

운동방정식을 기저로 한 스투워드 플랫폼 운동장치의 제어시스템 설계 및 슬라이딩 모드제어

이 종 원* · 김 낙 인**
(1998년 1월 21일 접수)

Model-Based Control System Design and Sliding Mode Control of Stewart Platform Manipulator

Chong-Won Lee and Nag-In Kim

Key Words : Stewart Platform Manipulator(스튜워드 플랫폼 운동장치), Joint-axis Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), Forward Kinematics(순기구학), Tracking Control(추종 제어), Control System(제어시스템).

Abstract

A high speed tracking control system for 6-6 Stewart platform manipulator is designed for performing the model based joint-axis sliding mode control. Because of the complex dynamics and kinematics of the Stewart platform manipulator, two computer systems, consisting of a PC and a DSP, are adopted, so that real time tasks are run in synchronous and asynchronous modes. It is experimentally proven that the proposed control system makes the convenience in implementation of model based tracking control, so that it can achieve effective tracking control under relatively high speed and additional payload conditions.

1. 서 론

최근 개루프 운동장치(serial manipulator)에 비해 대부하 환경에서 고속 및 고정밀 운동재현 기능이 탁월한 페루프 운동재현장치⁽¹⁾(parallel manipulator)에 대한 관심이 날로 증가하고 있다. 스투워드 운동재현장치(Stewart platform manipulator: SPM)로 대변되는 페루프 운동재현장치는 이를 구성하는 다중 액추에이터들이 한쪽 끝으로 이동부하를 분담하면서, 액추에이터 반대쪽의 지지부는 지상에 고정된 하판에 연결된 구조를 가진다. 이러한 페루프 운동장치를 실제적인 문제에 다각도로 응용하기 위해서는 기구학과 운동방정식에 대한 완전한 해석이 필요하다. 그러나, 이러한 페루프 운동장치는 순 기구학(forward kinematics)의 완전해(closed form solution)가 존재하지 않아 이 해를 얻기 위해

많은 시간이 소요되는 수치해석 방법을 사용해야 하는 단점을 가지고있으며⁽²⁾, 또한 상대적으로 개루프 운동장치에 비해 운동영역이 작고, 모든 관성 질량을 고려한 운동방정식을 유도하는 것이 매우 어려운 것으로 보고되고 있다.

최근에 국내외적으로 SPM 을 이용한 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 과거 항공공사를 중심으로 6 자유도 SPM 이 운동재현장치로 채용된 비행기 시뮬레이터를 도입하였으나, 최근 국내에서도 SPM 을 개발할 수 있는 기반기술의 발전으로 유압 선형 액추에이터를 이용한 6 자유도 운동을 발생시킬 수 있는 차량 및 비행운동 재현장치^(3,4)가 개발되었다. 이러한 운동재현장치는 MIL-Spec. 1558 을 만족하는 정도의 저주파수 운동을 목표로 개발되었기 때문에 일반적으로 SPM 의 역기구학만을 필요로 하는 아날로그 PID 제어를 도입하였다.

SPM 이 가지는 높은 강성 및 각 링크에서 발생하는 오차가 누적되지 않는 강점을 이용해 공작 기계에 적용하는 연구 역시 최근의 가장 두드러진

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 센터(NOVIC)

** 회원, 대우중공업(주) 중앙 연구소 CAD/NVH 팀

응용연구 분야라고 할 수 있다. 국외에서는 이미 이를 이용한 상품이 개발되어 판매되고 있으며, 국내에서도 이를 공작기계의 6자유도 공구 이송 기구로 응용하려는 연구가 시작되고 있다.⁵⁾ SPM은 큰 부하를 지지하며 자유로이 공간상에서 6자유도 위치를 발생할 수 있으므로, 이를 이용하여 안정화 플랫폼 시스템⁶⁾을 구축하려는 연구가 진행되고 있으며, 운동영역이 작다는 가정하에 SPM의 운동방정식을 선형화하여 강건제어의 일종인 H_{∞} 를 사용하여 모의 실험을 진행하고 있는 것이 역시 보고되고 있다. 이와 같은 모든 응용연구는 SPM이 가지는 장점을 이용한 적용연구이면서, 또한 SPM을 제어할 때 요구되는 순기구학 및 복잡한 운동방정식을 실제적으로는 사용하지 않는다는 공통점을 가지고 있다. 하지만, 최근에 연구 방향은 SPM이 가지는 대 부하 지지 및 고속 운동특성을 가장 잘 이용할 수 있는 대형 유연구조물의 다축 진동제어에 대한 응용연구⁷⁾ 및 진보된 차량 운동재현장치⁸⁾에 대한 연구로서, 공통적으로 고속, 고정도의 제어성능을 요구하고 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 일반적으로 운동재현장치에서 고속, 고성능의 추종제어 성능을 구현하기 위해서는 제어장치 내에서 매 순간마다 연속적으로 운동장치의 기구학 및 운동방정식을 이용하는 제어법칙을 사용하는 방법론이 효과적이다. 그러나, 이러한 순기구학과 복잡한 운동방정식의 고속 실시간 처리는 용이하지 않으며, 실제 고속, 고성능 제어시스템을 구축하는데 큰 제약이 되어왔다. 그 결과 본 연구에서는 SPM을 고속, 고성능이 요구되는 응용분야에 적용할 수 있도록 운동방정식을 기저로 하는 제어시스템을 구축하고, 이를 이용하여 본 연구실에서 개발된 6-6 SPM에 적용하여 그 타당성을 판단하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위해, 본 연구에서는 SPM의 제어과정 중 상대적으로 연산 시간이 많이 소요되는 순기구학과 운동방정식의 연산을 2개의 연산장치에서 분담하여 실행시키는 제어시스템을 제안하였으며, 2개의 연산장치에서는 3개의 동기, 비동기의 프로그램이 연속적으로 실행될 수 있도록 하여 운동방정식을 기저로 하는 제어시스템을 구축하였다. 그 결과 SPM 귀환제어장치의 샘플링 시간을 획기적으로 단축시켜 운동방정식을 사용하는 제어법칙을 구현할 수 있는 제어환경을 구축하였다. 운동방정식에서 예측되지 않는 변수의 변화, 모호화 되지 않은 동특성 및 예측되지 않은 외란으로 대변되는 불확실성을 극복하고 강건한 추종제어를 구현하기 위해 운동방정식을 기저로 하는

슬라이딩 모드 제어를 도입하여 SPM의 추종제어를 실시하였다. 실험결과 귀환루프의 샘플링 시간을 1msec 이내로 설정할 수 있었으며, 실험실에서 제작한 볼스크류우 선형 액추에이터를 가진 SPM에 대하여 주어진 요구신호를 충실히 추종 제어함을 확인할 수 있었다.

2. SPM의 기구학 및 운동방정식

2.1 SPM 기구학 계산

6-6 SPM의 역기구학(Inverse kinematics)은 일반적으로 순기구학과 달리 간단하게 완전 해를 구할 수 있다. Fig. 1에서 실린더 길이를 이용하여 운동장치 하판중심 O_B 에 대한 운동판 상부 중심 O_U 의 변위를 구하는 순기구학은 여러 가지 방법이 제안되었지만, 일반적으로 안정적으로 그 해를 구할 수 있는 수치해석 방법인 뉴턴-랩슨방법(Iterative Newton-Raphson method: INR)이 가장 많이 적용되어 왔다.⁹⁾ INR 방법을 사용하여 SPM의 순기구학을 계산하는 연구는 실제적으로 많이 적용되어 왔으나, 제어시스템에 적용하기 위해서는 제한점이 있다. 일반적으로 INR 방법 등의 수치해석은 그 정확한 해에 도달하기 위해 많은 반복 계산을 필요로 한다. 그러므로 INR 방법 역시 정확한 순기구학 해를 구하기 위해 반복적인 계산을 필요로 하므로 실시간 제어와 같이 제한된 시간 내에 해를 필요로 하는 시스템의 구현에는 문제점을 가지고 있다. 그러나 실제 SPM의 순기구학 해를 구할 때 INR 방법은 바로 전 단계에서 구한 순기구학 해를 초기조건으로 사용할 수 있으며, 또한 어느 정도의 수렴오차를 허용할 수 있다면, INR 방법의 오차는 해 근처에서 2차 함수로 해에 수렴할 수 있기 때문에, 적절한 해에 도달하는 반복계산 수를 낮출 수 있어 효과적으로 계산 시간을 줄일 수 있다. 이러한 방법에 의해 순기구학의 계산시간을 단축시킬 수 있으며, 단축된 계산시간에 의해 계산과정 중 이동하는 상부 운동판의 변위도 매우 작아서 INR 초기조건으로 사용할 수 있는 전단계의 계산결과는 현단계와 매우 가까운 값에 있을 것으로 판단되므로 계산 시간을 더 단축시킬 수 있다.

본 연구에서 SPM의 상판 중심을 구하기 위한 INR은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n - [\Psi'(\mathbf{X}_n)]^{-1} \Psi(\mathbf{X}_n) \quad (1)$$

여기에서 $\Psi(\mathbf{X}_n) = l_c^2(\mathbf{X}_n) - l_0^2$ 는 해에서 0이 되

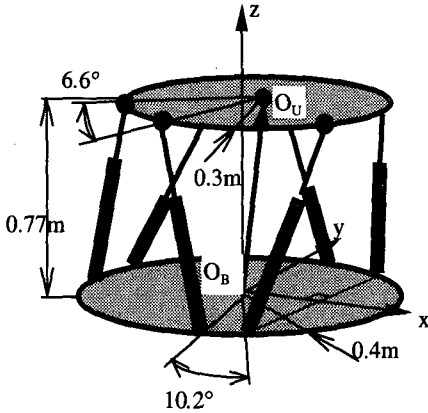


Fig. 1 Stewart platform manipulator and the coordinates.

는 함수이며, $\Psi'(X_n) = \frac{\partial \Psi(X_n)}{\partial X_n}$ 는 이 함수에 대

한 미분 치이다. $X = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 는 Fig. 1에서와 같이 하판중심에 대한 상판 중심의 변위벡터이며 α, β, γ 는 x, y, z 축에 대한 각각의 각 변위이다. $l_k = [l_{c,1} \ l_{c,2} \ \dots \ l_{c,6}]^T$ 와 $l_a = [l_{a,1} \ l_{a,2} \ \dots \ l_{a,6}]^T$ 는 수치해석에 의해 계산된 X 에 의해 계산된 액추에이터 길이와 실제 측정된 액추에이터 길이 벡터이다. 여기서 하 첨자 n 은 반복 계산 수를 표시하고 가역함수에 대한 미분 치 $\Psi'(X)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\Psi'(X) = 2 \text{diag}(l_c) J(X) \quad (2)$$

여기에서 J 와 $\text{diag}(\bullet)$ 는 각각 SPM에 대한 자코비안 행렬(Jacobian matrix) 및 대각행렬을 의미한다. SPM의 작동공간에서 식(1)이 연속적으로 해에 도달하기 위해, 행렬 $[\Psi'(X)]^{-1}$ 은 특이성을 갖거나 특이점에 가까운 값을 가져서는 안된다. 식(2)에서 SPM의 모든 액추에이터 길이는 0이 될 수 없기 때문에, 결국 $[\Psi'(X)]^{-1}$ 에 대한 특이성(Singularity)은 $[J]^{-1}$ 의 특이성과 일치함을 알 수 있다. 그러므로 SPM에서 순기구학을 얻기 위한 특이성 회피 문제는 SPM의 구조적인 특성에 기인한다고 볼 수 있으므로, SPM이 적절히 설계된 경우 INR 방법은 강건하게 해에 도달할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

2.2 액추에이터 운동을 고려한 SPM의 운동 방정식

SPM는 Fig. 2와 같은 AC 서보모터 및 볼스크류 시스템으로 구성된 6개의 직선운동 액추에이터를 가지고 있다. AC 서보모터와 구동장치의 용량은

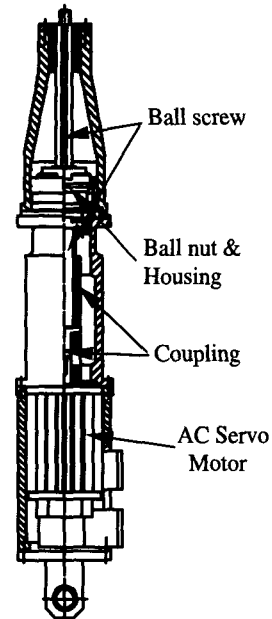


Fig. 2 Actuator

최대 200W이며 3,000 펄스짜리 엔코더가 장착되어 있고, 회전력을 동반하는 회전 운동을 발생한다. 또 AC 서보 구동기는 모터의 속도 및 토크를 제어할 수 있는데, 본 연구에서는 토크제어방식을 사용하였다. AC 모터의 회전 운동은 유연 커플링에 의해서 리드가 25mm 볼스크류 시스템의 볼너트로 전달되어 직선운동으로 전환된다. 그 결과 직선방향으로 순간최대 720N 힘과 최대 240N의 정지 힘을 발생시키게 된다. 볼스크류 및 모터코어와 같이 고정된 액추에이터 몸체에 대해 상대적으로 회전운동을 하는 복잡한 부품들로 인하여 액추에이터의 운동방정식은 복잡한 형태가 되는데, 이 경우 모형의 계수 추정과정이 매우 복잡하고 상황에 따라 변할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 추후 불확실성을 모형에 도입하기로 하고, 다음과 같은 간단한 액추에이터 운동방정식을 구하였다.⁽¹⁰⁾

$$u_{a,j} = m_{a,j} \ddot{j}_j + c_j \dot{j}_j, \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

여기에서 $u_{a,j}$ 는 액추에이터 내부 운동에 의해 발생하는 j 번째 액추에이터 길이 방향으로의 힘이고, $m_{a,j}$ 은 액추에이터 내에서 모든 회전부품들에 의해 발생하는 직선 운동방향으로의 등가 관성 질량이며, c_j 는 관성 질량이 액추에이터 몸체와 상대 운동을 하며 발생하는 비례 마찰 계수이다. 특히 모터와 모터 구동기에 의해서 발생하는 전자기적 특성은 운동재현장치의 사용영역에

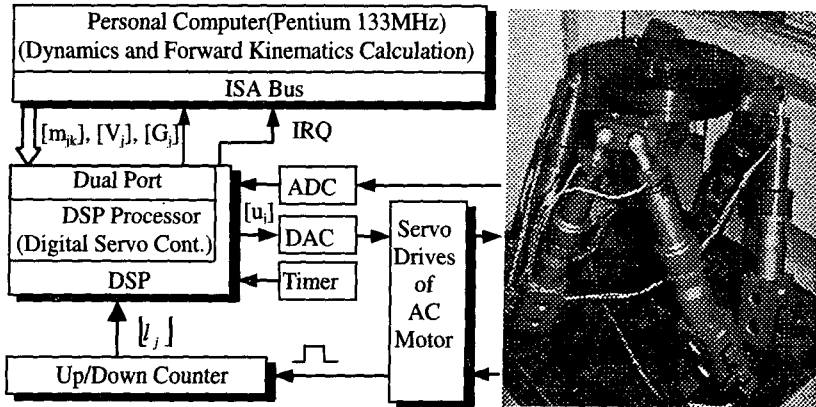


Fig. 3 Control block diagram of SPM system .

비해 매우 빠르기 때문에 본 연구에서는 무시하였다.

6-6 SPM의 모든 관성 질량의 영향을 고려한 운동장치의 운동방정식을 유도하는 것은 일반적으로 매우 어려운 것으로 알려져 왔다.

Zhang 및 Song⁽¹¹⁾은 대부분의 운동방정식이 고려된 6-6 SPM의 운동방정식을 구하기 위해 운동장치를 구성하는 모든 링크들에 대해 가상의 개구간 운동장치 형태로 분리하여 운동방정식을 구한 다음, 뉴턴-오일러(Newton-Euler)방법 및 가상 일 원리를 이용하여 액추에이터 길이 방향에 대한 다음과 같은 운동방정식을 유도하였다.

$$u_{p,j}(t) = H_j(\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \ddot{\mathbf{x}}(t)), j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

여기에서 $u_{p,j}$ 는 운동장치의 운동에 의해서 발생하는 액추에이터 방향으로의 힘이다. 이러한 운동방정식은 수치계산 관점에서 효과적으로 구성되어 있지만, 직접 제어에 적용하기에는 너무 복잡하다. 또한 모형화된 운동방정식을 SPM 상판중심의 위치에 대한 함수로서 유도하여, 제어법칙에 적용하기 위해서는 연속적인 SPM의 순기구학 해석을 피할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 변수상태로서 운동방정식을 유도할 수 있는 Mathematica⁽¹²⁾를 이용하여, 식(4)를 제어법칙에 용이하게 적용할 수 있도록 다음과 같은 형태의 운동방정식으로 재구성하였다.

$$u_{p,j}(t) = \sum_{k=1}^6 \{m_{p,jk}(\mathbf{x}(t))\ddot{r}_k(t)\} + V_{p,j}(\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t)) + G_j(\mathbf{x}(t)), j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

여기에서 $[m_{p,jk}] \in R^{6 \times 6}$ 은 액추에이터 길이방향의 가속도 신호에 대한 관성 행렬이고, $[V_{p,j}] \in R^{6 \times 1}$

는 원심력과 코리올리힘 벡터, 그리고 $[G_j] \in R^{6 \times 1}$ 는 중력힘을 각각 표시한다.

결국, 볼스크류 액추에이터 및 운동장치의 운동에 의해서 발생하는 SPM 시스템의 전체 운동방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$u_j(t) = \sum_{k=1}^6 \{m_{jk}(\mathbf{x}(t))\ddot{r}_k(t)\} + V_j(\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), l_j(t)) + G_j(\mathbf{x}(t)), j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

여기서 액추에이터 길이방향의 힘 벡터는 $[u_j] = [u_{p,j}] + [u_{a,j}] \in R^{6 \times 1}$ 이고, 관성 질량 행렬은 $[m_{jk}] = [m_{p,jk}] + [m_{a,j}] \in R^{6 \times 6}$ 과 같이 표현되며, 이 행렬은 대칭특성과 특이성이 없다. $[V_j] = [V_{p,j}] + [c_{a,j}] \in R^{6 \times 1}$ 는 원심력과 코리올리힘 벡터 및 액추에이터의 마찰력을 포함하고 있다.

3. 제어 시스템

3.1 제어장치

운동방정식을 기저로 하는 제어법칙은 일반적으로 매순간 샘플링 시간 이내에 모든 계산을 마치고 결과를 출력해야 한다. 그러나, 2장에서 설명한 바와 같이 SPM의 순기구학을 포함하는 운동방정식은 많은 양의 복잡한 계산과 반복계산을 필요로 하는 수치 연산을 필요로 하기 때문에, 일반적인 연산시스템에서 주어진 샘플링 시간 이내에 모든 연산과정을 마치는 것은 매우 어렵다. 특히, 운동 재현 장치를 고속제어 하기 위해서는 허용되는 샘플링 시간이 매우 작아야 하기 때문에 단일 연산 장치에 의한 제어시스템의 구축은 현재 매우 어려

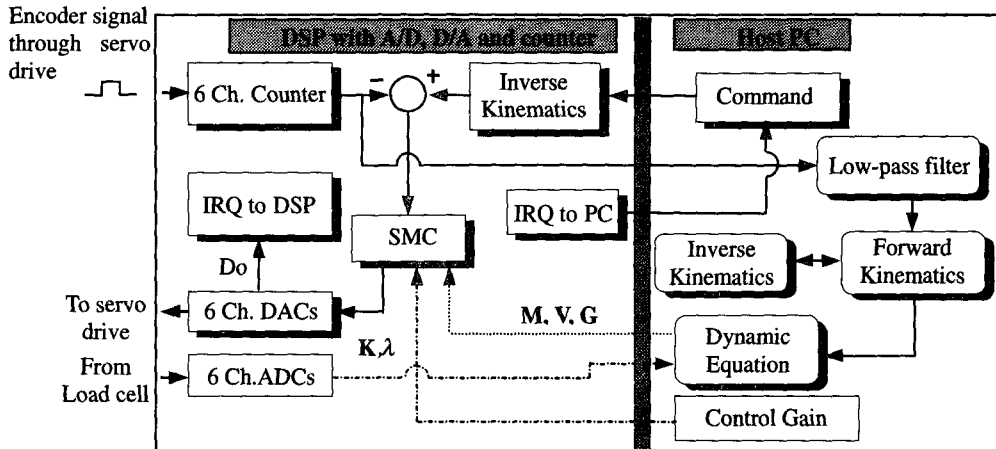


Fig. 4 Control structure of the SPM control system.
 (Rectangular corner boxes and solid lines: Running at every sampling time
 Round corner boxes and dotted lines: Asynchronous tasks
 No shadow boxes and dash-dot lines: At start time executor)

은 상황이다.

그러므로 본 연구에서는 운동재현장치에 대한 디지털 귀환 제어시스템을 구성하기 위해 한 개의 PC와 이에 연결된 DSP(Digital signal processor)를 포함하는 2개의 연산장치를 제안하였다. Fig. 3에서와 같이 2개의 연산장치는 DSP에 설치되어 있는 듀얼포트램(dual port RAM)을 통하여 상호 고속으로 자료를 전달할 수 있다. 귀환제어시스템을 구현하기 위해서는 제어시스템은 연속 적으로 운동방정식의 계산, 순 기구학 및 역기구학의 계산, 외부장치를 제어하고 제어된 신호를 읽어 들일 수 있는 기능이 필요하다. 본 연구에서는 액추에이터 선단에 설치된 하중측정장치에서 하중을 읽어 들일 수 있는 ADC(Analog to digital converter), 제어법칙에 의해서 계산된 제어력을 AC 서보모터 구동기에 전달하기 위한 DAC(Digital to analog converter), 엔코더에서 발생된 신호를 이용하여 현재의 액추에이터 길이를 읽어 들일 수 있는 카운터가 DSP에 각각 연결되어 있어, 실시간으로 외부장치와 신호를 교환할 수 있다. DSP는 카운터에서 읽어 들인 액추에이터 길이신호를 PC에 전달하며, 이 신호를 이용하여, PC에서는 순기구학 및 역기구학 계산을 실시하고, 여기에서 구한 운동판 상판중심의 변위 신호를 사용하여 식(5), (6)에서의 $[m_{jk}]$, $[V_j]$ 및 $[G_j]$ 를 계산한 후, 제어력을 구하기 위해 DSP에 전달한다. DSP는 PC에서 전달된 자료를 이용, 사전에 설정된 제어법칙에 의해 제어력을 계산하여 DAC를 통해 AC 모터 구동기에 전달한다. 제어시스템에 사용된 2개의 연산장치 및 연결된 장치들의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the control system.

Parts	Characteristics	Parts	Characteristics
PC	Intel Pentium 133MHz	DSP	TMS320C40 50MHz
ADCs	16 ch., 12bits, 48kSPS	DACs	8ch., 12bits
Counter	6ch., 24bits, Programmable	Timer	18bits

3.2 연산프로그램

SPM의 추종제어를 구현하기 위해 필요한 실행환경과 실행장소 및 동기화 특성에 의해서 2개의 연산장치에는 3개의 독립된 프로그램이 실행된다. 첫번째 프로그램은 DSP에서 실행되는 실시간 프로그램(RT1)으로서 운동방정식 계산을 하지 않는다는 것을 제외하면 일반적인 디지털 제어기와 동일한 기능을 갖고 있다. 이 부분의 프로그램은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 PC에서 입력된 상판중심의 요구신호를 이용해 액추에이터 길이, 속도 및 가속도 신호를 계산한다. 계산된 요구신호와 카운터에서 읽은 액추에이터 길이 신호를 이용하여 오차신호를 만들어 PC에서 입력되어 있는 운동방정식 계산결과와 제어법칙을 이용해 제어력을 발생한다. 이 부분의 프로그램은 DSP에 내장되어있는 타이머를 이용해 일정한 시간마다 DSP에 인터럽트를 발생시켜 샘플링 시간을 결정한다. 두번째 실시간 실행 프로그램(RT2)은 PC에서 실행되며, DSP와 동기되어 실행한다. 이 프로그램의 역할은 DSP와 PC간의 자료교환을 하면서 사용자 및 PC 주변장치에서 발생된 SPM의 요구변위

신호를 DSP 에 전달한다. 이 프로그램과 DSP 프로그램의 동기화는 DSP가 PC에 인터럽트 신호를 보내어 동기화시킨다. 세번째 프로그램(Asynchronous task)은 PC에서 실행되며, 어느 실시간 프로그램과 동기되어 실행되지 않는다. 이 프로그램의 역할은 두번째 실시간 프로그램에 의해서 전달된 액추에이터 길이신호를 이용하여 SPM의 순기구학 해를 수치해석에 의해서 구하고 이를

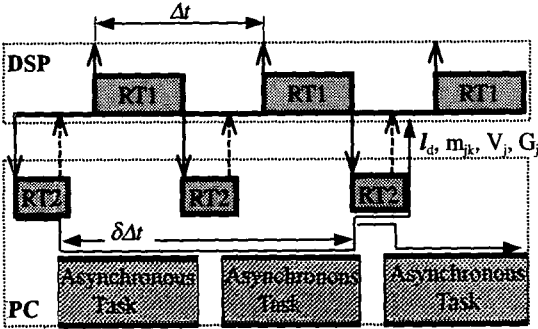


Fig. 5 Timing chart and running sequences.

→ Interrupt request, --→ Polling, → : M, V, G flow)

이용하여 운동방정식을 계산한다. 이 프로그램은 많은 계산과정과 반복 계산을 포함하고 있기 때문에 DSP의 귀환제어와 동기되어 실행되지 못한다. 그 결과 액추에이터 길이신호를 사용해서 최종적으로 운동방정식을 계산하여 DSP에 전달하기까지는 DSP에서 귀환루프가 몇 단계 지난 후이기 때문에 시간 지연에 의한 운동방정식 결과의 오차를 가져올 수 있다.

Fig. 5는 전송한 3개의 프로그램에 대한 시간 분할도이다. PC에서는 2개의 독립된 프로그램이 시분할을 통하여 실행되며, RT2이 비동기 프로그램에 대해서 우선권을 가짐을 알 수 있다. 그 결과 RT2 프로그램의 수행이 끝나고 다음 수행을 시작하기 전까지의 시간이 비동기 프로그램이 실행할 수 있는 시간이다. 또한 RT2 프로그램은 RT1 프로그램의 실행이 끝난 후에 DSP에 의해 PC에 인터럽트가 요구되기 때문에 RT1 프로그램의 수행 시간과 RT2 프로그램의 수행 시간의 합이 DSP에서 수행되는 귀환루프의 샘플링 시간보다도 작아야 함을 알 수 있다.

3.3 슬라이딩 모드 제어기 설계

불확실성을 고려한 운동방정식 (6)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_j = \sum_{k=1}^6 \{(\hat{m}_{jk} + \Delta m_{jk})\dot{i}_k\} + \hat{V}_j + \Delta V_j + \hat{G}_j + \Delta G_j + d_j,$$

$$j=1, 2, \dots, 6 \tag{7}$$

여기에서 \wedge 은 대표적 값으로서 실제측정 및 모형화된 식에 의해 계산된 값을 의미하고, Δm_{jk} , ΔV_j 및 ΔG_j 는 \hat{m}_{jk} , \hat{V}_j 및 \hat{G}_j 에 대한 불확실 부분을 의미하며, d_j 는 운동장치에 입력되는 예측되지 않은 외란을 의미한다.

슬라이딩 함수 s_j 는 다음과 같이 정의된다.⁽¹³⁾

$$s_j = \dot{e}_j + \lambda_j e_j, \quad j=1, 2, \dots, 6 \tag{8}$$

여기에서 $e_j = l_j - l_{d,j}$ 는 제어 오차이고, 양의 값 λ_j 는 상태공간에서 슬라이딩 표면(sliding surface)의 기울기이다. l_j 및 $l_{d,j}$ 는 제어된 액추에이터 길이와 요구되는 액추에이터 길이이다. 슬라이딩 모드 제어법칙은 다음과 같이 등가 제어력, $u_{eq,j}$,과 릴레이 제어력, Δu_j , 항으로 구성된다.

$$u_j = u_{eq,j} + \Delta u_j \tag{9}$$

여기서 등가 제어력 $u_{eq,j}$ 는 $\dot{s}_j = 0$ 의 조건에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$u_{eq,j} = \sum_{k=1}^6 \{ \hat{m}_{jk} (\ddot{i}_{d,k} - \lambda_k \dot{e}_k) \} + \hat{V}_j + \hat{G}_j \tag{10}$$

그리고 본 연구에 사용된 제어법칙에서 리아프노프 함수 V_L 를 다음과 같이 정의한다.

$$V_L = 0.5 \sum_{j=1}^6 s_j^2 \tag{11}$$

제어시스템의 안정조건으로서 리아프노프 함수의 시간 미분 값이 다음과 같은 조건을 만족해야 된다.

$$\dot{V}_L = \sum_{j=1}^6 (s_j \dot{s}_j \leq -\eta_j) \tag{12}$$

여기에서 η_j 는 양의 값으로서 식(12)를 만족하는 조건에서 릴레이 제어력 Δu_j 을 구하면 슬라이딩 모드 제어법칙은 다음과 같다.

$$u_j = \sum_{k=1}^6 \{ \hat{m}_{jk} (\ddot{i}_{d,k} - \lambda_k \dot{e}_k) \} - k_j \text{sgn}(s_j) + \hat{V}_j + \hat{G}_j, \quad j=1, 2, \dots, 6 \tag{13}$$

여기에서

$$k_j \geq \max \left\{ -\Delta V_j - \Delta G_j + \sum_{k=1}^6 \{ \hat{m}_{v,jk} (\ddot{i}_{d,k} - \lambda_k \dot{e}_k) \} + \eta_j \right\} \tag{14}$$

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

$$\begin{aligned} \text{sgn}(s) &= 1 & \text{for } s > 0 \\ &= -1 & \text{for } s < 0 \\ &= 0 & \text{for } s = 0 \end{aligned}$$

식(11)에서 사용한 sgn 함수는 제어 시, 제어력에 채터링을 발생시켜 제어시스템을 불안정하게 하거나 액추에이터 시스템의 파손을 야기시킬 수가 있으므로 슬라이딩 표면 주변에 연속함수를 만들 수 있는 다음과 같은 포화함수로 대체하였다.

$$\begin{aligned} \text{sat}(s, s_o) &= \text{sgn}(s) & \text{for } |s| > s_o \\ &= \frac{s}{s_o} & \text{for } |s| \leq s_o \end{aligned} \quad (15)$$

여기에서 양의 상수 s_o 는 슬라이딩 표면 주위의 경계층 두께이다.⁹⁾ 결과적으로 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_j &= \sum_{k=1}^6 \{ \hat{m}_{jk} (\ddot{i}_{d,k} - \lambda_k \dot{e}_k) \} - k_j \text{sat}(s_j, s_{o,j}) + \hat{V}_j + \hat{G}_j, \\ j &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (16)$$

3.4 운동방정식에서의 불확실성 해석

SPM의 운동방정식 (6)에서 불확실성은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta m_{jk}(t) &= \Delta m_{m,jk}(t - \delta \Delta t) + \Delta m_{r,jk}(t) \\ \Delta V_{i,j}(t) &= \Delta V_{m,i,j}(t - \delta \Delta t) + \Delta V_{r,i,j}(t) \\ \Delta G_{i,j}(t) &= \Delta G_{m,i,j}(t - \delta \Delta t) + \Delta G_{r,i,j}(t) \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서

$$\begin{aligned} \Delta m_{r,i,jk}(t) &= \hat{m}_{i,jk}(t) - \hat{m}_{i,jk}(t - \delta \Delta t) \\ \Delta V_{r,i,j}(t) &= \hat{V}_j(t) - \hat{V}_j(t - \delta \Delta t) \\ \Delta G_{r,i,j}(t) &= \hat{G}_j(t) - \hat{G}_j(t - \delta \Delta t) \end{aligned}$$

양의 정수 δ 는 Fig. 5에서와 같이 PC에서 비동기적으로 운동방정식을 계산하기 때문에 발생하는 값으로서, DSP 내에서의 샘플링 시간에 대한 배수이다. 또한 식(17)에서 $\Delta m_{r,i,jk}(t)$, $\Delta V_{r,i,j}(t)$ 및 $\Delta G_{r,i,j}(t)$ 은 시간 지연 계산에 의해 발생하는 불확실성 값이고, $\Delta m_{m,jk}(t - \delta \Delta t)$, $\Delta V_{m,i,j}(t - \delta \Delta t)$ 및 $\Delta G_{m,i,j}(t - \delta \Delta t)$ 는 모델 및 계수의 불확실성에 의해 기인하는 값이다. 그러므로 본 연구에서 일반적으로 발생하는 불확실성과 함께 시간지연에 의해 발생하는 불확실성 값이 추가되었다.

4. 실험

제안된 제어장치 및 제어법칙을 이용하여 본 연구실에서 제작된 6-6 SPM에 적용하여 추종제어 실험을 실시하였다. 본 실험에서 선정된 상판중심

의 각 방향에 대한 요구신호는 SPM의 수직방향 을 제외한 다른 방향은 운동판 자세변화를 연속적으로 부여하기 위해 각기 다른 저주파수, 대 변위의 운동을 부여하였다. 그리고 본 연구에 사용된 운동판은 자동차 시뮬레이터를 대상으로 개발되었기 때문에, 수직방향의 상대적인 고주파수 운동 제어 특성을 확인하였다. 수직방향은 운동판의 자세

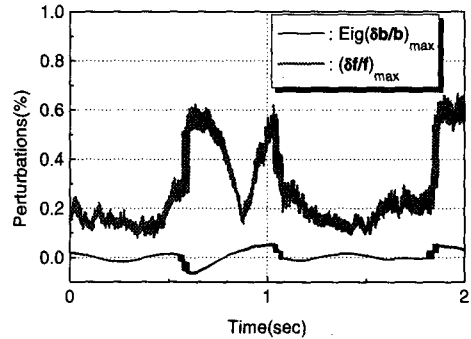


Fig. 6 Perturbations caused by asynchronous dynamic calculation.

변화 따른 제어 특성을 확인하기 위해 저주파수부터 고주파수까지 연속적인 변화를 갖는 정현 파를 사용하였다.

본 실험의 제어법칙에 사용된 제어 인자는 가능한 높은 추종제어 성능을 가질 수 있으며 높은 이득값을 사용하도록 실험적으로 튜닝하였다. 그 상한값은 실제 6-6 SPM이 가지는 기계적 특성과 사용된 AC 서보모터의 성능 및 모형화 된 운동방정식의 불확실성이 고려되어 모든 액추에이터에 대하여 $\lambda_j = 14\pi \text{ rad/sec}$, $s_{o,j} = 0.06 \text{ m/sec}$ 및 $k_j = 160 \text{ N}$ 으로 튜닝 되었으며 이때 SPM에 설치된 부하는 64 kg이다.

실제적으로 대부분의 연산시간이 소요되는 부분은 SPM의 순기구학 및 운동방정식의 계산으로서, 이 부분은 PC에서 비동기적으로 계산되어 DSP에 전달하기 때문에 DSP의 연산 시간은 1msec 이내로 수행할 수 있었다. PC에서 수행되는 비동기 프로그램은 상황에 따라 약간씩 다르지만 약 2-3msec 이내에서 수행되었다. 그 결과 운동방정식의 계산 결과는 DSP에 대해 항상 3-4 단계 전 자료를 이용하여 DSP에 계산결과를 전달하기 때문에, 제어력을 계산하기 위한 운동방정식의 결과는 항상 어느 정도의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 이러한 비동기 계산에 의해 발생하는 운동방정식의 계수에 대한 불확실성으로서, 실험결과 이러한 이유에 의해서 발생하는 불확실성

의 값은 계산된 운동방정식의 절대값에 비해서 매우 작음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 불확실성 값을 운동방정식의 모델에 대한 불확실성으로 처리하여 강건 제어 시 이를 고려하였다.

Fig. 7은 SPM 하관중심의 좌표계 방향으로 상관중심 O_0 에 대한 요구신호 및 추종 오차이다. 실험결과 모든 방향에 대해서 요구 신호에 대한 거의 완전한 추종제어 성능을 보여주고 있으며, SPM의 동특성이 모든 좌표계 방향으로 연성 되었음에도 불구하고 제어 시 거의 영향을 받지 않은 제어특성을 보여주었다. Fig. 8은 액추에이터의 추종오차로 구성되는 액추에이터 1에 대한 전형적인 슬라이딩 변수로서 전 시험구간 이내에 슬라이딩 표면 근처에 설정한 경계층 이내에 존재함을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 7과 같은 추종제어 성능을 발생시킬 수 있는 액추에이터 1의 제어력으로서, 슬라이딩 표면근처에 경계층을 도입한 제어법칙을 사용하였기 때문에 채터링은 발생하지 않았다. 그 결과 설계된 운동판의 부하능력에 대해 상대적으로 고부하에서도 제안된 제어시스템은 SPM 운동 판을 충실히 추종 제어함을 알 수 있어, 제안된 SPM의 운동방정식을 기저로 한 제어시스템 및 제어법칙은 적절했음을 알 수 있다.

5. 결론 및 정리

SPM에 대한 고속, 고성능의 제어를 설계하

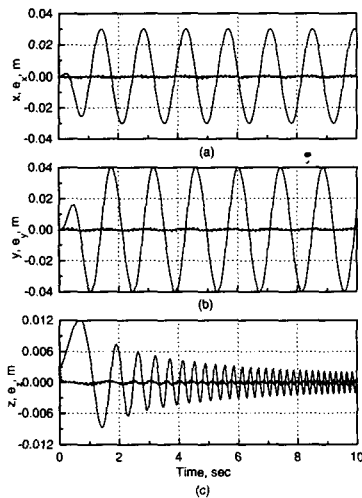


Fig. 7 Commands and tracking errors. (Command : —, Error : —)

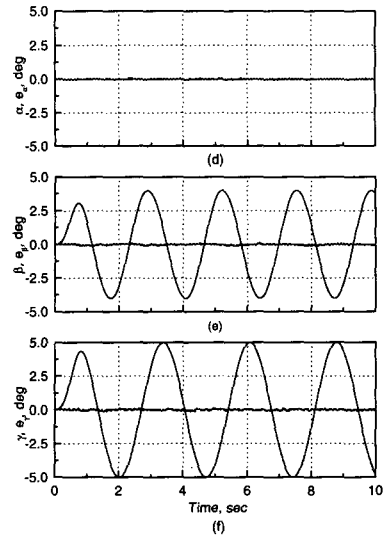


Fig. 7 Continued(Command : —, Error : —)

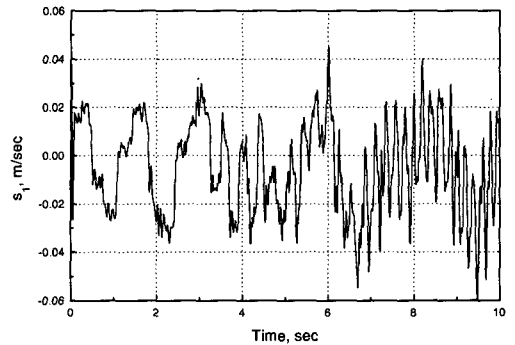


Fig. 8 Typical sliding function.

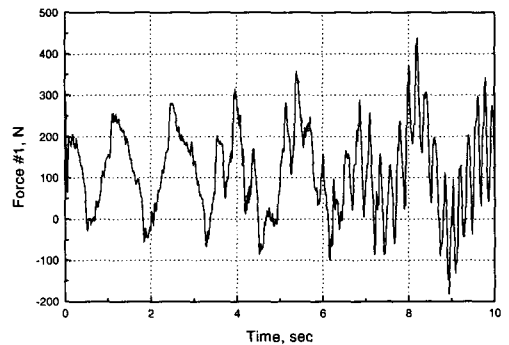


Fig. 9 Typical control force.

기 위한 운동방정식을 이용한 제어시스템 설계를 하였으며, 제어시스템 및 운동판 모델링 과정 중 발생할 수 있는 불확실성을 극복하기 위해 슬라이딩 모드 제어 기법이 도입 되었다. SPM의 운동방정식을 계산하기 위한 순기구학 해는 완전해로서 도출되지 않기 때문에 강건하고 상대적으로 빠른 해를 구할 수 있는 수치해석 방법인 INR을 도입 하였다. SPM의 추종제어에 필요한 순기구학 계산 과정을 포함하는 SPM의 운동방정식의 계산은 계산 시간이 많이 소요되기 때문에 제어과정 중 발생하는 계산을 분담하여 빠르고 효과적인 제어시스템을 설계하기 위해 2개의 연산장치를 도입한 실시간 제어 시스템을 구축하였다. 2개의 연산장치에서는 3개의 동기, 비동기 프로그램이 실행되고, 이로 인해 발생한 운동방정식 계수의 불확실성을 대표값에 대한 불확실성으로 처리하여 강건 제어의 일종인 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어법칙을 기반으로 하는 제안된 제어시스템을 실험실에서 제작된 6-6 SPM의 운동장치에 적용하여 추종제어 실험을 실시하였으며, 실험결과 설계된 운동판의 부하능력에 대해 상대적으로 고부하에서도 충실한 추종제어를 구현할 수 있었다. 그 결과 본 연구에서 제안된 제어시스템과 제어법칙은 운동방정식을 사용하는 SPM의 제어환경에 적절하였음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Stewart, D., 1965, A "Platform with Six Degree of Freedom," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*, Vol. 180, Part 1, No. 5, pp. 371~386.
- (2) Griffis, M. and Duffy, J. 1989, A Forward Displacements Analysis of a Class of Stewart Platforms, *Journal of Robotic System*, Vol. 6, No. 6, pp. 703~720.
- (3) 김영수, 항공기 시뮬레이터 운동 판 개발, 1994, 제 2 회 항공기 개발 심포지엄, pp. 185~194.
- (4) 박일경, 박경균, 조준희, 김정하, 이운성, 병렬 구조형 차량운전 모사장치의 성능평가 및 분석, 1997, 한국 자동제어 학술회의, pp. 1481~1484.
- (5) 채승훈, 이한성, 양현석, 최용제, 스튜어트 플랫폼형 6축 공작기계의 적응제어, 1997, 대한기계학회 1997년도 추계 학술대회, pp. 714~719
- (6) 박종범, 박철규, 이교일, 안정화 플랫폼으로 사용되기 위한 스튜어트 플랫폼의 제어기 설계, 1997, 대한기계학회 1997년도 추계 학술대회, pp. 621~626
- (7) Bormann, J., and Ulbrich, H., 1996, Isolation of Vibrations to Avoid Dynamic Interactions Between a Telescope and Its Foundation by Active Control, *Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan*, pp. 88~93
- (8) Freman S., et al., 1995, The Iowa Driving Simulator: an Implementation and Application Overview, *SAE 950174*, pp 1~10.
- (9) Parrish, R. V., Dieudenne J.E. and Martin, D. J. Jr., 1973, Motion Software for a Synergistic Six-degree-of-freedom Motion Base, *NASA TN D-7350*.
- (10) Lee, C. W., Shin, J. C. and Kim, N. I., 1997, Dynamic Modeling and Robust Planar Motion Control of Parallel Manipulator, *Asia-Pacific Vibration Conference '97, Kyoungju, Korea* pp. 336~340.
- (11) Zhang C.-D. and Song, S.-N., 1993, An Efficient Method for Inverse Dynamics of Manipulator Based on Virtual Work Principle, *Journal of Robotic System*, Vol. 10, No. 5, pp. 605~628.
- (12) Wolfram, S., 1991, *Mathematica: A System for Doing Mathematics by Computer*, Addison Wesley.
- (13) Slotine, J.-J. E., 1984, Sliding Controller Design for Non-linear Systems, *International Journal of Control*, Vol. 40, No. 2, pp. 421~434.