 $\theta \in R^7$ 중에서 $(\theta_1 \theta_2 \theta_3)^T$, (h) 파라미터 벡터 $\theta \in R^7$ 중에서 $(\theta_4 \theta_5 \theta_6 \theta_7)^T$.
 { (a),(b): 실선: 관절 1, 파선-점: 관절 2, 파선: 관절 3 }
 { (g): 실선: θ_1 , 파선-점: θ_2 , 파선: θ_3 }
 { (h): 실선: θ_4 , 파선-점: θ_5 , 파선: θ_6 , 점선: θ_7 }

Fig. 4 Simulation results for actuator failures and uncertainties ($\hat{\rho} \neq 0$): (a) Joint angles (q), (b) Joint position errors (e), (c) Joint velocity errors (\dot{e}), (d) Control law (Commanded torques)

(u_c), (e) Actual actuator torque (u), (f) Robust adaptive controller gain function ($\hat{\rho}$, $\hat{\rho} = \theta^T \psi$, $\theta = (\theta_1 \theta_2 \dots \theta_7)^T \in R^7$), (g) $(\theta_1 \theta_2 \theta_3)^T$ of the parameter vector $\theta \in R^7$, (h) $(\theta_4 \theta_5 \theta_6 \theta_7)^T$ of the parameter vector $\theta \in R^7$.
 { (a),(b): solid line: joint 1, dashdotted line: joint 2, dashed line: joint 3 }
 { (g): solid line: θ_1 , dashdotted line: θ_2 , dashed line: θ_3 }
 { (h): solid line: θ_4 , dashdotted line: θ_5 , dashed line: θ_6 , dotted line: θ_7 }

제안된 제어기 (2)에서 $\hat{\rho}$ 값이 동작하지 않을 때, 다시 말해서, $\hat{\rho} = 0$ 일 때, 구동기 고장과 불확실성으로 인한 성능 저하에 대한 모의 실험 결과를 그림 5에 나타내어진다.

이 경우는 $\theta = 0 \in R^7$ 으로 적응 법칙이 작동하지 않으며, 결국 $\hat{\rho} = 0$ 이며, 로봇 파라미터, 파라미터 불확실성, 외란 등에 대한 환경 설정은 $\hat{\rho} \neq 0$ 인 경우의 그림 4에서와 같다. 또한, 구동기 고장인 경우도 그림 3-(a)와 같이 구동기 고장이 일어나며, 제어기에 사용되는 추정 공칭 구동기 고장 계수 행렬은 그림 3-(b)와 같이 정상 상태로서 단위 행렬로 설정되어진다.



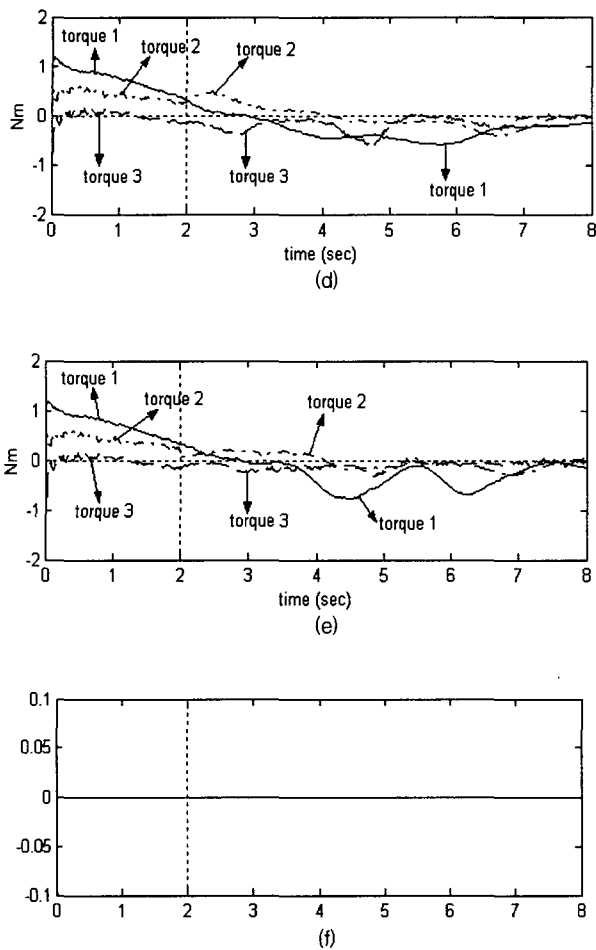


그림 5 구동기 고장과 불확실성에 대한 모의 실험 결과($\hat{\rho}=0$): (a) 관절의 각도 (q), (b) 관절의 위치 오차 (e), (c) 관절의 속도 오차 (\dot{e}), (d) 제어 법칙 (명령 토크) (u_c), (e) 실제 구동기 토크 (u), (f) 강인 적응 제어기 이득 함수 ($\hat{\rho}$).
 { (a),(b): 실선: 관절 1, 파선-점: 관절 2, 파선: 관절 3 }

Fig. 5 Simulation results for actuator failures and uncertainties($\hat{\rho}=0$): (a) Joint angles (q), (b) Joint position errors (e), (c) Joint velocity errors (\dot{e}), (d) Control law (Commanded torques) (u_c), (e) Actual actuator torque (u), (f) Robust adaptive controller gain function ($\hat{\rho}$).
 { (a),(b): solid line: joint 1, dashdotted line: joint 2, dashed line: joint 3 }

그림 5-(a) ~ 그림 5-(c)의 결과로부터, 제어기가 만족스럽게 성능 저하를 극복하지 못하여 위치 오차 및 속도 오차가 0으로 수렴하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이유는 그림 5-(f)의 $\hat{\rho}$ 값이 0이 되는 PD 제어기가 되어 PD 제어기만으로는 성능 저하를 회복하여 내고장성 및 성능 개선을 성공적으로 이루기에는 한계가 있으며, 매우 미흡하기 때문이다.

그림 4와 그림 5의 비교 결과로부터, 그림 4에서의 결과가 그림 5에서의 결과보다 위치 오차 및 속도 오차가 훨씬 더 작아지는 성능 개선이 이루어졌다. 이유는 그림 4에서의 모의 실험에서는 $\hat{\rho}$ 값의 영향으로 제안된 제어 기법이 구동기 고장 및 불확실성에 강

인하게 대처하였기 때문이다.

그림 5의 모의 실험에 비하여, 그림 4에서의 모의 실험이 구동기 고장과 불확실성에 성공적으로 대처되어졌으며, 위치 오차 및 속도 오차는 구동기 고장 이후에도 강인성과 내고장성을 유지하며 0의 근방으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 제안된 강인한 적응 내고장 제어 기법이 구동기 고장과 불확실성에 강인하며, 성능 개선에 타당하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이전의 타 논문들에서는 구동기 고장에 대해 다루었으나, 고장 검출기를 제안하거나 자유 진동 관절 고장 또는 고정 관절 고장에 대한 내고장성에 대해 토의·연구하였다. 한편, 파라미터 불확실성과 외란에 초점을 두고 그것을 극복하는 로봇 제어기 설계를 다룬 논문들이 많았다. 그러나, 구체적으로 구동기 고장과 불확실성을 동시에 로봇의 동역학 모델에 적용해서 내고장성과 강인성을 제어기 설계에서 고려한 기존의 연구결과는 아직 미미하다.

본 논문에서, 로봇 매니퓰레이터에 대하여 구동기 고장과 불확실성을 동시에 극복할 수 있는 강인한 적응 내고장 제어기가 제시되어졌다. 로봇 시스템에서 불확실성이 존재하는 상황에서, 작업 중 환경의 변화 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 영향으로 인하여 제어기 출력이 로봇의 구동기 입력에 정확히 전달되지 못하는 구동기 고장이 발생할 경우에도 만족스럽게 보상할 수 있는 강인한 적응 제어기를 설계하여 성능 저하를 보상하여 원래의 작업을 성공적으로 완수할 수 있다.

모의 실험 연구에서, 파라미터 불확실성과 외란이 존재하며, 구동기 토크 계수가 어느 순간 이후에 고장이 발생하여 성능 저하를 가져올 경우에 제안된 제어기가 내고장성과 강인성을 보이며, 만족스러운 결과를 나타내었으며, $\hat{\rho}=0$ 인 경우에서의 PD 제어기와와의 비교 모의 실험 결과를 통하여 제안된 강인한 적응 내고장 제어기의 타당성과 우월성을 보였다.

참고 문헌

- [1] M. L. Visinsky, J. R. Cavallaro and I. D. Walker, "A Dynamic Fault Tolerance Framework for Remote Robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 4, pp. 477-490, 1995.
- [2] J. D. English and A. A. Maciejewski, "Fault Tolerance for Kinematically Redundant Manipulators: Anticipating Free-Swinging Joint Failures," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 4, pp. 566-575, 1998.
- [3] K. N. Groom, A. A. Maciejewski and V. Balakrishnan, "Real-Time Failure-Tolerant Control of Kinematically Redundant Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1109-1116, 1999.
- [4] M. W. Spong, "On the Robust Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 37, No. 11, pp. 1782-1789, 1992.
- [5] J. J. -E. Slotine and W. Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 6, No.

- 3, pp. 49-59, 1987.
- [6] D. S. Yoo and M. J. Chung, "A Variable Structure Control with Simple Adaptation Laws for Upper Bounds on the Norm of the Uncertainties," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 37, No. 6, pp. 860-864, 1992.
- [7] D. M. Dawson, Z. Qu and F. L. Lewis, "Hybrid Adaptive-Robust Control for a Robot Manipulator," *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 6, pp. 537-545, 1992.
- [8] L. C. Fu, "Robust Adaptive Decentralized Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 37, No. 1, pp. 106-110, 1992.
- [9] K. B. Park, J. H. Shin and J. J. Lee, "Adaptive Variable Structure Controller with Decreasing Gain for Nonlinear Uncertain Systems," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 12, pp. 1145-1147, 1996.
- [10] J. H. Shin, K. B. Park and J. J. Lee, "Adaptive Robust Control Using Radial Basis Function Networks for Robot Manipulators," *Int. J. of Intelligent Control and Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 117-133, 1999.
- [11] W. E. Dixon, I. D. Walker, D. M. Dawson and J. P. Hartranft, "Fault Detection for Robot Manipulators with Parametric Uncertainty: A Prediction-Error-Based Approach," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, pp. 689-699, 2000.
- [12] A. T. Venuri, M. M. Polycarpou and S. A. Diakourti, "Neural Network Based Fault Detection in Robotic Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 2, pp. 342-348, 1998.
- [13] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.
- [14] H. Arai and S. Tachi, "Position Control of a Manipulator with Passive Joints Using Dynamic Coupling," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, pp. 528-534, 1991.
- [15] J. H. Shin and J. J. Lee, "Underactuated Space Manipulators: Analysis and Adaptive Robust Control," *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)*, Vol. 9, No. 3, pp. 179-189, 1996.
- [16] Y. Nakamura, T. Suzuki and M. Koimura, "Nonlinear Behavior and Control of a Nonholonomic Free-Joint Manipulator," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 6, pp. 853-862, 1997.
- [17] D. M. Dawson and Z. Qu, "On the Global Uniform Ultimate Boundedness of a DCAL-Like Robot Controller," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 3, pp. 409-413, 1992.

저 자 소 개



신진호 (申鎮鎬)

1968년 12월 14일생. 1991년 2월 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학사). 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1999년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1999년 11월~2001년 1월 한국과학기술원 정보전자연구소 연수연구원. 2000년 1월~2002년 1월 도쿄대학교 대학원 기계정보공학과 박사후연구원. 2002년 3월~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 조교수.

주 관심분야: 강인한 적응 제어, 내교장 제어, 지능 제어, 인간-컴퓨터(로봇) 상호작용, 지능형 로봇, 지능형 홈, 텔레매틱스 등.

Tel : 051-890-2257

Fax : 051-890-2255

E-mail : jhshin7@deu.ac.kr



백운보 (白雲普)

1957년 12월 19일생. 1985년 2월 부산대 기계공학과 졸업(학사). 1987년 2월 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 2월 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1993년 10월~1999년 12월 삼성중공업 기계전자연구소 선임연구원. 2000년 1월~2002년 2월 두산중공업 기술연구원 선임연구원. 2002년 3월~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 조교수. 주 관심분야: 지능형 로봇, 강인한 비선형 제어, 지능 차량제어, 차량 텔레매틱스 분야 등.

Tel : 051-890-2258

Fax : 051-890-2255

E-mail : wbbaek@deu.ac.kr