

반복 학습 알고리즘을 이용한 산업용 로봇의 제어

하태준[†]·연제성*·박종현*·손승우**·이상훈**

Iterative Learning Control for Industrial Robot Manipulators

Tae-Jun Ha, Je Sung Yeon, Jong Hyeon Park, Seung-Woo Son and Sang-Hun Lee

Key Words: Iterative Learning Control(반복학습제어), Tracking Control(궤적 추종 제어), Industrial Robot Manipulator(산업용 로봇 매니퓰레이터)

Abstract

Uncertain dynamic parameters and joint flexibility have been problem to control robot manipulator precisely. Hence, even if the controller tracks the desired trajectory well with the feedback of the motor encoders, it is hard to achieve the desired behavior at the end-effector. In this paper, robot trajectory is taught by a general heuristic iterative learning control (ILC) algorithm in order to reduce tracking error of the tool center point (TCP) and the results of tracking with 6 DOF industrial robot manipulator are presented. The performance is verified based on ISO 9283.

1. 서 론

산업용 로봇에 대한 연구는 로봇 공학의 역사만큼이나 오래되었으며 또한 오랜 역사만큼이나 다양한 연구가 진행되었다. 제어분야만 보더라도 PID 제어, 강인제어, 적응제어뿐만 아니라 지능제어까지 산업용 로봇을 대상으로 연구되었다 [1, 2, 3]. 하지만 실제 산업현장에서 사용되고 있는 제어방법으로는 PID제어가 대부분이며 진동을 해결하기 위한 제진제어기 그리고 일부 힘 제어가 적용되고 있다. 그 이유는 복잡한 제어기는 많은 계산 시간 및 경제적인 이유로 현장에서 사용할 수 없기 때문이다. 또한 일정한 조건을 만족하는 실험실에서만 가능한 연구도 많이 있다.

산업용 로봇의 제어 시스템은 고사양의 CPU를 탑재하지 않는다. 또한 로봇의 센서는 모터의 위치 값을 얻을 수 있는 엔코더 그리고 일부 외계 센서가 전부이다. 로봇의 하드웨어는 초정밀 가공이 되지 않았기 때문에 로봇 링크의 길이, 질량 및 관성, 조인트 강성, 마찰력 그리고 로봇 축의 기울기까지 정확하다고 볼 수 없다. 그렇기 때문에 주어진 궤적 정보를 조인트가 정확하게 추종할 지라도 로봇 끝단의 위치는 우리가 원하는 위치에 도달하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하는 방식으로는 로봇의 정확하지 못한 파라미터를 추종하기 위한 적응제어가 개발되었으며, 조인트 강성 및 불규칙한 외란에 대해 강인성을 갖도록 강인제어기가 개발되었다 [4, 5, 6]. 하지만 이러한 고급제어기들은 앞서 언급한 바와 같이 실 산업용 로봇에 적용하기에 계산시간이 너무 오래 걸리며 또한 추가적인 센서를 달고 고성능 CPU를 장착해야 하는 등 경제적으로도 부적합하다.

산업용 로봇은 대부분 일정한 작업을 반복한다. 그렇기 때문에 매번 같은 조건에서 일을 시작하고 또한 같은 오차를 발생시킨다. 이러한 조

† 한양대학교 기계공학과 대학원
E-mail : taejuny@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2297-3786 FAX : (02)2297-3786

* 한양대학교 기계공학과

** 현대중공업 기계전기연구소

건은 반복학습제어(ILC, Iteration Learning Control)를 적용하기에 적합한 조건이다. 반복학습제어란 말 그대로 반복적인 작업에서 전번의 오차를 다음번의 제어에 이용하는 방식으로 로봇의 제어 입력 값을 변경하든지 아니면 추종궤적을 변경하는 방식이 있다. 반복 학습 제어는 1967년 개발되어 다양한 분야에 다양한 연구가 진행되었다. 다양한 외계센서에 따른 궤적 추종 성능 향상 알고리즘, 파라미터 불확실에 따른 적응성을 높인 적응 반복 학습 제어 알고리즘 그리고 외란 및 초기조건에의 차이에서 발생하는 강인 반복 학습 제어 알고리즘 등이 연구되었다 [7, 8, 9]. 하지만 이러한 연구가 이론적으로 다양하게 개발되었지만 실제 로봇에는 기초적인 이론만이 적용되었다 [10, 11].

본 논문에서는 실제 로봇에의 적용성을 높이기 위해 제어기 변경 없이 반복학습제어 알고리즘을 이용하여 로봇의 추종 궤적을 변경하고 로봇 끝단의 궤적 추종 오차를 향상시킨다. 로봇 끝단의 위치정보를 얻기 위해서는 외계센서를 이용하였으며 이를 로봇 하단 3자유도의 궤적을 변경하는데 이용하였다. 그리고 6자유도 산업용 로봇을 이용하여 제어 알고리즘의 성능을 확인하였다. 2장에서는 Heuristic Method를 이용한 반복 학습제어를 설계하고, 3장에서는 외계센서에 의해 얻어진 정보를 바탕으로 로봇 하단 3자유도 궤적을 변경하는 역기구학, 그리고 4장에서는 산업용 로봇에서의 실험, 그리고 4장에서는 이를 정리한다.

2. 반복 학습 제어

파라미터의 불확실 성 및 조인트 강성에 의한 로봇 끝단의 궤적 추종 오차를 줄이기 위해 본 논문에서는 반복 학습 제어를 이용한 궤적 정보를 수정하게 된다. 반복학습제어란 반복된 일련의 작업에서 전번실행에서 발생한 오차를 다음번의 제어를 위해 이용하는 방식으로 여러 번의 반복된 학습제어에 의해 원하는 오차를 매우 작은 범위까지 줄일 수 있는 제어방식이다. 그림은 반복학습 제어의 원리를 설명하고 있다. 제어 횟수가 반복될수록 제어 궤적은 오차가 감소하는 쪽으로 업데이트 된다. 결과적으로 제어기 변환 없이 만족하는 궤적오차 범위를 만족하는 제어 궤적을 얻게 된다.

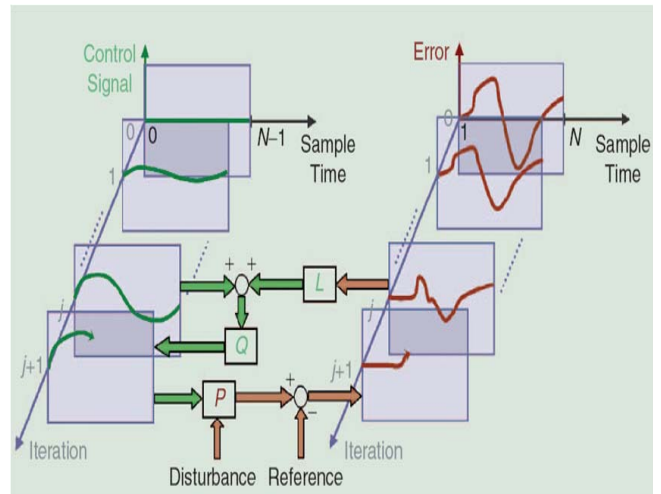


Fig. 1 Iterative Learning Control [12]

반복학습제어를 구조적으로 분류하면 크게 제어입력을 학습하는 방식과 추종궤적을 학습하는 방식이 있다. 본 논문에서는 제어기 자체의 변화 없이 제어 성능을 향상시키기 위해 후자의 제어 방식을 이용하게 된다. 본 논문에서는 Heuristic ILC를 이용한 6축 로봇의 제어로 로봇 추종 궤적이 매회 제어가 거듭 될수록 다음과 같이 변환된다.

$$\mu_{k+1}^{REF} = Q(\mu_k^{REF} + Le_k)$$

여기서 L 은 학습 계인으로 0과 1사이의 값이며 또한 시간 지연을 하게 되며, Q 는 butterworth filter로 외란을 제거하게 된다. 그리고 e_k 는 궤적 오차로 로봇 끝단의 궤적과 외계센서에 의해 측정된 실제 로봇의 위치의 차이이다. 식 1에서 μ_k^{REF} 는 k 번째 학습을 통해 얻어진 추가되는 궤적 변환 값이다. 결과적으로 $k+1$ 번째 궤적 정보(y_{k+1}^{REF})는 다음과 같이 된다.

$$y_{k+1}^{REF} = y_d + \mu_k^{REF}$$

결국 실 제어기(PID)에 사용하는 예러는 변경된 궤적과 실제 엔코더에 의해 얻어진 조인트 위치 값이 된다.

외계센서에 의해 얻어진 정보를 이용한 학습 제어 알고리즘을 블럭다이어그램으로 표현하면 다음과 같다.

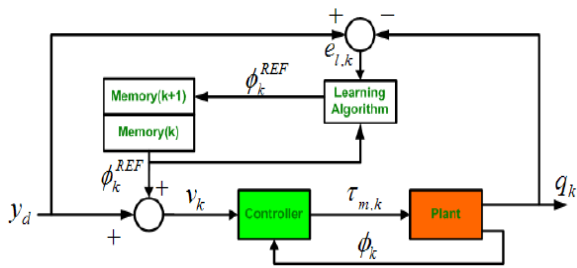


Fig. 2 Block Diagram of ILC

3. 역기구학

파라미터의 불확실성 및 조인트 강성에 의해 로봇을 정밀하게 주어진 궤적에 대해 제어하였을 때 로봇 끝단의 위치는 원하는 위치로 가지 못하는 경우가 대부분이다. 그러한 이유로 외계센서로부터 얻은 로봇 끝단의 위치 정보를 이용하여 역기구학을 통해 기존의 조인트별 궤적을 변경하게 된다. 본 논문에서 사용한 외계센서는 다음 Fig.3과 같은 Dynalog사의 *CompuGauge™*를 사용하였다.



Fig. 3 HA006 and External Sensor



Fig. 4 Sensor Attachment Part

외계 센서로부터 샘플링 주기 1000Hz 미만의 로봇 끝단의 위치 정보를 얻게 된다. 하지만 위치 정보만으로 일반적인 기구학적 해석 방식으로는 역기구학을 해석할 수 없다. 그러한 이유로 본 논문에서는 로봇 끝단의 오차를 마지막 피치 방향의 회전 중심점의 오차로 변환하여 문제를 해결하였다. 비록 변형된 로봇의 하단 3개의 조인트로 인해 로봇 끝단의 방향벡터가 원하는 방향과 다를 수 있지만 로봇 끝단의 위치 오차가 작다면 그 변화도 작기 때문에 그로인한 방향벡터의 변화는 적을 것으로 예상된다.

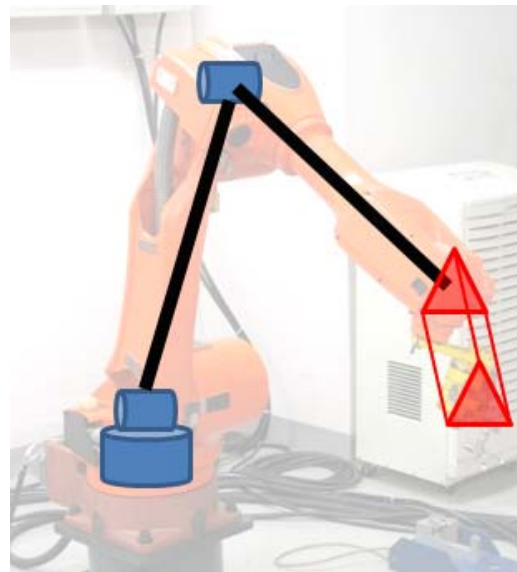


Fig. 5 HA006 and External Sensor

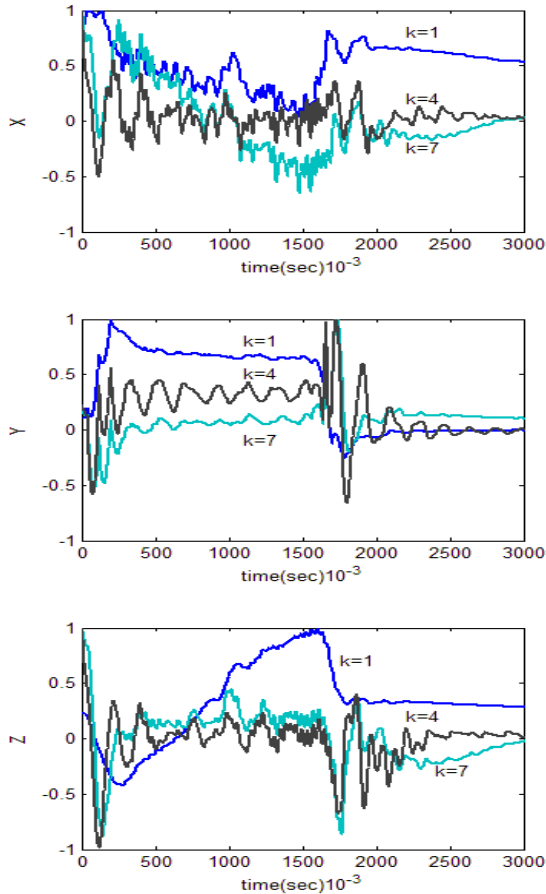


Fig. 6 Position Error of End-effector

4. 실험

반복 학습제어의 의해 얻어진 궤적 정보 변환 값을 적용한 알고리즘을 증명하기 위해 현대 중공업의 HA006을 이용한 실험을 실시하였다. 외계 센서로부터 얻은 로봇의 위치벡터와 실제 궤적과의 차이를 이용하여 로봇 각 조인트의 궤적 변환 값을 구하였고 이를 이용하여 PID 제어를 실시하였다. 제어기 성능을 평가하기 위한 궤적은 지면과 평행한 횡단궤적이다. 로봇의 속도는 등속구간이 1000mm/sec의 속도이다. 사용한 학습계인 (L)은 0.5이며 시간 지연은 사용하지 않았다. Q 는 60Hz에 대한 butterworth filter를 설계하였다.

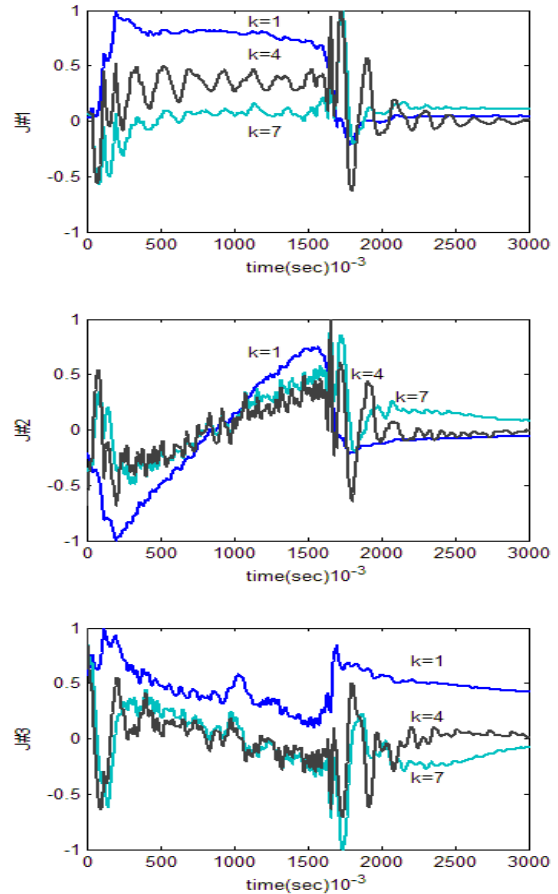


Fig. 7 1,2,3 Link-side Error

Fig. 6은 로봇 끝단의 위치 오차를 보여주고 있다. 궤적 오차가 반복학습의 횟수에 따라 끝단의 오차가 감소하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 정상상태 오차도 0으로 수렴하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

조인트 별 오차의 경우도 반복 학습의 횟수에 대하여 점점 에러가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 1, 3번 조인트의 경우는 에러가 감소했다 증가했다 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 로봇 끝단의 오차가 역기구학을 구하는데 과정에서 각 조인트 오차로 인가 되기 때문이다. 하지만 반복 횟수가 증가하면 결과적으로 작은 조인트 오차로 수렴함을 확인할 수 있다.

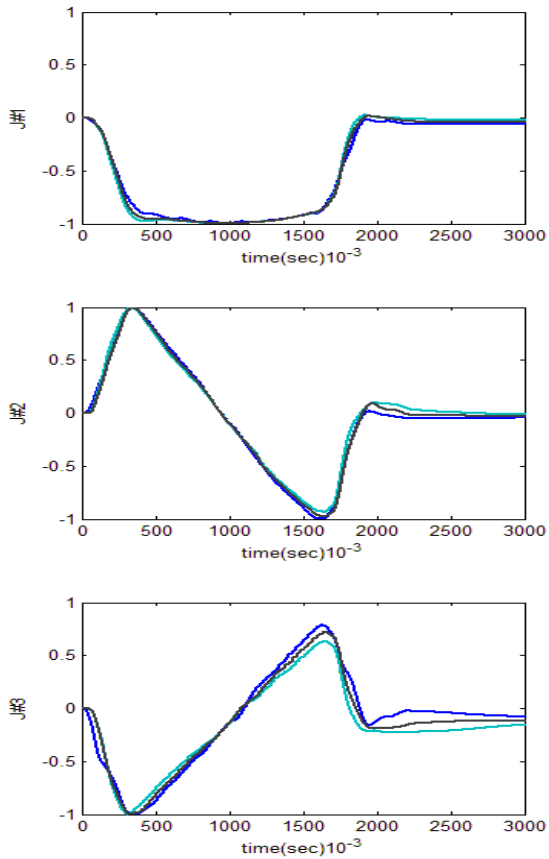


Fig. 8 1,2,3 Motor-side Error

Fig. 8은 실제 모터 축의 원래 추종 궤적에 대한 오차로 실험을 반복할수록 임의의 값으로 수렴하고 있는 것을 확인할 수 있다.

ISO 9283 에러 측정법에 의한 궤적 추종 오차의 편차를 Fig. 9와 Fig. 10에서 보여주고 있다. Fig. 9는 로봇 진행방향에 대해 수직한 평면으로의 평균편차이며, Fig. 10은 최대 편차를 보여주고 있다. 결과적으로 반복학습제어를 거듭할수록 평균 편차 및 최대편차가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 최대편차의 경우는 3회 학습 후 일정한 값에서 편차의 크기가 머물고 있는데 그 이유는 변형된 궤적의 업데이트 데이터가 끝나는 부분에서 불연속이 발생하기 때문에 이러나는 현상이다. 6축 시리얼 로봇을 대상으로 한 학습 제어 알고리즘의 적용결과 오차 편차의 감소율이 전 오차 대비 1/2 정도로 오차 감소율이 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

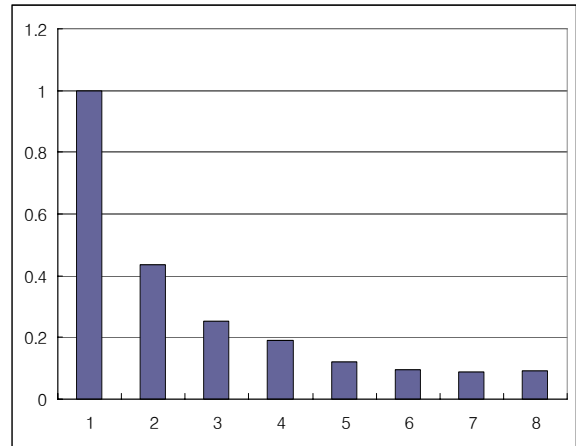


Fig. 9 Error Average Deviation

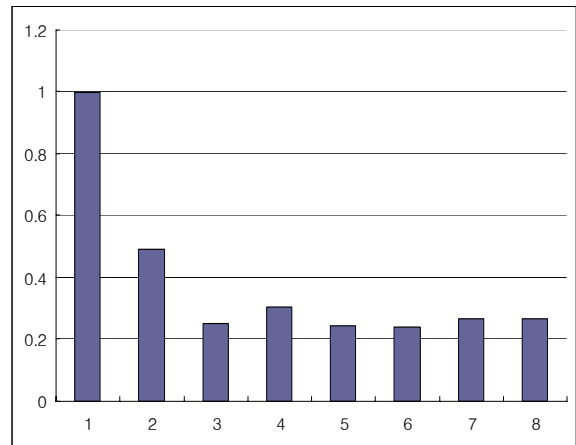


Fig. 10 Error Maximum Deviation

5. 결론

산업용 로봇의 정밀한 제어를 하기 위해서는 좋은 제어기가 필요하다. 하지만 제어기의 교체 없이 로봇의 파라미터 및 강성에 의한 로봇의 추종오차를 본 논문에서는 외계센서로부터 얻은 로봇 끝단의 정보를 이용하여 반복 학습 제어 알고리즘으로 궤적을 변경함으로써 얻을 수 있었다. 학습 횟수가 증가할수록 로봇이 끝단 정밀도는 크게 증가하였다. 본 논문에서는 외계센서를 통해 얻어진 정보를 조인트 궤적의 변환 값으로 변경하는데 있어 위치 오차로의 환산만을 하였다. 앞으로는 적은 외계센서 데이터 개수로부터 로봇 끝단의 회전 오차까지 줄일 것인가에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) T.-J. Ha, J. Lee and J. H. Park, 2007, "Robust Control by Inverse Optimal PID Approach for Flexible Joint Robot Manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 336-341.
- (2) M. kritic, I. Kanelleakopoulos, and P. Kokotovic, 1995, "Nonlinear and Adaptive Control Design," *Wiley-Interscience Publication*.
- (3) J.-J. E. Slotine, and W. Li, 1987, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators." *The International Journal of Robotics and Research*. Vol. 6, No. 3, pp. 49-59.
- (4) J.-G. Yim, J. S. Yeon, and J. H. Park, 2007, "Robust Control using Recursive Design Method for Flexible Joint Robot Manipulator," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3805-3810.
- (5) Z. Qu and D. M. Dawson, 1996, "Robust Tracking Control of Robot Manipulators," *IEEE Press*.
- (6) J. Lee, J. S. Yeon, J. H. Park, S. Lee, 2007, "Robust Back-Stepping Control for Flexible Joint Robot Manipulators," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. pp. 183-188.
- (7) S. Liuzzo, R. Marino and P. Tomei, 2007, "Adaptive Learning Control of Linear Systems by Output Error Feedback," *Automatica*, Vol. 43, pp. 669-676.
- (8) A. Tayebi, 2008, "Model Reference Adaptive Iterative Learning Control for Linear Systems," *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, pp. 475-489.
- (9) H.-S. Ahn, K. L. Moore and Y. Chen, 2007, "Iterative Learning Control: Robustness and Monotonic Convergence for Interval Systems," *Springer*.
- (10) M. Norrlöf and S. Gunnarsson, 2002, "Experimental Comparison of Some Classical Iterative Learning Control Algorithms," *IEEE Tr. on Automation and Control*, Vol. 18, pp.636-641.
- (11) J. Wallén, M. Norrlöf and S. Gunnarsson, 2007, "Experimental Evaluation of ILC Applied to a Six Degrees-of-freedom Industrial Robot," *Proc. European Control Conf.*
- (12) D. A. Bristow, M. Tharayil, and A. G. Alleyne, 2006, "A Survey of Iterative Learning Control," *IEEE Control systems Magazine*. pp. 96-114