

고속 직교 머니플레이터의 진동 감소를 위한 Two-time scale 제어기 설계

강봉수[#]

Two-time Scale Controller Design for Vibration Reduction of a High Speed Cartesian Manipulator

Bong Soo Kang[#]

ABSTRACT

This paper presents a two-time scale approach for vibration reduction of a high speed Cartesian manipulator. High speed manipulators would be subject to mechanical vibration due to high inertia forces acting on linkages. To achieve high throughput capability, such motion induced vibration would have to be damped quickly, to reduce settling time of the manipulator end-effector. This paper develops a two-time scale model for a structurally-flexible Cartesian manipulator. Based on the two-time scale model, a composite controller consisting of a computed torque method for the slow time-scale rigid body subsystem, and a linear quadratic state-feedback regulator for the fast time-scale flexible subsystem, is designed. Simulation results show that the proposed two time-scale controller yields good performance in attenuating structural vibration arising due to excitation from inertial forces.

Key Words : Two-time scale model (두 시간 영역 모델), Cartesian manipulator(직교 머니플레이터), Composite controller(복합 제어기), Vibration reduction(진동 감소)

1. 서론

로봇은 많은 산업현장에서 제품의 조립 및 검사를 담당하는 필수적인 기계로서, 특히 조립할 대상의 부품 밀도가 높고 빠른 작업속도를 요구하는 전자 산업에 있어서, 고속 및 고정밀을 갖는 로봇의 중요성은 날로 커지고 있다. X-Y 테이블 혹은 갠트리(gantry) 로봇과 같은 직교형 로봇(Cartesian robot)이 소형 전자 부품의 조립을 위한 머니플레이터 혹은 시편을 검사하는 스캐닝 (scanning)장비

의 이송기구로서 현재 많이 사용되고 있다. 직교형 로봇은 직진형 구동장치를 연속적으로 적층한 형태로 각 직선운동의 축을 독립적으로 구동함으로써 동역학 해석 및 위치 제어가 용이한 장점이 있다. 더욱이 링크간에 질량 균형이 이루어지도록 설계하면 운동전후에 구동링크의 관성변화가 비직교형 로봇에 비하여 훨씬 줄어들게 된다. 그러나 직선 링크와 회전모터를 포함하는 한 방향의 구동시스템은 하단에 위치한 다른 방향의 구동시스템의 구동모터에 부하로 작용하게 된다. 따라서

^{*} 접수일: 2003년 7월 29일; 게재승인일: 2004년 4월 9일

[#] 교신저자: 한남대학교 기계공학과

E-mail bskang@hannam.ac.kr Tel. (042) 629-7983

하단부로 갈수록 상단부에 위치한 모든 링크와 구동모터의 무게가 부하로 작용하므로 더욱 큰 용량의 구동모터가 필요하다.

조립 혹은 검사작업에 필요한 시간을 단축하기 위하여 산업계에서는 고속의 머니플레이터를 요구하고 있으며, 이는 머니플레이터를 구성하는 링크의 경량화로 이어져서 높은 감/가속 시 링크의 진동이 발생할 수 있다. 이러한 링크의 진동을 줄이기 위하여 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 압전소자(piezoelectric material)를 이용하여 링크의 탄성변형을 상쇄시키는 방법은^{1,2} 대표적인 능동형 진동 제어방법으로 많이 연구되고 있지만 압전소자와 이를 구동하기 위한 구동장치를 장착해야 하는 단점이 있다. two-time scale 방법은 제어 대상체의 동역학 특성을 강체 운동과 유연체 운동으로 나누어서 모델링하고 각각의 운동에 맞는 제어를 분리하여 설계한다. Siciliano 와 Book³에 의해서 처음으로 고안되어 두개의 유연 링크와 회전 조인트(revolute joint)를 가진 비직교형 로봇의 위치제어에 적용되었으며⁴, 비직교형 로봇의 끝단이 외부 환경과 접하여 제한적인 운동을 할 경우에도 two-time scale 모델에 근거한 복합제어기(composite controller)를 설계하여 힘제어가 가능하다.^{5,6}

본 연구에서는 링크의 컴플라이언스(compliance)가 공간좌표 위치 오차에 직접적으로 영향을 미치는 직교형 머니플레이터에 대해서 two-time scale 모델링을 수행하여 링크의 강체운동과 유연체 운동을 분리한다. 그리고 제시된 two-time scale 모델을 이용하여 높은 관성력에 의해서 발생된 링크진동을 억제하면서 주어진 궤적을 정확히 추종할 수 있는 복합제어기를 설계한다. 복합제어기는 머니플레이터 강체운동에 해당하는 slow time-scale 모델을 제어하기 위한 구동력 제어법(computed torque method)과, 링크의 유연체 운동에 해당하는 fast time-scale 모델을 제어하기 위한 선형 2 차 상태 피드백 조정기(linear quadratic state-feedback regulator)로 구성된다. 전산모의 실험을 통해서 two-time scale 복합 제어기가 머니플레이터의 감/가속으로 인한 유연한 링크의 진동을 효율적으로 감쇠 시킴을 보여준다. 따라서 제품의 조립 혹은 검사를 위하여 머니플레이터가 고속이동 시 발생한 진동을 빨리 감쇠 시킴으로써 로봇 말단장치(end-effector)의 정착시간(settling time)을 단축할 수 있다.

2 장에서는 유연한 링크를 가진 직교형 머니플

레이터의 two-time scale 모델링을 제시하고 있으며, 3 장에서는 two-time scale 모델에 근거한 복합 제어기를 설계하였다. 4 장은 전산모의 실험의 과정 및 결과를 보여주고 있으며 마지막으로 결론은 5 장에 제시된다.

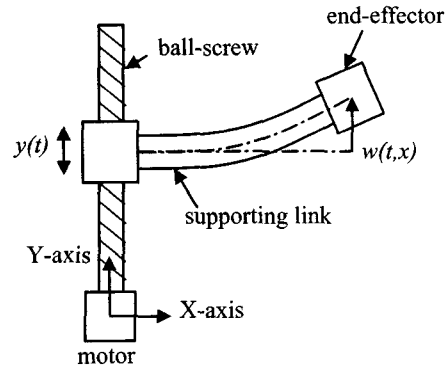


Fig. 1 Configuration of a Cartesian manipulator with a structurally-flexible linkage

2. 직교형 머니플레이터의 모델링

전자회로기판에 부품을 삽입하거나 표면을 검사하는 장치로 많이 사용되는 갠트리 로봇 혹은 표면 실장 기술(surface mount technology) 장비의 개략적인 모델은 Fig. 1 과 같다. Y 축 방향으로의 직선 운동은 전기 서보 모터(servo motor)에 연결된 볼-스크류(ball-screw) 기구에 의해서 이루어지며 X 축 방향으로의 직선운동도 역시 동일한 방식으로 이루어진다. 말단장치에는 X 축 구동에 필요한 장치에 덧붙여서 Z 축(지면에서 나오는 방향) 링크부와 이에 부착된 레이저 용접기(LASER welder), 스캐닝 프로브(scanning probe) 등 작업공구가 포함된다.

비교적 큰 감/가속이 일어나는 Y 축 방향의 운동만을 고려하고, 이로 인한 지지 링크(supporting link)의 탄성변형과 진동을 예측하기 위하여 길이가 l 인 지지 링크를 Euler-Bernoulli beam 으로 가정하였다. 작업 공구들을 포함한 말단장치는 Fig. 1 에서 보여지듯 지지 링크의 끝단에 점질량의 형태로 작용하며, 지지 링크의 Y 축 방향으로의 변위(displacement)를 $y(t)$ 라고 정의한다. 지지링크

의 변형(deformation)이 일어나지 않았을 때 지지 링크의 중심선 즉 $y(t)$ 에 수직한 기준선은 X 축과 평행하다. 이 기준선에 대해서 지지링크의 상대적인 변형값을 $w(x,t)$ 라고 한다면, assumed modes 방법을⁷ 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다;

$$w(t,x) = \sum_{i=1}^r \eta(t)_i \psi_i(x) \quad i=1,2,\dots,r \quad (1)$$

여기서 시간의 함수 $\eta(t)$ 는 머니플레이터의 동역학식을 유도하기 위해서 도입되는 일반 좌표계(generalized coordinate)에 포함되는 링크의 변형값이다. $\psi(x)$ 는 링크의 위치에 따른 변형형태를 표현하는 형상함수로서 링크의 경계조건(boundary condition)에 부합되도록 선정해야 한다. 아래첨자 i 는 i 번째 진동 모드를 나타내며, r 은 유연한 링크의 모델링에 사용되는 모드 수(number of modes)로서, 모드 수가 많을수록 변형을 정확하게 예측할 수 있으나 계산량이 많아지게 된다. Fig. 1에 나타난 지지 링크의 경계조건은 clamped-free 조건에 해당하므로, 이에 맞는 다음의 형상함수를 모델링에 사용하였다.

$$\psi_i(\xi) = \frac{1}{N_2} \{ \sin(\beta_i \xi) - \sinh(\beta_i \xi) - N_1 [\cos(\beta_i \xi) - \cosh(\beta_i \xi)] \} \quad (2)$$

여기서: $\xi = x/l$, $\beta_i(\xi) \cong (i-1/2)\pi$

$$N_1 = \frac{\sin(\beta_i) + \sinh(\beta_i)}{\cos(\beta_i) + \cosh(\beta_i)}$$

$$N_2 = \sin(\beta_i) - \sinh(\beta_i) - N_1 [\cos(\beta_i) + \cosh(\beta_i)]$$

작업공구를 포함하는 말단장치의 전체 질량을 m_e 라 하고, 지지 링크의 단면적과 밀도는 각각 A 와 ρ 로 정의한다. 지지 링크와 말단장치를 포함하는 전체 시스템의 운동에너지(kinetic energy)는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A (\dot{y} + \dot{w}(x))^2 dx + \frac{1}{2} m_e (\dot{y} + \dot{w}(l))^2 \quad (3)$$

중력의 방향이 Fig. 1에서 지면으로 들어가는 방향이면 머니플레이터의 움직임은 중력과 관계가 없으므로, 시스템의 위치에너지(potential energy)는 지지 링크의 탄성변형에 의한 에너지로만 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (4)$$

여기서 E, I 는 지지 링크의 탄성 변형률(elastic modulus)과 면적 관성 모멘트(area moment of inertia)를 각각 나타낸다. 주어진 시스템에 대해서 다음의 라그랑지안 방법(Lagrangian method)을 적용하면,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = f_i \quad (5)$$

여기서 $L := T - U$, q : 일반 좌표계,

f : 일반 좌표계에 작용하는 일반힘

유연한 링크를 가진 직교형 머니플레이터의 운동 방정식은 벡터-행렬 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^T & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{K}\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ \mathbf{0}_{(r \times 1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\eta := [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_r] \in \mathcal{R}^r$

$$M_{11} = m_e + \rho A l$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} m_e + \int_0^l \rho A \psi_1 dx & \dots & m_e + \int_0^l \rho A \psi_r dx \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{1 \times r}$$

$$M_{22} = \begin{bmatrix} m_e + \int_0^l \rho A \psi_1^2 dx & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & m_e + \int_0^l \rho A \psi_r^2 dx \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{r \times r}$$

$$\mathbf{K} = EI \begin{bmatrix} \int_0^l \rho A (\psi_1'')^2 dx & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \int_0^l \rho A (\psi_r'')^2 dx \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{r \times r}$$

\mathbf{u} 는 볼-스크류 기구에 작용하는 구동력으로 제어기의 출력에 해당된다. 관성행렬(mass matrix), \mathbf{M}_{11} , \mathbf{M}_{12} , \mathbf{M}_{22} , 그리고 강성행렬(stiffness matrix), \mathbf{K} , 모두 형상함수 혹은 그 미분을 포함하며 일반좌표, $\mathbf{y}(t)$,와는 무관하다.

관성행렬은 정칙(invertible)이므로 그 역행렬, \mathbf{H} , 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{H} := \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{H}_{12} \in \mathbb{R}^{1 \times r}$, $\mathbf{H}_{21} \in \mathbb{R}^{r \times 1}$, $\mathbf{H}_{22} \in \mathbb{R}^{r \times r}$

식(7)을 이용하여 식(6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{H}_{11}\mathbf{u} - \mathbf{H}_{12}\mathbf{K}\boldsymbol{\eta} \quad (8)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{H}_{21}\mathbf{u} - \mathbf{H}_{22}\mathbf{K}\boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

two-time scale 모델링을 위하여 탄성력(elastic force)에 해당하는 새로운 변수, \mathbf{z} ,와 $\tilde{\mathbf{K}}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{z} := \mathbf{K}\boldsymbol{\eta}, \quad \tilde{\mathbf{K}} := \mu\mathbf{K} \quad (10)$$

여기서 μ 는 강성행렬, \mathbf{K} , 의 주대각 원소에서 가장 작은 값의 역수이다. 식(10)에서 정의된 변수를 이용하여 식(9)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\mu\tilde{\mathbf{K}}^{-1}\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}_{21}\mathbf{u} - \mathbf{H}_{22}\mathbf{z} \quad (11)$$

μ 가 영의 값으로 접근하면 강성행렬이 무한대로 커지며 동역학 시스템은 강체운동만을 하게 된다. singular perturbation 방법에³ 의해서 μ 가 작은 영역에서는 유연체 운동을 강체 운동으로부터 분리할 수 있다. 즉 μ 가 0 이라고 가정하면 식(11)로

부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\mathbf{z}_s = \mathbf{H}_{22,s}^{-1}\mathbf{H}_{21,s}\mathbf{u}_s \quad (12)$$

여기서 아래첨자 s 는 해당변수가 slow time-scale 에서 계산되었다는 것을 나타낸다. 식(12)을 식(8)에 대입하면 강체운동을 묘사하는 slow time-scale 에서의 머니플레이터의 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{y}}_s &= (\mathbf{H}_{11,s} - \mathbf{H}_{12,s}\mathbf{H}_{22,s}^{-1}\mathbf{H}_{21,s})\mathbf{u}_s \\ &= \mathbf{M}_{11,s}^{-1}\mathbf{u}_s \end{aligned} \quad (13)$$

다음으로 fast time-scale 에서의 동역학식을 유도하기 위해서 다음의 변수를 정의한다.

$$\mathbf{z}_f := \mathbf{z} - \mathbf{z}_s, \quad \mathbf{u}_f := \mathbf{u} - \mathbf{u}_s \quad (14)$$

식(14)에서 정의된 상태변수를 식(11)에 대입하면,

$$\frac{d^2\mathbf{z}_f}{d\tau^2} = \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{H}_{22,s}\mathbf{z}_f + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{H}_{21,s}\mathbf{u}_f \quad (15)$$

여기서 $\tau := t / \sqrt{\mu}$ 로서 fast time-scale 을 나타내며, 식(15)는 강체운동에서 분리된 유연체 운동 즉 fast time-scale 모델을 묘사하는 미분방정식이다.

3. 복합제어기 설계

two-time scale 방법을 통해서 머니플레이터의 동역학을 강체모델과 유연체 모델로 나눈 후에는 각 모델에 맞는 제어기를 분리하여 설계할 수 있다. 먼저 식(13)으로 표현되는 slow time-scale 에서 설계되는 제어기의 목적은 머니플레이터의 말단장치가 주어진 기준 궤적을 추종하도록 하는 것이며, 식(15)로 표현되는 fast time-scale 에서 설계되는 제어기의 목적은 머니플레이터 링크의 진동을 빠른 시간 안에 감쇠시키는 것이다.

머니플레이터의 강체운동에 해당하는 slow time-scale 에서 주어진 궤적을 정확히 추정하기 위해서 다음의 구동력 계산법(computed torque method)을

이용하였다.

$$u_s = \hat{M}_{11,s} [\ddot{y}_d + k_v(\dot{y}_d - \dot{y}_s) + k_p(y_d - y_s)] \quad (16)$$

여기서 $\hat{M}_{11,s}$ 은 관성행렬, $M_{11,s}$, 의 추정값 (estimated value)이며 $\ddot{y}_d, \dot{y}_d, y_d$ 은 각각 주어진 기준 궤적의 가속도, 속도, 위치 함수를 나타낸다. k_p, k_v 는 피드백 제어기의 비례 이득(proportional gain), 미분 이득(derivative gain)을 각각 나타낸다. 식(16)으로 표현되는 제어기의 출력이 식(13)으로 표현되는 slow time-scale 시스템에 가해지면 시스템의 특성방정식은 다음과 같다.

$$(\ddot{y}_d - \ddot{y}_s) + k_v(\dot{y}_d - \dot{y}_s) + k_p(y_d - y_s) = (\hat{M}_{11,s}^{-1} M_{11,s} - 1)\ddot{y}_s \quad (17)$$

따라서 관성행렬의 추정값과 실제값과 정확히 일치하고 외부 외란(disturbance) 이 없을 경우 식(17)은 양의 피드백 이득값에 의해서 안정화된다.⁸

머니플레이터 링크의 유연체 운동을 나타내는 fast time-scale 에서 다음의 상태변수를 정의하면,

$$x_f = \left[\frac{dz_f}{d\tau} \quad z_f \right]^T \in \mathbb{R}^{2r} \quad (18)$$

식(15)는 다음의 상태공간(state space) 방정식으로 변환된다.

$$\dot{x}_f = Ax_f + Bu_f \quad (19)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{(r \times r)} & I_{(r \times r)} \\ -\tilde{K}H_{22,s} & 0_{(r \times r)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2r \times 2r}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{(r \times 1)} \\ -\tilde{K}H_{21,s} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2r \times 1}$$

Table 1 Specification of the manipulator

	Parameter	value
Supporting	length (<i>l</i>)	0.25 m

Link	cross-section	0.03 * 0.01 m
	stiffness (<i>El</i>)	182.5 Nm ²
	density (ρ)	2770 kg/m ³

End-effector	mass (<i>m_e</i>)	2 kg
--------------	-------------------------------	------

$$u_f = -k_f x_f \quad (20)$$

식(19)로 표현되는 fast time-scale 시스템은 제어기의 출력, u_f , 이 없는 개회로(open loop) 상태에서는 허수축에 $2r$ 개의 복소수 극점을 가지고 있으므로 감쇠비가 0 이다. 따라서 시스템에 감쇠를 주어 링크의 진동을 억제하기 위해서는 링크의 변형에 해당하는 상태변수를 피드백하여 폐회로(closed loop) 구조를 이루고 상태변수들을 조정(regulation)해야 한다. 이때 제어기의 피드백 게인, $k_f \in \mathbb{R}^{2r}$, 은 극점 배치(pole placement) 혹은 최적 제어(optimal control) 기법을 이용해서 원하는 제어성능을 가지도록 선정할 수 있다.

최종적으로 복합제어기의 출력은 slow time-scale 제어기의 출력, 식(16),과 fast time-scale 제어기의 출력, 식(20),의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$u = u_s + u_f \quad (21)$$

4. 전산 모의 실험

two-time scale 제어기에 의한 직교형 머니플레이터의 진동 감쇠 특성을 관찰하기 위하여 전산 모의 실험을 수행하였다. Fig. 1 에 보여진 개방형 직교형 머니플레이터의 사양은 Table 1 에 주어진다. Y 방향으로 움직이는 지지링크의 한 쪽 끝단과 볼스크류 사이에 마찰이 없다고 가정하였으며, 지지링크의 재질은 알루미늄 합금으로 가정하여 계산하였다. 관성력에 의한 링크의 진동을 충분히 관측하기 위하여 기준 궤적(reference trajectory)은 Fig. 2 와 같이 일정한 가속/감속 구간을 가지도록 하였다. 직교형 머니플레이터의 주된 응용분야가 전자 부품의 조립 및 검사임을 고려하여, 말단장치가 0.1 초 내에 10 cm 의 직선구간을 이동하도록 하였다. 이 경우 Fig. 2 와 같이 기준 궤적의 최대 가

속도는 40 m/s² 이며, 출발 시(t=0), 감속 시(t=0.05), 정지 시(t=0.1) 가속도의 불연속이 존재한다. 그리고 가속도 불연속점에서 큰 관성력이 머니플레이터에 가해지게 된다.

주어진 지지 링크에 있어서 첫번째 고유진동수 (natural frequency)는 21Hz 이며, μ 는 0.00003 로서 충분히 작기 때문에 강체운동과 유연체 운동을 분리하여 모델링 할 수 있다. slow time-scale 모델에 대한 구동력 계산법에서 관성행렬 매개변수의 추정값과 실제값이 정확히 일치한다고 가정하였으며, 강체운동을 나타내는 특성방정식, 식(17),의 근 (root)이 공진주파수에서 멀리 떨어지도록 Table 2 와 같이 피드백 게인, k_p, k_v 을 선정하였다.

식(19)로 표현되는 Fast time-scale 모델에 대한 피드백 제어를 구성하기 위해서는 상태변수들을 측정해야 한다. 그러나 상태변수에 해당하는 진동 모드들을 구분해서 측정하기는 어렵기 때문에, 본 모의 실험에서는 첫번째 진동모드만을 측정한다고 가정하였다. 그리고 직교형과 달리 Fig. 1 에서 주어진 비직교형은 식(6)에서 알 수 있듯이 머니플레이터의 자세에 따라 관성행렬과 강성행렬을 구성하는 원소(element)의 값이 변하지 않는다. 따라서 식(19)에서 주어진 상태 공간 방정식의 행렬, A, B 는 변수 $y(t)$ 에 독립적이므로 주어진 궤적에 대해서 하나의 최적해를 구할 수 있다. $Q=[10 \ 0; 0 \ 1], R=0.01$ 로 가중치행렬을 잡고 LQ 조정기(linear quadratic state-feedback regulator)로 fast time-scale 모델을 위한 제어를 구성했을 때 피드백 게인은 Table 2 에 주어진다.

Table 2 Feedback control gains

Compute torque method	torque	k_p	49
		k_v	2
LQ regulator		k_f	[30.4 10.2]

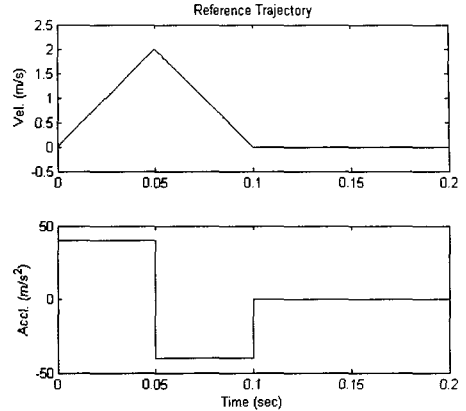


Fig. 2 Reference trajectory for the end-effector

전산모의 실험은 다음의 두가지 경우에 대해서 수행하였다. 첫번째로 fast time-scale 모델에 대한 제어기는 제거하고 slow time-scale 모델을 위한 구동력 계산법만을 가지고 유연 링크를 가진 직교형 머니플레이터의 궤적 추종을 수행하였다. 두번째로 강체운동을 위한 구동력 계산법 그리고 유연체 운동을 위한 LQ 조정기로 구성된 복합제어기를 이용하여 궤적 추종을 수행하였다. 이를 통해서 머니플레이터 링크의 유연체 운동을 고려한 복합 제어기의 감쇠 성능을 비교할 수 있다. 머니플레이터의 동역학식, 식(6),을 적분하기 위하여 0.1 millisecond 간격으로 4 차 Runge-Kutta 방법을 이용하였다.

Fig. 3 은 말단장치에서 머니플레이터의 궤적추종오차를 보여주고 있다. 기준궤적이 출발점, 감속점, 정지점에서 가속도의 불연속이 존재하므로 3 곳에서 큰 관성력이 머니플레이터에 가해지고 이로 인하여 최대 5mm 이상의 위치오차가 생긴다. 구동력 계산법만을 가지고 위치제어를 할 경우(점선) 불연속점에서 생긴 큰 위치오차의 진동이 천천히 감소하고 목표점에 도달한 후에도 오차의 진동현상이 계속 나타난다. 그러나 복합제어기를 가지고 위치제어를 수행할 경우(실선) 오차의 진동폭이 급격히 줄어들고 0.15 초 후에는 오차의 진동은 완전히 사라진다. Fig. 4 와 5 는 구동력 계산법만을 가지고 머니플레이터를 제어할 경우의 결과이다. Fig. 4 에서 보듯이 모든 진동모드에 있어서 진동이 오랫동안 존재하며, 이로 인하여 목표점 도달 후에도 말단장치의 위치오차가 계속해서 발

생한다. 첫번째 진동모드의 진폭이 두번째 모드에 비해서 10 배, 세번째 모드에 비해서 100 배 정도의 크기를 보이고 있다. Fig. 5 는 볼-스크류에 가해지는 제어출력으로 최대 90 N 정도의 구동력이 Fig. 2 에 주어진 기준 궤적 가속도의 형태와 유사하게 가해지고 있다.

Fig. 6 과 7 은 구동력 계산법과 LQ 조정기가 합쳐진 복합제어기를 가지고 머니플레이터를 제어한 결과이다. Fig. 6 에 보듯이 LQ 조정기가 fast time-scale 모델에서 나타나는 진동에 대해 감쇠작용을 하고 있으므로 Fig. 4 와 비교하면 각 진동모드들이 빠른 시간에 억제되고 있음을 보여주고 있다.

Fast time-scale 모델의 개회로 특성방정식의 근들은 복소 평면상에서 $s = \pm 3.34j$ 에 위치하고 있으므로 이론적으로 감쇠비가 없다. 그러나 상태변수 피드백 제어를 통해서 폐회로 특성방정식의 근들은 $s = -3.17, s = -104.85$ 로 이동하기 때문에 Fig. 6 과 같은 감쇠효과를 얻을 수 있다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 복합제어기를 구성하는 각 제어기의 출력을 보여주고 있다. Fig. 7 은 강제운동 즉 궤적 추종을 수행하는 구동력 계산법의 출력이며, Fig. 8 은 유연체 운동 즉 지지 링크의 진동을 감쇠하기 위해서 작용하는 LQ 조정기의 출력으로 큰 관성력이 작용하는 시작점, 중앙점, 목표점에서 큰 제어출력을 보여주고 있으나 링크 진동이 감쇠 됨에 따라

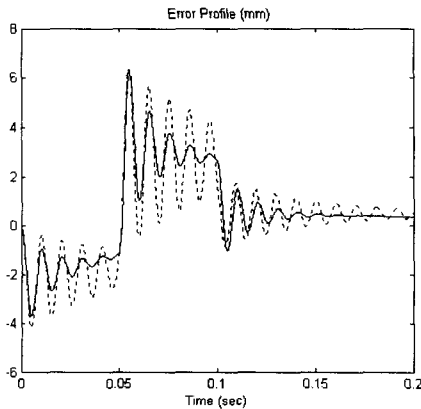


Fig. 3 Error profile of the end-effector (solid : composite, dotted : slow time-scale alone)

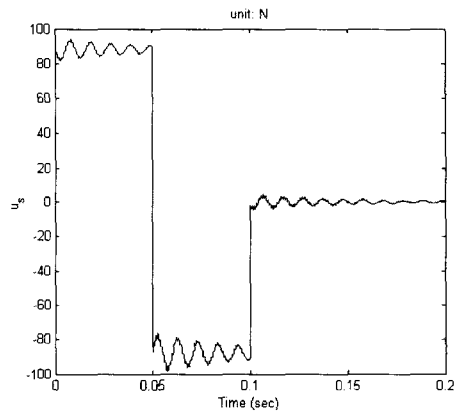


Fig. 5 Control output (slow time-scale controller alone)

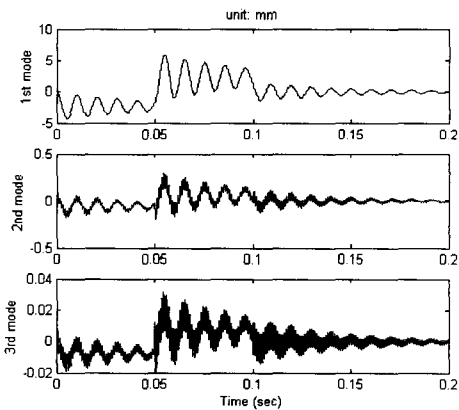


Fig. 4 The first three vibration modes of the link (slow time-scale controller alone)

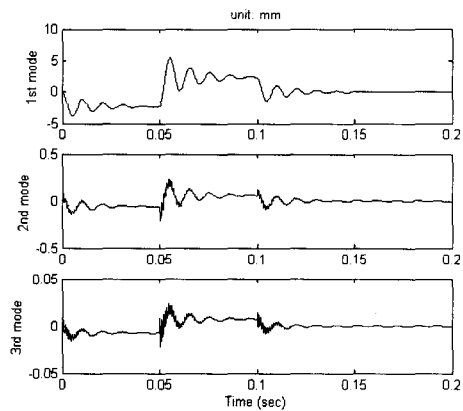


Fig. 6 The first three vibration modes of the link (composite controller)

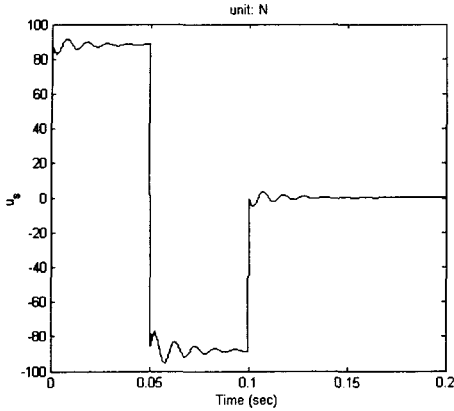


Fig. 7 Control output of the slow time-scale (composite controller)

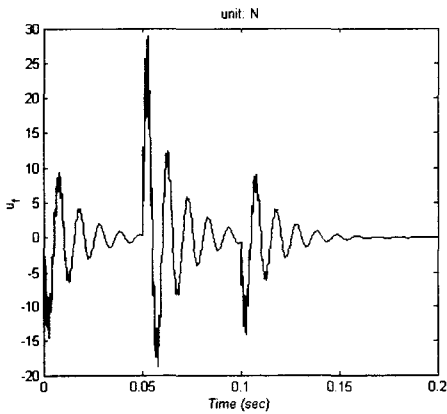


Fig. 8 Control output of the fast time-scale (composite controller)

그 크기도 같이 줄어든다. Fig. 7에서 보여진 링크의 강제운동을 위한 제어출력은 slow time-scale 제어기에 의해 계산되므로 구동력 계산법만을 이용한 제어 결과인 Fig. 5와 비슷한 크기와 형태를 가지게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 전자기관의 조립 및 검사장비로 많이 사용되는 직교형 머니플레이터의 고속 작동을 위하여 two time scale 모델에 근거한 복합제어기를 제안하였다. 먼저 유연한 링크를 가진 직교형 머니플레이터의 운동을 강제운동을 표현하는 slow time-scale 모델과 유연체 운동을 표현하는

fast time-scale 모델로 분리하였다. 그리고 관성력으로 인한 링크의 진동을 억제하면서 주어진 궤적을 정확히 추종하기 위하여, slow time-scale 모델은 구동력 계산법으로 fast time-scale 모델은 LQ 조정기로 각각 제어기를 설계하였다. 전산모의 실험을 통해서 강제운동을 고려한 구동력 계산법만을 이용했을 때에 비해서 복합제어기가 높은 감/가속시 발생하는 링크의 진동을 효과적으로 감쇠시켜 말단장치의 정착시간을 줄일 수 있었다. 따라서 two-time scale 모델을 이용한 복합제어기는 압전소자를 이용한 진동 제어와는 달리 추가적인 센서나 구동장치가 없이 머니플레이터의 효과적인 진동 감쇠성능을 보일 수 있다.

참고문헌

1. Callahan, J. and Baruh, H., "Active control of flexible structures by use of segmented piezoelectric elements," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 4, pp. 808-815, 1996.
2. Kwak, M. K., "Active vibration control of smart structure using piezoceramics," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 30-46, 2001.
3. Siciliano, B. and Book, W. J., "A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators," *J. of Robotics Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 79-90, 1988.
4. Siciliano, B. and Prasad, J. V. R. and Calise, A. J., "Output feedback two-time scale control of multilink flexible arms," *ASME Journal of Dynamic Systems and Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 70-77, 1992.
5. Siciliano, B. and Villani, L., "Two-time scale force and position control of flexible manipulators," *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea, pp. 2729-2734, 2001.
6. Matsuno, F. and Yamamoto, K., "Dynamic hybrid position/force control of a flexible manipulator," *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 462-467, Atlanta, Georgia, 1993.
7. Genta, G., *Vibration of structures and machines*, Springer-Verlag, New York, pp. 112-117, 1993.
8. Craig, J. J., *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley Publishing company, pp. 224-242, 1986.