한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp.235~240

자전거 시뮬레이터용 4자유도 운동판의 설계 및 추적 제어

Design and Tracking Control of 4-DOF Motion Platform for Bicycle Simulator

성지원*, 신재철**, 이종원***
Ji-Won Sung, Jae-Cheol Shin and Chong-Won Lee

Key Words : simulator (시뮬레이터), motion platform (운동판), parallel manipulator (병렬 매니퓰레이터), tracking control (추적 제어), computed torque method (계산 토크법), sliding mode control (슬라이딩 모드 제어법)

ABSTRACT

A four degrees of freedom (dof) motion platform for bicycle simulator is developed. The motion platform, capable of the vertical linear and three angular motions, is designed based on analysis of the typical motion characteristics revealed by the existing six dof bicycle simulator. The platform essentially consists of two parts: the three dof parallel manipulator, consisting of a moving platform, a fixed base and three actuators, and the turntable to generate the yaw motion. The nonlinear kinematics and dynamics of the three dof parallel manipulator with multiple closed loop chains are analyzed for tracking control of the motion platform. The tracking performances of the three control schemes are experimentally compared: the computed torque method (CTM), the sliding mode control (SMC) and the PD control. The CTM and SMC, incorporated with the system dynamics model, are found to be equally better in performance than the PD controller, irrespective of the presence of external disturbance.

기호 설명

A_i	하판의 조인트 위치 (i=1,2,3)
B_i	상판의 조인트 위치
${}^{C}\mathbf{e}_c$	구속링크의 질량중심의 위치벡터
e_1	A_i에서 실린더 질량중심까지의 거리
e_2	B_i에서 피스톤 질량중심까지의 거리
${}^{A}\mathbf{f}_{bi}, {}^{B}\mathbf{f}_{bi}, {}^{i}\mathbf{f}_{bi}$	각 다리에 의해 상판에 작용하는 반력
${}^{A}\mathbf{f}_c, {}^{C}\mathbf{f}_c$	구속링크에 의해 상판에 작용하는 힘
$\mathbf{g}$	중력가속도
${}^{B}\mathbf{I}_p$	상판의 관성행렬
${}^{C}\mathbf{I}_{Oc}$	구속링크의 관성행렬
${}^{i}\mathbf{I}_{1i}, {}^{i}\mathbf{I}_{2i}$	각 다리의 실린더, 피스톤의 관성행렬
m_1, m_2	실린더와 피스톤의 질량
m_c, m_p	구속링크와 상판의 질량
${}^{C}\mathbf{R}_A, {}^{i}\mathbf{R}_A$	회전변환행렬
$\mathbf{s}_i$	다리의 단위벡터
$\mathbf{v}_p, \dot{\mathbf{v}}_p$	상판의 선속도와 선가속도 벡터
${}^{C}\mathbf{v}_p$	구속링크 끝단에서의 선속도 벡터
$\mathbf{v}_{1i}$	각 다리의 실린더 질량 중심의 선속도
${}^{B}\boldsymbol{\omega}_p, {}^{C}\boldsymbol{\omega}_g, {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i$	상판, 구속링크, 각 다리의 각속도

왼쪽 위첨자 A, B, i는 각각 A, B, D 좌표계를 나타냄

* LG 전자 Digital Appliance Research Lab.
E-mail : jwsung@lge.com
Tel : (02) 818-7974, Fax : (02) 867-3941
** 한국과학기술원 기계공학과 대학원
*** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

컴퓨터 그래픽으로 재생되는 가상현실 시각환경과 인간이 느끼게 되는 각종 운동 감각을 재현해주는 운동장치를 결합한 시뮬레이터는 오래 전부터 항공기와 자동차 관련 연구가 진행되어 왔으며, 1990 년대에 들어서는 군사용 훈련장비 및 민간항공 비행 시뮬레이션으로 연구가 확대되고, 최근에는 여가산업의 발달과 더불어 레저 및 오락용 시뮬레이터의 부가가치 및 경제적 잠재력이 커짐에 따라 그 응용범위가 점점 더 넓어지고 있다.

자전거 시뮬레이터와 관련해서는 1997 년 독일의 Max-Plank Institute for Biological Cybernetics 에서 기울임(tilting) 효과를 고려한 시뮬레이터가 개발되었고, 1998 년 미국의 Carnegie Mellon 대학에서는 페달효과를 고려한 시뮬레이터가 개발되었다. 1999 년 한국과학기술원에서 개발한 자전거 주행 시뮬레이터는[1], [2] 현실적 운동감을 수반하는 시뮬레이터의 핵심 요소기술과 통합기술을 자체적으로 개발함으로써 시뮬레이터 및 관련 기술의 국산화를 이루기 위한 선행연구의 대상이 되고 있다. 최근에는 싱가포르의 Nanyang 대학에서도 시각재현장치와 운동재현장치를 결합한 자전거 시뮬레이터를 개발하였다. 그 외 국내외 업체에서 레저 및 오락용 시뮬레이터를 개발, 연구 중에 있다.

이러한 시뮬레이터 개발에 있어서 운동판은 주요한 운동재현장치의 하나로서 1950 년대 말부터 적극적으로 도입되기 시작하였다. 현재 많이 사용되는 운동재현장치는 1965 년 Stewart 에 의해 항공기 시뮬레이터 용으로 제안된 스튜어트 플랫폼(Stewart platform)으로, 관련 연구로는 기구학 해석에 의한 기구 구조 변수의 최적화, 동역학 해석

및 제어 알고리즘 개발 등 기구계 및 제어관련 분야의 연구가 주를 이루어 왔다. 시뮬레이터 관련 연구로는 미국의 Iowa 대학교와 NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration)에 의해 NADS(National Advanced Driving Simulator)의 운동재현 장치로 차량의 운동특성에 맞는 스튜어트 플랫폼이 연구개발 되었으며, 국내에서는 한국과학기술원에서 차량 시뮬레이터용 운동판을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 1999 년 한국과학기술원에서 개발된 자전거 주행 시뮬레이터를 기초로 하여, 6 자유도 운동판을 축소한 4 자유도 운동판을 설계하고 운동판의 위치 추적 제어를 실시하였다.

2. 자전거 주행 시뮬레이터의 운동재현장치

2.1 4자유도 운동판의 필요성

운전자가 느끼는 운동느낌은 주로 평형사(Otolith)를 통해 느껴지는 비력(Specific force)과 반고리관(Semicircular canal)을 통해 느껴지는 회전속도에 기인하게 된다. 시뮬레이터 운전시 비력과 회전속도의 특성을 살펴보기 위하여 한국과학기술원 자전거 주행 시뮬레이터를 운전하여 운동특성을 검토하였다[2]. 시뮬레이터의 운동재현장치는 x 방향의 선형전후변위(Longitudinal)운동과 롤(Roll)운동, y 방향의 선형횡변위(Lateral)운동과 피치(Pitch)운동, z 방향 선형상하변위(Heave)운동과 요(Yaw)운동을 하는 6 자유도 스튜어트 플랫폼이며, 자전거 몸체의 앞 방향이 x 방향이고, 위 방향이 z 방향, y 방향은 오른손 법칙에 의하여 정해진 방향이다.

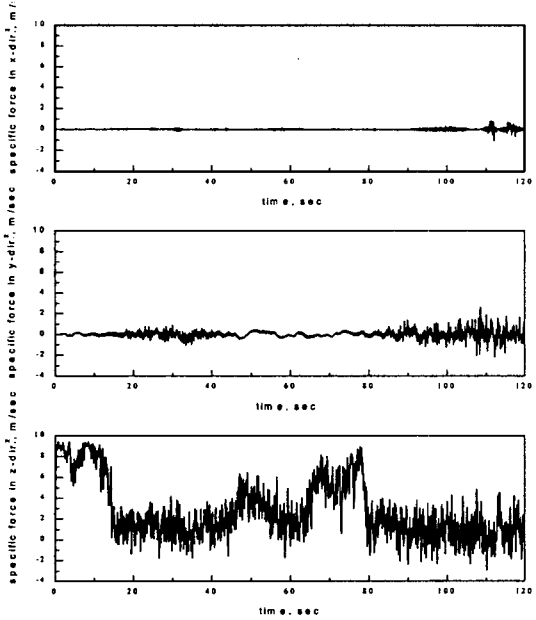

Fig.2-1 Specific force

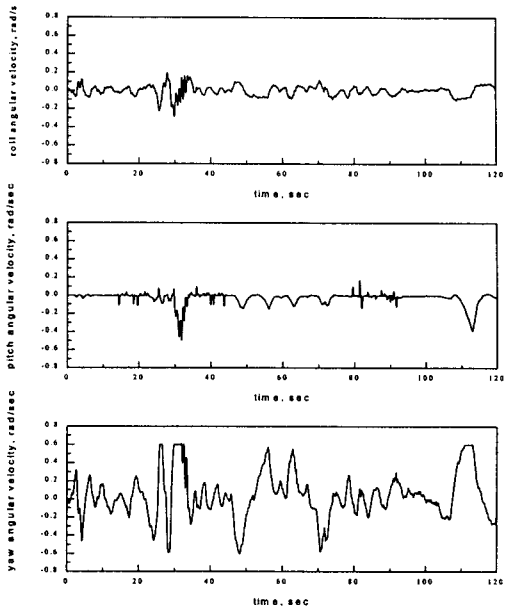

Fig.2-2 Angular velocity

운전 결과는 Fig.2-1 를 살펴보면 비력으로 나타내어지는 선형운동특성은 x 방향과 y 방향의 비력에 비하여, z 방향의 비력의 크기가 상대적으로 큰 값을 가진다. 또한 자전거 주행시의 운동재현에 있어서 자전거의 가감속과 좌우방향의 운동이 크지 않고, x 방향, y 방향의 가속도는 운동판의 롤 운동과 피치운동으로 대체하여 나타내어질 수 있기 때문에 x 방향, y 방향의 운동재현이 상대적으로 덜 중요하다. 선형운동의 경우 z 방향의 선형운동만을 재현해 주어도 운전자에게 실제와 같은 운동느낌을 줄 수 있다. 그러나 Fig.2-2 를 보면 각운동에 있어서는 실제의 운동범위가 크고, 선형운동특성이 각운동으로 대체되어 나타내어지므로 모든 각운동의 재현이 필요하다. 이러한 이유로 z 방향의 선형운동과 세 방향의 각운동을 하는 4 자유도 운동판을 제안하였다

2.2 4자유도 운동판의 설계 및 사양

고안된 4 자유도 운동판은 z 방향의 선형 상하변위운동과 롤, 피치운동을 하는 3 자유도 병렬 매니퓰레이터에 1 자유도 요운동을 하는 장치를 추가함으로써 구성되어진다. 그 중 3 자유도의 병렬 매니퓰레이터는 상판과 하판, 3 개의 선형운동 액추에이터 및 구속링크로 구성되어 있다. 이는 z 방향의 선형변위 운동과 롤, 피치운동을 하며, 운동성능 특성은 Table.2-1 과 같다. 이 병렬 매니퓰레이터에 요방향의 운동을 재현해 주기 위하여 상판에 턴테이블을 설치하였으며, 턴테이블 구동시 필요한 토크는 자전거 시뮬레이터 주행 시 얻은 요 방향 각속도의 최대값과 각가속도의 최대값으

로부터 구하였다. 이와 같이 설계된 4 자유도 운동판은 Fig.2-3 과 같다.

Table. 2-1 Motion range and performance of three dof motion platform

Payload	300 kg		
Actuator Stroke	180 mm		
Motion	Range	Speed	Acceleration
Z translation	± 8 cm	50 cm/sec	0.6 g
Roll Angle	± 18 degree	50 deg/sec	600 deg/sec^2
Pitch Angle	± 18 degree	50 deg/sec	360 deg/sec^2

(* 1 g = 9.8 m/sec^2)

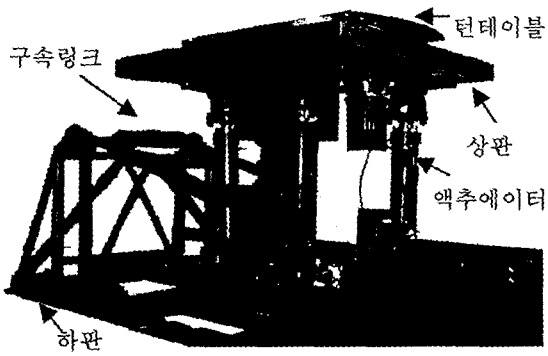

Fig.2-3 Motion platform

3. 기구학 및 동역학[3]

3.1 기구학

4 자유도 운동판에서 1 자유도 요운동을 하는 턴테이블은 3 자유도 병렬 매니퓰레이터와는 독립적으로 구동하며, 기구학적인 폐루프(closed-loop)를 형성하지 않으므로 기구학 해석은 3 자유도 병렬 매니퓰레이터만을 고려하였다. 역기구학은 상판의 위치가 주어졌을 때, 각 다리(Limb)의 길이를 구하는 문제로서 벡터계산에 의해서 유도하였으며, 자코비언은 다리의 속도와 상판의 속도의 관계를 나타내는 식으로, 구속조건을 고려하여 속도 벡터-루프 방법 (Conventional velocity vector-loop method)을 통하여 구하였다. 순기구학은 각 다리의 길이 d_i 가 주어졌을 때, 상판의 위치를 찾는 문제로 정의되며, 순기구학 계산은 반복 Newton-Raphson's (NR) 방법을 사용하였다[4],[5].

3.2 동역학

본 연구에서는 액추에이터의 마찰 등에 따른 모델링의 불확실성과 부하하중의 변화, 외란의 영향 등을 고려한 운동판 제어를 위해서 운동판의 동역학을 해석하였으며, 운동판의 운동에 필요한 액추에이터 힘을 구하기 위하여 뉴튼-오일러 방법을 이용해 운동방정식을 유도하였다. 운동판은 크게 각 다리와 상판, 구속링크로 구성되어 있으며, 각 다리는 실린더(Link1)와 피스톤(Link2)으로 구성된다. Fig.3-1 은 각 다리와 상판, 구속링크의 자유 물체도이다. 좌표계는 하판에 고정된 좌표계 A(x-y-z)와 상판에 고정된 좌표계 B(u-v-w), 구속링크에 고정된 좌표계 $C(x_c\text{-}y_c\text{-}z_c)$와 각 다리에 고정되어 있는 좌표계 $D(x_i\text{-}y_i\text{-}z_i)$를 사용한다. 좌표계 $D(x_i\text{-}y_i\text{-}z_i)$는 A 와 평행한 좌표계의 y 축에 대하여 $-\phi_i$ 회전하여 얻어진 좌표계의 x 축을 기준으로 하여 φ_i 회전한 좌표계이다.

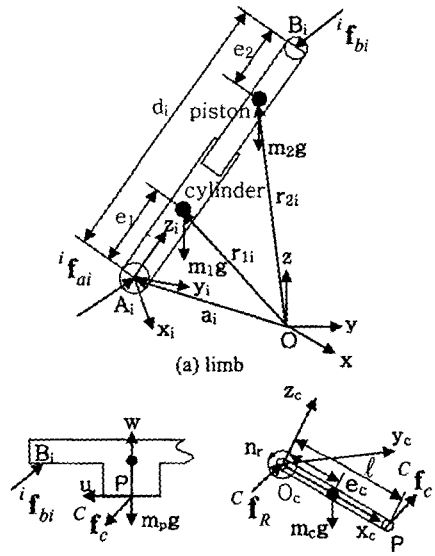

Fig.3-1 Free-body diagram

(1) 다리의 운동방정식

다리의 운동방정식을 유도하기 위하여 점 A_i 에 대해 오일러 운동방정식(Euler's equation of motion)을 구한다.

$$ {}^i\mathbf{n}_i^A = \frac{d}{dt}({}^i\mathbf{h}_i^A) \tag{3-1} $$

${}^i\mathbf{h}_i^A$ 는 포인트 A_i 에 대한 다리의 각운동량으로 다음과 같이 구하여 진다.

$$ \begin{aligned} {}^i\mathbf{h}_i^A &= m_1 e_1 ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{v}_{1i}) \\ &+ m_2 (d_i - e_2)({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{v}_{2i}) + {}^i\mathbf{h}_{1i}^c + {}^i\mathbf{h}_{2i}^c \end{aligned} \tag{3-2} $$

여기에서 ${}^i\mathbf{h}_{1i}^c = {}^i\mathbf{I}_{1i}\,{}^i\boldsymbol{\omega}_i$, ${}^i\mathbf{h}_{2i}^c = {}^i\mathbf{I}_{2i}\,{}^i\boldsymbol{\omega}_i$ 이다.

또한 포인트 A_i 에 대해 각 다리에 작용하는 모멘트는 다음과 같다.

$$ \begin{aligned} {}^i\mathbf{n}_i^A &= d_i\,{}^i\mathbf{s}_i \times (-{}^i\mathbf{f}_{bi}) \\ &+ \left[m_1 e_1 + m_2 (d_i - e_2)\right]({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{R}_A\,\mathbf{g}) \end{aligned} \tag{3-3} $$

따라서 각 다리에 대한 운동방정식은 위의 식들로부터 구할 수 있다.

(2) 구속 링크의 운동방정식

구속링크의 끝단에 작용하는 힘을 구하기 위하여, 포인트 O_c 에 대해 오일러 운동방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$ {}^{C}\mathbf{n}_O = \frac{d}{dt}({}^{C}\mathbf{h}_O) \tag{3-4} $$

각운동량은 다음과 같이 구하여진다.

$$ {}^{C}\mathbf{h}_O = m_c({}^{C}\mathbf{e}_c \times {}^{C}\mathbf{v}_g) + {}^{C}\mathbf{I}_{Oc}\,{}^{C}\boldsymbol{\omega}_g \tag{3-5} $$

구속링크에 의해 상판에 작용하는 힘을 ${}^{C}\mathbf{f}_c$ 라 하면, 포인트 O_c 에 대해 작용하는 모멘트는 다음과 같이 계산되어진다.

$$ {}^{C}\mathbf{n}_O = {}^{C}\boldsymbol{\ell} \times {}^{C}\mathbf{f}_c + m_c({}^{C}\mathbf{e}_c \times {}^{C}\mathbf{R}_A\mathbf{g}) \tag{3-6} $$

따라서 위의 세 식으로부터 구속링크의 운동방정식을 구할 수 있다.

(3) 상판의 운동방정식

좌표계 A(x-y-z)에서 상판의 뉴튼 운동방정식은 다음과 같다.

$$ \sum_{i=1}^{3} {}^{A}\mathbf{f}_{bi} - {}^{A}\mathbf{f}_c + m_p\,{}^{A}\mathbf{g} = m_p\dot{\mathbf{v}}_p \tag{3-7} $$

상판에 고정된 좌표계 B(u-v-w)에서 원점 P 에 대한 모멘트는 다음과 같으며, 오일러 운동방정식에 의해 다음과 같다.

$$ {}^{B}\mathbf{n}_p = \sum_{i=1}^{3} {}^{B}\mathbf{b}_i \times {}^{B}\mathbf{f}_{bi} \tag{3-8} $$

$$ {}^{B}\mathbf{n}_p = {}^{B}\mathbf{I}_p\,{}^{B}\dot{\boldsymbol{\omega}}_p + {}^{B}\boldsymbol{\omega}_p \times ({}^{B}\mathbf{I}_p\,{}^{B}\boldsymbol{\omega}_p) \tag{3-9} $$

위의 세 식을 연립하여 다리에 의해 상판에 작용하는 z 방향의 힘, ${}^{i}f_{biz}$ 과 구속링크에 의해 상판에 작용하는 x 와 y 방향의 힘, ${}^{C}f_{cx}$, ${}^{C}f_{cy}$ 를 구할 수 있다.

(4) 운동방정식

각 다리의 액추에이터의 힘은 다리의 좌표계 $D(x_i\text{-}y_i\text{-}z_i)$의 z_i 축을 따라 피스톤에 작용하는 모든 힘의 합으로서 앞에서 구한 기구학적인 해석을 통해서 상판 위치의 좌표계로부터 다리길이에 관한 항으로 바꾸어 주면 최종적으로 운동방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$ \mathbf{f} = \mathbf{M}(\mathbf{d})\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{V}(\mathbf{d},\dot{\mathbf{d}}) + \mathbf{G}(\mathbf{d}) \tag{3-10} $$

여기에서 $\mathbf{f}$ 는 액추에이터 힘 벡터, $\mathbf{d}$ 는 다리의 길이벡터, $\mathbf{M}$ 은 관성행렬, $\mathbf{V}$ 는 코리올리 힘과 원심력 벡터, $\mathbf{G}$ 는 중력 벡터이다.

4. 실험장치의 구성

고안된 4 자유도 운동판의 추적 제어를 위한 실험장치는 기구학과 동역학을 해석하고, 토크 명령을 주는 컴퓨터, 모터를 제어하는 DSP(Digital Signal Processor)와 액추에이터로 구성된다. 컴퓨터의 OS 환경은 실시간(Real-time) OS 인 QNX 이고, 컴퓨터와 DSP 모터 제어기간의 통신은 CAN (Control Area Network) 통신을 이용하였다. 모터 내부의 전류 제어는 FOC(Field Oriented Control) 방식의 벡터 제어에 의해 이루어지며, 모터 엔코더 신호는 DSP 모터 제어기로 피드백되어 CAN 통신을 통해 컴퓨터로 전달된다.

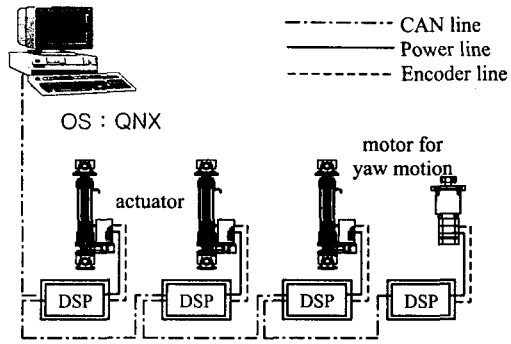

Fig.4-1 Schematic of experimental setup

5. 운동판의 제어

3 자유도 시스템에 대하여 운동판의 동역학을 고려하지 않은 PD 제어법과 동역학을 고려한 계산 토크법, 강건제어 방법의 일종인 슬라이딩 모드 제어 방법을 이용하여 추적 제어에 대한 성능을 비교하였다. 요방향의 제어는 PD 제어법을 이용하였다.

5.1 PD 제어법

기본적인 PD 제어법칙은 다음과 같다.

$$ \mathbf{f} = \mathbf{K}_v\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e} \tag{5-1} $$

여기에서 $\mathbf{d}_d$ 는 요구되는 변위신호 벡터이고, $\mathbf{e} = \mathbf{d}_d - \mathbf{d}$ 로 오차신호 벡터이다. 설계시 $\mathbf{K}_v$ 는 17kg/sec, $\mathbf{K}_p$ 는 1150kg/sec^2 을 이용하였다.

요 방향의 위치 추적 제어를 위하여 사용한 제어 법칙도 위와 같으며, 이 때의 게인 값은 $\mathbf{K}_v$ 는 0.026Nm.sec, $\mathbf{K}_p$ 는 0.26Nm 으로 설계하였다.

5.2 계산 토크법

로봇 매니퓰레이터 시스템에서 가장 일반적인 제어 방법인 계산 토크법의 제어법칙은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$ \mathbf{f} = \mathbf{M}(\mathbf{d})(\ddot{\mathbf{d}}_d + \mathbf{K}_v\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e}) + \mathbf{V}(\mathbf{d},\dot{\mathbf{d}}) + \mathbf{G}(\mathbf{d}) \tag{5-2} $$

여기에서 $\ddot{\mathbf{d}}_d$ 는 요구되는 변위신호 벡터이다. $\mathbf{K}_v = diag\{k_{vi}\}$, $\mathbf{K}_p = diag\{k_{pi}\}$ $(i=1,2,3)$인 게인

행렬로, 여기에서 k_{vi}, k_{pi} 가 모두 양수이면 오차의 동특성은 안정하며, 이것이 만족되도록 다음과 같이 설계하였다. 2 차 시스템의 특성 방정식으로부터 $k_{vi}=2\varsigma\omega_n$, $k_{pi}=\omega_n^2$ 이며, 오차의 동특성이 절점 주파수(ω_n)는 20Hz 이고, 감쇠비(ς)는 1 이 되도록 하였다.

5.3 슬라이딩 모드 제어법

슬라이딩 모드 제어 방법을 이용한 제어법칙은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}=\mathbf{M(d)}(\ddot{\mathbf{d}}_d+\lambda\dot{\mathbf{e}}+\mathbf{P}_s\mathbf{s}+\mathbf{K}sat(\mathbf{s},s_o)) +\mathbf{V(d,\dot{d})}+\mathbf{G(d)} \quad (5\text{-}3)$$

여기에서 $\mathbf{s}=\dot{\mathbf{e}}+\lambda\mathbf{e}$ 는 슬라이딩 함수이다. $\mathbf{P}_s\mathbf{s}$ 는 오차상태 공간의 임의의 위치에서 슬라이딩 표면까지의 도달시간을 축소시키기 위해서 첨가한 항으로[6] 스텝입력에 대한 응답특성을 기준으로 대각행렬 $\mathbf{P}_s$ 의 요소가 15rad/sec 가 되도록 설계하였으며, 불연속으로 인한 채터링 현상에 의해 시스템의 모델화 되지 않은 부분의 가진이나 상대운동을 하는 부분의 심한 마모 유발을 방지하기 위하여 슬라이딩면 근처에 경계면을 주는 포화함수 sat(•) 를 사용하였다[7]. λ 는 500rad/sec 로 하였으며, 외란 및 모형화 되지 않은 부분의 불확실량, 모델링된 부분의 불확실량 등을 포함하여 최대 불확실량 350N 을 기준으로 하여 $k=4\text{m/s}^2$ 로 설계하였으며, 경계면의 크기 s_o 는 $k/s_o>\lambda$ 를 기준으로 하여 0.008m/s 로 설계하였다.

5.4 제어 결과

자전거 동역학은 저주파 운동이 지배적이므로 5Hz 미만의 주파수 입력을 가지고 실험을 하였다. z 방향으로는 진폭이 0.02m, 주파수 0.33Hz 인 정현파와 진폭이 0.004m, 0.002m 이고 주파수가 각각 1Hz, 3Hz 인 여현파를 합성하여 입력신호로 인가하여 실험을 하였으며, 롤 방향으로는 진폭이 0.17rad 이고 주파수가 0.33Hz 인 정현파와 진폭이 0.035rad, 0.017rad, 주파수가 1Hz, 3Hz 인 여현파를 합성하여 입력신호로 인가하였다. 피치 방향은 z 방향이나 롤 방향에 비해 상대적으로 고주파의 운동이 적으므로 진폭이 0.17rad 이고 주파수가 0.33Hz 인 정현파와 진폭이 0.035rad, 주파수가 1Hz 인 여현파를 합성하여 입력신호로 인가하여 각 제어법을 사용하여 그 추적 성능을 비교하였다.

요 방향은 다른 방향의 운동에 비해 그 운동범위가 크므로, 요 방향의 입력신호로는 진폭이 0.75rad 이고 주파수가 0.33Hz 인 정현파와 진폭이 0.87rad, 0.52rad, 주파수가 1Hz, 3Hz 인 여현파를 합성하여 인가하였다.

이 때 각각 발생되는 추적 오차의 peak-to-peak 를 살펴보면 z 방향의 경우 PD 제어법을 사용하였을 때에는 0.0017m 의 추적 오차를 발생시키며, 계산 토크법 사용 시에는 0.0011m, 슬라이딩 모드 제어법 사용 시에는 0.0008m 의 추적 오차를 발생시킨다. 또한 롤방향에 대하여는 각각 0.018rad, 0.015rad, 0.01rad 의 추적 오차를, 피치 방향에 대하여는 각각 0.009rad, 0.007rad, 0.004rad 의 추적오차를 갖는다.

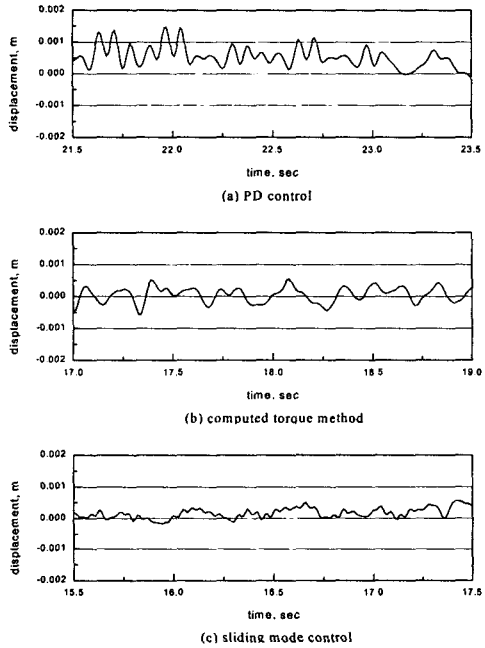

Fig.5-1 Error of z direction without disturbance

자전거 시뮬레이터용 운동판으로 고안된 매니퓰레이터는 사람이 자전거 시뮬레이터를 타고 운전하는 경우, 사람의 움직임이나 사람의 움직임에 따라서 발생되는 자전거의 동역학은 운동판에 외란으로 작용하게 된다. 이 때 운동판에 작용되는 외란은 x, y, z 방향의 힘과 모멘트로 나타내어진다. 이와 같은 외란을 고려하여 x 방향과 y 방향으로 크기 50N, 주파수 1Hz 의 정현파를 가해주고, z 방향으로 크기 200N, 주파수 1Hz 의 정현파를 가해준다. 또한 x 방향으로 크기 50Nm, 주파수 0.5Hz, y 방향으로 크기 50Nm, 주파수 1Hz 의 정현파를 가해준다. 운동판에 이와 같은 외란이 작용하는 경우 계산 토크법은 z 방향으로 peak-to-peak 0.0016m, 슬라이딩 모드 제어법은 0.0017m 의 추적 오차를 갖는다. 또한 롤 방향으로는 각각 0.013rad, 0.009rad 의 추적 오차를 피치 방향으로는 0.01rad, 0.008rad 의 추적 오차를 발생시킴을 알 수 있다. Fig.5-3 은 요 방향의 경우 입력신호의 크기가 peak-to-peak 5.93rad 일 때 발생하는 추적 오차의 크기는 peak-to-peak 0.28rad 으로 5% 미만의 추적 오차를 갖는다. 이 때 발생하는 기어의 백래쉬 크기는 약 0.007rad 으로 제어 성능에 큰 영향을

미치지 못한다.

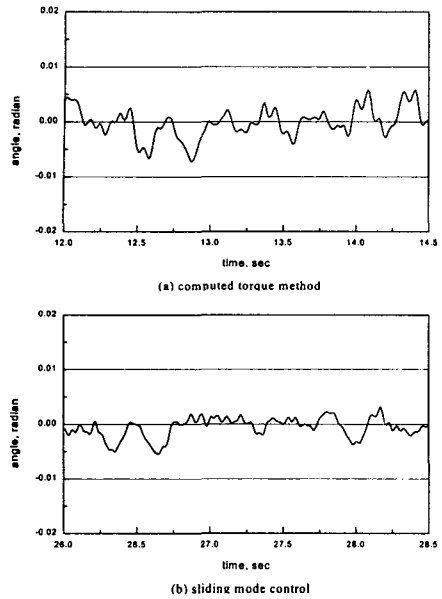

Fig.5-2 Error of roll direction with disturbance

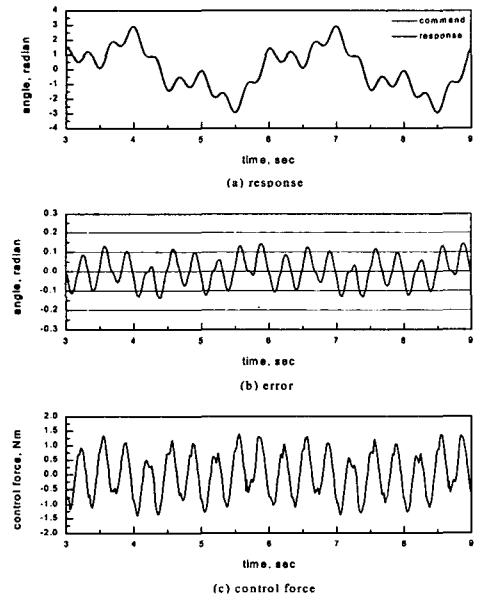

Fig.5-3 Yaw motion

6. 결론

자전거 주행 시뮬레이터 운전시 상대적으로 운동재현의 중요도가 낮은 평면 선형운동 방향의 2 자유도를 축소하여 4 자유도의 운동판을 설계하였다. 고안된 4 자유도 운동판의 위치 추적 제어를 위하여 기구학적인 폐루프를 형성하는 3 자유도 병렬 매니퓰레이터에 대한 기구학 해석 및 동역학 해석을 수행하였으며, 실시간(Real-time) OS 인 QNX 환경에서 PD 제어법과 계산 토크법, 슬라이딩 모드 제어법을 사용하여 각각 제어하였다.

외란을 고려하지 않은 경우와 외란을 고려한 경우에 대하여 각 제어법을 사용하여 위치 추적 제어를 실시하였다. 외란이 없는 경우 PD 제어법을 사용한 결과에 비하여 시스템의 동역학이 고려된 계산 토크법과 슬라이딩 모드 제어법을 사용한 결과가 더 좋은 제어 성능을 보였다. 외란을 인가하여 계산 토크법과 슬라이딩 모드 제어법을 사용해 추적 제어를 실시한 결과는 두 제어법의 성능이 크게 차이가 나지 않았으며, 5% 미만의 추적 오차를 보여주었다.

고안된 자전거 시뮬레이터용 운동판은 5Hz 미만의 입력 신호에 대하여 계산 토크법과 슬라이딩 모드 제어법을 사용하여 PD 제어법보다 우수한 제어 성능을 갖는 위치 추적 제어를 하였다.

후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 한국과학기술원 기관고유사업과 한국과학재단 가상현실 연구센터내 연구과제로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] 이두용 외, "한국과학기술원 자전거 주행 시뮬레이터," 대한기계학회 동역학 및 제어부문/생산 및 설계공학부문 공동학술대회 논문집, pp.130-137, 1999

[2] 이정열, "자전거 시뮬레이터용 운동생성 알고리즘 개발," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2000

[3] 성지원, "자전거 시뮬레이터용 4 자유도 운동판의 설계 및 추적 제어," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2001

[4] L.W.Tsai, Robot Analysis-The mechanics of serial and parallel manipulators, John Wiley & Sons, Inc., 1999

[5] C.C.Nguyen, S.S.Antrazi, X.-L.Xhou, and C.E.Campbell, "Adaptive control of a Stewart platform-based manipulator," Journal of Robotic System, Vol.10, No.5, pp.657-668, 1993

[6] W.Cao, "Variable structure control of nonlinear system : A new approach," IEEE Transaction on Industrial electronics, Vol.40, No.1, pp.45-55, 1993

[7] J.Y.Hung, "Variable structure control : A survey," IEEE Transaction on Industrial electronics, Vol.40, No.1, pp.2-22, 1993