

로봇 매니플레이터의 목표궤적 추종을 위한 학습제어기 구현

*조형기, 김진수, 홍석교
아주대학교 전기전자 공학부 로봇 응용 실험실

A Learning Controller Implementation for Robot Manipulators to track the desired trajectory

*Hyeong-Ki Cho, Jin-Soo Gil, Suk-Kyo Hong
Dept. of Electric & Electronic Engineering Ajou-Univ.

Abstract

This paper presents the learning controller for robot manipulators to track the desired trajectory exactly. The learning controller, based on the Lyapunov theory, consists of a fixed PD action and a repetitive action for the purpose of feedforward compensation which is adjusted utilizing a linear combination of the velocity and position errors. The learning controller is often used in case of the desired trajectories are periodic tasks, and has advantage that it periodically converges to zero even if we don't know the exact dynamic parameters.

In this paper, we show that the position and velocity errors of robot manipulators converge to zero as time goes infinite for the input is periodic function and show a good trajectory tracking performance in the cartesian space.

1. 서론

산업현장에서 로봇 매니플레이터는 주로 반복 작업에 이용된다. 각 관절의 상태변수가 링크 상호간에 결합되고 부하의 변화 및 작업환경에 따라 파라미터값이 변하는 로봇 매니플레이터는 비선형 시스템이며, 제어적인 측면에서 비선형 다변수 시스템이 된다. 비선형적 특성을 갖는 로봇 매니플레이터의 동력학을 고려하지 않는 제어는 고속이나 부하의 변동이 큰 작업에 대해서는 좋은 성능을 기대하기 어렵기 때문에 Model Based 제어기나, Computed Torque 제어기, Feed Forward 제어기 등의 동력학을 고려한 제어기[1,2]에 대한 연구가 이어져 왔다.

최근, 로봇 매니플레이터의 "적용제어" 알고리즘[4]과 "학습제어"에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이들은 파라미터의 불확실성과 외란등으로 인한 로봇 매니플레이터의 비선형성을 보완하기 위함이다.

Sadegh와 Horowitz는 가속도 측정과 추정된 관성행렬의 역변환을 필요로 하지 않는 완벽한 로봇 매니플레이터 역학을 고려한 학습제어기를 제시 하였다.

적용제어의 연구에 대한 노력과 같이하여 로봇 매니플레이터의 "학습", "반복" 이라 불리는 제어기의 연구[5,7]가 진행된 것은 현상에서의 단순 반복 운동이 요인이라 할 수 있다.

이 제어기는 로봇 매니플레이터가 어떠한 주기를 가지고 계속해서 같은 작업을 수행하는 분야에 주로 응용 되는데,

한 주기에서 다음 주기까지의 트래킹 성능 향상이 주목적으로, 현재의 매니플레이터 목표궤적 운동과 바로 이전 주기의 매니플레이터 실제 운동 사이의 여러 입력신호를 보상하는 것이다.

한편, 그동안 로봇 매니플레이터 연구의 대부분은 작업 공간의 모델링이 조인트 공간 좌표계에서 설정되어 있지만 산업현장이나 응용 분야에서의 로봇 작업은 End-Effector에 의해서 이루어 진다. 즉, 실제적인 로봇 매니플레이터 제어는 직교공간 좌표계에서 End-Effector가 목표궤적을 추종해 가는 것이 대부분이다. 본 논문에서는 그림 3에서 보이는 것과 같이 직교공간 좌표계에서의 제어기 타당성을 확인 하고자 중심 P(2,1), 반지름 0.5m인 원에 대한 목표궤적을 제시 하였으며, 연속적인 반복 동작으로 매니플레이터는 결국 작업에 대한 "학습"을 하게 되고 어떠한 잔류에러 없이 목표궤적을 추종 하게 된다.

2. 학습 제어기

로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같은 비선형 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, $M(q) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬, $V_m(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 전향력과 편향력 벡터, $G(q) \in R^n$ 는 중력 벡터, F는 그 밖에 모델화되지 않은 힘 즉, 마찰력 및 외란 등을 나타내고, $\tau \in R^n$ 는 각 조인트에 가해지는 토크 입력 벡터를 나타낸다.

식 (1)의 운동 방정식이 주기적이고 매 주기에 따라 같은 운동을 반복 한다는 가정을 한다면 다음과 같은 방정식이 성립한다.

$$M(q_d)\ddot{q}_d + V_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + G(q_d) + F = u_d(t) \quad (2)$$

$$u_d(t) = u_d(t-T) \quad (3)$$

$$\dot{u}_d(t) = \dot{u}_d(t-T) \quad (4)$$

$$\ddot{u}_d(t) = \ddot{u}_d(t-T) \quad (5)$$

식 (3),(4),(5)는 현재나 이전주기의 매니플레이터 동력학식이 변함이 없음을 의미하고, 식 (2)로 부터 다음의 제어기를 유도한다.

$$\tau = \hat{u}_d(t) + K_V r + K_P e + K_a \|e\|^2 r \quad (6)$$

식 (6)의 $\hat{u}_d(t)$ 는 Learning Term으로 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{u}_d(t) = \hat{u}_d(t-T) + K_L r \quad (7)$$

식 (6)의 제어기는 Lyapunov 안정도 해석에 의해 시간이 지남에 따라 위치오차와 속도 오차가 점진적으로 수렴함을 증명[2,5,6] 하였으며 그림 1. 에 제어기의 전체 블록도를 나타내었다.

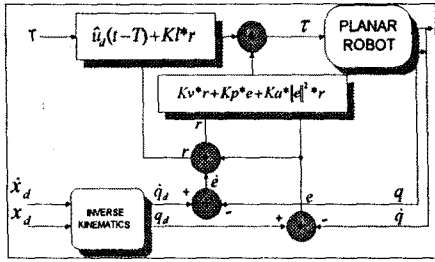


그림 1. 학습제어기의 블록도
Fig.1. Block Diagram of Learning Controller

3. 모의 실험

그림 2. 와 같은 2축 로봇 매니플레이터를 대상으로 모의실험을 하였다.

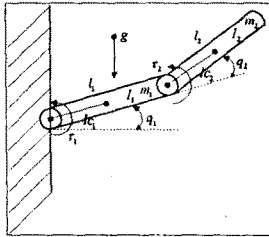


그림 2 시뮬레이션 모델
Fig.2. Simulation Model

모의 실험을 위해 쓰여진 2축 로봇 매니플레이터의 링크의 질량과 길이는 각각 1kg, 2m로 하였으며, 또한 중력가속도는: $9.8m/s^2$ 이며 샘플링 시간은 5msec로 하였다. 제어 알고리즘의 효율적인 검증을 위해 그림 3. 과 같이 직교공간에서 End-Effector가 원을 추종하도록 설계하였으며 원을 한 바퀴 추종하는 데는 주기가 3초 이고 전체 24초의 모의실험 시간동안 6회의 원을 추종하게 했다.

4. 결론

본 논문에서는 로봇 매니플레이터가 주기적으로 반복 작업을 한다는 가정 아래 바로 이전 주기에서 발생했던 에러와 현재의 에러를 동시에 보상하는 학습제어기를 제시 하였다.

그림 5, 6은 End-Effector가 원을 그리기 위해 각 조인트에 가해져야 할 조인트 입력이며, 그림 7-9는 각 조인트의 위치 및 속도오차를 의미한다.

그림 10, 11은 End-Effector가 원을 그릴때의 각 조인트 추종각이며, 그림 12는 주기를 반복해 가면서 End-Effector가 원에 대한 궤적을 추종해 나가는 모습을 보여준다.

적용제어기와 마찬가지로 Update Rule에 따라 주기적으로 에러를 갱신해 나가므로 불확실한 파라미터나 외란에 대해서도 에러가 수렴함을 알 수 있으며 제어기

의 간단한 구조 때문에 계산시간을 현저하게 단축시켰을 뿐 아니라 가속도의 계산이 필요없으며 역동력학 또한 계산할 필요가 없는 장점이 있다. 목표궤적이 주기적이야 하는 면에서 단순 반복작업을 주로하는 현장에서 적용해 볼만한 제어기이며, 앞으로 실험을 통해 모의실험에서 확인했던 목표궤적 추종성능을 재확인 해 볼 필요가 있을 것이다.

5. 참고 문헌

- [1] C.H.An, C.G.Atkeson, J.M.Hollerbach, "Experimental evaluation of feedforward and computed torque control," IEEE Conf. on Robotics and Automation, Vol.2, pp.165-168, 1987.
- [2] F.L. Lewis, C.T. Abdallah, D.M. Dawson, Control of Robot Manipulators, MACMILLAN PUB., 1993.
- [3] J.J. E. Slotine, Weiping Li, "On the adaptive control of robot manipulators," Int. J. Robotics Res., pp.49-59, June, 1987.
- [4] John J.Craig, Ping Hsu, S.ShankarSastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," Int. J. Robotics Research, Vol.6, No.2, pp.16-28, Summer, 1987.
- [5] Sadegh,N., R. Horowitz, W.Kao, and M. Tomizuka, "A unified approach to the design of adaptive and repetitive onrollers for robotic manipulators," Trans. ASME, vol. 112, pp. 618-629, Dec. 1990.
- [6] Sadegh,N., R. Horowitz, "Stability and robustness analysis of a class of adaptive controller for robotic manipulators," Int.J.Robot. Res., vol. 9, no. 3, pp. 74-92, June 1990.
- [7] Tae-yong Kuc and Jin S. Lee, "Learning control of constrained robot motion," Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 4, pp. 345-349, Oct 1993.

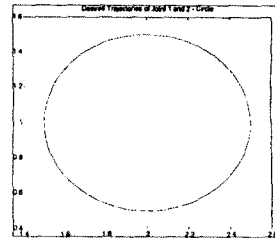


그림 3. 목표궤적 - 원
Fig.3. Desired Trajectory-Circle

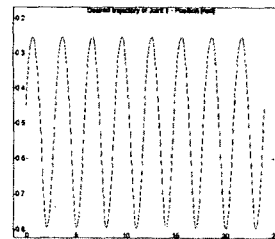


그림 4. 조인트 1의 목표궤적
Fig.4. Desired Trajectory of Joint 1

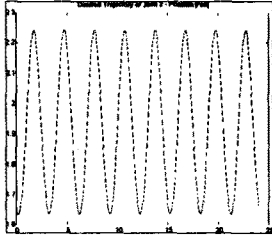


그림 5. 조인트 2의 목표궤적
Fig.5. Desired Trajectory of Joint 2

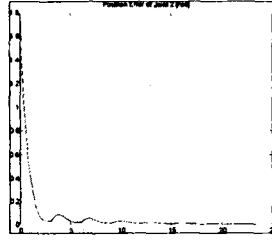


그림 9. 조인트 2의 속도 오차
Fig. 9. Velocity error of Joint 2

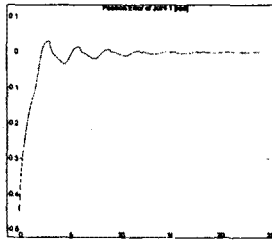


그림 6. 조인트 1의 위치 오차
Fig.6. Position error of Joint 1

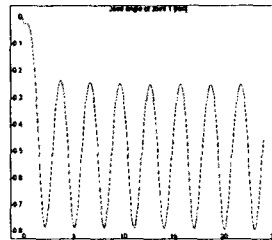


그림 10. 조인트 1의 추종각
Fig.10. Tracking angle of Joint 1

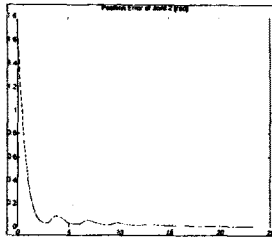


그림 7. 조인트 2의 위치 오차
Fig.7. Position error of Joint 2

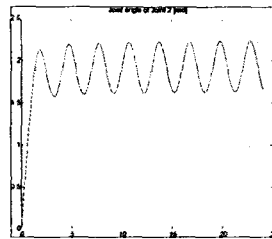


그림 11. 조인트 2의 추종각
Fig.11. Tracking angle of Joint 2

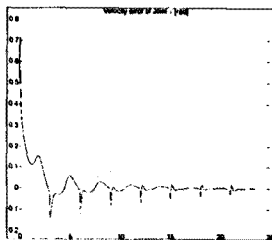


그림 8. 조인트 1의 속도 오차
Fig.8. Velocity error of Joint 1

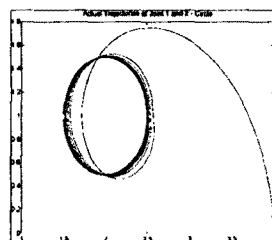


그림 12. End-Effector의 궤적
Fig.12. Trajectory of End-Effector