

탄성을 고려한 로봇트 매니플레이터의 제어에 관한 연구

이 시복,* 조 형석**

A Study on the Control of Robotic Manipulators with Flexibility

Si-Bok, Lee, Hyung-Suk, Cho

ABSTRACT

A control system for improving the moving accuracy of robotic manipulators with elastic joints is developed. The dynamics of manipulator system is splitted into two sub-dynamics ; of arm-link and actuator rotor-link, which are coupled statically through joint torque. Two control loops are implemented respectively around both sub-dynamic systems. Computed torque algorithm with acceleration feedback is used for the arm-link control loop, and for the actuator rotor-link control loop PID algorithm is adopted. The resulting control system is tested through a series of computer simulation for a PUMA type manipulator. The results show good performace of the developed control system for wide range of joint stiffness and moving speed.

1. 서 론

현 산업용 로봇트의 대부분은 팔의하중부하를 구동기가 감당할 수 있도록 조인트부에 감속기를 갖고 있는데 감속기의 저항성으로 인해 고

속 운동할때 진동 및 정확성의 저하 그리고 절삭작업과 같이 힘을 외부에 가해야 하는 작업에서는 작업성이 떨어지게 된다.

직접 구동방식으로 감속기를 사용하지 않음으로서 동력 전달부의 저항성 및 큰 마찰등의

* 부산대학교 기계설계공학과

** 한국과학기술원 생산공학과

문제를 근본적으로 해결하고자 하는 노력이[1] 시도되고 있으나 구동기의 중량이 커지는등 아직 풀어야 할 일이 많이 남아있다. 실제로 대부분의 기계 시스템에서 구동부와 종동부 사이에 탄성체가 개재되는 경우가 많고 로봇에서도 구동기를 원격 설치할 수 있게 되면 팔의 중량을 감소시킬 수 있는 등의 유리한점이 있기 때문에 이 문제의 해결은 의미를 갖고 있다. 컴퓨터 기술의 발전이 기계시스템의 문제를 소프트웨어적으로 해결할 수 있는 힘을 제공함에 따라 감속기의 탄성 문제도 제어기법으로 해결하려는 연구가 진행되어 왔다.

5 hz 정도의 고유 진동수를 갖는 로봇트 동력 전달부의 탄성을 고려해 Liegeois [2]가 처음 극점 배치법으로 제어축을 구성 진동 감쇠 효과를 확인하였다. F.Nicolo[3]는 탄성 조인트를 갖는 다관절 로봇트의 비선형 귀환 제어에 의한 선형화 제어 가능성을 조사하고 현 산업용 다관절 로봇트 구조에서는 이의 불가능함을 보였다. M.W.Spong[4]은 몇몇 가정 아래 간단화된 다관절 로봇트 모델식에 특이 섭동 제어법을, M.G.Forrest-Barlach[5]는 직각 좌표 로봇트에 대해 비선형 귀환선형화 제어방법을 적용하였다. 한편 작업 영역 주위에서 선형화된 모델식에 주파수역 설계법을 적용 조인트 저장성을 보상하는 방법이 H.B.Kuntze[6]에 의해 연구되었다.

이상의 연구들은 로봇트의 복잡한 동 특성을 충분히 고려하지 못함으로서 성능 개선에 한계를 갖거나 측정이 어려운 변수를 사용함으로써 실제 설치에 어려움을 갖고 있는 경우가 많다. 본 연구에서는 구동기 - 저장성 감속기 - 팔로 구성된 각 관절부의 전체 동력학을 구동절 (actuator-link)부와 팔절 (arm-link)부의 동력학으로 분리해서 전 제어시스템을 팔절제어부와 구동절 제어부로 분리 설계하여 팔이 정확하게 운동하는데 필요한 팔절 조인트 토크를 팔절제어부에서 계산하고 구동제어부에서 이

토크를 서보할 수 있도록 제어시스템을 구성하였다. 팔절 제어부는 가속도를 귀환 입력하는 토크계산 제어법으로 구성하여 팔절의 운동에 필요한 조인트 구동 토크를 계산한다. 팔의 운동에 필요한 구동 토크를 서보하는 구동부의 제어측은 목표 토크 추종 성능과 시스템 안정성을 독립적으로 분리 설계할 수 있는 2자유도 설계개념에 근거하여 구성하였다.

2. 시스템 방정식

로봇트 시스템의 운동 방정식은 제어법칙 구성, 시스템의 성능 평가를 위한 컴퓨터 모의 실험 등 방정식의 용도에 따라 벡터 역학적 또는 해석 역학적 방법을 이용하여 순환형태(recursive form)나 닫힌 형태(closed form)로 유도할 수 있다. 닫힌 형태의 시스템식이 시스템의 동적 특성을 이해하는데 유리하기 때문에 제어법칙 개발 과정에서 많이 사용된다. 조인트부 탄성을 갖는 경우 강체 시스템과는 달리 구동기 로터가 팔부와 독립된 자유도를 갖게 되어 강체 모델에 비해 2배의 자유도를 갖는 복잡한 운동식을 얻게 된다. 그러나 로터의 운동에너지가 순수 자체 회전에 의한 것이고 로터 및 변속 기어열의 관성 분포가 회진축에 대해 대칭인 것으로 가정하면[4] 기존 강체 모델운동식을 조금 변형함으로서 간단하게 구할 수 있다. 이와 같은 가정은 현 산업용 로봇트의 구조로 볼때 타당성을 갖고 있다.

이와같은 가정위에 구한 조인트부의 탄성이 고려된 n관절 로봇트의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & [H(\underline{\theta})] + \underline{c}(\underline{\theta}, \dot{\underline{\theta}}) + [B] \dot{\underline{\theta}} + \underline{f} \\
 & = [K] [\underline{\theta}_m [N]^{-1} - \underline{\theta}] \dots\dots\dots (1) \\
 & [J_m] \ddot{\underline{\theta}}_m + [B_m] \dot{\underline{\theta}}_m + \underline{f}_m \\
 & + [K] [\underline{\theta}_m [N]^{-1} - \underline{\theta}] [N]^{-1} = \underline{\tau}_m
 \end{aligned}$$

- [H(θ)] : 팔관성 행렬 (nxn)
- [B] : 팔관절 점성 감쇠행렬 (nxn)
- [K] : 조인트 강성행렬 (nxn)
- \underline{f} : 팔관절 쿨롱마찰 토크벡터 (nx1)
- \underline{c} : 속도 및 중력관계 토크벡터(nx1)
- $\underline{\theta}$: 팔 관절 좌표 벡터 (nx1)
- [J_m] : 구동부 관성 행렬 (nxn)
- [B_m] : 구동부 점성감쇠행렬 (nxn)
- [N] : 감속비 행렬 (nxn)
- \underline{f}_m : 구동부 쿨롱 마찰토크벡터 (nx1)
- $\underline{\tau}_m$: 구동기 입력 토크 (nx1)
- $\underline{\theta}_m$: 구동기 로터 좌표 벡터 (nx1)

윗 식은 전류 증폭 방식의 DC모터와 같이 구동기를 단순히 토크발생기로 간주해서 구해진 것이다. 본 연구에서는 위치 결정에 관계하는 3자유도 시스템을 대상으로 한다.

3. 제어계 구성

3.1 제어계 구조

정확한 운동은 팔절좌표 벡터 $\underline{\theta}$ 가 목표 좌표벡터 $\underline{\theta}^d$ 를 정확하게 추종할 수 있도록 제어계를 구성하고 제어입력을 만들어줌으로서 달성할 수 있다. 모든 1차 이상의 동적시스템은 입-출력 사이의 이득과 위상이 입력신호의 변화속도에 관계한다. 로봇과 같은 다 입-출력 시스템의 연속 경로운동 정확성은 각 입-출력 계통의 이득 위상이 일치할때 이루어질 수 있다.

일정 시불변 매개변수를 갖는 시스템의 경우 적절한 고전제어방법을 통한 제어계 구성으로 이의 실현이 가능하다. 그러나 로봇시스템은 자세에 따라 시스템 매개변수가 변하고 속도 및 변위에 관계되는 강한 비선형성 때문에 현대 제어기법에 의한 여러 방법이 [7-10] 제안되어 왔다. 동력 전달부에 탄성이 개재하면 시스템 차수가 2차에서 4차로 변함으로 입-출

력 사이의 이득-위상관계가 더욱 복잡해지고 위상 지연 증가에 의한 목표 경로 추종 능력이 저하한다. 본 연구는 매개 변수변화 및 비선형성을 갖는 팔절과 상대적으로 선형성을 갖는 구동절 동력학을 분리 고려함으로써 팔부는 적절한 현대제어기법을 적용하고 구동부는 고전제어 개념에 입각해서 제어계를 구성한다. 목표경로가 규정되는 팔절의 정확한 운동에 필요한 토크를 산출하는 팔절 제어계를 구성하고 이 토크를 구동 제어부에서 서보할 수 있도록 전제어계를 분리 구성한다.

식 1. 은 구동절과 팔절의 연결 변수인 조인트 토크 $\underline{\tau}_J$ 를 이용식2.와 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$[H] \ddot{\underline{\theta}} + \underline{c} + [B] \dot{\underline{\theta}} + \underline{f} = \underline{\tau}_J \dots\dots\dots (2)$$

$$[J_m] \ddot{\underline{\theta}}_m + [B_m] \dot{\underline{\theta}}_m + \underline{f}_m + \underline{\tau}_J [N]^{-1} = \underline{\tau}_m$$

이와 같이 조인트 토크로 연성되어 있는 시스템을 제어하기 위해 팔 제어부는 $\underline{\theta}^d$ 를 정확히 추종하기 위한 팔절 조인트 토크 $\underline{\tau}_J$ 를 계산하고 구동 제어부는 이 $\underline{\tau}_J$ 를 제어변수로 서보하기 위한 구동기 입력 토크를 조절한다. 이와같이 제어계를 분리 구성함으로써 고차의 비선형계 제어문제를 두 저차계 제어 문제로 변환하여 보다 용이하게 설계할 수 있다. Fig.1은 이 제어계의 기본구조를 보여주고 있다. 그림에서 첨자 d는 대상 변수의 목표값을 나타낸다.

3.2 제어 법칙

3.2.1 팔절제어부

팔절 운동 제어에 필요한 토크 계산을 위해 기존 강체 모델에 대해 연구 제시된 효과적 방법들을 그대로 사용할 수 있다. 조인트 탄성에 의해 시스템 차수가 증가함으로써 발생하는 응답시간 지연 오차를 줄이기 위해서는 팔의 정확한 운동을 위해 필요한 조인트 입력 토크에

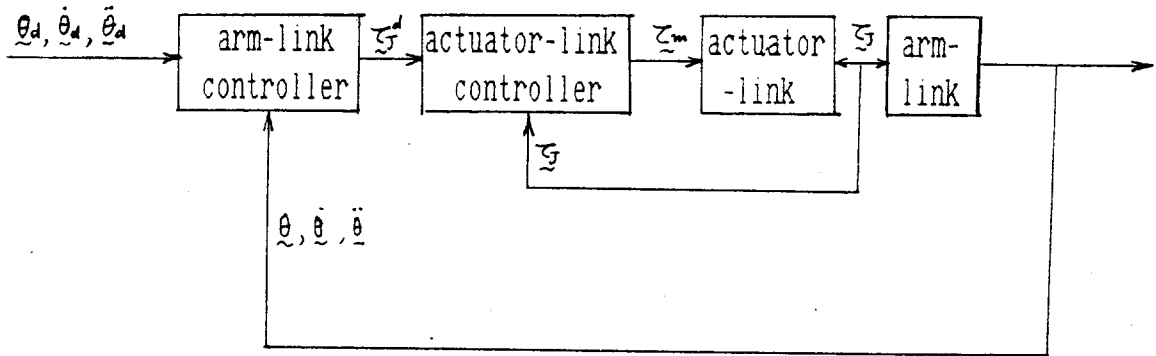


Fig.1 Schematic diagram of overall system

대해 가능한 앞선 정보가 요구된다. 이점에 비추어 비선형 귀환 제어를 통한 토크계산 제어법 (computed torque method) 이 가속도 궤적 정보를 전향입력 (feedforward) 하기 때문에 상대적으로 앞선 필요 토크 정보를 제공할 수 있다. 한편 탄성이 개재된 기계시스템 제어에 가속도를 귀환입력 (feedback) 시켜 좋은 제어 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 식3. 으로 주어지는 가속도 신호를 귀환시키는 토크 계산제어법칙을 팔제어부에 이용한다.

$$\begin{aligned} \tau_j^d = & [H(\theta)] [\ddot{\theta}^d + [T_a](\ddot{\theta}^d - \ddot{\theta}) \\ & + [T_v](\dot{\theta}^d - \dot{\theta}) + [T_p](\theta^d - \theta)] \\ & + R(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

여기서 τ_j^d 는 팔절의 운동에 필요한 조인트 토크 벡터를 그리고 $[T_a], [T_v], [T_p]$ 는 각각 가속도, 속도, 변위 귀환계수 행렬이다. $R(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta)$ 는 팔관성 토크 이외의 코리올리, 중력, 마찰 등에 관계되는 비선형토크와 연성 토크를 포함한 모든 잔여 토크 벡터를 나타낸다. 이 잔여 토크항은 수학 모형식에 상태 변

수를 비선형 귀환시켜 계산할 수 있으나 모형식의 부정확성 및 실시간 계산의 어려움 등을 갖고 있다. 이 잔여 토크는 본 연구에서 측정 변수인 가속도 정보와 조인트 토크로부터 다음 식을 이용[11] 간단하게 계산할 수 있다.

$$R(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta) = \tau_j - [H(\theta)] \ddot{\theta} \dots\dots\dots(4)$$

기존 위치, 속도를 귀환 입력하는 토크 계산 제어법칙의 오차동역학은 시스템의 매개변수가 정확하게 사용되었을 경우 다음과 같다.

$$\ddot{e}_i + T_{vi} \dot{e}_i + T_{pi} e_i = 0 \dots\dots\dots(5)$$

여기서 e_i 는 $\theta_i^d - \theta_i$ 로서 궤적 추종오차를 나타낸다. 귀환 입력 이득 상수 T_{pi}, T_{vi} 결정시에 강체모델 경우에는 그 상한이 없지만 실제로는 대상 기계구조의 고유진동수에 의해 결정되는 구조물 대역 (bandwidth) 의 제약을 받는다. 제어계 고유진동수가 제어대상 구조 고유 진동수의 1/2 이하 되도록 추천되고 있다. [14] 가속도 귀환 입력이 추가되는 경우오차 동역학은 다음 식으로 된다.

$$\ddot{e}_i + T_{vi}/(1 + T_{ai}) \dot{e}_i + T_{pi}/(1 + T_{ai}) e_i = 0 \dots\dots\dots (6)$$

이 식을 보면 위치, 속도 귀환입력 상수가 $(1 + T_{ai})$ 배만큼 작아지고 있다. 따라서 제약을 받고 있는 제어계 대역을 크게하지 않고 위치 귀환입력 이득상수를 높혀 위치 정확도를 향상시킬 수 있다.

3.2.2 구동 제어부

구동 제어부는 팔제어부에서 요구하는 지령 조인트 토크 τ_j 를 충실하게 서보할 수 있도록 구성되어져야 한다. 구동 제어부를 구성하기 위해 먼저 구동기 입력 토크와 조인트 출력 토크 사이의 입-출력관계 전달함수를 구한다. 이를 위해 팔절의 매개변수가 일정한 것으로 가정하고 비선형항 및 연성항을 외란으로 간주한다. Fig.2는 이 입-출력 관계의 블록선도를 보여주고 있다.

그림에서 S는 라플라스 변수를 그이의 기호는 임의의 i 관절에 대한 동역학 및 구조 변수 그리고 입-출력 변수를 표시한다. 이와같이 구동 제어부 구성에서는 시스템을 SISO로 간주하여 이후로는 표기 편의상 관성행렬의 i대각항 H_{ii} 는 H로, 구동기 입력토크 τ_{mi} 는 τ_m 로 하는 식으로 첨자를 생략 표기한다. 여기서 각축의 입력 토크와 출력토크 사이의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\tau_j}{\tau_m} = \frac{KHS}{N^2HJ_mS^3 + N^2HB_mS^2 + (KJ_mN^2 + KH)S + B_mKN^2} \dots\dots\dots (7)$$

이 입-출력 시스템의 제어 목표는 τ_j 의 정확한 추종성능 확보에 있다. 한편 이 시스템은 실제 팔절에 의한 시스템 매개 변수 변화 및 팔절의 비선형항, 연성항 그리고 구동기 자체의 모델되지 않은 마찰등 많은 외란을 받고 있기

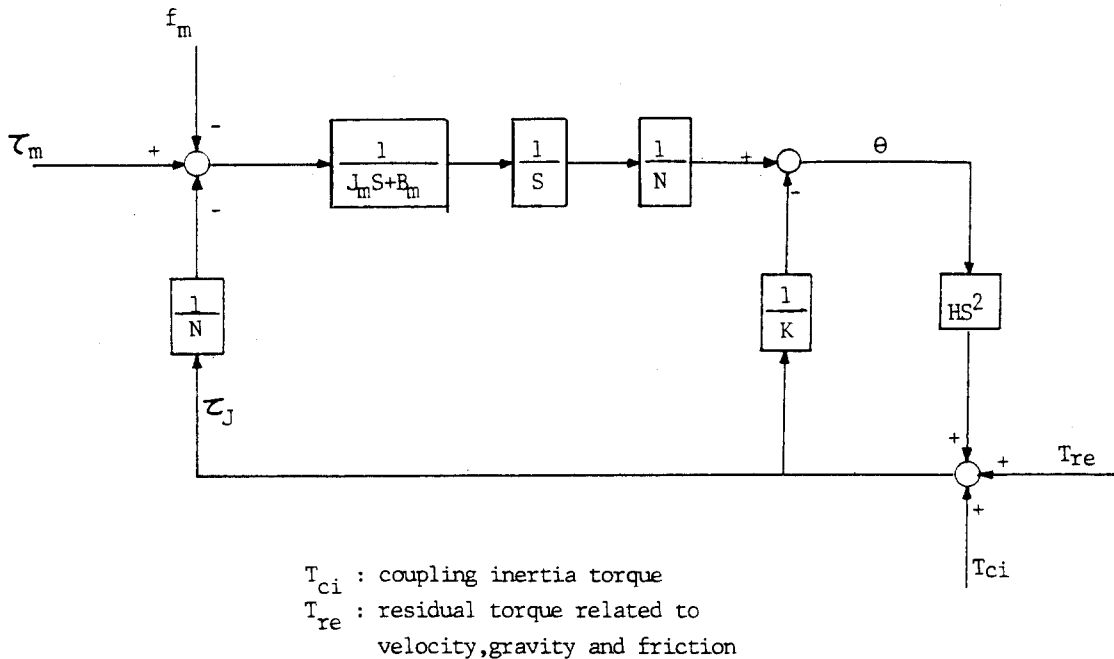


Fig.2 Block diagram of open loop system

때문에 제어부의 견인성 (robustness) 이 필요하다. 이들 문제를 고려하여 목표값 추종 성능과 시스템 안정성을 독립으로 조정할 수 있는 2 자유도 PID 제어방법을 [12] 이용한다. Fig. 3은 2자유도 제어계의 구조를 보여주고 있다.

이 제어계의 전달함수는

$$\frac{O}{R} = \frac{K_p G (K_d S^2 + S + K_i) + K_p G S (a + b K_d S)}{K_p G (K_d S^2 + S + K_i) + S K_d S} \dots\dots\dots (8)$$

로 표현된다. 따라서 안정성, 응답속도 등의 시

스템 내부 특성은 PID 루프에 의해서만 결정되고 전향 입력부분의 조정계수 a, b는 시스템의 내부 특성에 영향을 주지 않고 시스템 영점을 조정하여 목표 신호 추종 성능을 결정한다. Fig. 4는 구동 제어부에 2자유도 PID 제어계를 설치한 것을 보여주고 있다.

목표 입력토크와 출력 조인트 토크 사이 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\tau_j}{\tau_j^d} = \frac{(KHK_p K_d (1+b)S^2 + KHK_p (1+a)S^3 + (KHK_p K_d + N^2 HB_m)/z S^2 + (KHK_p S + KHK_p)/z + KJ_m N^2 + KH)/z S + (KHK_i K_p + B_m KN^2)/z}{S^3 + (KHK_p K_d + N^2 HB_m)/z S^2 + (KHK_p S + KHK_p)/z + KJ_m N^2 + KH} \dots\dots\dots (9)$$

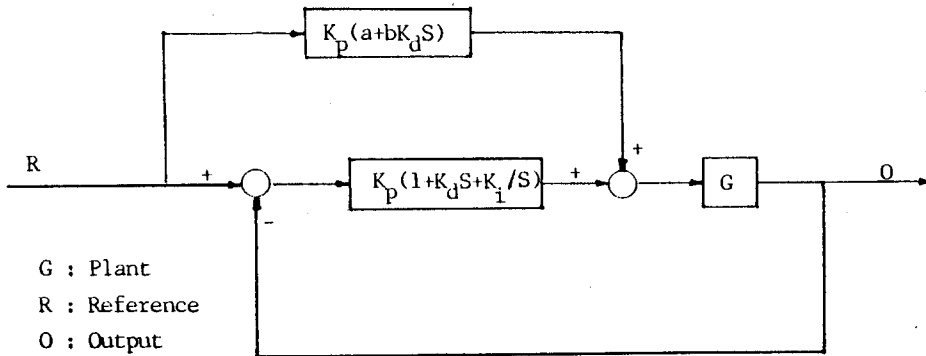


Fig. 3 Block diagram of 2 d.o.f PID control system

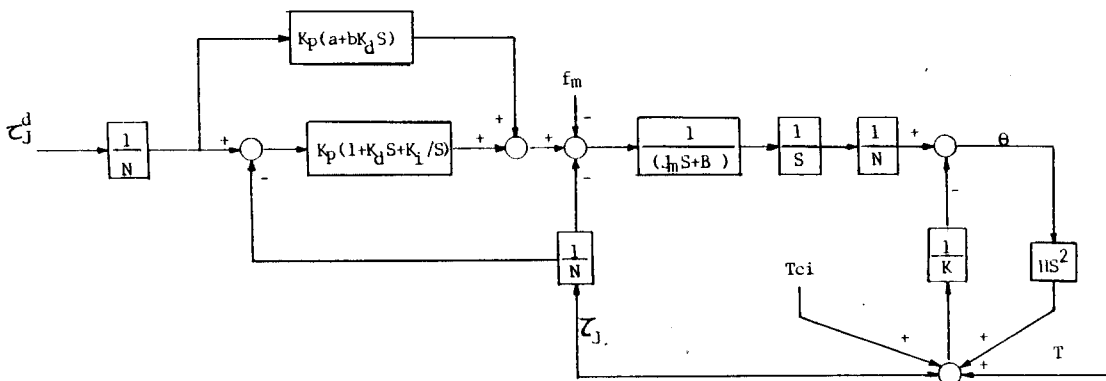


Fig. 4 Block diagram of actuator control system adopting 2 d.o.f PID controller

단 $z = N^2 H J_m$

식 9.에서 시스템 내부 특성은 K_p, K_d, K_i 에 의해서만 결정되는 것을 알 수 있다. 식 6.은 다음식 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\tau_j}{\tau_j^*} = \frac{C}{D(S)} \cdot \frac{N(S)}{C} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $D(S)$ 는 식 9.의 분모 다항식, C 는 $D(S)$ 의 상수항 $N(s)$ 는 분자다항식이다. 시스템 내부 특성을 결정하기 위해 $G(s)=C/D(s)$ 시스템에 ITAE 성능 지수 최소화 기법을 적용해서 K_p, K_d, K_i 에 대한 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} K_p &= (2.15z\omega_0^2 - K(J_m N^2 + H))/KH \\ K_i &= (z\omega_0^3 - B_m K N^2)/KHK_p \dots (11) \\ K_d &= (1.75z\omega_0 - N HB_m)/KHK_p \end{aligned}$$

식에서 ω_0 는 시스템의 극점 위치를 지정하는 ITAE 설계매개 변수로서 시스템의 희망 안정성 및 견인성등을 주도록 적절하게 결정한다. 이와 같이 PID 루프의 이득 상수를 결정한 후에 전향 입력 조정 상수 a, b 는 컴퓨터 모의 실험을 통해 제적 추종 능력을 조사하여 학습적으로 결정한다.

4. 적용에 및 결과 검토

앞에서 설명된 제어기법을 PUMA 형 로봇에 적용해서 컴퓨터 모의 실험을 통해 그 성능을 조사했다. PUMA 형 로봇은 각관절 사이의 오프셋(offset)로 인해 모든 관절 사이에 동적 연성이 나타나는 복잡한 동특성을 갖고 있다. 로봇 구조의 관성, 기하 매개변수, 마찰 특성값으로 J. I. Moon[13]이 PUMA760에 대해 실험적으로 구한 값을 그리고 조인트 탄성 계수로는 표 1.의 값을 기준값(nominal data)으로 사용한다. 이 탄성 계수값은 16hz -20hz 정도의 구조 고유진동수를 주는 값으로서 일반적으로 동형 로봇 구조에 대해 보고되고 있는 10hz 정도의 값보다 조금 높게 선정된 값이다.

표 1.

	조인트 1	조인트 2	조인트 3
강성계수 (N_m/rad)	500000	400000	300000

운동 경로는 작업 좌표계에서 $(0.8m, 0, 0) - (0, 0.8m, 0.8m)$ 사이를 사다리형 속도분포로 움직이는 것으로 한다. 먼저 본 제어법(AFAC)의 효과를 평가하기 위해 기존 강체 모델에 대해서 개발된 토크 계산제어법(CTMR)과 제적 추종 능력을 비교해본다. Fig.5는 경로 구간을 1초에 이동할때 작업좌표 공간에서의 추종

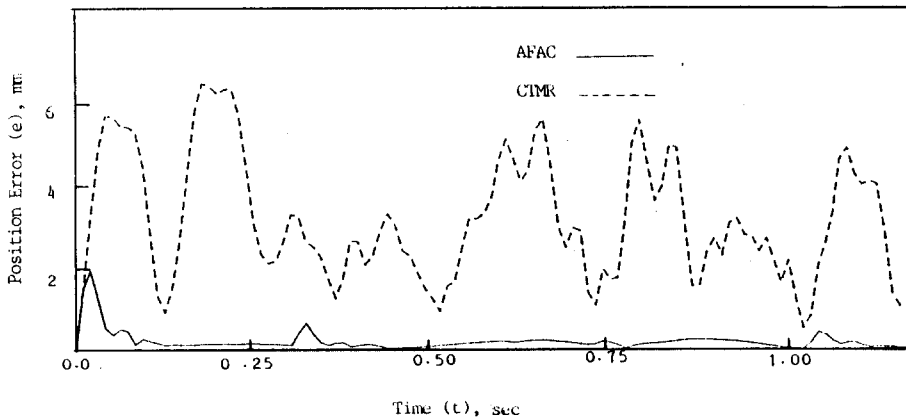


Fig.5 Position error trajectories of controllers AFAC and CTMR

오차를 그린 것이다. 이 이동속도는 실제 로봇의 최대 가능 속도의 3배가 넘는 빠른 속도다. CTMR의 귀환 입력 이득은 시스템이 불안정해 지지 않는 범위에서 최대로 한 것이다. 분할시간제어를 위한 제어 샘플 시간은 두 방법 모두 10msec로 한다. 본 제어시스템이 진동없이 작은 오차로 경로 추종하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 관절 1에 대한 목표 가속도 궤적 추종 상태를 보여주고 있다. 본 제어시스템의 양호한 추종 능력을 볼 수 있다. Fig.7은 팔 제어부에서 계산하는 토크에 거의 비슷하게 조인트 토크가 따라가고 있는 것을 보여주고 있어 구동

질 제어부의 우수한 토크 서보능력을 볼 수 있다. 시스템의 매개 변수변화에 대한 제어 시스템 추종 성능 견인성을 알아보기 위해 작업질량 부하 (payload)와, 조인트 강성 변화에 대한 추종 성능변화를 Fig.8, Fig.9에 각각 조사해 놓았다. 모두 구간 이동 속도를 1초로 한 경우이다. Fig.8에서 30kg의 큰 질량부하도 제어 토크 계산할때 그 값을 50% 정도 부정확하게 사용한 경우 오차가 약간만 커지는 것을 알 수 있다. Fig.10은 조인트강성이 100배 낮은 경우에도 성능이 별로 저하하지 않고 있음을 보여주고 있다. 그러나 강성이 높아지는

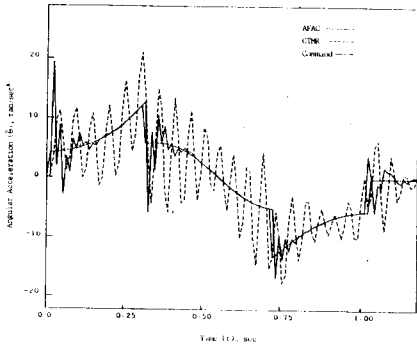


Fig.6 Acceleration trajectories commanded and of AFAC and CTMR for arm-link 1

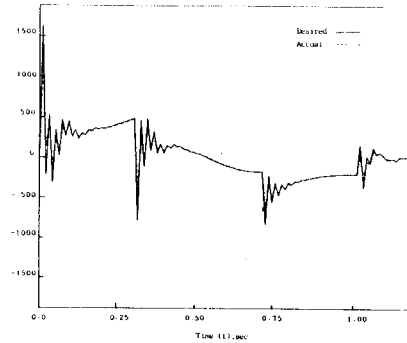


Fig.8 Position error trajectories with 30kg of payload

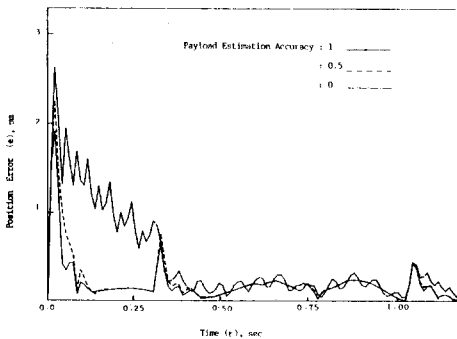


Fig.7 Torque trajectories desired and of controller AFAC for joint 1

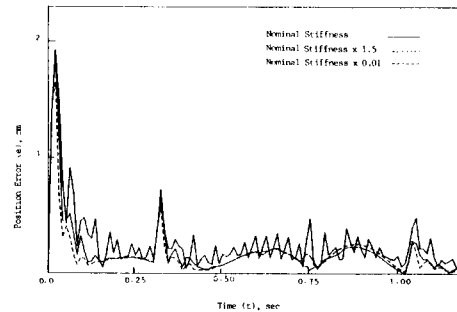


Fig.9 Position error trajectories with nominal, high and very low joint stiffness

경우 시스템이 불안정해지는데 50% 정도의 범위 변화에서는 기준탄성값에 대해 선정된 제어 매개변수가 양호하게 기능한다.

5. 결 론

조인트 탄성이 있는 매니플레이터를 안전하고 정확하게 운동시킬 수 있는 제어시스템에 관해 연구했다. 전 시스템 동역학을 팔절부와 구동절부로 분리 팔절부는 가속도를 귀환 입력시키는 토크계산제어법 구동부에는 필요 조인트 토크를 서보하기 위해 2자유도 PID 보상기를 설치했다. 컴퓨터 모의 실험을 통해 제안된 제어계가 이 탄성을 무시하고 설계된 토크계산 제어기법의 고속운동시 성능 저하문제를 해결할 수 있는 한 방법이 될 수 있음을 보였다. 또한 본 제어계가 조인트 강성을 포함한 시스템 매개변수들의 넓은 폭 변화에도 양호한 성능을 유지하는 견인성을 갖고 있는 것을 확인했다. 본 시스템의 보다 체계적 구성을 위해서는 두 부분으로 분리 구성된 제어시스템 매개변수들의 전 시스템 안정성 및 정확성에 미치는 유기적 관련성에 대한 연구가 필요하다. 한편 본 시스템은 가속도와 조인트 토크를 측정 변수로 하기 때문에 경제성 문제를 갖고 있다. 가속도를 속도 신호로부터 그리고 조인트 토크를 구동기 로터와 팔관절부의 상대각도 변위로 대체하는 방법에 대한 연구도 의미가 있을 것으로 본다.

[참 고 문 헌]

1. H.Asada, T.Kanade and I.Takeyama, "Control of a direct drive arm", J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.105, pp.136~142, 1983.
2. A.Liegeois, E.Dombre and P.Borrel, "Learning and control for a compliant computer controlled manipulator", IEEE Trans.on Automatic Control, Vol.25, No.6, pp.1097~1102, 1980
3. C.D.Simone and F.Nicolo, "On the control of elastic robots by feedback decoupling", Proc. IASTED Int. Symp. Robotics and Automat., pp.112~116, 1984
4. M.W.Spong, "Modeling and control of elastic joint robots", Proc. ASME Winter annual meeting, pp.57~65, 1986
5. M.G.Forrest-Barlach and S.M.Babcock, "Inverse dynamics position control of a compliant manipulator", IEEE J.of Robotics and Automation, Vol.3, No.1, pp.75~83, 1987
6. H.B.Kuntze and A.H.K.Jacubasch, "Control algorithms for stiffening an elastic industrial robot", IEEE J.of Robotics and Automation, Vol.1, No.2, pp.71~78, 1985
7. J.Y.S.Luh, M.W.Walker and R.P. Paul, "Resolved acceleration control of mechanical manipulators", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.25, pp.468~474, 1980
8. C.S.G.Lee and M.J.Chung, "An adaptive control strategy for mechanical manipulators", IEEE Trans. Automatic Control, Vol.29, pp.837~840, 1984
9. A.Balestrino, G.D.Maria and L.

- Sciavicco, "An adaptive model following control for robot manipulators", ASME Trans. J. of Dystems, Measurement and Control, Vol.105, pp.143~151, 1983
10. G.L.Luo and G.N.Saridis, "Robust compensation for a robotic manipulator", IEEE Trans. Automatic Control, Vol.29., No.6,1984
 11. J.S.Burdess and J.R.Hewit, "An active method for the control of mechanical systems in the presence of unmeasurable forcing", Mechanism and Machine Theory, Vol.21, No.5, pp.393~400,1986
 12. 荒木光彦, "2自由度 制御系. I-PID 微分先行型. I-PD 制御系の統一的 見方などについて", システムと制御, Vol.29, No.10, pp.649~656,1985
 13. J.I.Moon, "A study on dynamic parameter identification of PUMA 760 robot", M.S.Thesis, Production Eng.Dep., KAIST, 1986
 14. R.P.Paul, "Robot Manipulators", MIT Press,1981

감사의 말

본 연구는 1987년도 학술진흥재단 첨단연구비 지원으로 이루어졌습니다.
이에 깊은 감사를 표합니다.