

유연 관절 로봇의 적응 고장 수용 제어

Adaptive Fault Accommodation Control for Flexible-Joint Robots

유성진*†

Sung Jin Yoo*

*중앙대학교 전자전기공학부

† School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요 약

본 논문은 다수의 구동기 고장을 가진 유연 관절 로봇의 적응 고장 수용 제어를 제안한다. 다수의 구동기 고장의 크기와 일어나는 시간은 알려지지 않는다고 가정한다. 구동기 고장을 수용하기 위해 추종 오차의 수렴율과 오버슈트의 최대치로 특성화된 미리 정의된 성능을 보장하는 유계 조건을 갖는 적응 고장 수용 제어를 설계한다. 르아프노브 안정도 이론을 이용하여 페루트 시스템의 모든 신호가 준 전역적이고 균일하고 궁극적으로 유계됨을 증명하고 추종 오차가 미리 정의된 성능 유계에서 벗어나지 않음을 보인다.

키워드 : 고장 수용, 유연 관절 로봇, 적응 제어, 구동기 오차

Abstract

This paper proposes an adaptive fault accommodation control approach for flexible-joint (FJ) robots with multiple actuator faults. It is assumed that the value and occurrence time of multiple actuator faults are unknown. An adaptive fault accommodation control scheme with prescribed performance bounds, which characterize the convergence rate and maximum overshoot of tracking errors, is designed to accommodate the actuator faults. From the Lyapunov stability theorem, it is proved that all signals of the closed-loop system are semi-globally uniformly ultimately bounded and tracking errors are preserved within prescribed performance bounds regardless of actuator faults.

Key Words : Fault Accommodation, Flexible-Joint Robots, Adaptive Control, Actuator Faults

1. 서 론

시스템의 성능에 영향을 미치는 고장(fault)을 자동적으로 진단(detection)하고 보상(compensation)하는 분야는 로봇 제어 시스템의 중요한 연구 분야 중의 하나이다. 특히, 구동기(actuator)의 고장은 시스템에서 원하지 않는 출력을 발생시키고 결국 시스템을 불안정하게 만든다. 따라서 고장의 발생에도 불구하고 시스템의 신뢰성과 성능을 보장하기 위해 로봇 시스템을 위한 고장 수용 제어기의 설계 및 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 그러나 기존의 연구들은 각각의 관절에 유연 관절 요소를 고려한 로봇 시스템에 적

용될 수 없다. 따라서 유연 관절 로봇(flexible-joint robots)의 고장 보상을 위한 연구가 필요하다. 또한 고장이 발생했을 때, 그 크기와 발생 시간이 불확실하기 때문에 발생 순간의 일시적인 성능(transient performance)의 보장이 요구된다.

한편 로봇의 유연 관절 부분의 고려는 실제적인 추종 제어의 성능에 밀접한 영향을 미치기 때문에 유연 관절 로봇의 추종 제어에 대한 많은 연구가 이루어졌다[4-6]. 특히 유연 관절 로봇은 제어 입력과 불일치한(unmatched) 비선형성의 존재 때문에 백스테핑(backstepping) 기법이 널리 사용되었다. 그러나 백스테핑 기법은 설계 과정에서 가상 제어기의 반복적인 미분값을 요구하는 문제('explosion of complexity' problem)를 갖는다. 따라서 각각의 설계 과정에 구해진 가상 제어기를 일차 필터를 통과시킴으로써 가상 제어기의 반복적인 미분 문제를 해결한 동적 표면(dynamic surface) 제어 기법이 제안되었다[7]. 또한 동적 표면 기법을 유연 관절 로봇의 추종 제어에 성공적으로 적용되었다[8]. 그러나 이러한 기법이 고장을 수용하기 위한 제어 시스템에 적용될 수 있을지라도 고장의 발생 시간과 크기가 알려지지 않은 상황에서 고장이 발생한 순간에 원하는 만큼 일시적인 성능을 보장할 수 없다.

접수일자: 2012년 12월 9일

심사(수정)일자: 2013년 2월 1일

게재확정일자 : 2013년 2월 10일

† Corresponding author

본 논문은 본 학회 2012년도 추계 학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 본 논문에서는 다수의 구동기 고장을 고려한 불확실한 유연 관절 로봇을 위한 미리 정의된 성능 유계를 가진 고장 수용 제어를 설계한다. 다수의 구동기 고장이 일어나는 시간과 크기가 알려지지 않는다는 가정 아래 적응 고장 수용 제어를 설계한다. 미리 정의된 성능 유계 기법과 적응 제어 기법을 사용하여 고장이 일어나는 순간의 일시적인 성능을 보장한다. 또한 르아브노브(Lyapunov) 안정도 이론에 기반하여 설계된 제어 시스템의 안정도를 분석한다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 고장 수용 제어기의 성능을 검증하기 위해 모의 실험 결과를 제시한다.

2. 문제 제기

본 논문에서는 (1)과 같은 유연 관절 로봇을 고려한다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F\dot{q} + K_m(q - q_m) = 0 \quad (1)$$

$$J\dot{q}_m + B\ddot{q}_m + K_m(q_m - q) = u$$

여기서 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 는 관절의 위치, 속도, 그리고 가속도 벡터이다. $M(q) \in R^{n \times n}$ 는 대칭적인 양의 정부호(positive definite) 관성 행렬이고, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 는 Coriolis-centripetal 행렬이고, $G(q) \in R^n$ 는 중력 벡터이고, $F \in R^{n \times n}$ 는 각각의 관절의 마찰력 계수를 나타내는 대각 양의 정부호 행렬이다. $q_m, \dot{q}_m, \ddot{q}_m \in R^n$ 는 구동기의 위치, 속도, 그리고 가속도 벡터이다. 양의 정부호 대각 행렬 $K_m \in R^{n \times n}$, $J \in R^{n \times n}$, 그리고 $B \in R^{n \times n}$ 는 관절의 유연성, 구동기 관성, 그리고 고유제동항을 각각 나타낸다. 제어 입력 $u = [u_1, \dots, u_n]^T \in R^n$ 는 각 구동기의 토크(torque) 입력으로 사용된다.

i 번째 구동기 입력 u_i 는 다음의 고장 형태를 갖는다.

$$u_i = \theta_{pi} u_{ni} + \theta_{bi}, \quad \forall t > t_{fi} \quad (2)$$

여기서 $i = 1, \dots, n$, $0 < \theta_{pi} \leq 1$ 는 제어 입력의 부분적 감소를 나타내는 알려지지 않은 상수이고, θ_{bi} 는 알려지지 않은 구동기 바이어스이다. i 번째 구동기는 알려지지 않은 시간 t_{fi} 에 갑자기 고장이 발생한다고 가정한다.

참조 1 : 구동기에 고장이 일어나지 않은 경우에 (2)에서 $\theta_{pi} = 1$ 이고 $\theta_{bi} = 0$ 이다, 즉, $u_i = u_{ni}$ 이다.

특성 1 : 관성 행렬 $M(q)$ 는 대칭적이고 보편적으로 유계하고 양의 정부호 행렬이다. 또한 $M^{-1}(q)$ 는 보편적으로 유계하다. (즉, $\|M^{-1}(q)\|_2 \leq \overline{M}_M$ 여기서 \overline{M}_M 은 양의 상수이다.)

가정 1 : 기준 궤적 벡터 x_d 와 그것의 첫 번째, 두 번째 미분값 \dot{x}_d, \ddot{x}_d 는 제어 루프를 위해 이용가능하고 유계한다.

고장 수용 제어를 설계하기 위해 $x_1 = q, x_2 = \dot{q}, x_3 = q_m, x_4 = \dot{q}_m$ 을 정의하면 (1)은 다음과 같은 상태 방정식 형태로 나타내진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= M^{-1}(x_1)[-C(x_1, x_2)x_2 - G(x_1) - Fx_2 - K_m(x_1 - x_3)] \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= J^{-1}[-Bx_4 - K_m(x_3 - x_1) + \theta_p u_n + \theta_b] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\theta_p = \text{diag}[\theta_{p1}, \dots, \theta_{pn}]$, $u_n = [u_{n1}, \dots, u_{nn}]^T$ 그리고 $\theta_b = [\theta_{b1}, \dots, \theta_{bn}]^T$.

본 논문의 목적은 다음과 같다.

- (i) 다수의 구동기 고장에도 불구하고 유연 관절 로봇 (3)의 x_1 이 기준 궤적 벡터 x_d 를 추종하기 위한 고장 수용 제어를 설계하는 것이다.
- (ii) 추종 오차 $s_1 = x_1 - x_d$ 가 미리 설정된 성능 유계에 보전되고 설계 매개변수를 조절함으로써 일시적인 성능의 향상을 보장하는 것이다.

3. 구동기 고장 수용 제어

3.1 고장 수용 제어기 설계

다수의 구동기 고장을 갖는 유연 관절 로봇을 위해 본 논문에서는 적응 동적 표면 제어 이론 [8]과 성능 보장 설계 기법[9] 기반 제어를 설계한다. 성능 보장 함수를 가진 추종 오차를 (4)와 같이 정의한다.

$$-\delta_{Li}\rho_i(t) < s_{1,i}(t) < \delta_{Ui}\rho_i(t), \quad \forall t \geq 0 \quad (4)$$

여기서 $i = 1, \dots, n$, 추종 오차 $s_{1,i} = x_{1,i} - x_{i,d}$ 는 s_1 의 i 번째 요소이고, $0 < \delta_{Li}, \delta_{Ui} \leq 1$ 는 설계 상수이고, $\rho_i(t) > 0$ 는 감소하는 부드러운 함수(smooth function)이고 $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) = \rho_{i,\infty} > 0$ 을 만족한다. 본 논문에서 성능

함수 $\rho_i(t)$ 는 $\rho_i(t) = (\rho_{i,0} - \rho_{i,\infty})e^{-at} + \rho_{i,\infty}$ 로 선택한다. 여기서 $a, \rho_{i,0}, \rho_{i,\infty}$ 는 양의 상수이고 $\rho_{i,0} > \rho_{i,\infty}$ 이다.

성능 보장 함수에 의해 제약된 추종 오차 (4)을 (5)와 같이 나타내자.

$$s_{1,i}(t) = \rho_i(t)\Psi_i(\phi_i) \quad (5)$$

여기서 $i = 1, \dots, n$, ϕ_i 는 변환된 오차이고, $\Psi_i(\phi_i)$ 는 $-\delta_{Li} < \Psi_i(\phi_i) < \delta_{Ui}$, $\lim_{\phi_i \rightarrow +\infty} \Psi_i(\phi_i) = \delta_{Ui}$, 그리고

$\lim_{\phi_i \rightarrow -\infty} \Psi_i(\phi_i) = \delta_{Li}$ 을 만족하는 엄격히 증가하는 부드러운 함수이다. $\Psi_i(\phi_i)$ 의 엄격히 증가하는 특성과 $\rho_i(t) > 0$ 을 이용하면, (6)과 같은 역함수가 정의된다.

$$\phi_i = \Psi_i^{-1}\left(\frac{s_{1,i}(t)}{\rho_i(t)}\right). \quad (6)$$

만일 ϕ_i 이 고장 수용 제어기에 의해 유계되고 초기의 추종 오차가 $-\delta_{L,i}\rho_i(0) < s_{1,i}(0) < \delta_{U,i}\rho_i(0)$ 을 만족하면 $-\delta_{L,i} < s_{1,i}(t)/\rho_i(t) < \delta_{U,i}, \forall t > 0$ 이 보장됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 함수 $\Psi_i(\phi_i)$ 을 다음과 같이 선택한다.

$$\Psi_i(\phi_i) = \frac{\delta_{U,i}e^{(\phi_i+\zeta_i)} - \delta_{L,i}e^{-(\phi_i+\zeta_i)}}{e^{(\phi_i+\zeta_i)} + e^{-(\phi_i+\zeta_i)}}$$

여기서 $\zeta_i = (1/2)\ln(\delta_{L,i}/\delta_{U,i})$.
그때, 변환된 추종 오차는 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_i &= \frac{1}{2} \ln \left(\delta_{U,i} \frac{s_{1,i}(t)}{\rho_i(t)} + \delta_{U,i}\delta_{L,i} \right) \\ &\quad - \frac{1}{2} \ln \left(\delta_{U,i}\delta_{L,i} - \delta_{L,i} \frac{s_{1,i}(t)}{\rho_i(t)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

변환된 추종 오차 (7)을 이용하여 다음의 각 단계에 따라 고장 수용 제어기를 설계한다.

단계 1: 첫 번째 오차 표면을 $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]^T$ 로 정의하고 시간에 의한 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = \Pi_\beta(x_2 - \dot{x}_d - \Pi_\rho s_1) \quad (8)$$

여기서 $\Pi_\rho = \text{diag}[\dot{\rho}_1/\rho_1, \dots, \dot{\rho}_n/\rho_n]$, $\Pi_\beta = \text{diag}[\beta_1, \dots, \beta_n]$; 그리고

$$\beta_i = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{s_{1,i}(t) + \delta_{L,i}\rho_i(t)} - \frac{1}{s_{1,i}(t) - \delta_{U,i}\rho_i(t)} \right].$$

(9)와 같은 첫 번째 가상 제어기를 선택하자.

$$v_2 = -k_1 \Pi_\beta^{-1} \dot{\phi} + \dot{x}_d + \Pi_\rho s_1 \quad (9)$$

여기서 $k_1 > 0$ 은 설계상수이다. 선택된 가상 제어기를 (10)과 같은 일차 저역 통과 필터에 통과한다.

$$\kappa_2 \dot{v}_{2f} + v_{2f} = v_2 \quad (10)$$

여기서 $\kappa_2 > 0$ 는 작은 필터 상수이다.

단계 2: 두 번째 오차 표면을 $s_2 = x_2 - v_{2f}$ 로 정의하자.

s_2 의 도함수를 구한 후, 다음과 같은 두 번째 가상 제어기를 선택하자.

$$\begin{aligned} v_3 &= K_m^{-1} [K_m x_1 + F x_2 + G(x_1) + C(x_1, x_2) x_2] \\ &\quad + M(x_1) \left\{ -k_2 s_2 + \frac{v_2 - v_{2f}}{\kappa_2} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $k_2 > 0$ 은 설계상수이다. 선택된 가상 제어기를 (12)과 같은 일차 저역 통과 필터에 통과한다.

$$\kappa_3 \dot{v}_{3f} + v_{3f} = v_3 \quad (12)$$

여기서 $\kappa_3 > 0$ 는 작은 필터 상수이다.

단계 3: 세 번째 오차 표면을 $s_3 = x_3 - v_{3f}$ 로 정의하자.

(13)과 같이 세 번째 가상 제어기를 선택하자.

$$v_4 = -k_3 s_3 + \frac{v_3 - v_{3f}}{\kappa_3} \quad (13)$$

여기서 $k_3 > 0$ 은 설계상수이다. 선택된 가상 제어기를 (14)과 같은 일차 저역 통과 필터에 통과한다.

$$\kappa_4 \dot{v}_{4f} + v_{4f} = v_4 \quad (14)$$

여기서 $\kappa_4 > 0$ 는 작은 필터 상수이다.

단계 4: 네 번째 오차 표면을 $s_4 = x_4 - v_{4f}$ 로 정의하자.

제안된 실제 고장 보상 제어기를 (15)와 같다.

$$u_n = \hat{\theta} w \quad (15)$$

여기서 $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2]$; $\hat{\theta}_1$ 는 $\theta_1 = \theta_p^{-1}$ 의 예측 행렬이고 $\hat{\theta}_2$ 는 $\theta_2 = -\theta_p^{-1}\theta_b$ 의 예측 벡터이고, $w = [u_{no}^T, \mathbf{1}]^T$; u_{no} 는 다음과 같다.

$$u_{no} = Bx_4 + K_m(x_3 - x_1) + J[-k_4 s_4 + \frac{v_4 - v_{4f}}{\kappa_4}]$$

여기서 $k_4 > 0$ 은 설계상수이다.

예측 행렬 $\hat{\theta}$ 는 (16)과 (17)와 같은 적응 법칙에 의해 학습된다.

$$\dot{\hat{\theta}}_{1,i} = -\eta_{1,i} u_{no,i} s_{4,i} - \sigma_1 \eta_{1,i} \hat{\theta}_{1,i} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = -\eta_2 s_4 - \sigma_2 \eta_2 \hat{\theta}_2 \quad (17)$$

여기서 $i=1, \dots, n$, $\hat{\theta}_{1,i}$ 는 행렬 $\hat{\theta}_1$ 의 i 번째 대각 요소이고 $u_{no,i}$ 와 $s_{4,i}$ 는 u_{no} 와 s_4 의 각각 i 번째 요소이다. $\eta_{1,i} > 0$ 와 $\eta_2 > 0$ 는 학습율을 나타내는 매개변수이고, $\sigma_{1,i}$ 와 σ_2 는 σ -modification을 위한 설계 변수이다.

3.2 안정도 분석

본 절에서는 다수의 구동기 고장을 가진 유연 관절 로봇을 위해 제안된 고장 수용 제어기의 안정도를 분석한다. 경계층 오차(boundary layer error)을 (18)과 같이 정의하자.

$$\omega_i = v_{if} - v_i, \quad (18)$$

여기서 $i=2,3,4$. 그리고 경계층 오차의 도함수를 (19), (20), 그리고 (21)과 같이 나타낸다.

$$\dot{\omega}_2 = -\frac{\omega_2}{\kappa_2} + \Omega_2(s_1, s_2, \rho, \omega_2, X_d) \quad (19)$$

$$\dot{\omega}_3 = -\frac{\omega_3}{\kappa_3} + \Omega_3(s_1, s_2, s_3, \omega_2, \omega_3, X_d) \quad (20)$$

$$\dot{\omega}_4 = -\frac{\omega_4}{\kappa_4} + \Omega_4(s_1, s_2, s_3, s_4, \omega_2, \omega_3, \omega_4, X_d) \quad (21)$$

여기서 $X_d = [x_d^T, \dot{x}_d^T, \ddot{x}_d^T]^T$, Ω_2 , Ω_3 , 그리고 Ω_4 은 가상 제어기들의 도함수를 나타내는 연속함수이다.

전체적인 시스템의 안정도를 분석하기 위해 르아프노브 함수 V 를 (22)와 같이 정의하자.

$$V = \frac{1}{2}[\phi^T \phi + \sum_{h=2}^4 s_h^T s_h + \sum_{h=1}^3 \omega_{h+1}^T \omega_{h+1} + \text{tr}(\tilde{\Theta}_1^T \mathcal{J}^{-1} \theta_p \eta_1^{-1} \tilde{\Theta}_1) + \frac{1}{\eta_2} \tilde{\Theta}_2^T \mathcal{J}^{-1} \theta_p \tilde{\Theta}_2] \quad (22)$$

여기서 $\tilde{\Theta}_1 = \Theta_1 - \hat{\Theta}_1$, $\tilde{\Theta}_2 = \Theta_2 - \hat{\Theta}_2$, 그리고 $\eta_1 = \text{diag}[\eta_{1,1}, \dots, \eta_{1,n}]$.

정리 1. 구동기 고장을 가진 유연 관절 로봇을 위해 제안한 고장 수용 제어기 (15) 기반 전체 폐루프 시스템을 고려하자. 이때 $V(0) \leq \iota$ 을 만족하는 초기의 조건들을 위한 양의 상수 ι 가 주어진다면, 전체적인 시스템의 신호들이 준 전역적이고 균일하고 궁극적으로 유계(semiglobally unigformly ultimately bounded)되고 추종 오차는 충분히 줄어든다. 그리고 추종 오차가 미리 정의된 성능 유계 이내로 보장된다.

증명) 제안된 가상 제어기 (9), (11), (13)와 실제 제어기 (15)를 이용하여 V 를 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 \|\phi\|^2 - \sum_{h=2}^4 k_h \|s_h\|^2 - \sum_{h=1}^3 \frac{1}{\kappa_{h+1}} \|\omega_{h+1}\|^2 \\ & + \phi^T \Pi_\beta (s_2 + \omega_2) + s_2^T M^{-1}(x_1) K_m (s_3 + \omega_3) \\ & + s_3^T (s_4 + \omega_4) + \sum_{h=1}^3 \omega_{h+1}^T \Omega_{h+1} \\ & - \sum_{i=1}^n \tilde{\Theta}_{1,i} \theta_{p,i} \mathcal{J}_i (u_{no,i} s_{4,i} + \eta_{1,i}^{-1} \hat{\Theta}_{1,i}) \\ & - \tilde{\Theta}_2^T \mathcal{J}^{-1} \theta_p (s_4 + \frac{1}{\eta_2} \dot{\hat{\Theta}}_2) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $\theta_{p,i}$ 와 \mathcal{J}_i 는 θ_p 와 \mathcal{J}^{-1} 의 각각의 대각 요소들이고 $\theta_p \hat{\Theta} w + \theta_b = -\theta_p \Theta w + \theta_p \hat{\Theta} w + \theta_p \Theta w + \theta_b = -\theta_p \tilde{\Theta} w + u_{no}$ 이다.

적응 법칙 (16)과 (17)을 (23)에 대입하고 다음의 특성을 이용하자.

$$\tilde{\Theta}_{1,i} \hat{\Theta}_{1,i} \leq -(1/2) \tilde{\Theta}_{1,i}^2 + (1/2) \Theta_{1,i}^2 \quad (24)$$

$$\tilde{\Theta}_2 \hat{\Theta}_2 \leq -(1/2) \tilde{\Theta}_2^2 + (1/2) \Theta_2^2 \quad (25)$$

그리고 $k_1 = \Pi_\beta + k_1^*$, $k_2 = \Pi_\beta/2 + \overline{M}_M + k_2^*$, $k_3 = 1 + 1/2 \overline{M}_M + k_3^*$, $k_4 = 1/2 + k_4^*$, $1/\kappa_2 = 1/2 + \Pi_\beta/2 + \kappa_2^*$, $1/\kappa_3 = (1/2) + (1/2) \overline{M}_M + \kappa_3^*$, $\kappa_4 = 1 + \kappa_4^*$ 을 선택하고, 상수 ι 의 존재로부터 $\|\Omega_{h+1}\| \leq L_{h+1}$ 을 만족하는 상수 L_{h+1} 을 이용하면 (23)는 (26)이 된다.

$$\dot{V} \leq -2\xi V + D \quad (26)$$

여기서 $0 < \xi < \min[k_1^*, \dots, k_4^*, \kappa_2^*, \dots, \kappa_4^*, \sigma_1 \eta_{1,m}/2, \sigma_2 \eta_2/2]$; $\eta_{1,m}$ 은 η_1 의 고유치의 최솟값이고

$$D = (1/2) \sum_{h=2}^3 L_{h+1}^2 + (1/2) \sum_{i=1}^n \theta_{p,i} \mathcal{J}_i \sigma_1 \Theta_{1,i}^2 + (1/2) \sigma_2 \Theta_2^T \mathcal{J}^{-1} \theta_p \Theta_2.$$

부등식 (26)는 $\xi > D/2\iota$ 일 때 $V = \iota$ 에서 $\dot{V} < 0$ 라는 것을 암시한다. 따라서 $V \leq \iota$ 는 불변 집합(invariant set)이다. 그러므로 모든 오차 신호들은 준 전역적이고 균일하고 궁극적으로 유계한다. 또한 ϕ 는 설계 매개변수를 조절하여 충분히 줄일 수 있다. 따라서 (4), (5), (7)과 $\lim_{\phi \rightarrow 0} \Psi_i(\phi_i) = 0$ 로부터 추종 오차 s_1 은 설계 매개변수를 조절하여 충분히 줄일 수 있다.

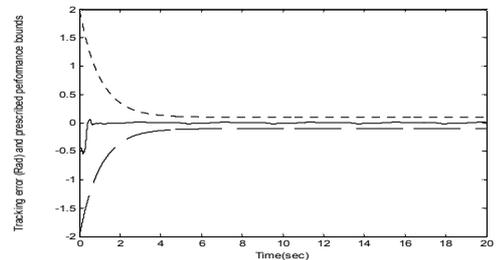
4. 모의실험

제안된 적응 고장 수용 제어기의 효율성을 검증하기 위해 복잡한 비선형을 가진 3-link 유연 관절 로봇을 고려한다. 기준 신호는 $x_d = [x_{1,d}, x_{2,d}, x_{3,d}]^T$ 로 정의된다. 여기서 $x_{1,d} = \cos(1.5t + \pi/3)$, $x_{2,d} = 1.2 \cos(1.5t)$, 그리고 $x_{3,d} = 0.8 \cos(1.5t)$ 이다. [8]에서 정의된 로봇의 동역학식의 행렬과 매개 변수를 이용한다.

구동기 고장은 다음과 같이 발생한다고 가정한다.

$$\theta_p = \begin{cases} \text{diag}[1, 1, 1], & 0 \leq t < 5 \\ \text{diag}[1, 0.7, 0.7], & 5 \leq t < 8 \\ \text{diag}[0.6, 1, 0.5], & 8 \leq t < 20 \end{cases}$$

$$\theta_b = \begin{cases} \text{diag}[0, 0, 10], & 5 \leq t < 8 \\ \text{diag}[0, 0, 0], & \text{elsewhere} \end{cases}$$



(a)

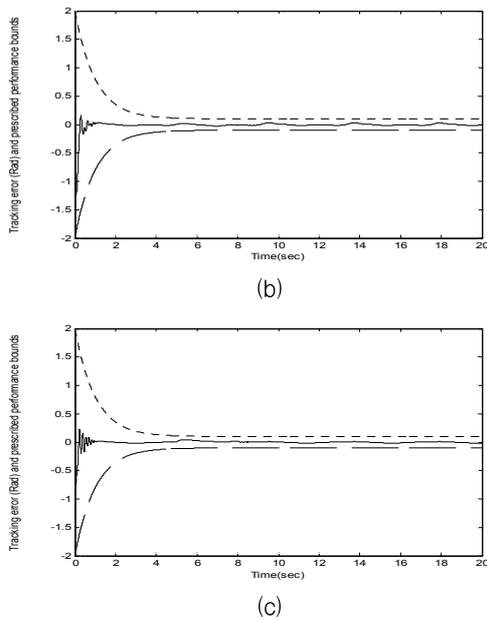


그림 1. 고장 수용 제어 오차
Fig. 1. Fault accommodation control errors

구동기 고장이 발생했을 때의 제안된 적응 고장 수용 제어기의 제어 오차와 미리 설정된 성능 유계들은 그림 1과 같다. 제안된 제어기는 다수의 구동기 고장 현상을 극복할 수 있고 고장이 일어난 순간의 일시적인 성능 또한 보장한다.

5. 결론

본 논문에서는 다수의 구동기 고장을 고려한 유연 관절 로봇의 미리 정의된 성능 유계 기반 적응 고장 수용 제어기를 제안하였다. 고장이 발생한 시간과 크기가 알려지지 않았다고 가정하였고 동적 표면 제어 기법과 미리 설정된 성능 기반 고장 수용 제어 알고리즘을 제시하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 제어 시스템의 성능을 검증하기 위해 모의실험 결과를 제시하였고 만족스러운 성능을 검증하였다.

References

[1] M. L. Visinsky, J. R. Cavallaro, I. D. Walker, "Robotic fault detection and fault tolerance: a survey", *Rel. Eng. Syst. Safety*, vol. 46, no. 2, pp. 136 - 158, 1994.
 [2] M. L. Visinsky, J. R. Cavallaro, I. D. Walker, "Expert system framework for fault detection and fault tolerance in robotics", *Comput. Electr. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 421 - 435, 1994.

[3] S. N. Huang, K. K. Tan, "Fault detection, isolation, and accommodation control in robotic systems", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 480 - 489, 2008.
 [4] A. A. Abouelsoud, "Robust regulator for flexible-joint robots using integrator backstepping", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 23 - 38, 1998.
 [5] S. Nicosia, P. Tomei, "A new approach to control elastic joint robots with application to adaptive control", *Proc. IEEE Conf on Decision and Control*, pp. 343 - 347, 1991.
 [6] M. M. Bridges, D. M. Dawson, C. T. Abdallah, "Control of rigid-link flexible-joint robots: a survey of backstepping approaches", *J. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 199 - 216, 1995.
 [7] D. Swaroop, J. K. Hedrick, P. P. Yip, J. C. Gerdes, "Dynamic surface control for a class of nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45 no. 10, pp. 1893-1899, 2000.
 [8] S. J. Yoo, J. B. Park, and Y. H. Choi "Adaptive output feedback control of flexible-joint robots using neural networks: dynamic surface design approach," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 19, no. 10, pp. 1712-1726, 2008.
 [9] C. P. Bechlioulis, and G. A. Rovithakis, "Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems", *Automatica*, vol. 45, no. 2, pp. 532 - 538, 2009.

저 자 소 개



유성진 (Sung Jin Yoo)

2003년 : 연세대학교 전기전자공학과 학사

2005년 : 연세대학교 전기전자공학과 석사

2009년 : 연세대학교 전기전자공학과 박사

2009년~2010년 : 미국 UIUC 박사 후 연구원

2011년~현재 : 중앙대 전자전기공학부 조교수

관심 분야 : 비선형 적응 제어, 분산 적응 제어, 및 지능제어, 그리고 시간 지연 시스템, 대규모 시스템, 로봇 시스템 적용

Phone : +82-2-820-5288

E-mail : sjyoo@cau.ac.kr