

6자유도 조작장치의 설계와 기구학적 특성에 관한 연구

김 정 태* · 김 문 생**

(1997년 5월 9일 접수)

A Study on the Design and Characteristics of Kinematics of 6 Degree-of-Freedom Manipulators

Jeung-tae Kim and Moon-saeng Kim

Key Words : 6 Degree-of-Freedom(6자유도), Manipulator(조작장치), Forward Kinematics(순기구학), Inverse Kinematics(역기구학), Stewart Platform(스튜어트 플랫폼)

Abstract

The Six Degree-of-Freedom manipulators are generally operated by linear actuators which are hydraulic cylinder, pneumatic cylinder, ball-screw. But, these actuators are not adequate to have a wide work-space, and furthermore some of them have a self-locking property. Therefore, we have designed a new manipulator which fully overcomes these demerits. The new manipulating system consists of 6 DC-motors to generate operation forces and 6 position transducers to feedback displacement signals. This paper presents an overview of the design and characteristics of 6 Degree-of-Freedom force feedback manipulators for virtual reality implementation. We can operate Six Degree-of-Freedom manipulator with six motors and six potentiometers.

1. 서 론

가상현실(virtual reality)이란 관찰자의 감각기구를 인위적으로 자극하여 창출해 낸 가상공간에서 관찰자가 느낄 수 있는 총체적인 것을 말한다. 가상공간은 컴퓨터로 구현된 가상형상(virtual objects)들의 집합체, 관찰자, 그리고 이들 상호간의 연계작용으로 이루어진다. 가상공간의 실제성은 3차원 그래픽이 가능한 고성능 컴퓨터의 출현, 고화질 표시판의 등장, 그리고 대화식 인터페이스기구(interface instruments)의 개발 등으로 구현되어질 수 있다. 이와 같이 구현되어진 가상공간에서 관찰자는 컴퓨터의 세계를 보는 것이 아니라 컴퓨터의 세

계 안으로 들어가는 착각을 하게 된다. 가상공간 내에서 관찰자의 현실감을 더욱 높히 주기 위해서는 가상공간에 관찰자가 직접 개입하여 가상형상의 조작을 위해 3차원 좌표를 측정, 입력할 수 있고 가상공간의 상황에 따라 힘이 조작자에게 전달될 수 있는 조작장치(manipulator)의 개발이 필수적이다.⁽¹⁻³⁾

한편, 3차원에서 임의의 위치를 표현하는 조작장치는 3개의 직선운동과 3개의 회전운동, 즉 6자유도를 가져야만 임의의 위치에서 물체의 좌표들이 결정되어 질 수 있다. 기존의 6자유도를 구현하기 위한 조작장치는 기구적인 특성에 따라, 각 기구가 직렬로 연결되는 개방연결기구(open kinematic chain manipulator)와 각 기구가 병렬로 연결되는 폐쇄연결기구(closed kinematic chain manipulator)로 나누어 질수 있다. 일반적으로 산업용 로봇에 적용

*대우전자(주) 전략기술 제1연구소

**회원, 부산대학교 기계설계공학과, 기계기술연구소

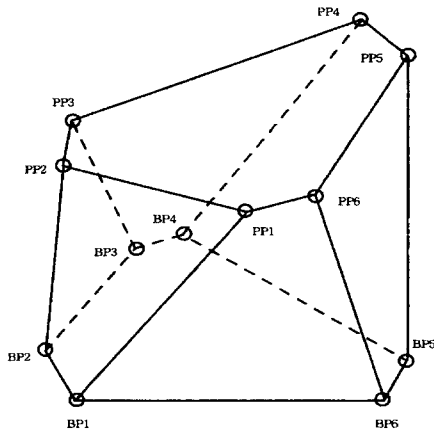


Fig. 1 Schematic diagram of a six degree-of-freedom joystick system.

되는 개방연결기구 방식은 넓은 운동영역과 능숙한 운동성을 가지는 장점이 있지만 고속 운동시 동특성이 상대적으로 불량하며 가역적(reversible) 구동에 적합하지 않다. 이에 반해 구동기(actuator)가 병렬로 연결되는 폐쇄연결기구는 외관보 형태를 갖지 않으므로 여러 개의 링크(link)에 부하가 분담되고 모멘트(moment) 부하가 아닌 축방향의 하중만이 작용하므로 작은 구동기로도 큰 부하를 구동시킬 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 가역적 구동을 구현하는데 좋은 적용성을 갖고 있다.

이러한 병렬조작기구의 대표적인 예는 비행체 운동을 모사하기 위해 Stewart에 의해 제안된 스투어트 플랫폼(stewart platform)이 대표적인 형태이다.^(4,5) 이것은 공간상에서 운동하는 강체를 6개의 구동기로 구동하여 6자유도 운동을 재현하는 기구이다. 또, McCallion 등은 편심된 부품의 정밀 키워맞춤을 할 수 있는 6자유도 엔드이펙터(end-effector)를 안하여 병렬조작기구의 응용범위를 확대하였다.⁽⁶⁾ 이와 같은 연구에 사용된 스크류잭(screw jack), 선형 구동기(linear actuator) 및 실린더(cylinder) 등을 이용하여 플랫폼의 운동영역을 확장하려 하면 구동기의 행정길이가 커져야 되는 단점이 있고, 특히 스크류잭과 볼나사(ball screw)를 이용한 구동기는 마찰력이 크므로 가역적 운동을 구현해 내기에는 적합하지 않다.

본 논문에서는, 구조적으로 안정될 뿐만 아니라 운동영역이 넓고 가역운동에 따른 에너지 손실이 작은 구조를 가지는 새로운 병렬조작기구를 설계, 제작하여, 이 기구의 기구학적인 해석과 정적 힘

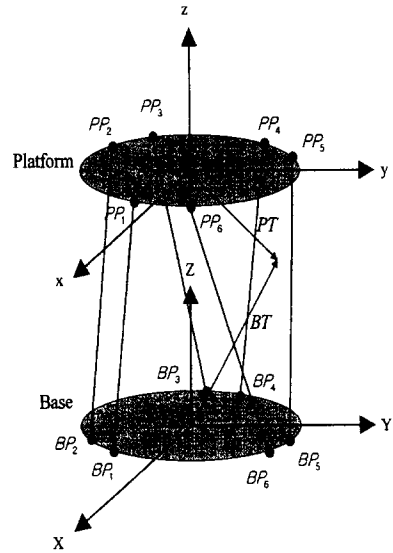


Fig. 2 Coordinate systems.

해석을 통해 병렬조작기구의 특성에 관하여 상술하였다.

2. 6자유도 조작장치의 이론

2.1 6자유도 병렬기구의 기구구조

6자유도 병렬기구의 기본개념은 Fig. 1에 도시되어 있다. 상, 하면은 꼭지점 부근이 절단된 삼각형 모양을 가지고 있으며 전체적으로는 8면체를 이루고 있다. 8면체의 상부 삼각형에 PPi의 연결점이 있고, 이면은 병렬기구의 플랫폼(platform)이 된다. 베이스(base)는 BPi의 연결점을 가지고 있으며, 이는 플랫폼의 연결점들과 각각 연결되어 PPi-BPi의 구동막대(rod)를 이룬다. 그리고, 실제로 이 구동막대의 길이를 제어함으로써 상부 플랫폼의 자세를 제어할 수 있다.

상부 플랫폼과 베이스를 연결하는 구동막대의 길이를 변화시키는 방법으로는 실린더, 볼나사 등이 이용되고 있으나 가동범위가 작아 플랫폼의 운동영역을 제한한다. 또한 이러한 선형 구동기는 마찰력과 나사(screw)의 자기잠금(self-locking) 등으로 인해 비가역적(irreversible) 성질을 가진다. 특히, 조이스틱(joystick)은 손으로 플랫폼을 움직여서 발생하는 6자유도 운동을 인식해야 하므로 가역적인 운동이 가능하고 운동영역이 넓은 구동기의 고안이 중요하다.

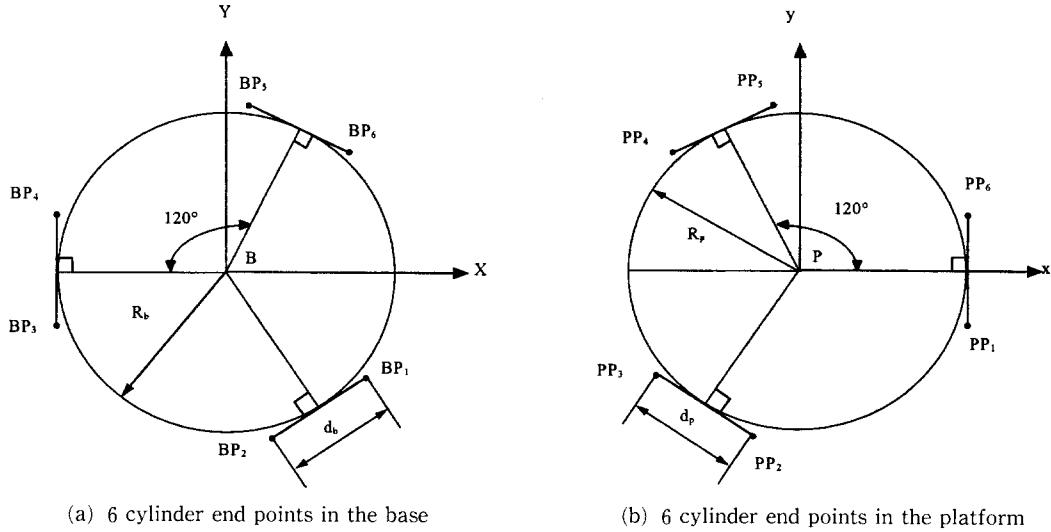


Fig. 3 Rod end points configuration in a base and a platform.

2.2 좌표계의 설정

Fig. 2와 같이 베이스(base)에 고정된 좌표계 BX YZ를 이스좌표계(base coordinate system), 플랫폼에 정된 좌표계 Pxyz를 플랫폼좌표계(platform coordinate system)로 정의한다. 점 T를 베이스좌표계에서 표현하면 $B\vec{T}$, 플랫폼좌표계에서 표현하면 $P\vec{T}$ 와 같이 표기된다. 베이스와 플랫폼에 연결되는 구동막대의 끝점은 임의의 위치에 존재 가능하나 Fig. 3에서와 같이 중심원을 중심으로 대칭적인 위치에 선정하였다.

베이스에 고정된 구동막대 끝점 BP_i 의 좌표를 (BP_{ix} , BP_{iy} , BP_{iz})로 나타내고, 플랫폼에 고정된 구동막대 끝점 PP_i 의 좌표를 (PP_{ix} , PP_{iy} , PP_{iz})로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} BP_{1x} &= R_b \cos \frac{\pi}{3} + \frac{d_b}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ BP_{1y} &= -R_b \sin \frac{\pi}{3} + \frac{d_b}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ BP_{2x} &= R_b \cos \frac{\pi}{3} - \frac{d_b}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ BP_{2y} &= -R_b \sin \frac{\pi}{3} - \frac{d_b}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ BP_{3x} &= -R_b, \quad BP_{3y} = -\frac{d_b}{2} \\ BP_{4x} &= -R_b, \quad BP_{4y} = \frac{d_b}{2} \\ BP_{5x} &= R_b \sin \frac{\pi}{3} + \frac{d_b}{2} \sin \frac{\pi}{6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BP_{5y} &= R_b \sin \frac{\pi}{3} + \frac{d_b}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ BP_{6x} &= R_b \cos \frac{\pi}{3} + \frac{d_b}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ BP_{6y} &= R_b \sin \frac{\pi}{3} - \frac{d_b}{2} \sin \frac{\pi}{6} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} PP_{1x} &= R_p, \quad PP_{1y} = -\frac{d_p}{2} \\ PP_{2x} &= -R_p \cos \frac{\pi}{3} + \frac{d_p}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ PP_{2y} &= -R_p \sin \frac{\pi}{3} - \frac{d_p}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ PP_{3x} &= -R_p \cos \frac{\pi}{3} - \frac{d_p}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ PP_{3y} &= -R_p \sin \frac{\pi}{3} + \frac{d_p}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ PP_{4x} &= -R_p \cos \frac{\pi}{3} - \frac{d_p}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ PP_{4y} &= R_p \sin \frac{\pi}{3} - \frac{d_p}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ PP_{5x} &= -R_p \cos \frac{\pi}{3} + \frac{d_p}{2} \cos \frac{\pi}{6} \\ PP_{5y} &= R_p \sin \frac{\pi}{3} + \frac{d_p}{2} \sin \frac{\pi}{6} \\ PP_{6x} &= R_p, \quad PP_{6y} = \frac{d_p}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 6자유도 병렬기구의 변위와 벡터변환

6자유도를 갖는 플랫폼은 일반적으로 3개의 선형 변위와 3개의 각변위로 기술된다. 선형변위는 베이

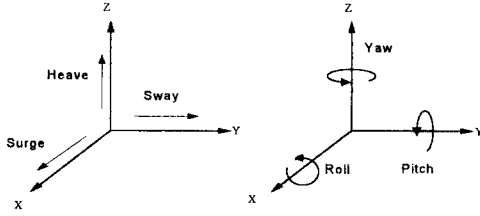


Fig. 4 Definition of six degree-of-freedom motions.

스좌표계에서 서로 수직인 각 축방향으로의 이동을 나타내며, Fig. 4에서와 같이 X축 방향으로의 변위를 서지(Surge), Y축 방향으로의 변위를 스웨이(Sway), Z축 방향으로의 변위를 허브(Heave)로 정의한다.

플랫폼의 초기위치에서 운동후의 위치의 차인 $P\vec{P}_{PORG}$ 는 다음과 같다.

$$P\vec{P}_{PORG} = [Sg \ Sw \ He]^T \quad (3)$$

여기서,

- Sg : X축 방향의 변위
- Sw : Y축 방향의 변위
- He : Z축 방향의 변위

플랫폼의 초기위치가 베이스좌표계로부터 $B\vec{P}_0 = [0 \ 0 \ H_{height}]^T$ 만큼 떨어져 있다고 가정하면(여기서 H_{height} 는 플랫폼의 초기위치의 Z축 방향의 변위), 베이스좌표계를 중심으로 볼때 이동된 플랫폼 좌표계의 원점은 Fig. 5에서와 같이 $B\vec{P}_{PORG}$ 로 표기되며 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$B\vec{P}_{PORG} = B\vec{P}_0 + P\vec{P}_{PORG} = [Sg \ Sw \ He + H_{height}]^T \quad (4)$$

여기서,

- $B\vec{P}_{PORG}$: BXYZ좌표계에서 기술된 플랫폼 원점의 위치벡터
- $P\vec{P}_{PORG}$: Pxyz좌표계에서 기술된 플랫폼 원점의 위치벡터
- $B\vec{P}_0$: BXYZ좌표계에서 기술된 플랫폼 원점의 초기 위치벡터

플랫폼의 각변위(angular displacement)는 Fig. 4에서와 같이 x, y, z축을 중심으로 하는 회전운동으로 정의되고, 이는 각각 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw)라고 정의된다.

위와 같은 정의에 따라 플랫폼의 3자유도 선형변위와 3자유도 회전각 변위를 고려한 베이스좌표계와 플랫폼좌표계 사이의 벡터 관계식은 다음과 같

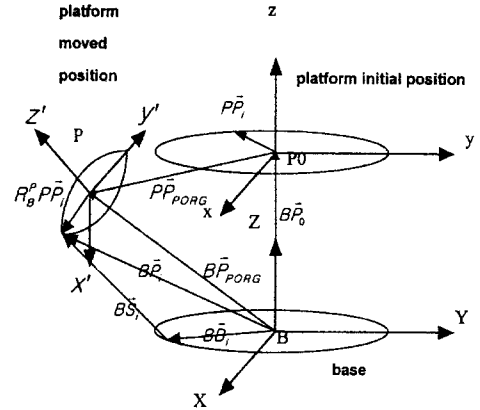


Fig. 5 Coordinate notation when the platform moves.

이 나타낼 수 있다.

$$B\vec{P}_i = R_B^P P\vec{P}_i + B\vec{P}_{PORG} \quad (5)$$

여기서

$$R_B^P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cr & -sr \\ 0 & sr & cr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cp & 0 & sp \\ 0 & 1 & 0 \\ -sp & 0 & cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cy & -sy & 0 \\ sy & cy & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$cr = \cos(\text{roll}), sr = \sin(\text{roll}), cp = \cos(\text{pitch}), sp = \sin(\text{pitch}), cy = \cos(\text{yaw}), sy = \sin(\text{yaw})$

2.4 6자유도 병렬기구의 운동영역

구동막대의 길이변화에 따라 플랫폼의 6자유도 운동이 발생하는 병렬기구의 기구학적 관심사는 플랫폼에 6자유도 변위가 주어졌을 때 각 구동막대의 길이를 구하는 역기구학(Inverse kinematics)의 문제와 각 구동막대의 길이가 주어졌을 때 플랫폼의 6자유도 변위를 구하는 순기구학(forward kinematics)의 문제로 대별된다.

구동기가 병렬로 연결되어 작동되는 병렬구동기구는 직렬로 연결되어 작동되는 직렬구동기구는 상반된 기구학적 특성을 갖는다. 일반적인 직렬구동기구의 순기구학은 변환행렬의 곱으로 표현되므로 용이하게 구할 수 있으나, 역기구학의 해는 모든 변환행렬을 순차적으로 풀어서 해를 구하여야 하고 해가 유일하게 존재하지 않으므로 상당히 어려운 문제에 속한다. 그러나, 병렬구동기구의 역기구학 문제는 변환행렬의 곱으로 나타나게 되므로 구동막대의 길이는 끝점좌표로부터 쉽게 구할 수 있으나, 순기구학 문제는 주어진 구동막대의 길이 조건으로부터 플랫폼의 6자유도 변위를 비선형 연

립방정식으로 구하여야 하는 어려움이 있다.

먼저 구동막대의 길이를 구하는 역기구학의 문제를 살펴보자. Fig. 5에는 플랫폼의 운동에 따른 각 위치벡터를 나타내었다. 구동막대의 길이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$B\vec{S}_i = B\vec{P}_i - B\vec{B}_i \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} BS_{ix} \\ BS_{iy} \\ BS_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CpCy & -CpSy & Sp & Sg \\ SrSpCy + CrSy & -SrSpSy + CrCy - SrCp & Sw & \\ -CrSpCy + SrSy & CrSpSy + SrCy & CrCpHe + H_{height} & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} PP_{ix} \\ PP_{iy} \\ PP_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} BB_{ix} \\ BB_{iy} \\ BB_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

위의 관계식으로부터 각 구동막대의 길이 L_i 는 BXYZ 좌표계에서 $B\vec{S}_i$ 의 크기이므로 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L_i &= |B\vec{S}_i| \\ &= \sqrt{B\vec{S}_i * B\vec{S}_i} \\ &= \sqrt{(BS_{ix})^2 + (BS_{iy})^2 + (BS_{iz})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

구동막대의 길이로부터 각 구동막대의 단위벡터 $B\vec{S}_{iu}$ 는 식 (10)과 같다.

$$B\vec{S}_{iu} = B\vec{S}_i / |B\vec{S}_i| = \begin{bmatrix} (BS_{ix}) / L_i \\ (BS_{iy}) / L_i \\ (BS_{iz}) / L_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

다음은 주어진 구동막대의 길이로부터 플랫폼의 6자유도 변위를 구하는 순기구학문제를 살펴보면 다음과 같다. 플랫폼의 6자유도 변위는 베이스좌표계에서 볼때 3개의 선형운동과 3개의 회전운동으로 기술되며, 식 (9)에서 표현되는 구동막대의 길이를 구속조건으로 하여 구할 수 있다. 만약, 병렬기구가 특이점(singularity)을 갖지 않는다면 식 (9)의 해는 유일하다. 식 (9)의 좌변은 주어진 구동막대의 길이로서 상수이고, 우변은 플랫폼 6자유도 변위의 제곱근이므로 비선형 연립방정식의 해를 구하는 수치해석법을 이용하여 플랫폼의 6자유도 변위를 구하는 것이 가능하다.

2.5 병렬기구의 정역학

각 구동막대가 이동하는 방향으로만 힘을 발생시킨다고 가정하면, 플랫폼이 일정한 위치에 정지할 때, 플랫폼의 자중에 의하여 각 구동막대에 미치는 힘은 힘평형방정식과 모멘트평형방정식으로부터 구해 질 수 있다.

식 (5)를 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$B\vec{S}_i = R_B^P P\vec{P}_i + B\vec{P}_{ORG} - B\vec{B}_i \quad (7)$$

식 (7)을 xyz 성분으로 표현하여 행렬로 나타내면 (8)과 같다.

Fig. 6은 임의 위치에서 플랫폼에 작용하는 외력을 나타낸다. 플랫폼 좌표계의 원점과 플랫폼의 무게, 심이 일치하고, 플랫폼 평면이 각 조인트로 이루어지는 평면상에 존재한다고 가정하면 플랫폼 좌표계로 기술된 플랫폼의 힘평형방정식은 식 (11)과 같다.

$$\sum_{i=1}^6 P\vec{S}_{iu} f_i = m P\vec{g} \quad (11)$$

여기서, 각 구동막대에서 플랫폼으로 작용하는 힘을 f_i , 구동막대의 방향벡터를 $P\vec{S}_{iu}$, 플랫폼의 질량을 m , 중력벡터를 $P\vec{g}$ 라고 한다.

이를 다시 고쳐 쓰면 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^6 P\vec{S}_{iu} f_i = P\vec{S}_{iu} F = m R_B^P B\vec{g} \quad (12)$$

여기서, $P\vec{S}_{iu}$ 는 링크의 방향벡터로 구성된 3×6 행렬이고 F 는 링크에서 플랫폼에 미치는 힘행렬이며, $B\vec{g}$ 는 행렬 $[0 \ 0 \ -g]^T$ 를 의미한다.

플랫폼의 무게중심이 플랫폼좌표계의 원점과 일치할 경우 중력에 의해 발생하는 모멘트값은 0이므로 각 링크에 발생하는 모멘트는 평형을 이루어

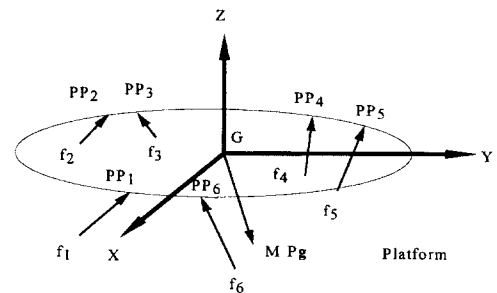


Fig. 6 Static force and moment equilibrium of the platform.

야한다.

$$\sum_{i=1}^6 P\vec{P} \times \vec{f}_i = 0 \quad (13)$$

플랫폼에 다른 외력이 작용하지 않는 상태에서 각 구동막대에 미치는 힘은 식 (12)와 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

3. 설계 결과 및 고찰

3.1 6자유도 병렬기구의 설계

앞절에서 기술한 일반적인 6자유도 병렬기구가 갖는 문제점을 해결하기 위해 가역운동에 의한 에너지손실이 적고 넓은 운동영역을 갖는 병렬기구를 설계하였다. 볼나사형태의 구동기가 갖는 자기잠금 상태를 해결하기 위해 DC모터와 감속 피니언 기어 박스를 이용하여 구동기를 설계하여 정역회전에 의한 가역운동이 가능하게 하였다. 넓은 운동영역을 구현하기 위해 한 점을 고정점으로 하고 다른 한점을 움직이는 점으로 하였을 때 움직이는 점과 고정점 사이의 길이를 구하는 것을 고안의 출발점으로 하였다. Fig. 7에서와 같이 고정점 B_1 과 움직이는 점 P_1 사이의 길이는 고정점의 원이 충분히 작으면 움직이는 점과 고정점에 위치한 원의 접선 까지의 거리가 된다. 이와 같이 하면 고정점을 중심으로 움직이는 점이 어느 위치에 있어도 고정점에 있는 원의 접선과 움직이는 점 사이의 길이를 구할 수 있다. 움직이는 점과 고정점을 연결하는 접선을 구동막대로 대체하여 구동막대의 길이만 확보되면 움직이는 점이 운동영역으로 운동할 수 있고, 역으로 고정점 가까이 접근할 수 있어서 기존 실린더 형태의 구동기의 단점을 보완하여 넓은 운동영역을 갖는 병렬기구를 제작할 수 있다. 좀더 구체적으로 기술하면 플랫폼이 ㉔의 위치에서 ㉕의 위치로 움직일 때, P_1 - B_1 에서 P'_1 - B_1 으로 구동막대가 구동하고 구동막대의 한면이 백기어로 제작되어 모터와 연결된 피니언 기어와 미끄럼없이 움직이고, 피니어인 기어는 센서와 연동하여 구동막대가 줄어든 길이를 검출할 수 있도록 하였다. 이때 센서는 구동기와 일체로 움직이며, 구동막대의 길이변화만을 검출할 수 있도록 하였다.

이와 같은 개념에서 제작된 설계도면은 Fig. 8에 나타낸 것과 같다. 이것은 피니어인 기어 박스에 의한 감속이 이루어지고 외접기어에 구동막대가 설

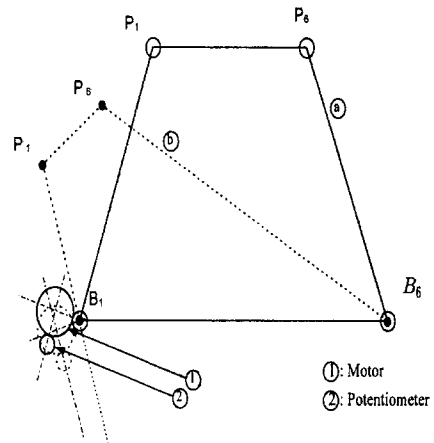


Fig. 7 Rod movement when the platform moves.

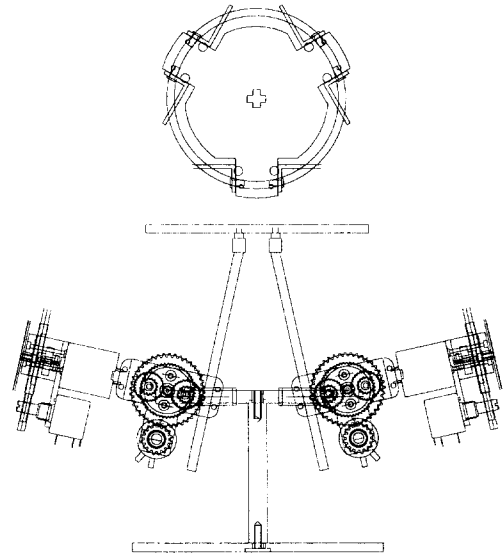


Fig. 8 Design drawing of the six degree-of-freedom joystick.

치되어 있으므로 가역적인 운동을 원활하게 할 수 있는 구조이다. 구동막대의 구동을 위해 6개의 DC 모터를 사용하였고, 6개의 변위검출기(displacement transducer)를 이용하여 구동막대의 길이를 측정하였다. 구동막대가 움직일 수 있는 공간이 일반적인 신행 구동기에 비해 많이 개선되었고 플랫폼의 운동영역도 넓어졌다. Fig. 9는 실제 제작된 6자유도 조이스틱(Joystick)의 사진이다.



Fig. 9 Photo of the six degree-of-freedom joystick.

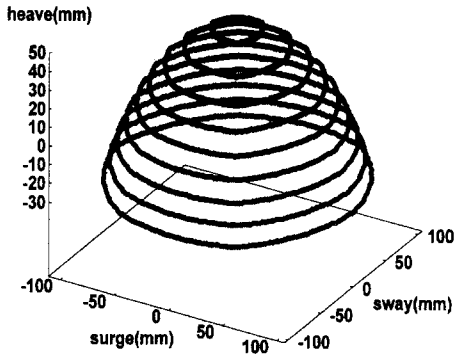


Fig. 10 Maximum work space of surge and sway as heave increases.

3.2 6자유도 병렬기구의 운동영역

병렬기구의 운동영역은 구동막대간의 간섭과 링크의 가역길이에 의해 결정된다. 구동막대간의 간섭은 기어조립부와의 접촉상태나 유니버설조인트가 갖는 임계각에 의해 결정된다. 구동막대의 가역길이와 구동막대의 이동방향의 단위벡터를 이용하여 식 (9)와 식 (10)으로부터 임계각의 범위와 운동영역을 구할 수 있다. Fig. 10은 히브운동에 따른 서지, 스웨이운동의 최대영역을 나타낸다. 중립위치보다 아래쪽에서 비교적 넓은 운동영역을 가진다. Fig. 11은 히브운동에 따른 롤과 피치 운동의 최대영역을 나타낸다. 동작점의 배치에 따른 운동영역의 대칭성이 나타나고 중립점 가까이에서는 각 방향으로 45도 이상의 넓은 운동영역을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 동일한 크기

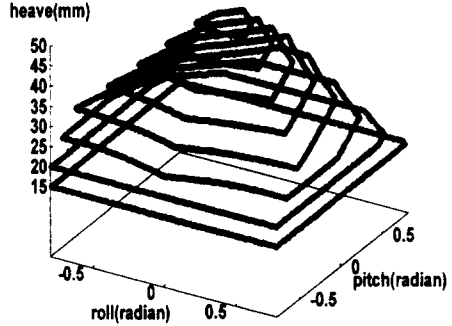


Fig. 11 Maximum work space of roll and pitch as heave increases.

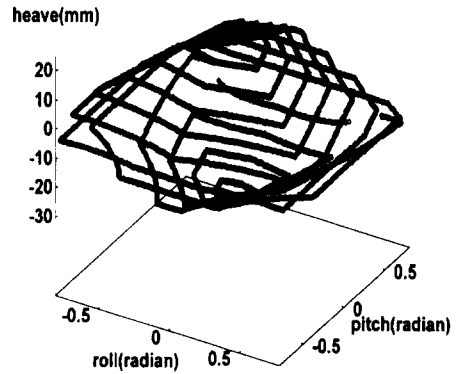


Fig. 12 Maximum work space of roll and pitch in case that the actuator is a cylinder type.

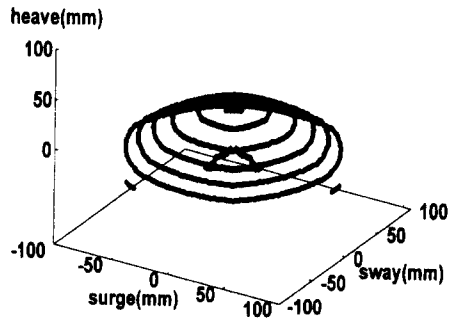


Fig. 13 Maximum work space of surge and sway in case that the actuator is a cylinder type.

를 갖고 있지만 구동기의 길이변위가 전체 길이의 40%를 갖는 실린더 형태의 병렬기구가 갖는 운동영역을 나타낸다. 이것은 히브운동에 따른 롤과 피치 운동의 최대영역을 구한 것이다. Fig. 11에서와는 대조적으로 중립면 아래쪽에서 운동영역이 급격히 제한됨을 알 수 있다. Fig. 13은 실린더 형태의 병렬기구가 갖는 서지와 스웨이운동의 최대

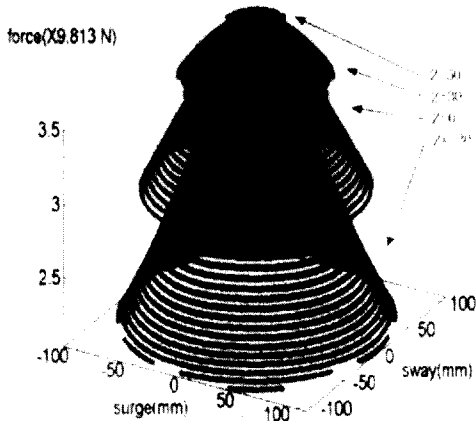


Fig. 14 Axial variation of the z directional force as heave increases.

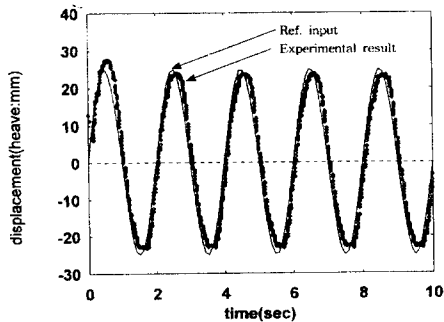


Fig. 15 Sinsoidal response of the platform.

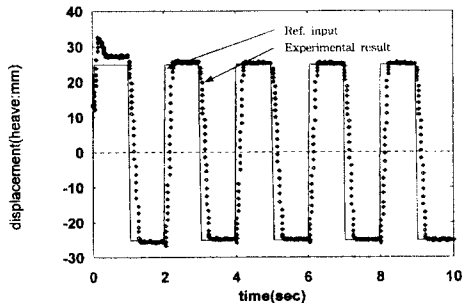


Fig. 16 Step response of the platform.

영역을 나타낸 것이다. Fig. 10의 최대 운동영역과 비교하여 보면 같은 히브 운동 위치에서 서지와 스웨이 운동이 적음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 고안된 시스템은 기존 실린더 형태의 병렬기구에 비해 넓은 운동영역을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 힘의 최대값

병렬기구의 플랫폼을 수평상태로 유지시키고 Z축 방향의 힘을 계산하였다. Fig. 14은 $Z = -30, 0, 30, 50$ 에서 Z방향의 힘을 나타낸다. Z방향의 값이 증가할수록 힘이 커지는 것은 링크에 가해지는 힘의 Z방향 분력이 조인트 각도에 의해 커지기 때문에 XY평면의 중앙에서 가장 큰 값을 가진다. 기어에 의한 감속비는 8:1이고, 각 축에 걸리는 힘은 0.7 Kgf일 때를 고려하여 구하였다. 운동영역의 가장자리에서는 2 Kgf 이상의 힘이 걸리므로 병렬기구의 상부의 무게 600 g을 고려하면 충분히 구동할 수 있는 값임을 알 수 있다.

3.4 플랫폼의 제어

플랫폼의 자세로부터 로드의 길이를 구하는 것은 쉬우나 반대로 로드의 길이로부터 플랫폼의 자세를 구하는 것은 어려운 일이다. 센서에서 측정된 길이로부터 플랫폼의 자세를 구하는 것은 수치해석의 형태로 역행렬을 계산하여 구하였다. 히브 운동에 대한 값을 기준입력으로 하고, 그 기준에 대한 각 로드의 목표길이를 계산하여 패루프제어를 구하였다. Fig. 15에서는 정현파 기준입력에 대한 상부 플랫폼의 운동을 나타낸다. Fig. 16은 스텝(step)입력에 대한 플랫폼의 운동을 나타내었다. 정상상태 오차가 3, 4mm 정도 발생했으며 시간 지연에 대한 응답은 상대적으로 좋았다. 가상 공간과 사람의 손을 연결하는 연결기구로서의 역할을 구현할 수 있었다. 제어성능을 향상 시키기 위한 제어 알고리즘의 개발과 적용은 다음 과제로 남겨둔다.

4. 결 론

본 논문에서는 병렬기구의 기구설계, 기하학적 해석, 정적인 힘의 해석, 그리고 그 결과로 얻어지는 기구의 특성에 관하여 기술하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일반적 형태의 구동기에서 얻어지는 운동영역보다 넓은 운동영역을 확보할 수 있고, 특히 중립점 이하에서의 운동영역이 많이 개선됨을 알 수 있다.

(2) 운동영역 안에서 가해지는 힘의 성분이 플랫폼의 무게를 이겨낼 수 있고, 구동막대의 길이를 제어함으로써 플랫폼을 제어할 수 있다.

(3) 6개의 센서와 6개의 DC 모터를 가지고 6자유도 병렬기구의 운동을 재현해 낼 수 있다.

향후 연구는 시스템의 제어성능을 향상시키는 것과 실제 크기를 줄여서 제작하는 것이 필요하며, 조이스틱과 컴퓨터와의 직렬통신을 이용하여 플랫폼의 자세를 모니터링하는 것도 필요하다.

참고문헌

- (1) Aukstakalnis, S. and Blatner, D., 1992, "Silicon Mirage : The Art and Science of Virtual Reality," Peachpit Press.
- (2) Roy S. Kalawsky, 1993, *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison-Wesley.
- (3) Tsusaka, Y., Fukuizumi, T. and Inoue, H., 1987, "Parallel Manipulator : Its Design and Mechanical Characteristics," *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 5, No3, pp. 12~19.
- (4) Stewart, D., 1965-66, "A Platform with Six Degrees of Freedom Part 2," *Proc. of the Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 180, No. 15, pp. 371~386.
- (5) 정규홍, 이교일, 1994, "스튜어트 플랫폼 순기구학 해의 실시간 추정기법," 대한기계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1632~1642.
- (6) McCallion, H. and Truong, P. D., 1975, "The Analysis of a Six-Degree-of-Freedom Work Station for Mechanized Assembly," *Proc. of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, pp. 611~616.