

유연한 수평 다관절형 로봇의 진동제어

Vibration Control of a Flexible SCARA Type Robot

°용 대 중*, 임 승 철*

*명지대학교 기계공학과 (Tel:0335-30-6428; Fax:0335-35-9998; E-mail: Slim@wh.myongji.ac.kr)

Abstract This paper concerns a SCARA type robot with the second arm flexible. Its 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 first determined based on the inverse dynamics of the latter. Next, 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 with a prescribed degree of stability. The numerical simulations results show the satisfactory control performance.

Keywords Link Flexibility, Perturbation, LQR, Prescribed Degree of Stability, Robustness

1. 서론

현재의 산업용 로봇은 대개 강체 팔로 만들어져 제작비와 에너지 소비가 크며 동작속도가 제한되고 자중대 가반중량의 비가 매우 작은 단점을 갖고 있다. 따라서 그러한 단점을 해소하고 작업영역을 극대화하기 위하여 로봇 팔을 가능한 가늘고 길게 만들 필요가 있다.

그러나 그 경우에 로봇팔의 유연성으로 인하여, 교시된 목표 위치로 End-effector를 이동시키다 보면 팔 자체 및 가반 질량에 의한 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 로봇제어의 설계시, 상기 자유진동뿐만 아니라 운동중 진동에 의하여 야기되는 궤적 추종 오차의 신속한 감쇠능력까지도 반드시 고려해야 한다.

본 논문에서는 상기 관점과 컴플라이언스 추가에 의한 조립능력의 증대까지도 목표로 하여 두 번째 팔을 유연하게 만든 SCARA형 로봇에 대하여 3차원 운동방정식을 구하고 섭동이론⁽⁵⁾을 적용하여 제어를 설계한 후 그 성능을 자체 제작한 2축 로봇을 대상으로 수행한 시뮬레이션으로 검증하고자 한다.

2. 운동 방정식

그림1에 보인바와 같이 두 번째 팔이 유연한 4축 SCARA로봇을 대상으로 그의 운동방정식을 Lagrange 역학으로 유도하고자 한다.

우선 운동에너지를 구하기 위하여 1번 부터 4번 물체의 임의의 점에서의 절대 속도를 구해보면 각각 물체 고정 좌표계 성분으로 표현될 때 연쇄적으로 다음과 같이 얻어진다.

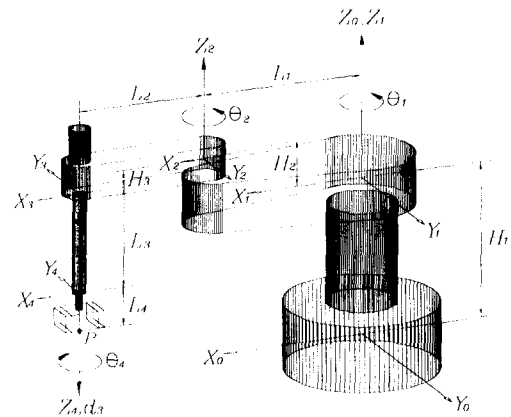


그림1. 유연한 SCARA로봇

Fig.1 Flexible SCARA Robot

$${}^1v_1 = {}^1\tilde{\omega}_1 \quad {}^1r_1 \quad (1a)$$

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

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

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

여기서 각벡터의 앞 상첨자는 성분 표현된 기준좌표계를, 뒤의 하첨자는 해당 물체를 의미하며, r 은 상기 임의의점까지 위치 벡터, $O_i(i=2,3,4)$ 는 i 번째 물체 좌표계의 원점, 행렬 C 는 상첨자와 하첨자로 표시된 좌표계간의 회전행렬을 의미한다. 또한 Ω 는 하첨자로 표시된 링크의 바로 전 링크에 대한 상대 각속도를 의미하며 ω 는 로봇base에 관한 절대 각속도를, 그리고 $\tilde{\omega}$ 는 벡터적의 행렬표현으로서 해당벡터로 이루어진 외대칭 행렬을 뜻한다.

한편 식(1b)에서 u 는, 비틀림이 없다고 가정할 때 그림2에서와 같이 2번 링크의 유연성에 기인한 y_2 방향 탄성변위로서 이것에 의해 3번 링크는 식(1c)에서와 같이 ${}^2\Omega_3$, 즉

$$\left[0 \ 0 \ \frac{\partial u(L_2, t)}{\partial x_2}\right]^T \text{만큼의 추가 회전을 갖는다.}$$

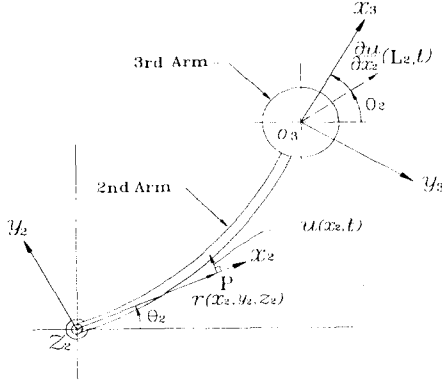


그림2. 제2암의 탄성변위

Fig.2 Elastic Displacement of the 2nd Arm

제2암 hub이후 부분의 횡방향 탄성변위는 경계조건이 복잡하여 해석적 진동모드를 구하기 어려우므로 가정모드법⁽⁶⁾에 의하여 다음과 같이 공간 이산화한다.

$$u(x_2, t) = \phi_y(x_2)^T q_y(t) \quad (2)$$

여기서 ϕ_y 는 가정되는 허용함수이며 q_y 는 일반화 좌표이다. 로봇의 configuration 벡터를 $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ d_3 \ \theta_4 \ q_y]^T$ 로 정의할 때 식(1)의 속도벡터들은 다음과 같이 \dot{q} 에 관하여 표현될 수 있다.

$${}^i v_i = D_i \dot{q} \quad , \quad i=1,2,3,4 \quad (3)$$

여기서 D_i 는 가정모드의 갯수를 n 이라고 할 때, 각 링크 파라메타와 조인트 변수의 함수인 $3 \times (4+n)$ 행렬이다.

그러므로 식(4)로부터 전체 로봇의 운동에너지는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad (4)$$

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 중력 방향으로의 제3암의 이동과 제2암의 탄성 변형에너지에 의하여 발생하게 되므로 그 둘을 합하면 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T K \dot{q} + g^T q \quad (5)$$

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

비보존 가상일은, 내부 액츄에이터에 의하여 각 revolute 조인트에 토크 1개씩, prismatic 조인트에 lead screw와 조합된 토크 또는 힘 1개가 작용한다고 하고 외부 액츄에이터로서 반작용

용량이 제2암의 끝단에서 작용한다고 할 때, 그들을 순서대로 τ_{01} 에서 τ_5 까지로 정의하고 각 관절의 마찰을 추가 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta W_{nc} &= (\tau_{01} - \tau_{01f}) \delta \theta_1 + (\tau_{02} - \tau_{02f}) \delta \theta_2 + (\tau_{03} - \tau_{03f}) \delta d_3 \\ &\quad + (\tau_{04} - \tau_{04f}) \delta \theta_4 + \tau_5 \delta (\theta_1 + \theta_2 + u(L_2, t)) \\ &= (E\tau - \tau_f)^T \delta q \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 E 는 쉽게 알 수 있는 상수행렬이며 $\tau = [\tau_{01} \ \tau_{02} \ \tau_{03} \ \tau_{04} \ \tau_5]^T$ 는 액츄에이터 토크 벡터, $\delta q = [\delta \theta_1 \ \delta \theta_2 \ \delta d_3 \ \delta \theta_4 \ \delta q_5]^T$ 는 가상변위, $\tau_f = [\tau_{01f} \ \tau_{02f} \ \tau_{03f} \ \tau_{04f} \ 0]^T$ 는 마찰토크 벡터이다.

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

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

여기서 G 는 Coriolis 힘과 원심력에 관계된 계수 행렬로서 다음과 같이 표현된다.

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

3. 섭동 방정식

식(7)의 운동방정식은 비선형이므로 제어기 설계가 어렵다. 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 정격치인 영차섭동과 하첨자 1을 갖는 일차 섭동치로 근사화한다.

$$q = q_0 + q_1, \quad \dot{q} = \dot{q}_0 + \dot{q}_1, \quad \ddot{q} = \ddot{q}_0 + \ddot{q}_1, \quad \tau = \tau_0 + \tau_1 \quad (8a, b, c, d)$$

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

$$M_0 \ddot{q}_0 + G_0 \dot{q}_0 + g + \tau_f = \tau_0 \quad (9)$$

$$M_0 \ddot{q}_1 + (G_0 + G_c) \dot{q}_1 + (M_a + G_s + K) q_1 = E\tau_1 + \tau_d \quad (10)$$

여기서 M_0 는 질량행렬의 정격치인 $M(q_0)$, G_0 는 G 행렬의 정격치인 $G(q_0, \dot{q}_0)$ 을 나타내며 그 밖의 계수 행렬들은 다음과 같다.

$$G_c = \left[\frac{\partial G}{\partial \theta_1} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial \theta_2} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial d_3} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial \theta_4} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial q_y} \dot{q}_0 \right]_{a_0, a_0}$$

$$M_a = \left[\frac{\partial M}{\partial \theta_1} \ddot{q}_0 \quad \frac{\partial M}{\partial \theta_2} \ddot{q}_0 \quad \frac{\partial M}{\partial d_3} \ddot{q}_0 \quad \frac{\partial M}{\partial \theta_4} \ddot{q}_0 \quad \frac{\partial M}{\partial q_y} \ddot{q}_0 \right]_{a_0}$$

$$G_s = \left[\frac{\partial G}{\partial \theta_1} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial \theta_2} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial d_3} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial \theta_4} \dot{q}_0 \quad \frac{\partial G}{\partial q_y} \dot{q}_0 \right]_{a_0, a_0}$$

한편, 식(10)의 τ_d 는, 식(9)를 제2암의 링크 유연성을 배제한 강체 로봇 운동만을 묘사하는 데 사용하기 위하여 차수를 $(4+n)$ 에서 4로 축소시키는 과정에서 식(10)에 편입된, 외란 힘

또는 토크 벡터로서 위의 4개 요소는 모두 0이다. τ_d 는 q_0 , \dot{q}_0 , \ddot{q}_0 등 영차 섭동의 함수로서 로봇의 목표궤적이 정해지면 추종중 지속적으로 변화하는 알려진 시간함수로서 추종오차를 발생시키는 근원이다.

4. 제어기 설계

탄성운동과 미소 강제 섭동운동은 식(10)에 의하여 지배된다. 지속적으로 변화하며 작용하는 외란은 궤적계획시 알려진 시간함수이므로 일단 feedforward 제어로 근사적으로 상쇄하고 그래도 남는 잔류 외란은 귀환 제어에 의하여 그 효과를 억제한다. 이를 위하여 제어 입력을 $\tau_1 = \tau_{1a} + \tau_{1b}$ 로 분리하고 feedforward 입력 $\tau_{1a} = -E^* \tau_d$ 으로 설계한다. 여기서 $E^* = (E^T E)^{-1} E^T$ 는 비정방 행렬 E 의 pseudo inverse를 의미한다.

귀환제어에 필요한 모든 상태변수를 알 수 있다는 전제하에 페루프 귀환 제어 설계를 위하여, 우선 상태변수 $x = [q_1^T \ \dot{q}_1^T]^T$, 제어입력 $u = \tau_{1b}$, 그리고 외란 $d = \tau_d$ 를 정의하여 식(10)을 상태방정식으로 변형하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)Eu(t) + B(t)Dd(t) \quad (11)$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_0^{-1}(M_0 + G_v + K) & -M_0^{-1}(G_0 + G_v) \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_0^{-1} \end{bmatrix}$, 특히 $D(t) = I - EE^*$ 는 역휴에이터 수가 전체 운동 자유도 수와 같지 않는 한 영이 아닌 행렬이다.

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

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k E u_k + \Gamma_k D d_k, \quad k=0, 1, \dots \quad (12)$$

여기서 하첨자 k 는 각 연속 시간 변수의 k 번째 샘플링 순간 값을 의미하며 $\Phi_k = e^{A_k T}$, $\Gamma_k = (e^{A_k T} - I) A_k^{-1} B_k$ 이다.

귀환 제어기는 외란에 대한 강인성을 확보하기 위한 방안으로서 문헌^(5,7)에서와 같이 지정된 상대안정도를 갖는 이산시간 LQR 문제를 풀어서 구한다. 즉, 다음과 같은 형태의 이차 성능지수를 최소화 하는 제어 이득을 구한다.

$$J = x_N^T P_N x_N + \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\alpha k} (x_k^T Q_k x_k + u_k^T R_k u_k) \quad (13)$$

여기서, P_N , Q_k , R_k 은 가중치 행렬, α 는 안정도의 크기를 지정하는 음이 아닌 상수이다. 한편, N 은 제어 종료시의 샘플링 횟수로서 이를 로봇의 거동 종료 시점보다 충분히 크게 하면 거동종료후 시불변 계의 정상상태 잔류진동 제어기의 이득까지를 구할 수 있다.

이 경우, 다음의 차분 Riccati 방정식으로 부터 제어이득을 얻을 수 있다.

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

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

여기서 $\hat{P}_k = e^{-2\alpha k} P_k$ 이며 $\hat{P}_N = e^{-2\alpha N} P_N$ 는 초기 조건이 된다. 귀환 제어 입력은 $u_k = K_k x_k$ 이 되고 페루프 상태 방정식은 아래와

같아서

$$x_{k+1} = (\Phi_k + \Gamma_k E K_k) x_k + \Gamma_k D d_k, \quad k=0, 1, \dots \quad (15)$$

페루프 시스템 행렬 $\Phi_k + \Gamma_k E K_k$ 의 극점은 Z 평면 상의 반경이 $e^{-\alpha}$ 인 원의 내부 혹은 근처에 존재한다.

5. 수치 시뮬레이션

SCARA로봇의 3,4축은 각각 타축과 직교하며 inertia가 작아서 1,2축의 운동에 거의 영향을 주지 않는다. 따라서 처음 두 축만으로 이루어진 실험용 유연 로봇을 제작하여 현재 실험중에 있으며 본 논문에서는 일단 수치 시뮬레이션 결과만을 제시하고자 한다.

1,2축에는 공히 센서가 장착된 직류서보 모터를 사용하였으며 1축에는 특히 감속비 50인 harmonic drive가 설치되어 있다. 한편 로봇의 구조 제원은 다음과 같다.

$$L_1 = 0.1m, \quad L_2 = 0.4m, \quad m_2 = 1.13kg, \quad EI_2 = 6.18Nm^2$$

$$I_{1zz} = 0.11kgm^2, \quad I_{2zz} = 0.26kgm^2, \quad S_{z2} = 0.43kgm$$

여기서 질량관성값들은 각 팔의 회전축에 관한 값이며 S_{z2} 는 제2암의 일차 질량관성 모멘트값이다.

제2암의 탄성변위 모델의 허용함수로서는 다음과 같이 경계조건이 고정-자유, 고정-고정인 균일보의 1차 고유모드 1개씩을 조합하여 사용한다.

$$\phi_{yi} = \frac{1}{\sqrt{L_2}} [\cosh \lambda x / L_2 - \cos \lambda x / L_2 - \sigma_i (\sinh \lambda x / L_2 - \sin \lambda x / L_2)], \quad i=1, 2$$

여기서 $\lambda_1 = 1.8751$, $\lambda_2 = 4.7300$, $\sigma_1 = 0.7341$, $\sigma_2 = 0.9825$ 이다. 이 경우 두개의 강제모드 이후에 발생하는 탄성모드의 고유진동수는 두팔이 완전히 퍼진 상태에서 계산결과 1.67, 68.07 Hz로서 1,2축과의 coupling에 의하여 단순 외팔보로 계산할 때보다 크게 나타난다.

사용된 1,2축 모터의 마찰토크는 실험결과 $3.70 \times 10^{-2} Nm$ 로서 속도에 관계없이 거의 일정하였다.

한편 끝단의 궤적은 관절 공간에서 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 인 정지상태에서 시작하여 5초 동안 $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi/2$ 에 도달 정지하도록 주파수 0.2 Hz의 매끄러운 한 주기의 정현파 가속도 곡선으로 계획하였다.

기반중량 이송 시간은 5 초이나 그 이후의 진동까지도 억제하기 위하여 제어를 10 초까지 지속한다. 이때 주목할 것은 5초이후의 로봇 시스템은 시불변 계이므로 이후 일정한 제어이득이 사용된다. 그 이득은, 이산시간 샘플링 주기 T 가 0.01 초이고 $N=1000$ 으로 충분히 크게 하여 역 시간으로 Riccati 방정식을 풀때, $N=500$ 인 이송 완료 시점에서의 이득에 해당한다.

성능지수에 사용된 가중치 행렬 P_N , Q_k , R_k 은 각각 I_6 , I_6 , I_3 이다. 안정도 상수 α 가 0.1인 경우를 살펴보았다. 이때 이송 종료 순간에 구한 페루프 극점의 위치는, 제어되기 전 2개의 강제 모드를 포함하여 모두 Z 평면의 단위 원주상에 존재하던 극점들이 내부로 이동하여 표1에서 알 수 있듯이 $e^{-0.1}$ ($=0.90$)보다 작은 반경내에 존재함을 확인할 수 있었다.

섭동이 귀환제어되지 않은 경우와 귀환제어된 경우의 로봇 운동의 일차 섭동추이를 각각 그림 3a와 3b에 도시하였다. 이들 신호는 관절의 각 위치센서와 제2암의 끝단에 설치된 가속도계의 신호를 적분한 v_s 신호중 미리 계획된 강제운동을 제외한 부

분이다. 한편, v_s 는 ${}^2v_2(O_3)$ 의 y_2 성분으로서 다음과 같이 표현된다.

$$v_s = L_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + L_2 \dot{\theta}_2 + \dot{u}(L_2, t)$$

그림에서 귀환제어시 섭동이 궤적추종후 뿐만 아니라 도중에도 현저히 감소함을 알 수 있다.

한편 이 때 가해지는 각 액츄에이터의 강제운동을 일으키기 위한 토크와 일차 섭동을 제어하기 위한 토크를 구별하여 그림 4a, 4b에 제시하였다(F.F.=feedforward, F.B.=feedback). 각 축 액츄에이터의 총 토크는 그림4a와 4b의 토크를 합한 것이며 1, 2축의 경우 실제상황에서 존재하는 마찰을 고려하면 그 만큼의 정.역방향으로 추가토크가 필요하다. 한편 1축의 모터의 경우는 상기 총 토크중 감속비의 역수배만큼만 모터에서 출력하면 된다.

표 1. 이산시간 폐루프 극점
Table 1. Discrete Time Closed Loop Poles

No.	location	No.	location
1, 2	$0.0411 \pm 0.3322 i$	6, 7	$0.8187 \pm 0.0002 i$
3	0.6838	8	0.8183
4, 5	$0.8072 \pm 0.0793 i$		

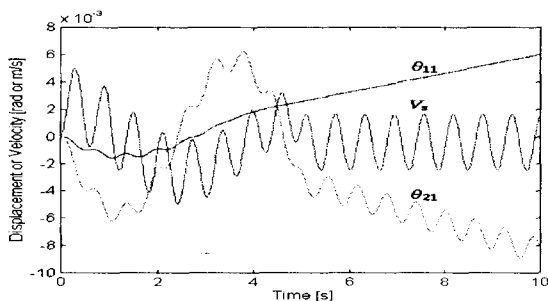


그림3a 비제어시 일차섭동

Fig. 3a 1st Order Perturbation in Uncontrolled Case

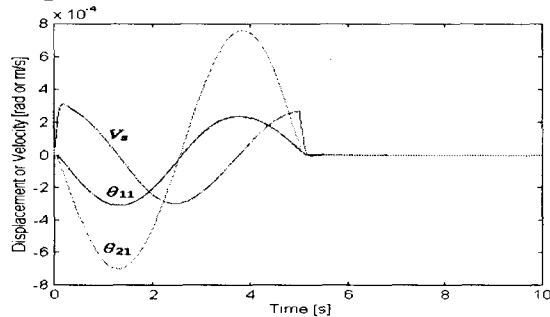


그림3b. 제어시 일차섭동

Fig. 3b 1st Order Perturbation in Controlled Case

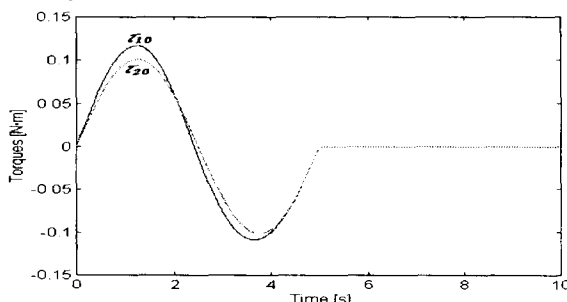


그림4a 궤적추종용 토크

Fig. 4a Torques for Trajectory Following

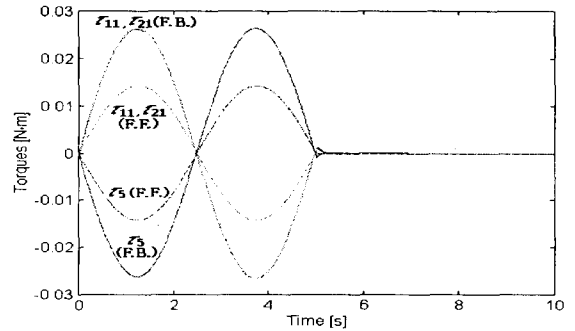


그림4b. 일차섭동 제어용 토크

Fig. 4b Torques for Suppression of the 1st Order Perturbation

6. 결론

유연한 수평다관절형 로봇의 운동방정식을 유도하였고 로봇이 궤적 추종중 발생하는 진동의 억제를 위하여 제어기 설계를 하였다.

이를 위하여 제2암의 끝단에 반작용륜을 설치하였으며 섭동 이론을 적용하여 로봇의 운동방정식을 영차 방정식과 탄성 운동과 강제 섭동 운동을 지배하는 일차 방정식으로 분리시켰다. 영차 방정식은 계획된 궤적에 따라 역동력학으로 부터 개루프 제어 입력 설계에 적용하며, 일차 방정식은 feedforward 제어에 의하여 최대한 외란을 상쇄시킨후 지정된 상대안정도를 갖는 이산시간 LQR제어에 의하여 잔류외란의 효과를 감소시키는 데 이용되었다.

실험용으로 제작된 2축 로봇을 대상으로, 실시간 실험을 위한 예비단계로서 상기 위치제어 방식을 수치 시뮬레이션하여 본 결과 우수한 제어성능을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Cannon, R.H. Jr. and Bindford, T.O., "Precise Control of Flexible Manipulator", Final Report for NASA Langley Research Center, 1984.
- [2] 임준영, 박인오, 오준호, "레이트 자이로를 이용한 유연한 로봇팔의 진동제어에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제14권 제5권, 1990.
- [3] 이재원, 주재호, 신찬배, "가속도 센서를 이용한 유연한 조작기의 끝점제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(1), 1994.
- [4] 하영균, 박영필, "유연한 3 자유도 로봇 팔 진동의 능동제어(I)", 대한기계학회 논문집, 제17권 제3호, 1993.
- [5] L.Meirovitch and S.Lim, "Maneuvering and Control of Flexible Space Robots", AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.17, No.3, 1994.
- [6] Meirovitch, L., Analytical Methods in Vibrations, Macmillan Publishing Company, New York, 1967.
- [7] 임승철, "유연한 우주로봇의 위치제어", 제10차 한국자동제어 학술회의 논문집, pp.100-103, 서울, 1995.10.