

# 가상환경과 촉감적 상호작용을 위한 햅틱 디바이스

정영훈\*(영남대 대학원 기계공학과), 이재원, 주해호(영남대 기계공학과)

## Haptic Device For Haptic Interaction With Virtual Environment

Young-Hoon Chung ( Mecha. Eng. Dept. Yeungnam Univ.)\* : haptics@hanmail.net

Jae-Won Lee ( Mechanical Eng. Dept., Yeungnam Univ.) : jwlee@yu.ac.kr

Hae-Ho Joo ( Mechanical Eng. Dept., Yeungnam Univ.) : hhjoo@yu.ac.kr

### ABSTRACT

In this paper, we determine the design criteria of haptic device considering the human haptic system and determine the design specifications. We developed a new 2DOF haptic device based on the specifications. It has the wide workspace, statically- balanced, constant inertia matrix, well-conditioned Jacobian matrix and so on. There also is not singularity point within workspace of the device We show that it has better performance than other 2DOF haptic device in the many aspects.

**Key Words** : virtual reality, haptic device, statically-balanced, human haptic system, closed kinematic chain, backdrive friction,

### 1. 서론

최근에 가상현실에 대한 관심이 고조되고 있고 그 응용이 여러 분야로 급속히 퍼져 가고 있다. 예를 들어 의료분야, 원격조정분야, 인간 복지분야, 오락분야 등이 있다. 가상현실 분야는 크게 3 가지 기술에 기반 한다. 시각적인 부분을 담당하는 컴퓨터 그래픽스 기술, 비전 기술과 청각적인 부분의 스트레오 음향 기술 그리고 촉감을 담당하는 햅틱 디바이스 기술로 나눌 수가 있다. 그래픽스 기술에 비해 촉감을 느끼게 하는 햅틱 디바이스에 관한 연구가 많이 이루어 지지 못했다. 촉감은 사람의 오감 중에서 유일하게 정보의 전달과 정보의 입수를 같은 시간과 같은 위치에서 서로 주고 받을 수가 있는 양방향성을 지니고 있다. 따라서 보다 진보된 고품질의 가상현실 시스템의 구축하기 위해서는 촉감을 반드시 부여해야 한다.

햅틱 디바이스의 역사를 살펴보면 1950 년대로 거슬러 올라간다. 마스터-슬레이브 시스템은 Goertz<sup>[1]</sup>에 의해서 개발되었다. 그 이후로 몇몇의 마스터 디바이스가 개발되었다. 빠른 운동과 넓은 작업영역에 초점을 두어 개발되었다. 그리고 소형화에도 초점이 맞추어 지기 시작하였다.

큰 작업영역을 위해서 골격 형태의 디바이스가 개발되었으나 빠른 응답을 기대 할 수가 없다.<sup>[2]</sup> 그래서 빠른 응답을 얻기 위해서 닫힌 기구연쇄(closed kinematic chain)를 이용 하였다. Berkelman<sup>[3]</sup>은 자기부상을 이용하여 빠른 응답을 실현 하였지만 작업 영역이 극도로 작은 단점이 있다. 닫힌 기구연쇄의 단점은 작업영역이 작다 것이다.

이러한 단점을 보완하기 위해서 기구학적으로 여유 자유도를 가지는 디바이스가 개발 되기도 했다<sup>[4]</sup>. 그리고

Hayward.V<sup>[5]</sup>는 닫힌 기구연쇄의 5-bar 병렬구조를 이용하여 2 자유도 햅틱 디바이스를 개발하였다. 하지만 여전히 작업 영역이 작기 때문에 그 응용이 다양하지 못한 것이 흠이다. 따라서 보다 우수한 햅틱 디바이스를 개발하기 위해서는 인간의 촉감 시스템(human haptic system)의 고려를 통한 햅틱 디바이스 설계 기준들을 정리할 필요가 있다. 그래서 본 논문에서는 그 설계 기준을 살펴보고 이에 알맞은 사양을 선택한 후, 기존의 디바이스보다 향상된 햅틱 디바이스를 제시한다.

### 2. 햅틱 디바이스 설계 기준

PHANTOM<sup>[6]</sup> 와 Hayward.V<sup>[5]</sup>이 대표적인 인간의 촉감시스템에 대한 충분한 고려를 통해서 개발된 시스템으로 볼 수가 있지만, 국내외에서 개발된 대부분의 햅틱 디바이스들은 인간의 촉감 시스템에 대한 충분한 고려 없이 개발되었다.

#### 2.1 이상적 햅틱 디바이스 설계 기준

이상적인 햅틱 디바이스 설계를 위해서 고려되어야 할 요소들을 다음과 같다.

- 역 구동 마찰이 작아야 한다 .
- 낮은 관성을 가져야 한다 .
- 정적으로 균형이 이루어져야 한다 .
- 백래시가 없어야 한다 .
- 높은 강성을 가져야 한다 .
- 큰 힘을 낼 수가 있어야 한다 .
- 넓은 작업영역을 가져야 한다 .
- 토크-힘 변환이 우수해야 한다 .

● **분해도가 높아야 한다 .**

위에서 언급한 9가지의 설계 기준들 각각은 절대적으로 완벽하게 만족할 수가 없다. 서로 상호 연관 관계를 가지므로 한 개의 설계 기준을 절대적으로 우수하게 만들게 되면 하나 이상의 설계 기준들이 변화하게 된다. 따라서 절대적 만족이 아닌 상대적 만족 조건으로 표현 해야 하며, 현재 실현 가능한 기술로 설계기준의 사양을 정해야 한다.

**3. 햅틱 디바이스 설계 기준의 사양**

**3.1 최대 힘 (F)**

표면의 강성을 촉감적으로 사람에게 묘사할 때, 모터가 포화영역에 도달 하게 되면 햅틱 디바이스는 묘사될 표면의 강성을 제대로 사용자에게 전달 하지 못하게 된다.

그래서 햅틱 디바이스가 발휘할 수는 최대힘을 얼마로 설정하는 것이 중요하다. 최대힘의 설정을 하기 이전에 인간의 손과 팔이 낼 수 있는 최대의 힘이 얼마인지 알아보는 것이 중요하겠다. 남자의 경우 길게 손가락은 최대 50N의 힘을 낼 수가 있고, 여자인 경우 16.5N이다.<sup>[9][10][11]</sup> 그리고 인간이 딱딱한 벽이라고 느끼게 되는 힘은 11-15N 정도면 충분하다. 따라서 햅틱 디바이스가 낼 수 있는 최대 힘을 15N으로 설정한다.

**3.2 역 구동 마찰력 (f)**

역 구동 마찰은 사용자에게 전달 되는 힘에 노이즈를 부가하게 되고, 사용자에게 피로감을 주기도 한다.

햅틱 디바이스가 발휘할 수 있는 최대 힘(F)과 역 구동 마찰력(f)의 비(F/f)가 크면 클수록 좋다.그러나 역 구동 마찰은 항상 존재 하고 이 마찰의 크기를 줄여야 한다.

역 구동 마찰이 존재하는 근원은 크게 3가지가 있다.

- 햅틱 디바이스를 구성하는 베어링의 마찰력.
- 토크 증폭을 위한 트랜스미션의 마찰력.
- 구동기(모터)에 존재하는 마찰력.

세가지 중에서 베어링과 트랜스미션에 의한 마찰력은 거의 무시할 만큼 쉽게 줄일 수가 있다. 따라서 시스템 전체의 역 구동 마찰력은 모터의 성능에 달려 있다. 현재의 모터기술은 최대 힘(F)과 역 구동 마찰력(f)의 비(F/f)의 상한(upper limit)을 결정짓는다. 현재의 모터기술로 실현 가능한 F/f는 30 라고 한다. 따라서 어떠한 모터를 선정하는 것 역시 중요하겠다. 본 논문에서는 그 비(F/f)가 우수한 맥슨 모터를 사용하였다.

**3.3 관성 (I)**

가상환경의 자유공간에서 햅틱 디바이스를 잡고 있는 사용자가 천천히 움직일 경우 디바이스의 관성은 그다지 문제가 되지 않는다고 할 수 있다. 하지만 사용자가 빠른 가, 감속 운동을 하게 될 때, 사용자는 외력이 작용하는 것과 같은 원하지 않는 느낌을 받게 된다. 그리고 햅틱 디바이스가 응답할 수 있는 속도에 제한을 주게 된다. 그래서 관성은 햅틱 디바이스 설계 기준에서 중요한 역할을 한

다. 그리고 디바이스의 관성은 피드백에 의해서 쉽게 감소 되지 않는다. 만약 관성을 힘/가속도 피드백을 통해서 감소시키려고 할지라도 힘과 가속도를 직접 측정하기 위해서는 부가적으로 센서를 부착해야 한다. 간접적으로 가속도를 측정하기 위해 모터의 각도측정에 사용되는 엔코더 신호를 이용할 수 있지만 정확한 가속도 추정이 어렵다. 일반적인 햅틱 디바이스의 관성행렬은 그 디바이스의 형상에 따라 그 행렬 값이 달라진다. 따라서 관성이 작은 구조의 개발과 형상에 관계없이 일정한 관성 행렬을 가지는 햅틱 디바이스의 개발은 중요하다.

외관상 사람에 의해서 느껴지는 질량은 관성에 비례한다. 즉, 햅틱 디바이스의 관성과 모터의 관성에 비례하게 된다. 또한 햅틱 디바이스를 잡고 특정한 작업을 할 때 사람이 외관상으로 느끼는 질량은 150g보다 작아야 한다.

**3.4 백래시**

햅틱 디바이스의 토크 증폭을 위해 사용되는 트랜스미션에서 백래시가 거의 없어야 한다. 백래시는 햅틱 디바이스를 통해 사용자에게 전달되는 힘에 불연속성을 발생시킨다. 백래시 영역에서 사용자는 힘을 전달 받지 못하다가 이 영역 밖으로 햅틱 디바이스를 움직이게 될 때, 다시 모터에 의해서 전달되는 힘을 받게 되어 사용자는 마치 딱딱한 물체와 다시 부딪히는 듯한 느낌을 받게 된다. 이런 백래시에 의해 생기는 비선형 특성은 쉽게 모델링 할 수 없기 때문에 힘 제어를 어렵게 하기도 하고 시스템을 불안정화 시키는 경향이 있다. 사람의 손과 팔꿈치 그리고 어깨의 각도 분해도는 Table.1과 같다.

Table 1 Joint angel for finger, wrist, shoulder<sup>[9]</sup>

Finger Joint	Wrist	Elbow	Shoulder (side)	Shoulder (front)
2.5°	2.0°	2.0°	0.8°	0.8°

백래시를 가지면 그 각도 에러는 햅틱 디바이스의 끝점에서 발생하게 되고, Table.1의 결과에 비추어보면 그 에러는 사람이 쉽게 인지할 수 있게 된다 이러한 이유로 디바이스는 백래시가 없어야 한다.

**3.5 강성**

햅틱 디바이스가 딱딱한 표면(rigid surface)을 묘사하기 위해서는 햅틱 디바이스의 강성과 토크 증폭을 위해 사용된 트랜스미션의 강성이 높아야 한다. 디바이스구조와 트랜스미션의 컴플라이언스는 햅틱 디바이스가 묘사할 표면의 강성에 상한선을 결정한다. 실험결과에 의하면 딱딱한 물체(rigid object)를 묘사하는데 필요한 최소한의 강성은 153에서 415 (N/cm)이다.<sup>[9]</sup> 따라서 햅틱 디바이스 시스템의 전체 강성은 이 값보다 커야 한다. 디바이스 전체의 강성(stiffness)과 대역폭(bandwidth)은 다음과 같은 세가지 강성에 의해서 결정된다.

- 햅틱 디바이스 구조의 강성
- 트랜스미션의 강성
- 제어 루프의 강성

디바이스 구조의 강성은 닫힌 기구연쇄를 채용함으로써 높일 수 있고, 트랜스미션의 강성은 텐던 구동방식중의 케이블(cable)을 이용하여 쉽게 강성을 높일 수가 있다. 따라서 디바이스 전체의 강성은 제어 루프의 강성에 많은 영향을 받게 된다. 제어 루프의 강성은 디바이스의 관성, 디바이스를 잡고 있는 사람손가락의 임피던스, 트랜스미션의 증폭비와 관계가 있지만 특히 샘플링 시간과 밀접한 관계가 있다. 샘플링 시간이 짧을수록 강성은 증가한다. 보통 디바이스의 고유주파수를 고려하여 이것의 한계를 설정해야한다.

### 3.6 작업 영역

햅틱 디바이스가 움직이는 작업영역이 가상물체가 표현된 공간의 작업영역보다 넓으면 좋지만 그렇지 못한 경우가 많다. 이러한 작업영역의 차이에 따라 디바이스 끝점의 위치 변위에 대한 민감도에 영향을 미치게 된다.

예를 들어, 디바이스의 작업 영역이 가상공간의 영역보다 작다고 할 때, 실제 디바이스의 끝점이 1cm 움직일지라도 가상의 공간에서는 2cm 움직인다는 것이다. 이럴 경우 표.1에서 보듯이 사람의 각 관절의 각도 분해도의 범위를 벗어나는 운동에 대해서 사람은 그 위치를 제어할 수 없게 된다. 햅틱 디바이스의 작업영역이 넓으면 좋지만 이것은 관성과 강성 등의 설계인자와 상관 관계가 있다. 따라서 디바이스 전체 크기에 비해서 작업영역이 넓은 디바이스 개발은 중요하다. 일반적으로 사람이 손목을 움직일 때 손가락에 의해서 그려지는 작업영역은 대략 16 by 16 by 16 이다. 팔과 어깨의 운동 범위는 훨씬 더 크다.

### 3.7 정적으로 균형

작업 영역내부의 모든 점에 대해서 정적으로 균형이 이루어져야 하는 것은 중요하다. 중력에 의해서 발생하는 외력은 사용자에게 전달 되어야 하는 힘을 왜곡시키게 된다. 중력에 대한 힘 때문에 장시간 사용할 때, 사용자에게 피로감을 주게 된다. 디바이스가 정적으로 균형이 이루어진다면 피로감이 훨씬 줄어들게 된다.

그리고 정적으로 균형이 이루어지면 중력으로 인해 발생된 힘이 없게 되므로 디바이스가 발휘할 수 있는 최대 힘의 장애요인을 제거할 수 있게 되고, 특히 외관상 느끼는 질량이 상당히 감소하게 된다.

### 3.8 토크-힘 변환

모터의 토크 발생으로 햅틱 디바이스 끝점에는 힘이 발생하게 되는데, 이 힘은 디바이스의 형상에 따라 달라진다. 기어와 같은 트랜스미션은 토크와 힘의 변환관계가 선형적이지만 햅틱 디바이스의 경우는 그 관계가 비선형적이다. 토크와 힘의 관계를 Jacobian 이라는 행렬로 표현할 수가 있는데, 햅틱 디바이스가 우수한 Jacobian 행렬을 가지기 위해서는 기구학적으로 우수한 구조를 지녀야 할 것이다. 이러한 것은 앞에서 언급한 디바이스가 발휘할 수 있는 최대 힘과 연관이 있다.

## 4. 햅틱 디바이스 설계 및 해석

위에서 살펴본 설계 기준의 사양에 충분히 고려하여 2 자유도 햅틱 디바이스를 개발 하였다. 가장 큰 특징은 정적 균형, 일정한 관성 행렬, 높은 강성, 넓은 작업영역, 우수한 힘 토크 변환이고, 특히 작업영역 내부에서 특이점이 없다는 것이다.

### 4.1 2 자유도 햅틱 디바이스 개발

본 논문에서 개발한 2 자유도 햅틱 디바이스(Fig.1(a))는 기존의 5-bar 기구학적 구조를 가진 2 자유도 햅틱 디바이스<sup>[6]</sup>(Fig.1(b))의 성능을 비교해 볼 때 기구학적, 동역학적 성능이 우수하다. 그리고 링크 길이를 최적화하는 방법이 아닌, 구동조인트(active joint) 위치를 변경함으로써 기구학적 성능을 향상 시켰고, 디바이스의 형상에 관계없이 일정한 관성을 가지며, 모든 작업 영역에 대해서 정적으로 균형을 이루도록 설계 하였다.

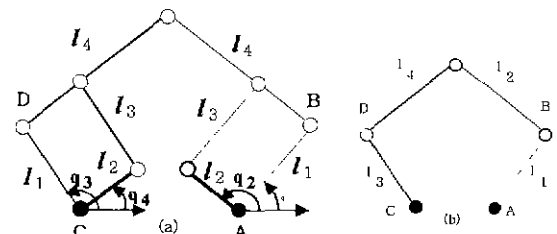


Fig.1 2 DOF Haptic Device

### 4.2 기구학 특성

기구학적 성능을 향상 시키기 위해서 구동기의 위치를 변경 하였다. Fig.1에서 구동 조인트는 채워진 원, 수동 조인트는 빈 원으로 표시하였다. Fig.1(b)에서 구동 조인트를 B,D로 변경하게 되면 기구학적 성능을 향상시킬 수 있다. Fig.1(a)과 같은 구조로 구동조인트의 위치를 바꾸었다. 즉, 입력 링크 2가 회전하게 되면 링크 4는 조인트 B,D를 중심으로 회전하게 되어 구동 조인트가 B와 D에 위치하는 것과 동등하다.

$$J_p \dot{P} = J_\theta \theta_a \quad (1)$$

$$\text{where, } J_p = \begin{bmatrix} l_1 C_1 & l_1 S_1 \\ l_1 C_3 & l_1 S_3 \end{bmatrix}, J_\theta = \begin{bmatrix} l_1 l_4 S_{1-2} & 0 \\ 0 & l_1 l_4 S_{3-4} \end{bmatrix}$$

식(1)에서, 디바이스의 특이점이 생기는 경우는 다음의 세가지 경우이다.

1.  $\det |J_p| = 0$  일 때 :  $\theta_1 = \theta_3$
2.  $\det |J_\theta| = 0$  :  $\theta_1 = \theta_2$  또는  $\theta_3 = \theta_4$
3.  $\det |J_p| = 0$  and  $\det |J_\theta| = 0$  :

첫번째의 경우는 작업 영역의 외부 경계에 존재하기 때문에 고려할 필요가 없다. 일반적으로 닫힌 기구연쇄를

가진 햅틱 디바이스의 경우 작업 영역의 내부에 특이점이 존재하는 것이 보통이다. 그리고 두번째는 링크 1과 2가 겹쳐지는 형상이기 때문에 실제의 디바이스에서는 생기지 않는다. 세번째 경우는 Fig.1(a)에서는 생기지 않는 형상이다. 이로 인해서 작업영역이 기존의 디바이스보다 훨씬 넓어졌고, 작업 영역 내부에 특이점이 존재하지 않는다.

### 3.3 동역학 특성

본 시스템과 같이 닫힌 연쇄기구를 가진 시스템의 동역학식은 다음과 같이 미분-대수 방정식으로 표현된다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \Phi_{\theta}^T \lambda = \tau^c \quad (2)$$

$$\Phi_{\theta}(\theta)\dot{\theta} = 0$$

$$\text{where, } M(\theta) = \begin{bmatrix} a & bC_{1-2} & 0 & 0 \\ bC_{1-2} & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & bC_{3-4} \\ 0 & 0 & bC_{3-4} & c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$a = I_1 + I_3 + m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2$$

$$b = m_3 l_2 l_{c3} + m_4 l_1 l_{c4}$$

$$c = I_2 + I_4 + m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2$$

일정한 관성 행렬과 정적균형( $G(\theta) = 0$ )을 이루기 위해서 식(4),(5)가 만족되면 된다.

$$b = m_3 l_2 l_{c3} + m_4 l_1 l_{c4} = 0 \quad (4)$$

$$m_1 l_{c1} + m_1 l_{c3} + m_4 l_1 = m_2 l_{c2} + m_3 l_2 + m_4 l_{c4} = 0 \quad (5)$$

식(4),(5)가 만족 되기 위해서, [6][7][8]에서 처럼 모터질량을 이용하여 링크 1,2의 질량중심 위치를 이동시키면 된다. 이렇게 함으로써 디바이스의 형상에 관계없이 정적 균형과 일정한 관성 행렬을 가지게 되며, 동시에 식(2)의 원심력,코리올리력 항인  $V(\theta, \dot{\theta})$ 은 제거된다. 디바이스의 동역학식이 간단해져 힘 제어기의 계산 부담을 줄이기 때문에 빠른 가,감속 운동에 대한 응답성을 향상시킬 뿐만 아니라 제어기의 강성을 증가시킬 수가 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 인간의 촉각 시스템의 충분한 고려를 통해 햅틱 디바이스 설계기준과 그 사양을 정리하였다.

이를 기반으로 새로운 2 자유도 햅틱 디바이스를 개발하였다. 그 특징으로써는 작업영역 내부에 특이점이 존재하지않기 때문에 기존의 디바이스<sup>[3]</sup>보다 훨씬 큰 작업영역 가진다. 이것은 끝질의 높은 위치 분해도와 힘-토크관계 우수하다는 것과 동등하다. 그리고 4-bar 링크 구조를 응용 하여 정적균형과 디바이스의 형상에 관계없이 일정한 관성 행렬을 가지므로 힘 제어기설계의 용이성과 제어기의 강성을 높여 디바이스 전체의 강성을 높일 수 가

있다. 그리고 텐던(tendon) 구동 방식중 하나인 케이블(cable)방식 의한 토크 증폭을 통해서 최대 힘 능력과 백래시를 제거 할 수가 있다

### 참고문헌

1. R.C.Goertz, "Fundamentals of General-Purpose Remote Manipulators," *Nucleonics*, Vol. 10, 11, pp.36-42, 1952
2. M.Bergramasco, et al., "An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications," 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1449-1454
3. P.J.Berkelman, S.E.Salcudean, "Interacting with Virtual Environments Using a Magnetic Levitation Haptic Interface," 1992, Proc. Of the IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp. 889-896,
4. V. Hayward, "Toward a Seven Axis Haptic Device," 1995, Proc. Of the IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp. 133-139
5. Hayward, V., Choksi, J. Lanvin, G. Ramstein, C. 1994. "Design and multi-objective optimization of a linkage for a haptic interface," In *Advances in Robot Kinematics*. J. Lenarcic and B. Ravani (Eds.). Kluwer Academic. pp. 352-359.
6. T.H.Massie, J.K.Salisbury. "The PHANToM Haptic Interface: A device for probing Virtual Objects," Proc. Of the 1994 ASME Int. Mechanical Engineering Exposition and congress, pp. 259-301
7. J.P.Karidis, G.MCVicker, J.P.Pawletko, "The Hummingbird Minipositioner-Providing Three-Axis Motion At 50G's With Low Reactions" Proc. Of the 1992 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 685-692
8. L.C.Zai, L.F.Durfee, D.G.Manzer, J.P.Karidis. "Control of a Hummingbird Minipositioner With a Multi-Transputer MARC Controller" Proc. Of the 1992 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation,
9. Hong Z.Tan, Srinivasan MA, Eberman, B and Cheng, B, "Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces," in *Dynamic Systems and Control*, Vol. 1, Ed: C. J. Radcliffe, DSC-Vol.55-1, pp. 353-359, ASME, 1994
10. Hong Z.Tan. X.D.Pang, Nat Durlach, "Manual Resolution of length, force, and compliance In *Advances in Robotics*" Proc. Of the ASME Winter Annual Meeting, 1992, pp. 13-18
11. Srinivasan MA, "Virtual Haptic Environments: Facts Behind the Fiction," Proc. Of the Eighth Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems, Center for Systems Science, Yale University, New Haven, June, 1994