

스카라로봇의 적응-슬라이딩모드 제어에 관한 연구

A Study on Adaptive-Sliding Mode Control of SCARA Robot

윤대식¹, 양승윤², 김휘동³, 한성현⁴

1. (주) 대우중공업

2. ADD

3. 연암공업전문대 (TEL : +82-591-751-2075)

4. 경남대 기계공학부 (TEL : +82-551-249-2624, E-mail : shhan@kyungnam.ac.kr)

Abstract

In this paper, it is proposed the adaptive-sliding mode control technique which is new approach to implement the robust control of industrial robot manipulator with external disturbances and parameter uncertainties.

Over the past decade, the design of advanced control systems for industrial robotic manipulators has been a very active area of research and two major design categories have emerged.

Sliding mode control is a well-known technique for robust control of uncertain nonlinear systems. The robustness of sliding model controllers can be shown in continuous time, but digital implementation may not preserve robustness properties because the sampling process limits the existence of a true sliding mode.

Adaptive control algorithm is designed by using the principle of the model reference adaptive control method based upon the hyperstability theory. The proposed control scheme has a simple structure is computationally fast and does not require knowledge of the complex dynamic model or the parameter values of the manipulator or the payload.

Simulation results show that the proposed method not only improves the performance of the system but also reduces the chattering problem of sliding mode control. Consequently, it is expected that the new adaptive sliding mode control algorithm will be suited for various practical applications of industrial robot control system.

1. 서 론

산업용 로봇(industrial robot)는 산업계에 다시 한번 산업혁명을 일으킨 주역이다. 산업용 로봇은 NC(numerical control) 기계와 여러 가지로 비슷하나 로봇은 NC보다 많은 운동의 축을 필요로 하며 보다 빠른 응답속도 및 다양한 작업조건에 대한 적응성을

요구한다. 즉, NC는 공간상의 한 점인 사용공구의 끝점만이 고려되나 로봇에서는 끝점 뿐만 아니라 끝점의 진행 방향과 위치도 고려되어야 한다. 따라서 로봇은 보다 많은 자유도와 진보된 소프트웨어 그리고 보다 효율적인 제어방식이 특히 필요하다. 따라서, 여러가지의 제어이론들이 개발되었으나, 아직도 실제적인 응용 면에 있어서는 여러 가지 문제점들이 대두되고 있는 실정이다. 그 중에서 대표적인 문제점 중의 하나는 복잡한 비선형성의 동특성을 지닌 실제 시스템에 대한 정확한 수학적 모델링이라고 할 수 있다.

특히, 산업용 로봇 매니플레이터는 각 관절 사이에 코리올리스(Coriolis)력 및 원심력 등과 같은 강한 비선형 및 불확실성을 지니고 있기 때문에 정확한 동특성의 모델링이 어려우므로 모델과 제어제에 대한 선형성의 가정 및 프로세서의 진행 중 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 것 등의 여러 가정 하에서 제어 알고리즘을 설계해 왔으므로 고도의 동역학적 성능이 요구될 경우에 이러한 가정 하에서 설계된 제어 알고리즘은 그 수렴 특성을 상실하게 됨으로서 좋은 제어 성능을 내지 못하게 된다. 또한 모델식이 구해진다 해도 작업환경의 변화나 부하변동과 같은 외란의 영향에 대처하면서 위치제어를 고속으로 수행하기란 상당히 어려운 문제이다.

VSC(variable structure control)이론을 근간으로 하는 슬라이딩 모드 제어는 비선형성, 파라미터 변동, 잡음 등에 대하여 강인한 제어시스템을 실현할 수 있는 제어이론으로 제어대상의 모델링시에 어느 정도의 불확실함이 포함되어있더라도 목표로 하는 제어를 수행 가능케 한다. 슬라이딩모드 제어의 원리는 오차상태공간내에 설정한 초평면의 양측에서 제어구조를 변환하여 슬라이딩모드를 발생시킴으로서 제어대상을 초평면(hypersurface)에 구속하는 것이다. 따라서 파라미터의 변동, 비선형성, 잡음 등에 둔감한 특성을 지닌 견실한 제어계를 실현할 수 있게 된다.

2. 본 론

2.1 가변구조 적응제어알고리즘

2.1.1 적응제어의 기본적인 설계방법

적응제어기법 중에서 본 연구에서는 기준모델적응기

법에 대하여 연구하고, 기준모델적용제어의 기본구조의 활용으로 새로운 적용제어 구조를 제시하고자 한다. 기준모델 적용제어의 설계기법에는 대표적으로 MIT규율에 의한 접근방법, 리아프노프함수에 의한 접근방법, 그리고 초안정도(hyperstability)이론에 의한 접근방법 등이 있다.

첫째, MIT 규율에 의한 기준모델 적용제어방법은 이상적으로 요구되는 기준모델의 출력과 실제 플랜트 모델에서 나오는 출력사이의 오차량의 제곱의 적분이 되는 성능지수 $J(= \int ||\text{기준모델의 출력} - \text{실제플랜트의 출력}||^2)$ 의 최소화에 기초를 두고 있다. 이 접근방법에는 구배법(gradient method), 급강하법(steepest decent method), 그리고 복소 구배법(conjugate gradient method)등이 있다. 하지만 이 MIT 규율을 이용한 기준모델 제어시스템의 설계시에는 온라인으로 유도되어야만 되는 민감함수(sensitivity function)의 사용이 요구되어지므로 페루프시스템의 대국적인 안정도(globally stable system)의 보장 및 비선형 제어시스템의 안정도 해석에는 충분한 안정성을 보장하지 못하는 단점이 있다.

둘째, 리아프노프 함수에 의한 접근방법에서는 오차로 기술된 미분방정식이 점근적으로 안정하다는 것을 보장하기 위한 파라미터 조정방정식(parameter adjusting equation)을 얻기 위해서 우선 기준모델의 출력과 플랜트의 출력사이의 오차로 기술되는 미분방정식을 얻어야한다. 이와 같이 하기 위해서 양으로 정의되는 리아프노프 방정식은 오차방정식으로 수식화되어야 하고 적용 메카니즘 방정식은 시스템의 안정성을 보장하기 위해 음으로 정의되는 리아프노프함수의 도함수로서 선택되어진다.

MRAC의 설계시 시스템들은 비선형, 시변시스템들을 포함하고 있기 때문에 안정성해석은 반드시 고려되어야할 아주 중요한 요소이다. 예전의 설계방법에서 보아왔듯이 불안정은 많은 입력들 또는 큰 계인들에 의해 일어난다고 할 수 있다. 견실한 제어기 설계를 위해 안정성의 관점은 반드시 고려되어야하고 이것은 리아프노프의 방법과 초안정도방법을 사용함으로써 행할 수 있다.

셋째, 초안정도(hyperstability)이론의 개념은 Fig. 1에서 나타내고 있는 페루프 시스템의 블록선도와 같이 기본적인 두개의 블록으로 구성된 비선형 시스템의 피이드백 제어 시스템의 안정도 해석에 주로 이용된다.

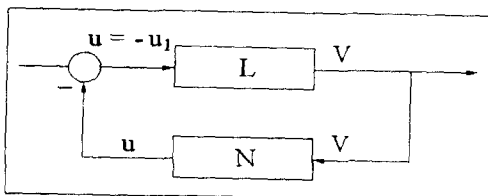


Fig. 1 Standard feedback system.

앞의 블록선도에서 L은 선형시불변블록의 전달함수를 나타내고 N은 비선형 시불변블록의 전달함수를 나타낸다. Fig. 1과 같은 n개의 입력과 m개의 출력을 변수로 하는 기본 시스템은 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$v = Cx + Du \quad (2)$$

$$u_1 = u \quad (3)$$

$$u(t) = F(v(\tau), t), \quad \tau \ll t \quad (4)$$

여기서 A, B, C 그리고 D는 상수 행렬이고, x는 상태벡터(n×1)이다. u와 v는 (m×1)벡터이다. $\gamma \ll t$ 일 때 F는 u와 v의 값들 사이의 관계를 정의하는 비선형 함수이다.

본 연구에서는 제안되고 있는 기준모델 적용제어 시스템의 점근적인 초안정(Asymptotically hyperstability)을 유지하기 위해서는 다음의 정리를 만족해야 한다.

정리1 : Fig. 1의 선형 시불변블록의 전달함수 L(s)이 SPR(strictly positive real)이어야 한다.

정리2 : Fig. 1에서 피이드백 블록의 비선형시변 블록은 다음과 같이 정의되는 Popov 적분 부등식(Popov integral inequality)을 만족하여야 한다.

$$\int_0^t u^T v dt \gg -\gamma_0^2 \quad (5)$$

여기서 v는 피이드백 블록의 입력 벡터이고, u는 피이드백 블록의 출력 벡터이다. 또한 γ_0^2 는 시간 t에 관계없는 제한된 양의 상수이다.

2.2.2 가변구조 적용제어기 설계

로봇트 매니플레이터의 관절 좌표의 동적 방정식은 직접 기구학을 이용하여 작업좌표의 동적 방정식으로 변환할 수 있다. 일반적으로 매니플레이터의 동적방정식을 비선형 결합(nonlinear coupling) 행렬방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (6)$$

여기서 q, \dot{q} , \ddot{q} 는 각각 관절각의 위치, 속도 및 가속도를 나타내고, $D(q) \in R^{n \times n}$ 은 대칭 정칙 관성행렬(n×n)이고, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 은 원심력과 코리올리스 벡터행렬(n×1), $G(q) \in R^{n \times 1}$ 은 중력벡터행렬(n×1), $\tau(t)$ 은 각 관절에 가해지는 관절 토크이다.

그리고 매니플레이터의 위치(작업좌표: x, y, z)와 방향(euler angle)벡터(6×1)와 관절각 벡터와의 기구학적 관계는 다음과 같다.

$$X_p = f(q) \quad (7)$$

여기서 X_p 는 매니플레이터의 위치 및 방향을 나타내는 벡터 행렬(6×1)이고, f(q)는 비선형 벡터행렬(n×1)이다.

또한, 식 (7)를 미분하여 매니플레이터의 속도를 구하면,

$$\dot{X}_p = J(q)\dot{q} \quad (8)$$

으로 정의된다. 여기서 $J(q)$ 는 매니플레이터의 Jacobian 행렬을 나타낸다.

그리고 작업좌표에서 매니플레이터를 제어하기 위해 필요한 입력힘벡터를 $U_p(t)$ 를 입력관절토크 $\tau(t)$ 와의 관계식으로 나타내면 다음과 같이 기술된다.

$$\tau(t) = J^T(q)U_p(t) \quad (9)$$

그리고, 매니플레이터의 가속도는 식 (6), (7), (8), (9)로부터

$$\begin{aligned} \ddot{X}_p &= J(q, \dot{q})\ddot{q} + J(q)\dot{\ddot{q}} \\ &- J(q, \dot{q})J(q)^{-1}\dot{X}_p \\ &+ J(q)D^{-1}(q)\{J^T(q)U_p(t) - h(q, \dot{q}) - G(q)\} \\ &- J(q, \dot{q})J(q)^{-1}\dot{X}_p - D^{-1}(q)\{h(q, \dot{q}) + G(q)\} \\ &+ D^{-1}(q)J^T(q)U_p(t) \end{aligned} \quad (10)$$

으로 정의된다. 여기서, 자코비안 $J(q)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$J(q) = \begin{bmatrix} -a_1S_1 - a_2S_{12} & -a_2S_{12} & 0 & 0 \\ a_1C_1 + a_2C_{12} & a_2C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

그리고 $J(q, \dot{q})$ 와 $J^{-1}(q)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$J(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -a_1\dot{q}_1C_1 - a_2\dot{q}_1C_{12} - a_2\dot{q}_2C_{12} & -a_2\dot{q}_1C_{12} - a_2\dot{q}_2C_{12} & 0 & 0 \\ -a_2\dot{q}_1C_{12} & -a_2\dot{q}_2S_{12} - a_2\dot{q}_1C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J^{-1}(q) =$$

$$\det \begin{bmatrix} a_1C_{12} & a_1S_{12} & 0 & 0 \\ -a_1C_1 - a_2C_{12} & -a_1S_1 - a_2S_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_2C_1S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -a_2C_1S_{12} & a_2C_1C_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\det = \frac{1}{-a_1a_2C_{12}S_{12} + a_1^2C_1S_{12} + a_1a_2C_{12}S_{12} - a_2^2C_{12}S_{12}}$$

매니플레이터의 상태변수는

$$X_s(t) = [X_p(t)^T, \dot{X}_p(t)^T]^T \quad (14)$$

$$U_s(t) = U_p(t) \quad (15)$$

으로 정의되고, 매니플레이터의 동적방정식을 상태 방정식으로 기술하면 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{X}_s(t) = A_s(t)X_s(t) + B_s(t)U_s(t) \quad (16)$$

여기서, $X_s(t)$ 는 상태 벡터행렬($n \times n$), $U_s(t)$ 는 입력 벡터행렬($n \times 1$), $A_s(t)$ 및 $B_s(t)$ 는 매개변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$A_s(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ J(q, \dot{q})J(q)^{-1} & D^{-1}(q)\{h(q, \dot{q}) + G(q)\} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B_s(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1}(q)J^T(q) \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 0 및 1는 각각 영벡터 행렬 및 단위벡터 행렬을 나타낸다.

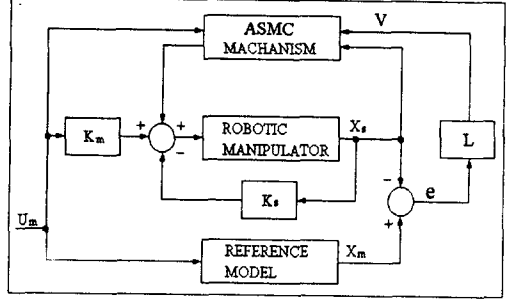


Fig. 2 Block diagram of adaptive-sliding mode control system.

본 연구에서 제안하고 있는 제어구조는 기준모델 적용 제어구조를 기본구조로 하여 설계되었다. 기준모델 적용 제어 시스템의 궁극적인 목적은 플랜트의 기준모델의 출력의 오차가 영이 되게 하는 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 가 되도록

하는 제어이득을 선정하여 플랜트인 로봇 매니플레이터의 동특성이 기준모델을 추종하도록 하는 것이므로 기준모델의 선정이 매우 중요하다. 그런데 각 관절의 자유도 (degree of freedom)가 상호 결합이 시변 비선형 (nonlinear)의 동특성을 지닌 로봇 매니플레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky 에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분방정식으로 선정하였다.

$$\ddot{X}_m + A_i \dot{X}_m + B_i X_m = U_m \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

여기서 $X_m = [X_m^T, \dot{X}_m^T]^T$ 으로 정의하고 이 식을 상태 공간 방정식(state space equation)으로 표기하면 다음 식과 같이 기술되어진다.

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U_m \quad (20)$$

여기서, 기준모델의 입력 및 출력의 상태변수는 다음과 같다.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \Omega_0 & \Omega_1 \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

이고 $\Omega_0 = -B_i$, $\Omega_1 = -A_i$ 이며 $A_i, B_i > 0$ 이다.

그리고 $X_m \in R^{2 \times n}$ 및 $U_m \in R^{n \times n}$ 는 각각 기준모델의 출력 및 입력의 상태변수를 나타내고 있다. 또한 기준모델과 플랜트의 출력오차 상태 방정식은 다음식과 같이 정의된다.

$$e(t) = X_m(t) - X_s(t) \quad (22)$$

$$v(t) = L e(t) \quad (23)$$

위의 식(22)에서 L 는 선형보상인자(linear compensator)이다. 그리고 제안된 매니플레이터의 적응슬라이딩모드 제어시스템(ASMC)의 제어입력은 Fig. 2 에서와 같은 제어구조에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$U_s(t) = \Phi_1(V, X_s, t)X_s(t) + \Phi_2(V, U_m, t)U_m(t) - K_v \dot{X}_s(t) + K_m U_m(t) \quad (24)$$

여기서, K , 및 K_m 은 각각 피이드백 게인 및 피이드 포워드 게인을 나타내고, Φ_1 및 Φ_2 는 슬라이딩 모드 제어구조를 내포한 적용제어칙으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\Phi_1(V, X_s, t) &= P_1 \|V\| \|X_s\| \text{sgn}(X_s)^T \\ \Phi_2(V, U_m, t) &= P_2 \|V\| \|U_m\| \text{sgn}(U_m)^T\end{aligned}\quad (25)$$

여기서, P_1 , P_2 는 단위벡터 적용제어칙의 게인으로서 (26)식의 조건을 만족하는 수로서 positive definite 이어야 한다.

$$\begin{aligned}P_1 &> (A_R) \max (A_D) \min \\ P_2 &> (A_S) \max (A_D) \min\end{aligned}\quad (26)$$

여기서 $(A_R) \max$ 및 $(A_S) \max$ 는 각각 $[RR^T]$ 및 $[SS^T]$ 에 대한 최대고유치를 나타내고 $(A_D) \min$ 는 $[D^{-1}]$ 에 대한 최소고유치를 나타낸다. 그리고 $[R]$ 과 $[S]$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$[R] = [K_S + B_S^T(A_m - A_s)][B_S]^{-1}\quad (27)$$

$$[S] = [B_S B_m - K_m][B_S]^{-1}\quad (28)$$

여기서 $B_s^{-1} (= [B_s^T B_s]^{-1} B_s^{-1})$ 는 가관성행렬(pseudo inertial matrix)을 나타낸다.

3 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

제안된 적용-슬라이딩모드 제어알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 스카라로봇의 1, 2관절의 속도 및 위치 추종성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 정현파 함수로 정의되는 위치 및 속도의 기준계적 성능시험을 위해 부하하중의 증가현상에 대한 제안된 제어기의 건설성평가를 위해 0.001sec의 샘플링시간으로 3초 동안 수행되었다. 프로그램언어는 볼랜드C를 사용하였으며 수치해석방법으로는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

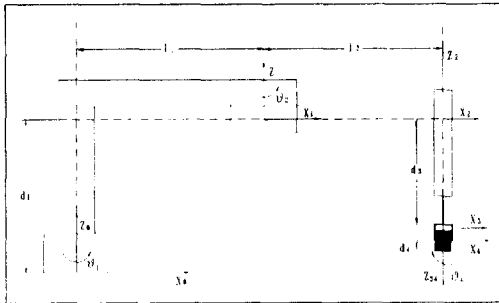


Fig. 3 D-H coordinates of SCARA robot.

3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 제안된 적용-슬라이딩모드 제어기의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 관절의 위치 및 속도의 기준계적 추적에 대한 성능시험의 결과를 Fig. 4 ~ Fig. 11에 나타내고 있다.

Fig. 4은 무부하시 기존의 슬라이딩모드 제어의 링크 1 및 링크 2의 궤적추적성능시험에 대한 추적응답 상태 및 추적오차에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 나타낸 결과에서와 같이 무부하에서는 슬라이딩모드 제어는 비록 다소의 추적오차가 존재하지만 기준계적을 비교적 잘 추적하는 제어성능을 보여주고 있지만, 관절1 및 관절2의 궤적추종성능을 비교해보면 커플링의 영향을 받고 있는 관절1의 궤적추종오차가 비교적 심하다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 2링크의 말단에 부하하중 1kg을 부가하였을 때의 기준계적에 대한 위치추적성능을 보여주고 있다. 초기오차는 무부하상태와 거의 다르지 않지만 부하하중이 증가함에 따라 슬라이딩모드제어의 단점인 입력신호에 비례한 채터링이 발생하고 있으며, 그 오차의 크기도 증가하고 있음을 볼 수가 있다. Fig. 6는 기존의 슬라이딩모드 제어기법을 사용하여 부하하중 3kg을 매니플레이터의 말단에 부가하였을 때의 위치추적성능을 보여주고 있다. 초기의 오차값이 상당히 증가하였으며, 기준계적에 대한 위치추적성능면에서도 슬라이딩모드 제어의 문제점인 채터링현상이 고정도의 제어를 어렵게 한다는 것을 알 수 있으며, 특히 1링크의 경우는 2링크에 비하여 그 오차의 크기가 크며 추적성능이 상당히 불량하다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 비단 부하하중의 증가 뿐만이 아니라, 로봇 매니플레이터의 자유도가 증가할 수록 상당히 심각한 문제점으로 대두된다.

Fig. 7 ~ Fig. 9는 본 논문에서 제안한 적용-슬라이딩모드 제어의 무부하, 1kg 및 3kg의 부하하중 변동에 따른 기준계적의 위치추적성능 결과를 나타내고 있다. Fig. 7은 무부하상태에서 적용-슬라이딩모드 제어의 위치추적성능을 나타내고 있는데, Fig. 7에 나타낸 슬라이딩모드 제어성능의 결과와 비교해 볼 때 위치추적 오차의 크기와 위치추적 응답속도 등에서 유사한 제어성능을 보임으로써 큰 성능의 차이를 보이고 있지는 않다. 하지만, 부하하중이 1kg 부가된 Fig. 8은 제안된 적용-슬라이딩모드 제어의 우수한 성능을 잘 보여주고 있다. Fig. 5과 Fig. 8을 비교해 보면 부하하중의 변동에도 제안된 적용-슬라이딩모드제어는 상당히 안정된 제어성능을 보이고 있을 뿐만 아니라, 기준계적의 위치 추종시 발생하던 채터링과 초기의 오차 및 기준계적 도달시간이 많이 단축되었음을 볼 수가 있다. Fig. 9은 최대 부하하중 3kg을 부가하였을 때의 적용-슬라이딩모드제어의 위치추적성능을 나타내고 있는데, Fig. 6에서 볼 수 있었던 심한 채터링이 상당히 감소되었고 그 오차의 크기와 기준계적에 도달하는 시간

등이 적응-슬라이딩모드 제어기법에 의해 상당히 개선되었음을 보여주고 있다.

Fig. 10 ~ Fig. 13은 슬라이딩모드 제어와 적응슬라이딩모드 제어를 사용하여 무부하와 3kg의 부하하중을 고려한 속도추적성능의 결과를 비교하여 나타내고 있다. Fig. 10과 Fig. 11는 무부하상태에서 슬라이딩모드 제어와 적응슬라이딩모드 제어의 속도추적성능을 각각 나타내고 있다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 슬라이딩모드 제어의 단점인 채터링현상이 속도추적시에 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 적응-슬라이딩모드 제어의 속도추적성능을 나타낸 Fig. 11을 보면, 본 논문에서 제안한 적응슬라이딩모드 제어를 사용함으로써 이러한 채터링현상이 많이 감소되었음을 볼 수 있다. 무부하상태 뿐만 아니라 3kg 부하하중이 고려된 속도추적성능을 나타내고 있는 Fig. 12과 Fig. 13를 비교해 보면 알 수 있듯이 슬라이딩모드 제어의 경우는 부하하중이 증가함에 따라 더욱 더 큰 오차와 심한 채터링이 발생하고 있음을 볼 수 있으나 제안된 적응-슬라이딩모드 제어는 이러한 오차 및 채터링현상이 감소되므로써 상당히 안정된 성능을 보이고 있다. 따라서, 제안된 적응-슬라이딩모드 제어는 슬라이딩모드 제어의 단점인 입력토크의 증가현상에 비례한 채터링을 상당히 감소시킬 뿐만 아니라, 오차의 감소와 위치 및 속도추적성능을 향상시키는 견실한 제어방법이라는 것을 검증할 수 있었다.

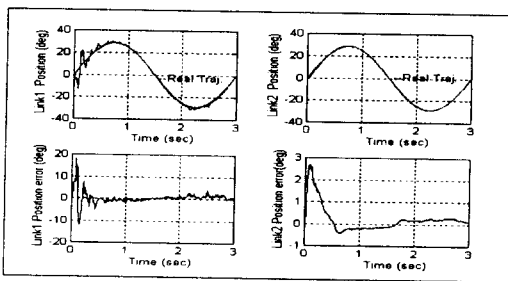


Fig. 4 Control performance of sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with no-payload.

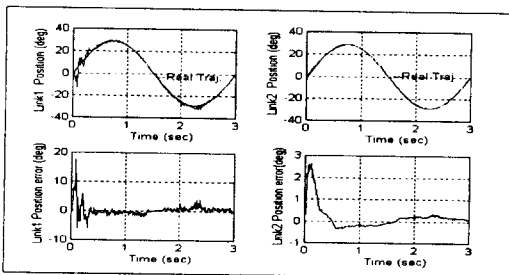


Fig. 5 Control performance of sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(1kg).

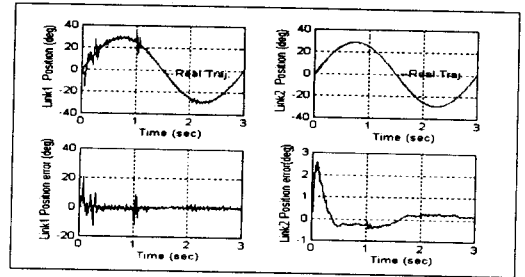


Fig. 6 Control performance of sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg).

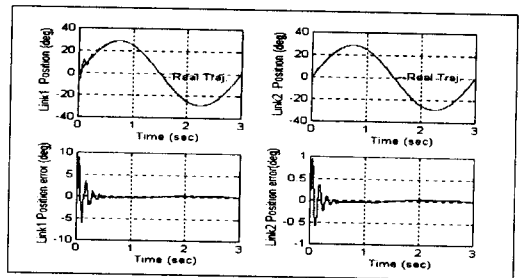


Fig. 7 Control performance of adaptive-sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with no-payload.

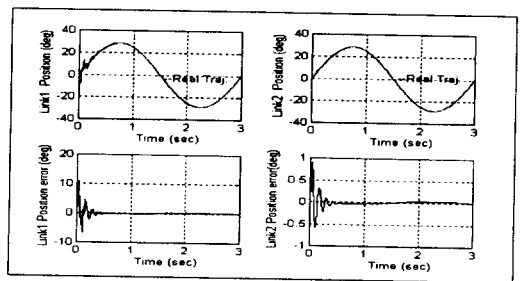


Fig. 8 Control performance of adaptive-sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(1kg).

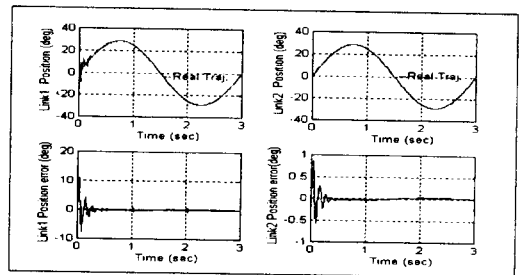


Fig. 9 Control performance of adaptive-sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg).

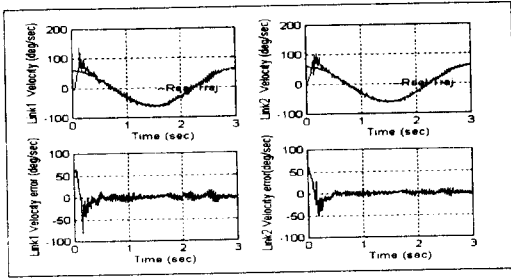


Fig. 10 Control performance of sliding mode control for velocity trajectory tracking of link 1, 2 with no-payload.

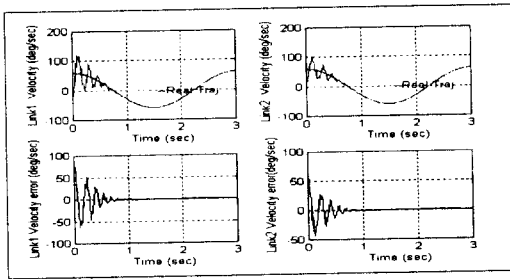


Fig. 11 Control performance of adaptive sliding mode control for velocity trajectory tracking of link 1, 2 with no-payload.

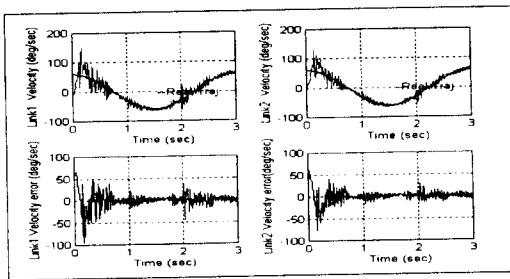


Fig. 12 Control performance of sliding mode control for velocity trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg).

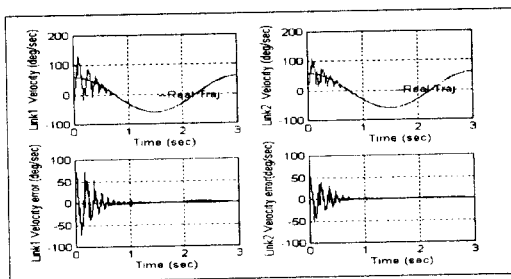


Fig. 13 Control performance of adaptive-sliding mode control for velocity trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg).

4. 결 론

본 논문에서는 복잡한 동특성을 지니는 산업용 로봇의 위치 및 속도의 견실한 제어를 위하여 적응제어 구조와 슬라이딩모드제어구조를 결합하여 부하변동 및 미지의 외란이 존재하는 경우에도 항상 신속하고 정밀한 제어능력이 유지될 수 있는 새로운 견실제어기법인 적응-슬라이딩모드제어에 관한 연구를 수행하였다. 제안된 적응-슬라이딩모드 제어구조는 적응제어구조를 바탕으로 하여 외란에 대한 견실한 제어특성을 지니는 슬라이딩모드 제어의 장점을 결합시킨 제어기법으로써 미지의 외란 및 부하하중 변동 등에 대한 견실성을 기존의 산업용 로봇의 제어기에 비하여 더욱더 향상시킨 제어구조라 할 수 있다.

또한, 제안된 적응-슬라이딩모드 제어구조의 특성은 기존의 슬라이딩모드제어의 단점인 입력신호에 비례한 채터링의 증가현상을 경감시키므로써 외부외란에 더욱 강인한 고속 고정도의 제어특성을 지닌다는 것이 시뮬레이션 실험을 통하여 입증됨으로서 제어성능의 견실성을 확인할 수 있었다.

향후 연구내용으로는 현재 진행 중에 있는 디지털 시그널 프로세서(digital signal processor; TMS320C50)를 사용한 DSPs 제어기의 설계를 완료하고 신뢰성 확인을 위한 실험완료 후 본 연구에서 제안한 적응-슬라이딩모드 제어기의 실제 산업용 로봇모델에의 적용을 연구하고자 한다.

참고문헌

- (1) M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics And Control," John Wiley & Sons, Inc., pp.335-373, 1989.
- (2) R. Isermann, K.H. Lachmann, and D. Matko, "Adaptive Control," Prentice Hall Inc. pp. 387-512, 1992.
- (3) K.S. Narendra and A.M. Annaswamy, "Stable Adaptive Systems," Prentice Hall Inc. pp.21-97, 1989.
- (4) B.S. Chen and C.M. Lin, "Multipurpose adaptive control in deterministic multivariable systems," IEEE Proc. Vol.135, Pt.D, No. 4, 1988.
- (5) S. Dubowsky and D.T. DesForges, "The Application of Model Reference Adaptation Control to Robot Manipulators," ASME J. Dyn. Syst., Meas., Contr., Vol.101, pp. 193-200, 1979.
- (6) 진상영, 이민철, 이만형, "슬라이딩 모드제어를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구", 한국 자동제어 학술대회논문집, Vol. 2, pp.1031~1035, 1993.