

개선된 슬라이딩 모드제어를 이용한 스투워드플랫폼의 추종제어

Tracking Control of Stewart Platform Manipulator via Enhanced Sliding Mode Control

김낙인*, 이종원**
Nag-In Kim, Chong-Won Lee

ABSTRACT

The high speed tracking control of a 6-6 Stewart platform manipulator (SPM) normally requires knowledge of its complex full dynamics and measurement of its base motion when the SPM operates on a motion unit. In this study, an enhanced sliding mode control scheme has been developed, which is based on the reduced dynamics, not necessitating measurement of the base motion. The enhanced sliding mode control implemented with the perturbation compensation and modified reaching phase alleviation functions has been successfully employed for high speed tracking control of the laboratory SPM, when it is subjected to a virtual base motion.

주요기술용어 : Stewart platform manipulator(스튜워드 플랫폼운동장치), Enhanced sliding mode control(개선된 슬라이딩모드제어), Model based control(운동방정식 기반 제어), Perturbation estimation(섭동 관측기), Reaching phase alleviation(리칭페이스 제거)

1. 서론

최근, 링크가 순차적으로 구성된 운동장치(serial manipulator)에 비해 정밀위치제어, 운동방향에 대한 강성도 및 하중 분산 특성이 상대적으로 우수한 병렬식 운동장치(parallel manipulator)에 대한 관심이 증가되고 있다. 이러한 장점은, 병렬식 운동장치가 가지는 특성으로 각각의 액추에이터가 부하를 나누어 분담하는 현상에서 기인한다.¹⁾ 그 결과, 병렬식 운동장치

는 고속, 고 정밀 및 대 부하를 필요로 하는 곳에 주로 응용되고 있다. 하지만, 6 자유도 병렬식 운동장치인 스투워드플랫폼 운동장치(Stewart Platform Manipulator: SPM)의 응용은 주로 저속, 대 부하를 필요로 하는 고전적 응용 분야인 자동차 시뮬레이터,²⁾ 항공기 시뮬레이터 및 공작기계의 이송장치³⁾에 주로 사용되어져 왔다. 제어기 설계에 있어서는 SPM의 운동방정식을 사용하지 않은 축 방향 비례-미분-적분제어(PID) 및 적응제어⁴⁾등이 주로 사용되어져 왔다. 이러한 이유는, SPM이 저속의 작업상태에서 필요로 하는 대 부하의 중력 힘 및 외란 만을 보상하는

* 회원, 대우종합기계 중앙연구소

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

관점에서 제어기가 설계되었기 때문이다. 하지만, 상대적으로 고속작업환경을 가지고 있으며, 높은 추종성능을 필요로 하는 개선된 자동차용 운동재현장치²⁾ 및 다 자유도 진동제어에³⁾의 응용은 고속 운동에 필요한 운동장치의 동역학적 힘이 매우 커서 운동방정식을 사용하는 제어 기법이 필요하다.

일반적으로 SPM의 실시간 순 기구학⁴⁾ 및 운동방정식은 매우 복잡하여 많은 계산시간이 소요되기 때문에, Kim and Lee⁵⁾는 SPM에 대한 운동방정식을 기반으로 하는 실시간 제어시스템을 구축하기 위해 2개의 연산기를 가지는 제어시스템을 제안하였고, 제어시스템에서는 운동방정식을 사용한 축 방향 슬라이딩모드 제어기를 적용하여 추종 제어하는 연구결과를 발표하였다. 하지만, SPM은 운동방정식이 이동중인 차량⁶⁾이나, 저주파수 대변형의 운동장치 위에서 고주파수대의 소변형으로 운용하는 경우가 존재하며, 이 경우 SPM의 하판이 고정된 상태에 비해 매우 복잡한 형태를 가진다. 또한, SPM의 하판이 고정된 운동방정식을 사용한 운동제어는, 하판의 저주파수대 운동으로 발생하는 모형화 되지 않은 동역학적 힘이 외란으로 인가되고, 고전적 슬라이딩 모드제어(Sliding mode control: SMC)에 의해서는 외란에 의한 큰 추종오차를 피할 수 없다.

본 연구에서는, 이러한 SPM 사용환경에서 제어기의 설계는 하판이 고정된 SPM 운동방정식을 사용하고, 이로 인해 발생한 외란을 제어기에서 효과적으로 극복하여 추종오차를 최소한으로 발생할 수 있는 제어기를 설계하고자 한다. 발생한 외란은 제어기에서 리칭페이스 제거(reaching phase alleviation)¹⁰⁾기능 및 섭동보상기능을 가진 개선된 SMC¹⁰⁾를 이용하여, 제어과정 중 발생할 수 있는 저주파수대의 외란을 예측하여 보상 함으로서 추종오차를 최소화 시킬 수

있다. 제어시 도입한 주파수 형상화(frequency-shaped) SMC 개념¹¹⁾은 운동장치에 사용된 액추에이터의 연성특성에 기인한 내부 동특성을 제거하여 채터링 완화를 가져다 준다. 개선된 SMC를 이용하여 가상적으로 SPM의 하판이 평면 운동하는 환경을 SPM 운동 중에 외란으로 인가하여 실험실에서 제작된 SPM을 이용하여 운동제어를 수행하였다. 실험결과, 저주파수대의 외란은 효과적으로 외란 관측기에서 예측되어 보상되었으며, 추적제어과정 중 이로 인한 추종오차가 개선됨을 확인할 수 있었다.

2 개선된 SMC

2.1 리칭페이스가 제거된 고전적 SMC

섭동을 가정한 SPM의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.¹²⁾

$$u_j = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk} + \Delta m_{jk}\} \ddot{l}_k + V_j + \Delta V_j + G_j + \Delta G_j + d_j + u_{a_j},$$

$$u_{a_j} = (c_1 + c_2 u_j) \operatorname{sgn}(\dot{l}_j) + c_2 \sin\left(\frac{2\pi}{n} + \phi_s\right),$$

$$j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

여기에서 Δm_{jk} , ΔV_j 및 ΔG_j 은 각각 관성질량 행렬 m_{jk} , 코리올리 및 원심력 벡터 V_j 과 중력 힘 벡터 G_j 에 대한 모형화 오차 항이며, 벡터 d_j 는 외란을 의미하고, 하 첨자 j 는 SPM을 구성하는 6개의 축을 의한다. 그리고, u_{a_j} 는 SPM을 구성하는 액추에이터 내부 동역학¹³⁾ 부분이며, 액추에이터가 작동 조건에 따라 특성을 가지기 때문에, 제어기 설계에서는 모형화 되지 않은 섭동 항으로 처리하였다. 이때, 슬라이딩 함수 s 는 다음과 같이 정의된다.⁹⁾¹³⁾

$$s_j(t) = \dot{e}_j(t) + \lambda_j e_j(t) - g_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

여기에서 $e_j = l_j - l_{d_j}$, 양상 수 λ_j 는 상태공간에서 슬라이딩 표면 기울기이다. l_j 와 l_{d_j} 는 각

각 측정된 액추에이터 길이와 요구되는 액추에이터 길이이며, $g_j(t)$ 는 리칭페이스 제거를 위해 첨가된 항⁹⁾으로서 다음과 같이 정의 된다.

$$g_j(t) = \{\dot{e}_j(0) + \lambda_j e_j(0)\} \exp(-\varphi_j t) \quad (3)$$

여기서 φ_j 는 양의 값을 갖는 시 상수 이며, 초기속도 및 변위 오차, $\dot{e}_j(0), e_j(0)$ 는 시험시 초기요구신호 및 측정된 신호로부터 구할 수 있다. 적절한 제어인자를 가지는 SMC에서 시 변동 특성을 갖는 슬라이딩 함수(2)는 항상 슬라이딩 표면, 혹은 경계층 내에 존재한다.

운동장치 방정식(1)에 대한 등가 제어 항으로 표현되는 Filippov의 설계 및 리아프노프(Lyapunov) 안정화 조건 $\frac{1}{2} \frac{d}{dt}(s^T s) < 0$ 으로부터 SMC 법칙은 다음과 같다.¹²⁾

$$u_j = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}(\ddot{i}_{dk} - \lambda_k \dot{e}_k + \dot{g}_k)\} - k_j \text{sat}(s_j, s_{oj}) + V_j + G_j, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

여기에서

$$k_j > \max |P'_{s,j}|,$$

$$P'_{s,j} = -(c_1 + c_2 u_j) \text{sgn}(i_j) - c_3 \sin\left(\frac{2\pi}{n} + \phi_s\right) - \Delta V_j - \Delta G_j + \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}(\ddot{i}_{dk} - \lambda_k \dot{e}_k + \dot{g}_k)\} \quad (5)$$

$$[m_{v,jk}] = [\Delta m_{jk} [m_{jk} + \Delta m_{jk}]^{-1} [m_{jk}]]$$

$$\text{sat}(s_j, s_{oj}) = \begin{cases} |s_j| \geq s_{oj}, & \text{sat}(s_j, s_{oj}) = \text{sgn}(s_j/s_{oj}) \\ |s_j| < s_{oj}, & \text{sat}(s_j, s_{oj}) = s_j/s_{oj}, \\ s_j = 0, & \text{sat}(s_j, s_{oj}) = 0 \end{cases}$$

여기서 양상수 s_{oj} 는 슬라이딩 표면 근처의 경계층 두께이다.¹³⁾

2.2 섭동 예측

Kim 등¹⁰⁾이 제안한 섭동관측기를 갖춘 SMC를 리칭페이스가 제거된 시스템에 대해 유도해 보기로 한다. 실제적으로 시스템에 인가되는 섭

동, $P_{s,j}$,는 다음과 같이 관측될 수 있는 부분, Φ_j , 과 관측될 수 없는 부분, $\Delta P_{s,j}$, 으로 나눌 수 있다.

$$P_{s,j} = \Phi_j + \Delta P_{s,j}, \quad P_{s,j} = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}\}^{-1} P'_{s,k} \quad (6)$$

따라서 제어법칙(4)는 다음과 같이 변화되면,

$$u_j = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}(\ddot{i}_{dk} - \lambda_k \dot{e}_k + \dot{g}_k - \Phi_k)\} - k_{r,j} \text{sat}(s_j, s_{oj}) + V_j + G_j \quad (7)$$

경계층 안정화 조건(boundary layer attraction condition)은 다음과 같다.

$$k_{r,j} > \max |\Delta P_{s,j}| \quad (8)$$

이러한 제어시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. 한편, 운동방정식(1)은 다음과 같이 모형화 부분과 모형화 되지 못한 섭동 부분으로 나눌 수 있다.

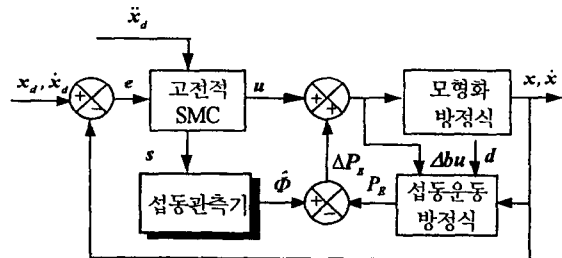


Fig. 1 Structure of proposed SMC

$$u_{n,j} = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk} \ddot{i}_{nk}\} + V_j + G_j, \quad u_{p,j} = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}(\ddot{i}_{pk} + P_{s,k})\} \quad (9.a,b)$$

여기서 $l_j = l_{n,j} + l_{p,j}$ 이고 $l_{p,j}$ 와 $l_{n,j}$ 는 각각 모형화 된 운동방정식과 모형화 되지 않은 섭동 운동방정식에서의 길이벡터이며, $u_{n,j}$ 와 $u_{p,j}$ 는 관계되는 각각의 제어 힘이다. 섭동 운동방정식은 시스템이 슬라이딩표면에 머무는 것을 허용하지 않아, $s \neq 0$ 인 반면, 모형화 된 운동방정식은 경계층 내에서 Filippov의 등가 힘으로 완전히 보상되므로 $\dot{s} = 0$ ¹³⁾이 된다. 그 결과, s 는 경계층 내에서 섭동방정식의 상태변수로 다

음과 같이 정리할 수 있다.

$$s_j = \dot{i}_{p,j} + \lambda_j i_{p,j} - g_j, \quad j=1,2,\dots,6 \quad (10)$$

만약 이론적인 섭동 운동방정식에 대해서 고주파 수 추종오차를 허용하는 잘 설계된 제어 힘 $u_{p,j}$ 를 발생할 수 있으면, 저주파수 형태로 시스템에 인가되는 섭동은 제어력으로 충분히 극복할 수 있다. 그러므로, 제어력은 저주파수 형태의 섭동을 실제적으로 보상하는 기능을 가지고 있으며, 다음 관계를 도입하여 이러한 관계를 증명할 수 있다.

$$\ddot{i}_{p,j}(t) = -P_{Ej}(t) - \Phi_j(t), \quad j=1,2,\dots,6 \quad (11)$$

여기서 $\Phi_j = -\sum_{k=1}^6 \{m_{jk}\}^T u_{p,k}$ 이며, 제어입력에 의해 Φ_j 는 원치 않는 고주파 수 성분을 가질 수 있으므로, 다음과 같은 저주파 필터 관측기를 제안한다.

$$\dot{\hat{\Phi}}_j(t) + \omega_{n,j} \hat{\Phi}_j(t) = \omega_{n,j} \Phi_j(t), \quad j=1,2,\dots,6. \quad (12)$$

여기서 $\hat{\Phi}_j$ 는 Φ_j 에 대한 저주파 통과 값이며, 이때 필터 절 점 주파수 $\omega_{n,j}$ (rad/sec) 는 관측할 섭동의 최대 주파수를 의미한다.

다음과 같은 섭동 운동방정식에 대한 제어모형을 고려해보자.

$$\ddot{i}_{p,j}(t) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(t) + a_{j2} i_{p,j}(t) + g_{m,j}(t) = 0, \quad j=1,2,\dots,6 \quad (13)$$

여기서 $g_{m,j}(t) = -\dot{g}_j(t) - h_j g_j(t)$ 이며, h_j 는 식(13)에서 초기조건, $t=0$, 을 만족할 수 있도록 결정하며, 상수 a_{j1} 및 a_{j2} 는 섭동 운동방정식이 슬라이딩 표면으로 점 근적으로 감소할 수 있게 만든다. 식 (11)을 식(13)에 대입하면

$$\Phi_j(t) = -P_{Ej}(t) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(t) + a_{j2} i_{p,j}(t) + g_{m,j}(t),$$

$$j=1, 2, \dots, 6 \quad (14)$$

한편, 낮은 속도를 가지는 섭동과 시스템 방정식에 대해 시간지연제어기(Time delay control)는 충분히 작은 시간 지연 Δt 에 대해 다음관계를 얻을 수 있다.¹⁴⁾

$$P_{Ej}(t) \cong P_{Ej}(t - \Delta t) = -\ddot{i}_{p,j}(t - \Delta t) - \Phi_j(t - \Delta t), \quad j=1,2,\dots,6. \quad (15)$$

주의할 점은, 넓은 대역의 주파수 특성을 가지고 있는 운동방정식과 섭동으로 인해 식(15)는 일반적으로 성립되지 않는다. 이를 해결하는 간단하면서 효과적인 방법은 저주파 통과 필터에 의해 P_{Ej} 에 내재되어 있는 고주파 성분을 제거하는 것이며, 식(15)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{P}_{Ej}(t) \cong \hat{P}_{Ej}(t - \Delta t) = -\hat{\ddot{i}}_{p,j}(t - \Delta t) - \hat{\Phi}_j(t - \Delta t) \quad (16)$$

여기에서 $\hat{P}_{Ej}(\bullet)$, $\hat{\ddot{i}}_{p,j}(\bullet)$ 및 $\hat{\Phi}_j(\bullet)$ 는 각각 $P_{Ej}(\bullet)$, $\ddot{i}_{p,j}(\bullet)$ 및 $\Phi_j(\bullet)$ 에 대한 저주파 통과 필터된 값이다.

식 (16)을 식(14)에 대입하면 연속 및 이산시간 영역에서 다음과 같은 결과를 각각 구할 수 있다.

$$\Phi_j(t) = \hat{\Phi}_j(t - \Delta t) + \hat{\ddot{i}}_{p,j}(t - \Delta t) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(t) + a_{j2} i_{p,j}(t) + g_{m,j}(t), \quad (17.a)$$

$$\Phi_j(nT) = \hat{\Phi}_j((n-1)T) + \hat{\ddot{i}}_{p,j}((n-1)T) + a_{j1} \dot{i}_{p,j}(nT) + a_{j2} i_{p,j}(nT) + g_{m,j}(nT) \quad (17.b)$$

여기에서 n 은 정수이고 $T(= \Delta t)$ 는 샘플링 시간을 의미한다. 이산 시간영역에서 관측기(12)는 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁷⁾

$$\hat{\Phi}_j(nT) = \frac{\hat{\Phi}_j((n-1)T)}{1 + T\omega_{n,j}} + \frac{T\omega_{n,j}\Phi_j(nT)}{1 + T\omega_{n,j}} \quad (18)$$

식 (17.b)를 식(18)에 대입하면

$$\frac{1}{T} \left\{ \hat{\phi}_j(nT) - \hat{\phi}_j((n-1)T) \right\} = \frac{\omega_{n,j}}{1+T\omega_{n,j}} \left\{ \hat{i}_{p,j}((n-1)T) + a_{j1} i_{p,j}(nT) + a_{j2} l_{p,j}(nT) + g_{m,j}(nT) \right\} \quad (19)$$

여기에서 좌측 항은 저속의 $\hat{\phi}_j$ 와 충분히 작은 T 에 대해 다음과 같은 연속시간 미분형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{d\hat{\phi}_j(t)}{dt} = \lim_{T \rightarrow 0} \left\{ \frac{\hat{\phi}_j(nT) - \hat{\phi}_j((n-1)T)}{T} \right\} \quad (20)$$

양변을 시간 t 에 대해 적분하면

$$\hat{\phi}_j(t) = \int \lim_{T \rightarrow 0} \left[\frac{\omega_{n,j}}{1+T\omega_{n,j}} \left\{ \hat{i}_{p,j}((n-1)T) + a_{j1} i_{p,j}(nT) + a_{j2} l_{p,j}(nT) + g_{m,j}(nT) \right\} \right] dt = k_{p,j} \left\{ s_j(t) + h_j \int s_j(t) dt - k_{r,j} \tilde{i}_{p,j}(t) \right\} \quad (21)$$

여기에서 $a_{j1} = -(\lambda_j + h_j)$, $a_{j2} = -\lambda_j h_j$,

$\tilde{i}_{p,j}(t) = i_{p,j}(t) - \hat{i}_{p,j}(t)$, $k_{p,j} = \omega_{n,j}$ 이며 다음조건을 만족한다.

$$\tilde{i}_{p,j}(p) = \frac{p^2}{(p + \omega_j)(p + \lambda_j)} s_j(p) \quad (22)$$

여기에서 p 는 라플라스 연산자이다. 섭동방정식 (9.b)는 슬라이딩 표면 주위 경계층 내에서 정의되며, 그 결과 섭동 예측은 작은 s 에 대해 수행되어진다. 또한 s 는 광대역 섭동에 대해 일차 저주파 필터를 통과한 값이므로, 식(21)에서 $\tilde{i}_{p,j}$ 를 다음과 같이 무시할 수 있다.

$$s_j - \tilde{i}_{p,j} \cong s_j, \quad \text{혹은} \quad \tilde{i}_{p,j} \cong 0 \quad (23)$$

그 결과 충분히 작은 Δt 와 저속의 $\hat{\phi}_j$ 에 대해 식(21)는 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{\phi}_j(t) \cong k_{p,j} \left\{ s_j(t) + h_j \int s_j(t) dt \right\} \quad (24)$$

2.3 주파수 형상화된 SMC

볼 스크류 액추에이터 시스템의 힘 전달부품의 연성에 의해 식(7)에서 모형화 되지 않은 내부 운동방정식이 발생하며, 이 운동방정식의 특성은 액추에이터 부품의 연성 및 SPM의 부하에 의존한다. 그러므로, 제안된 제어기의 제어주파수대역은 모형화 되지 않은 운동방정식의 가장 낮은 공진 주파수에 의존한다. 만약 운동방정식의 극점이 제어주파수 대역보다 큰 값 쪽에 위치하더라도 모형화 된 내부 운동방정식은 높은 제어이득과 불완전한 저주파필터 특성에 의해 증폭되어 시스템의 제어특성에 영향을 미치며 실제 액추에이터에 제어 채터링을 발생시킬 수 있다.¹⁵⁾ 이는 유연구조물의 진동제어에서 모형화 되지 않은 운동방정식에 의해 발생하는 spillover 현상과 동일하다. 그러므로, 본 연구에서는 액추에이터에서 모형화 되지 않은 고주파 성분의 운동방정식을 제거하기 위해 절환 주파수 ω_u 을 가지는 저주파 필터를 측정된 실린더 길이신호에 적용하였으며, 이러한 개념은 주파수 형상화 SMC(frequency-shaped SMC)에서 기원한다.^{11,16)}

3. 문제 정의

본 연구에서는 SPM이 고성능 자동차 시뮬레이터의 고속 운동장치¹⁶⁾로서 사용되는 것을 가정하였으며, 작은 진폭과 고주파 수 운동을 하는 장치로 설정하였다. Fig. 2는 2자유도 저속 운동재현장치 위에서 작동되는 자동차 시뮬레이터의 좌표관계를 보여준다. 그 결과, SPM과 2자유도 운동장치는 자동차 운동을 각각의 특성에 적절하게 나누어 재현하며, 이러한 개념은 개선된 자동차 시뮬레이터에 적용되고 있다. 비록 SPM은 고주파 운동을 재현하지만, SPM의 관성질량은 2자유도 운동장치에 의해 추가적으

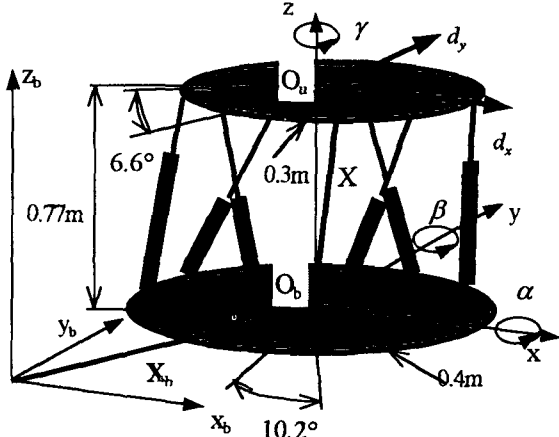


Fig. 2 Stewart platform manipulator and the coordinates

로 영향을 받으며, SPM의 운동 방정식이 식(1)보다 복잡한 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$u_N(t) = u(t) + [m_{\mu}(x)]\ddot{x}_b(t) + \Delta V_x(x, \dot{x}, \ddot{x}),$$

$$\Delta V_x(x, \dot{x}, \ddot{x}) = V_{nx}(x, \dot{x}, \ddot{x}) - V(x, \dot{x}), \quad (25)$$

$$\dot{x}_b = [\dot{x}_b \quad \dot{y}_b \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\ddot{x}_b = [\ddot{x}_b \quad \ddot{y}_b \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

여기서 $u_N(t)$ 는 SPM의 하판 운동을 고려한 액추에이터 힘이며, \dot{x}_b 및 $\ddot{x}_b(\ddot{x}_b, \ddot{y}_b)$ 는 하판의 속도(가속도)를 의미하고, $\Delta V_x(x, \dot{x}, \ddot{x})$ 는 하판의 운동에 의해 추가적으로 발생하는 코리올리 및 원심력 항으로서, SPM의 작은 운동 영역특성에 의해 다른 항보다도 무시할 수 있을 만큼 작은 값이다. 또한, $[m_{\mu}(x)]\ddot{x}_b$ 대표 값의 주파수 특성이 \ddot{x}_b 와 유사하고 무시할 만큼 작은 값은 아니지만, 이 항을 SPM 제어기에서 고려하기 위해서는 평면 운동장치의 동적거동을 SPM 제어기에서 측정해야만 한다.

4. 실험

SPM의 제어시스템 및 실제 운동장치에 대한 설명은, 참고자료 (12)에 자세히 설명되어 있으며, 제안된 제어기의 제어 특성을 확인하기 위해 SPM의 운동영역 대부분을 가지며, 6Hz 대가

지의 동적 운동특성을 가지는 다음과 같은 요구 신호를 이용해 추종제어 실험을 하였다.

$$\begin{cases} x(t) = 0.03\{1 - \exp(-\pi)\}\cos(1.88\pi t), m, \\ y(t) = 0.04\{1 - \exp(-\pi)\}\sin(1.88\pi t), m, \\ z(t) = \frac{0.02}{1 + 0.9t} \sin\left\{2\pi t \left(\frac{0.1 + 5.9t}{10.5}\right) + \frac{\pi}{24}\right\}, m, \\ \alpha(t) = 0, \text{ deg}, \\ \beta(t) = 4\{1 - \exp(-\pi)\}\sin(0.86\pi t), \text{ deg}, \\ \gamma(t) = 5\{1 - \exp(-\pi)\}\sin(0.74\pi t), \text{ deg}, \\ \mathbf{X}(t) = \dot{\mathbf{X}}(t) = \ddot{\mathbf{X}}(t) = 0 \quad ; \text{ otherwise.} \end{cases}$$

$$; 0 \leq t \leq 10 \text{ sec} \quad (26)$$

실험 중 사용한 제어인자는 $\lambda_j = 14\pi \text{ rad/sec}$, $s_{o,j} = 0.06 \text{ m/sec}$, $k_j = k_{r,j} = 160 \text{ N}$, $\omega_{n,j} = 3\pi \text{ rad/sec}$, $h_j = \lambda_j = \varphi_j$, $g_{m,j} = 0$ 이며, $j = 1, 2, \dots, 6$ 이다. 실험실에서 제작된 SPM의 운동방정식에 필요한 각 물성치는 Appendix A에 정리하였다. 가상적인 2자유도 평면 운동장치의 운동영향에 의한 SPM의 제어 특성을 확인하기 위해 SPM의 하판 운동인 2자유도 평면 운동장치의 운동을 다음과 같이 가정하였다.

$$\begin{cases} x_b \\ y_b \end{cases} = \begin{bmatrix} -0.385\sin(0.86\pi t) - 0.12\sin(1.26\pi t) \\ -0.21\sin(1.06\pi t) - 0.048\sin(1.74\pi t) \end{bmatrix}, m \quad (27.a)$$

본 연구에서는, SPM 제어시스템 설계를 단순화 하기 위해 하판의 운동특성을 고려하지 않았으며, 고려되지 않은 동역학적 외란은 본 연구에서 제안한 섭동 예측기를 이용하여 제어기에서 보상하도록 하였다. 하지만, 실험실에서 제작된 운동장치는 하판 평면 운동장치를 가지고 있지 않으므로, 식(27.a)과 같은 평면 운동에 대한 영향을 실제 SPM 운동제어시 고려될 수 없다. 그러므로, 본 연구에서는 식(27.a)과 같은 하판 운동의 영향을 SPM 제어기에서 알수없는 외란으로 처리 하였다. 본 연구에서는, 이러한 외란 중에 상대적으로 큰 값을 가지고 있는

$[m_{jk}(\mathbf{x})]\ddot{\mathbf{x}}$, 항을 가상적인 외란으로 인가해주기 위해, SPM의 x 와 y 축에 따라 외란 형태, d_x 및 d_y , 의 섭동으로 각각 다음과 같이 계산하여 제어기에서 이 항을 인가하였다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 64 & 0 \\ 0 & 64 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 180\sin(0.86\pi) + 120\sin(1.26\pi) \\ 150\sin(1.06\pi) + 80\sin(1.74\pi) \end{bmatrix}, N \end{aligned} \quad (27.b)$$

결과적으로, 실험시 식(7)에서 액추에이터에 요구되는 제어력, $u_{req,j}$,은 다음과 같다.

$$u_{req,j} = \sum_{k=1}^6 \left\{ m_{jk} (\ddot{y}_{d,k} - \lambda_k \dot{e}_k + \dot{g}_k - \Phi_k) \right\} - k_{r,j} \text{sat}(s_j, s_{o,j}) + V_j + G_j - d_j \quad (28)$$

많은 시간이 소요되는 복잡한 운동방정식의 계산은 대부분 PC에서 비동기적으로 실행되기 때문에, DSP에서는 1msec 이내에 필요한 모든 작업을 수행할 수 있었으며, PC에서 실행되는 비동기 작업은 약 2-3msec 정도의 시간을 필요로 하였다.¹²⁾ Fig 3 부터 6은 SPM의 관성 좌표계에서의 추종 오차, 액추에이터 길이방향 추종오차로 구성되는 슬라이딩 함수, 이때 인가된 액추에이터 힘 및 예측된 가상 섭동이다. 고전적 및 제안된 슬라이딩모드 제어에서는 모두 채터링이 발생되지 않았으나, 전자는 저주파수 형태의 섭동을 효과적으로 극복하지 못하였다. 하지만, 제안된 SMC는 고전적 SMC에 비해 상대적으로 작은 추종오차와 슬라이딩함수 s 를 가졌으며, 그 이유는 시스템에 인가되는 저주파수대의 섭동을 제어기에서 제안된 섭동 관측기를 이용, 효과적으로 예측 및 보상했기 때문이다. 특히 Fig 6 과 같이 제어과정 중 예측된 섭동은 제어시스템에 주된 오차를 형성하는 저주파수대의 외란을 성공적으로 추종함을 보여주었다. 고전적 SMC 제어에 의한 s 는 Fig 4 와 같이 저주파수 형태의 외란에 의해 경계층 안정화 조

건을 위배하는 경우가 있으나, 제안된 SMC를 사용한 추종제어는 시험 기간 내내 s 는 경계층 내에 존재함을 알 수 있었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 제안된 SMC를 사용한 경우 저주파수 외란이 추종성능에 영향을 미치지 못하나, 고전적 SMC는 경계층 안정화 조건을 만족시키기 위해 k_f 를 증가시켜 바람직하지 않은 제어 채터링을 야기시킬 수 있어, 결과적으로 낮은 추종성능을 보일 수 있다.

초기 천이구간에서 Fig 3(c)과 같이 제안된 SMC를 사용한 제어 실험에서는 z 방향의 추종 오차를 대수적으로 감소시켰으며, Fig 4와 같이 리칭페이스가 제거되어 슬라이딩 함수 s 는 0에서 시작하여 항상 경계층 내에 머물고 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 예측된 섭동 $\hat{\phi}$ 는 Fig 6 과 같이 실제 시스템에 인가된 섭동을 초기 제어부터 모든 시간 영역에 대해서 섭동관측기가 충실히 관측함을 알 수 있다.

5. 결론

제안된 SMC는 저주파수 형태의 외란이 인가되는 운동방정식을 기반으로 하는 SPM의 추종 제어에 효과적임을 실험적으로 증명하였다. 제안된 SMC의 설계에서 저주파수 SPM의 하판 운동으로 야기된 추가적인 동역학적 힘을 외란으로 처리하여 추종제어를 하였으며, 이러한 모형화 되지 않은 부분은 리칭페이스 제거기능과 제안된 섭동 관측기를 사용하여 효과적으로 보상하였다. 제안된 SMC의 도입에 의해 운동방정식을 기반으로 하는 SMC의 설계를 간단화 시키었으며, 하판 운동에 대한 정보를 필요로 하지 않았다. 실험실에서 제작된 SPM에 대한 추종제어 실험결과 제안된 SMC는 고 부하와 저주파수 형태의 큰 섭동 환경에서도 SPM에 대한 고성능의 추종제어를 할 수 있었다.

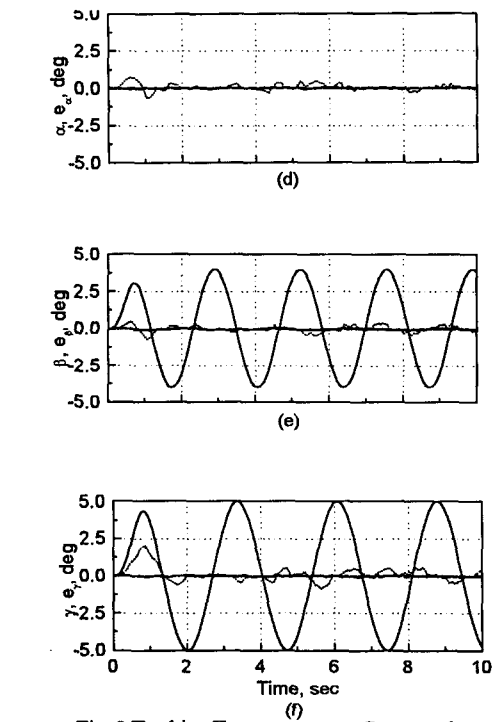
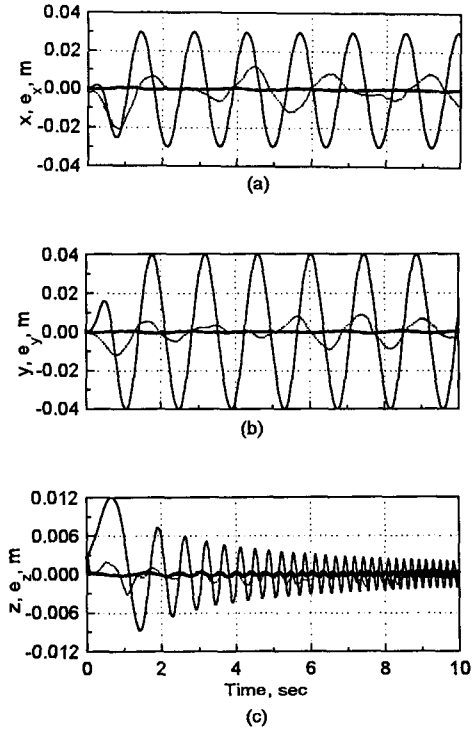


Fig. 3 Tracking Errors: — Command, Conventional SMC ($\hat{\phi} = 0$), — Enhanced SMC.

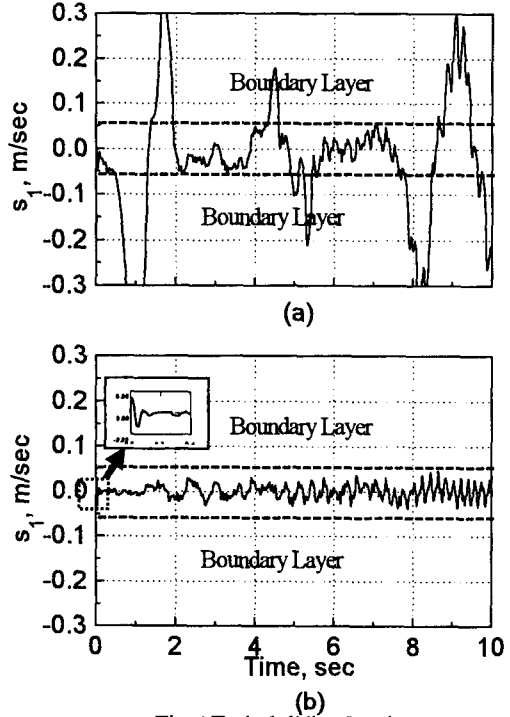


Fig. 4 Typical sliding functions: (a) Conventional SMC ($\hat{\phi} = 0$), (b) Enhanced SMC

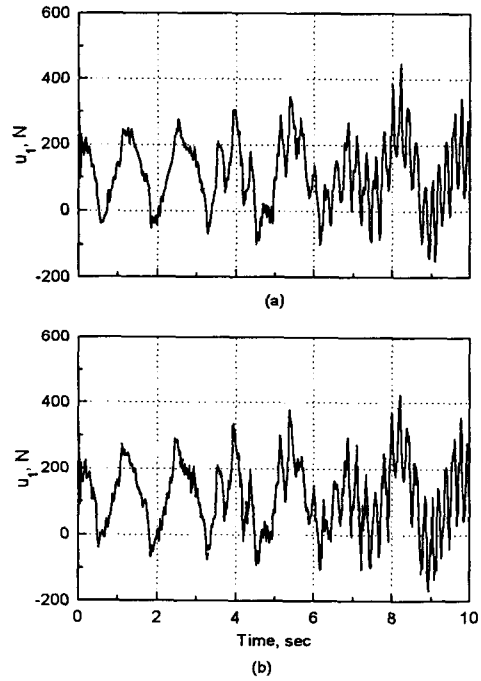


Fig. 5 Typical control forces: (a) Conventional ($\hat{\phi} = 0$) and (b) Enhanced SMCs.

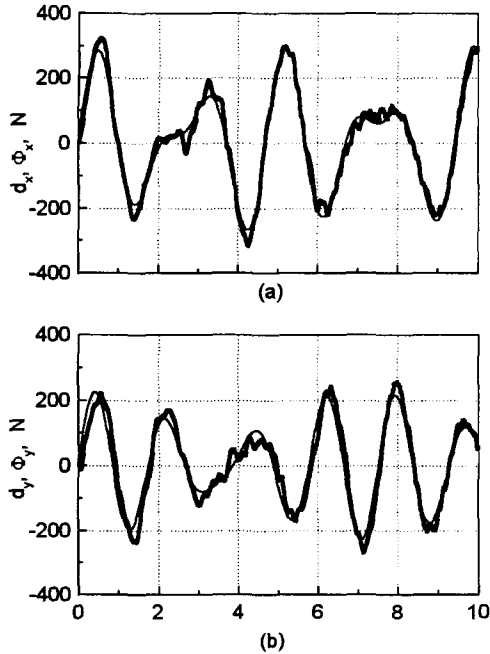


Fig. 6 Applied and estimated forces:
 (a)x and (b)y direction forces: —, d_x, d_y , — $\hat{\phi}_x, \hat{\phi}_y$

참 고 문 헌

- 1) D. Stewart, "A Platform with Six Degree of Freedom", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Vol. 180, Part 1, No. 5, pp. 371-386, 1965.
- 2) S. Freeman, et al., "The Iowa Driving Simulator: An Implementation and Application Overview", SAE 950174, pp. 1-10, 1995.
- 3) G. Leuret, K. Liu, and F. L. Lewis, "Dynamic Analysis and Control of a Stewart Platform Manipulator", Journal of Robotic System, Vol. 10, No. 5, pp. 629-656, 1993.
- 4) C. C. Nguyen, et al., "Adaptive Control of a Stewart Platform-based Manipulator", Journal of Robotic System, Vol. 10, No. 5, pp. 657-668, 1993.
- 5) Z. Geng and L. S. Haynes, "Six-degree-of-freedom Active Vibration Isolation Using a Stewart Platform Mechanism", Journal of Robotic System, Vol. 10, No. 5, pp. 725-744, 1993.
- 6) R. V. Parrish, J. E. Dieudenne, and D. J. Martin Jr., "Motion Software for a Synergistic Six-degree-of-freedom Motion Base", NASA TN D-7350, 1973.
- 7) N. I. Kim, and C. W. Lee, "High Speed Tracking Control of Stewart Platform Manipulator Via Enhanced Sliding Mode Control", 1998 IEEE Automation, Leuven, Belgium, pp.2716-2721, 1998.
- 8) J. Bormann, and H. Ulbrich, "Isolation of Vibrations to Avoid Dynamic Interactions between a Telescope and Its Foundation by Active Control", Third International Conference on Motion and Vibration Control, Japan, pp. 88-93, 1996.
- 9) B. K. Park, and J. J. Lee, "Variable Structure Controller for Robot Manipulators Using Time-varying Sliding Surface", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 89-93, 1993.
- 10) N. I. Kim, C. W. Lee, and P. H. Chang, "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation: Application to Motion Control of Parallel Manipulator", Control Engineering Practice, Vol. 6, No. 11, pp. 1321-1330, 1998.
- 11) T. Ito, and K. Nonami, "Sliding Mode Control for Spillover Suppression with Flexible System", Third International Conference on Motion and Vibration Control, Japan, pp. 421-426, 1996.
- 12) 김낙인, 이종원, "운동방정식을 기저로한 스투워트 플랫폼 운동장치의 제어시스템 설계 및 슬라이딩모드제어", 기계학회지 논문집, Vol. 23, No. 6, pp. 903-911, 1999.
- 13) J.-J. E., Slotine, "Sliding Controller Design for

Non-linear Systems", International Journal of Control, Vol. 40, No. 2, pp. 421-434, 1984.

14) K. Youcef-Toumi, and O. Ito, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 133-142, 1990.

15) M. C. Good, L. M. Stweet, and K. L. Strobel, "Dynamic Models for Control System Design of Integrated Robot and Drive Systems", Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp. 53-59, 1985.

16) K. D. Young, and Ü. Özgüner, "Frequency Shaping Compensator Design for Sliding Mode", International Journal of Control, Vol. 57, No. 5, pp. 1005-1019, 1993.

17) K. Ogata, Discrete-time Control Systems, Prentice Hall, pp. 311-314, 1987.

18) National Highway Traffic Safety Administration of U. S. and University of Iowa, "National Advanced Driving Simulator: NADS".

APPENDIX A: 시험에 사용한 SPM의 동적 물성치

1. 부하

- 질량 : 64kg
- 부하질량에 의한 상판중심에서의 관성행렬 :

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.727 & 0.052 & 0 \\ 0.052 & 0.727 & 0 \\ 0 & 0 & 1.325 \end{bmatrix} kg \cdot m^2$$

2. 액추에이터

- 실린더로드를 제외한 질량 : 10.0kg
- 하부질량에 대한 회전관성모멘트 : $[I_{11} \ I_{22} \ I_{33}] = [1.3 \ 1.3 \ 0] kg \cdot m^2$
- 액추에이터 로드질량 : 1.24kg
- 회전부가 가지는 액추에이터 길이방향의 등가질량: 10.8kg

3. SPM 중립위치에서 식(6)에서의 동적물성치

$$[m_{jk}] = \begin{bmatrix} 1050 & -84.1 & -30.3 & 47.8 & -30.1 & 166 \\ & 1050 & 165 & -30.2 & 47.9 & -30.1 \\ & & 1050 & -84.0 & -30.2 & 47.9 \\ & & & 1050 & 166 & -30.2 \\ & & & & 1049 & -84.2 \\ & & & & & 1049 \end{bmatrix} kg$$

$$[V_j] = 0$$

$$[G_j] = [1298 \ 1298 \ 1298 \ 1298 \ 1298 \ 1298] N$$

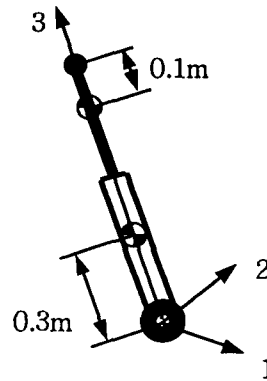


Fig. a1 Mass centers