

구속받는 3차원 유연 매니퓰레이터의 컴플라이언스 해석

김진수*

(논문접수일 2006. 1. 11, 심사완료일 2006. 3. 27)

Compliance Analysis of Constrained Spatial Flexible Manipulators

Kim Jin-Soo*

Abstract

The aim of this paper is to clarify the structural compliance of the constrained spatial flexible manipulator and to develop the force control by using the compliance of the links. Using the dependency of elastic deflections of links on contact force, vibrations for constrained vertical motion have been suppressed successfully by controlling the position of end-effector. However, for constrained horizontal motion, the vibrations cannot be suppressed by only controlling position of end-effector. We present the experimental results for constrained vertical motion, and constrained horizontal motion. Finally, a comparison between these results is presented to show the validity of link compliance.

Key Words : Structural compliance(구조적 컴플라이언스), Spatial flexible manipulator(3차원 유연 매니퓰레이터), Vertical motion(수직운동), Horizontal motion(수평운동), Experimental result(실험결과)

1. 서론

최근 노령인구의 급격한 증가와 가족의 핵가족화로 말미암은 노인들의 복지 및 개호문제는 중차대한 문제로서 복지/재활 로봇은 현재 큰 관심을 끌고 있다. 또한 내년부터는 외부환경을 인식하고 스스로 상황을 판단, 자율적으로 움직이거나 인간과 상호작용을 하는 가정용 지능로봇이 일반 가정에 보급될 것이다.

이와 같이 로봇은 우리 실생활에 밀접하게 다가오고 있으며, 인간과 거의 흡사하게 생각하고 행동하는 로봇(휴머노이드)

의 출현은 이제 멀지 않았다. 특히 인간의 생활환경에 이용되는 로봇은 안정성이 가장 중요한 문제이며, 인간과 주변 환경에 위험을 주지 않는 기능이 필요할 것이다. 또한 위험한 동작을 피하는 기술은 필요 불가결하다. 이러한 기능을 갖고 있는 로봇이라 할지라도 만일의 경우 인간 또는 구속환경에 충돌하였을 경우에도 피해를 최소화해야 할 것이다. 경량화 및 에너지 절약 등과 같은 장점으로 인해서 우주로봇으로 많은 연구가 진행된 유연 매니퓰레이터는 링크의 유연성을 이용하여 안전하며 인간생활 및 환경에 친화적 로봇으로서 가능성을 충분히 활용할 수 있다. 유연 매니퓰레이터가

* 전주대학교 기계자동차공학과 (jskim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

환경과 접촉하여 작업을 수행할 경우, 매니플레이터 유연성은 모델링 오차 및 환경의 미세한 변화를 흡수하는 등 유효하게 작용할 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 구속된 환경에서 유연 매니플레이터의 컴플라이언스에 대해서 논의하고자 한다.

Fukuda는 유연 2링크 매니플레이터를 이용하여 접촉 작업의 실험을 수행하였다⁽¹⁾. Komatsu는 2차원 유연 매니플레이터를 이용하여 링크의 유연성에 따른 컴플라이언스를 고려한 컴플라이언스제어를 제안하였다⁽²⁾. Choi는 유연 2링크 매니플레이터의 힘제어에 있어서의 안전성을 해석하였다⁽³⁾. Kojima는 강체링크와 유연링크로 구성된 매니플레이터를 이용하여 링크의 탄성변형 피드백방식의 힘제어(PIS 제어)를 제안하였다⁽⁴⁾. Matsuno는 1링크 또는 2링크로 구성된 유연 매니플레이터에 대해서 분포정수법을 이용하여 모델을 작성하여 위치/힘 병렬제어법 및 강력(Robust)제어법을 제안하였다⁽⁵⁾. 그 밖의 연구에 있어서도 평면에서 작업을 수행하는 유연 매니플레이터의 위치/힘 제어에 관한 많은 연구가 수행되었다⁽⁶⁻⁹⁾. 유연 매니플레이터의 힘제어를 실제의 작업에 응용하고자 3차원으로 위치/힘제어를 확장하여 연구가 진행되고 있다. 또한 유연 링크의 유연성을 활용한 적극적인 유연매니플레이터의 위치/힘제어의 연구 성과는 있으나 아직은 미미한 수준이다^(10,11).

3차원 공간에서 작업을 수행하는 유연 매니플레이터의 구조적인 컴플라이언스 특성의 파악 및 컴플라이언스를 이용한 효과적인 힘 제어에 관해서 논의 하고자 한다. 이를 위해서 본 논문에서는 3차원 공간에서의 유연 매니플레이터의 링크 유연성에 따른 선단의 컴플라이언스를 해석한다. 또한, 해석 결과를 실험 장치에 적용하여 링크의 유연성의 유효성을 검증한다.

2. 컴플라이언스

2.1 유연 매니플레이터의 운동학

본 논문에 있어서, 매니플레이터 선단의 위치와 자세를 나타내는 벡터 p 는 다음과 같다.

$$p = [x^T \phi^T]^T \quad (1)$$

여기서, x 는 선단의 위치, ϕ 는 자세를 나타내는 3차원 벡터이다. 유연 매니플레이터의 일반좌표 q 는

$$q = [\theta^T e^T]^T \quad (2)$$

이며, θ 는 m 차원 관절각 벡터($\theta \in \mathbb{R}^m$), e 는 n 차원 탄성벡터이다($e \in \mathbb{R}^n$).

일반적으로 자세 각을 미분하면 각 속도 벡터를 구할 수 있다. 한편, 각 속도 벡터의 적분은 일률적인 자세 각을 구할 수는 없다. 매니플레이터 선단의 병진/회전 속도벡터 v 와 선단의 위치/자세벡터 p 의 미분치 관계는 다음과 같이 표현된다⁽¹¹⁾.

$$\begin{aligned} v &= B_s \dot{p} \\ &= B_s J_p \dot{q} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} J_p &= \left[\frac{\partial p}{\partial \theta} \quad \frac{\partial p}{\partial e} \right]^T \\ B &= \text{diag} [I_3 B_0] \end{aligned}$$

이며, B_0 는 자세각 성분의 시간에 대한 미분치를 각속도로 변환하는 행렬이다.

또한 매니플레이터 선단 자세각의 미분치가 아닌 각속도 벡터를 이용하여 속도벡터 v 를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v &= [u^T \omega^T]^T = J_q \dot{q} \\ &= J_\theta(q)\dot{\theta} + J_e(q)\dot{e} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 u 와 ω 는 각각 선단의 속도와 각속도 벡터, $J = [J_\theta \ J_e]$, $J_\theta \in \mathbb{R}^{6 \times m}$, $J_e \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 는 θ , e 에 대한 Jacobian행렬이다. 그러나 적은 자유도의 매니플레이터에 있어서, 선단 위치만을 고려하는 경우와 선단의 회전축 방향이 변하지 않는 경우에는 본질적으로 J_p 는 J 와 동일하다.

2.2 컴플라이언스

Fig. 1과 같이 탄성 변형하는 유연 링크 i ($= 1, 2, \dots, n$)을 갖는 매니플레이터를 고려하자. 유연 링크는 힘과 모멘트의 관계로부터 선단의 위치, 자세가 변화하면 링크의 탄성벡

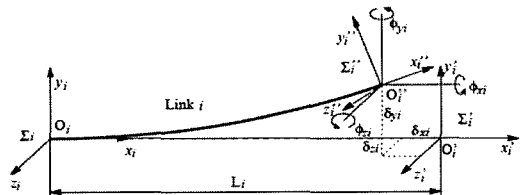


Fig. 1 Displacement at the tip of the link

터를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = [\delta_{xi} \delta_{yi} \delta_{zi} \phi_{xi} \phi_{yi} \phi_{zi}]^T \quad (5)$$

여기서, $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ 는 링크 i 의 x 축, y 축, z 축 방향의 탄성변위이며, $\phi_{xi}, \phi_{yi}, \phi_{zi}$ 는 링크 i 의 x 축, y 축, z 축 방향의 탄성 변위각을 나타낸다.

전체 유연 매니플레이터의 탄성벡터는

$$e = [e_1^T e_2^T \dots e_n^T]^T \quad (6)$$

이다. 또한 각 링크의 변형은 링크의 길이에 비해서 충분히 작으며, 링크 i 의 선단에 힘/모멘트벡터 f_{li} 가 작용할 경우 탄성벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = C_l [f_{l1}^T f_{l2}^T \dots f_{ln}^T] \quad (7)$$

여기서, $C_l \in \mathbb{R}^{n \times 6}$ 은 링크의 구조적인 특성에 의해서 결정되는 강성행렬이다. 매니플레이터 선단의 기구적인 컴플라이언스를 나타내는 C_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽²⁾.

$$C_s = J_e(\theta, e) C_l J_e^T(\theta, e) \quad (8)$$

여기서 $C_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 이며 선단의 컴플라이언스는 관절 각도에 의존한다.

3. 실험시스템

3.1 실험기 ADAM

본 연구에 사용된 유연 매니플레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)⁽¹²⁾는 2개의 팔을 갖고 있으며, 각각의 팔은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다. 본 논문에서는 왼쪽 매니플레이터만을 고려한다(Fig. 2). Fig. 3은 실험기 ADAM의 궤환 제어제이다. 관절1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7은 각각 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동 된다. 이 모터는 서보 모터를 이용하고 있으며, 감속기를 내장하고 있다. 관절 1~3은 tachometer와 optical encoder를 내장, 관절 4~7은 optical encoder만 내장하고 있다. 모터의 회전 각속도는 관절 1~3의 경우 내장 tachometer로부터, 관절 4~7의 경우는 내장 optical encoder로부터 검출된 회전 각 펄스 신호를 F/V(Frequency to Voltage) 변환함으로써 검출되어 서보 앰프에

입력된다. 각 링크의 진동은 strain gauge를 이용하여 검출하며, 매니플레이터의 선단에 작용하는 접촉력은 Force/torque 센서를 이용하여 검출하나, 본 논문에서는 사용하지 않는다. Table 1과 Table 2에 ADAM의 제원과 모터의 제원을 나타냈다.

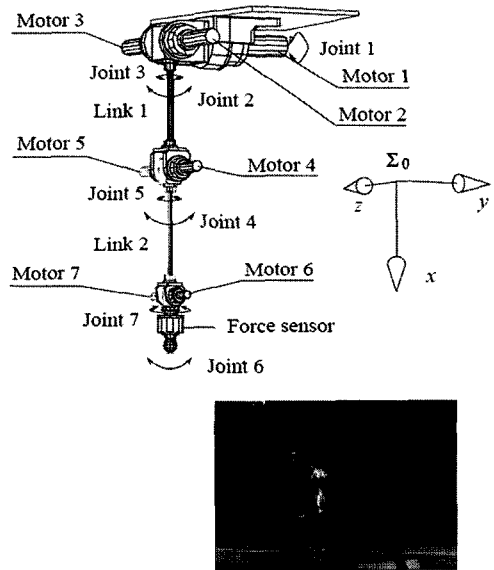


Fig. 2 Right arm of ADAM

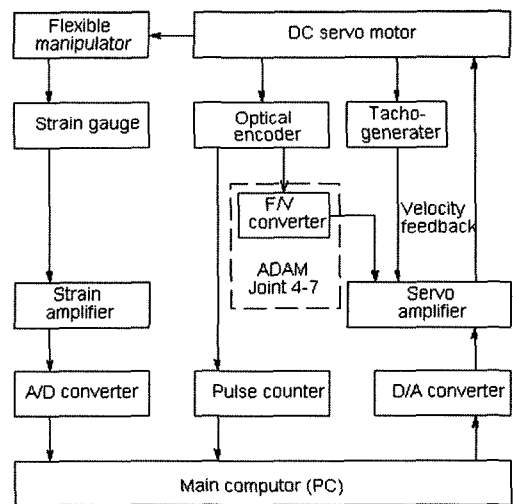


Fig. 3 The feedback control system

3.2 제어 입력치

속도 입력형 서보 모터의 경우, 속도 입력치와 서보 모터의 출력 토오크의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토오크를 계산한다⁽¹⁰⁾.

$$\tau = G_r K_{sp} (V_{ref} - K_{sv} \dot{\theta}_m) = \Lambda (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}) \quad (9)$$

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 각속도 벡터, $\dot{\theta}_c$ 는 속도 입력치, $\Lambda = G_r^2 K_{sp} K_{sv}$ 는 속도 궤환 이득이다. 속도 입력 전압 벡터 V_{ref} 는 다음과 같다.

$$V_{ref} = G_r K_{sv} \dot{\theta}_c \quad (10)$$

전체 시스템의 입력속도 $\dot{\theta}_c$ 는 링크의 유연성을 이용한 작업을 수행하므로 선단의 위치제어만을 고려하면 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_c = J_\theta^+ [K_{rp} B(p_d - p) - J_e \dot{e}] \quad (11)$$

여기서, J_θ^+ 는 J_θ 의 일반 역행렬, p_d 와 p 은 목표, 현재 위

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

Table 2 ADAM joint parameters

	Joint1	Joint2,3	joint4,5	joint6,7
Rated Power [W]	200	110	40	11
Rated velocity [rpm]	30	30	30	60
Max. velocity [rpm]	50	50	50	100
Rated torque [kgm]	6.5	3.5	1.35	0.18
Max. inst. torque [kgm]	56.0	37.0	8.0	0.8
Reduction ratio	1/100	1/100	1/100	1/50

치벡터, K_{rp} 는 비례 이득, B 는 위치오차중의 선단의 자세각 성분을 회전벡터로 변환하는 행렬이다.

3.3 실험기 ADAM의 컴플라이언스

식 (8)에서 매니퓰레이터 선단의 기구적인 컴플라이언스 C_s 의 좌측 상부 3×3 소행렬로부터 선단에 작용하는 힘에 대한 위치의 컴플라이언스 타원체 즉, 단위력 벡터가 작용한 경우에 대한 선단의 탄성변위 벡터 궤적을 구할 수 있다. 그림 4는 실험기 ADAM에 대해서 계산한 컴플라이언스의 타원체를 $x-y$ 평면, $x-z$ 평면에 투영한 것이다. 단, 각 링크의 길이 방향의 탄성변형 값 δ_{xi} 은 무시할 수 있을 정도의 작은 값이라 가정하였다. Fig. 4와 같은 자세의 경우, 컴플라이언스가 방향에 따라서 크게 다른 것을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 방법

이 실험에서는 실험기 ADAM이 갖고 있는 여유자유도는 이용하지 않고, 관절 3을 일정한 각도를 유지하면서 실험한다. 링크의 유연성을 이용한 작업을 수행하므로 각 관절에 속도 입력치는 식 (11)로부터 다음과 나타낼 수 있으며, 링크의 탄성변위를 무시한 위치 피드백제어를 수행한다.

$$\dot{\theta}_c = J_\theta^+(\theta, 0) [K_{rp} B(p_d - p(\theta, 0))] \quad (13)$$

접촉하여 이동작업을 수행하는 경우, 구속환경의 법선벡터의 방향에 대해서 충분히 큰 컴플라이언스를 가질 필요가 있다. 이 실험에서는 구속면을 그림 4의 점선 a, 점선 b에 대해서 모두 평행한 평면으로 $x-z$ 평면과 45°을 이루는 평면으로 한다. 선단의 이동 방향은 점선 a에 평행한 방향(실

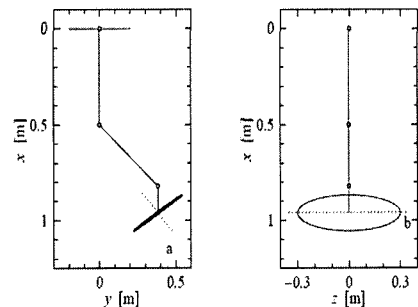


Fig. 4 Compliance ellipsoid

힘 A) 및 점선 b에 평행한 방향(실험 B)로 한다. 실험 A와 실험 B에 있어서 각각의 진행방향으로 2[s]동안 0.1[m]을 접촉 이동하는 목표궤도를 부여한다. 이 실험에 있어서 위치 제어의 이득은 $K_p = 4.0I_0[s^{-1}]$ 로 설정했다.

4.2 결과 고찰

Fig. 5와 Fig. 6은 실험 A와 실험 B에서의 매니퓰레이터 선단의 구속력과 링크의 탄성변위의 실험 결과의 응답을 나타낸다. 단, 링크의 탄성변위는 각각의 실험에서 변화폭이 큰 방향에 대한 실험결과이다. 또한 Fig. 1에 표시한 링크의 좌표계 Σ_i 는 Fig. 2의 자세이며 Fig. 2의 Σ_0 에 평행하게 한다. Fig. 5 (a), Fig. 6 (a)로부터 실험 A와 실험 B 모두 구속면에 과대한 힘이 작용하면서 구속 면으로부터 떨어지지 않고 접촉하여 이동함을 알 수 있다. 단, Fig. 4 (a)와 같이 컴플라이언스가 작은 실험 A에서는 Fig. 5 (b)와 같이 탄성변위가 부드럽게 변화하였으나, Fig. 4 (b)와 같이 컴플라이언스가 큰 실험 B에서는 Fig. 6 (b)로부터 선단에 진동이 발생하였음을 알 수 있다. 컴플라이언스가 작은 경우에는 매니퓰레이터의 운동과 탄성변위가 구속환경의 영향을 많이 받으나, 컴플라이언스가 큰 경우에는 구속환경의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 제어 입력치를 나타내는 식 (13)에는 탄성변위를 보상하는 값이 없으므로 링크의 진동은 선단위치의 추종성이 좋지 않다. 또한 Fig. 5 (a), (b)와 Fig. 6 (a), (b)에서, 0[s]부근과 3[s]부근에서 값이 상이한 것은

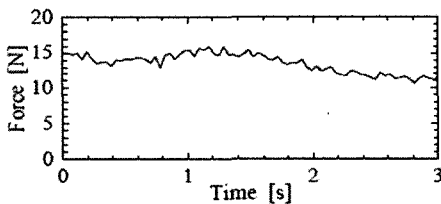
매니퓰레이터의 자세 변화에 의해서 동반하는 중력의 영향이 변화하며, 컴플라이언스 타원체가 변화함으로 발생한다고 생각할 수 있다.

2차원 평면 내에서는 접촉이동 작업을 수행할 구속면이 결정됨과 동시에 이동 진행방향이 결정되나, 3차원 공간 내에서는 접촉이동 방향을 선택할 수 있다. 접촉하여 이동하는 작업방향을 결정할 경우, 컴플라이언스 타원체를 고려해서, 실험 A 같이 컴플라이언스가 작은 방향을 선택하여 관찰각만을 제어함으로써 별도의 힘/모멘트 센서를 사용하지 않고도 접촉이동 작업을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

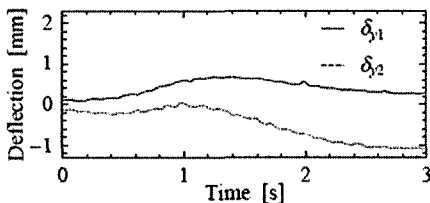
5. 결론

힘/모멘트 센서를 이용하여 제어를 수행할 경우 사용하는 센서는 고가의 장비이고 직렬형 매니퓰레이터의 경우 센서가 장착된 선단의 강성 증대로 인해 진동을 유발시킴으로서 위치제어에 불리하게 작용한다. 그러나 유연 매니퓰레이터의 경우 링크의 컴플라이언스를 이용하여 힘제어를 수행할 경우, 환경에도 친화적이면서 로봇의 경량화화 시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 3차원 유연매니퓰레이터의 링크 유연성에 의한 컴플라이언스 특성을 해석하였다. 또한, 매니퓰레이터 선단의 힘/모멘트와 링크의 탄성 변위를 피드백하지 않고 링크의 유연성만을 이용해서 접촉 이동작

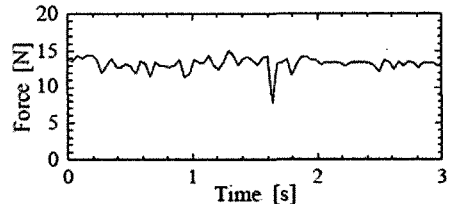


(a) constrained force

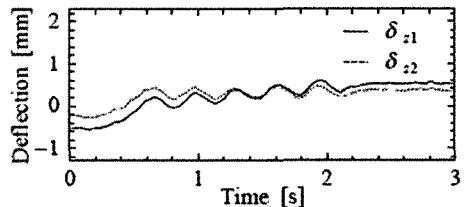


(b) link deflection

Fig. 5 Results of experiment A



(a) Constrained force



(b) link deflection

Fig. 6 Results of experiment B

업 실험을 수행하였다.

매니퓰레이터의 컴플라이언스 특성을 파악해서 접촉 이동 작업에 알맞은 위치 및 이동 방향을 선택함으로써 힘/모멘트 센서를 사용하지 않고도 관찰각도만을 이용해서 간단하게 접촉 이동 작업을 실현할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Fukuda, T., 1985, "Flexibility Control of Elastic Robotic Arm," *J. of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 73~81.
- (2) Komatsu, T., Uenohara, M., Imura, S., Miura, H. and Shimoyama, I., 1990, "Compliance Control of Flexible Two-Link Manipulators," *Transactions of the JSME(C)*, Vol. 56, No. 530, pp. 26422~648.
- (3) Chiou, B. C. and Shahinpoor, M., 1990, "Dynamic Stability Analysis of a Two-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," *Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 661~666.
- (4) Kojima, H. and Kawanabe, T., 1992, "Position and Force Control of Flexible Robot Arm with PIS Control," *J. Robotics Society of Japan*, Vol. 10, No. 3, pp. 353~360.
- (5) Matsuno, F., Asano, T. and Sakawa, Y., 1994, "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.
- (6) Richter, F. and Pfeiffer, F., 1991, "A Flexible Link Manipulator as a Force Measuring and Controlling Unit," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1214~1219.
- (7) Bossert, D., Ly, U. L. and Vagners, J., 1996, "Experimental Evaluation of Robust Reduced-Order Hybrid Position/Force Control on a Two-Link Flexible Manipulator," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2573~2578.
- (8) Kim, J. S., Suzuki, K., Konno, A. and Uchiyama, M., 1996, "Force Control of Constrained Flexible Manipulators," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 635~640.
- (9) Yoshikawa, T., Harada, K. and Matsumoto, A., 1996, "Hybrid Position/Force Control of Flexible Macro/Rigid Micro Manipulator Systems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 4, pp. 633~639.
- (10) Kim, J. S., Suzuki, K., Yamano, M. and Uchiyama, M., 1997, "Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2831~2837.
- (11) Yoshikawa, T., 1998, *Foundations of Robot Control*, Corona Publishing Co., pp. 46~57.
- (12) Uchiyama, M., Konno, A., Uchiyama, T. and Kanda, S., 1990, "Development of a flexible dual-arm manipulator test bed for space robotics," *Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems'90*, pp. 375~381.