로보트 머니퓰레이터 시스템에 대한 적응 제어에 관한 연구

°강 문식 박 찬영 박 민용 이 상배
연 세 대 학 교 전 자 공 학 과

A Study on Adaptive Control For Robotic Manipulator System

MOON SIK KANG CHAN YOUNG PARK MIGNON PARK SANG BAE LEE
Dept. of Electronic Eng. Yonsei University

ABSTRACT

Adaptive control for robot manipulator controller has been considered as an effective approach because robot dynamic models contain the nonlinearities and uncertainties.This paper present an approach for the position and velocity control of a manipulator by using the self-tuning type controller for each point. The complicated model manipulator system is modeled by a set of time series difference equation. The parameters of the models are determined by on-line recursive algorithms. Finally some remarks on the effectiveness and applications of adaptive controller are' discussed.

1. 서 론

다관절 로보트 머니퓰레이터의 운동 방정식은 고전역학으로부터 유도된, 잘 알려진 Lagrange-Euler 방정식으로 표현 가능하다. 이러한 로보트 머니퓰레이터 시스템의 제어에 관한 연구가 최근에 광범위하게 연구되고 있다.
로보트 적응제어에 대한 연구는 1970 년대 중반 이후 진행되어, 이러한 결과는 산업용로보트에 간단한 구조로 적용되었다. 그러나 높은속도를 요하는 머니퓰레이터인 경우 한계가있다.
예를들어, 머니퓰레이터를 사용하여 물체를 한곳에서 다른곳으로 이동시키는 경우를 생각해보자. 이러한 시스템은 부분적으로 미지변수를 갖게되어 로보트 시스템에 대한 변수들이, 분리된(isolated) 부시스템에 대한 변수들을 나타낼 수 없게되어 로보트 시스템에 대한 매개변수 추증은 직접적으로 적용할 수 없게되어 간접적인 접근방법이 필요하게된다. 이와같은 로보트 시스템의 동특성으로 인한 비선형성과 불확정성에 대처하기위한 적응제어방식이 유용하다 .

이러한 적응제어방식에는 모델기준적응제어 (model-reference adaptive control) 와 자기동조 적응제어(self-tuning adaptive control) 방식이 있는데 본논문에서는 자기동조 적응제어방식을 사용하고 시스템의 안정도를 고려한 적응제어 방식에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 본론

로보트의 각 조인트(joint)는 모터 에 의해서 구동되며 각 모터 축에는 엔코더(encoder)나 타코미터(tachometer) 가 부착되어 있어서 위치와 속도를 감지한다. 머니퓰레이터의 운동방정식은 고전역학으로 부터 유도되는데, n 개의 조인트를 갖는 머니퓰레이터에 대한 Lagrange-Euler 방정식은 다음과같다.

$$D(\theta)\ddot{\theta}=Q(\theta,\dot{\theta})+G(\theta)+Fu(t) \qquad \text{--- (1)}$$

여기서 $\theta,\dot{\theta},\ddot{\theta}$는 조인트의 위치, 속도 그리고 가속도를 나타내는 n 차원 벡터이고 $D(\theta)$는 조인트들의 각속도에 관계되는 계수로써 링크관성의 영향을 포함하는 n x n 대칭행렬이다. $Q(\theta,\dot{\theta})$는 코리올리힘과 원심력에 관계되는 n 차원 벡터이며, $G(\theta)$는 중력에 의한 힘 토오크를 나타내는 n 차원 벡터이다. 이때 $u(t)$는 시스템 입력으로 n 차원 토오크 벡터이고, F 는 대각선 크기 행렬(diagonal scaling matrix) 이다. (1) 식으로 주어지는 모델에 대한 제어기(controller) 를 구성함에 있어 모델을 간략하게 하기 위해서 각 조인트들 간의 커플링(coupling) 항들은 고려하지않는 " 독립적 조인트 제어" 로 가정한다.

각 조인트를 제어하는 방식은 점대점을 (point-to- point) 제어하는 방식과 좌표 변환에 의한 방식이 있는데, 좌표 변환에 의한 방식은 로보트의 직각 좌표계로부터 로보트 팔에 대한 해

(Arm solution) 을 구함으로서 가능하다. 이때 이러한 두가지 방식을 절충한, 보간법에 의한 방식 (Interpolat-d Joint Control)을 쓰면, 고속으로 좌표 변환을 행함에 있어 발생하는 계산량을 줄이고 경로 제어를 정확하고 부드럽게 할 수 있다.

그러면 (1) 식을 먼저 정해진 경로에 대하여 선형화하고 Euler의 방법에 의해서 이산화하여 다변수 이산적 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$y(k) = a_0 + A_1 y(k-1) + A_2 y(k-2) + B_1 u(k-1) + B_2 u(k-2) + \xi(t) \qquad ---(2)$$

(2) 식은 머니퓰레이터 시스템을 위한 제어기의 사용 가능성을 보여준다. 위 식을 일반화하여 표시하면 다음과같다.

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z)+C(z^{-1})\xi(t)+h \qquad ---(3)$$

여기서 $u(t)$와 $y(t)$는 각각 n 차원 입력, 출력 벡터이고, $\xi(t)$ 는 n 차원 벡터로 표시되는 백색 잡음이다. $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$ 은 다음과같이 정의되는 다항식 행렬이다.

$$X(z^{-1}) = X_0 + X_1 z^{-1} + --- + X_n z^{-n} \qquad ---(4)$$

$Xi(i = 0,1,2,---n)$ 는 $A_0 = C_0 = I$ 이고 $\det C(z^{-1})$ 의 근이 z-평면 에서 단위원 내에 존재하는 계수행렬이다.

일반화된 최소분산손실함수는,

$$J = E\{\|P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t)\|^2 + \|Q'(z^{-1})u(t)\|^2\} \qquad ---(5)$$

여기서 $P(z^{-1}), R(z^{-1}), Q'(z^{-1})$은 nxn 가중치 행렬이고 $\|x\|^2 = x^T x$ 이다. 최적예측기 $\phi_y^*(t+k/t)$ 를 유도하기 위하여 다항식행렬 $\tilde{C}(z^{-1})$ 을 도입한다.

$$\tilde{C}(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}) \qquad ---(6)$$

여기서

$$\bar{A}(z^{-1})P(z^{-1}) = \bar{P}(z^{-1})A(z^{-1}) \qquad ---(7)$$

$$\bar{C}(z^{-1}) = \bar{P}(z^{-1})C(z^{-1}) \qquad ---(8)$$

그리고,

$$\bar{F}(z^{-1})G(z^{-1}) = \bar{G}(z^{-1})F(z^{-1}) \qquad ---(9)$$

여기서 $\det \bar{F}(z^{-1}) = \det F(z^{-1})$ 이다.

다항식행렬 $\tilde{C}(z^{-1})$ 을 다음과같이 정의하면

$$\tilde{C}(z^{-1}) = \bar{F}(z^{-1})\bar{A}(z^{-1}) + z^{-k}\bar{G}(z^{-1}) \qquad ---(10)$$

위의 관계식을 이용하면 최적예측기는*

$$\phi_y^*(x+k/t) = \tilde{C}^{-1}[\tilde{G}y(t) + \tilde{F}Bu(t)] \qquad ---(11)$$

로 주어지고 이때 예측오차는

$$\xi'(t+k) = F(z^{-1})\xi(t+k) = \phi y(t) - \phi_y^* (t+k/t) \qquad --(12)$$

위식을 손실함수에 대입하면

$$J = E\{\|\phi y^*(t+k/t) - R(z^{-1})w(t)\|^2 + \|Q'(z^{-1})U(t)\|^2\} + E\{\|\xi'(t+k)\|^2\} \qquad ---(13)$$

(13)식을 $u(t)$에 대하여 최소화하면

$$\phi^*(t+k/t) = \phi y^*(t+k/t) - R(z^{-1})W(t) + Q(z^{-1})u(t) = 0 \qquad ---(14)$$

여기서

$$Q(z^{-1}) = (P_0 B_0)^{-T} (Q'(0))^T Q'(z^{-1})$$

(11) 을 (14)식에 대입하면

$$\tilde{G}(z^{-1})y(t) + H(z^{-1})u(t) + E(z^{-1})W(t) = 0 \qquad ---(15)$$

$$H(z^{-1}) = \tilde{F}(z^{-1})B(z^{-1}) + \tau(z^{-1})Q(z^{-1}) \qquad ---(16)$$

$$E(z^{-1}) = -\tilde{C}(z^{-1})R(z^{-1}) \qquad ---(17)$$

(11)식을다시 쓰면

$$\phi y^*(t+k/t) = \tilde{G}y(t) + \tilde{F}Bu(t) - \tilde{C}'\phi_y^*(t+k-1/t-1) \qquad ---(18)$$

여기서

$$\tilde{C}(t) = I + \tau'$$

$$L = \tilde{F}B$$

위식에서

$$\phi i(k-1) = [y^T(t)\ y^T(t-1)\ ---;\ u^T(t)\ ---;\ \phi y^*(t+k-1/t-1)] \qquad ---(19)$$

$$\hat{\theta} = [\tilde{G}_0, ---; L_0 L_1\ ---; \tilde{C}_1 \tilde{C}'_2 --]^T \qquad ---(20)$$

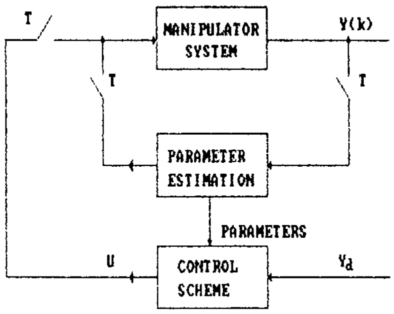
(3) 식은다음과같이 생각할수있다

$$yi(t) = X(t-l)\theta i + \xi' i(t)$$

여기서

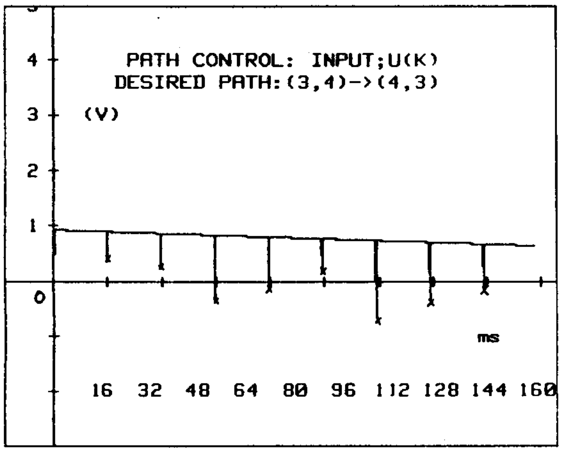
$$\theta i = [\tilde{g}^0 i1 --- \tilde{g}^0 in; \tilde{g}^1 i1 --- \tilde{g}^1 in ---; l^0 i1 --- l^0 in; l^1 i1 --- l^1 in; \tilde{C}^1 i1 --- \tilde{C}^1 in; \tilde{C}^2 i1 --; \tilde{C}^n in ---]$$

따라서 (18) 식에 의해 최적예측기가 구해지며 이러한 적응제어 알고리즘의 구조는 다음 그림과 같다.

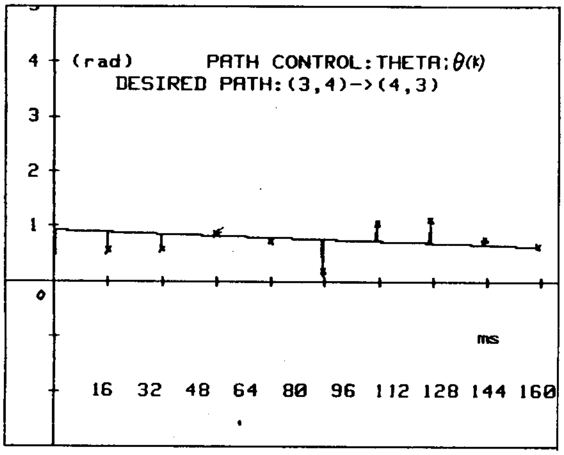


(SCHEME OF ADAPTIVE CONTROLLER FOR MANIPULATOR SYSTEM)

시뮬레이션은 θ -r 머니퓰레이터인 경우로서 그림(2-1) 은 제어입력값을 상대적으로 나타낸 것이고, 그림(2-2) 는 조인트 각도값을 시간의 변화에 따라 보이고있다. 이때 보간법에 의한 조인트 제어 알고리즘을 이용했다. 샘플링 주파수는 60 HZ로 가정했다.



(그림2-1)CONTROL INPUT U(K)



(그림2-2)OUTPUT O(K)

3. 결론

로보트 제어문제는 일반적으로 조인트들간의 운동이 원하는 경로를 잘 따라 가도록 로보트 토오크 F 나 구동부의 입력전압 u 를 구하는 문제로 생각할 수 있다. 실재 로보트 시스템은 상당한 불확정성(uncertainty) 으로 인하여 동적 모델이 필요하게되고 이러한 것들을 정확하게 모델링하는 것은 쉬운 일이 아니다.

따라서 이러한 불확정성을 해결하는 방법으로 적응제어구조를 적용했으며, 이러한 적응제어 구조에는 모델기준 적응제어 (MRAC) 와 자기동조 적응제어(STAC) 와같이 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 STAC를 사용하여 미지 변화량에 대하여 로버스트하게 제어하는 알고리즘을 제시하였다.

참고문헌

1. K.J.Astron , "INTRODUCTION TO STOCHASTIC CONTROL THEORY",ACADEMIC PRESS, 1972
2. H.GOLDSTEIN , "CLASSICAL MECHANCIS", ADDISON -WESELY PUBLISHING COMPONY,1980
3. R.P.PAUL, "ROBOT MANIPULATERS ;METHEMATICS, PROGRAMING AND CONTROL", MIT Press,1981
4. K.J.Astron, B.WITTENMARK,"COMPUTER CONTROLLED SYSTEMS",PRENTICE-HALL,INC.,1984
5. W.E.SNYDER, "INDUSTRIAL ROBOTS:COMPUTER INTERFACING AND CONTROL", PRENTICE-HALL , 1985
6. A.J.KOIVO,T.H.GUO,"ADAPTIVE LINEAR CONTROLLER FOR ROBOTIC MANIPULATORS",IEEE TRANS., VOL.AC-28,NO.2, FEBRUARY,1983
7. K.Y.LIM,M.ESLAMI,"NEW CONTROLLER DESIGNS FOR ROBOT MANIPULATOR SYSTEMS",PROC.ACC. 1985
8. T.C.HSIA,"ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS",IEEE, 1986
9. M.VUKOBRATOVIC,N.KIRCANSKI,"AN APPROACH TO ADAPTIVE CONTROL OF ROBOTIC MANIPULATORS", AUTOMATICA,VOL.21,NO.6, 1985
10. J. K.MILLS, A.A.GOLDENBERG,"A NEW ROBOT CONTROLLER",IEEE,1986