

유사 역행렬을 이용한 여유자유도 3차원 유연 매니플레이터의 위치 및 진동제어

김진수*

Position and Vibration Control of a Spatial Redundant Flexible Manipulator by using Pseudo-inverse of Jacobian

Jin-Soo Kim*

ABSTRACT

In this paper, by using pseudo-inverse matrix of the spatial redundant flexible manipulators, a position control method and its effect in vibration suppression was presented. Vibration suppression control was developed using lumped mass spring model of the flexible manipulators. With 2 elastic links and 7 rotory joint manipulator ADAM, (1)position control for no redundancy, and (2)position control for one redundant DOF(degree of freedom) were tested. The objective of this experiment is to show the effect of position control, using pseudo-inverse matrix, toward the improvement of operation, and at the same time, to reduce the vibration of the link and the magnitude of the joint torque.

Key Words : Pseudo-inverse matrix(유사 역행렬), Redundant DOF(여유 자유도), flexible manipulators(유연 매니플레이터), Vibration suppression(진동 억제), Experiment (실험)

1. 서론

최근 유연 매니플레이터의 연구는 다 링크 다 관절 매니플레이터를 대상으로 위치제어, 힘제어, 협조제어 등 산업 현장에서 응용될 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 이러한 관점에서 다 링크 다 관절로 인해서 발생하는 여유자유도를 적극적으로 활용하는 연구가 필요하다.

여유자유도 매니플레이터는 여유자유도를 이용하여 위험한 자세와 장애물을 회피할 수 있으며,

또한 작업 효율을 향상시킬 수 있는 동작을 설계할 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾. 최근 여유 자유도 매니플레이터의 연구는 활발히 진행되고 있으며, 이 연구들은 강체 매니플레이터에 한해서 논한 것이 대부분이다. 그러나 현재까지 여유자유도를 활용한 유연 매니플레이터의 연구는 평면 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션에 의한 해석의 결과가 발표되었으며⁽⁵⁾, 실험에 의한 검증은 거의 전무한 상황이다.

여유자유도를 이용해서 진동을 억제하고자하는

* 2001년 3월 20일 접수

* 전주대학교 공학부 기계공학전공

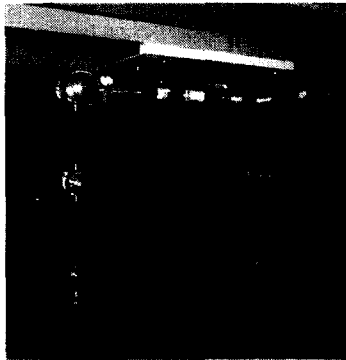


Fig. 1 A photograph of experimental robot setup

연구는 빛등에 의해서 제안되었다⁶⁾. 빛 등은 각각의 진동성분에 구동기를 할당하는 방법을 채택했다. 또한, 빛 등이 이용한 매니플레이터는 차동기어를 이용해서 각 진동성분과 구동기의 관계가 매니플레이터의 자세에 의존하지 않도록 설계하였다. 이 접근법은 매니플레이터 설계단계에서 진동제어를 고려하여 진동을 억제하기 용이한 기구로 설계한 것이다. 본 논문에서 이용하는 매니플레이터 ADAM(Aerospace Dual-Arm Manipulator)⁷⁾의 설계시에 기존의 매니플레이터의 기구를 고려하여 일반적인 여유자유도를 갖는 매니플레이터의 자유도 배치를 채용하였다. 즉, 실험기 ADAM의 여유자유도는 진동억제 뿐만 아니라 작업성 향상 등도 염두에 두고 개발하였다.

본 연구에서는 여유자유도 유연 매니플레이터의 유사 역행렬을 이용하여 링크의 진동을 감소시킬 수 있고 아울러 작업성을 향상시킬 수 있는 위치 및 진동제어계를 제안한다. 진동억제 제어는 유연 매니플레이터의 집중정수 모델중의 한 종류인 집중질량 스프링모델을 이용하여 도출한다. 2링크 7관절의 매니플레이터 ADAM을 대상으로 (1) 7자유도의 유사 역행렬을 이용한 위치제어계 (2) 7자유도중 6자유도만을 이용한 위치제어계를 이용하여 실험을 수행한다. 이 실험으로부터 유사 역행렬을 이용한 위치제어계의 유효성을 검증한다.

2. 실험장치

2.1 실험기 ADAM

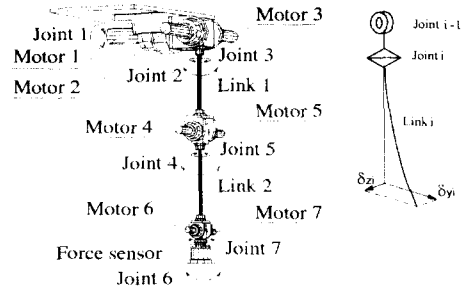


Fig. 2 Joint, motor, links and link deflections of Arm ($i=1, 2$)

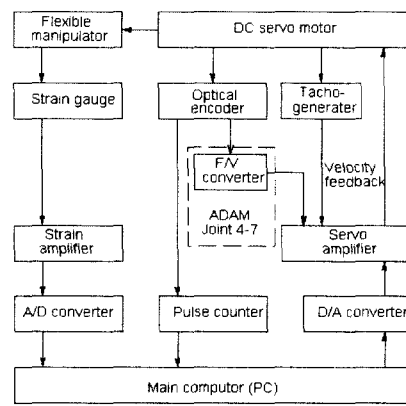


Fig. 3 The feedback control system

본 연구에 사용된 유연 매니플레이터 ADAM은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2개의 팔을 갖고 있으며, 각각의 팔은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다. Fig. 2는 관절, 모터, 링크와 링크의 변형을 나타내는 그림이다. 관절 1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7은 각각 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동 된다. 이 모터는 DC서보 모터이며 이용하고 있으며, 감속기를 내장하고 있다. 그 감속비는 1/80이다. Fig. 3은 실험장치의 시스템을 보여준다. 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 검출되며, 이 회전 각속도는 서보 앰프에 입력된다.

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

각 링크의 진동은 Strain gauge를 이용하여 검출한다. Table 1 에 ADAM의 각각의 제원을 나타냈다.

2.2 운동방정식

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

$$p = [x^T \phi^T]^T$$

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

$$q = [\theta^T e^T]^T$$

이며, $\theta \in R^m$ 는 관절각도 벡터, $e \in R^n$ 는 탄성변형 벡터이다. 일반적으로 자세각을 미분하면 각속도 벡터를 구할 수 있다. 한편, 각속도 벡터의 적분은 일률적인 자세각을 구할 수는 없다. 그러므로, 매니플레이터 선단의 병진/회전 속도벡터 v 와 선단의 위치/자세벡터 p 의 미분치 관계는 다음과 같이 표현된다⁸⁾.

$$\begin{aligned} v &= B_s \dot{p} \\ &= B_s J_p \dot{q} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$J_p = \left[\frac{\partial p}{\partial \theta} \quad \frac{\partial p}{\partial e} \right]^T$$

$$B = \text{diag}[I_3 \ B_0]$$

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.

$$\begin{aligned} v &= [u^T \ \omega^T]^T = J \dot{q} \\ &= J_\theta(q) \dot{\theta} + J_e(q) \dot{e} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, u 와 ω 는 각각 선단의 속도와 각속도 벡터, $J = [J_\theta \ J_e]$, $J_\theta \in R^{6 \times n}$, $J_e \in R^{6 \times m}$ 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.

유연 매니플레이터의 운동방정식은 집중질량 스프링 모델을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾¹⁰⁾.

$$\tau = M_{11}(q) \ddot{\theta} + M_{12}(q) \ddot{e} + h_1(q, \dot{q}) + g_1(q) \quad (3)$$

$$0 = M_{21}(q) \ddot{\theta} + M_{22}(q) \ddot{e} + h_2(q, \dot{q}) + K_{22}e + g_2(q) \quad (4)$$

여기서, $M_{11} \in R^{n \times n}$, $M_{12} \in R^{n \times m}$, $M_{21} \in R^{m \times n}$, $M_{22} \in R^{m \times m}$ 는 관성 소행렬이며, h_1 와 h_2 는 원심력과 Coriolis력 벡터, g_1 , g_2 는 중력벡터, $K_{22} \in R^{m \times m}$ 는 탄성계수 행렬, $\tau \in R^n$ 는 관절 토크 벡터이다. 운동방정식에 있어서 식(3)은 시스템 전체의 운동을 나타내는 반면, 식(4)는 링크의 탄성 운동을 나타낸다.

3. 제어 입력치

본 연구에서 사용한 제어계는 Fig. 4의 블록선도에서 보는 바와 같이 구성되어 있다. 속도 입력형 서보 모터의 경우, 속도 입력치와 서보 모터의 출력 토크의 관계는 고차의 복잡한 식으로 표시된다. 그러므로 다음과 같은 근사식을 이용하여 출력 토크를 계산한다¹¹⁾.

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

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

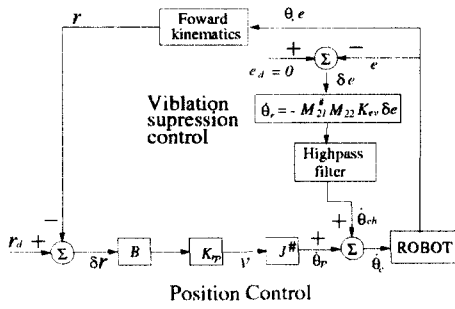


Fig. 4 Position and vibration suppression controller

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

이며, $\dot{\theta}_p$ 는 매니플레이터 선단 위치제어를 위한 입력속도, $\dot{\theta}_{eh}$ 는 진동제어를 위한 입력속도이다.

3.1 위치제어 입력치

식(2)으로부터 매니플레이터 선단의 위치제어를 위한 입력속도 $\dot{\theta}_p$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_p = J_{\theta}^{\#} [K_{rp} B (r_d - r) - J_e \dot{e}] \quad (8)$$

여기서, $J_{\theta}^{\#}$ 는 J_{θ} 의 일반 역행렬, r_d 와 r 은 목표, 현재 위치벡터, K_{rp} 는 비례 이득, B 는 위치오차 중의 선단의 자세각 성분을 회전벡터로 변환하는 행렬이다. 식(8)의 일반 역행렬(generalized inverse)은 다음과 같은 유사 역행렬을 이용하여 구할 수 있다.

$$J_{\theta}^{+} = J_{\theta}^T (J_{\theta} J_{\theta}^T)^{-1} \quad (9)$$

이상과 같은 유사 역행렬로부터 계산된 $\dot{\theta}_p$ 은 속도 입력치의 Norm, $\|\dot{\theta}_p\|$ 이 최소로 되도록 하는 특징이 있다. 즉, 각 관절의 목표 각속도의 Norm이 작다는 것이며, 결과적으로 관절의 가속도가 감소되며, 아울러 링크의 진동을 감소시킬 수 있는 효과가 있을 것이라 판단된다.

식(8)에서 진동억제 제어로 인하여 \dot{e} 가 미소하다 가정하여 $J_e \dot{e}$ 항을 무시하면 위치제어 입력속도 $\dot{\theta}_p$ 는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta}_p = J_{\theta}^{+} [K_{rp} B (r_d - r)] \quad (10)$$

3.2 진동제어 입력치

2차원 평면 내에서 운동하는 유연 매니플레이터의 진동억제 제어는 이득을 고정된 채 각 링크의 진동 성분을 부분적으로 제한시킴으로서 충분히 링크의 진동을 억제할 수 있었다⁽¹²⁾. 그러나, 일반적으로 이용되고 있는 3차원 매니플레이터와 같은 다 링크 시리얼형 3차원 매니플레이터에서는 평면 매니플레이터와 같은 방법을 이용하면 제어가 불안정하게 되어 진동 억제가 불가능한 자세가 존재하게 된다⁽¹³⁾. 그러므로 매니플레이터의 자세 변화에 따른 가변 이득을 이용한 진동억제 제어가 고려되어야 한다⁽¹⁴⁾. 본 논문에서도 식(3)과 식(4)의 운동방정식을 이용하여 자세 변화에 따른 진동억제 입력치를 계산한다. 식(3), (4)에서 매니플레이터의 운동을 저속운동으로 가정하면, 비선형 항 h_1, h_2 는 무시할 수 있다. 또한 식(4)에서 $\ddot{\theta}_e$ 을 운동방정식에서의 제어입력 가속도로 간주하면 다음과 같이 식이 성립함을 알 수 있다.

$$M_{22}(q)\Delta\ddot{e} + K_{22}\Delta e = -M_{21}(q)\ddot{\theta}_e \quad (11)$$

$$\Delta e = e - e_0 = e + K_{22}^{-1}g_2(q) \quad (12)$$

여기서, e_0 는 중력의 영향에 의해서 발생하는 변형량을 의미한다. 식(11)을 안정화시키기 위해, 다음과 같은 시스템을 도입한다⁽²⁾.

$$\Delta\ddot{e} + K_{ev}\Delta\dot{e} + K_{ep}\Delta e = 0 \quad (13)$$

여기서, K_{ev} 는 대각 속도이득 행렬, K_{ep} 는 대각 위치이득 행렬이다. 식(13)을 식(11)에 대입하여 정리하면 $\ddot{\theta}_e$ 는 다음과 같다.

$$\ddot{\theta}_e = -M_{21}^{+} \{M_{22}(K_{ev}\Delta\dot{e} + K_{ep}\Delta e) - K_{22}\Delta e\} \quad (14)$$

여기서 M_{21}^{+} 는 M_{21} 의 유사 역행렬이다. 탄성링크의 진동제어 입력치를 간단히 도출하기 위해 식(14)의 강성항만을 고려하면

$$\ddot{\theta}_e = -M_{21}^{+} M_{22} (K_{ev}\Delta\dot{e} + K_{ep}\Delta e) \quad (15)$$

되며, 식(15)를 θ 에 대해서 적분하면 진동제어입력 $\dot{\theta}_e$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_e = M_{21}^{+} M_{22} (K_{ev}\dot{e} + K_{ep}\int_0^t \Delta e) \quad (16)$$

실험에서는 Δe 은 식(12)으로부터 간단히 구할 수 있으나, 계산을 간단히 하기 위해서 1차 high-pass

filter를 사용한다. 이 필터를 사용하면 Δe 는

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

이며, 식(16)에서 비례성분만을 고려하면 진동제어 입력은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{ch} = S_{high} M_{21}^+ M_{22} K_{ev} e \quad (17)$$

4. 실험결과 및 고찰

3장에서 제시한 여유자유도 유연 매니플레이터의 위치 및 진동제어계의 유효성을 검증하기 위해서 실험기 ADAM을 이용하여 ① 유사 역행렬을 이용한 위치제어와 ② 6자유도만의 위치제어 방법에 대해서 각각 실험을 수행하였다.

먼저, 첫 번째는 식(9)의 유사 역행렬을 이용한 위치제어를 의미한다. 두 번째로 6자유도만을 이용한 실험은 관절1~6을 이용해서 선단의 위치를 제어하며, 나머지 관절7에 대해서는 위치제어와는 별도로 항상 관절 각이 0이 되도록 제어하는 것을 의미한다. 6자유도 실험에서 이용한 역행렬은 다음과 같다.

$$J_{\theta}^{\#} = \begin{bmatrix} J_{6 \times 6}^{-1} \\ 0_{1 \times 6} \end{bmatrix} \quad (18)$$

유사 역행렬의 이용한 위치제어 실험에 있어서 실험기의 초기 위치는 특이점, 즉 $\det[J_{\theta} J_{\theta}^T]$ 값이 0이므로 초기 위치부터 선단의 위치를 제어하는 것은 불가능하다. 그러므로 실험 초기에는 위치정보를 케환시키지 않고 모터에 직접 입력하여 특이점을 빠져나온 후 위치제어를 하였다. 이 실험에 있어서 위치와 진동제어의 이득은

$$K_p = \text{diag}[4.0 \ 4.0 \ 4.0]$$

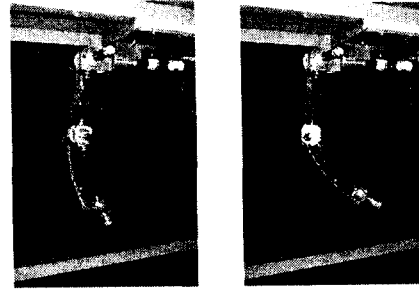
$$K_{ev} = \text{diag}[16.0 \ 16.0 \ 16.0 \ 16.0]$$

이며, high-pass filter의 cutoff주파수는 1[Hz]로 설정했다. Table 2과 Fig. 5는 실험에서 초기 위치/자세와 목표위치/자세를 나타낸다.

Fig. 6 과 Fig. 7에서 (a)는 하나의 여유 자유도

Table 2 Position movement

	x[m]	y[m]	z[m]	α [rad]	β [rad]	γ [rad]
Initial	1.10	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
Desired	0.95	0.35	0.20	0.50	-0.50	1.00



(a)Initial Configuration (b)Final Configuration

Fig. 5 Experiment

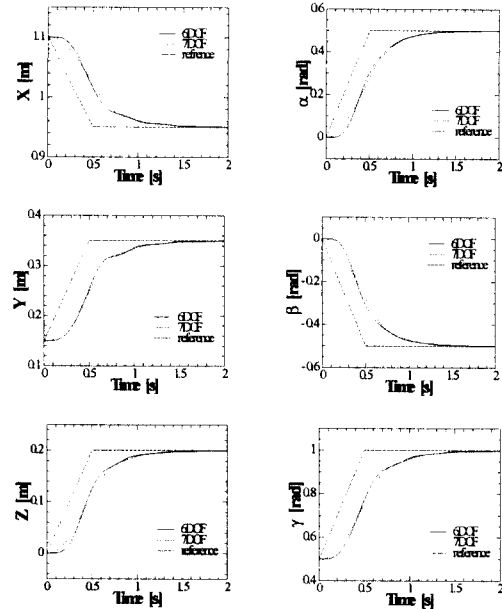


Fig. 6 Position and Orientation response

를 갖는 경우, (b)는 여유자유도가 없는 경우에 대한 실험 결과를 나타낸다. Fig. 6은 위치/자세제어의 응답성을 나타낸다. 또한, Fig. 7은 위치/자세 제어시의 링크의 탄성변형과 관절의 속도 입력치이다. Fig. 7의 탄성변형 결과로부터 (a)7자유도의 유사 역행렬을 이용한 위치제어의 결과가 (b)6자유도의 일반 역행렬을 이용한 것에 비해서 링크1 δz 와 링크2 δy 는 정상상태에서 처짐이 더 크음을 알 수 있다. 이 이유로서는 식(10)은 7자유도의 유사 역행

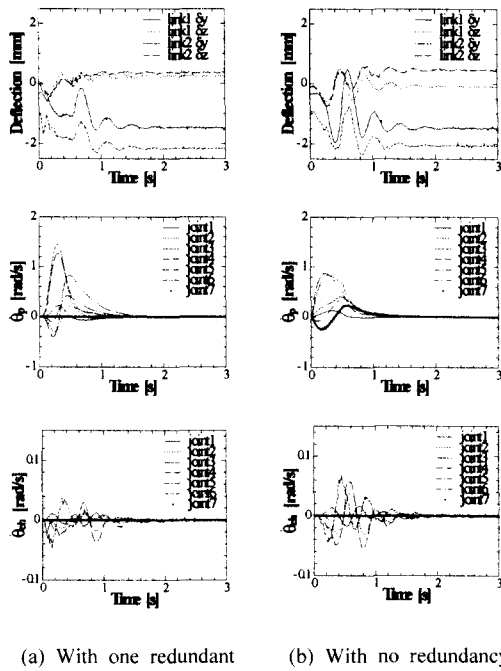


Fig. 7 Deflection and velocity command

를 사용하고 있으며 이는 일반 6자유도의 일반 역행렬을 사용한 것과 비교해서 최소 속도 입력치를 시스템에 입력하기 때문이라 생각된다.

이 결과들로부터 여유 자유도를 갖는 유연 매니플레이터에 있어서 유사 역행렬을 이용하여 위치/자세제어를 수행하는 방법이 링크의 탄성진동과 속도 입력치를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 속도 입력치의 감소는 관절 토크의 감소를 의미하며, 운동 에너지 절약 면에서도 효율적임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 2링크 7관절의 유연 매니플레이터 ADAM을 대상으로 (1) 7자유도의 유사 역행렬을 이용한 위치제어계 (2) 7자유도중 6자유도만을 이용한 위치제어계를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 유사 역행렬을 이용한 위치제어계가 링크의 진동과 관절 토크를 감소시키고 아울러 작업성을 향상에 효과가 있다는 사실을 검증하였다. 또한, 유연 매니플레이터의 집중질량 스프링

모델로부터 도출한 진동제어가 유효함을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 유사 역행렬을 이용해서 위치/자세 제어하는 것이 진동제어에 효과적임을 알 수 있다.

참고문헌

1. J. S. Kim, K. Suzuki, M. Yamano and M. Uchiyama, "Vibration Suppression Control of Constrained Spatial Flexible Manipulators," Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2831 - 2837, 1997.
2. 김진수, "3차원 양팔 유연 매니플레이터의 협조 제어(실험에 의한 검증)," 정밀공학회지, Vol. 17, No. 9, pp. 87-94, 2000.
3. W. K. Hyun, I. H. Suh, "Intelligent Control of Redundant Manipulator in an Environment with Obstacles," The Transactions of the KIEE, Vol. 41, No. 5, pp. 551-561, 1992.
4. 정완균, "여유자유도 로봇의 제어," 전자공학회지, Vol. 23, No. 12, pp. 102-114, 1996.
5. S. J. Kim and Y. S. Park, "Self-motion Utilization for Reducing Vibration of a Structurally Flexible Redundant Robot Manipulator System," Robotica, pp. 669-677, 1998.
6. 吳, 下山, 三浦, "三次元宇宙用マニピュレータの構成法," 日本ロボット學會誌, Vol. 6, No. 5, pp. 338-392, 1988.
7. M. Uchiyama, A. Konno, T. Uchiyama and S. Kanda, "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.
8. 吉川恒夫, "ロボット制御基礎論," コロナ社, 1988
9. 金鎮秀, 近野敦, 内山勝, "フレキシブルマニピュレータの動力學の高精度集中正數モデリング," 日本機械學會論文誌(C編), Vol. 62, No. 602, pp. 4005-4011, 1996.
10. 近野敦, 内山勝, "ホルツァ法に基づくフレキシブルマニピュレータの動力學モデリング," 日本ロボット學會誌, Vol. 12, No. 7, pp. 1021-1028, 1994.
11. S. Lopez-Linares, A. Konno and M. Uchiyama,

- “Vibration Controllability of 3D Flexible Manipulators,” Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 119, No. 2, pp. 326-330, 1997.
12. 李浩吉, 宮崎文夫, 有本卓, “柔軟多リンク・マニピュレータのpds制御,” 計測自動制御學會論文集, Vol. 25, No. 6, pp. 675-681, 1989.
13. 村山誠, 吉本堅一, “三次元空間内で動作する弾性アームの制御,” 日本機械學會集(c編), Vol. 56, No. 522, pp. 424-430, 1990.
14. M. Uchiyama and A. Konno, “Computed acceleration control for vibration suppression of flexible robot manipulators,” In Proc. 5th Int. Conf. on Advanced Robotics, pp. 126-131, 1991.