

## 5각 관절 병렬 구조를 이용한 6자유도 힘 반사형 마스터 컨트롤러

### A Six-Degree-of-Freedom Force-Reflecting Master Hand Controller using Fivebar Parallel Mechanism

진 병 대, 우 기 영, 권 동 수

(Byoung Dae Jin, Ki Young Woo, and Dong-Soo Kwon)

**Abstracts :** A force-reflecting hand controller can provide the kinesthetic information obtained from a slave manipulator to the operator of a teleoperation system. The goal is to construct a compact hand controller that can provide large workspace and good force-reflecting capability. This paper presents the design and the analysis of a 6-degree-of-freedom force-reflecting hand controller using fivebar parallel mechanism. The forward kinematics of the fivebar parallel mechanism has been calculated in real-time using three pin-joint sensors in addition to six actuator position sensors. A force decomposition approach is used to compute the Jacobian. To evaluate the characteristics of the fivebar parallel mechanism, it has been compared with the other three parallel mechanisms in terms with workspace and manipulability measure. The hand controller using the fivebar parallel mechanism has been constructed and tested to verify the feasibility of the design concept.

**Keywords :** master hand controller, force reflecting, workspace, fivebar parallel mechanism

#### I. 서론

오늘날 컴퓨터와 통신 기술의 발달로 사용자는 가상 현실(virtual reality)을 통하여 컴퓨터와 제어 시스템을 연결할 수 있게 되었다. 아직은 간단한 그래픽 환경으로 제한되고 있지만 가상환경은 오락산업으로부터 원격수술, 군사 모의 실험 장치, 원격 조종과 인터넷을 통한 다양한 사업에 이르기까지 적용 범위가 크게 확대되고 있다. 사용자가 가상환경으로부터 현실감을 느끼기를 원하는 것은 당연한 일이며, 이를 위한 인터페이스 기구의 개발이 급속히 진전되어 왔다.

VR(Virtual Reality)분야와 병행하여 텔레로봇(telerobotics) 분야에서도 고성능 힘반사 기능을 갖는 마스터 컨트롤러의 개발이 크게 요구되어 왔다. 인공지능을 가진 자동화 로봇기술의 개발이 정체되면서 1940년대부터 개발되어온 원격조종(teleoperation)기술은 텔레로보틱스(telerobotics)라고 부르는 새로운 로봇기술 분야로 발전하였다. 원격지 작업을 좀 더 현실감을 가지고 효과적으로 수행하기 위하여 작업자에게 촉감 등의 힘을 전달시켜 줄 수 있는 다양한 종류의 마스터 컨트롤러(master hand controller)가 개발되었다. 재래식 마스터 컨트롤러를 개량하여 JPL Universal Master[1], MEL Master[2] 및 Oak Ridge M2와 같은 힘반사 기능을 가진 직렬형 마스터 컨트롤러들이 개발되어 현장에서 사용되고 있다. 이러한 마스터 컨트롤러는 부피가 크고 바닥이나 벽에 고정하여야 하며, 대부분 특수한 기능을 갖는 슬레이브

로봇을 위하여 제작되어 범용성이 거의 없다. 최근에 범용으로 사용할 수 있고 이동이 가능한 소형 마스터 컨트롤러가 개발되었다. Cybernetic System사는 프로그램이 가능한 6자유도의 힘 반사형 조이스틱을 개발하였으며[3], Massie와 Salisbury는 가상환경의 힘 피드백 시스템을 위한 마스터 컨트롤러로 PHANTOM을 개발하여 상품화하였다[4].

직렬 구조에 비하여 구조의 강성이 크고 간결성(compactness)이 있는 병렬구조를 마스터 컨트롤러에 적용하려는 관심이 최근 크게 증가하고 있다. Inoue 등은 조이스틱용으로 병렬 매니플레이터를 제안하였으며[5], Siva et. al.은 공압 구동기를 사용하여 Stewart 형의 6자유도 마스터 컨트롤러를 제안하였다[6]. Milman et. al.은 brushless 모터를 사용한 Stewart 형의 4자유도 마스터 컨트롤러를 개발하였으며[7], Long과 Collins는 pantograph 링크 구조의 힘 반사형 6자유도 마스터 컨트롤러를 제안하였다[8].

본 연구에서는 기구의 범용성, 소형화 및 경량화를 기본 설계 개념으로 5각 관절 구조[9]의 힘 반사형 6자유도 마스터 컨트롤러를 제안하였으며, 기구학 해석과 작업공간 및 운동능력(manipulability) 등의 성능지수 분석을 통하여 기구의 특성을 파악하고 설계인자를 최적화하였다. 설계된 기구로 마스터 컨트롤러를 제작하고 로봇 시뮬레이터와 연결하여 가상 원격 조종 시스템을 구성하였으며, 실험을 통하여 제안된 기구의 마스터 컨트롤러로서의 구현 가능성을 확인하였다.

#### II. 기구학 해석

##### 1. 모델링 및 자유도 해석

5각관절 병렬구조는 그림 1과 같이 지지대인 하판

접수일자 : 1998. 8. 3., 수정완료 : 1999. 2. 22.

진병대, 우기영 : 국방과학연구소

권동수 : 한국과학기술원 기계공학과

※ 본 연구는 보건복지부 보건의료기술 연구개발 사업(HMP-96-E-1015) 지원에 의해 이루어진 연구결과입니다.

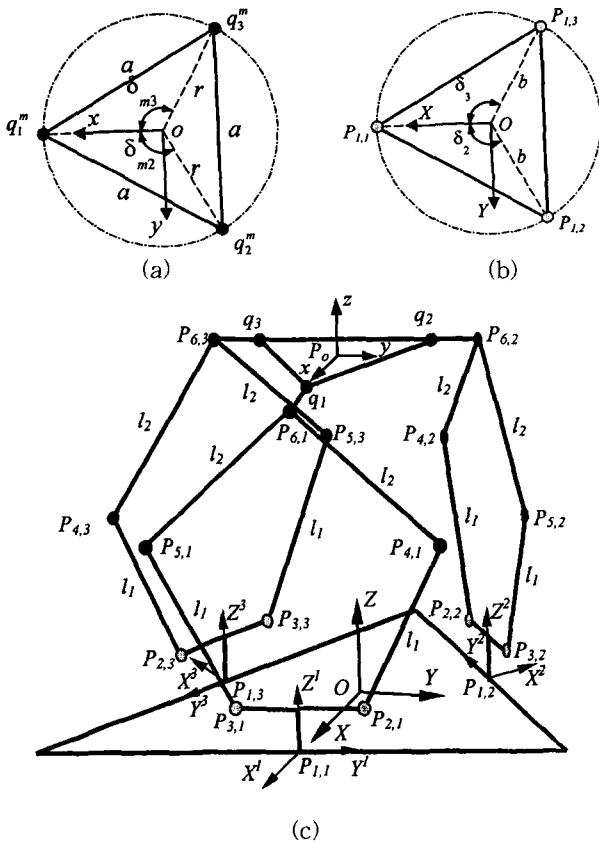


그림 1. 5각관절 병렬 기구.

Fig. 1. Fivebar parallel mechanism. (a) upper platform (b) lower platform (c) fivebar parallel mechanism.

(lower platform), 위치 및 자세를 나타내는 상판(upper platform)과 상판과 하판을 연결하는 3개의 5각관절(Fivebar)로 구성되어 있으며, 각 5각관절은 상판과 구형관절(spherical joint)로 하판과는 회전관절(revolute joint)로 연결되어 있다. 5각관절 병렬구조의 기구학 해석을 위한 좌표계의 설정은 먼저 하판의 중심에 고정된 좌표계를  $C_{XYZ}$ , 상판에 고정된 이동 좌표계를  $C_{xyz}$ , 그리고 5각관절과 하판을 연결하는 회전관절을 중심으로 하판에 고정된 좌표계를  $C_{XYZ}^i (i=1,2,3)$ , 5각관절에 고정된 이동 좌표계를  $C_{xyz}^i$  로 각각 표기하도록 한다.

그림 1에 표시한 각 관절의 위치는  $C_{XYZ}$ 에 대하여 기술한 것으로  $P_o$ 는 상판의 중심점의 위치,  $q_i (i=1,2,3)$ 는 상판에 설치된 구형관절의 위치, 그리고  $P_{n,i} (n=1, \dots, 6)$ 는 5각관절의 회전관절의 위치를 나타낸다. 또한 상첨자  $m$ 은  $C_{xyz}$ 에 대한 위치, 상첨자  $i (i=1,2,3)$ 는  $C_{XYZ}^i$ 에 대한 위치, 상첨자  $mi (i=1,2,3)$ 는  $C_{xyz}^i$ 에 대한 위치를 나타낸다. 5각관절 병렬 기구의 2개의 하부 링크 각각의 길이는 각각  $l_1$ , 2개의 상부 링크의 각각의 길이는 각각  $l_2$ , 회전관절  $P_{2,i}$ 와  $P_{3,i}$  사이의 거리는  $2d$ , 회전관절  $P_{1,i}$ 와 회전관절  $P_{2,i}$ 와  $P_{3,i}$ 의 중심점까지의 거리는  $f$ , 회전관절  $P_{6,i}$ 와 구형관절  $q_i$  사이의 거리는  $g$ 로 설정하였다. 5각관절 기구의 회전관절  $P_{2,i}$ 와  $P_{3,i}$ 에 구동기를

설치하였으며,  $C_{xyz}^i$ 의  $y^i$ 축과 2개의 하부 링크 각각 이루는 각도,  $\theta_{2,i}, \theta_{3,i}$ 를 능동변수로 설정하였다.

Gruebler의 자유도(mobility) 계산식 (1)을 사용하여 5각관절 병렬구조의 자유도를 계산하여 보면 구동 입력이 능동적인 경우 6자유도의 움직임을 가지며, 구동 입력이 모두 고정 되었을 경우 자유도가 0이 되어 하나의 강체가 되는 것을 알 수 있다. 이로부터 제안된 기구는 원하는 자유도를 갖는 것을 확인할 수 있다[10].

$$M = D(N - G - 1) + \sum_{j=1}^G F_j \quad (1)$$

여기서  $M$  : 기구계의 자유도

$D$  : 나사기구(screw system)의 차수

(평면운동 : 3, 공간운동 : 6)

$N$  : 상,하판을 포함한 링크의 수

$G$  : 조인트의 수

$F_j$  :  $j$ 번째 조인트의 자유도

2. 역기구학 해석

역기구학 해석은 주어진 상판의 위치와 자세에 해당하는 능동변수  $\theta_{2,i}, \theta_{3,i}$ 의 각도를 구하는 문제로서, 5각관절 병렬구조의 상판의 위치와 자세가  $C_{XYZ}$ 좌표계에 대한  $C_{xyz}$ 좌표계의 원점  $P_o$ 와  $R$ 로 주어지면  $P_o$ 와  $R$ 은 각각 다음과 같다.

$$P_o = [P_{ox} \ P_{oy} \ P_{oz}]^T \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} CaC\beta & CaS\beta S\gamma - SaC\gamma & CaS\beta C\gamma + SaS\gamma \\ SaC\beta & SaS\beta S\gamma + CaC\gamma & SaS\beta C\gamma - CaS\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 Fixed X-Y-Z표기법을 사용하여 표시하였으며,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 각각  $C_{XYZ}$ 좌표계에 대한  $C_{xyz}$ 좌표계의  $z, y$  및  $x$ 축의 방향코사인 값을 나타내고  $C$ 는  $\cos$ ,  $S$ 는  $\sin$ 을 의미한다. 따라서, 상판 구형관절들의 위치가  $C_{XYZ}$ 좌표계와  $C_{xyz}$ 좌표계에서 표현된 값을 각각  $q_i$ 와  $q_i^m (i=1,2,3)$ 라 하면  $q_i$ 와  $q_i^m$ 는 다음과 같다.

$$q_i = Rq_i^m + P_o \quad (4)$$

$$q_i^m = [\gamma \cdot \cos \delta_{mi} \ \gamma \cdot \sin \delta_{mi} \ 0]^T \quad (5)$$

여기서,  $\delta_{mi} (\delta_{m1} = 0^\circ, \delta_{m2} = 120^\circ, \delta_{m3} = -120^\circ)$ 는 그림 1의 (a)에 나타낸 것과 같다. 또한, 좌표계에 대한 구형 조인트의 위치  $q_i$ 는 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = Rot(z, \delta_i) Trans(b, 0, 0) Rot(y, \theta_{1,i}) Trans(0, d, f) Rot(x, \theta_{2,i}) Trans(0, l_1, 0) Rot(x, \theta_{6,i}) Trans(-g, l_2, 0) \quad (6)$$

여기서,  $\delta_i (\delta_1 = 0^\circ, \delta_2 = 120^\circ, \delta_3 = -120^\circ)$ 는 그림 1(b)에 나타낸 것과 같으며,  $b$ 는 좌표계의 원점  $O$ 로부터 회전관절  $P_{1,i}$ 까지의 거리이고  $\theta_{6,i} = \theta_{4,i} - \theta_{2,i}$ 이다. (6)에서 우변의 첫번째 두개 항을 좌변으로 넘겨 정리하면  $C_{XYZ}$ 좌표계에 대한  $q_i^i$ 는 (7)과 같다.

$$q_{x,i}^i = S_{1,i} (l_2 S_{2,i} C_{6,i} + l_2 C_{2,i} S_{6,i} + l_1 S_{2,i} + f) - g C_{1,i}$$

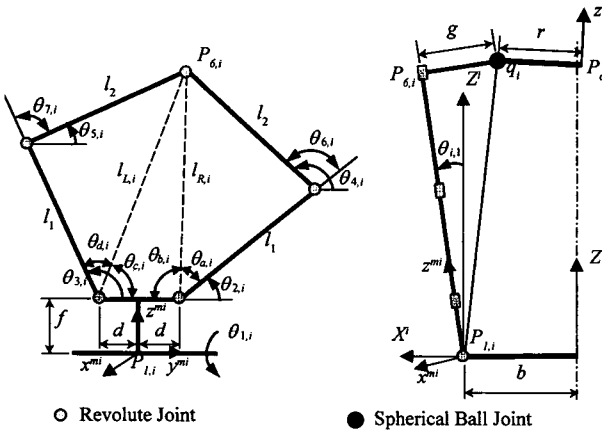


그림 2. 5각관절 링크 구조.  
Fig. 2. Fivebar linkage.

$$\begin{aligned} q_{y,i}^i &= l_{2,i} C_{2,i} C_{6,i} - l_{2,i} S_{2,i} S_{6,i} + l_{1,i} C_{2,i} + d \\ q_{z,i}^i &= C_{1,i} (l_{2,i} S_{2,i} C_{6,i} + l_{2,i} S_{2,i} S_{6,i} + l_{1,i} S_{2,i} + f) + g S_{1,i} \end{aligned} \quad (7)$$

(7)로부터  $\theta_{1,i}$ 를 구하면 (8)과 같다.

$$\theta_{1,i} = \tan^{-1}(q_{x,i}^i / q_{z,i}^i) \quad (8)$$

그림 2에서 구형 조인트,  $q_i$ 와 각 능동 조인트,  $P_{2,i}$ 와  $P_{3,i}$  사이의 거리는 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} l_{R,i} &= \|q_i - P_{2,i}\| \\ l_{L,i} &= \|q_i - P_{3,i}\| \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $P_{2,i}$ 와  $P_{3,i}$ 는 각각  $C_{XYZ}$  좌표계에 대한 능동 조인트의 위치이며,  $\theta_{1,i}$ 를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{2,i} &= Rot(z, \delta_i) Trans(b, 0, 0) Rot(y, \theta_{1,i}) Trans(0, d, f) \\ P_{3,i} &= Rot(z, \delta_i) Trans(b, 0, 0) Rot(y, \theta_{1,i}) Trans(0, -d, f) \end{aligned} \quad (10)$$

코사인(cosine) 정리를 적용하여  $\theta_{a,i}$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$\theta_{a,i} = \arccos((l_{R,i}^2 + l_1^2 - l_2^2) / (2l_{R,i}l_1)) \quad (11)$$

$\theta_{b,i}$ ,  $\theta_{c,i}$ ,  $\theta_{d,i}$ 도 같은 방식으로 구할 수 있으며, 이 값들을 사용하여  $\theta_{2,i}$ ,  $\theta_{3,i}$ 를 표현하면 (15)와 같다

$$\begin{aligned} \theta_{2,i} &= \pi - (\theta_{a,i} + \theta_{b,i}) \\ \theta_{3,i} &= \theta_{c,i} + \theta_{d,i} \end{aligned} \quad (12)$$

이와 같이 병렬 구조의 역 기구학의 해는 직렬 구조와는 반대로 Closed 형태로 유일하게 표현됨을 알 수 있다.

3. 정기구학 해석

정기구학은 각 능동 변수  $\theta_{2,i}$ ,  $\theta_{3,i}$ 에 대한 매니퓰레이터의 말단 장치의 위치  $P_o$ 와 자세  $R$ 의 관계를 나타내는 것으로 다음과 같이 해석할 수 있다. 그림 2로부터 5각관절의 왼쪽 체인과 오른쪽 체인이 한 점  $S_{6,i}$ 에서 만나는 기구학적 특성으로부터 (13)를 유도할 수 있다.

$$d + l_1 C_{2,i} + l_2 C_{4,i} = -d + l_1 C_{3,i} + l_2 C_{5,i} \quad (13)$$

$$l_1 C_{2,i} + l_2 C_{4,i} = l_1 S_{3,i} + l_2 S_{5,i}$$

(13)을  $\theta_{4,i}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_{4,i} = \tan^{-1}(A/B) + \cos^{-1}(\sqrt{A^2 + B^2}/2) \quad (14)$$

여기서  $A = S_{4,i} - S_{5,i} = l_1/l_2(S_{3,i} - S_{2,i})$

$$B = C_{4,i} - C_{5,i} = l_1/l_2(-2dl_2 + C_{3,i} - C_{2,i})$$

(14)를 (6)에 대입하고, 각 구형 조인트 사이의 거리가  $a$ 로 일정하다는 (15)의 구속 조건으로부터  $\theta_{1,i}$ 에 관한 3개의 비선형 방정식을 유도할 수 있으며, 유도된 수식으로부터 수치 해석적 방법을 사용하여  $\theta_{1,i}$ 를 구한다.

$$a = \|q_1 - q_2\| = \|q_2 - q_3\| = \|q_3 - q_1\| \quad (15)$$

수치해석적 방법은 Newton-Rapson방법을 사용하였으며, 구해진  $\theta_{1,i}$ 를 (6)에 대입하여 각 구형조인트의  $C_{XYZ}$  좌표계에 대한 위치  $q_i$ 를 구한다.  $C_{XYZ}$  좌표계에 대한  $C_{xyz}$  좌표계의 원점  $P_o$ 는 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_o = (q_1 + q_2 + q_3)/3 \quad (16)$$

(4)와 (16)으로부터  $C_{XYZ}$  좌표계에 대한  $C_{xyz}$  좌표계의 회전행렬  $R$ 은 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = [q_1 - P_o, q_2 - P_o, q_3 - P_o] [q_1^m, q_2^m, q_3^m]^{-1} \quad (17)$$

이상과 같이 정기구학의 해는 closed형태의 유일해가 존재하지 않기 때문에 수치해석적 방법을 사용하여 정기구학을 해석하여야 한다. 그러나, 이와 같은 수치 해석 방법을 사용할 경우 초기값 선정 문제와 해의 수렴성 보장 문제가 수반되므로 수치해석 방법이 수렴하기 위해서는 기구의 실제 작업 공간보다 작은 영역을 작업 공간으로 정해야 하는 문제점이 발생한다.

대부분의 병렬형 구조에서는 정 기구학 해를 유일하게 구할 수 없으며 상,하판의 기하학적 구조와 기구의 형상에 따라 4개 이상의 다중 해가 존재하는 것이 일반적이다. 병렬형 구조의 정 기구학 해는 특수한 형상을 제외하고는 해석해(closed form solution)으로 표현되지 않고, 하나의 변수를 갖는 고차의 다항식의 해로 나타나므로 이를 실시간 제어에 적용하기는 어렵다[11]. 본 연구에서의 5각 관절 구조는 해석 결과 16개의 정기구학 해가 존재하며, 그림 3에 그 중 8가지 형상을 나타내었다.

실제 시스템에 적용 시 정 기구학 해의 다중성으로 인한 해 선택의 문제를 피하고 고차의 비선형 방정식으로 인한 계산 부하를 줄임으로써 실시간 제어를 가능하도록 5각 관절과 하판의 연결부위인 3개의 편 조인트에 여분의 위치 센서를 편 조인트 축과 동일 직선상에 추가적으로 설치하여 위와 같은 문제를 해결하였다.

4. 자코비안

$C_{XYZ}$ 좌표계에 대한  $C_{xyz}$  좌표계의 회전속도는  $C_{xyz}$  좌표계의 각속도  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 와  $C_{xyz}$  좌표계의 방향코사인의 시간 변화를  $\dot{\phi} = [\dot{\gamma}, \dot{\beta}, \dot{\alpha}]^T$ 로 표현이 가능

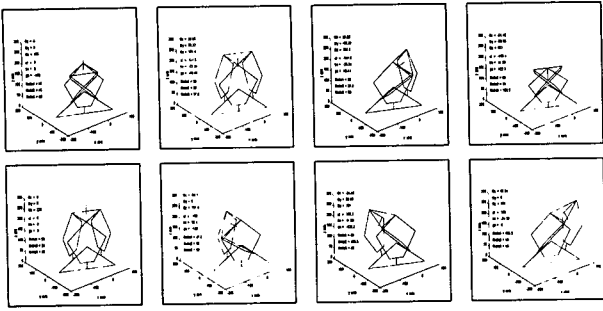


그림 3. 정기구학 해의 다중성.  
Fig. 3. Eight over-the-base-assembly modes.

하며, 두 회전속도 사이의 관계는 다음과 같다[16].

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \alpha \bar{Z} + \beta R_z(\alpha) \bar{Y} + \gamma R_z(\alpha) R_y(\beta) \bar{X} \quad (18)$$

$$= \begin{bmatrix} CaC\beta & -Sa & 0 \\ SaC\beta & Ca & 0 \\ -S\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

그러므로, 말단장치의 속도  $u$ 는 (19)와 같이 두 가지로 표현이 가능하며, 능동 조인트 각속도를  $\theta$ 와의 관계는 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} u_w &= [\dot{P}_{\alpha} \dot{P}_{\beta} \dot{P}_{\gamma} \omega_x \omega_y \omega_z]^T \\ u_{\theta} &= [\dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{\gamma}]^T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\dot{\theta} = J_p u = J_{p\omega} u_w = J_{p\theta} u_{\theta} \quad (20)$$

$$J_{p\theta} = J_{p\omega} T_r = J_{\omega} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} CaC\beta & -Sa & 0 \\ SaC\beta & Ca & 0 \\ -S\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

말단 장치에 작용하는 힘/모멘트  $F_{ee}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{ee} = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T \quad (21)$$

힘/모멘트  $F_{ee}$ 와 능동 조인트에서의 토크  $\tau_{act}$ 의 관계는 (22)와 같다.

$$F_{ee} = J_{p\omega}^T \tau_{act} \quad (22)$$

매니플레이터의 말단 장치의 속도  $u$ 와 능동 조인트 각속도,  $\theta$ 과의 관계를 나타내는 순간속도 해석은 병렬 구조의 경우 역기구학 해가 closed 형태로 유일하게 존재하기 때문에 역기구학 관계식을 통하여 해석하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나, 마스터 컨트롤러와 같이 힘 제어를 하는 경우 말단장치에서의 힘/모멘트로부터 구동 조인트 토크를 구하기 위하여 자코비안을 사용하므로 힘/모멘트 관계 해석에서 불필요한 속도관계의 식의 계산으로 인한 계산하중을 줄이고, 속도관계에 의해 유도된 자코비안보다 유도과정이 간단한 능동 조인트에서의 토크  $\tau_{act}$ 와 말단 장치에 작용하는 힘/모멘트  $F_{ee}$ 와의 관계로부터 자코비안을 해석하였다[13].

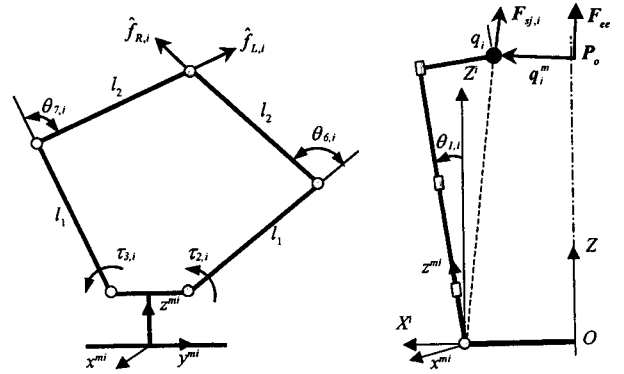


그림 4. 5각 관절 기구에 작용하는 힘과 토크 성분.

Fig. 4. Force and torque components on fivebar.

능동 조인트에서의 토크,  $\tau_{act}$ 와 말단 장치에 작용하는 힘/모멘트,  $F_{ee}$ 는 구형 조인트에 작용하는 힘  $F_{sj}$ 와의 상호 관계에 의해 (23)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{ee} = J_{sj}^{ee} F_{sj} \quad (23)$$

$$F_{sj} = J_{act}^{sj} \tau_{act}$$

구형관절에는 모멘트가 작용하지 않으므로 능동 조인트에서의 토크  $\tau_{2,i}$ 와  $\tau_{3,i}$ 에 의해 구형관절  $q_i$ 에 작용하는 힘을  $C_{XYZ}^i$ 에 대하여 표현하면 (24)와 같다.

$$\hat{F}_{sj,i} = \begin{bmatrix} \hat{f}_{sjx,i} \\ \hat{f}_{sjy,i} \\ \hat{f}_{sjz,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_z}{g} \frac{\sin \theta_4}{l_1 \sin \theta_6} & \frac{L_z}{g} \frac{\sin \theta_5}{l_1 \sin \theta_7} \\ \frac{\cos \theta_4}{l_1 \sin \theta_6} & -\frac{\cos \theta_5}{l_1 \sin \theta_7} \\ \frac{\sin \theta_4}{l_1 \sin \theta_6} & -\frac{\sin \theta_5}{l_1 \sin \theta_7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{2,i} \\ \tau_{3,i} \end{bmatrix} \quad (24)$$

(24)에서  $L_z$ 는 (25)와 같으며,  $\hat{F}_{sj,i}$ 를  $C_{XYZ}$ 에 대해서 표현한  $F_{sj,i}$ 는 (26)과 같다.

$$L_z = q_{x,i}^2 + q_{z,i}^2 - g^2 \quad (25)$$

$$F_{sj,i} = Rot(z, \delta_i) Rot(y, \theta_{1,i}) \hat{F}_{sj,i} = J_{act}^{sj,i} \begin{bmatrix} \tau_{2,i} \\ \tau_{3,i} \end{bmatrix} \quad (26)$$

(26)를 정리하면 (27)과 같다.

$$F_{sj} = \begin{bmatrix} F_{sj,1} \\ F_{sj,2} \\ F_{sj,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{act}^{sj,1} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} & J_{act}^{sj,2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & J_{act}^{sj,3} \end{bmatrix} \tau_{act} = J_{act}^{sj} \tau_{act} \quad (27)$$

$i$ 번째 구형 조인트에 작용하는 힘  $F_{sj,i}$ 와 말단 장치에 작용하는 힘  $F_{ee,i}$ 의 관계는 (28)과 같다.

$$F_{ee,i} = \begin{bmatrix} F_{sj,i} \\ q_i^0 \times F_{sj,i} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$q_i^0 = q_i - P_0 = Rq_i^m \quad (29)$$

(28)과 (29)에서  $q_i^0 = [q_{x,i}^0 \ q_{y,i}^0 \ q_{z,i}^0]^T$  인 경우  $[q_i^0 \times]$  는 skew symmetric matrix의 정의를 사용하여 (30)과 같이 표현된다.

$$[q_i^o \times] = \begin{bmatrix} 0 & -q_{z,i}^o & q_{y,i}^o \\ q_{z,i}^o & 0 & -q_{x,i}^o \\ -q_{y,i}^o & q_{x,i}^o & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

(29)를 (28)에 대입하여 정리하면 (31)과 같다.

$$\begin{aligned} F_{ee} &= \begin{bmatrix} \sum_i F_{sj,i} \\ \sum_i q_i^m \times F_{sj,i} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ [q_1^m \times] & [q_1^m \times] & [q_1^m \times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{sj,1} \\ F_{sj,2} \\ F_{sj,3} \end{bmatrix} \\ &= J_{sj}^{ee} F_{sj} \end{aligned} \quad (31)$$

(27)과 (31)으로부터 말단 장치에 가해지는 힘,  $F_{ee}$  과 구동기의 토오크,  $\tau_{act}$ 의 관계는 (32)와 같이 정리되어 진다.

$$F_{ee} = J_{sj}^{ee} J_{act}^{sj} \tau_{act} = J_{pw}^T \tau_{act} \quad (32)$$

### III. 기구 특성 분석

#### 1. 작업 공간 비교

마스터 콘트롤러의 작업 공간은 종속 매니플레이터의 작업 공간과 성능에 영향을 주기 때문에 설계 시 고려하여야 할 중요한 기구 특성값이다. 병렬 구조는 기구의 구조가 복잡하고 정기구학 해가 유일하게 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 역기구학을 이용하여 작업공간을 해석하였다[14]. 본 연구에서 제시한 5각관절 구조 외에 그림 5에 있는 병렬 기구의 대표적 모델인 Stewart platform과 3PRPS(P : Prismatic, R : Revolute, S : Spherical)와 pantograph 병렬기구를 비교 대상 기구로 선정하였다[8][9][15][16].

그림 5의 기구들은 자기 구동 방식이 다르고 상,하판의 크기의 비와 기구 구성 요소의 변화에 따라 작업공간의 크기가 변화하기 때문에 다음과 같은 기준을 가지고 작업 공간을 비교, 분석 하였다.

- 작업 공간의 Z축으로의 최대 값을 동일하게 설정한다.
- 각 기구의 상판과 하판의 크기는 같으며, 상판과 하판의 비율은 0.5로 한다.

상판의 자세가 하판과 평행으로 고정인 상태에서 그림 6과 같이 각 기구가 도달할 수 있는 작업 공간을 구하였다.

그림 6에서 5각관절 구조의 작업 공간이 Stewart platform과 3PRPS보다는 훨씬 크며, 높이에 따른 작업공간의 변화가 완만하므로 마스터 콘트롤러에 적용될 경우 다른 기구 구조보다 마스터 콘트롤러의 움직임이 유리할 것으로 예측된다. Pantograph의 작업 공간은 5각 관절 구조보다는 약간 큰 특성을 보이지만 구동기가 한 점에 위치해야 하므로 제작상의 어려움이 따른다. 5각관절 기구는 부분적으로 직렬형 기구인 서브 체인을 사용하고 있으므로 병렬 구조의 장점인 구조의 강성을 지니면서 직렬형 기구의 특징인 큰 작업 공간을 가지는 것을 알 수 있다.

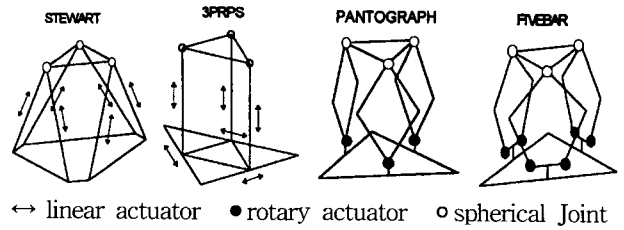


그림 5. 비교대상 기구 구조.  
Fig. 5. Compared mechanisms.

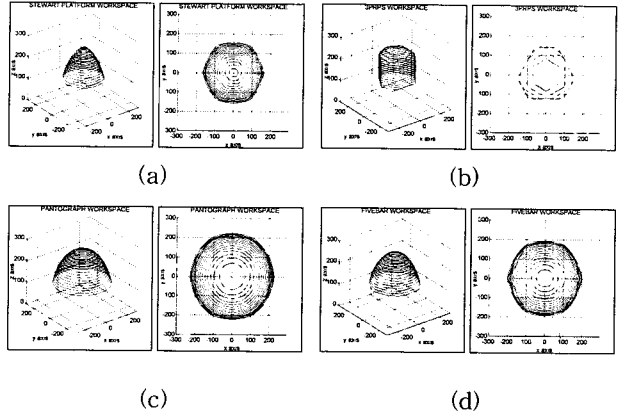


그림 6. 작업공간.  
Fig. 6. Workspace. (a) Stewart platform, (b) 3PRPS, (c) Pantograph, (d) Fivebar.

#### 2. 성능지수

기구학적인 관점에서 말단장치의 위치와 방향을 변화시킬 수 있는 매니플레이터(manipulator)의 능력을 정량적으로 측정하기 위하여 (33)로 정의되는 운동능력 지수 (manipulability measure),  $W_p$ 와 외력에 견딜 수 있는 능력을 정량적으로 측정하기 위하여 (34)으로 정의되는 저항능력 지수(resistivity measure),  $W_R$ 가 연구 제안되었다[17].

$$W_p = | \det J_p(u) |^{-1} \quad (33)$$

$$W_R = \frac{1}{| \det J_p(u) |} \quad (34)$$

마스터 콘트롤러는 어떠한 자세를 이루고 있더라도 원격 로봇으로부터 전달되는 힘 명령을 조작자에게 정확하게 전달하여야 하며, 조작자가 가하는 힘을 포함한 외부의 힘에 대하여 자체의 형상을 유지하여야 하므로 운동능력(manipulability)과 저항능력(resistivity)이 어느 한쪽으로 치우치지 않아야 한다.

그림 7은 x축과 y축의 위치를 0mm, z축의 위치를 220mm, roll각과 pitch각을 0deg로 고정시키고, yaw각을 -0.1deg에서 +0.1deg로 회전하는 경우에 대하여 각 기구의 운동능력 지수를 정규화(normalized)하여 나타낸 것이다. 그림 7에서 3PRPS는 상,하판이 평행으로 정위치(nominal point)에 있을 경우 특이형상이 발생하여 운동능력(manipulability)이 무한대가 됨을 알 수 있다. 이러한 특이형상을 방지하기 위해서는 구조상으로

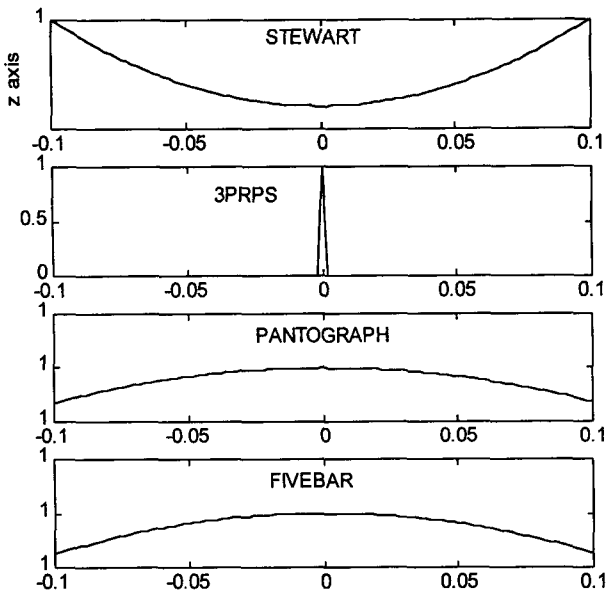


그림 7. 정규화된 운동능력 지수.  
Fig. 7. Normalized manipulability measure.

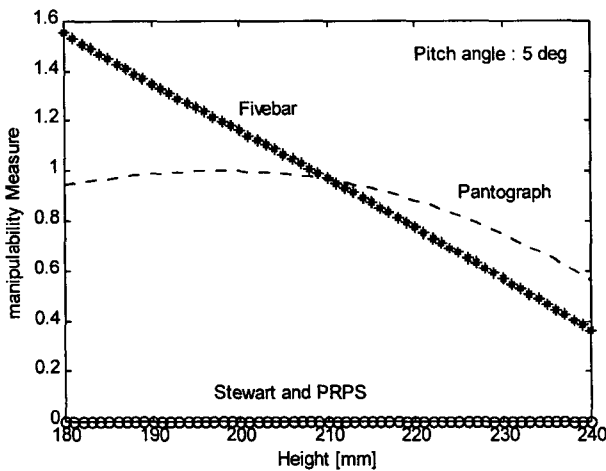


그림 8. 저항능력 지수의 크기.  
Fig. 8. Magnitude of the resistivity measure.

상,하판이 평행이 되지 않도록 설계되어야 하지만 이러한 경우 작업공간의 왜곡이 발생하는 문제점을 가진다. 그러나 5각관절 구조의 경우 이러한 기구의 특이형상이 없으므로 제어 시 유리함을 알 수 있다.

그림 8은 Stewart platform과 3PRPS에서 특이 형상이 발생하지 않도록 pitch각만을 5deg로 고정하고, z축의 높이를 180mm에서 240mm까지 변화시키면서 저항능력 지수의 상대적 크기 변화를 계산한 결과이다. 그림 8을 보면 Stewart platform과 3PRPS의 경우 저항능력 지수가 phantograph나 5각관절 병렬구조보다 작은 값을 가지므로 마스터 컨트롤러로서 사용이 불리한 것을 알 수 있다. 5각관절 병렬구조의 경우 저항능력 지수가 높이에 따라 완만히 감소하므로 마스터 컨트롤러로서의 기구적 특성이 Stewart platform과 3PRPS에 비하여 우수한 것을 알 수 있다.

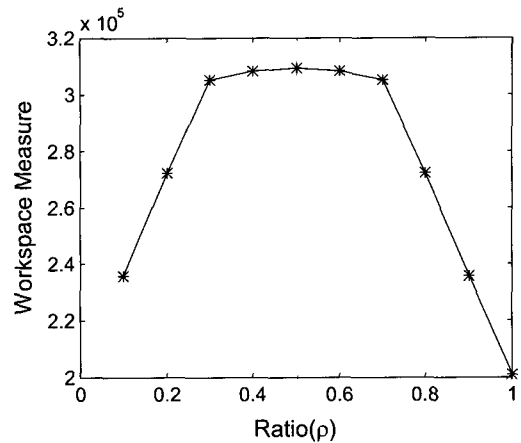


그림 9. 마스터 컨트롤러의 작업공간 지수.  
Fig. 9. Workspace measure of the master hand controller.

IV. 힘반사형 마스터 컨트롤러 설계

범용 마스터 컨트롤러의 구현을 위해 5각 관절 병렬 구조의 기구를 활용하였다. 마스터 컨트롤러의 기본적인 설계 개념을 기구의 소형화, 경량화, 이동성 및 힘반사 기능을 갖는 6자유도 범용 마스터 컨트롤러 구현에 두었다. 기구부 링크의 길이와 상,하판의 치수 등의 설계인자의 최적화는 작업공간과 운동능력(manipulability)을 기준으로 선정하였다. 설계인자 중 작업공간의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 링크의 길이는 시뮬레이션을 통하여 요구되는 작업공간과 위치와 자세를 나타낼 수 있는 범위 내에서 최적값을 선정하였다. 하판의 크기는 선정된 링크의 길이에 대하여 각 5각 관절의 간섭이 일어나지 않는 범위 내에서 최소값을 선정하였으며, 상,하판의 크기의 비에 대한 작업공간의 크기와 운동능력 지수의 경향을 분석하여 상판 크기를 선정하였다.

그림 9는 z축의 높이가 고정된 경우의 상,하판의 크기 비에 대한 작업공간의 변화를 나타낸 것으로 수직축의 값은 작업공간에서 x와 y방향의 최대 작업공간의 길이를 곱한 값이다. 상,하판의 비가 0.5일 경우 가장 큰 작업 공간을 가지는 것을 알 수 있으며, 그림 10에 나타난 것과 같이 작업공간이 가장 원의 형태에 근접하므로 방향에 따른 작업공간의 변화가 적어 마스터 컨트롤러로서의 사용에 유리함을 알 수 있다.

그림 11은 각 링크의 길이가 120mm, Z축 높이가 240mm인 경우의 상,하판 크기의 비에 따른 운동지수(manipulability)와 저항지수(resistivity)를 나타낸 것으로 마스터 컨트롤러는 운동지수와 저항지수가 상호 보완적이어야 한다. 그림 11로부터 상,하판 비가 0.5인 경우 성능지수와 저항지수가 어느 한 쪽으로 크게 치우치지 않고 적절한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 12는 제작된 힘반사 기능을 갖는 범용 6자유도 마스터 컨트롤러의 사진이다. 마스터 컨트롤러는 6개의 구동기, 9개의 엔코더, 상판과 하판 그리고 상판과 하판을 연결하는 3개의 5각 관절로 구성되어 있다. 구동기는 현존하는 전기 모터들의 불충분한 출력토크 대 중량비를

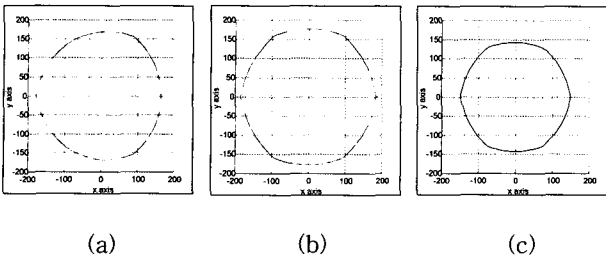


그림 10. 작업공간의 단면적.  
Fig. 10. The sectional area of the workspace. (a)  $\rho = 0.2$ , (b)  $\rho = 0.5$  (c)  $\rho = 0.7$

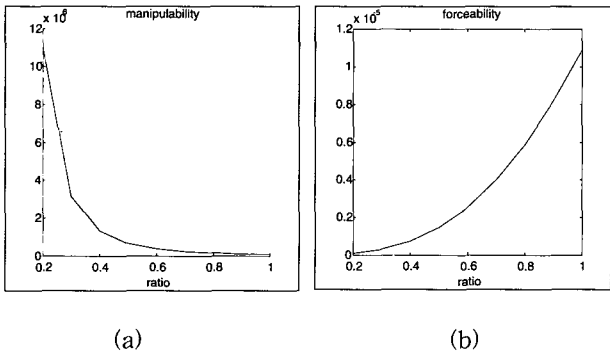


그림 11. 마스터 컨트롤러의 운동능력과 저항능력.  
Fig. 11. Manipulability and resistivity measure of the master hand controller. (a) manipulability measure, (b) resistivity measure.

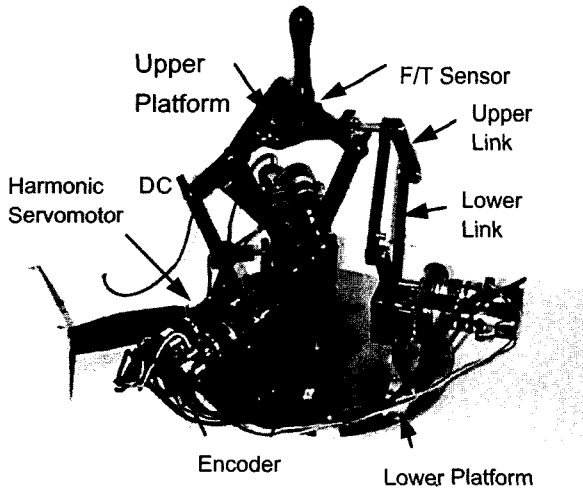


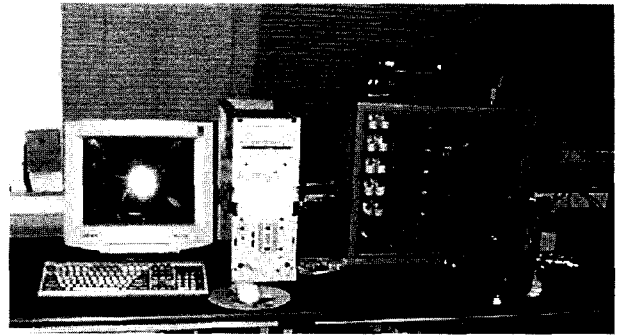
그림 12. 마스터 컨트롤러의 사진.  
Fig. 12. Photograph of the master hand controller.

고려하여 50:1의 기어비를 갖는 harmonic DC 서보모터를 사용하였으며, 정기구학 해의 실시간 획득이 가능하도록 3개의 여분의 위치센서를 설치하였다.

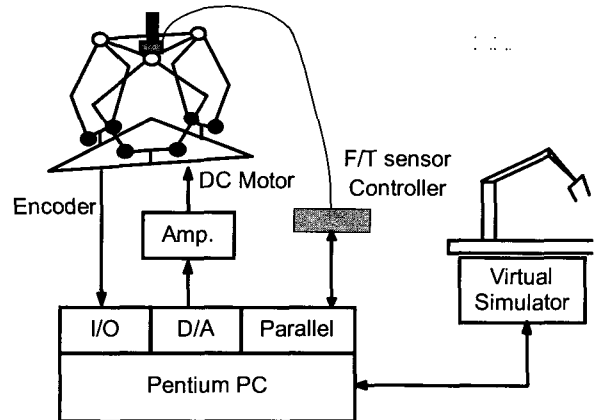
V. 실험 및 고찰

1. 실험 장치

제안된 5각관절 병렬구조를 갖는 마스터 컨트롤러의



(a)



(b)

그림 13. 실험장치 구성

Fig. 13. Hardware configuration, (a) photograph of the experimental apparatus, (b) architecture of the teleoperation system.

구현 가능성을 입증하기 위하여 그림 13과 같이 마스터-슬레이브(master-slave) 시스템을 구성하였다. 마스터암(master arm)으로는 제작된 6자유도 힘반사형 마스터 컨트롤러를 사용하였고, 슬레이브암(slave arm, 이하 종속암)은 가상환경의 시뮬레이터를 사용하였다. 실험 데이터 저장과 마스터 컨트롤러의 제어기로 Pentium PC를 사용하였다. 6개의 능동 조인트의 각도는 200000pulse/rev의 분해능인 엔코더, 3개의 여분의 수동 조인트 각도는 4000pulse/rev의 분해능인 엔코더를 사용하여 측정하였다. 마스터 컨트롤러에 작용하는 힘의 측정은 ATI사의 type MINI F/T 센서를 사용하였으며, 병렬포트를 통하여 제어기와 통신한다. 제어에 사용된 sampling time은 4msec이다.

2. 제어기 및 가상환경

마스터 컨트롤러의 구현 가능성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 일반적인 힘반사 제어에서는 작업자에 의해 마스터 컨트롤러에 작용하는 힘을 측정하는 사용하지 않고 open-loop로 힘 제어를 한다. 그러나, 실제 시스템에서는 컨트롤러의 중력, 마찰과 관성의 변화로 인한 영향이 있으므로 이를 보상하기 위하여 (35)의 제어법칙을 사용하였고, (36)을 사용하여 구동 토크 입력으로 변환하였다.

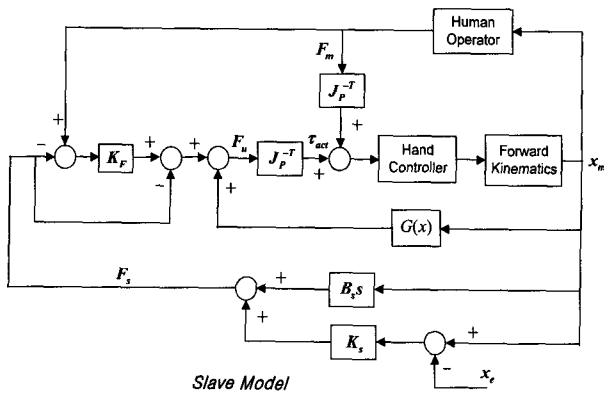


그림 14. 마스터 컨트롤러 제어 블록도.  
Fig. 14. Control block diagram of master controller.

$$F_u = F_s + K_F (F_m - F_s) + G(x) \quad (35)$$

$$\tau_{act} = J_p^{-T} F_u \quad (36)$$

(35)와 (36)에서  $F_u$ 는 직교 좌표계에서의 제어기 출력,  $\tau_{act}$ 는 조인트 토크,  $F_s$ 는 슬레이브로부터의 기준 입력,  $K_F$ 는 제어기 게인이고,  $G(x)$ 는 중력 보상기이다. 종속암의 가상환경은 Pentium PC에서 (37)과 같이 종속암의 모델은 고려하지 않고 가상환경의 임피던스(impedance)만을 갖도록 모델링하였다.

$$F_s = K_s (x_m - x_e) + B_s \dot{x} \quad (37)$$

(37)에서  $K_s$ 는 가상환경의 강성도(stiffness),  $B_s$ 는 감쇄(damping)계수이고,  $x_e$ 는 가상환경의 벽의 위치이다. 종속암이 자유공간에서 움직일 경우( $K_s = 0, B_s = 0$ ) 마스터 컨트롤러로 반사되는 힘이 없고, 가상의 벽과 접촉하면 접촉력이 발생하여 마스터 컨트롤러의 입력으로 작용하도록 2차원 시뮬레이션 모델로 구성하였다. 그림 14는 전체 시스템 블록도를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 실험의 간략화를 위해  $B_s$ 는 고려하지 않았다.

3. 실험 결과 및 토의

실험은 마스터 컨트롤러를 자유롭게 움직이면서 종속암이 가상의 벽과 접촉 시 마스터 컨트롤러에 힘이 반사되는지 살펴보았다. 그림 15(a)에 나타난 것과 같이 마스터 컨트롤러를 x축 방향으로 움직여서 종속암이 가상의 벽과 접촉할 경우 그림 15 (b)와 같은 작용력(reaction force)이 종속암으로부터 발생한다. 그림 16은 마스터 컨트롤러의 제어기로 중력보상기와 PD-제어기를 사용하여 실험한 결과이다. F/T센서로부터 측정된 힘은 그림 15 (b)에 나타난 종속암으로부터의 반사힘보다 ±10N정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 마스터 컨트롤러의 구동기가 높은 기어비를 갖는 harmonic DC 서보모터를 사용하여 발생하는 마찰에 의한 영향으로 판단된다. 추후 과제에 마스터 컨트롤러에 interaction control 등을 적용하여 마찰 등 외란으로 인한 영향을 최소화하고 정확한 힘반사 기능을 갖는 알고리즘을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

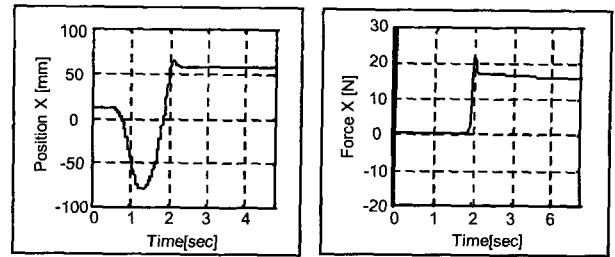


그림 15. 마스터 컨트롤러의 위치와 반사힘.  
Fig. 15. Position of master arm and reflected force. (a) position of master, (b) reflected force from slave.

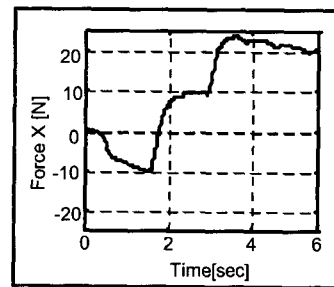


그림 16. 실험결과.  
Fig. 16. Experiment results.

VI. 결론

5각관절 기구(fivebar parallel mechanism)를 이용하여 소형이며 이동이 가능한 범용 6자유도 힘 반사 마스터 컨트롤러를 개발하였다. 기구의 기구학 해석을 통하여 정기구학 해석 시 발생하는 해의 수렴성과 계산 시간의 문제를 3개의 여분의 위치 센서를 추가 설치하여 해결하였으며, 구동 조인트의 토크와 말단장치의 힘 관계를 이용하여 순간속도를 해석하였다. 작업공간과 운동지수 등의 성능지수 분석을 통하여 제안된 기구가 마스터 컨트롤러로서의 기구적 특성이 우수함을 확인하였으며, 성능지수 분석을 통하여 최적의 기구를 설계 제작하였다. 제작된 기구는 실험을 통하여 마스터 컨트롤러로서의 구현 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] A. Bejczy and K. Salisbury, "Kinematic coupling between operator and remote manipulator," *Advanced in Computer Technology*, vol. 1, ASME, New York, pp. 197-211, 1980.
- [2] T. Kotoku, E. Husler, K. Tanie and A. Fujikawa, "The development of a direct drive master arm," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 2, no. 6, pp. 49-56, 1989.
- [3] Cybernet System Co., 1995, Company brochure, Ann Arbor, MI.
- [4] T. Massi and K. Salisbury, "The PHANToM haptic interface: a device for probing virtual objects," *ASME Winter Annual Meeting, DSC-*



vol. 55-1, pp. 295-300, 1994.

[5] H. Inoue et. al., "Parallel manipulator," *Proc. ISRR, Robotics Research* 3, 1985.

[6] K. V. Siva et. al., "Development of a general purpose hand controller for advanced teleoperation," *In Proc. of the Int. Symposium on Teleoperation and Control*, pp. 277-290, 1988.

[7] P. A. Millman and J. E. Colgate, "Design of a four-dof force-reflecting manipulandum with a specified force/torque workspace," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1488-1493, 1991.

[8] Gregory L. Long and Curtis L. Collins, "A pantograph linkage parallel platform master hand controller for force-reflection," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 390-395, May, 1992.

[9] N. Mimura and Y. Funahashi, "A new analytical system applying 6 DOF parallel link manipulator for evaluating motion sensation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 227-233, 1995.

[10] F. Behi, "Kinematic analysis for a six-degree-of freedom 3-PRPS parallel mechanism," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 5, October, 1988.

[11] R. Nair and J. H. Maddocks, "On the forward kinematics of parallel manipulator," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 2, pp. 171-188, April, 1994.

[12] T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics/ Analysis and Control*, The MIT press, 1990.

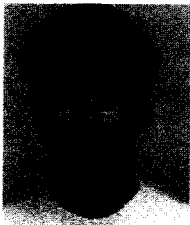
[13] K. Cleary and M. Uebel, "Jacobian formulation for a novel 6-DOF parallel manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2377-2382, 1994.

[14] C.-M. Luh, F. A. Adkins, E. J. Haug and C. C. Qiu, "Working capability analysis of stewart platforms," *Trans. ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 118, pp. 220-227, June, 1996.

[15] K. Liu, M. Fitzgerald and D. Dawson, "Modeling and control of a stewart platform manipulator," *Control of Systems*, DSC-Vol. 33, ASME, 1991.

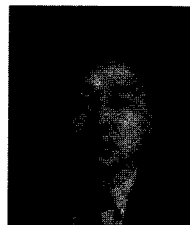
[16] E. F. Fichter, "A stewart platform-based manipulator : General theory and practical construction," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 45, no. 2, pp. 157-182, Summer, 1986.

[17] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *Int. J. Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.



**진 병 대**

1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 석사. 1997년-현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 원격 조정 로봇시스템 설계 및 응용 등.



**우 기 영**

1985년 한양대 기계공학과 졸업. 동 대학원 석사(1987). 1995년-현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정. 1987년-현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 원격 조정 로봇시스템, 유공압제어, 강인제어 등.



**권 동 수**

1980년 서울대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1991년 Georgia Institute of Technology 기계공학과 박사. 1991년-1995년 Oak Ridge National Laboratory research staff. 1995년-현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수. 관심분야는 원격 조정 로봇시스템, human-robot haptic interface, 의료용 로봇, 강인제어 등.