

로봇 매니퓰레이터를 위한 RTOS 기반 동력학 제어기의 구현 및 성능평가

임 동 철, 국 태 용

성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부

전화 : (0331) 290-7202 / 팩스 : (0331) 290-7170

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

Dong Cheol Lim, Tae Yong Kuc

The Graduate School of Electronic Engineering Sung Kyun Kwan University

E-mail : tykuc@yurim.skku.ac.kr

Abstract

In this paper, a real-time control system 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 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 for tasks of tracking moving objects and compared with the conventional servo controller.

1. 서론

현재 산업 현장에서 사용되는 로봇 매니퓰레이터의 제어방식은 선형 PID 피드백 제어기등으로 특징지어지는 고전적 제어기법이 그 대부분을 차지하지만 이러한 고전적 제어기법은 파라미터와 같은 동적 특성의 변화와 작업 환경의 변화에 대한 적응 능력이 떨어지는 등의 여러 문제점을 내포하고 있다[1]. 이에 대해 기존의 고전적 제어기의 한계를 극복하고 다양한 제어 환경 변화에 적극적으로 대처할 수 있는 적응 제어 기법[2,3]과 적응 능력 외에 학습 능력과 강인성을 함께 고려한 지능 제어 기법[4]이 활발하게 연구되고 있다. 본 논문은 이 중에서 반복되는 학습을 통해 제어 입력 신호의 궤적을 구해내는 반복 학습 제어기[5,6]와 로봇의 파라미터 변동과 마찰력에 대한 제어 입력의 보정 능력 및 외란에 대해 강인한 특성을 가지는 강인 학습 동력학 제어기[11]에 대해 논의하기로 한다. 위의 제어 기법들은 불확실성에 대한 강인성의 범위가 크고 시스템 파라미터의 실시간 추정이 가능하며 정확

한 동력학 모델링이 불필요하다는 장점을 가지고 있다.

실시간 시스템이란 일반적으로 계산결과가 논리적인 타당성을 갖추어야 하는 것뿐만 아니라 어떠한 상황하에서도 그 계산결과가 요구되어지는 시간 안에 정확하게 출력되어야 하는 시스템을 의미한다[7,8]. 로봇 시스템은 전체 시스템의 신뢰성과 강인성 그리고 안전 및 고장에 대한 예측 가능성이 보장되어야 하는 매우 엄격한 의미의 실시간 시스템이다. 본 논문에서는 이러한 실시간 제어 시스템으로서의 로봇 제어 시스템의 요구에 대응하기 위하여 실시간 운영체제가 제공하는 멀티 태스킹 기법[8]을 이용하여 로봇 제어기의 응용 소프트웨어를 구현하고 또한 로봇 제어 시스템의 하드웨어 구성에 있어서 확장성, 안전성, 속도 등에서 우수한 VME 버스 및 관련 디바이스로서 하위 조인트 위치 제어를 위한 계층적 하드웨어 시스템을 구성하여 보다 안정적으로 외부 환경에 대응할 수 있도록 로봇 제어기의 신뢰성 및 강인성을 보장한다.

본 논문에서는 결국, VME 버스[9] 및 상용 실시간 운영 체제인 VRTX[10]를 이용하여 로봇 제어 시스템을 개발하고 위에서 기술한 반복 학습 제어기와 강인 학습 동력학 제어기의 지능제어 기법을 적용하여 궤적 추종 작업을 수행함으로써 기존의 PID 제어기와 파라미터 불확실성, 외란등에 대한 강인성을 비교 평가하고자 한다.

2. 제어기 구성

2.1 반복 학습 제어기 구조

비선형 시스템을 단지 선형 제어기만을 사용하여 원하는 궤적을 오차 없이 추종하려면 피드백 이득이 무한한 값을 가져야 한다. 그러나 피드포워드 내에 비선형 보상이 존재한다면 선형제어기의 이득 값은 그다지 클 필요가 없다. 본 논문에서 구현하고자 하는 반복 학습 제어기는 비선형항 보상을 위한 제어 알고리즘을 포함하고 있

다. 반복 학습제어기법은 모델화되지 않은 동력학에 기인하는 외란에 따른 제어의 어려움을 극복하고자 연속된 반복동작을 통하여 원하는 제어 입력을 찾는 제어 기법으로서 학습 횟수가 증가함에 따라 궤적추종 오차를 줄이게 된다.

로봇시스템이 요구 궤적을 추종하도록 하기 위하여 제어 법칙을 다음과 같이 구성한다[5].

$$T^i = T_e^i + H^i \quad (1)$$

T^i 는 i 번째 반복의 제어입력 토크를 의미하고 T_e^i 는 피드백 이득 (Feedback Gain) K , L 를 가지는 일반적인 PD 제어기 형태의 제어 입력 토크이다.

H^i 는 학습 규칙에 의해 각 학습 단계마다 계산된 피드포워드 (Feedforward) 제어 입력이다. H^i 가 미지의 값을 가지는 비선형항 S_d 로 수렴하기 위하여 H^i 를 갱신시키는 학습 규칙은 다음과 같다.

$$H^{i+1} = H^i + \beta T_e^i \quad (2)$$

여기에서 β 는 학습 인자 (training factor)로 불리는 양의 상수이고 그 범위는 H^i 의 수렴을 보장하기 위해 $0 < \beta < 2$ 사이의 값을 가져야 한다. 만약 비선형항 S_d 가 H^i 에 의해서 삭제되지 않는다면 궤적 오차는 0으로 수렴하지 않는다. 학습 규칙은 보상 토크 H^i 로서 미지의 비선형항 S_d 를 근사화하고 그것을 보상한다.

그림1은 이러한 목적을 위하여 구현된 학습제어기의 제어구조를 보여준다.

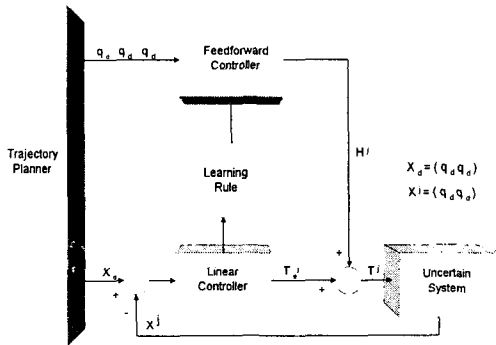


그림 1. 학습제어기의 제어구조
Fig.1. The structure of Learning Controller.

위에서 궤적 플래너(trajjectory planner)는 원하는 궤적을 만들고 고정된 이득을 가지는 선형 PD제어기는 일정한 오차 한계 내로 시스템의 제어 안정성을 부여한다. 그와 동시에 피드포워드 제어기는 피드포워드 토크 요소 H^i 를 갱신한다.

2.2 강인 학습 동력학 제어기 구조

로봇 매니플레이터 모델에 대하여 [11]에서는 내부 루프 동력학 제어기의 출력을 다음과 같이 구성하였다.

$$\tau = \tau_b + \tau_{ce} + \text{Pr}[h] + \text{Pr}[\gamma] \quad (3)$$

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

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

여기서 $e = q_d - q$, 궤환 이득 Γ 는 양의 대칭행렬이고, α 는 양수이다. ($\hat{\cdot}$)는 추정된 파라미터로 구성된 추정 시스템을 의미하며 $\text{Pr}[\cdot]$ 은 학습 신호의 과도한 변화를 방지하기 위하여 사용되는 Projection 연산자이다.

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

$$\begin{aligned} h(t) &= \text{Pr}[h(t-\delta)] + \sigma \Lambda_1^{-1} z(t-\delta) \\ \hat{\theta}(t) &= \text{Pr}[\hat{\theta}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_2^{-1} Y_e^T z(t-\delta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{d}_m(t) = \text{Pr}[\hat{d}_m(t-\delta)] + \sigma \Lambda_3^{-1} z(t-\delta)$$

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.

$$h_d(t) \approx h_d(t-\delta) \quad (5)$$

그러면 시스템은 제어 입력 (3)과 학습입력, 파라미터, 시변 외란의 경계치를 위한 학습 규칙 (4)로 구성된 제어기에 의하여 점근적으로 수렴함을 알 수 있다[11].

3. 구현 및 성능평가

3.1 제어 시스템의 하드웨어 구성

로봇 제어기의 하드웨어 구성은 다음의 요소로 구성되어 있다. 주 시스템은 호스트로 SUN Workstation, 타겟 시스템으로 MVME167싱글 보드 컴퓨터 및 인터페이스 보드를 각각 이용하였고 타겟의 콘솔로서 터미널을 사용하였다. 호스트와 타겟 시스템은 ethernet으로 연결된다. 타겟 시스템 내의 인터페이스 보드는 다음과 같은 내용으로 구성하였다.

인터페이스 보드 1 --- VME 인터페이스부, 엔코더 값을 읽어들이는 32비트 위치 정보 입력부, 디지털 속도 값을 아날로그 값으로 변환해주는 12비트 속도 정보 출력부, 로봇 상태값을 읽어들이고 출력할 수 있는 병렬 I/O부, 타이머(68230) 및 인터럽트 발생부

인터페이스 보드 2 --- VME 인터페이스부, 보조 시스템과의 유저 인터페이스를 위한 DPRAM 및 병렬 통신부

보조 시스템은 주 시스템과의 데이터 송,수신을 담당하는 인터페이스 보드가 장착된 486PC를 사용하였으며 사용자로부터의 모든 명령을 병렬 통신을 통하여 주 시스템

으로 전달하고 반대로 주 시스템으로부터 전달받은 로봇 매니플레이터의 궤적 데이터를 실시간으로 모니터 화면에 그려주고 파일에 저장시키는 일을 담당한다. 제어 대상 로봇 매니플레이터는 LG에서 제작된 4축의 평면 다관절로 이루어진 산업용 스카라(SCARA) 로봇 매니플레이터이다.

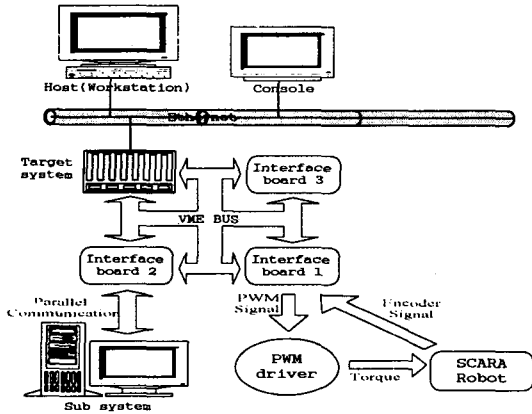


그림 2 전체 시스템의 블록 선도
Fig 2 Block diagram of overall system

3.2 제어 시스템의 소프트웨어 구성

본 논문에서는 태스크 구조를 설계할 때 프로그램의 유연성, 이식성 및 수정을 용이하게 하기 위하여 1축과 2축, 각 축별로 태스크를 정의하였다. 1축에 관한 태스크와 2축에 관한 태스크는 각각 J1과 J2 침자를 붙여 명명하였다. 각 태스크들 중에서 Path, J1Actual, J2Actual, J1Torque, J2Torque, J1Dac, J2Dac는 특정 마감시간을 가지는 시간 임계적(Time-Critical)인 태스크이자 주기적인 태스크인데 반하여 그 외 태스크들은 지정된 마감시간 안에 실행이 완료되지 않아도 무방한 시간 비임계적인 태스크이다.

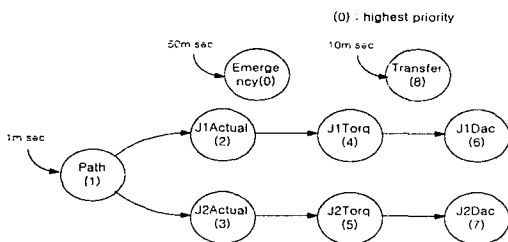


그림 3 제어 태스크의 계층적 구조
Fig 3 Hierarchical structure of control tasks

로봇 비전 시스템의 프로그램을 구성하는 위 태스크의 내용은 다음과 같다.

Emergency - 로봇의 이상 상태를 50m sec의 주기로 지속적으로 점검하여 긴급상황 발생시 그에 대해 적절히 대응하는 태스크

Path - 1m sec 또는 2m sec 간격으로 동력학 제어 요구 궤적을 구해내는 태스크

Actual - 입력되는 엔코더 값으로부터 로봇 매니플레이터의 실제 궤적을 구해내는 태스크

Torque - 로봇 매니플레이터를 움직이기 위한 제어 입력력을 계산해내는 태스크

Dac - PWM드라이버의 아날로그제어 입력을 만들어내기 위해 D/A 컨버터에 디지털제어 입력을 출력시키는 태스크

Transfer - 실시간 모니터링 및 파일 저장을 위하여 제어기의 결과 데이터를 보조 시스템에 전달하는 태스크

태스크들의 우선 순위는 그림 3에 표시되어 있는 바와 같고 특히 Emergency 태스크의 경우는 긴급 상황 발생시 필요한 태스크이므로 우선 순위가 가장 높아야 한다. 상위 우선 순위 태스크에서 하위 우선 순위 태스크로의 태스크 스위칭에는 Emergency 태스크 및 Transfer 태스크의 경우는 시스템 콜 함수 sc_delay()를 사용하였고, 그 외 태스크의 경우는 태스크간 통신 및 동기화 도구로 Event_flag, Que, Semaphore를 사용하였다.

주기적으로 실행되는 태스크들에 대한 주기성 부여 방법에 있어서 Emergency 태스크와 Transfer 태스크의 경우는 클럭 틱에 관련된 시스템 콜 함수 및 sc_delay()를 사용한 S/W적인 주기 부여방법을 사용하였고 Path 태스크 등과 같이 직접적으로 로봇 동작과 관련된 태스크들의 경우는 정확성을 기하기 위하여 H/W적으로 68230 타이머 칩의 출력 펄스를 이용하여 주기를 부여하였다. Path 태스크는 온라인으로 요구궤적을 생성하는 태스크로서 만일 태스크 수가 많아져서 지정된 시간안에 실행이 완료되는 것이 곤란할 경우에는 오프라인으로 미리 수행하게 하여 태스크 스위칭작업에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

3.3 실험 방법 및 결과

본 논문에서 제안한 구조를 가지는 반복 학습 제어기 및 강인 학습 동력학 제어기의 성능을 검증하기 위하여 스카라 로봇에 대해서 VME 버스, 실시간 운영 체제 및 이를 바탕으로 해서 설계된 로봇 제어기 응용소프트웨어를 이용하여 실험을 수행하였다. 일반적인 PID제어기를 사용했을 경우와 반복 학습 제어기를 사용했을 경우, 그리고 강인 학습 동력학 제어기를 사용했을 경우에 대하여 각각 추종 성능을 비교 분석하였다.

그림 4는 로봇 매니플레이터의 X,Y 평면상의 위치 추종 결과를 보이고 그림 5는 그 위치 오차를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 6회 학습재의 반복 학습 제어기가 타 제어기보다 위치 추종에 있어서 가장 성능이 뛰어나고 추종 오차도 현저하게 작음을 알 수 있다. 또한 그림 6을 살펴보면 학습의 초기단계에서는 제어 입력을 차지하는 범위에 있어서 학습 제어기보다는 선형 제어기가 많은 부분을 차지하지만 학습이 진행됨에 따라서는 반대로 학습 제어기가 선형 제어기보다 더 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 또한 학습 횟수의 증가에 따라 위치 오차 RMS가 감소함을 보이는데 이는 학습이 증가함에 따라 궤적 오차가 0으로 수렴한다는 것을 보이는 결과이다.

4. 결론

본 논문에서는 특정한 요구 궤적에 대한 추종 작업을 수행함에 있어서 불확실성에 대한 강인성의 범위가 크고 수학적으로 엄밀한 안정 특성을 가지며 제어 구조가 비교적 간단한 지능제어기법을 적용하여 파라미터의 불확실성, 외란등에 대하여 강인한 제어를 제시하였다. 또한 VME버스 및 관련 디바이스로서 하위 조인트 위치 세팅을 위한 계층적 하드웨어 시스템을 구성하여 로봇 제어 시스템의 신뢰성 및 강인성을 보장하였고 상용 실시간 운영체제를 이용하여 로봇 제어기의 운영체제를 구성하고 멀티태스킹 기법과 동기화 도구를 이용하여 로봇 제어기 응용 소프트웨어를 디자인하여 소프트웨어의 독립성과 확장성을 향상시켰다. 실험에서는 구현된 전체 로봇 시스템에 대하여 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위해 특정한 요구 궤적에 대한 추종 작업을 수행하였고 그 결과 제안된 반복 학습 제어기 및 강인 학습 동력학 제어기가 기존의 PID제어기보다 미지의 파라미터, 외란등의 측면에서 더 강인하고 뛰어난 성능을 나타냄을 보였다.

참고문헌

- [1] levis, A. H., et al., "Challenges to control: A Collective View", IEEE Trans. AC, vol.32, No.4, pp.275-285, Apr. 1987
- [2] Jean-Jacques E. Slotine Weiping Li "On the Adaptive Control of Robotic Manipulators" The International Journal of Robotics Research. Vol.6. No.3. Fall 1987
- [3] Tae-yong Kuc and Jin S. Lee "An Adaptive Learning Control of Uncertain robotic Systems" Proceedings of the 30th Conf. on Decision and Control. Dec 1991
- [4] White, D. A. and Sofge, D. A. Ed., Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy and Adaptive approach, Van Nostrand Reinhold, 1992
- [5] Tae-yong Kuc, Kwang-hee Nam, and Jin S. Lee "An Iterative Learning Control of Robot Manipulator" IEEE Trans. on Robotics and Automations. Vol.7. No.6 Dec 1991
- [6] Tae-yong Kuc, and Jin S. Lee "An Adaptive Learning Control of Robot Manipulator" IEEE CDC, pp.1206-1211, 1991
- [7] P. A. Laplante, Real-Time Systems Design and Analysis : An Engineer's Handbook, IEEE Computer Society Press, 1992
- [8] J. A. stankovic, K. Ramamrithan, "Tutorial : Hard Real-Time Systems," IEEE Computer Society Press, pp.1-11, 1988
- [9] Wade D. Peterson, The VMEbus Handbook Second Edition, VFEA International Trade Association, 1991
- [10] Spectra VRTX/OS User's Guide and Reference, Microtec Research, Incorporated
- [11] 한용기, 국태용, "비전 시스템을 이용한 로봇 매니플레이터의 동력학 추적 제어," KACC 논문집, 제2권, pp.1816-1819, 1997.

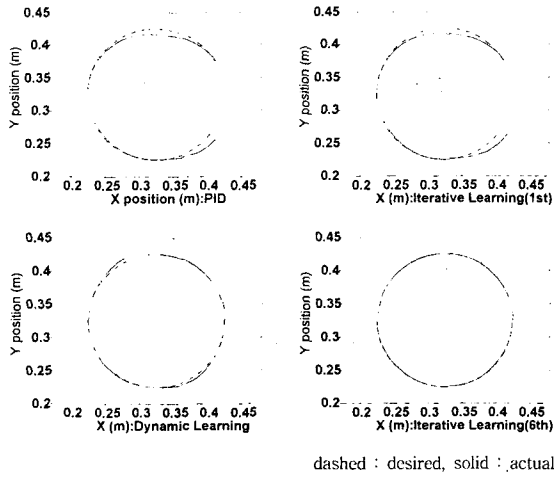


그림 4. 원 궤적에 대한 응답
FIG. 4. Response to circle trajectory

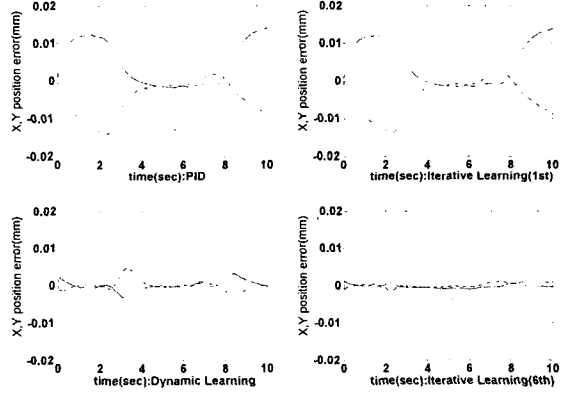


그림 5. X, Y 위치 에러
Fig 5. X, Y position error

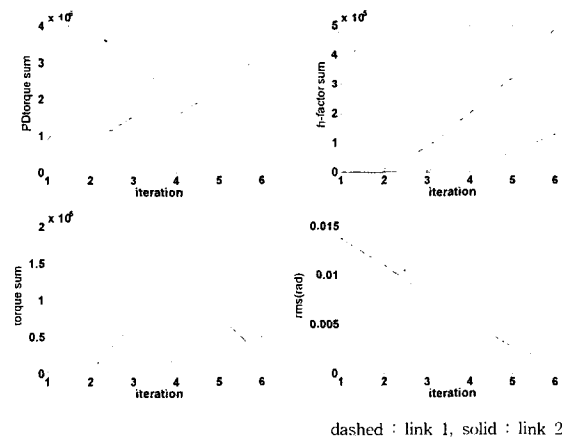


그림 6. 학습 횟수의 증가에 따른 토크 합 의 도시
Fig 6. Plots of squared torque sums versus iteration number