

## 스카라로보트의 적용-슬라이딩모드 제어에 관한 연구

### ( A Study on Adaptive-Sliding Mode Control of SCARA Robot )

윤대식, 차보남(경남대 대학원), 김경년(거제전문대), 한성현(경남대)

D.S.Yoon, B.N.Cha(Graduate School Kyoungnam Univ.), K.Y.Kim(Kejei Junior College), S.H.Han(Kyoungnam Univ.)

**Keyword :** (적용-제어)adaptive control, (슬라이딩모드제어)sliding mode control, (초안정도)hyperstability,

(견실성)robustness

**Abstract :** In this paper, adaptive control and sliding mode control are combined to implement the proposed adaptive sliding mode control(ASMC) algorithm which is new approach to the control of industrial robot manipulator with external disturbances and parameter uncertainties. Adaptive control algorithm is designed by using the principle of the model reference adaptive control method based upon the hyperstability theory. The contribution of this method is that the parameters of the sliding surface are replaced by time varying parameters whose value are calculated by an adaptation algorithm, which forces the errors to follow the behavior of a reference error model. 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.

#### 1. 서 론

최근 제어이론은 산업의 발전과 더불어 눈부신 발전을 거듭 하여 왔음에도 불구하고 아직도 실제적인 응용 면에 있어서는 여러 가지 문제점들이 대두되고 있는 실정이다. 그 중에서 가장 큰 문제점 중의 하나는 복잡한 비선형성의 동특성을 지닌 실제 시스템에 대한 정확한 수학적 모델링이라고 할 수 있다.

특히, 산업용 로보트 매니퓰레이터는 각 관절 사이에 코리올리스(Coriolis)력 및 원심력 등의 강한 비선형 양성( nonlinear coupling)의 성질을 지니고 있기 때문에 정확한 동특성의 모델링이 어려워 모델과 제어계에 대한 선형성의 가정 및 프로세서의 진행 중 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 것 등의 여러 가정 하에서 제어알고리즘을 설계해 왔으므로 고도의 동력학적 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 불확실성이 포함되며

라도 목표로 하는 제어를 수행 가능케 한다. 슬라이딩모드제어의 원리는 오차상태공간내에 설정한 초평면의 양측에서 제어구조를 변환하여 슬라이딩모드를 발생시킴으로서 제어대상을 초평면에 구속하는 것이다. 따라서 파라미터의 변동, 비선형성, 잡음 등에 둔감한 특성을 지닌 견실한 제어계를 실현할 수 있게 된다. 그러나 산업용 로보트에 슬라이딩모드제어를 적용시킬 경우, 제어대상은 불확실한 파라미터에 대해서는 매우 견실한 특성을 지니는 반면, 오차상태 공간의 절환면에 도달할 때까지의 시간이 요구될 뿐만 아니라 제어입력에 비례하여 채터링이 발생하게 된다. 특히 매니퓰레이터의 자유도가 높아질 수록 이러한 채터링과 연산시간지연은 가중되고 이러한 현상이 고속도 고정도의 제어를 어렵게 하는 슬라이딩모드제어의 단점으로 지적되고 있다.

한편, 적용제어 방식은 플랜트의 동특성에 대한 제한된 정보만을 가지고 예측할 수 있는 불확실성에 대처할 수 있는 진보된 제어 방식이라 할 수 있다.

적용제어 기법에는 크게 기준모델 적용제어(model reference adaptive control) 방식과 자기동조적응제어(self-tunning adaptive control) 방식<sup>[1-3]</sup>의 두 가지로 나눌 수 있다. 후자의 자기동조적응제어 방식은 대상 시스템의 특성을 추정하면서 추정된 매개변수를 바탕으로 적절한 제어기를 구성하는 것으로써, 이는 1970년대 Astrom 과

Wittenmark에 의해 제안되었으며 이미 많은 응용 결과가 보고되어 왔고, 전자의 기준모델 적용제어 방식은 원하는 동특성을 갖는 기준모델을 설정하여 이 기준모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치하도록 플랜트의 파라메타를 조정하는 방식으로써 직접 적용제어(direct adaptive control)와 간접 적용제어(indirect adaptive control) 방식<sup>(1)-(3)</sup>으로 구분된다.

직접 적용제어 방식에서는 플랜트와 제어계를 포함한 전체 제어 계의 전달 함수가 원하는 기준모델의 전달 함수와 일치하도록 하기 위하여 플랜트의 출력과 모델의 출력사이의 오차를 적용제어법(adaptive control law)에 사용하는 반면에, 간접 적용제어(indirect adaptive control) 방식은 플랜트의 매개변수를 추정하여 제어기의 매개변수를 조정하도록 하는 방식인데, 이 방식은 효율적인 연산이 가능한 on-line 상태 추정자를 구성해야 하는 단점이 있으므로 보편적으로 직접 적용제어 방식이 많이 사용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 슬라이딩모드 제어구조의 특성을 직접 적용제어방식의 적용제어법에 포함시킴으로서 부하의 변동 및 외란의 증가에 대해서도 정확한 궤적 추종의 제어가 가능한 견실한 적용슬라이딩보드제어<sup>(6)-(7)</sup>를 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 제 2절에서 로보트 매니퓰레이터의 기구학적 이론 및 동적 모델링에 한 기본 이론을 전개하고, 제 3절에서 안정한 제어기의 설계를 위한 제어 알고리즘과 초안정(hyperstability) 이론을 통한 안정성 해석을 다룬다.

그리고 제 4절에서 제안된 제어기의 성능 평가를 위해 4관절 로보트인 스카라로보트 매니퓰레이터에 대한 시뮬레이션을 통해 그 결과를 슬라이딩모드 제어기법에 의한 결과와 비교 검토함으로써 제안된 제어기의 성능을 입증하고자 한다.

## 2. 동적방정식의 유도

스카라형 로보트는 세 개의 회전관절과 한 개의 병진관절로 구성되어 있다. 매니퓰레이터를 강성체로 가정하고, 운동방정식을 라그랑지법으로 유도하면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (1)$$

여기서 원쪽 첫 번째 항은 관성행렬( $4 \times 4$ ), 두 번째 항은 원심력과 코리올리리력벡터( $4 \times 1$ ), 세 번째 항은 중력항( $4 \times 1$ ), 오른쪽 항은 토크값( $4 \times 1$ )을 각각 나타낸다. 식 (1)을 각 링크에 대한 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{11}\ddot{q}_1 + D_{12}\ddot{q}_2 + D_{14}\ddot{q}_4 + D_{12}\dot{q}_1\dot{q}_2 + h_{12}\ddot{q}_2 &= \tau_1 \\ D_{21}\ddot{q}_1 + D_{22}\ddot{q}_2 + D_{24}\ddot{q}_4 + h_{21}\ddot{q}_1 &= \tau_2 \\ D_{33}\ddot{q}_3 + G_3 &= \tau_3 \\ D_{41}\ddot{q}_1 + D_{42}\ddot{q}_2 + D_{44}\ddot{q}_4 &= \tau_4 \end{aligned} \quad (2)$$

매니퓰레이터의 관성행렬 ( $4 \times 4$ )인  $H$ 와 행렬의 각 요소를 나타내면 다음과 같다.

$$D = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$D_{11} = m_1L_{c1}^2 + I_1 + m_2(L_{c1}^2 + L_{c2}^2 + 2L_1L_{c2}\cos q_2) + I_2 + (m_3 + m_4)(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos q_2) + I_3$$

$$D_{12} = D_{21} = m_2(L_{c2}^2 + L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos q_2) + I_2 + (m_3 + m_4)(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos q_2) + I_3$$

$$D_{22} = m_2L_{c2}^2 + I_2 + m_3L_{c2}^2 + m_4L_{c2}^2 + I_4$$

$$D_{34} = D_{43} = D_{11} = -I_4$$

$$D_{44} = I_1$$

$$D_{13} = D_{31} = D_{23} = D_{32} = D_{34} = D_{43} = 0$$

각 요소의 항들을 살펴보면 각 링크의 파라메타 변수인  $q_i$ ,

$q_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ 가 포함되어 있어 로보트의 운동방정식이 형상종속임을 알 수 있다.

코리올리력과 원심력을 앞의 관성행렬  $D$ 를 이용하여 유도할 수 있으며, 코리올리력과 원심력항의 일반적인 식은 다음과 같다.

$$h_{jk} = \frac{\partial H_{ij}}{\partial q_k} - 0.5 \frac{\partial H_{ik}}{\partial q_j} \quad (4)$$

여기서 스카라형 로보트에 적용하여 각 항 ( $i, j, k = 1, 2, 3, 4$ )에 대해 구하면, 영의 값을 갖지 않는 항들은 다음과 같다.

$$h_{12} = -2m_2L_1L_{c2}\sin q_2 - 2(m_3 + m_4)L_1L_2\sin q_2$$

$$h_{12} = -m_2L_1L_{c2}\sin q_2 - (m_3 + m_4)L_1L_2\sin q_2$$

$$h_{21} = m_2L_1L_{c2}\sin q_2 + (m_3 + m_4)L_1L_2\sin q_2$$

$$h_{21} = -0.5[m_2L_1L_{c2}\sin q_2 + (m_3 + m_4)L_1L_2\sin q_2] = -h_{12}$$

$G_i$ 는 중력을 나타내는 항으로써 다음과 같이 정의된다.

$$G_i = \sum_{l=1}^4 m_l G^T J_l^{(i)} \quad (5)$$

여기서 링크 1,2,4의 운동방향이 중력 영향을 받지 않기 때문에 다음과 같이 영의 값을 가지며, 병진운동을 하는 링크 3 만이 중력항을 포함함을 알 수 있다.

$$G_1 = G_2 = G_4 = 0$$

$$G_3 = -g(m_3 + m_4)$$

### 3. 제어계구성

#### 3.1. 슬라이딩 모드 제어알고리즘

비선형 미분방정식으로 표현되는 4 자유도 로보트 매니퓰레이터에 대해서 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위한 절환파라미터를 유도하는 것은 쉽지 않다. 그러나 식 (2)~(4)에 나타나는 비선형성분을 모두 외란으로 간주하면 선형시스템의 경우와 같이 절환파라미터를 쉽게 유도할 수 있다.

4자유도 매니퓰레이터의 간단화된 운동방정식을 가지는 시스템에 대하여 시스템이 슬라이딩 모드상에 존재하도록 하는 절환파라미터를 유도하기 위해 매니퓰레이터의  $i$  관절의 목표각도, 각속도, 각가속도를 각각  $q_d^i$ ,  $\dot{q}_d^i$ ,  $\ddot{q}_d^i$ 로 두고 측정한 각도를 각각  $q_i$ 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_i &= q_i - q_d^i \\ \dot{e}_i &= \dot{q}_i - \dot{q}_d^i \end{aligned} \quad (6)$$

$e_i$  와  $\dot{e}_i$ 를 상태로 하는 오차상태공간 상에서 각 축에 대하여 슬라이딩 모드가 발생하는 절환선을 다음과 같이 정의한다.

$$l_i = \alpha_i e_i + \dot{e}_i \quad (7)$$

비선형성분을 외란으로 가정하였으므로 외란으로 간주된 항들에 의해 슬라이딩모드의 존재조건을 벗어나는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 실제 외란의 영향을 억제하면서 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키기 위해서 다음과 같은 외란에 대응할 수 있는 적절한 제어입력을 정의한다.

$$u_i = \rho_a e_i + \rho_{\beta i} + \rho_{\beta i} \dot{q}_d^i + \rho_{\gamma i} \ddot{q}_d^i \quad (8)$$

$$\rho_{\beta i} = \begin{cases} \beta_i & \text{if } l_i e_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } l_i e_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_{\beta i} = \begin{cases} u_i^- & \text{if } l_i > 0 \\ u_i^+ & \text{if } l_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\rho_{\gamma i} = \begin{cases} \delta_i & \text{if } l_i \dot{q}_d^i > 0 \\ -\delta_i & \text{if } l_i \dot{q}_d^i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\rho_{\gamma i} = \begin{cases} \gamma_i & \text{if } l_i \ddot{q}_d^i > 0 \\ -\gamma_i & \text{if } l_i \ddot{q}_d^i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\rho_f = \begin{cases} u_i^- = M_{1i} + M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } l_i > 0 \\ u_i^+ = -M_{1i} - M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } l_i < 0 \end{cases} \quad (13)$$

단,  $f(e_i) = |e_i|$

여기서  $\rho_{\beta i}$  와  $\rho_{\gamma i}$ 는 케도제어를 수행할 때  $q_d^i$ ,  $\dot{q}_d^i$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하기 위한 입력으로 피드 포워드(feed forward)요소이며,  $\rho_f$ 는 외란의 영향을 억제하기 위한 제어입력이다.  $\rho_f$

에서  $M_1$ 은 외란의 최대값을 고려하여 그 크기를 결정한다.

제  $i$ 관절에서 슬라이딩모드가 발생하기 위해서는 슬라이딩모드의 존재조건을 만족해야 하며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$l_i l_i' = l_i(\alpha_i e_i + \dot{e}_i) < 0 \quad (14)$$

식 (14)를 만족하도록 정리하면 각 절환파라미터의 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} k_i \alpha_i + B_i \alpha_i - J_i \dot{e}_i^2 < 0 & \text{if } l_i e_i > 0 \\ -k_i \alpha_i + B_i \alpha_i - J_i \dot{e}_i^2 > 0 & \text{if } l_i e_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} u_i^- = Q_{1i} + Q_{2i} \times |\dot{e}_i| < F_i/k_i & \text{if } l_i > 0 \\ u_i^+ = Q_{1i} - Q_{2i} \times |\dot{e}_i| > F_i/k_i & \text{if } l_i < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} k_i \delta_i - B_i < 0 & \text{if } l_i \dot{q}_d^i > 0 \\ -k_i \delta_i - B_i > 0 & \text{if } l_i \dot{q}_d^i < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} k_i c_i - J_i < 0 & \text{if } l_i \ddot{q}_d^i > 0 \\ -k_i c_i - J_i > 0 & \text{if } l_i \ddot{q}_d^i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

#### 3.2. 적용슬라이딩모드 제어알고리즘

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

$$D(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (19)$$

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

그리고 매니퓰레이터의 손끝(hand end)의 위치 (작업좌표:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ )와 방향(euler angle)벡터 ( $6 \times 1$ )와 관절각 벡터와의 기구학적 관계는 다음과 같다.

$$X_p = f(q) \quad (20)$$

여기서  $X_p$ 는 매니퓰레이터의 위치 및 방향을 나타내는 벡터 행렬( $6 \times 1$ )이고,  $f(q)$ 는 비선형 벡터행렬( $n \times 1$ )이다.

또한, 식 (20)를 미분하여 매니퓰레이터의 손끝의 속도를 구하면,

$$\dot{X}_p = J(q) \dot{q} \quad (21)$$

이 되는데 여기서  $J(q)$ 는 매니퓰레이터의 Jacobian 행렬을 나타낸다.

그리고 작업좌표에서 매니퓰레이터를 제어하기 위해 필요한 입력힘벡터를  $U_p(t)$ 를 입력관절토오크  $\tau(t)$  와의 관계식으로

나타내면 다음과 같이 기술된다.

$$\tau(t) = J^T(q) U_p(t) \quad (22)$$

그리고, 매니퓰레이터의 가속도는 식 (19), (20), (21), (22)로부터

$$\begin{aligned} \ddot{X}_p &= J(q, \dot{q})\ddot{q} + J(q)\dot{\ddot{q}} \\ &= J(q, \dot{q})J(q)^{-1}X_p \\ &\quad + J(q)D^{-1}(q)[J^T(q)U_p(t) - h(q, \dot{q}) - G(q)] \quad (23) \\ &= J(q, \dot{q})J(q)^{-1}\dot{X}_p - [D^{-1}(h(q, \dot{q}) + G(q))]X_p^{-1}X_p \\ &\quad + D^{-1}(q)J^T(q)U_p(t) \end{aligned}$$

으로 주어진다. 그러므로 매니퓰레이터의 상태변수를 정의하고 매니퓰레이터의 동적방정식을 상태 방정식으로 기술하면 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{X}_p(t) = A_s(t)X_s(t) + B_s(t)U_s(t) \quad (24)$$

여기서,  $X_s(t)$ 는 상태 벡터행렬( $n \times n$ ),  $U_s(t)$ 는 입력벡터 행렬( $n \times 1$ ),  $A_s(t)$  및  $B_s(t)$ 는 매개변수로서 다음과 같다.

$$A_s(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ J(q, \dot{q})J(q)^{-1} & D^{-1}[h(q, \dot{q}) + G(q)]X_p^{-1} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B_s(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1}(q)J^T(q) \end{bmatrix} \quad (26)$$

여기서 0 및 1은 각각 영벡터 행렬 및 단위벡터 행렬을 나타낸다.

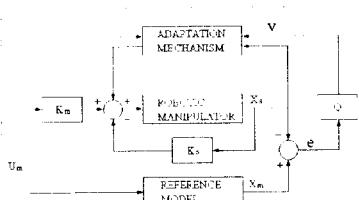


Fig. 1 Block diagram of model reference adaptive control system

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

을 선정하여 플랜트인 로보트 매니퓰레이터의 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 로보트 매니퓰레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분방정식으로 선정하였다.

$$\ddot{X}_{mi} + A_i \dot{X}_{mi} + B_i X_{mi} = U_{mi}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$X_m = [X_m^T \quad \dot{X}_m^T]^T$$

(state space equation)으로 표기하면 다음 식과 같이 기술되어진다.

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U_m \quad (28)$$

여기서

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ Q_0 & Q_1 \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

이고  $Q_0 = -B$ ,  $Q_1 = -A$ 이며  $A, B > 0$ 이다. 그리고  $X_m \in R^{n \times n}$  및  $U_m \in R^n$ 은 각각 기준모델의 출력 및 입력의 상태변수를 나타내고 있다.

또한 기준모델과 플랜트의 출력오차 상태 방정식은 다음과 같다.

$$e(t) = X_m(t) - X_s(t) \quad (30)$$

$$r(t) = L e(t) \quad (31)$$

위의 식 (31)에서  $L$ 은 선형보상인자(linear compensator)이다. 그리고 제안된 매니퓰레이터의 기준모델 적용 제어시스템(MRAC)의 제어입력은 Fig. 1에서와 같은 제어구조에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$U_s(t) = \Phi_1(V, X_s, t)X_s(t) + \Phi_2(V, U_m, t)U_m(t) - K_s \dot{X}_s(t) + K_m U_m(t) \quad (32)$$

여기서,  $K_s$  및  $K_m$ 은 각각 피드백 계인 및 피드포워드 계인을 나타내고,  $\Phi_1$  및  $\Phi_2$ 는 슬라이딩 모드 제어구조를 내포한 적용제어식으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(V, X_s, t) &= P_1 \|V\|^{-1} \operatorname{sgn}(X_s)^T \\ \Phi_2(V, U_m, t) &= P_2 \|V\|^{-1} \operatorname{sgn}(U_m)^T \end{aligned} \quad (33)$$

여기서,  $P_1$ ,  $P_2$ 는 단위벡터 적용제어식의 계인으로서 (34)식의 조건을 만족하는 수로서 p.d.(positive definite)이어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 &> (A_R) \max(A_D) \min \\ P_2 &> (A_S) \max(A_D) \min \end{aligned} \quad (34)$$

여기서  $(A_R) \max$  및  $(A_D) \min$ 은 각각  $[RR^T]$  및  $[SS^T]$ 에 대한  $X_S$ 의 고유치의 실수부의 최소치를 나타낸다. 그리고  $[R]$  과  $[S]$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$[R] = [K_S + B_S^+ (A_m - A_s)] [B_s]^{-1} \quad (35)$$

$$[S] = [B_s^+ (B_m - B_s) - K_m] [B_s]^{-1} \quad (36)$$

여기서  $B_s^+ = (B_s^T B_s)^{-1} B_s^{-1}$ 으로 정의된다.

### 3.3. 안정도 해석

일반적으로 모델추종 적용제어 시스템의 안정성 해석에 있어서는 우선 그 시스템의 플랜트 및 기준모델의 파라미터 구조적 특성에 의하여 결정되어지는 구조적 완전모델 추종조건 (structural perfect model following condition)을 언급하여야 한다.

그러나 본 연구에서 제안하고 있는 직접 적용제어방식은 시간이 지남에 따라 상태오차( $e = X_m - X_s$ )가 "0"으로 수렴하는 구조를 갖도록 제어기를 설계하므로 이 방식은 모델의 구조적인 특성에 의한 완전모델 추종조건을 언급하지 않아도 된다.

그리고 제안된 Fig. 1의 기준모델 적용제어 시스템은 식 (27), (28), (32)로부터 다음과 같이 상태오차에 대한 방정식으로 기술되어진다.

$$e = A_m e + [0 : 1] W \quad (37)$$

$$V = Le \quad (38)$$

$$\begin{aligned} W_1 &= -W \\ &= [B_s] ([B_s^+] ([A_m] - [A_s]) \\ &\quad + K_s - \Phi_1) X_s + [B_s] ([B_s^+] [B_m] \\ &\quad - K_m + \Phi_2) U_m \end{aligned} \quad (39)$$

또한, 위의 식 (37), (38), (39)은 선형 시불변 피드포워드(linear time invariant feedforward)블록과 비선형시변(nonlinear time varying)의 피드백 블록으로서 구성되는 Fig. 1의 제어 시스템에 대한 동가표시(equivalent representation)를 Fig. 2와 같이 구성시킬 수 있다. Fig. 2에서  $G_r(s)$ 은 선형시불변(linear time invariant)블록의 전달함수이고,  $G_b(s)$ 는 비선형 시불변(nonlinear time varying)블록의 전달함수를 나타내고 있다.

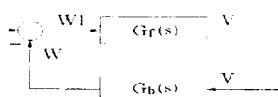


Fig. 2 Equivalent representation of model reference adaptive control system

본 연구에서 제안되고 있는 Fig. 2의 직접 적용방식에 의한 기준모델 적용제어 시스템의 점근적인 초안정(Asymptotically hyperstability)을 유지하기 위해서는 다음의 정리를 만족해야 한다.

정리1 : Fig. 2의 선형 시불변블록의 전달함수  $G_r(s)$ 이 SPR(strictly positive real)이어야 한다.

정리2 : Fig. 2에서 피드백의 비선형시변 블록은 다음과 같이 정의되는 부등식,

$$\int_0^t V^T W d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \quad (40)$$

을 만족한다. 여기서  $\gamma_0^2$ 는 임의의 상수이다.

첫 번째의 정리1은 앞절에서 언급된 선형보상인자(linear compensator)을 다음과 같이 설정함으로서 만족한다.

$$L = [0 : 1] M \quad (41)$$

여기서  $M$ 은 아래의 Lyapunov 방정식

$$A_m^T M + M A_m = -H \quad (42)$$

의 해(solution)이다. 잊식에서의  $H$ 는 양의 부호인 정치행렬(positive definite symmetric matrix)로서 기준모델이 디커플링(decoupling)이므로 다음과 같이 대각선 행렬로 구성하였다.

$$H = \begin{bmatrix} \text{diag}(h_i) & 0 \\ 0 & \text{diag}(h_{i+n}) \end{bmatrix}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (43)$$

그리고, 시스템의 초안정을 위한 두 번째 조건인 식 (40)의 만족은 식 (33)과 같이 정의되는 단위벡터 적용제어칙에 의해 달성되어진다.

따라서, 식 (39)을 식 (40)에 대입하면 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} &\int_0^t V^T [B_s \Phi_1 - B_s B_s^+ (A_m - A_s) + B_s K_s] d\Gamma \\ &+ \int_0^t V^T [B_s \Phi_2 - B_s B_s^+ (B_m - B_s) - B_s K_m] d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (44)$$

그러므로 식 (44)에서 적용칙  $\Phi_1$  및  $\Phi_2$ 의 계인  $P_1$  및  $P_2$ 의 값은 다음의 조건을 만족하는 값으로 정의되어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 &> \|B_s [B_s^+ (A_m - A_s) + K_s]\| \cdot \|B_s^{-1}\| \\ P_2 &> \|B_s [B_s^+ (B_m - B_s) + K_m]\| \cdot \|B_s^{-1}\| \end{aligned} \quad (45)$$

#### 4. 시뮬레이션

제안된 적용-슬라이딩모드 제어알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 스카라로보트의 1.2관절의 속도 및 위치 추종성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 정현파 함수로 정의되는 위치 및 속도의 기준궤적 성능시험을 위해 부하하중의 증가현상에 대한 제안된 제어기의 견실평가를 위해 0.001sec의 샘플링시간으로 3초 동안 수행되었다. Fig. 3~Fig. 8은 무부하 및 부하상태에서의 슬라이딩모드 제어와 적용슬라이딩모드 제어의 위치 및 속도 추종결과를 나타내고 있다. 프로그램언어는 불랜드C를 사용하였으며 586PC에서 수행하였다.

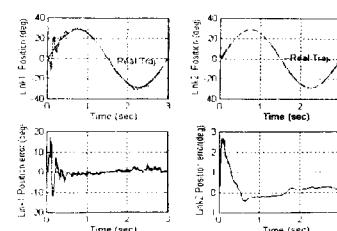


Fig. 3 Control performance of sliding mode control for trajectory tracking of the position with no payload

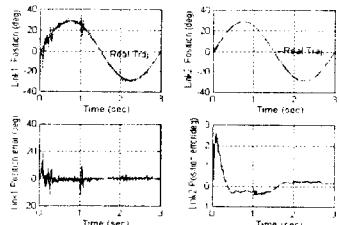


Fig. 4 Control performance of sliding mode control for trajectory tracking of the position with payload(3kg)

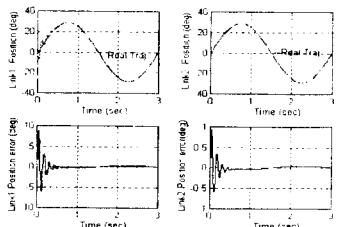


Fig. 5 Control performance of adaptive-sliding mode control for trajectory tracking of the position with no-payload

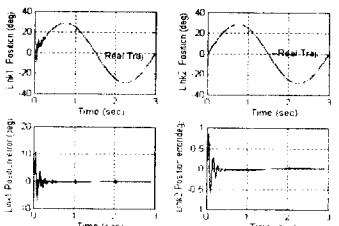


Fig. 6 Control performance of adaptive-sliding mode control for trajectory tracking of the position with payload(3kg)

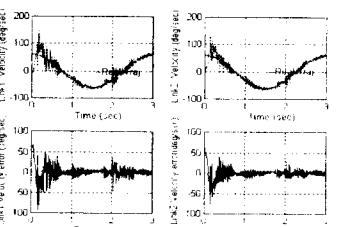


Fig. 7 Control performance of sliding mode control for velocity tracking with payload(3kg)

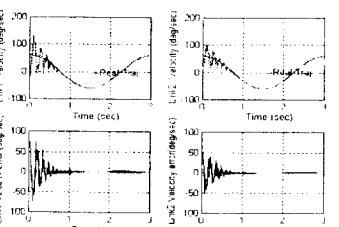


Fig. 8 Control performance of adaptive-sliding mode control for velocity tracking with payload(3kg)

## 5. 결 과

본 논문에서는 복잡한 동특성을 지니는 산업용 로보트의 위치 및 속도 제어를 위하여 적용제어구조와 슬라이딩모드제어구조를 결합하여 부하변동 및 미지의 외란이 존재하는 경우에도 항상 신속하고 정밀한 제어성능이 유지되는 적용-슬라이딩모드제어 알고리즘을 개발하였다. 제안된 적용슬라이딩모드제어구조의 특성은 슬라이딩모드제어의 단점인 채터링 현상을 경감시키는 특성과 외부외란에 더욱 강인한 제어특성을 지닌다는 것이 시뮬레이션 실험을 통하여 입증됨으로서 제어성능의 견실성을 확인할 수 있었다. 현재 디지털 시그널 프로세서(digital signal processor; TMS320C50)을 사용한 DSPs 제어기를 설계하여 제안된 제어기의 성능을 입증하기 위한 연구가 진행 중이며, 향후 연구내용으로는 실험완료 후 실제모델에의 적용을 연구하고자 한다.

## 6. 참고문헌

- (1) Mark 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) A.J. Koiv and T.H. Guo, "Adaptive linear controller for robotic manipulators," IEEE Trans., AC-20, pp. 162-171, 1983.
- (7) 한성현, 이만형, "적용제어기법에 의한 다관절 로보트 매니퓰레이터의 견실한 제어기 설계에 관한 연구", 정밀공학회지 제6권, 제4호, 1989.