

기준 경로의 변형에 의한 로봇 메니퓰레이터 제어에 관한 연구

민 경 원[○] 이 종 수 죄 경 삼
홍익 대학교 공과대학 전자·전기 공학부

The Study on the Control of Robot Manipulator by Modification of Reference Trajectory

Kyoungwon Min Jongsoo Lee Gyeong-Sam Choi
School. of Electronic and Electric Eng., Hong Ik University

Abstract

The computed-torque method (CTM) shows good trajectory tracking performance in controlling robot manipulator if there is no disturbance or modelling errors. But with the increase of a payload or the disturbance of a manipulator, the tracking errors become large. So there have been many researches to reduce the tracking error.

In this paper, we propose a new control algorithm based on the CTM that decreases a tracking error by generating new reference trajectory to the controller. In this algorithm we used a fuzzy system based on the rule bases.

For the numerical simulation, we used a 2-link robot manipulator. To simulate the disturbance due to a modelling uncertainty, we added errors to each elements of the inertia matrix and the nonlinear terms and assumed a payload to the end-effector. In the simulations of several cases, our method showed better trajectory tracking performance compared with the CTM.

1. 서 론

최근 산업의 고도화에 따라 생산 시스템에 있어서 공정의 정밀화, 고속화가 요구되고 있다. 그러나 종래의 산업용 로봇은 감속기를 체택함에 따른 백래쉬(back lash), 마찰 등의 오차로 인해 정밀한 제어가 어렵고, 또한 감속비만큼의 속도 저하를 가져옴으로써 고속화의 요구에 부합하기가 어려웠다. 이를 극복하여 정밀하고 고속의 운동이 가능한 미래지향적 로봇을 설계하기 위해서 직접 구동 방식의 로봇에 관한 연구가 최근에 활성화되고 있다. 직접 구동 방식이란 큰 토크 출력을 가진 저속의 전동기가 감속 장치를 거치지 않고 직접 로봇의 연동부를 구동하는 것을 말하며, 따라서 이의 특징은 정확하고 고속의 운동을 가능하게 한다는 것이다. 그러나 관절간의 상호작용 토크 등이 감쇄 없이 직접 전동기 축에 외관으로서 작용하게 되므로, 정확한 위치제어를 위하여 로봇의 동역학을 고려한 제어가 필요하게 된

다. 대표적인 방법으로 토크 계산법을 들 수 있는데, 이러한 형태는 견실제어나 적응제어 등의 알고리즘에서도 나타나며 실제로 어느 정도의 좋은 성능을 보이고 있다. 한편 대부분의 로봇 메니퓰레이터는 스칼라형으로 원심력, 코리올리력 및 관성력과 같은 비선형적인 요소들의 간섭을 많이 받는다. 더구나 마찰력 및 주위의 외관등으로 인해서 로봇의 정확한 모델식을 얻기가 어려우며, 이러한 모델의 불확실성은 정확한 추종제어를 할 수 있게 하는 요소가 된다.

본 논문에서는 토크 계산법에 바탕을 두고, 기준 경로를 변경시킴으로써 모델링 오차로 인한 추종오차를 줄이는 것을 그 목적으로 하고 있다. 기준경로의 변형을 위해서 위치정보를 채환받아 이용하였으며, 이 과정에서 경험적으로 얻어진 규칙들을 기반으로 하는 퍼지 시스템을 이용하였다. 제안하는 알고리즘의 경로추적 성능을 보이기 위해, 모델링 오차와 부하오차를 고려하여 수치적 시뮬레이션을 하였으며 기존의 토크 계산법에 의한 제어 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 Computed-Torque Method (토크 계산법)

n자유도의 메니퓰레이터에서 모든 물리적 요소를 고려한 로봇의 동역학 방정식은

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (1)$$

여기서 $M(q)$: 관성 행렬

$N(q, \dot{q})$: 비선형 항 벡터

대부분의 동적 제어 알고리즘은 Newton-Euler 알고리즘 등을 이용한 동역학 계산을 포함하는 토크에 의한 제어를 수행하며, 식(1)로 표현되는 동역학 계산을 수행한다. 그러나 모델을 단순화하는 과정에서 나타나는 물리적 오차와 예측할 수 없는 작업 부하의 변화에 의해 나타나는 오차등이 존재하며, 또한 동역학 계산에 기인하는 시간 지연 오차등이 복합적으로 작용하여 실제의 시스템 (1)을 정확히 알아낼 수는 없다. 따라서 실제의 제어에서 이용 가능한 로봇의 동역학 모델은 실제의 모델과는

오차가 있게 되며, 이를 본 논문에서는

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{N}(q, \dot{q}) = \tau$$

로 나타내기로 한다.

시스템에 인가되는 제어 신호는

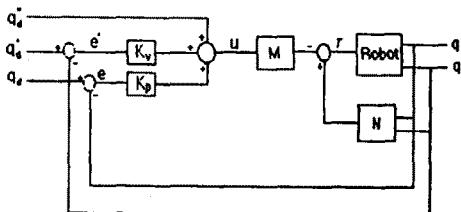
$$\tau_c = \hat{M}(q) u_c(t) + \hat{N}(q, \dot{q})$$

로 쓸 수 있으며, $u_c(t)$ 는

$$u_c(t) = \ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. (여기서 K_v, K_p 는 $n \times n$ 의 gain matrix)

토오크 계산법을 블록선도로 표현하면 다음과 같다.



<Fig 1> 토오크 계산법의 블럭 선도

식(3)의 토오크를 로봇 동역학 방정식에 인가해주면 실제 시스템과의 모델링 오차로 인해 오차방정식은 다음과 같이 된다.

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = \Delta(K_v\dot{e} + K_p e) + \Delta\ddot{q}_d(t) + \delta(t) \quad (5)$$

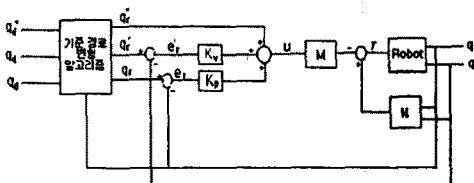
여기서 $e = q_d - q$, $\Delta = M^{-1}(M - \hat{M})$, $\delta(t) = M^{-1}(N - \hat{N})$ 로 나타낼 수 있고, 실제 시스템과 모델이 정확히 일치하는 경우에는 $\Delta = \delta = 0$ 이 되어서 식(5)는 식(6)과 같은 이상적인 오차방정식으로 표현된다.

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = 0 \quad (6)$$

이러한 경우에는 이상적인 경로 제어가 가능하게 되나, 실제의 경우 모델링 오차가 존재하기 마련이므로 경로제어는 많은 오차를 나타내게 되고, 그러한 현상은 외란이나 부하의 증가에 따라 더욱 심화된다.

2.2 기준 경로 변형 알고리즘

앞의 2.1절에서 보았듯이 기존의 토오크 계산법은 모델링오차로 인해 정확한 경로제어가 불가능하다. 본 절에서는 모델링 오차를 감소시키기 위해 제어기에 인가되는 기준 경로를 변형시킴으로써 더욱 정확한 경로제어를 가능하게 하는 방법을 제안한다. 이 방법에서는 기준 경로의 변형을 위해 위치정보를 궤환받아 이용하였고, 전체 블록선도는 다음과 같다.



<Fig 2> 제안 알고리즘의 블럭 선도

새롭게 발생된 기준 경로와 속도, 가속도를 각각 $q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r$,

라고 할 때, 기준 경로와 속도는

$$q_r = q_d + Pe, \quad \dot{q}_r = \dot{q}_d + D\dot{e} \quad (7)$$

로 정의할 수 있고, 가속도는

$$\ddot{q}_r = \frac{\dot{q}_r(\Delta t + t) - \dot{q}_r(t)}{\Delta t} \quad (8)$$

로 나타내었다. 변형된 기준 경로 $q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r$ 를 토오크 계산 법 알고리즘에 기준 경로로 대체하면, 시스템에 인가되는 제어 신호 $\tau_c = \hat{M}(q) u_c(t) + \hat{N}(q, \dot{q})$ 에서 $u_c(t)$ 는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$u_c(t) = \ddot{q}_r + K_v(\dot{q}_r - \dot{q}) + K_p(q_r - q) \quad (9)$$

이로부터 오차방정식을 구하면,

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = \Delta(K_v\dot{e}_r + K_p e_r) + \Delta\ddot{q}_r(t) + \delta(t) \quad (10)$$

이 된다. 여기서

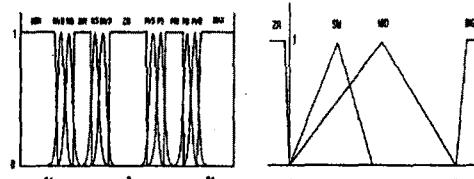
$$e_r = q_r - q, \quad \dot{e}_r = \dot{q}_r - \dot{q}, \quad \ddot{e}_r = \ddot{q}_r - \ddot{q}$$

$$\Delta = M^{-1}(M - \hat{M}) \quad \delta(t) = M^{-1}(N - \hat{N})$$

식(7)과 식(8)의 $q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r$ 을 식(10)에 대입하면

$$\begin{aligned} \ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e &= \Delta K_v\dot{e}_r + \frac{K_p e (\Delta(P+1) + D - P)}{D+1} \\ &\quad + \frac{\Delta(\ddot{q}_d + D\dot{e}) + \delta(t)}{D+1} \end{aligned} \quad (11)$$

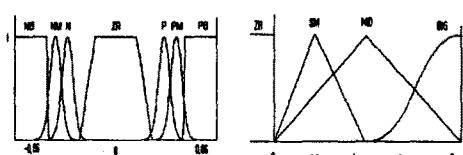
식(11)을 식(5)와 비교해볼 때, P와 D를 적절히 설정해줌으로써 식(5)의 우연을 감소시켜 더욱 좋은 경로추적 성능을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 경험적으로 세워진 규칙에 기인한 퍼지 시스템을 이용하여 P, D값을 설정하였다. 퍼지 시스템의 입력은 위치오차이고 출력은 P, D값이며 각각에 대한 퍼지 멤버쉽 함수와 퍼지 규칙은 다음과 같다.



<Fig 3> 입력 오차와 출력 P에 대한 퍼지 집합

	MIN	NVB	NB	NM	NS	NVS	ZR	PVS	PS	PM	PR	PVR	MAX
P	BIG	MID	SM	ZR	SM	MID	BIG	MID	SM	ZR	SM	MID	BIG

<Table 1> 입력 오차와 출력 P의 퍼지 규칙



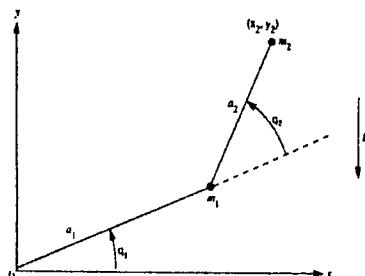
<Fig 4> 입력 오차와 출력 D에 대한 퍼지 집합

•	NB	NB	N	ZR	P	PM	PB
D	ZR	SM	MID	BIG	MID	SM	ZR

<Table 2> 입력 오차와 출력 D의 폐지 규칙

3. Simulation

앞에서 제안한 제어기의 성능 평가를 위해서, 2-link 로봇 메니퓰레이터의 모의실험을 통해 기존의 토오크 계산법과 성능을 비교하였다. Simulation 모델은 <Fig 5>의 2-자유도 로봇 메니퓰레이터 시스템을 사용하였다.



<Fig 5> 2-자유도 로봇 메니퓰레이터

이 시스템의 무부하 모델은 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau$$

$$N(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q}) + G(q)$$

($V(q, \dot{q})$: 원심력과 코리올리항 $G(q)$: 중력항)

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)a_1^2 + m_2a_2^2 + 2m_2a_1a_2\cos q_2 & m_2a_2^2 + m_2a_1a_2\cos q_2 \\ m_2a_2^2 + m_2a_1a_2\cos q_2 & m_2a_2^2 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2a_1a_2(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)\sin q_2 \\ m_2a_1a_2\dot{q}_1^2\sin q_2 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)ga_1\cos q_1 + m_2ga_2\cos(q_1 + q_2) \\ m_2ga_2\cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

위의 모델에 사용된 각각의 계수들은

$$m_1 = 1 \text{ (Kg)} \quad m_2 = 1 \text{ (Kg)} \quad \text{이며,}$$

$$a_1 = 1 \text{ (m)} \quad a_2 = 1 \text{ (m)}$$

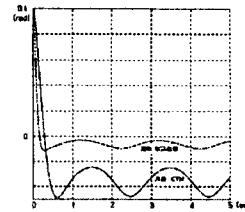
실제 시스템에서는 모델링 오차를 주기 위해서 관성행렬의 각 요소에 % 오차를 더해주고 말단장치에는 부하오차를 인가해주었다. 토오크 계산법제어에서의 이득 행렬은 대각행렬로 선택하였으며, 임계제동 시스템을 구성하기 위해 $K_v = 20J$, $K_p = 100J$ 로 선택하였다. 규정 경로는 위치, 속도, 가속도가 연속함수로 나타나는 다음과 같은 정현파 입력을 선택하였고

$$\theta_{1d} = g_1 \sin(2\pi t / T)$$

$$\theta_{2d} = g_2 \cos(2\pi t / T)$$

초기위치벡터는 $\theta_i = [0 \ 0]^T \text{ (rad)}$ 로 설정하였다.

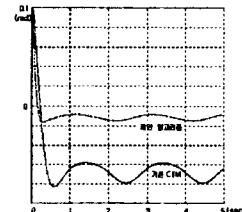
이때 $T = 2 \text{ (sec)}$, $g_{1,2} = 0.1 \text{ (rad)} \approx 6 \text{ (deg)}$ 로 설정하였고, 작업수행시간은 5 (sec)로 하였다. 기준 경로 발생과 실제 경로의 궤환시 sampling time은 0.005 (sec)로 하였으며, simulation 알고리즘은 Runge-Kutta fifth order method를 사용하였다. 그 결과, <Fig 6>, <Fig 7>의 link 2의 위치 오차에서 보듯이 기존의 토오크 계산법에 비해 더욱 향상된 성능을 나타내었다.



<Fig 6>

관성 행렬의 오차 : 70 (%)

부하 오차 : 0.2 (Kg)



<Fig 7>

관성 행렬의 오차 : 90 (%)

부하 오차 : 0.1 (Kg)

4. 결론 및 검토

본 논문에서는 토오크 계산법 제어 구조에 바탕을 두고, 실제 위치정보를 궤환받아 기준 경로를 재발생시켜주는 제어 구조를 제안하였다. 경험적인 규칙들에 근거한 피지시스템을 사용하여 원래의 기준 경로에 더해질 위치오차와 속도오차의 이득값을 선정해주어 기준 경로를 변형해주었고, 그 결과 토오크 계산법에 비해 추종 오차가 줄어들었음을 볼 수 있었다.

참고 문헌

- 1) F. L. Lewis and C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, New York : Macmillan, 1993
- 2) M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, New York : John Wiley & Sons, 1989
- 3) Seul Jung and T. C. Hsia, "A New Neural Network Control Technique for Robot Manipulators," American Control Conference, pp 878-882, 1995
- 4) R. W. Daniel and P. G. Davey, "Two Key Problems in Robotics Research", *Robotics Research : 2nd Int. Symposium*, MIT Press, pp 495-499, 1987
- 5) Yoshiaki Shirai, "Key Issues of Robotics Research", *Robotics Research : 2nd Int Symposium*, MIT Press, pp 505-510, 1987
- 6) Bart Kosko, *Neural Networks and Fuzzy systems*, Prentice-Hall, International Inc. 1992

본 연구는 96년 홍익 대학교 교내 연구비에 의해 연구된 결과임