

새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 기구의 최적설계 및 해석

A New 6-DOF Parallel Haptic Device: Optimum Design and Analysis

이 재 훈, 김 형 욱, 이 병 주, 서 일 흥

(Jae Hoon Lee, Hyung Wook Kim, Byung-Ju Yi and Il Hong Suh)

Abstract : A new 6-DOF parallel haptic device is proposed. Many existing haptic devices require large power due to having floating actuator and also have small workspaces. The proposed new mechanism can generate 6-DOF reflecting force. This device is relatively light by employing non-floating actuators and has large workspace. Kinematic analysis and kinematic optimal design is performed for this mechanism. Dexterous workspace, global isotropic index, and global maximum force transmission ratio are considered as kinematic design indices. To deal with such multi-criteria optimization problem, composite design index is employed. For the given operational specifications, actuator sizing for this mechanism is also carried out.

Keywords : haptic device, parallel mechanism, optimum design

I. 서론

최근 가상현실기술(virtual reality technology)은 의학, 원격조종, 오락(entertainment) 등의 분야에서 그 응용 범위가 확대되고 있다. 가상현실기술은 컴퓨터 그래픽스, 햅틱 인터페이스, 그리고 음향 등의 주된 기술로 이루어지며, 이중 햅틱 인터페이스 기술은 다른 기술에 비하여 상대적으로 그 발전이 미진한 실정이다.

햅틱 인터페이스는 작업공간이 넓고, 기구의 운동 질량 및 관성이 작으며, 관절 등에서 발생하는 마찰이 적고, 기구의 구조적 강성(stiffness)이 크며, 역조종성(backdriveability)이 있으며, 감속기 등으로 인한 백래쉬가 적으며, 높은 force bandwidth 와 force dynamic range 를 지니어야 한다. 또한 작업공간 내에 특이점(singularity)이 없고 모든 작업공간에서 균일한 감각(even feel)을 느낄 수 있어야 하며 시스템의 크기 또한 작업자의 조작에 알맞은 크기이어야 한다[2,7]. 햅틱 인터페이스 기술은 제어기와 햅틱기구로 구성되며, 좋은 햅틱기구와 함께 이에 적합한 제어기를 사용함으로써 이러한 요건들을 만족시키는 시스템을 구현할 수 있다.

1950 년대에 Goertz[1]에 의하여 마스터-슬레이브 시스템이 제안된 이후, Bergamasco 에 의해 개발된 외골격 형태의 마스터 암[5], Massie 와 Salisbury 에 의해 개발된 직렬 매니플레이터 형태의 PHANTOM[3], Hollis 의 MagLev Wrist[4] 등 과 같은 매우 다양한 형태의 햅틱 인터페이스 장치가 개발되었다. 이와 같이 많은 햅틱 장치들이 개발되었으나, 현재까지의 장치들은 일반적으로 3 또는 그 이하의 자유도를 지니므로 6 자유도 공간운동을 재현함에 있어 제약이 있다. 또한 대부분이 단단한 물체와의 접촉을 재현하기 어려운 직렬 매니플레이터 형태이거나, 병렬형 햅틱기구의 경우는 크고 무거운 구

동기의 관성으로 인하여 작업공간이 작고 사용자가 조작하기에 많은 부담을 가지는 등의 단점이 있다[2,6,8].

병렬형 매니플레이터는 직렬형 매니플레이터에 비하여 작업공간이 작고, 설계가 복잡하며, 정방향 해가 복잡한 반면, 강성이 크고, 관성이 작으며, 높은 속도를 낼 수 있는 등의 장점을 지닌다. 이와 같이 병렬형 매니플레이터가 많은 장점을 지님에도 불구하고, 부유(浮遊)구동기가 없이 모든 구동기가 지면에 부착된 형태의 기구는 매우 적다. 부유구동기가 없는 3 자유도 병렬형기구로는 Y-Star Robot, H-Robot, Prism Robot, 3-RUU, 3-UPU 메커니즘 등이 있으며[12,13], 6 자유도 병렬형 기구로는 UCI hand master, Kaist master, Ryu's mechanism, 그리고 Ultra-fast hybrid parallel manipulator 등이 있다[12-14]. 이러한 메커니즘들은 상판과 지면, 그리고 이들을 연결하는 세 개의 직렬체인으로 구성되며 하부 체인들의 조합에 의하여 상판의 움직임을 생성한다. 따라서, 모터의 구동력이 직접 말단장치에 전달되지 못하며, 작업공간 내부에 하부 체인들의 기구적인 구조로 인한 특이점이 존재하는 메커니즘도 있다 [17-19].

이상에 언급한 다양한 6 자유도 병렬형 메커니즘들은 그림 1 에 도시한 바와 같이 5 가지 형태로 분류할 수 있다. 그림 1 에 도시된 도형들 중 삼각형은 지면에 고정된 관절을, 흰색 원은 구동기가 부착되지 않은 수동(passive) 관절, 검은색 원은 구동기가 부착된 능동(active)관절, 그리고 파선은 이들을 연결하는 기구적인 링크를 나타낸다. 그림 1(a)의 Type 1 은 상판이 하나의 부유 구동기를 포함하는 여섯 개의 직렬체인에 의해 지면과 연결되어 있는 형태로써, 그 대표적인 예로 스투어트플랫폼(Stewart platform)이 있다. 이러한 메커니즘은 직렬체인 및 구동기 간의 간섭 등으로 인해 작업공간이 작다. 그림 1(b)의 Type 2 는 각각 두 개의 구동기를 포함한 세 개의 직렬체인과 상판으로 구성된다. 각 체인은 2 자유도 모션을 상판에 제공한다. 그림 1(c)의 Type 3 은 Type 2 와 유사한 구조이지만, 지면에 위치한 세 개의 구동관절이 레일 등과 같은 주어진 궤적을 따라 움직인다.

논문접수 : 2002. 5. 29., 채택확정 : 2002. 11. 28.

이재훈, 김형욱, 이병주, 서일흥 : 한양대학교

(joyleejh@shinbico.com, hwkim@incorl.hanyang.ac.kr, bj@hanyang.ac.kr, ihsuh@hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00260-0(2002)) 지원으로 수행되었음.

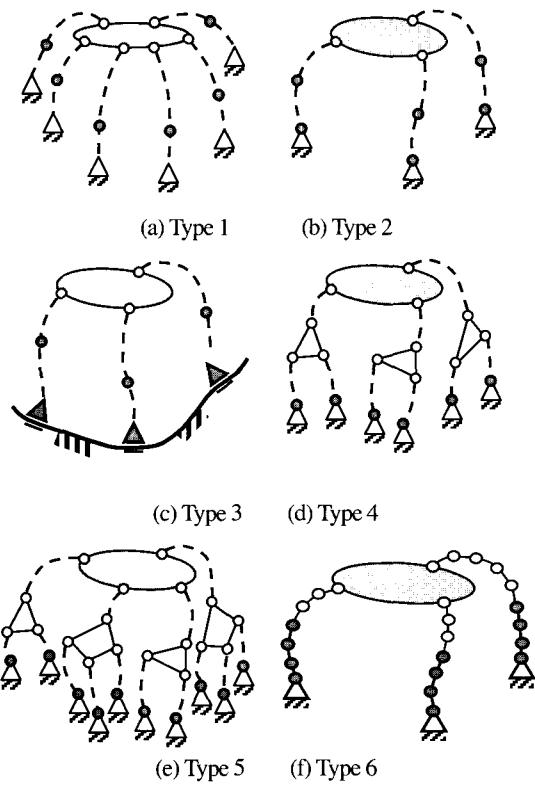


그림 1. 다양한 형태의 6 자유도 병렬형 메커니즘.
Fig. 1. Various types of 6-DOF parallel mechanisms.

Type 3의 대표적인 예로 Eclipse 시스템[17]을 들 수 있다. 이상의 세 형태의 병렬형 메커니즘은 부유 구동기로 인하여 시스템 관성이 비교적 크며 체인과 부유구동기 몸체의 간섭 등으로 인해 작업공간이 비교적 작다. 위의 형태와 달리 그림 1(d)의 Type 4와 같은 메커니즘은 체인들 간의 구속을 활용하여 모든 구동기가 지면에 부착되어 상대적으로 작은 시스템관성을 지닌다. 그림 1(e)의 Type 5 역시 모든 구동기가 지면에 부착되며 여유구동모드를 사용하는 점이 다르다. 여유구동모드는 특이점을 줄이고 가반하중을 증가시킬 수 있는 등의 많은 장점을 지닌다. 그림 1(f)의 Type 6는 기구학적 여유자유도를 지니는 직렬구조를 다리에 적용시켜 시스템에 기구학적으로 많은 자유도를 부여하고 보다 유연한 움직임을 생성할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 모든 구동기가 지면에 부착된 새로운 형태의 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘을 제안한다. 그림 2는 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 사진이다. 부유구동기가 없으므로 기구의 간섭이 적으며 특이점이 없는 넓은 작업공간을 지닌다. 상위 구동기와 하위 구동기의 구동력은 세 개의 체인을 통해 직접 상판에 전달되어 수직 및 수평방향의 운동에 직접적인 영향을 미친다. 햅틱 메커니즘으로서의 최적의 성능을 얻기 위해 작업공간(dexterous workspace), 전역등방성지수(global isotropic index), 전역최대힘전달비(global force transmission ratio) 등의 다양한 성능지수를 동시에 고려한 최적설계를 수행한다. 또한, 주어진 성능을 얻기 위한 구동기의 최적용량을 구한다.

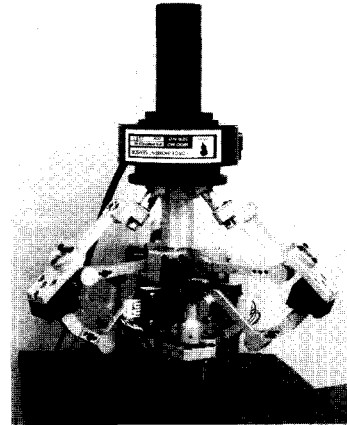


그림 2. 6 자유도 병렬형 햅틱장치.
Fig. 2. New 6-DOF parallel haptic device.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II 장에서 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 기구학을 소개하며, 기구학적 설계를 위한 성능지수와 최적설계를 각각 III 장과 VI 장에 기술한다. V 장에서 새로운 햅틱 메커니즘을 위한 구동기의 최적용량 결정방법을 소개하며, 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 새로운 6 자유도 햅틱기구의 기구학

본 장에서는 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 구조와 1 차 정방향 및 역방향 기구학 모델링 방법을 설명한다.

1. 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 구조

그림 3은 Gosselin 에 의해 개발된 'Ultra-fast hybrid parallel manipulator'의 구조를 도시한 그림이다[15,16]. 이 메커니즘은 상판과 지면에 수평방향으로 부착된 여섯 개의 구동기, 그리고 상판을 여섯 개의 구동기에 연결시키는 세 개의 병렬 체인으로 구성된다. 상판의 6자유도 운동은 체인들과 구동기의 조합에 의하여 생성된다. 이 시스템은 모든 구동기가 지면에 부착됨으로 인해 넓은 작업공간과 작은 관성을 지니고, 큰 중력하중을 지탱할 수 있으며, 병렬구조로 인하여 구조적 강성이 높은 장점이 있다. 하지만, 모터의 구동력이 상판의 수평방향 운동에 직접 전달될 수 없으며 병렬 체인들의 조합에 의하여 간접적으로 전달되는 구조이다.

본 논문에서는 이상에 기술한 구조적인 단점을 해결할 수 있는 그림 4와 같은 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘을 제안한다[20,21]. 본 메커니즘은 Gosselin 이 개발한 모델과 유사한 구조로 상판과 세 개의 병렬형 다리, 그리고 여기에 연결된 세 쌍의 모터로 구성되어 있다. 하지만, Gosselin 의 모델과 달리 세 개의 하위 모터가 지면에 대하여 수직방향으로 부착되어 있는 점이 다르다. 지면과 평행한 수평방향으로 부착된 상위모터는 시스템의 중력방향의 부하와 z 방향의 운동을 담당하며, 지면에 대하여 수직방향으로 부착된 하위모터는 x 및 y 의 수평방향의 운동을 담당한다. 그리고, 이들 세 체인의 조합운동에 의하여 상판의 3 자유도 회전운동이 생성된다. 따라서 모터의 구동력이 세 개의 체인들을 통하여 직접 상판에 전달되어 상판의 자유로운 운동을 효율적으로

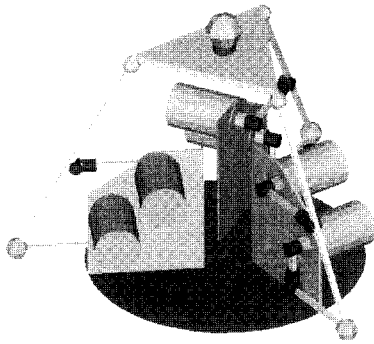


그림 3. Gosselin 모델의 기구학적 구조도.
Fig. 3. Kinematic structure of Gosselin's model.

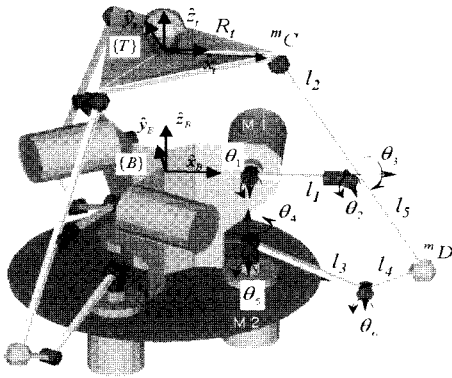


그림 4. 새로운 6 자유도 병렬형 햅틱기구의 기구학적 구조도.
Fig. 4. Kinematic structure of a new 6 DOF parallel haptic device.

만들어낼 수 있는 장점을 지닌다. 모든 구동기들이 지면에 부착되어 구동기 몸체와 기구부 간의 간섭이 적고 작업공간이 크며 시스템 관성이 매우 작다. 또한, 메커니즘을 형성하는 체인들이 폐쇄회로를 형성하여 높은 구조적 강성을 지니는 특징이 있다.

본 시스템을 구현함에 있어 상위모터와 링크간의 간섭을 최소화하기 위하여 그림 5의 우측 그림에 도시한 바와 같이 상위모터를 지면 아래에 부착하고 베벨기어를 사용하였다. 상위모터의 구동력은 베벨기어를 통해 첫번째 관절(θ_1)에 전달되어 l_1 이 회전시키게 된다. 그림 6은 제작된 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 베벨기어 부분을 확대한 사진이다. 이와 같이 베벨기어를 사용하여 모든 모터를 지면 아래에 위치시키고 링크 간의 간섭을 줄이는 등의 설계로 이 시스템은 작으면서도 작업공간이 넓은 장점을 지닌다.

그림 7은 새로운 햅틱 메커니즘을 구성하는 세 개의 다리 중에서 하나의 다리를 확대하여 나타낸 그림이다. 그림 7에서 $\{B\}$ 는 지면의 중심에 위치한 기저좌표계를 나타내며, $\{T\}$ 는 상판의 중심에 고정되어 움직이는 상판좌표계를 나타낸다. 상판에는 중심으로부터 반경이 R_t 인 원 위에 120° 간격으로 세 개의 상위접촉점($m_C, m=1,2,3$)이 위치한다. 또한 지면에는 세 쌍의 모터들이 각각 120° 의 간격으로 위치한다.

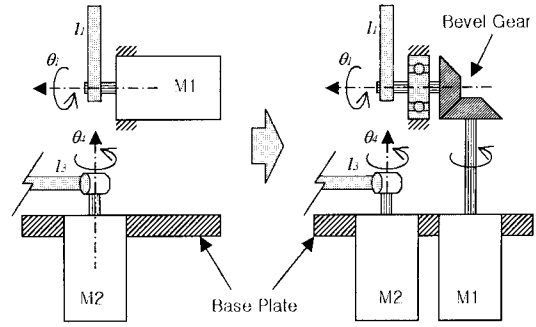


그림 5. 베벨기어를 이용한 동력전달 구조도.
Fig. 5. Schematic diagram of Bevel gear transmission.

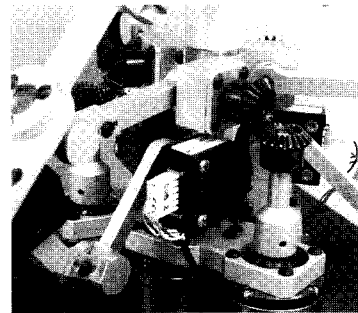


그림 6. 베벨기어의 사진.
Fig. 6. Photograph of Bevel gear set.

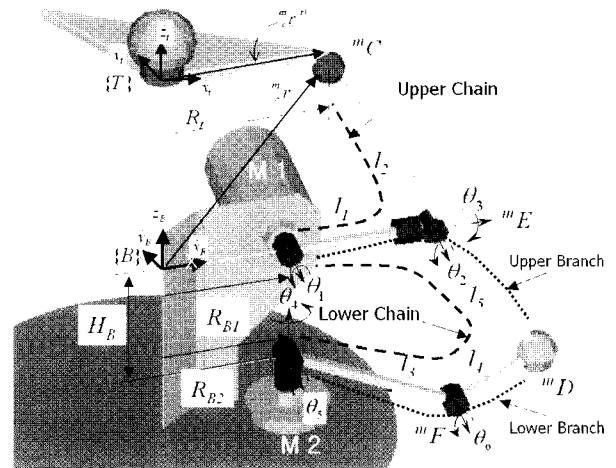


그림 7. 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘의 다리 구조.
Fig. 7. Kinematic leg structure of 6 DOF parallel haptic device.

상위모터(M1)는 기저좌표계의 중심으로부터 반경이 R_{B1} 인 원 위에 부착되며, 하위모터(M2)는 기저좌표계의 중심으로부터 거리가 R_{B2} 이며 지면으로부터 z 방향으로 $-H_B$ 인 위치에 고정된다.

상판과 지면의 모터를 연결하는 각각의 병렬형 체인은 그림 7에 도시된 바와 같이 상위체인과 하위체인으로 구성된다. 상위체인은 상판의 상위접촉점($m_C, m=1,2,3$)과 상위모터(M1)를 연결하는 l_1 과 l_2 로 이루어진 체인을 나타낸다.

하위체인은 하위모터(M2)와 하위접촉점("D, m=1,2,3), 그리고 상위모터(M1)를 연결하는 l₃, l₄, l₅ 및 l₂로 이루어진 폐쇄체인을 나타낸다. 하위체인은 상위모터(M1)와 하위접촉점("D)을 연결하는 상위가지(upper branch)와 하위모터(M2)와 하위접촉점("D)을 연결하는 하위가지(lower branch)로 나뉜다. 이 메커니즘의 공간에서의 출력위치벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{u} = (x, y, z, \theta_1, \theta_2, \theta_3)', \quad (1)$$

여기서, (x, y, z)는 기저좌표계의 중심에 대한 상관좌표계의 위치를 나타내며, (θ₁, θ₂, θ₃)는 기저좌표계에 대한 상관좌표계의 회전을 나타낸다. 본 논문에서는 상관의 회전 [R_b^s]을 오일러각(Euler angles)방식으로 표기하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$[R_b^s] = [Rot(\hat{x}, \theta_1)] [Rot(\hat{y}, \theta_2)] [Rot(\hat{z}, \theta_3)]. \quad (2)$$

2. 정방향/역방향 기구학(Forward/Inverse Kinematics)

일반적으로 직렬형 매니플레이터가 자세에 따라 하나 이상의 역방향 기구학 해를 지니는 것과 달리[17,19], 병렬형 매커니즘은 여러 개의 정방향 기구학 해를 지니며, 본 논문에서 제안한 메커니즘의 정방향 기구학 해는 16 차 다항식(16-th order polynomial)의 형태로 얻어진다. 본 연구에서는 하위체인에 위치한 수동관절(θ₅)에 3 개의 추가적인 센서를 부착하는 방법을 사용하여 유일해를 얻었다. 모터가 부착된 첫 번째와 네 번째 관절(θ₁, θ₄), 그리고 수동관절인 다섯 번째 관절(θ₅)에 부착된 센서의 회전각 값을 통해 그림 8 에 도시한 바와 같이 기하학적 방법을 활용하여 정방향기구학 해를 계산할 수 있다.

그림 8 에서 하위체인을 구성하는 상위 및 하위가지들 3 자유도 직렬 매니플레이터로 가정하면, 하위접촉점("D)은 상위가지의 "E 점을 중심으로 두 번째와 세 번째 관절(θ₂, θ₃) 및 l₃에 의하여 구(sphere)를 형성하며, 하위가지에서는 여섯번째 관절(θ₆)과 l₄에 의하여 원(circle)을 형성한다. 하위체인은 하위접촉점("D)에서 상위가지와 하위가지가 기구적으로 구속되므로 구와 원의 만나는 점이 하위접촉점이 된다. l₅의 끝점에 위치한 지역좌표계 {F}에 대한 구와 원의 방정식은 다음과 같다.

$$(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 = l_3^2 \quad (3)$$

$$x^2 + z^2 = l_4^2 \quad (4)$$

그리고 하위접촉점이 지역좌표계 {F}의 x-z 평면에 존재하므로 항상 y=0인 구속조건이 적용된다. 구와 원이 만나는 점은 2 개가 존재하지만 기구적 형태에 의하여 바깥쪽의 접촉점이 실제의 해가 되므로 하위접촉점은 양의 x 값을

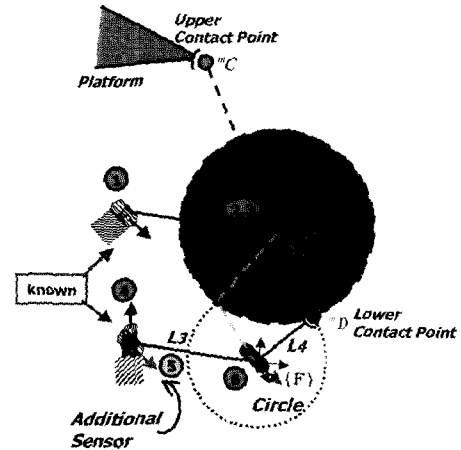


그림 8. 부가센서를 활용한 정방향기구학.
Fig. 8. Forward kinematics with additional sensor.

지니며 (3)과 (4)를 공통으로 만족시키는 실제 접촉점의 위치를 구할 수 있다. 따라서 상위 및 하위가지를 구성하는 모든 관절의 각도는 하위접촉점의 위치해로부터 3 자유도 직렬 매니플레이터 역기구학을 사용하여 계산한다. 이로부터 상위체인의 3 자유도 직렬 매니플레이터 정방향 기구학을 활용하여 상위 접촉점("C)의 위치벡터를 얻는다. 마지막으로, 상판에 위치한 세 개의 상위접촉점 위치벡터로부터 상관중심의 위치벡터와 상관의 회전각은 다음과 같이 구해진다.

$$\underline{u} = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 {}^m C = (x, y, z)', \quad (5)$$

$$[R_b^s] = [\tilde{X}_b^s \ \tilde{Y}_b^s \ \tilde{Z}_b^s], \quad (6)$$

여기서

$$\tilde{X}_b^s = \overline{O^s C} / |\overline{O^s C}|, \ \tilde{Z}_b^s = \overline{O^s C} \times \overline{O^s C} / |\overline{O^s C} \times \overline{O^s C}|, \ \tilde{Y}_b^s = \tilde{Z}_b^s \times \tilde{X}_b^s, \quad (7)$$

여기서, $\overline{O^s C}$ 은 상판의 중심(O)으로부터 m 번째 상위접촉점("C)에 이르는 벡터를 나타낸다.

역방향 기구학 해는 정방향기구학의 역순으로 얻어진다. 상관 위치벡터(\underline{u})로부터 m-번째 다리에 대한 상위 접촉점("C)의 위치벡터가 구해지며, 상위체인의 3 자유도 직렬 매니플레이터 역방향 기구학을 활용하여 상위체인을 구성하는 관절각을 계산한다. 하위체인의 상위가지에 대한 정방향기구학으로부터 하위접촉점("D, m=1~3)의 위치벡터가 얻어지며, 이로부터 하위가지에 대한 3 자유도 직렬 매니플레이터 역방향 기구학을 활용하여 하위가지를 형성하는 관절들의 회전각을 얻는다.

3. 1 차 기구학 모델링 (First-order Kinematic Modeling)

본 절에서는 작업공간의 출력 속도벡터($\underline{\dot{u}}$)와 관절속도벡터($\underline{\dot{\theta}}$) 간의 관계를 나타내는 새로운 6 자유도 병렬형 랩터 기구의 1 차 기구학적 영향계수(1-st order Kinematic Influence Coefficient)를 소개한다. 상판의 위치한 세 개의 상위접촉점의

위치벡터는

$$\underline{C} = ({}^1\underline{C}^T \quad {}^2\underline{C}^T \quad {}^3\underline{C}^T)^T \quad (8)$$

로 표시한다. 여기서 왼쪽 위 첨자는 다리의 번호를, 오른쪽 위 첨자 T 는 벡터의 전치(transpose)형태를 의미한다. 또한, (8)을 구성하는 하나의 상위접촉점에 대한 위치벡터는

$${}^m\underline{C} = ({}^m{}_c x, {}^m{}_c y, {}^m{}_c z)^T \quad m=1\sim 3 \quad (9)$$

로 정의한다. 여기서, 왼쪽 위 첨자 m 은 다리의 번호를 나타내며, 왼쪽 아래 첨자 c 는 상위접촉점 임을 나타낸다.

각 상위접촉점의 위치벡터는 다음 식으로 정의된다.

$${}^m\underline{C} = \underline{u}_i + {}^m{}_c \underline{r} \quad (10)$$

그리고

$${}^m{}_c \underline{r} = [R_b^T] \quad {}^m{}_c \underline{r}^{(b)}, \quad (11)$$

여기서, \underline{u}_i 는 기저좌표계에 대한 상판중심의 위치벡터를 나타내며, $[R_b^T]$ 는 상판좌표계의 기저좌표계로의 변환행렬을 나타낸다. ${}^m{}_c \underline{r}$ 와 ${}^m{}_c \underline{r}^{(b)}$ 는 각각 기저좌표계와 상판의 지역좌표계에 대한 m 번째 상위접촉점의 위치벡터를 의미한다.

상위접촉점의 위치벡터(${}^m\underline{C}$)를 시간에 대하여 미분하면 다음 식으로 표현할 수 있으며

$${}^m\dot{\underline{C}} = \dot{\underline{u}}_i + \underline{\omega} \times {}^m{}_c \underline{r}, \quad (12)$$

여기서

$$\dot{\underline{u}}_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)^T, \quad (13)$$

$$\underline{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T, \quad (14)$$

$${}^m{}_c \underline{r} = ({}^m{}_c r_x, {}^m{}_c r_y, {}^m{}_c r_z)^T. \quad (15)$$

상위접촉점의 속도를 나타내는 위의 (12)를 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$${}^m\dot{\underline{C}} = [{}^mG_u^c] \dot{\underline{u}}, \quad (16)$$

여기서

$$[{}^mG_u^c] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & {}^m{}_c r_z & -{}^m{}_c r_y \\ 0 & 1 & 0 & -{}^m{}_c r_z & 0 & {}^m{}_c r_x \\ 0 & 0 & 1 & {}^m{}_c r_y & -{}^m{}_c r_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\dot{\underline{u}} = (\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T. \quad (18)$$

따라서 작업공간의 출력속도벡터 $\dot{\underline{u}}$ 와 상위접촉점 속도벡터 ${}^m\dot{\underline{C}}$ 사이의 관계는

$$\dot{\underline{C}} = [G_u^c] \dot{\underline{u}} \quad (19)$$

로 정의되며, 여기서

$$[G_u^c] = [[{}^1G_u^c]^T [{}^2G_u^c]^T [{}^3G_u^c]^T]^T. \quad (20)$$

각 다리를 구성하는 상위체인의 직렬기구학으로부터 m 번째 다리의 상위체인을 구성하는 관절들의 속도벡터(${}^m\dot{\underline{\theta}}$)와 상위접촉점 속도벡터 사이의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$${}^m\dot{\underline{C}} = [{}^mG_\theta^c] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}}, \quad (21)$$

(21)에서 왼쪽 아래첨자 u 는 상위체인에서의 관계임을 의미하며, $[{}^mG_\theta^c]$ 이 비특이 행렬이라고 가정하면, 다음의 역관계를 얻을 수 있다.

$${}^m\dot{\underline{\theta}} = [{}^mG_\theta^c]^{-1} \quad {}^m\dot{\underline{C}}. \quad (22)$$

세 다리의 상위체인에 대한 속도관계를 하나의 식으로 통합하면

$${}^u\dot{\underline{\theta}} = [{}^uG_\theta^c] \dot{\underline{C}} \quad (23)$$

로 정의된다. 여기서

$${}^u\dot{\underline{\theta}} = ({}^1\dot{\underline{\theta}}^T \quad {}^2\dot{\underline{\theta}}^T \quad {}^3\dot{\underline{\theta}}^T)^T, \\ [{}^uG_\theta^c] = \begin{bmatrix} [{}^1G_\theta^c] & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & [{}^2G_\theta^c] & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & [{}^3G_\theta^c] \end{bmatrix}.$$

4. 내부 기구학(Internal Kinematics)

하위 체인을 구성하는 상위 및 하위가지는 하위접촉점 (mD , $m=1\sim 3$)에 의하여 한 점에서 구속되어 다음과 같은 속도관계를 지닌다.

$${}^m\dot{D} = [{}^mG_\theta^D] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}} = [{}^mG_\theta^D] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}}, \quad (24)$$

여기서 $[{}^mG_\theta^D]$ 와 $[{}^mG_\theta^D]$ 는 각각 상위 및 하위 가지의 1 차 기구학적 영향계수(1-st order Kinematic Influence Coefficient)를 나타낸다. (24)로부터 상위 가지와 하위가지 사이의 속도관계는 다음과 같이 얻어진다.

$${}^m\dot{\underline{\theta}} = [{}^mG_\theta^D]^{-1} [{}^mG_\theta^D] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}} = [{}^mG_\theta^A] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}}, \quad m=1\sim 3. \quad (25)$$

상위체인의 첫 번째 관절(${}^m\dot{\theta}_1$)과 하위체인의 네 번째 관절(${}^m\dot{\theta}_4$)이 모터를 부착한 구동관절이다. 위의 (25)에서 구동관절에 해당하는 행을 선택하여 하나의 식으로 조합하면 구동관절의 속도벡터(${}^m\dot{\underline{\theta}}_A : {}^m\dot{\theta}_1, {}^m\dot{\theta}_4, m=1\sim 3$)와 상위체인의 속도벡터(${}^m\dot{\underline{\theta}}$) 간의 관계는

$$\dot{\underline{\theta}}_A = [G_\theta^A] \quad {}^m\dot{\underline{\theta}}, \quad (26)$$

로 정의되며, 여기서

$$[G_\theta^A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \underline{0} & \underline{0} \\ [{}^1G_\theta^A]_{1:} & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & 1 & 0 & 0 & \underline{0} \\ \underline{0} & [{}^2G_\theta^A]_{1:} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & 1 & 0 & 0 \\ \underline{0} & \underline{0} & [{}^3G_\theta^A]_{1:} \end{bmatrix}_{6 \times 9}, \quad (27)$$

$$\dot{\underline{\theta}} = [{}^1\theta_1 \ {}^1\theta_2 \ {}^1\theta_3 \ {}^2\theta_1 \ {}^2\theta_2 \ {}^2\theta_3 \ {}^3\theta_1 \ {}^3\theta_2 \ {}^3\theta_3]_{(9 \times 1)}^T \quad (28)$$

구동관절과 상위접촉점 사이의 속도관계는 (23)을 (26)에 대입하여 정리하면 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{\underline{\theta}}_A = [G_c^A] \dot{C} \quad (29)$$

여기서

$$[G_c^A] = [G_{c\theta}^A] [G_c^0] \quad (30)$$

마지막으로 작업공간에서의 출력속도벡터와 구동관절의 속도벡터 사이의 관계는 (19)를 (29)에 대입하여

$$\dot{\underline{\theta}}_{A(6 \times 1)} = [G_u^A]_{(6 \times 6)} \dot{\underline{u}}_{(6 \times 1)} \quad (31)$$

로 얻어진다. 여기서

$$[G_u^A] = [G_c^A] [G_u^c] \quad (32)$$

(31)에서 $[G_u^A]$ 가 비특이 행렬이라고 가정하면 시스템 자코비안(Jacobian)은 $[G_u^A]$ 의 역행렬로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{\underline{u}} = [G_u^A]^{-1} \dot{\underline{\theta}}_A \quad (33)$$

힘과 속도의 이중관계(duality relation)에 의하여 작업공간의 힘 벡터와 관절공간의 토크벡터 사이의 관계는

$$\underline{T}_{(6 \times 1)} = [G_u^A]_{(6 \times 6)}^T \underline{T}_{A(6 \times 1)} \quad (34)$$

로 정의되며, 여기서 $\underline{T}_{u(6 \times 1)}$ 와 $\underline{T}_{A(6 \times 1)}$ 는 각각 말단장치의 힘 벡터와 구동관절의 토크벡터를 나타낸다.

III. 기구학적 성능지수

햅틱 메커니즘을 설계함에 있어서 다양한 지수를 성능평가의 기준으로 활용할 수 있으며, 본 논문에서는 작업공간, 기구학적 등방성지수, 최대 힘 전달비 등을 사용하였다. 작업공간은 조작자가 시스템을 사용하여 작업할 수 있는 공간의 크기를 나타내며, 기구학적 등방성지수는 시스템의 말단장치가 작업공간에서 균일한 속도분포를 지니는 정도를 의미한다. 그리고 최대 힘 전달비는 모터 구동력이 작업공간의 말단장치로 전달되는 효율을 나타낸다.

1. 작업공간(Workspace)

햅틱 메커니즘에 있어 중요한 인자 중 하나는 작업공간이다. 매니플레이터의 작업공간은 말단장치의 방위각과는 상관없이 도달 가능한 작업공간(reachable workspace)과 말단장치가 도달할 수 있을 뿐 아니라 그 지점에서 모든 방향으로 임의의 방위각을 지닐 수 있는 자유 작업공간(dexterous workspace)으로 분류된다. 본 논문에서 설계기준으로 채택한 자유 작업공간은 다음 (35)로 정의되며, 상판의 방위각 범위는 다음 (36)과 같다. 사용자가 넓은 범위에서 작업할 수 있도록 넓은 작업공간을 지니도록 설계하는 것이 목적이다.

$$V = \int_V dV \quad (35)$$

$$-45 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 45, \quad -90 \leq \theta_3 \leq 90 \quad (36)$$

2. 자코비안 비례화(Jacobian Scaling)

일반적으로 햅틱 시스템의 말단장치는 사용자의 조작에 따라 공간에서 병진운동과 회전운동을 동시에 한다. 따라서 시스템의 자코비안(Jacobian)은 병진운동에 관계된 부분과 회전운동에 관계된 부분이 서로 다른 단위에 따라 정의되며, 이들 두 가지 운동을 함께 고려하여 일반적인 6 자유도 운동을 표현하여야 한다. 병진운동부분과 회전운동부분을 함께 고려하는 다양한 비례화(scaling)방법이 소개된 바 있다[10]. 본 논문에서는 기저좌표계 중심으로부터 주 작업공간의 중심까지의 거리를 의미하는 공칭길이(l_{N_i} : normal length)를 사용하는 자코비안 비례화 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 비례화된 자코비안은

$$[*G_c] = [S][G_c] \quad (37)$$

로 정의되며, 여기서 비례화 행렬[S]는 다음과 같다.

$$[S] = \begin{bmatrix} l/l_1 & 0 \\ 0 & l/l_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

3. 기구학적 등방성비(Kinematic Isotropic Index)

기구학적 등방성지수는 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{\min} (*G_{c_i}^*)}{\sigma_{\max} (*G_{c_i}^*)} \quad (39)$$

여기서, σ_{\min} 와 σ_{\max} 는 각각 비례화된 자코비안 행렬($*G_{c_i}^*$)의 최소 및 최대 특이값을 나타낸다. σ_i 가 단위값(unity)일 때 시스템의 말단장치가 모든 방향으로 동일한 속도 분포를 지니는 것을 의미한다. 작업공간 전 영역에 대한 평균적인 등방성 지수를 나타내는 전역등방성지수(Σ_i)는

$$\Sigma_i = \frac{\int_V \sigma_i dV}{\int_V dV} \quad (40)$$

로 정의되며, 전역등방성지수(Σ_i) 값이 클수록 시스템이 작업공간 전 영역에 대하여 좋은 등방성 특성을 지닌다. 따라서, 전역등방성지수(Σ_i)는 최대화되도록 설계하여야 한다.

4. 최대 힘 전달비 (Maximum Force Transmission Ratio)

최대 힘 전달비는 출력공간의 시스템의 말단장치에서 단위 힘을 내기 위하여 요구되는 구동 토크의 최대값을 의미하며, 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_f = \sigma_{\max} (*G_{c_i}^*) \quad (41)$$

σ_f 이 작은 값을 지닐 때 구동기에 작은 부하가 요구됨을 나타내며, 이것은 매니플레이터가 작은 구동기로 보다 큰 하

중을 지탱할 수 있음을 의미한다. 전 작업공간에 대한 σ_f 를 나타내는 전역최대힘전달비는

$$\Sigma_f = \frac{\int_v \sigma_f dV}{\int_v dV} \quad (42)$$

로 정의된다. Σ_f 가 작은 값을 지닐 때 구동기에 작은 부하가 부과되므로 최소화시키는 설계를 수행하여야 한다.

IV. 최적설계

제안된 햅틱기구의 성능을 최대화하는 설계를 위해 여러 개의 성능인자를 함께 고려하는 최적화 방법을 사용하였으며 유전 알고리즘을 이용하여 최적해를 구하였다.

1. 복합설계지수(Composite Design Index)

설계의 기준으로 사용되는 다양한 설계지수는 각기 다른 물리적 의미와 단위를 지닌다. 따라서, 다양한 설계지수들을 하나의 공통된 단위로 변환하여 동시에 고려하여야 하며, 본 연구에서는 복합설계지수(composite design index) 개념을 활용한 복합설계방식을 활용한다[8,18]. 이 방식은 각기 다른 단위를 지니는 설계지수들을 공통 단위로 변환시키는 정규화(normalization), 그리고 정규화된 설계지수들을 하나의 지수로 반영하는 합성(synthesis)의 두 과정으로 이루어진다.

최대화 시키고자 하는 설계지수인 작업공간(V)과 전역등방성지수(Σ_f)는 다음 두 식에 의하여 정규화시킨다.

$$\tilde{V} = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}, \quad (43)$$

$$\tilde{\Sigma}_{KSI} = \frac{\Sigma_{KSI} - (\Sigma_{KSI})_{min}}{(\Sigma_{KSI})_{max} - (\Sigma_{KSI})_{min}}, \quad (44)$$

여기서, 각 설계지수의 “~”는 공통단위계로 변환된 지수임을 나타낸다. 역으로 최소화 시키고자 하는 설계지수인 전역최대힘전달비($\tilde{\Sigma}_f$)는 다음 (45)에 의하여 정규화시킨다.

$$\tilde{\Sigma}_f = \frac{(\Sigma_f)_{max} - \Sigma_f}{(\Sigma_f)_{max} - (\Sigma_f)_{min}}. \quad (45)$$

정규화된 설계지수들을 하나의 통합된 지수로 만들기 위해 퍼지이론을 활용한 기구학적 복합설계지수(KCDI; kinematic composite design index)를 다음과 같이 정의한다.

$$KCDI = \min\{\tilde{V}, \tilde{\Sigma}_{KSI}, \tilde{\Sigma}_f\}. \quad (46)$$

여기서, 기구학적 복합설계지수(KCDI)는 주어진 기구학 파라미터 셋(set)에 대한 정규화된 다양한 설계지수들 중 최소값을 의미하며, 기구학적 복합설계지수(KCDI) 값이 최대일때의 기구학 파라미터 셋이 최적의 설계인자 임을 나타낸다.

2. 설계인자와 구속조건(Design Parameters and Constraint)

제안된 6 자유도 햅틱 기구의 기구학적 설계인자는 상판의 크기를 의미하는 상판의 반경 R_s , 각 다리를 구성하는 링크들의 길이를 나타내는 l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 , 하위모터(M2)의 중

심으로부터의 수평거리와 수직거리를 나타내는 R_{B2} 와 H_B 등이다. 설계인자와 그 구속조건은 표 1 에 도시하였다. 상위 모터의 위치를 나타내는 R_{B1}, l_1 과 l_2 길이의 합은 전체 시스템의 크기를 규정짓는 변수로서 실제시스템의 크기를 고려하여 상수로 정의하였다. 다른 기구학적 구속조건 또한 시스템을 제작함에 있어 고려되어야 할 관절의 크기 등을 반영하여 정의하였다.

표 1. 설계인자와 구속조건.

Table 1. Design parameters and constraints.

Constant Parameters	Length (mm)	
Motor Diameter	50	
R_{B1}	50	
$l_1 + l_2$	250	
Variable Parameters	Range of length (mm)	
	Minimum	Maximum
l_1	30	220
l_3	30	150
l_4	30	130
l_5	30	130
R_s	30	130
R_{B2}	30	70
H_B	40	100

3. 최적설계 결과(Optimization result)

유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하여 제안된 6 자유도 병렬형 햅틱기구의 비선형 기구학 최적화를 수행하였다 [9]. 햅틱 시스템의 설계파라미터 7 개에 대하여, (46)에 정의된 복합성능지수를 유전알고리즘을 활용하여 최대화하는 값을 구하는 것이다. (46)에 정의된 복합성능지수를 $f(x)$ 라 하고 설계파라미터를 $x_i (i=1,2,\dots,7)$ 라 하면, $f(x)$ 를 최대화하며 일정한 정밀도를 가지는 변수 x_i 를 구하는 문제가 된다. x_i 가 a_i 와 b_i 의 범위 내에 존재하고 n_i 개의 비트로 표현된다면, x_i 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$x_i = a_i + decimal(1001\dots 011_2)(b_i - a_i)/(2^{n_i} - 1), \quad (47)$$

여기서, $decimal(string_2)$ 는 이진 문자열의 십진수 값을 의미한다. x_i 를 포함하는 염색체는 $n = \sum_{i=1}^7 n_i$ 개의 길이를 갖는 이진문자열로 표현될 수 있다.

본 연구에서는 20 개의 모집단을 형성하고, 랜덤숫자 생성법에 의해 염색체를 구성하였다. 생성된 염색체에 대하여 기구학적성능지수(KCDI)를 구하고, 구해진 성능지수를 이용하여 조정값(fitness) 기반의 확률분포에 대하여 새로운 모집단을 구성한다. 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)연산에 의하여 새로이 생성된 모집단의 염색체를 변화시키는 과정의 반복을 통하여 최적의 설계인자를 구한다. 확률분포에 따른 새로운 모집단의 선택과정을 위해서는, 조정에 해당하는 개수의 슬롯을 갖는 룰렛휠(roulette wheel)을 이용하였다.

표 2. 최적화 결과.

Table 2. Optimization result.

Variable Parameters	Length (mm)
l_1	89.3
l_2	160.7
l_3	133.5
l_4	55.1
l_5	98.0
R_1	37.7
R_{B2}	50.0
H_B	50.0

표 3. 새로운 햅틱 기구의 규격.

Table 3. Specification of new haptic device.

Base Dimension	equilateral triangle width & height : 120mm
Dexterous Workspace	Max width : 200mm Max height : 100mm
Rotation Angle	$-45^\circ \leq \theta_x, \theta_y \leq 45^\circ$ $-90^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$
Output Continuous Force/moment	20N / 1Nm

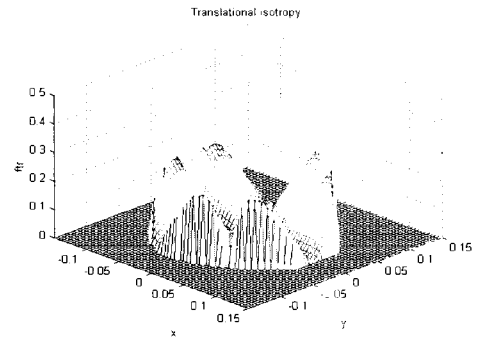
반복되는 과정 가운데 우성 염색체들이 중복되어 복제되고 열성염색체들은 도퇴되는 결과를 낳는다. 표 2 에 이상의 최적화과정을 통해 얻어진 최적설계의 결과를 나타내었다. 표 3 은 새로운 햅틱기구의 규격을 나타낸다.

4. 성능해석(Analysis of performance)

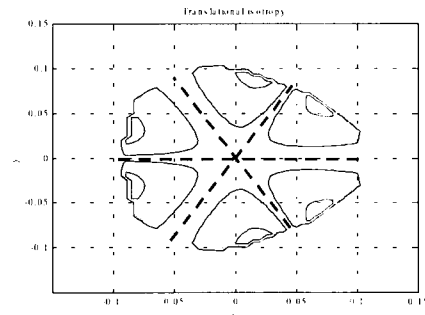
그림 9에Gosselin[16]에 의해 개발된 ‘Ultra-fast hybrid parallel manipulator’ 메커니즘의 대표적인 성능지수로서 등방성비 분포를 도시하였다. 상판중심이 지면으로부터 15cm 높이의 x-y 작업평면에서의 병진운동 및 회전운동에 대한 등방성비를 3 차원분포도와 등고선도로 나타내었다. 그림에서 상판이 구동기의 축과 수직인 평면 위에 위치할 때(굵은 점선) 등방성비가 매우 낮은 값을 지님을 알 수 있다. 이것은 Gosselin 메커니즘의 모든 구동기가 수평방향으로 배치되어 있기 때문에 나타나는 구조적 특이점(architectural singularity)이다[21].

그림 10 은 제안된 새로운 메커니즘의 다양한 기구학적 성능지수의 분포를 3 차원공간에 도시한 것이다. 그림 10(a)는 자유 작업공간(dexterous workspace)을 나타내며, 작업공간의 폭과 두께는 각각 약 20cm 및 10cm 이다. 그림 10(b)부터 그림 10(e)는 작업공간에서 상판 팔단장치가 지면으로부터 15cm의 위치에 있을 때의 다양한 성능지수분포를 나타낸다. 그림 10(b)와 10(c)는 각각 병진 및 회전운동에 대한 기구학적 등방성지수의 분포를 나타내며, 작업공간의 중심부에서 큰 값을 지닌다. 이는 작업공간의 가장자리보다 중심부에서 보다 균일한 속도분포를 지님을 의미한다.

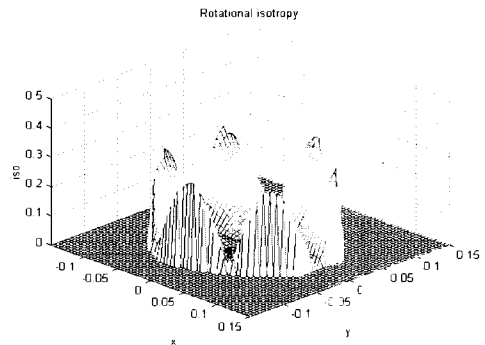
그림 10(d)와 10(e)는 각각 병진힘 및 회전 모멘트에 대한 최대 힘 전달비의 분포를 나타내며, 등방성비 분포와 달리 중심부에서 작은 값을 지닌다. 이는 출력 힘에 대한 구동기



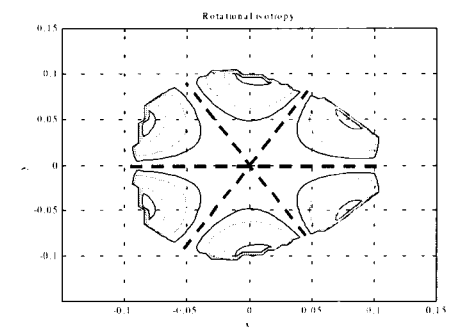
(a) 기구학적 등방성비(병진부분: 3 차원 분포도)



(b) 기구학적 등방성비(병진부분: 등고선도)



(c) 기구학적 등방성비(회전부분: 3 차원 분포도)

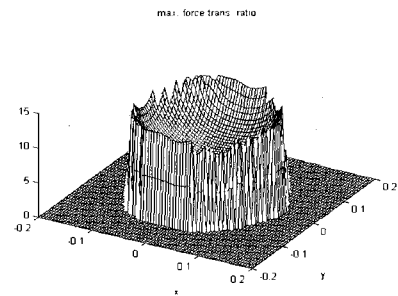
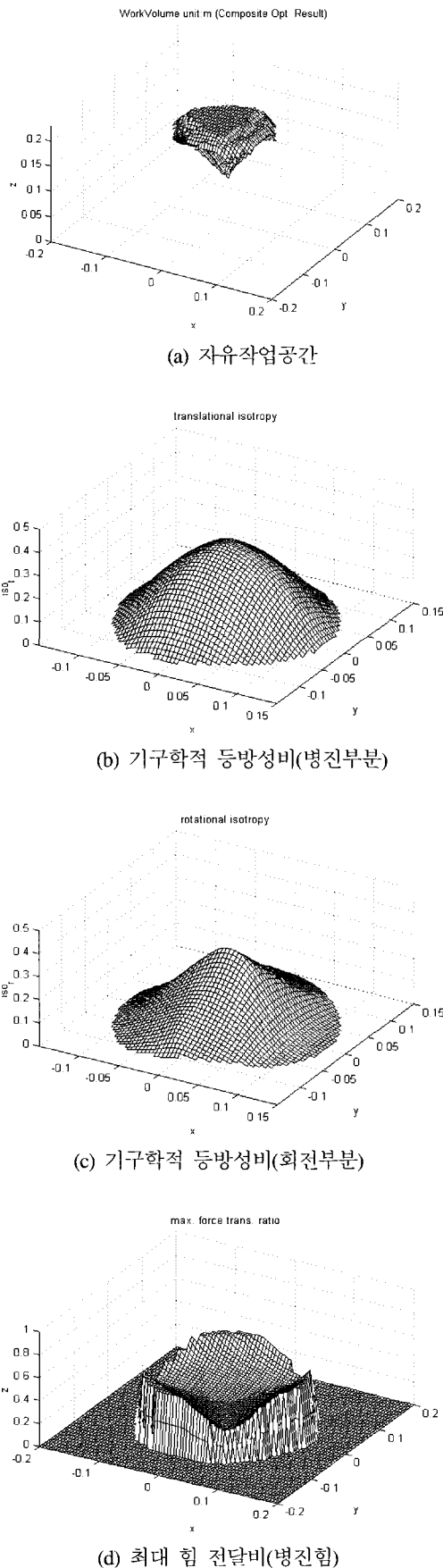


(d) 기구학적 등방성비(회전부분: 등고선도)

그림 9. Gosselin 모델의 등방성비 성능지수 분포.

Fig. 9. Distribution of isotropic index of Gosselin's model.

에서의 부담을 의미하므로 단위 출력력을 위하여 중심부에서 보다 적은 구동력이 필요함을 알 수 있다. Gosselin 모델과 달리 본 논문에서 제안하는 메커니즘은 작업공간의 전 영역에서 비교적 균일한 등방성비 분포를 지님을 알 수 있다.



(a) 자유작업공간

(b) 기구학적 등방성비(병진부분)

(c) 기구학적 등방성비(회전부분)

(d) 최대 힘 전달비(병진힘)

(e) 최대 힘 전달비(회전모멘트)

그림 10. 새로운 병렬형 햅틱기구의 성능지수분포.

Fig. 10. Distribution of performance indices of new parallel haptic device.

V. 구동기 용량결정

구동장치의 구동력은 시스템 전체의 성능을 크게 좌우하며, 본 장에서는 말단장치에 부과된 하중에 의해 구동기에 걸리는 최적용량을 산출한다.

말단장치에 부과된 일정한 힘에 의하여 각 구동장치에 걸리는 최대부하를 그 구동장치의 최적용량으로 정의하며, 다음의 최적화문제를 형성하여 해를 구한다[8,11]. 요구되는 최대하중 $(T_u)_{max}$ 에 대하여 다음 구속조건 하에서 각 구동장치에 걸리는 최대구동력을 구한다.

말단장치에 부과된 힘은 다음과 같이 주어지며

$$T_u = \|T_u\|_2 = (T_u^T W T_u)^{1/2} \leq (T_u)_{max}, \quad (48)$$

$$(\theta_i)_{min} \leq \theta_i \leq (\theta_i)_{max}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_p) \quad (49)$$

여기서, $(T_u)_{max}$ 는 말단장치에 주어진 외부 힘, θ_i 은 i 번째 관절의 회전각, N_p 는 모든 관절의 수를 나타낸다. 외부 힘에 의하여 부과된 구동관절 토크는 다음 (50)으로 나타낼 수 있다.

$$(T_{An})_{ext} = (T_u)_{max} ((G_A^u)^T [W]^{-1} [G_A^u]_n)^{1/2}. \quad (50)$$

결과적으로, n 번째 구동관절에 요구되는 구동용량은 $(T_{An})_{ext}$ 과 중력에 의한 부하 T_{An}^G 에 의하여 결정되므로 최적 구동용량은 다음과 같이 구하여진다.

$$T_{An}^M = \max \{ |T_{An}^G + (T_{An})_{ext}|, |T_{An}^G - (T_{An})_{ext}| \}. \quad (51)$$

표 4. 구동기 최적 용량.

Table 4. Actuator Size.

Payload at the top plate	Actuator Torque (Nm)	
	Force(20.0 N)	T_{A1}
T_{A2}		12.03
Torque (1.0 Nm)	T_{A1}	3.79
	T_{A2}	6.79
Force (20.0 N) + Torque (1.0 Nm)	T_{A1}	4.53
	T_{A2}	13.82

전 작업공간에 대한 T_{An}^M 의 최대값을 최적구동용량으로 정하였다. 말단장치에서 20N의 힘과 1.0Nm의 모멘트가 주어졌을 때 각 체인의 동일한 위치에 부착되는 구동기들의 최적용량은 표 4와 같다.

VI. 결론

모든 구동기를 지면에 부착시켜 적은 관성을 지니고 벽과 같은 딱딱한 느낌(hard contact feeling)의 생성에 적합한 병렬형 구조이며, 작업공간이 넓은 등의 장점을 지니는 새로운 형태의 6 자유도 병렬형 햅틱 메커니즘을 제안하였다.

제안된 메커니즘에 대하여 다양한 성능지수를 통합적으로 고려하는 최적화 방법을 통해 최적설계를 수행하였으며, 유전알고리즘을 활용하여 최적해를 구하였다. 또한 주어진 출력 힘을 생성하기 위한 구동기의 최적용량을 산출하였다.

참고문헌

- [1] R. C. Goertz, "Fundamentals of General-purpose remote manipulators," *Journal of Nucleonics*, Vol. 10, No. 11, pp. 36-42, 1952.
- [2] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, and M. G. Lipsett, "Design and evaluation of High-performance haptic interface", *Robotica*, Vol. 4., 1996.
- [3] T. Massie, K. Stalisbury, "Phantom haptic interface: A device for probing virtual objects", *ASME Journal of Dynamic System and Control*, New York, NY, pp. 295-299, 1994.
- [4] J. Berkelman, R. L. Hollis, and S. E. Salcudean, "Interacting with virtual environments using a magnetic levitation haptic interface", *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 117-122, Piscataway, NJ, 1995.
- [5] M. Bergamasco, et al., "An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications," *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, California*, pp. 1449-1454, 1994.
- [6] M. Ishii and M. Sato, "A 3D spatial interface device using tensed strings," *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 3, No. 1, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 81-86, 1994.
- [7] J. M. Hollerbach, "Some current issues in haptic research," *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 757-762, 2000.
- [8] J. H. Lee, B. -J. Yi, S. R. Oh, and I. H. Suh, "Optimal design and development of a Five-bar finger with redundant actuation," *Mechatronics*, Vol. 11, No.1, pp. 27-42, 2000.
- [9] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs," Springer, 1996.
- [10] L. J. Stocco, S. E. Salcudean, and F. Sassani, "On the use of scaling matrices for Task-specific robot design", *IEEE Transactions on Robotics And Automation*, Vol. 15, No. 5, October 1999.
- [11] M. Thomas, H. C. Yuan-Chou, and D. Tesar, "Optimal actuator sizing for robotic manipulators based on local dynamic criteria," *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol. 107, pp. 163-169, 1985.
- [12] L. - W. Tsai, G. C. Walsh, and R. E. Stamper, "Kinematics of a Novel three DOF translational platform," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3446-3451, 1996.
- [13] L. - W. Tsai, S. Joshi, "Comparison study of architectures of four 3 Degree-Of-Freedom translational parallel manipulators," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1283-1288, 2001.
- [14] J. W. Yoon, J. h. Ryu, "Design, fabrication, and evaluation of a new haptic device using a parallel mechanism," *IEEE Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 3, Sept. 2001.
- [15] http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme05_a.html
- [16] C. M. Gosselin, J. - F. Allan and T. Lalibert, "A new architecture for a High-performance 6-DOF parallel mechanism," *Proceeding of the IFToMM Tenth World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms*, Oulu, Finland, 20-24 June, pp. 1140-1145, 1999.
- [17] J. W. Kim, F. C. Park, S. J. Ryu, J. W. Kim, J. C. Hwang, C. B. Park, and C. C. Iurascu, "Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, Aug. 2001.
- [18] R. Kurtz and V. Hayward, "Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy," *IEEE Transactions On Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, Oct. 1992.
- [19] S. - K. Song, D. - S. Kwon, "New methodology for the forward kinematics of 6-dof parallel manipulators using tetrahedron configurations," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1307-1312, 2001.
- [20] J. H. Lee, K. S. Eom, B. - J. Yi, and I. H. Suh, "Design of a new 6-DOF parallel haptic device," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 886-891, 2001.
- [21] J. H. Lee, H. W. Kim, B.-J. Yi, I. H. Suh, "Singularity-free algorithms and design scheme for a new 6-DOF parallel haptic device," *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4229-4235, 2002.

이재훈

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 12 호 참조.

이병주

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 6 권 제 7 호 참조.

김형욱

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 12 호 참조.

서일홍

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 6 권 제 4 호 참조.