

산업용 머니플레이터를 위한 여러 제어 알고리즘의 구현과 비교

○ 유 동상, 신 유식, 정 명진, 변증남
한국과학기술원 전기 및 전자과

Implementation and Comparison of Various Control Algorithms for Industrial Manipulators

D.S. Yoo, Y.S. Shin, M.J. Chung, and Z. Bien
Department of Electrical Engineering, KAIST

Abstract

Recently various control algorithms for industrial manipulators have been proposed. However, computation time, modelling error, and torque type controller design have prevented real-time implementation. As the result, most of performance evaluations of control algorithms have been carried out only by computer simulations.

In this paper, we explore real-time implementation to show the feasibility and effectiveness of such algorithms. Experimental results indicate that computed torque method and learning control algorithms can be effectively applied to control industrial manipulators.

1. 서론

아크 용접이나 절단등의 반복적인 작업을 위해 로봇 머니플레이터는 가능한한 주어진 연속 경로를 근접하게 추적할 수 있어야 한다. 그러나, 로봇 머니플레이터의 기계적 특성인 비선형성, 링크간의 커플링 효과등에 의해 일반적인 제어 알고리즘으로는 고속 정밀 제어 어렵다.^[1] 이런 어려움을 극복하기 위해 로봇 머니플레이터의 동적 특성을 이용한 제어 알고리즘들이 제안되었다.^{[2][3]} 그러나, 실제 응용에 있어 Backlash, 마찰력, 그리고 nonrigidity와 같은 알려지지 않은 변수들로 인해 정확한 동적 모델을 얻을 수 없고 로봇 머니플레이터의 자유도가 증가함에 따라 계산 시간의 증가도 실시간 구현을 어렵게 하고 있다. 따라서 대부분의 동적 제어 알고리즘들의 성능은 단지 컴퓨터 모사에 의해 증명되어 왔다.^{[4][5]}

이 논문에서는, 여러 동적 제어 알고리즘들의 실현 가능성과 효과등을 실시간 구현을 통해 타진하였다. 이를 위해 Lagrangian Mechanism을 이용한 로봇 머니플레이터의 동적 특성 방정식을 유도하였고, 이를 다시 구동기 축으로 변환하여 최종적으로 구동기의 동적 특성 방정식에 첨가되었다.

2. 다이내믹스

로봇 머니플레이터의 각 축들이 PM DC 서보 모터에 의해 구동되고 모터의 토크가 그림 1)과 같은 히스테리시스형 전류 제어기에 의해 제어된다고 하면, 전류 제어기와 모터의 전체적인 전달 함수는 그림 2-a)와 같게 되며, 전류 제어기는 빠른 다이내믹스와 큰 이득(gain)을 가지고 있으므로 전달 함수는 그림 2-b)와 같이 간략화 된다.

따라서, 머니플레이터와 구동기의 다이내믹스는 최종적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I = K_T^{-1} \{ J\ddot{q} + NH(q, \dot{q}) + NG(q) + F_C(\dot{q}) \}$$

여기서

$$J = J_m N^{-1} + ND(q), \quad B = B_m N^{-1} + NV$$

$$F_C(\dot{q}) = F_{C_m}(N^{-1}\dot{q}) + NF_{C_r}(\dot{q})$$

는 각각 전체 시스템의 관성 모멘트, 점성 마찰 계수, 그리고 풀름 마찰을 나타내는 $n \times n$ 대칭행렬 행렬이다. K_T 는 $n \times n$ 토크 상수 행렬이며, N 는 $n \times n$ 기어비 행렬이며, I 는 구동기에 인가되는 $n \times 1$ 전류 벡터이다.

이 논문에서는, 동적 제어 알고리즘을 구현하기 위해 스카라형 로봇의 처음 두 축을 사용하였다. 스카라형 로봇의 두 축은 수평관절이므로 중력에 의한 토크는 생략된다. 일반적 B, F_C 는 다이내믹스로 부터 쉽게 구할 수 없기 때문에 간단한 실험을 통해 구하였다. 스카라형 로봇의 동적 모델의 각 파라미터 값은 표 1에서 보았다.

3. 하드웨어 구조 및 구현

로봇 머니플레이터의 제어 목적은 머니플레이터의 동적 응답이 미리 정한 시스템의 성능과 목표에 부합되도록 유지하는 것이다. 이를 위해 로봇 머니플레이터를 위한 많은 제어 알고리즘들이 제안되었다.^{[2]-[9]} 이 논문에서는 다이내믹스에 대한 정보가 각각 다른 세 가지 제어 알고리즘에 대해 스카라형 로봇을 이용하여 구현하였다.

즉, 일반적인 PID 제어 알고리즘^[2], computed torque 방법^[3], 그리고 반복 학습 제어 알고리즘^[8]이 구현되었다.

그림 3)은 동적 제어 알고리즘을 구현하기 위한 하드웨어의 전체 구조를 보여주는 것으로 각각의 기능은 다음과 같다.

주 컴퓨터는 제어 알고리즘을 개발하고 이 알고리즘의 실행 프로그램을 공유 메모리로 loading하기 위해 사용된다. 주 컴퓨터로는 CPU가 MC68000이며 UNIX/OS를 가진 16-bit 수퍼 마이크로 컴퓨터(SSM-16)가 이용되었다. 공유 메모리 용량은 256kbyte로 VME-bus를 통해 access되는 실행 프로그램과 입출력 데이터를 저장하고 서보 컴퓨터로는 연산 전용 MC68881을 내장한 MVME 110-1 모듈이 사용되어 원하는 궤적과 제어 입력을 계산하며, 모터 토오크를 제어하고 전자 전류를 제한할 수 있는 히스테리시스형 전류 제이기가 모터 제이기로써 사용되었다.

디지털 서보 팩은 폐환회로(feedback circuit), D/A 변환회로(D/A conversion circuit), 그리고 긴급상황 체크회로(emergency check circuit)으로 구성되어 있다. 먼저 폐환회로는 모터의 위치와 운동 방향을 체크하기 위해 엔코더로부터 발생하는 펄스를 카운팅한다. D/A 변환회로에서는 서보 컴퓨터에 의해 계산된 제어 입력을 아날로그 신호로 변환하여 모터 제이기에 인가한다. 마지막으로 긴급상황 체크회로에서는 작업수행중에 발생하는 머니플레이터의 과속이나, 모터 제이기의 과전류, 과열등을 체크하여 서보 컴퓨터에 전달함으로써 위험에 대처할 수 있도록 한다.

4. 실험 결과

각 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 원하는 운동을 직교좌표계에서의 원운동으로 설정하였다. 이는 방향전환시 물통 마찰의 영향과 출발과 정지시 다이내믹스에서 큰 부분을 차지하게 되는 관성 모멘트의 영향을 관찰할 수 있는 장점이 있다. 축 좌표계에서의 제어를 위해 직교좌표계에서의 원의 궤적은 축 변수인 q_d, \dot{q}_d 와 \ddot{q}_d 로 변환되었다. 원운동에 사용된 파라미터는 직교좌표계에서 반지름이 100 mm, 속도는 100 mm/sec, 200 mm/sec와 300 mm/sec이며, 샘플링 시간은 15 msec이다.

먼저, 일반적인 PID 방법과 computed torque 방법에 의한 실험 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 PID gain은 $K_V = \text{diag}[11, 20.5]$, $K_P = \text{diag}[41, 82]$, $K_I = \text{diag}[70, 110]$ 이며, computed torque 방법에서는 $K_P = \text{diag}[850, 1200]$, $K_V = \text{diag}[58.3, 69.3]$ 이다.

그림 4)는 직교좌표계에서의 원의 속도가 100 mm/sec일 때의 축 앵글 궤적의 위치 오차를 보여주는 것으로 computed torque 방법을 사용했을 때의 각 축 위치 오차가 PID 방법보다는 적게 나타나고 있다. 원의 속도를

증가했을 때도 유사한 결과를 얻어, 이런 결과로부터 computed torque 방법이 PID 제어보다는 뛰어난 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

다음으로는 반복 학습 제어 알고리즘에 대한 성능 평가를 수행하였다. 모델 알고리즘 학습 제어 방법^[9]에서는 상수 행렬 $S = \text{diag}[0.95, 0.9, 0.95, 0.9]$ 이고, Betterment process^[8]의 제어 이득은 $K_P = \text{diag}[13, 17]$, $K_V = \text{diag}[6.5, 8.5]$, $\phi = \text{diag}[1, 3]$ 이다.

전자의 경우 그림 5)에서 볼 수 있듯이 머니플레이터의 운동이 반복 횟수가 증가함에 따라 빠른 수렴속도를 가지고 원하는 궤적에 접근해 감을 볼 수 있다. 속도가 200 mm/sec, 300 mm/sec로 증가했을 때의 결과에서도 수렴속도는 거의 비슷하게 나타났다. 한편 후자의 경우에서도 전자보다는 수렴속도가 다소 떨어지지만 그림 6)에서 보는 것과 같이 로봇의 운동이 원하는 궤적으로 수렴해 간다.

5. 결론

실험 결과를 통해서 로봇트 머니플레이터의 동적 특성을 이용한 computed torque 방법이 일반적인 PID 제어 방법보다는 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인했으며, 정확한 동적 모델링을 얻을 수 없는 어려움을 극복하기 위해 제안된 반복 학습 제어 알고리즘들이 반복횟수를 증가함에 따라 원하는 연속 경로를 추적해 감을 보임으로써 산업 현장에서도 응용할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] M. Vukobratovic, and D. Stokic, "Is dynamic control needed in robotic systems, and, if so, to what extent?," Int. J. of Robotics Res., vol. 2, no. 2, pp. 18-34, Summer 1983
- [2] J. Y. S. Luh, "Conventional controller design for industrial robots - a tutorial," IEEE Trans. on SMC, vol. SMC-13, no. 3, May 1983
- [3] J. J. Craig, Introduction to Robotics : mechanics and Control, Addison-Wesley Publishing Co., 1986
- [4] C. S. G. Lee, R. C. Gonzalez, and K. S. Fu, Tutorial on Robotics, IEEE Computer Society Press, 1984
- [5] Chang-huan Liu, "A comparison controller design and simulation for an industrial manipulator," IEEE Trans. on IE, vol. IE-33, no. 1, pp. 59-65, Feb. 1986
- [6] K. P. Valavanis, N. B. Leahy, and G. N. Saridis, "Real-time evaluation of control methods," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, Missouri, pp. 644-649, 1985

- [7] H. Hashimoto, K. Maruyama, and F. Harashima, "A microprocessor-based robot manipulator control with sliding mode," IEEE Trans. on IE, vol. IE-34, no. 1, pp. 11-18, Feb. 1987
- [8] S. Hawamura, F. Miyazaki, and S. Arimoto, "Iterative learning control for robotic systems," IEEE-IECON '84, Tokyo, Japan, pp. 393-398, 1984
- [9] 오 상록, "로봇트 매니플레이터를 위한 반복학습제어 방법 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1987
- [10] 유 등상, "스카라형 로봇트를 이용한 다이내미 제어 방법 구현," 석사학위논문, 한국과학기술원, 1987

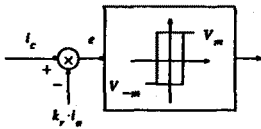
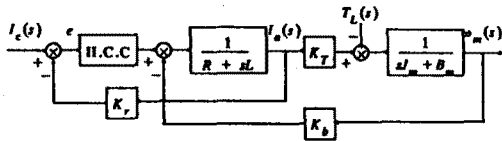
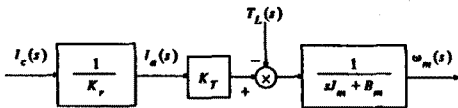


그림 1. 히스테리시스형 전류 제어기의 블록선도



a. 완전한 블록선도



b. 간략화된 블록선도

그림 2. 모터와 제어기의 블록선도

Item	Link1	Link2
K_r (kg·cm/A)	1.21	0.584
N	1/157	1/120
J (kg·cm/sec ²)	$J_{11}=0.324+0.022 \cdot c_{\theta_2}$ $J_{12}=0.005+0.011 \cdot c_{\theta_2}$	$J_{21}=0.006+0.014 \cdot c_{\theta_2}$ $J_{22}=0.025 \cdot c_{\theta_2}$
B (kg·cm/sec)	3.0	1.5
$H(q, \dot{q})$ (kg·cm)	$-(3.473 \cdot s_{\theta_2} \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 + 1.737 \cdot s_{\theta_2} \cdot \dot{\theta}_2^2)$	$1.736 \cdot s_{\theta_2} \cdot \dot{\theta}_1^2$
F_c (kg·cm)	0.85	0.55

$c_{\theta_2} = \cos\theta_2$ $s_{\theta_2} = \sin\theta_2$

표 1. 스카라형 로봇트의 파라미터 값

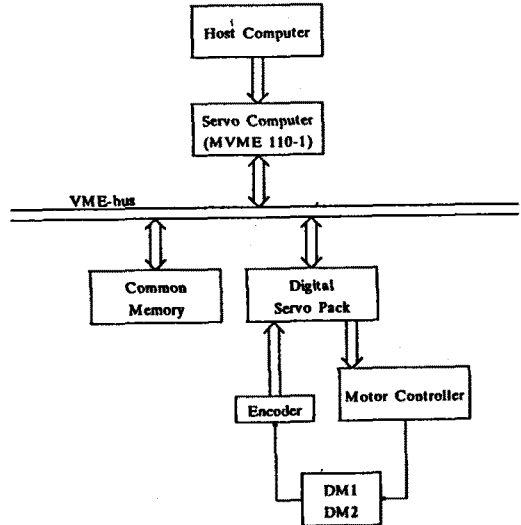


그림 3. 전체 시스템의 구성도

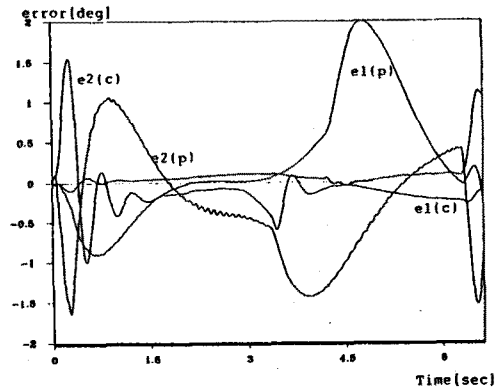
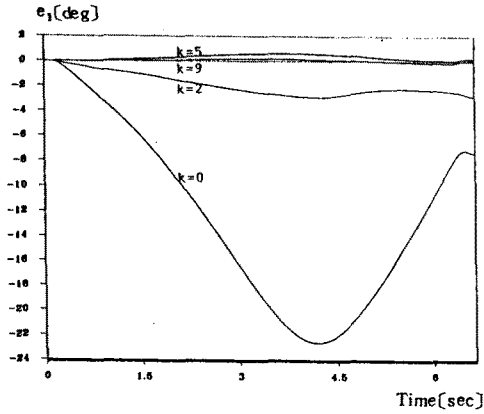
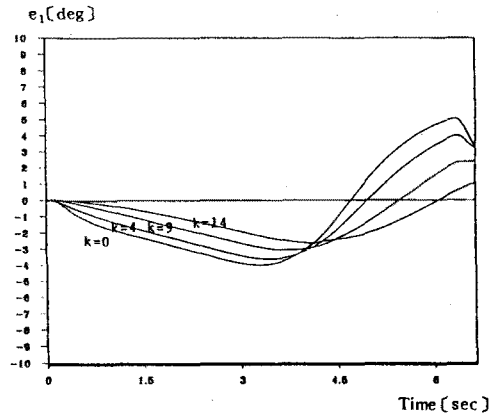


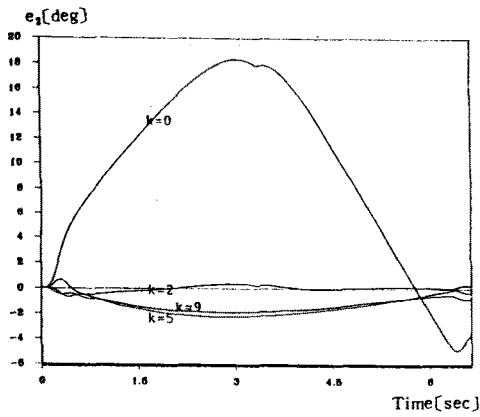
그림 4. 각 축 위치오차 궤적 (속도 100 mm/sec, p : PID 제어 c : computed torque 방법)



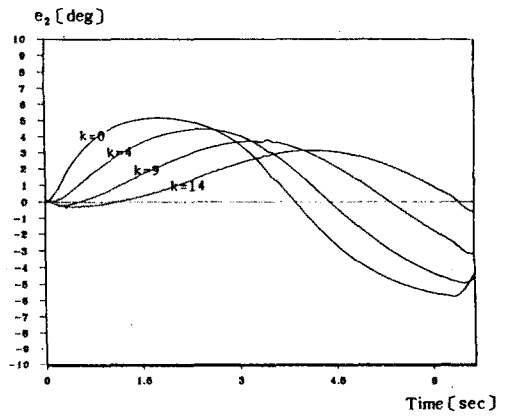
a. 1 축



a. 1 축



b. 2 축



b. 2 축

그림 5. 모델 알고리즘 반복 제어 구현시 각 축 위치오차 궤적 (속도 100 mm/sec)

그림 6. Betterment process 구현시 각 축 위치오차 궤적 (속도 100 mm/sec)