

## 3 차원 양팔 유연 매니퓰레이터의 협조제어 (실험에 의한 검증)

김진수\*

### Cooperative Control of Two Spatial Flexible Manipulators - Verification by Experiments -

Jin-Soo Kim\*

#### ABSTRACT

In this paper, we discuss the control scheme on cooperative control of two flexible manipulators working in 3D space. We propose a control scheme which consists of hybrid position/force control and vibration suppression control. Hybrid position/force control is extended from the scheme for two cooperating rigid manipulators to that for flexible ones. In addition to the control, vibration suppression control based upon a lumped-mass-spring model of the flexible manipulators is applied. To illustrate the validity of the proposed control scheme, we show experimental results. In the experiment, a rigid object is handled by two cooperating flexible manipulators in 3D space.

**Key Words** : cooperative control(협조 제어), two flexible manipulators(양팔 유연 매니퓰레이터), hybrid position/force control (하이브리드 위치/힘 제어), vibration suppression control (진동 억제 제어), 3D space (3 차원)

#### 1. 서론

초기의 유연 매니퓰레이터의 연구는 1 링크 유연 매니퓰레이터를 대상으로 한 진동 억제 제어 및 모델링이 중심이었다<sup>(1)(2)</sup>. 현재는 다 링크 유연 매니퓰레이터의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다 링크 매니퓰레이터를 이용한 궤도제어와 힘 제어 등의 실질적으로 산업 현장에 응용될 수 있는 연구 또한 진행되고 있다<sup>(3)</sup>.

우주 로봇로서의 유연 매니퓰레이터의 작업을 실용화하기 위해서는 간단한 물체의 운반, 핸드 아이 카메라의 감시 등의 위치 제어만으로 가능한 작업이외에 물체의 삽입, 판넬의 개폐, 대형

물체의 운반 등 힘 제어 및 협조 제어를 필요로 하는 작업이 당연히 필요하다. 강체 매니퓰레이터의 경우 그 강성으로 인해 약간의 위치 오차만으로도 매니퓰레이터와 구속 환경간에 큰 반력을 발생시킨다. 한편 유연 로봇의 경우, 이 오차에 대해 링크의 기계적인 콤프라이언스를 적극적으로 이용함으로써 충돌 시 액츄에이터에 작용하는 충격의 흡수가 가능하다 생각된다. 이러한 관점으로 보아 유연 로봇의 고 기능화를 위해서는 힘 및 협조 제어는 매우 중요한 연구 테마라 할 수 있다.

강체 매니퓰레이터의 협조 제어에 관해서는 많은 연구가 보고되어 있으며, 주요 테마는 시스템의 마스터 스테이브 제어<sup>(4)</sup>, 임피던스 제어<sup>(5)</sup>, 하

\* 한국항공우주연구소

이브리드 위치/힘 제어의 적용에 대한 제어 알고리즘연구<sup>(6)(7)</sup>, 부하의 분배 문제연구<sup>(8)</sup> 등이 있다.

유연 매니퓰레이터 협조 제어의 선구적인 연구로서는 Matsumoto의 연구를 들 수 있다<sup>(9)</sup>. 이 보고는 강체 대상물을 파지, 평면 내를 운동하는 2 자유도의 유연 매니퓰레이터를 분포 정수계로서 모델링, 그 모델을 이용한 준 정적인 하이브리드 위치/힘 제어기를 제안하고 있다. Sur는 양팔 유연 매니퓰레이터의 하이브리드 위치/힘 제어계를 제안, 실험을 통하여 유연성의 유효성과 작업에 대한 유연성의 적용 가능성을 소개하고 있다<sup>(10)</sup>.

이와 같은 종래 연구들은 2 자유도 매니퓰레이터를 이용, 운동을 평면 내에 국한하여 논의 했으며, 모델링 방법으로서 분포 정수 모델을 채택하였다. 그러나, 모델링 방법으로 분포 정수 모델을 사용하지 않으면서 운동 방정식이 복잡하고 이해하기 어려운 점이 있었다. 이와 같은 이유로, 1 링크와 2 링크가 아닌 다 링크 다 자유도로의 확장은 곤란하다. 이러한 관점에서 본 논문은 다 링크 다 자유도 매니퓰레이터를 이용한 3 차원 공간에서의 유연 매니퓰레이터의 협조 제어에 대해서 논하고자 한다.

본 논문에서는 강체 물체를 파지한 양팔 유연 매니퓰레이터의 운동방정식을 유도하였다. 또한 하이브리드 위치/힘 제어와 진동 제어로 구성된 협조 제어 법을 제안하였다. 하이브리드 위치/힘 제어는 양팔 강체 매니퓰레이터로부터 확장 시킨 것이며, 진동 억제 제어는 유연 매니퓰레이터의 집중 정수 모델중의 한 종류인 집중 질량 스프링 모델을 이용하여 도출하였다. 또한, 실험적인 평가를 통하여 제안한 제어법의 타당성을 입증시켰다. 이 실험은 강체 물체를 양팔 유연 매니퓰레이터를 이용하여 3 차원 공간에서 병진 운동 및 회전 운동을 수행하였다.

## 2. 협조 제어계의 운동 방정식

양팔 유연 매니퓰레이터를 이용하여 위치/힘을 제어하기 위하여, 힘, 위치, 속도의 작업 벡터(task vector)의 개념이 고려되어야 한다<sup>(7)</sup>. 작업 벡터는 각각의 매니퓰레이터의 힘, 위치, 속도로부터 도출된다. 본 논문에서의 양팔 유연 로봇의 운동 방정식은 외팔 유연 매니퓰레이터의 운동 방정식과

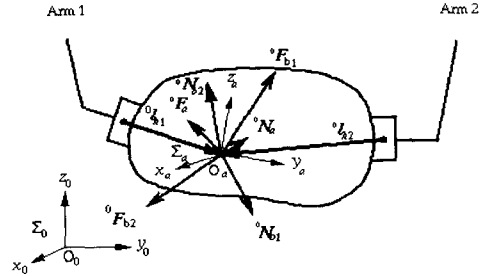


Fig. 1 Two arms holding a single object

작업 벡터에 의해서 유도된다.

### 2.1 운동 분해 이론

그림 1에서 보는 바와 같이 2 대의 매니퓰레이터를 사용하여 하나의 대상물을 파지하는 경우를 고려한다. 그림 1에 있어서  $\Sigma_0$ 는 기준 좌표계,  $\Sigma_a$ 는 대상물에 고정된 좌표계로 표시한다. 그림 중의 벡터  ${}^0l_{hn}$  ( $n = 1, 2$ )의 크기, 매니퓰레이터의 선단(end-effector)에 대한 위치와 자세는 양팔 매니퓰레이터로 파지한 순간 결정된다. 여기서,  ${}^0l_{hn}$ 가 선단에 고정된 강체봉과 같이 움직인다고 가정하기로 하며, 이것을 가상 스틱(virtual sticks)<sup>(7)</sup>이라 칭하기로 한다. 각 매니퓰레이터 선단으로부터 대상물에 가해지는 힘/모멘트, 대상물의 위치, 속도를 이 가상 스틱 선단에서 정의함으로써, 임의의 위치에 결정된 대표 점에 있어서 양팔 선단의 운동을 분해할 수 있다. 가상 스틱 선단에서의 힘/모멘트  ${}^0f_{bn}$ 와 대상물에 가해지는 외력/모멘트  ${}^0f_a$ (이하에서 힘은 힘과 모멘트를 의미함)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$${}^0f_{bn} = [{}^0F_{bn}^T \quad {}^0N_{bn}^T]^T \quad (1)$$

$${}^0f_a = [{}^0F_a^T \quad {}^0N_a^T]^T \quad (2)$$

${}^0f_a$ 와  ${}^0f_{bn}$  관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^0f_a = W^0 \lambda_b \quad (3)$$

$$W = [I_6 \quad I_6] \quad (4)$$

$${}^0\lambda_b = [{}^0f_{b1}^T \quad {}^0f_{b2}^T]^T \quad (5)$$

$I_6$ 는 6x6의 단위행렬이며,  ${}^0f_a$ 가 주어졌을 때, 식 (3)의 일반 해는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$${}^0\lambda_b = W^+ {}^0f_a + (I_{12} - W^+ W) b \quad (6)$$

여기서,  $b$ 는 임의의 12 차원 벡터이다.  $W^+$ 는  $W$ 의 Moore-penrose 역 행렬

$$W^+ = \left[ \frac{1}{2} I_6 \quad \frac{1}{2} I_6 \right]^T \quad (7)$$

이다. 그러므로, 식(6)으로부터 대상물에 가해지는 내력을  ${}^0f_r$ 로 표시하면 식(5)를 다음과 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^0\lambda_b &= W^+ {}^0f_a + V {}^0f_r \\ &= \left[ \frac{1}{2} I_6 \quad \frac{1}{2} I_6 \right]^T {}^0f_a + [I_6 \quad I_6]^T {}^0f_r \end{aligned} \quad (8)$$

$V$ 는 식(6)의 제 2항을  ${}^0f_r$ 로부터 좌표 표현을 하기 위한 단위 벡터로 구성된 행렬이며, 식(8)에서 정의했다. 외력  ${}^0f_a$ 와 내력  ${}^0f_r$ 에 대해서, 매니퓰레이터의 운동은 대상물의 절대 운동과 양팔의 상대 운동으로 분해될 수 있다.

이상에서 설명한 운동 분해 이론을 적용하여 대상물에 가해지는 외력  ${}^0f_a$ , 내력  ${}^0f_r$  및 각각에 상응하는 속도와 위치 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^0f_a = {}^0f_{b1} + {}^0f_{b2} \quad (9)$$

$${}^0f_r = \frac{1}{2} ({}^0f_{b1} - {}^0f_{b2}) \quad (10)$$

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

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

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

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

여기서,  ${}^0s_{bn}$ 과  ${}^0p_{bn}$ 는 좌우 가상 스틱 선단에서의 병진/회전 속도 벡터와 위치/자세 벡터이다.

이상으로부터 양팔 매니퓰레이터의 협조작업벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \begin{bmatrix} {}^0f_a^T & {}^0f_r^T \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$u = \begin{bmatrix} {}^0\Delta s_a^T & {}^0\Delta s_r^T \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$z = \begin{bmatrix} {}^0p_a^T & {}^0p_r^T \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

단, 외부 상태를 표시하는  ${}^0f_a$ ,  ${}^0s_a$ ,  ${}^0p_a$ 는 기준 좌표계, 내부 상태를  ${}^0f_r$ ,  ${}^0s_r$ ,  ${}^0p_r$ 는 대상물 좌표계로 표시한다.

## 2.2 외팔 유연 매니퓰레이터의 운동학

유연 매니퓰레이터 선단의 위치와 자세는 관절 각  $\theta_n$ 와 링크의 탄성 변형량  $e_n$ 으로 구할 수 있다<sup>(2)</sup> (3). 일반적으로 자세 각을 미분하면 각 속도 벡터를 구할 수 있다. 한편, 각 속도 벡터의 적분은 일률적인 자세 각을 구할 수는 없다. 그러므로,  $\Sigma_0$ 에 대한 매니퓰레이터 선단의 병진/회전 속도 벡터  ${}^0s_{hn}$ 과 선단의 위치/자세 벡터  ${}^0p_{hn}$ 의 미분치 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$\begin{aligned} {}^0s_{hn} &= B_s {}^0\dot{p}_{hn} \\ &= B_s J_{hn} \dot{q}_n \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,

$$J_{hn} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{hn}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial p_{hn}}{\partial e_n} \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$q_n = \begin{bmatrix} \theta_n^T & e_n^T \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$B_s = \text{diag}[I_3 \quad B_0] \quad (21)$$

이며,  $B_0$ 는 자세 각 성분의 시간에 대한 미분치를 각속도로 변환하는 행렬이다<sup>(7)</sup>.

## 2.3 페루프 운동학의 좌표 변환 관계 식

양팔 매니퓰레이터의 협조 제어계를 구성하기 위해서는 각 매니퓰레이터의 관절 변위, 속도 힘 센서의  $z$ ,  $u$ ,  $h$ 을 계산하는 관계식이 필요하다. 양팔 매니퓰레이터의 관절 토오크, 관절 각, 탄성 변형량, 유연 매니퓰레이터의 일반 좌표를 정리하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1^T & \tau_2^T \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1^T & \theta_2^T \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$e = \begin{bmatrix} e_1^T & e_2^T \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

$$q = \begin{bmatrix} \theta^T & e^T \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

각 매니퓰레이터 스틱 선단의 병진/회전 속도 벡터  $s_{bn}$ 는 각 매니퓰레이터의 관절 각 벡터  $q_n$ , 각 속도 벡터  $\dot{q}_{hn}$ 을 이용하여 식(18)과 같은 관계로부터 구할 수 있다. 그러므로 식(11), (12), (16)으로부터 협조 작업 속도 벡터  $u$ 와 좌우 매니퓰레이터의 속도 벡터  $\dot{q}$ 의 관계는 다음과 같이 기술할 수 있다<sup>(3)</sup>.

$$\begin{aligned} u &= J_\theta(q) \dot{\theta} + J_e(q) \dot{e} \\ &= J(q) \dot{q} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,  $J_\theta$  와  $J_e$  는  $\theta$  와  $e$  에 대한 Jacobian 행렬이며,  $J$  는  $q$  에 대한 Jacobian 행렬이다.

식(18)과 힘과 속도의 상관 관계(가상의 일)로부터,  $\tau$  와  $\eta$  는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_\eta = J_\theta^T \eta \quad (27)$$

### 3. 위치/힘의 하이브리드 협조 제어

본 연구에서 사용한 제어기는 Fig. 2 의 블록선도에서 보는 바와 같이 위치/힘 하이브리드 제어기와 진동 억제 제어기로 구성되었다. 하이브리드 위치/힘 제어기는 양팔 유연 매니퓰레이터의 운동학에 근거를 두고 있다. 한편, 진동 억제 제어기는 양팔 매니퓰레이터와 대상물의 운동방정식에 근거를 두고 도출 했다.

속도 입력형 서보 모터의 경우, 속도 입력치와 서보 모터의 출력 토오크와의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로, 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토오크를 계산한다.

$$\begin{aligned} \tau &= G_r K_{sp} (V_{ref} - K_{sv} \dot{\theta}_m) \\ &= A (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서,  $G_r$  는 모터의 감속비 행렬,  $K_{sp}$  는 속도 피드백 행렬,  $K_{sv}$  는 전압/속도 계수 행렬,  $\dot{\theta}_m = G_r \dot{\theta}$  는 모터의 감속 전의 회전 각 속도 벡터,  $\dot{\theta}_c$  는 속도 입력치,  $A = G_r^2 K_{sp} K_{sv}$  는 속도 피드백 이득 이다. 속도 입력 전압 벡터  $V_{ref}$  는

$$V_{ref} = G_r K_{sv} \dot{\theta}_c \quad (29)$$

이며, 전체 계의 입력 속도를  $\dot{\theta}_c$ , 대상물 위치 제어를 위한 입력 속도를  $\dot{\theta}_z$ , 힘 제어를 위한 입력 속도를  $\dot{\theta}_\eta$ , 진동 억제 제어를 위한 입력 속도를  $\dot{\theta}_{eh}$  라 정의한 경우

$$\dot{\theta}_c = \dot{\theta}_z + \dot{\theta}_\eta + \dot{\theta}_{eh} \quad (30)$$

로  $\dot{\theta}_c$  을 계산한다.

#### 3.1 위치 제어 입력치

식(26)에서 진동 억제 제어로 인하여  $\dot{e}$  가 미소하다 가정하여  $J_e \dot{e}$  항을 무시하면 대상물 위치

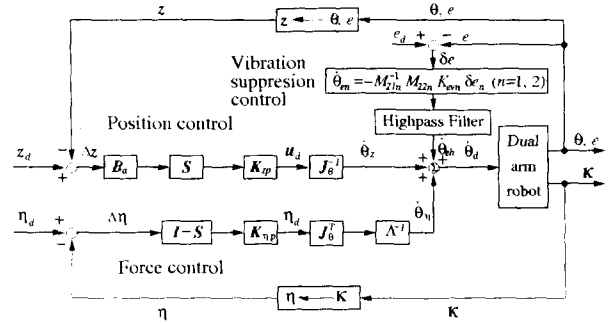


Fig. 2 Hybrid position/force and Vibration Suppression controller

제어를 위한 입력 속도  $\dot{\theta}_z$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_z = J_\theta^{-1} S K_{zp} B_a (z_d - z) \quad (31)$$

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

#### 3.2 힘 제어 입력치

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

$$\dot{\theta}_\eta = A^{-1} J_\theta^T (I_{12} - S) K_{mp} (\eta_d - \eta) \quad (32)$$

여기서  $\eta_d$  와  $\eta$  는 각각 목표와 현재의 힘 벡터,  $K_{mp}$  는 비례 이득,  $(I_{12} - S)$  는 내력 성분만을 선택하는 행렬이다. Fig. 5 의 제어계에서 좌우 매니퓰레이터의  $\kappa$  는 선단에서 힘/토오크 센서에 의해서 측정된 힘/토오크를 외력과 내력으로 분해하여 제어기에 피드백 하는 행렬이다.

#### 3.3 진동 제어 입력치

진동 제어 입력  $\dot{\theta}_{eh}$  은 양팔 유연 매니퓰레이터의 폐 루프 운동 방정식으로부터 계산한다. 이 폐 루프 운동 방정식은 양팔 유연 매니퓰레이터의 집중 질량 스프링 모델<sup>(2)</sup>, 강제 대상물의 운동방정식, 매니퓰레이터 선단과 대상물 간의 상대운동에 의한 기하학적인 구속 조건식으로부터 도출하며, 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$\tau = M_{11}(q) \ddot{\theta} + M_{12}(q) \ddot{e} + h_1(q, \dot{q}) + g_1(q) + J_{\theta r}^T(q) f_r \quad (33)$$

$$0 = M_{21}(q) \ddot{\theta} + M_{22}(q) \ddot{e} + h_2(q, \dot{q}) + K_{22}e + g_2(q) + J_{er}^T(q) f_r \quad (34)$$

여기서  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$ 은 관성 행렬,  $h_1$ ,  $h_2$ 은 원심력과 코리올리력등의 속도 의존항  $g_1$ ,  $g_2$  중력 벡터,  $K_{22}$ 은 스프링 정수 행렬,  $J_{\theta r}$ ,  $J_{er}$ 은  $\theta$ ,  $e$ 에 대한  ${}^a\Delta s_r$ 의 Jacobian 행렬을 나타낸다.

식(33), (34)에서 양팔 매니퓰레이터의 운동은 저속 운동으로 가정하면, 비선형 항  $h_1$ ,  $h_2$ 는 무시할 수 있다. 식(34)는 다음과 같이 표현할 수 있으며,  $\ddot{\theta} = -M_{21}^{\#}(q)M_{22}(q)\ddot{e} - M_{21}^{\#}(q)h_2(q, \dot{q}) - M_{21}^{\#}(q)K_{22}e - M_{21}^{\#}(q)g_2(q) - M_{21}^{\#}(q)J_{er}^T(q) f_r$  (35)

$M_{21}^{\#}$ 는  $M_{21}$ 의 일반화 역 행렬이다. 위식에 계산 토오크 방법의 개념<sup>(12)</sup>을 적용하면  $u_e$ 을 제어입력으로 간주하여 다음과 같은 비선형 피드백보상을 고려한다.

$$\ddot{\theta}_e = -M_{21}^{\#}(q)M_{22}(q) u_e - M_{21}^{\#}(q)h_2(q, \dot{q}) - M_{21}^{\#}(q)K_{22}e - M_{21}^{\#}(q)g_2(q) - M_{21}^{\#}(q)J_{er}^T(q) f_r \quad (36)$$

식 (34)에 모델의 오차가 포함되어 있지 않다면 위식에  $u_e$ 로서  $\ddot{e}_d$ 을 입력하면 진동을 제어할 수 있는 가속도  $\ddot{\theta}_e$ 을 구할 수 있다. 그러나, 모델 오차와 외란은 무시할 수 없으므로 서보 보상을 부가한다. 즉,  $u_e$ 을 다음과 같이 설계한다.

$$u_e = \ddot{e}_d + K_{ev}(\dot{e}_d - \dot{e}) + K_{ep}(e_d - e) \quad (37)$$

$K_{ev}$ 는 대각 속도 이득 행렬,  $K_{ep}$ 는 대각 위치 이득 행렬이다. (37)식에서 계산된  $u_e$ 를 (36)식에 대입하여  $\ddot{\theta}_e$ 를 계산한다. 만약 관절 각 가속도로서  $\ddot{\theta}_e$ 가 실현 가능하다면 다음과 같은 계를 구할 수 있다.

$$M_{21}^{\#}(q)M_{22}\{\ddot{e}_d - \ddot{e}\} + K_{ev}(\dot{e}_d - \dot{e}) + K_{ep}(e_d - e) = 0 \quad (38)$$

이 경우는  $K_{ev}$ ,  $K_{ep}$ 을 적당한 값으로 설정하므로서  $e$ 을  $e_d$ 에 수렴시킬 수 있다.

일반적으로 자유공간에서 운동하는 유연 매니퓰레이터의  $\ddot{e}_d$ 는 0 이나, 본 논문은 유연 매니퓰레이터가 중력과 구속력의 영향을 받음으로  $\ddot{e}_d$ 는

$\ddot{e}_0$ 로 간주할 수 있다. 그러므로 모델 오차와 외란은 무시할 수 없으므로 서보 보상을 부가하기 위하여 식(37)는 다음과 같이 다시 정의할 수 있다.

$$\Delta \ddot{e} + K_{ev}\Delta \dot{e} + K_{ep}\Delta e = 0 \quad (39)$$

여기서,

$$\Delta e = e - e_0$$

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

식(34)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M_{22}(q)\Delta \ddot{e} + K_{22}\Delta e = -M_{21}(q)\ddot{\theta}_e \quad (40)$$

시스템이

$$\text{rank } M_{21} = \text{dim}(e)$$

을 만족하면 식(35)으로부터  $\ddot{\theta}_e$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\theta}_{eh} = M_{21}^{-1} \{M_{22}(K_{ev}\Delta \dot{e} + K_{ep}\Delta e) - K_{22}\Delta e\} \quad (41)$$

여기서, 식(37)의 강성항만을 고려하여  $\theta$ 에 대하여 적분하면 진동 제어 입력  $\ddot{\theta}_{eh}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_e = M_{21}^{-1} M_{22} (K_{ev}\Delta e + K_{ep} \int_0^t \Delta e) \quad (42)$$

실험에서는  $\Delta e$ 은 식(39)으로부터 구할 수 있으나, 계산을 간단히 하기 위해서 1차 high-pass filter를 사용한다. 이 필터를 사용하면  $\Delta e$ 는

$$\Delta e = S_{\text{high}} e$$

이며, 식(42)에서 비례 성분만을 고려하면 진동 억제 입력은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta}_{eh} = S_{\text{high}} M_{21}^{-1} M_{22} K_{ev} e \quad (43)$$

#### 4. 실험 시스템

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)<sup>(13)</sup>는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 2개의 팔을 갖고

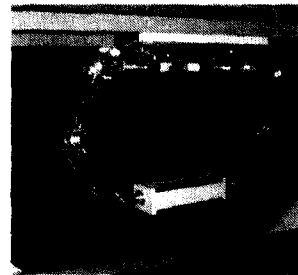


Fig. 3 A photograph of experimental setup

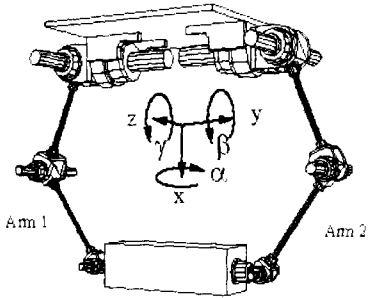


Fig. 4 Overview of a dual-arm manipulator

있으며, 각각의 팔은 2 개의 유연 링크와 7 개의 회전 관절로 구성되어 있다. Fig. 5 는 관절, 모터, 링크와 링크의 변형을 나타내는 그림이다. 관절 1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7 은 각각 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7 에 의해서 구동 된다. 이 모터는 서보 모터를 이용하고 있으며, 감속기를 내장하고 있다. 그 감속비는 1/80 이다. 관절 1~3 은 tachometer 와 optical encoder 를 내장, 관절 4~7 은 optical encoder 만 내장하고 있다. 모터의 회전 각속도는 관절 1~3 의 경우 내장 tachometer 로부터, 관절 4~7 의 경우는 내장 optical encoder 로부터 검출된 회전 각 펄스 신호를 F/V(Frequency to Voltage) 변환함으로서 검출되어서 보 앰프에 입력된다. 각 링크의 진동은 strain gauge 를 이용하여 검출하며, 매니퓰레이터의 선단에 작용하는 접촉력은 force/torque 센서를 이용하여 검출한다. Table 1 에 ADAM 와 대상물의 각각의 제원을 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 <sup>2</sup> ]	291.6
Bending stiffness of link 5	[N m <sup>2</sup> ]	102.1
Mass of elbow	[kg]	6.0
Mass of wrist and end-effector	[kg]	2.7
Mass of object	[kg]	0.45

본 논문에서는 관절 3 을 고정시켰으며, 각각의 팔을 6 자유도만으로 한정하여 논의한다.

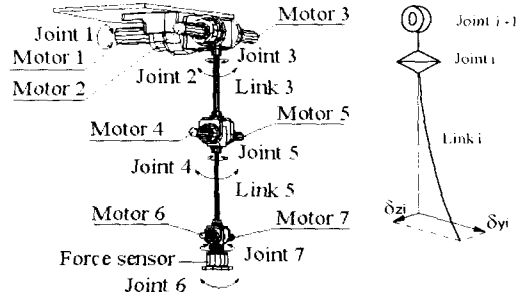


Fig. 5 Joint, motors, links and link deflections of Arm 2 (i = 3, 5)

### 5. 실험

2 장에서 제안한 양팔 매니퓰레이터의 협조 제어계의 유효성을 검증하기 위해 Fig. 3 의 실험기 ADAM 을 이용하여 3 차원 공간에서 강체 대상물을 파지하여 협조 제어를 행하였다. 실험 매니퓰레이터 ADAM 의 시스템에 대해서는 4 장에서 설명했으며 Fig. 5 는 오른쪽의 매니퓰레이터의 링크와 모터의 위치, 탄성 변형  $\delta_{yi}$ ,  $\delta_{zi}$  를 나타내고 있다. 본 절은 2 가지의 실험 결과를 나타내며, 첫 번째 실험은 진동 억제 제어의 유효성을, 두 번째는 대상물을 파지한 후 병진 운동과 회전 운동을 행하여 위치/힘의 협조 제어의 유효성을 검증하기 위함이다. 이 실험에서  $K_{cp} = 4.0I_{12} [s^{-1}]$ ,

$K_{np} = 0.4I_{12} [s^{-1}]$ ,  $K_{ev} = 40I_{24} [s^{-1}]$  와 high-pass filter 의 cutoff 주파수는 1 [Hz] 로 설정했다.

먼저, 첫 번째 실험은 매니퓰레이터가 불안정 상태인 경우, 진동 억제 제어의 효과를 나타낸다. 그 가진 방법으로는 사람의 손으로 좌측 매니퓰레이터 선단에 충격을 가하였다. Fig. 6 의 결과로부터 진동 억제 제어를 행하였을 경우, 진동이 감소하는 것을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안한 진동 억제 제어가 유효함을 알 수 있다.

두 번째 실험은 양팔 매니퓰레이터로 대상물을 파지한 후 병진 운동, 회전 운동에 대한 위치/힘의 협조 제어를 수행하였으며, Fig. 7 과 Fig. 8 은 협조 제어에 대한 위치/자세각, 힘/토크의 응답성 결과이다. 이 실험에서 목표 위치와 내력은 각각 다음과 같다.

$${}^0 p_{ad} = [850\text{mm } 0\text{mm } 0\text{mm } 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$$

$${}^0 f_{rd} = [0\text{N } 0\text{N } 0\text{N } 0\text{Nm } 0\text{Nm } -0.7\text{Nm}]^T$$

Fig. 7 은 내력이 목표치에 추종함을 나타낸다. 본 실험에서 외력은 대상물이 경량임으로 무시하였다.

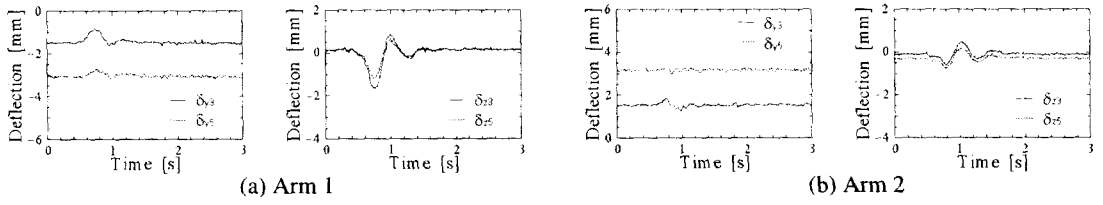


Fig. 6 Link deflections after disturbing

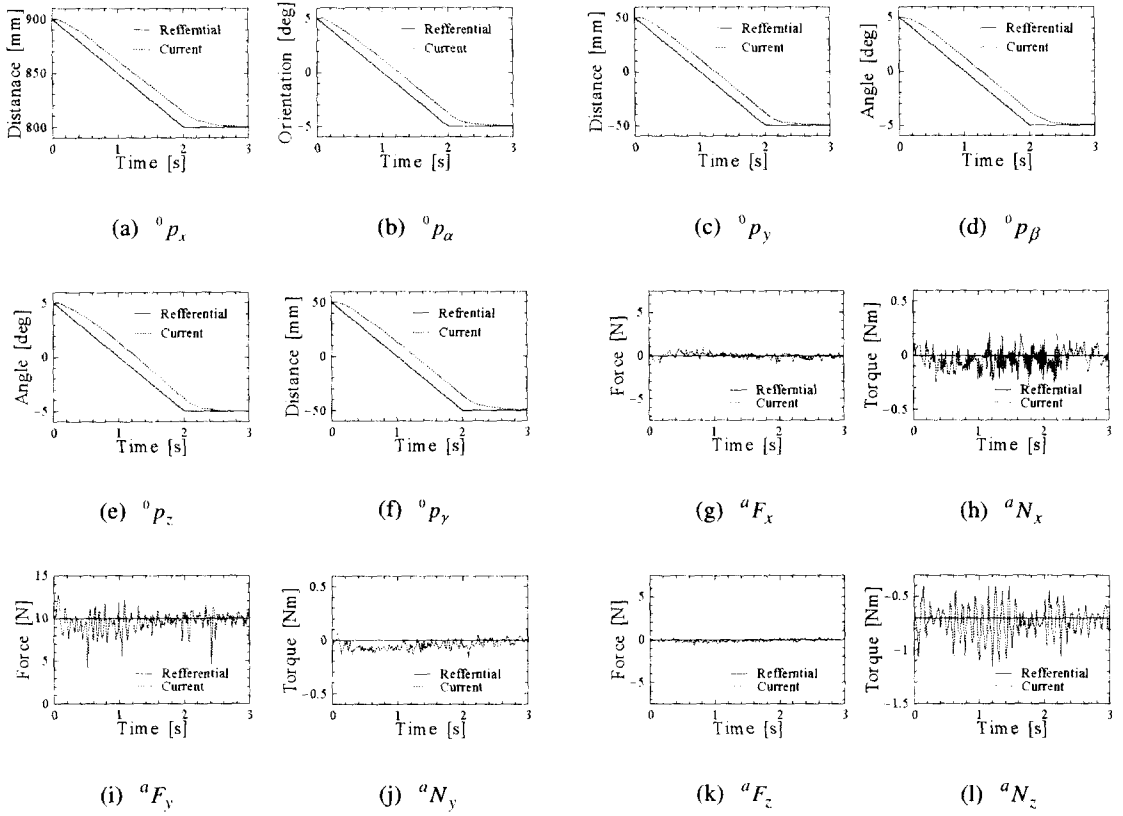


Fig. 7 Positions and forces while the object is translated and rotated

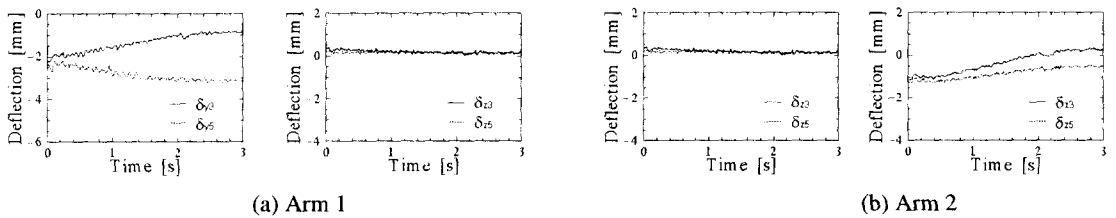


Fig. 8 Link deflections while the object is translated and rotated

$e_0$ 는 high-pass filter 에 의해서 제거했으며. 진동은 식(43)의 입력에 의해서 억제 제어되었다. 힘과 위치의 추종성에 있어서, 위치는 약간의 추종의 늦음이 있으나 힘과 위치에 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 논문의 양팔 유연 매니퓰레이터의 위치/힘 협조 제어 및 진동 억제 제어가 유효함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 우주 산업에 있어서 양팔 유연 매니퓰레이터의 실용화를 목적으로 개발한 ADAM 를 이용해서 3 차원 공간에서의 진동 억제 제어의 유효성을 보이기 위한 실험 및 위치/힘의 하이브리드협조 제어의 실험을 수행하였다. 본 논문에서의 진동 억제 제어는 양팔 매니퓰레이터와 대상물의 페루프 운동 방정식으로부터 도출했다. 본 논문에서는 시스템의 안정성에 대해서 이론적으로 입증하지는 못했지만, 실험 결과들로부터 제안한 협조 제어기가 실질적으로 대상물의 매니퓰레이션에 유효함을 나타냈다. 또한 제안한 진동 억제 제어기의 유효성을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Bayo, E., "A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot," J. of Robotic system, Vol. 4-1, pp. 63 - 75, 1987.
2. Kim J. S., Konno A. and Uchiyama M., "Precise Lumped-Parameter Modeling of Flexible Manipulator Dynamics," J. of JSME (c), Vol. 62, No. 602, pp. 4005 - 4011, 1996.
3. Kim, J. S., Suzuki, K., Yamano, M., and Uchiyama, M., "Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators," Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2831 - 2837, 1997.
4. Nakano, E., Ozaki, S., Ishida, T., and Kato, I., "Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator 'MELARM'," Proc. of 4th Int. Symo. on Industrial Robot, pp. 251 - 260, 1974.
5. Bonitz, R. G., and Hisa, T. C., "Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 12, No. 1, pp. 78 - 89, 1996.
6. Hayati, S., "Hybrid Position/Force Control of Multiple Arm Cooperating Robots," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 89 - 92, 1986.
7. Uchiyama, M., and Dauchez, P., "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, 1988.
8. Zheng, Y. F., and Luh, J. Y. S. "Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 344 - 349, 1988.
9. Matsuno, F., Asai, N., Hatayama, M., and Sakawa, Y., "Quasi-Static Control of Cooperative Multiple Two-Link Flexible Manipulator Whose Second Links are on a Straight Line," IFAC Symp. on Robot Control '94, pp. 1011 - 1016, 1994.
10. Sur, S., and Murray, R. M., "An Experimental Comparison of Tradeoffs in Using Compliant Manipulators for Robotic Grasping Tasks," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1807 - 1814, 1997.
11. Kim, J. S and Uchiyama, M., "Dynamic Modeling of Two Cooperative Flexible Manipulators," KSME Int. Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 186 - 196, Korea, 2000.
12. B.R. Marikiewicz, "Analysis of computer torque drive method and comparison with conventional position servo for a computer-controlled manipulator," Technical report, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA Tech. 33-669. 1973.
13. Uchiyama, M., Konno, A., Uchiyama T., and Kanda, S., "Development of a flexible dual-arm manipulator testbed for space robotics," Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems, pp. 375 - 381, 1990.