

자기동조 적응제어기법에 의한 로봇 매니퓰레이터의 강인제어 Robust Control of Robot Manipulator Using Self-Tuning Adaptive Control

배길호* (경남대 대학원), 한성현 (경남대)

G. H. Bae (Graduate School, Kyungnam Univ.), S. H. Han (Kyungnam Univ.)

ABSTRACT

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.

Key Words : Digital Signal Processor(디지털 신호처리기), Pole-Placement(극 배치), Self-Tuning Adaptive Control(자기동조 적응제어), Parameter Estimate(파라미터 추정)

1. 서론

기존의 산업용 로봇 제어방식은 로봇 매니퓰레이터의 비선형 동특성을 거의 무시한 상태에서 개개의 관절을 독립적으로 제어하는 PD 및 PID

제어방식 등의 선형시불변(linear time-invariant) 제어기법에 주로 의존하고 있다. 따라서 로봇 매니퓰레이터의 파라미터 변동이나 고속 운전시 발생하는 비선형성의 증가, 그리고 부하변동 등이 외란으로 작용하는 한 기존의 제어방식은 제어기의 견실성을 보장할 수 없다. 그러므로, 이러한 외란에 대처하면서 견실한 제어성능을 얻을 수 있는 제어기 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 작업환경의 변화 및 내부외란등의 작용시 효율적으로 대처하는 적응제어를 개발하여 기존의 로봇 매니퓰레이터 제어기의 단점을 보완 개선하고자 한다. 적응제어기법에는 크게 기준모델적응제어 (Model Reference Adaptive Control, MRAC)방법과 자기 동조 적응제어 (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)으로 추정된 모델의 파라미터와 극점 배치를 통하여 제어기의 파라미터가 갱신되는 제어기법이다.

본 연구에 제안된 적응제어 알고리즘은 기존의 고전적인 제어방법에 의한 제어 알고리즘에 비해 상당한 계산량이 요구된다.

그러므로, 적응제어의 견실 실시간 제어실현을 위하여, 실시간 고속의 계산처리가 가능하고, 디지털

탈 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 프로세스로 사용하여, 4관절에 대한 각 관절 제어기를 설계 하였다. 실험을 통해 제작된 제어기의 신뢰성을 입증하기 위해 제어 프로그램의 다운로드에는 TI사의 XDS 510에블레이더와 호스트제어기(IBM 486)를 이용하여 제안된 적응제어기법을 DSP에 다운로드(down load)시켜 실험을 수행하였다. 그리고 FARA SM5 SCARA 로봇에 대한 실험을 통하여 기존의 PID제어기 보다 우수한 추종 성능 비교를 통해 제안된 적응제어기의 견실한 제어성능을 입증하고자 한다.

2. 자기동조 적응제어기 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 외란 과정으로 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 부하외란에 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.

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

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.

$$\begin{aligned} \delta e(t) &= -a_1 \delta e(t-1) - a_2 \delta e(t-2) - \dots \\ &\quad - a_{na} \delta e(t-na) + b_0 \delta u(t-d) + b_1 \delta u(t-d-1) \\ &\quad \dots + b_{nb} \delta u(t-d-nb) + \zeta(t) \\ &= x^T \theta + \zeta(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, x 와 θ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x &= [-\delta e(t-1), -\delta e(t-2), \dots -\delta e(t-na), \\ &\quad \delta u(t-d), \delta u(t-d-1), \dots \delta u(t-d-nb)]^T \quad (7) \\ \theta &= [a_1, a_2, \dots a_{na}, b_0, b_1, \dots b_{nb}]^T \end{aligned}$$

매개변수 θ 는 순환 최소 자승법으로 다음과 같은 방법으로 추정된다.

$$\varepsilon_{i+1} = \delta e_{i+1} - x_{i+1}^T \theta_i$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + K_{i+1} \varepsilon_{i+1}$$

$$K_{i+1} = P_i x_{i+1} + [\beta + x_{i+1}^T P_i x_{i+1}]^{-1} \quad (8)$$

$$P_{i+1} = [I - K_{i+1} x_{i+1}^T] P_i / \beta$$

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

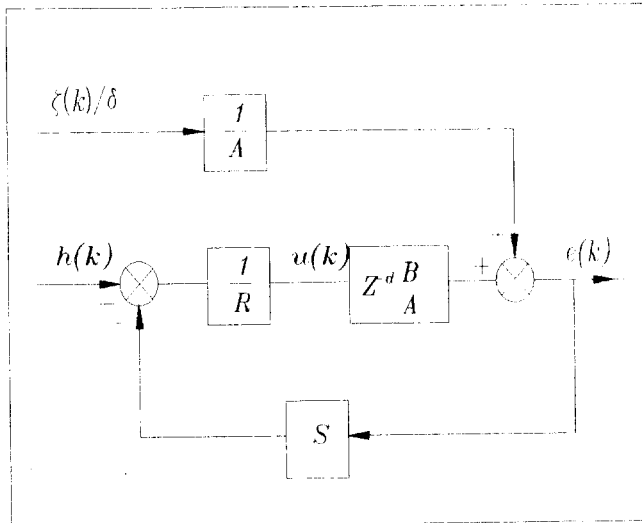


Fig. 1. Block diagram of pole-placement self-tuning control.

3. 제어 시스템(H/W)구성

3.1 전체 시스템

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

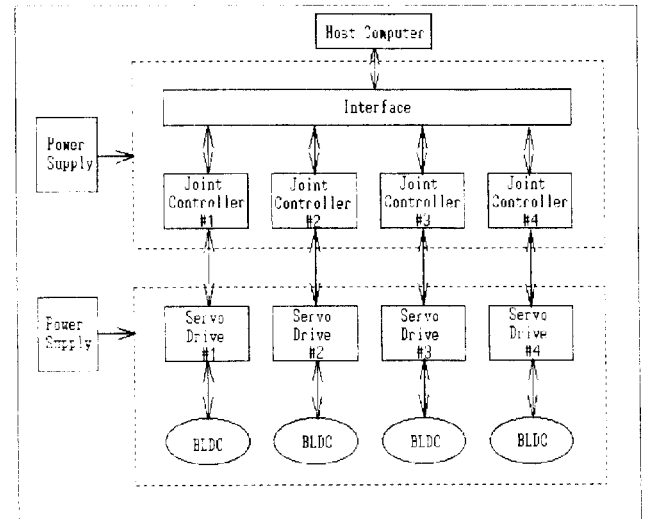


Fig. 2. Overall system block diagram.

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

single-cycle 프로그램/데이터 RAM을 가지고 있으며, micro-computer mode 시 프로그램의 다운로드(down loading)을 하기위한 부트 로더(boot loader)를 포함하고 있는 $2K \times 16$ 비트의 single-cycle boot ROM을 가지고 있다.

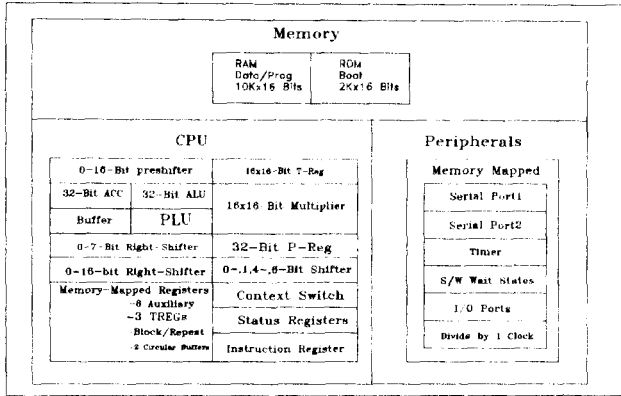


Fig. 5. The block diagram of TMS320C50.

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 위치 추종 성능 실험을 수행하였다. Fig. 6~Fig. 9는 부가하중 2kg 하에서의 링크 1, 2에 대한 제안된 자기동조 적응제어기와 기존의 PID제어기의 위치 추종성능을 나타낸다.

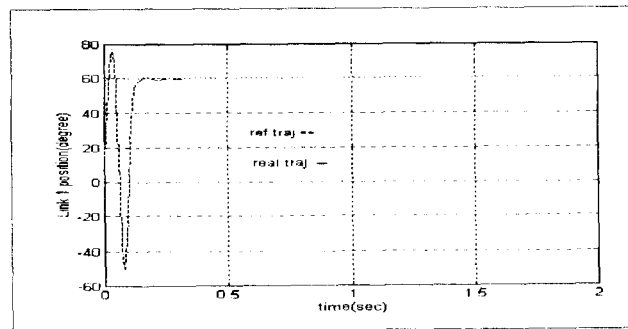


Fig. 6. Position tracking performance of self-tuning adaptive controller for joint 1 with payload 2kg.

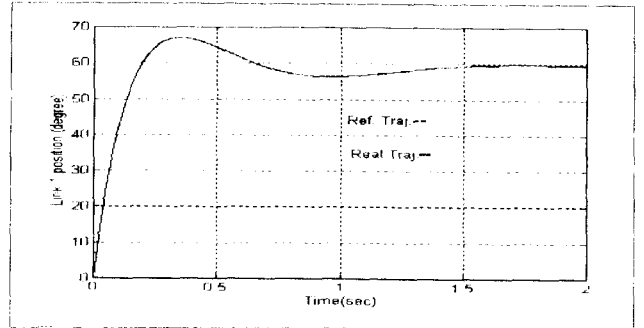


Fig. 7. Position tracking performance of PID controller for joint 1 with payload 2kg.

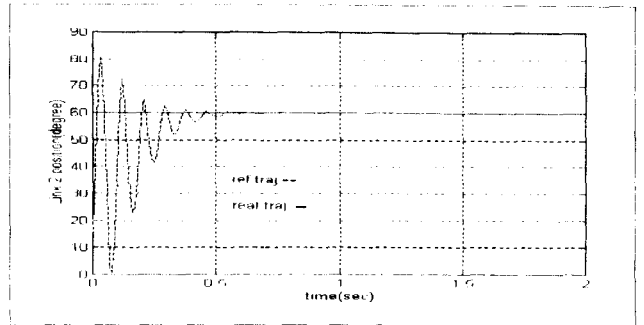


Fig. 8. Position tracking performance of self-tuning adaptive controller for joint 2 with payload 2kg.

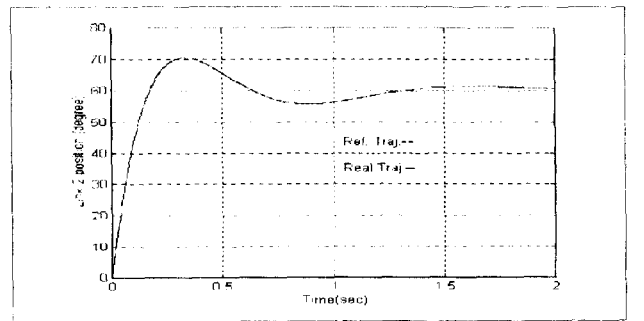


Fig. 9. Position tracking performance of PID controller for joint 1 with payload 2kg.

6. 결론

본 연구에서는 산업용 로봇 매니플레이터의 건설 실시간 제어 실현을 위하여 디지털 신호 처리 기인 TMS320C50을 이용한 스카라 로봇에 대한 디지털 자기동조 적응제어를 설계 하였다. 개발된 극배치 자기동조 적응제어기는 간접 적응제어 기법으로서 TMS320C50 칩을 이용하여 실시간 적응제어 실현을 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서 제안된 디지털 자기동조 적응제어 시스템의 성능 검증을 위해서 TI사의 XDS 510에 물레이더를 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 관절제어를 산업현장의 범용 로봇에 적용될 수 있도록 실제 생산라인에서 발생될 수 있는 제반잡음에 대한 영향을 다양한 조건에 대한 실험을 통하여 개선하는 것이다.

참 고 문 헌

- (1) A.Y. Allidins, F.M. Hughes, "Generalized 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. Strejc, "Least sqare parameter estimation", *Automatics*, Vol. 16, pp. 535-550, 1980.
- (8) "TMS320C5X User's Guide", Texas Instruments Inc. 1993.