

TMS320C5X칩을 사용한 스카라 로봇의 극점배치 자기동조 적응제어기의 실현

Implementation of a Pole-Placement Self-Tuning Adaptive Controller for SCARA Robot Using TMS320C5X Chip

배길호*, 한성현*, 이민철**, 손권**, 이장명**, 이만형**, 김성권***

*경남대학교 기계설계학과(Tel: 0551-49-2617 ; Fax: 0551-43-8133)

**부산대학교 기계공학부(Tel: 051-510-2308 ; Fax: 051-512-9835)

***(주)삼성전자 생산기술센터(Tel: 0331-200-2200 ; Fax: 0331-250-2252)

Abstracts This paper presents a new approach to the design of self-tuning adaptive control system that is robust to the changing dynamic configuration as well as to the load variation factors using Digital signal processors for robot manipulators. TMS320C50 is used in implementing real-time adaptive control algorithms to provide advanced performance for robot manipulator. In this paper, an adaptive control scheme is proposed in order to design the pole-placement self-tuning controller which can reject the offset due to any load disturbance without a detailed description of robot dynamics. Parameters of discrete-time difference model are estimated by the recursive least-square identification algorithm, and controller parameters are determined by the pole-placement method. Performance of self-tuning adaptive controller is illustrated by the simulation and experiment for a SCARA robot.

Keywords Digital Signal Processor, Pole-Placement, Self-Tuning Adaptive Control, Parameter Estimate

1. 서 론

기존의 산업용 로봇의 제어방식은 로봇의 매니퓰레이터의 비선형 동특성을 거의 무시한 상태에서 개개의 관절을 독립적으로 제어하는 PD 및 PID 제어방식 등의 선형시불변(linear time-invariant) 제어기법에 주로 의존하고 있다. 따라서 로봇의 매니퓰레이터의 파라미터 변동이나 고속 운전시 발생하는 비선형성의 증가, 그리고 부하변동 등이 외란으로 작용하는 한 기존의 제어방식은 제어기의 건설성을 보장할 수 없다. 그러므로, 이러한 외란에 대처하면서 건설한 제어성능을 얻을 수 있는 제어기 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 작업환경의 변화 및 내부외란등의 적용시 효율적으로 대처하는 적응제어기를 개발하여 기존의 로봇 매니퓰레이터 제어기의 단점을 보완 개선하고자 한다. 적응제어기법은 크게 기준모델적응제어(Model Reference Adaptive Control, MRAC)방법과 자기동조적응제어(Self-Tuning Adaptive Control, STAC)방법[1, 2]이 있다. 기준모델 적응제어 방법은 대상 시스템의 특성과 일치시키는 것이며, 자기동조 방법은 대상 시스템의 특성을 추정하면서 추정된 매개변수를 바탕으로 적절한 제어기를 구성하는 것이다. 본 연구에서 채택한 적응제어 시스템은 극점 배치 자기동조적응제어 방식이다. 이 제어기법에서의 모델 파라미터 추정 방법은 이산 시간 차분 모델과 입출력 정보를 통해 순환 최소 자승법(Recursive Least Square Algorithm)을 이용하여 추정하고, 온라인(on-line)로 추정된 모델의 파라미터와 극점 배치를 통하여 제어기의 파라미터가 갱신되는 제어기법이다.

본 연구에 제안된 적응제어 알고리즘은 기존의 고전적인 제어 방법에 의한 제어 알고리즘에 비해 상당한 계산량이 요구된다. 그러므로, 적응제어의 건설 실시간 제어실험을 위하여, 실시간

고속의 계산처리가 가능하고, 디지털 신호 처리기(Digital Signal Processor)[3, 4] 계열 중에서 TMS320C3X의 floating-point 계열보다 가격이 저렴하고 더욱더 신속한 처리속도를 갖는 fixed point 인 TMS320C5X[7, 8] 계열의 디지털 신호 처리기를 관절제어기의 프로세서로 사용하여, 4관절에 대한 각 관절 제어기를 설계 하였다. 실험을 통해 재가된 제어기의 신뢰성은 입증하기 위해 제어 프로그램의 다운로드용 TI사의 XDS 510에 연결 이터와 호스트제어기(IBM 486)를 이용하여 제안된 적응제어기를 DSP에 다운로드(down load)시키 실험을 수행하였다. 그리고 FARA SM5 SCARA 로봇에 대한 실험을 통하여 기존의 PID제어기 보다 우수한 추종 성능 비교를 통해 제안된 적응제어기의 건설한 제어성능을 입증하고자 한다.

2. 자기동조 적응제어적 유도

단일 입출력 계통(Single Input/Single Output)의 시간 지연이 있는 이산 시간 모델을 고려하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A(z^{-1})e(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + v(k) \quad (1)$$

여기서, $u(k)$ 는 제어입력, $e(k) (= y(k) - y_d(k))$ 는 k 시간에서의 시스템의 출력 $y(k)$ 와 원하는 출력 $y_d(k)$ 의 오차를 나타내며, $v(k)$ 는 모델링 오차 및 외부외란을 나타낸다. 그리고 d 는 시스템의 지연시간을 나타내며, $A(z^{-1})$ 과 $B(z^{-1})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$$

외란 $v(k)$ 를 다음과 같이 정상증분을 갖는 외란과정으로 취급하면 식(1)은 식(2)와 같이 재표현될 수 있다.

$$\delta v(k) = \zeta(t) v(k)$$

$$A(z^{-1})e(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + \zeta(k)/\delta \quad (2)$$

(단, $\delta = (1 - Z^{-1})$)

위의 이산 시간 모델을 기준하여 로봇 매니퓰레이터의 부하 외란에 의한 잔류편차를 제거하기 위한 제어책을 정의하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(z^{-1})u(k) + S(z^{-1})e(k) + h(k) = 0 \quad (3)$$

여기서, $h(k)$ 는 k 시간에서 잔류편차를 제거하기 위한 항을 나타내고, $R(z^{-1})$ 과 $S(z^{-1})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R(z^{-1}) = 1 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_{nr} z^{-nr}$$

$$S(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_{ns} z^{-ns}$$

위의 식(3)을 식(2)에 대입하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})S(z^{-1})] e(k) = R(z^{-1})\zeta(k)/\delta - z^{-d}B(z^{-1})h(k) \quad (4)$$

또한, 원하는 특성 방정식을 $T(z^{-1})$ 라 정의하면 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})S(z^{-1}) = T(z^{-1}) \quad (5)$$

여기서, $T(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$T(z^{-1}) = 1 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} + \dots + t_{nt} z^{-nt}$$

제어기 다항식 $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ 는 위의 식(5)에 대한 극점배치를 통하여 결정된다.

매개 변수의 추정을 위하여 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta e(t) = -a_1 \delta e(t-1) - a_2 \delta e(t-2) - \dots - a_{na} \delta e(t-na) + b_0 \delta u(t-d) + b_1 \delta u(t-d-1) + \dots + b_{nb} \delta u(t-d-nb) + \zeta(t) \quad (6)$$

$$= x^T \theta + \zeta(t)$$

여기서, x 와 θ 는 다음과 같이 정의된다.

$$x = [-\delta e(t-1), -\delta e(t-2), \dots, -\delta e(t-na), \delta u(t-d), \delta u(t-d-1), \dots, \delta u(t-d-nb)]^T \quad (7)$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_0, b_1, \dots, b_{nb}]^T$$

매개변수 θ 는 순환 최소 자승법으로 다음과 같은 방법으로 추정된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{i+1} &= \delta e_{i+1} - x_{i+1}^T \theta_i \\ \theta_{i+1} &= \theta_i + K_{i+1} \epsilon_{i+1} \\ K_{i+1} &= P_i x_{i+1} + [\beta + x_{i+1}^T P_i x_{i+1}]^{-1} \\ P_{i+1} &= [I - K_{i+1} x_{i+1}^T] P_i / \beta \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 1 은 본 연구에서 제안되어진 자기동조 제어시스템에 대한 블록선도를 나타낸다.

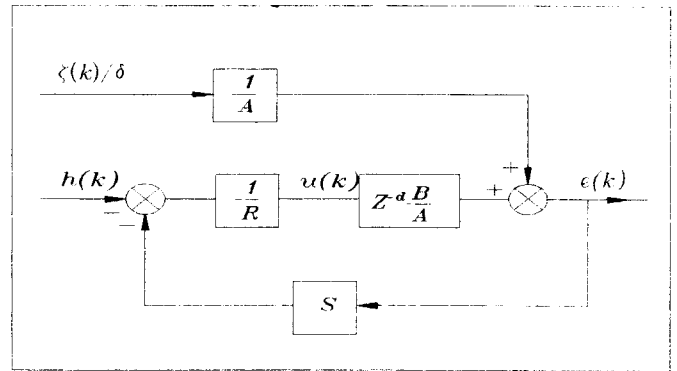


그림 1. 극배치 자기동조 제어의 블록 선도.
Fig. 1. Block diagram of Pole-Placement Self-Tuning Control.

3. 제어 시스템(H/W)구성

3.1 전체 시스템

본 연구에 사용된 관절제어기의 전체시스템에 대한 하드웨어의 구성은 Fig. 2 와 같다.

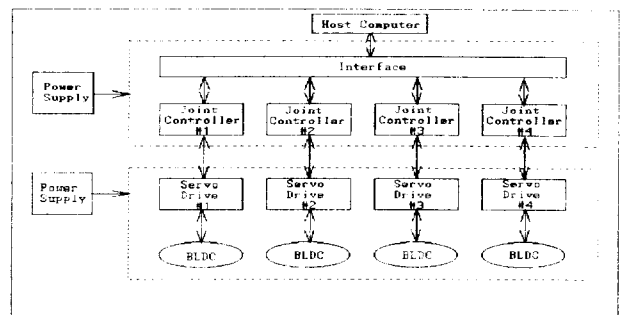


그림 2. 전체 시스템의 블록선도.

Fig. 2. Overall system block diagram.

전체시스템은 Fig. 2에 나타내고 있는 바와 같이 기본 구성은 호스트 제어기(IBM 486)와 관절제어기(controller), 인터페이스, 서보드라이브와 모터 그리고 전원공급기로 이루어진다. 호스

트 제어기는 궤적계획에 따른 위치명령을 각 축 제어기에 공급하고, 로봇의 추종성능 결과를 사용자가 확인할 수 있도록 인터페이스내에 존재하는 공통메모리(global memory)와 메모리 맵 방식으로 16-bit 병렬 통신을 하도록 되어있다. 그리고 프로그램을 개발할 때 편리하게 하기 위하여 각 관절제어기는 14핀 커넥터(connector)를 통하여 DSP 'C50의 에뮬레이터(emulator)와 연결할 수 있다.

3.2 인터페이스

인터페이스는 공통메모리와 조정회로, 직렬통신 조정회로, EPROM으로 구성된다. Fig. 3은 인터페이스 회로의 구성도를 나타내고 있다.

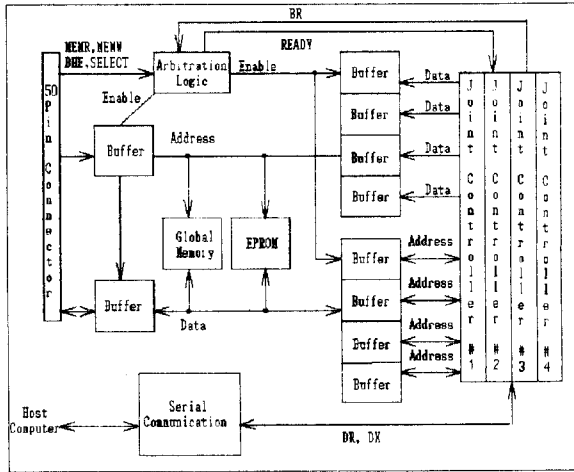


그림 3. 인터페이스의 블록선도.
Fig. 3. Interface block diagram.

공통메모리는 액세스 시간이 20nsec인 32K X 8비트의 SRAM을 2개로 구성하여 사용하였다. 이 공통메모리는 주로 호스트 제어기가 오프라인(off-line)에서 learning/teaching한 궤적 데이터를 받아 관절제어기에 전달하고 관절제어기에서 보내는 로봇의 구동 결과를 호스트 제어기에 보낼 수 있도록 저장하는 역할뿐만 아니라 관절제어기 사이의 데이터를 공유를 위한 목적으로 사용된다. 호스트 제어기에서 관절제어기에 각기 다른 제어 알고리즘을 다운로드시킬 때에도 이 공통메모리는 사용된다. 그리고 호스트 제어기와는 50핀 커넥터를 통하여 연결이 되는데 이것은 16비트 데이터 버스, 16비트 어드레스 버스, 그리고 제어 신호들(chip select signal, bus high enable signal, memory read/write signal)로 구성된다.

3.3 관절제어기

본 시스템에 사용된 메인 프로세서로는 TI사의 fixed-point 계열의 DSP인 TMS320C50을 사용하였다. 관절제어기에서 사용하고 있는 메모리는 프로그램 메모리로 액세스(access) 시간이 20nsec인 32K X 8비트 SRAM 2개를 사용하였고, 데이터 메모리에는 어드레싱 가능한 64K 중에서 공통메모리의 영역을 제외한 32K X 16비트를 사용하는데 역시 액세스 시간이 20nsec인 32K X 8비트 SRAM을 2개 사용한다. 위와 같이 구성된 메모리는 신속한 액세스 시간으로 DSP가 지연 시간 없이 데이터를 읽고 쓸 수 있도록 해 준다. 각 관절제어기와 서보 드라이브 사이의 통신은 34핀 커넥터를 통하여 이루어진다. 그리고 피드백 위치 신호들을 버퍼를 통해서 신호들을 주고받는다. 속도 신호는 버퍼와 래치를 통하여 A/D 변환기와 접

속된다. A/D변환기는 출력이 12 비트이고, 변환시간은 10μs, 입력력은 -10V~+10V이다. D/A 변환기는 출력 범위가 -10V~+10V이고, 분해능이 1LSB=0.00488V이다. 이 D/A변환기의 출력은 서보 드라이브의 전류명령으로 연결되어 로봇을 구동한다.

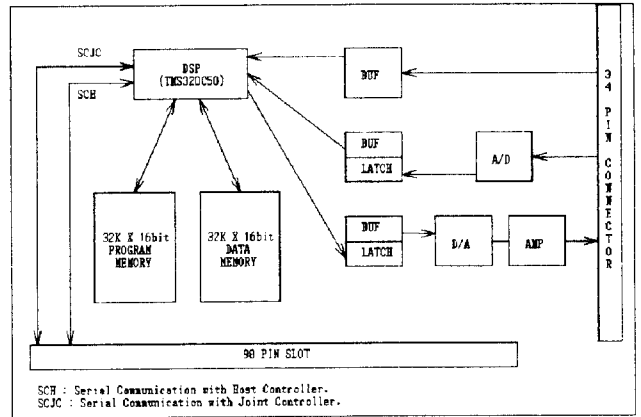


그림 4. 관절 제어기의 블록선도.
Fig. 4. The block diagram of Joint controller.

4. TMS320C50의 특징

본 연구에 사용된 메인 프로세서 TMS320C50은 40MHz 클럭(clock) 사용시 single-cycle fixed-point instruction을 매 50nsec(20MIPS)마다 수행하며 64K X 16비트의 프로그램과 데이터 영역을 각각 어드레싱할 수 있으며 64K의 I/O를 가질수 있다. 그리고 내부에는 9K X 16비트의 single-cycle 프로그램/데이터 RAM을 가지고 있으며, micro-computer mode 시 프로그램의 다운로드(down loading)을 하기위한 부트 로더(boot loader)를 포함하고 있는 2K X 16비트의 single-cycle boot ROM을 가지고 있다.

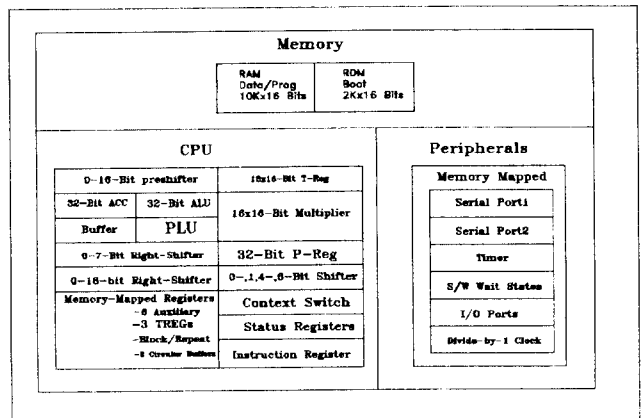


그림 5. TMS320C50의 블록선도.
Fig. 5. The block diagram of TMS320C50.

5. 성능 실험

TMS320C50으로 설계/제작된 시스템의 안정성을 확인하기 위해 제안된 적응제어알고리즘을 SCARA 로봇의 1, 2 관절에

대하여 성능 실험을 수행하였다. 성능 시험은 샘플링 타임을 1ms로 하여, 기준 궤적이 스텝이고, 미지의 외란 및 파라미터 불확실성을 고려한 상태에서 제안된 자기동조 적응제어기와 기존의 PID 제어기에 대한 위치추종 성능 실험을 수행하였다. Fig. 6~Fig. 9는 부하하중 2kg 하에서의 링크 1, 2에 대한 제안된 자기동조 적응제어기와 기존의 PID제어기의 위치추종성능을 나타낸다.

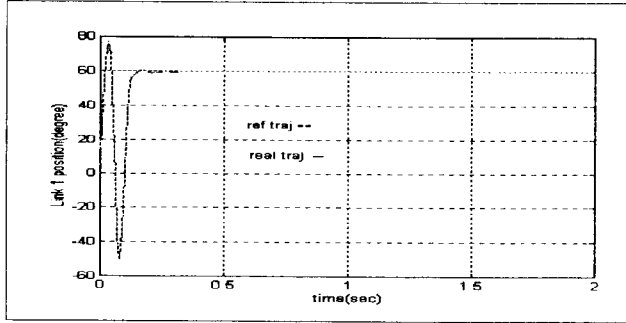


그림 6. 부하하중 2Kg에서의 1 관절에 대한 자기동조적용제어기의 위치 추종 성능.

Fig. 6. Position tracking performance of self-tuning adaptive controller for joint 1 with payload 2kg.

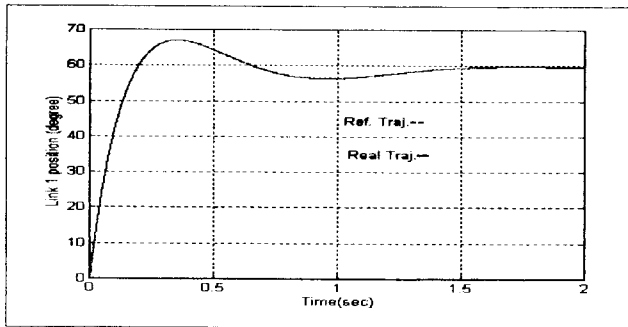


그림 7. 부하하중 2Kg에서의 1 관절에 대한 PID 제어기의 위치 추종 성능.

Fig. 7. Position tracking performance of PID controller for joint 1 with payload 2kg.

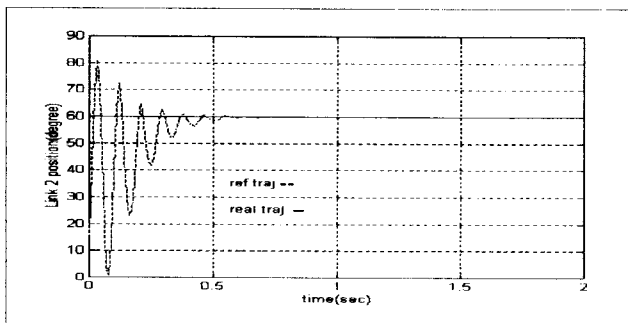


그림 8. 부하하중 2Kg에서의 2 관절에 대한 자기동조적용제어기의 위치 추종 성능.

Fig. 8. Position tracking performance of self-tuning adaptive controller for joint 2 with payload 2kg.

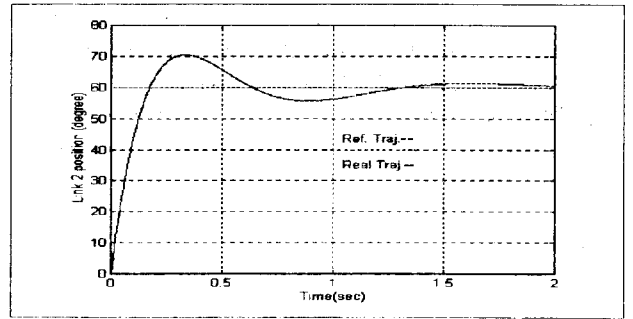


그림 9. 부하하중 2Kg에서의 1 관절에 대한 PID 제어기의 위치 추종 성능.

Fig. 9. Position tracking performance of PID controller for joint 1 with payload 2kg.

6. 결론

본 연구에서는 산업용 로봇 매니퓰레이터의 건설 실시간 제어 실험을 위하여 디지털 신호 처리기인 TMS320C50을 이용한 스카라 로봇에 대한 디지털 자기동조 적응제어기를 설계 하였다. 개발된 극배치 자기동조 적응제어기는 간접 적응제어 기법으로서 TMS320C50 칩을 이용하여 실시간 적응제어 실험을 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서 제안된 디지털 자기동조 적응제어 시스템의 성능 검증을 위해서 TI사의 XDS 510에물레이터를 연결하여 실제 관절의 위치 추종에 대한 실험을 수행한 결과 본 연구에서 설계된 제어기는 부하하중의 증가 및 제반외란에 대한 환경하에서도 견실하고 정밀한 제어성능을 나타냄을 입증할 수 있었다. 향후 연구 방향은 설계된 관절제어기를 산업현장의 범용 로봇에 적용될 수 있도록 실제 생산라인에서 발생될 수 있는 제반잡음에 대한 영향을 다양한 조건에 대한 실험을 통하여 개선하는 것이다.

참고 문헌

- [1] A.Y. Allidins, F.M. Hughes, "Generalised Self-Tuning Controller With pole assignment", *Proc. IEEE*, Vol. 127, No. 1, pp.13-18, 1980.
- [2] K.J. Astrom, B. Wittenmark, "Self-Tuning Controllers based on pole-zero placement", *Proc. IEEE*, Vol. 127, No. 3, pp. 120-130, 1980.
- [3] Irfan. Ahmed, "Disital Signal Processing Applications with the TMS320 family", *Selected Application Notes, Texas Instruments Inc.* 1991.
- [4] S. A. Bortoff, "Advanced Nonlinear Robotic Control Using Digital Signal Processing," *IEEE Trans. Indust. Elect.*, Vol. 41, No. 1, Feb. 1994.
- [5] Y.K. Choi, M.J. Chang, and Z. Bien, "An Adaptive Control Scheme for Robot Manipulators." *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. 44, No. 4, pp. 1185-1191, 1986.
- [6] G. G. Leininger, "Adaptive Control of manipulators Using Self-Tuning Methods", *Robotic Research, MIT Press*, 1984.
- [7] V. Strejic, "Least qare parameter estimation", *Automatics*, Vol. 16, pp. 535-550, 1980.
- [8] "TMS320C5X User's Guide", *Texas Instruments Inc.* 1993.