한국소음진동공학회지 제 7 권 제 3 호, pp. 387~392, 1997.

〈논 문〉

유연한 수평 다관절 로봇의 진동제어

Vibration Control of Flexible SCARA Robots

임 승 철* · 용 대 중**
S. Lim and D. J. Yong

(1996년 12월 11일 접수 ; 1997년 5월 12일 심사완료)

Key Words : Link Flexibility(링크 유연성), Perturbation(섭동), Real-Time Control(실시간 제어), Relative Stability(상대 안정도), Reaction Wheel(반작용 륜), Friction(마찰)

ABSTRACT

This paper concerns a SCARA robot with the flexible forearm linked to the rigid upper arm. The equations of motion are derived by the Lagrangian mechanics. For controller design, the perturbation approach is taken to separate the original equations of motion into linear equations describing small perturbed motions and nonlinear equations describing purely rigid motion of the robot. To effect the desired payload motion, open loop control inputs are determined based on the inverse dynamics of the latter. In order to reduce the positional error during maneuver, an active vibration suppression is done. To this end, a feedback control is designed for robustness against disturbance on the basis of the linear equations and the LQR theory modified to have a prescribed degree of stability. The proposed control scheme shows satisfactory performances in experiments as well as in numerical simulations.

1. 서 론

현재의 산업용 로봇은 일반적으로 강체 팔로 만들어져 제작비와 에너지 소비가 크며 동작속도가 제한되고 가반중량대 자중의 비가 작은 단점을 갖고 있다. 그러한 단점을 해소하고 작업영역을 극대화시키기 위하여는 로봇 팔을 가능한한 가늘고 길게 만들 필요가 있다.

그러나 이러한 경우에 로봇팔의 유연성으로 인하여, 고속으로 로봇팔을 작동시키면 팔 및 이송물체 질량의 관성력에 의하여 로봇 팔의 강제 진동이 발생하는 문제가 있다. 문헌[1~4]에서는 각기 다양한 센서의 사용과 제어방식으로 유연한 1개의 로봇팔에 대한 진동제어가 연구되었으나 공통적으로 모두 로봇의 거동 이후 잔류하는 자유진동에 국한된 것이었다. 그러나 고성능의 작업 능력을 확보하기 위하여는 로봇제어기의 설계시, 상기 자유진동 뿐만 아니라 이송중 진동에 의하여 야기되는 궤적 추종 오차의 신속한 감쇠능력까지도 반드시 확보되어야 한다.

본 논문에서는 상기 관점과 차후의 컴플라이언스 추가에 의한 조립능력의 증대까지도 목표로 하여 팔 하박이 유연한 SCARA형 로봇에 대하여 3차원 운동방정식을 구하고 섭동이론[5]을 적용하여 제어기를 설계하고 이를 수치 시뮬레이션하였으며 실험을 수행하여 제안한 알고리듬의 타당성을 입증하였다.

2. 운동 방정식

Fig. 1에 보인 바와 같이 두 번째 팔이 유연한 4축 SCARA로봇의 운동방정식을 Lagrange 역학으로 유

*정회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과
**명지대학교 대학원 기계공학과

도하고자 한다.

우선 운동에너지를 구하기 위하여 1번 부터 4번 몸체의 임의 점에서의 절대 속도를 구해보면 각각 몸체 고정 좌표계 성분으로 표현될 때 연쇄적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$^1v_1 = {}^1\tilde{\omega}_1\ {}^1r_1 \tag{1a}$$

$$^2v_2 = {}^2_1C\ {}^1v_1(O_2) + ({}^2\tilde{\Omega}_2 + {}^2\tilde{\omega}_1)\ {}^2r_2 + {}^2\dot{u} \tag{1b}$$

$$^3v_3 = {}^3_2C\ {}^2v_2(O_3) + ({}^3\tilde{\Omega}_3 + {}^3\tilde{\omega}_1 + {}^3\tilde{\Omega}_2)\ {}^3r_3 + {}^3\dot{r}_3 \tag{1c}$$

$$^4v_4 = {}^4_3C\ {}^3v_3(O_4) + ({}^4\tilde{\omega}_1 + {}^4\tilde{\Omega}_2 + {}^4\tilde{\Omega}_3 + {}^4\tilde{\Omega}_4)\ {}^4r_4 \tag{1d}$$

여기서 각 벡터의 앞 상첨자는 성분 표현된 기준좌표계, 뒤의 하첨자는 해당 몸체를 의미하며, r은 상기 임의점까지의 위치 벡터, $O_i(i=2,3,4)$는 i번째 몸체 좌표계의 원점, 행렬 C는 상첨자와 하첨자로 표시된 좌표계간의 회전행렬을 의미한다. 또한 Ω는 하첨자로 표시된 링크의 바로 전 링크에 대한 상대 각속도를 의미하며 ω는 로봇몸체에 관한 절대 각속도, 그리고 $\tilde{}$는 벡터적의 행렬표현으로서 해당벡터로 이루어진 의대칭(skew-symmetric) 행렬을 뜻한다.

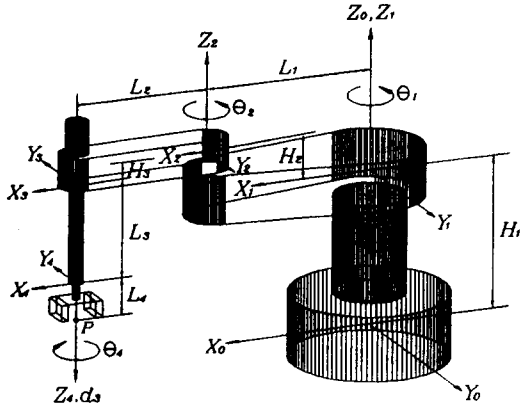

Fig. 1 Flexible SCARA robot

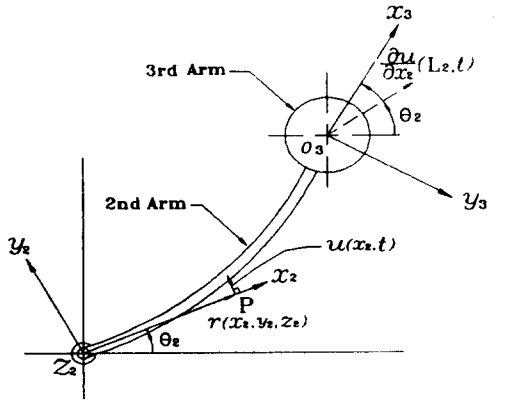

Fig. 2 Elastic displacement of the 2nd arm

한편 식 (1b)에서 u는, 비틀림이 없다고 가정할 때 Fig. 2에서와 같이 2번 링크의 유연성에 기인한 y_2방향 탄성변위로서 이것에 의해 3, 4번 링크는 식 (1c)에서와 같이 Ω_3, 즉 $[0\ 0\ \frac{\partial u(L_2,\ t)}{\partial x_2}]^T$ 만큼의 추가 회전을 갖는다.

두번째 팔 hub 이후 부분의 횡방향 탄성변위는 경계조건이 복잡하여 해석적 진동모드를 구하기 어려우므로 가정모드법[6]에 의하여 다음과 같이 공간 이산화한다.

$$u(x_2,\ t) = \phi_y(x_2)^T q_y(t) \tag{2}$$

여기서 ϕ_y는 가정되는 허용함수이며 q_y는 일반화 좌표이다. 로봇의 configuration 벡터를 $q=[\theta_1\ \theta_2\ \theta_3\ \theta_4\ q_y^T]^T$로 정의할 때 식 (1)의 속도벡터들은 다음과 같이 그의 시간변화율 $\dot{q}$에 관하여 표현될 수 있다.

$$^iv_i = D_i\dot{q},\quad i=1,2,3,4 \tag{3}$$

여기서 D_i는 가정모드의 갯수를 n이라고 할 때, 각 링크 매개변수와 조인트 변수의 함수인 $3\times(4+n)$행렬이다.

그러므로 식 (3)으로부터 로봇의 전체 운동에너지는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2}\dot{q}^T M\dot{q} \tag{4}$$

여기서 $M(q)=\sum_i \int D_i^T D_i dm_i$ $(i=1,2,3,4)$은 positive definite하고 대칭인 전체 질량 행렬이다.

한편, 위치에너지는 두번째 팔의 탄성 변형에너지와 중력 방향으로의 제 3암의 이동에 의하여 발생하게 되므로 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2}q^T Kq + g^T q \tag{5}$$

여기서 K는 positive-semidefinite하고 대칭인 전체 강성행렬로서 $\int_{x_2} EI\phi_y''\phi_y''^T dx_2$를 유일한 영이 아닌 대각요소로 가지며, g는 $d_3=0$를 기준 datum으로 하고 $\underline{g}$를 중력가속도라고 할 때 $[0\ 0\ -(m_3+m_4)\underline{g}\ 0\ 0^T]^T$인 벡터이다.

비보존 가상일은, 내부 엑츄에이터에 의하여 각 revolute 조인트에 토크 1개씩, prismatic 조인트에 lead screw와 조합된 토크 또는 힘 1개가 작용한다고 하고 외부 엑츄에이터로서 반작용륜이 두번째 팔의 끝단에서 작용한다고 할 때, 그들을 순서대로 $\tau_{\theta 1}$에서 τ_5까지로 정의하고 각 관절의 마찰을 추가 고려

하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\delta W_{nc} &= (\tau_{\theta 1}-\tau_{\theta 1 f})\,\delta\theta_1+(\tau_{\theta 2}-\tau_{\theta 2 f})\,\delta\theta_2+(\tau_{\theta 3}-\tau_{\theta 3 f})\,\delta d_3\\ &\quad+(\tau_{\theta 4}-\tau_{\theta 4 f})\,\delta\theta_4+\tau_5\delta(\theta_1+\theta_2+u'(L_2,\ t))\\ &=(E\tau-\tau_f)^T\delta q \qquad (6)\end{aligned}$$

여기서 E는 쉽게 알 수 있는 상수행렬이며 $\tau=[\tau_{\theta 1}\ \tau_{\theta 2}\ \tau_{\theta 3}\ \tau_{\theta 4}\ \tau_5]^T$는 엑츄에이터 토크 벡터, $\delta q=[\delta\theta_1\ \delta\theta_2\ \delta d_3\ \delta\theta_4\ \delta q_y^T]^T$는 가상변위, $\tau_f=[\tau_{\theta 1 f}\ \tau_{\theta 2 f}\ \tau_{\theta 3 f}\ \tau_{\theta 4 f}\ 0^T]^T$는 마찰토크 벡터이다.

앞에서 구한 에너지 항들을 Lagrange 방정식에 대입하여 연산하면 다음과 같은 로봇의 운동방정식이 얻어진다.

$$M(q)\ddot{q}+G(q,\ \dot{q})\dot{q}+Kq+g+\tau_f=E\tau \qquad (7)$$

여기서 G는 Coriolis 힘과 원심력에 관계된 계수 행렬로서 다음과 같이 표현된다.

$$G=\frac{\partial M}{\partial q}\dot{q}-\frac{1}{2}\dot{q}^T\frac{\partial M}{\partial q}$$

3. 섭동 방정식

식 (7)의 운동방정식은 비선형이므로 선형 최적제어기의 설계가 용이하지 않다. 따라서 탄성 변위와 강체 섭동의 크기가 로봇의 전체적 운동에 비하여 작다는 가정하에 섭동이론에 의거하여 운동방정식을 선형화 한다. 즉, 각 변수를 다음과 같이 하첨자 0으로 표시된 정격 영차섭동과 하첨자 1로 표시된 상대적으로 미소한 일차 섭동의 합으로 근사화한다.

$$\begin{aligned}&q=q_0+q_1,\quad \dot{q}=\dot{q}_0+\dot{q}_1,\quad \ddot{q}=\ddot{q}_0+\ddot{q}_1,\\ &\tau=\tau_0+\tau_1,\quad \tau_f=\tau_{f0}+\tau_{f1} \qquad (8a,\ b,\ c,\ d,\ e)\end{aligned}$$

여기서 $q_0=[\theta_{10}\ \theta_{20}\ d_{30}\ \theta_{40}\ 0^T]^T$, $q_1=[\theta_{11}\ \theta_{21}\ d_{31}\ \theta_{41}\ q_y^T]^T$, $\tau_0=[\tau_{10}\ \tau_{20}\ \tau_{30}\ \tau_{40}\ 0^T]^T$, $\tau_1=[\tau_{11}\ \tau_{21}\ \tau_{31}\ \tau_{41}\ \tau_5]^T$이다.

이 때 식 (7)의 계수행렬들을 영차섭동 근처에서 1차 Taylor 급수로 선형화하고 식 (8)을 대입하여 동차 섭동항끼리 정리하면 각각 아래의 식 (9), (10)과 같은 영차 섭동 방정식과 일차 섭동 방정식을 동시에 얻게 된다.

$$M_0\ddot{q}_0+G_0\dot{q}_0+g+\tau_{f0}=\tau_0 \qquad (9)$$

$$M_0\ddot{q}_1+(G_0+G_v')\dot{q}_1+(M_a+G_v+K)q_1+\tau_{f1}=E\tau_1+\tau_d \qquad (10)$$

여기서 M_0는 질량행렬의 정격치인 $M(q_0)$, G_0는 G 행렬의 정격치인 $G(q_0,\ \dot{q}_0)$을 나타내며 그 밖의 계수 행렬들은 다음과 같다.

$$G_v'=\left[\frac{\partial G}{\partial\theta_1}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial\theta_2}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial d_3}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial\theta_4}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial\dot{q}_y}\dot{q}_0\right]_{q_0,\dot{q}_0}$$

$$M_a=\left[\frac{\partial M}{\partial\theta_1}\ddot{q}_0\ \frac{\partial M}{\partial\theta_2}\ddot{q}_0\ \frac{\partial M}{\partial d_3}\ddot{q}_0\ \frac{\partial M}{\partial\theta_4}\ddot{q}_0\ \frac{\partial M}{\partial q_y}\ddot{q}_0\right]_{q_0}$$

$$G_v=\left[\frac{\partial G}{\partial\theta_1}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial\theta_2}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial d_3}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial\theta_4}\dot{q}_0\ \frac{\partial G}{\partial q_y}\dot{q}_0\right]_{q_0,\dot{q}_0}$$

한편, 식 (10)의 τ_d는, 식 (9)가 두번째 팔의 링크 유연성을 배제한 강체 로봇 운동만을 묘사하도록 차수를 $(4+n)$에서 4로 축소시키는 과정중에 식 (10)에 편입된, 위의 4개 요소가 모두 0인 외란 힘 또는 토크 벡터이다. τ_d는 q_0, $\dot{q}_0$, $\ddot{q}_0$ 등 영차 섭동의 함수로서 로봇의 목표궤적이 정해지면 추종중 지속적으로 변화하는 알려진 시간함수로서 추종오차를 야기시키는 근원이다.

4. 제어기 설계

탄성운동과 미소 강체 섭동운동 즉 모든 팔 진동은 식 (10)에 의하여 지배된다. 진동의 억제를 위한 폐루프 귀환 제어기 설계를 위하여, 우선 상태변수 $x=[q_1^T\ \dot{q}_1^T]$, 제어입력 $u=\tau_1$, 그리고 외란 $d=\tau_d$를 정의한 후 τ_{f1}을 일단 무시한 상태에서 식 (10)을 상태방정식으로 변형하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t)=A(t)x(t)+B(t)Eu(t)+B(t)d(t) \qquad (11)$$

여기서 $A=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M_0^{-1}(M_a+G_v+K) & -M_0^{-1}(G_0+G_v')\end{bmatrix}$,

$B=\begin{bmatrix}0\\ M_0^{-1}\end{bmatrix}$이다.

식 (11)를 다시 주기가 T인 샘플러와 영차 홀드를 거쳐 시간 이산화 하면 식 (12)와 같이 된다.

$$x_{k+1}=\Phi_k x_k+\Gamma_k Eu_k+\Gamma_k d_k,\quad k=0,1,\cdots \qquad (12)$$

여기서 하첨자 k는 각 연속시간 변수의 k번째 샘플링 순간 값을 의미하며 $\Phi_k=e^{A_kT}$, $\Gamma_k=(e^{A_kT}-I)A_k^{-1}B_k$이다.

귀환 제어기는 외란에 대한 강인성을 확보하기 위한 방안으로서 참고문헌 (5)와 (7)에서와 같이 지정된 상대안정도를 갖는 이산시간 LQR문제를 풀어서 구한다. 즉, 다음과 같은 형태의 이차 성능지수를 최소화하는 제어 이득을 구한다.

$$J=x_N^TP_Nx_N+\sum_{k=0}^{N-1}e^{2ak}(x_k^TQ_kx_k+u_k^TR_ku_k) \qquad (13)$$

여기서, P_N, Q_k, R_k은 가중치 행렬, a는 상대안정도의 크기를 지정하는 음이 아닌 상수이다. 한편, N은 제어 종료시의 샘플링 횟수로서 이를 로봇의

거동 종료 시점보다 충분히 크게 하면 거동종료후 시불변 계의 정상상태 잔류진동 제어기의 이득까지를 구할 수 있다.

이 경우, 제어이득은 다음과 같이 유도된 차분 Riccati 방정식으로 부터 역시간 방향으로 얻을 수 있다.

$$K_{N-i}=-[e^{2\alpha}E^T\Gamma_{N-i}^T\ \hat{P}_{N+1-i}\Gamma_{N-i}E+R_{N-i}]^{-1}\times e^{2\alpha}E^T\Gamma_{N-i}^T\ \hat{P}_{N+1-i}\Phi_{N-i} \quad (14a)$$

$$\hat{P}_{N-i}=e^{2\alpha}[\Phi_{N-i}+\Gamma_{N-i}EK_{N-i}]^T\hat{P}_{N+1-i}[\Phi_{N-i}+\Gamma_{N-i}EK_{N-i}]K_{N-i}^TR_{N-i}K_{N-i}+Q_{N-i},\quad i=1,2,\cdots N \quad (14b)$$

여기서 $\hat{P}_k=e^{-2\alpha k}P_k$이며 $\hat{P_N}=e^{-2\alpha N}P_N$는 초기 조건이 된다. 이 때, 귀환 제어 입력은 $u_k=K_kx_k$이 되고 폐루프 상태 방정식은 아래 식 (15)와 같아져, 폐루프 시스템 행렬 $\Phi_k+\Gamma_kEK_k$의 극점은 Z평면 상의 반경이 $e^{-\alpha}$인 원의 내부 혹은 근처에 존재하므로써 지정된 상대안정도를 갖게 된다.

$$x_{k+1}=(\Phi_k+\Gamma_kEK_k)x_k+\Gamma_kd_k,\quad k=0,1,\cdots \quad (15)$$

5. 수치 시뮬레이션 및 실험

SCARA로봇의 3, 4축은 각각 타축과 직교하며 질량관성이 작아서 1, 2축의 운동에 거의 영향을 주지 않는다. 따라서 처음 두 축만으로 구성되고 비선형 마찰등이 없는 이상적 SCARA형 로봇에 대하여는 이미 수치 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 발표하였으며[8], 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 제작한 실험용 로봇 시스템을 대상으로 수치 시뮬레이션과 실험을 수행하고 그 결과를 비교하고자 한다.

한편 로봇 팔의 구조 제원은, 첫번째 팔의 경우 $L_1=0.19$ m, $I_{1zz}=0.10$ kgm², 두번째 팔의 경우 $L_2=0.4$ m, $m_2=1.78$ kg, $EI_2=7.73$ Nm², $I_{2zz}=0.40$ kgm², $S_{x2}=0.82$ kgm이다. 여기서 질량관성 값들은 각 팔의 회전축에 관한 값이며 S_{x2}는 두번째 팔의 일차 질량관성 모멘트 값이다.

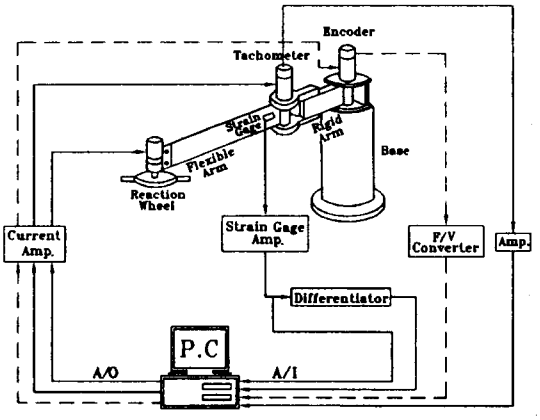

Fig. 3 Robot system for experiments

1, 2축 엑츄에이터로는 각각 광학식 인코더와 타코미터 센서가 부착된 직류서보 모터를 사용하였으며, 두번째 팔의 끝단에는 공기저항을 부하로 이용하기 위하여 날개가 달린 원판과 직류 서보 모터가 직결된 구조인 반작용륜이 설치되어 있다. 한편 이들 엑츄에이터의 구동을 위하여 입력 전압에 비례하여 토크를 출력하는, Fig. 4와 같이 출력전류대 입력전압의 비가 $-R_2/R_sR_1$인 전류증폭기를 설계 제작하여 연결하였다. 그러나 가용한 데이터 획득보드의 D/A채널이 2개 뿐이어서 본 실험에서는 Fig. 3의 실선으로 표시된 부분만이 제어용 PC와 연결되었고 첫번째 팔은 그 영향을 억제하기 위하여 기계적으로 고정되었다.

한편 타코미터 신호는 PC내에서 잡음제거를 위한 2차 디지털 저통과 필터를 거친후 회전속도외에도 수치적분된 두번째 팔의 회전각 신호까지도 제공하고, 두번째 팔의 hub 근방에 설치된 스트레인 게이지(이하 SG)의 신호는 탄성변위량과 동시에 아날로그 미분기와 디지털 필터를 거쳐 그의 시간 변화율 정보도 함께 제공하게 된다.

참고문헌 (8)에서는 두번째 팔의 탄성변위를 2차 모드까지 고려하였으나 본 실험조건하에서는 2차이상 모드가 거의 가진되지 않으므로, 두번째 팔의 탄성변위 모델의 허용함수로서 다음과 같이 경계조건이 고정-자유인 균일보의 1차 고유모드 함수를 사용하였다.

$$\phi_y=\frac{1}{\sqrt{L_2}}[\cosh\lambda x/L_2-\cos\lambda x/L_2-\sigma(\sinh\lambda x/L_2-\sin\lambda x/L_2)] \quad (16)$$

여기서 $\lambda=1.8751$, $\sigma=0.7341$인 상수이다. 이 경우,

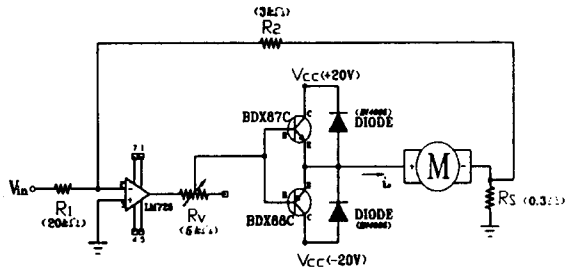

Fig. 4 Current amplifier

고유진동수가 0 Hz인 한개의 강체 회전모드 이후에 발생하는 탄성모드의 비감쇠 고유진동수는 계산결과 0.94 Hz로서 임펄스 시험결과인 0.48 Hz보다 큰 값으로 나타났다. 그 차이는 관절에서의 비선형 Coulomb마찰과 진동모드간의 coupling에 크게 기인한다는 것을 식 (10)의 τ_{f1}을 고려하므로써 알 수 있었다.

따라서, 모든 필터의 차단주파수를 10 Hz로 하였고 이 경우, 상기 센서신호와 상태변수간에는 다음과 같은 출력방정식이 성립하며 이로부터 모든 상태변수를 구할 수 있다.

$$y_k = Cx_k \tag{17}$$

여기서 $C = diag[1, \ -H\phi''_y(L_{SG})/2, 1, \ -H\phi''_y(L_{SG})/2]$, H는 두번째 팔의 두께로서 0.001 m, L_{SG}는 SG의 부착위치로서 0.04 m이다.

한편, 실험중 상기 언급한 식 (7)의 마찰토크 τ_f 외에도 중력의 효과를 무시할 수 없었다. 따라서 주로 Coulomb 마찰력으로 구성된 τ_f와, 기계 가공 및 조립상의 문제로 팔의 운동이 중력방향과 완전 직교되지 못하여 발생하는 중력효과를 q에 관한 함수로서, 각각 식 (18a), (18b)와 같이 모델링한 후

$$\tau_f = C_c sgn(\dot{q}), \quad \tau_g = f_g(q) \tag{18a,b}$$

이를 반영하면, 섭동방정식 (9), (10)은 아래와 같이 재표현된다.

$$M_0\ddot{q}_0 + G_0\dot{q}_0 + g + C_c sgn(\dot{q}_0) + f_g(q_0) = \tau_0 \tag{19}$$

$$M_0\ddot{q}_1 + (G_0 + G'_v)\dot{q}_1 + (M_a + G_v + K)q_1 + C_c sgn(\dot{q}_1) + f_g(q_1) = E\tau_1 + \tau_d \tag{20}$$

한편 팔 끝단의 궤적은 $\theta_2 = 0$인 정지상태로 부터 매끄러운 한 주기의 정현파 가속도를 가지며 3초 동안 $\theta_2 = 45°$에 도달 정지하도록 계획하였다. 이를 실현시키기 위한 토크는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 이송시간 동안 관절의 Coulomb마찰을 극복하기 위하여 일정량의 추가 토크를 필요로 하며 실험결과 C_c의 크기는 약 0.02 Nm로 나타났다. 그러나, f_g는 팔의 위치에 따라 크기가 변화하며 논리적으로는 유추할 수 없는 미지의 함수이므로 사실상 시뮬레이션에서는 고려하지 않았다.

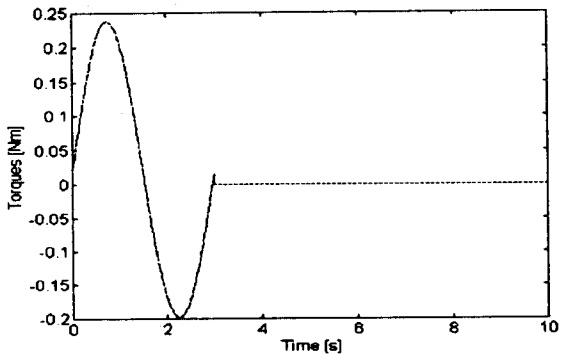

Fig. 5 Torque for trajectory following

가반중량 이송 시간은 3초이나 그 이후의 진동까지도 억제하기 위하여 제어를 10초까지 지속한다. 이때 주목할 것은 3초이후의 로봇 시스템은 시불변계이므로 일정한 제어이득이 사용된다. 그 이득은, 이산시간 샘플링 주기 T가 0.01 초이므로 $N=1000$으로 충분히 크게 하여 역 시간으로 Riccati 방정식을 풀때, $N=300$인 시점에서의 이득에 해당한다. 성능지수에 사용된 가중치 행렬 P_N, Q_k, R_k은 각각 I_4, I_4, I_2, 안정도 상수 α는 0.1인 경우를 살펴 보았다. 이 때 이송 종료 순간에 구한 페루프 극점의 위치는, 제어되기 전 1개의 강체 모드를 포함하여 모두 Z평면의 단위 원주상에 존재하던 극점들이 내부로 이동하여 Table 1에서 알 수 있듯이 $e^{-0.1}(=0.90)$보다 작은 반경내에 위치함을 확인할 수 있었다.

섭동이 귀환제어되지 않은 경우와 귀환제어된 경우의 로봇 운동의 일차 섭동추이를 각각 Figs. 6, 7에 도시하였다. 이들 신호는 관절의 각위치와 30배 확대한 SG의 신호이다. Fig. 6을 보면, 두번째 팔의 거동이 Fig. 5의 동일 토크를 가한 경우 시뮬레이션과 실험에서 상호 근사한 결과가 나타남을 알 수 있

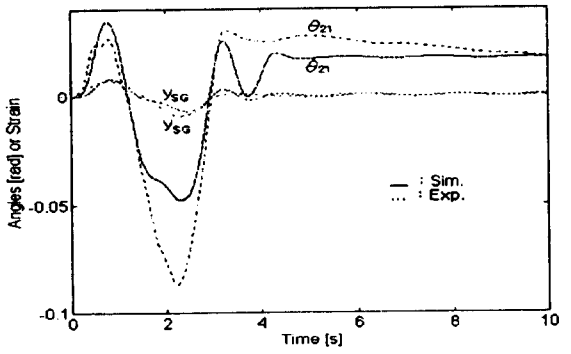

Fig. 6 Uncontrolled 1st order perturbations

Table 1 Closed loop poles

No.	Location
1, 2	0.8073±0.0429 i
3	0.8183
4	0.8135

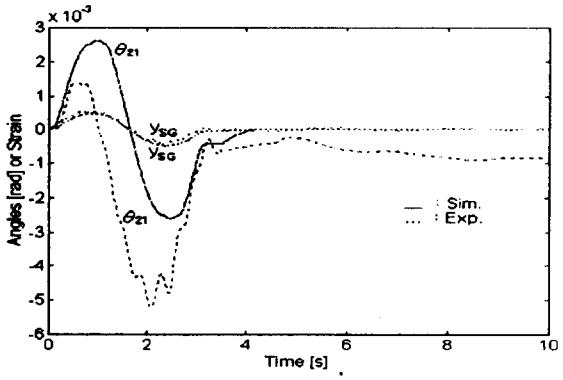

Fig. 7 Controlled 1st order perturbations

다. 다만 실험의 경우 이송완료 후에도 상기 중력효과에 의하여 팔이 조금씩 회전함을 알 수 있다. 한편 Fig. 7에서는, 귀환 제어시 섭동이 궤적 추종 후뿐만 아니라 도중에도 현저히 감소함을 시뮬레이션과 실험으로 공히 알 수 있으며, 그 중 실험의 경우는 상기 중력효과에 의하여 정상상태 각도 오차가 다소 존재함을 알 수 있다.

6. 결 론

유연한 수평다관절형 로봇의 운동방정식을 유도하였고 로봇이 궤적 추종중 발생하는 진동까지 억제하기 위한 제어기를 설계하였다.

이를 위하여 두번째 팔의 끝단에 반작용륜을 설치하였으며 섭동 이론을 적용하여 로봇의 운동방정식을 비선형 강체운동 방정식과 선형 진동 방정식으로 분리시켰다. 강체운동 방정식은 계획된 궤적에 따라 역동력학으로 부터 개루프 위치제어 토크입력 설계에 적용하며, 진동 방정식은 지정된 상대안정도를 갖는 이산시간 LQR제어에 의하여 외란의 효과를 감소시키기 위한 폐루프 진동제어 설계에 이용되었다.

실험용으로 제작한 2축 로봇시스템을 대상으로, 수치 시뮬레이션과 실시간 실험을 통하여 제안된 위치 및 진동 제어 방식을 점검해 본 결과 우수한 제어성능을 확인할 수 있었다. 그러나 본 진동제어 방식의 실효성을 제고하기 위하여는 로봇팔의 제작시 상기 중력효과에 관한 엄격한 관리가 필요하다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비 (기계공학 : ME95-D-01)에 의하여 연구되었으며 이에 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Cannon, R. H. Jr. and Bindford, T. O., 1984, "Precise Control of Flexible Manipulator", Final Report for NASA Langley Research Center.

(2) 임준영, 박인오, 오준호, 1990, "레이트 자이로를 이용한 유연한 로봇팔의 진동제어에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제14권, 제5호, pp. 1112～1118.

(3) 이재원, 주재호, 신찬배, 1994, "가속도 센서를 이용한 유연한 조작기의 끝점제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(Ⅰ), pp. 740～745.

(4) 하영균, 박영필, 1993, "유연한 3 자유도 로봇팔 진동의 능동제어(Ⅰ)", 대한기계학회논문집, 제17권, 제3호, pp. 548～558.

(5) Meirovitch, L. and Lim, S. 1994, "Maneuvering and Control of Flexible Space Robots", AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No. 3, pp. 520～528.

(6) Meirovitch, L., 1967, Analytical Methods in Vibrations, Macmillan Publishing Company, New York, pp. 233～235.

(7) 임승철, 1995, "유연한 우주로봇의 위치제어", 제10차 한국자동제어 학술회의 논문집, pp. 100～103.

(8) 용대중, 임승철, 1996, "유연한 수평다관절형 로봇의 진동제어", 제11차 한국자동제어 학술회의 논문집, pp. 225～228.