

양팔 협조 유연 매니플레이터의 진동억제 제어

김진수*

(논문접수일 2010. 2. 26, 심사완료일 2010. 8. 4)

Vibration Suppression Control of Two Cooperating Flexible Manipulators

Jin-soo Kim*

Abstract

For free motions, vibration suppression of single flexible manipulators has been one of the hottest research topics. However, for cooperative motions of multiple flexible manipulators, a little effort has been devoted for the vibration suppression control. So, the aim of this paper is to develop a hybrid force/position control and vibration suppression control scheme for multiple cooperation flexible manipulators handling a rigid object. In order to clarify the discussion, the motions of dual-arm experimental flexible manipulator are considered. Using the developed model, we control a robotic system with hybrid position/force control scheme. Finally, Experiments are performed, and a comparison of experimental results is given to clarify the validity of our control scheme.

Key Words : Cooperative control(협조 운동), Multiple flexible manipulators(복수 유연 매니플레이터), Hybrid position/force control(하이브리드 위치/힘 제어), Vibration suppression control(진동 억제 제어), Rigid object(강체 대상물)

1. 서론

우주공간과 산업현장에서 대형구조물을 운반 및 조작하는 경우, 단수의 매니플레이터를 이용해서 작업을 수행하기 보다는 복수의 매니플레이터를 이용해서 협조작업을 수행하면 작업 효율이 향상될 것이다. 이러한 경우 복수 매니플레이터 고차 동역학 모델의 복잡성으로 인해서 제어에 많은 어려움이 존재하지만, 현장에서 복잡한 작업에 대해 복수 매니플

레이터를 이용한 협조작업의 필요성은 증대되어져 가고 있다. 이러한 요구에 의해서 링크가 강체인 복수의 매니플레이터에 대한 연구는 많이 진행되어져 왔다⁽¹⁻³⁾.

우주공간과 같이 매니플레이터 링크의 경량화가 필요한 현장에서는 유연 매니플레이터를 활용한 작업 수행도 필요할 것이다. 현재 유연 매니플레이터의 경우, 강체 매니플레이터에 비해서 모델의 복잡성과 링크의 탄성진동으로 인해서 복수 매니플레이터의 협조제어에 대한 연구는 많이 진

* 전주대학교 기계자동화공학과(jskim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 백마길 45

행되고 있지 않다.

유연 매니플레이터의 연구는 링크의 특성인 유연성을 파악하기 위한 모델링 방법과 링크의 탄성을 억제하는 제어가 활발히 진행되어져 왔다^(4,5). 최근에는 강체 매니플레이터와 같이 산업현장 및 우주공간에서 유연 매니플레이터를 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 시도로서 단순 매니플레이터를 이용한 위치/힘제어가 하나의 중요한 테마로서 연구되고 있으나^(6,7) 복수 유연 매니플레이터를 이용한 협조작업에 대한 연구는 미미하다 할 수 있다⁽⁸⁾. 이러한 관점에서 본 논문에서는 복수의 유연 매니플레이터를 이용하여 강체 대상물을 협조하여 작업을 수행하는 위치/힘제어 알고리즘을 제안한다.

본 논문에서 대상물을 파지하는 양팔 유연 매니플레이터의 운동 방정식은 자유공간에서 운동하는 단순 유연 매니플레이터의 운동 방정식, 매니플레이터 선단과 대상물간의 상대운동에 따른 기하학적인 구속조건식, 대상물의 운동방정식으로부터 유도한다.

자유공간에서 운동하는 단순 유연 매니플레이터의 운동 방정식은 집중 정수 모델법의 하나인 집중 스프링 질량 모델(Lumped Spring Mass Model)⁽⁵⁾을 이용하여 도출한다. 매니플레이터의 선단과 대상물간의 구속관계는 가상 스틱(virtual sticks)⁽²⁾ 이론을 이용하여 각 매니플레이터 선단으로부터 대상물에 가해지는 힘/모멘트, 대상물의 위치, 속도를 정의한다. 대상물의 운동방정식은 Newton-Euler방식을 이용한다. 이와 같이 도출한 운동방정식을 이용하여 하이브리드 위치/힘 제어계와 진동억제 제어계를 구성한다. 이 제어계를 실험기인 유연 매니플레이터 ADAM(Aerospace Dual Arm Manipulators)⁽⁹⁾에 적용하여 실시간 위치/힘 제어 및 진동제어 실험을 수행한다. 이 실험결과로부터 협조제어계 및 진동억제 제어계의 유효성을 검증한다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 유연 매니플레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)는 2개의 매니플레이터를 갖고 있으며, 각각의 매니플레이터는 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다⁽⁹⁾. Fig. 1은 실험기 ADAM의 외관을 보여준다. 매니플레이터의 관절 1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7은 각각의 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동된다. 모터로서는 DC서보 모터를 사용하고 있으며, 감속기를 내장하고 있다. 그 감속비는 1/80이다.

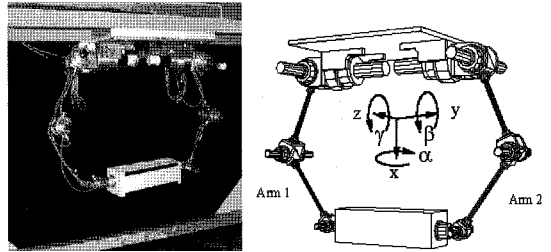


Fig. 1 Experimental dual arm manipulator(ADAM)

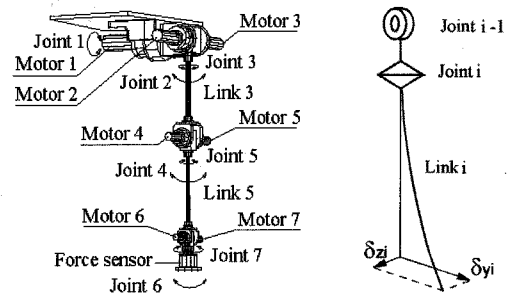


Fig. 2 Joint, motors, links and link deflections of Arm 2

Table 1 Parameters of ADAM

Parameter		Value
Length of link 1	[m]	0.50
Length of link 2	[m]	0.50
Bending stiffness of link3	[Nm ²]	291.6
Bending stiffness of link5	[Nm ²]	102.1
Mass of elbow	[kg]	6.0
Mass of wrist and end-effector	[kg]	2.7

관절 1~3은 타코메타(tachometer)와 광학 엔코더(optical encoder)를 내장, 관절 4~7은 광학 엔코더만 내장하고 있다. 모터의 회전 각속도는 관절 1~3의 경우 내장 타코메타로부터, 관절 4~7의 경우는 내장 광학 엔코더로부터 검출된 회전 각 펄스 신호를 F/V(Frequency to Voltage) 변환함으로써 검출되며, 이 회전 각속도는 서보 앰프에 입력된다. 각 링크의 진동은 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용하여 검출하며, 매니플레이터의 선단에 작용하는 힘은 Force/Torque 센서를 이용하여 검출한다. Table 1에 ADAM의 제원을 나타냈다.

3. 양팔 협조 유연 매니플레이터의 운동방정식

본 장에서는 대상물을 파지하는 양팔 유연 매니플레이터의 운동 방정식은 외팔 유연 매니플레이터의 운동 방정식, 대상물의 운동방정식, 매니플레이터 선단과 대상물간의 상대운동에 따른 기하학적인 구속조건식으로부터 유도된다.

3.1 외팔 유연 매니플레이터의 운동학

매니플레이터 선단의 위치/자세 벡터 ${}^0p_{hi} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 는 관절 각 $\theta_i \in \mathbb{R}^n$ 와 링크의 탄성 변형량 $e_i \in \mathbb{R}^m$ 으로 구할 있으며 점자 $i(= 1, 2)$ 은 i 번째 매니플레이터를 의미한다⁽⁵⁾. 일반적으로 자세 각을 미분하면 각속도벡터를 구할 수 있으나, 각속도벡터의 적분은 일률적인 자세 각을 구할 수 없다. 그러므로 i 번째 매니플레이터 선단의 병진/회전 속도벡터 ${}^0s_{hi}$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽²⁾.

$${}^0s_{hi} = B_s \dot{{}^0p}_{hi} = B_s J_{hi} \dot{q}_i \quad (1)$$

여기서

$$J_{hi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial {}^0p}_{hi}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial {}^0p}_{hi}}{\partial e_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$q_i = [\theta_i^T \ e_i^T]^T \quad (3)$$

$$B_s = \text{diag}[I_3 \ B_3] \quad (4)$$

이며, $I_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 단위행렬, $B_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 자세각 성분의 시간에 대한 미분치를 각속도 벡터로 변환하는 행렬이다⁽²⁾. i 번째 유연 매니플레이터의 운동방정식은 집중질량 스프링 모델을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$\tau_i = M_{11i}(q_i)\ddot{\theta}_i + M_{12i}(q_i)\ddot{e}_i + h_{1i}(q_i, \dot{q}_i) + g_{1i}(q_i) \quad (5)$$

$$0 = M_{21i}(q_i)\ddot{\theta}_i + M_{22i}(q_i)\ddot{e}_i + h_{2i}(q_i, \dot{q}_i) + K_{22}e_i + g_{2i}(q_i) \quad (6)$$

$M_{11i}, M_{12i}, M_{21i}, M_{22i}$ 는 관성 행렬이며, K_{22} 는 탄성계수 행렬, h_{1i}, h_{2i} 는 원심력과 Coriolis력 벡터, g_{1i}, g_{2i} 는 중력 벡터, τ_i 는 관절토크 벡터, θ_i 는 관절각 벡터, e_i 는 링크의 탄성 변위 벡터, q_i 는 θ_i 와 e_i 로 구성되는 벡터이다.

3.2 운동 분해 이론

그림 3에서 보는 바와 같이 2대의 매니플레이터를 사용하여 하나의 대상물을 파지하는 경우를 고려한다. 그림 3에 있어서 Σ_0 는 기준 좌표계, Σ_a 는 대상물에 고정된 좌표계, Σ_{hi} 은 선단좌표계로 표시한다. 그림 중의 벡터 ${}^0l_{hi}$ 는 Σ_{hi} 에서 O_a 까지의 위치벡터를 나타낸다. 여기서, ${}^0l_{hi}$ 가 선단에 고정된 강체봉과 같이 움직인다고 가정하기로 하며, 이것을 가상 스틱(virtual sticks)⁽²⁾이라 칭하기로 한다. 각 매니플레이터 선단으로부터 대상물에 가해지는 힘/모멘트, 대상물의 위치, 속도를 이 가상 스틱 선단에서 정의함으로써, 임의의 위치에 결정된 대표점에 있어서 매니플레이터 선단의 운동을 분해할 수 있다. 대상물은 강체이며 대상물과 매니플레이터 선단 사이에 미끄럼은 없다고 가정한다. 가상 스틱 선단에서의 힘/모멘트 ${}^0f_{bi}$ 는

$${}^0f_{bi} = [{}^0F_{bi}^T \ {}^0N_{bi}^T]^T \quad (7)$$

이며, ${}^0f_{bi}$ 와 대상물 중심 O_a 에서의 외력/모멘트 0f_a 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$${}^0f_a = {}^0f_{b1} + {}^0f_{b2} \quad (8)$$

Moore-penrose역행렬을 이용하면, 대상물에 가해지는 내력 0f_r 는 다음과 같이 정리할 수 있다⁽²⁾.

$${}^0f_r = \frac{1}{2}({}^0f_{b1} - {}^0f_{b2}) \quad (9)$$

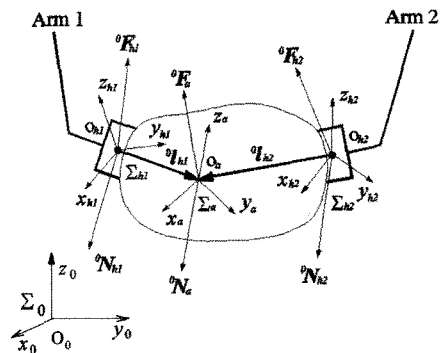


Fig. 3 Two arms holding a single object

매니플레이터 선단에 가상스틱이 연결되어 있으므로 가상스틱 선단의 위치/자세 ${}^0p_{bi}$ 는 매니플레이터 선단의 위치/자세 벡터 ${}^0p_{hi}$ 으로부터 도출할 수 있다. 이와같은 관계로부터 가상스틱 선단의 위치/자세 속도벡터는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$${}^0s_{bi} = D_{hi} {}^0s_{hi} \quad (10)$$

여기서, D_{hi} 는 ${}^0s_{bi}$ 와 ${}^0s_{hi}$ 의 관계를 나타내는 계수 행렬이며 ${}^0s_{hi} = [{}^0v_{hi}^T \quad {}^0\omega_{hi}^T]$ 와 ${}^0s_{bi} = [{}^0v_{bi}^T \quad {}^0\omega_{bi}^T]$ 는 각각 Σ_{hi} 와 Σ_{bi} 에서의 속도벡터를 나타낸다. 가상일의 정의를 이용하면 절대속도 벡터 0s_a 와 상대속도 벡터 0s_r , 또한 절대위치 벡터 0p_a 와 상대위치 벡터 0p_r 는 각각 다음과 같다⁽²⁾.

$${}^0s_a = \frac{1}{2}({}^0s_{b1} + {}^0s_{b2}) \quad (11)$$

$${}^0s_r = {}^0s_{b1} - {}^0s_{b2} \quad (12)$$

$${}^0p_a = \frac{1}{2}({}^0p_{b1} + {}^0p_{b2}) \quad (13)$$

$${}^0p_r = {}^0p_{b1} - {}^0p_{b2} \quad (14)$$

양팔 협조작업의 힘벡터 η , 속도벡터 u , 위치벡터 z 는

$$\eta = [{}^0f_a^T \quad {}^0f_r^T] \quad (15)$$

$$u = [{}^0s_a^T \quad {}^0s_r^T] \quad (16)$$

$$z = [{}^0p_a^T \quad {}^0p_r^T] \quad (17)$$

이다.

3.3 페루프 운동학

대상물체의 변형이 없으며, 매니플레이터 선단과 대상물체 사이의 미끄럼이 매우 작다고 가정하면, 협조작업계의 위치벡터 z 는 $\theta_i = [\theta_1^T \quad \theta_2^T]$ 와 $e_i = [e_1^T \quad e_2^T]$ 로부터 구할 수 있다. 그러므로 식 (10)을 고려하면 협조작업 속도벡터 u 는 다음과 같이 기술할 수 있다⁽⁶⁾.

$$u = J_\theta(q)\dot{\theta} + J_e(q)\dot{e} \quad (18)$$

여기서

$$J_\theta = [J_{\theta a}^T \quad J_{\theta r}^T] \quad (19)$$

$$J_e = [J_{ea}^T \quad J_{er}^T] \quad (20)$$

$${}^0J_{\theta a} = \frac{1}{2}(D_{h1}J_{h\theta 1} + D_{h2}J_{h\theta 2}) \quad (21)$$

$${}^0J_{\theta r} = {}^aR_0(D_{h1}J_{h\theta 1} - D_{h2}J_{h\theta 2}) \quad (22)$$

$${}^0J_{ea} = \frac{1}{2}(D_{h1}J_{he1} + D_{h2}J_{he2}) \quad (23)$$

$${}^0J_{er} = {}^aR_0(D_{h1}J_{he1} - D_{h2}J_{he2}) \quad (24)$$

이며, $J_{\theta a}, J_{ea}$ 는 0p_a 에 대한 $J_{\theta r}, J_{er}$ 는 0p_r 에 대한 Jacobian 행렬, ${}^aR_0 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 는 기준 좌표계 Σ_0 에서 대상물 좌표계 Σ_a 로 변환하는 행렬이다. 식 (18)와 가상일의 정의로부터, 양팔 협조작업계의 힘/모멘트 η 에 이용하면 양팔 협조제어를 유지하기 위한 관절토크와 탄성변형 관계는

$$\tau_\eta = J_\theta^T \eta \quad (25)$$

$$K_{22}e_\eta = -J_e^T \eta \quad (26)$$

이다. $K_{22} = \text{diag}[K_{221} \quad K_{222}]$, τ_η 는 η 와 균형을 유지하기 위한 양팔 매니플레이터의 관절토크이며, e_η 는 η 에 의해서 발생하는 양팔 매니플레이터의 탄성변형이다.

대상물의 운동방정식은 Newton-Euler식을 이용하면 대상물체 중심 O_a 에 대해서 다음과 같이 도출할 수 있다.

$${}^0f_a = {}^0f_{b1} + {}^0f_{b2} = \begin{bmatrix} m_a I_3 & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0v_a \\ {}^0\omega_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ {}^0\omega_a \times I_3 \omega_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_a g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식 (27)을 간단이 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^0f_a = \Psi_a {}^0s_a + h_a + g_a = \Psi_a (J_{\theta a} \dot{\theta} + J_{ea} \dot{e}) + h_{aq} + g_a \quad (28)$$

여기서, $h_{aq} = h_a + \Psi_a (\dot{J}_{\theta a} \dot{\theta} + \dot{J}_{ea} \dot{e})$, Ψ_a 는 대상물에 대한 관성행렬, h_a 는 원심력과 Coriolis력 벡터, g_a 는 중력벡터를 나타낸다.

대상물체를 파지한 양팔 유연 매니플레이터의 운동 방정식은 식 (5), (6), (25), (26), (28)으로부터 다음과 같이 도출할 수 있다⁽⁷⁾.

$$\tau = M_{11}(q)\ddot{\theta} + M_{12}(q)\ddot{e} + h_1(q, \dot{q}) + g_1(q) + J_{\theta r}^T(q)f_r \quad (29)$$

$$0 = M_{21}(q)\ddot{\theta} + M_{22}(q)\ddot{e} + h_2(q, \dot{q}) + K_{22}e + g_2(q) + J_{cr}^T(q)f_r \quad (30)$$

여기서,

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1^T & \tau_2^T \end{bmatrix}^T \quad (31)$$

$$M_{11} = \text{diag}[M_{111} \ M_{112}] + J_{\theta a}^T \Psi_a J_{\theta a} \quad (32)$$

$$M_{12} = \text{diag}[M_{121} \ M_{122}] + J_{\theta a}^T \Psi_a J_{ca} \quad (33)$$

$$M_{21} = \text{diag}[M_{211} \ M_{212}] + J_{ca}^T \Psi_a J_{\theta a} \quad (34)$$

$$M_{22} = \text{diag}[M_{221} \ M_{222}] + J_{ca}^T \Psi_a J_{ca} \quad (35)$$

$$h_1 = [h_{11} \ h_{21}] + J_{\theta a}^T h_{\theta a} \quad (36)$$

$$h_2 = [h_{12} \ h_{22}] + J_{ca}^T h_{ca} \quad (37)$$

$$g_1 = [g_{11} \ g_{21}] + J_{\theta a}^T g_a \quad (38)$$

$$g_2 = [g_{12} \ g_{22}] + J_{ca}^T g_a \quad (39)$$

이다.

4. 하이브리드 위치/힘 협조제어계

본 연구에서 사용한 제어계는 Fig. 4의 블록선도에서 보는 바와 같이 하이브리드 위치/힘 제어계와 진동억제 제어계로 구성되었다. 하이브리드 위치/힘 제어계는 양팔 매니퓰레이터의 운동학과 정적인 모델, 진동억제 제어계는 양팔 매니퓰레이터와 대상물체의 동역학 모델을 이용하여 설계하였다. 속도 입력형 서보 모터의 경우, 속도 입력치와 서보 모터의 출력 토크와의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토크를 계산한다^(5,6).

$$\tau = G_r K_{sp} (V_{ref} - K_{sv} \dot{\theta}_m) = \Lambda (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}) \quad (40)$$

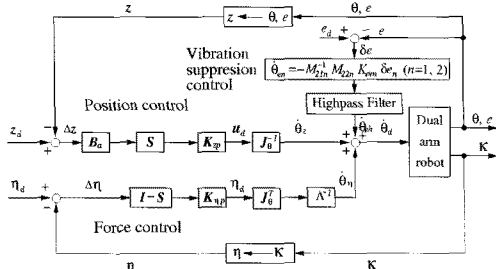


Fig. 4 Hybrid position/force and vibration Suppression controller

여기서, G_r 는 모터의 감속비 행렬, K_{sp} 는 속도 궤환 행렬, K_{sv} 는 전압/속도 계수 행렬, $\dot{\theta}_m = G_r \dot{\theta}$ 는 모터의 감속 전의 회전 각속도벡터, $\dot{\theta}_c$ 는 속도 입력치, $\Lambda = G_r^2 K_{sp} K_{sv}$ 는 속도 궤환 이득이다. 속도 입력 전압벡터 V_{ref} 는

$$V_{ref} = G_r K_{sv} \dot{\theta}_c \quad (41)$$

전체 시스템의 입력속도를 $\dot{\theta}_c$ 는

$$\dot{\theta}_c = \dot{\theta}_z + \dot{\theta}_\eta + \dot{\theta}_{eh} \quad (42)$$

이며, $\dot{\theta}_z$ 는 대상물체의 위치제어를 위한 입력속도, $\dot{\theta}_\eta$ 는 힘 제어를 위한 입력속도, $\dot{\theta}_{eh}$ 는 진동 억제제어를 위한 입력속도이다.

4.1 위치제어 입력치

식 (18)에서 진동억제 제어로 인하여 \dot{e} 가 미소하다 가정하여 $J_c \dot{e}$ 항을 무시하면 대상물 위치제어를 위한 입력 속도 $\dot{\theta}_z$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_z = J_\theta^{-1} S K_{zp} B_a (z_d - z) \quad (43)$$

여기서, z_d 와 z 는 각각 목표, 현재 위치벡터, K_{zp} 는 비례 이득, $B_a = \text{diag}[B_s \ I_6]$ 는 위치 오차중의 대상물의 자세 각 성분을 회전벡터로 변환하는 행렬, $S = \text{diag}[I_6 \ 0]$ 는 z 로부터 ${}^0 p_a$ 성분만을 선택하는 행렬이다.

4.2 힘 제어 입력치

힘제어를 위한 양팔 관절 각속도의 입력치 $\dot{\theta}_\eta$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{\theta}_\eta = \Lambda^{-1} J_\theta^T (I_{12} - S) K_{fp} (\eta_d - \eta) \quad (44)$$

여기서 η_d 와 η 는 각각 목표와 현재의 힘벡터, K_{fp} 는 비례 이득, $(I_{12} - S)$ 는 내력 성분만을 선택하는 행렬이다. Fig. 4의 제어계에서 양팔 매니퓰레이터의 κ 는 선단에서 힘/토크 센서에 의해서 측정된 힘/토크를 외력과 내력으로 분해하여 제어기에 궤환하는 행렬이다.

4.3 진동 제어 입력치

협조제어계의 양팔 유연 매니플레이터의 진동억제 제어는 외팔 유연 매니플레이터의 진동억제 제어계를 확장시켜 사용한다⁽⁶⁾. 협조제어계의 진동 제어입력 θ_{eh} 은 양팔 유연 매니플레이터의 페루프 운동방정식으로부터 도출한다. 식 (30)의 정적인 평형 상태($\dot{\theta}=\ddot{\theta}=0, \dot{e}=\ddot{e}=0$)를 고려하면, 비선형 항 h_1, h_2 는 무시할 수 있으며, 중력과 외력의 영향에 의해서 발생하는 변형벡터 e_0 는

$$e_0 = -K_{22}^{-1}(g_2(q) + J_{er}^T(q)f_r) \quad (45)$$

이다. 동적인 운동에 의해서 발생하는 탄성변형만을 고려한 탄성운동방정식은 식 (30)으로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$M_{22}(q)\Delta\ddot{e} + K_{22}\Delta e = -M_{21}(q)\Delta\ddot{\theta}_e \quad (46)$$

여기서,

$$\Delta e = e - e_0 \quad (47)$$

이다. 식 (46)을 안정화시키기 위해, 다음과 같은 시스템을 도입한다.

$$\Delta\ddot{e} + K_{ev}\Delta\dot{e} + K_{ep}\Delta e = 0 \quad (48)$$

여기서, K_{ev} 는 대각 속도이득 행렬, K_{ep} 는 대각 비례이득 행렬이다. 시스템이 $\text{rank}M_{21} = \text{dim}(e)$ 를 만족하면 식 (46)으로부터 진동제어 입력 θ_{eh} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_{eh} = M_{21}^{-1}\{M_{22}(K_{ev}\Delta\dot{e} + K_{ep}\Delta e) - K_{22}\Delta e\} \quad (49)$$

링크의 탄성변형은 매니플레이터의 운동에 의해 발생하는 고주파 영역의 진동과 저주파 영역의 외력과 중력의 영향에 의한 정적인 변형이 있다. 매니플레이터의 운동시에 발생하는 진동억제는 고주파 영역의 진동만을 억제하면 되므로 식 (46)의 강성항만을 고려하여 θ 에 대하여 적분하면 진동 제어 입력 θ_{eh} 는 다음과 같다.

$$\theta_{eh} = M_{21}^{-1}M_{22}\left(K_{ev}\Delta e + K_{ep}\int_0^t \Delta e\right) \quad (50)$$

실험에서는 Δe 은 식 (47)으로부터 구할 수 있으나, 계산을 간단히 하기 위해서 저주파 영역인 외력과 중력의 영향에 의한 변형을 1차 high pass filter를 사용하여 제거한 후, 매니플레이터의 운동에 의해 발생하는 탄성 변형만을 억제한다. 이 필터를 사용하면 Δe 는 $\Delta e = S_{\text{high}}e$ 이며, 식 (50)에서 비례 성분만을 고려하면 진동억제 입력은 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_{eh} = S_{\text{high}}M_{21}^{-1}M_{22}K_{ev}e \quad (51)$$

5. 실험결과 고찰

3장에서 제안한 양팔 매니플레이터의 협조제어계의 유효성을 검증하기 위해 Fig. 1의 실험기 ADAM을 이용하여 강제 대상물을 파지하여 협조제어를 수행하였다. 본 실험에서는 관절 2, 4, 6만을 이용하며 θ 와 e 는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta_{12} \theta_{14} \theta_{16} \theta_{22} \theta_{24} \theta_{26}] \quad (52)$$

$$e = [\delta_{y13} \delta_{z13} \delta_{y15} \delta_{z15} \delta_{y23} \delta_{z23} \delta_{y25} \delta_{z25}] \quad (53)$$

여기서 $\delta_{y13}, \delta_{y15}, \delta_{z13}, \delta_{z15}$ 는 각각 링크 3과 5의 y 축과 z 축 방향의 탄성변위를 나타낸다. 또한 0p_a 와 0f_r 는

$${}^0p_a = [{}^0x_a \ {}^0y_a \ {}^0\gamma_a] \quad (54)$$

$${}^0f_r = [{}^0F_{rx} \ {}^0F_{ry} \ {}^0N_{rz}] \quad (55)$$

이다. 이 실험에서 $K_{sp} = 4.0I_{12}[s^{-1}]$, $K_{rp} = 0.4I_{12}$, $K_{ep} = 16I_{24}[s^{-1}]$ 으로 high pass filter의 cutoff 주파수는 1[Hz], Sampling 시간은 15[ms], 목표 내력은 ${}^0f_{rd} = [0N \ 30N \ -0.7N]$ 와 같이 설정한다.

본 논문에서 두가지 실험을 통해서 양팔 매니플레이터로 대상물을 파지한 후 위치/힘 협조제어할 경우의 진동제어계의 유효성을 검증한다. 먼저, 첫번째 실험은 진동제어계를 이용하지 않고 실험한 경우이며, Fig. 5는 협조제어에 대한 위치/자세와 힘/토크의 응답성 결과이다. 이 결과로부터 매니플레이터 선단의 진동이 발생하여 시간 경과와 함께 증가하며, 위치/힘 제어계도 불안정해지는 것을 볼 수 있다.

두 번째 실험은 진동제어계를 이용하여 위치/힘의 협조제어를 수행하였으며, Fig. 6은 협조제어에 대한 위치/자세와 힘/토크의 응답성 결과이다. Fig. 6의 결과로부터 진동억제 제어를 가하였을 경우, 진동이 감쇠하는 것을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안한 진동억제 제어가 유효함을 알 수 있다.

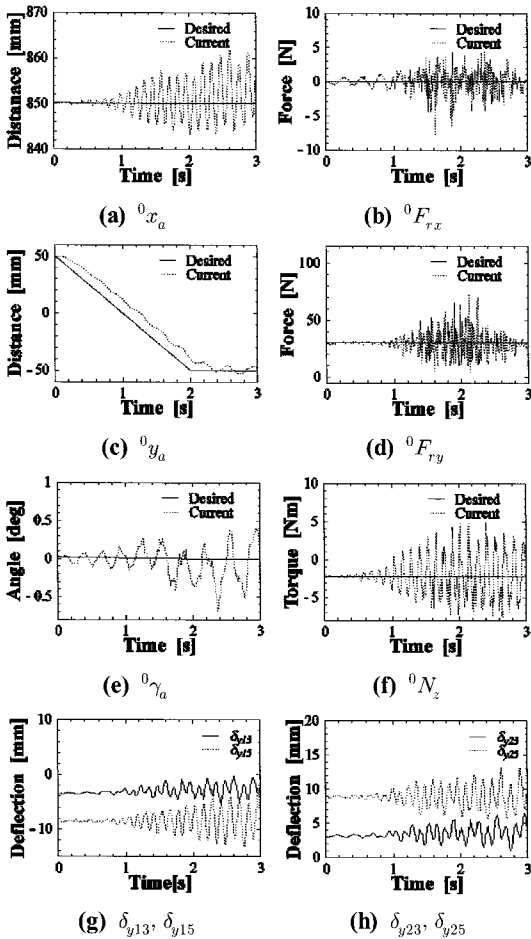


Fig. 5 Experimental results without suppressing vibration

6. 결론

본 논문에서는 대상물을 파지하는 복수 유연 매니플레이터의 운동방정식을 자유공간에서 운동하는 단수 유연 매니플레이터의 운동방정식, 매니플레이터 선단과 대상물간의 상대운동에 따른 기하학적인 구속조건식, 대상물의 운동방정식으로부터 유도하였다.

페루프 복수 매니플레이터 운동방정식을 이용하여 하이브리드 위치/힘 제어계와 진동억제 제어계를 구성하였다. 이 제어계를 실험기인 유연 매니플레이터 ADAM에 적용하여 실시간 위치/힘 제어 및 진동제어 실험을 수행하였다. 이 실험결과로부터 양팔 유연 매니플레이터의 협조작업을 수행할 경우에 링크의 진동을 억제하지 않으면 협조제어계 시스템

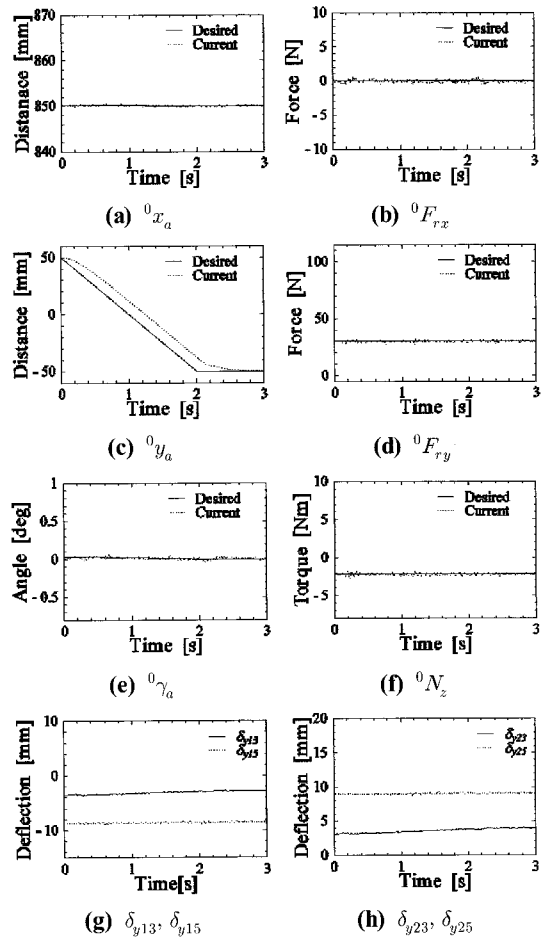


Fig. 6 Experimental results with suppressing vibration

이 불안정하게 됨을 보였다. 또한 본 논문에서 제안하는 진동억제 제어계를 적용하여 협조작업을 수행할 경우에는 링크의 진동이 효과적으로 억제되었으며 협조작업 제어계도 안정됨을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 본 논문에서 제안한 복수 유연매니플레이터에 대한 하이브리드 위치/힘 제어계와 진동 억제 제어계가 유효하다고 사료된다.

참고문헌

- (1) Hayati, S., 1986, "Hybrid Position/Force Control of Multiple Arm Cooperating Robots," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 89-92.
- (2) Uchiyama, M. and Dauchez, P., 1988, "Symmetric

- Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robot,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 350~356.
- (3) Bonitz, R. G. and Hisa, T. C., 1996, “Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 12, No. 1, pp. 78~89.
- (4) Bayo, E., 1987, “A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot,” *J. of Robotic system*, Vol. 4, No. 1, pp. 63~75.
- (5) Uchiyama, M. and Konno, A., 1996. “Modeling of flexible manipulator dynamics based upon Holzer’s Model,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 223~229.
- (6) Kim, J. S. and Uchiyama, M., 2003, “Vibration Mechanism of Constrained Spatial Flexible Manipulators,” *Int. J. JSME, Series C*, Vol. 46, No. 1, pp. 123~128.
- (7) Kim, J. S., 2003, “Active Compliance Control of Constrained Flexible Manipulators” *J. of KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 1~7.
- (8) Kim, J. S. and Uchiyama, M., 2000, “Dynamic Modeling of Two Cooperating Flexible Manipulators” *Int. J. of KSME*, Vol. 14, No. 2, pp. 188~196.
- (9) Uchiyama, M., Konno, A., Uchiyama, T., and Kanda, S., 1990. “Development of a flexible dual-arm manipulator tested for space robotics,” *Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems ’90*, pp. 375~381.