

〈論 文〉

우주로봇의 이산시간 출력 귀환 LQ 제어

Output Feedback LQ Control of a Space Robot in Discrete-Time

임 승 철*

Seungchul Lim

(1996년 5월 23일 접수 ; 1996년 7월 15일 심사완료)

Key Words : Link Flexibility(링크 유연성), Perturbation Method(섭동 방법), Position Control(위치 제어), Vibration Suppression(진동 억제), Prescribed Degree of Stability(처방된 안정도), State Estimator(상태 관측기)

ABSTRACT

This paper concerns an articulated space robot with flexible links. The equations of its motion are derived by means of the Lagrangian mechanics. Assuming that magnitude of elastic motions are relatively small, the perturbation approach is taken to separate the original equations of motion into linear and nonlinear equations. To effect the desired payload motion, open loop control inputs are first determined based on the nonlinear equations. On the other hand, in order to reduce the positional errors during the maneuver, vibration suppression is actively done with a feedforward control for disturbance cancellation to some extent. Additionally, for performance robustness against residual disturbance, an LQ control modified to have a prescribed degree of stability is applied based on the linear equations. Measurement equations are formulated to be used for the maximum likelihood estimator to reconstruct states from the original robot equations of motion. Finally, numerical simulations show effectiveness of the proposed control design scheme.

1. 서 론

우주 폐기물의 수거, 이탈된 우주선의 궤도복귀, 고장난 우주선의 수리, 궤도내 우주정거장의 건설과 유지보수 등 다양한 작업이 가능한 우주로봇의 개발이 점차 요구되고 있다.

그러나 최근까지 로봇에 관한 연구는 주로 산업용 강체 로봇에 편중되어 왔으며 일부 연구만이 유연한 산업용 로봇에 관하여^(1,2) 그리고 강체 우주로봇에 관하여^(3,4) 수행되어 왔을 뿐 유연한 우주 로봇에 관한 연구는 아직 활발하지 못한 실정이다⁽⁵⁾.

따라서 본 논문은 우주에서 기동성, 거대한 작업

공간, 가용 에너지의 제한성, 능숙한 작업성 등을 고려하여, Fig. 1과 같이 가늘고 긴 두 팔과 gripper가 revolute 관절을 통하여 직렬로 우주선체에 연결된 형태의 우주로봇을 제안하고 그의 위치 제어 방법에 관하여 고찰하고자 한다.

특히 문제의 복잡성을 피하기 위하여, 로봇이 우주선 platform의 상하 및 좌우의 병진과 1축 회전운동 그리고 각 관절에서의 1축회전 등으로 구성된 전체 6개 운동 자유도의 평면 운동만을 하는 것으로 가정한다.

두팔의 유연성을 고려하여 동작중 우주로봇의 운동방정식을 구하면 고차 비선형 방정식이 되어 제어기 설계가 난이하므로, 탄성 변형의 크기가 전체 로봇 운동의 크기에 비하여 상대적으로 작다고 보고 섭동이론⁽⁶⁾을 적용하여 운동방정식을 섭동이론의 의

*정회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과

미에서의 영차 방정식과 일차 방정식으로 분리한다.

gripper의 위치이동은 기본적으로 영차 방정식을 기초로 계획된 궤적에 따라 역동역학에 의하여 개루프로 이루어 지게 하며, 이 때 수반되는 섭동에 의한 추종오차는 일차 방정식을 기초로 페루프 제어하여 제거시킨다. 페루프에 유입되는 지속적인 외란은 우선 feedforward 제어에 의하여 최대한 상쇄시키도록 하고 그럼에도 잔류하는 외란의 영향은 처방된 안정도를 갖도록 변형된 이산시간 LQR(Linear Quadratic Regulator)에 의하여 최소화 시킨다.

한편, 귀환제어에 필요한 상태변수를 시스템 출력신호로부터 큰 오차없이 재 구축하기 위하여 충분한 개수의 센서를 가정하고 측정 방정식을 구한 수, 원래의 비선형 로봇 방정식에 근거한 ML(Maximum Likelihood) 관측기를 사용한다.

수치 시뮬레이션에서는 이러한 출력귀환 제어방식이 목표점 도달후 뿐만아니라 궤적추종 과정에서의 위치 오차 감소에 매우 효과적임을 보인다.

2. 운동 방정식

운동에너지, 위치에너지 그리고 가상일의 표현을 구하면 로봇의 운동방정식은 Lagrange역학에 의하여 유도될 수 있다. 그 중 운동에너지를 구하기 위하여 로봇의 $i(i=1, 2, 3, 4)$ 번째 body상의 임의점 P_i 의 속도를 필요로 하며 이들은 Fig. 1로부터 다음과 같이 주어진다.

$$V_1 = C_{10}\dot{R}_0 + \tilde{\omega}_1\gamma_1, \quad (1a)$$

$$V_2 = C_{20}\dot{R}_0 + C_{21}\tilde{\omega}_1r_1(O_2) + \tilde{\omega}_2(r_2 + u_2) + \dot{u}_2 \quad (1b)$$

$$V_3 = C_{30}\dot{R}_0 + C_{31}\tilde{\omega}_1r_1(O_2) + C_{32}[\tilde{\omega}_2[r_2(O_3)$$

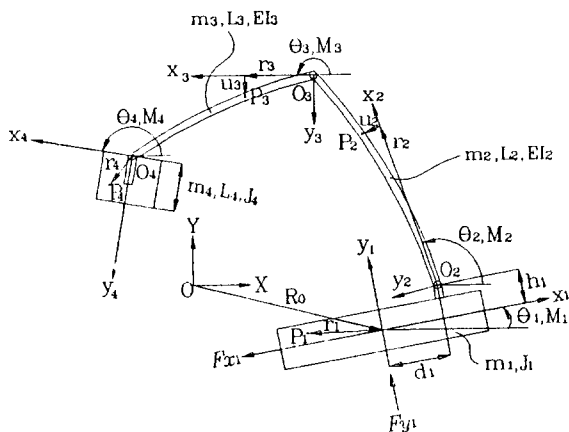


Fig. 1 Flexible space robot

$$+ u_2(L_2, t)] + \dot{u}_2(L_2, t)] + \tilde{\omega}_3(r_3 + u_3) + \dot{u}_3 \quad (1c)$$

$$V_4 = C_{40}\dot{R}_0 + C_{41}\tilde{\omega}_1r_1(O_2) + C_{42}[\tilde{\omega}_2[r_2(O_3) + u_2(L_2, t)] + \dot{u}_2(L_2, t)] + C_{43}[\tilde{\omega}_3[r_3(O_4) + u_3(L_3, t)] + \dot{u}_3(L_3, t)] + \tilde{\omega}_4r_4 \quad (1d)$$

여기서, $C_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i - \theta_j) & \sin(\theta_i - \theta_j) & 0 \\ -\sin(\theta_i - \theta_j) & \cos(\theta_i - \theta_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 는 i 와

$j(j=0, 1, 2, 3)$ 번째 body고정 좌표계간의 회전 행렬이며 θ_0 는 영으로 정의한다. 또한 $\dot{R}_0 = [\dot{X} \ \dot{Y}]^T$, $\tilde{\omega}_i$ 는 ω_i 벡터적의 행렬 표현, r_i 는 정격 위치벡터, $r_i(O_i)$ 는 O_i 점까지의 r_i 벡터, u_i 와 $\dot{u}_i(i=2, 3)$ 는 각각 탄성 변위와 속도, 그리고 $u_i(L_i, t)$ 는 $x_i=L_i$ 에서의 u_i 벡터를 나타낸다. 위에서 구한 속도벡터 V_i 는 i 번째 몸체 고정 좌표계 성분으로 표현된 절대 속도이다.

유연한 팔의 굽힘시 탄성변위는 가정모드법에 의하여 다음과 같은 급수로 표현될 수 있다.

$$u_i(x_i, t) = \phi_i^T(x_i) \eta_i(t), \quad i=2, 3 \quad (2)$$

여기서 $\phi_i(x_i)$ 는 허용함수 벡터이며 $\eta_i(t)$ 는 일반좌표 벡터로서 공히 i 번째 몸체에 관련된 양이며 n 차원을 갖는다. 허용함수로는, 정해로의 수렴성을 향상시키기 위하여 준비교(quasi-comparison)함수⁽⁷⁾방법에 따라 경계조건이 고정-자유단, 고정-고정단인 균일보의 고유함수들을 조합하여 사용한다.

식 (2)에 의한 공간이산화는 아래와 같은 configuration 벡터 $q(t)$ 를 갖게 하며 따라서 속도 벡터들은

$$q(t) = [X(t) \ Y(t) \ \theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t) \ \theta_4(t) \ \eta_2^T(t) \ \eta_3^T(t)]^T$$

$V_i = D_i \dot{q}$ 형태로 다시 쓸수 있다. 여기서 $D_i(i=1, 2, 3, 4)$ 는 식 (1)로부터 쉽게 유추 가능하다. 그 결과 운동에너지는 간단히 아래 식으로 구해진다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad (3)$$

여기서 $M = \sum_{i=1}^4 \int_{m_i} D_i^T D_i dm_i$ 은 대칭이며 positive-definite한 질량행렬이 된다.

위치에너지는, 굽힘 변형만을 고려할 때 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$V = \frac{1}{2} q^T K q \quad (4)$$

여기서, $K = \text{block-diag}[0 \ K_2 \ K_3]$ 은 전체 강성 행렬

이며 2,3번째 대각요소 $K_i = \int_0^{L_i} EI_i \phi_i'' (\phi_i'')^T dx_i$ 는 각 유연 팔의 강성행렬이다. 또한, $EI_i (i=2, 3)$ 은 굽힘 강성이며 '은 공간 미분을 나타낸다.

Platform에는 2개의 추력기 F_{x1} 과 F_{y1} 이 몸체의 x, y 축과 정렬되게, 그리고 토크기 M_1 이 O_1 점에 설치되어 있고, O_2, O_3, O_4 관절에 각각 별도의 토크기 M_2, M_3, M_4 가 설치되어 있다. 또한 각 팔에 길이 방향으로 1/3과 2/3 지점에 하나씩의 토크기가 추가 설치되어 있고 이들을 각각 M_5, M_6, M_7, M_8 이라고 할 때, 비보존 기상일은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \delta W = & F_{x1}(\cos \theta_1 \delta X + \sin \theta_1 \delta Y) + F_{y1}(-\sin \theta_1 \delta X + \cos \theta_1 \delta Y) + M_1 \delta \theta_1 + M_2 \delta (\theta_2 - \theta_1) \\ & + M_3 \delta [\theta_3 - \theta_2 - \phi_2'^T (L_2) \eta_2] + M_4 \delta [\theta_4 - \theta_3 - \phi_3'^T (L_3) \eta_3] + M_5 \delta [\theta_2 + \phi_2'^T (L_2/3) \eta_2] \\ & + M_6 \delta [\theta_2 + \phi_2'^T (2L_2/3) \eta_2] + M_7 \delta [\theta_3 + \phi_3'^T (L_3/3) \eta_3] \\ & + M_8 \delta [\theta_3 + \phi_3'^T (2L_2/3) \eta_3] \\ = & Q^T \delta q \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\delta q = [\delta X \ \delta Y \ \delta \theta_1 \ \delta \theta_2 \ \delta \theta_3 \ \delta \theta_4 \ \delta \eta_2^T \ \delta \eta_3^T]^T$ 는 일반 기상변위 벡터이며 $Q = [F_x \ F_y \ \Theta_1 \ \Theta_2 \ \Theta_3 \ \Theta_4 \ N_2^T \ N_3^T]^T$ 는 δq 방향으로 작용하는 일반력 벡터이다.

따라서 식 (5)로 부터 일반력은 실제 역추에이터의 힘과 토크로서 구할 수 있으며, 이를 $F = [F_{x1} \ F_{y1} \ M_1 \ M_2 \dots M_8]^T$ 라고 정의할 때 $Q = EF$ 로 간단히 표현된다. 여기서, $E = E(\theta_1)$ 는 θ_1 이 시간 함수이므로 시변 행렬이 된다.

$M = M(q)$ 임을 인식하고 위에서 구한 식 (3)~(5)를 표준 Lagrange 방정식에 대입하여 연산하면 아래와 같은 로봇의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{q} + \left(\dot{M} - \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial M}{\partial q} \right) \dot{q} + Kq = Q \quad (6)$$

3. 섭동 방정식

식 (6)은 고차의 비선형 연립미방으로서 선형제어기 설계에 적합하지 않다. 그러나 탄성변형이 전체 운동에 비하여 최소한 한 크기 단위가 작다고 보면 섭동이론을 적용하여 원래 문제를 순수 강체운동에 관한 영차문제와, 탄성운동과 같은 작은 강체 섭동운동에 관한 일차 문제로 분리할 수 있다.

영차문제는 상대적으로 차수는 작지만 비선형이므로 개루프 제어를 시도하고 일차문제는 외란을 포함

하고 고차 시변이지만 선형이므로 페루프 제어를 시도한다.

섭동방정식을 얻기 위하여 식 (6)을 q_0 와 Q_0 부근에서 일차까지 Taylor급수로 근사화한 수 $q = q_0 + q_1, Q = Q_0 + Q_1$ 과 같이 하첨자 0으로 표시된 영차값과 하첨자 1로 표시된 작은 섭동값을 2차항 이상은 무시하고 동차항만으로 이루어진 식으로 개별 정리한다.

이 때 얻어진 다음 식중 처음 6번째 scalar 식까지만 취하여 영차 섭동방정식을 얻는다.

$$M_0 \ddot{q} + (M_v - \frac{1}{2} M_v^T) \dot{q}_0 = E_0 F_0 \quad (7)$$

여기서 $M_0 = M(q_0), q_0 = [X_0 \ Y_0 \ \theta_{10} \ \theta_{20} \ \theta_{30} \ \theta_{40} \ 0^T \ 0^T]^T, M_v = [\frac{\partial M}{\partial q_1} \dot{q}_0 \ \frac{\partial M}{\partial q_2} \dot{q}_0 \dots \frac{\partial M}{\partial q_{6+2n}} \dot{q}_0]_{q=q_0}, E_0 = E(\theta_{10}), F_0 = [F_{x0} \ F_{y0} \ M_{10} \ M_{20} \dots M_{80}]^T$ 이다.

한편 나머지 식으로 만들어 지는 일차 섭동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_0 \ddot{q} + (M_v + M' - M_v^T) \dot{q}_1 + (M_a + M_{vv} - \frac{1}{2} M_{vv}^* \\ + K - F_0^*) q_1 = E_0 F_1 + Q_a \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $q_1 = [X_1 \ Y_1 \ \theta_{11} \ \theta_{21} \ \theta_{31} \ \theta_{41} \ \eta_2^T \ \eta_3^T]^T, M' = \sum_{j=1}^{6+2n} \frac{\partial M}{\partial q_j} \dot{q}_0, M_a = [\frac{\partial M}{\partial q_1} \dot{q}_0 \ \frac{\partial M}{\partial q_2} \dot{q}_0 \dots \frac{\partial M}{\partial q_{6+2n}} \dot{q}_0]_{q=q_0}, M_{vv} q_1 = \sum_{j=1}^{6+2n} \sum_{k=1}^{6+2n} \frac{\partial^2 M}{\partial q_j \partial q_k} \dot{q}_0, M'_{vv} q_1 = \dot{q}_0^T \sum_{k=1}^{6+2n} \frac{\partial^2 M}{\partial q \partial q_k} q_{1k} \dot{q}_0, F_1 = [F_{x1} \ F_{y1} \ M_{11} \ M_{21} \dots M_{81}]^T, Q_a = [0 \dots 0 \ F_{a2}^T \ F_{a3}^T]^T$ 이다. 특히 Q_a 는 외란항으로서 로봇의 운동시 발생하는 관성력에 해당한다.

4. 처방된 안정도를 갖는 LQR 설계

로봇운동시 지속적으로 변화하며 작용하는 외란은 계획계획에 따라 결정되는 영차 섭동의 시간함수이므로 일단 feedforward 제어로 최대한 상쇄하고 그래도 잔류하는 외란은 귀환 제어에 의하여 그 효과를 억제한다.

이를 위하여 탄성운동과 강체 섭동운동을 지배하는 식 (8)의 제어 입력을 $F_1 = F_{1f} + F_{1b}$ 로 분리하고 feedforward 입력 $F_{1f} = -E_0^+ Q_a$ 로 설계한다. 여기서 $E_0^+ = (E_0^T E_0)^{-1} E_0^T$ 는 비정방 행렬 E_0 의 pseudoinverse를 의미한다.

페루프 귀환 제어 설계를 위하여, 우선 상태변수 $x = [q_1^T \ \dot{q}_1^T]^T$, 제어입력 $u = F_{1b}$, 그리고 외란 $d =$

Q_d 를 정의하여 식 (8)을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)E_0(t)u(t) + B(t)D(t)d(t) \quad (9)$$

여기서 $A(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_0^{-1}(M_a + M_{vv} - M_{vv}'/2 + K - F_0^*) \\ I \\ -M_0^{-1}(M_v + M' - M_d^*) \end{bmatrix}$, $B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M_0^{-1} \end{bmatrix}$ 이며 $D(t) = I - E_0E_0^T$ 는 액츄에이터 수가 전체 운동 자유도 수와 같지 않는 한 영이 아닌 행렬로서, 일반적으로 feedforward 제어만으로는 외란의 완전 제거가 불가능함을 시사한다.

식 (9)를 다시 주기가 T_s 인 샘플링과 영차 홀드를 거쳐 시간 이산화하면 다음 식과 같이 된다.

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k E_{0k} u_k + \Gamma_k D_k d_k, \quad k=0, 1, \dots \quad (10)$$

여기서 하첨자 k 는 k 번째 샘플링 순간을 의미하며 $\Phi_k = \exp A_k T_s$, $\Gamma_k = (\exp A_k T_s - I) A_k^{-1} B_k$ 이다.

비교적 넓은 저주파수 대역을 갖는 외란에 대한 성능 강인성을 확보하기 위한 방안으로, 관측기에 의해 모든 상태변수를 알 수 있다는 가정하에 큰 이득의 상태 귀환 제어가 바람직하다.

이를 위하여 항상 안정성이 보장되는 표준 LQR 제어기를 시도해 볼 수 있지만 문헌⁽⁸⁾에서도 알 수 있듯이 허수축에 가까운 영점이 있는 경우, 상태 가중치 함수를 증가시켜 우세 극점을 포함한 페루프 극점을 s평면의 좌반면 깊숙히 위치시키는 데에는 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 형태의 처방된 상태 안정도를 보장하는 LQR문제를 제안하고 이차 성능지수 J 를 최소화하는 제어이득을 구한다.

$$J = x_N^T P_N x_N + \sum_{k=0}^{N-1} e^{2\alpha k} (x_k^T Q_k x_k + u_k^T R_k u_k) \quad (11)$$

여기서, P_N , Q_k , R_k 은 가중치 행렬, α 는 안정도의 크기를 지정하는 음이 아닌 상수이다.

이 경우, 외란항을 일시 무시할 때 $\hat{x}_k = e^{ak} x_k$, $\hat{u}_k = e^{ak} u_k$, $\hat{P}_N = e^{-2\alpha N} P_N$ 과 같은 변환을 행하면 식 (10), (11)은 각각 식 (12), (13)과 같이 되어

$$\hat{x}_{k+1} = e^{\alpha} (\Phi_k \hat{x}_k + \Gamma_k E_{0k} \hat{u}_k) \quad (12)$$

$$J = \hat{x}_N^T \hat{P}_N \hat{x}_N + \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{x}_k^T Q_k \hat{x}_k + \hat{u}_k^T R_k \hat{u}_k) \quad (13)$$

시스템 행렬과 입력 행렬이 각각 $e^{\alpha} \Phi_k$, $e^{\alpha} \Gamma_k E_{0k}$ 이

며 표준형의 성능지수를 갖는 전형적 이산시간 LQR 문제로 귀착된다.

그러므로 일반적 차분 Riccati방정식⁽⁹⁾을 풀어 $\hat{u}_k = G_k \hat{x}_k$ 인 제어이득 G_k 를 구할 수 있다. N 이 무한대인 경우는 LQR특성에 따라 보장된 안정성으로 인하여 $e^{\alpha} (\Phi_k + \Gamma_k E_{0k} G_k)$ 의 모든 극점은 z평면상의 단위원내에 존재한다.

따라서 본 논문의 경우와 같이 N 이 유한한 경우 귀환 제어 입력은 $u_k = G_k x_k$ 이 되고 식 (10)으로 부터 페루프 상태 방정식은 다음과 같이 되어

$$x_{k+1} = (\Phi_k + \Gamma_k E_{0k} G_k) x_k + \Gamma_k D_k d_k \quad (14)$$

변환전 원래 시스템의 페루프 시스템 행렬 $\Phi_k + \Gamma_k E_{0k} G_k$ 의 극점은 반경이 $e^{-\alpha}$ 인 원의 내부 혹은 근처에 존재하리라는 것을 예측할 수 있다.

참고로, 이 때 외란으로부터 상태변수까지의 전달함수행렬 관계는 다음과 같다.

$$x_k(z) = [zI - (\Phi_k + \Gamma_k E_{0k} G_k)]^{-1} \Gamma_k D_k d_k(z) \quad (15)$$

2. ML 상태 관측기 설계

상태관측을 위하여, 관성좌표에 관한 로봇 platform의 병진 변위를 감지하기 위한 비디오 카메라 한쌍과 회전속도를 감지하기 위한 레이트 자이로 1개, 그리고 산업용 로봇에서와 같이 각 관절에 로타리 인코더 1개씩 등 강체 운동 감지용 센서가 설치되어 있으며, 탄성운동을 감지하기 위하여 스트레인 게이지와 압전 세라믹 센서 몇 개가 로봇 팔에 분포 설치되었다고 가정한다.

이 경우 각 센서의 신호와 그의 미분 혹은 적분 신호를 구하여 결합한 후 섭동이론에 의거, 영차와 일차로 일반좌표량을 분리하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻는다⁽¹⁰⁾.

$$y_w(t) = C_m x(t) + y_o(t) \quad (16)$$

위 식에서 C_m 은 출력행렬이며, $y_o(t)$ 는 궤적 계획에 따라 알려진 영차 항이므로 $y_w(t)$ 와 그 차이를 출력 $y(t)$ 로 재 정의한 후 시간 이산화하면 다음과 같은 선형 출력방정식을 얻는다.

$$y_k = C_m x_k \quad (17)$$

상태변수를 관측하는 방법을 논의하면, 우선적으로 선형 일차 섭동 방정식과 식 (17)을 근거로 한 Luenberger 관측기나 최적개념의 칼만 필터 등 선형 관측기를 생각할 수 있다.

그러나 LQ제어기의 안정성이 충분하다고 하여도

관측기의 성능에 따라 전체 보상기의 안정도가 저하될 수 있으므로⁽¹¹⁾, 본 논문에서와 같이 비선형 시스템을 선형화 하여 구한 시스템 방정식에 근거를 두는 방식의 LQG제어등은 그 안정성과 성능을 보장할 수 없다.

따라서 확정 칼만 필터와 같은 비선형 제어기를 대안으로 적용할 수 있지만, 본 논문에서는 측정잡음 강도의 역수를 가중치로 하여 최소자승 관측오차가 되도록 유도한 다음과 같은 식에 의하여 로봇의 센서 출력으로부터 상태변수를 추정할 수 있는 ML 관측기⁽¹²⁾를 사용하고자 한다.

$$\hat{x}_k = (C_m^T R^{-1} C_m)^{-1} C_m^T R^{-1} y_k \quad (18)$$

여기서 R 은 측정 잡음의 강도를 나타내는 행렬이다.

한편 측정 잡음이 평균이 영인 정규분포를 이루는 경우, ML관측기의 성능을 예측하기 위하여 위 식으로부터 관측상태의 평균을 구해보면 실제 상태의 평균과 일치하며 공분산을 구해보면 다음 식과 같음을 알 수 있다.

$$E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] = (C_m^T R^{-1} C_m)^{-1} \quad (19)$$

따라서, ML 관측기는 bias되지 않으며 그의 성능을 향상시키기 위하여는 출력이득 대 측정잡음 즉, 신호 대 잡음비를 크게 하여야 함을 알 수 있다.

특히 센서수가 충분해서 정방시스템의 되는 경우, C_m 은 비특이 행렬이 되므로 식 (18)은 다음과 같아진다.

$$\hat{x}_k = C_m^{-1} y_k \quad (20)$$

이 경우, 상태변수는 단순히 미리 기억시킨 출력 역행렬과 센서의 일차섭동 신호를 곱하여 관측될 수 있다.

6. 수치 시뮬레이션 및 토의

Fig. 1의 우주로봇에 대하여 각부의 제원이 다음과 같은 경우를 가정한다.

$$\begin{aligned} L_1 &= 1m, \quad d_1 = 0.5m, \quad L_2 = L_3 = 5m, \\ L_4 &= 1.66m, \quad EI_2 = EI_3 = 122.28Nm^2 \\ m_1 &= 10kg, \quad m_2 = m_3 = 1kg, \quad m_4 = 0.1kg, \\ J_1 &= 20kgm^2, \quad J_4 = 3kgm^2 \end{aligned}$$

각 팔의 탄성변위의 공간 이산화에 사용된 준 비교함수로는 $n=5$ 로 정하여, 다음과 같은 함수형태인 2개의 고정-자유단, 3개의 고정-고정단 균일보의 고유함수를 조합 사용하였다.

Table 1 Coefficients of the shape functions

i	λ_i	σ_i
1	1.8751	0.7341
2	4.6941	1.0185
3	4.7300	0.9825
4	7.8532	1.0008
5	10.9956	1.0000

$$\phi_i = \frac{1}{\sqrt{L}} [\cosh \lambda_i x / L - \cos \lambda_i x / L - \sigma_i (\sinh \lambda_i x / L - \sin \lambda_i x / L)], \quad i=1, 2, \dots, 5$$

여기서 상수 λ_i 와 σ_i 의 값은 Table 1과 같다.

초기 및 최종 gripper 위치는 각각 Cartesian 관성 좌표계상의 (9.757 m, 1.914 m, 0 rad)과 (5.000 m, 1.914 m, $\pi/2$ rad)이며 그 사이는 직선경로로 계획하였고, 요구 가속도 패턴은 병진과 회전시 공히 지나친 진동의 발생을 막기 위하여 매끄러운 한 주기의 정현 곡선으로 설정하였다. 한편, 궤적 계획 시 로봇의 총 잉여 자유도 3개중 platform의 2개 추력기는 제한된 에너지의 절약을 위하여 사용하지 않고 토크기는 platform의 수평자세 유지에 사용되었다.

가반중량 이송 소요시간은 2.5초이며 그 이후의 진동까지도 억제하기 위하여 제어를 4초까지 지속한다. 이 때 주목할 것은 2.5초이후의 로봇 시스템은 시불변 계이므로 그 이후는 제어이득으로 일정한 값을 사용할 수 있다. 그 정상상태 값은 이산시간 샘플링 주기 T_s 가 0.01초일 때 $N=350$ 으로 충분히 크게 하여 역 시간으로 Riccati 방정식을 풀어, $N=250$ 인 이송 완료 시점에서의 이득으로 구하였다.

성능지수에 사용된 가중치 행렬 P_N , Q_k , R_k 은 각각 $10I_{32}$, $10I_{32}$, I_{10} 이다. 안정도 상수 α 가 0.1인 경우, 이송 종료 순간에 구한 페루프 극점의 위치는, 제어되기 전 6개의 강체 모드를 포함하여 모두 단위 원주상에 존재하던 극점들이 내부로 이동하여 Fig. 2에서 알 수 있듯이 $e^{-0.1}$ 보다 작은 0.827의 반경내에 존재함을 확인할 수 있었다.

따라서 제어기의 이득이 그 만큼 커지고 페루프 시스템의 응답이 빨라지며 또한 식 (15)로부터 차단주파수까지의 외란에 대한 민감도가 작아질 것임을 알 수 있다.

모든 상태변수를 알 수 있다는 가정하에, 섭동이 귀환제어되지 않은 경우 ($u_k=0$)와 귀환 제어된 경우 ($u_k=G_k x_k$)의 로봇 gripper의 위치오차 추이와, 0

초, 1초, 1.5초, 2.5초 순간에 포착된 로봇의 자세를 각각 Fig. 3과 4에 도시하였는데, 귀환제어의 효과가 뚜렷이 보인다. 한편, Fig. 3b와 4b에서 점선과 실선은 각각 계획과 실제의 거동을 나타낸다.

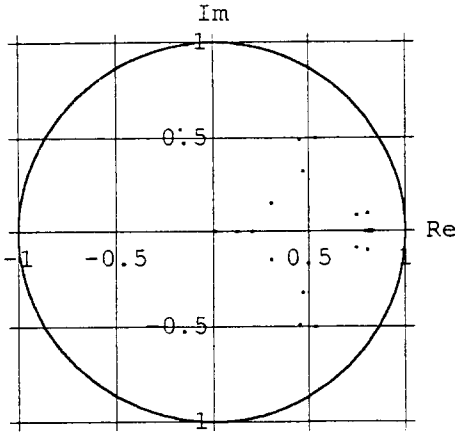


Fig. 2 Discrete-time closed-loop poles

한편, α 를 1로 증가시켰을 때 페루프 극점들은 모든 반경 0.566이내의 원내부에 존재하였고 gripper의 궤적 추적오차는 더욱 감소하였다. 그러나, 비록 충분히 빠르고 큰 출력을 갖는 구동기를 사용하더라도 α 를 무제한 증가시킬 수는 없다. 왜냐하면 어느 이상 시스템의 대역폭이 증가하면, 고주파 대역에서의 측정잡음의 영향이나 모델의 불확실성으로 인하여 섭동 이론에 근거하여 설계된 선형 관측기나 LQ 제어기의 성능을 보장할 수 없기 때문이다.

이러한 경우는 위의 LQR제어기를 칼만 필터와 함께 사용한 LQG 보상기에서 실제로 나타났다. 즉 현재의 로봇운동속도에서 이송 도중 위치오차는 발산하여 버렸다.

따라서 선형 섭동 방정식 대신 원래의 로봇 방정식과 상태변수 수 만큼의 센서신호로 이루어진 출력 방정식에 근거한 ML관측기를 사용한 결과, 잡음강도가 $10^{-6} I_{32}$ 이고 출력행렬이 $10^4 C_m$ 인 경우, Fig. 5와

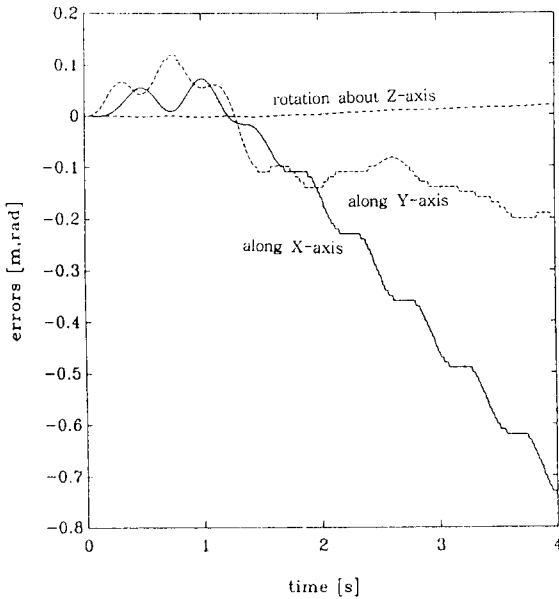


Fig. 3a Gripper position errors under no feedback control

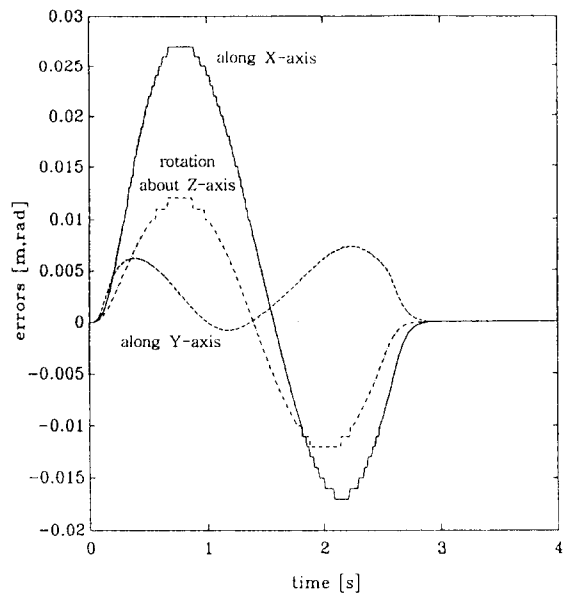


Fig. 4a Gripper position errors under state feedback control

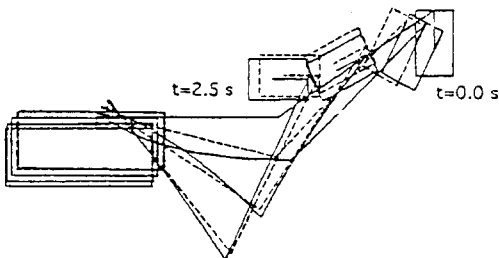


Fig. 3b Maneuver under no feedback control

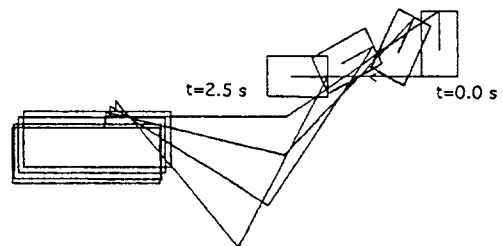


Fig. 4b Maneuver under state feedback control

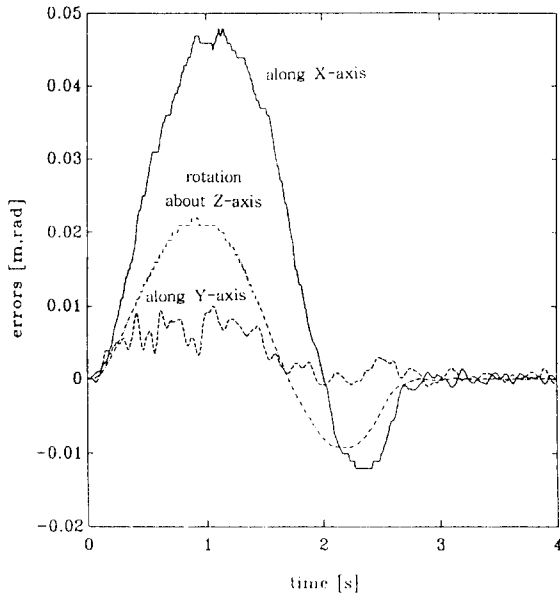


Fig. 5a Gripper position errors under output feedback control via MLE

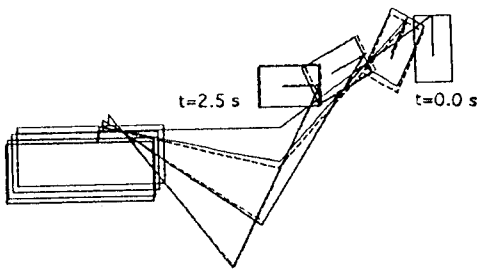


Fig. 5b Maneuver under output feedback control via MLE

같은 결과를 얻었다.

위에서 가정한 신호대 잡음을 얻기 위하여는 고감도 센서와, 필터링과 증폭을 포함한 고성능 신호조화 장치가 필요하다. 한편 출력행렬이 $10^6 C_m$ 인 경우는 상태변수의 관측이 오차없이 정확하게 이루어져 그 응답이 거의 Fig. 4와 같았다.

7. 결 론

우주 로봇의 운동방정식은 고차 비선형 계가 되며, 섭동 이론으로 그러한 계를 순수 강체 운동을 지배하는 영차 방정식과 탄성 및 작은 강체 섭동 운동을 지배하는 일차 방정식으로 분리시킬 수 있다.

영차 방정식은 gripper의 궤적이 일단 계획되면 역동력학으로 부터 개루프 제어 입력 설계에 적용하며, 지속적으로 변화하는 외란을 포함하는 일차 방

정식은 feedforward 제어에 의하여 최대한 외란을 상쇄시킨 후, 처방된 안정도를 보장하는 변형된 이산시간 LQR제어에 의하여 큰 제어이득을 얻어 잔류 외란의 성능저하 효과를 억제시키는 데 이용될 수 있다.

한편, 충분한 개수의 고감도 센서와 신호조화 장치가 가용하다면 ML관측기를 이용하여 상태변수를 간단히 그러나 정확하게 추정할 수 있다.

이와 같이 제안된 제어기법은 비교적 고속운전 (gripper의 평균 신속도= $1.9m/s$, 평균 각 속도= $36^\circ/s$)의 경우에도 계획된 궤적을 따라 가반중량을 정밀하게 이송시키는 데 효과적이다.

참 고 문 헌

- (1) Book, W. J., Maizza-Neto, A. and Whitney, D. E., 1975, "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 97, Dec. pp. 424~431.
- (2) Kozel, D. and Koivo, A. J., 1991, "A General Force/Torque Relationship and Kinematic Representation for Flexible Link Manipulators," J. of Robotic Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 531~556.
- (3) Nenchev, D., Umetani, Y. and Yoshida, K., 1992, "Analysis of a Redundant Free-Flying Spacecraft/Manipulator System," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 1, pp. 1~6.
- (4) Umetani, Y. and Yoshida, K., 1987, "Continuous Path Control of Space Manipulators Mounted on OMV," Acta Astronautica, Vol. 15, No. 15, pp. 981~986.
- (5) Usoro, P. B., Nadira, R. and Mahil, S. S., 1984, "Control of Lightweight Flexible Manipulators: A Feasibility Study," Proceed. of the American Control Conference, Vol. 3, pp. 1209~1216, San Diego, CA.
- (6) Meirovitch, L. and Quinn, R. D., 1987, "Equations of Motion for Maneuvering Flexible Spacecraft," J. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 10, No. 5, pp. 453~465.
- (7) Meirovitch, L. and Kwak, M. K., 1990, "Convergence of the Classical Rayleigh-Ritz Method and the Finite Element Method," AIAA Journal, Vol. 28, No. 8, pp. 1509~1516.

- (8) Kwakernaak, H. and Sivan, R., 1972, Linear Optimal Control Systems, Wiley-Interscience.
- (9) Kuo, B. C., 1977, Digital Control Systems, SRL Publishing Co., Champaign, IL.
- (10) Lim, S., 1992, Position and Vibration Control of Flexible Space Robots, PhD Dissertation, VPI & SU.
- (11) Doyle, J. C. and Stein, G., August, 1978, "Robustness with Observers," IEEE Transactions on Automatic Control.
- (12) Melsa, J. L. and Cohn, D. L., 1979, Decision and Estimation Theory, McGraw-Hill, New York.