

〈論 文〉

제어기강성이 로봇관절의 진동에 미치는 영향

경현태* · 김재원** · 박영필*** · 김문상****

(1993년 4월 30일 접수)

The Effects of Controller Stiffness on the Vibration of Robot Joints

Hyeon-Tae Kyeong,* Jae-Won Kim,** Young-Pil Park*** and Mun-Sang Kim****

Key Words : Parallel Drive Mechanism Robot(평행링크 구동방식 로봇), Controller Stiffness(제어기강성), Stiffness of Transmission(동력전달계강성), Flexible Joint(유연한 조인트), Vibration of Joint(조인트진동)

Abstract

With the prevalent use of robot, the interests in moving speed of robot have been increasing for the purpose of upgrading performance of production. But the faster robot manipulator moves, the worse working accuracies are. And mechanical vibration is more and more serious with the increment of the moving speed of robot. So, the study on the cause and control method of robot vibration is one of the points of issue in robotics. This paper focuses on the vibration of 3 DOF parallel link drive mechanism robot. We assume that links of robot manipulator are 'rigid' and joints are 'flexible elements'. Governing equations of robot system including controller, servo amplifier, D.C servo motor, transmission with elasticity, and manipulator dynamics are derived. On the basis of modelling, we define 'controller stiffness' by the proportional gain of controller and 'stiffness of transmission'. Numerical and experimental research is performed to study vibration phenomena of robot induced from the variation of these two defined stiffnesses, and its results are shown.

기 호 설 명

$D(\theta_i)$: 로봇팔의 관성행렬
 Ec_i : 관절변수오차 [rad]
 Ei_i : 서보앰프의 전류루프 오차 [volt]
 Ev_i : 서보앰프의 전압루프 오차 [volt]
 \bar{h} : 로봇팔의 원심력 벡터
 i_i : 모터전류 [A]
 Jm_i : 모터의 회전관성모멘트 [$kg\ m^2$]

Kcd_i : 로봇 제어기의 미분이득
 Kcp_i : 로봇 제어기의 비례이득
 Kc_i : 정의된 로봇 제어기의 강성
 Kcs : 로봇 제어기의 기준강성(하모닉드라이브사 제공)
 Ke_i : 모터의 역기전력 상수 [volt sec/rad]
 KG_i : 정의된 감속기의 강성 [N m/rad]
 KGs_i : 감속기의 기준강성 [N m/rad](하모닉드라이브사 제공)
 Kii_i : 서보앰프의 전류루프 적분이득
 Kip_i : 서보앰프의 전류루프 비례이득
 $Kpum_i$: 서보앰프의 PWM앰프 이득

* (주) 금성산전

** 연세대학교 기계공학과 대학원

*** 정희원, 연세대학교 기계공학과

**** 한국과학기술연구원

Kt_i	: 모터의 토크상수 [N m/A]
$Ktaco_i$: 타코제네레이터 이득
Kv_i	: 서보앰프의 속도루프 비례이득
Kvp_i	: 서보앰프의 속도루프 비례이득
La_i	: 모터 인덕턴스 [H]
m_i	: 링크질량
N_i	: 로봇의 관절 감속비
Ra_i	: 모터저항 [Ω]
Ri_i	: 모터전류의 되먹임 이득 [volt/A]
Rs_i	: 속도 기준입력의 이득
Vc_i	: 로봇 제어기 입력 [volt]
V_i	: 로봇 제어기 출력 [volt]
Vi_i	: 서보앰프의 전류루프 출력 [volt]
Vv_i	: 서보앰프의 속도루프 출력 [volt]
θ_i	: 링크의 관절각
τ_i	: 링크의 관절토크
$\bar{\tau}$: 로봇팔의 토크벡터
ω_{mi}	: 모터의 회전속도 [rad/sec]

1. 서 론

산업발전에 의해서 로봇의 이용이 늘어감에 따라 로봇의 성능향상에 대해서 많은 연구가 행하여지고 있다. 이러한 로봇의 성능향상은 동작의 고속화, 작업의 고정밀도화 등에 의해서 달성될 수 있으나 동작의 고속화에 의해서 필연적으로 진동이 발생되어 작업정밀도에 영향을 미치게 된다. 또한 큰 토크(torque)를 얻기 위하여 이용되는 하모닉 드라이브(harmonic drive) 등의 감속기가 탄성을 갖는 스프링요소이기 때문에 고속동작중에 진동이 발생하기 쉽다. 따라서 요구되는 고속화, 고정밀도화의 목적을 달성하기 위해서는 로봇에 발생하는 진동을 억제할 필요가 있다. 그러나 로봇은 기계기술, 전기전자기술, 제어기술 등이 복합된 것이므로 로봇에 발생하는 진동을 줄이기 위해서는 제어기, 구동기, 감속기, 로봇팔의 운동계 등으로 구성되는 전체 로봇시스템에 대한 진동해석 및 진동억제방법의 모색 등이 필요하게 된다.

로봇에 발생하는 진동을 해석하는 방법으로는 로봇의 링크들을 유연성을 가진 탄성체로 간주하여 진동을 해석하고 그 진동을 억제하는 진동제어에 연구목적이 있는 방법과 로봇의 링크들을 강체로 가정하고 감속기를 스프링요소로 모델링하여 진동

현상을 연구하고 그 진동을 억제하는 진동제어에 관심을 두는 방법 등이 있다.

박영필 등⁽¹⁾은 단일 링크로봇팔을 첨단질량을 가진 회전하는 외팔보로 모델링하여 그 진동응답을 Galerkin의 모드합성법에 의해서 구하고 팔의 진동을 최소로 하는 회전속도의 조건 및 매개변수의 조건을 제시하였다. Toyama⁽²⁾는 유연한 링크를 가진 로봇에 대해서 운동방정식을 유도하고 로봇관절을 구성하는 축, 베어링, 감속기 등의 비선형성에 의한 진동현상에 대하여 해석하였다. 하영균⁽³⁾은 최종 링크가 유연한 평행링크 구동방식의 3자유도 로봇에 대하여 최종 링크를 수평 및 수직방향으로 진동하는 외팔보로 모델링하여 이에 대한 진동의 능동제어에 관한 연구를 하였다. Masuda 등⁽⁴⁾은 4자유도 수평다관절 로봇에 대하여 제어계가 가지는 강성요소와 감속기가 가지는 강성요소와의 크기 차이에 의해서 로봇에 발생하는 진동에 대해서 해석하였고, Yoshida 등⁽⁵⁾은 유연한 조인트를 갖는 평행링크 구동방식의 2자유도 로봇에 대해서 운동방정식을 유도하여 각 링크의 위치에 따른 계의 고유진동수의 변화에 대해서 고찰하고 감속기를 통하여 모터로부터 전달되는 가진력에 의한 계의 진동을 해석하고 실험을 하였다. Nakagawa 등⁽⁶⁻⁸⁾은 3자유도 로봇에 대해서 자세에 따른 계의 고유진동수의 변화 및 원심력 등의 비선형력의 영향에 대한 연구를 하였고 동력전달계의 백래쉬(backlash), 비선형마찰 등이 계의 진동에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. Nishii⁽⁹⁾는 로봇팔의 점성마찰을 제어알고리즘(algorithm)적으로 증대시켜서 계의 진동을 억제하는 방법을 제시하고 이를 2자유도를 갖는 수평다관절 로봇에 적용하여 실험을 행하였고, Timcenko 등⁽¹⁰⁾은 유연한 조인트를 갖는 로봇에 대해서 구동 토크를 알고 있는 경우에는 관측기를 사용하고 알 수 없는 경우에는 칼만필터(Kalman filter)를 이용하여 진동을 억제하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 평행링크 구동방식의 3자유도 로봇의 링크를 강체로 가정하고 유연한 조인트를 갖는 것으로 고려하여 제어기, 서보앰프, 직류 서보모터, 탄성을 가진 감속기, 로봇팔운동계 등으로 구성되는 전체 로봇시스템에 대해서 모델링을 하여 지배방정식을 얻었다. 이를 바탕으로 로봇에 발생하는 진동을 해석하기 위해서 제어기의 비례게인에 의한 제어기의 강성요소를 정의하고 제어기의 감속

요소와 동력전달장치인 감속기의 강성요소를 정의하였다. 이 강성요소들의 크기차이에 대한 진동현상, 진동이 발생하는 원인, 진동의 억제방법에 대한 연구를 위해서 정의된 강성요소들과 감쇠계수를 증감시키면서 시뮬레이션 및 실험을 행하였다.

2. 이 론

2.1 로봇시스템의 구조

2.1.1 대상로봇모델

본 연구의 대상인 유연한 조인트를 갖는 로봇은 3자유도의 평행링크 구동방식의 로봇으로 개인용 컴퓨터를 이용한 소프트웨어 제어기, 속도루프와 전류루프를 갖는 속도입력형 서보앰프, 위치검출기와 속도검출기가 부착된 직류 서보모터, 동력전달장치, 팔운동계 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1에 로봇 매니플레이터의 구조 및 좌표계를 나타내었다.

2.1.2 로봇 제어기의 구조

대상로봇 제어기의 하드웨어(hardware) 구조는 80286 마이크로 프로세서를 이용한 컴퓨터로 구성되며 제어 알고리즘은 각각의 조인트에 대해서 미리 계산된 목표경로 θ_r 와 각 조인트에 위치한 모터의 위치검출기인 엔코더로부터 검출된 위치 θ_m ,

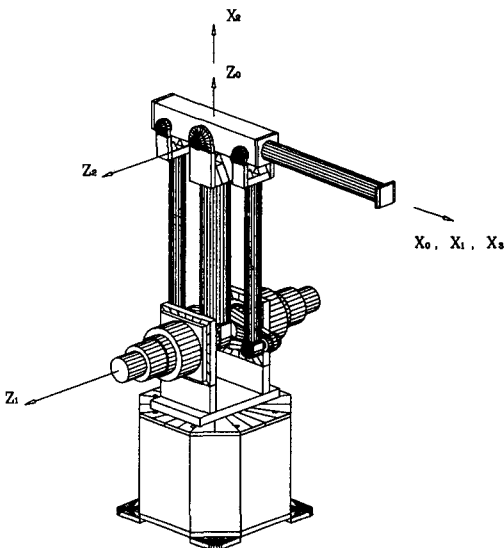


Fig. 1 The link coordinate frame

와의 차이인 위치오차 Ec_i 에 대해서 비례미분제어를 행하고 이 결과를 D/A 변환기를 통해서 서보앰프에 입력을 부가하는 것이다.

$$Vc_i = Kc p_i \cdot Ec_i + Kc d_i \frac{d(Ec_i)}{dt} \quad (1)$$

2.1.3 서보앰프의 구조

제어기로부터 출력된 전압을 입력받아서 구동모터의 속도를 제어하는 서보앰프는 크게 속도를 제어하는 속도루프(velocity loop), 모터에 흐르는 전류를 제어하는 전류루프(current loop), 전류루프의 출력을 증폭하는 PWM 증폭기로 구성된다. 속도루프는 제어기에서 출력된 목표치 Vc_i 와 모터의 타코제너레이터(tacho generator)의 출력 $Ktaco_i \cdot \omega_{m_i}$ 와의 차이인 속도오차 Evi 에 대해서 비례적분제어를 행하여 이 결과를 전류루프에 입력한다.

$$Vv_i = Kvp_i + Kvi + Kvi \int Evi dt \quad (2)$$

전류루프는 속도루프에서 출력된 목표치 Vv_i 와 모터의 전류(i_i)를 검출하여 얻은 $(Ri_i \cdot i_i)$ 와의 차이인 전류오차 Ei_i 에 대해서 비례적분제어를 행하여 이 결과를 PWM 증폭기쪽으로 출력한다.

$$Vi_i = Kip_i \cdot Ei_i + Kii \int Ei_i dt \quad (3)$$

PWM 증폭기는 전류루프에서 출력된 전압이 직접적으로 모터를 구동하기에는 부족하므로 이를 증폭하여 모터를 구동하기에 충분한 전압을 만든다.

$$Vi = Kpwm_i \cdot Vi_i \quad (4)$$

2.1.4 구동모터계의 구조

대상로봇의 구동모터는 280W급의 직류서보모터로, 서보앰프에서 출력된 전압 Vi 가 모터의 전기자에 인가되어 전기자전류 i_i 가 흐르고 이 전류에 의해서 구동토크 τ_{m_i} 가 발생하여 관성모멘트 J_{m_i} 를 가진 모터축이 회전을 하게 된다. 또한, 모터의 현재 위치를 엔코더펄스로 환산하여 로봇제어기쪽으로 귀환시키며 모터의 현재속도 ω_{m_i} 를 타코제너레이터로 검출하여 서보앰프쪽으로 귀환시키는 역할도 담당한다. 전기자 인덕턴스(inductance) La_i , 전기자저항 Ra_i , 역기전력상수 Ke_i 로 구성된 모터의 전기계는 다음의 식으로 표현된다.

$$La_i \frac{di_i}{dt} + Ra_i \cdot i_i = Vi - Ke_i \cdot \omega_{m_i} \quad (5)$$

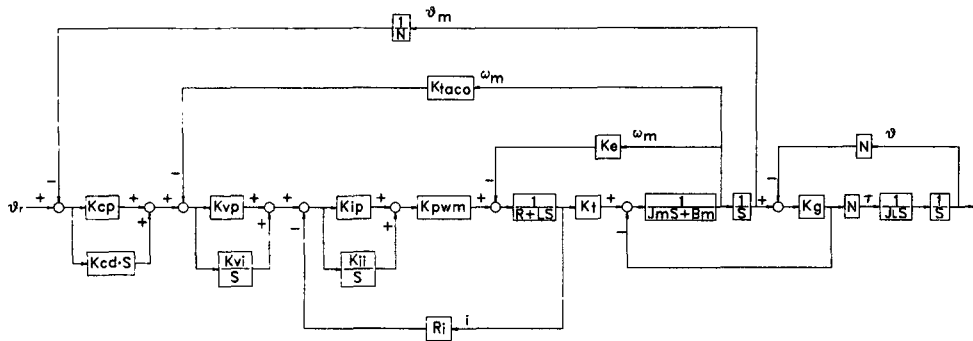


Fig. 2 Block diagram of robot system

전자전류 i_i , 토크상수 Kt_i 에 의해서 모터에 발생하는 토크 τ_{mi} 는 다음과 같다.

$$\tau_{mi} = Kt_i \cdot i_i \tag{6}$$

모터축의 회전에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$Jm_i \frac{d^2(\theta_{m_i})}{dt^2} + Bm_i \frac{d(\theta_{m_i})}{dt} = \tau_{mi} - \frac{\tau_i}{N_i} \tag{7}$$

여기서 Jm_i 는 모터의 관성모멘트, θ_{m_i} 는 모터의 회전각도, Bm_i 는 모터의 비례점성감쇠계수, τ_{mi} 는 발생토크, τ_i 는 조인트의 구동토크, N_i 는 로봇관절의 감속비, (τ_i/N_i) 는 동력전달계에 의한 반발토크이다.

2.1.5 동력전달계의 구조

대상로봇의 감속기로는 하모닉드라이브가 이용되었으며 이 감속기는 감속비 N_i , 스프링상수 Kg_i 인 요소로 모델링할 수 있다. 이때 조인트에 발생하는 관절구동토크 τ_i 는 조인트의 관절회전각도 θ_i 에 대해서 다음의 식으로 표현된다.

$$\tau_i = Kg_i(\theta_{m_i} - N_i \cdot \theta_i) \cdot N_i \tag{8}$$

2.1.6 로봇팔운동계의 구성

로봇팔의 운동은 마찰을 무시하고 간략하게 표현하면 다음과 같다.

$$\tilde{\tau} = \underline{D}(\theta_i) \cdot \frac{d^2}{dt^2}(\bar{\theta}) + \tilde{h}(\theta_i, \dot{\theta}_i) + \tilde{C}(\theta_i) \tag{9}$$

여기서 $\tilde{\tau}$ 는 τ_i 들로 이루어진 관절구동토크 벡터, $\underline{D}(\theta_i)$ 는 관절의 위치 θ_i 들의 함수인 로봇관성행렬, \tilde{h} 는 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 의 함수인 원심력, Coriolis 등의 비선형 벡터, \tilde{C} 는 θ_i 들의 함수인 중력항벡터이다.

2.1.7 로봇시스템의 블록선도

이상에서 구한 전체 로봇시스템에 대한 모델링을 바탕으로 계의 블록선도(block diagram)를 그리면 Fig. 2와 같다.

2.2 제어기의 강성, 감쇠계수 및 동력전달계 강성의 정의

2.2.1 제어기 강성요소 및 감쇠요소

로봇관절의 위치오차에 비례해서 로봇의 조인트에 관절구동토크가 발생하는 것으로 생각하면 그 비례상수가 회전계에서 스프링상수와 같은 역할을 하는 것으로 고려할 수 있다. 따라서 대상 로봇제어기의 비례계인은 강성요소 KC_i 를 구성하게 되며 적분제어기의 항 및 모터의 전기방정식중 인덕턴스항을 무시하면 다음식과 같이 정의할 수 있다.

$$KC_i = Kcp_i \cdot Rs_i \cdot Kvp_i \cdot Kip_i \cdot Kpwm_i \cdot \frac{1}{Ra_i} \cdot Kt_i \cdot N_i \tag{10}$$

대상로봇 제어기의 구성요소인 미분제어기가 계에 미치는 영향을 고려하면 감쇠기능의 역할을 가지므로 강성요소의 정의에서와 같은 방법을 사용하면 다음의 식으로 제어기의 감쇠요소 BC_i 를 정의할 수 있다.

$$BC_i = Kcd_i \cdot Rs_i \cdot Kvp_i \cdot Kpwm_i \cdot \frac{1}{Ra_i} \cdot Kt_i \cdot N_i \tag{11}$$

2.2.2 동력전달장치 강성요소의 정의

제어기 강성요소의 정의에서와 같은 관점에서 동력전달장치인 감속기에 대한 강성요소 KG_i 를 정의

하면 다음과 같다.

$$KG_i = Kg_i \cdot N_i^2 \quad (12)$$

3. 수치해석 및 실험

3.1 로봇의 모델 파라미터

대상로봇의 각종 파라미터(parameter)들 중에서 제어기 및 서보앰프에 관한 것들은 Table 1에, 서보모터 및 감속기에 관한 것들은 Table 2에, 로봇 매니플레이터의 각 관절에 대한 관성인자(inertia) 항들은 Table 3에 나타내었다. Table 2의 값들은 실험장치로 사용한 하모닉드라이브사에서 자사의 제품에 대하여 측정한 값을 사용하였다. 식(12)에 있는 KG_i 값은 측정이 곤란하여 실험장치로 사용한 하모닉 드라이브사에서 제시한 KGs_i 값을 KG_i 값으로 사용하였고 이를 Table 2에 나타내었다.

3.2 수치해석 및 실험의 조건

3.2.1. 목표 경로

로봇 매니플레이터의 운동경로를 제어하는 방법

을 대별하면 로봇의 엔드이펙터(end-effector)의 경로를 제어하는 방법과 로봇의 각 관절을 제어하는 방법이 있으며, 운동경로를 표시하는 함수로는 사다리꼴함수, 사인함수(sinusoidal function), 다항함수(polynomial function) 등이 있다. 그 중, 본 연구의 대상로봇에서 사용된 방법은 로봇의 관절을 초기위치에서 정지위치까지 시간에 대한 5차다항식의 경로로 제어하는 것으로 초기 각변위(initial angle) θ_0 와 종료 각변위(final angle) θ_f 및 목표 시간(target time) t_f 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5 \quad (13)$$

초기 및 종료상태의 경계조건을 대입하여 각 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= \dot{\theta}_0 \\ a_2 &= \ddot{\theta}_0 \\ a_3 &= \frac{20 \cdot \theta_f - 20 \cdot \theta_0 - (8 \cdot \dot{\theta}_f + 12 \cdot \dot{\theta}_0) t_f - (3 \cdot \ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f) t_f^2}{2 \cdot t_f^3} \end{aligned}$$

Table 1 Parameters of controller & servo amp

	Kcs	Kvp	Kvi	Ktaco	Kip	Kii	Ri	Kpwm
Joint 1	58160	14.3	650	0.06685	0.022	3.03	0.95	31.1
Joint 2	51632	14.3	650	0.06685	0.022	3.03	0.95	31.1
Joint 3	51632	14.3	650	0.06685	0.022	3.03	0.95	31.1

Table 2 Parameters of motor & harmonic drive

	La	Ra	Ke	Kt	Jm	Bm	Kg	N	KGs
Joint 1	0.0018	1.1	0.212	0.212	0.000744	0.002	5.7	101	58160
Joint 2	0.0018	1.1	0.212	0.212	0.000744	0.002	5.7	79	51632
Joint 3	0.0018	1.1	0.217	0.212	0.000744	0.002	5.7	79	51532

Table 3 Inertia parameters of robot manipulator

	m	mCx	mCy	mCz	Ixx	Ixy	Ixz	Iyy	Iyz	Izz
Link 1	14.8	0.00	-0.83	0.00	1.13	0.00	0.00	0.98	0.00	0.35
Link 2	9.16	2.54	0.00	0.08	0.04	0.00	0.00	1.22	0.00	1.21
Link 3	7.13	0.42	-2.27	-0.16	1.29	0.00	0.00	0.32	-0.10	1.59
Units	Kg	Kg · m			Kg · m ²					

Table 4 Initial & final joint angle

	Joint 1	Joint 2	Joint 3
θ_0	-40°	120°	50°
θ_f	40°	60°	-50°
Target time	1.0 sec		

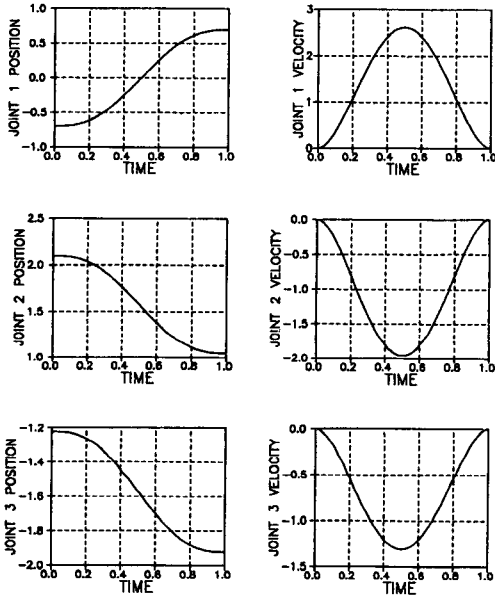


Fig. 3 Target trajectory

$$a_4 = \frac{30 \cdot \theta_0 - 30 \cdot \theta_f - (14 \cdot \dot{\theta}_f + 19 \cdot \dot{\theta}_0) t_f - (3 \cdot \ddot{\theta}_0 - 2 \cdot \ddot{\theta}_f) t_f^2}{2 \cdot t_f^4}$$

$$a_5 = \frac{12 \cdot \theta_f - 12 \cdot \theta_0 - (6 \cdot \dot{\theta}_f + 6 \cdot \dot{\theta}_0) t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f) t_f^2}{2 \cdot t_f^3} \quad (14)$$

각 관절의 초기위치 및 종료위치, 목표시간 등을 Table 4에 나타내었으며 경로함수에 의해서 구한 각 관절 목표궤도의 각도, 각속도의 형태를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2.2 수치해석 및 실험의 조건

로봇의 링크를 강체로 가정하고 유연한 조인트를 갖는 것으로 가정한 경우에 로봇에 발생하는 진동 현상 및 그 원인에 대해서 고찰하고 진동을 줄이는 방법을 모색하기 위하여, 앞에서 정의된 제어기 강성 Kc_i , 동력전달장치 강성 KG_i 의 크기차이에 대한 다음의 여러가지 경우에 대해서 제어기강성과

제어기감쇠계수를 증감시키면서 수치해석 및 실험을 행하여 이들의 변화가 계의 진동에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다.

3.3 수치해석 및 실험의 방법

3.3.1 수치해석의 방법

모델링에서 얻은 (1)부터 (9)까지의 식들은 대부분 시간에 대한 미분방정식들이다. 특히 로봇팔운동계를 표현하는 식들은 조인트변수(joint variable) θ_i 에 대해서 연성이 큰 비선형식이므로 직접적분이 곤란하여 본 연구의 수치해석에서는 각 변수들의 시간에 대한 변화를 계산하기 위해서 수치적분방법으로 4차 Runge-Kutta방법(4th-order Runge-Kutta method)을 사용하였다.

3.3.2 실험의 방법

본 연구의 대상로봇은 평행링크 구동방식의 3자유도 로봇으로 Fig. 4에 실험장치의 대략적인 구조를 나타내었다. 2.3절에서 정의된 제어기 강성과 감쇠계수를 변화시키면서 목표경로를 따라서 로봇을 구동하고 엔코더로부터 모터의 위치를, 타코제너레이터의 출력으로부터 A/D변환기를 거쳐서 모터의 속도를 측정하여 컴퓨터에 저장하였다. 이 값들로부터 동력전달계의 감속비를 고려하여 로봇관절의 위치와 속도를 간접적으로 계산하여 시뮬레이션에서 얻은 관절의 위치 및 속도와 비교, 검토하였다.

정의된 강성사이에 차이가 있을 때에 대한 진동 현상을 관찰하기 위해서 로봇의 최종링크의 말단에 가속도계(accelerometer)를 부착하고 목표관절궤도를 따라서 로봇을 동작시키면서 최종링크에 수직인 성분의 가속도를 측정하였다.

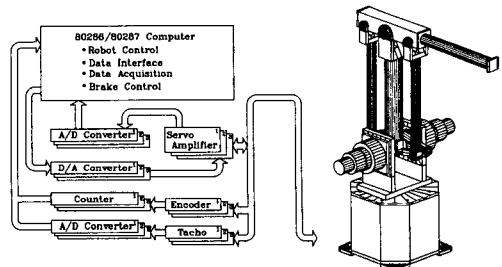


Fig. 4 Schematic diagram of APROYS-1

Table 5 Parameters of gains & defined stiffnesses

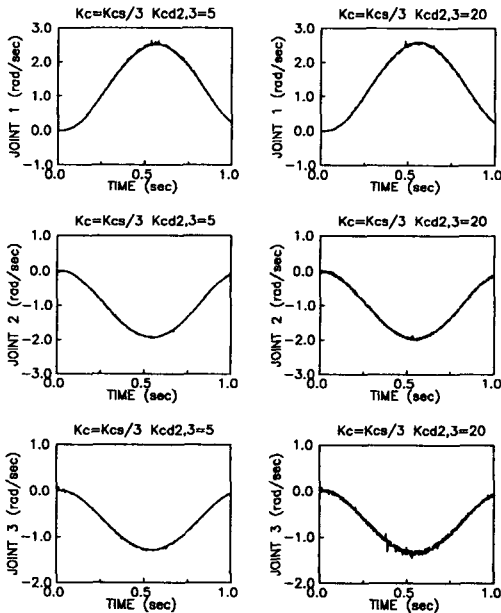
Figure number	Joint 1			Joint 2			Joint 3		
	Kc ₁	KG ₁	Kcd ₁	Kc ₂	KG ₂	Kcd ₂	Kc ₃	KG ₃	Kcd ₃
5	19387	58160	2	17210	51632	5, 20	17210	51632	5, 20
6	174480	58160	2	154896	51632	5, 20	154896	51632	5, 20
7	58160	58160	2	51632	51632	5, 20	51632	51620	
8		58160	2		51632	5		51632	5
9		58160	2		51632	20		51632	20

4. 결과 및 고찰

로봇의 링크를 강체로 가정하고 유연한 조인트를 갖는 것으로 모델링하여 로봇에 발생하는 진동현상과 그 원인 및 진동억제방법에 대해서 연구하기 위해서 수치해석 및 실험을 행한 강성 및 감쇠계수의 조건들을 Table 5에 나타내었다.

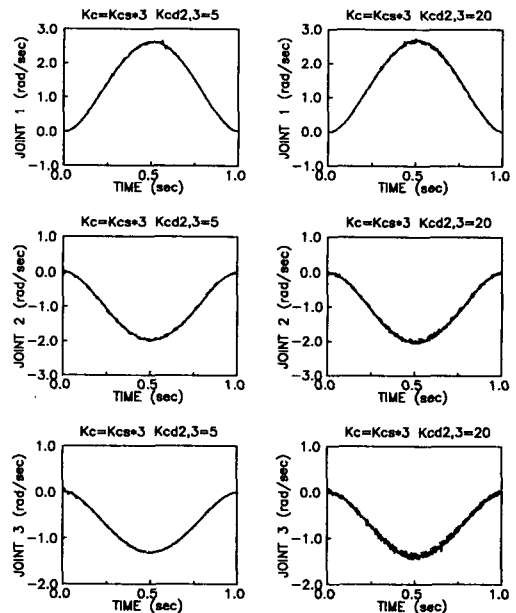
제어기강성 Kc_i 가 동력전달계 강성 KG_i 에 비해서 작은 경우, 즉 제어기 강성 Kc_i 가 $Kc_i = KG_i/3$

인 경우의 관절속도에 대한 수치해석 및 실험의 결과들을 Fig. 5에, 제어기 강성이 동력전달계강성에 비해서 큰 경우의 관절속도에 대한 수치해석 및 실험의 결과들을 Fig. 6에, 제어기 강성과 동력전달계 강성의 크기가 같은 경우의 관절속도에 대한 수치해석 및 실험의 결과들을 Fig. 7에 나타내었다. 또한 제어기 강성의 증감에 따른 결과들을 Fig. 8, Fig. 9에, 로봇의 최종링크에서 측정된 가속도를 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다. 동력전달장치를 강체로 가정하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과들



— : Experiments
 : Simulation

Fig. 5 Joint velocities simulation & experiment for $Kc_i = KG_i/3$



— : Experiments
 : Simulation

Fig. 6 Joint velocities simulation & experiment for $Kc_i = KG_i * 3$

Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12와 Fig. 5~9의 결과를 비교해 보면 동력전달계를 강체로 가정하는 경우보다 스프링요소로 가정한 경우가 실험과 더 잘 일치함을 알 수 있다.

4.1 $Kc_1 < KG_1$ 의 경우

Fig. 5, Fig. 3, Fig. 9의 결과들을 보면 제어기 강성 Kc_i 가 동력전달계 강성 KG_i 에 비해서 작은 경우 목표시간 1초내에 목표된 위치에 도달하지 못하는 시간지연현상이 나타나며 그 이유는 제어기의 비례게인이 작아서 입력명령을 충분히 따라가지 못하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 5, Fig. 8, Fig. 9의 수치해석 및 실험의 결과로부터 제어기 감쇠계수를 증가시켜도 시간지연현상의 해소에는 도움이 되지 않음을 알 수 있으며, 제어기강성의 증가가 효과적임을 알 수 있다.

로봇에 발생하는 진동의 측면에서 보면 제어기의 미분게인 Kcd_i 를 증가시켜서 제어기 감쇠계수를 증가시켜도 별 효과가 없는 것을 알 수 있으며, Fig. 5, Fig. 10, Fig. 11의 실험결과에서는 오히려 진동이 커지는 역효과가 관찰되었다. 이는 실험에서 사용한 미분제어기의 경우에 모터로부터 얻은

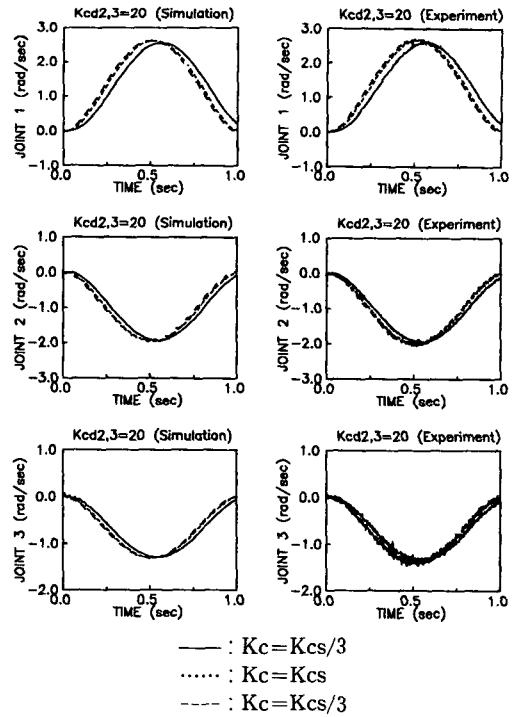


Fig. 8 Joint velocities simulation & experiment for $Kcd_{2,3}=20$

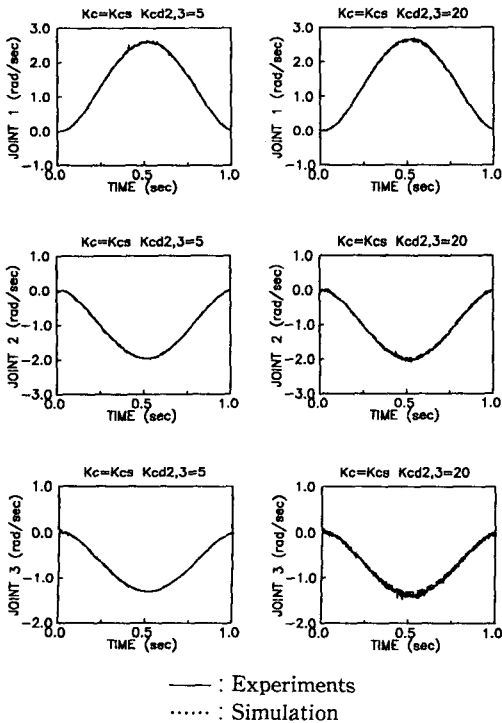


Fig. 7 Joint velocities simulation & experiment for $Kc=Kcs$

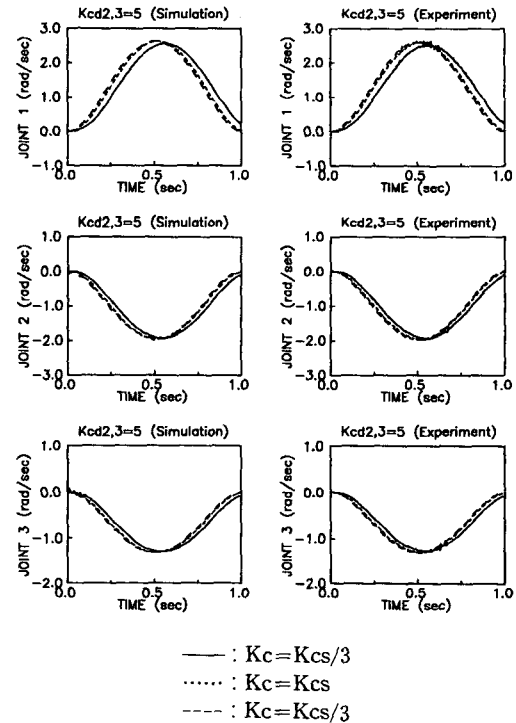


Fig. 9 Joint velocities simulation & experiment for $Kc=Kcs/3$

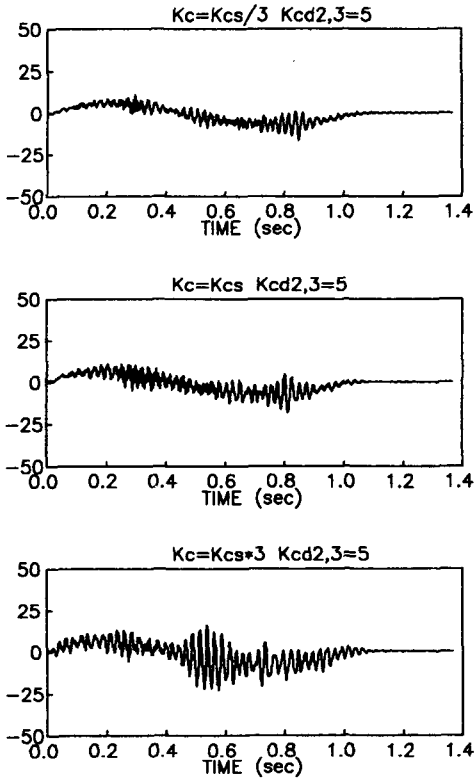


Fig. 10 Acceleration of end effector for $Kcd_{2,3}=5$

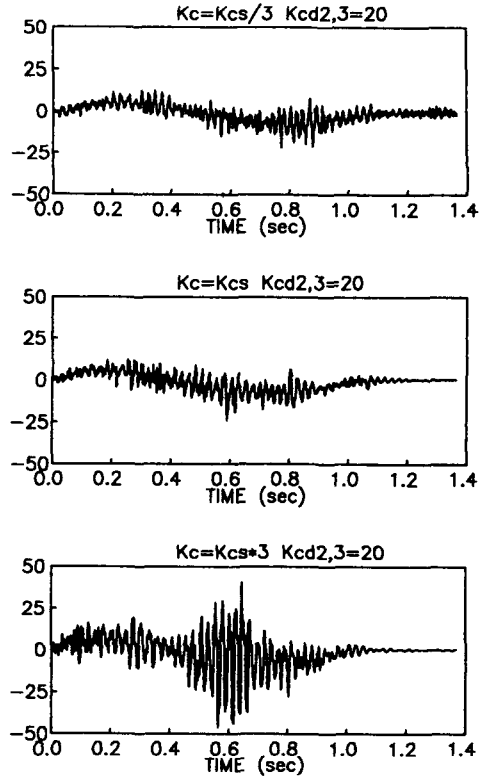


Fig. 11 Acceleration of end effector for $Kcd_{2,3}=20$

엔코더신호를 수치적으로 미분하여 사용하므로 엔코더신호에 포함된 노이즈(noise)성분이 증폭되었기 때문인 것으로 생각된다.

4.2 $Kc_1 > KG_1$ 의 경우

Fig. 6의 결과로부터 제어기 강성이 동력전달계 강성에 비해서 큰 경우에는 제어기 강성이 동력전달계 강성에 비해서 작은 경우에서와 같은 시간지연 현상이 나타나지 않음을 알 수 있으며 이는 제어기의 비례게인이 증가한 때문이다.

Fig. 6, Fig. 3, Fig. 9 및 Fig. 10, Fig. 11의 결과에서 보면 관절에 발생하는 진동이 커진 것을 알 수 있으며 제어기의 미분게인을 증감시켜도 관절진동의 억제에 효과가 없음을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11의 실험결과에서는 앞에서와 같이 미분게인의 증가에 따라서 진동이 매우 심해지는 현상이 나타나 있다. 따라서 이 경우에는 제어기의 비례게인을 줄여서 제어기 강성을 줄이는 것이 로봇에 발생하는 진동의 억제에 효과적임을 알 수 있다.

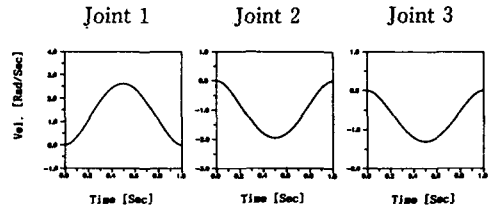


Fig. 12 Joint velocities simulation result ($Kcd_{2,3}=5$)

4.3 $Kc_1 = KG_1$ 의 경우

Fig. 7의 결과로부터 제어기 강성과 동력전달계 강성의 크기가 같은 경우에는 Fig. 5에서와 같은 시간지연현상이나 Fig. 6에서와 같은 관절의 진동 현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 2개의 스프링요소가 직렬로 연결되어 있는 경우 상대적으로 큰 스프링요소는 강체로 작용하게 되고 약한 스프링에 의해 진동이 잘 유발되기 때문에 스프링요소로 가정된 두 요소의 크기가 같을 경우에 진동이

가장 적게 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 제어기 강성과 동력전달계 강성의 차이가 없을 때 로봇이 가장 효과적으로 운동한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10, Fig. 11의 결과를 보면 제어기 강성과 동력전달계 강성과의 사이에 차이가 없을 때 로봇에 발생하는 진동이 가장 작게 나타났고 이 경우에도 제어기 감쇠계수의 증감에 의한 진동억제효과는 관찰되지 않았으며 앞에서와 같이 제어기의 미분계인을 증가시키면 진동이 커지는 결과를 볼 수 있다.

5. 결 론

평행링크 구동방식의 3자유도 로봇에 대하여 로봇 매니퓰레이터의 링크를 강체로 가정하고 유연한 조인트를 갖는 것으로 고려하여 제어계, 서보앰프, 직류 서보모터, 동력전달장치(감속기), 로봇팔운동계 등으로 구성된 전체 로봇시스템을 모델링하여 로봇에 발생하는 진동현상, 진동의 원인 및 억제방법에 대해서 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체 로봇시스템의 모델링을 바탕으로 한 수치 해석과 실험결과로부터 제어기 강성과 동력전달계 강성의 크기차이에 의해서 로봇관절에 진동이 발생함을 알 수 있다.

(2) 제어기 강성이 동력전달계 강성에 비해서 작은 경우에는 목표경로를 따라가지 못하는 현상이 관찰되었으며 이 경우에는 제어기 강성의 증가가 필요로 된다.

(3) 제어기 강성이 동력전달계 강성에 비해서 큰 경우에는 동력전달계 강성이 작은 이유로 인하여 관절에 발생하는 진동이 심해진다는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 제어기 강성의 저하가 진동억제에 효과적이며, 제어기 감쇠계수의 증감에 의한 진동억제효과는 관찰되지 않았다. 따라서 이 경우에는 제어기 강성을 줄이는 것이 진동억제에 효과적임을 알 수 있다.

(4) 제어기 강성과 동력전달계 강성이 같은 경우, 로봇에 발생하는 진동이 가장 작게 되고 시간 지연현상도 발생하지 않는다. 따라서 제어기 강성이 로봇의 설계단계에서 미리 결정되는 동력전달계 강성과 같은 값을 갖도록 제어기의 비례계인을 결정하는 것이 로봇에 발생하는 진동의 억제에 가장 효과적임을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 박영필, 하영균, 김승호, 1986, "유연한 로봇 팔의 진동제어," 한국정밀공학회지, 제3권, 제2호, pp. 28~38
- (2) Shigeki Toyama, 1987, "Research on Simulation of Robot (1st Report) -Vibration Analysis-," 일본 정밀공학회지, 제53권, 제8호, pp. 1177~1182.
- (3) 하영균, 1991, "유연한 로봇팔 진동의 능동제어," 연세대학교 박사학위 논문.
- (4) Masuda, T., Futakawa, A., Koga, E. and Inoue, K., 1985, "A Parametric Study of Robot Arm Vibration by Simulation Analysis," 일본로봇학회지, 제3권, 제3호, pp. 197~206.
- (5) Yosjida Takeshi and Igarashi Shigemi, 1990, "Vibration Analysis of Parallel Linkage Robot," 일본 정밀공학회지, 제56권, 제4호, pp. 709~714.
- (6) Nakagawa Eiichi and Sato Jun'iti, 1990, "Vibration Analysis of Robot Manipulators (1st Report)," 일본기계학회논문집, 제56권, 제532호, pp. 3161~3166.
- (7) Nakagawa Eiichi and Sato Jun'iti, 1991, "Vibration Analysis of Robot Manipulators (2nd Report, The Effect of Backlash in Transmission Mechanisms)," 일본기계학회논문집, 제57권, 제 544호, pp. 3877~3881.
- (8) Nakagawa Eiichi and Sato Jun'iti, 1992, "Vibration Analysis of Robot Manipulators (3rd Report, The Effects of Friction in Joints and Driving Mechanisms)," 일본기계학회논문집, 제 58권, 제545호, pp. 44~49.
- (9) Hisao Nishii, 1991, "Robot Arm Vibration Control Using Virtual Damping Theory," 일본기계학회논문집, 제 57 권, 제 536 호, pp. 90~95.
- (10) Timcenko, A. and Kircanski, N., 1991, "Control of Robots with Elastic Joints: Deterministic Observer & Kalman Filter Approach," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 722~727.
- (11) Fu, K. S., Gonzalez, R. C. and Lee, C. S., 1987, *Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelli*

gence, McGraw-Hill Press

shing Company.

(12) Craig, J. J., 1986, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control Addison-Wesley Publi-*

(13) 오태석, 1991. “로봇의 관성부하 추정에 관한 연구,” 연세대학교 석사학위 논문.