

퍼지알고리즘을 이용한 불확실한 로봇매니퓰레이터의 설계

정회원 최수열*, 박재형**, 이상관***

A Design of Uncertainty Robot Manipulators using Fuzzy Algorithms

Su-Yeol Choi*, Jae-Hyung Park**, Sang-Kwan Lee*** *Regular Members*

요약

불확실하고 외란을 갖는 로봇 매니퓰레이터를 제어하기 위해서 비선형을 갖는 건실한 제어가 적합하다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 제어기는 높은 입력이 요구되어 진다. 본 논문에서는 제한된 입력 내에서 안정된 경로를 갖는 새로운 제어기를 제안한다. 이 제어기는 퍼지논리를 바탕으로 설계되었다. 시뮬레이션을 통한 결과 불확실성을 갖는 해저 2축 로봇 매니퓰레이터에 대해 제안된 알고리즘이 기존의 건실제어기 보다 제어성능이 향상됨을 확인하였다.

Key Words : Uncertainty, Fuzzy algorithm, Torque saturation

ABSTRACT

To control robot manipulators with model uncertainties and disturbances, nonlinear robust controllers are appropriate. Those robust controllers often require high torques so that actuating joint motors can face torque saturation. In this paper, a new scheme is presented to achieve stable path tracking in the presence of torque saturation. The scheme generates a new stable path based on the initial desired path using a fuzzy logic. As a result of the study by using computer simulation, we identified that improvement control evaluation more in case of connecting proposed algorithm using by fuzzy robust controller than conventional combined robust controller to the an uncertain two degree-of-freedom underwater robot manipulator.

I. 서론

로봇 매니퓰레이터는 생산라인 외에 해저와 같은 불확실한 환경에서 작업을 하는 경우가 많다. 이러한 불확실한 환경 외에 로봇 모델에도 불확실성이 존재하며, 로봇 매니퓰레이터의 운동 모델도 비선형성이 매우 커서 용접작업과 같은 경로 추적제어에 어려움이 따른다. 이와 같은 비선형적이고 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 경로제어를 위하여 비선형 형태의 여러 제어 알고리즘들이 소개되었다. 이러한

알고리즘에 대한 논문들로는 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치를 보상하는 슬라이딩모드 제어 알고리즘으로 매니퓰레이터 적용에 적용한 연구가 있었고^[1], Corless등이 제안한 비선형 제어기로 비선형시스템의 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치를 정의하여 이를 제어입력에 반영하는 제어 알고리즘에 관한 연구가 있었다.^[2] 그리고 이와 같은 제어기를 계산토크 제어기와 함께 로봇 매니퓰레이터의 경로제어에 적용한 논문들이 있었다.^[3] 소개된 비선형 제어기들은 불확

※ 본 연구는 2007년 서일대학 연구비 지원에 의하여 수행 되었습니다.

* 서일대학 정보전자과 (semisan@seoil.ac.kr), ** (주) 오토일렉스 선임연구원, *** 부산가톨릭대학교 컴퓨터공학과(sklee@cup.ac.kr)
논문번호 : 08003-0115, 접수일자 : 2008년 1월 15일

실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치와 매니플레이터의 속도를 제어입력에 반영하기 때문에 추정오차나 외란이 크거나 빠른 이동속도가 설정되면 매우 큰 제어 입력토크가 요구된다. 이 제어기들의 현실성은 매우 큰 입력토크의 가정 하에서 보장된다. 그러나 로봇 매니플레이터의 구동기인 모터들은 직렬 형태인 매니플레이터의 각 축에 연결되어 자중을 누적시키므로 높은 토크모터의 선정에 제약이 있다. 따라서 매니플레이터의 제어에 구동기의 제한된 입력을 고려하여야 한다. 이러한 제한된 토크입력을 갖는 로봇 시스템의 제어에 대한 연구 중에서 로봇 매니플레이터의 제어에 슬라이딩모드 제어를 적용하고 최적화기법을 이용하여 제한된 토크 내에서 작동될 수 있는 새로운 경로를 생성하는 알고리즘에 관한 것들이 있다.^[4,5] 또한 추적오차의 범위를 조정하는 ε 을 퍼지논리로 제어하여 제한된 입력 내에서 매니플레이터를 구동하는 방법에 대한 연구^[6]와 경로 추적을 위한 주제어기로 H_∞ 제어를 적용하고 토크를 제한하는 알고리즘을 적용하여 경로를 추적하는 논문이 있다.^[7] 여기서 토크 제한 알고리즘은 지정된 토크를 초과할 때 경로시간을 조정하였다. 본 논문에서는 불확실한 로봇 매니플레이터의 제어에 건실제어기를 적용할 때 발생하는 과도한 입력토크를 해결하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 입력토크의 크기에 영향을 미치는 추적 경로의 속도를 퍼지 논리를 이용하여 제한된 입력토크 내에서 건실제어기가 동작하도록 하였다.^[8] 제안된 알고리즘은 기준 경로를 바탕으로 새로운 경로를 퍼지논리를 이용하여 생성하여 건실제어기의 제한된 입력 토크 내에 존재하도록 하며 매니플레이터의 동작속도를 제한된 입력토크 내에서 증가시킬 수 있는 논리로 구성되었다. 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 불확실성이 많은 2 자유도 해저로봇 매니플레이터를 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

II. 해저 로봇 매니플레이터의 운동방정식

해저에서 로봇 매니플레이터의 운동은 부가 질량, 부가관성모멘트 및 항력과 같은 불확실한 파라미터에 의하여 많은 영향을 받는다. 우선, 해저에서 매니플레이터에 작용하는 항력을 포함하는 l 번째 링크 길리는 중력 방향의 힘은 다음과 같다.

$$m_i^0 g = (m_i - \rho_s V_i) g \quad (1)$$

여기서 ρ_s , m_i , V_i 는 각각 해수의 밀도, i 번째 링크의 질량, 속도이다. 로봇 매니플레이터가 가속될 때 링크의 질량과 관성모멘트는 부가질량과 부가관성모멘트에 의하여 증가된다. 따라서 부가질량 m_i' 와 부가관성모멘트 I_i' 를 포함하는 실제 운동에 고려하여야 할 질량 m_i^* 와 관성모멘트 I_i^* 는 각각 다음과 같다.

$$m_i^* = m_i + m_i', I_i^* = I_i + I_i' \quad (2)$$

여기에서 $m_i' = C_A \rho_s A_i l_i$, C_A : 부가질량계수, A_i : l 번째 링크의 운동 방향의 수직면에 대한 i 번째 링크의 투사 면적, l_i : i 번째 링크의 길이이다. I_i' 는 링크의 형상에 따라 결정되어 정확한 모델링은 어렵다. 부가질량과 관성 모멘트를 고려한 매니플레이터의 운동을 오일러-뉴턴 방정식을 이용하여 폐형식(closed form) 운동방정식으로 나타내면 다음의 n -자유도 매니플레이터의 식으로 표현된다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + \tau \quad (3)$$

여기서 $H^*(q)$ 는 부가질량 및 부가관성모멘트를 포함하는 링크의 질량과 관성모멘트로 구성된 $n \times n$ 관성 행렬이다. $C^*(q, \dot{q})$ 는 $n \times 1$ 부가질량을 포함하는 코리올리력, 원심력인 비선형 힘 벡터이다. 해저에서 부가질량, 부가관성 모멘트 외에도 로봇 매니플레이터의 운동을 방해하는 항력이 존재한다. 항력은 파도와 해류의 운동에 대한 매니플레이터의 상대속도의 제곱근에 비례한다. 항력을 야기하는 파도로 인한 속도 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u &= \xi_a v_w k \frac{\cosh k(-z+h)}{\sinh kh} \cos k(x - v_w t) \\ w &= \xi_a v_w k \frac{\cosh k(-z+h)}{\sinh kh} \sin k(x - v_w t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ξ_a 는 파도의 진폭, $k = \frac{2\pi}{L_w}$ 는 파수, L_w 는 파장이다. z 는 기준 점이 해수면인 깊이 방향의 좌표이다. 물깊이 h 는 양의 성분이다. u 와 w 는 각각

수평과 수직 파속을 나타내며 v_w 는 파형의 속도이다. 항력에 영향을 미치는 요소인 해류의 속도는 v_{ci} 로 정의하고 그것의 정확한 모델링은 정의되어 있지 않으나 방향과 크기의 상한은 존재한다. 주위의 유체에 대한 매니퓰레이터의 상대 속도 v_{ri} 는 매니퓰레이터 그 자체의 속도 v_{mi} , 파도의 속도 u_{wi} 및 해류의 속도 v_{ci} 로 구성되어 $v_{ri} = v_{mi} - u_{wi} - v_{ci}$ 로 표현된다.

매니퓰레이터의 i 번째 링크에 가해지는 항력은 다음과 같다.

$$D_{fi} = -C_D(1/2)\rho v_{ri}|v_{ri}|A_i \quad (5)$$

항력 계수 C_D 는 레이놀즈수와 로봇 링크의 거칠기에 따라서 변하나 그 범위는 유계된다. 항력으로 인하여 매니퓰레이터에 가해지는 토크는 오일러 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$D_{di} - D_{di+1} + r_{i,ci} \times D_{fi,i+1} - r_{i-1,ci} \times D_{fi-1,i} = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 $i=1, \dots, n$ 에 대해 반복하여 계산하면 항력 $D_{fi,i+1}$ 와 $D_{fi-1,i}$ 로 인한 로봇 매니퓰레이터의 각 링크에 가해지는 토크를 산출할 수 있다. 이는 $D(q, \dot{q}) = [D_{d1}, D_{d2}, \dots, D_{dn}]^T$ 와 같은 관절각과 각속도의 함수인 벡터로 표현된다.

해저 로봇에서 실링으로 인한 각 관절의 마찰력을 무시할 수가 없다. 작용하는 정적 및 Coulomb 마찰력은 다음과 같다.

$$F(q, \dot{q}) = csgn(\dot{q}) + v\dot{q} \quad (7)$$

여기서 $csgn(\dot{q})$ 는 $n \times 1$ Coulomb 마찰 벡터이고 $v\dot{q}$ 는 $n \times 1$ 점성 마찰 벡터이며 c 와 v 는 각각 Coulomb 마찰 계수와 점성 마찰 계수를 나타낸다. 항력과 가속화된 파도로 인한 토크 및 마찰력으로 인한 항을 정리하면 다음의 행렬식을 구할 수 있다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + F(q, \dot{q}) + D = \tau \quad (8)$$

식 (8)은 부가질량, 부가관성모멘트, 관절간의 마찰력 및 항력을 포함하여 모델링 된 해저 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식이다.

III. 견실제어기 설계

해저에서 동작되는 로봇 매니퓰레이터를 제어하기 위해서, 바람직한 궤적을 추적하기 위한 견실 제어기는 다음과 같이 설계되어 질 수 있다.

$$\tau = \widehat{H}^*(q)(v + U) + \widehat{C}^*(q, \dot{q})\dot{q} + \widehat{F}(q, \dot{q}) + \widehat{D} \quad (9)$$

여기서, $v = \ddot{q}_d + k_v\dot{e} + k_p e$ 와 $e = q_d - q$ 로 정의되며, $\widehat{H}^*(q)$, $\widehat{C}^*(q, \dot{q})$ 및 $\widehat{F}^*(q, \dot{q})$ 는 각각 $H^*(q)$, $C^*(q, \dot{q})$, $F^*(q, \dot{q})$ 를 구성하는 질량, 관성 및 마찰력과 같은 불확실한 변수에 대한 추정치이다. q_d 는 원하는 경로를 나타내는 관절각이고, 제어기 이득은 양의 대각 행렬이다. 시스템의 불확실한 변수들의 추정오차와 외부로부터의 외란을 제어하기 위하여 견실 제어기 U 를 설계한다. 본 논문에서는 Corless가 제안한 견실 제어기를 이용하나 이는 매우 큰 제어입력을 전제로 하고 있다. 따라서 이를 개선하여 시스템의 제한된 입력을 초과하지 않는 제어기를 설계한다. 해저작업 매니퓰레이터의 제어를 위해 제안된 견실 제어기는 식 (10)과 같다.

$$U = \frac{(B^T P x) \rho^2}{\|B^T P x\| \rho + \varepsilon} \quad (10)$$

여기서, ε 는 미소한 양의 상수이고, B , P 및 ρ 는 이후에 정의된다. 식(9)를 해저로봇 운동방정식(8)에 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$H^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + F + D = \widehat{H}^*(v + U) + \widehat{C}^* \dot{q} + \widehat{F} + \widehat{D} \quad (11)$$

여기서 $v = \ddot{q}_d + k_v\dot{e} + k_p e$ 이고 $k_v, k_p \in R^{n \times n}$ 는 제어이득으로 양의 대각행렬이다. 식 (11)을 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\widehat{H}^*(\ddot{e} + k_v\dot{e} + k_p e) = \widetilde{H}^* \ddot{q} + \widetilde{C}^* \dot{q} + \widetilde{F} + \widetilde{D} + \widehat{H}^* U \quad (12)$$

여기서 $\widetilde{H} = H - \widehat{H}$, $\widetilde{C} = C - \widehat{C}$, $\widetilde{F} = F - \widehat{F}$ 이다. 식 (12)를 정리하면, 식 (13)을 얻는다.

$$\ddot{e} + k_v\dot{e} + k_p e = \widehat{H}^{-1}(q) \{ \widetilde{H} \ddot{q} + \widetilde{C} \dot{q} + \widetilde{F} + \widetilde{D} \} + U \quad (13)$$

식 (13)에서 \ddot{q} 는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\ddot{q} = H^*{}^{-1} \{ \widehat{H}^*(v+U) + \widetilde{C}q + \widetilde{F} + \widetilde{D} \} \quad (14)$$

식 (14)를 식 (13)에 적용하여 정리하면 식(15)와 같다.

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = \Omega + U \quad (15)$$

여기서 $I \in R^{n \times n}$ 는 단위행렬이고 $\Omega = E_1(v+U) + H^*{}^{-1}\psi_1$, $E_1 = H^*{}^{-1}\widehat{H}^* - I$, $\psi_1 = \widetilde{C}q + \widetilde{F} + \widetilde{D}$ 이다. 식 (15)에서 불확실한 항들의 추정치가 정확하면, 즉 $H^* = \widehat{H}^*$, $C^* = \widehat{C}$, $F = \widehat{F}$ 를 만족하면 $\Omega = 0$ 이 되며 따라서 시스템의 추적오차는 점근적으로 0에 수렴하여 전실 제어기 U 를 적용할 필요가 없다. 식 (10)의 전실 제어기의 적용을 위해 식 (15)를 다음의 상태식으로 표현한다.

$$\dot{x} = Ax + Bw \quad (16)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_p & -k_v \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad w = (\Omega + U)$$

이며, A 는 $2n \times 2n$ 행렬이고, x 는 $2n \times 1$ 오차벡터이다. 또한 식 (16)에서 Ω 은 다음의 부등식과 같이 유계되고 식 (10)을 이용하면 다음의 두 번째 부등호의 조건을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\Omega\| &\leq \|E_1 v\| + \|H^*{}^{-1}\psi_1\| + \|E_1 U\| \quad (17) \\ &\leq \|E_1 v\| + \|H^*{}^{-1}\psi_1\| + \|E_1\| \rho = \rho \end{aligned}$$

여기서 $\|U\| \leq \rho$ 이고 $\|\cdot\|$ 는 L_2 놈을 의미한다. 또한 식(17)에서 등호를 만족하는 함수 ρ 가 존재한다고 가정하면 ρ 에 대한 정의를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = (1 - \|E_1\|)^{-1} (\|E_1 v\| + \|H^*{}^{-1}\psi_1\|) \quad (18)$$

식 (18)을 만족하기 위한 조건은 $\rho > 0$ 이고 따라서 조건 $\max \|E_1\| < 1$ 이 만족되어야 한다. 리아푸노프함수는 $V = x^T P x$ 이고, 여기서 행렬 P 는 $2n \times 2n$ 정정대각 행렬(positive definite symmetric matrix)이다. 이는 양의 스칼라 λ_1, λ_2 에 의하여

아래와 같이 유계된다.

$$\lambda_1 \|x\|^2 < x^T P x < \lambda_2 \|x\|^2 \quad (19)$$

리아푸노프함수 V 를 시간에 관하여 미분하고 식 (19)와 리아푸노프식(Lyapunov Equation)을 이용하면 V 의 미분식이 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = x^T P \dot{x} + \dot{x}^T P x = -x^T Q x + 2x^T P B w \quad (20)$$

식(17)의 정의를 이용하여 식(20)을 정리하면 다음의 부등식이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -x^T Q x + 2 \|x^T P B\| \rho + 2x^T P B U \quad (21) \\ &\leq -x^T Q x + 2(B^T P x)^T (U + \frac{B^T P x}{\|B^T P x\|} \rho) \end{aligned}$$

식 (21)에 식 (10)의 전실 제어기를 적용하면 \dot{V} 에 대한 다음의 결과가 얻어진다.

$$\dot{V} \leq -\lambda \|x\|^2 + 2\varepsilon \quad (22)$$

여기서 $\lambda = \min\{Q\}$ 이다. 전실 제어기의 안정성은 문헌 [2]에 나타나 있다. 추적오차는 ε 에 상수 비례하는 범위 내에 일양궁극유계(uniformly ultimately bounded) 된다. 하지만 식 (18)의 조건에서 불확실한 파라미터의 추정오차가 크거나 경로의 추적 위치 및 속도오차가 크면 ρ 의 값이 커야하고 이는 전실 제어기의 입력토크가 커야함을 의미한다. 따라서, 전실 제어기는 불확실성이 많은 해저로봇 매니플레이터에 적용할 때 매우 큰 제어입력을 전제로 하고 있다.

IV. 퍼지 논리에 의한 제한된 입력을 만족하는 궤적제어분석

전실 제어기는 무한한 제어입력의 가정 하에서 전실성을 보장받을 수 있다. 그러나 모든 물리적 시스템에는 입력토크의 범위가 제한되며 이 범위 내에서 제어 입력 토크가 결정되어야 한다. 해저 매니플레이터는 불확실한 파라미터와 외란이 많이 존재하여 이의 제어에 적합한 전실제어기는 큰 추정오차와 외란 보상으로 큰 입력 토크를 요구하여 제한된 입력 토크를 초과할 가능성이 많다. 따라서 본

논문에서는 퍼지 제어를 이용하여 제한된 토크 내에서 적용가능하며 기존 경로를 바탕으로 새로운 단축 경로를 생성할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에 적용되는 퍼지 제어부를 살펴보면 다음과 같다. 퍼지제어는 퍼지화 부, 규칙 기반부, 퍼지 추론부, 비 퍼지화부로 구성된다. 본 논문에서의 퍼지 제어기의 입력은 입력토크 오차 τ_i 와 이의 변화율 $\Delta\tau$ 이고 출력은 경로 추적 경과 시간인 t_{Di} 이다. 제한된 입력 토크와 제어 입력사이의 토크 입력 오차는 $\tau_i = \tau_s - \tau(k)$ 로 정의되며, 입력토크 오차 변화율은 $\Delta\tau = (\tau(k) - \tau(k-1))/\Delta t$ 로 정의되었다. 여기서, Δt 는 샘플링 시간이고 τ_s 는 구동기의 제한된 토크이다. 경로추적 시간은 초기의 경로 계획을 바탕으로 퍼지제어의 출력 소속 함수 t_{Di} 에 의해 새로운 경로가 결정된다. t_{Di} 를 얻기 위한 제어 규칙은 다음과 같이 주어진다.

- Rule1:
if τ_i is A_1 , $\Delta\tau$ is B_1 , then t_{D1} is C_1
- Rule2:
if τ_i is A_2 , $\Delta\tau$ is B_2 , then t_{D2} is C_2 ,
- ⋮
- Rule i
if τ_i is A_i , $\Delta\tau$ is B_i , then t_{Di} is C_i ,

여기서, A_i 와 B_i 는 언어 항의 조합이고, C_i 는 퍼지 제어 출력의 조합이다. 본 논문에서는 모두 20개의 퍼지 규칙을 사용하였으며, 이를 표 1에 나타내었다. 입력 변수의 소속함수와 출력변수의 소속수를 그림 1, 2, 3에 각각 나타내었다.

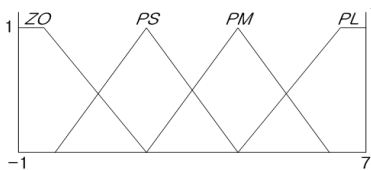


그림 1. 입력소속함수 τ_i

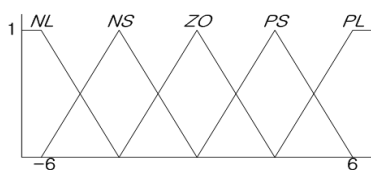


그림 2. 입력소속함수 $\Delta\tau$

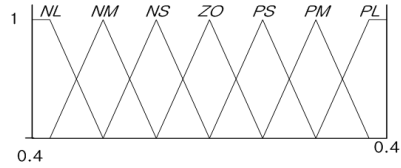


그림 3. 출력소속함수 t_{Di}

표 1. 퍼지제어규칙

$\Delta\tau \backslash \tau_i$	ZO	PS	PM	PL
NL	ZO	NS	NM	NL
NS	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	ZO	NS
PS	PL	PM	PS	ZO
PL	PL	PL	PM	PS

제어 방법은 입력 변수 τ_i 가 작고(제한된 입력토크에 가깝고) $\Delta\tau$ 가 클 경우(입력토크가 증가할 경우), 제어 제한된 토크 입력을 초과할 수 있기 때문에 제한된 입력에 이르지 않도록 매니퓰레이터의 느린 동작을 유도하기 위해 경로 추적 시간이 증가 되도록 한다. 또한, τ_i 가 크고 $\Delta\tau$ 가 적어질 경우, 매니퓰레이터의 빠른 동작을 위해 추적시간이 감소 되도록 하여 입력 토크를 증가시킨다. 퍼지추론은 Mamdani의 Max - Min 추론 규칙을 이용하였고 비 퍼지화 방법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 합성된 퍼지 집합의 무게중심을 구하여 그에 해당하는 집합을 제어입력으로 하는 무게 중심법을 사용하였다. 제안된 방법을 이용하면, 초기의 궤적 계획을 바탕으로 새로운 궤적을 생성하여 제한된 토크를 초과하지 않고 현실성을 보장받을 수 있는 현실한 제어를 구성할 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문의 시뮬레이션에서는 해저에서 동작되는 2축 수평 관절 로봇을 이용하였고 제안된 전체시스템은 그림 4와 같다.

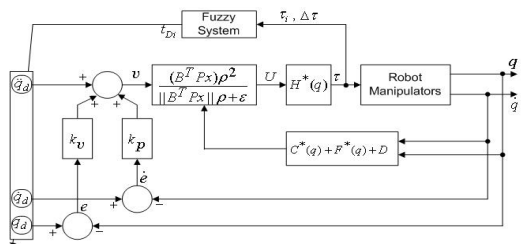


그림 4. 퍼지를 이용한 퍼지 현실 제어 시스템

이의 운동방정식은 다음과 같다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D = \tau \quad (23)$$

식 (23)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\alpha_2 - c(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서,

$$\begin{aligned} h_{11} &= m_1^* L_{c1}^2 + m_2^* (L_1^2 + L_2^2) + I_1^* + I_2^* + 2m_2^* L_1 L_2 \cos(q_2) \\ h_{12} &= h_{21} = m_2^* L_2^2 + I_2^* + 2m_2^* L_1 L_2 \cos(q_2) \\ h_{22} &= m_2^* L_2^2 + I_2^* \\ c &= m_2^* L_1 L_2 \sin(q_2) \\ d_1 &= -\frac{1}{2} C_d \rho A_1 v_1 |v_1| (L_{c1}) - \frac{1}{2} C_d \rho A_2 v_2 |v_2| (L_1 + L_2) \\ d_2 &= -\frac{1}{2} C_d \rho A_2 v_2 |v_2| (L_{c2}) \end{aligned}$$

식 (24)에서, $m_i^* = m_i + m_{adi}$, $I_i^* = I_i + I_{adi}$ 이며, m_i 와 I_i 는 측정된 질량과 관성 모멘트이고, m_{adi} 와 I_{adi} 는 비선형이면서 불확실하게 추가된 질량과 부가관성모멘트이다. 시뮬레이션에서 관절의 질량과 관성 모멘트는 측정이 가능하지만, 부가된 질량과 관성 모멘트는 불확실하다. 마찰력 항은 다른 불확실한 항에 비하여 크기가 작으므로 생략하였다. 2축 수평 매니퓰레이터의 파라미터에 적용된 수치를 표 2에 나타내었다.

표 2. 매니퓰레이터의 각 파라미터 수치

No. Of Link	Link 1	Link 2
mass: m_i (Kg)	8	5
Inertia: I_i (Kgm^2)	0.172	0.067
radius: r_i (m)	0.05	0.03
length: L_i (m)	0.5	0.4
centroid: L_{ci} (m)	0.25	0.2

로봇 링크의 관성은 $I_1 = (1/12)m_1(3r_1^2 + l_1^2)$ 와 $I_2 = (1/12)m_2(r_2^2 + l_2^2)$ 을 근거로 계산되었다. 부가된 질량과 관성 모멘트의 값은 각각 $m_{ad1} = 2(Kg)$, $m_{ad2} = 1.5\cos(q_2)(Kg)$, $I_{ad1} = 0.1(Kg-m^2)$, $I_{ad2} = 0.04\cos(q_2)(Kg-m^2)$ 이다. 계산 토크 제어기의 제어 이득의 대각성분은 다음과 같다.

$$k_v = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, k_p = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (25)$$

행렬 P 는 리아푸노프식 $A^T P + P A = -Q$ 를 풀면 얻을 수 있다. 견실 제어기에서의 ε 은 10^{-3} 으로 정하였다. 링크 1과 링크 2의 원하는 궤적의 시작 및 도착점은 각각 $[0, \pi/3]$, $[0, \pi/3]$ 이며, 경로함수는 5차 다항식을 사용하여 3초 동안 이동하도록 설정하였다. 그림 5는 2축 해저 로봇 매니퓰레이터의 속도 비교 결과를 나타낸 것으로, 새로 생성된 궤적이 기존의 궤적보다 대략 0.2초 단축된 것을 알 수 있다. 이것은 퍼지 규칙으로 입력 토크를 제어하여 경로 추적 시간을 단축하였다는 것을 의미한다. 그림 6과 7은 링크 1과 2에 대하여, 견실 제어기와 퍼지 제어기의 입력 토크를 각각 나타낸 것이다. 여기서 제한된 입력을 각각 ± 3.8 과 ± 1.8 로 정하였다. 그림 6과 7에서 볼 수 있듯이, 기존의 견실제어기는 제한된 입력 범위를 초과하였지만, 제안한 퍼지 견실 제어기는 제한된 입력 내에 머물러 있다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 두 가지의 개선된 점을 알 수 있는데 하나는 제한된 입력 범위를 초과하는 것을 방지하는 것이고, 나머지는 로봇 매니퓰레이터의 추적 시간을 줄일 수 있다는 것이다.

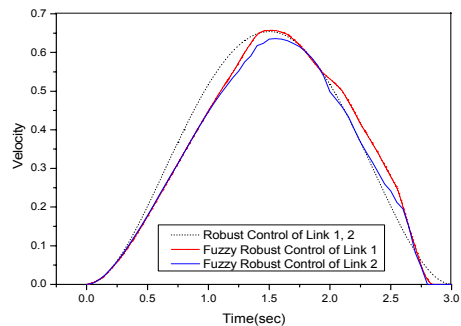


그림 5. 퍼지 견실제어기의 속도 비교

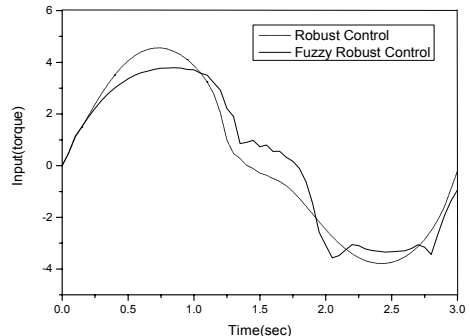


그림 6. 링크 1의 토크 입력 비교

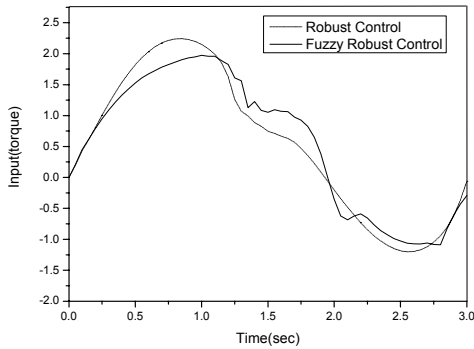


그림 7. 링크 2의 토크 입력 비교

VI. 결 론

본 논문은 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 동작 제어를 위한 새로운 견실 제어기의 설계에 관한 것이다. 기존의 견실 제어기의 견실성은 매우 큰 입력 토크의 가정 하에 정의되어 있으므로 제한된 입력 토크를 갖는 실제 시스템의 적용이 매우 어려운 경우가 있으며 이는 견실성의 보장을 받지 못한다. 제안된 새로운 퍼지견실 제어기는 제한된 입력토크의 범위 내에서 불확실하고 외란이 존재하는 로봇 매니퓰레이터를 구동할 수 있으며, 또한 입력토크를 충분히 활용하여 기존 경로보다 단축된 새로운 경로를 생성함을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] J. J. E. Slotine, "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems" Int. Journal Control, 40, 2, 1984.
- [2] M. Corless and G. Leitmann, "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems", J. Automatic Controls, AC-26, 1139-1143, 1979.
- [3] Y. H. .Chen, "Robust Computed Torque Scheme for Mechanical Manipulators: Nonadaptive Versus Adaptive", J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 113, pp. 324-327 1991.
- [4] J. J. E. Slotine and M. W. Spong, "Robust Robot Control with Bounded Input Torques", Journal of Robotic Systems, 2(4), pp. 329-352, 1985.
- [5] M. W. Spong, J. s. Thorp, and J. M. Kleinwas, "The Control of Robt Manipulators with Boubded Input" IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 6 1986.
- [6] W. Kaewprom and K. Ohishi, "Robust

Manipulator Control Considering Saturation of Joint Torque and Joint Servo System" 2nd Asian Control Conference, pp. 617-620 1977.

- [7] E. H. Mamdani and S. Appilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machine Stud., Vol. 7, pp.1-13, 1975.
- [8] E.H.Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proc. IEE,vol.12 .1585-1588,1974

최 수 열 (Su-Yeol Choi)

정회원



1984년 8월 한양대학교 전자 공
학과 졸업<공학사>
1993년 2월 연세대학교 전기공학
과 졸업 <공학석사>
2000년2월 동아대학교 대학원전
자공학과 졸업 <공학박사>
1986년1월~1991년 2월 쌍용양
회공업 (주) 기술부 근무

1991년 3월~1994년 2월 동도공업고등학교 전자과 교사
1994년 3월~2008년 현재 서일대학 정보전자과 부교수
<관심 분야> 신경회로망, 퍼지, 유전알고리즘, 로봇제어

박 재 형 (Jae-Hyung Park)

정회원



1987년 2월 동아대학교 전자공학
과 공학사
1990년 2월 동아대학교 전자공학
과 공학석사
2000년 2월 동아대학교 전자공학
과 공학박사
2000년 3월~2008년 현재 부산정

보대학 겸임교수
<관심분야> 지능시스템, 신경회로망, Fuzzy이론

이 상 관 (Sang-Kwan Lee)

정회원



1982년 2월 동아대학교 전자공
학과 공학사
1984년 2월 동아대학교 전자공
학과 공학석사
1996년 8월 동아대학교 전자공
학과 공학박사
1993~2001 지산대학 부교수

2001~2008 현재 부산가톨릭대학교 응용과학대학
컴퓨터공학과 부교수
<관심분야> 지능시스템, 신경회로망, RFID시스템