

여유자유도 유연 매니플레이터의 위치제어

김진수*

Position Control of a Redundant Flexible Manipulator

Jin-Soo Kim*

Abstract

In this paper, we discuss the vibration suppression control of spatial redundant flexible manipulators through pseudo-inverse of Jacobian. In order to verify our method, the experiments are performed for PTP(Point To Point) motion of spatial flexible manipulators (1) with no redundancy (2) with one redundant DOF(degree of freedom). Finally, a comparison between these results is presented to show the performance of out approach.

Key Words : Pseudo-inverse of Jacobian(유사 역행렬), Redundant DOF(여유 자유도), Flexible manipulators(유연 매니플레이터), Vibration suppression control(진동억제 제어), Experiment(실험)

1. 서론

최근, 작업속도 및 작업 성능 향상을 위해서 로봇의 경량화 및 링크의 전장이 길어지는 추세에 있다. 이로 인해서 매니플레이터의 강성이 저하되어 발생하는 변형과 탄성 진동이 제어 성능에 악영향을 미치게 한다. 이와 같이 강성이 작은 매니플레이터(유연 매니플레이터)를 이용하는 경우에는 링크의 탄성 진동을 억제하는 것이 중요한 문제이다. 이러한 이유로부터 초기 유연 매니플레이터의 연구는 위치제어와 진동 제어와 관한 것이 대부분이었다. 한편, 최근에는 다 링크 다 관절 로봇을 이용한 협제어, 협

조제어 등의 산업 현장에 응용할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 관점에서 다 링크 다 관절로 인해서 발생하는 여유자유도를 적극적으로 활용하는 연구 필요성이 높아지고 있다.

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.⁽²⁾ 현재까지 여유자유도 매니플레이터의 연구는 강제 매니플레이터를 대상으로 한 것이 대부분이었다. 한편, 여유자유도 유연 매니플레이터의 연구는 평면 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션에 의한 해석의 결과

* 한국항공우주연구원 우주기반기술연구부 유도제어연구그룹 (jskim55@kari.re.kr)

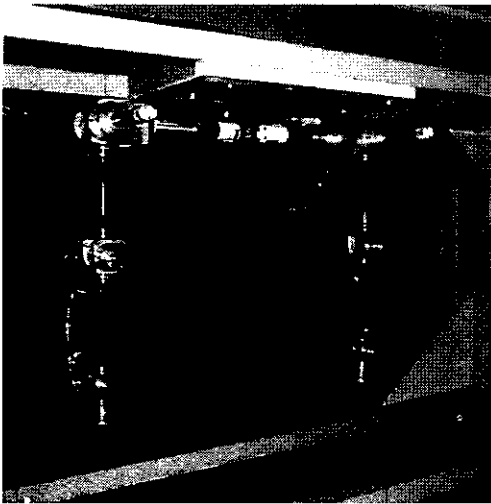


Fig. 1 A photograph of experimental robot setup

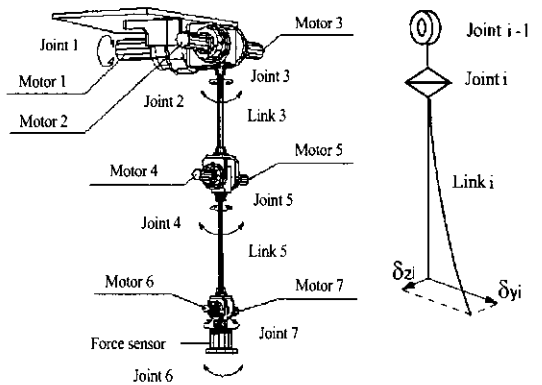


Fig. 2 Joint, motor, links and link deflections of Arm (i=3, 5)

가 발표되었으며⁽³⁾, 실험에 의한 검증은 거의 전무한 상황이다. 유연 매니퓰레이터에 있어서 진동억제에 여유자유도를 이용하고자 하는 연구는 미미하나 발표되고 있다.

이러한 관점에서, 본 연구는 여유자유도 유연 매니퓰레이터의 유사 역행렬을 이용하여 링크의 진동을 감쇠시킬 수 있으며 아울러 작업을 향상시킬 수 있는 위치 및 진동제어계를 제안한다. 진동억제 제어는 유연 매니퓰레이터의 집중정수 모델중의 한 종류인 집중질량 스프링모델을 이용하여 도출한다.⁽⁴⁾ 2링크 7관절의 로봇 ADAM (Aerospace Dual-Arm Manipulator)⁽⁵⁾을 대상으로 (1) 7자유도의 유사 역행렬을 이용한 위치제어계 (2) 7자유도중 6자유도만 이용한 위치제어계를 이용하여 실험을 수행한다. 이 실험으로부터 유사 역행렬을 이용한 위치제어계의 유효성을 검증한다.

2. 실험장치

2.1 실험기 ADAM

본 연구에 사용된 유연 매니퓰레이터 ADAM는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2개의 팔을 갖고 있으며, 각각의 팔은 2개의 유연 링크와 7개의 회전 관절로 구성되어 있다. Fig. 2는 관절, 모터, 링크의 변형을 나타내는 그림이다. 관절 1~3, 관절 4, 5, 관절 6, 7은 각각의 차동기구를 이용하여 모터 1~3, 모터 4, 5, 모터 6, 7에 의해서 구동된다. 모터로서는 DC서보 모터를 이용하고 있으며, 감속기를

Table 1 Parameters of ADAM

Parameter		Value
Length of link 3	[m]	0.50
Length of link 5	[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

내장하고 있다. 그 감속비는 1/80이다. 관절 1~3은 타코메타(tachometer)와 광학 엔코더(optical encoder)를 내장, 관절 4~7은 광학 엔코더만 내장하고 있다. 모터의 회전각속도는 관절 1~3의 경우 내장 타코메타로부터, 관절 4~7의 경우는 내장 광학 엔코더로부터 검출된 회전 각펄스 신호를 F/V(Frequency to Voltage) 변환함으로써 검출되며, 이 회전 각속도는 서보 앰프에 입력된다. 각 링크의 진동은 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용하여 검출한다. Table 1에 실험 로봇 ADAM에 대한 각각의 제원을 나타냈다.

2.2 운동방정식

본 논문에 있어서, 매니퓰레이터 선단의 위치와 자세를 나타내는 벡터 p는 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 관절각 벡터, $e \in R^n$ 는 탄성 변위 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 과 선단의 위치/자세벡터 p 의 미분치 관계는 다음과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

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

여기서,

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \theta} & \frac{\partial p}{\partial e} \end{bmatrix}^T$$

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

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, v 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 자코비안(Jacobian)행렬이다. 그러나 자유도가 적은 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 있다.⁽⁴⁾

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

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

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 코리올리(Coriolis)력 벡터, g_1 , g_2 는 중력벡터, $M_{22} \in R^{m \times m}$ 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

B. Siciliano는 탄성거동을 강제 매니플레이터의 운동으로부터 섭동(Perturbation)으로 간주하여, 특히 섭동(a singularly perturbed)모델을 이용해서 유연 매니플레이터의 운동을 빠른 부분 시스템(fast subsystem)과 느린 부분 시스템(slow subsystem)으로 분리하였다. 이 부분 시스템의 제어입력을 각각 계산한 후, 이 값을 합하여 전체 시스템의 제어입력으로 하였다.⁽⁷⁾ 여기서, 느린 부분 시스템과 빠른 부분 시스템은 각각 강체 매니플레이터의 운동과 탄성 거동에 상응한다. 丙山는 주파수 대역에서 제어를 분리해서 저주파 영역에서는 궤도제어를 고주파 영역에서는 진동억제 제어를 수행하는 제어법을 제안하였다.⁽⁶⁾ 본 논문에서는 특히 섭동법과 주파수 분리법을 모두 고려하여, 관절 각도제어에 대한 제어입력과 진동억제 제어에 대한 제어입력으로 계산한 후 각각의 제어입력을 합하여 전체입력으로 한다.

본 연구에서 사용한 제어계는 Fig. 3의 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 계산한다.

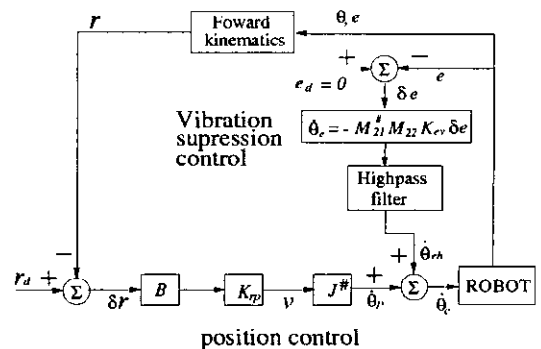


Fig. 3 Position and vibration suppression controller

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

여기서, G_r 는 모터의 감속비 행렬, K_{sp} 는 속도 제환 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 제환 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 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 위치 벡터와 현재 위치벡터, K_{rp} 는 비례 이득, B 는 위치오차 중의 선단의 자세각 성분을 회전벡터로 변환하는 행렬이다. 식(8)의 일반 역행렬(generalized inverse matrix)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 $\dot{\theta}_p$ 는 속도 입력치의 노름(norm), $\|\dot{\theta}_p\|$ 이 최소로 되도록 하는 특징이 있다. 즉, 각 관절의 목표 각속도의 노름이 작다는 것이며, 결과적으로 관절의 가속도가 감소되며, 아울러 링크의 진동을 감쇠시킬 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 진동억제 제어 입력치

본 논문에서 이용하는 진동억제 제어 입력치는 매니플레이터의 운동방정식으로부터 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 참고문헌[1]로부터 다음과 같이 진동억제 제어입력 $\dot{\theta}_e$ 를 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_{eh} = M_{21}^+ M_{22} (K_{ev} \Delta e + K_{ep} \int_0^t \Delta e) \quad (11)$$

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

여기서, M_{21}^+ 는 M_{21} 의 유사 역행렬이며, e_0 는 중력의 영향에 의해서 발생하는 변형량을 의미한다. Δe 은 식(12)으로부터 간단히 구할 수 있으나, 실험에서는 계산을 간단히 하기 위해서 1차 고역 필터(high-pass filter)를 사용한다. 이 필터를 사용하면 Δe 는

$$\Delta e = S_{high} e \quad (13)$$

이며, S_{high} 는 고역 필터링을 의미한다. 식(11)에서 비례 성분만을 고려하면 진동제어 입력은 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_{eh} = S_{high} M_{21}^+ M_{22} K_{ev} e \quad (14)$$

4. 실험결과 및 고찰

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

먼저, 첫 번째는 식(9)의 유사 역행렬을 이용한 위치제어를 수행한다. 두 번째로 6자유도만을 이용한 실험은 관절 1~6을 이용해서 선단의 위치를 제어하며, 나머지 관절

Table 3 Movement of end-effector in x direction

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

Table 4 Movement of end-effector in y direction

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

7에 대해서는 위치제어와는 별도로 항상 관절 각이 0°가 되도록 제어한다. 6자유도 실험에서 이용한 역행렬은 다음과 같다.

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

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

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

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

고역 필터의 컷오프(cut-off) 주파수는 1[Hz]로 설정했다. Table 3과 Table 4는 실험에서 초기위치/자세와 목표 위치/자세를 나타낸다.

Fig. 4와 Fig. 6에서 6 DOF는 여유자유도가 없는 경우, 7 DOF는 하나의 여유자유도를 갖는 경우를 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 6은 위치/자세제어의 응답성을 나타낸다. Fig. 5과 Fig. 7에서 (a)는 여유자유도가 없는 경우, (b)는 하나의 여유자유도를 갖는 경우에 대한 실험 결과를 나타낸다. 또한, Fig. 5과 Fig. 7은 위치/자세 제어시의 링크의 탄성 변형량과 관절의 속도 입력치를 나타낸다. Fig. 4에서 y방향 위치응답이 z방향 응답과는 다르게 위치 이탈이 발생하는 현상은 x-y평면상에서의 중력의 영향과 램프

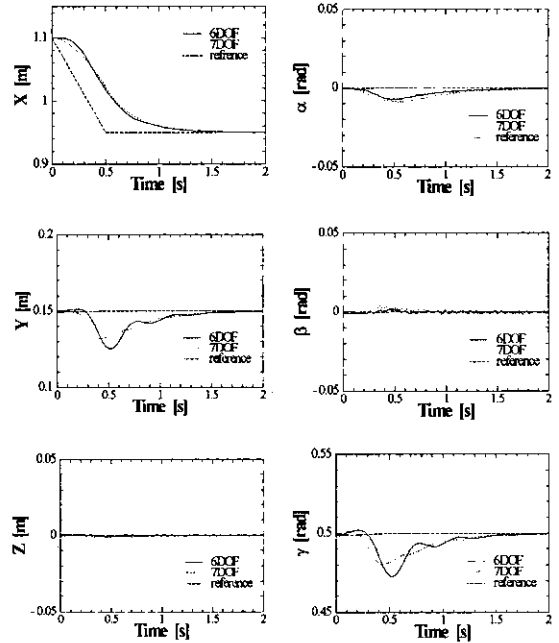
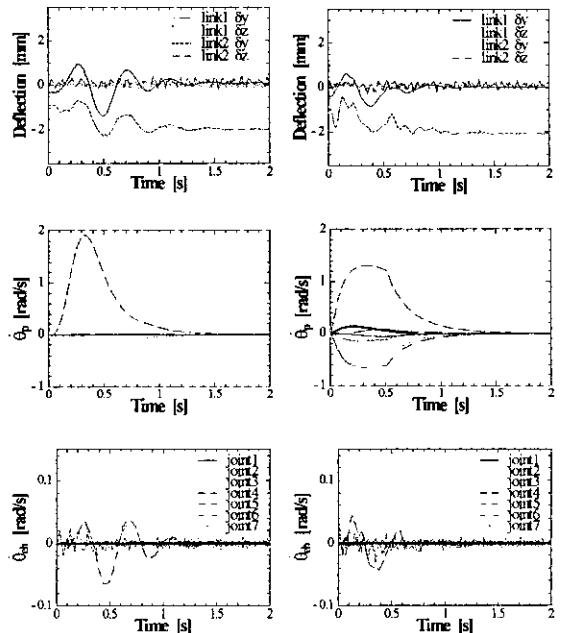


Fig. 4 Position and Orientation response in x direction



(a) with no redundancy

(b) with one redundant

Fig. 5 Deflection and velocity command in x direction

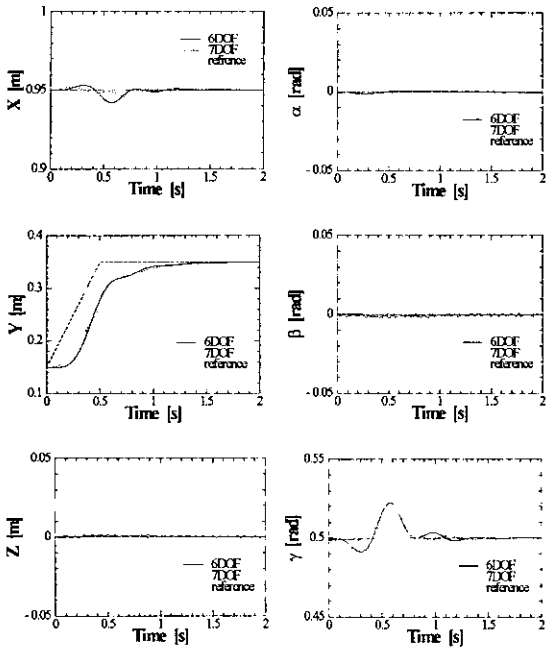
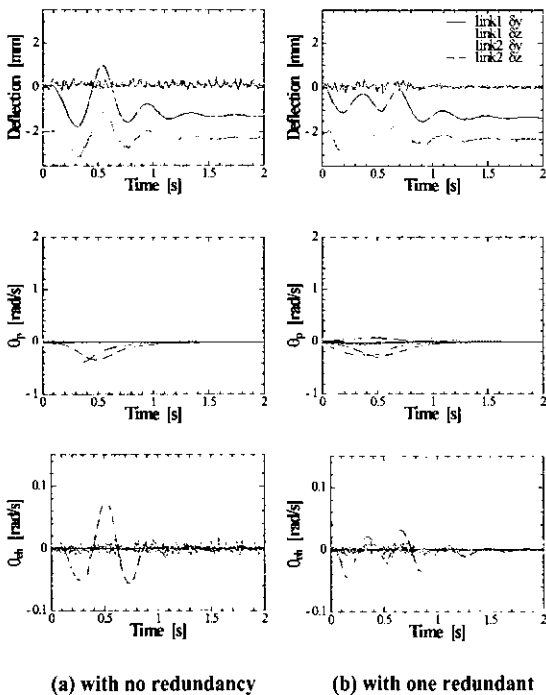


Fig. 6 Position and Orientation response in y direction



(a) with no redundancy

(b) with one redundant

Fig. 7 Deflection and velocity command in y direction

(ramp)입력의 영향에 의해서 발생한 것이다. 또한 이상과 동일한 원인으로 Fig. 4에서 α , γ 의 자세응답, Fig. 6에서 x방향 위치응답, γ 의 자세응답에서도 이탈 현상이 발생한다. 이 결과들로부터 여유자유도를 갖는 유연 매니플레이터에 있어서 유사 역행렬을 이용하여 위치/자세제어를 수행하는 방법이 링크의 탄성진동과 속도 입력치를 감소시킬 수 있음을 명백히 알 수 있다. 또한 속도 입력치의 감소는 관절 토크의 감소를 의미하며, 운동 에너지 절약 면에서도 효율적임을 알 수 있다. 본 논문에서 이용한 진동억제 제어 입력은 시스템의 안정성을 고려하여 설계하였다. 또한 실험을 통해서 진동억제 제어에 유효성이 있음을 확인할 수 있었으나, 안정성 해석은 수행하지 않는다.

5. 결론

3차원 유연 매니플레이터의 경우, 설계단계에서 진동억제제가 용이한 기구로 설계하기 위해서 차동기어를 이용하여 각 진동성분과 구동기의 관계가 매니플레이터의 자세에 의존하지 않도록 설계하는 방법이 있다. 그러나, 본 논문에서는 설계단계에서 기존의 매니플레이터 구조를 고려하여 자유도 배치를 채용한 일반적인 여유자유도를 갖는 유연 매니플레이터 ADAM를 이용하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 2링크 7관절의 유연 로봇 ADAM을 대상으로 ① 7자유도의 유사 역행렬을 이용한 위치제어계 ② 7자유도중 6자유도만을 이용한 위치제어계를 이용하여 실험을 수행하였다. x, y방향에 대한 위치제어 실험 결과로부터 유사 역행렬을 이용한 위치제어계가 링크의 진동과 관절 토크를 감소시키고 아울러 작업성을 향상에 효과가 있다는 사실을 검증하였다.

이 결과들로부터 유사 역행렬을 이용해서 위치/자세 제어하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) 김진수, "3차원 양팔 유연 매니플레이터의 협조제어(실험에 의한 검증)", 정밀공학회지, Vol. 17, No. 9, pp. 87~94, 2000.
- (2) 정완균, "여유자유도 로봇의 제어", 전자공학회지, vol. 23, no. 12, pp. 102~114, 1996.
- (3) S. J. Kim and Y. S. Park, "Self-motion Utilization

for Reducing Vibration of a Structurally Flexible Redundant Robot Manipulator System", *Robotica*, Mar. pp. 669~677, 1998.

- (4) 金鎮秀, 近野敦, 內山勝, "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.
- (5) 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.
- (6) 吉川恒夫, "ロボット制御基礎論", コロナ社, 1988.
- (7) B. Siciliano and W. J. Book, "A Singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 79~90, 1988.
- (8) 內山勝, 姜兆慧, 箱守京次郎, "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. 7, No. 4, pp. 284~293, 1989.