

사용자를 고려한 병렬형 6자유도 햅틱 핸드 컨트롤러의 설계

류동석* · 권태용* · 송재복**

Design of a User-Oriented 6-DOF Parallel Haptic Hand Controller

Dong-Seok Ryu, Tae-Yong Kwon and Jae-Bok Song

Key Words : Haptic hand controller(햅틱 핸드 컨트롤러), Five bar linkage(5절링크), Gimbal mechanism(짐벌 기구), Manipulability(조작성).

Abstract

A haptic hand controller 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. This paper presents a design method for KU-HHC, 6 DOF Korea University-haptic hand controller, which allows separation of workspace from linkage mechanism in consideration of the efficient user operation. First, the 3 DOF mechanism in which all the actuators are mounted on the fixed base is developed by combining a 5-bar linkage and gimbal mechanism. Then, the 6 DOF HHC is designed by connecting the two 3 DOF devices through a handle. This paper presents the forward and inverse kinematics for this device and Jacobian analysis. Improvement of the kinematic characteristics using performance index is also discussed. The hand controller KU-HHC based on this design concept and kinematic analysis was manufactured and shows excellent performance.

1. 서론

최근 로봇, 제어, 컴퓨터, 그래픽, 통신 분야의 비약적인 기술 발전과 함께, 이러한 기술들이 집약된 가상환경(virtual environment) 구축이 각광을 받고 있다. 특히, 로봇 및 제어 기술을 적용한 햅틱장치(haptic device)의 개발을 통해, 힘이나 촉감 등을 가상환경 속에서 사용자에게 제시하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 햅틱장치는 원격 진료, 원격 작업, 군사 훈련, 재활, 교육, 게임 등 다양한 분야에 활용 가능하며, 신체 적용 부위에 따라 시뮬레이터, 암 마스터, 핸드 컨트롤러, 핸드 마스터, 촉각 제시 장치 등으로 분류된다. 사용자의 손과 접촉하여 위치를 입력 받고 힘을 반영하는 핸드 컨트롤러는 적용할 수 있는 응용 사례가 많아서 햅틱 연구의 초기부터 활발한 연구가 진행되어 왔다. 햅틱장치의 설계에 있어서 중요하게

고려되어야 할 사항으로는, 적절한 작업 공간, 위치 입력과 힘 반영(force reflection)의 정확성, 넓은 범위의 임피던스 구현과 역구동성(back drivability)을 통한 투명성(transparency) 향상 등을 들 수 있다[1] [2] [3].

초기에는 자유도가 적고 구조가 간단한 직렬 구조의 핸드 컨트롤러가 많이 개발되었으나, 이는 강성이 작고, 관절의 오차가 누적되어 정확성이 저하되는 단점이 있다. 핸드 컨트롤러는 신체적으로 민감한 부위에 적용되는 만큼, 다른 햅틱장치와 비하여 정확성이 우수하여야 하기 때문에, 병렬 기구를 활용하는 연구가 진행되어 왔다. 병렬 구조의 경우, 부착 면적에 비해 작업 영역이 협소하지만, 정확도가 우수하며, 액추에이터를 베이스에 장착하여 관성을 줄이고 장치의 역구동성을 높일 수 있다. 병렬형 핸드 컨트롤러 중에서 3점에서 엔드 이펙터(장치의 특성상 이하 '핸들'이라 칭함)를 지지하는 구조는, 강성이 뛰어나고 정확도가 우수하지만, 순기구학의 해석이 어렵다. 수치적 방법을 사용할 경우 컴퓨터에 많은 부담을 주게

* 고려대학교 대학원

** 고려대학교 기계공학과

되어, 실시간 제어를 위해 추가적인 센서를 설치하기도 한다. 이제 핸드 컨트롤러는 단순히 가상 환경에 적용하기 위한 햅틱장치의 수준을 넘어서, 컴퓨터와 사용자를 연결하는 직관적인 차세대 인터페이스로서, 마우스와 키보드를 대체할 새로운 패러다임으로 떠오르고 있다. 이러한 사실을 감안할 때, 이제는 병렬형 핸드 컨트롤러의 설계에 있어서, 그 기능뿐만 아니라 사용자 인터페이스로서의 측면이 강조되어야 한다.

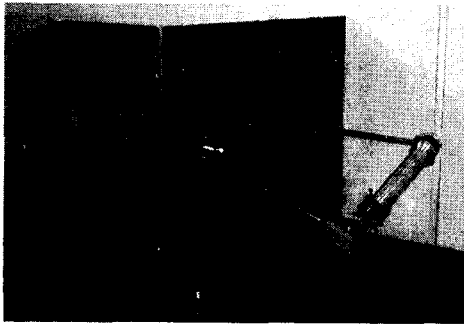


Fig. 1 Photo of KU-HHC.

본 논문은 Fig. 1과 같이, 병렬 기구의 장점을 최대한 활용하고, 복잡한 기구부를 베이스 뒤쪽으로 배치하여, 사용자가 작업 영역에서 원활하게 작업할 수 있도록 함으로써, 보다 친근한 인터페이스를 제공할 수 있도록 제작된, 2점 지지 방식의 새로운 6자유도 햅틱 핸드 컨트롤러인 KU-HHC(Korea University - Haptic Hand Controller)의 개발에 관한 것이다.

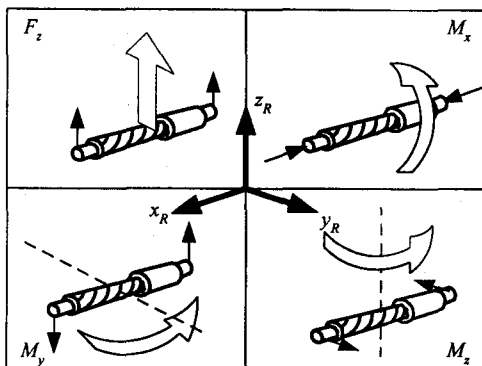


Fig. 2 Representation of 6-DOF motion by handle supported by 2 points.

2. KU-HHC의 구조

2.1 2점 지지 방식의 6자유도 구현

독립적으로 위치 3자유도의 입력 및 힘 반응이 가능한 햅틱장치 2개를 스크류/너트를 통해 핸들에 연결하면, 위치 및 방위 6자유도에 대해 입력 및 힘 반응이 가능해진다.

Fig. 2와 같이, 핸들의 양단에 연결된 독립적인 3자유도 햅틱장치를 통해 x, y, z 의 방향으로 힘을 가하게 되면, 각 방향의 위치 3자유도에 대한 힘을 제시할 수 있다. 또한, 핸들의 양단에 연결된 3자유도 햅틱장치를 x, y, z 의 서로 반대 방향으로 힘을 가하게 되면, 각 방향의 회전 3자유도에 대한 모멘트를 제시할 수 있다[4].

2.2 5절링크와 짐벌기구를 이용한 3자유도 기구부의 설계.

5절링크는 설계, 해석 및 제작의 편의, 역구동성의 우수함, 기구의 단순함 및 강성 등의 이점으로부터 인해 핸드 컨트롤러의 설계에 많이 사용된다.

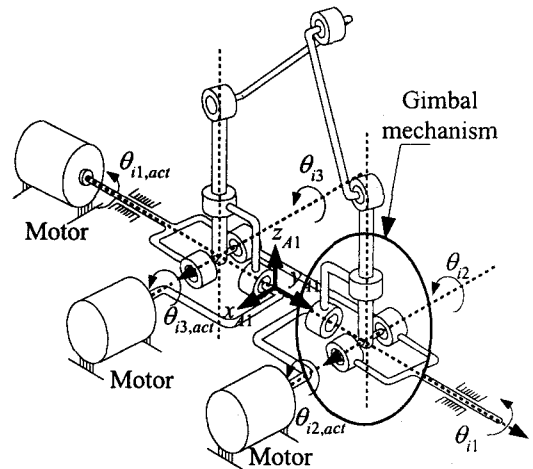


Fig. 3 Structure of 3DOF haptic device using 5-bar linkage and gimbal mechanism.

일반적으로 5절링크를 이용하여 3자유도의 기구를 만드는 경우에, 2자유도의 5절링크를 1자유도의 회전관절 위에 직렬로 연결하는 방법을 사용하게 된다. 그러나 이 경우 5절링크의 2자유도를 구현하기 위한 액추에이터가 5절링크의 회전에 따라 같이 움직이며, 장치의 관성을 증가시키고, 역구동성을 저하시키게 된다. 또한, 이러한 관성이 전체 5절링크를 회전시키기 위한 액추에이터에 부담을

주게 되어, 이 부분에 보다 큰 용량의 액추에이터를 사용하여야 하므로 비효율적이라 할 수 있다.

KU-HHC의 핸들 양단에 연결하는 독립적인 3자유도 햅틱장치를 5절링크와 짐벌기구를 이용하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. 제시된 기구부는 5절링크 하부의 회전관절을 짐벌기구로 설계하여 대체함으로써, 5절링크 전체를 회전시키는 회전관절의 축과 일치하게 된다. 결국, 일반적인 5절링크를 이용한 3자유도 장치와는 다르게 액추에이터를 베이스에 장착할 수 있다.

2.3 KU-HHC의 구조

KU-HHC은 독자적으로 개발한 5절링크 구조를 사용하여 장치의 역구동성을 향상시키도록 하였다.

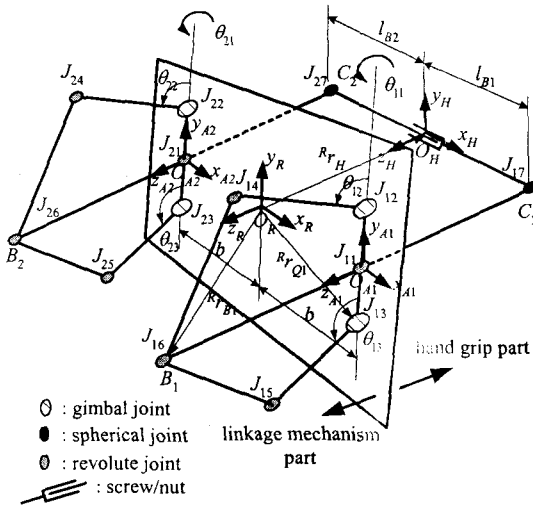


Fig. 4 Configuration of KU-HHC.

기구부와 핸들의 연결에 있어 2점 지지 방식을 취하였으며, Fig. 4에 나타난 구조에서 B_1 과 B_2 를 핸들에 직접 연결하여 6자유도 구동이 가능한 핸드 콘트롤러를 구성하였다. KU-HHC은 짐벌기구를 통해 능동관절들의 회전축을 일치시키고, 직선관절과 구형관절이 복합된 관절을 J_{i1} 에 설치하여, 링크를 통해 5절링크의 정점 B_i 의 위치를 베이스 반대편 C_i 에 투영시켜 핸들에 연결하였다. 이는 사용자를 고려하여, 복잡한 기구부를 베이스 뒤쪽에 배치하고, 간단한 링크구조와 핸들만을 작업영역에 제시함으로써, 사용자에게 단순화된 환경을 제공하기 위함이다. 다음 장의 기구학 해석에서는 5절링크에 사용된 짐벌기구를 일반적인 회전관절

로 해석하고, 4장에서 짐벌기구에 의해 변화된 부분을 살펴보기로 한다.

3. 기구학 해석

3.1 주요상수 및 좌표의 설정

기구학 해석에 앞서, 계산에 필요한 좌표 및 주요 상수와 벡터를 Fig. 4에 표시하였다. 기준좌표계 $\{R\}$ $O_R-x_R y_R z_R$ 와 핸드좌표계 $\{H\}$ $O_H-x_H y_H z_H$ 를 설정하고, 각 5절링크 기구의 하부링크 중앙점인 A_i 에 링크좌표계 $\{A_i\}$ $O_{A_i}-x_{A_i} y_{A_i} z_{A_i}$ 를 설정한다. 기준좌표계 $\{R\}$ 에 대하여 핸드좌표계 $\{H\}$ 의 원점 H 의 위치는 위치벡터 ${}^R r_{RH}$ 로, $\{H\}$ 의 회전은 회전행렬 ${}^R R_H$ 로 나타낼 수 있다.

$${}^R r_{RH} = \{ {}^R x_H \quad {}^R y_H \quad {}^R z_H \}^T \quad (1)$$

$${}^R R_H = \begin{bmatrix} C\gamma C\beta & C\gamma S\beta S\alpha - S\gamma C\alpha & C\gamma S\beta C\alpha + S\gamma S\alpha \\ S\gamma C\beta & S\gamma S\beta S\alpha + C\gamma C\alpha & S\gamma S\beta C\alpha - C\gamma S\alpha \\ -S\beta & C\beta S\alpha & C\beta C\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 식 (2)로 나타낸 회전행렬 ${}^R R_H$ 는 RPY 표시법에 의해 나타낸 것으로, x 축에 대해 α , y 축에 대해 β , z 축에 대해 γ 만큼 회전한 것을 의미한다. 한편, C 는 \cos , S 는 \sin 을 각각 나타낸다.

3.2 순기구학의 해석

순기구학의 해석은 각 액추에이터의 회전각으로부터 핸들의 위치와 방위를 구해내는 것이다. 즉, 능동변수 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3} (i = 1, 2)$ 에 대한 핸들의 위치 ${}^R r_{RH}$ 와 회전행렬 ${}^R R_H$ 를 해석하는 것이다. 핸들의 양끝에 해당하는 관절 J_{i7} 의 위치를 기준좌표계 $\{R\}$ 과 핸드좌표계에 $\{H\}$ 에 대해 나타낸 ${}^R r_{J_{i7}}$ 와 ${}^H r_{J_{i7}}$ 의 관계는 다음과 같다.

$${}^R r_{J_{i7}} = {}^R R_H {}^H r_{J_{i7}} + {}^R r_H \quad (3)$$

식 (3)의 ${}^H r_{J_{i7}}$ 는 각각

$$\begin{aligned} {}^H r_{J_{17}} &= \{ l_{J_{17}} \quad 0 \quad 0 \}^T \\ {}^H r_{J_{27}} &= \{ l_{J_{27}} \quad 0 \quad 0 \}^T \end{aligned} \quad (4)$$

이며, $l_{J_{i7}}$ 는 핸들의 home position에서 관절 J_{i7} 까지의 거리이다. $l_{J_{27}}$ 는 핸들을 축방향으로 회전시킴에 따라, 그 회전각 α 에 스크류의 리드 P_{ball} 를 곱한 만큼 길이가 변하게 된다. 5절링크의 양끝에 해당하는 관절 J_{i6} 의 위치를 기준좌표계 $\{R\}$ 에 대해

나타낸 ${}^R r_{J16}$ 과 ${}^R r_{J17}$ 의 관계는 다음과 같다.

$${}^R r_{J17} = {}^R r_{J16} - \frac{\|l_3\|}{\|{}^R r_{J16}\|} \cdot {}^R r_{J16, J11} \quad (5)$$

또한, ${}^R r_{J16}$ 은 다음과 같이 동차변환을 통해 나타낼 수 있다.

$${}^R r_{J16} = \text{Trans}(b_1, 0, 0) \text{Rot}(y, \theta_{11}) \text{Trans}(0, d, 0) \text{Rot}(x, \theta_{12}) \text{Trans}(0, l_1, 0) \text{Rot}(x, \theta_{16}) \text{Trans}(0, l_2, 0) \quad (6)$$

이 때, b_i 는 $b_1 = b, b_2 = -b$ 이다.

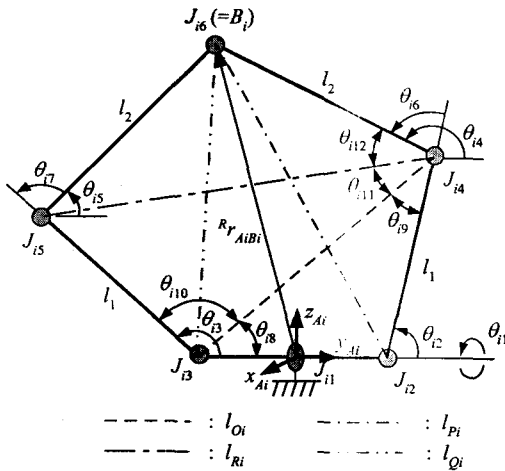


Fig. 5 5-bar linkage.

5절링크 해석에 필요한 변수를 Fig. 5에 표시하였다. 관절 J_{16} 의 위치 ${}^R r_{J16}$ 는 기준좌표계 $\{R\}$ 에 대하여 각 성분별로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$${}^R r_{J16} = \begin{cases} S_{11}(l_2 S_{12} C_{16} + l_2 C_{12} S_{16} + l_1 S_{12}) + b_1 \\ l_2 C_{12} C_{16} - l_2 S_{12} S_{16} + l_1 C_{12} + d \\ C_{11}(l_2 S_{12} C_{16} + l_2 C_{12} S_{16} + l_1 S_{12}) \end{cases} \quad (7)$$

주어진 능동변수 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ 로 5절링크를 해석하여 ${}^R r_{J16}$ 을 구하고, 식 (5)에서 ${}^R r_{J17}$ 을 구할 수 있다. 한편, 식 (3)을 통해 핸들의 양단 J_{27} 에서 J_{17} 까지의 위치벡터를 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^R r_{J17} - {}^R r_{J27} = {}^R R_H ({}^H r_{J17} - {}^H r_{J27}) \quad (8)$$

식 (8)에 ${}^R r_{J17}$ 를 대입하면 핸드좌표계의 회전행렬 ${}^R R_H$ 를 구해낼 수 있다. 이 때, ${}^R r_{J17} - {}^R r_{J27}$ 는 핸드좌표계 $\{H\}$ 의 x 축과 일치하여, x 축에 대한 회전 α 를 구할 수 없게 되는데, 이는 ${}^R r_{J17} - {}^R r_{J27}$ 의 절댓값을

이용하여 구한다. 또한, ${}^R R_H$ 를 구하면 식 (3)에서 핸들의 위치 ${}^R r_H$ 를 구할 수 있다.

3.3 역기구학의 해석

역기구학 해석은 핸들의 위치와 방위가 주어졌을 때, 이를 구현하기 위한 각 관절에서의 각도를 구하는 것이다. 즉, ${}^R R_H$ 와 ${}^R r_H$ 가 주어졌을 때, 이에 해당하는 능동변수 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ 를 구하는 것이다. 이 때, 식 (3)에서 우변의 모든 항이 주어졌으므로, 이를 대입하여 쉽게 핸들 양단의 관절 J_{17} 의 위치 ${}^R r_{J17}$ 를 구할 수 있고, 벡터관계를 통해 ${}^R r_{J16}$ 을 알아낼 수 있다. 결국, 역기구학의 해석은 식 (7)에서, 주어진 ${}^R r_{J16}$ 에 대하여 능동변수 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ 의 값을 3원 3차 삼각 연립방정식으로 풀어내는 것이라 할 수 있다. Fig. 5에 표시된 기하학적 정보를 이용하여, 코사인 정리를 적용하면 능동변수 $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ 에 대한 값을 구할 수 있다.

4. 정역학 해석

4.1 정역학 해석

일반적인 다자유도 기구의 동역학 해석에 있어, 기구학 해석을 바탕으로 각 능동관절의 각속도와 각가속도를 도출하여, 각 능동관절에서의 토크와 말단부의 힘/토크 관계, 즉 자코비안을 계산하게 된다. 여기서는 속도 관계에 의해 유도된 자코비안보다 유도 과정이 간단한 능동 관절에서의 토크와 엔드 이펙터에 작용하는 힘/토크와의 관계로부터 자코비안을 해석하였다.

능동관절의 토크와 핸들에 작용하는 힘과의 관계는 다음과 같이 자코비안 J 를 통해 정의할 수 있다.

$$\tau = J^T \cdot F \quad (9)$$

역학 관계를 통해, 능동관절 토크 τ_i 와 기준좌표계에 대해 표시된 핸들의 양단 C_i 에 작용하는 힘 ${}^R F_{Ci}$ 을 쉽게 구할 수 있으며, 전체 자코비안을 유도하기 위하여, 이를 변환 행렬 ${}^R T_{Ci}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$${}^R F_{Ci} = {}^R T_{Ci} \cdot \tau_i \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

손잡이의 양단 C_1, C_2 에 걸리는 힘을 하나의 벡터 ${}^R F_C$ 로 다음과 같이 정의하여 보자.

$${}^R F_C = \begin{Bmatrix} {}^R F_{C1} \\ {}^R F_{C2} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

${}^R F_C$ 와 능동관절 토크 τ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^R F_C = {}^R T_C \cdot \tau \quad (12)$$

$${}^R T_C = \begin{bmatrix} {}^R T_{C1} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & {}^R T_{C2} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (13)$$

한편, (11)에서 정의된 ${}^R F_C$ 는 핸드좌표계 {H}에 대해서 다음과 같이 ${}^H F_C$ 로 나타낼 수 있다.

$${}^H F_C = {}^H T_R \cdot {}^R F_C \quad (14)$$

여기서 변환행렬 ${}^H T_R$ 은 식 (2)에서 정의된 회전행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^H T_R = \begin{bmatrix} {}^R R_H^{-1} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & {}^R R_H^{-1} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (15)$$

이제, 식 (14)의 ${}^H F_C$ 로부터 핸들에 작용하는 힘 ${}^H F$ 를 Fig. 2에 나타난 원리를 적용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$${}^H F = T_H \cdot {}^H F_C \quad (16)$$

$$T_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{F_{ball}}{2\pi} & 0 & 0 & -\frac{F_{ball}}{2\pi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_{A1} & 0 & 0 & l_{A2} \\ 0 & l_{A1} & 0 & 0 & -l_{A2} & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

위식들을 정리하면, 엔드이펙터에 작용하는 힘/모멘트는 기준좌표계 {R}에 대해서 다음과 같이 나타내고, 자코비안 J 를 구할 수 있다.

$$F = {}^H T_R^{-1} \cdot T_H \cdot {}^H T_R \cdot {}^R T_C \cdot \tau \quad (18)$$

$$J = [({}^H T_R^{-1} \cdot T_H \cdot {}^H T_R \cdot {}^R T_C)^{-1}]^T \quad (19)$$

4.2 짐벌기구의 해석

사용된 짐벌기구를 해석하여 제 액추에이터의 회전각과 앞 장의 기구학 해석에 사용한 능동변수의 관계를 알아보자. Fig. 3에 표시된 짐벌기구에서, 능동변수 θ_{2s} , θ_{3s} 는 기구의 움직임에 따라 실제 액추에이터의 회전각 $\theta_{2,act}$, $\theta_{3,act}$ 와 같다. 사용된

짐벌기구는 기구학적으로 공간 5절링크(spatial 5-linkage)로 해석할 수 있으며, 각 회전관절의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \theta_{i1} \\ \theta_{i2} \\ \theta_{i3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \theta_{1,act} \\ \text{atan2}(\cos\theta_{2,act} \cdot \tan\theta_{1,act}, 1) \\ \text{atan2}(\cos\theta_{3,act} \cdot \tan\theta_{1,act}, 1) \end{Bmatrix} \quad (20)$$

이러한 위치 관계를 미분하여, 쉽게 짐벌기구의 자코비안을 구할 수 있다.

5. KU-HHC의 성능 해석

5.1 기구학적 성능 해석

핸드 컨트롤러의 기구학적 성능은 일반적인 머니플레이터와 동일하게, 자코비안 행렬을 통하여 살펴볼 수 있다. 자코비안을 이용한 장치의 기구학적 특성을 분석하기 위하여, 기구학적 성능지수(kinematic performance index)가 제안되었으며, 이를 이용하여 설계 단계에서 기구 요소의 구성과 배치를 최적화할 수 있다. 여기서는 핸들의 자유로운 운동 능력을 나타내는 조작성(manipulability)와 효율적으로 힘을 가하거나 지지할 수 있는 능력의 척도로 사용되는 저항성(resistibility)을 이용하여, KU-HHC의 성능을 분석하고 설계 변수를 최적화하였다[8].

조작성과 저항성은 서로 역수 관계를 가지는데, Fig. 7에 제안된 구조와 관련된 조작성을 나타내었다. 측정 방법은 나머지 축을 고정한 상태로 각 x , y , z 방향으로 핸들의 위치를 변화시키면서 나타나는 성능지수를 표시하였다. 핸드 컨트롤러의 설계에 있어 두 성능지수가 균형을 이루도록 하여야 하며, Fig. 7에 나타난 것처럼, 제안된 구조의 장치를 설계할 때, 링크 l_3 의 길이는 l_1 의 3.5배 정도가 적절함을 알 수 있다.

5.2 작업공간 해석

제안된 구조에서 3자유도 기구부의 위치를 베이스 반대편의 핸들로 투영하기 위하여, Fig. 4에 표시된 J_{H1} 에 구형관절과 선형관절이 복합된 관절을 사용하게 된다. KU-HHC에서는 상용 제품을 사용하여, 그 작동 범위가 다소 협소하며, 이는 장치의 작업공간을 제한하게 된다. 회전관절을 이용하여 이를 직접 제작할 경우, 작업영역을 증가시킬 수 있다.

Fig. 6에 KU-HHC의 작업영역을 표시하였다. 전체 작업영역은 복합관절에 의해 반구형 형태의 작

업영역에서 z축을 중심으로 약 25°로 회전하며 생성되는 원뿔형 형태로 제한되었다. 앞에서 분석한 기구학적 특성을 고려하여 $l_1=90\text{mm}$, $l_2=100\text{mm}$, $l_3=3.5l_1$, $d=70\text{mm}$ 로 설계하였으며, 전체적으로는 각 x, y, z 방향으로 최대 240mm, 300mm, 80mm의 작업 공간을 가진다. 이는 장치의 부속 면적과 설계된 링크의 길이를 비교할 때, 병렬기구로서는 매우 넓은 작업 영역이라는 점을 알 수 있다.

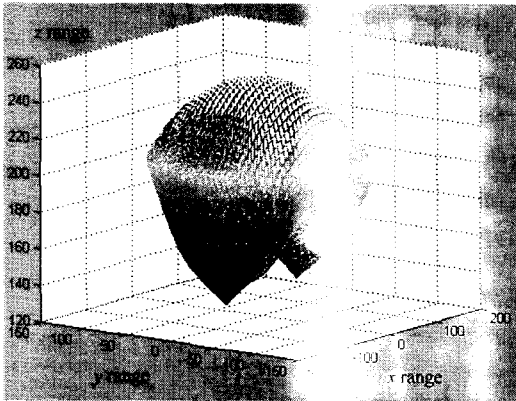


Fig. 6 Workspace of the KU-HHC

6. 결론

본 논문은 핸드 컨트롤러의 설계에 있어, 실질적인 6자유도 기구부를 사용하여 작업에서 베이스의 반대편 영역에 설치하고, 사용자에게 작업영역에는 간단한 인터페이스만을 제공하고, 원격제 방식은 제시하였다. 5절링크와 짐벌기구를 이용하여 역구동성이 우수한 3자유도 기구를 구성하였고, 두 개의 기구를 결합하여 새로운 병렬 6자유도 햅틱 핸

드 컨트롤러인 KU-HHC를 개발하였다. 그리고 기구학적 성능지수를 사용하여 기구의 설계에 반영하는 방법을 제시하였다. 개발된 핸드 컨트롤러는 비교적 큰 작업공간을 가진다. 현재 이를 이용한 응용 사례의 개발이 진행되고 있다.

참고문헌

- (1) P. Fischer, R. Daniel, and K.V. Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540-545, 1990.
- (2) D.A. Lawrence, and J.D. Chapel, "Performance trade-offs for hand controller design," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3211-3216, 1994.
- (3) J. E. Colgate, and J. M. Brown, "Factors affecting the Z-width of a haptic display," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3205-3210, 1994.
- (4) H. Iwata, "Pen-based haptic virtual environment," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 287-292, 1993.
- (5) G.L. Long, and C.L. Collins, "A pantograph linkage parallel platform master hand controller for force-reflection," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 390-395, 1992.
- (6) Y. Tsumaki, H. Naruse, D. N. Nenchev, M. Uchiyama, "Design of a compact 6-DOF haptic interface," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2580-2585, 1998.
- (7) 진병대, 우기영, 권동수, "5각 관절 병렬 구조를 이용한 6자유도 힘 반사형 마스터 컨트롤러," 제어.자동화.시스템공학 논문지, 5권, 3호, pp. 288-96, 1999.
- (8) T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics Analysis and Control*, The MIT Press, Ch.4, pp.127~143, 1990.

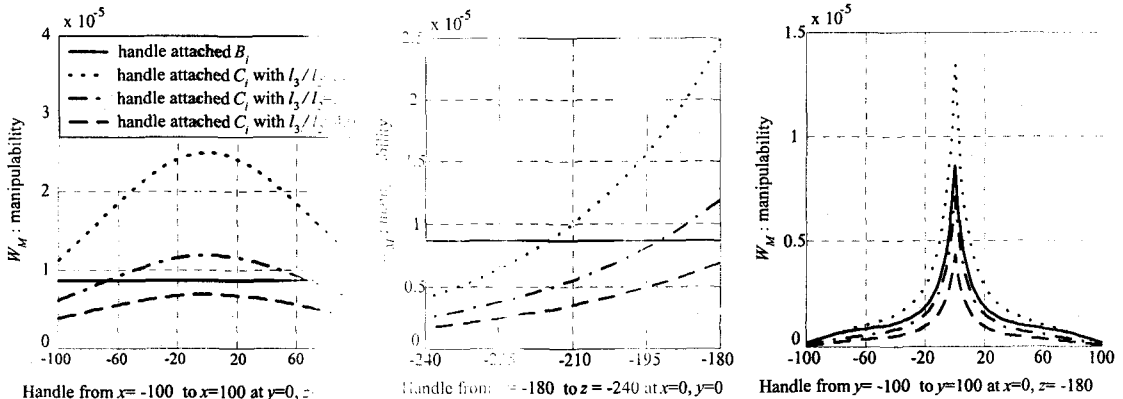


Fig. 7 Manipulability analysis of KU-HHC.