

Real-Time OS 기반의 로봇 매니퓰레이터 동력학 제어기의 구현 및 성능평가

論 文
57P-2-8

Implementation and Performance Evaluation of RTOS-Based Dynamic Controller for Robot Manipulator

高 在 源[†] · 林 東 哲^{*}
(Jaw-Won Kho · Dong-Cheol Lim)

Abstract - In this paper, a dynamic learning controller for robot manipulator is implemented using real-time operating system with capabilities of multitasking, intertask communication and synchronization, event-driven, priority-driven scheduling, real-time clock control, etc. The controller hardware system with VME bus and related devices is developed and applied to implement a dynamic learning control scheme for robot manipulator. Real-time performance of the proposed dynamic learning controller is tested and evaluated for tracking of the desired trajectory and compared with the conventional servo controller.

Key Words : Robot Dynamics, Dynamic Learning Control, Robot Control System, Real-Time OS, VME Bus

1. 서 론

최근에 실시간 처리는 로봇 제어 시스템에 있어서 그 중요성 및 필요성이 크게 높아지고 있다. 실시간 시스템(Real-time system)이란 일반적으로 계산 결과가 논리적인 타당성을 갖추어야 하는 것뿐만 아니라, 어떠한 상황하에서도 그 계산결과가 요구되어지는 시간 안에 정확하게 출력되어야 하는 시스템을 의미한다[1-4]. 로봇 제어 시스템은 전체 시스템의 신뢰성과 강인성 그리고 안전 및 고장에 대한 예측 가능성 등이 보장되어야 하는 매우 엄격한 의미의 실시간 시스템이다. 이러한 실시간 시스템은 이벤트 처리 마감시간의 보장 정도에 따라 경성 실시간 시스템(Hard real-time system)과 연성 실시간 시스템(Soft real-time system)으로 나뉘어 진다.

현재 상용 RTOS는 LynxOS, VxWorks, pSOS, OS-9, VRTXsa 등이 출시되어 시장 점유를 위해 경쟁중이다. 이러한 상용 RTOS는 특성화된 시장을 중심으로 소비자에게 필요한 통합 개발 환경에서부터 각종 미들웨어까지 제공하기 때문에 일반 OS보다 가격적인 면에서 상대적으로 높다[5]. 이 중에서 본 논문은 개방형 구조를 갖는 운영체제로서 마이크로텍 리서치사의 VRTXsa[6]를 이용하여 실시간 제어 시스템으로서의 로봇 제어 시스템의 요구에 대응하기 위하여 실시간 운영체제가 제공하는 멀티태스킹, 태스크간 통신 및 동기화, 선점 가능한 스케줄링 방식, 신속하고 예측 가능한 인터럽트 반응 등의 실시간 멀티태스킹 기법[2]을 이용하여

로봇 제어 시스템의 응용 소프트웨어를 구현하고자 한다. 그리고 로봇제어기의 하드웨어적인 구성에 있어서는 VME 버스 및 관련 디바이스로서 조인트 위치, 속도 제어를 위한 하드웨어의 간소화 및 계층적 하드웨어 시스템을 구성하여 보다 안정적으로 외부 환경에 대응할 수 있도록 로봇 제어기의 신뢰성 및 강인성을 보장하는 것을 논문의 목적으로 한다.

한편 최근에 로봇 제어기에 있어서는 기존의 고전적 제어기의 한계를 극복하고 다양한 제어 환경 변화에 적극적으로 대처할 수 있는 적응 제어 기법[7-10]과 적응 능력 외에 학습 능력과 강인성을 함께 고려한 지능 제어 기법[11,12]이 활발하게 연구되고 있다. 본 논문은 이 중에서 반복되는 학습을 통해 제어 입력 신호의 궤적을 구해내는 반복 학습 제어기[13,14]와 로봇의 파라미터 변동과 마찰력에 대한 제어 입력의 보정 능력 및 외란에 대해 강인한 특성을 가지는 강인 학습 동력학 제어기[15,16]에 대해 논의하기로 한다. 본 논문에서 제안한 강인 학습 동력학 제어기는 반복 학습제어기와 적응제어 법칙을 결합시킨 형태의 지능제어 기법으로서, 지금까지의 제어기법과는 다르게 독창적으로 개발한 제어기법이다. 이 제어 기법들은 불확실성에 대한 강인성의 범위가 크고 시스템 파라미터의 실시간 추정이 가능하며, 정확한 동력학 모델링이 불필요하다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 결국, VME 버스[17] 및 상용 실시간 운영체제인 VRTXsa[6]를 이용하여 로봇 제어 시스템을 개발하고 위에서 언급한 강인 학습 동력학 제어기의 지능제어 기법을 적용하여 궤적 추종 작업을 수행함으로써 기존의 PID 제어기와 파라미터 불확실성, 외란 등에 대한 강인성을 비교 평가하고자 한다.

2. 제어기 구성

일반적으로 n-자유도(D.O.F. : Degrees of freedom)의 강

[†] 교신저자, 正會員 : 柳韓大學 컴퓨터制御科 副教授 · 工博
E-mail: jwkho@yuhan.ac.kr

^{*} 正會員 : 斗源工科大学 디스플레이工學科 專任講師
接受日字 : 2008年 3月 13日
最終完了 : 2008年 4月 24日

체 로봇 매니플레이터의 동역학 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + F(q, \dot{q}) + d = \tau \quad (2.1)$$

여기서 $q \in R^n$ 는 로봇 관절의 일반화 좌표 벡터이다. 그리고 $D(q) \in R^{n \times n}$ 는 양의 한정(positive-definite)인 관성 행렬이며, $B(q, \dot{q}) \in R^n$, $F(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 구심력 및 코리올리(coriolis)력을 나타내는 벡터이다. 또한 $d(t) \in R^n$, $\tau \in R^n$ 는 각각 중력과 마찰력, 크기가 유계된 미지의 반복 확정 외란, 로봇에 주어지는 입력 토크 벡터를 표시한다. 여기서 $D(q)$ 는 모든 $q \in R^n$ 에 대해서 $0 < \lambda_1 I \leq D(q) \leq \lambda_2 I$ 로 양의 한정되어 있다. 여기서 λ_1 과 λ_2 는 양의 상수이다.

여기서 우리는 각 관절의 추종 궤적을 q_d 로 정의하고 제어의 목적을 로봇이 이 궤적 q_d 를 추종하는데 요구되어지는 제어입력을 구하는 것에 둔다. 이러한 관계 하에서 본 논문에서 다루고자 하는 동역학 제어기 설계문제는 로봇 시스템의 실제 궤적 q 가 원하는 궤적 q_d 를 추적하는데 필요한 제어 입력을 구하는 것으로 그림 1은 로봇 매니플레이터의 파라미터를 추종하여 그에 따른 제어 입력을 구성하는 구조로서 본 논문에서 제안하는 강인 학습 동역학 제어기의 제어 구조를 보여준다.

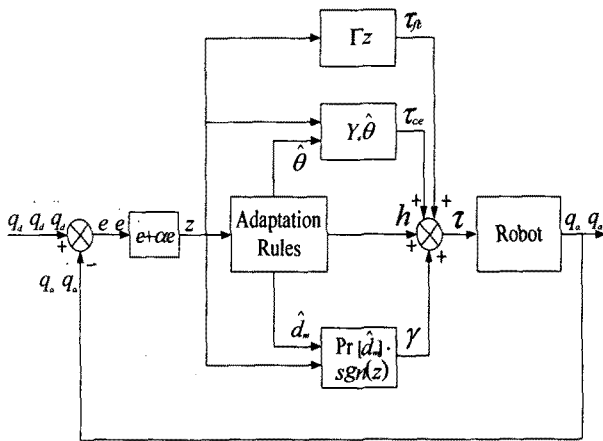


그림 1 동역학 제어기 구조
Fig. 1 Structure of dynamic controller

먼저 동역학 제어기의 출력을 다음과 같이 구성한다.

$$\tau = \tau_{fb} + \tau_{ce} + \Pr[h] + \Pr[\gamma] \quad (2.2)$$

여기서 $\tau_{fb}, \tau_{ce}, \hat{h}, \gamma$ 는 각각 궤환 오차 입력, 토크계산 오차입력(computed-torque-error input), 학습입력, 강인 제어 입력을 나타내며, 시스템을 안정화시키는 오차입력 τ_{fb} 와 τ_{ce} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{fb} &= \Gamma(\dot{e} + \alpha e) \\ \tau_{ce} &= \hat{D}_e \ddot{q} + \hat{B}_e \dot{q} + \hat{F}_e + \alpha(\hat{D}\dot{e} + \hat{B}e) \\ &= Y_e \hat{\theta} \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서 $e = q_d - q$, 궤환 이득 Γ 는 양의 대칭행렬이고, α 는 양수이다. $(\hat{\cdot})$ 는 추정된 파라미터로 구성된 추정 시스템이며 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{D}_e(q) &\equiv \hat{D}(q) - \hat{D}(q_d) \\ \hat{B}_e(q) &\equiv \hat{B}(q) - \hat{B}(q_d) \\ \hat{F}_e(q) &\equiv \hat{F}(q) - \hat{F}(q_d) \end{aligned} \quad (2.4)$$

그리고 학습 신호의 과도한 변화를 방지하기 위하여 사용되는 Projection 연산자(Pr[·])의 정의는 다음과 같다.

$$\Pr[x(t)] = \begin{cases} \bar{X}, & \text{if } x(t) > \bar{X} \\ x(t), & \text{if } X \leq x(t) \leq \bar{X} \\ \underline{X}, & \text{if } x(t) < \underline{X} \end{cases} \quad (2.5)$$

식 (2.2)를 식 (2.1)에 대입하여 정리하면 다음의 오차 시스템을 구할 수 있다.

$$D(q)\dot{z} + B(q, \dot{q})z + \Gamma z = Y_e \tilde{\theta} + \tilde{h} + d_2 - \gamma \quad (2.6)$$

여기서 $z = \dot{e} + \alpha e$, $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\tilde{h} = h_d - \hat{h}$ 이고, 강인 제어 입력은 $\gamma = \Pr[\hat{d}_m(t)] \text{sgn}(z)$ 와 같이 정의한다. h_d 는 명령 궤적에 대한 역동역학 제어입력과 유계된 외란으로 이루어져 있다. 즉, $h_d = Y_d \dot{\theta} + d_1$. 그리고 $\text{sgn}(z)$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} \frac{z}{|z|}, & |z| \neq 0 \\ 0, & |z| = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

학습 입력과 추종 파라미터 그리고 외란의 경계치에 대한 적용 법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h(t) &= \Pr[h(t-\delta)] + \sigma \Lambda_1^{-1} z(t-\delta) \\ \hat{\theta}(t) &= \Pr[\hat{\theta}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_2^{-1} Y_e^T z(t-\delta) \\ \hat{d}_m(t) &= \Pr[\hat{d}_m(t-\delta)] + \sigma \Lambda_3^{-1} |z(t-\delta)| \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서 Λ_1, Λ_2 는 양의 대각 행렬인 학습이득이고, Λ_3, σ 는 양수인 학습 이득, δ 는 갱신 시간 간격이다.

위의 학습법칙에 있어서 갱신 시간 간격(δ)의 선택은 목표 제어 입력 값이 다음의 조건을 만족하도록 선택한다.

$$h_d(t) \approx h_d(t-\delta) \quad (2.9)$$

그러면 제어입력 (2.2)와 학습 규칙 (2.8)을 지닌 동력학 제어기는 점근적으로 수렴한다.

3. 로봇제어시스템 구현 및 성능평가

3.1 로봇 제어 시스템의 소프트웨어

3.1.1 전체 구성 및 내용

실시간 운영 체제는 개방형 구조를 갖는 운영체제로서 마이크로텍 리서치사의 VRTXsa를 이용하였다. 시스템 구조는 Unix를 기반으로 하는 호스트 워크스테이션과 타겟 시스템이 네트워크로 연결되어 있는데 사용자의 응용 소프트웨어는 호스트 워크스테이션에서 개발되어서 타겟 시스템으로 다운 로드 되어 실행되게 된다. 그림 2에 소프트웨어와 하드웨어를 포함한 전체 시스템에 대한 구조가 나타나 있는데 MVME167 보드가 포함된 타겟 시스템을 하드웨어 레벨로 하고 기기에 실시간 운영체제가 올라가고 그 위에 사용자 레벨의 로봇 제어기 응용 소프트웨어가 실리게 된다. 이와 같은 구조는 응용 프로그램이 물리적인 하드웨어와 디바이스 드라이버를 직접 액세스하는 대신 VRTXsa를 통하여 접근함으로써 응용 프로그램의 이식성, 재사용성, 신뢰성 등을 더욱 높일 수가 있다. 커널은 실시간 운영 체제의 가장 작은 핵심 구성 요소를 의미하는 것으로서 멀티 태스킹, 태스크간의 통신 및 동기화 메커니즘, 태스크 스케줄링, 실시간 클럭 지원, 문자 입출력 지원, 엄격한 실시간 반응성 등의 기능을 지원한다. VRTXsa는 이러한 멀티 태스킹 기법을 지원하기 위하여 태스크 관리, 메모리 관리, 태스크간 통신 및 동기화 등의 멀티 태스킹 메커니즘을 제공하게 된다.

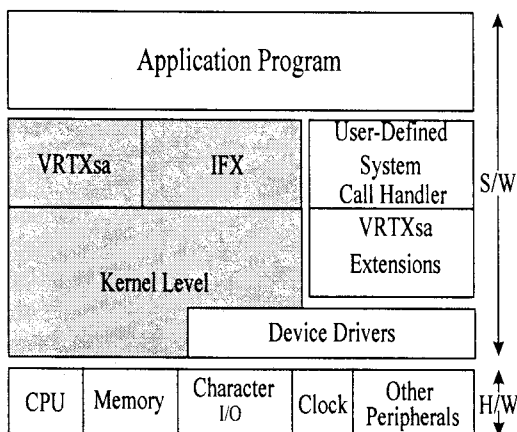


그림 2 런 타임 시스템 구조
Fig. 2 Run_Time system architecture

여기에서 태스크란 OS가 관리하는 프로그램의 단위로서 하나의 사건을 실시간으로 실행시키는 일련의 처리를 의미하는 것으로서 물리적인 의미로는 독립적인 기능을 수행하는 시퀀셜한 응용 프로그램 코드를 말한다. VRTXsa는

언제나 가장 높은 우선 순위의 태스크가 실행되도록 리스케줄링 프로시저(rescheduling procedure)를 제공한다.

3.1.2 응용 소프트웨어

로봇 매니플레이터를 실시간 운영체제에 의해서 제어하기 위해 우선 각 작업별로 태스크를 분할하여야 한다. 이러한 태스크들의 우선 순위 및 주기성 여부를 표 1에 나타내었다. 태스크 구조를 설계할 때 프로그램의 유연성, 이식성 및 수정을 용이하게 하기 위하여 1축과 2축의 각 축별로 태스크를 정의하였다. 1축에 관한 태스크와 2축에 관한 태스크는 각각 J1과 J2 접자를 붙여 명명하였다. 구성된 해당 태스크들은 PWM 드라이버, 스카라 로봇과 연계하여 1[ms] 간격 또는 2[ms] 간격의 인터플레이션을 통하여 속도 파형을 만들어서 목표위치를 추종한다.

표 1 태스크의 정의(0 : 가장 높은 우선순위)
Table 1 Definition of tasks(0 : highest priority)

태스크명	우선 순위	주기성 여부
Emergency	0	주기
Path	1	주기
J1Actual	2	주기
J2Actual	3	주기
J1Torque	4	주기
J2Torque	5	주기
J1Dac	6	주기
J2Dac	7	주기
Transfer	8	주기

한편, 각 태스크들간의 통신 및 동기화 도구와 그에 관련된 태스크들을 표 2에 나타내었다. Emergency, Transfer, Path 태스크의 경우는 시스템 콜 함수 sc_delay()를 사용하였고, 그 외 태스크의 경우는 Event_flag, Que, Mailbox, Semaphore, Mutex 등의 태스크간 통신 및 동기화 도구를 사용하였다.

표 2 태스크간의 통신 및 동기화
Table 2 Intertask communication & synchronization

메커니즘	Posting 태스크	Pending 태스크
Event_Flag	Path	J1Actua, J2Actual
Semaphore	J1Actual	J1Torque
Semaphore	J2Actual	J2Torque
Semaphore	J1Torque	J1Dac
Semaphore	J2Torque	J2Dac

3.2 로봇 제어 시스템의 하드웨어

로봇 제어기의 하드웨어 구성은 크게 주 시스템, 보조 시

시스템, 인터페이스 보드, 로봇 매니플레이터, PWM 드라이버 등의 요소로 구성되어 있다. 그림 3은 전체 로봇 제어 시스템의 하드웨어 구성을 나타내고 있고, 그림 4는 인터페이스 보드의 외관을 보여 주고 있다. 주 시스템은 크로스 개발 환경으로서 호스트 컴퓨터와 타겟 시스템의 두 부분으로 구성되어 있다. 호스트는 개발에 필요한 모니터링을 위한 시스템으로서 개발된 프로그램을 타겟 시스템으로 다운로드하고, 프로그램 실행 및 디버깅에 관련된 명령을 타겟 시스템에 내리는 역할을 담당한다. 보조 시스템은 주 시스템과의 데이터 송, 수신을 담당하는 인터페이스 보드를 장착시킨 486PC를 사용하였다. 인터페이스 보드는 타겟 시스템 내에 장착되는 부분으로서 여러 상용의 VME 버스 전용 I/O 카드들이 판매되고 있지만, 로봇 매니플레이터 제어용으로서의 적합성 및 확장성 등의 여러 요인으로 인하여 직접 설계 및 제작하였다. 인터페이스 보드는 다음과 같은 구성을 그 내용으로 제작하였다.

- 인터페이스 보드 1 --> VME 버스 인터페이스부, 32 비트 위치 정보 입력부, 12비트 속도 정보 출력부, 병렬 I/O부, 타이머(68230) 및 인터럽트 발생부
- 인터페이스 보드 2 --> VME 버스 인터페이스부, DPRAM 및 병렬 통신부
- 인터페이스 보드 3 --> VME 버스 인터페이스부, 병렬 통신부

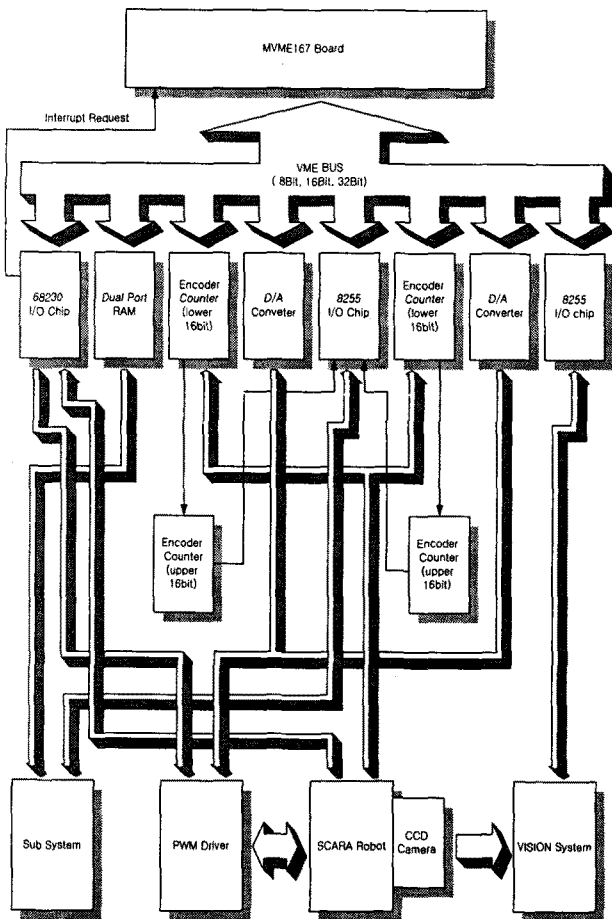


그림 3 로봇 제어 시스템의 하드웨어 구성
Fig. 3 H/W configuration of robot control system

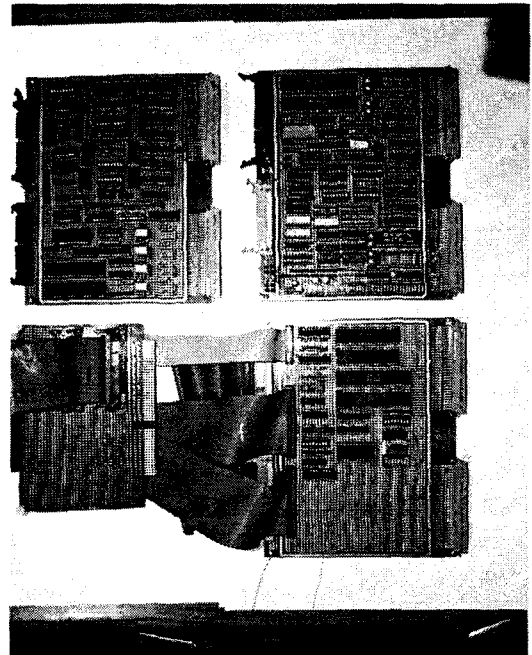


그림 4 인터페이스 보드
Fig. 4 Interface board

3.3 실험 방법 및 결과

3.3.1 로봇 매니플레이터의 자원

제어 대상 로봇 매니플레이터는 LG에서 제작된 4축의 평면 다관절로 이루어진 산업용 스키라(SCARA) 로봇 매니플레이터이다. 그림 5는 로봇 매니플레이터의 외관을 나타내고 있고, 표 3은 스키라 로봇 매니플레이터의 파라미터를 나타내고 있다.

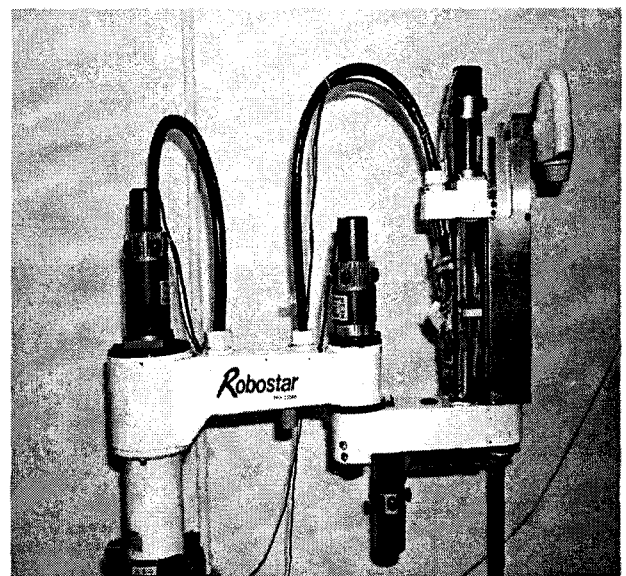


그림 5 스키라 로봇 매니플레이터
Fig. 5 SCARA robot manipulator

표 3 스카라 로봇 매니플레이터의 파라미터

Table 3 Parameters of SCARA robot

파라미터	관절 1	관절 2	
모터	최대전력	400 [W]	200 [W]
	최대전압	65 [V]	65 [V]
	최대전류	6.5 [A]	3.5 [A]
	최대토크	400 [Nm]	200 [Nm]
	최대속도	3000 [rpm]	3000 [rpm]
엔코더	1000 [pulse/rev.]	1000 [pulse/rev.]	
감속비	50 : 1	50 : 1	
동력전달방식	하모닉드라이브	하모닉드라이브	
링크 길이	350 [mm]	250 [mm]	
작업각도	$\pm 110^\circ$	$\pm 145^\circ$	

3.3.2 결과 및 성능평가

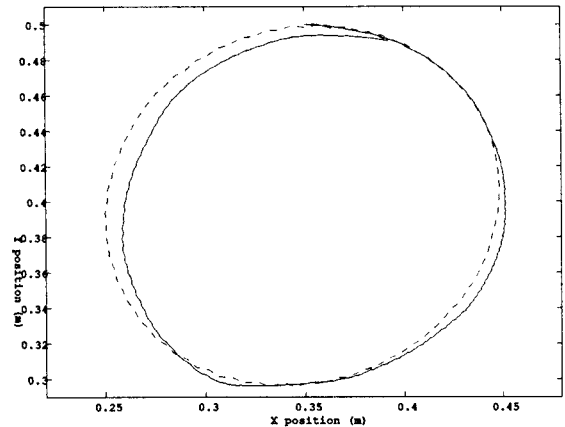
본 논문에서 제안한 구조를 가지는 강인 학습 동력학 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실시간 운영 체제, VME 버스 및 이를 바탕으로 해서 설계된 로봇 제어기 응용 소프트웨어를 이용하여 스카라 로봇에 대한 실험을 수행하였다. 일반적인 PD 제어기를 사용했을 경우와 PID 제어기를 사용했을 경우, 그리고 제안된 강인 학습 동력학 제어기를 사용했을 경우에 대하여 각각 추적 성능을 비교 분석하였다. 적용된 각각의 제어 파라미터는 표 4에 나타내었다.

표 4 동력학 제어기의 제어 파라미터

Table 4 Control parameters of dynamic controller

표시	값	설명
α	3	$z = \dot{e} + \alpha e$ 의 상수
Γ	30	궤환 오차 입력 이득
σA_1^{-1}	0.5	학습 입력 이득
σA_2^{-1}	0.5	추종 파라미터 적용 이득
σA_3^{-1}	0.5	미지의 확정 외란 적용 이득
δ	0.002[sec]	적용 법칙 갱신 시간 간격

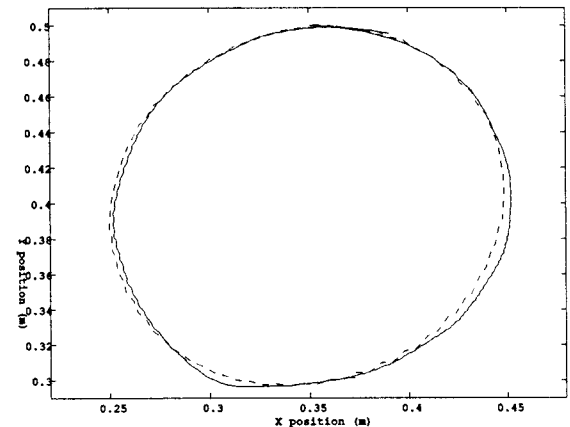
그림 6~그림 8은 동력학 제어기의 샘플링 시간 간격, 전체 실험 수행 시간에 대한 설정치가 각각 2[ms], 5[sec]인 경우에 대한 응답이다. 모든 경우에 대하여 제안된 강인 학습 동력학 제어기가 PD 제어기나 PID 제어기에 비해 더 정확한 추적 성능을 보이는 것을 알 수 있고, 또한 강인 학습 동력학 제어기의 경우에 식 (2.8)에서와 같이 학습 입력과 추종 파라미터 그리고 외란의 경계치에 대한 적용 법칙을 제어기에 적용하였는데, 실험 과정에서는 표 4에서와 같이 여러 가지 적응제어 파라미터를 실제로 적용하므로써 외란과 불안정한 파라미터가 존재하는 환경에서도 강인한 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.



dashed : desired, solid : actual

그림 6 응답 결과(PD 제어기)

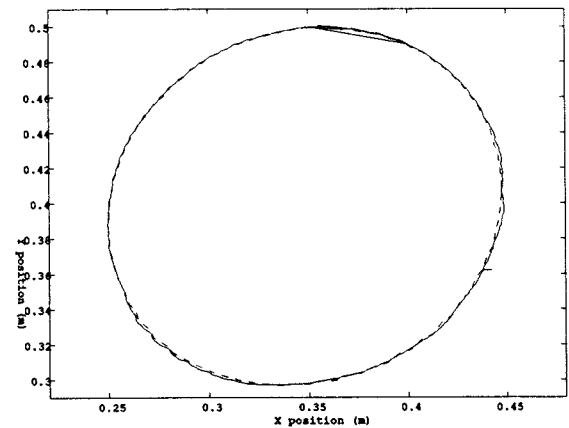
Fig. 6 Reponse result(PD controller)



dashed : desired, solid : actual

그림 7 응답 결과(PID 제어기)

Fig. 7 Reponse result(PID controller)



dashed : desired, solid : actual

그림 8 응답 결과(제안된 제어기)

Fig. 8 Reponse result(Proposed controller)

4. 결 론

본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터를 제어함에 있어서 강인 학습 동력학 제어기를 적용하여 파라미터의 불확실성, 외란, 샘플링 주기 등에 대하여 강인함을 제시하였다. 또한 로봇 제어기의 소프트웨어 구성에 있어서 상용 실시간 운영체제인 VRTXsa를 이용하여 로봇 제어 시스템의 운영체제를 구성하고 멀티태스킹 기법과 통신 동기화 도구를 이용하여 로봇 제어기 응용 소프트웨어를 디자인하여 소프트웨어의 독립성과 확장성을 향상시켰고, 로봇 제어기의 하드웨어 구성에 있어서는 확장성, 안정성, 속도 등에서 우수한 VME 버스 및 관련 디바이스로서 조인트 위치 및 속도 제어를 위한 하드웨어를 간소화시키고 계층적 하드웨어 시스템을 구성하여 로봇 제어 시스템의 신뢰성 및 강인성을 보장하였다. 실험에서는 구현된 전체 시스템에 대하여 제안된 강인 학습 동력학 제어기의 성능을 검증하기 위해 로봇 매니퓰레이터의 요구 궤적에 대한 추적 작업을 수행하였고, 그 결과 제안된 동력학 제어기가 기존의 제어기보다 미지의 파라미터, 외란, 샘플링 주기 등의 측면에서 더 강인하고 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다.

참 고 문 헌

[1] P. A. Laplante, *Real-Time Systems Design and Analysis : An Engineer's Handbook*, IEEE Computer Society Press, 1992.

[2] J. A. stankovic, K. Ramamrithan, "Tutorial : Hard Real-Time Systems," *IEEE Computer Society Press*, pp.1-11, 1988.

[3] Bishop, *Mechatronics handbook*, CRC Press, 2002.

[4] *Real-time Extension for Portable Operating System*, IEEE Computer Society for Work Item : JTC1.22.21.2, Dec. 1989.

[5] 이두용, "적용기술과 적용사례", 데이터베이스 월드, pp. 82-84, 2000.

[6] *Spectra VRTX/OS User's Guide and Reference*, Microtec Research Incorporated.

[7] Jean-Jacques, E. Slotine and Weiping Li, "On the Adaptive Control of Robotic Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, No. 3, Fall 1987.

[8] T. Y. Kuc and J. S. Lee "An Adaptive Learning Control of Uncertain Robotic Systems," *Proceedings of the 30th Conf. on Decision and Control*. Dec. 1991.

[9] V. Chellaboina, W. M. Haddad and T. Hayakawa, "Direct Adaptive Control for Nonlinear Matrix Second-order Dynamical Systems with State-dependant Uncertainty," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 4247-4252, 2001.

[10] A. V. Roup and D. S. Bernstein, "Stabilization of a Class of Nonlinear Systems using Direct Adaptive Control," *Proc. of the American Control Conference*, pp.3148-3152, 2000.

[11] White, D. A. and Sofge, D. A. Ed., *Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy and Adaptive approach*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

[12] J. Y. Choi and J. S. Lee, "Adaptive Iterative Learning Control of Uncertain Robotic Systems," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 147, No. 2, pp.217-223, 2000.

[13] T. Y. Kuc, K. H. Nam and J. S. Lee, "An Iterative Learning Control of Robot Manipulator," *IEEE Trans. on Robotics and Automations.*, vol. 7, No. 6, Dec. 1991.

[14] T. Y. Kuc and J. S. Lee, "An Adaptive Learning Control of Robot Manipulator," *IEEE CDC*, pp.1206- 1211, 1991.

[15] Y. Choi and W. K. Chung, "PID Performance Tuning Methods for a Robotic Manipulator," *Asian Journal of Control*, vol. 5, No. 2, pp.206-216, 2003.

[16] 한웅기, 국태용, "비전 시스템을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 동력학 추적 제어," KACC 논문집, 제2권, pp. 1816-1819, 1997.

[17] Wade D. Peterson, *The VMEbus Handbook Second Edition*, VFEA International Trade Association, 1991.

저 자 소 개



고재원 (高在源)

1957년 2월 21일생. 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986~1992 삼성전자 자동화연구소 선임연구원. 1993~1995 고등기술연구원 생산기술연구실 책임연구원. 1996~현재 유한대학 컴퓨터 제어과 부교수

Tel : 02-2610-0833

Fax : 02-2682-6080

E-mail : jwkh0@yuhan.ac.kr



임동철 (林東哲)

1966년 2월 21일생. 1992년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정. 2007. 3.~현재 두원공과대학 디스플레이공학과 전임강사

Tel : 02-2610-0387

Fax : 02-2682-6080

E-mail : dclim660@hanmail.net