

〈論 文〉

평행구동방식 로봇 조작기의 진동제어

최승철* · 하영균** · 박영필***

(1991년 8월 2일 접수)

Vibration Control of a Robot Manipulator with a Parallel Drive Mechanism

Seung-Chel Choi, Young-Kyun Ha and Young-Pil Park

Key Words : Vibration Control(진동제어), Robot Manipulator(로봇 조작기), Parallel Drive Mechanism(평행구동기구), Flexible Link(유연한 링크), Tip Mass(첨단질량), Perturbed Variable(교란변수), Optimal Control(최적제어), Optimal Observer(최적관측기), Inaccessible State(측정불가능 상태변수)

Abstract

A long and light-weight forearm of the vertical 2 DOF robot manipulator with a heavy payload driven by parallel drive mechanism is modelled as a Euler-Bernoulli beam with a tip mass subjected to a high speed rotation. Governing equation is obtained by Hamilton's principle and represented as state variable form using the perturbed variables which describe the perturbed errors at the manipulator's final configuration. Digital optimal control and observer theory are used to suppress the forearm vibration and control the positions of the joint angles with measured/estimated state feedback. Computer simulations and experimental results are obtained and compared each other.

기호설명

a	: 링크 5의 강체허브 길이, m	$\tilde{w}(x, t)$: 보의 교란 횡방향 변위, m
EI	: 보의 굽힘강성계수, Nm ²	$\tilde{w}(x)$: 조작기 최종위치에 대한 보의 정적 횡방향 변위, m
g	: 중력가속도 (=9.80665m/sec ²)	x, y, z	: 보의 고정단에 원점이 위치한 회전좌표계
h	: 보의 두께, m	X, Y, Z	: 절대좌표계
l	: 링크 5의 유연한 보 길이, m	x_s	: 보의 고정단에서 변형률 게이지까지의 거리, m
l_1	: 링크 1, 3, 4의 길이, m	$\delta(\)$: Dirac Delta 함수
l_2	: 링크 2의 길이, m	$\varepsilon(x_s, t)$: 보의 x_s 지점에서의 변형률
m	: 보의 단위길이 당 질량, Kg/m	$\theta_i(t)$: 조작기의 i 번째 관절각, rad
M	: 첨단질량, Kg	θ_{i0}	: 조작기 초기위치에 대한 i 번째 관절각, rad
T	: 샘플링 시간, sec	$\bar{\theta}_i(t)$: 조작기의 i 번째 교란 관절각, rad
$w(x, t)$: 보의 횡방향 변위, m	$\bar{\theta}_i$: 조작기 최종위치에 대한 i 번째 관절각,

*금성산전주식회사 창원연구소

**정회원, 연세대학교 공과대학 산업기술연구소

***정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

	rad
ω_i	: 조작기 i 번째 관저링 각속도, rad/sec
ω^*_i	: 보의 i 번째 고유진동수, rad/sec
M	: 행렬 M
V	: 벡터 V
$(M)_{ij}$: M 의 (i, j) 번째 요소
$(V)_i$: V 의 i 번째 요소
diag()	: 대각행렬
$\underline{0}, \underline{0}$: 영(Zero) 행렬, 영 벡터
\underline{I}	: 단위행렬
(\cdot)	: t 에 대한 편미분
(\prime)	: x 에 대한 편미분

1. 서 론

산업용 로봇 조작기는 생산성 향상을 위하여 고속동작, 적은 에너지 소모 및 높은 위치정밀도의 보장등이 이루어져야 한다. 로봇 조작기가 고속으로 운동 하려면 조작기의 경량화가 필수적이나 경량화에 따른 조작기 구조물의 강성 저하로 구조물을 강제로 취급하기가 곤란하게 되어 구조물의 탄성에 의한 진동 문제가 발생되게 되며, 특수작업을 위해 길이가 긴 링크를 사용하는 조작기 또한 긴 세장비에 의해 진동 문제가 크게 대두되게 된다. 따라서 조작기의 유연성을 고려하여 그 위치 및 진동제어를 동시에 수행하여야 조작기의 정밀도 및 안정성을 보장할 수 있게 되며, 이 경우, 경량 조작기의 장점인 고속동작, 적은 에너지 소모, 조작기중량 대 가반중량 비의 증가 및 작업영역의 증대 등의 잇점들을 얻을 수 있다.

최근들어 로봇 조작기를 강체가 아닌 탄성을 가진 구조물로 간주하여 이의 해석 및 제어에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. 1975년 Book⁽¹⁾은 두 개의 링크와 관절을 가진 조작기의 링크들을 강체가 아닌 탄성 보로 가정하고 이의 귀환제어에 대한 연구를 행하였으며, 그 후 많은 관련 논문들을 발표하였고, 1978년 Balas⁽²⁾는 탄성계를 분포정수계(distributed parameter system)로 보고 이의 귀환제어 방법에 대해 연구하였으며, 가제어성(controllability), 기관측성(observability) 및 제어되지 않는 잔류 모드들에 의한 spillover 효과등에 대해 언급하였다. 1985년 Fukuda⁽³⁾는 첨단질량이 없는 회전하는 유연한 외팔보에 대해 귀환제어를 행하여 위치제어시 보의 진동을 억제하였으며

이를 2 자유도 SCARA 형의 로봇 조작기까지 확장하였다. 1986년 Sakawa⁽⁴⁻⁵⁾는 평행구동방식 2 자유도 조작기의 마지막 링크를 유연하다고 가정하여 이의 모드 추정법과 이에 기초한 최적제어에 대해 연구하였고, 동년 박영필⁽⁶⁾은 충격적 회전을 하는 단일링크 조작기 팔의 진동을 최소로 하는 운전 조건을 Galerkin의 모드 합 방법을 이용하여 구하였다. 1987년 Yoshida⁽⁷⁾는 유연한 단일링크 조작기 팔에 대해 디지털 최적제어 이론을 적용하고 고차 모드의 spillover 및 샘플링시간이 제어효과에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 강체허브(rigid hub)와 첨단질량(tip mass)을 가진 유연한 단일링크 로봇 팔에 대해, 1987년 하영균⁽⁸⁾은 최적제어 및 관측기 이론을 이용하여 제어기를 구성하고 제어기설계에 관계된 가중치의 변화가 제어효과에 미치는 영향에 대해 연구를 행하였으며, 1988년 박노철⁽⁹⁾은 디지털 제어제를 구성하고 샘플링시간 및 목표회전각함수의 형태가 제어효과에 미치는 영향에 대해 연구를 행하였고, 김승호⁽¹⁰⁾는 특별히 설계된 선형작동기를 이용한 다입출력 제어계(MIMO control system)를 구성하여 이의 제어효과에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 무거운 부하중량(payload)을 운반하는 평행구동기구(parallel drive mechanism)를 가진 2 자유도 수직 로봇 조작기의 마지막 링크를 고속화 및 작업영역의 확대를 위해 경량의 길이가 긴 링크로 구성하고, 동적 해석 및 제어를 위해 이를 수직면상에서 회전하는 첨단질량을 가진 Euler-Bernoulli 외팔보로 모델링하였다. Hamilton의 원리를 적용하여 계의 지배방정식을 구하였으며 이를 조작기의 최종 자세(configuration)에 대한 교란변수들(perturbed variables)을 도입하여 이산시간계 상태방정식으로 표시하였다. 계의 상태방정식에 대해 디지털 최적제어 및 최적관측기 이론을 적용하여, 유연한 조작기의 위치 및 진동제어를 병행하여 수행하는 제어기를 설계하였으며, 제어기의 효용성 및 적용성을 검토하기 위하여 수치해석 및 실험을 행하였고 이들 결과를 비교, 검토하였다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

수직평면에서 운동하는 2 자유도 평행구동방식 로봇 조작기에 대하여, Fig. 1과 같이 링크 1과 링크

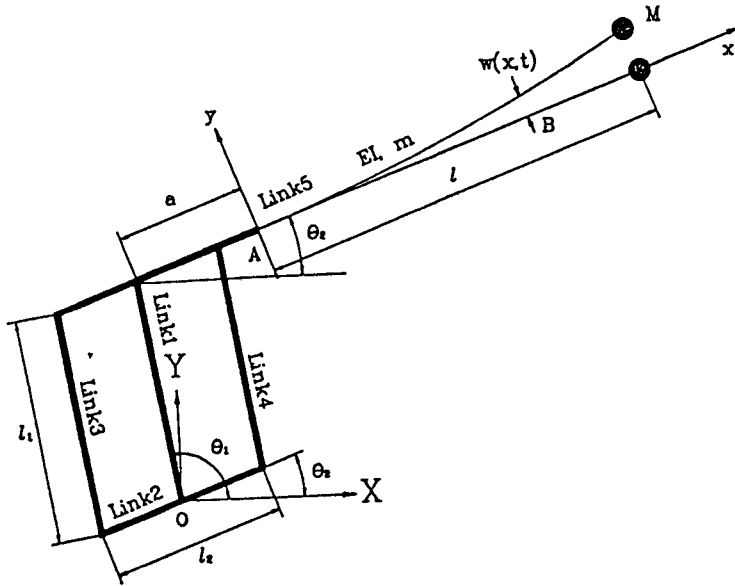


Fig. 1 2 DOF vertical flexible robot manipulator model with a parallel-drive-mechanism

크 3,4는 같은 길이 l_1 , 링크 2는 l_2 의 길이를 가지고 있으며, 이들은 강체로 가정한다. 링크 5는 강체 링크부와 유연한 링크부로 나뉘어져 있으며, 그 회전중심에 대하여 강체허브의 길이는 a 이고, 유연한 링크는 길이 l , 굽힘강성계수 EI , 단위길이당 질량이 m 인 Euler-Bernoulli 보로 가정하고 원심력 및 길이방향과 수평방향의 변위는 없다고 가정한다. end-effector 및 부하중량은 첨단질량 M 으로 단순화하며, 조작기를 구동하는 두 개의 서보 모터는 절대좌표계의 원점 O 에 위치하면서 각각 링크 1과 링크 2를 $\omega_1(t) = \dot{\theta}_1(t)$, $\omega_2(t) = \dot{\theta}_2(t)$ 의 각속도로 회전시킨다. X, Y, Z 는 링크 1과 링크 2의 회전중심이 원점인 절대좌표계이며, x, y, z 는 링크 5의 유연한 링크부와 강체 링크부가 연결된 A 점을 원점으로 하는 회전좌표계이다. 회전좌표계의 단위 벡터들을 i_B, j_B, k_B 라 하면, 유연한 링크부 위의 임의의 지점 B 의 절대속도 $v(x,t)$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$v(x,t) = -\{w(x,t)\dot{\theta}_2 + l_1\dot{\theta}_1\sin(\theta_1 - \theta_2)\}i_B + \{(x+a)\dot{\theta}_2 + l_1\dot{\theta}_1\cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{w}(x,t)\}j_B \quad (1)$$

여기서 $w(x,t)$ 는 링크 5의 굽힘에 의한 y 방향의 변위이다.

링크 5의 유연한 부에 확장된 Hamilton의 원리를

적용하면

$$\delta \int_{t_2}^{t_1} (T - V) dt = 0 \quad (2)$$

이고, 여기서 계의 운동에너지와 위치에너지 T 와 V 는

$$T = \int_0^l \frac{1}{2} M_T (v^T v) dx \quad (3)$$

$$V = \int_0^l \left\{ \frac{1}{2} (EI w''(x,t))^2 + M_T g w(x,t) \cos \theta_2 \right\} dx \quad (4)$$

이며, 여기서 $M_T = m + M\delta(x-l)$ 이다.

식(3), (4)를 (2)에 대입하여 원심력항들을 무시하면 다음과 같은 운동방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

$$EI w''''(x,t) + M_T \dot{w}(x,t) = -M_T \{g \cos \theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + (x+a) \ddot{\theta}_2\} \quad (5)$$

$$w(0,t) = 0, \quad w'(0,t) = 0, \quad (6)$$

$$w''(l,t) = 0, \quad w'''(l,t) = 0$$

2.2 교란변수들로 표현된 지배방정식

$\bar{\theta}_1$ 과 $\bar{\theta}_2$ 를 링크 1과 링크 2의 최종 목표관절각이라 하면, 이 관절각에 대한 유연한 링크의 정적 변위 (static displacement) $\bar{w}(x)$ 는

$$EI\bar{w}''''(x) = -M_T g \cos \bar{\theta}_2 \quad (7)$$

의 식을 만족하며, 이 최종 평형상태에 대한 교란 변수(perturbed variable)들을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{교란관절각: } \bar{\theta}_i(t) = \theta_i(t) - \bar{\theta}_i \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

$$\text{교란변위: } \bar{w}(x, t) = w(x, t) - \bar{w}(x) \quad (9)$$

식(8), (9)를 식(5), (6)에 대입하고 식(10)을 이용한 뒤, 교란변수들이 작은 값이라고 가정하고 비선형성을 무시하면 다음과같은 교란변수들로 표현된 계의 지배방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} EI\bar{w}''''(x, t) + M_T \bar{w}''(x, t) \\ = M_T \{g \bar{\theta}_2 \sin \bar{\theta}_2 - l_1 u_1(t) \cos(\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2) \\ - (x+a) u_2(t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{w}(0, t) = 0, \quad \bar{w}'(0, t) = 0, \\ \bar{w}(l, t) = 0, \quad \bar{w}''(l, t) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $u_i(t) = \dot{w}_i(t) = \dot{\theta}_i(t)$ ($i=1, 2$)이다.

2.3 상태방정식

계의 제어를 위하여, 식(10)의 해를 Galerkin의 모드 합(mode summation) 방법을 사용하여 다음과 같이 가정하여 계를 유한차원화한다⁽¹¹⁾.

$$\bar{w}(x, t) = \sum_{j=1}^N \phi_j(x) q_j(t) \quad (12)$$

여기서 N 은 가정된 계의 모드 수, $\phi_j(x)$ 는 계의 표준함수(comparison function), $q_j(t)$ 는 일반화된 좌표(generalized coordinate)를 나타낸다. 본 연구에서는 $\phi_j(x)$ 를 첨단질량이 없는 균일외팔보의 고유함수를 사용한다.

식(12)를 식(10)에 대입한 뒤 고유함수의 직교성조건을 이용하여 행렬식을 얻고, 이의 고유치해석을 통하여 구한 표준화된 모달행렬 \underline{P} 와 고유진동수 ω_k^* 를 이용하면 비연성된 계의 행렬식을 얻을 수 있다. 이에 다음과 같이 정의된 두 개의 상태변수벡터(state variable vector)

$$x_1 = \begin{bmatrix} H \\ \dot{H} \end{bmatrix}, \quad x_2 = \begin{bmatrix} \bar{\theta}_1 \\ \omega_1 \\ \bar{\theta}_2 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

를 이용하여 정리하면 다음과 같은 계의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_1 = \underline{A}_1 x_1 + \underline{A}_{12} x_2 + \underline{B}_1 u \quad (14)$$

여기서

$$\underline{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\underline{\Lambda} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_N & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_{N1} & B_{N2} \end{bmatrix}, \quad (u)_i = u_i(t)$$

이며, 포함된 작은 행렬 및 벡터들은 다음과 같고, 사용되는 상수 σ_i , β_i 의 값들을 Table 1에 나타내었다.

$$\underline{\Lambda} = \text{diag}(\omega_1^{*2}, \dots, \omega_i^{*2}, \dots, \omega_N^{*2})$$

$$(A_N)_i = 2g \sin \bar{\theta}_2 \sqrt{ml} \sum_{k=1}^N (P)_{ki} \left\{ \frac{\sigma_k}{\beta_k} + M^* (-1)^{k-1} \right\}$$

$$(B_{N1})_i = -2l_1 \cos(\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2) \sqrt{ml} \sum_{k=1}^N (P)_{ki} \left\{ \frac{\sigma_k}{\beta_k} + M^* (-1)^{k+1} \right\}$$

$$(B_{N2})_i = -2\sqrt{ml} \sum_{k=1}^N (P)_{ki} \left\{ \frac{l}{\beta_k^2} + (a+l) M^* (-1)^{k-1} + a \frac{\alpha_k}{\beta_k} \right\}$$

$$M^* = M / (ml)$$

또한 정의된 상태변수벡터 내의 H 는 다음의 좌표 변환식을 만족하는 벡터이다.

$$\begin{aligned} Q = PH \quad \text{또는} \quad H = \underline{P}^{-1} Q \\ (Q)_i = q_i(t) \end{aligned} \quad (15)$$

모터를 속도귀환회로가 내장된 속도제어용 드라이버를 이용하여 구동하고, 모터 및 드라이버의 성능이 링크들의 운동에 따른 부하변동에 의한 속도변화를 충분히 제어할 수 있는 경우, 구동부의 상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

Table 1 Values of β_j and σ_j

j	β_j	σ_j
1	1.87510407	0.734095514
2	4.69409113	1.018467319
3	7.87475744	0.999224497
4	10.99554073	1.000033553

$$\dot{x}_2 = \underline{A}_2 x_1 + \underline{B}_2 u \quad (16)$$

여기서

$$\underline{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 식(14)와 식(16)을 결합하면 전체 계의 상태 방정식은

$$\dot{x} = \underline{A}_c x + \underline{B}_c u \quad (17)$$

으로 표시되며, 여기서

$$x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}, \underline{A}_c = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{A}_{12} \\ O & \underline{A}_2 \end{bmatrix}, \underline{B}_c = \begin{bmatrix} \underline{B}_1 \\ \underline{B}_2 \end{bmatrix}$$

이다.

계의 출력벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$y = [\tilde{\varepsilon}(x_s, t) \quad \tilde{\theta}_1 \quad \omega_1 \quad \tilde{\theta}_2 \quad \omega_2]^T \quad (18)$$

여기서 $\tilde{\varepsilon}(x_s, t)$ 는

$$\tilde{\varepsilon}(x_s, t) = \varepsilon(x_s, t) - \bar{\varepsilon}(x_s) \quad (19)$$

로 정의되는 교란변형률(perturbed strain)이며, $\varepsilon(x_s, t)$ 는 계의 동적변형률(dynamic strain), $\bar{\varepsilon}(x_s)$ 는 조작기가 최종 평형상태에 있을 때의 정적변형률(static strain)이다. 이 출력벡터에 대한 계의 출력식은

$$y = \underline{C}x \quad (20)$$

로 표시되며 출력행렬은 다음과 같다.

$$C = \left[\begin{array}{c|cccc} \hline \underline{\Phi}^T \underline{P} & O^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \underline{O}_{4 \times 2N} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \right]$$

여기서

$$(\Phi)_i = -\frac{h}{2} \phi_i''(x_s)$$

이고, h 는 보의 두께이다.

식 (17), (20)의 상태방정식을 샘플링시간 T 로 하여 이산시간계(discrete time system)로 변환하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$x(k+1) = \underline{A}x(k) + \underline{B}u(k) \quad (21)$$

$$y(k) = \underline{G}x(k) \quad (22)$$

여기서

$$\underline{A} = e^{\underline{A}_c T}, \underline{B} = \int_0^T e^{\underline{A}_c \tau} \underline{B}_c d\tau$$

이다. 식(21), (22)로 표시되는 계는 가제어성(controllability), 가관측성(observability) 시험결과, 가제어(controllable), 가관측(observable) 함이 입증되었다.

2.4 디지털 최적제어^(11,12) 및 최적관측기^(11,13)

계의 상태방정식 (21), (22)에 대하여 정상상태 최적제어(steady-state optimal control) 이론을 도입하면 제어입력 $u(k)$ 는

$$u(k) = -\underline{K}x(k) \quad (23)$$

로 결정되며 귀환계수행렬 \underline{K} 는 다음의 2차 성능계수(quadratic performance index)

$$PI = \lim_{k_1 \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{k_1} \{x^T(k) \underline{Q}x(k) + u^T(k) \underline{R}u(k)\} \quad (24)$$

를 최소화하는 것을 선택한다.

식 (23)으로 표시되는 최적제어력 $u(k)$ 는 계의 모든 상태변수들을 알아야 결정할 수 있으나 상태변수들의 선형조합인 계의 출력벡터만 직접 측정이 가능하므로 관측기 이론을 도입하여 상태변수벡터 $x(k)$ 의 추정치 $\hat{x}(k)$ 를 구하고 이를 이용하여 최적제어력을 결정한다. 식(21), (22)를 측정불가능 상태변수들에 관한 상태방정식으로 정리하여 이에대한 최소차수 관측기(minimum-order observer)를 설계하고 추정오차를 최소화 하는 최적관측기 이론을 이용하여 관측기 이득행렬 \underline{L}_e 을 구한다. 최종적인 예측형태(prediction type)의 최적 관측기 상태방정식은 다음과 같다.

$$z(k+1) = \underline{A}_0 z(k) + \underline{C}_0 y(k) + \underline{B}_0 u(k) \quad (25)$$

이 관측기의 상태변수벡터 $z(k)$ 를 이용하여 $x(k)$

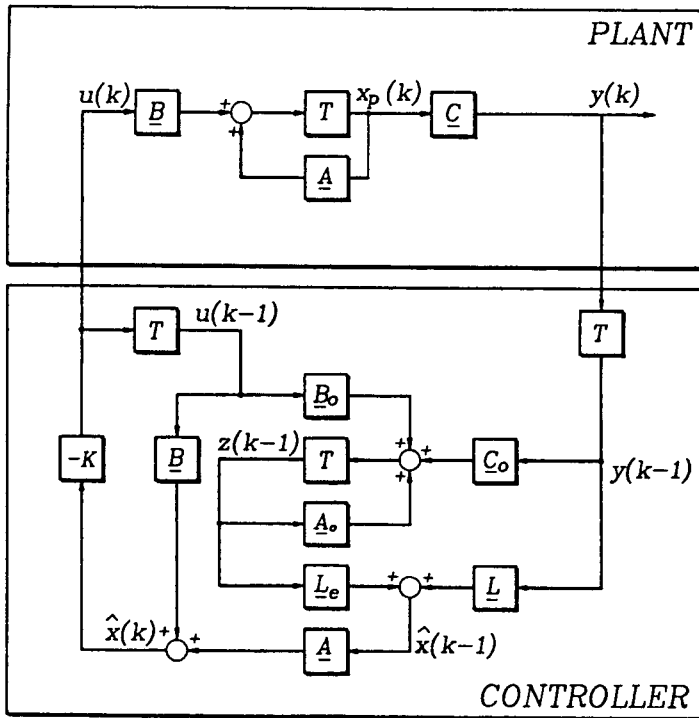


Fig. 2 Block diagram of the closed-loop system

의 추정치 $\hat{x}(k)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{x}(k) = L_o z(k) + L y(k) \tag{26}$$

이와 같이 최적제어 및 최적관측기 이론을 이용하여 구성된 귀환제어계를 Fig. 2에 나타내었다.

3. 수치해석 및 실험

3.1 실험장치의 구성

식(12)로 계의 모드 수를 가정할 때, 모드 수 N 을 충분히 크게 가정하여야 계의 동적거동을 충실히 표현할 수 있으나, 큰 차수의 제어계는 샘플링 시간이 길어져 고차 모드에 대한 샘플링이 부정확해짐에 따라 제어가 불가능해지며, 계가 불안정해진다. 따라서 충분히 큰 모드 수 I 로 모델링하고, 그중 $N(N < I)$ 개의 모드만을 제어하는 것으로 제어계를 구성한다.

수치해석 및 실험에 관계된 파라미터들을 Table 2에 나타내었으며, 링크 5의 유연한 부분은 길이 2.56m, 폭 40mm, 높이 20mm 이며, 두께가 1.2mm인 사각 알루미늄 파이프를 사용하였으며 수치

해석 및 측정에 의해 구한 고유진동수들을 Table 3에 나타내었다. 팔의 고유진동수 측정은 평형상태에 있는 팔에 충격력을 가한뒤 팔의 진동신호를 팔에 부착된 변형률 게이지를 통하여 FFT 분석기에 입력하여 행하였다. 유연한 로봇 조작용의 제어 실험을 위하여 구성한 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 주제어기는 80286/80287 마이크로 프로세서를 사용하는 개인용 컴퓨터를 이용하였으며 제어알고리즘은 pascal 언어를 사용하여 작성되었다. 로봇 팔의 변형률과 관절의 회전각속도는 각각 변형률 게이지와 tacho generator를 통하여 아나로그 전압으로 변환되며, A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 팔의 변형률 신호는 한 쌍의 마주보는 변형률 게이지를 사용하여 온도변화 및 축방향변형, 비틀림변형에 의한 영향을 보상하며, A/D 변환전에 low pass filter를 통과시켜 제어하지 않는 고차 모드의 신호를 제거하여 관측 spillover 영향을 줄인다. 허브의 회전각은 엔코더와 카운터를 통해 컴퓨터에 입력된다. 제어 알고리즘에 의하여 계산된 모터의 각속도는 D/A 변환기 및 모터 드라이버를 통하여 모터에 전달되어 조작

Table 2 Numerical and experimental parameters of the robot manipulator system

Subsystem	Parameter	Value		
Flexible manipulator arm	Length	l	2.56	m
	Mass per unit length	m	0.37325	Kg/m
	Thickness	h	0.02	m
	Bending stiffness	EI	613.885	Nm ²
	Payload	M	0.6507	Kg
	Strain gage location	x_s	0.2	m
Rigid manipulator part	Hub length	a	0.245	m
	Link 1,3,4 length	l_1	0.6	m
	Link 2 length	l_2	0.3	m

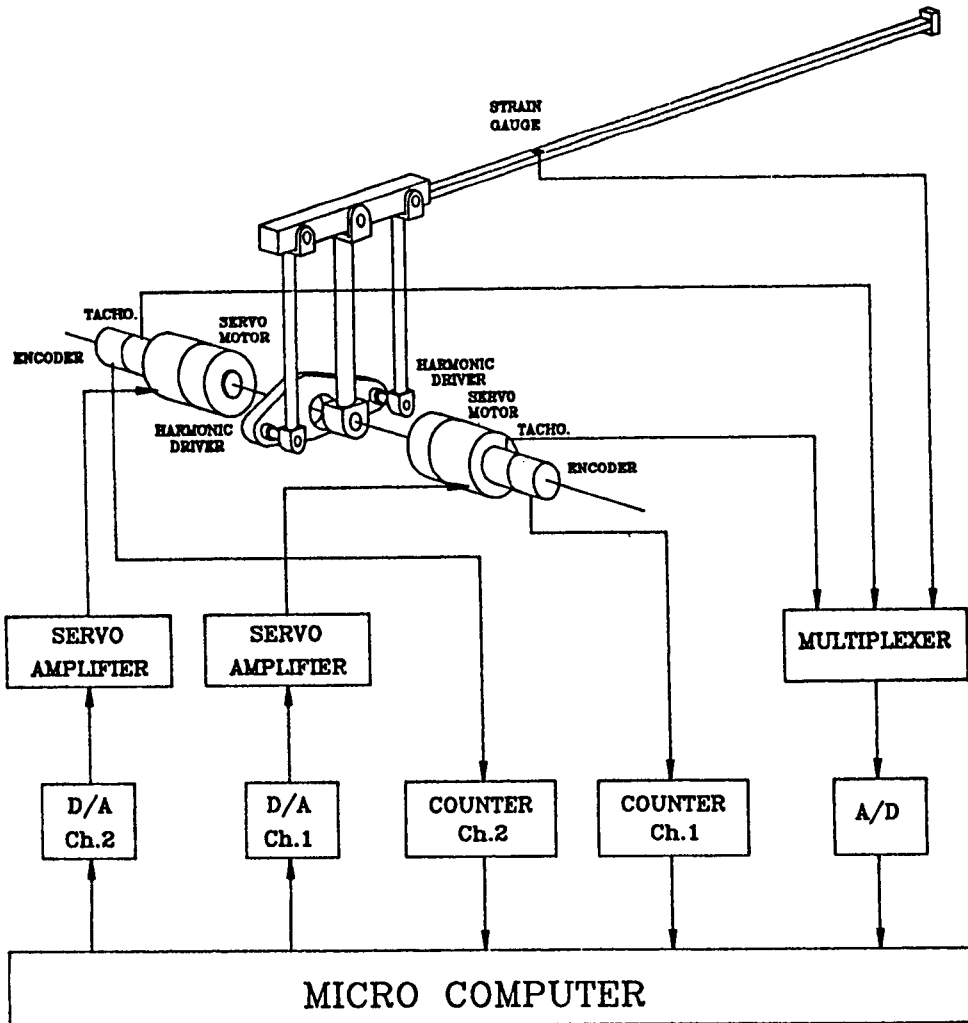


Fig. 3 Experimental set-up of the flexible robot manipulator control system

Table 3 Computed and measured natural frequencies

Mode	Natural Frequency (Hz)	
	Computed	Measured
1st	1.693	1.685
2nd	15.411	15.050

기를 움직이게 된다.

3.2 결과 및 고찰

평행구동방식 로봇 조작기의 마지막 링크를 유연하다고 하여 이를 4개의 모드를 가진 것으로 가정

하여 계의 상태방정식을 구하고, 계의 첫번째 모드가 진동거동의 주 모드가 되며 조작기 끝단의 정밀도에 지배적인 영향을 미치므로 이 첫번째 모드만을 제어하는 제어를 설계하여 수치해석 및 실험을 행하였다. 실험시 제어계의 샘플링시간은 9.22 msec이다.

Fig. 4는 조작기를 초기위치 관절각 $\theta_{10}=125^\circ$, $\theta_{20}=25^\circ$ 로부터 최종위치 $\bar{\theta}_1=75^\circ$, $\bar{\theta}_2=-10^\circ$ 로 회전시킬때 조작기의 유연성을 고려한 최적제어를 행한 경우와, 조작기 팔의 진동과 관계된 상태변수에 대한 최적귀환계수를 영으로 하여 조작기 팔을 강체로 간주하고 위치제어만 행하는 것과 유사한 제어를 행한 경우를 비교한 것이다. 두 결과를 비교하여 보면 서보모터의 교란관절각과 각속도의 변화

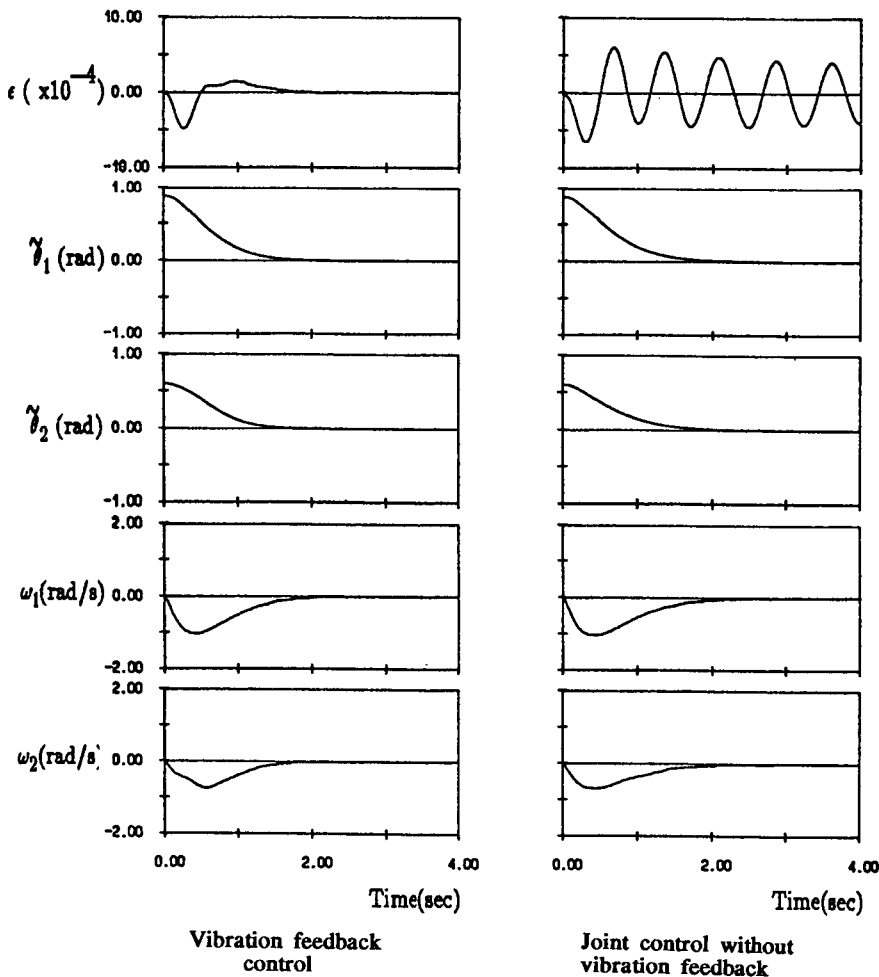


Fig. 4 Experimental results showing the active vibration feedback effect

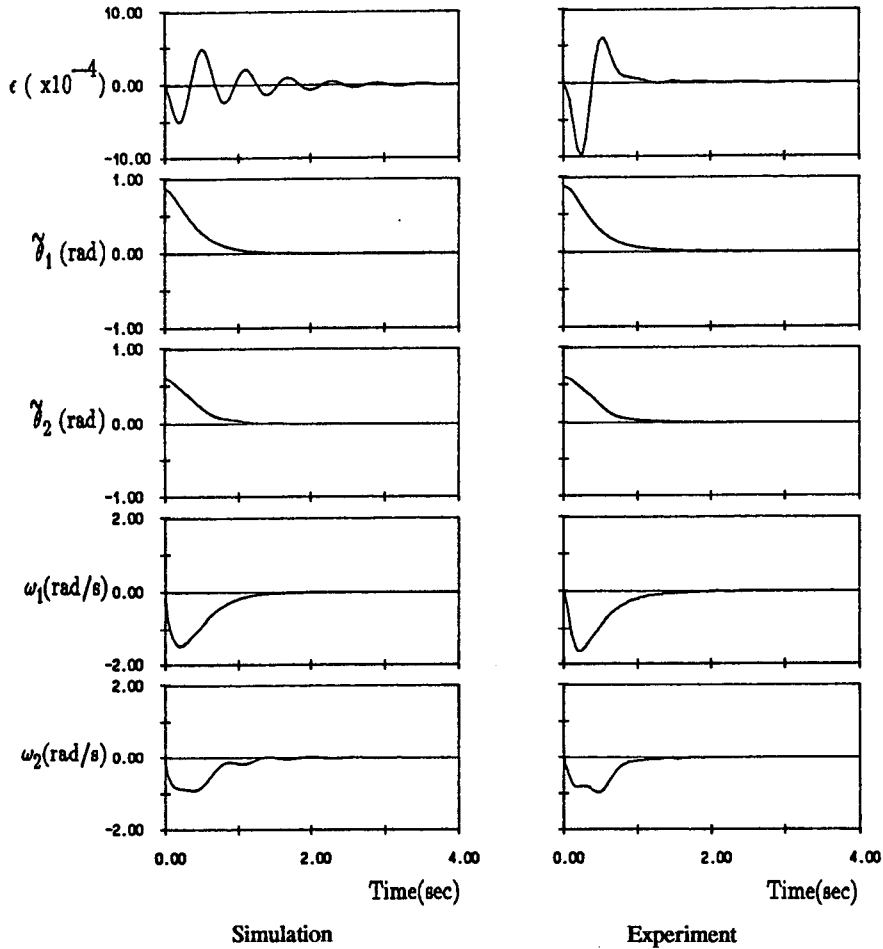


Fig. 5 Control results of the simulation and experiment.

(Controller designed for $\bar{\theta}_1=75^\circ$, $\bar{\theta}_2=-10^\circ$; $\theta_{1o}=125^\circ$, $\theta_{2o}=25^\circ$, $\bar{\theta}_1=75^\circ$, $\bar{\theta}_2=-10^\circ$;
 $Q=\text{diag}(10, 0, 01, 5, 0.5, 5, 0, 0.5)$, $R=\text{diag}(0.01, 0.01)$)

는 서로 비슷하지만 조작기 팔의 진동을 나타내는 변형률은 팔의 유연성을 고려한 최적제어를 행하였을 때가 훨씬 팔의 진동을 효과적으로 억제함을 알 수가 있다. 따라서 설계된 제어기는 위치제어와 진동제어를 효과적으로 병행하여 수행함으로써 조작기의 정밀도와 안정성을 크게 향상시킬 수 있다.

Fig. 5는 로봇 조작기 팔의 진동이 빨리 억제되도록 적절히 가중치를 선정하여 설계된 제어기를 이용하여 제어 시뮬레이션과 실험을 행한 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 보면, 도시된 여러 상태변수들이 유사한 경향들을

보이며, 따라서 모델링 및 제어기 설계 기법이 타당함을 알 수 있다. 변형률은 두 경우 약간의 차이를 보이며 시뮬레이션의 경우가 제어 완료시간이 더 걸림을 보이나, 이러한 차이는 모델링시 고려되지 않은 계의 감쇠계수등의 요인들 및 시뮬레이션시 교란 모델을 사용함에 따른 것으로 생각된다.

조작기의 특정한 최종위치에 대한 교란변수들을 이용하여 설계된 제어기가 다른 조작기가 다른 최종위치로 이동하는 경우에도 효과적으로 제어를 수행할 수 있는지를 알아보기 위해 제어 시뮬레이션 및 실험을 행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 사용된 초기위치 관절각들은 $\theta_{1o}=75^\circ$, $\theta_{2o}=-$

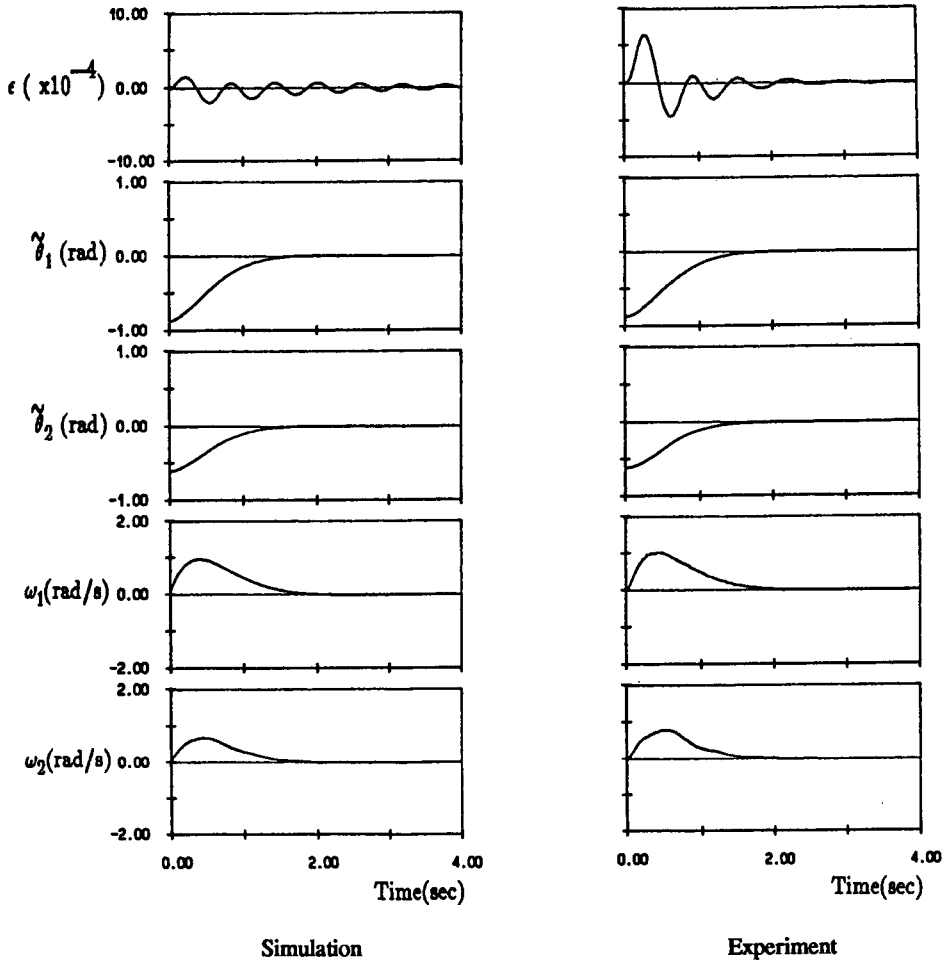


Fig. 6 Control results of the simulation and experiment.

(Controller designed for $\bar{\theta}_1=75^\circ$, $\bar{\theta}_2=-10^\circ$; $\theta_{1o}=75^\circ$, $\theta_{2o}=-10^\circ$, $\bar{\theta}_1=125^\circ$, $\bar{\theta}_2=25^\circ$;
 $Q=\text{diag}(10, 0.01, 5, 0.5, 5, 0.5)$, $R=\text{diag}(0.01, 0.01)$)

-10° 이며 최종위치 관절각들은 $\bar{\theta}_1=125^\circ$, $\bar{\theta}_2=25^\circ$ 로 Fig. 5의 제어에 사용된 제어기를 이용하여 초기위치와 최종위치를 바꾸어 제어한 것이다. 이 결과를 보면 제어완료 시간이 증가하기는 하나 제어는 효과적으로 수행됨을 알 수 있다. 즉, 조작기의 특징 최종위치에 대한 설계된 제어기는 조작기가 다른 최종위치로 움직이는 경우에도 효과적으로 제어를 수행할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

수직면에서 운동하는 마지막 링크가 유연한 2 자

유도 평행구동방식 로봇 조작기를 수학적으로 모델링하고 조작기의 최종위치에 대한 교란변수들을 도입하여 상태방정식을 구하였다. 이에 디지털 최적 제어 및 최적관측기 이론을 적용하여 제어기를 설계하고 제어 시뮬레이션 및 실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시뮬레이션과 실험 결과가 잘 일치함을 보임으로써 유연한 조작기의 수학적 모델링 기법 및 제어기 설계기법이 타당함을 보였다.

(2) 설계된 제어기는 효과적으로 조작기의 위치 제어와 진동제어를 병행하여 수행하여 조작기의 정밀도와 안정성을 크게 향상시킨다.

(3) 조작기의 특정 최종위치에 대하여 설계된 제어기는 조작기가 다른 최종위치로 이동하는 경우에도 제어를 효과적으로 수행한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정연구 개발사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Book, W.J., Maizza-Neto, O. and Whitney, D. E., 1975, "Feedback Control of Two Beam Two Joint Systems with Distributed Flexibility," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp.424~431.
- (2) Balas, M.J., 1978, "FeedBack Control of Flexible Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-23, No.4, pp.673~679.
- (3) Fukuda, T., 1985, "Control of Flexible Robotic Arm," J. of JSME, Vol.51, No. 468, pp.2140~2144.
- (4) Sakawa, Y. and Matsuno, F., 1986, "Modelling and Control of a Flexible Manipulator with a Parallel Drive Mechanism," Int. J. of Control, Vol.44, No.2, pp.299~313.
- (5) Matsuno, F. and et al., 1987, "Feedback Control of a Flexible Manipulator with a Parallel Drive Mechanism," The Int. J. of Robotics Research, Vol.6, No.4, pp.76~84.
- (6) 박영필, 하영균, 김승호, 1986, "유연한 로봇 트 팔의 진동제어", 한국정밀학회지, 제3권, 제2호, pp.28~38.
- (7) Yoshida, K. and et al., 1986, "Digital Optimal Control of Elastic Structure Systems," J. of JSME, Vol. 52, No. 484, pp.3073~3081.
- (8) 하영균, 김승호, 이상조, 박영필, 1987, "유연한 로봇 조작기의 최적귀환제어," 대한기계학회 논문집, 제11권, 제3호, pp.923~934.
- (9) 박노철, 1988년 전기, "유연한 조작기 진동의 디지털 제어", 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사학위 논문.
- (10) 김승호, 1988년 후기, "유연한 로봇 팔 진동의 디지털 최적제어", 연세대학교 공과대학 기계공학과 박사학위 논문.
- (11) 최승철, 1990년 전기, "평행구동방식 로봇 매니퓰레이터의 진동제어", 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사학위 논문.
- (12) Phillips, C.L. and Nagle, Jr., H.T., 1984, Digital Control System Analysis and Design, Prentice-Hall Inc.
- (13) Ogata, K., 1987, Discrete-Time Control Systems, Prentice-Hall Inc.