

적응제어를 이용한 6자유도 로봇의 제어향상을 위한 연구

김병수*(경희대 대학원), 김규로(경희대 대학원), 이순걸(경희대 기계공학과)

(Control Progress of 6-DOF Robot using Adaptive Control)

B. S. Kim*, G. R. Kim(Dept. of ME, KyungHee Univ.), S. G. Lee(ME, KyungHee Univ.)

ABSTRACT

The purpose of robot manipulator control is to make for manipulator take a trace of pre-planned trajectory. In this study, the algorithm of MRAC(Model Reference Adaptive Control) on reference to adaptive control theory was studied. The experiments were performed on 6-DOF robot manipulator with respect to p-d(proportional-differential) controller and adaptive controller. The property of adaptive control was studied and its efficiency proved by being compared to p-d controller.

Key Words : Robot Manipulator (로봇 매니플레이터), Trajectory(궤도), Adaptive Control(적응제어), DOF(Degree Of Freedom:자유도), MRAC(모델기준적응제어), P-D Control(비례-미분 제어).

1. 서 론

최근 생산 자동화의 추세에 따라 로봇 매니플레이터는 단순 반복작업에서 점차 복잡하고 정밀한 작업으로 그 이용 범위가 날로 증가하고 있다. 이때, 매니플레이터의 운동경로 오차를 감소시켜 보다 신속한 동작 및 정확한 기능의 요구에 따라 로봇 매니플레이터의 효율적인 제어 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1,2).

로봇 매니플레이터 동역학 방정식에서 변수들의 비선형 특성에도 불구하고, 전체 시스템의 안정도를 보장하는 모델 기준적응제어는 각 관절에 독립적인 시불변 2-차 선형시스템을 기준모델로 사용하는 제어방식으로⁽³⁾, 본 논문은 스펀포드 6자유도 로봇 매니플레이터를 사용, 입,출력 양쪽의 측정값들을 사용하는 기준모델을 구성하여 자동으로 귀환되는 모델에, 선택된 실행 작업이 최소가 되도록 매개 변수를 결정, 적응제어와 비례-미분 제어와의 비교를 통한 적응제어의 제어성 향상에 그 목적이 있다.

2. 이 론

2.1 동역학적 해석

로봇 매니플레이터 팔을 원하는 위치로 구동시키기 위해서는 각 관절의 위치와 속도, 가속도등을 계산하여, 필요한 관절 토크를 링크에 전달해야만 한다.

n-차 관절을 갖는 로봇 매니플레이터 팔끝의 가속도는 다음식의 기준좌표계에 대한 로봇 팔끝의 선속도 및 각속도를 이용하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}(t) \\ \dot{\Omega}(t) \end{bmatrix} = [J_1(\theta), J_2(\theta), \dots, J_6(\theta)] \dot{\theta}(t) \quad (1)$$

2.2 비례-미분 제어

비례-미분 제어가 설치에 따른 로봇 매니플레이터의 구동에서 로봇은 그 자체의 비선형적인 요소에 의해 일정한 외란으로 취급되지 못하여 매니플레이터로 다시 귀환되는 토르는 완전한 보상을 이루지 못한다. 따라서, 이를 완전한 보상이 이루어진다는 가정하에, n-차 관절에 대한 비례-미분 제어기의 제어 법칙을 다음과 같이 나타낸다.

$$T = -K_p \ddot{\theta} - K_D \dot{\theta} \quad (2)$$

여기서, $\ddot{\theta}$ 는 관절의 실제 구동과 바라는 구동의 관절각 오차 즉, $\theta - \theta_D$ 의 오차(Positive Error)이며, $\dot{\theta}$ 는 $\ddot{\theta}$ 의 시간에 대한 미분량 $\dot{\theta} = \dot{\theta}_D - \dot{\theta}$ 이며, 그리고 K_p 는 매니플레이터의 비례 이득(Proportional Gain)이며, K_D 는 미분 이득(Derivated Gain)을 의미한다. 식(2)의 첫번째 항은 비례 이득 $K_p \ddot{\theta}$ 의 항이며, 두번째 항은 로봇 매니플레이터의 운동에너지항이다.

정상 상태 오차를 무시한 상태에서의 위 식은 Lyapunov 함수를 고려하여 다음과 같다^(6,7).

$$L = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} + \frac{1}{2} \dot{\theta}^T K_p \dot{\theta} \quad (3)$$

위와 같이, 함수 L은 매니플레이터 시스템의 전 에너지(Total Energy)를 갖게 되며, $M(\theta)$ 와 K_p 는 $\theta = \theta_D$ 일 때를 제외한 $L > 0$ 에서, 양(Positive)으로 정의되는 대칭(Symmetric)성분들로서, 위 식(3)을 미분한 후, 식(2)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{L} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{M}(\theta) \dot{\theta} - \dot{\theta}^T (H + K_D) \dot{\theta} \quad (4)$$

여기서, 불균형 대칭행렬(antisymmetric matrix)로 계산되는 $(M-2H)$ 의 항때문에, 로봇 매니플레이터 구동 방정식은 다음과 같은 함수 L 의 성질에 의해 안정한 제어를 하게 된다⁽¹⁰⁾.

$$L = -\dot{\theta}^T K_D \dot{\theta} \leq 0 \quad (5)$$

2.3 적응제어

모델기준적응제어는 매니플레이터의 바라는 페루프 귀환 이득을 동역학적 응답으로 나타내는 기준 모델로 설정함으로써 이루어진다. 이때의 적응제어기는 설정된 토크와 실제 토크와의 출력 오차를 관찰하여, 이를 줄여나가기 위해 기준 모델에 사용된 변수벡터를 이용한다.

로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같은 간단한 구동 방정식이 된다⁽⁴⁾.

$$T = M(\theta) \ddot{\theta} + Q(\theta, \dot{\theta}) \quad (6)$$

식(6)의 매니플레이터를 제어하기 위해, 다음과 같은 제어 법칙을 설정한다⁽⁴⁾.

$$T = \overline{M}(\theta) \ddot{\theta}^* + \overline{Q}(\theta, \dot{\theta}) \quad (7)$$

여기서, $\overline{M}(\theta)$ 와 $\overline{Q}(\theta, \dot{\theta})$ 는 $M(\theta)$ 와 $Q(\theta, \dot{\theta})$ 의 구동 시 계산되는 값이다.

적응제어 법칙에 따른 초기가정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}^* &= \dot{\theta}_D + K_D \dot{E} + K_P E \\ \dot{E} &= \dot{\theta}_D - \dot{\theta} \triangleq [e_1 e_2 \dots e_N]^T \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, K_D 와 K_P 는 $N \times N$ 상수의 대칭-이득 행렬이다.

식(7)은 매니플레이터 제어의 토크 계산법이라 불린다.

식(7)과 식(8)에 의해 다음을 얻는다.

$$\dot{E} + K_D \dot{E} + K_P E = \overline{M}^{-1}(\theta) [\overline{M}(\theta) \ddot{\theta} + \overline{Q}(\theta, \dot{\theta})] \quad (9)$$

이때, $\overline{M}(\theta)$ 와 $\overline{Q}(\theta, \dot{\theta})$ 은 모델 변수내의 오차로부터 발생한 제어기내의 동역학적 모델값의 오차를 표시하는 것으로, $M(\theta) - \overline{M}(\theta)$ 과 $Q(\theta, \dot{\theta}) - \overline{Q}(\theta, \dot{\theta})$ 이다.

n -차 관절 검출서보 오차는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathcal{E}_{1N}(S) = (S + \Phi_N) e_M(S) \quad (10)$$

여기서, Φ_N 은 양의 상수로 다음과 같이 쓸 수 있다⁽⁴⁾.

$$\begin{aligned} \Phi_1 &:= \dot{E} + \Phi E \\ \Phi &:= \text{diag}(\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_N) \end{aligned} \quad (11)$$

정상상태에서 시스템 검출오차 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + B \overline{M}^{-1} W \phi, \quad E_1 = CX \quad (12)$$

여기서, A, B 및 C 는 대칭을 갖는 A_n, B_n 그리고, C_n 과 함께 블록대칭이며, $X = [X_1 X_2 \dots X_n]^T$ 이다.

다음의 Lyapunov를 고려하여 적응제어법칙을 유도한다⁽⁸⁾.

$$V(X, \phi) = X^T P X + \phi^T \Gamma^{-1} \phi \quad (13)$$

윗 식에서 $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_n)$ 이며, ϕ 를 고려한 다음과 같이 된다.

$$\dot{V}(X, \phi) = -X^T Q X \quad (14)$$

Q 가 양(Positive)으로 정의되었기 때문에, 원점착업상의 변수를 더한 것은 $V(X, \phi)$ 가 양이 아닌 상태를 유지하며, 이때의 시스템은 연관된 X 와 ϕ 와 같이 Lyapunov 함수상에서 안정된 상태를 갖게 된다⁽⁸⁾.

이는 연속적으로 동일하며, 이때 $X^T Q X$ 는 다음과 같은 유한의 적분량을 갖게 된다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X^T Q X = 0 \quad (15)$$

그러므로, 시스템의 서보오차는 다음과 같이 조정되어 오차값을 줄이게 된다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E = 0 \quad (16)$$

즉, 위와 같은 적응제어를 적용함으로써 서보오차가 영(zero)으로 수렴, 로봇 매니플레이터의 궤도추적은 시스템의 모든 연관된 신호에서 안정하게 각 관절로의 정확한 추적을 하게 된다^(7,8).

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

작업 공간내의 매니플레이터 구동을 위한 궤도가 정해질 때, 이들의 위치, 속도, 가속도등은 직각 좌표계 혹은 관절 좌표계에서 묘사된다. 로봇 매니플레이터의 초기설정된 궤도상에서 구동에 따른 속도의 분포 형태는 사다리꼴모양을 이룬다.

본 연구에서, 임의의 설정 궤도에 대한 시뮬레이션 대상은 6-DOF 로봇 매니플레이터로써, 미국 스탠포드 6자유도 매니플레이터를 가지고 수행하였다. 로봇 매니플레이터의 팔은 주어진 초기위치로부터 구동되어, 정해진 최종위치와 자세를 갖는다. 시뮬레이션 모델의 사양은 Table.1과 같다.

Table.1 Specification of 6-DOF Robot Manipulator

Link	D_i (m)	M_i (Kg)	K_{pi} (Nm/rad)	K_{di} (Nm/rad)
1	0.4125	9.29	200.0×10^4	8.0×10^5
2	0.1537	5.01	500.0×10^4	10.0×10^5
3	0.40	4.25	25.0×10^4	1.0×10^5
4	.	1.08	15.0×10^4	5.5×10^5
5	.	0.63	200.0×10^4	8.0×10^5
6	0.2629	0.51	500.0×10^4	10.0×10^5

여기서, d_i 는 i -차 링크의 길이(m)이고, m_i 는 i -차 링크의 무게(Kg)이며, K_{pi} 는 i -차 링크의 위치 이득(Nm/rad), K_{Di} 는 i -차 링크의 미분 이득(Nms/rad)을 나타낸다.

6자유도 로봇 매니퓰레이터의 시뮬레이션 궤도는 X-Y 평면을 매 sec마다 0.2(m)씩 이동하는, 전체 구동 시간 4(sec)의 순환 궤도로써 설정하였고, 이때, 한 구획당 시간 분할은 0~0.2~0.8~1(sec)로 구분하였다. 또한, 궤도를 순환하는 최대 설정 속도 v_{max} 는 0.248(m/sec), 가속도 a 는 $\pm 1.24(m/sec^2)$ 로서 규정하였다.

3.2 시뮬레이션 고찰

Fig. 1~6은 바라는 궤도각(radian)을 영(zero)으로 기준시, 비례-미분 제어의 궤도오차와 적응제어의 궤도오차 값을 보여준다. 여기서, 1번은 비례-미분 제어를 수행한 궤도오차를, 2번은 적응제어를 수행한 궤도오차를 나타낸다.

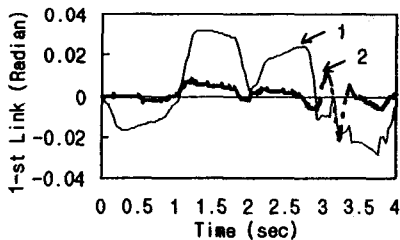


Fig. 1 Trajectory Error of 1-st Link

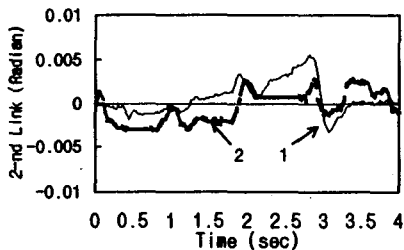


Fig. 2 Trajectory Error of 2-nd Link

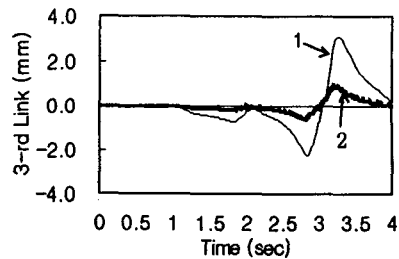


Fig. 3 Trajectory Error of 3-rd Link

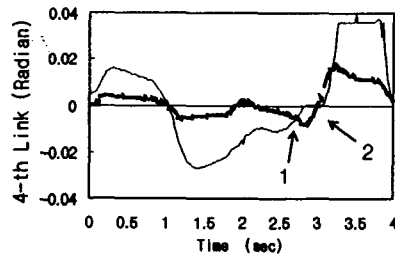


Fig. 4 Trajectory Error of 4-th Link

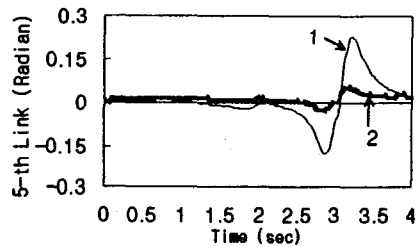


Fig. 5 Trajectory Error of 5-th Link

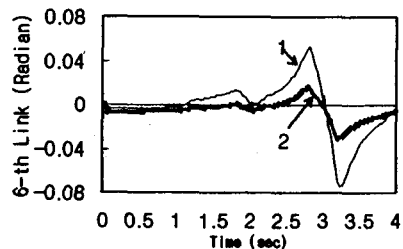


Fig. 6 Trajectory Error of 6-th Link

4. 결 론

본 연구는 6자유도 로봇 매니퓰레이터를 시뮬레이션 대상으로 하여, 임의의 설정된 궤도를 비례-미분 제어와 적응제어를 이용하여 추적하도록 구성하였다.

각 제어 방식에 따른 궤도 추적의 결과, 우선, 각 링크의

제어에서 전반적으로 적응제어가 비례-미분제어에 비해 상당히 우수했다. 1-링크와 2-링크의 제어에 있어서, 비례-미분제어와 적응제어 모두가 3.0(Sec)부근에서 약간의 오차 변동을 수반하였는데, 이는 매니플레이터 구동시 3-링크이후의 모든 링크에서 발생하는 관성 특성을 1-링크와 2-링크가 충분히 극복하지 못함에 기인한 것으로 보인다.

2-링크에서의 제어는 적응 제어가 비례-미분제어보다 전례도에 걸쳐 오차가 다소 크게 나타났으나, 나머지 링크(3-링크는 제외)의 오차와 비교하여 볼때 제일 적게 나타남을 알 수 있었다. 이것은 2-링크의 구동에 따른 외란이 두 제어방식에서 거의 같게 발생한다에 따른 것으로 보인다.

3-링크의 제어는 두 제어 방식 모두가 좋은 제어 결과를 가졌으나, 비례-미분제어의 경우 3.0(sec)부근에서 최대 오차가 적응 제어의 경우보다 크게 나타났다. 5-링크의 경우, 비례-미분제어 오차는 전 링크의 제어 오차중에서 가장 크게 나타났다. 이는 4-링크, 5-링크가 하나의 기구학적인 형상을 가지고 구동함으로써 발생하는 동적인 특성에 기인한다고 생각한다.

참고문헌

- (1) M.W.Spong & M.Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", John Wiley & Sons. Inc, 1989
- (2) Y.Koren, "Robotics for Engineers", McGraw-Hill Book.Inc, 1985.
- (3) J.J.Craig, "Introduction to Robotics Mechanics & Control-2ed", Addison-Wesley Pub.Inc, 1989.
- (4) H.Seraji, "An Approach to Multi variable Control of Manipulator", The Journal of Dynamic Systems & Measurement and Control, 1985.
- (5) J.J.Craig, "Adaptive Control of Mechanical Manipulator", Addison-Wesley Pub.Inc, 1988.
- (6) R.P.Paul, "Robot Manipulator - Mathematics, Programming & Control", The MIT Press, 1982.
- (7) A.J.Koivo, "Fundamentals for Control Robotic Manipulators", John Willey & Sons.Inc, 1989.
- (8) Parks, "Lyapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control System", IEEE Trans, Auto. Control, 1966.
- (9) 박영욱, 김재원, 박영필, "유연한 외팔보의 적응제어", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), 1994.
- (10) 최원준, 선양래, " 3자유도 로보트 매니플레이터의 제어에 관한 연구", 경희대학교 석사학위논문, 1992.