

Computed-Torque 제어와 Feedforward 역학 보상 제어 방법의 비교 평가

'88 추계 학술대회

'88-B-7

정용욱 배준경 박종국

경희대학교 전자공학과

The comparison of the Feedforward compensation and Computed-Torque control schemes

Yong-oung Chung* Jun-kyung Bae Chong-kuk Park

Kyung Hee University Electronics

ABSTRACT

The purpose of this paper is to compare with the simulated results of two control algorithms in the real time, based upon the model. These control schemes are "Computed-torque" and "Feedforward-Dynamics compensation", and have been simulated on the CMU DD Arm II.

1. 서론

매니플레이터의 제어문제는 원하는 궤적에서의 조인트 위치, 속도 그리고 가속도를 추적하기 위한 조인트 토크를 구하는데 있다.

CMU DD Arm II project 목적중의 하나는 매니플레이터의 실시간 궤적 추적에 대한 full 역학 보상의 효과를 입증하는데 있다. 본 논문에서는 Computed-torque 방법과 Feedforward 역학 보상 방법을 비교하며, 이에 대한 두 제어 알고리즘은 다같이 full 역학모델을 사용한다.

2. 매니플레이터의 제어 방식

매니플레이터의 역학은 매우 복잡한 비선형 미분 방정식으로 표현되며, N 개의 자유도를 갖는 매니플레이터의 완전한 역학모델의 표현은 Lagrange-Euler 방식에 의해,

$$T = D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad \text{-----(1)}$$

로 표현된다.

여기서, T는 실제적 토크이며 D(θ)는 위치 함수인 N X N의 관성 행렬이며 H(θ, θ̇)는 N 벡터의 Coriolis 와 Centrifugal 토크, G(θ)는 중력 토크를 나타내며 θ, θ̇ 와 θ̈는 조인트의 위치, 속도 그리고 가속도를 각각 나타낸다.

2-1. Computed-Torque 제어 방식 (C-T)

이 방식은 그림 1. 에 도시되어 있으며, 매니플레이터를 decoupled 하기 위해 비선형 궤환을 사용한다. 제어 토크 T는 식(1)에서 역 역학 방정식에 의해 계산되며, 이때 측정 가속도 θ̈ 대신에 Command 가속도를 사용해서 나타낸다.

$$U_i; K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d$$

U_i는 속도와 가속도의 Feedforward 항을 사용한 경우이다.

본 논문에서는 U_i의 경우를 사용한다.

$$T = \hat{D}(\theta)(K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d) + \hat{h}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{g}(\theta) \quad \text{---(2)}$$

위 식에서의 "hat"은 역학 파라메타의 추정치를 나타낸다.

2-2 Feedforward 역학 보상 방식

민약에 역학 모델이 정확하다면, 각 링크는 decouple 되고 기존 궤적을 이용함으로써, (1)식에서 구해진 조인트 토크는 원하는 궤적을 따라 매니플레이터를 동작시키게 된다. 따라서, 실제적으로 궤적 추이에 있어서 발생하는 모델링 오차를 보상하기 위해 궤환 제어가 필요하다. 즉, 궤환 제어를 사용함으로써 매니플레이터의 역학을 Decouple 시키고 선형화한다.

Feedforward 역학 보상 방식은 그림2 에서
도시되어 있으며 Feedforward 항과 Feedback 항
으로 분리된 제어 보오르 T 는

$$T = \hat{D}(\dot{\theta}_d)\ddot{\theta}_d + \hat{H}(\dot{\theta}_d, \dot{\theta}_d) + \hat{G}(\theta_d) + J(K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})) \quad \text{-----}(3)$$

방정식(3) 에서 처음의 3개 항은 Feedforward
보상 보오르를 나타내고 마지막 항은 Feedback
제어기에 의해 발생하는 보오르이며, J 는
N x N 의 링크 관성 행렬이다.

2-3. Reduced feedforward 보상방식(RFED)

그림3 에 나타난 RFED 방법은 상수 링크 관
성 행렬에 의해서, 위치 함수인 관성 행렬이
근사화된 결과를 증명하기 위해 사용된다.

제어 보오르는 (3)식의 첫번째 항에서 D(θ)
대신에 상수 관성 행렬 J 를 대체시킴으로써,
구해진다. 각 Sampling instant 에서의 적용된
보오르는

$$T = J(K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d) + \hat{H}(\dot{\theta}_d, \dot{\theta}_d) + \hat{G}(\theta_d) \quad \text{---}(4)$$

CMU DD ArmII 는 매우 작은 마찰력을 갖으며
제어 모드의 진압이나 속도 보다는 진류에
의해 증폭되고 DC-Torque 모드로 구동된다.

3. 제어기의 설계

제어 방법의 실행은 단지 동일한 기준이 제
어기 이득 행렬의 설계에 적용될 경우에만 비
교될 수 있다. 다행이도 본 논문에서의 이득
행렬 Kp와 Kv는 세 제어 알고리즘에서 동일하
음을 갖는다.

3-1. Computed-torque 방식에서 이득행렬의 설계

C-T 방법에서의 기본 개념은 비선형 Feedback
을 이용하여 모든 조인트의 역학 Decoupling을
구하는 것이며, 만약 배너플레이어의 역학이 (1)
식처럼 표현되고 적용된 제어 보오르가 (2)식과
같이 구해 진다면, 페루우르 시스템은 (1)식과
(2) 식을 동일하게 놓음으로써 다음과 같이 구
해진다.

$$\ddot{\theta} = U_i \cdot [D] \{ (D^{-1} \ddot{\theta}) + (H^{-1} \dot{\theta}) + (G^{-1} \theta) \}$$

여기서, U_i : 는 Commanded 가속도 신호이다.
만약에 역학 모델이 정확하다면 즉, D=Ĥ, H=Ĥ
그리고 G=Ĝ 이면, Decoupled 된 페루우르 시스템
은 아래와 같이 표현된다.

$$\ddot{\theta} = U_i \quad \text{-----}(5)$$

Commanded 가속도 신호는

$$U_i = K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d \quad \text{-----}(6)$$

(5) 식에 (6)식의 U_i를 대입하여 Laplace 변환시
키면, 모든 조인트에서의 페루우르 특성방정식은

$$S^2 + K_v S + K_p = 0 \quad \text{-----}(7)$$

여기서, K_{pj} 와 K_{vj} 는 j 번째 조인트에서의
위치와 속도의 이득을 나타낸다. 이때, 행렬 K_p
와 K_v을 선택하는데 있어, 아래와 같은 조건을
만족해야 한다.

$$K_{vj} - 2\sqrt{K_{pj}} = 0. \quad \text{-----(8)}$$

더우기, 외란 제거율을 최대화하기 위해서는
가능한 위치 이득 행렬 K_p를 크게 선택해야
한다.

4. 시뮬레이션

4-1. 궤적의 설정과 평가 기준

CMU DD ArmII는 복잡한 비선형 시스템이기
때문에, 특정 입력이 제어기를 설계하고 평가하
는데 사용되는 선형 시스템과는 달리, 복잡한
입력으로 부터 보오르 밖의 동작을 특성화시키
는것은 불가능하다. 따라서 보오르 제어 방법의
실험적 평가에 대한 중요한 특성은 보오르 입
력에 대한 선택이다. 보오르 제어 방법의 실행
을 평가하기 위해, 정확한 역학을 사용하며, 이
것은 설정된 궤적을 따라 최대 위치와 속도
추적 오차로서 정의된다.

4-2. 실험 시간 실행

본 논문에서는 6개의 자유도를 갖는 CMU DD
ArmII 에서의 실시간 실행을 평가하였다. 조인
트 1에서의 원하는 위치, 속도 그리고 가속도의
궤적은 그림 4 에서 나타내었다. 최대 속도와
최대 가속도의 질대값은 2rad/sec와 7.5rad/sec
일때 발생한다. CT, FED 와 RFED 방식에서의 위
치와 속도의 추적 곡선은 그림 5, 그림 6에 나
타내었다. 각 조인트에 세 가지 제어 방법을
적용하여 얻어진 속도와 위치의 추적 오차는
그림 7, 그림 8 에 나타내었다. 각 조인트에
대한 제어 방법에서 사용된 위치와 속도 이득
행렬은 Table I 에서 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 본 모델을 근기보 인 두개의 제어 알고리즘을 실시간에 실행하여 상호 비교해 보았다. 시뮬레이션 결과 값을 통해, 만약 매니플레이터의 모델이 정확하다면 Computed-Torque 제어 방법과 Feedforward 역학 보상 제어 방법은 유사한 결과를 얻는다. 그러나, 실제로 Computed-Torque 제어 방법이 다른 방법에 비해, 설정된 궤적을 따라 발생하는 추적 오차가 보다 작게 발생함을 알 수 있다.

Joint(j)	Transfer Function ($\frac{1}{J_i s^2}$)	K_{p_i}	K_{v_i}
1	$\frac{1}{18.35s^2}$	400	19.6
2	$\frac{1}{2s^2}$	58.0	15.2
3	$\frac{1}{0.25s^2}$	400.0	40.0
4	$\frac{1}{0.0075s^2}$	9500.0	106.0
5	$\frac{1}{0.0065s^2}$	1200.0	69.3
6	$\frac{1}{0.00035s^2}$	3000.0	110.0

Table 1. 각 링크의 전달함수의 이득

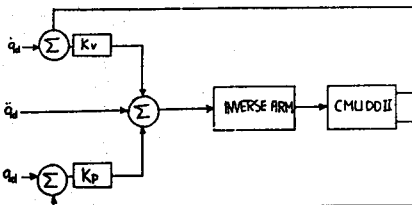


그림 1. C-T 제어 방법의 블록선도

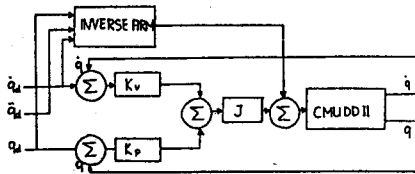


그림 2. FED 제어 방법의 블록선도

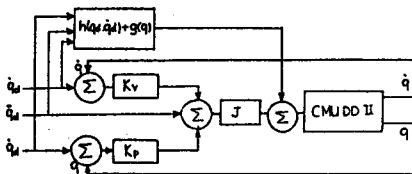


그림 3. RFED 제어 방법의 블록선도

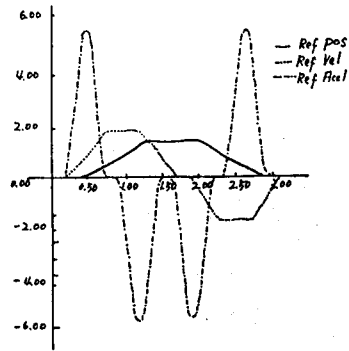


그림 4. 조인트 1에서의 원하는 궤적

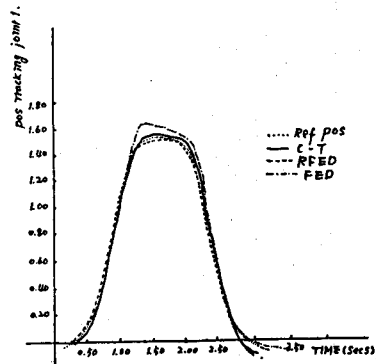


그림 5. 조인트 1의 위치추적

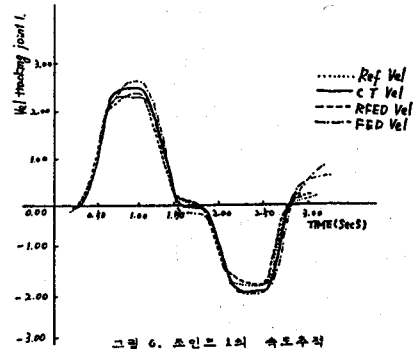


그림 6. 조인트 1의 속도추적

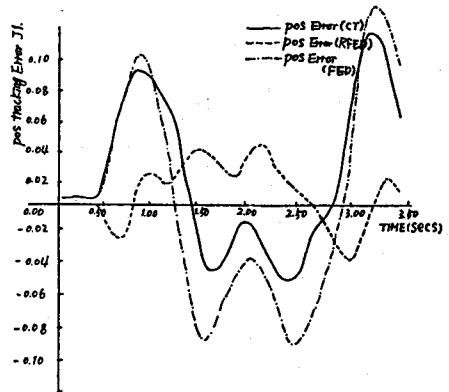


그림 7. 조인트 1의 위치 추적오차

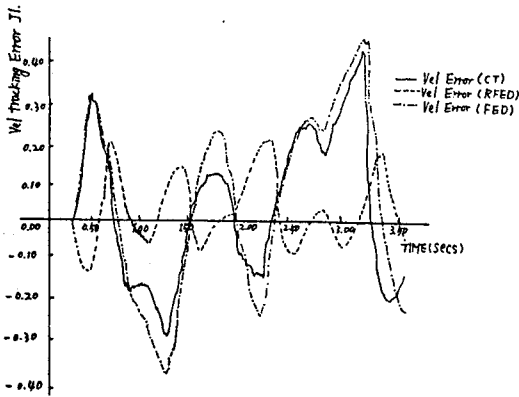


그림 8. 쇼링크 1의 속도 추적오차

REFERENCE

- (1) Khosla, P.K. Real-time control and identification of Direct-Drive Manipulators. Carnegie-Mellon University, October 1985
- (2) Khosla, P.K. and Kanade, T. Parameter Identification of Robot Dynamics. In Franklin, G.F (editor) Proceedings of the 24-th CDC, pages 1754-1760 Florida, December 11-13, 1985.
- (3) Tourassis, V.D. Dynamic Modeling and Control of Robotic Manipulator. Carnegie-Mellon University, June, 1985.
- (4) Slotine, J.-J.E The Robust Control of robot Manipulator. International Journal of Robotics Research, 4(2):81-100, Summer, 1985.
- (5) Bejczy A.K.
Robot Arm Dynamics and Control.
Technical Memorandum 33-669, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, February, 1974
- (6) Brady, M, et al (editors)
Robot Motion: Planning and Control
MIT Press, Cambridge, MA, 1982