

구속 받는 3 차원 유연 매니퓰레이터의 진동억제 제어

김진수*, 우찌야마 마사루**

Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators

Jin-Soo Kim* and Masaru Uchiyama**

ABSTRACT

For free motions, vibration suppression of flexible manipulators has been one of the hottest research topics. However, for constrained motions, a little effort has been devoted for vibration suppression control. Using the dependency of elastic deflections of links on contact force under static conditions, vibrations for constrained planar two-link flexible manipulators have been suppressed successfully by controlling the contact force. However, for constrained spatial multi-link flexible manipulators, the vibrations cannot be suppressed by only controlling the contact force. So, the aim of this paper is to clarify the vibration mechanism of a constrained, multi-DOF, flexible manipulator and to devise the suppression method. We apply a concise hybrid position/force control scheme to control a flexible manipulator modeled by lumped-parameter modeling method. Finally, a comparison between simulation and experimental results is presented to show the performance of our method.

Key Words : vibration suppression control (진동억제 제어), 3 Spatial Flexible manipulator (공간 유연 매니퓰레이터), Lumped-parameter model(집중정수 모델), Position/Force Control(하이브리드 위치/힘 제어), Experiment(실험), Simulation(해석)

1. 서론

자유공간에서의 유연 매니퓰레이터의 모델링, 진동억제 제어, 진동 가제어성 등은 활발하게 연구되어져 왔다.⁽¹⁾ 매니퓰레이터에 의한 작업을 수행하는 경우, 부품의 조립등과 같이 매니퓰레이터의 선단이 구속을 받는 작업이 적지않으나, 구속 환경하의 유연 매니퓰레이터의 제어에 대해서는 링크의 진동과 시스템의 안정성 등의 연구가 적으며, 더욱이 이에 관한 연구는 2 차원 평면 내의 운동에 한해서 논한 것이 대부분이다^{(2)~(5)}. 환경의 구속을 받는 3 차원 유연 매니퓰레이터의 위치/힘에 관한 연구는 최근 시작된 연구 과제 중의 하나이다⁽⁶⁾.

유연 매니퓰레이터의 선단이 구속 받지 않는

경우(자유 운동)의 진동억제 제어에 관한 연구는 중요한 테마로서 많은 연구자에 의해서 연구되어져 왔으나, 매니퓰레이터의 선단이 환경의 구속을 받는 경우(구속 운동)의 진동억제 제어의 연구는 거의 전무하다. 평면의 구속 환경하의 유연 매니퓰레이터는 매니퓰레이터 선단의 구속력과 링크 탄성 변형의 종속관계로 자유 공간에서의 매니퓰레이터와는 다르게 진동 제어 루프 없이 구속력의 제어만으로 링크의 진동이 억제되는 경우가 있다⁽⁴⁾. 구속 환경하의 3 차원 다 링크 유연 매니퓰레이터의 진동은 단지 평면 매니퓰레이터와 같이 구속력을 제어함으로써 억제되지 않는 경우가 있으며, 이러한 경우는 링크의 진동 제어를 위해서는 진동억제 제어 루프가 필요하다.

이러한 관점에서, 본 논문에서는 구속환경 하

* 한국항공우주연구소

** 일본 동북대학

에 있는 3차원 유연 매니퓰레이터 진동 메커니즘과 진동억제에 대해서 논하고자 한다. 링크의 탄성 변형과 구속력을 나타내는 운동방정식은 분포 정수 모델인 집중질량스프링 모델⁽⁷⁾을 이용하여 도출하였다. 이 집중질량스프링 모델의 유효성을 확인하기 위해 범용 동역학 소프트웨어 ADAMS를 이용하여 분포 정수 모델을 작성했다. 분포 정수에 의한 해석 결과와 집중질량 모델의 해석결과를 비교하여 집중질량스프링 모델의 유효성을 나타낸다. 또한 실험 결과와 해석 결과로부터 3차원 구속 운동하는 유연 매니퓰레이터의 진동 메커니즘을 분명히 하고 진동억제 제어의 유효성을 나타낸다.

2. 구속환경 하의 유연 매니퓰레이터의 운동 방정식

본 논문에 있어서, 유연 매니퓰레이터의 일반 좌표 q 는

$$q = [\theta^T \ e^T]^T$$

이며, $\theta \in \mathcal{R}^n$ 는 관절 각도 벡터, $e \in \mathcal{R}^m$ 는 탄성 변형 벡터이다. 매니퓰레이터 선단의 구속은 rheonomous 구속환경만을 고려하며, 이 구속식은

$$\varphi(q, t) = 0 \quad (1)$$

이다.⁽⁸⁾ $\varphi: \mathcal{R}^{n+m} \rightarrow \mathcal{R}^1$ 는 구속함수, t 는 시간이다.

구속환경 하에 있는 유연 매니퓰레이터의 운동방정식은 집중질량스프링 모델을 이용하면 다음과 같다.

$$\tau = M_{11}(q)\ddot{\theta} + M_{12}(q)\ddot{e} + h_1(q, \dot{q}) + g_1(q) + J_{\varphi\theta}^T(q)\lambda \quad (2)$$

$$0 = M_{21}(q)\ddot{\theta} + M_{22}(q)\ddot{e} + h_2(q, \dot{q}) + K_{22}e + g_2(q) + J_{\varphi e}^T(q)\lambda \quad (3)$$

여기서, $M_{11} \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $M_{12} \in \mathcal{R}^{n \times m}$, $M_{21} \in \mathcal{R}^{m \times n}$, $M_{22} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 관성 소 행렬이며, h_1 와 h_2 는 원심력과 Coriolis력 벡터, g_1, g_2 는 중력 벡터, $K_{22} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 는 탄성 계수 행렬, $\lambda \in \mathcal{R}^1$ 는 Lagrange multiplier, $J_{\varphi\theta}$ 와 $J_{\varphi e}$ 는 구속 Jacobian 행렬, $\tau \in \mathcal{R}^n$ 는 관절 토크 벡터이다. 운동 방정식에 있어서, 식(2)는 시스템 전체의 운동을 나타내는 반면, 식(3)는 링크의 탄성 운동을 나타낸다. 또한 운동 방정식에서 구속 Jacobian 행렬을 0이라

하면, 이 방정식은 자유 공간에서의 유연 매니퓰레이터의 운동 방정식이 된다.

구속에 대한 Jacobian 행렬은 다음과 같다.

$$J_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial p} J_q(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \varphi}{\partial e_1} & \frac{\partial \varphi}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial \varphi}{\partial e_m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} J_{\varphi\theta} & J_{\varphi e} \end{bmatrix}$$

여기서 $J_q = [J_\theta \ J_e]$ 는 매니퓰레이터의 일반 Jacobian 행렬, p 는 매니퓰레이터 선단의 위치 좌표이다. Lagrange multiplier는 아래 식과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{f_n}{|\text{grad} \varphi|} \quad (5)$$

$$\text{grad} \varphi = \nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial p}$$

여기서 f_n 는 구속에 대한 법선력이다.

다음과 같은 가정을 설정, 운동 방정식(2)와 (3)을 간략화 한다.

- 준 정적인 구속 운동만을 고려한다. 따라서 원심력, Coriolis력은 무시한다 $h(q, \dot{q}) = 0$
- 탄성 변위 벡터 e 를 미소량이라 하면, $M(q) \approx M(\theta)$, $g(q) \approx g(\theta)$ 로 근사시킬 수 있다.

식(2)와 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L\tau = M(\theta)\ddot{q} + Kq + g(\theta) + J_\varphi^T \lambda \quad (6)$$

여기서

$$L = \begin{bmatrix} I_n \\ 0_{m \times n} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & K_{22} \end{bmatrix}$$

이다.

3. 진동 메커니즘

3차원 유연 매니퓰레이터의 구속 운동에 있어서, 구속 환경에 대해 법선 방향의 회전 축을 갖는 관절의 구속 Jacobian $J_{\varphi p}$ ($p=1,2,\dots,n$)이 구속 작업 환경에 있어서 0에 근접하는 경우가 존재한다. 즉, 이 관절에 대한 구속력 ($J_{\varphi p} \lambda$)의 영향이 전혀 없음을 의미한다. 따라서, 이 관절에 의해 발생하는 진동도 구속력의 영향을 받지 않는다. 즉, 식(3)의 $J_{\varphi e} \lambda$ ($e=1,2,\dots,m$)도 0에 근접한다. λ 는 0가 아니므로, 탄성 변형의 구속 Jacobian 행렬

$J_{\varphi eq}$ 가 0 에 근접함을 알 수 있다.

그러므로, 식(6)는 다음과 같이 2 개의 식으로 분류하며 표시할 수 있다.

$$L_c \tau_c = M_c(\theta) \ddot{q}_c + K_c q_c + g_c(\theta) + J_{\varphi c}^T \lambda \quad (7)$$

$$L_f \tau_f = M_f(\theta) \ddot{q}_f + K_f q_f + g_f(\theta) \quad (8)$$

- 식(7)은 매니퓰레이터의 운동과 탄성 변형에 있어서 구속 영향을 받는 부분 시스템의 운동 방정식을 나타낸다. 본 논문에서는 식(7)을 “구속운동 부분 시스템”이라 칭하기로 하며, 첨자 c 로 표시한다.
- 식(8)은 매니퓰레이터의 운동과 탄성 변형에 있어서 구속 영향을 받지 않는 부분 시스템의 운동 방정식을 나타낸다. 본 논문에서는 식(8)을 “자유운동 부분시스템”이라 칭하기로 하며, 첨자 f 로 표시한다.

식(7)과 (8)으로부터, 정적상태($\dot{\theta}=\dot{\theta}=0, \ddot{e}=\dot{e}=0$)에 서는 식(9)과 식(10)과 같이 수정되어 정리된다.

$$0 = K_{22c} e_{0c} + g_{2c} + J_{\varphi c}^T \lambda \quad (9)$$

$$0 = K_{22f} e_{0f} + g_{2f} \quad (10)$$

여기서 e_{0c} 는 매니퓰레이터 자세에서의 중력과 구속력에 의한 정적인 탄성 변위, e_{0f} 는 매니퓰레이터 자세에서의 중력에 의한 정적인 탄성 변위이다. 그러므로 식(9)과 식(10)으로부터 다음과 같은 사실을 구할 수 있다.

- 구속운동 부분 시스템에서는 링크의 탄성 변위와 구속력의 종속관계로 기인해서 구속력만을 제어함으로써 진동제어 루프 없이도 링크의 진동을 억제할 수 있다
- 자유운동 부분 시스템에서는 링크의 탄성 변위가 자유 공간에서 운동하는 매니퓰레이터의 변위와 동일하다. 따라서, 링크의 진동을 억제를 위해서 진동제어 루프가 필요하다.

4. 위치/힘의 하이브리드 제어계

속도 입력형 서보 모터의 경우, 속도 입력치와 서보 모터의 출력 토오크와의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \tau &= G_r K_{sp} (V_{ref} - K_{sv} \dot{\theta}_m) \\ &= A (\dot{\theta}_{com} - \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, G_r 는 모터의 감속비 행렬, K_{sp} 는 속도 제

환 행렬, K_{sv} 는 전압/속도 계수 행렬, $\dot{\theta}_m = G_r \dot{\theta}$ 는 모터의 감속 전의 회전 각속도 벡터, $\dot{\theta}_{com}$ 는 속도 입력치, $A = G_r^2 K_{sp} K_{sv}$ 는 속도 변환 이득 이다. 속도 입력 전압 벡터 V_{ref} 는

$$V_{ref} = G_r K_{sv} \dot{\theta}_{com} \quad (12)$$

이다.

4.1 진동 제어

본 절은 탄성 링크의 진동을 억제하기 위한 속도 입력치 $\dot{\theta}_e$ 에 대해서 설명한다. 운동방정식(식(2))에 있어서 속도 서보 루프의 강성, 즉 속도 변환 이득 A 이 충분히 크다 하면, $\dot{\theta} \approx \dot{\theta}_{com}$ 이 된다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 또한, 식(3)에서의 $\ddot{\theta}_e$ 을 운동방정식에서의 제어 입력 가속도로 간주하면 식(8)의 탄성운동 방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M_{22f}(\theta) \Delta \ddot{e}_f + K_{22f} \Delta e_f = -M_{21f}(\theta) \ddot{\theta}_e \quad (13)$$

$$\Delta e_f = e_f - e_{0f} = e_f + K_{22}^{-1} g_{2f}(\theta)$$

식(13)을 안정화 시키기 위해, 다음과 같은 시스템을 도입한다.

$$\Delta \ddot{e}_f + K_v \Delta \dot{e}_f + K_p \Delta e_f = 0 \quad (14)$$

여기서, K_v 는 대각 속도 이득 행렬, K_p 는 대각 위치 이득 행렬이다. 식(14)을 식(13)에 대입하면 $-M_{21f} \ddot{\theta}_e = -M_{22f} [K_v \Delta \dot{e}_f + K_p \Delta e_f] + K_{22f} \Delta e_f$ (15) 이다. 식(15)으로부터 $\ddot{\theta}_e$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\theta}_e = M_{21f}^+ \{ M_{22f} [K_v \Delta \dot{e}_f + K_p \Delta e_f] - K_{22f} \Delta e_f \} \quad (16)$$

여기서 M_{21f}^+ 는 M_{21f} 의 Moore-Penrose 역행렬이다. 탄성 링크의 진동제어 입력치를 간단히 도출하기 위해 식(13)과 식(16)의 강성항만을 고려하면

$$\ddot{\theta}_e = M_{21f}^+ M_{22f} [K_v \Delta \dot{e}_f + K_p \Delta e_f] \quad (17)$$

이며, 식(17)을 θ 에 대하여 적분하면 진동제어 입력 $\dot{\theta}_e$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_e = K_{ep} \Delta e_f + K_{ei} \int_0^t \Delta e_f \quad (18)$$

여기서

$$K_{ep} = M_{21f}^+ M_{22f} K_v \quad (19)$$

$$K_{ei} = M_{21f}^+ M_{22f} K_p$$

이다.

4.2 제어 입력치

전 장에서 설명한 바와 같이 환경에 구속 받

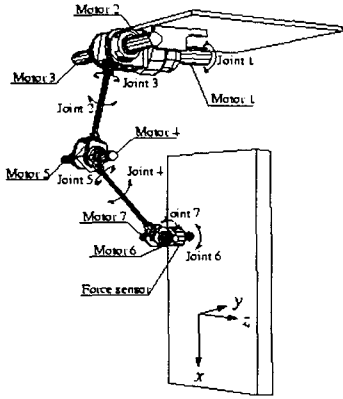


Fig. 1 Experimental robot with 2 link and 7 joints

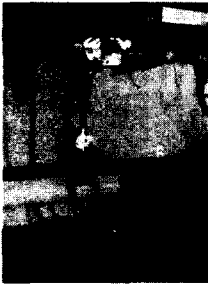


Fig. 2 A photograph of experimental robot setup

는 3 차원 유연 매니퓰레이터의 경우, 구속운동 부분 시스템과 자유운동 부분 시스템으로 분류할 수 있다. 본 절에서는 각각의 운동 부분 시스템에 대한 적합한 속도 제어 입력을 제시한다. 구속운동 부분 시스템의 입력 속도 $\dot{\theta}_{com}^c$ 는

$$\dot{\theta}_{com}^c = \dot{\theta}_t + \dot{\theta}_f \quad (20)$$

이며, 자유운동 부분 시스템의 입력 속도 $\dot{\theta}_{com}^f$ 는

$$\dot{\theta}_{com}^f = \dot{\theta}_t + \dot{\theta}_e \quad (21)$$

여기서 $\dot{\theta}_t$ 는 위치 제어를 위한 입력 속도 $\dot{\theta}_f$ 는 힘 제어를 위한 입력 속도이다. $\dot{\theta}_t$, $\dot{\theta}_f$ 와 $\dot{\theta}_e$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_t &= J_{\theta}^{-1} (I - n^T n) [K_{tp}(p_d - p) + K_{ti} \int_0^t (p_d - p)] \\ \dot{\theta}_f &= A^{-1} J_{\theta}^T n^T [K_{fp}(f_d - f_n) + K_{fi} \int_0^t (f_d - f_n)] \\ \dot{\theta}_e &= K_{ep} \Delta e_f + K_{ei} \int_0^t \Delta e_f \end{aligned} \quad (22)$$

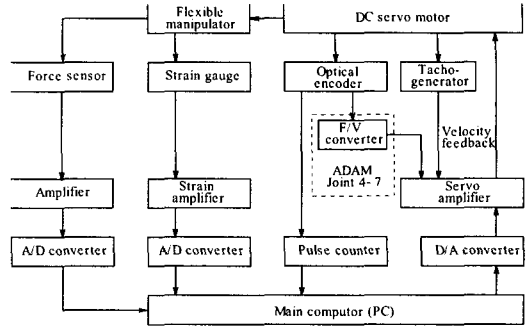


Fig. 3 The feedback control system

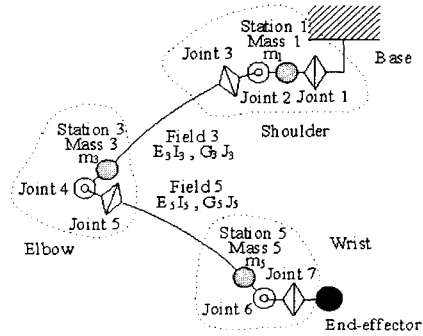


Fig. 4 Lumped-parameter model of the experimental manipulator ADAM.

여기서 I 는 단위 행렬이며 $n = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$ 는 구속면에

대한 법선 방향의 단위 벡터이다. $n^T (I - n^T n)$ 는 각각 힘의 제어 방향과 매니퓰레이터 선단의 운동 제어 방향을 선택하는 행렬을 정의한다

5. 예제

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)⁽¹¹⁾은 2 개의 팔을 갖고 있으며, 각각의 팔은 2 개의 유연 링크와 7 개의 회전 관절로 구성되어 있다. 본 논문에서는 왼쪽 매니퓰레이터(Fig. 1, 2)만을 고려한다. 또한 매니퓰레이터 선단의 자세 제어는 고려하지 않으므로, 본 실험과 해석은 관절 1, 2, 4, 6 만을 이용한다. 매니퓰레이터 선단은 $x-z$ 평면에 고정된

벽면을 일정한 힘을 가하면서 이동하는 작업을 한다. 단, 관절 6은 매니퓰레이터 선단이 벽면에 $\pi/2$ [rad]의 각도를 유지하도록 제어한다. 수직하 구속환경은 매니퓰레이터로부터 y 방향으로 0.375[m]에 위치해 있다. 한편 $x-z$ 평면은 자유공

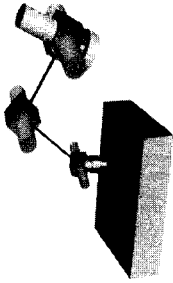


Fig. 5 ADAMS™ Simulation.

간이다.

5.1. 실험 시스템

실험기 ADAM은 속도 제한 제어를 하는 DC 서보 모터에 의해서 구동 된다. 각 링크의 진동은 strain gauge를 이용하여 검출하며, 매니퓰레이터의 선단에 작용하는 접촉력은 힘/토크 센서를 이용하여 검출한다. Fig. 3은 실험기 ADAM의 제한 제어계이다. Table 1에 ADAM과 대상물의 각각의 제한을 나타냈다.

Table 1 Parameters of ADAM and object

Parameter		Value
Length of link 3	[m]	0.50
Length of link 5	[m]	0.50
Bending stiffness of link 3	[N m ²]	291.6
Bending stiffness of link 5	[N m ²]	102.1
Mass of elbow	[kg]	6.0
Mass of wrist and end-effector	[kg]	2.7
Mass of object	[kg]	0.45

5.2 ADAM 모델링

Fig. 4는 실험기 ADAM의 집중질량스프링 모델이다⁽⁹⁾. 집중질량스프링 모델은 유연 매니퓰레이터의 탄성강성 E_3I_3 , E_5I_5 , 비틀림 강성 G_3J_3 , G_5J_5 특성을 갖는 질량이 없는 스프링(fields)과 집중질량(stations)으로 구성된다. 관절 각 θ 와 링크 탄성 변위 e 는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_4]^T \tag{23}$$

$$\delta = [\delta_{y3} \ \delta_{z3} \ \delta_{y5} \ \delta_{z5}]^T \tag{24}$$

여기서 δ_{y3} , δ_{y5} , δ_{z3} , δ_{z5} 는 각각 링크 3과 5의 y 와 z 축 방향의 탄성 변위를 나타낸다
실험기 ADAM의 분포정수 모델은 Mechanical

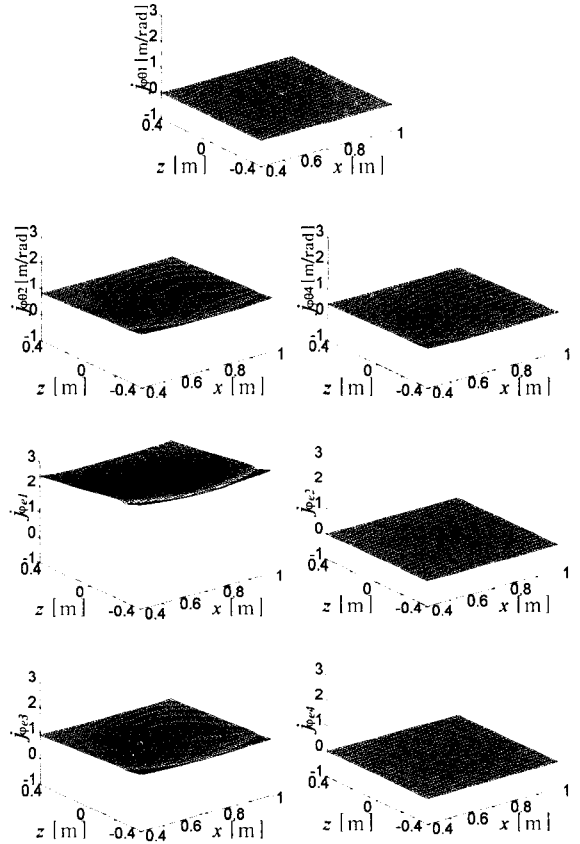


Fig. 6 Constraint Jacobian

Dynamics Inc.의 동역학 시뮬레이션 소프트웨어 ADAMS™을 이용하여 작성한다. ADAMS 해석 모델(Fig. 5)에서 유연 링크는 유한 요소법을 이용하여 모델링 한다. 여기서 유연 링크를 5개의 요소로 분할한다. 가능하면 실험과 유사한 환경을 구축하기 위해, 매니퓰레이터 선단과 구속환경 사이에 간단한 Coulomb 마찰이 발생하도록 했다. 매니퓰레이터의 선단 속도가 -0.001와 0.001이 되면 마찰력이 각각 $-\mu f_n$ 와 μf_n 이 된다. μ 는 마찰 계수이다.

6. 실험과 해석

구속식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varphi = y - 0.375 \quad (25)$$

실험기 ADAM 에 대한 식(4)의 J_φ 는

$$J_\varphi = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta_4} & \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_{y3}} & \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_{z3}} & \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_{y5}} & \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_{z5}} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} J_{\varphi\theta 1} & J_{\varphi\theta 2} & J_{\varphi\theta 4} & J_{\varphi\delta 1} & J_{\varphi\delta 2} & J_{\varphi\delta 3} & J_{\varphi\delta 4} \end{bmatrix}$$

이며, 각각을 Fig. 6 에 나타낸다.

구속환경에 대한 매니퓰레이터의 수평운동 $(\theta_1, \delta_{y3}, \delta_{y5})$ 은 자유운동이며, 반면 수직운동 $(\theta_2, \theta_3, \delta_{z3}, \delta_{z5})$ 은 구속운동이다. 식(7)과 식(8)에서 q_c, τ_c, q_f, τ_f 는

$$q_c = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_4 \\ \delta_{y3} \\ \delta_{y5} \end{bmatrix} \quad q_f = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \delta_{z3} \\ \delta_{z5} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\tau_c = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad \tau_f = \begin{bmatrix} \tau_1 \end{bmatrix}$$

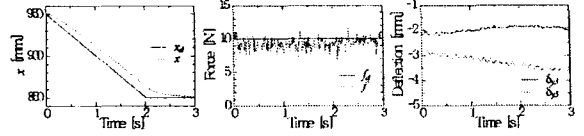
이다. 본 절에서는 다음과 같은 운동에 대해서 실험과 해석을 한다.

- ① 진동억제 제어 없이 매니퓰레이터 선단 x 방향 이동(Fig. 7)
- ② 진동억제 제어 없이 매니퓰레이터 선단 z 방향 이동(Fig. 8)
- ③ 진동억제 제어 하면서 매니퓰레이터 선단 z 방향 이동(Fig. 9)

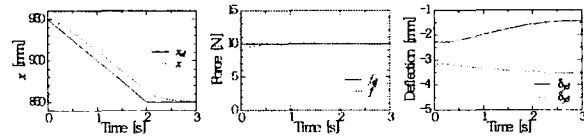
시뮬레이션에서 식(11)의 K_{sp} 는 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 근사하도록 조정한다. 구속환경의 강성, 마찰력을 각각 $10000[N/m]$ 와 0.2 로 한다. Sampling 시간과 구속력을 각각 $10[ms]$ 와 $10[N]$ 로 설정한다. ①과 ②의 실험과 시뮬레이션에서는 $K_{tp} = 4I_3[1/s]$, $K_{ti} = 0I_3[1/s^2]$, $K_{fp} = 0.4[m]$, $K_{fi} = 0[m/s]$, $K_v = 0I_3$, $K_p = 0I_3[1/s]$ 로 하며, ③의 실험과 시뮬레이션에서는 $K_{tp} = 4I_3[1/s]$, $K_{ti} = 0I_3[1/s^2]$, $K_{fp} = 0.4[m]$, $K_{fi} = 0[m/s]$, $K_v = 32I_3$, $K_p = 0I_3[1/s]$ 로 했다.

Fig. 7 은 ①의 실험과 시뮬레이션 결과의 응답을 나타낸다. ①의 운동의 속도 입력으로서 구속운동 부분 시스템의 입력 식(20)을 이용하였다. 이 응답 결과로부터 진동 제어 루프를 고려하지 않아도 구속력만을 제어함으로써 링크의 진동이 억제되는 것을 알 수 있다. Fig.7의 결과에 있어서 구속력 f 와 목표 구속력 f_d 사이에 오차가 존재하

는 이유로는 2 절에서 가정, 즉 운동 방정식의 중력 항에 탄성 변위의 효과를 무시한 결과

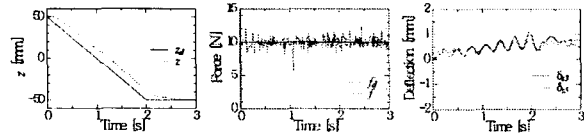


(a) Experimental results



(b) Simulation results

Fig. 7 End-effector is moving in x direction without vibration suppression

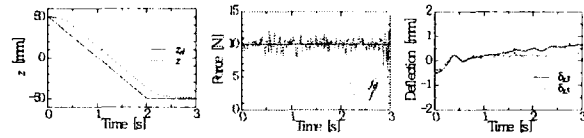


(a) Experimental results

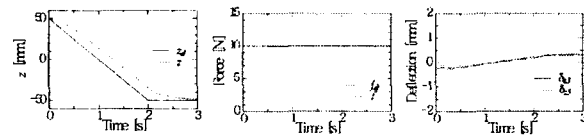


(b) Simulation results

Fig. 8 End-effector is moving in z direction without vibration suppression



(a) Experimental results



(b) Simulation results

Fig. 9 End-effector is moving in z direction with vibration suppression

($g(q) \approx g(\theta)$)라 판단된다.

Fig. 8 은 자유운동 부분 시스템 ②의 실험과 시뮬레이션 결과의 응답을 나타낸다. ②의 속도 입력으로서 운동①과 동일하게 구속운동 부분시스템의 입력 식(20)을 이용하였다. 운동②의 경우에는 링크의 탄성 진동이 발생한다. 즉, 운동 방향의 진동이 구속력의 영향을 받지않는다는 것을 알 수 있다.

자유운동 부분시스템에 대한 진동억제 제어를 위해서는 진동 제어 입력치 식(21)을 속도 입력치에 포함시켜야 한다. Fig. 9 는 진동억제 제어 입력을 포함한 운동②, 즉 운동③의 실험과 시뮬레이션 결과이며, 링크의 진동이 억제되는 것을 나타낸다. 여기서 관절 1, 2 의 입력으로는 구속운동 부분 시스템 입력치 식(20)을 관절 4 의 입력으로는 자유운동 부분 시스템 입력치 식(21)을 이용하였다. 이 결과는 전체 시스템에 대해서 진동억제 제어 입력을 일률적으로 입력한 것과 효과가 동일하다.

7. 결론

환경에 구속 받는 3 차원 유연 매니퓰레이터에 대한 실험과 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- 1) 3 차원 유연 매니퓰레이터에는 평면 유연 매니퓰레이터와는 상이한 진동 메커니즘이 존재함을 알 수 있었다.
- 2) 일반적으로 매니퓰레이터 선단이 자유 운동하는 경우, 전체 모터에 일률적으로 진동제어 입력치를 포함시킴으로써 진동억제하는 개념과는 다르게, 환경에 구속 받는 3 차원 유연 매니퓰레이터의 경우, 구속운동 부분 시스템과 자유운동 부분 시스템으로 분류하여 각각의 운동 부분 시스템에 적합한 제어치를 입력하는 것이 보다 효율적이며, 유효성이 있다 판단된다.

참고문헌

1. A. Konno, and M. Uchiyama, "Vibration Suppression Control of Spatial Flexible Manipulators," Control Engineering Practice, A

Journal of IFAC, Vol. 3, No. 9, pp. 1315-1321, 1995.

2. B. C. Chiou and M. Shahinpoor, "Dynamics Stability Analysis of a One-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," J. Robotic Systems, vol. 5, no. 5, pp. 443-451, 1988.
3. F. Matsuno T. Asano and Y. Sakawa, "Modeling and Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of a Constrained Planar Two-Link Flexible Manipulator," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 10, no. 3, pp. 287-297, 1994.
4. J. S. Kim, K. Suzuki, A. Konno and M. Uchiyama, "Force Control of Constrained Flexible Manipulators," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 635-640, 1996.
5. P. Rocco and W. J. Book, "Modelling for two-time scale Force/Position Control of Flexible Robots," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 1941-1945, 1996.
6. J. S. Kim, K. Suzuki, M. Yamano and M. Uchiyama, "Hybrid Position/Force Control of Spatial Flexible Manipulators," Proc. of The 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Vol. 1, pp. 222-227, 1996.
7. A. Konno and M. Uchiyama, "Modeling of a Flexible Manipulator Dynamics Based upon Holzer's Model," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent Robots and Systems, vol. 1, pp. 223-229, 1994.
8. J. G. Jalon and E. Bayo, "Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody System," Springer-Verlag New York, 1994.
9. A. Konno, M. Uchiyama, Y. Kito and M. Murakami, "Vibration Controllability of Flexible Manipulators," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 308-314, 1994.
10. S. Lopez-Linares, A. Konno and M. Uchiyama, "Controllability of Flexible Manipulators," 4th IFAC Symp. on Robot Control '94, Vol. 2, pp. 509-516, 1994.
11. M. Uchiyama, A. Konno, T. Uchiyama, and S. Kanda, "Development of a flexible dual-arm manipulator testbed for space robotics," Proc. of the IEEE Int.-Workshop on Intelligent Robotics and Systems'90, pp. 375-381, Tsuchiura, Japan, 1990.