한국공작기계학회 2002 춘계학술대회 논문집 pp. 173~178

TMS320C5X 칩을 사용한 산업용 스카라 로봇의 견실제어

An Robust Control Inderstrial SCARA Robot Manipulator Using TMS320C5X Chip

°배 길 호[1], 김 용 태[2], 김 휘 동[3], 염 만 오[4], 한 성 현[4]

1. 미래 산업(주), 425-170 경기도 안산시 사동 1431-4
2. 경남대학교 대학원 기계설계학과
3. 연암공업대학교, 660-750 경남 진주시 가좌동 780번지
4. 경남대학교 기계자동화공학부, 631-701 경남 마산시 합포구 월영2동 449번지

Abstract

This paper presents a new approach to the design of adaptive control system using DSPs(TMS320C50) for robotic manipulators to achieve trajectory tracking angles. Digital signal processors are used in implementing real time adaptive control algorithms to provide motion for robotic manipulators. In the proposed scheme, adaptation laws are derived from the improved second stability analysis based on the indirect adaptive control theory. The proposed control scheme is simple in structure, fast in computation, an suitable for implementation of real-time control. Moreover, this scheme does not requre an accurate dynamic modeling, nor values of manipulator parameters and payload. Performance of the adaptive controller is illustrated by exeperimental results for a SCARA robot.

Key word: Indirect Adaptive Control (간접 적응 제어), SCARA Robot (스카라 로보트), Joint Controller (관절 제어기), Digtal Signal Processor (디지털 신호 처리기), Robustness (견실성)

1. 서 론

산업분야에서 생산공정의 자동화를 위하여 산업용 로보트의 사용이 급증함에 따라 로보트의 고속화·고정밀화 등이 절실히 요구되고 있다. 지금까지의 산업용 로보트의 제어방식은 스카라 로봇의 비선형동특성을 거의 무시한 상태에서 PD 및 PID제어가 사용되고 있는 실정이다. 스카라 로봇의 동적모델링에 있어서 매개변수의 불확실성과 비선형성의 존재 및 부하의 변동 등의 외란에 대처하면서 견실한 제어성능을 얻을 수 있는 제어기 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구로 다양한 제어기법의 연구가 활발히 진행중에 있다.

본 연구에서는, 작업환경의 변화 및 내부 외란등의 작용시 효율적인 제어성능을 지닌 견실제어기를 개발하여 기존의 스카라 로봇의 제어기의 단점을 보완, 개선하고자 한다. 본 연구에서 체택한 견실제어시스템의 구조는 선형 PD법칙을 사용하는 계산토오크 기법(computed-torque control method)을 기초로 한 기본 구조에서 운동상태의 변화에 따라 변화하는 관성 파라미터 및 마찰항을 적절히 추정하는 간접 적응 제어 알고리즘을 사용하였다. 견실제어 알고리즘은 컴퓨터 토오크 기법을 이용하여 얻어진 오차동력학에 직접 Lyapunov 방법을 이용하여 안정성 해석 조건을 바탕으로 견실제어칙이 유도된다.

본 연구에 제안된 견실제어 알고리즘은 기존의 고전적인 제어방법에 의한 제어 알고리즘에 비해 상당한 계산량이 요구된다. 그러므로, 견실

제어의 견실 실시간 제어실현을 위하여, TMS320C50[(1)~(3)] 어셈블리 S/W를 이용하여 적응 제어 알고리즘을 개발하고, 실시간 안에 고속의 계산처리가 가능하고, Floating-point 계열보다는 경제적으로 유리한 Fixed-Point 인 TMS320C50 DSP(Digital signal processor)를 관절제어기의 프로세스로 사용하여, 관절 제어기를 설계·제작하였다. 각 관절 제어기에는 독립관절의 형태로, 한개의 DSP가 한개의 관절을 제어하도록 되어 있다. 각 관절제어기의 DSP가 로보트를 제어할 데이타를 외부에서 입력하고, 제어된 결과를 사용자가 확인할 수 있도록 16비트 병렬로 연결된 공통메모리를 사용하였다. 실험을 통해 제작된 제어기의 신뢰성을 입증하기 위해 제어 프로그램의 다운로딩은 TI사의 XDS 510에뮬레이터와 호스트제어기(IBM 486)를 이용하여 제안된 견실제어기법을 DSP에 다운로드(down load)시켜 실험을 하였다.

2. 스카라 로보트의 운동방정식

운동 방정식을 라그랑지법으로 유도하면 다음과 같다.

$$H(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \qquad (1)$$

여기서, 왼쪽 첫 번째 항은 관성 행렬, 두 번째 항은 원심력과 코리올리력, 세 번째 항은 중력항, 오른쪽 항은 토오크값을 각각 나타낸다. 식 (1)를 각 링크에 대한 운동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&H_{11}\ddot{\theta}_1 + H_{12}\ddot{\theta}_2 + H_{14}\ddot{\theta}_4 + V_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + V_{122}\dot{\theta}_2^2 = \tau_1\\
&H_{21}\ddot{\theta}_1 + H_{22}\ddot{\theta}_2 + H_{24}\ddot{\theta}_4 + V_{211}\dot{\theta}_1^2 = \tau_2\\
&H_{33}\ddot{d}_3 + G_3 = \tau_3\\
&H_{41}\ddot{\theta}_1 + H_{42}\ddot{\theta}_2 + H_{44}\ddot{\theta}_4 = \tau_4
\end{aligned} \qquad (2)$$

각 항에 대한 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
H_{11} &= m_1 L_{c1}^2 + I_1 + m_2(L_1^2 + L_{c2}^2 + 2L_1 L_{c2}\cos\theta_2)\\
&\quad + I_2 + (m_3 + m_4)(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2\cos\theta_2) + I_4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{12} &= H_{21} = m_2(L_{c2}^2 + L_1 L_{c2}\cos\theta_2) + I_2\\
&\quad + (m_3 + m_4)(L_2^2 + 2L_1 L_2\cos\theta_2) + I_4
\end{aligned}$$

$$H_{22} = m_2 L_{c2}^2 + I_2 + m_3 L_2^2 + m_4 L_2^2 + I_4$$

$$H_{14} = H_{41} = H_{24} = H_{42} = -I_4$$

$$H_{33} = m_3 + m_4$$

$$H_{44} = I_4$$

$$H_{13} = H_{31} = H_{23} = H_{32} = 0$$

$$V_{112} = -2m_2 L_1 L_{c2}\sin\theta_2 - 2(m_3 + m_4)L_1 L_2\sin\theta_2$$

$$V_{122} = -m_2 L_1 L_{c2}\sin\theta_2 - (m_3 + m_4)L_1 L_2\sin\theta_2$$

$$V_{211} = m_2 L_1 L_{c2}\sin\theta_2 + (m_3 + m_4)L_1 L_2\sin\theta_2$$

$$\begin{aligned}
V_{212} &= -0.5[m_2 L_1 L_{c2}\sin\theta_2 + (m_3 + m_4)L_1 L_2\sin\theta_2]\\
&= -V_{221}
\end{aligned}$$

$$G_1 = G_2 = G_4 = 0$$

$$G_3 = -g(m_3 + m_4)$$

여기서, θ_i : i번째 축 링크의 회전각도

d_3 : 3번째 축 병진 운동의 변위

m_i : i번째 링크의 질량

L_i : i번째 링크의 길이

L_{ci} : i번째의 좌표에서 i번째 링크의 중심까지거리

I_i : i번째 링크의 회전 관성 모멘트

G_i : i번째 링크의 중력

3. 적응 제어칙 유도

본 연구에서는 지금까지 로보트 제어 방법중에 정확한 동적 모델링이 가능하다는 조건하에서는 가장 간단 하면서도 효율적인 제어 기법이라 할 수 있는 계산 토오크 방법을 이용하여 파라미터 즉, 관성모우멘트나 코리올리 원심력항을 추정해주는 갱신법칙을 부가시킴으로 해서 파라미터 오차벡터가 제로가 되도록 하여 점근적인 안정을 꾀하려는 것이다.

스카라 로봇의 동역학 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\nu = H(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\dot{\theta}) \qquad (3)$$

여기서, $R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$는 알려진 시간 함수의 $n \times r$ 행렬이고, ν는 알 수 없는 파라미터 벡터이다. H, V, G, F는 각각 관성 모멘트, 원심력

항, 중력항 그리고 마찰계수 항을 나타낸다.

$$\tau = R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\nu \tag{4}$$

간접 적응 제어 메카니즘에 의한 적응 제어칙(adaptive control law)은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau = \ & \hat{H}(\theta)(\ \ddot{\theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e) \\ & + \hat{V}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \hat{G}(\theta) + \hat{F}(\dot{\theta})\end{aligned} \tag{5}$$

원하는 기준 궤적의 각위치와 실제 관절의 각 위치에 대한 오차 ($e = \theta_d - \theta$) 의 정의로부터 토오크 입력에 대한 식이 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau = \ & \hat{H}(\theta)(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) + \hat{H}(\theta)\ddot{\theta} \\ & + \hat{V}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \hat{G}(\theta) + \hat{F}(\dot{\theta})\end{aligned} \tag{6}$$

식 (3)과 식 (6)로 부터 다음과 같은 식으로 정의 될 수 있다.

$$\tau = \hat{H}(\theta)(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) + R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\hat{\nu} \tag{7}$$

여기서, $\hat{\nu}$은 알 수 없는 시변 파라미터의 추정을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다.

오차 방정식의 형태로 식(7)을 재정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = \hat{H}^{-1} R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\tilde{\nu} \tag{8}$$

파라미터 오차를 $\tilde{\nu} = \nu - \hat{\nu}$으로 정의하고, 오차 방정식을 상태 공간 형태로 다시 쓰면 다음과 같은 형태로 된다.

$$\dot{e} = Ae + BH^{-1}(\theta)R(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\tilde{\nu} \tag{9}$$

추종 오차 벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$e = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} O_n \\ I_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} O_n & I_n \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix}$$

다음은 Lyapunov 안정성 해석을 통하여 추종(tracking) 오차 벡터 e가 점근적인 안정을 하도록 하는 적응 제어칙을 유도하기 위하여 양의 한정인 리아프노프 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V = e^T P e + \tilde{\nu}^T \Gamma^{-1} \tilde{\nu} \tag{10}$$

여기서 P는 $2n \times 2n$의 양의 한정(positive definition) 상수 대칭 행렬(symmetric matrix)이며, Γ는 대각(diagonal)이며, 양의 한정인 $r \times r$ 행렬이다.

$$\Gamma = diag(y_1, y_2, \cdots\cdots, y_r)$$

리아프노프(Lyapunov) 함수를 시간에 대하여 미분(differential)함으로써 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} = e^T P \dot{e} + \dot{e}^T P e + 2\tilde{\nu}\,\Gamma^{-1}\,\dot{\tilde{\nu}} \tag{11}$$

식 (9)를 식 (11)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}\dot{V} = \ & e^T P(Ae + B\hat{H}^{-1}(\theta)R(\cdot)\tilde{\nu}) \\ & + (Ae + B\hat{H}^{-1}(\theta)R(\cdot)\tilde{\nu})^T P e + 2\,\tilde{\nu}^T \Gamma^{-1}\,\dot{\tilde{\nu}}\end{aligned} \tag{12}$$

여기서, $[\dot{\tilde{\nu}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\nu}] = \tilde{\nu}^T \Gamma^{-1}\,\dot{\tilde{\nu}}$ 으로 정의된다. 스칼라 전치(scalar translation) 의 특성을 이용하여 항별로 조합하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2\tilde{\nu}^T(\Gamma^{-1}\,\dot{\tilde{\nu}} + R^T(\cdot)\hat{H}^{-1}(\theta)B^T P e) \tag{13}$$

여기서, Q는 리아프노프 함수를 만족하는 양의 한정 행렬이다.

$$A^T P + PA = -Q$$

$\dot{V}$는 항상 최소한 음의 반한정(negative-semidefinite)이어야 안정(stability)하다는 사실에서 적응 갱신 법칙(updating rule)을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{\tilde{\nu}} = -\Gamma R^T(\cdot)\hat{H}^{-1}(\theta)B^T P e \tag{14}$$

$$\dot{V} = -e^T Q e$$

$\dot{\nu}$가 0이기 때문에 파라미터 추종 벡터 $\hat{\nu}$를 적응 갱신 법칙에 대입하면 다음과 같은 최종 견실 제어칙이 형성한다.

$$\hat{v} = \Gamma R^{-1}(\cdot)\,\hat{H}^{-1}(\theta)\,B^{T}Pe \qquad (15)$$

V은 항상 양(positive)이고, $\dot{V}$는 (A > 0) 항상 음(nagative)이면 오차가 점근적(asymptotic)으로 영으로 수렴하게 된다. 위와 같은 사실에 근거하고, V가 항상 시간에 따른 연속 함수라고 가정하면, 다음의 결론을 얻을 수 있다.

$$\lim_{t\to\infty} e = 0 \qquad (16)$$

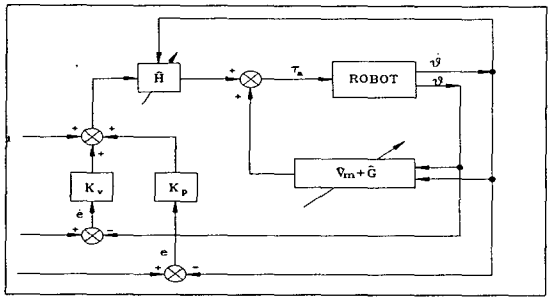

Fig. 1 Block diagram of the adaptive controller.

4. 제어 시스템의 구성

4.1 전체 시스템

본 연구에 사용된 제어기의 전체시스템 구성의 블럭 선도는 Fig.2 와 같다.

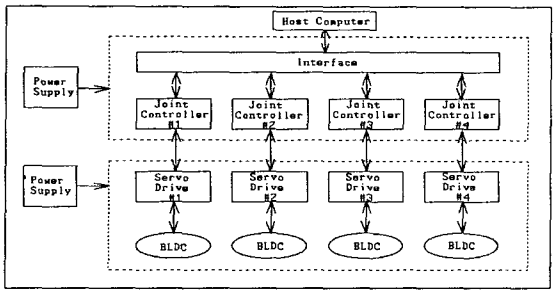

Fig. 2 Overall system block diagram.

Fig.2 에서 보듯이 전체시스템의 구성은 호스트 제어기(IBM 486)와 관절제어기(controller), 인터페이스, 서보드라이브와 모터 그리고 전원공급기로 이루어진다. 호스트 제어기는 궤적계획에 따른 위치명령을 각 축 제어기에 공급하고, 로보트의 추종성능결과를 사용자가 확인할 수 있도록 인터페이스 내에 존재하는 공통메모리(Global Memort)와 메모리 맵 방식으로 16-bit병렬 통신을 하도록 되어있다. 그리고 각 관절제어기는 14핀 커넥터(Connector)를 통하여 DSP C50의 에뮬레이터(Emulator)와 연결할 수 있다.

4.2 서보 드라이브(Servo Drive)

스카라 로보트에 사용된 서보 드라이브는 삼성에서 제작된 CSA series중 전원 분리형 CSA12로서 DC brushdless 모터를 구동하여 고정밀의 위치, 속도를 제어할 수 있도록 고안된 AC서보 드라이브이다[4]~[6]. 구성은 Fig.3 와 같이 되며, 구동은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

단계1. 상위 관절제어기로부터 Servo On/Off 신호를 받는다.

단계2. 상위 관절제어기로부터 Servo Reset 신호를 받는다.

단계3. 상위 관절제어기로부터 속도 또는 전류명령을 받는다.

단계4. 상위 관절제어기로 위치 및 속도신호를 보낸다.

단계5. 단계3과 단계4를 반복한다.

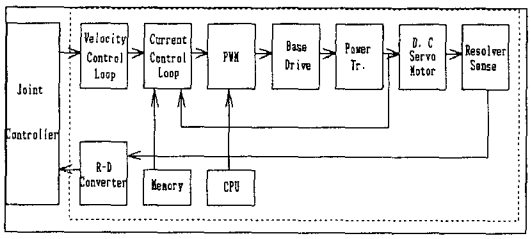

Fig. 3 AC servo drive.

4.3 인터페이스

인터페이스 회로의 구성은 Fig.4와 같다. 인터페이스는 공통메모리와 조정회로, 직렬통신 조정회로, EPROM으로 구성된다. 공통메모리는 32K X 8비트의 SRAM 2개로 구성되는데 역시 액세스 시간이 20nsec이다. 이 공통메모리는 주로 호스트 제어기가 오프라인(off-line)에서 learning/teaching한 궤적 데이타를 받아 관절제어기에 전달하고 관절제어기에서 보내는 로보트의 구동 결과를 호스트 제어기에 보낼 수 있도록 저장하는 역할뿐만 아니라 관절제어기 사이의 데이타 공유를 위한 목적으로 사용된다. 그리고 호스트 제어기와는 50핀 커넥터를 통하여 연결이 되는데 이것은 16비트 데이타 버스, 16비트 어드레스 버스, 그리고 제어 신호들(chip select signal, bus high enable signal, memory

read/write signal)로 구성된다.

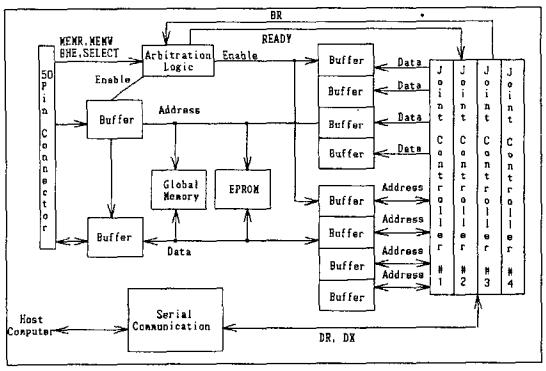

Fig. 4 Interface block diagram.

4.4 관절제어기

본 시스템에 사용된 메인 프로세서로는 TI사의 Fixed-Point DSP인 TMS320C50을 사용하였다. 관절제어기에서 사용하고 있는 메모리는 프로그램 메모리로 액세스(Access) 시간이 20nsec인 32K X 8비트 SRAM 2개를 사용하며, 데이타 메모리에는 어드레싱 가능한 64K 중에서 공통메모리의 영역을 뺀 32K X 16비트를 사용하는데 역시 액세스 시간이 20necs인 32K X 8비트 SRAM 을 2개 사용한다. 각 관절제어기와 서보 드라이브 사이의 통신은 34핀 커넥터를 통하여 이루어진다. 속도 신호는 버퍼와 래치를 통하여 A/D 변환기와 접속된다. A/D변환기는 출력이 12비트이고, 변환시간은 10μs, 입력은 -10V~+10V이다. D/A 변환기는 출력 범위가 -10V~+10V이고, 분해능이 1LSB=0.00488V이다.

4.5 TMS320C50의 특징

본 연구에 사용된 메인 프로세서 TMS320C50은 40MHz 클럭(Clock) 사용시 Single-Cycle Fixed-Point Instruction을 매 50nsec(20MIPS)마다 수행하며 64K × 16비트의 프로그램과 데이타 영역을 각각 어드레싱할 수 있으며 64K의 I/O를 가질수 있다. 그리고 내부에는 9K × 16비트의 Single-Cycle 프로그램/데이타 RAM을 가지고 있으며, Micro-Computer Mode 시 프로그램의 다운로딩(down loading)을 하기위한 부트로더(boot loader)를 포함하고 있는 2K × 16비트의 Single-Cycle Boot ROM을 가지고 있다.

5. 실 험

5.1 성능 시험 조건 및 결과

TMS320C50으로 설계/제작된 시스템의 안정성을 확인하기 위해 제안된 견실제어알고리즘을 스카라 로봇의 1, 2 관절에 대하여 성능 실험을 수행하였다. 성능 시험은 기준 궤적이 스텝이고, 미지의 외란 및 파라미터 불확실성을 고려한 상태에서 제안된 견실제어와의 위치추종 대한 성능 실험을 셈플링 타임을 1ms로 하였다. 사용된 스카라 로봇의 사양은 Table 1과 Table 2 에 나타내었다. Fig. 7~Fig. 9는 부가하중 2kg 하에서의 링크 1, 2에 대한 위치추종성능과 위치오차를 나타낸다.

Table 1 The specification of a SCARA robot.

각 링크의 질량 (kg)		각 링크의 길이 (m)		각 관절의 기어비	
m1	15.067	L1	0.35	n1	1/100
m2	8.994	L2	0.3	n2	1/80
m3	3.0	d3	0.175	n3	1/200
m4	1.0	d4	0.007	n4	1/75

Table 2 The specification of a SCARA robot.

각 링크의 Viscous 마찰계수(N·m/(rad/s))		각 링크의 Coulomb 마찰계수(N·m)		각 링크의 관성 모우멘트($kg \cdot m^2$)	
f1	0.000759	k1	0.06867	I1	0.1538
f2	0.000328	k2	0.05150	I2	0.0674
f3	0.7	k3	0.04905	I3	0.045
f4	0.0003	k4	0.04905	I4	0.0016

6. 결 론

본 연구에서는 산업용 로보트 매니퓰레이터의 견실 실시간 제어 실현을 위하여, 디지털 신호 처리기인 TMS320C50을 이용한 스카라 로봇에 대한 디지털 견실제어기를 설계하였다. 개발된 견실제어칙은 간접 견실제어 기법에 기초하여 Lyapunov 제2방법에 의한 안정성 해석을 통하여 유도 되었고, 개발된 TMS320C50 어셈블리 S/W를 이용하여 실시간 견실제어 실현을 수행하였다. 또한 제안된 디지탈 적응 제어 시스템의 성능 검증을 위해서 TI사의 XDS 510에뮬레이터를

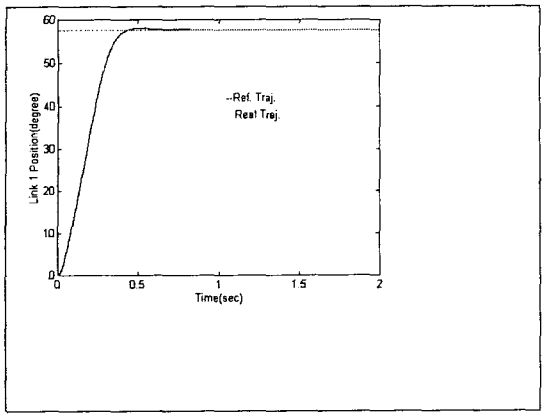

Fig. 7 Position trackihg performance of 1 link with 1 radian input under payload (2kg).

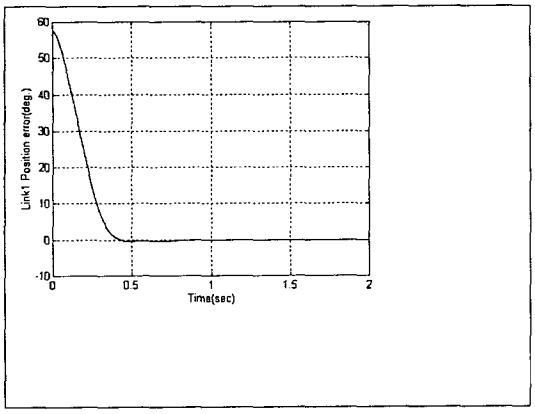

Fig. 8 Position error of 1 link with 1 radian under payload (2kg).

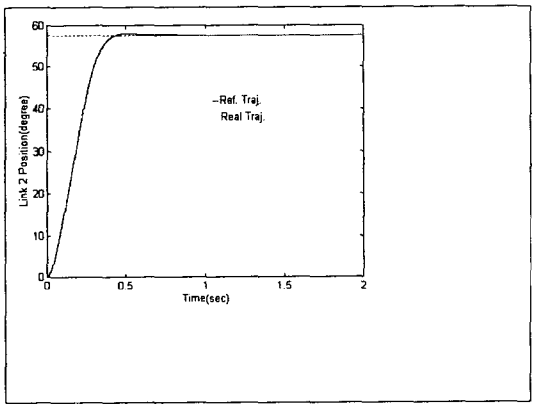

Fig. 9 Position tracking performance of 2 link with 1 radian under payload (2kg).

연결하여 실제 관절의 위치 및 속도 추종에 대한 실험을 수행한 결과 본 연구에서 설계된 제어기는 부하하중의 증가 및 제반 외란에 대해서도 견실하고 정밀한 제어성능을 입증할 수 있었다. 향후 연구 방향은 설계된 관절제어기를 산업현장의 범용 로봇에 적용될 수 있도록 실제 생산라인에서 발생될 수 있는 여러가지 잡음에 대한 영향을 다양한 조건에 대한 실험을 통하여 개선하는 것이다.

본 연구는 과학기술부 지역용역기술개발과제 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고 문헌

[1] "TMS320C5X User's Guide", Texas Instruments Inc. 1993.

[2] "Disital Signal Processing Applications with the TMS320 Family", Vol. 3, Texas Instruments Inc. 1989.

[3] Kun-Shan Lin, Gene A.Frantz, Ray Simar, Jr, "The TMS320 Family of Digital Signal Procssors", Proceeding of the IEEE, Vol. 75, No. 9, September, 1987.

[4] Pragasen Pillay and Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part II : The Brushless DC Motor Drive," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 25, No. 2, March, 1989.

[5] Takuzo Maeno and masakazu Kobata, "AC Commutatorless and Brushless Motor," IEEE Trans. Power Appl. Syst., Vol. PAS-91, pp. 1476-1484, Aug., 1972.

[6] Jacob Zubek, Alberto Abbondanti and Craig J. Nordby, "Pulsewidth Modulated Inverter Motor Drives with Improved Modulation," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 1A-11, pp.695-703, Nov., 1975.

[7] J. J. Craig, P. Hsu and S. S. "Sastry, Adaptive Control of Mechanical", Int. Journal of Robotic Reserch, Vol. 6, No. 2, pp. 16-28, 1987.

[8] R. H. Middleton and G. C. Goodwin, "Adaptive Computed Torque Control for Rigid Link Manipulators", System & Control Letters, Vol. 10, pp. 9-16, 1988.