

산업용 로봇의 정밀제어를 위한 학습제어 방법의 개발

A Development of Learning Control Method for the Accurate Control of Industrial Robot

원광호, 허경무**

* 단국대학교 공학부 전자공학전공 (Tel: 81-041-550-3594; E-mail: won-kh@hanmail.net)
 ** 단국대학교 공학부 전자공학전공 (Tel: 81-041-550-3548; Fax: 81-041-550-4548; E-mail: huhkm@anseo.dankook.ac.kr)

Abstract - We proposed a method of second-order iterative learning control with feedback, which shows an enhancement of convergence speed and robustness to the disturbances in our previous study. In this paper, we show that the proposed second-order iterative learning control algorithm with feedback is more effective and has better convergence performance than the algorithm without feedback in the case of the existence of initial condition errors.

And the convergence proof of the proposed algorithm in the case of the existence of initial condition error is given in detail, and the effectiveness of the proposed algorithm is shown by simulation results.

Key Words : Iterative Learning Control, Feedback, Robustness to Disturbances, Initial Condition, System Parameter Variation,

1. 서론

완전한 설계의 시스템이라 할지라도 실제 발생하는 여러 가지 문제들, 외란, 초기 조건 오차, 시스템 변수의 변화 등 이러한 주위 환경에 따른 확실한 극복 능력이 없다면 시스템이 정상적인 작동을 하는데 어려움이 많다. 게다가 빠르고도 복잡한 동특성을 지닌 시스템에서는 이러한 외란과 초기 오차 등의 문제로 인해 기존의 제어 기법 등으로 실시간 제어를 하기에는 복잡하고 어려운 것으로 판단되는 경우가 많이 있어 왔다. 이러한 불확실한 동적 시스템을 보다 단순하면서도 정밀하게 제어할 수 있는 방법으로서 학습 제어 방법이 많이 연구되고 있다[1,2,3].

우리가 [4]에서 제안한 바 있는 피드백 사용형 2차 반복 학습 제어 알고리즘은 외란의 제거와 시스템의 안정화를 위하여 피드백 루프가 제어 시스템에 필요하다는 사실을 고려할 때 학습제어에 피드백 항을 추가함으로써 수렴 성능과 외란에 대한 강인성을 향상시키는 좋은 결과를 낼 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 피드백 사용형 2차 반복 학습제어 방법이 앞에서 말한 성능의 향상, 즉 수렴 성능의 향상과 외란에 대한 강인성 향상에 덧붙여 학습제어의 피드백 항을 이용함으로써 초기 조건 오차가 있음에도 불구하고 이를 극복할 뿐만 아니라 기존의 알고리즘보다 더 빠른 수렴 능력이 있음을 확인한다. 또한 불안정한 결과를 낳는 높은 학습 제어 게인의 경우에도 피드백 항을 추가한 본 학습제어 방법에 의해 안정화됨으로써, 빠른 응답 특성과 강인성 향상을 가져올 수 있음을 보인다. 그리고 본 알고리즘을 선형 시변 연속 시스템이 적용된 모델 시스템을 설계하여 이를 통한 시뮬레이션 결과로서 초기 조건 오차의 극복 능력이 뛰어난 것을 확인하고 시스템의 안정화와 강인성 향상에 기여함을 확인할 수 있었다.

본문에서 사용되는 벡터 노름(vector norm)과 매트릭스 노름(matrix norm), 그리고 lambda 노름의 정의는 다음과 같다.

$$f = (f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(r)}) \text{ 일 때}$$

$$\|f\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq r} |f^{(i)}| \quad (1)$$

$$G = (g^{(i)}) \text{ 일 때}$$

$$\|G\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq r} \left\{ \sum_{j=1}^r |g^{(ij)}| \right\} \quad (2)$$

$$h: [0, T] \rightarrow R^n \text{ 일 때}$$

$$\|h(\cdot)\|_1 \triangleq \sup_{t \in [0, T]} e^{-\mu t} \|h(t)\|_{\infty} \quad (3)$$

2. 피드백 사용형 2차 반복 학습제어 알고리즘

다음과 같은 선형 시변 연속 시스템(Linear Time-Varying Continuous System)을 대상으로 하자.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(0) = x^0$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (4)$$

여기서 x 는 $(nx1)$ 의 상태벡터이고 u 는 $(px1)$ 의 제어벡터이며 y 는 $(mx1)$ 의 출력벡터이다. 그리고 $A(t), B(t), C(t), D(t)$ 는 각기 적절한 디멘션을 갖는 행렬함수로서, 모두 미지의 파라미터를 포함하는 연속함수들이다.

우리가 성취하고자 하는 목표 출력 경로를 $y_d(t), 0 \leq t \leq T$ 라고 하고, 허용오차 범위를 $\epsilon^* > 0$ 이라 하자. 이 때 우리의 목적은 시스템 파라미터 $A(t), B(t), C(t), D(t)$ 의 값을 정확히 알지 못하는 상태에서, 선형 시변 연속 시스템 (4)의 출력 $y(t)$ 가 다음 식 (5)와 같은 조건을 만족시키도록 하는 제어 입력 $u(t), 0 \leq t \leq T$ 를 구해내는 것이다.

$$E(y(t)) = \|y_d(t) - y(t)\| \leq \epsilon^*, \quad 0 \leq t \leq T \quad (5)$$

여기서 시스템에 대한 동특성을 정확히 알지 못하는 상태이기 때문에, 우리가 생각하는 경로추적 문제는 간단히 해결되기가 어렵다. 그래서 그것을 해결하기 위한 방법으로서 다음과 같은 피드백 사용형 2차 반복 학습제어 알고리즘을 제안하였다.

$$u_{k+1}(t) = P_1 u_k(t) + P_2 u_{k-1}(t) + Q_1 e_k(t) + Q_2 e_{k-1}(t) + R e_{k+1}(t) \quad (6)$$