

불확실성의 존재에서 관절 고장을 가지는 로봇 시스템에 대한 강인한 내고장 제어

Robust Fault-Tolerant Control for a Robot System Anticipating Joint Failures in the Presence of Uncertainties

신진호*
(Jin-Ho Shin)

Abstract : This paper proposes a robust fault-tolerant control framework for robot manipulators to maintain the required performance and achieve task completion in the presence of both partial joint failures and complete joint failures and uncertainties. In the case of a complete joint failure or free-swinging joint failure causing the complete loss of torque on a joint, a fully-actuated robot manipulator can be viewed as an underactuated robot manipulator. To detect and identify a complete actuator failure, an on-line fault detection operation is also presented. The proposed fault-tolerant control system contains a robust adaptive controller overcoming partial joint failures based on robust adaptive control methodology, an on-line fault detector detecting and identifying complete joint failures, and a robust adaptive controller overcoming partial and complete joint failures, and so eventually it can face and overcome joint failures and uncertainties. Numerical simulations are conducted to validate the proposed robust fault-tolerant control scheme.

Keywords : robust fault-tolerant control system, joint(actuator) failure, robust adaptive control, underactuated robots

I. 서론

고장 검출 및 대응에 기반한 신뢰성과 안정성은 자율적인 지능 로봇 시스템의 동작에 중요한 역할을 담당한다. 내고장성은 특히, 우주, 심해, 원전과 같은 원격 지역이나 위험한 환경에서 작업하는 로봇 시스템에 대해 중요하며, 로보틱스에서 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[9][10].

1990년대이래, 수동 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터 또는 비구동 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터 또는 부족구동 로봇 매니퓰레이터(underactuated robot manipulators: robot manipulators with passive joints or unactuated joints)에 대한 동역학 및 제어 기법들이 여러 논문지들에 발표되어져왔다 [1]-[7][11]. 수동관절을 가진 로봇 매니퓰레이터는 완전히 고장난 구동기를 가진 로봇 매니퓰레이터로 볼 수 있다. 따라서, 비구동 관절을 가진 로봇의 개념은 내고장 제어와 설계에서 이용될 수 있다. 그러나, 고장 검출 방법을 포함한 구체적인 내고장 제어 시스템은 위에서 발표되었던 논문들에서 제시되지 못했다.

English와 Maciejewski[9]는 자유 진동 관절 고장(free-swinging joint failures)을 가진 여유자유도 매니퓰레이터에 대한 내고장성에 대한 연구 논문을 발표하였다. 그러나, 그들의 논문 [9]는 구체적인 내고장 제어기와 내고장 검출 기법을 고려하지 못했다. 로봇에 대한 동역학 내고장 구조는 Visinsky의 2인의 논문[10]에서 제안되어졌다.

논문[10]은 내고장 검출 방법을 제안 하였다. 그러나, 구체적인 강인 제어 기법을 제시하지 않았으며, 자유 진동 관절 고장을 다루지 않았다. Papadopoulos와 Dubowsky[11]은 비구동 관절을 가진 로봇의 개념을 바탕으로 우주 로봇의 고장 복구 제어 방법을 제안했으나, 고장 검출 방법과 전체 내고장 구조를 제시하지 못했다.

로봇의 관절들의 어떤 구동기들은 하드웨어 또는 소프트웨어 문제들로 인하여 부분적으로 고장이 일어날 수 있다. 실제적으로 부분적인 구동기 고장으로 인한 로봇 시스템의 성능 저하는 무시되어질 수 없다. 이러한 부분적인 구동기 고장은 성능 저하를 막고 만족스러운 성능을 유지하면서 작업을 완수하기 위하여 자율적인 로봇 제어 시스템에서 온라인으로 극복되어져야만 한다.

본 논문에서는 구동기 고장을 가진 로봇 매니퓰레이터에 대해 강인한 내고장 제어 기법이 개발되어진다. 제안된 내고장 제어 시스템은 불확실성의 존재에서 부분적인 관절 고장과 완전한 관절 고장 모두를 극복할 수 있다. 로봇 시스템에서 완전한 관절 고장에 대한 온라인 내고장 검출 방법이 제시되어진다. 불확실성과 구동기 고장을 극복할 수 있는 강인한 고장 극복 제어 기법이 로봇의 작업 완수를 성취하기 위하여 제안되어진다. 부분 관절 고장 및 완전 관절 고장에 대해 제안된 고장 검출 및 고장 극복 제어 기법의 타당성과 유효성을 입증하기 위하여 모의 실험 결과들이 보여진다.

II. 동역학 모델과 관절 고장

관절 고장이 있는 n -링크 다관절 로봇 매니퓰레이터의 동역학 모델은 다음 식에 의해 기술된다. 여기서, $q \in R^n$ 는 관절 좌표의 위치 벡터, $M(q)$ 는 대칭 양한정 관성 행렬

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 18., 채택확정 : 2003. 7. 14.

신진호 : 동의대학교 메카트로닉스공학과(jhshin7@dongeui.ac.kr)

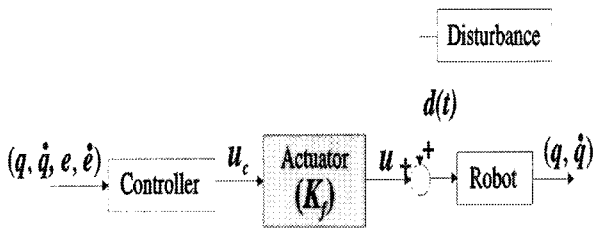


그림 1. 로봇 제어 시스템에서 명령 제어 신호와 구동기 토크 신호사이의 관계: e 는 관절 위치 오차 벡터를 나타낸다.

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

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

(symmetric positive definite inertial matrix), $F(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F_{fr}(\dot{q}) + G(q)$ 는 각각 원심력, 코리올리력, 마찰력, 중력 토크에 대한 항의 합이며, u 는 실제 관절의 토크 벡터(actual 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) $K_f \in R^{n \times n}$ 는 구동기 토크 계수들(actuator torque coefficients)로 구성되는 유계 시변 대각 행렬(bounded time-varying diagonal matrix)이다. 다시 말해서, $K_f(t) = \text{diag}(K_{f1}(t), K_{f2}(t), \dots, K_{fn}(t))$ 이며, 그리고 양수 \overline{k}_f 를 가진 $\|K_f\| \leq \overline{k}_f$ 이다.

위의 동역학 방정식 (1)에서 보여진바와 같이, 제어기로부터 구동기를 통해 로봇으로 가는 신호들의 연결 관계는 그림 1에서 보여진다.

위의 동역학 방정식 (1)에서 나타난 각각의 동역학 항들의 경계값 성질은 성질 1에서 보여진다.

성질 1 : 다음과 같은 방정식 $\|M(q)\| \leq m_{\max}$, $\|C(q, \dot{q})\| \leq c_{\max} \|\dot{q}\|$, $\|F_{fr}(\dot{q})\| \leq f_{fr_{\max}} \|\dot{q}\|$, $\|G(q)\| \leq g_{\max}$, $\|F(q, \dot{q})\| \leq f_g + f_f \|\dot{q}\| + f_c \|\dot{q}\|^2$ 이 성립하는 양의 정수 m_{\max} , c_{\max} , $f_{fr_{\max}}$, g_{\max} , f_g , f_f , 그리고 f_c 가 존재한다[8].

이상적인 경우로서, 행렬 K_f 는 $n \times n$ 단위 행렬이며 그때 $u = u_c$ 이다. 따라서, 명령 토크 벡터 u_c 는 로봇 관절에 정확히 전달된다. 이런 이상적인 경우에서, 로봇은 관절 고장을 가지지 않으며, 로봇 관절은 정상적이라고 고려되어질 수 있다.

반면에, 실제 로봇 시스템에서 명령 토크 u_c 는 구동기 및 드라이브 전자회로 다이내믹스(dynamics) 과열 등의 원인으로 인하여 로봇 관절에 정확히 전달되지 않을지도 모른다. 실제적으로, 어떤 관절에서는 관절 고장으로 인하여 $u_i \neq u_{ci}$ 가 될 수 있다.

본 논문에서는, 관절 고장 또는 구동기 고장은 다음과 같이 K_f 의 값에 따라 구분되어질 수 있다.

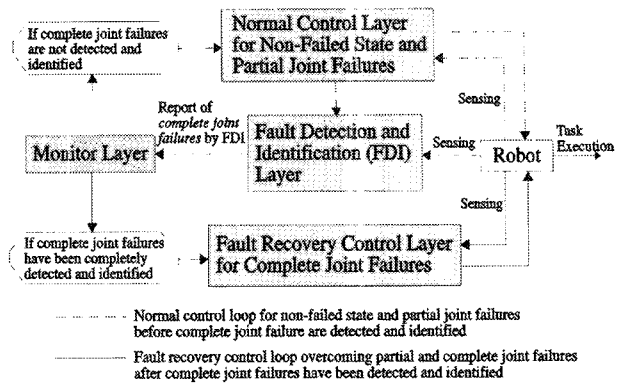


그림 2. 제안된 계층적 내고장 제어 시스템 구성의 블록선도.

Fig. 2. Block diagram of the proposed layered fault-tolerant control system configuration.

1) **부분 관절 고장(Partial joint failure):** 이 경우는 K_f 가 0인 대각 원소값을 가지지 않으며 또한 단위 행렬이 아닐 때 일어난다. 이 때, 로봇은 부분적으로 고장난 관절을 가진다.

2) **완전 관절 고장(Complete joint failure):** K_f 의 어떤 대각 원소들이 0이 될 때, 그 대각 원소들에 해당하는 관절들은 완전히 고장이라고 우리는 말한다. 보통, 한 관절의 토크 또는 힘의 완전한 손실을 초래하는 완전한 관절 고장은 두 종류가 있는데, 하나는 자유 진동 고장(free-swinging failure)이며, 다른 하나는 고정 관절 고장(locked-joint failure)이다. 본 연구에서 고려된 완전한 관절 고장은 움직일 수 없는 고정 관절 고장이 아니라 자유 진동 고장이다. “자유 진동 고장” 용어는 로봇 매니플레이터에서 고장난 관절이 외부력과 중력의 영향하에서 자유롭게 움직이게 만드는 하드웨어 또는 소프트웨어 고장을 말한다. 그 일례는 수력 구동기의 과열된 펌, 전력의 손실, 드라이브 시스템에서 기계적 고장 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 부분 관절 고장과 완전 관절 고장을 모두 다룬다.

III. 강인한 내고장 제어 시스템

그림 2에 보여진 블록선도는 관절 고장을 예상하는 로봇에 대한 제안된 내고장 제어 구조의 계층적 구성을 설명해 준다. 제안된 강인한 자율 내고장 제어 구조는 네 개의 층으로 나누어진다. 정상 상태(비고장 상태)와 부분 관절 고장에 대한 강인한 정상 제어층, 완전 관절 고장에 대한 고장 검출 및 동정화층, 부분 관절 고장뿐만 아니라 완전 관절 고장에 대한 고장 복구 제어층 그리고 모니터 층으로 구성되어진다.

정상 제어층은 관절 고장이 없는 상태와 부분적인 관절 고장 상태에서 성공적으로 로봇을 제어하기 위하여 강인한 적응 제어를 가진다.

고장 검출 및 동정화층은 고장 검출 루프를 가지며 완전 관절 고장이 일어나는 상황에서 고장 검출 및 동정화 처리를 수행한다.

부분 관절 고장뿐만 아니라 완전 관절 고장을 견뎌내고 적응시키기 위한 강인한 고장 복구 제어층이 로봇으로 하여금 불확실성이 있을 때, 완전 관절 고장에도 불구하고 원래의 로봇 작업을 계속 수행하는 것이 가능하도록 한다.

모니터층은 고장 검출 및 동정화층을 통한 검출 결과에 따라 주 제어기의 스위치로서의 역할을 담당한다.

IV. 부분 관절 고장을 가진 로봇 매니플레이터에 대한 강인한 적응 제어

이 장에서는 불확실성이 존재할 때, 부분 관절 고장을 극복할 수 있는 정상 제어층에서 사용된 강인한 적응 제어 기법이 제시되어진다.

관절 벡터의 위치 오차(position error)와 확장 오차(augmented error)는 각각 $e = q - q_d$ 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.

부분 관절 고장과 불확실성을 극복하는 제안된 강인한 적응 제어기는 다음과 같이 요약된다.

$$u_c = K_f^{-1} (\mathcal{M}(q)v_c + \mathcal{F}(q, \dot{q})) \in R^n, \tag{2}$$

$$v_c = \ddot{q}_d - (k_c + \lambda)e - k_v \lambda e - \hat{\rho} \frac{\alpha}{\|d\| + \epsilon} \in R^n, \quad \alpha = R s, \tag{3}$$

$$\hat{\rho} = \mathcal{D}^T \psi, \quad \psi = (1 \parallel \ddot{q}_d \parallel^2 \parallel \ddot{q}_d \parallel \|\dot{e}\| \|\ddot{q}_d\| \|\dot{q}\|)^T, \tag{4}$$

$$\mathcal{D} = \Gamma \left(\frac{\psi \|d\|^2}{\|d\| + \epsilon} - \sigma \mathcal{D} \right) \in R^6, \tag{5}$$

여기서, K_f^{-1} , \mathcal{M} , \mathcal{F} 은 각각 실제 모델 K_f^{-1} , \mathcal{M} , \mathcal{F} 에 대한 추정 공칭 모델(guessed nominal model)을 나타낸다. 이 추정 공칭 모델들은 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. \mathcal{M} 과 \mathcal{F} 에서의 추정 공칭 값들은 불확실성이 심한 동적 파라미터, 즉 질량, 관성 모멘트, 질량 중심 위치, 각종 마찰 계수(점성, 쿨롱, 정적) 등이라 할 수 있다. 따라서, 정확한 실제 값들과 차이가 난다고 볼 수 있다. 이것이 파라미터 불확실성의 원인이 되는 것이다. $\mathcal{D} \in R^6$ 은 파라미터 불확실성과 외란에 의해 생기는 불확실성 항들을 모아 만든 노름(norm)의 상한 경계값(upper-bound) 성질에서 나온 파라미터 벡터 $\theta \in R^6$ 에 대한 추정 벡터(estimation vector)이다. 따라서, \mathcal{D} 은 (5)의 적응 법칙으로부터 추정된 파라미터들로 이루어진 벡터이다. 이 추정 벡터가 (3)의 강인 적응 제어기에 쓰여져 로봇의 토크 제어기 (2)에 입력되어진다. 이것의 유도 과정 및 안정도 해석은 앞으로 전개되어진다. 이득 k_c , R 과 Γ 는 양한정 상수 대각 행렬이며, ϵ 과 σ 는 작은 양수들(small positive constants)이다.

확장 추종 오차 s 에 대한 페루프 오차 동역학 방정식은 s 를 시간에 대하여 미분하여 명령 제어 입력 (2)를 로봇

동역학 방정식 (1)에 대입하여 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$\dot{s} = -k_c s - \hat{\rho} \frac{\alpha}{\|d\| + \epsilon} + \eta \tag{6}$$

여기서, $\eta = (M^{-1}K_f K_f^{-1} M - I_n) v_c + [M^{-1}K_f K_f^{-1} \mathcal{F} - M^{-1} \mathcal{F} + M^{-1} d(t)]$ 은 집중 불확실성 항(lumped uncertainty term)이며, I_n 은 $n \times n$ 단위 행렬(identity matrix)이다.

가정 1 : $\|M^{-1}K_f K_f^{-1} M - I_n\| \leq c_0 < 1$ 이 되도록 $c_0 > 0$ 인 c_0 가 존재한다고 가정한다.

첨언 1 : K_f 과 \mathcal{M} 은 가정 1이 만족하도록 추정(guess)하여 설정한다. 바꾸어 말하면, 제어 대상의 로봇이 주어진다면, K_f 와 \mathcal{M} 이 결정되어지며, 이 때, K_f 과 \mathcal{M} 이 잘 설정되어져서 강인한 적응 제어가 운용이 되어진다는 것은 주어진 로봇과 이 주어진 로봇에 대해 야기된 관절 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 같이 포함되어 있기 때문에 그 제어 입력을 불확실성으로 같이 고려하여 극복하려할 때 나타나는 현상이다. 개념은 불확실성을 억제하기 위해 그것보다 더 큰 제어 입력을 가해주어야 한다는 가정이다.

성질 2 : 성질 1, 외란, 그리고 K_f 의 노름값들(norm values)의 상한 경계값 성질에 의해, $\|M^{-1}K_f K_f^{-1} \mathcal{F} - M^{-1} \mathcal{F} + M^{-1} d(t)\| \leq c_1 + c_2 \|\ddot{q}_d\|^2 + c_3 \|\ddot{q}_d\|$ 이 되도록 양수 c_1 , c_2 와 c_3 가 존재한다.

성질 3 : 제어기의 정의에 의해, $\|v_c\| \leq \|\ddot{q}_d\| + c_4 \|\dot{e}\| + c_5 \|\ddot{e}\| + \hat{\rho}$ 이 되도록 양수 c_4 와 c_5 가 존재한다. 이 때, 파라미터 추정 벡터의 초기값 $\mathcal{D}(0)$ 의 모든 원소들은 0보다 크거나 같은 값을 가지도록 잡아준다.

첨언 3 : 위의 성질 3에서, 적응 법칙 (5)가 $\dot{\mathcal{D}} + \Gamma \sigma \mathcal{D} = \Gamma \frac{\psi \|d\|^2}{\|d\| + \epsilon}$ 는 양의 입력을 가진 저대역통과 필터(low-pass filter)이기 때문에, $\mathcal{D}(0) \geq 0$ 일 때, 모든 시간 t 에 대해 $\mathcal{D}(t) \geq 0$ 이다. 따라서, 모든 시간에 대하여 $\hat{\rho} = \mathcal{D}^T \psi \geq 0$ 이며, $|\hat{\rho}| = \hat{\rho}$. 보통은 초기값 $\mathcal{D}(0)$ 은 0으로 설정되어질 수 있다.

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

정리 1 : 가정 1하에서, 위의 제안된 제어 시스템 (2)-(5)는 관절의 위치 및 속도 오차값들이 전역균등극극유계(Globally Uniformly Ultimately Bounded: GUUB)됨을 보장한다.

증명 : Lyapunov 함수 후보를 다음과 같이 고려해 보자.

$$V = \frac{1}{2} \{s^T R s + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \vartheta\} = \frac{1}{2} z^T P z \quad (7)$$

여기서, $\vartheta = \vartheta - \theta \in R^6$, $\theta_i = \bar{\theta}_i / (1 - \bar{\theta}_3)$, 그리고 $z = (s^T \ \vartheta^T)^T \in R^{(n+6)}$ 이다. 또한, $P = \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & (1 - \bar{\theta}_3) \Gamma^{-1} \end{pmatrix}$. (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 (6)을 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T R \dot{s} + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \\ \dot{V} &\leq -s^T R k_c s - \hat{\rho} \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} + \|a\| \|k\| \\ &\quad + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\|a\|^2 = a^T a$. 이제, 집중 불확실성의 노음 k 의 유계성질을 위의 (9)에 대입하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -s^T R k_c s - \hat{\rho} \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} + \|a\| [\bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2] \|\dot{q}\|^2 \\ &\quad + \bar{\theta}_3 (\|\dot{q}_d\| + \hat{\rho}) + \bar{\theta}_4 \|\dot{e}\| + \bar{\theta}_5 \|\dot{e}\| + \bar{\theta}_6 \|\dot{q}\| \\ &\quad + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \\ &= -s^T R k_c s - \hat{\rho} (1 - \bar{\theta}_3) \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} + \hat{\rho} \bar{\theta}_3 \left[\|a\| - \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} \right] \\ &\quad + \left(\frac{\bar{\theta}_1}{1 - \bar{\theta}_3} + \frac{\bar{\theta}_2}{1 - \bar{\theta}_3} \|\dot{q}\|^2 + \frac{\bar{\theta}_3}{1 - \bar{\theta}_3} \|\dot{q}_d\| \right. \\ &\quad \left. + \frac{\bar{\theta}_4}{1 - \bar{\theta}_3} \|\dot{e}\| + \frac{\bar{\theta}_5}{1 - \bar{\theta}_3} \|\dot{e}\| + \frac{\bar{\theta}_6}{1 - \bar{\theta}_3} \|\dot{q}\| \right) (1 - \bar{\theta}_3) \|a\| \\ &\quad + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \quad (10) \\ &= -s^T R k_c s - \hat{\rho} (1 - \bar{\theta}_3) \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} + \hat{\rho} \bar{\theta}_3 \left[\|a\| - \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} \right] \\ &\quad + \rho (1 - \bar{\theta}_3) \|a\| + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \\ &= -s^T R k_c s - \hat{\rho} (1 - \bar{\theta}_3) \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} + \rho (1 - \bar{\theta}_3) \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} \\ &\quad + \rho (1 - \bar{\theta}_3) \left[\|a\| - \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} \right] + \hat{\rho} \bar{\theta}_3 \left[\|a\| - \frac{\|a\|^2}{\|a\| + \varepsilon} \right] \\ &\quad + (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \end{aligned}$$

여기서, $\theta_i = \frac{\bar{\theta}_i}{1 - \bar{\theta}_3}$, $i = 1, 2, \dots, 6$, $\theta = (\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_6)^T$, $\psi = (1 \ \|\dot{q}\|^2 \ \|\dot{q}_d\| \ \|\dot{e}\| \ \|\dot{e}\| \ \|\dot{q}\|)^T$, $\rho = \theta^T \psi$, $\hat{\rho} = \vartheta^T \psi$, $\bar{\rho} = \hat{\rho} - \rho = (\vartheta - \theta)^T \psi = \vartheta^T \psi$, 그리고 $\vartheta = \vartheta$. 따라서, 적응 법칙 (5)를 (10)에 대입해서 정리하면, 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -s^T R k_c s - (1 - \bar{\theta}_3) \sigma \vartheta^T \vartheta + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) \quad (11)$$

여기서, $\bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) = \left(\frac{\|a\| \varepsilon}{\|a\| + \varepsilon} \right) [\hat{\rho} \bar{\theta}_3 + \rho (1 - \bar{\theta}_3)]$. 또한,

다음 관계가 성립한다: $\frac{1}{2} \sigma (\vartheta + \theta)^T (\vartheta + \theta) \geq 0$. 따라서, $\sigma \vartheta^T \vartheta + \sigma \vartheta^T \theta = \sigma \vartheta^T \vartheta \geq \frac{1}{2} \sigma (\vartheta^T \vartheta - \theta^T \theta)$. 이제 다음 부등식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -s^T R k_c s - \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_3) \sigma \vartheta^T \vartheta \\ &\quad + \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_3) \sigma \theta^T \theta + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) \\ &= -\frac{1}{2} z^T Q z + w(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) \\ &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + w(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $Q = \begin{pmatrix} 2R k_c & 0 \\ 0 & (1 - \bar{\theta}_3) \sigma I_7 \end{pmatrix}$, $I_7 \in R^{7 \times 7}$ 은 단위행렬

이며, 그리고 $w(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) = \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_3) \sigma \theta^T \theta + \bar{w}(\rho, \hat{\rho}, \|a\|)$ 이다. Lyapunov 함수 후보 (7)과 부등식 (8)로부터, (12)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\mu V + w(\rho, \hat{\rho}, \|a\|) \quad (13)$$

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

미분 부등식 (13)은 다음 해를 가진다.

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

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 Qu[12]의 방법을 따르면, 다음과 같이 전역균등궁극유계(globally uniformly ultimately bounded: GUUB)되어진다.

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

Lyapunov 함수 후보 (7)로부터,

$$\begin{aligned} V(t, z(t)) &\geq \frac{1}{2} s^T R s \geq \frac{1}{2} \lambda_{\min}(R) \|s\|^2 \text{이며, } V(t, z(t)) \\ &\geq \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_3) \vartheta^T \Gamma^{-1} \vartheta \geq \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_3) \lambda_{\min} \Gamma^{-1} \|\vartheta\|^2 \end{aligned}$$

이기 때문에, 확장 추종 오차 $s(t)$ 와 파라미터 오차 $\vartheta(t)$ 는 다음과 같이 유계되어진다.

$$\begin{aligned} \|s(t)\| &\leq \left[\frac{2V}{\lambda_{\min}(R)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \|\vartheta(t)\| &\leq \left[\frac{2V}{(1 - \bar{\theta}_3) \lambda_{\min}(\Gamma^{-1})} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (16)$$

확장 추종 오차 $s(t)$ 와 파라미터 오차 ϑ 는 (15)에 의해서도 GUUB되어지며, (14)와 (16)에 의해서도 GUUB가

증명되어진다. 이제, 위치 추종 오차 e 와 속도 추종 오차 \dot{e} 의 GUUB의 보장인데, 이것은 Dawson과 Qu[12]의 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} 은 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.

$$\|e(t)\| \leq n \exp(-\lambda_0 t) \|e(0)\| + n \int_0^t \exp[-\lambda_0(t-\beta)] \|s(\beta)\| d\beta \quad (17)$$

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

또한, $\dot{e}(t)$ 의 GUUB도 Dawson과 Qu[12]의 Remark 7에서 처럼, $\dot{e}(t) + \lambda e(t) = s(t)$ 의 성질을 이용하여 다음과 같은 부등식을 이용하여 유계성질(boundedness)을 보장한다.

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

(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 $\dot{s}(t)$ 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 4 : 제어기 (2)에서, 보통 추정 공칭 구동기 토크 계수 행렬 K_f 은 사용자가 초기에 로봇 시스템에서 어떤 관절 고장들을 예상할 수 없기 때문에 단위 행렬, 즉 $K_f = \text{diag}\{1, 1, \dots, 1\} \in R^{n \times n}$ 으로 정의할 수 있다. 물론, 다른 방법으로 추정 공칭 모델로 K_f 을 정의할 수도 있다. 예를 들어, $K_f = \text{diag}\{2, 3, \dots, 1 + 0.5 \sin(t)\} \in R^{n \times n}$ 이다. 그러나, 이 방법은 이미 로봇 구동기에 고장이 있는 상태이다. 제어기 관점에서 보면, K_f 은 M 과 함께 가장 1이 성립하도록 정해주어야 한다. 그러기 위해서는, $K_f \approx K_i$ 이 되도록 해 주어야 하는데, 로봇의 초기 상태에서는 로봇 구동기 상태가 이미 고장 상태라고 예측하기에는 상당히 어렵다. 그리고 고장 상태라고 본다 하더라도 초기에 어떤 관절에 고장의 정도가 어떤지 예측하기도 상당히 어렵다. 따라서, 로봇을 제어할 초기 단계에서는 로봇의 모든 관절이

정상 상태라고 생각하고 K_f 을 단위 행렬로 정의하고 제어기에 설정하는 것이 합당하다.

V. 완전 관절 고장에 대한 고장 검출 및 동정화

오직 부분 관절 고장이 어떤 관절들에서 일어나며 완전 관절 고장은 다른 관절들에서 일어나지 않는 경우에서, 제안된 강인한 적응 제어 기법 (2)-(5)가 파라미터 불확실성과 외적 외란과 같은 불확실성의 존재에서 부분 관절 고장을 성공적으로 극복할 수 있기 때문에 고장 검출 처리 과정은 수행될 필요가 없다.

반면에, 어떤 한 관절에서 완전 관절 고장이 일어나는 경우에, 부분 관절 고장을 극복하는 제안된 강인한 적응 제어 기법이 완전히 고장난 구동기를 가진 로봇을 성공적으로 그리고 효과적으로 제어하지 못할지도 모른다는 것을 알 수 있다.

완전 관절 고장이 일어난 후에, 완전히 고장난 구동기를 가진 로봇 매니퓰레이터는 비구동 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터로서 간주되어질 수 있다. 완전히 고장난 구동기들을 가진 로봇을 성공적으로 제어하기 위하여 고장이 언제 일어나며 어떤 관절들이 고장나는지 온라인으로 조사해야 한다. 그러므로, 완전한 관절 고장에 대한 고장 검출 처리 과정이 완전히 고장난 구동기들을 가진 로봇 매니퓰레이터를 효과적으로 제어하기 위하여 필요하다.

제시된 온라인 고장 검출 방법은 다음 두 단계 절차를 가진다.

- 1) 단계 1 (Stage 1). **FD** (고장 검출(Fault Detection)) : 관절 고장의 검출
- 2) 단계 2 (Stage 2). **FI** (고장 동정화(Fault Identification)) : 관절 고장의 관절 위치의 동정화

여기서 제시되어지는 고장 검출 방법은 완전 관절 고장의 검출 및 동정화를 결정짓는 결정 기준자 역할로서 위치 오차 e 와 속도 오차 \dot{e} 을 이용한다.

이 고장 검출 및 동정화 기간 동안에, 4장에서 제시된 강인한 적응 제어기 (2)-(5)는 주 기본 제어기로서 로봇에게 입력된다. 그러므로, 실제의 로봇의 관절들로부터의 실제의 관절 위치와 속도 신호들은 제안된 제어기 (2)-(5)가 적용될 때 관절들에서 장착된 회전위치계(encoder)와 회전 속도계(tachometer)에 의해 측정되어진다.

불확실성의 존재에서 완전 관절 고장을 검출하기 위한 기준을 제공한다. **FD** 단계에서, 조건은 다음과 같다.

- **완전 관절 고장 없음** : $\|e\| \leq B_{pe}$ OR $\|\dot{e}\| \leq B_{ve}$ 이면, 제어 루프를 계속한다.
- **완전 관절 고장 검출** : $\|e\| > B_{pe}$ AND $\|\dot{e}\| > B_{ve}$ 이면, **FI** 단계로 이동한다.

여기서, B_{pe} 는 위치 오차에 대한 관절 고장 또는 구동기 고장을 검출하기 위한 판단 근거로 삼는 문턱값(threshold value) 또는 오차 경계값 상수(error bound constant)를 나타내며, B_{ve} 는 속도 오차에 대한 문턱값을 나타낸다. 위의 조건문에서 'OR'과 'AND'은 각각 논리합과 논리곱의 조건 연산을 나타낸다.

관절의 실제값과 목표값간의 오차(error)의 경계값 B_{pe} 과 B_{ve} 은 다음과 같이 결정되어 질 수 있다.

- 조절 문제 (Regulation Problem) :
 - $B_{pe} = B_{per} = \|e_f\| + (\|e_i\| + e_{io} - \|e_f\|) \exp(-\gamma_{pe}t)$
 - $B_{ve} = B_{ver} = \|\dot{e}_f\| + (\|\dot{e}_i\| + \dot{e}_{io} - \|\dot{e}_f\|) \exp(-\gamma_{ve}t)$
- 추종 문제 (Tracking Problem) :
 - $\|e_i\| \neq 0$ 일 때, $B_{pe} = B_{per}$ 과 $B_{ve} = B_{ver}$.
 - $\|e_i\| = 0$ 일 때, $B_{pe} = \|e_f\|$ 과 $B_{ve} = \|\dot{e}_f\|$.

여기서, e_i 와 \dot{e}_i 는 각각 관절의 위치 오차 e 와 속도 오차 \dot{e} 의 초기값들이다. e_{io} 와 \dot{e}_{io} 은 사용자 정의 초기 오프셋 값들이며, e_f 와 \dot{e}_f 은 사용자 정의 최종 값들이다. 또한, γ_{pe} 와 γ_{ve} 는 양의 상수들이다. e , e_i , \dot{e} , \dot{e}_i 은 각각 로봇 관절을 통해 실제 측정하는 값들이며, e_{io} , \dot{e}_{io} , e_f , \dot{e}_f , γ_{pe} , γ_{ve} 는 고장 검출을 위해 적절히 사용자가 설정해주는 상수 값들이다.

첨언 5 : 관절의 고장을 좀 더 정확하게 검출하기 위하여, 위치 오차뿐만 아니라 속도 오차까지 이용하였으며, 조절 문제와 추종 문제를 나누어 오차 경계값 상수들을 정의하였다.

먼저, 조절 문제에서, 초기 위치 오차는 크다. 만약 오차 경계값 상수 또는 문턱값 B_{pe} 와 B_{ve} 가 매우 작은 양의 상수 값이라면, 큰 초기 위치 오차로 인하여 고장이 실제 발생하지 않을지라도 관절 고장이 일어난다고 잘못 보고할지도 모른다. 반면에, 문턱값 B_{pe} 와 B_{ve} 이 큰 양의 상수라면, 관절 고장이 실제 일어날지라도, 고장이 일어난다고 매우 늦게 보고하거나, 작업 중 관절 고장이 검출되어지지 않을지도 모른다. 따라서, 위에서 제시한 조절 문제에서의 문턱값 B_{per} 과 B_{ver} 은 작은 양의 상수값과 큰 양의 상수값의 적절한 타협에 대한 지수 함수적으로 감소하는 값으로서 동역학적으로 선택한 함수이다.

추종 문제에서는 문턱값들의 선택은 두 경우로 나누어진 다. 첫 번째로 위치 오차의 초기값이 0이 아닌 경우는 위에서 설명한 조절 문제와 같이 생각할 수 있기 때문에, 문턱값 B_{pe} 와 B_{ve} 의 정의도 조절 문제와 같이 정의한다. 두 번째로 위치 오차의 초기값이 0인 경우는 처음에 위치 오차가 없었으니가 추종 제어기(tracking controller)가 매우 잘 동작을 하도록 설계되어졌다면, 계속 오차가 0의 근처에서 크게 벗어나지 않으며, 오차는 매우 작은 범위에서 머물 것이다. 따라서, 문턱값 B_{pe} 와 B_{ve} 의 정의도 위의 조절 문제 처럼 생각할 필요 없이 작은 양의 상수로 선택해 주면 될 것이다.

다음 단계인 **FI**는 발생한 완전 관절 고장이 검출된 후에 즉시 고장난 관절의 위치를 식별하는 단계이다. 이 단계에서는, 고장이 검출된 후에 실제 관절의 위치 신호와 비교하기 위하여 몇 개의 관절 위치 기준 신호(reference signal)들이 필요하다. 만일 n 개의 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터가 n 개 중 p_m 개의 완전히 고장난 관절을 가진다면, **FI** 단

계에서 필요한 기준 신호의 최대 개수는 $\frac{n!}{p_m!(n-p_m)!}$ 이며, 여기서 p_m 은 $p_m \leq \frac{n}{2}$ 을 만족하는 가장 큰 양의 정수이다.

FI 단계에서, i 번째 완전 관절 고장에 대해, $K_{fi}=0$ 이고, 따라서 i 번째 실제 관절 토크는 0이다. 어떠한 완전 고장 없이 남아있는 관절 토크는 제시된 강인한 적응 제어기 (2)-(5)에 의해 주어진 값들로부터 얻어진다. 완전히 고장난 관절 토크를 가진 강인한 적응 제어기가 로봇에 적용되어질 때, 기준 관절 위치 신호들은 추정 공칭 로봇 동역학 모델에 의해 수치적으로 갱신된다. 이들 값들은 모델링 오차나 외적 외관과 같은 불확실성에 기인해서 정확하지 않다. 그러나, 완전 관절 고장의 효과가 불확실성의 효과보다 훨씬 더 크고 더 치명적이기 때문에 어느 관절이 고장나는지 식별하는 것은 가능하다.

고장난 관절의 위치를 식별하기 위한 기준은 다음과 같다. 일반성을 유지하면서, 문제를 단순화하기 위하여 3개의 관절을 가지는 로봇 매니퓰레이터를 고려해보자. 이 3 관절 매니퓰레이터에 대하여 고장난 관절의 수는 $p_m \leq \frac{n}{2} = \frac{3}{2}$ 의 관계식에 의하여 $p_m=1$ 이 되어 오직 한 개의 관절이 완전히 고장난다고 생각할 수 있다. 그러므로, 기준 신호의 수는 $\frac{3!}{1!2!} = 3$ 으로서 세 개의 기준 신호가 필요하다.

a_{ci} 는 i 번째 완전 관절 고장의 발생을 나타내는 기준 관절 위치 벡터라 한다. 로봇 동역학 모델로부터 기준 관절 위치 신호 a_{ci} 를 계산하는 데 있어서, 우리는 오일러 적분 방법(Euler integration method)을 이용한다.

$$e_{ci} = a - a_{ci}, \quad \dot{e}_{ci} = \dot{q} - \dot{a}_{ci} \quad \text{for } i=1,2,3 \quad (19)$$

여기서, e_c 와 \dot{e}_c 는 각각 i 번째 관절이 완전 고장이 발생했을 때의 기준 관절 위치 오차 및 기준 관절 속도 오차이다.

첨언 6 : i 번째 완전 관절 고장의 발생을 나타내는 기준 관절 위치 벡터인 a_{ci} 의 계산은 그림 3에서 보면 알 수 있듯이 i 번째 실제 관절 토크는 0이 되지만, 어떠한 완전 고장 없이 남아있는 관절 토크는 제시된 강인한 적응 제어기 (2)-(5)에 의해 주어진 값들로부터 얻어진다. i 번째 완전히 고장난 관절 토크를 가진 강인한 적응 제어기가 로봇에 적용되어질 때, 기준 관절 위치 신호들은 추정 공칭 로봇 동역학 모델(nominal robot dynamic model)에 의해 수치적으로 갱신되어지며, a_{ci} 는 그림 3에서 보여지듯이 오일러 적분 방법에 의해 \dot{a}_{ci} 으로부터 얻어진다.

다시 요약해서 정의하면, a_{ci} 는 정상적인 상태에서의 실제 로봇에서 측정된 관절의 위치 값이 아니라, i 번째 실제 관절 토크가 0이 되는 완전 고장인 상태에서 수치적으로 계산되어지는 기준 관절 위치 값이 된다.

이 세 개의 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터에 대해 조사된 고장 동정화 조건은 다음과 같다.

- 조건 1 : $(\|e_{c1}\| \leq B_{pc} \text{ AND } \|\dot{e}_{c1}\| \leq B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c2}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c2}\| > B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c3}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c3}\| > B_{vc})$ 이면, 관절 1에서 완전 고장.
 - 조건 2 : $(\|e_{c1}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c1}\| > B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c2}\| \leq B_{pc} \text{ AND } \|\dot{e}_{c2}\| \leq B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c3}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c3}\| > B_{vc})$ 이면, 관절 2에서 완전 고장.
 - 조건 3 : $(\|e_{c1}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c1}\| > B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c2}\| > B_{pc} \text{ OR } \|\dot{e}_{c2}\| > B_{vc}) \text{ AND } (\|e_{c3}\| \leq B_{pc} \text{ AND } \|\dot{e}_{c3}\| \leq B_{vc})$ 이면, 관절 3에서 완전 고장.
- 만약, 실행 시간 $\leq \text{delay_period}$, 제어 루프를 계속한다.
 만약, 실행 시간 $> \text{delay_period}$, 다음의 그 외의 추가 조건을 점검한다.
- 그 외 추가조건 : $e_{\min} = \min(\|e_{c1}\|, \|e_{c2}\|, \|e_{c3}\|)$ 과 $\dot{e}_{\min} = \min(\|\dot{e}_{c1}\|, \|\dot{e}_{c2}\|, \|\dot{e}_{c3}\|)$ 의 계산.

보조조건 1 : $e_{\min} = \|e_{c1}\| \text{ AND } \dot{e}_{\min} = \|\dot{e}_{c1}\|$ 이면, 관절 1에서 완전 고장.

보조조건 2 : $e_{\min} = \|e_{c2}\| \text{ AND } \dot{e}_{\min} = \|\dot{e}_{c2}\|$ 이면, 관절 2에서 완전 고장.

보조조건 3 : $e_{\min} = \|e_{c3}\| \text{ AND } \dot{e}_{\min} = \|\dot{e}_{c3}\|$ 이면, 관절 3에서 완전 고장.

그 외 : 고장 위치를 식별하기 위한 결정을 하지 않음 (No decision): 제어루프를 계속한다.

여기서, B_{pc} 와 B_{vc} 는 적절히 선택된 사용자가 정의한 작은 양의 상수이며, 'min(x,y,z)'는 세 개의 인수의 최소값을 나타낸다. 또한, delay_period 는 FI 단계의 시작 시간으로부터 위의 보조조건을 조사하기 위한 시작 시간까지 적절히 선택된 사용자 정의 상수 기간이다.

첨언 7 : B_{pc} 는 관절 고장의 위치를 알아내기 위한 판단 근거로 하는 기준 문턱값(threshold value) 또는 오차 경계값 상수(error bound constant)를 나타내며, B_{vc} 는 속도 오차에 대한 문턱값을 나타낸다. 위의 고장 동정화 조건에서 알 수 있듯이 각 오차의 노움값들이 동시에 B_{pc} 와 B_{vc} 보다 작다면, 그 관절에서 완전 고장이 발생하였다고 판단한다. 여기서, B_{pc} 와 B_{vc} 는 0 근처의 작은 양의 상수로 설정한다.

고장 동정화 조건에서 보듯이, 문턱값 B_{pc} 와 B_{vc} 가 감소하며, delay_period 가 증가함에 따라, 고장 동정화 조건의 신뢰성과 정확성은 증가한다. 그러나, 고장난 관절의 위치를 찾기 위한 시간은 좀 더 오래 걸릴지도 모른다. 그러므로, B_{pc} , B_{vc} , delay_period 는 고장 동정화의 정확성과 시간의 타협을 통하여 적절히 선택되어야 한다.

완전 관절 고장에 대하여 위에서 제시된 고장 검출 및 동정화 방법은 그림 3에서 도해되어진다.

VI. 부분 및 완전 관절 고장을 가진 로봇

매니플레이터에 대한 강인한 적응 제어

로봇 매니플레이터에서 완전히 고장난 관절들(completely

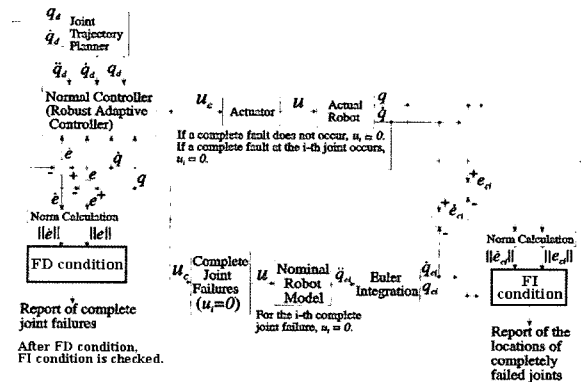


그림 3. 완전한 관절 고장에 대한 제안된 고장 검출 및 동정화 방법의 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of the proposed fault detection and identification method for complete joint failures.

failed joints)은 비구동 관절들을 가진 로봇 매니플레이터(robot manipulators with unactuated joints)에서 수동 관절(passive joints)로 생각될 수 있다. 그 때, 어떠한 완전히 고장난 관절을 배제하고 남아 있는 관절들은 능동 관절(active joints)로 간주될 수 있다. 어느 관절이 완전히 고장나는 동안에, 남아있는 능동 관절들은 여전히 아직도 어떤 부분적인 관절 고장을 경험할지도 모른다. 이 장에서는 완전 관절 고장이 5장에서 제시된 고장 검출 및 동정화 방법을 통해 검출된 후에 불확실성의 존재에서 부분 관절 고장과 함께 완전 관절 고장을 극복하기 위하여 강인한 적응 제어가 제안된다.

Bergerman과 Xu의 논문[3]과 Shin과 Lee의 논문[5]에서 제시된 바와 같이, 수동 관절을 가진 로봇 매니플레이터의 관절 제어 개념에 기반해서 완전 관절 고장에 대처하기 위해 각각의 관절에 제동기(brake)가 장착되어진다고 가정되어진다. 논문 [3]과 [5]의 제어 개념은 수동 관절을 가진 매니플레이터의 제어에 초점을 두고 로봇의 모든 관절의 위치 제어를 다루었으나, 본 논문에서는 고장 대응 관점에서 부분 관절 고장 및 완전 관절 고장에 모두 대처할 수 있도록 로봇의 각 관절의 위치 제어를 다루었다.

세 가지 모드를 가진 제어 절차는 [5]에서 보여진 것과 같은 절차로 다음과 같다. (i) 모드 1 : 수동 관절 제어 범칙에 의해 모든 완전히 고장난 관절들의 제어; (ii) 모드 2 : 거의 0의 속도를 가지고 그들 자신의 목표값(set-points or desired values)에서 모든 완전히 고장난 관절들의 제동; (iii) 모드 3 : 능동 관절 제어 범칙에 의하여 모든 남아 있는 부분적으로 고장난 관절들의 제어.

1. 부분 및 완전 관절 고장을 가진 로봇 매니플레이터의 동역학 모델

n 개의 링크를 가지는 로봇 매니플레이터의 동역학 모델 (1)은 부분적인 관절 고장뿐만 아니라 완전한 관절 고장에 기인해 다음과 같이 다시 쓰여진다.

$$M(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) = K_f u_c + d(t) = \begin{pmatrix} K_{fa} u_{ca} + d_a(t) \\ O_p + d_p(t) \end{pmatrix} \quad (20)$$

여기서, $q = (q_a^T \ q_b^T)^T \in R^n$ 는 관절의 위치 벡터, $q_a \in R^r$ 는 능동 관절의 위치 벡터, $q_b \in R^p$ 는 수동 관절 또는 완전히 고장난 관절의 위치 벡터, $n = r + p$, $u_c = (u_{ca}^T \ u_{cb}^T)^T \in R^n$ 는 명령 제어 토크, $u_{ca} \in R^r$ 는 능동 관절에서의 명령 제어 토크이며, $O_b \in R^p$ 는 완전 관절 고장으로 인한 수동 관절에서 0의 토크 입력, 그리고 $d(t) = (d_a^T \ d_b^T)^T$ 는 경계값을 가지는 외란이다. 구동기 토크 계수 행렬 $K_f = \begin{pmatrix} K_{fa} & O_{ap} \\ O_{pa} & O_{pb} \end{pmatrix} \in R^{n \times n}$, 여기서 $K_{fa} \in R^{r \times r}$ 는 K_f 의 능동 부분이고, 물론 K_f 의 수동 부분인 O_{pb} 은 0이며, 결합(coupling) 부분인 O_{ap} 와 O_{pa} 는 모두 0 행렬이다.

방정식 (20)은 다음과 같이 분할된다.

$$\begin{pmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_a \\ \dot{q}_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{fa} u_{ca} + d_a(t) \\ O_b + d_b(t) \end{pmatrix} \quad (21)$$

여기서, $M_{aa} \in R^{r \times r}$ 와 $M_{bb} \in R^{p \times p}$ 이 대칭 양한정 행렬이며, $M_{ap} = M_{pa}^T \in R^{r \times p}$ 그리고, $F(q, \dot{q}) = (F_a^T \ F_b^T)^T = C(q, \dot{q})\dot{q} + F_f(\dot{q}) + G(q)$ 이다.

2. 완전히 고장난 관절의 제어

분할된 동역학 방정식 (21)을 이용하여 완전히 고장난 관절에 대한 동역학 방정식은

$$\ddot{q}_b = M_{bu} K_{fa} u_{ca} + H_b \in R^p \quad (22)$$

여기서, 각 항들은 $M_{bu} = -M_{bb}^{-1} M_{ba} M_{aa}^{-1} \in R^{p \times r}$, $M_{bb} = M_{bb} - M_{ba} M_{aa}^{-1} M_{ab} \in R^{p \times p}$ 그리고 $H_b = M_{bu} (d_a - F_a) + M_{bb}^{-1} (d_b - F_b)$ 이다. 또한, M_{bb} 도 대칭 양한정 행렬이 된다.

수동 관절의 위치 오차 및 확장 오차는 $e_b = q_b - q_{b,d}$ 와 $s_b = \dot{e}_b + \Lambda_b e_b$ 에 의해 표시되어지며, 여기서 $q_{b,d}$ 는 수동 관절의 목표 위치 벡터이고, Λ_b 는 양한정 상수 이득 행렬이다.

이 때, 수동 관절 또는 완전히 고장난 관절에 대한 강인한 적응 제어를 다음과 같이 제안한다.

$$u_{ca} = K_{fa}^{-1} M_{bu}^* (V_b - H_b) \in R^r \quad (23)$$

$$V_b = V_b + \Delta V_b \in R^p \quad (24)$$

$$V_b = \ddot{q}_b - (K_b + \Lambda_b) \dot{e}_b - K_b \Lambda_b e_b \in R^p \quad (25)$$

$$\Delta V_b = -\hat{\rho}_b \frac{\alpha_b}{\|\alpha_b\| + \epsilon_b}, \quad \alpha_b = R_b s_b \quad (26)$$

$$\hat{\rho}_b = \theta_b^T \psi_b, \quad \psi_b = (1 \ \|\dot{q}\|^2 \ \|\ddot{q}_b\| \ \|e_b\| \ \|e_b\| \ \|\dot{q}\|)^T \quad (27)$$

$$\theta_b = \Gamma_b \left(\frac{\psi_b \|\alpha_b\|^2}{\|\alpha_b\| + \epsilon_b} - \sigma_b \theta_b \right) \in R^6 \quad (28)$$

여기서, $r \geq p$ 이며, 결합 행렬(coupling matrix) $M_{ba} \in R^{p \times r}$ 이 전계수(full rank)라는 가정하에서 구해지는 의사역행렬

(pseudoinverse matrix) $M_{bu}^* = M_{bu}^T (M_{bu} M_{bu}^T)^{-1}$ 이며, M_{ba} 또한 전계수행렬이어야하며, $H_b = -M_{bu} F_a - M_{bb}^{-1} F_b$ 이다. M_{bb} , M_{ba} , M_{ab} , M_{aa} , F_a , F_b 은 공칭 동적 파라미터를 가진 공칭 동적 모델항(nominal dynamic model terms)이며, $K_{fa} \in R^{r \times r}$ 또한 추정된 구동기 토크 계수 행렬의 공칭 모델 행렬이다. 이득 K_b , R_b , Γ_b 는 양한정 상수 행렬이며, ϵ_b 와 σ_b 는 작은 양의 상수이다.

따라서, 수동 관절의 개수는 능동 관절의 개수보다 많지 않아야 하며, 동적 결합력(dynamic coupling)이 없는 로봇 시스템은 수동 관절을 제어하기 어렵다.

s_b 에 대한 오차 동역학 방정식은 $\dot{s}_b = -K_b s_b + \Delta V_b + \eta_b$, 여기서 $\eta_b = (M_{bu} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{bu}^* - I_p) V_b + (H_b - M_{bu} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{bu}^* H_b)$ 는 집중 불확실성 항이며, I_p 는 $p \times p$ 단위 행렬이다.

가정 1과 같이, $\|M_{bu} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{bu}^* - I_p\| \leq \bar{\theta}_p < 1$ 이 되도록 $\bar{\theta}_p > 0$ 인 미지의 양수 $\bar{\theta}_p$ 이 존재한다고 가정한다.

앞의 4장에서 보여진 정리 1의 증명과 같은 방법으로, 수동 관절의 추종 오차 e_b 와 \dot{e}_b 은 Lyapunov 함수를 $V = \frac{1}{2} \{s_b^T R_b s_b + (1 - \bar{\theta}_p) \theta_b^T \Gamma_b^{-1} \theta_b\} = \frac{1}{2} z_b^T P_b z_b$, 여기서 $\theta_b = \theta_b - \theta_{b,d} \in R^6$ 으로 놓음으로써 전역균등궁극유계(GUUB)되어진다고 증명되어질 수 있다. 결국, Lyapunov 함수는 다음과 같이 유계되어진다고 수식을

$$V(t, z_b(t)) \leq \frac{w_b(\rho_b, \hat{\rho}_b, \|\alpha_b\|)}{\mu_b} + \left[V(0, z_b(0)) - \frac{w_b(\rho_b, \hat{\rho}_b, \|\alpha_b\|)}{\mu_b} \right] \exp(-\mu_b t),$$

여기서 $\mu_b = \frac{\lambda_{\min}(Q_b)}{\lambda_{\max}(P_b)}$, $Q_b = \begin{pmatrix} 2R_b K_b & \\ & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \bar{\theta}_p \\ \sigma_b \end{pmatrix}$, 그리고

$$w_b(\rho_b, \hat{\rho}_b, \|\alpha_b\|) = \frac{1}{2} (1 - \bar{\theta}_p) \sigma_b \theta_b^T \theta_b + \left\{ \left(\frac{\|\alpha_b\| \epsilon_b}{\|\alpha_b\| + \epsilon_b} \right) \cdot [\hat{\rho}_b \bar{\theta}_p + \rho_b (1 - \bar{\theta}_p)] \right\}$$

따라서, $\|s_b\| \leq \left[\frac{2V}{\lambda_{\min}(R_b)} \right]^{\frac{1}{2}}$ 이며, $\|\theta_b\| \leq \left[\frac{2V}{(1 - \bar{\theta}_p) \lambda_{\min}(\Gamma_b^{-1})} \right]^{\frac{1}{2}}$ 이다. s_b 와 θ_b 는 GUUB되어

지기 때문에, $s_b = \dot{e}_b + \Lambda_b e_b$ 의 성질에 의해, 수동 관절 또는 완전히 고장난 관절의 추종 오차 e_b 와 \dot{e}_b 도 또한 GUUB이라고 말할 수 있다.

3. 능동 관절의 제어

완전히 고장난 관절이 제어 절차의 모드 2에서 그것의 목표 위치의 근처에서 고정된 후에, 여전히 부분 관절 고장으로 성능 저하를 경험하고 있는 능동 관절을 제어하기 위

하여 모드 3에서 사용될 강인 제어 기법이 본 3절에서 제시되어진다.

모든 수동 관절 또는 완전히 고장난 관절 q_p 는 제동기 (brakes)에 의해 고정되어지기 때문에, $\dot{q}_p = \ddot{q}_p = 0$. 그 때, 고정된 수동 관절을 가진 능동 관절만을 가진 로봇의 동역학 방정식은

$$\ddot{q}_a = M_{aa}^{-1} K_{fa} u_{ca} + H_a \quad (29)$$

여기서, $H_a = M_{aa}^{-1}(d_a - F_a)$.

능동 관절의 오차들은 $e_a = q_a - q_{a_s}$ 와 $s_a = \dot{e}_a + \Lambda_a e_a$, 여기서 $q_{a_s} \in R^r$ 는 목표 위치 벡터이며, Λ_a 는 양한정 이득 행렬이다.

이 때, 고정된 완전히 고장난 관절 또는 수동 관절을 가진 로봇 매니플레이터의 남아 있는 능동 관절에 대한 강인한 적응 제어를 다음과 같이 제안한다.

$$u_{ca} = K_{fa}^{-1} M_{aa} (V_{a_s} - H_a) \in R^r \quad (30)$$

$$V_{a_s} = V_a + \Delta V_a \in R^r \quad (31)$$

$$V_a = \ddot{q}_{a_s} - (K_a + \Lambda_a) \dot{e}_a - K_a \Lambda_a e_a \in R^r \quad (32)$$

$$\Delta V_a = -\hat{\rho}_a \frac{\alpha_a}{\|\alpha_a\| + \epsilon_a}, \quad \alpha_a = R_a s_a \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_a &= \hat{\theta}_a^T \psi_a, \\ \psi_a &= (1 \|\dot{q}\|^2 \|\ddot{q}_{a_s}\| \|\dot{e}_a\| \|e_a\| \|\dot{q}\|)^T \end{aligned} \quad (34)$$

$$\hat{\theta}_a = \Gamma_a \left(\frac{\psi_a \|\alpha_a\|^2}{\|\alpha_a\| + \epsilon_a} - \sigma_a \hat{\theta}_a \right) \in R^6 \quad (35)$$

여기서, K_a , R_a 그리고 Γ_a 는 양한정 상수 행렬이며, ϵ_a 와 σ_a 는 작은 양의 상수이다.

s_a 에 대한 오차 동역학 방정식은 $\dot{s}_a = -K_a s_a + \Delta V_a + \eta_a$, 여기서 $\eta_a = (M_{aa}^{-1} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{aa} - I_a) V_{a_s} + (H_a - M_{aa}^{-1} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{aa} H_a)$ 는 집중 불확실성 항이며, I_a 는 $r \times r$ 단위 행렬이다.

가정 1과 같이, $\|M_{aa}^{-1} K_{fa} K_{fa}^{-1} M_{aa} - I_a\| \leq \overline{\theta}_{a_s} < 1$ 이 되는 $\overline{\theta}_{a_s} > 0$ 이 존재한다고 또한 가정한다.

또한, 4장에서 보여진 안정도의 증명과 유사하게, 다음의 Lyapunov 함수 $V = \frac{1}{2} \{ s_a^T R_a s_a + (1 - \overline{\theta}_{a_s}) \hat{\theta}_a^T \Gamma_a^{-1} \hat{\theta}_a \} = \frac{1}{2} z_a^T P_a z_a$, 여기서 $\hat{\theta}_a = \hat{\theta}_a - \theta_a \in R^6$ 를 사용함으로써 능동 관절의 추종 오차 e_a 와 \dot{e}_a 가 전역균등궁극유계 (GUUB)되어진다는 것이 또한 증명되어질 수 있다. 앞의 수동 관절에서의 안정도 증명과 유사하게 Lyapunov 함수는 다음과 같이 유계되어진다.

$$V(t, z_a(t)) \leq \frac{w_a(\rho_a, \hat{\rho}_a, \|\alpha_a\|)}{\mu_a} + [V(0, z_a(0))$$

$$- \frac{w_a(\rho_a, \hat{\rho}_a, \|\alpha_a\|)}{\mu_a}] \exp(-\mu_a t), \text{ 또한, } \mu_a = \frac{\lambda_{\min}(Q_a)}{\lambda_{\max}(P_a)},$$

$$Q_a = \begin{pmatrix} 2R_a K_a & 0 \\ 0 & (1 - \overline{\theta}_{a_s}) \sigma_a \end{pmatrix}, \text{ 그리고 } w_a(\rho_a, \hat{\rho}_a, \|\alpha_a\|) = \frac{1}{2} (1 - \overline{\theta}_{a_s}) \sigma_a \theta_a^T \theta_a + \left\{ \left(\frac{\|\alpha_a\| \epsilon_a}{\|\alpha_a\| + \epsilon_a} \right) \cdot [\hat{\rho}_a \overline{\theta}_{a_s} + \rho_a (1 - \overline{\theta}_{a_s})] \right\} \text{이다.}$$

$$\text{따라서, } \|s_a\| \leq \left[\frac{2V}{\lambda_{\min}(R_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{이며, } \|\hat{\theta}_a\| \leq$$

$$\left[\frac{2V}{(1 - \overline{\theta}_{a_s}) \lambda_{\min}(\Gamma_a^{-1})} \right]^{\frac{1}{2}} \text{이다. } s_a \text{와 } \hat{\theta}_a \text{는 GUUB이기}$$

때문에, $s_a = \dot{e}_a + \Lambda_a e_a$ 에 의해, 능동 관절 또는 부분적으로 고장난 관절의 추종 오차 e_a 와 \dot{e}_a 도 또한 GUUB된다.

첨언 8: 첨언 4에서 언급되어졌듯이, 제어기 (23)과 (30)에서, $K_{fa} \in R^{r \times r}$ 도 단위 행렬로서 설정되어 제어기에서 이용되어질 수 있다.

VII. 모의 실험 연구

모의 실험되는 로봇 시스템은 그림 4에서 보여지는 것과 같이, 수평 평면 위에서 움직이는 3개의 링크를 가지는 평면 로봇 매니플레이터이다. 길이(L_i), 질량(m_i), 관성모멘트(I_i), 그리고 질량 중심 위치(L_{ci})와 같은 로봇 파라미터 값들은 각각 $i=1, 2, 3$ 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 $F_f(\dot{q})$ 은 또한 모의 실험에서 고려되어진다. 각 관절에서 점성, 쿨롱, 정적 마찰 계수들은 각각 0.05 (Nm sec/rad), 0.01 (Nm), 0.02 (Nm)로 할당되어진다. 각 관절은 초기에 구동기(모터)와 제동기를 가진다고 가정된다.

본 모의 실험에서 사용된 불확실성의 양은 다음과 같다. 제어기들에서 이용된 공칭 동적 파라미터들은 실제 동적 파라미터들의 70%까지 설정되어진다. 각 관절로 삼입되는 외적 외란은 랜덤 잡음(random noise)이며, 그것의 각 크기가 0.5 이내로 제한되어지는 데, 즉 $i=1, 2, 3$ 에 대해 $|d_i(t)| \leq 0.5$ 이다.

제어 목적은 초기 위치 $q_1(0) = -90(\text{deg})$ 와 $q_2(0) = q_3(0) = 0(\text{deg})$ 로부터 최종 위치 $q_{1_s} = q_{3_s} = 90(\text{deg})$ 와 $q_{2_s} = -90(\text{deg})$ 까지의 관절 위치 제어이다. 모든 최종 목표값의 관절 속도 및 가속도들은 0의 값으로 설정되어진다.

본 모의 실험 시나리오는 시간의 경과에 따라 다음과 같다. 전체 실험 시간은 7초이다. 초기에 관절 고장이 전혀 없다. 초기 시간으로부터 1초까지 로봇은 어떠한 관절 고장도 경험하지 않아 정상 상태를 가진다. 모든 관절들에서 부분 관절 고장이 1초에서 일어난다. 부분 관절 고장이 일어나는 이 시간은 T_p 에 의해 표시된다. 이 시간부터 종료 때까지, $K_{\beta}(t) = K_{\beta}(t) = 1.0 + 0.5 \sin(2\pi t/7)$ 이며,

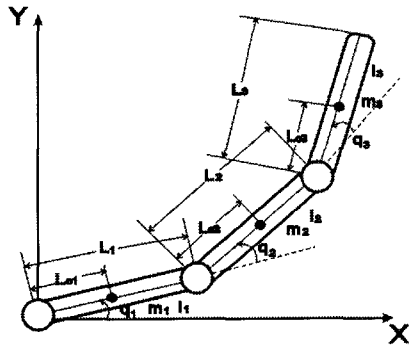


그림 4. 3개의 링크를 가진 평면 로봇 매니퓰레이터.
Fig. 4. A three-link planar robot manipulator.

$K_p(t) = 1.0 + 0.5 \cos(2\pi t/7)$ 이다. 2초에서 완전 관절 고장이 어느 한 관절에서 발생한다. 완전 관절 고장이 일어나는 이 시간은 T_c 라고 표현한다. 따라서, 그 관절에 적용되는 실제 토크는 완전 관절 고장이 발생한 후에는 항상 0이다. 다시 말해서, 어느 한 관절에서 K_{pi} 는 $T_c = 2(\text{sec})$ 이후에는 0이 된다. 다른 남아있는 2개의 관절들은 위의 부분 관절 고장에 의해 여전히 끝까지 성능이 저하된다. 샘플링 시간(sampling time)은 0.01초이다.

본 모의 실험은 완전히 고장난 관절의 위치에 따라 두 가지 경우가 고려되어졌다: 1. Case 1: 두 번째 관절 (q_2)이 완전히 고장난다; 2. Case 2: 세 번째 관절 (q_3)이 완전히 고장난다. 위에서 언급한 바와 같이, 이 완전 관절 고장은 2초부터 이후 끝까지 일어난다.

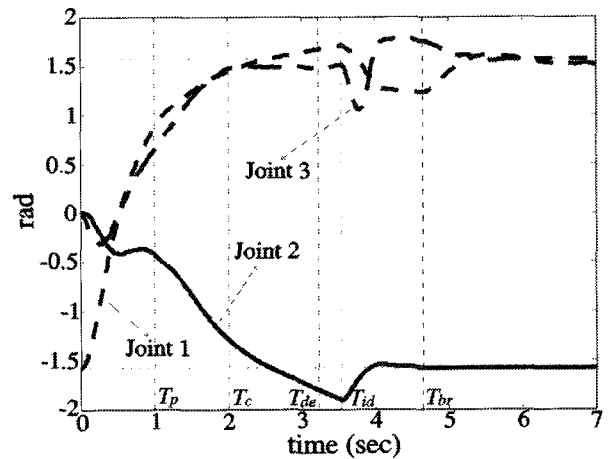
위의 모의 실험 처리 과정에서 사용된 제어기들은 관절 고장에 대응하고 요구된 제어 성능을 유지하기 위하여 시간의 경과에 따라 다음과 같다: 제안된 제어기 (2)-(5)는 완전 관절 고장이 제안된 고장 검출 및 동정화 방법에 의해 검출되어질 때까지 초기 시간으로부터 관절 고장이 없는 정상 동작뿐만 아니라 부분 관절 고장에 대처하기 위하여 사용된다. 완전 관절 고장이 검출된 후에, 로봇은 비구동 관절을 가진 로봇으로 간주되어질 수 있고, 로봇 제어기는 완전히 고장난 관절 또는 수동 관절을 제어하기 위하여 제시된 수동 관절 제어기 (23)-(28)로 전환된다. 수동 관절이 그것의 목표 위치의 근처에서 제동기에 의해 고정된 후에, 로봇 제어기는 오직 부분 관절 고장만을 가지고 남아있는 관절들을 제어하기 위하여 제시된 능동 관절 제어기 (30)-(35)로 다시 전환되어진다.

제어기 (2), (23)와 (30)에서 사용되어진 추정된 구동기 토크 계수 행렬 K_f 과 K_{fa} 는첨언 4와 첨언 8에서 언급했듯이, 보통 로봇 시스템에 초기에 어떠한 관절 고장이 있는지 예상하기 어렵기 때문에, 본 모의 실험에서 단위 행렬로 할당되며, 따라서 그 로봇이 정상 상태에서 동작되어진다고 기대할 수 있다.

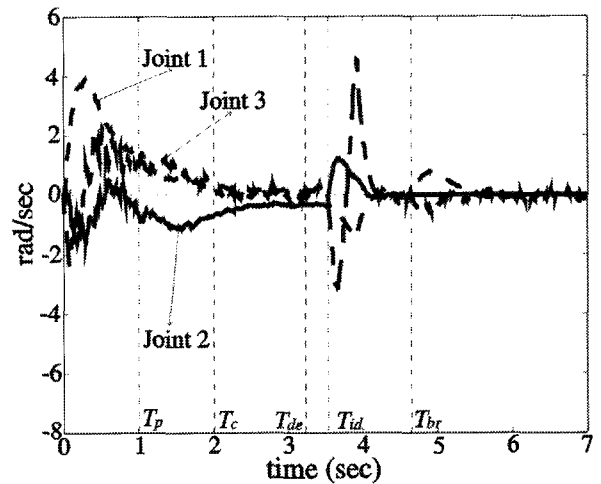
모의 실험에서 수행된 두 가지 경우에 대해, 고장 검출 방법에서 쓰인 관절 오차의 경계값 B_{pc} 와 B_{vc} 는 $B_{pc} = \|e_{pi}\| + (\|e_{i0}\| + e_{i0} - \|e_{pi}\|) \exp(-\gamma_{pc} t)$ 와 $B_{vc} =$

$\| \dot{e}_{pi} \| + (\| \dot{e}_{pi} \| + \dot{e}_{i0} - \| \dot{e}_{pi} \|) \exp(-\gamma_{vc} t)$ 이다. 여기서, 설정된 상수들은 $\|e_{pi}\| = 0.01$, $\| \dot{e}_{pi} \| = 0.01$, $e_{i0} = 0.8$, $\dot{e}_{i0} = 0.8$, 그리고 $\gamma_{pc} = 0.9$, $\gamma_{vc} = 0.9$ 이다. 고장 동정화 방법에서 사용된 문턱값(threshold value)들은 $B_{pc} = 0.001$ 과 $B_{vc} = 0.001$ 이다. 또한, $\text{delay_period} = 0.3$ 초가 사용된다. 이들 문턱값들은 Case 1과 Case 2에 대해 공통적으로 쓰인다.

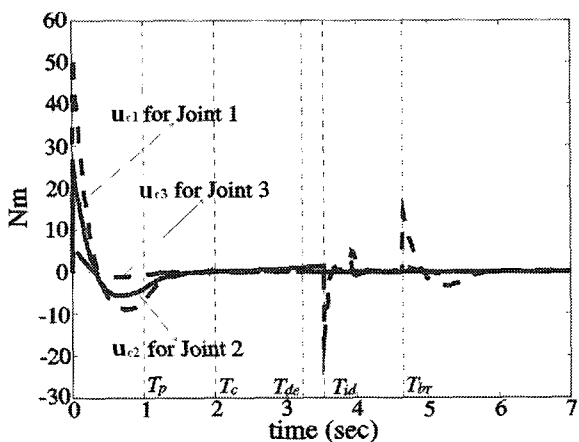
Case 1에 대해, 제어 결과는 그림 5에서 보여진다. FD 단계에 의해 완전 관절 고장에 대하여 검출된 고장 검출 시간 (T_{de})은 3.23초이다. FI 단계에 의한 완전 관절 고장의 동정화된 관절 위치는 두 번째 관절이며, 완전 고장의 관절 위치가 완전히 추정되어졌던 시간 (T_{id})이 3.54초이다. 3.54초 후에 로봇 매니퓰레이터는 수동 관절을 가진 매니퓰레이터의 제어 방법에 의하여 제어되어진다. 완전히 고장난 관절 (q_2)의 제동 시간 (T_{br})이 4.64초이다. 4.64초 후에 두 번째 관절은 제동되어지며, 오직 부분 관절 고장을 가지며 남아있는 두 능동 관절은 그들의 목표 위치로 성공적으로 제어되어진다.



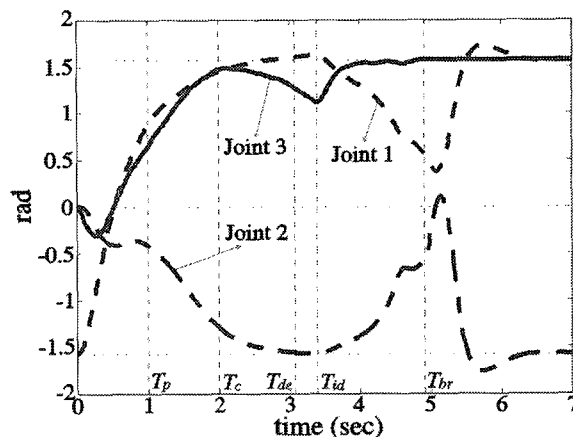
(a) 관절각 (q)



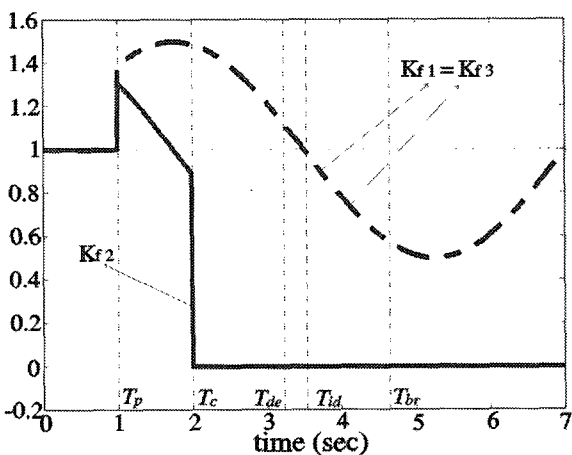
(b) 속도 오차 (\dot{e})



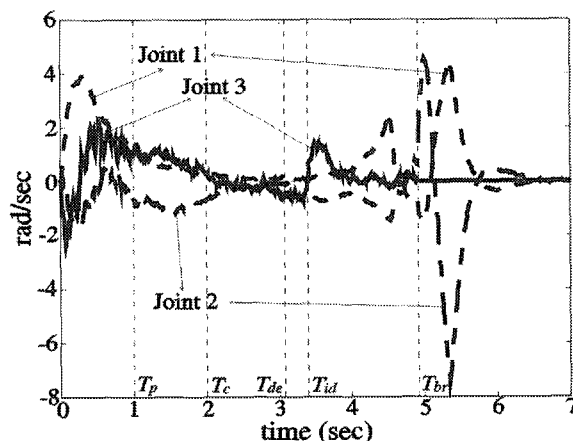
(c) 제어 법칙 (u_c)



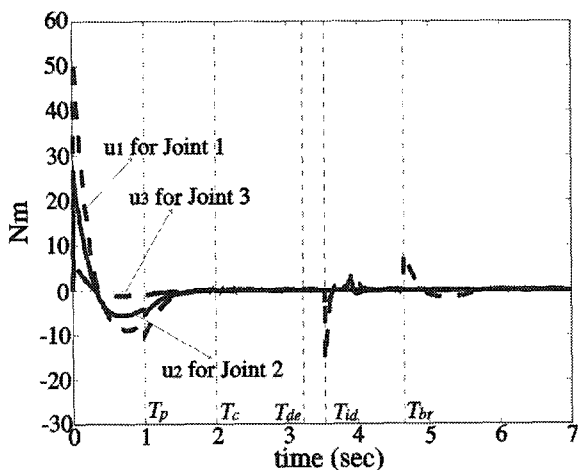
(a) 관절각 (q)



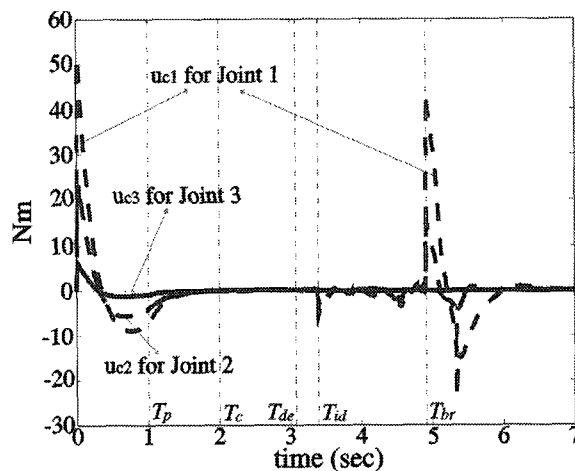
(d) 구동기 토크 계수 (K_{fi})



(b) 속도 오차 (e)



(e) 구동기 토크 (u)



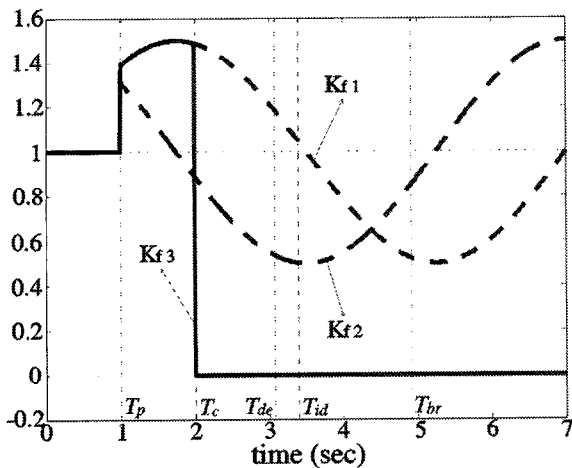
(c) 제어 법칙 (u_c)

그림 5. 두 번째 관절 (q_2)이 완전히 고장나는 Case 1에 대한 모의 실험 결과: [(a)-(e)]

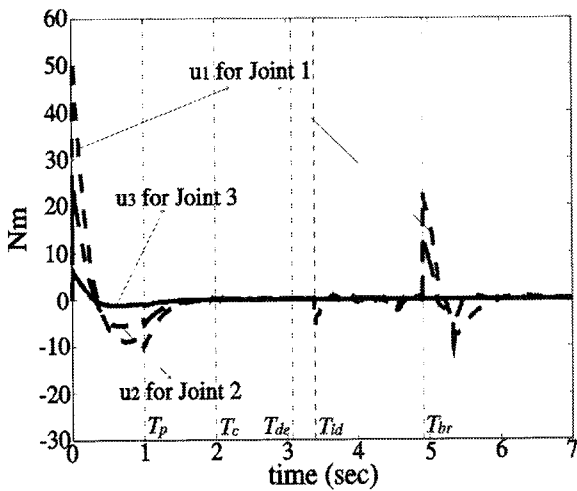
Fig. 5. Simulation results for Case 1 that the second joint (q_2) fails completely: [(a)-(e)]

Case 2에 대해, 모의 실험의 제어 결과는 그림 6에서 제시되어진다. 완전 관절 고장에 대한 검출 시간 (T_{de})은

3.08초이다. 완전한 고장의 식별된 관절의 위치는 세 번째 관절이며, 완전 고장의 관절 위치가 완전히 추정되어졌던 시간 (T_{id})은 3.39초이다. 완전히 고장난 관절의 제동 시간 (T_{br})은 4.91초이다. 완전히 고장난 관절이 세 번째 관절 및 부분적으로 고장난 첫 번째 관절과 두 번째 관절 모두 불확실성이 있는 상황하에서도 궁극적으로 성공적으로 만족



(d) 구동기 토크 계수 (K_{fi})



(e) 구동기 토크 (u)

그림 6. 세 번째 관절 (q_3)이 완전히 고장나는 Case 2에 대한 모의 실험 결과: [(a)~(e)]

Fig. 6. Simulation results for Case 2 that the third joint (q_3) fails completely: [(a)~(e)]

스럽게 목표값으로 제어되어진다는 것을 알 수 있다.

고장 상황을 나타내는 구동기 토크 계수 K_{fi} 는 그림 5와 그림 6의 각 결과에서 보여진다. 동역학 방정식 (1)에서 보여진 바와 같이 명령 토크 또는 제어 법칙 (u_c)과 실제 토크 (u) 사이의 관계는 $u = K_f \cdot u_c$ 이다. 고장이 없는 정상 상태에서, 구동기 토크 계수는 $K_{f1} = K_{f2} = K_{f3} = 1$ 이다.

그림 5와 그림 6에서 보여진 모의 실험 결과로부터, 부분 및 완전 관절 고장은 성공적으로 적응 및 대처되어졌으며, 관절 고장이 일어났다 할지라도 불확실성의 존재에서 원래 주어진 작업 과제가 만족스럽게 완수되어짐을 알 수 있다. 따라서, 제안된 강인한 내고장 제어 기법이 관절 고장과 불확실성에 유효하며 강인하다는 것이 보여졌다.

VIII. 결론

본 논문에서, 구동기 고장을 극복할 수 있는 로봇 매니퓰레이터에 대한 강인한 내고장 제어 구조가 제시되어졌다. 제안된 내고장 로봇 제어 시스템은 불확실성의 존재에서 부분 관절 고장과 완전 관절 고장을 작업 중에 온라인으로 모두 적응하며 대처할 수 있다. 개발된 계층적 온라인 내고장 제어 시스템은 부분 관절 고장을 극복하는 강인한 적응 제어기, 고장 검출 및 대응 처리, 그리고 부분 관절 고장뿐만 아니라 완전 관절 고장을 극복하는 강인한 적응 제어기로 구성되어진다. 제안된 고장 검출 기법은 위치 오차 및 속도 오차를 측정하기 위해 단지 회전위치계(encoder)와 회전속도계(tachometer)를 사용하며, 관절 고장을 검출하기 위한 어떤 다른 특별한 하드웨어들을 요구하지 않는다.

기존에 다른 논문들은 부분 관절 고장과 완전 관절 고장을 모두 극복하는 강인한 내고장 제어 시스템을 제시하지 못했으며, 또한, 완전 관절 고장에 대한 온라인 고장 검출 기법을 제안하면서, 불확실성을 극복하는 강인 제어기를 제시하지 못하였다. 내고장 제어 시스템에 대한 논문[10]은 자유 진동 관절 고장을 다루지 않았으며, 구체적인 강인 제어 기법을 제시하지 않았다. 따라서, 본 논문은 타 논문과 비교해, 고장 검출 및 식별 능력을 가지며, 부분 관절 고장과 완전 관절 고장에 모두 작업 중에 온라인으로 대처하여 불확실성을 극복하는 강인한 내고장 제어 시스템을 제시하였다.

로봇 시스템에 대한 제안된 강인한 내고장 제어 기법은 모의 실험 결과들을 통해 그 타당성을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] H. Arai and S. Tachi, "Position control of a manipulator with passive joints using dynamic coupling," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 4, pp. 528--534, Aug., 1991.
- [2] G. Oriolo and Y. Nakamura, "Control of mechanical systems with second-order nonholonomic constraints: underactuated manipulators," *Proc. of the 30th Conf. on Decision and Control*, pp. 2398--2403, Dec., 1991.
- [3] M. Bergerman and Y. Xu, "Robust joint and cartesian control of underactuated manipulators," *The ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 118, no. 3, pp.557--565, Sept., 1996.
- [4] H. Arai, K. Tanie and N. Shiroma, "Nonholonomic control of a three-DOF planar underactuated manipulator," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 5, pp. 681--695, Oct., 1998.
- [5] J. -H. Shin and J. -J. Lee, "Dynamics and robust control of underactuated manipulators using brakes at passive joints," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 18, pp. 1796-1797, Sept., 1998.
- [6] J. -H. Shin and J. -J. Lee, "Trajectory planning and robust adaptive control for underactuated manipulators," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 17, pp. 1705-1706, Aug., 1998.

- [7] Y. Nakamura, T. Suzuki and M. Koinuma, "Nonlinear behavior and control of a nonholonomic free-joint manipulator," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 6, pp. 853--862, Dec., 1997.
- [8] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.
- [9] J. D. English and A. A. Maciejewski, "Fault tolerance for kinematically redundant manipulators anticipating free-swinging joint failures," *Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 460--467, 1996.
- [10] 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, Aug., 1995.
- [11] E. Papadopoulos and S. Dubowsky, "Failure recovery control of space robotic systems," *Proc. of the 1999년~2001년 동대학 정보전자연구소 연수연구원. American Control Conf.*, vol. 2, pp. 1485--1490, 1991.
- [12] 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, June, 1992.



신진호

1968년 12월 14일생. 1991년 한양대학교 공과 대학 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사), 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사). 2002년~현재 동의대학교 메카트 로닉스공학과

전임강사. 관심분야는 로봇틱스 비선형제어, 내고장/신뢰 제어, 지능 시스템, 인간-컴퓨터(로봇) 상호작용.