

## 5절링크와 짐벌기구로 구성된 병렬형 6자유도 햅틱 핸드컨트롤러의 설계

류동석\* · 손원선\* · 송재복†  
(2002년 1월 2일 접수, 2002년 12월 4일 심사완료)

### Design of a 6-DOF Parallel Haptic Hand Controller Consisting of 5-Bar Linkages and Gimbal Mechanisms

Dong-Seok Ryu, Won-Sun Sohn and Jae-Bok Song

**Key Words :** Haptic Hand Controller(햅틱 핸드컨트롤러), Gimbal Mechanism(짐벌기구) Five Bar Linkage(5절링크), Manipulability(조작성)

#### Abstract

A haptic hand controller (HHC) operated by the user's hand can receive information on position and orientation of the hand and display force and moment generated in the virtual environment to the hand. In this paper, a 3-DOF hand controller is first presented, in which all the actuators are mounted on the fixed base by combining a 5-bar linkage and a gimbal mechanism. The 6-DOF HHC is then designed by connecting these two 3-DOF devices through a handle which consists of a screw and nut. Analysis using performance index is carried out to determine the dimensions of the device. The HHC control system consists of the high-level controller for kinematic and static analysis and the low-level controller for position sensing and motor control. The HHC used as a user interface to control the mobile robot in the virtual environment is given as a simple application.

#### 1. 서론

컴퓨터 기술의 급속한 발전으로, 사용자가 컴퓨터에서 구성한 가상의 세계를 현실과 같이 느끼도록 하는 가상현실(virtual reality)이 등장하였다. 가상현실을 사용자에게 보다 현실감 있게 제공하기 위해서는 신체의 오감을 모두 자극할 수 있도록 가상환경을 구축하는 것이 바람직하지만, 지금까지는 컴퓨터 그래픽에 기초한 시각환경 및 청각환경의 연구가 주로 진행되어 왔다.

최근, 로봇 및 제어 기술을 이용하여 사용자에게 힘이나 촉감 등을 제시할 수 있는 다양한 햅틱장치(haptic device)가 개발되고 있으며, 이를 가상

환경에 적용하여 현실감을 높이고, 원격 진료, 원격 작업, 군사 훈련, 재활, 교육, 게임 등 다양한 분야에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 햅틱장치는 신체 적용 부위에 따라 시뮬레이터, 압마스터, 핸드컨트롤러, 핸드 마스터, 촉각 제시 장치 등으로 분류할 수 있다. 이 중에서 본 연구의 대상이 되는 핸드컨트롤러는 사용자의 손과 접촉하여 움직이면서, 손의 위치/자세 정보를 가상현실에 입력하고, 가상현실에서 요구하는 힘/토크를 손에 피드백시켜 주는 햅틱장치이다. 이는 컴퓨터와 사용자를 연결하는 직관적인 차세대 인터페이스 중 하나로서, 앞으로 현재의 2차원 마우스를 대체하는 등 여러 응용 분야에 활용될 수 있다.

햅틱장치를 설계할 때 주요 고려 사항으로는, 적절한 작업공간, 위치입력과 힘피드백의 정확성, 넓은 범위의 임피던스(impedance) 구현과 역구동성(back-drivability) 등을 들 수 있다.<sup>(1-3)</sup> 연구 초기에는 자유도가 작고 구조가 간단하며 베이스의 크기에 비해 넓은 작업공간을 갖는 직렬형 매니플레

\* 고려대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : jbsong@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3363 FAX : (02)3290-3757

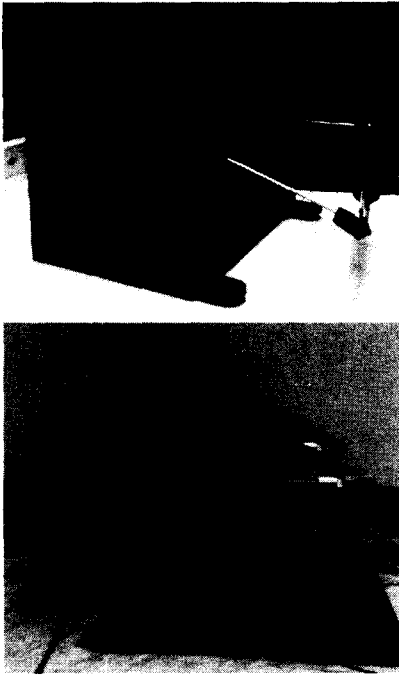


Fig. 1 Photo of HHC

레이더 형태의 직렬형 핸드컨트롤러가 많이 개발되었으나, 이는 강성이 작고, 관절의 오차가 누적되어 정확성이 저하되는 단점이 있다. 핸드컨트롤러는 다른 햅틱장치와 비교하였을 때 정확성이 우수하여야 하기 때문에, 직렬형의 단점을 보완하기 위해서 병렬형 기구를 활용하는 연구가 진행되었다. 병렬형 기구의 경우에는 부착면적에 비해 작업공간이 다소 협소하지만, 정확도가 우수하며, 액추에이터를 베이스에 장착하여 관성을 줄이고 장치의 역구동성을 높일 수 있다는 장점을 갖는다.

병렬형 핸드컨트롤러 중에서 3점에서 엔드 이펙터(장치의 특성상 이하 ‘핸들’이라 칭함)를 지지하는 구조는, 강성이 뛰어나고 정확도가 우수하지만, 순기구학의 해석이 어렵다. 수치적인 방법을 사용할 경우 컴퓨터에 많은 부담을 주게 되어, 실시간 제어를 위해 추가적인 센서를 설치하기도 한다.<sup>(4,5)</sup>

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한, 2점 지지 방식의 새로운 6자유도 햅틱 핸드컨트롤러인 KU-HHC(Korea University-Haptic Hand Controller, 이하 HHC라 칭함)를 개발하였다. HHC는 2점 지지 방식을 채택하여, 병렬형 기구의 장점을 활용하면서도, 순기구학의 해석이 용이하도록 하였다. 또한, 복잡한 기구부를 베이스 뒤쪽에 배치하고, 사용자의 작업영역에는 단순화된 핸들 형태의 인터페이스만을 제시하였다.

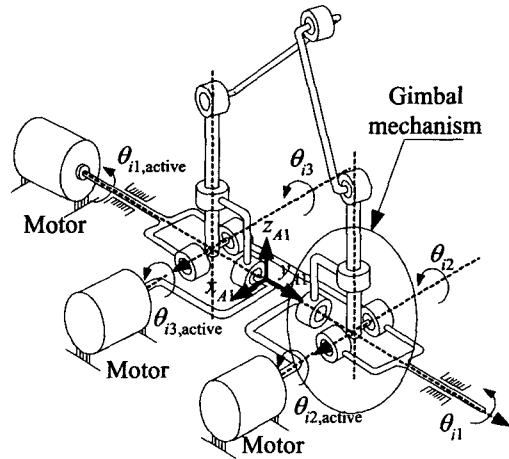


Fig. 2 Structure of 3DOF haptic device using 5-bar linkage and gimbal mechanism

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 개발된 HHC 기구적인 구조에 대하여 설명하고, 3장에서는 HHC를 설계하기 위한 조작성의 해석 및 설계변수의 결정에 대하여 다룬다. 4장에서는 HHC의 기구부 및 제어부 제작에 대하여 설명하고, 5장에서 PC의 가상환경과 연계된 HHC의 작동 방식 및 간단한 응용 사례를 보여준 후에, 6장에서 결론을 도출하도록 한다.

## 2. HHC의 구조

### 2.1 5절링크와 짐벌기구를 이용한 3자유도 기구

5절링크는 설계 및 해석이 쉬우므로 여러 장치에 널리 사용된다. 일반적으로 5절링크를 이용하여 3자유도의 기구를 제작하는 경우에, 평면 2자유도를 갖는 5절링크의 베이스를 1자유도의 회전관절 위에 연결하여 5절링크 전체를 회전시키는 구조를 갖게 된다. 그러나 이러한 구조를 핸드컨트롤러에 그대로 적용하면, 5절링크를 2자유도로 구동하기 위한 액추에이터가 5절링크 전체를 회전시키는 회전관절의 움직임에 따라 같이 움직이므로, 이러한 액추에이터의 관성이 장치 전체의 역구동성을 저하시키며, 액추에이터 자신을 움직이기 위한 추가적인 동력이 필요하게 되어 효율이 저하된다.

본 논문에서는, Fig. 2과 같이 5절링크와 짐벌기구를 이용하여, 핸드컨트롤러에 사용하기 적합한 새로운 3자유도 기구를 설계하였다. 제시된 기구부는 5절링크 하부의 회전관절을 짐벌기구로 대체하였으며, 5절링크 전체를 회전시키는 회전관절의

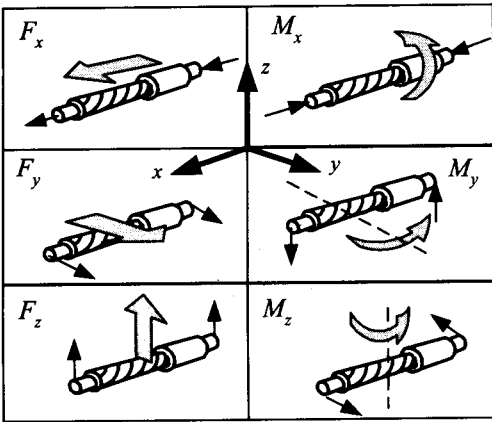


Fig. 3 Representation of 6-DOF force/torque feedback by the handle supported by 2 points

축은, 5절링크를 2자유도로 움직여 주는 회전판절의 축과 일치하게 된다. 결국, 일반적인 5절링크를 이용한 3자유도 장치와 달리 모든 액추에이터를 베이스에 장착할 수 있으므로 역구동성을 향상시킬 수 있다. 따라서 제시한 기구는 독립적으로 3자유도 햅틱 핸드컨트롤러로 사용할 수 있지만, 본 연구에서는 6자유도 핸드컨트롤러인 HHC를 제작하기 위해 핸들 양단에 연결하는 독립적인 3자유도 햅틱장치로 사용하였다.

2.2 2점 지지 방식의 6자유도 구현

독립적으로 위치 3자유도의 입력 및 힘 피드백이 가능한 Fig. 2와 같은 3자유도 햅틱장치 2개를 스크류/너트를 통해 핸들에 연결하면, 위치 및 자세 6자유도에 대해 입력 및 힘/토크 피드백이 가능해진다. 이 때, 핸들을 통한 힘과 토크의 구현은 Fig. 3과 같이 구현할 수 있다. 즉, 핸들의 양단에 연결된 독립적인 3자유도 햅틱장치를 통해 x, y, z의 방향으로 힘을 가하게 되면, 각 방향의 위치 3자유도에 대한 힘을 제시할 수 있다. 또한, 핸들의 양단에 연결된 3자유도 햅틱장치를 x, y, z의 서로 반대 방향으로 힘을 가하게 되면, 각 방향의 자세 3자유도에 대한 모멘트를 제시할 수 있다.<sup>(6)</sup>

2.3 HHC의 구조

HHC는 Fig. 2에서 설명한 독립적인 3자유도 기구 2개를 병렬로 연결하여 6자유도를 구현하도록 하였으며, 모든 액추에이터를 베이스에 장착하여 장치의 역구동성을 향상시키도록 하였다. 또한, 기구부와 핸들의 연결에 있어 2점 지지 방식을 취하여 순기구학의 해석이 쉽도록 하였다.

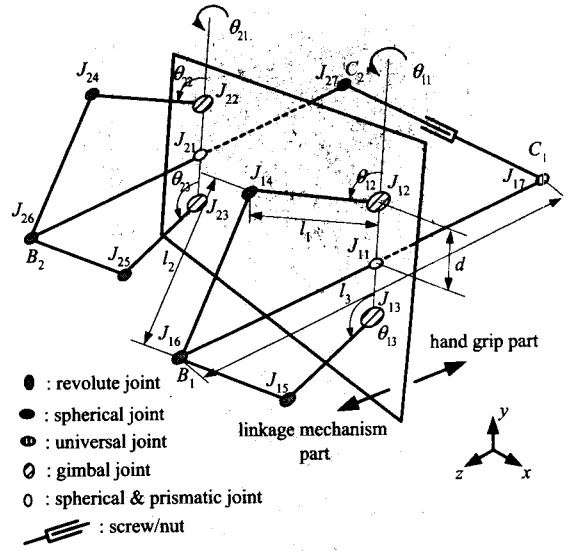


Fig. 4 Configuration of HHC.

Fig. 4에 나타낸 HHC의 구조에서,  $J_{12}, J_{13}, J_{14}, J_{15}, J_{16}$ 으로 연결된 5절링크와  $J_{22}, J_{23}, J_{24}, J_{25}, J_{26}$ 으로 연결된 또 다른 5절링크가, Fig. 2에서 설명한 바와 같이 각각 독립적인 3자유도 운동을 한다. 따라서, Fig. 3에서 설명한 원리에 의해,  $B_1$ 과  $B_2$ 를 스크류/너트로 구성된 핸들과 연결하여 6자유도를 구현하는 핸드컨트롤러를 구성할 수 있다. 그러나 HHC에서는,  $B_1$ 과  $B_2$ 를 직접 핸들과 연결하지 않고, 직선관절과 구면관절이 복합된 관절  $J_{i1}$ 을 통해 5절링크의 정점  $B_i$ 의 위치를 베이스 반대편  $C_i$ 에 투영시켜 핸들에 연결하였다. 제시한 구조는 각 독립적인 3자유도 기구의 해석이 서로에게 커플링되어 있지 않으므로, 이를 병렬적으로 연결하더라도 일반적인 3점지지 구조의 병렬기구와 달리 순기구학이 어렵지 않다는 장점이 있다.<sup>(7)</sup> 또한, 이러한 구조는, 복잡한 기구부를 베이스 뒤쪽에 배치하고 간단한 링크 구조와 핸들만을 작업공간에 제시함으로써 사용자에게 단순화된 작업환경을 제공할 수 있는 장점과,  $l_3$ 를 길이를 변경하여 장치의 기구학적 특성을 조정할 수 있다는 장점을 가진다.

3. HHC의 설계

3.1 HHC의 설계변수

제안된 HHC를 설계함에 있어서, 주요 설계변수로서  $l_1, l_2, l_3, d$  등이 있으며, 작업공간 및 기구학적 성능을 고려하여 이를 결정하였다. 일반적으로 핸드컨트롤러는 베이스의 크기가 작으면서, 작업공간이 넓고, 각 방향에 대해 기하학적으로 등방

적이어야(isotropic) 한다. 제안된 장치에서  $l_1, l_2, d$  등이 커지면 작업공간이 커지지만, 장치의 전체적인 크기와 부착면적이 함께 증가하게 된다. 또한,  $l_3$ 는 베이스 뒤쪽의 6자유도 기구부의 운동을 사용자의 영역에 투영하여 주는 링크의 길이로서, 이를 조정하여 제안된 장치의 기구학적 특성을 조절할 수 있다.  $l_3$ 가 증가하면 동일한 3자유도 기구를 사용하면서도  $x, y$  방향으로 작업공간을 확대할 수 있지만,  $z$  방향으로 작업공간이 확대되지 않으므로 기하학적 등방성이 저하된다.

먼저, 장치의 크기, 부착면적 및 작업영역을 고려하여  $l_1, l_2, d$ 를 각각 90mm, 100mm, 70mm로 선정하였으며, 작업공간의 등방성, 힘 피드백의 효율성 등을 고려하여  $l_3$ 를  $3.0 l_1, 3.5 l_1, 4.0 l_1$ 의 몇 가지 경우로 설정한 후, 적절한 작업공간과 힘피드백 크기, 등방성 등을 고려하여 이를 결정하고자 한다.

3.2 HHC의 기구학적 특성

HHC의 설계에 있어서 기구의 자코비안 행렬에 기초하여 기구학적 특성을 해석하면, 기구의 성능을 최적화하는 설계변수를 선정하는 데 사용할 수 있다. 자코비안을 이용한 장치의 기구학적 특성을 해석하기 위하여, 여러 연구자들에 의해, 최대/최소 특이값의 비, 조작성(manipulability), 저항성(resistivity), 병진성(translationability) 및 회전성(rotationability)과 같은 다양한 기구학적 성능지수(kinematic performance index)가 제안되었으며,<sup>(8-10)</sup> 이를 이용하여 설계 단계에서 기구요소의 구성과 배치를 최적화할 수 있다.

본 논문에서는 핸들의 자유로운 운동능력을 나타내는 조작성(manipulability)과 효율적으로 힘을 제시할 수 있는 능력의 척도로 사용되는 저항성(resistivity)을 이용하여 성능을 해석하고 설계변수  $l_3$ 를 최적화하였다.<sup>(11)</sup>

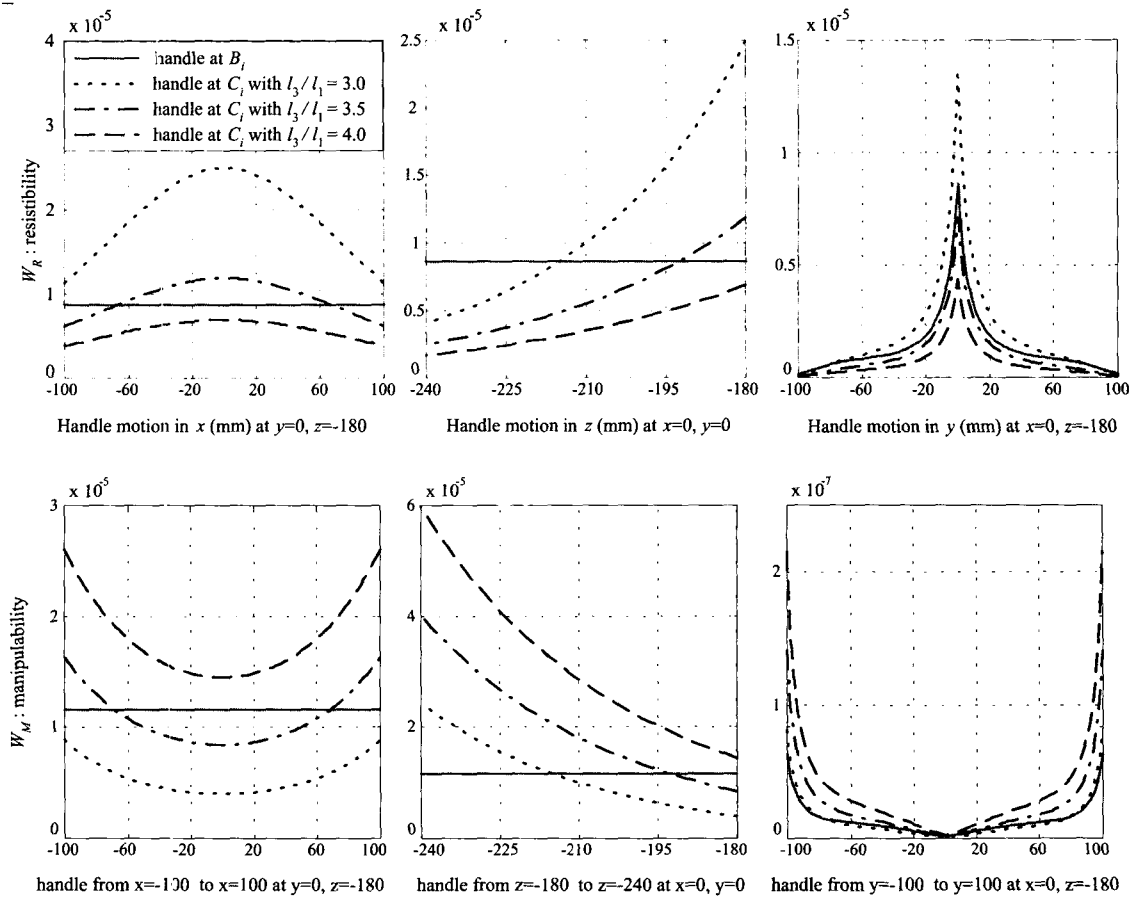


Fig. 5 Configuration of HHC

일반적인 매니플레이터에 있어 자유로운 운동 능력의 척도로서, Yoshikawa<sup>(8)</sup>는 조작성 지수  $w_M$ 와 저항성 지수  $w_R$ 를 다음의 식 (3a)과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} w_M &= \sqrt{\det(J \cdot J^T)} \\ w_R &= \frac{1}{\sqrt{\det(J \cdot J^T)}} \end{aligned} \quad (3a)$$

Fig. 5는 제안된 구조와 관련된 조작성과 저항성을 나타낸 것이다. 해석 방법은 나머지 축을 고정된 상태로 각  $x, y, z$  방향으로 핸들의 위치를 변화시키면서 나타나는 성능지수를 표시하였다. 조작성과 저항성은 서로 역수 관계를 가지는데, 핸드 컨트롤러의 설계에 있어 두 성능지수가 균형을 이루도록 하여야 하며, 용도에 따라 적절한 성능을 가질 수 있도록 상호 보완적으로 선택하여야 한다.

Fig. 5에서 5절링크 상단의 위치  $B_1$ 에 직접 핸들을 부착하였을 경우의 성능지수를 실선으로 표시하였으며, 제안된 구조와 같이  $B_1$ 의 위치를 링크  $l_3$ 를 통해 사용자 영역의  $C_1$ 에 투영하여 핸들을 부착하였을 경우의 성능지수를 링크의 길이(링크  $l_3$ 는 각각  $3.0 l_1, 3.5 l_1, 4.0 l_1$ )에 따라 각 점선, 쇄선, 이점쇄선으로 표시하였다. 전자의 경우에 적용한 성능지수가  $x, z$  방향으로 균일하여 등방적임을 알 수 있으며, 후자의 경우에 링크  $l_3$ 의 길이가 상대적으로 길어지면 각 방향에 대해 성능지수의 변화가 작아지고, 조작성이 전체적으로 증가하지만, 저항성이 감소하여 사용자에게 제시할 수 있는 힘의 크기가 감소하게 된다.

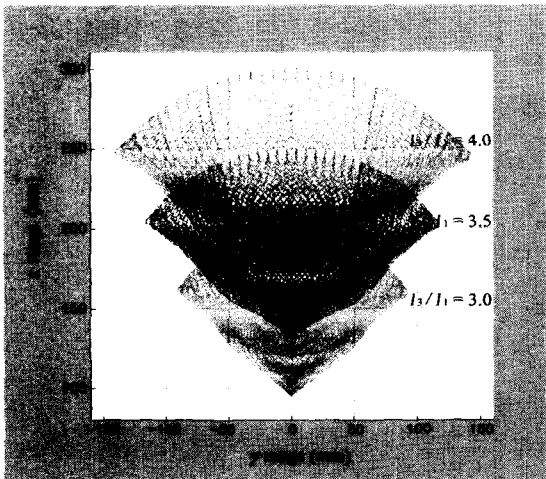


Fig. 6 Variation of workspace of proposed HHC with respect to  $l_3 / l_1$

또한, Fig. 6에 도시한 바와 같이, 링크  $l_3$ 의 길이가 상대적으로 길어지면,  $x, y$  방향으로 작업공간이 확대되는 장점을 가지지만,  $z$  방향은 변화하지 않으므로 전체적으로 작업공간이 일그러지게 된다.

### 3.3 HHC 설계변수의 선정

HHC의 설계변수는, 전술한 바와 같이, 장치의 크기를 고려하여  $l_1, l_2, d$ 를 각각 90mm, 100mm, 70mm로 선정하였다. 또한, 링크  $l_3$ 의 길이를  $l_1$ 의 3.5배가 되도록 선정하였으며, 이는 위 절에서 살펴본 바와 같이, 작업공간과 기구학적 성능을 모두 고려하여, 제시할 수 있는 힘의 크기가 너무 작아지지 않는 범위에서 적절한 작업공간을 가질 수 있도록 선택한 것이다. 어플리케이션에 따라, 장치의 크기, 액추에이터의 역구동성과 힘의 크기, 링크  $l_3$ 의 강성 등을 감안하고, 위 절의 해석을 바탕으로 하여 설계목표에 부합하도록 설계변수를 다르게 선정할 수 있다.

선정된 설계변수와 사용한 액추에이터를 통해 HHC에서 각 방향으로 제시할 수 있는 힘은 기구의 형상(configuration)에 따라 달라지며, 평균 약 5N의 힘을 반영할 수 있다. 선정된 설계변수에 의한 작업공간을 Fig. 7에 도시하였다.  $z$ 축을 중심으로 약  $25^\circ$ 로 회전하며 생성되는 원뿔형 형태이며, 각  $x, y, z$  방향으로 최대 240mm, 300mm, 80mm의 매우 넓은 작업공간에 해당한다는 점을 알 수 있다. 작업공간을 가진다. 이는 장치의 부착면적과 설계된 링크의 길이를 고려할 때, 병렬기구로서는 매우 넓은 작업공간에 해당한다는 점을 알 수 있다.

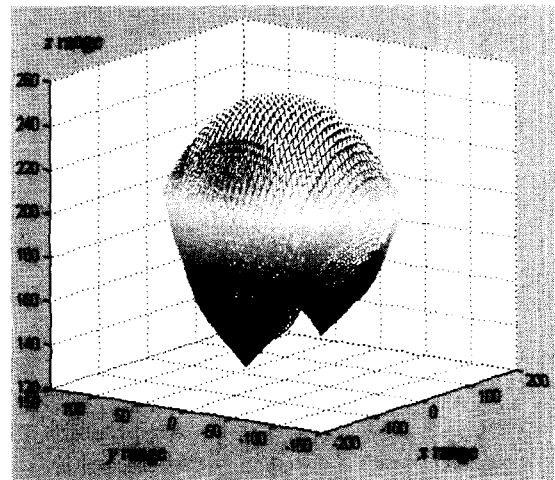


Fig. 7 Workspace of proposed HHC

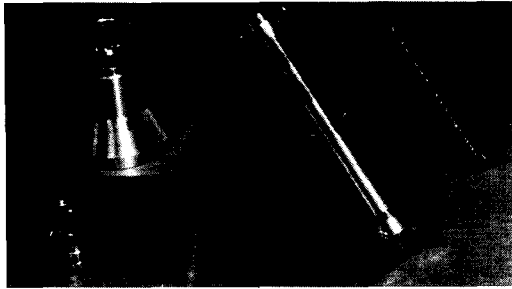


Fig. 8 (a) Joint  $J_{11}$ , and (b) handle consisting of screw/nut

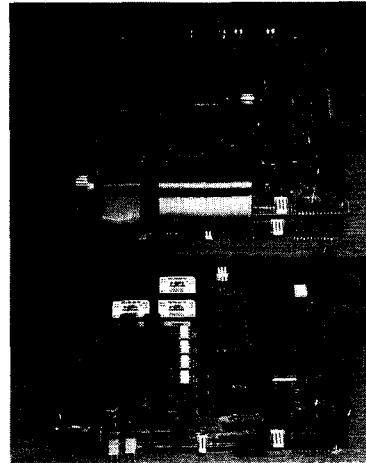


Fig. 9 (a) High-level controller using DSP, and (b) low-level controller using 80196

#### 4. HHC의 제작

##### 4.1 기구부 제작

실제 기구의 제작에 있어서, 구면관절과 직선관절이 복합된  $J_{11}$ (Fig. 4 참조)를 구현하기 위하여 Fig. 8(a)에 도시한 바와 같이 상용으로 제작된 구면축수와 볼부시를 복합하여 사용하였다. 따라서 링크  $l_3$ 는 구면 운동을 하는 볼부시 안으로 삽입되어 원활히 미끄럼 운동을 할 수 있다.

또한, Fig. 8(b)에 나타나 있는 핸들에 사용되는 스크류/너트의 리드(lead)를 선택하는 데 있어, 장치의 정확도 및 힘반영 효율을 고려하여 적절하게 선택하도록 주의하였다. HHC의 핸들에 사용된 스크류/리드의 리드각은  $45^\circ$ 로서, 리드를 크게 하여 정확도를 향상시키고, 역구동성이 우수하도록 하였다.

##### 4.2 HHC 제어 시스템

HHC의 제어시스템은, 각 능동관절에 설치된 엔코더로부터 위치정보를 받아들이고, 각 모터를 구동하는 역할을 수행하는 6개의 하위제어기와 이들 6개의 하위제어기를 총괄하면서 필요한 기구학 및 역학 계산을 수행하는 1개의 상위제어기로 구성되어 있다. Fig. 9(a)의 상위제어기는 TI사의 32비트 부동소수점 연산용 프로세서인 TMS320C31을 탑재한 DSP 보드를 사용하였으며, PC 및 하위제어기와 통신을 수행하고, 실시간으로 기구학 및 역학 계산을 수행한다. Fig. 9(b)의 하위제어기는 Intel사의 16비트 범용 마이크로컨트롤러인 80C196KC를 사용하는데, 본 연구를 위하여 인터페이스 회로를 설계하고 PCB의 제작을 통하여 구현하였다. 이 제어기에서는 전류센서를 통해 모터에 인가되는 전류를 측정하여 각 능동관절의 토크를 제어하도록 하였으며, 엔코더의 신호 판별, 계수 회로 및 상위제어기와의 통신회로를 하나의 EPLD(Erasable

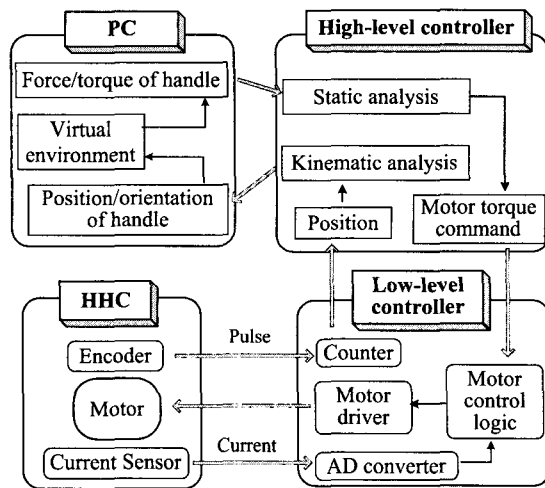


Fig. 10 System architecture of HHC

Programmable Logic Device)에 구현하여 장착하였다. 또한, 모터를 구동하기 위하여 4개의 FET로 구성된 인버터에 기초하는 모터 드라이버를 내장하고 있다.

#### 5. 통합시스템의 구축

##### 5.1 PC와 연동한 통합 시스템의 구축

제작된 HHC를 PC와 연동하여 Fig. 10와 같은 통합 시스템을 구축하면, 이를 PC 인터페이스로 활용하여 사용자의 손의 움직임을 PC에 전달하고, PC에서 발생하는 이벤트에 대응하는 힘을 사용자에게 전달하여 줄 수 있다.

우선 HHC 핸들의 위치정보를 처리하는 과정을 살펴보자. 사용자가 핸들을 잡고 움직이면 이에 따라 6개의 능동축이 운동을 하게 되는데, 각 능동축에 설치된 엔코더의 펄스 정보를 각 하위제어기의 계수기(counter)가 판독함으로써 각 축의 위치정보를 상위제어기에 전달하게 된다. 상위제어기는 각 축의 위치로부터 HHC의 기구학 해석을 통하여 핸들의 위치/자세를 계산하여 이를 PC에 전달한다.

한편, PC에서 구현되는 가상환경에서는 핸들의 위치/자세를 입력으로 받아서, 이에 상응하는 힘/토크를 핸들에 전달함으로써 사용자의 손이 이러한 힘피드백을 경험하도록 하게 되는데, 이 과정은 다음과 같다. 먼저 핸들에 가해지는 힘/토크가 가상환경에서 계산되어 상위제어기로 보내지면, 이를 구현하기 위해서 각 능동축의 모터가 발생하여야 하는 모터토크를  $\tau = J^T F$ 의 관계식에 기초하여 역학 해석을 통하여 계산한다. 여기서,  $J$ 는 HHC의 자코비안 행렬,  $\tau$ 는 각 모터가 발생시켜야 하는 모터토크로 구성되는 벡터,  $F$ 는 핸들에 발생하는 힘/토크로 3개의 힘  $F_x, F_y, F_z$ 과 3개의 모멘트  $M_x, M_y, M_z$ 로 구성되는 벡터이다. 상위제어기에서는 각 모터가 발생시켜야 되는 모터토크 명령을 6개의 하위제어기로 각각 전달하면, 각 하위제어기에서는 주어진 토크 명령을 실행하기 위해서 PID 제어를 수행한다. 이 때, 토크를 직접 측정할 수 없지만, 발생토크는 공급전류에 비례하므로 전류센서를 사용한 전류제어를 수행하게 된다. 이와 같은 공급전류는 하위제어기의 모터 드라이버로부터 공급된다. 이와 같이 각 모터가 지시된 토크를 발생시키게 되면, HHC의 핸들은 가상환경에서 요구하는 힘/토크를 사용자의 손에 전달하게 되는 것이다.

## 5.2 실험

햅틱장치의 중요 기능 중의 하나는 가상환경에서 계산되거나 원격지에서 보내온 힘을 정확하고 신속하게 사용자에게 반영하는 것이다. 이러한 성능을 시험하기 위하여 햅틱장치에서 발생하는 힘이 기준 힘 궤적을 추종하는 실험을 수행하였다. 실험에서는 HHC 핸들을  $x=0, y=0, z=-180$ 의 위치로 고정된 후에, 1N 크기의 힘을 계단입력 방식이나(Fig. 11)와 1Hz, 5Hz, 10Hz의 주파수를 갖는 정현파 입력 방식(Fig. 12)으로 제시하였고, 샘플링시간은 0.25msec로 설정하였다. 이 때 기준 힘 궤적이 변화하면 제어기에서 이 힘을 발생시키기 위하여 각 모터가 제공하여야 하는 토크 및 이에

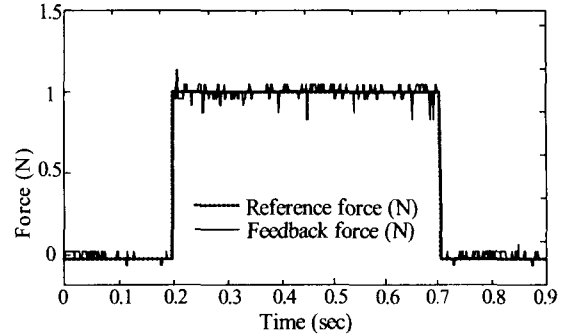


Fig. 11 Responses of feedback force for step input.

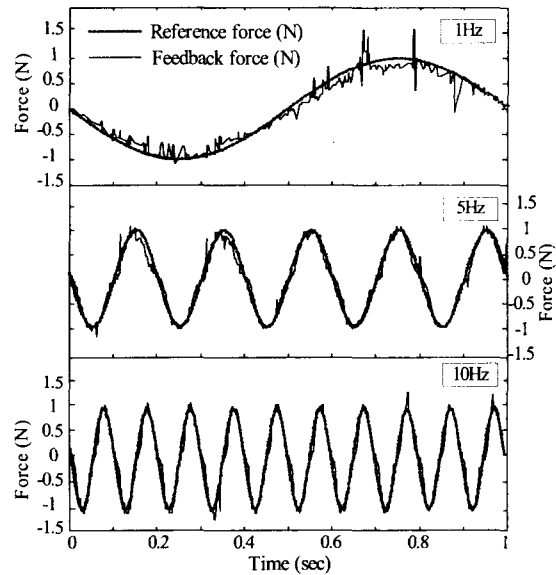


Fig. 12 Responses of feedback force for sinusoidal input

해당하는 모터 공급 전류를 산출하게 된다. 제어기에서는 전류센서를 이용한 전류제어 방식으로 모터 토크를 제어하게 된다. 또한, 실험에서는 실제 핸들에서 발생하는 힘을 직접 측정하는 것이 아니라, 공급된 전류로부터 자코비안 관계식을 이용하여 힘을 추정하는 방식을 사용하였다.

Fig. 11 및 Fig 12에서 반영된 힘을 보면 구동모터의 토크리플 및 전류센서에 의한 잡음이 섞여 있으며, 이를 해결하기 위해 하드웨어와 소프트웨어적으로 저역통과 필터(low-pass filter)를 사용하였다. Fig. 11의 실험 결과 급격하게 변화되는 기준에 대해서도 큰 오버슈트 없이 안정되게 힘을 반영함을 볼 수 있고, Fig. 12의 실험결과 10Hz 이상의 대역폭을 갖는 정현파 입력도 잘 추종함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 새로운 병렬형 6자유도 햅틱 핸드컨트롤러를 설계 및 제작하고, 통합 시스템을 구축하였으며, 그 응용 사례를 제시하였다.

우선 5절링크와 짐벌기구를 이용하여 역구동성이 우수한 3자유도 기구를 구성하였으며, 이러한 2개의 3자유도 기구를 결합하여 병렬형 6자유도 기구를 구성하였다. 이러한 구조는 모든 액추에이터를 베이스에 장착할 수 있도록 하여 역구동성을 높일 수 있고, 일반적인 3점지지 방식의 병렬기구와 다르게 순기구학의 해석이 용이하며, 복잡한 링크구조물과 사용자의 작업영역을 분리하여 단순한 인터페이스를 제공할 수 있다는 장점이 있다.

제안된 구조에 대해, 기구학적 성능지수를 해석하고 장치의 설계에 반영하여 기구부를 제작하였으며, 제어기를 구성하여 PC와 연동한 통합시스템을 구축하고, 실험을 통해 장치의 사용성을 검증하였다. 현재 이를 이용한 다양한 응용 사례의 개발이 진행되고 있다.

## 후 기

본 연구는 고려대학교 교내특별연구비로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Fischer, P., Daniel, R., and Siva, K. V., 1990, "Specification and Design of Input Devices for Teleoperation," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540~545.
- (2) Lawrence, D. A. and Chapel, J. D., 1994, "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3211~3216.
- (3) Colgate, J. E. and Brown, J. M., 1994, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3205~3210.
- (4) Long, G. L. and Collins, C. L., 1992, "A Pantograph Linkage Parallel Platform Master Hand Controller for Force-Reflection," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 390~395.
- (5) Tsumaki, Y., Naruse, H., Nenchev, D. N., Uchiyama, M., 1998, "Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2580~2585.
- (6) Iwata, H., 1993, "Pen-based Haptic Virtual Environment," *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 287~292.
- (7) Ryu, D. S., 2001, "Design of a User-Oriented 6-DOF Parallel Haptic Hand Controller," M.S. Thesis, Korea University, Seoul, Korea.
- (8) Yoshikawa, T., 1990, *Foundations of Robotics Analysis and Control*, MIT Press, pp. 127~143.
- (9) Ozaki, H., Wang, H., Liu X., and Gao F., 1996, "The Atlas of the Payload Capability for Design of 2-DOF Planar Parallel Manipulators," *Proc. IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 1483~1488.
- (10) Gosselin, C., Angeles, J., 1988, "A New Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators," *Proc. 20th Biennial Mechanisms Conf.*
- (11) Ryu D. S., Kwon T. Y., and Song J. B., 2001, "Design of a User-Oriented 6-DOF Parallel Haptic Hand Controller," *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 313~318.