

6자유도 병렬형 모션 시뮬레이터 개발

김한성*

(논문접수일 2009. 8. 14, 심사완료일 2010. 1. 27)

Development of a New 6-DOF Parallel-type Motion Simulator

Han Sung Kim*

Abstract

This paper presents the development of a new 6-DOF parallel-kinematic motion simulator. The moving platform is connected to the fixed base by six *P-S-U* (Prismatic-Spherical-Universal) serial chains. Comparing with the well-known Gough-Stewart platform-type motion simulator, it uses commercialized linear actuators mounted at the fixed base whereas a 6-*UPS* manipulator uses telescopic linear ones. Therefore, the proposed motion simulator has the advantages of easier fabrication and lower inertia over a 6-*UPS* counterpart. Furthermore, since most forces acting along the legs are transmitted to the structure of linear actuators, smaller actuation forces are required. The inverse position and Jacobian matrix are analyzed. In order to further increase workspace, inclined arrangement of universal joints is introduced. The optimal design considering workspace and force transmission capability has been performed. The prototype motion simulator and PC-based real-time controller have been developed. Finally, position control experiment on the prototype has been performed.

Key Words : Parallel-kinematic motion simulator(병렬형 모션 시뮬레이터), 6-*PSU* parallel manipulator(6-*PSU* 병렬형 기구), Workspace analysis(작업영역 해석), Optimal design(최적 설계), Force transmission capability(힘 전달 능력), Real-time controller(실시간 제어기)

1. 서론

모션 시뮬레이터는 항공기, 자동차, 철도 및 선박 시뮬레이터, 타이어 운행 시험기, 엔터테인먼트 및 재활분야 등 응용분야가 매우 광범위하다. 병렬형 기구는 직렬형 기구에 비하여

저관성, 고작업하중 및 높은 힘전달 특성 등의 장점으로 인하여 다양한 형태의 병렬형 기구가 모션 시뮬레이터의 메커니즘으로 응용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 6자유도 모션 시뮬레이터의 경우는 가우-스튜어트 플랫폼⁽¹⁾이 베이스 메커니즘으로 주로 사용되고 있다. 가우-스튜어트 플랫폼(6개의 *UPS* 다리로 구성됨)은

* 경남대학교 기계자동화공학부 (hkim@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449

다른 6자유도 병렬형 기구에 비하여 상대적으로 큰 작업영역을 가지나 선형구동기가 이동부에 위치하고 고가의 망원경 형식 (telescopic)의 선형구동기를 사용해야 한다는 단점을 갖는다.

반면, 본 연구에서 제시하는 6-PSU 병렬형 기구⁽⁹⁻¹¹⁾는 모든 선형구동기가 고정부에 위치하고 기존 Gantry 로봇 등에서 사용되는 상용화된 선형구동기를 이용하여 손쉽게 구축할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 이동 플랫폼이 양단에 구형 및 유니버설 조인트가 부착된 6개의 단순 로드로 지지되고 로드에는 인장/압축력만 작용하므로 다리의 질량과 관성을 가우-스튜어트 플랫폼에 비하여 크게 감소시킬 수 있다. 더욱이, 각 다리에 작용하는 힘의 대부분이 고정부에 위치하는 선형구동기의 구조부에 전달되므로 작은 구동력으로 큰 작업하중을 지탱할 수 있는 장점을 갖는다. 즉, 6-PSU 병렬형 기구는 가우-스튜어트 플랫폼에 비하여 힘전달 능력이 우수하고 저관성 설계가 가능하므로 큰 가속력을 생성할 수 있는 적합한 메커니즘이다.

본 논문에서는 제작 용이성, 저관성 및 우수한 힘전달 능력을 갖는 6-PSU 병렬형 기구를 모션 시뮬레이터의 메커니즘으로 제안하고자 한다. 개발된 모션 시뮬레이터는 1인 탑승자를 위한 범용 시뮬레이터 및 일반적인 모션/진동 발생기로 응용하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저, 2장에서는 역기구학 및 자코비안을 해석하고, 이를 이용하여 3장에서는 작업영역과 힘전달 능력을 고려한 최적설계 방법이 제시된다. 4장에서는 개발된 모션 시뮬레이터 시작품 및 작동성 확인을 위한 위치제어 실험결과를 제시한다.

2. 역기구학 및 자코비안 해석

제안하는 병렬형 기구는 Fig. 1(a)와 같이 이동 플랫폼이 6개의 PSU 직렬 체인에 의하여 고정부에 연결된 구조를 갖는다. 실제 시작품 설계는 구형 조인트 대신 유니버설 조인트와 회전 조인트를 결합하여 사용하였다. 직선 조인트의 시작점은 F_i 이고 구형 조인트와 유니버설 조인트는 A_i 및 B_i ($i=1,2,\dots,6$)에 위치한다. 여기서, 직선 조인트는 선형 구동기에 의해 구동되고, 나머지 구형 및 유니버설 조인트는 수동 조인트이다. 해석을 위하여 고정 좌표계 $A(x, y, z)$ 와 이동 플랫폼에 부착된 이동 좌표계 $B(u, v, w)$ 를 정의한다. 이동 좌표계의 위치 및 자세는 $x = \overline{OP}$ 및 회전행렬 R 로 각각 표현된다.

Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 고정 좌표계에서 표현된 직선 조인트의 시작점 F_i 와 단위방향벡터 u_i 는 다음과 같다.

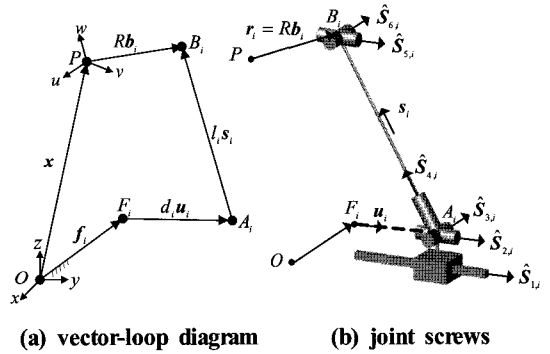


Fig. 1 Kinematic structure of a P-S-U leg

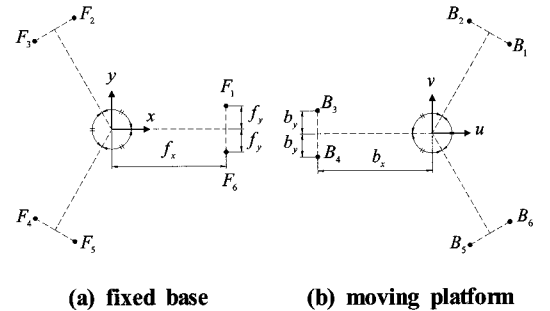


Fig. 2 Top views of a 6-PSU parallel manipulator

$$\begin{aligned} f_i &= Rot(z, \theta_{f,i}) [f_x, f_y, 0]^T \text{ for } i=1,3,5 \\ f_i &= Rot(z, \theta_{f,i}) [f_x, -f_y, 0]^T \text{ for } i=2,4,6 \\ u_i &= Rot(z, \theta_{f,i}) [1, 0, 0]^T \text{ for } i=1,2,\dots,6 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $Rot(z)$ 는 z축에 대한 회전행렬을 나타내고 배치각은 $\theta_f = [0, 2\pi/3, 2\pi/3, -2\pi/3, -2\pi/3, 0]$ 이다. 한편, Fig. 2(b)와 같이 이동 좌표계에서 표현된 유니버설 조인트의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_i &= Rot(w, \theta_{b,i}) [b_x, -b_y, 0]^T \text{ for } i=1,3,5 \\ b_i &= Rot(w, \theta_{b,i}) [b_x, b_y, 0]^T \text{ for } i=2,4,6 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\theta_b = [\pi/3, \pi/3, \pi, \pi, -\pi/3, -\pi/3]$ 이다.

Fig. 1(a)와 같이, i 번째 다리의 벡터 루프 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$l_i s_i = x + H b_i - f_i - d_i u_i \text{ for } i=1,2,\dots,6 \quad (3)$$

여기서, $d_i = \overline{F_i A_i}$ 는 선형구동기의 이동거리이다. 미지수 s_i 를 소거하기 위하여 식 (3)의 양변을 제곱한 후 이를 정리하면 다음과 같다.

$$l_i^2 = t_i^T t_i - 2(t_i^T u_i) d_i + d_i^2 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

여기서, $t_i \equiv x + R b_i - f_i$ 이다. 식 (4)에서 d_i 를 구하면, 다음과 같은 역기구학 해를 얻을 수 있다.

$$d_i = (t_i^T u_i) \pm \sqrt{(t_i^T u_i)^2 - (t_i^T t_i - l_i^2)} \quad (5)$$

여기서, 음부호는 실제로 불가능한 위치이므로, 양부호를 선택하였다.

한편, 속도 및 정역학 관계를 얻기 위하여, 자코비안 행렬을 나선이론을 이용하여 유도하고자 한다. Fig. 1(b)와 같이, 이동 플랫폼의 트위스트(twist)는 각 다리를 구성하는 1자유도 조인트의 단위나선(unit screw)의 선형조합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹²⁾

$$\hat{T} = \sum_{j=1}^{i=6} \theta_{j,i} \hat{S}_{j,i} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

여기서, v 와 ω 를 이동 플랫폼 P 점의 선속도 및 각속도라 할 때, $\hat{T} = [v^T, \omega^T]^T$ 는 축 좌표(axis coordinates)⁽¹³⁾로 표현된 이동플랫폼의 트위스트를 나타내고 $\theta_{j,i}$ 와 $\hat{S}_{j,i}$ 는 i 번째 다리의 j 번째 조인트의 속도 및 축 좌표계로 표현된 단위나선을 나타낸다. i 번째 다리의 각 조인트 단위나선은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1,i} &= \begin{bmatrix} u_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{S}_{2,i} = \begin{bmatrix} (r_i - l_i s_i) \times s_{2,i} \\ s_{2,i} \end{bmatrix}, \\ \hat{S}_{3,i} &= \begin{bmatrix} (r_i - l_i s_i) \times s_{3,i} \\ s_{3,i} \end{bmatrix}, \quad \hat{S}_{4,i} = \begin{bmatrix} r_i \times s_i \\ s_i \end{bmatrix}, \\ \hat{S}_{5,i} &= \begin{bmatrix} r_i \times s_{5,i} \\ s_{5,i} \end{bmatrix}, \quad \hat{S}_{6,i} = \begin{bmatrix} r_i \times s_{6,i} \\ s_{6,i} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

여기서, 원점은 P 점에 위치하고 축 방향은 고정 좌표계의 축들과 평행한 순간 참조 좌표계를 정의할 때, 모든 나선들은 이 순간 참조 좌표계에서 표현되었다.

구동 조인트 나선($\hat{S}_{1,i}$)을 제외한 모든 수동 조인트 나선들과 역의 관계를 갖는 역나선(reciprocal screw)은 점 A_i 와 B_i

를 지나는 직선이 되고 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{s}_i = \begin{bmatrix} s_i \\ r_i \times s_i \end{bmatrix} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

여기서, 역나선은 방사 좌표(ray coordinates)⁽¹³⁾로 표현되었다. 이 i 번째 역나선을 식 (6)의 양변에 곱하면 다음과 같다.

$$\hat{s}_i^T \hat{T} = \dot{d}_i (s_i^T u_i) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

여기서, 기호의 편의상 $\dot{d}_i \equiv \dot{\theta}_{j,i}$ 로 정의한다. 식 (8)을 행렬 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$J_x^T \hat{T} = J_q \dot{q} \quad (9)$$

여기서, 조인트 속도 벡터는 $\dot{q} = [\dot{d}_1, \dots, \dot{d}_6]^T$ 이다. 각 부분 자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_x &= \begin{bmatrix} s_1 & \dots & s_6 \\ r_1 \times s_1 & \dots & r_6 \times s_6 \end{bmatrix}, \\ J_q &= \text{diag}(s_1^T u_1, \dots, s_6^T u_6) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 속도관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q} = J^T \hat{T} \quad (11)$$

여기서, 자코비안 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = J_x J_q^{-1} \quad (12)$$

한편, 가상일의 원리(principle of virtual work)를 이용하여 정역학 관계는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\hat{w} = J \tau \quad (13)$$

여기서, f 와 m 를 이동 플랫폼 P 점에 작용하는 힘과 모멘트라 할 때, 방사 좌표로 표현된 이동 플랫폼의 랜치(wrench)는 $\hat{w} = [f^T, m^T]^T$ 이고, 조인트의 힘 벡터는 $\tau = [f_1, \dots, f_6]^T$ 이다.

3. 최적 설계

본 장에서는 작업영역과 힘전달 능력을 고려한 병렬형 모션

시뮬레이터의 최적설계 방법을 제시한다. 일반적으로 모션을 원활히 재현하기 위해서는 작업영역이 커야하고 큰 가속도를 생성하기 위해서는 높은 힘 전달 능력이 반드시 필요하다.

먼저, 선형구동기의 행정길이와 각 조인트의 위치는 초기설계를 통하여 Table 1과 같이 결정되었다. 본 연구에서는 최적설계의 설계변수를 고정 다리길이(l_f)와 유니버설 조인트의 설치각(θ_u)으로 설정하였다. 여기서, θ_u 는 유니버설 조인트가 초기 위치(2개 회전각이 모두 0도)에 있을 때, 유니버설 조인트 두 축에 수직벡터와 각 플랫폼의 법선벡터(z 및 w)와의 사이각으로 정의한다. 즉, 설치각을 변화시키면 유니버설 조인트의 작동각을 이의 작동범위($\Delta\beta \leq \pm 40^\circ$)안에 최대한 배치할 수 있으므로 작업영역을 효과적으로 증가시킬 수 있다.

상하 유니버설 조인트가 초기 위치에 있을 때, 두 축에 수직한 단위방향벡터를 고정좌표계에 대하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_{a,i} &= Rot(z, \theta_{f,i}) \begin{bmatrix} -\sin\theta_u \\ 0 \\ \cos\theta_u \end{bmatrix} \text{ for } i = 1, \dots, 6, \\
 u_{b,i} &= R \times Rot(w, \theta_{b,i}) \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\theta_u \\ \cos\theta_u \end{bmatrix} \text{ for } i = 1, 3, 5, \\
 u_{b,i} &= R \times Rot(w, \theta_{b,i}) \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin\theta_u \\ \cos\theta_u \end{bmatrix} \text{ for } i = 2, 4, 6
 \end{aligned} \quad (14)$$

한편, 이 병렬형 기구의 힘전달 범위는 다음과 같은 최적화 문제로 정의할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize: } & \|f\|^2 = \hat{w}^T \Gamma \hat{w} \\
 \text{Subject to: } & \|\tau\|^2 = \hat{w}^T (JJ^T)^{-1} \hat{w} = 1
 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $\Gamma = \begin{bmatrix} J_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 \end{bmatrix}$ 이다. 식 (15)의 물리적 의미는 단위 구동력을 주어졌을 때, 엔드이펙터에서 생성할 수 있는 힘의 범위를 나타낸다. 식 (15)는 다음과 같은 고유치 문제로 유도된다.

$$(JJ^T)^{-1} \Gamma \hat{w} = \alpha^2 \hat{w} \quad (16)$$

Γ 의 계수(rank)가 3이므로, 힘방향만을 고려하여 식 (16)을 표현하면 다음과 같은 3차원 고유치 문제로 간략화 된다.

$$A f = \alpha^2 f \quad (17)$$

여기서, $A = \sum_{i=1}^6 [(s_i s_i^T) / (s_i^T u_i)]$ 이고 α 는 행렬 A 의 고유치의 제곱근 값이다. 병렬형 기구의 힘전달 범위는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{\min} \leq \frac{\|f\|}{\|\tau\|} \leq \alpha_{\max} \quad (18)$$

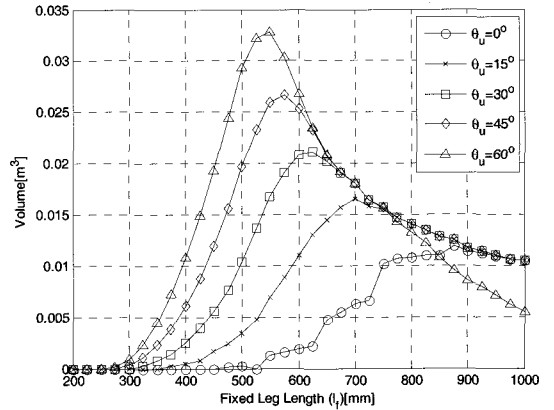


Fig. 3 Workspace with respect to l_f and θ_u

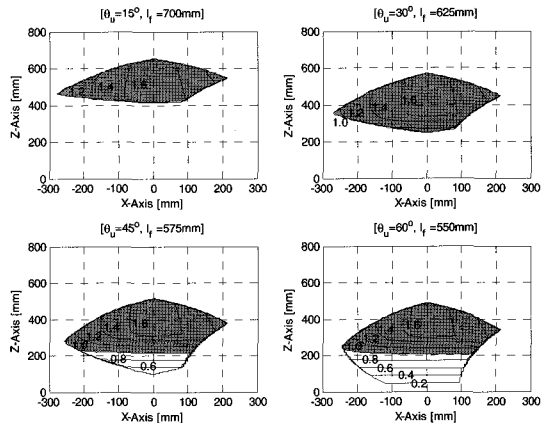


Fig. 4 Workspace and α_{\min} at the optimal sets of l_f and θ_u

Table 1 Kinematic parameters of a 6-PSU manipulator

Parameters	Values [mm]
(f_x, f_y)	(404.5, 57.5)
(b_x, b_y)	(200.0, 76.0)
Stroke (Δd)	400.0

여기서, α_{min} 는 엔드이펙터에서 모든 방향으로 생성할 수 있는 힘의 최대크기에 해당되므로, α_{min} 을 힘전달 지수로 정의한다. 본 논문에서는 모든 방향으로 큰 가속도를 생성할 수 있는 모션 시뮬레이터를 설계하기 위하여, 힘전달 지수가 $\alpha_{min} \geq 1$ 인 작업영역을 고려하였다.

Fig. 3은 설계변수(l_f 와 θ_u)에 따른 작업영역의 크기를 나타낸다. θ_u 가 증가함에 따라 작업영역은 증가하고 각 θ_u 에 따라 작업영역을 최대화하는 l_f 가 존재함을 알 수 있다. Fig. 4는 각 θ_u 에 대한 최적의 l_f 에서 작업영역과 힘전달 지수를 XZ평면에서 나타낸다. 최외각선은 작업영역의 경계를 표시하고 내부의 선들은 α_{min} 의 등고선을 나타낸다. 특히, $\alpha_{min} \geq 1$ 인 영역은 회색으로 나타내었다. θ_u 가 증가할수록 작업영역은 증가하지만, $\theta_u = 45^\circ$ 이상이 되면, 힘전달 능력이 좋은 작업영역 ($\alpha_{min} \geq 1$)은 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. Fig. 5는 $\alpha_{min} \geq 1$ 조건을 만족하는 작업영역의 크기를 l_f 와 θ_u 에 대해서 나타낸다. Fig. 4에서 예측된 것과 같이, $\theta_u = 45^\circ$ 이상이

되면 힘전달 능력이 좋은 작업영역은 더 이상 증가되지 않음을 알 수 있다.

따라서 힘전달 능력이 좋은 작업영역($\alpha_{min} \geq 1$) 측면에서 최적 설계점은 $l_f = 575[mm]$, $\theta_u = 45^\circ$ 이다. Fig. 6은 XZ 및 XY 평면에서 본 최적 설계점의 작업영역을 나타낸다. 모션 시뮬레이터 시작품($l_f = 690[mm]$, $\theta_u = 30^\circ$)은 이 최적설계 이전에 개발되어 최적점에 비하여 약 80%의 작업영역을 갖는다.(Fig. 5참고)

4. 시작품 설계 및 위치제어 실험

본 장에서는 개발된 모션 시뮬레이터 시작품의 제어기와 매니퓰레이터 설계 및 위치제어 실험결과를 제시한다.

먼저, 제어기 하드웨어는 Fig. 7과 같이 6축 AC 서보 모터/드라이버, DAQ 보드들이 장착된 실시간 제어용 Target PC와 상위 제어기인 Host PC로 구성된다. Fig. 8은 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 제어 프로그램은 MathWorks사의 Simulink와 xPC를 이용하여 구축하였다. 이는 Fig. 9와 같이 궤적생성 블록, 6축 관절제어기 블록, DAQ 드라이버 블록 및 데이터 저장 블록으로 구성된다. 이 제어 프로그램은 Host PC에서 컴파일하여 Target PC로 다운로드된다. Fig. 10은 Host PC에서 Target PC의 signal과 parameter의 용이한 제어 및 모니터링을 위하여 Matlab의 GUIDE를 이용하여 작성된 제어 메뉴를 나타낸다.

Table 2는 선정된 선형구동기의 규격을 나타낸다. Fig. 11과 Fig. 12는 3D CAD 모델링 및 제작된 모션 시뮬레이터 시작품을 나타낸다.

개발된 모션 시뮬레이터의 운동 성능을 동역학 해석 소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 계산하였다. 먼저, 이동부는 6개의 다리($6 \times 4.9kg$)와 선형구동기의 이동블록($6 \times 2.2kg$), 이동 플랫폼($26.5kg$) 및 1인 좌석과 탑승자는 $100kg$ 이고 균일 밀도로 구성된 체적이 $0.5 \times 0.5 \times 1[m^3]$ 인 강체로 구성된다. Table 3은 이동 플랫폼이 $(0, 0, 500)[mm]$ 에 위치하였을 때,

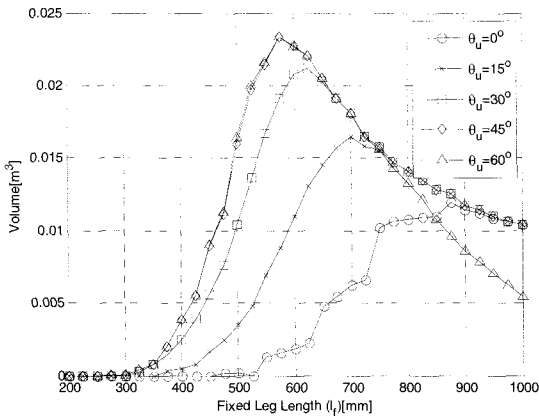


Fig. 5 Workspace with $\alpha_{min} \geq 1$ for l_f and θ_u

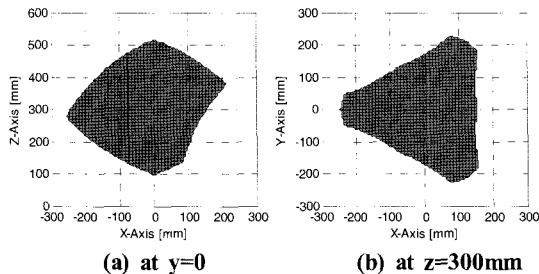


Fig. 6 Workspace at the optimal configuration ($l_f = 575mm$ and $\theta_u = 45^\circ$)

Table 2 Specifications of linear actuators

Items	Specifications
Linear actuator (THK)	KR45H10B+640LP0
AC Motor (Mitsubishi)	HF-KP43B(400W)
Thrust [rated (max)]	816.8(2,386.6) [N]
Velocity [rated (max)]	500(1,000) [mm/sec]

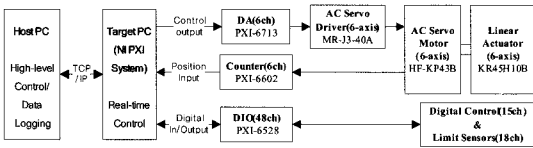


Fig. 7 Block diagram of a PC-based real-time controller

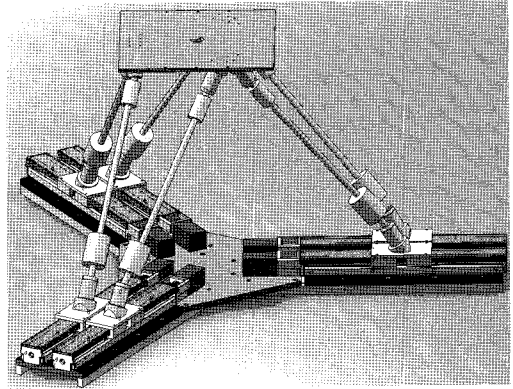


Fig. 11 3D CAD modeling of the prototype

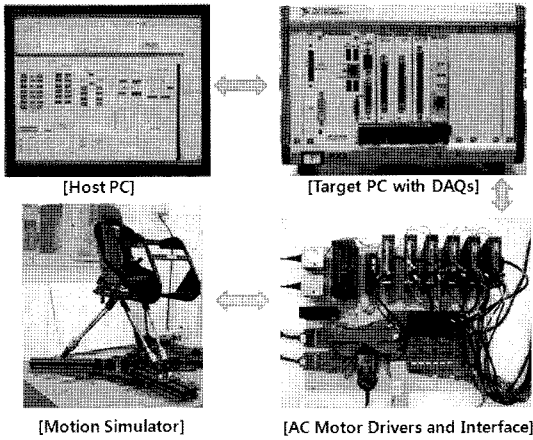


Fig. 8 System configuration of a 6-DOF motion simulator

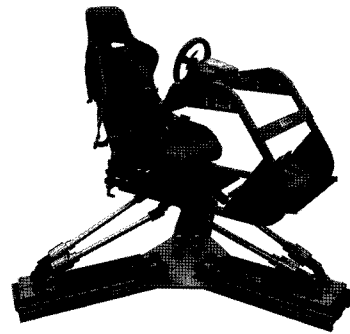


Fig. 12 Prototype of the 6-PSU parallel motion simulator

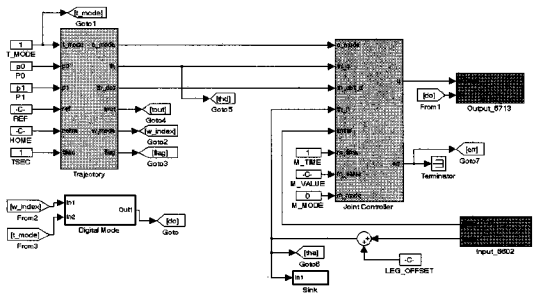
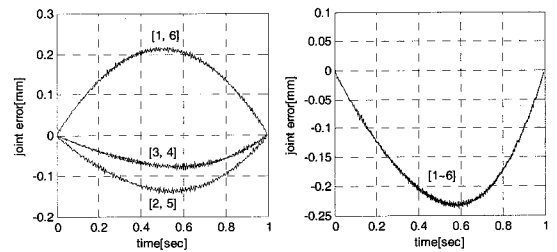


Fig. 9 Control program using Simulink and xPC



(a) Move along the X-axis (b) Move along the Z-axis

Fig. 13 Position control experiment results

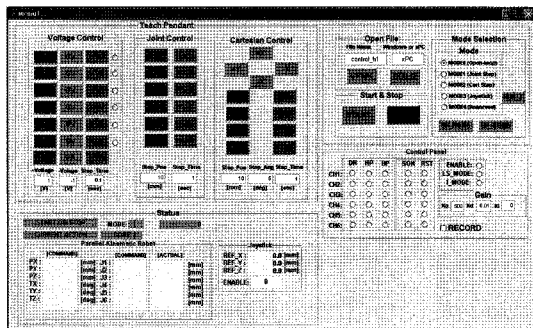


Fig. 10 Control menu written by GUIDE

모델링된 이동부의 질량과 관성모멘트에 대한 모션 시뮬레이터의 운동 성능을 나타낸다. 여기서, 성능은 선형 구동기의 정격 추력 및 정격 속도를 사용하여 계산되었다.

개발된 모션 시뮬레이터의 작동성을 확인하기 위하여 위치 제어 실험을 수행하였다. Fig. 13(a)는 1초 동안 엔드이펙터를 (-50,0,500)에서 (50,0,500)로 이동하였을 때, 선형구동기의 위치제어 오차를 나타내고, Fig. 13(b)는 1초 동안 엔드이펙터

Table 3 Specifications of the 6-PSU simulator

Direction	Velocity	Acceleration
Linear(X, Y)	± 0.50m/s	± 6.5m/s ²
Linear (Z)	± 0.47m/s	± 23.0m/s ²
Angular(θ_x, θ_y)	± 72deg/s	± 500deg/s ²
Angular(θ_z)	± 176deg/s	± 2,750deg/s ²

를 (0,0,450)에서 (0,0,550)로 이동하였을 때, 위치제어 오차를 나타낸다. 두 경우 모두 3차 다항식 궤적을 사용하여 제어 실험을 수행하였다. Fig. 13(a)의 경우, 3쌍의 구동기가 서로 다른 속도로 이동되고, Fig. 13(b)의 경우, 모든 구동기가 동일한 속도로 이동된다. 위치제어실험을 통하여 각 선형구동기의 위치제어 오차의 크기는 입력 궤적의 속도에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 평균속도가 100[mm/sec] 일 때, 위치제어 오차가 ±0.3mm 이내이므로 모션 시뮬레이터의 제어기는 충분한 정밀도를 갖는다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 제작 용이성, 저관성 및 힘전달 능력이 우수한 6-PSU 병렬형 기구를 베이스 메커니즘으로 하는 모션 시뮬레이터를 개발하였다. 이 기구의 기구학적 해석을 수행하였고 힘전달 능력이 좋은 작업영역($\alpha_{min} \geq 1$)을 최대화할 수 있는 최적설계방법을 제시하였다. 설계결과를 바탕으로 6-PSU 병렬형 모션 시뮬레이터의 시제품을 개발하고 위치제어실험을 통하여 작동성을 확인하였다. 향후, 성능 시험 및 모션재현 실험을 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 2010학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Stewart, D., 1965, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371~385.
 (2) Cappel, K. L., 1967, *Motion Simulator*, United States Patent: 3295224.
 (3) Bertolini, G. P., Johnston, C. M., Kuiper, J. W., Ku-

kula, J. C., Kulczycka, M. A., and Thomas, W. E., 1994, "The General Motors Driving Simulator," *SAE transactions*, Vol. 103, No. 6, pp. 54~67.
 (4) Merlet, J. P., 2006, *Parallel Robots*, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 77~79.
 (5) Salcudean, S. E., Drexel, P. A., Ben-Dov, D., Taylor, A. J., and Lawrence, P. D., 1994, "A Six Degree-of-freedom, Hydraulic, One Person Motion Simulator," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2437~2443, San Diego, May, 8~13.
 (6) Koevermans, W. P., 1988, "Design and Performance of the Four D.O.F. Motion Systems of the NLR Research Flight Simulator," *AGARD Conf. Proc. No. 198, Flight Simulation*, pp. 17-1~17-11, La Haye, October, 20~23.
 (7) Yang, H., Lee, J., and Xu, Y., 2004, "Design of the Parallel Manipulator for Minimizing the Extreme Articular Force in the Specific Translation Trajectory," *Transaction of the KSMTE*, Vol. 13, No. 3, pp. 68~75.
 (8) ParalleMIC, n.d., "What's New?," viewed 1 August 2009, <<http://www.parallemic.org>>.
 (9) Honegger, M., Codourey, A., and Burdet, E., 1997, "Adaptive Control of the Hexaglide, a 6 DOF Parallel Manipulator," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 543~548, New Mexicon, April.
 (10) Kim, J. P. and Ryu, J. H., 2002, "Inverse Kinematic and Dynamic Analyses of 6-DOF PUS Type Parallel Manipulators," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 13~23.
 (11) Rao, A. B., Saha, S. K., and Rao, P. V. M., 2006, "Dynamics Modelling of Hexaslides using the Decoupled Natural Orthogonal Complement Matrices," *Multibody System Dynamics*, Vol. 15, pp. 159~180.
 (12) Tsai, L. W., 1999, *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, Wiley, New York, USA, pp. 247~252.
 (13) Duffy, J., 1996, *Statics and Kinematics with Application to Robotics*, Cambridge University Press, New York, USA, pp. 89~91.
 (14) Kim, H. S. and Choi, Y. J., 2001, "Forward/Inverse Force Transmission Capability Analyses of Fully Parallel Manipulators," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, pp. 526~530.