

## 다중모델과 스위칭을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 적응제어

이형찬  
대전대학교 전기공학과

### Adaptive Control of Robotic Manipulators Using Multiple Models and

Hyoung-Chan Rhee

Dept. of Electrical Engineering, Daejin University

**Abstract** - This paper deals with the tracking control problem of robotic manipulators with unknown or changing dynamics. The torque input applied to the joint actuators is determined at every instance by the identification model that best approximates the robot dynamics. The best of the identified model is chosen by the proposed switching mechanism with fuzzy inference of the manipulator in an indirect adaptive controller architecture. Simulation results are also included to demonstrate the improvement in the tracking performance when the proposed method is used.

초기 추정치 사이의 초기 불일치로 인해 큰 진동이 생겨 전반적으로 시스템 성능이 좋지 않음을 알 수 있다. 그러한 과도 진동은 정밀성을 요구하는 작업에 있어서 바람직하지 못한 현상이다. 따라서 본 논문에서는 간접 적응 제어기 구조에 있어서 매니퓰레이터의 다중 동적 모델을 이용하여 하나의 모델을 근거로 한 제어 방법과 매 순간 상황에 따라 인간의 사고방식을 모방한 퍼지추론 기법을 도입하여 성능 지수를 결정한 후 이에 따라 적절한 토크 입력이 선정되는 스위칭 기법을 제시하고자 한다.

### 1. 서 론

생산 현장에서의 공장 자동화가 활발히 진행됨에 따라 로봇 매니퓰레이터의 활용 범위가 점차 증가하고 있다. 이에 따라 로봇 매니퓰레이터의 빠르고 정확한 동작을 위한 제어기의 구성이 활발히 연구되고 있다. 일반적으로 기존의 제어 알고리즘은 비교적 정확한 수학적 모델링을 필요로 하지만 매니퓰레이터의 동적 모델은 비선형 특성을 보임으로써 좋은 제어 성능을 얻기에는 어려움이 따른다. 특히 고성능 직접 구동 팔(Direct Drive Arm)을 사용할 때 비선형에 대한 영향은 더욱 잘 나타난다. 관절의 관성 파라미터들이나 부하 무게의 변화에 대한 부정확한 추정치로 부터 생기는 불확실성을 보상하기 위한 대책으로 적응 제어가 강력한 제어 기법으로 적합하다. 비록 그것이 비선형 일지라도 매니퓰레이터의 동적 모델은 미지이거나 부분적으로 알고 있는 관성 파라미터에 대해 선형식으로 파라미터화가 될 수 있다. 이러한 특성을 통해 많은 연구자들이 로봇 매니퓰레이터의 부하, 관절의 링크의 크기와 질량 등이 운행에 독립된 파라미터임에 착안하여 매니퓰레이터의 동역학식을 이들 파라미터에 대한 선형식으로 풀이하여 좋은 추정 속도 및 계통의 대국적 안정성을 입증하였다[1]. 그러나 큰 부하의 변화로 인해 실제 파라미터 값과 이들 파라미터의

### 2. 문제의 정식화

$n$ 개의 관절을 갖는 강체 매니퓰레이터 동특성의 벡터 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $q \in R^n$  는 관절 위치 벡터,  $\tau(t) \in R^n$  는 관절 토크 벡터,  $M(q) \in R^{n \times n}$  는 positive definite한 관성 행렬,  $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$  는 마찰력과 구심력을 나타내는 행렬 그리고,  $g(q) \in R^n$  는 중력 벡터이다. 유한한 원하고자 하는 궤적  $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$  가 주어진다면 제어 목적은 좋은 과도 특성을 가지면서 가능한 한 원하는 궤적을 근접하게 따라가도록 제어기를 설계하는 것이다. 매니퓰레이터의 정확한 모델이 이용 가능하다면 토크입력은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (2)$$

결과적으로 다음 관계가 성립할 수 있다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (3)$$

여기서  $e = q_d - q, \dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$  그리고  $K_p$ 와  $K_v$ 는 positive definite 대각 이득행렬이다. 이러한 제어기법은 일반적으로 Computed Torque 방법이라고 한다. 식(3)에서와 같이 오차 방정식은 전반적으로 안정하고  $K_p$ 와  $K_v$ 의 선택으로 바람직한 성능을 얻는다. 이와같은 방법은 매니플레이터의 정적모델을 근거로 하였지만 부하가 변동되었을 때 오차방정식은 제차방정식으로 더 이상 성립되지 않는다. 따라서 로봇 매니플레이터를 제어하기 위해서는 적응제어가 적합한 방법이라 할 수 있다.

### 3. 다중모델을 근거로한 적응제어

다중모델을 근거로 한 적응제어기는 병행해서 실행되는 N개의 식별기모델들로 구성된다. 각각의 식별기에 대한 모델들은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\hat{\tau}_{fj} = Y_j(q, \dot{q}) \hat{p}_j \quad j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

여기서  $Y_j(q, \dot{q}) = H(s)Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 필터링된 regressor 행렬이고,  $H(s) = \frac{a}{s+a}$ 이다. 앞에서와 같이 regressor 행렬  $Y_j(q, \dot{q})$ 는 모든 모델들이 동일한 구조를 갖고 있지만 파라미터 추정치벡터  $\hat{p}_j$ 는 다른 초기값을 갖는다. 각각의 모델에 대한  $\hat{p}_j$ 는 다음과 같이 오차모델을 근거로 하여 적응된다.

$$\dot{\hat{p}}_j = -\Gamma Y_j^T(q, \dot{q}) e_{Ij} \quad (5)$$

$$e_{Ij} = \tau_j - \hat{\tau}_{fj} = Y_j(q, \dot{q}) \hat{p}_j \quad (6)$$

여기서  $e_{Ij}$ 는 필터링된 식별오차 벡터이다. 각각의 이용 가능한 모델들에 대한 토크출력이 미리 발생될 수 있기 때문에 permissible switching rule  $h(t)$ 에서 토크벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau_{h(t)} = & \hat{M}_{h(t)}(q) (\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e) \\ & + \hat{C}_{h(t)}(q, \dot{q}) \dot{q} + \hat{g}_{h(t)}(q) \\ & + \frac{1}{\alpha} Y_j \hat{p}_{h(t)} + \frac{\hat{M}_{h(t)}(q)}{\alpha} \left[ \frac{d}{dt} (\hat{M}^{-1}) \right]_{h(t)} e_{I_{h(t)}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\left[ \frac{d}{dt} (\hat{M}^{-1}) \right]$ 의 미분기는 스위칭이 일어나기 전에 파라미터화가 이루어질 수 있기 때문에 아무런 문제가 일어나지 않는다. 그러므로  $\left[ \frac{d}{dt} (\hat{M}^{-1}) \right]_{h(t)}$ 는 스위칭이 일어나는 동안 쉽게 이용 가능하다.

임의의 주어진 순간에 N개의 모델들에 대한 식별오차들은 이용 가능하지만 토크벡터들 중에 최적으로 판정된  $\tau$ , 하나만이 매니플레이터의 입력으로 선택될 것이다.

그러므로 식별기모델들의 성능을 근거로 한 스위칭에 대한 성능지수는 로봇 매니플레이터의 안정도를 유지하면서 과도성능을 개선시키는 하나의 방법으로 선정되어야 한다. 과도특성을 개선시키기 위한 스위칭 지수를 선정하기 전에 우선 스위칭 열(switch sequence)과 스위칭 법칙(switching rule)을 정의해야 되며 결과적으로 이에 제어기에 사용될 특정한 스위칭 기법은 [6]에서 입증하였으므로 permissible switching rule을 이용하면 토크입력은 다음관계가 성립한다.

$$\tau_j(t) = \tau_{h(t)}(t) \quad t \geq 0 \quad (8)$$

위의 관계로부터 식(6)의  $\tau_j$ 는 식(7)을 필터링함으로써 얻을 수 있다.

### 4. 성능개선을 위한 스위칭 구조

로봇 매니플레이터의 다중 모델을 근거로한 적응제어 시스템은 무한히 빠른 스위칭을 요구하지 않는 한 스위칭 구조와 관계없이 전체 시스템의 안정성은 증명될 수 있기 때문에 안정성보다는 성능개선을 위한 스위칭 구조를 선정할 수 있다[5-6]. 그러나 매 순간 토크입력을 어떻게 결정하는지에 대한 뚜렷한 방법이 없기 때문에 기존의 스위칭 구조는 실제적인 오차들의 측정될 양을 알기 위해 성능지수  $J = \alpha e_I^2 + \beta \int_{t=0}^{\infty} e_I^2 dt$ 를 제안하여 매 순간 가장 작은 J값을 선정하였다. 이의 성능 지수는 순간적이며 장기적으로 정확한 측정량을 제공해 주지만 매니플레이터의 부하 변동이 생겼을 때나 작은 식별오차가 존재할 때 스위칭 동작을 제대로 하지 못하는 경우가 생긴다. 이에 대한 대책으로 식별기의 성능에 대한 지수는 전문가의 경험이나 지식을 바탕으로 인간의 의사 결정 과정을 모방한 퍼지추론 기법을 스위칭 구조에 도입하여 결정하고자 한다. 이는 필터링된 식별오차  $e_I$ 와 오차의 변화량  $\dot{e}_I$ 를 [-1 1]로 규격화하고, 그 값이 7가지 조건부 소속함수(PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB)에 포함된다면, 그에 따른 if-then 형태의 49개의 언어적 제어규칙을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 스위칭 구조를 결정짓는 성능지수 J는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$h_{ij} = \min(\mu_{A_i}(e_I), \mu_{B_j}(\dot{e}_I)) \quad (9)$$

$$J = \frac{\sum_{i,j=1}^7 L_{ij} h_{ij}}{\sum_{i,j=1}^7 h_{ij}} \quad (10)$$

여기서,  $\mu_{A_i}(e_I)$  ( $\mu_{B_j}(\dot{e}_I)$ )는  $e_I$  ( $\dot{e}_I$ )값이 언어적 변수 값에 소속하는 정도를,  $h_{ij}$ 는  $e_I$  ( $\dot{e}_I$ )에 대한  $L_{ij}$ 의 적합도를 나타낸다. 또한  $L_{ij}$  (B(=1), M(=0.8), S(=0.6), Z(=0))의 싱글톤(Singleton)소속함수를 갖는 값이며 성능지수 J를 결정하기 위해 사용된 퍼지 규칙은 표1.과 같다.

표 1. 제어 규칙 작성표

$e_j$	$\dot{e}_j$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B	B
NM	B	B	B	B	M	M	M	B
NS	B	B	B	S	S	M	B	B
ZO	B	M	S	Z	S	M	B	B
PS	B	M	S	S	B	B	B	B
PM	B	M	M	M	B	B	B	B
PB	B	B	B	B	B	B	B	B

퍼지추론 과정을 통해서 나온 성능지수  $J$ 는  $N$ 개의 식별기 모델에서 각각 나오게되며 이때 매 순간 식별오차가 가장 작은  $J$ 값을 선택하게 된다. 이는 모든 식별기들이 매니플레이터의 동특성을 근사시켰다는 의미가 되어 토크 벡터들 중에  $\tau_i$  하나만이 액츄에이터에 가해진다.

### 5. 모의실험 결과

본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 다음의 식(11)에서와 같은 1 자유도를 갖는 매니플레이터에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\tau = p_1 \ddot{q} + p_2 \sin(q) \quad (11)$$

여기서 파라미터 벡터  $p = [p_1, p_2]^T$ 로서  $p_2$ 는 1 과 1.2 사이에서 변화하는 것으로 가정하면, 2개의 다른 영역을 갖게 된다. 따라서 임의로 8개의 모델을 선택하면 8개의 다른 초기 파라미터 추정치를 갖게되어 16개의 식별기 모델이 주어진다. 원하는 궤적  $q_d = \frac{\pi}{4.0} + 2(1 - \cos(3t))$  이고 각각 1차와 2차 도함수를 갖는다.

서보레환이득  $K_v, K_p = 10$ 으로 하였다. 다음의 그림 1-3은 [6]에서 제시한 방식과 본 논문의 방식을 비교한 결과이다. 본 논문에서 제시한 방식이 위치오차에 대해 더 작게 할 수 있음을 그림1.을 통해 알 수 있다. 이때 파라미터 추정치는 16개의 식별기 중 최적치로의 스위칭이 활발히 일어남을 그림2.를 통해 알 수 있다.

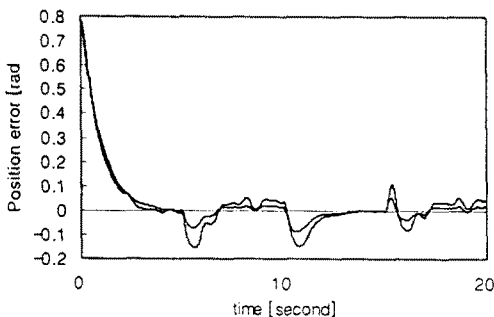


그림 1. 관절공간에서의 위치오차.

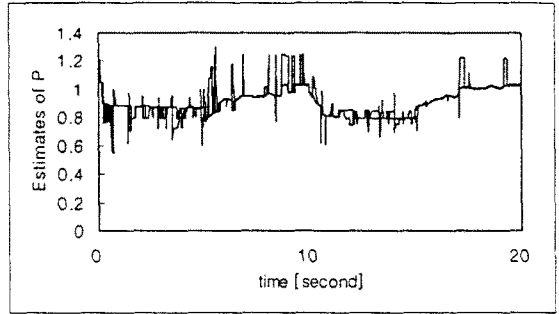


그림 2. 파라미터 추정치  $p_2$ .

### 6. 결론

다중모델을 근거로 한 적응제어 알고리즘은 로봇 매니플레이터의 전반적인 추종성능을 개선시키기 위해 제시되었다. 제안된 알고리즘은 매니플레이터의 다중식별기 모델과 관절 액츄에이터를 구동시키기 위해 특정한 토크 입력을 결정하는 스위칭 기법을 이용하였다. 특히 식별기의 성능에 대한 지수는 퍼지추론 기법을 이용하므로써 많은 식별기 모델중에 매니플레이터의 동특성을 가장 근사화시킨 한개의 모델을 근거로 매 순간 토크 벡터를 발생시켰다. 임의의 permissible 스위칭 하에서 제시한 알고리즘의 효용성을 컴퓨터 모의실험결과 과도추종 성능이 개선되었음을 보였다.

이 논문은 1997학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한것임.

### [참고 문헌]

- [1] J. E. Slotine and W. Li, " Adaptive Manipulator Control : A Case Study," IEEE Trans. Aut. Control, AC-33, pp. 995-1003, Nov., 1988.
- [2] R. Ortega and M. W. Spong, " Adaptive Motion Control of Rigid Robots," In Proc. IEEE 27th. Conf. Decision and Control, pp 1575-1584, 1988.
- [3] R. H. Middleton and G.C. Goodwin, " Adaptive Computed Torque Control for Rigid Link Manipulators," Sys. Control Lett. pp. 9-16, 1988.
- [4] J. J. Craig, P. Hsu and S. S. Sastry, " Adaptive Control of Mechanical Manipulators," Int. J. Robot. Res. pp. 16-28, 1987.
- [5] K. Ciliz and Kumpati S. Narendra, " Multiple Model Based Adaptive Control of Robotic Manipulators," in Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 1305-1310, 1994
- [6] K. Ciliz and K. S. Narendra, " Intelligent Control of Robotic Manipulators Using Multiple Models and Switching," Tech. Rep. No : 9313, Center for Systems Science, Yale University, pp. 422-427, 1995.
- [7] K. S. Narendra and Jeyendran Balakrishnan, "Improving Transient Response of Adaptive Systems using Multiple Models and Switching," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-39, no. 9, pp. 1861-1866, Sep., 1994.