

구조적 컴플라이언스 모델링을 이용한 구속받는 유연 매니플레이터의 위치/힘 제어

김진수*

Position/Force Control of Constrained Flexible Manipulators Using Structural Compliance Modeling

Jin-Soo Kim*

ABSTRACT

The aim of this paper is to clarify the structural compliance of the constrained flexible manipulator and to develop the force control algorithm by using the compliance of the links. The proposed structural compliance control consists of the position control to utilize a flexible manipulator model (considering the compensation for the elastic deflection of links) and the passive force control to utilize the rigid manipulator model (without considering the compensation for the elastic deflection of links). We present the experimental results for the case when applying the only position control, and when applying the structural compliance control. Finally, a comparison between these results is presented to show the performance of our method.

Key Words : Structural compliance (구조적 컴플라이언스), Flexible manipulator (유연 매니플레이터), Position control (위치제어), Passive force control (피동적 힘제어), Experimental result (실험결과)

1. 서론

우주개발 분야에서는 우주 공간으로 발사하는 로켓의 운반능력의 제한으로 인한 경량화 및 에너지 절약 등이 우주 공간에서 작업을 수행하는 로봇에게 요구되고 있다. 로봇의 경량화는 에너지 절약 및 고속 운동이 가능하다는 장점은 있으나, 매니플레이터 자체가 유연하게 됨으로 인해 고속 운동 및 힘제어의 경우에 링크의 진동 및 변형을 유발시키는 단점도 있다. 링크의 진동은 매니플레이터 선단의 정확한 위치 제어를 저해하는 원인이 된

다. 이러한 이유로 종래에는 유연 매니플레이터의 단점인 링크의 진동을 억제하기 위한 연구가 주류를 이루었다⁽¹⁾⁽²⁾. 우주개발에 요구되는 우주 로봇의 실용화 및 산업용 로봇의 고도의 작업을 실현시키기 위해서는 힘제어는 필요 불가결한 과제이다. 이러한 관점에서 본 논문은 유연 매니플레이터의 단점인 유연성을 억제하기 않고 적극적으로 활용하는 힘제어에 대해서 논의하고자 한다.

강체 매니플레이터의 힘제어에 관해서는 임피던스제어⁽³⁾⁽⁴⁾, 하이브리드제어⁽⁵⁾ 등 수 많은 연구성과가 발표되었으나, 유연 매니플레이터에 관해서는

* 2002년 4월 16일 접수
전주대학교 공학부

아직 미미한 수준이다⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾. 강체 매니플레이터가 강체인 환경에 대해서 힘제어를 수행하는 것은 상당히 어렵게 생각되며 무엇인가 완충 작용을 할 수 있는 요소가 로봇과 환경사이에 필요하지 않을까 생각할 수 있다. 그러한 의미에서 강체 환경에 유연 매니플레이터는 힘제어 적합하지 않을까 생각될 수 있다. 즉, 유연 매니플레이터의 경우 로봇 팔 자체에 구조적 컴플라이언스 특성을 갖고 있기 때문에 약간의 위치 오차가 존재하는 상황에서 환경과 접촉하여도 큰 반력이 발생하지 않을 수 있다는 예측을 할 수 있다. 또한 직접적인 힘제어를 수행할 경우 필요한 힘센서는 고가의 장비이면서 시리얼 매니플레이터의 경우 센서가 장착된 선단의 강성 증대로 인해 진동을 유발시킴으로서 위치제어에 불리하게 작용한다. 그러나 유연 매니플레이터의 경우 링크 선단의 탄성 변형을 측정하기 위해 장착된 변형 센서를 이용해서 선단의 작용하는 힘을 측정할 수 있다⁽⁶⁾. 이상과 같이 유연 매니플레이터의 특징인 유연성을 활용할 수 있음에도 불구하고 매니플레이터의 동역학 모델의 복잡성과 불안정성으로 인해서 연구에 어려운 점이 있다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 유연 매니플레이터의 구조적인 컴플라이언스 특성의 파악 및 컴플라이언스를 이용한 힘제어에 관해서 논의하고자 한다. 구조적 컴플라이언스 실험에 사용한 모델로서는 집중 정수 모델법의 하나인· 집중 스프링 질량 모델(Lumped Spring Mass Model)을 이용하였다. 이 모델을 실험 기인 유연 매니플레이터 ADAM(Aerospace Dual Arm Manipulators)⁽⁹⁾에 적용하여 실시간 위치 및 구조적 컴플라이언스 제어 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해서 유연 매니플레이터의 링크 유연성을 활용한 힘제어의 가능성을 실험적으로 증명한다.

2. 구조적인 컴플라이언스 제어

2.1 기본 개념

유연 매니플레이터의 구조적인 컴플라이언스 제어계와 위치제어계의 차이점은 그림 1에서 표시한 대로 구조적인 컴플라이언스 제어계에서는 강체 링크 모델(링크의 탄성 변위량을 고려하지 않음)로 계산된 링크 선단 위치 정보를 사용하며 위치 제어계에서는 링크 선단 위치의 궤환에 유연 링크 모델(링크의 탄성 변형 항을 고려)로 계산되는 링크 선단 위치의 정보를 이용하는 점이다.

그림 1 (a)와 같이 유연 매니플레이터 모델에서 계산된 매니플레이터 선단 위치를 궤환하면 링크의 탄성변위 항을 궤환 보상하는 것이므로 매니플레이터 선단에 외력이 작용해서 링크에 탄성 변형이 발생하여도 매니플레이터 선단에는 접촉력에 의한 탄성변위가 발생하지 않은 것으로 간주된다. 즉, 매니플레이터 선단에는 외견상, 구조적인 컴플라이언스 특성이 없어지는 것이다.

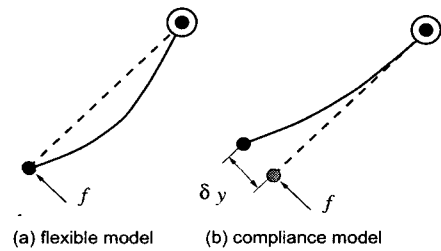


Fig. 1 Comparison of two model

반면, 그림 1 (b)와 같이 강체 매니플레이터 모델로 계산된 암 선단 위치를 궤환하면 암 탄성변위 항을 보상하지 않기 때문에 매니플레이터 선단에 외력이 작용하면 그 힘의 크기에 따라서 탄성변위가 발생한다. 즉, 매니플레이터 선단에는 외견상 구조적인 컴플라이언스 특성이 나타남을 알 수 있다. 유연 매니플레이터에 위치제어를 적용하면 링크에는 구조적 컴플라이언스 특성이 있음에도 불구하고 제어적으로 링크의 유연성을 활용하지 않는 것이 된다.

2.2 구조적 컴플라이언스 제어계

2.1절에서 설명과 같이 구속받지 않는 공간에서 유연 매니플레이터의 탄성변위를 보상하는 위치 제어계를 구속받는 공간에서는 구조적 컴플라이언스 제어계를 이용하므로 전체적인 구조적 컴플라이언스 제어계는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta X &= X_d - X \\ &= X_d - [S X_f + (I - S) X_s] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 선택행렬 S 에 의해서 위치 및 힘의 하이브리드 제어와 동일하게 작업 내용에 따라서 위치 제어할 방향과 구조적 컴플라이언스 제어할 방향으로 분리됨을 알 수 있다. 식(1)의 우편 괄호 안의 첫 번째 항은 자유공간의 위치제어계, 두 번째 항

은 구속 공간의 구조적 컴플라이언스 제어계를 의미한다. X_f 는 탄성변위를 보상하는 유연 매니플레이터의 위치 정보, X_r 는 강체 매니플레이터의 위치 정보를 나타낸다.

본 논문에서는 속도입력형 서보모터를 이용하는 경우의 제어계대해서 고려한다. 속도형 서보모터의 제어 입력치는 각속도벡터이며, 매니플레이터 선단의 병진/회전 속도벡터 오차 δX 는 다음과 같다.

$$\delta X = J_\theta \delta \theta + J_e \delta e \quad (2)$$

여기서, $\delta \theta \in R^m$ 는 관절 각벡터 오차, $\delta e \in R^n$ 는 탄성변위벡터 오차이다. $J_\theta \in R^{6 \times n}$, $J_e \in R^{6 \times m}$ 는 각각 관절 각벡터와 탄성변위벡터에 관한 Jacobian 행렬이다. 식(2)를 $\delta \theta$ 에 대해서 정리하면

$$\delta \theta_p = J_\theta^{-1} [\delta X - J_e \delta e] \quad (3)$$

이며 J_θ^{-1} 는 J_θ 의 역행렬이다. 구조적 컴플라이언스 제어에서 구속받지 않는 공간에서의 X_f 에는 탄성변위의 보상이 존재하므로 식(3)의 두 번째 항 $J_e \delta e$ 을 생략한다. 만약 생략하지 않으면 X_f 에서 탄성변위를 상쇄시키는 결과가 되며 X_r 이 된다. 그러므로 구조적인 컴플라이언스 제어 입력치는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \theta_p &= J_\theta^{-1} K_{Xp} \delta X \\ &= J_\theta^{-1} K_{Xp} \{ X_d - [S X_f + (I - S) X_r] \} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, K_{Xp} 는 대각 비례이득 행렬이다.

3. 실험장치

본 연구에 사용된 유연 매니플레이터 ADAM (Aerospace Dual-Arm Manipulator)는 2개의 암을 갖고 있으며, 각각의 암은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다⁽⁸⁾⁽⁹⁾. 본 논문에서는 2개의 암 중에서 한쪽 매니플레이터(Fig. 2, 3)만을 고려한다. 본 실험에서는 관절 2, 4, 6만을 이용한다. 또한 매니플레이터 선단은 벽면에서 떨어진 상태에

서 시작하여 $x-z$ 평면에 고정된 벽면에 접촉한 후 일정한 힘을 가하면서 이동하는 작업을 한다. 단, 관절 6은 매니플레이터 선단이 벽면에 $\pi/2$ [rad]의 각도를 유지하도록 제어한다. 수직인 구속 환경은 매니플레이터로부터 방향으로 0.375[m]에 위치해 있다.

3.1 실험기 ADAM

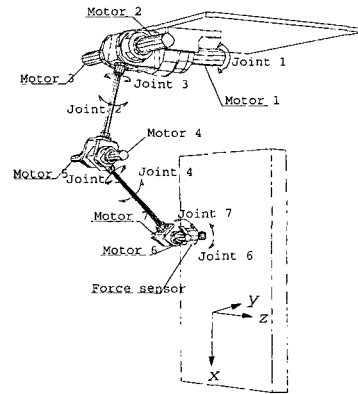


Fig. 2 Experimental robot with 2 links and 7 joint

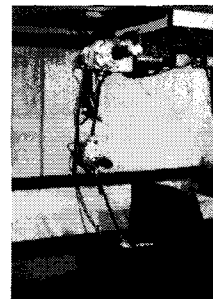


Fig. 3 A photograph of experimental robot setup

실험기 ADAM는 속도 궤환 제어를 하는 DC서보 모터에 의해서 구동된다. 각 링크의 진동은 변형 센서(strain gauge)를 이용하여 검출되며, 매니플레이터의 선단에 작용하는 접촉력은 힘/토크 센서를 이용하여 검출되나 본 논문에서는 센서로부터의 힘 정보를 이용하지 않는다. Table 1에 ADAM와 대상물의 각각의 제원을 나타냈다. 관절 각 θ 와 링크 탄성변위 e 는 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 y 축과 z 축 방향의 탄성변위를 나타낸다.

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

3.2 제어 입력치

속도 입력형 서보모터의 경우, 속도 입력치와 서보모터의 출력 토크의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토크를 계산한다⁽⁶⁾⁽⁸⁾.

$$\tau = G_r K_{sp} (V_{ref} - K_{sv} \dot{\theta}_m) = \Lambda (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}) \quad (5)$$

여기서, G_r 는 모터의 감속비 행렬, K_{sp} 는 속도 제한 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 제한 이득이다. 속도 입력 전압 벡터 V_{ref} 는 다음과 같다.

$$V_{ref} = G_r K_{sv} \dot{\theta}_c \quad (6)$$

전체 시스템의 입력속도를 $\dot{\theta}_c$ 는

$$\dot{\theta}_c = \dot{\theta}_p + \dot{\theta}_{eh} \quad (7)$$

이며, $\dot{\theta}_p$ 는 매니플레이터 선단 위치 및 구속력을 제어하기 위한 입력속도, $\dot{\theta}_{eh}$ 는 진동제어를 위한 입력속도이다. 그림 4에 유연 매니플레이터의 구조적 컴플라이언스 제어계의 블록선도를 나타낸다.

본 논문에서 구속운동 부분 시스템 범위 안에서의 운동에 한정해서 논의함으로 진동제어를 이용하지 않는다⁽⁸⁾. 만약, 논의 대상을 3차원 운동으로까지 확장한다면 자유운동 부분 시스템이 존재하므로 그림 4에서의 진동 억제제어 루프는 필요하다⁽⁶⁾⁽⁸⁾.

4. 실험결과 및 고찰

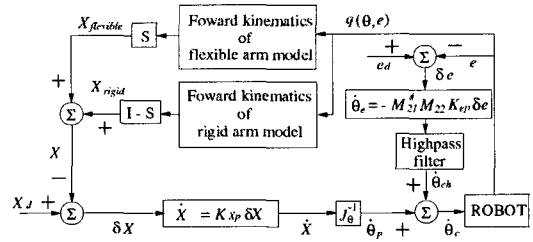


Fig. 4 Position and compliance controller

4.1 한 점 가중 실험

먼저, 매니플레이터의 선단이 위치 이동하지 않고 한 점을 계속해서 가중하는 작업을 위치제어만을 수행한 경우의 접촉력, 매니플레이터 선단 위치, 각 링크의 탄성변위의 거동을 조사한다.

초기위치는 $(x, y, z) = (900\text{mm}, 336\text{mm}, 0\text{mm})$, 목표 위치는 $(x_d, y_d, z_d) = (900\text{mm}, 346\text{mm}, 0\text{mm})$ 이며 y 방향은 램프 입력이다. 여기서 y 위치는 유연 매니플레이터 모델로부터 도출한 값이다. 이 실험에서 비례이득은 $K_{xp} = \text{diag}[4.0, 4.0, 4.0][\text{s}^{-1}]$ 로 설정한다, 또한 Sampling 시간은 10[ms]로 설정한다.

두 번째로 한 점 가중 작업에 대해서 구조적 컴플라이언스제어를 수행한 경우의 접촉력, 매니플레이터 선단 위치, 각 링크의 탄성변위의 거동을 조사한다. 초기위치는 $(x, y, z) = (900\text{mm}, 340\text{mm}, 0\text{mm})$, 목표위치는 $(x_d, y_d, z_d) = (900\text{mm}, 350\text{mm}, 0\text{mm})$ 이며 y 방향은 램프 입력이다. 여기서 y 위치는 강체 모델로부터 도출한 값이며, 강체 모델에서는 초기 y 값 340[mm]은 탄성변위를 보상하는 유연 모델에서는 실험 1과 동일한 336[mm]이다. 이 실험에서의 비례이득은 실험 1과 동일하게 설정했다.

4.2 x방향으로 이동 실험

유연 매니플레이터의 선단이 $x-z$ 평면에 고정된 벽면에 대해서 x 방향으로 위치 이동하면서 구조적 컴플라이언스 제어를 수행하는 경우의 접촉력, 매니플레이터 선단 위치, 각 링크의 탄성변위의 거동을 조사한다. 초기위치는 $(x, y, z) = (950\text{mm}, 354\text{mm}, 0\text{mm})$, 목표위치는 $(x_d, y_d, z_d) = (850\text{mm}, 354\text{mm}, 0\text{mm})$ 이며 x 방향은 램프 입력이다. 매니플레이터 선

단의 초기 접촉력과 이동 속도를 각각 $f=10$ [N] 와 50 [mm/s]로 설정한다. 본 실험에서도 4.1절의 실험과 같이 강체 모델의 위치 정보를 이용한다. 또한 비레이득도 4.1절의 실험과 동일하다.

4.3 결과 고찰

매니플레이터 선단이 $x-z$ 평면의 고정된 벽면에 접촉한 경우, 선단이 구속된 y 방향의 위치는 일정한 값을 유지하여야 한다. 그러나, 그림 5의 실험 결과로부터 매니플레이터 선단이 벽면에 접촉 중임에도 불구하고 y 방향으로 이동 즉, 벽면 내부로 이동함을 알 수 있으나, 실제로 고정된 벽면의 이동이 불가능하므로 강체 매니플레이터에서는 존재할 수 없는 상황이다. 이 결과로부터 약간의 위치 오차가 존재하여도 유연 매니플레이터의 구조적 특징인 탄성 변형으로 급격한 힘의 변화가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6의 실험 결과의 비교로부터 구조적 컴플라이언스 제어가 초기 위치로부터 같은 목표 위치를 부여하였음에도 매니플레이터 선단의 접촉력이 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 유연 매니플레이터의 구조적 컴플라이언스 제어가 링크의 컴플라이언스 특성을 활용한 제어임을 분명히 알 수 있다.

그림 6 (c)의 결과에서 y 는 유연 모델로부터 계산된 위치 정보이다. 매니플레이터 선단이 벽면에 접촉 후 힘의 변화 추이는 강체 매니플레이터의 경우가 매니플레이터가 탄성 변형하지 않는 만큼 초기 힘은 급격하게 변화할 것이다. 접촉력의 초기 변화 추이는 위치 제어 또는 구조적 컴플라이언스 제어의 차이점이다기 보다는 매니플레이터의 구조적인 특징에 따라 변한다. 또한 최종적으로 도달하는 정상 상태의 힘은 제어법과 모터의 성능에 영향을 받는다. 이상의 결과로부터 연 매니플레이터에 구조적 컴플라이언스 제어법을 적용하는 것이 구속 환경에 손상을 주지 않고 환경에 부드러운 제어가 가능함을 알 수 있다.

그림 7은 x 방향으로 이동하면서 구조적 컴플라이언스 제어를 수행한 실험 결과이다. 이 결과로부터 위치/힘 하이브리드제어의 결과와 비교하면 매니플레이터의 선단이 조금 더 진동함을 알 수 있다⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 위치/힘 하이브리드제어의 경우 준 정적 상태의 링크의 탄성 변위와 접촉력의 관계에 의해서 접촉력을 직접적으로 제어함으로써 링크의 진동 제어 효과가 있음을 보였다⁽⁸⁾. 그러나, 본 논문의 구

조적 컴플라이언스 제어에서는 구속력을 간접적으로 제어하는 것이 링크의 진동 발생 원인이다.

이상의 결과로부터 매니플레이터 선단의 구속력이 존재하여도 힘을 제어하지 않으면 선단의 구속력이 링크의 진동 제어의 역할을 하지 않음을 알 수 있다. 즉, 구속력이 직접적으로 링크의 진동 억제에 관계한다고 하기보다는 오히려 구속력을 통해서 형성되는 힘 계환 루프가 링크의 진동 제어에 관계한다고 할 수 있다.

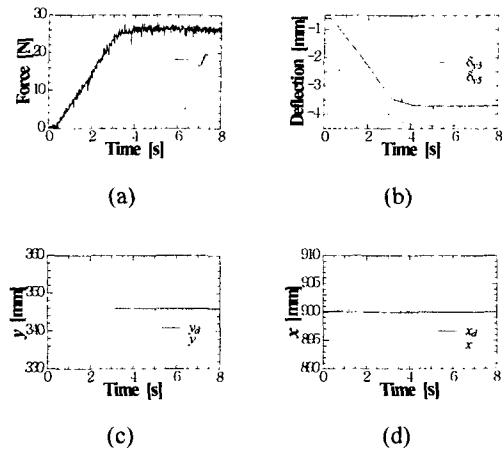


Fig. 5 When the end-effector of robot does not move (flexible model)

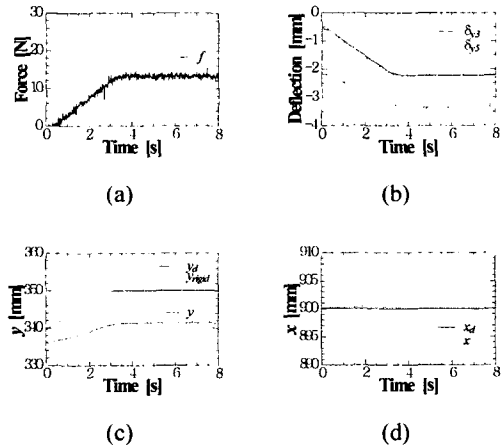


Fig. 6 When the end-effector of robot does not move (compliance model)

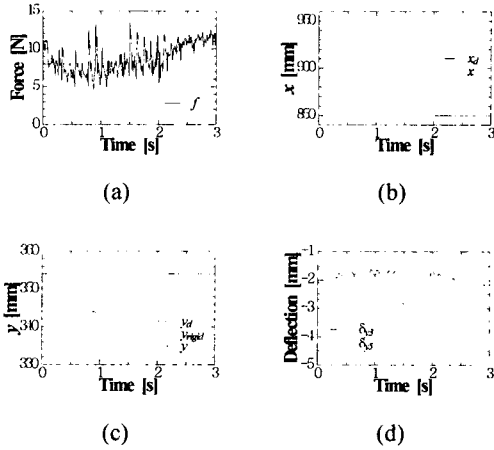


Fig. 7 When the end-effector of robot moves in x direction (compliance model)

5. 결론

환경에 구속되어 작업을 수행하는 매니플레이터의 링크가 유연 또는 강제인가에 따라서 선단이 벽면에 접촉한 경우 초기 힘의 변화 추이와 접촉 후 정상상태에 어떤 영향이 존재할지는 로봇과 환경에 있어서 모두 중요한 문제이다.

구속받는 유연 매니플레이터에서 선단의 변형은 접촉력에 의해서 발생하며, 이 변형은 링크의 탄성변형으로 발생한다. 이 링크의 구조적인 컴플라이언스를 이용하여 강제 매니플레이터의 위치/힘 병렬제어 개념과 같이 구속받지 않은 공간에는 유연 링크의 탄성변위를 보상하는 일반적인 유연 매니플레이터 위치제어를 구속받는 공간에는 링크의 탄성변위인 구조적 컴플라이언스를 이용한 접촉력을 제어하는 방법을 제안하였다.

Fig. 5(a) (26N)와 Fig. 6(c) (13N)의 접촉력을 비교하면 링크의 구조적인 컴플라이언스 제어가 위치 제어만을 수행한 것 보다 50%정도 접촉력이 적음을 알 수 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안한 유연 매니플레이터에 구조적 컴플라이언스 제어법을 적용하는 것이 위치 제어만을 이용한 경우보다 구속 환경에 손상을 주지 않는 환경에 친화적인 제어임을 나타냈다.

또한 x방향 이동 실험을 통해서 단지 구속력이 존재함으로써 구속력과 탄성변위의 준 정적인 관계

에 의해서 링크의 진동이 억제되는 것이 아니며, 오히려 구속력을 통해서 형성되는 힘 변환 루프가 링크의 진동 제어에 관계함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Book W. J., Neto O. M. and Whitney D. E., "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems With Distributed Flexibility," Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 101, No. 4, pp. 187-192, 1979.
2. 姜, 内山, "フレキシブルロボットアームの補償制御," 日本ロボット學會誌, Vol. 6, No. 5, pp. 416-423, 1988.
3. Hogan N., "Impedance control. Part1-Part3," Trans. of ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 107, pp. 1-24, 1985.
4. M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, pp. 418-432, 1981.
5. Raibert M. H. and Craig J. J., "Hybrid position/force control of manipulators," Trans. ASME, J. of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 103, No. 2, pp. 126-133, 1981.
6. 김진수, "유연 매니플레이터의 피동적인 힘제어에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 209-216, 1999.
7. Chiou B. C. and Shahinpoor M, "Dynamics Stability Analysis of a One-Link Force-Controlled Flexible Manipulator," J. Robotic Systems, Vol. 5, No. 5, pp. 443-451, 1988.
8. 김진수, 우찌야마 마사루, "구속받는 3차원 유연 매니플레이터의 진동억제 제어," 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 189-195, 2000.
9. Uchiyama M., Konno A., Uchiyama T., and Kanda S., "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, Tsuchiura, Japan, 1990.