한국정밀공학회지 제17권 제1호 (2000년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 1, January 2000

토크 한계를 갖는 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 퍼지 논리를 이용한 강인 제어기의 설계

최형식*, 박재형**

Design of a Robust Controller for Uncertain Robot Manipulators with Torque Saturation using a Fuzzy Algorithm

Hyeung-Sik Choi*, Jae-Hyung Park**

ABSTRACT

Robot manipulators, which are nonlinear structures and have uncertain system parameters, have complex in dynamics when are operated in unknown environment. To compensate for estimate errors of the uncertain system parameters and to accomplish the desired trajectory tracking, nonlinear robust controllers are appropriate. However, when estimation errors or tracking errors are large, they require large input torques, which may not be satisfied due to torque limits of actuators. As a result, their stability can not be guaranteed. In this paper, a new robust control scheme is presented to solve stability problem and to achieve fast trajectory tracking in the presence of torque limits. By using fuzzy logic, new desired trajectories which can be reduced are generated based on the initial desired trajectory, and torques of the robust controller are regulated to not exceed torque limits. Numerical examples are shown to validate the proposed controller using an uncertain two degree-of-freedom underwater robot manipulator.

Key Words : Robust Controller(강인제어기), Fuzzy Logic(퍼지논리), Torque Saturation(토크 포화), Model Uncertainty(모델 불확실성)

1. 서론

최근 로봇 매니퓰레이터는 생산라인 외에 우주나 해저와 같은 불확실한 환경에도 사용되고 있다. 이러한 환경에 존재하는 불확실성 외에도 로봇 매니퓰레이터의 모델 자체의 불확실성과 운동 모델의 비선형성으로 인하여 용접작업과 같은 경로 추적제어에 어려움이 존재한다. 이와 같은 비선형적이고 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 경로제어를 위하여 비선형 형태의 여러 강인제어 알고리즘들이 제안되었다.

우선, 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치를 보상하는 슬라이딩모드 제어 알고리즘을 매니퓰레이터에 적용한 것이 있다[1]. 또한, Corless등이 제안한 비선형 강인제어기로 비선형 시스템의 불확실한 파라미터에 대한 추정오차와 외란의 추정치를 정의하여 이를 제어입력에 반영하는

* 한국해양대학교 기계공학과
** 동아대학교 전자공학과

강인제어 알고리즘에 관한 연구[2]와 이러한 강인 제어기를 계산토크 제어기와 함께 로봇 매니퓰레이터의 경로제어에 적용한 논문이 존재한다[3].

소개한 비선형 강인 제어기들은 불확실한 파라미터에 대한 추정오차, 외란의 추정치 및 매니퓰레이터의 속도를 제어입력에 반영하기 때문에 추정오차나 외란이 크거나 빠른 이동속도가 설정되면 매우 큰 제어 입력토크를 요구된다. 즉, 이 제어기들의 강인성은 매우 큰 입력토크의 가정 하에서 보장된다. 하지만 로봇 매니퓰레이터의 구동모터들은 직렬 형태인 매니퓰레이터의 각 축에 부착되어 자중을 누적시킨다. 따라서, 고 토크모터의 적용에 제약이 있으므로 매니퓰레이터의 제어에는 구동기의 토크한계를 고려하여야 한다.

토크입력의 한계를 갖는 로봇 시스템의 제어에 대하여 여러 문헌들이 존재한다. 이들 중에 주제어기로 슬라이딩모드 제어기를 적용하고 최적화기법을 이용하여 한계토크 내에서 매니퓰레이터를 구동할 수 있는 새로운 경로를 생성하는 알고리즘을 제안한 것들이 있다[4-5]. 또한, 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 제어기로 문헌[2]에서 제안한 강인 제어기를 적용하고, 추적오차와 속도변화분을 퍼지논리의 입력으로 받아 추적오차와 제어입력의 크기의 함수인 ε 을 퍼지논리로 제어하면서 입력한계 내에서 매니퓰레이터를 구동하는 방법에 관한 연구[6]와 이를 일반적인 비선형 모델에 확장하여 적용한 연구가 존재한다[7]. 입력포화를 갖는 로봇 매니퓰레이터의 제어에 대한 다른 연구결과로 경로 추적을 위한 주제어기로는 H_∞ 제어기를 적용하고 토크를 제한하는 알고리즘을 부가한 것이 존재한다[8]. 여기서 토크 제어 알고리즘은 경로시간의 제어를 통하여 이루어졌다.

본 논문에서는 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 제어에 강인 제어기를 적용할 때 발생하는 입력토크의 포화를 해결하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 문헌 [6]에 제안된 제어 알고리즘과 퍼지 알고리즘을 적용부분은 유사하나 한계입력에 대한 제어입력의 오차와 오차의 미분치를 퍼지제어의 입력으로 받아 추적경로시간을 제어하는 개선된 방법을 제안하고있다. 즉, 입력토크의 크기에 영향을 미치는 추적 속도를 퍼지 논리를 이용하여 제어하여 입력토크 한계 내에서 강인 제어기가 동작한다. 제안한 퍼지 알고리즘은 기준 경로를 바탕으로 새로운 경로를 생성하여 강인 제어기의 입력 토크를 한계 내에 존재하도록 하며, 한계 내에서 매니퓰레이터의 동작속도를 제어할 수 있는 논리로 구성되었다. 제안된 제어 알고리즘의 유효성을 입증하기 위하여 불확실성이 큰 2 자유도 해저로봇 매니퓰레이터를 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

2. 해저 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식

해저에서 로봇 매니퓰레이터의 운동은 부력, 부가질량 및 부가관성모멘트, 항력과 같은 불확실한 파라미터에 의하여 많은 영향을 받는다. 부가질량과 관성 모멘트를 고려한 매니퓰레이터의 운동을 오일러-뉴턴 방정식을 이용하여 폐형식(closed form) 운동방정식으로 표현한 n-자유도 매니퓰레이터의 모델에 대한 연구는 참고문헌 [9-11]에 잘 나타나 있다. 여기서 매니퓰레이터의 기저는 해저에 안착한 잠수정에 고정되어 있다고 가정한다. 이의 운동방정식을 살펴보면 다음과 같다.

$$H^*(q)\ddot{q}+C^*(q,\dot{q})\dot{q}+G^*(q)=\tau \qquad (1)$$

여기서, $H^*(q)$는 부가 질량 및 부가 관성모멘트를 포함하는 링크의 질량과 관성모멘트로 구성된 $n\times n$ 관성 행렬이다. $C^*(q,\dot{q})$는 $n\times 1$ 부가 질량을 포함하는 코리올리력 및 원심력인 비선형 힘 벡터이다. $G^*(q)$는 부력을 포함하는 $n\times 1$ 중력벡터이다. 로봇 매니퓰레이터의 i번째 링크에 가해지는 항력은 식 (2)와 같다.

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

여기서, A_i는 매니퓰레이터 속도 v_{ri}의 수직방향에 대한 i번째 링크의 투사면적이고, ρ 는 물의 밀도이다. 항력 계수 C_D는 레이놀즈 수와 로봇 링크의 거칠기에 따라서 변하지만 그 범위는 유계된다. 항력으로 인하여 매니퓰레이터에 가해지는 토크는 오일러 방정식에 의해 식 (3)과 같이 표현된다.

$$D_{di}-D_{di+1}+r_{i,ci}\times D_{fi,i+1}-r_{i-1,ci}\times D_{fi-1,i}=0 \qquad (3)$$

식 (3)을 $i=1,\ldots,n$에 대해 반복 계산하면 항력 $D_{fi,i+1}$와 $D_{fi-1,i}$로 인한 로봇 매니퓰레이터의

각 링크에 가해지는 토크를 산출할 수 있다. 이는 $D(q,\dot{q})=[D_{d1}, D_{d2}, \ldots, D_{dn}]^T$와 같은 관절 각과 각 속도의 함수인 벡터로 표현된다.

해저 로봇에서 실링으로 인한 각 관절의 마찰력을 무시할 수 없으며, 작용하는 정적 및 Coulomb 마찰력은 식 (4)과 같다.

$$F(q,\dot{q})=c\ sgn(\dot{q})+v\dot{q} \tag{4}$$

여기서, $c\ sgn(\dot{q})$는 $n\times 1$ Coulomb 마찰 벡터이고, $v\dot{q}$는 $n\times 1$ 점성 마찰 벡터이며, c와 v는 각각 Coulomb 마찰 계수와 점성 마찰 계수를 나타낸다. 항력과 마찰력으로 인한 항을 정리하면 다음의 행렬식을 구할 수 있다.

$$H^*(q)\ddot{q}+C^*(q,\dot{q})\dot{q}+G^*(q)+F(q,\dot{q})+D=\tau \tag{5}$$

식 (5)는 부가질량, 부가관성모멘트, 부력, 관절간의 마찰력, 및 항력을 포함하여 모델링된 해저로봇 매니퓰레이터의 운동방정식이다.

3. 강인 제어기의 설계

해저에서 로봇 매니퓰레이터의 원하는 궤적 추적을 위한 강인 제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned}\tau = {} & \widehat{H^*}(q)(v+U)+\widehat{C^*}(q,\dot{q})\dot{q} \\ & +G^*(q)+\widehat{F}(q,\dot{q})+\hat{D}\end{aligned} \tag{6}$$

여기서, $v=\ddot{q}_d+k_v\dot{e}+k_pe$ 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 추정치로 구성된다. 또한, q_d는 원하는 경로를 나타내는 관절 각이고, 제어기 이득은 양의 대각 행렬이다. 시스템의 불확실한 변수들의 추정오차와 외부로부터의 외란을 제어하기 위하여 강인 제어기 U를 설계한다. 본 논문에서는 Corless가 제안한 강인 제어기를 이용하나 이는 매우 큰 제어입력을 전제로 하고 있어 이를 개선하여 시스템의 입력한계를 초과하지 않는 새로운 강인제어기를 제안한다. 해저작업 매니퓰레이터의 제어를 위해 제안된 강인 제어기는 식 (7)과 같다.

$$U=\frac{(B^TPx)\rho^2}{\|B^TPx\|\rho+\varepsilon} \tag{7}$$

여기서, ε 는 미소한 양의 상수이고, B, P 및 ρ 는 이후에 정의된다. 식 (6)을 해저로봇 운동방정식 (5)에 적용하면 다음의 식이 된다.

$$\begin{aligned}H^*\ddot{q}+C^*\dot{q}+G^*+F+D = {} & \widehat{H^*}(v+U)+\widehat{C^*}\dot{q} \\ & +G^*+\hat{F}+\hat{D}\end{aligned} \tag{8}$$

여기서 $v=\ddot{q}_d+k_v\dot{e}+k_pe$이고 k_v $k_p\in R^{n\times n}$는 제어이득으로 양의 대각행렬이다. 식 (8)을 정리하면 식 (9)을 얻을 수 있다.

$$\widehat{H^*}(\ddot{e}+k_v\dot{e}+k_pe)=\widetilde{H^*}\ddot{q}+\widetilde{C^*}\dot{q}+\tilde{F}+\tilde{D}+\widehat{H^*}U \tag{9}$$

여기서 $\tilde{H}=H-\hat{H}$, $\tilde{C}=C-\hat{C}$, $\tilde{F}=F-\hat{F}$ 이다. 식 (9)을 정리하면 다음의 식 (10)을 얻는다.

$$\ddot{e}+k_v\dot{e}+k_pe=\hat{H}^{-1}(q)\{\tilde{H}\ddot{q}+\tilde{C}+\tilde{F}+\tilde{D}\}+U \tag{10}$$

식 (10)에서 $\ddot{q}$는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\ddot{q}=H^{*-1}\{\widehat{H^*}(v+U)+\tilde{C}\dot{q}+\tilde{F}+\tilde{D}\} \tag{11}$$

식 (11)을 식 (10)에 적용하고 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{e}+k_v\dot{e}+k_pe=\Omega-U \tag{12}$$

여기서 $I\in R^{n\times n}$는 단위행렬이고,

$\Omega=E_1(v+U)+H^{*-1}\psi_1$, $\quad E_1=H^{*-1}\widehat{H^*}-I$,

$\psi_1=\tilde{C}\dot{q}+\tilde{F}+\tilde{D}$이다. 식 (12)에서 불확실한 항들의 추정이 정확하면, 즉 $H^*=\widehat{H^*}$, $C^*=\widehat{C^*}$, $F=\hat{F}$이 만족되면 $\Omega=0$ 되며 따라서 시스템의 추적오차는 점근적으로 0에 수렴하여 강인 제어기 U을 적용할 필요가 없다. 식 (7)의 강인 제어기의 적용을 위해 식 (12)을 다음의 상태 식으로 표현한다.

$$\dot{x} = Ax + Bw \tag{13}$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_p & -k_v \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix},\ w = (\Omega - U)$$

이며, A는 $2n \times 2n$ 행렬이고, x는 $2n \times 1$ 오차벡터이다. 또한 식 (13)에서 Ω는 다음의 부등식과 같이 유계되고 식 (7)을 이용하면 다음의 두 번째 부등호의 조건을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \| \Omega \| &\le \| E_1 v \| + \| H^{-1}\psi_1 \| + \| E_1 U \| \\ &\le \| E_1 v \| + \| H^{-1}\psi_1 \| + \| E_1 \| \rho = \rho \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 $\| U \| \le \rho$ 이고 $\| . \|$는 L_2 놈을 의미한다. 또한 식 (14)에서 등호를 만족하는 함수 ρ가 존재한다고 가정하면 ρ에 대한 정의를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = (1 - \| E_1 \|)^{-1} (\| E_1 v \| + \| H^{-1}\psi_1 \|) \tag{15}$$

식 (15)을 만족하기 위한 조건은 $\rho > 0$이고 따라서 조건 $\max \| E_1 \| < 1$이 만족되어야 한다. 리야푸노프 함수는 $V = x^T P x$이고, 여기서 행렬 P는 $2n \times 2n$ 정정대각 행렬(positive definite symmetric matrix)이다. 이는 양의 스칼라 λ_1, λ_2에 의하여 아래와 같이 유계된다고 가정한다.

$$\lambda_1 \| x \|^2 < x^T P x < \lambda_2 \| x \|^2 \tag{16}$$

리야푸노프 함수 V를 시간에 관하여 미분하고 식 (16)과 리야푸노프식(Lyapunov Equation)을 $A^T P + PA = -Q$을 이용하면 V의 미분식이 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = x^T P \dot{x} + x^T P \dot{x} = -x^T Q x + 2 x^T P B w \tag{17}$$

식 (14)의 정의를 이용하여 식 (17)을 정리하면 다음의 부등식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\le -x^T Q x + 2 \| x^T P B \| \rho + 2 x^T P B U \\ &\le -x^T Q x + 2 (B^T P x)^T \left(U + \frac{B^T P x}{\| B^T P x \|} \rho \right) \end{aligned} \tag{18}$$

식 (18)에 식 (7)의 강인 제어기를 적용하면 $\dot{V}$에 대한 다음의 결과가 얻어진다.

$$\dot{V} \le -\lambda \| x \|^2 + 2\varepsilon \tag{19}$$

여기서 $\lambda = \min\{Q\}$ 이다. 강인제어기의 안정도 증명은 문헌 [2]에 나타나 있다. 추적오차는 ε의 상수 비례하는 범위 내에 일양궁극유계(uniformly ultimately bounded)된다. 하지만 식 (15)의 조건에서 불확실한 파라미터의 추정오차가 크거나 경로의 추적 위치 및 속도오차 가 크면 ρ의 값이 커야하고 이는 강인 제어기의 입력토크가 커야함을 의미한다. 따라서, 강인 제어기는 불확실성이 많은 해저로봇 매니퓰레이터에 적용할 때 매우 큰 제어입력을 전제로 하고 있다.

4. 퍼지 논리에 의한 한계입력을 만족하는 궤적제어

강인 제어기는 매우 큰 제어입력의 가정 하에서 안정성을 보장받을 수 있다. 그러나, 모든 물리적 시스템에는 입력토크의 한계가 존재하고 이 내에서 제어 입력 토크가 결정되어야 한다. 해저 매니퓰레이터는 불확실한 파라미터와 외란이 많이 존재하여 강인 제어기는 큰 추정오차와 외란 보상으로 큰 입력 토크를 요구하여 입력 토크한계를 초과할 가능성이 많아 현실적으로 적용에 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 제어를 이용하여 토크 한계 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 $T(k)$와 이의 변화율 $\Delta T(k)$ 이고 출력은 경로 추적 경과 시간인 t_{Di} 이다. 입력 토크의 한계와 제어 입력사이의 토크 입력 오차는 $T(k) = \tau_s - \tau(k)$ 로 정의되며, 입력 토크 오차 변화율은 $\Delta T(k) = (\tau(k) - \tau(k-1)) / \Delta t$

로 정의되었다. 여기서, Δt는 샘플링 시간이고 τ_s는 구동기의 한계토크이다. 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.

Rule 1 : *If* $T(k)$ *is* $A_1, \Delta T(k)$ *is* B_1, *then* t_{D1} *is* C_1

Rule 2 : *If* $T(k)$ *is* $A_2, \Delta T(k)$ *is* B_2, *then* t_{D2} *is* C_2

. . . .

Rule i : *If* $T(k)$ *is* $A_i, \Delta T(k)$ *is* B_i, *then* t_{Di} *is* C_i,

여기서, A_i와 B_i는 언어 항의 조합이고, C_i는 퍼지 제어 출력의 조합이다. 본 논문에서는 모두 20개의 퍼지 규칙을 사용하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다. 입력 변수의 소속함수와 출력변수의 소속함수를 Figure 1, 2 및 3에 나타내었다.

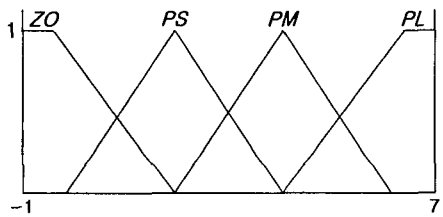

Fig. 1 Fuzzy Sets for T

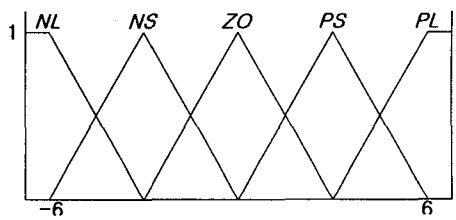

Fig. 2 Fuzzy Sets for ΔT

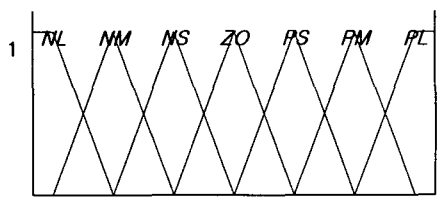

Fig. 3 Fuzzy Sets for t_{Di}

Table 1 Fuzzy Rule

ΔT \ T	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 전략은 입력 변수 T_i가 작고(입력토크가 한계에 가깝고) ΔT가 클 경우(입력토크가 증가할 경우), 제어 토크 입력이 토크한계를 초과하지 않도록 경로 추적 시간이 증가되도록 한다. 또한, T_i가 크고 ΔT_i가 적어질 경우, 매니퓰레이터의 빠른 동작을 위해 추적시간이 감소되도록 하여 입력 토크를 충분히 활용한다. 퍼지추론은 Mamdani의 Max-Min 추론 규칙을 이용하였고(12) 비 퍼지화 방법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 합성된 퍼지 집합의 무게중심을 구하여 그에 해당하는 집합을 제어입력으로 하는 무게 중심법을 사용하였다.

제어 전략은 입력 변수 T_i가 작고(입력토크가 한계에 가깝고) ΔT가 클 경우(입력토크가 증가할 경우), 제어 토크 입력이 토크한계를 초과하지 않도록 경로 추적 시간이 증가되도록 한다. 또한, T_i가 크고 ΔT_i가 적어질 경우, 매니퓰레이터의 빠른 동작을 위해 추적시간이 감소되도록 하여 입력 토크를 충분히 활용한다. 퍼지추론은 Mamdani의 Max-Min 추론 규칙을 이용하였고(12) 비 퍼지화 방법에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 합성된 퍼지 집합의 무게중심을 구하여 그에 해당하는 집합을 제어입력으로 하는 무게 중심법을 사용하였다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션에서는 해저에서 동작되는 2축 수평 관절 로봇을 이용하였고 이의 운동방정식은 다음과 같다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + D = \tau \qquad (20)$$

식 (20)을 구체적인 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서,

$$h_{11} = m_1^* L_{c1}^2 + m_2^*(L_1^2 + L_{c2}^2) + I_1^* + I_2^* + 2m_2^* L_1 L_{c2}\cos(q_2)$$

$$h_{12} = h_{21} = m_2^* L_{c2}^2 + I_2^* + 2m_2^* L_1 L_{c2}\cos(q_2)$$

$$h_{22} = m_2^* L_{c2}^2 + I_2^*, \quad c = m_2^* L_1 L_{c2}\sin(q_2)$$

$$d_1 = -\frac{1}{2} C_d \rho A_1 v_1 | v_1 | (L_{c1}) - \frac{1}{2} C_d \rho A_2 v_2 | v_2 | (L_1 + L_{c2})$$

$$d_2 = -\frac{1}{2} C_d \rho A_2 v_2 | v_2 | (L_{c2})$$

식 (21)에서, $m_i^* = m_i + m_{adi}$, $I_i^* = I_i + I_{adi}$ 이며, m_i와 I_i는 측정된 질량과 관성 모멘트이고, m_{adi}와 I_{adi}는 비선형이며 불확실한 부가 질량과 부가 관성모멘트이다. 시뮬레이션에서 관절의 질량과 관성모멘트는 측정이 가능하지만, 부가된 질량과 관성모멘트는 불확실하다. 마찰력 항은 다른 불확실한 항에 비하여 크기가 작아 생략하였다.

2축 수평 매니퓰레이터의 파라미터에 사용된 수치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Fuzzy Rule

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

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 각 각 $m_{ad1} = 2(Kg)$, $m_{ad2} = 1.5\cos(q_2)(Kg)$, $I_{ad1} = 0.1(Kg-m^2)$, $I_{ad2} = 0.04\cos(q_2)(Kg-m^2)$ 이다. 계산토크 제어기의 제어 이득의 대각 성분은 각 각 $k_{vii} = 16$와 $k_{\pi i} = 4$로 정하였다. 행렬 P는 다음의 리야푸노프 식 $A^TP + PA = -Q$을 풀면 얻을 수 있다. 강인 제어기에서의 ε 은 10^{-3}로 정하였다. 링크 1과 링크 2의 원하는 궤적의 시작 및 도착점은 각각 $[0, \pi/3]$, $[0, \pi/3]$ 이며, 초기 경로함수는 5차 다항식을 사용하여 3초 동안 이동하도록 정하였다.

2축 해저 로봇 매니퓰레이터의 궤적 추적 결과를 Figure 4, 5, 6 및 7에 나타내었다. Figure 4는 초기의 원하는 궤적과 새로운 궤적을 나타내는 것으로서, 실선이 기존의 원하는 궤적이고, 나머지가 1축과 2축의 새로 생성된 원하는 궤적이다. 나타난 바와 같이 새로 생성된 궤적이 기존의 궤적보다 약 0.3초 단축된 것을 알 수 있다. 이것은 퍼지 규칙으로 입력 토크를 제어하여 경로 추적 시간을 줄인 결과이다. Figure 5와 6은 링크 1과 2에 대한 강인 제어기와 퍼지 강인 제어기의 입력 토크를 각각 나타낸 것이다. 여기서 입력 포화 한계를 각각 ± 3.8과 ± 1.8로 가정하였다. Figure 5와 6에서 강인 제어기는 포화 한계를 초과하였지만, 퍼지 강인 제어기는 입력 포화 한계 내에 머물러 있다는 것을 알 수 있다. Figure 7은 퍼지 강인 제어기를 사용하였을 때, 추적 오차를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 두 가지의 개선된 점을 알 수 있는데 하나는 토크 포화 한계를 초과하는 것을 방지하는 것이고, 나머지는 로봇 매니퓰레이터의 추적 시간을 줄일 수 있다는 것이다.

6. 결론

높은 비선형성과 불확실한 로봇 매니퓰레이터의 제어에 적합한 강인 제어기는 큰 입력이 요구될 때가 많고, 이는 토크한계를 초과하는 문제에 직면한다. 이러한 토크포화 문제를 해결하기 위하여, 퍼지 논리 제어 알고리즘을 이용하여 새로운 강인 제어기를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 초기의 궤적에 근사하지만 더 빠른 새로운 궤적을 생성할 수 있다. 제안된 제어 알고리즘은 부가질량, 부가관성 모멘트, 항력과 마찰력과 같은 불확실성이 큰 로봇 매니퓰레이터에 적용될 수 있다. 시뮬레이션 결과는 토크 한계 내에서 불확실성이 큰 해저 로봇 매니퓰레이터의 신속한 궤적 추적을 보여준다.

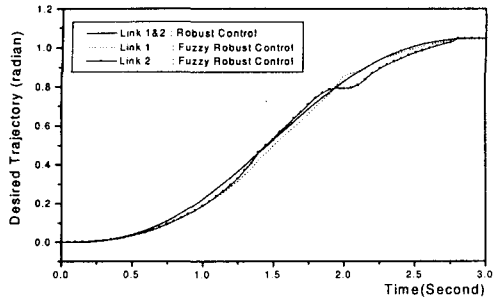

Fig. 4 Generation of New Desired Trajectories

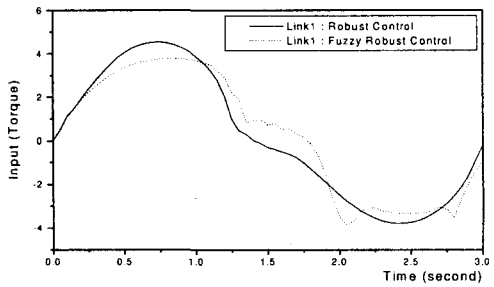

Fig. 5 Comparison of Torque Inputs for Link 1

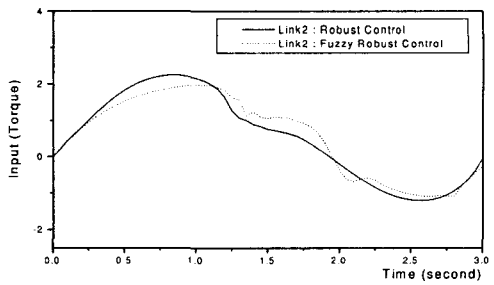

Fig. 6 Comparison of Torque Inputs for Link 2

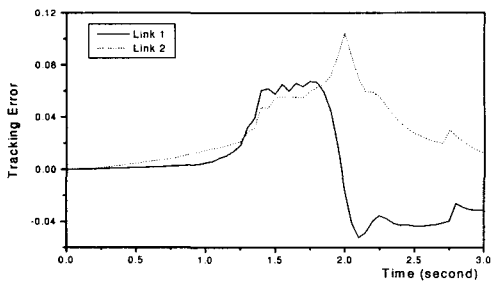

Fig. 7 Trajectory Tracking Errors

참고문헌

1. J. J. E. Slotine, "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems," Int. Journal of 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, pp. 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, Vol. 2 No. 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. H. S. Choi, "로봇 매니퓰레이터의 포화요소를 갖는 퍼지 견실제어," 한국정밀 공학회, Vol. 14-4, 1997.
7. H. S. Choi and M. H. Lee, "입력한계를 갖는 비선형 시스템을 위한 견실제어기의 설계," 한국정밀 공학회, Vol. 14-9, 1997.
8. 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.
9. H. S. Choi, "Modeling of robot manipulators working under the sea and the design of a robust controller," Int. J. Robotica, Vol. 14, pp. 213-218, 1996.
10. V. F. Filaretov and E. V. Koval "Autonomous Stabilization of Underwater Robots in the Time Manipulation Operations," Proc. Int. O.P.E.C, Osaks, Japan, pp. 382-388, 1994.
11. Inge Spangelo and Olav Egeland, "Generation of energy-optimal trajectories for an autonomous underwater vehicle," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2107-2112, 1992.
12. 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.