

# 로봇의 비선형 적응제어기 개발에 관한 연구

(Nonlinear Adaptive Controller for Robot Manipulator)

\*박태욱(연세대학교 기계공학과 대학원), 양현석(연세대학교 기계공학과)

Key Words : Adaptive Control, Nonlinear Control, Real-Time Control, Recursive Implementation, Spatial Vector

ABSTRACT : These days, industrial robots are required to have high speed and high precision in doing various tasks. Recently, the adaptive control algorithms for those nonlinear robots have been developed. With spatial vector space, these adaptive algorithms including recursive implementation are simply described. Without sensing joint acceleration and computing the inversion of inertia matrix, these algorithms which include P.D. terms and feedforward terms have global tracking convergence. In this paper, the feasibility of the proposed control method is illustrated by applying to 2 DOF SCARA robot in DSP(Digital Signal Processing).

## 1. 서론

로봇에 대한 연구가 시작된 이래로 많은 발전이 있어 왔다. 로봇의 운동과 주위환경에 작용하는 힘을 제어하기 위한 여러 기법들이 개발되어 왔다. 로봇의 운동과 힘을 제어하기 위해서 이론적인 측면과 실질적인 측면에 대해 연구할 것들이 여전히 많이 남아있다.

오늘날 산업용 로봇은 용접, 연삭, 조립 등과 같은 다양한 작업을 수행함에 있어서 빠른 속도와 높은 정밀도가 요구된다. 현재 사용중인 산업용 로봇은 비선형성이 매우 강한 동적 특성을 가지고 있다. 특히 빠른 속도와 높은 정밀도가 요구되는 경우에는 이런 특성이 더욱 현저해진다. 이런 비선형성을 고려해서 로봇 매니플레이터를 제어할 때의 문제점은 계산량이 많고 복잡하다는 것이다. 이런 다수의 계산량과 복잡성 때문에 실시간으로 로봇을 제어하는 것이 어려워졌기 때문에 계산량이 링크수에 선형적으로 비례하는 반복형 알고리즘들이 개발되어 왔다.

최근 비선형성이 강한 로봇에 대한 적응제어기법이 발전되어 왔다. 효과적인 적응제어기는 빠른 속도와 높은 정밀도를 가지고 로봇 매니플레이터를 제어하는데 중요한 역할을 담당한다. 로봇에는 링크의 동적 성질을 묘사하는 파라미터에 대한 불확실성이 존재한다. 파라미터에 대한 이런 불확실성은 고속 작동 시 특히 민감하다. 적응제어 기법은 로봇이 작동하는 동안 파라미터에 대한 정보를 얻어낼 수 있기 때문에 잠재적으로 부하변동이 큰 경우에도 지속적으로 일정한 성능을 유지할 수 있다. 로봇은 본래 비선형성과 연성이 강하다는 것을 고려해 선형-파라미터화 방법이 도입되었다. 이 방법은 로봇 매니플레이터의 동력학식이 파라미터에 선형적으로

비례한다는 사실을 근거로 한다. 1987년 Craig 등[1]은 조인트가 운동할 때 생기는 추적오차를 이용하여 파라미터에 대해 적응이 이루어짐을 보였다. 1987년 Slotine 과 Li[4]는 비례-미분 피드백 항과 적응 피드포워드 항을 결합한 적응제어기를 개발하여 추적오차가 전역적으로 수렴함을 보였다. 이 알고리즘은 조인트의 위치와 속도만을 측정하고 조인트 가속도를 측정할 필요가 없고 관성행렬의 고유 특성인 양의 한정성을 이용하여 추정된 관성행렬의 역행렬을 계산할 필요도 없다. 1990년 Walker[6]는 Featherstone[2]의 공간벡터 개념을 이용하여 폐쇄형 링크를 포함하는 매니플레이터에 대한 적응제어기를 개발하였다. 1990년 Niemeyer[3]는 Slotine 과 Li[4]의 알고리즘을 Walker[5,6]와 결합한 반복형 알고리즘을 소개하여 이를 실험으로 입증하였다.

국내에서는 아직 이런 최근의 적응제어 기법에 대한 연구가 비좁은 상태이다. 이 논문에서는 이런 최근의 적응제어 기법을 DSP(Digital Signal Processing)을 이용하여 2 링크 스카라 로봇에 대한 실험으로 그 타당성을 입증한다.

## 2. 이론

### 2.1 로봇의 비선형 제어

그렇지만, 로봇의 비선형 동역학은 전통적인 선형제어 접근법을 쉽게 적용할 수 없으므로 제어시 문제를 야기시킨다. 일반적으로 로봇 매니플레이터에 기어를 설치해서 링크사이의 상호 동적효과를 크게 감소시켜 이런 어려움을 감소시킬 수 있었다. 즉, 기어가 들어간 로봇 매니플레이터에서는, 비선형 또는 시변 동적효과가 전달을  $\gamma$  또는  $\gamma^2$  (전통적으로  $\gamma$ 은 약 100 정도이다.)에 의해

서 나누어진다. 그렇지만, 최근에 제적추적과 힘제어에 정밀성을 높이기 위한 필요성이 기어가 없는 직접 구동 아암(마찰이 줄어들고 백래쉬 현상을 피할 수 있다.) 또는 저감소 케이블 구동 메카니즘과 같은 더 분명한 접근법이 요구되기 때문에, 비선형 동적효과의 명백한 양이 높은 성능을 요구하는 매니퓰레이터 아암에 잠재된 전체 동역학을 탐구하기 위해서 중요하게 되었다.

로봇의 위치는 조인트 각벡터  $q$ 에 의해서 묘사될 수 있고, 액츄에이터의 입력은 매니퓰레이터 조인트에 작용하는 벡터  $\tau$ 로 구성된다. 일반적으로 로봇 매니퓰레이터의 동역학은 비선형성이 강하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서,  $H(q)$ 는  $n \times n$  대칭 양의 한정 매니퓰레이터 관성 행렬이고,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 구심토크와 코리올리 토크의  $n \times 1$  벡터이다. 그리고  $G(q)$ 는 중력토크의  $n \times 1$  벡터이다.

이와 같은 피드백 제어 문제는, 상태 조인트 각벡터  $q$ 와 조인트 속도벡터  $\dot{q}$ 가 측정되면, 요구되는 과업(즉, 목표궤적을 따라 가는 것)을 실행하기 위해 요구되는 액츄에이터 입력을 계산하는 것이다.

## 2.2 로봇의 적응 제적 제어

이 절에서는 Slotine 과 Li[4]에 의해 전개된 적응제어 기에 대해 설명한다. 목표 궤적  $q_d(t)$ (목표위치, 속도, 가속도가 모두 경계가 있다고 가정한다.)가 주어지고, 어떤 또는 모든 매니퓰레이터 파라미터를 모른다면, 적응제어기 설계 문제는 액츄에이터 토크에 대한 제어 법칙과 미지의 파라미터에 대한 추정 법칙을 유도해서 매니퓰레이터 출력  $q(t)$ 가 목표궤적을 가깝게 추적하는 것이다. 이것을 위해서 파라미터 추정오차로써  $\tilde{a} = \hat{a} - a$ 를 정의한다. 여기서  $a$ 는 매니퓰레이터의 질량 성질을 나타내는 미지 파라미터의 상수 벡터이다. 그리고 변수위의  $\hat{\cdot}$ 는 추정치를 나타낸다.

이 제어기의 분석과 안정성 증명은 다음과 같은 Lyapunov 함수  $V(t)$ 를 사용하고, 에너지 보존법칙과 관성행렬  $H$ 의 양의 한정성과 같은 시스템의 근본적인 성질을 이용해서 행해진다. Lyapunov 함수  $V(t)$ 는

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T H s + \tilde{a}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}] \quad (2)$$

여기서  $\Gamma$ 는 대칭 양의 한정 행렬이다.

$$\dot{V}(t) = s^T (\tau - H\dot{\tilde{q}}_r - C\dot{q} - G) + \tilde{a}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}$$

이 시점에서 시스템에 대한 부가적인 물리적 성질을 얻을 수 있다. 즉, 매니퓰레이터의 질량 성질을 묘사하는 미지의 파라미터 벡터  $a$ 에 선형적으로 의존한다는 것이다. 이제 기지의 행렬  $Y = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \tilde{q}_r)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{H}(q)\ddot{q}_r + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q}_r + \hat{G}(q) \\ = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \tilde{q}_r)\hat{a} \end{aligned} \quad (3)$$

그래서 제어기는 P.D. 피드백 항과 특별한 형태의 피드포워드 항으로 구성된다. 보다 정확하게, 피드포워드 항은 본래의 동역학 성질을 소개하지 않고, 오히려 기준 궤적에 상응하는 토크를 보상한다. 이것은  $\dot{V}(t)$ 에 음수항을 첨가시킴으로서 총괄적인 수렴을 돕고 마찰보상에 대한 속도 추정을 필요 없게 한다. 그러므로, 속도가 0 일 때에는 부정확한 마찰모델 문제가 생략되고 쿨롱 마찰에 대한 어떠한 경계층 근사법도 필요하지 않다. 이것은 모든 마찰 문제에 대해서 명백하고 모든 마찰 토크는 속도만의 함수로 표현될 수 있다.

제어법칙은

$$\tau = Y\hat{a} - K_D s \quad (4)$$

이것은 “피드포워드” 항  $Y\hat{a}$  (이것은 강건 제어기의  $\hat{\tau}$ 항과 같다.)가 간단한 P.D. 항  $K_D s$ 와 함께 포함되

어서

$$\dot{V}(t) = s^T Y\tilde{a} - s^T K_D s + \tilde{a}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}$$

상관적분에 따라 파라미터 추정치  $\hat{a}$ 를 갱신하면

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma Y^T s \quad (6)$$

따라서

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s \leq 0 \quad (7)$$

이것은,  $s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_r$ 와 같이  $s$ 의 필드와 같은 정의가 주어지면 표현  $s = 0$ 에 출력오차가 수렴하고 따라서  $\tilde{q}$ 와  $\dot{\tilde{q}}$ 가  $t$ 가 무한대로 감에 따라 0으로 향한다는 것을 암시한다. 따라서 위의 적응 제어기에 의해서 제어의 전역 안정성(즉, 벡터  $\tilde{q}$ ,  $\dot{\tilde{q}}$ ,  $\hat{a}$ )과

추적오차의 수렴성 모두가 보장된다. 여기서,

$$\tilde{q} = q - q_d, \text{ 이고 } \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q} \text{ 이다.}$$

이 접근법은 반드시 미지의 파라미터를 정확히 추정할 필요가 없고, 단지 원하는 일을 달성시키는데 알맞은 값을 발생시킨다. 목표계좌상에 대한 “충분히 풍부한” 조건들은, 왜 목표계좌에 대한 요구가 추적수렴이 반드시 파라미터 수렴을 필요로 한다는 것을 분명히 한다. 또한 추적오차가 “접근적으로” 영으로 향할 뿐만 아니라, 실질적인 목적상 고주파 모델되지 않은 동력학과 측정잡음의 존재에 의해서 제한되는 이득 행렬  $\Lambda, K_D, \Gamma$  의 값에 의해서 주어진 궤적에 대해 결정된 유한 시상수 내에 수렴한다.

같은 매니플레이터를 구동하기 위하여 파라미터 벡터  $a$  을 계속 추정하는 것이 다소 파잉되 보일 수도 있지만, 단순히 로봇이 잡은 부하를 마지막 링크의 일부로서 간주하므로, 위 접근법의 실제적인 적절함은 매니플레이터가 움직일 수 있는 미지의 무거운 부하가 직접적으로 설명된다는 것이다. 실제로, 매니플레이터 자체의 질량 성질은 변하지 않기 때문에, 단지 부하의 질량 성질(이것은 기껏해야 10개의 파라미터로 묘사된다. 즉 부하질량, 질량 중심의 위치를 묘사하는 세개의 파라미터, 그리고 대칭 부하 관성 행렬을 묘사하는 6 개의 독립된 파라미터)에 대해서만 적용할 수 있다. 게다가 이 접근법은 몇몇 중요한 파라미터만 적용되어지는 경우(예를 들면, 계산을 간단하게 하기 위하여)까지 쉽게 확장되는 반면, 제어기는 다른 파라미터들의 선결추정치의 불확실성에 기인한 잔류오차(뿐만 아니라 정마찰과 같은 경계를 가진 부가적인 시변 외란)에까지 강건하다.

위에 주어진 적응 제어기를 사용하면, 액츄에이터의 대역폭을 증가시키지 않고도 로봇 매니플레이터의 성능을 향상시킬 수 있다. 이것은 큰 부하가 일반적으로 구조적 주파수를 감소시키고 사용가능한 대역폭을 상당히 제한하기 때문에 큰 부하를 다룰 때에 더욱 중요하다.

### 2.3 로봇의 비선형 적응제어의 반복형 수행

이 절에서는 Niemeyer[3]에 의해 전개된 새로운 반복형 알고리즘에 대한 설명이 상세히 주어진다. 다자유도 비선형 제어기를 수행함에 있어서 주된 장애는 계산이 복잡하다는 것이다. 이 사실은 특히 전체 동력학 보상을 사용하는 다자유도 매니플레이터 제어기에 해당된다. 따라서 필요한 계산을 미리 정하는 반복형 알고리즘을 전개하고 수행하는 것은 중요하다. 이것의 실행 시간이 자유도의 수에 비례하고 더 정확하게는 링크의 수에 비례하기 때문에 알고리즘은 다자유도 제어기에 필요한 효

율성을 제공한다.

강체 매니플레이터에 대한 동력학적 운동방정식을 물리적으로 고찰해 보면 반복형 뉴우튼-오일러 알고리즘을 이끌어 낼 수 있다. 이 알고리즘은 운동방정식에 의해 결정됨에 따라 주어진 위치, 속도, 가속도에 대해 요구되는 힘과 토크를 계산한다. 따라서 이것은 정확히 비선형 동력학을 소거하려 하는 계산 토크형 제어기의 효과적인 수행을 제공한다. 그렇지만 적응 슬라이딩 제어기는 비선형 동력학을 소거하지 않고 기준 속도를 도입하고 적용된 토크를 계산하는 동력학 방정식을 다소 변형시킨다. 그래서 이것은 정확한 운동방정식에 제한되는 뉴우튼-오일러 알고리즘을 이용할 수 없다. 이 분제에 대한 해답은 Walker[5,6]에서 제시되었다. 그리고 이 논문에서는 Slotine 과 Li[4]의 이론이 운동방정식의 반복형 뉴우튼-오일러 공식에 직접적으로 적용되고 있다. 도출된 알고리즘은 반복적이고 따라서 효율적이다. 그리고 본래의 적응 슬라이딩 제어기와 매우 유사한 수렴 성질을 갖는다. 그렇지만 차이점이 존재한다. 특히 계산된 토크의 조인트 공간상에서의 표현이 없고, 그러므로 도출된 다중입력 제어기의 어떠한 간단한 폐쇄형도 없다.

Slotine 과 Li[4]의 적응 슬라이딩 제어기를 정확히 제어하기 위해서 이 절에서는 새로운 반복형 알고리즘을 전개한다. 비록 이것은 뉴우튼-오일러 알고리즘과는 독립적으로 유도되었지만 기준 속도를 채택하도록 일반화되어서 유사한 형태를 취한다. 본래의 알고리즘처럼 이것은 기구학적 연쇄와 조인트구조에 관계없이 모든 강체 매니플레이터에 적용 가능하다.

대각 이득행렬  $\Gamma$  와  $K_D$  의 경우에 관련된 모든 방정식은 Table.1에 요약되어 있다. 이 알고리즘은 개방형 기구학적 연쇄를 가진 매니플레이터 뿐만 아니라 폐쇄형 기구학적 연쇄를 가진 매니플레이터에 대해서도 적용될 수 있다.

Table.1 Equation for the recursive implementation of the adaptive controller

<p>Initialization :</p> $\dot{w}_0 = -g_0$ <p>Kinematic recursive implementation :</p> $v_k = v_{k-1} + d_k \dot{q}_k$ $w_k = w_{k-1} + d_k \dot{q}_{rk}$ $\dot{w}_k = \dot{w}_{k-1} + d_k \ddot{q}_k + v_{k-1} \times d_k \dot{q}_{rk}$
--

Dynamic recursive implementation :

$$f_k^i = \frac{1}{2} v_k \times R_i w_k + \frac{1}{2} w_k \times R_i v_k$$

$$+ \frac{1}{2} R_i w_k \times v_k + R_i \dot{w}_k$$

$$F_k = F_{k+1} + \sum_{i=1}^n f_k^i \hat{a}_k^i$$

$$\tau_k = d_k^T F_k$$

$$\hat{a}_k^i = -\Gamma_1^i e_i^T f_i^i$$

### 3 실험

#### 3.1 실험장치

로봇의 선형 P.D. 제어와 비선형 적응제어를 비교하기 위해서 Fig.1과 같은 2 링크 스카라 로봇을 설계 제작하였다.

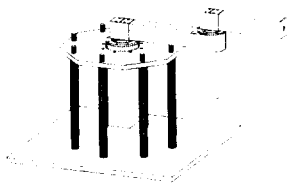


Fig.1 Two link SCARA robot

각각의 조인트에 부착된 모터는 감속기가 없이 직접 연결되었다.

실험장치의 전체적인 개략도는 Fig.2에 나타내었다.

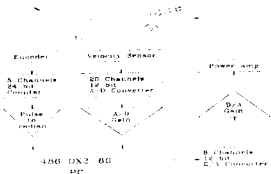


Fig. 3.2 Schematic diagram of experimental set-up

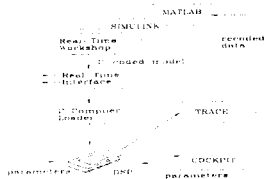


Fig.3.3 Combined development environment of The MathWorks and dSPACE products

인터페이싱(Interfacing)부에 대해서 간단히 설명해 보면 The MathWorks 사의 개발 소프트웨어인 MATLAB, SIMULINK, 그리고 Real-Time Workshop(RTW)를 dSPACE 사의 Real-Time Interface(RTI)와 연결해서 사용했다. 이것의 개략도를 Fig.3에 나타내었다.

#### 3.2 실험

Fig.1의 2 링크 스카라 로봇에 대한 P.D. 제어 및 적응제어를 실시하였다. 목표궤적은 모의실험과 마찬가지로

$$\theta_{d1} = \frac{\pi}{6} (1 - \cos 2\pi t), \theta_{d2} = \frac{\pi}{6} (1 - \cos 2\pi t)$$

로 한다. 결과는 Fig.4 부터 Fig.6 에 나타냈다. 이것들로부터 P.D.제어에 비하여 적응제어를 수행했을 때, 액츄에이터의 대역폭을 증가시키지 않고도 로봇 매니퓰레이터의 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 미지의 파라미터는 약 1초의 과도응답을 거친 후 로봇을 제어하기에 적절한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 이 실험결과는 적응제어기가 본질적으로 P.D.제어기와 마찬가지로 모델되지 않은 로봇 동역학에 대해 강건하고 P.D.제어기에 비해 추적 정밀도가 높음을 알 수 있다.

두 가지 제어기 모두에 대하여 이득행렬  $K_D$  와

$K_P = \Lambda K_D$  의 적절한 선택이 중요하다. 왜냐하면 큰 이득

값은 더 좋은 추적성능을 나타내지만 측정잡음과 모델되지 않은 고주파 동역학식에 덜 강건하기 때문이다.

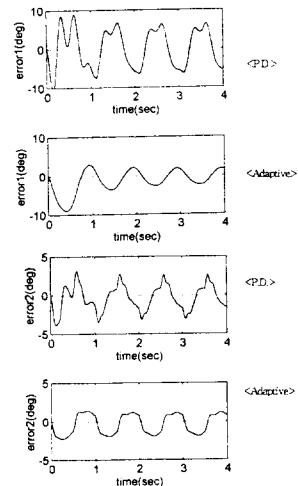


Fig.4 Position errors under P.D. control and adaptive control

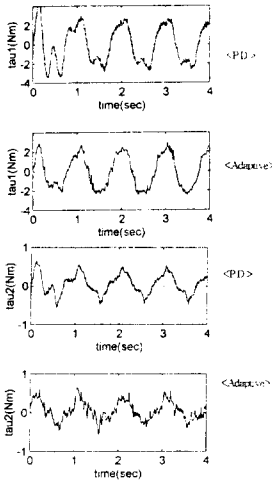


Fig.5 Control torques under P.D. control and adaptive control

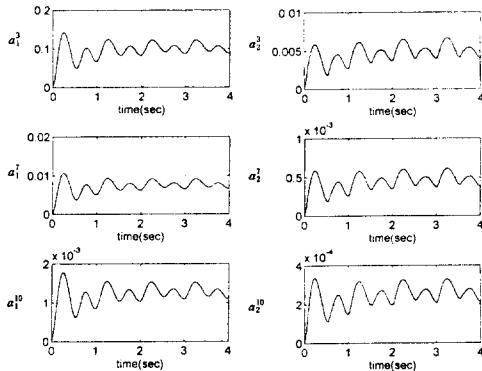


Fig.6 Parameter estimates of link 1 and 2 under adaptive control

#### 4. 결론

비선형 동특성을 고려한 로봇 매니퓰레이터의 P.D. 제어와 적응제어를 2 링크 스카라 로봇에 적용한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] P.D. 제어에 비하여 적응 제어를 사용하면, 액추에이터의 대역폭을 증가시키지 않고도 로봇 매니퓰레이터의 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이것은 큰 부하가 일반적으로 구조적 주파수를 감소

시키고 사용가능한 대역폭을 상당히 제한하기 때문에 큰 부하를 다룰 때에 비선형성을 고려한 적응제어의 도입이 더욱 중요하다는 것을 알 수 있다.

- [2] 적응제어시 미지의 파라미터 추정치들이 약 1초간의 과도응답을 거친 후 로봇을 제어하기에 적절한 값으로 수렴하는 것을 실험을 통해서 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Craig, J.J., Hsu, P. and Sastry, S., 1986, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," *I.E.E.E. Int. Conf. Robotics and Automation*, San Francisco.
- [2] Featherstone, R., 1987, *Robot Dynamics Algorithms*, Kluwer Academic Publishers.
- [3] Niemeyer, G., 1990, "Computational Algorithms for Adaptive Robot Control," MS Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT.
- [4] Slotine, J.-J. E., and Li W., 1990, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall.
- [5] Walker, M. W., 1988, "An Efficient Algorithm for the Adaptive Control of a Manipulator," *Proc. 5th Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.682~690.
- [6] Walker, M. W., 1990, "Adaptive Control of Manipulators Containing Closed Kinematic Loops," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.6, No. 1, pp.10~19.