한국공작기계학회지 Vol.19 No.4 2010. 8. pp. 449~454
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

구속 받는 3차원 유연 매니퓰레이터 선단의 마찰에 관한 연구

김진수*

(논문접수일 2010. 1. 19, 심사완료일 2010. 5. 24)

A Study on End-effector Friction of Constrained Spatial Flexible Manipulator

Jinsoo Kim*

Abstract

The force control of a constrained flexible manipulators has been one of the major research topics. However, a little effort has been devoted for the relation between friction force and elastic deflection of end-effector for a constrained flexible manipulator. So, the aim of this paper is to clarify the friction mechanism of a constrained spatial multi-link flexible manipulator by changing the material and connected method of end-effector. In this study, a concise hybrid position/force control scheme is applied to the control of a flexible manipulator, and the experimental results for the constrained vertical motion and constrained horizontal motion is presented. Finally a comparison between these results are presented to show the reduction of vibration of link and friction force.

Key Words : Flexible manipulator(유연 매니퓰레이터), Friction force(마찰력), Elastic deflection(탄성 변형), End-effector(선단), Hybrid postion/force control(병합 위치/힘 제어)

1. 서 론

우리나라 우주개발은 미국 등 선진 우주개발국에 비해 30~40년 늦은 1990년부터 본격적으로 시작했지만 현재 비약적인 성과를 이뤄가고 있다. 최근 2008년도 이소연 여자 우주비행사가 우주로 간 것부터 나로호 발사 등은 우주에 대하여 관심을 증대시키는 계기가 되었다.

우주개발 시대의 도래는 먼 미래가 아닌 가까운 장래에 현실화 될 것이다. 우주 공간은 무중력, 직접적으로 내리 쬐는 뜨거운 태양광선과 같은 환경이며, 이러한 환경에서 우주 정거장등과 같은 구조물 건설 등의 작업을 인간을 대신해서 수행하기 위한 다양한 로봇의 연구가 요구되어져 왔다. 이러한 관점에서 우주공간에 발사되는 로켓의 운반능력의 제한에 따른 경량화와 탑재 가능한 에너지의 제한으로 인해서 유연 매니퓰레이터의 연구가 활발히 진행되어져 왔다.

초기의 유연 매니퓰레이터의 연구는 링크의 진동을 분석

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

하고 억제하기 위한 모델링 방법과 진동제어가 진행되었다[1]. 현실적인 작업환경에서 유연 매니퓰레이터를 적용하기 위한 시도로서 위치/힘제어와 협조제어가 하나의 중요한 테마로서 연구되고 있다. 유연 매니퓰레이터의 힘제어는 단순히 강체 매니퓰레이터의 위치/힘제어를 유연 매니퓰레이터에 적용한 연구[2,3,4], 위치제어에는 강체 링크를, 작업환경과 매니퓰레이터 선단의 힘제어에는 유연 링크를 적용하여 혼합한 마크로-마이크로 매니퓰레이터의 연구[5]를 수행한 반면 유연 매니퓰레이터의 단점으로 인식되었던 링크의 탄성을 위치/힘제어에 활용한 연구[6] 등이 있다.

유연 매니퓰레이터의 위치/힘제어는 탄성링크의 변형 및 진동으로 인해서 강체 매니퓰레이터의 위치/힘제어 보다 시스템이 불안정하게 된다. 또한, 매니퓰레이터의 선단과 구속환경 간의 발생하는 마찰력도 시스템을 불안정하게 하는 원인이라 예상된다. 유연 매니퓰레이터 선단의 마찰력과 링크의 탄성 변형과의 관계를 파악하고, 그 결과를 활용해서 링크의 진동을 최소화시킬 수 있다면 유연 매니퓰레이터의 위치/힘제어 시스템을 더욱 안정화시킬 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 구속환경과 유연 매니퓰레이터 선단의 변화에 의해서 발생하는 마찰력의 특성을 파악하고 마찰력이 링크의 탄성변형에 어떠한 영향에 미치고 있는지 논의하고자 한다.

본 실험에 사용한 모델로서는 집중 정수 모델법의 하나인 집중 스프링 질량 모델(Lumped Spring Mass Model)을 이용하였다. 이 모델을 실험기인 유연 매니퓰레이터 ADAM (Aerospace Dual Arm Manipulators)[4]에 적용하여 실시간 위치/힘 제어 실험을 수행하였다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)는 2개의 암을 갖고 있으며, 각각의 암은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다[7]. Fig. 1은 실험기 ADAM의 한쪽 매니퓰레이터를 이용한 실험 시스템 및 구속환경의 외관의 개략도를 보여준다. 매니퓰레이터의 관절 1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7은 각각의 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동된다. 구동모터는 1/80의 감속비를 가지고 있는 감속기 내장형 DC 서보모터를 이용하고 있다. 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

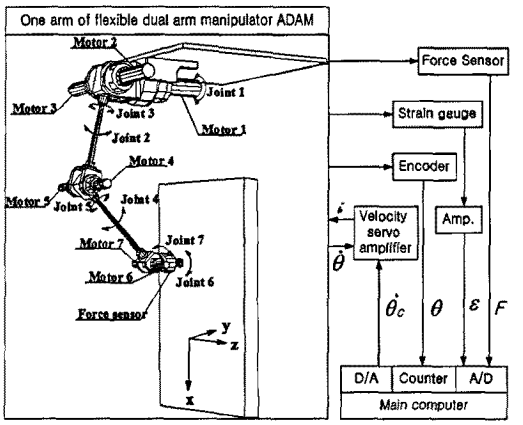


Fig. 1 Overview of experimental robot system

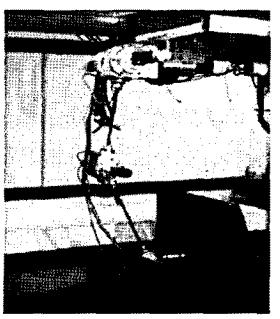


Fig. 2 A photograph of experimental robot setup

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

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, 매니퓰레이터의 선단에 작용하는 힘은 Force/Torque 센서를 이용하여 검출한다. Table 1에 ADAM의 제원, Table 2에 모터의 제원,

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

Table 3 Specification of Force/Torque Sensor

Rated load (R.C)	F_x, F_y	100 [kgf]
	F_z	40 [kgf]
	T_x, T_y, T_z	150 [kgf·cm]
Resolution	0.8% R.C	
Safe Overload	500% R.C (Only F_z 200% R.C)	
Dimension	$\phi 76 \times 47.5$ [mm]	
Mass	0.36 [kg]	

Table 3에 Hitachi사 6축 Force/Torque 센서 LSA 6000A 제원을 나타냈다.

3. 위치/힘의 하이브리드 제어계

속도 입력형 서보모터의 경우, 속도 입력치와 서보모터의 출력 토크의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토크를 계산한다[4].

$$\tau = G_r K_{sp}(V_{ref} - K_{sv}\dot{\theta}_m) = \Lambda(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}) \quad (1)$$

여기서, G_r는 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.

$$V_{ref} = G_r K_{sv}\dot{\theta}_c \quad (2)$$

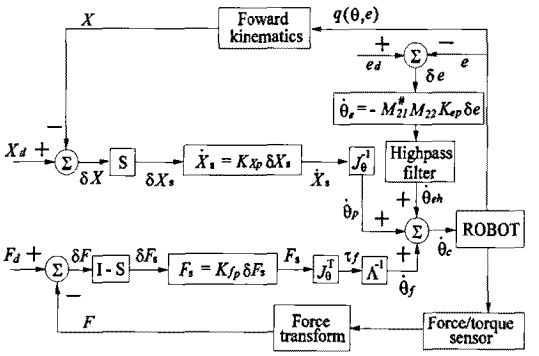


Fig. 3 Hybrid Position/force controller

전체 시스템의 입력속도를 $\dot{\theta}_c$는

$$\dot{\theta}_c = \dot{\theta}_p + \dot{\theta}_f + \dot{\theta}_{eh} \quad (3)$$

이며, $\dot{\theta}_p$는 매니퓰레이터 선단 위치를 제어하기 위한 입력속도, $\dot{\theta}_f$는 힘 제어를 제어하기 위한 입력속도, $\dot{\theta}_{eh}$는 진동제어를 위한 입력속도는 각각 다음과 같다[4,6].

$$\dot{\theta}_p = J_\theta^{-1} S[K_{Xp}(X_d - X)] \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_f = \Lambda^{-1} J_\theta^T (I - S)[K_{fp}(F_d - X)] \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_e = -M_{21}^{\#} M_{22} K_{ep}(e_d - e) \quad (6)$$

여기서, J_θ는 θ에 대한 Jacobian행렬이며, K_{Xp}, K_{fp}와 K_{ep}는 각각의 비례 이득, X_d와 X는 각각 목표와 현재 위치 벡터, F_d와 F는 각각 목표와 현재 힘 벡터, e_d와 e는 각각 목표와 현재 탄성변형 벡터, M_{21}는 M_{21}의 일반 역행렬, S와 $(S-I)$는 각각의 매니퓰레이터 선단 위체제어 방향과 힘제어 방향을 선택하는 행렬을 정의한다.

Fig. 3에 유연 매니퓰레이터의 위치/힘 제어계의 블록선도를 나타낸다. 본 논문에서 매니퓰레이터 선단의 변화에 따른 구속환경 간의 마찰력만을 분석하기 위해 식(6)의 진동제어는 고려하지 않는다. 만약, 논의 대상을 진동억제까지 확장한다면 Fig. 3에서와 같이 진동 억제제어 루프는 필요할 것이다. 링크의 변형은 매니퓰레이터의 운동에 의해 발생하는 탄성변형(진동)과 중력의 영향에 의한 변형이 있다. 매니

플레이터의 진동만을 억제하기 위해서 Fig. 3의 제어계에서 high pass filter를 사용하여 중력의 영향에 의한 변형 성분을 제거한다.

4. 실험결과 고찰

본 실험에서는 관절 2, 4, 6만을 이용한다. 또한 매니퓰레이터 선단은 구속환경으로부터 떨어진 상태에서 시작하여 $x-z$평면에 고정된 구속환경에 접촉한 후 일정한 힘을 가하면서 이동하는 작업을 수행한다. 단, 관절 6은 매니퓰레이터 선단이 벽면에 $\pi/2$[rad]의 각도를 유지하도록 제어한다. 수직한 구속환경은 매니퓰레이터로부터 y방향으로 0.375[m]에 위치해 있다. 본 논문에서는 3차원 공간의 실험을 실시간으로 간단히 수행하기위해 관절 2, 4, 6만을 이용하며 관절각 θ와 링크 탄성변위 e는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta_2\ \theta_4\ \theta_6],\quad \delta = [\delta_{y3}\ \delta_{z3}\ \delta_{y5}\ \delta_{z5}]$$

여기서 δ_{y3}, δ_{y5}, δ_{z3}, δ_{z5}는 각각 링크 3과 5의 y축과 z축 방향의 탄성변위를 나타낸다.

4.1 x방향 실험

유연 매니퓰레이터의 선단이 $x-z$평면에 고정된 구속환경에 대해서 x방향으로 위치 이동하면서 위치/힘 제어를 수행하는 경우의 선단에 발생하는 x방향 마찰력의 크기와 각 링크의 y방향 탄성변위의 거동을 조사한다. 매니퓰레이터와 구속환경간의 충돌의 영향을 안정화시킨 후에 실험을 수행하기 위해서 초기위치를 구속환경에 접촉한 후에 실험을 수행한다. 초기위치는 (x, y, z) = (920㎜, 354㎜, 0㎜), 목표위치는 (x_d, y_d, z_d) = (820㎜, 354㎜, 0㎜)이며 x방향의 위치입력은 램프 입력, 구속력은 스텝입력이다. 매니퓰레이터 선단의 구속력과 이동 속도를 각각 $f_d = 10$[N]와 100[㎜/s]로 설정한다. 유연 매니퓰레이터의 선단에 발생하는 마찰력에 변화를 주기 위해서 Table 4에 나타낸 아암 선단과 작업환경을 이용하여 실험을 수행한다.

매니퓰레이터 선단의 위치를 제어하고 링크의 진동을 억제하기 위해서 비례 이득 값을 설정하며, 이 실험에 있어서 위치 제어의 비례이득 K_{Xp}, 힘제어의 비례이득 K_{fp}, 진동억제제어의 비례이득 K_{ep}은

$$K_{Xp} = \mathrm{diag}[4.0\ 4.0\ 4.0]$$

Table 4 Experimental conditions

Case	End-effector	Constrained envi.
(a)	roller	steel
(b)	aluminium ball	steel
(c)	aluminium ball	rubber

Table 5 Friction Force

Case	Friction force [N]	
	x direction	z direction
(a)	0.5	0.0
(b)	2.0	2.0
(c)	8.0	6.0

$$K_{fp} = \mathrm{diag}[0.4\ 0.4\ 0.4]$$
$$K_{ep} = \mathrm{diag}[0.0\ 0.0\ 0.0\ 0.0]$$

으로 설정한다. 또한 실험을 실시간으로 수행하기 위해서 샘플링 타임을 10[ms]로 설정한다. 여기서 각각의 위치 값은 유연 모델로부터 도출한 값을 이용한다.

4.2 z방향 실험

유연 매니퓰레이터의 선단이 $x-z$평면에 고정된 구속환경에 대해서 z방향으로 위치 이동하면서 힘 제어를 수행하는 경우의 선단에 발생하는 z방향 마찰력의 크기와 각 링크의 z방향 탄성변위의 거동을 조사한다. 초기위치는 (x, y, z) = (900㎜, 354㎜, 50㎜), 목표위치는 (x_d, y_d, z_d) = (900㎜, 354㎜, -50㎜)이며 z방향은 위치입력은 램프 입력, 구속력은 스텝입력이다. 매니퓰레이터 선단의 구속력과 이동 속도를 각각 $f_d = 10$[N]와 100[㎜/s]로 설정한다.

매니퓰레이터의 선단과 구속환경은 변화는 4.1절과 동일하게 Table 4에 나타낸 아암 선단과 작업환경을 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험에서 위치제어의 비례이득 K_{Xp}, 힘제어의 비례이득 K_{fp}, 진동억제제어의 비례이득K_{ep}는 4.1절과 같은 값으로 설정했다.

4.3 고찰

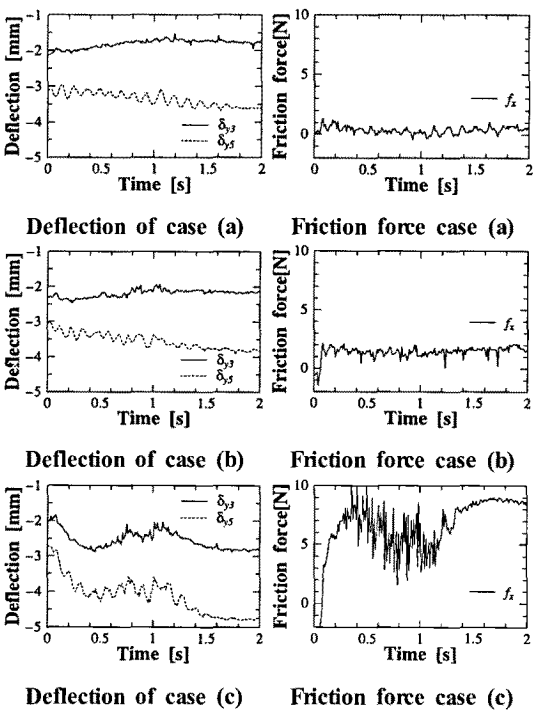
매니퓰레이터 선단과 구속환경 간의 변화가 로봇 아암인 탄성링크에 미치는 영향을 파악하고자 실험을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 매니퓰레이터 선단이 구속환경의 x방향

과 z방향으로 위치 이동하면서 실험한 결과의 응답을 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5로부터 매니퓰레이터와 구속환경 간에 발생한 마찰력을 대략적으로 수치 값으로 Table 5에 나타내었다. 이 결과로부터 실험 조건(a)에서는 매니퓰레이터 선단은 Roller, 구속환경은 steel로 설정했으며, 이 경우가 마찰력이 가장 작으며, 탄성변위도 작은 경향을 보여주고 있다. 실험 조건(b)에서는 매니퓰레이터 선단의 재질은 알루미늄 구로 설정하였고 체결방법은 Roller에서 고정으로 변경하였으며, 마찰력과 탄성변위의 값은 Case(a)보다 약간 크게 발생함을 보여주고 있다. 실험 조건(c)는 매니퓰레이터 선단은 알루미늄 구로 Case(b)와 동일하나, 구속환경을 rubber로 변경하였으며, 마찰력과 탄성변위의 값이 크게 증가함을 보여주고 있다.

이상의 결과로부터 매니퓰레이터 선단의 작업 방향과는 무관하게 매니퓰레이터 선단과 구속환경 간의 마찰계수가 커질수록 마찰력이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 실험결과로부터 시험조건이 변화함에 따라서 마찰력의 값은 크게 증가하는 반면, 링크의 탄성변위는 약간 증가함을 보여주고 있다. 이 결과는 링크의 탄성변위는 매니퓰레이터 선단과 구속환경 간의 마찰력에 의한 영향보다는 구속력(y방향)의 영향에 더 지배받고 있기 때문이다.

구속환경 하에 있는 유연매니퓰레이터의 작업공간은 링크의 탄성진동의 억제제어가 필요한 자유운동 부분 시스템과 구속력에 의해서 링크의 진동이 억제되는 구속운동 부분 시스템으로 분류된다[4]. 현재 실험환경에서 x방향의 운동이 구속운동 부분 시스템, z방향의 운동이 자유운동 부분 시스템임이다. Fig. 5의 z방향 실험은 자유운동 부분시스템에 해당됨으로 링크의 진동제어 루프를 이용했어야 하나, 본 논문에서는 순수하게 마찰력과 링크의 탄성변형관계를 파악하기 위해서 진동제어 입력을 사용하지 않은 관계로 링크의 진동이 크게 발생하는 현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

특히 Fig. 5의 Case(a)의 경우의 탄성변위가 매니퓰레이터의 선단의 위치이동이 종료한 후에도 링크의 진동이 계속되고 있음을 보여주고 있다. 이 원인으로서는 매니퓰레이터의 선단이 다른 실험에서 사용한 ball과는 상이하게 roller로 체결되어 있어서 선단의 위치이동 종료한 후에도 선단의

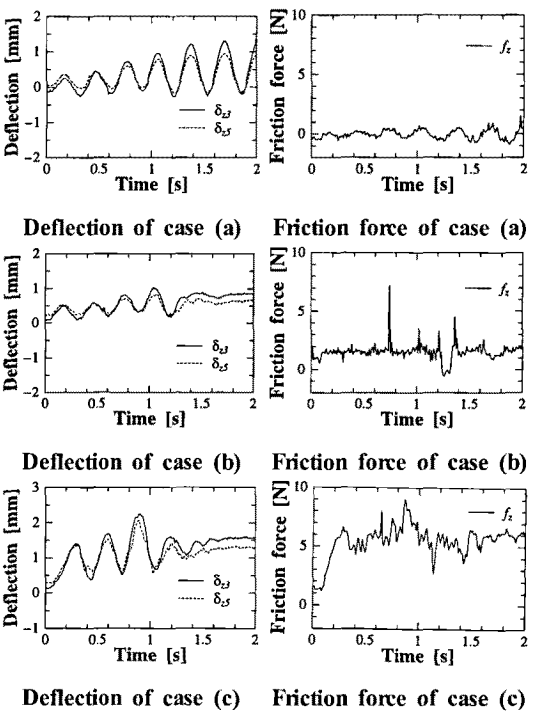


Deflection of case (a) Friction force case (a)

Deflection of case (b) Friction force case (b)

Deflection of case (c) Friction force case (c)

Fig. 4 When the end-effector of robot moves in x direction



Deflection of case (a) Friction force of case (a)

Deflection of case (b) Friction force of case (b)

Deflection of case (c) Friction force of case (c)

Fig. 5 When the end-effector of robot moves in z direction

roller가 계속 회전함으로 이러한 현상이 발생한다고 사료된다. Fig. 4의 Case(a)의 경우는 위 실험과 동일한 선단과 구속환경을 사용하였지만 진동이 발생하지 않았으며 그 이유로서는 앞서 설명한 바와 같이 구속 운동 부분 시스템 공간에 적용되기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

3차원 유연 매니퓰레이터 선단과 구속환경 간의 변화에 의해서 발생하는 마찰력이 링크의 탄성변형에 어떠한 영향에 미치고 있는가를 파악하기 위해서 실험기인 ADAM을 이용하여 실시간 위치/힘 제어 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 선단과 구속환경 간의 마찰계수가 증가하는 환경일수록 마찰력의 값은 크게 증가하는 반면, 링크의 탄성변위는 약간 증가함을 보여주고 있다.
(2) 자유운동 부분시스템 공간인 z방향으로 유연 매니퓰레이터의 힘/위치 제어를 할 경우, 링크의 진동이 크게 발생하는 현상을 알 수 있었다. x방향과 z방향의 실험 결과로부터 매니퓰레이터 선단과 구속환경 간에 발생하는 마찰력 변화가 탄성 링크의 변형에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.
(3) 선단에 roller를 장착한 Fig. 5의 Case(a)와 Fig. 4의 Case(a)의 탄성변위 응답 결과로부터 작업 방향에 따라서 링크의 진동이 발생함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 작업 수행 전에 매니퓰레이터의 자세를 구속운동 부분 시스템으로 변환한 후에 작업을 수행하면 탄성링크의 진동억제 제어 알고리즘을 이용하지 않고 강체 매니퓰레이터와 동일하게 작업을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

(1) T. Fukuda, 1985 "Flexibility Control of Elastic Robotic Arm", J.of Robotic Systems, Vol. 2, No.1 pp. 73~81.
(2) B. C. Chiou and M. Shahinpoor, 1990, "Dynamic Stability Analysisof a Two-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," Trans. ASME, J. of Dy-namic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 661~666
(3) F. Matsuno T. Asano and Y. Sakawa, 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.
(4) J. S. Kim, K. SuzukiM. Yamano and M. Uchiyama, 1997, "Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2831~2837.
(5) T .Yoshikawa, K. Harada, A. Matsumoto, 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.
(6) J. S. Kim, 2006, "Compliance Analysis of Constrained Spatial Flexible Manipulators" J. of KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 114~119.
(7) 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.