

로봇 매니플레이터의 반복 토크 제어

신대왕(부산대 대학원), 김종식*(부산대 기계공학부), 박전수(부산대 기계공학부)

Recursive Torque Control of Robot Manipulators

D. W. Shin(Mech. Eng., PNU), J. S. Kim(Mech. Eng., PNU), J. S. Park(Mech. Eng., PNU)

ABSTRACT

A control law for a SCARA robot manipulator is designed using recursive torque methods. This scheme uses previous torques and error dynamics to generate torque controls at the present time and adopts relatively simple numerical and control algorithms that can be easily realizable. In order to evaluate the performance and robustness of the suggested control system, the 2-link SCARA robot manipulator is practically implemented using a dSPACE interface. It is found that the recursive controller has a good tracking performance in spite of the presence of payload disturbances.

Key Words : two-link SCARA robot(2축 스칼라 로봇), recursive torque methods(반복 토크 방법)

1. 서론

산업용 로봇 매니플레이터의 토크 제어기는 지금까지 대부분 PID 제어기를 사용하여 왔으며, 이는 어느 정도의 요구되는 성능을 보장하면서도 구현이 간단하고 계산량이 적은 이점을 갖기 때문이었다. 하지만 로봇 매니플레이터가 불확실성이나 외란, 특히 하중(payload)이 크게 변하는 작업환경 속에서 운용될 때는 이의 정밀 제어 및 고속화에 큰 문제점이 대두된다. 한편, 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 종전까지는 계산 토크 제어방법을 적용해 보려는 추세를 보여 왔다^{1,2,3}. 그러나 이 방법은 원하는 로봇의 운동 성능을 대체적으로 만족시키지만 시스템 파라미터가 정확하게 평가되지 않을 경우에는 오차 동특성(error dynamics)이 무작위로 생성될 뿐만 아니라 제어법칙을 구하는 데에도 수치적으로 대단히 복잡하였다. 따라서 지금은 이런 단점을 보완하기 위하여 적응 제어기법을 도입한 계산 토크 방법이 크게 연구되고 있으며, 특히 Ostojic⁴은 직접 적응 제어기법(direct control adaptation)과 수치적인 해석 구조를 이용하여 계산 토크 알고리즘이 훨씬 간편한 반복 토크 제어기법(recursive torque methods)을 제안하였다. 하지만 Ostojic은 단지 자신의 이론을 모의실험

로만 입증하였을 뿐 실제 로봇 시스템에는 적용하지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 2축 스칼라 로봇에 대한 반복 토크 제어기를 실제로 구현하고 명령 추종 및 하중의 변화에 대한 출력 성능을 직접 실험을 통하여 이의 우수성을 입증해 보고자 한다.

2. 반복 토크 제어기 설계

본 논문에서 채택한 2-링크 로봇 매니플레이터의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 여기서 θ_i 는 링크 i 가 수평면과 이루는 관절각도, m_i 는 링크 i 의 질량, l_i

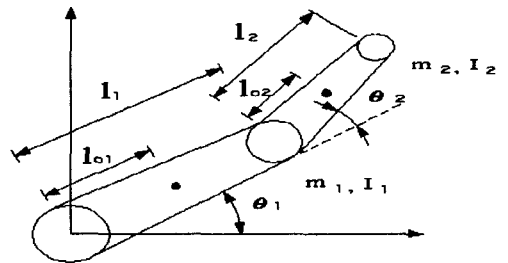


Fig. 1 Schematic diagram of a 2-link robot manipulator

은 이전관절에서 링크 i 의 중심까지의 거리, 그리고 I_i 는 각 링크의 질량관성모멘트이다.

Fig. 1과 같은 로봇 매니플레이터의 일반적인 운동방정식은 흔히 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(\theta, t)\ddot{\theta} + f(\theta, \dot{\theta}, t) + d = T \quad (1)$$

여기서 $\theta \in R^{n \times 1}$ 는 매니플레이터의 관절각, $M(\theta, t) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬, $f(\theta, \dot{\theta}, t) \in R^{n \times 1}$ 는 원심력, 코리올리력 및 중력에 의한 비선형 토크벡터, $d \in R^{n \times 1}$ 는 외란, 그리고 $T \in R^{n \times 1}$ 는 제어입력 토크이다.

로봇의 경로 추적 문제는 원하는 매니플레이터의 관절각을 제어하는 문제로 생각할 수 있다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 다음과 같은 오차 동역학식을 풀어야 한다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (2)$$

여기서 $e = \theta_d - \theta$ 이며, 이때 θ_d 는 요구되는 매니플레이터의 관절각, θ 는 실제 매니플레이터의 관절각, 그리고 K_p 와 K_v 는 각각 대각 행렬로 구성되는 설계 파라미터이다. 우선, 반복 토크 제어를 조직적으로 유도하기 위하여 다음과 같은 σ 를 정의한다.

$$\sigma = \ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e \quad (3)$$

다음, 식 (2)를 만족시키기 위한 수치적인 반복 토크 제어를 다음과 같은 형태로 표현하기로 한다.

$$T(t_{k+1}) = \varphi(T(t_k), \sigma(t_k)) \quad (4)$$

여기서 $T(t_{k+1}) \in [T_{\min}, T_{\max}]$ 이고, $T(t_0)$ 는 $t = t_0$ 에서 주어진 초기토크이다. 식 (4)로부터 t_{k+1} 일 때의 토크는 t_k 일 때의 토크 $T(t_k)$ 와 오차동역학 $\sigma(t_k)$ 의 함수임을 알 수 있고, 따라서 실제 실험시에는 t_k 일 때의 토크의 정보를 이용하여 t_{k+1} 일 때의 토크를 정확하게 계산할 수 있을 뿐만 아니라 몇몇 잘 알려진 수치적인 방법을 이용하면 식 (2)를 만족시키는 반복 토크 제어의 효과를 거의 실시간에 달성할 수 있을 것이다.

식 (4)에 parallel-chord의 수치 방법을 적용하면 다음과 같이 선형결합식으로 표현할 수 있다.

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + \lambda \sigma(t_k) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\lambda \in R^{n \times n}$ 은 상수 비특이 행렬(constant non-singular matrix)로써 일반적으로 다음과 같은 시스템의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)에 대한 수렴 조건^[4]으로 결정된다.

$$J(\varphi) = I + \lambda J(\sigma) \quad (6)$$

여기서 I 는 단위 행렬이고 $J(\sigma) = (\partial \sigma_i / \partial T_j)$ 이며, 또한 식 (6)에 대한 수렴 조건은 다음과 같다.

$$\rho(I - \lambda M^{-1}) < 1 \quad (7)$$

여기서 ρ 는 스펙트럼 반경(spectral radius)이다.

또한, 식 (4)에 Newton의 수치 방법을 적용하기로 한다. 이 방법은 parallel-chord 방법에서는 상수로 평가되는 λ 대신 시간에 따라 변하는 관성 행렬 $M(t_k)$ 의 수치적인 해인 $\hat{M}(t_k)$ 를 고려하는 방법이다. 즉,

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + \hat{M}(t_k) \sigma(t_k) \quad (8)$$

여기서 $\hat{M}(t_k) = -J^{-1}(\sigma_k)$ 이다. 따라서 페루프 시스템의 안정성은 다음과 같은 시스템의 자코비안 행렬인 J 로 결정할 수 있다.

$$J(\varphi) = I - \hat{M} M^{-1} \quad (9)$$

여기서 \hat{M} 이 부정확하게 측정되더라도 식 (9)는 다음과 같은 안정 조건식을 반드시 만족한다.

$$\rho(J(\varphi)) < 1 \quad (10)$$

3. 제어시스템의 성능 실험

본 논문에서는 2축 로봇의 반복 토크 제어시스템에 대한 바람직한 제어제인을 이론적으로 먼저 구한 후, 이를 스텝 응답 성능, 원 궤적 추종 성능 및 r 자형 궤적 추종을 실험을 통하여 서로 비교 평가하기로 한다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 2축 스칼라 로봇시스템의 실물과 구성도이다. 제어 알고리즘을 처리하는 컴퓨터 환경은 Windows95상의 MATLAB 4.2와 dSPACE사의 DSP 프로그램인 Cockpit31과 Trace31w를 사용



Fig. 2 Experimental unit of the 2-link robot manipulator

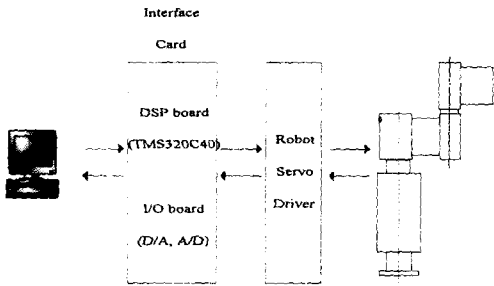


Fig. 3 Layout of the 2-link robot control system

Table 1 System parameters

parameter	link 1	link 2
I (kgm^2)	0.632	0.0746
m (kg)	25.6	7.2
l (m)	0.331	0.292
l_c (m)	0.086	0.037

할 수 있도록 되어 있다. 그리고 DSP 보드는 2개의 엔코드 신호를 받아서 제어입력(전압)을 발생하고, 로봇의 서보는 제어입력을 받아 로봇을 구동시킨다. 그리고 Table 1에는 본 논문의 실험에 사용된 로봇 시스템의 파라미터(parameter) 값들이 요약되어 있다.

이제 실험을 통하여 parallel-chord와 Newton 방법에 의한 수치적 반복 토크 제어기의 응답 성능을 구하고, 이를 각각 평가하기로 한다. Fig. 4에서 Fig. 6까지는 parallel-chord 제어기의 응답 성능을 나타낸다. 스텝 응답의 경우, 특히 두 번째 링크에서 초기의 과도한 토크 발생으로 인하여 과도 응답 상태가 별로 좋지 않다. 이는 만족할 만한 성능을 얻기 위해 큰 λ 가 선정되어 과도한 제어입력이 사용되었기 때문으로 사료된다. 하지만 λ 가 큰 경우에는 정상상태에서의 미세한 진동현상은 발생하지만 원 궤적 성능은 우수함을 알 수 있고, 이는 원 궤적을 추종하는 토크가 최대 토크 범위 내에 있고 시간에 따른 토크의 변화량도 크지 않아서 적절한 제어 토크를 만들

수 있기 때문으로 생각된다. 그리고 parallel-chord 제어기는 Fig. 6에서와 같이 Γ 자형 궤적 추종에서는 스텝에서 보였던 과도한 초기 입력에 대한 약 0.5초 정도의 적응 시간이 요구된다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 Newton 제어기에 대한 각각의 응답 성능들이다. 이 경우에도 만족할 만한 성능은 얻었지만 parallel-chord 제어기와 마찬가지로 초기 상태에서 과도한 토크가 요구되고 있음을 알 수 있다. 이는 반복 토크 제어기의 일반적인 단점으로 토크의 계산시 오차의 가속도를 고려하기 때문으로 여겨진다. 오차의 가속도항은 센서 잡음에 매우 민감하므로 처음에는 큰 제어량이 발생하고 이를 반복 토크 제어기가 이전 토크로 기억하기 때문에 이런 현상이 일어남을 예측할 수 있다. 한편, Newton 방법은 Γ 자형 궤적 추종에서는 parallel-chord 방법보다 더 좋은 성능을 갖는다. 이는 parallel-chord 방법에서는 오차동역학식에 곱하여 지는 λ 가 상수인 반면에 Newton 방법에서는 $M(t_k)$ 가 각 순간마다 변하는 값을 갖기 때문이다.

끝으로, 반복 토크 제어기의 강인성(robustness)을 평가하기로 한다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각의 반복 토크 제어시스템에 질량이 ± 3 kg씩 변하는 경우에 대한 궤적 실험 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 평가할 수 있듯이 본 논문에서 설계한 두가지의 반복 토크 제어기는 모두 부하 변동에 대하여 충분한 강인성을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 산업용 스칼라 로봇에 대한 반복 토크 제어기를 구현하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 과정과 실제 실험을 통하여 반복 토크 제어기는 매우 만족할 만한 성능을 얻었다. 특히, parallel-chord 방법보다는 Newton 방법이 성능면에서 더욱 우수하였다. 그러나 정밀 제어를 하기 위해서는 초기의 과도한 입력토크의 누적 문제와 순각적인 각의 변동시 즉, 각의 방향이 바뀔 때나 각이 불규칙적으로 변할 때, 반복 토크 제어기는 변하기 직전의 값을 이전 토크로 사용하기 때문에 이를 식별하여 적절히 처리할 수 있는 새로운 알고리즘이 필요하다. 또한, 체계적인 제어 개인 선정 방법에 대한 향후 연구도 아울러 요구된다.

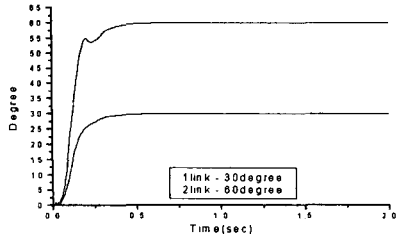


Fig. 4 Step responses(parallel-chord)

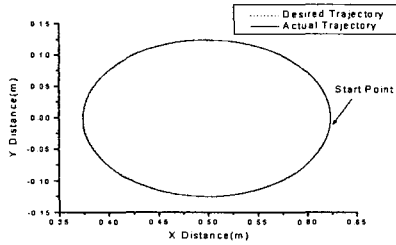


Fig. 5 Circle tracking responses(parallel-chord)

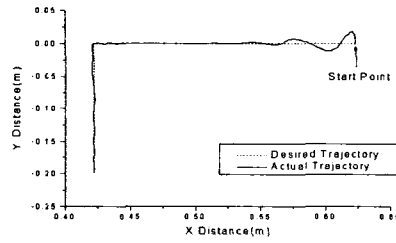


Fig. 6 Scheduled tracking responses(parallel-chord)

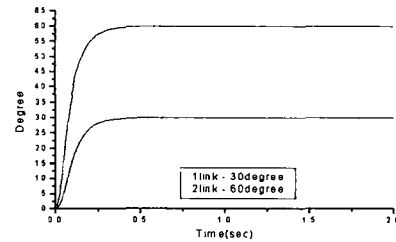


Fig. 7 Step responses(Newton)

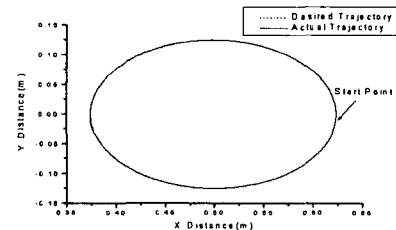


Fig. 8 Circle tracking responses(Newton)

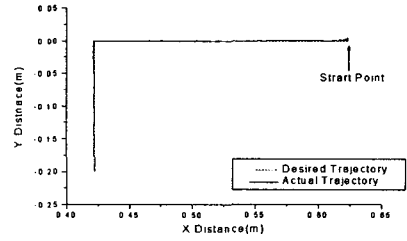


Fig. 9 Scheduled tracking responses(Newton)

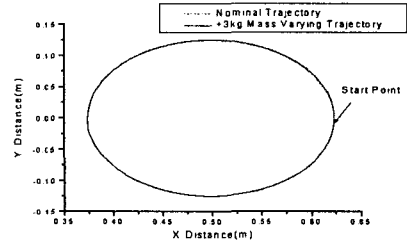


Fig. 10 Circle tracking responses with and without mass change(parallel-chord)

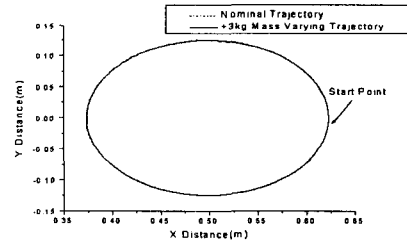


Fig. 11 Circle tracking responses with and without mass change(Newton)

참고 문헌

1. Mark W. Spong and M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, John Wiley and Sons, 1989.
2. K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, ROBOTICS, McGRAW-HILL, 1987.
3. Craig, Introduction to ROBOTICS Mechanics and Control, Addison Wesley, 1989.
4. Mile Ostojic, "Recursive control of robotic motion", Int. J. Control, Vol. 64, No. 5, pp. 775-787, 1996.