

# 햅틱스(Haptics)

## Haptics Interface



# 에이치 브이알

HVR Co., Ltd

[www.hvr.co.kr](http://www.hvr.co.kr)

[Haptic@hvr.co.kr](mailto:Haptic@hvr.co.kr)

## Haptic (1/2)

### ■ 햅틱이란?

- ✓ “만지다” 라는 그리스어인 “Haptesthai”에서 유래된 “Sense of Touch”.
- ✓ 촉감(Sense of Touch)에 기반된 또는 연관된 힘의 총칭:
  - ❖ 피부에 적용된 힘인 촉각(Tactile)과 관절 및 근육에 적용된 역감(Kinesthesia)으로 구성.
- ✓ “시스템(Machine)과 상호작용(Interaction)하는 촉감의 사용”으로 확장.

### ■ 햅틱이 왜 흥미롭고 중요한가?

- ✓ 원초적인 감각 : Primal.
- ✓ 직관적 감각 : Intuitive.
- ✓ 생활 구석구석에 스며 있는 감각 : Pervasive.
- ✓ 풍부한 표현 : Expressive.
- ✓ 미 개척 분야 : Unexplored.



횡적인 움직임  
(텍스처)



압력  
(단단함)



정적 접촉  
(온도)



지지하지 않고 떠받치는 힘  
(무게)



둘러싸인 영역  
(전체적인 형상)  
(볼륨, 체적)



외곽 추적  
(전체적인 형상)  
(정확한 형상)



Susan Lederman and Roberta Klatsky

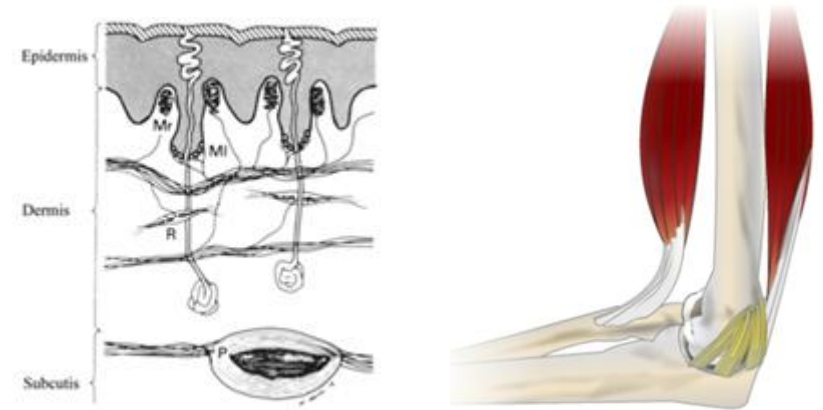
### ■ 촉각의 본질적인 특성은 연결:

- ✓ 손을 사용하여 모든 물체를 구성하는 재료, 질감 및 모양을 느끼면서 세상을 탐색하고 이해 함:
  - ❖ 우리의 촉각은 이러한 물체의 경도, 부드러움, 연성 또는 강성에 대한 다양한 정보를 제공하며, 이를 조작하는데 필요한 노력을 식별하는데 도움이 됨.
- ✓ 촉각(Sense of touch)은 만질 수 있는 환경의 상호작용에 대한 다양한 정보를 제공하여, 개체를 인식하고 개체를 조작하는데 필요한 작업을 식별하는데 도움이 되므로 시각적 피드백 만큼이나 중요 함.

## Haptic (2/2)

### ■ Haptic Information:

- ✓ 피부에 적용된 힘인 촉각(Tactile) 및 관절과 근육에 적용된 정보(Kinesthesia)로 구성된 정보의 총칭.
- ✓ Tactile Information:
  - ❖ 피부에 전달되는 느낌에 관련된 정보:
    - 진동, 압력, 온도 및 신경전기자극 등
  - ❖ 상대적으로 작은 **단방향성** 정보 전달.
- ✓ Kinesthetic 또는 Force Feedback Information:
  - ❖ 근육 감각(Kinesthesia)에 관련된 정보:
    - 물체의 질량, 딱딱한 정도, 형상, 위치 및 움직임 등
  - ❖ 상대적으로 보다 큰 힘으로 위치 및 움직임 등의 **양방향성** 정보 전달.



### ■ Haptic Interface:

- ✓ Tactile Device 또는 Tactile Display:
  - ❖ 상대적으로 작은 **단방향성** 힘으로  
표면의 무늬, 거칠기 등의 질감(Haptic Texture) 표현.
  - ❖ 촉각 인터페이스에 가해지는 힘을 측정하는 촉각 센서를 용합.
- ✓ Kinesthetic 또는 Force Feedback Device:
  - ❖ 상대적으로 보다 큰 힘으로 위치 및 움직임의 **양방향성** 힘으로  
힘 피드백(Force / Torque feedback),  
움직임 제약(Motion constraints) 등을 표현.
- ◆ 촉각을 통해 사용자에게 디지털 정보를 전달하는 햅틱 장치라고도 하는  
고 정밀 포스 피드백 인터페이스를 설계 및 제작:
  - 햅틱 장치는 모든 형태의 재료에 대한 곡률, 강성 및 텍스처 속성을  
매우 정확하게 렌더링 할 수 있으므로  
이 촉각 형태의 상호 작용은 복잡한 2D 및 3D 응용 프로그램과의  
사용 및 상호 작용의 용이성을 크게 향상 시킴.



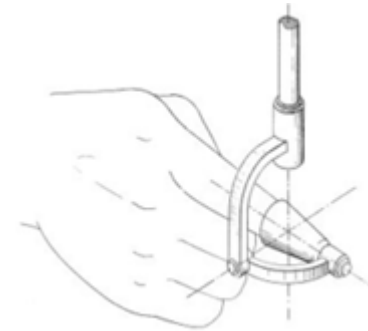
## Haptic의 간략한 역사 (1/2)

### ■ Human Haptic:

- ✓ 인간의 촉감 인식 및 조작에 관심.
- ✓ 사람의 실제 촉감(Active touch by human)을 심리학적 측면에서 연구.
- ✓ 정신물리학자(Psychophysicist):
  - ❖ 1890년 Haptic 용어 등장.

### ■ Machine Haptic:

- ✓ 초기 원격 조작(Teleoperation)은 기구적 링크로만 연결, 가까운 거리, 전기적 신호/파워를 가지고 제작:
  - ❖ 1954년 Argonne National Laboratory에서 방사성 물질 처리.
- ✓ 원격 작업, 로봇틱스 및 장애인을 위한 장치 개발 연구.
- ✓ 로봇 팔과 손에 연관된 촉감에 관심:
  - ❖ 처음에는 자율 로봇 구축에 관심이 있었던 연구자들은 촉각 기능을 갖춘 손재주 로봇 손을 구축하는 것이 처음에 기대했던 것보다 훨씬 더 복잡하고 미묘한 도전이라는 사실을 발견.



### ■ Computer Haptic:

- ✓ 컴퓨터 중개된 촉감에 관심.
- ✓ 가상 환경과 Machine이 포함된 Human-Machine Haptic 인터페이스 연구.
- ✓ 시청각 위주의 가상현실에 촉감이라는 새로운 패러다임 등장.
- ✓ 최초 상업용 햅틱 장비인 PHANTOM 발표:
  - ❖ 1993년 SensAble.
  - ❖ 컴퓨터에서 가상물체를 생성하고, 가상물체를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어.
- ✓ 멀티 모달(Visual + Aural + Haptic) 환경에 대한 개발.



## Haptic의 간략한 역사 (2/2)

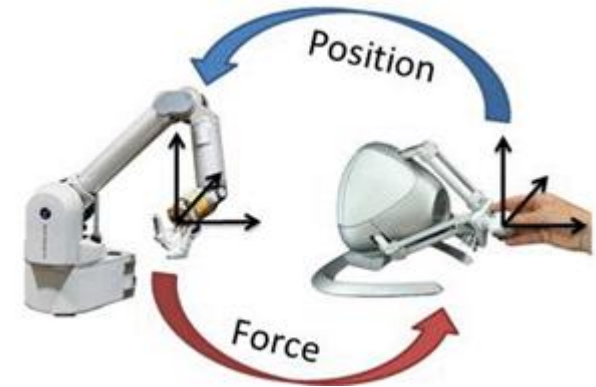
### ■ 2000년 이후:

- ✓ 2001년 : ForceDimension사에서 병렬 역감(Parallel Force Feedback) 디바이스인 **delta.3** 발표.
- ✓ 2006년 : 한센 메디컬 Sensei 로봇 시스템 FDA 인증, **최초의 의학적으로 인증된 햅틱 인터페이스** 출시.
- ✓ 2007년 : Novint사에서 최초의 소비자용 3D 터치 디바이스인 **Falcon** 발표(단종).
- ✓ 2007년 : Entact 사에서 **W5D** 발표(단종).
- ✓ 2010년 : Sigma.7 햅틱 장치를 DLR에서 설계한 MIRO 수술 로봇 시스템에 통합.
- ✓ 2011년 : Magnetecs는 MIS를 위해 로봇 카테터 유도 제어 및 이미징(CGCI) 시스템에 **Omega.3** 햅틱 장비를 통합.
- ✓ 2013년 : 두 대의 Omega.7 햅틱 장비로 작동하는 뇌 수술용 MRI 호환 로봇인 **NeuroArm**의 첫 번째 임상 실험을 수행.
- ✓ 2014년 : Geomagic SensAble사에서 소비자용 **Touch 3D 스타일러스** 햅틱 디바이스 발표(단종).
- ✓ 2015년 : Medrobotics는 ENT 어플리케이션 용 **Flex** 로봇 시스템에 대한 **CE 및 FDA 승인** 받음
- ✓ 2016년 : 인공 지능 및 햅틱 피드백 시스템으로 구동되는 **수중 로봇인 OceanOne**을 위한 햅틱 장치를 제공.
- ✓ 2019년 : 우주용 Sigma.7 햅틱 장비 인증, **국제 우주 정거장(ISS)에서 지구에 위치한 로봇 조작기를 원격조정.**
- ✓ 2020년 8월 : 엔터테인먼트를 위한 고 해상도 햅틱 제어 및 렌더링 기술을 출시.  
이 새로운 기술을 통해 게임 개발 스튜디오는 애플리케이션에 초현실적인 힘 피드백 기능을 쉽게 통합할 수 있음.
- ✓ 2021년 11월 : ISS에서 sigma.7을 사용하여 로봇 팔을 원격 조작할 때의 압력과 촉각을 재현하는 **PILOTE** 실험의 일환으로 사용.  
sigma.7은 우주에서의 2년 동안 4억 2천만 킬로미터에 걸쳐 지구 주위를 10,000회 이상 여행.
- ✓ 2022년 4월 : sigma.7과 lambda.7 햅틱 디바이스를 모두 지원하는 양손 조작형 햅틱 인터페이스 콘솔인 햅틱 워크스테이션을 출시.
- ✓ 2023년 5월 : 시계 디자이너를 위한 차세대 햅틱 시뮬레이터인 **BezelSim**을 소개.
- ✓ 2024년 : Haply Robotics, Inverse 3 정밀 햅틱 컨트롤러 CES2024 최고혁신상 수상.
- ✓ 2025년 : Haply Robotics, Miniverse 3 터치 지원 3D 마우스 CES2025 최고혁신상 수상.
- ✓ 2025년 7월 : IEEE World Haptics 2025, 수원 컨벤션 센터.

## Haptics = Haptic Interface + Haptic Rendering

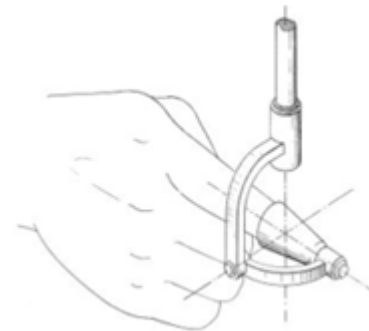
### ■ Haptic Interface:

- ✓ 가상 오브젝트와 물리적인 상호작용을 수행.
- ✓ 햅틱 디바이스, 작업 환경(실제, 가상 및 원격) 및 컨트롤러 등으로 구성:
  - ❖ 힘의 입 출력을 위한 물리적 장치인 햅틱 디바이스(또는 디스플레이)를 이용하여, 작업 환경(실제, 가상 및 원격)에서 햅틱 렌더링 되어 있는 가상의 사물에 대해, 실제 존재하는 물체를 처리하는 것처럼 만들거나 조작 및 변형 등을 수행.
- ✓ Tactile Device(또는 Tactile Display).
- ✓ Force Feedback(또는 Kinesthetic) Device:
  - ❖ Impedance 햅틱 디바이스:
    - 위치(Position) 센싱, 힘(Force 렌더링) 생성.
  - ❖ Admittance 햅틱 디바이스:
    - 힘(Force) 센싱, 위치(Velocity 렌더링) 생성.



### ■ Haptic Rendering:

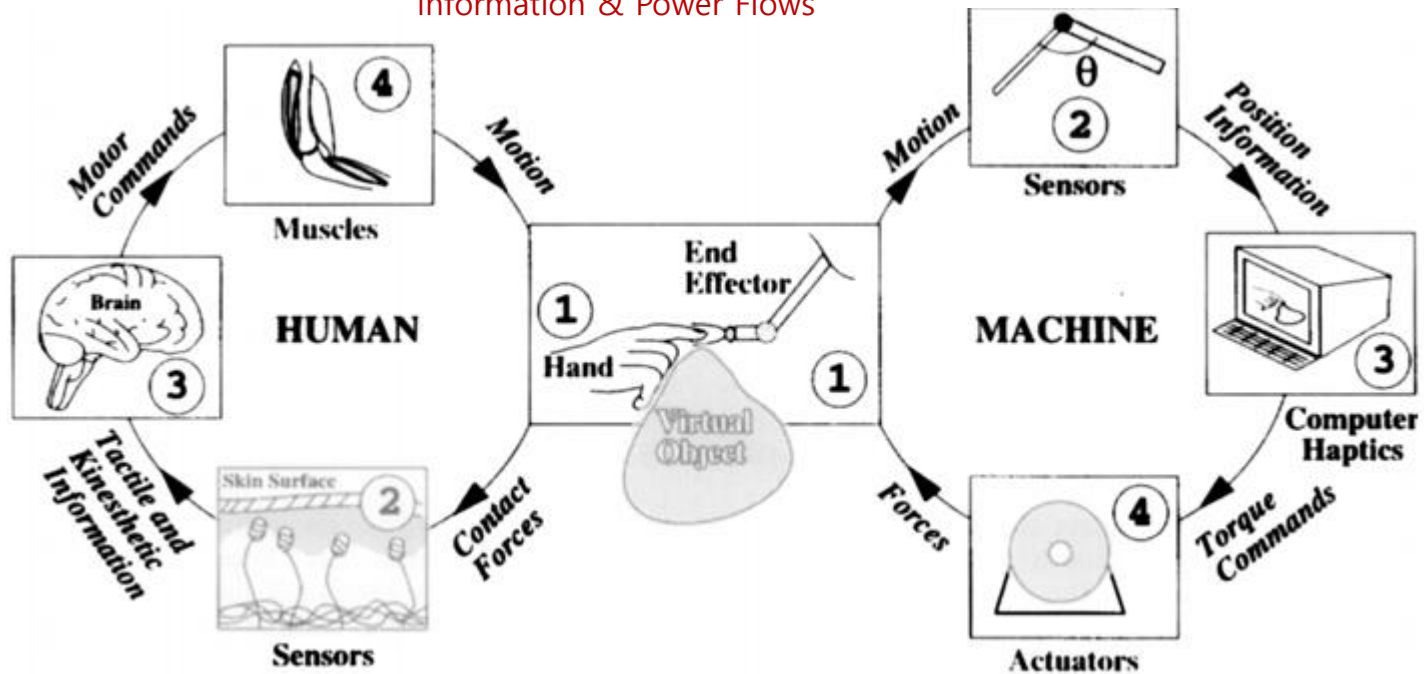
- ✓ 사실적인 촉감 생성 또는 재현:
  - ❖ 햅틱기술이 적용된 작업 환경에서 가상사물이 실제 존재하는 것처럼 느낄 수 있도록, 사람의 촉감 메커니즘과 가상의 사물에 대한 물리적 특성 등을 고려하여, 햅틱 디바이스로 가상의 사물과 상호작용하는 동안 사실적으로 느낄 수 있는 사실적인 촉감 발생 과정.
- ✓ Force Feedback(Kinesthetic) 햅틱 렌더링:
  - ❖ 도구(Tool)에 중재된 상호 작용:
    - 시스템은 도구에 접촉된 힘 만을 렌더링.



## Haptics Interaction

- 햅틱은 촉각을 통해 디지털 정보를 전송하는 새로운 기술:
  - ✓ 손으로 조작하는 형태의 상호작용은 힘, 진동 및 동작(Motion)을 사용자에게 적용하는 햅틱 장치라고하는 작은 작동 인터페이스를 사용하여 이루어짐.
- 접촉(Touch)을 통한 물리적 상호작용:
  - ✓ 실제, 가상 및 원격 환경에 촉감(Sense of Touch)을 추가.
- 역감 디바이스(Kinesthetic 또는 Force feedback Device)의 상호작용:
  - ✓ 유일한 양 방향성(Bidirectional) 감각.
  - ✓ 대칭적인(Symmetric) 햅틱 상호작용 제어 루프.
  - ✓ Tactile 정보 + Kinesthetic 정보.

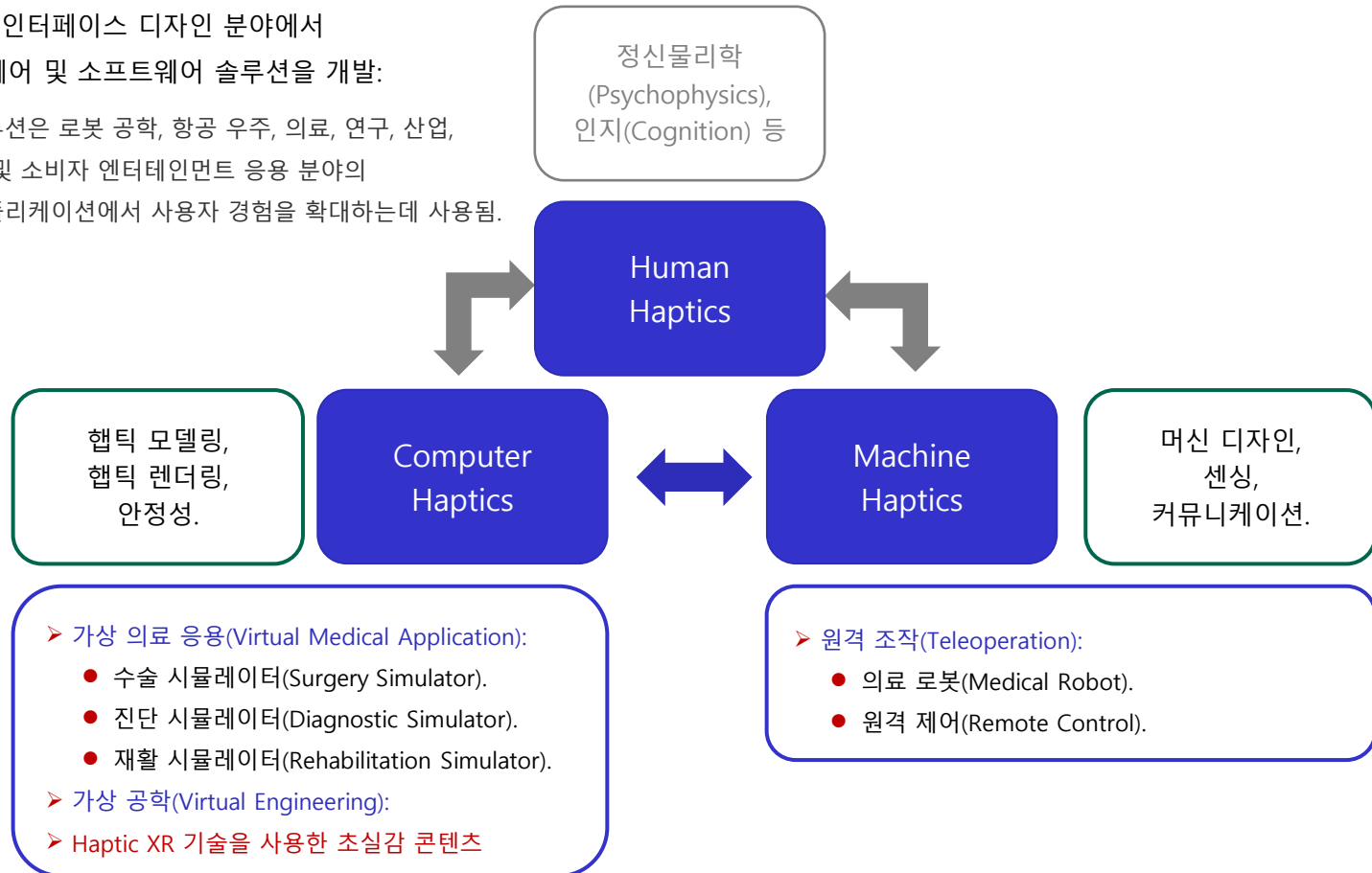
### Information & Power Flows



CS277 - Experimental Haptics, Stanford University, Spring 2014

## Haptics 연구 분야

- 햅틱 렌더링 알고리즘 및 사용자에게 보다 손쉽고 빠른 Human-Machine Haptic 인터페이스 연구:
  - ✓ 터치를 통한 정보 획득 및 오브젝트 처리 및 인터페이스 연구.
- 촉감 생성과 시각, 청각 및 촉각의 융합 표현 기술을 연구:
  - ✓ 현재의 역감 디바이스의 개발은 성숙 단계 이고, 햅틱 디바이스 개발은 정교한 질감 제시 디바이스 및 사용자 경험을 극대화하는 촉감 기술 구현 알고리즘에 연구가 집중됨.
- 햅틱 및 휴먼 인터페이스 디자인 분야에서 맞춤형 하드웨어 및 소프트웨어 솔루션을 개발:
  - ✓ 이러한 솔루션은 로봇 공학, 항공 우주, 의료, 연구, 산업, 헬스 케어 및 소비자 엔터테인먼트 응용 분야의 다양한 애플리케이션에서 사용자 경험을 확대하는데 사용됨.



## Haptics 응용 분야

### 가상 의료 응용(Virtual Medical Application):

- 수술 시뮬레이터(Surgery Simulator).
- 진단 시뮬레이터(Diagnostic Simulator).
- 재활 시뮬레이터(Rehabilitation Simulator).

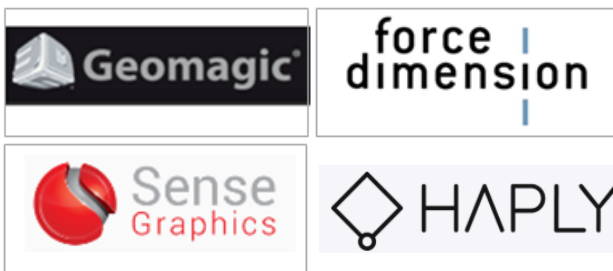
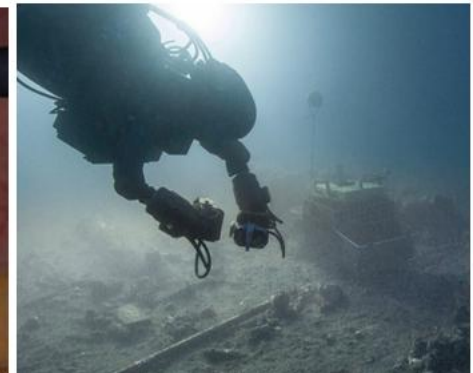
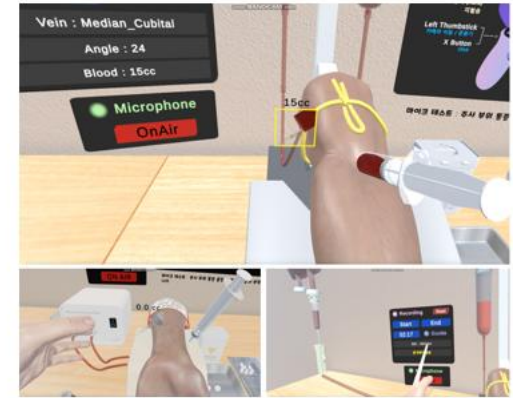
### 원격 조작(Teleoperation):

- 의료 로봇(Medical Robot).
- 원격 제어(Remote Control).

### 가상 공학(Virtual Engineering):

- 가상 프로토타이핑(Virtual Prototyping).
- 가상 목업(Virtual Mock-up).
- 교육, 훈련 및 기술 평가.

### Haptic XR 기술을 사용한 초실감 콘텐츠.



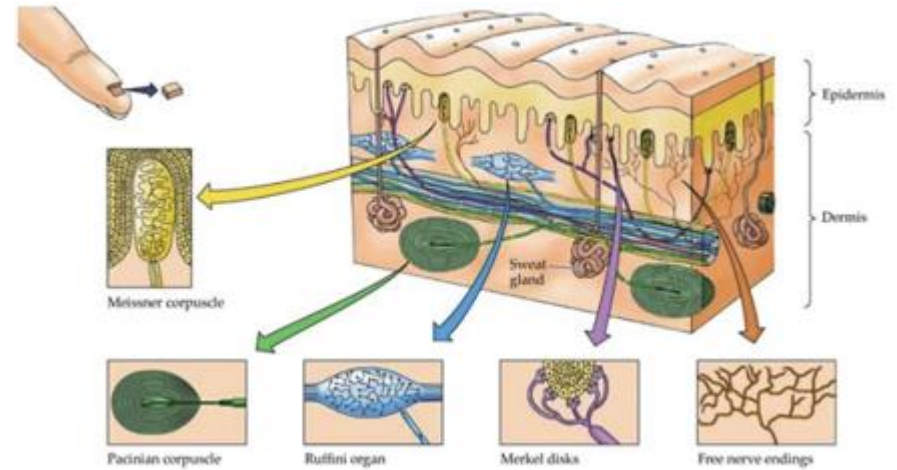
## Haptic Device

### ■ Tactile Device(또는 Tactile Display):

- ✓ 제한적인 자극으로 피부에 느낌 전달:
  - ❖ 진동, 압력, 온도 및 신경전기자극 등
- ✓ 상대적으로 작은 단방향성 힘으로  
 표면의 무늬, 거칠기 등의 질감(Haptic Texture) 표현:
  - ❖ 진동 및 질감 인식.
  - ❖ 압력 및 피부 스트레칭(파지 된 물체).
  - ❖ 양 방향성 질감 제시 디바이스 연구가 다수의 연구실에서 진행 중.

### ■ Force feedback(또는 Kinesthetic) Device:

- ✓ 근육 감각(Kinesthesia), 힘줄 및 관절에 관련된 정보 전달:
  - ❖ 물체의 질량, 딱딱한 정도, 형상, 위치 및 움직임 등의 정보.
- ✓ 상대적으로 보다 큰 힘으로 위치 및 움직임의 **양방향성** 정보 전달:
  - ❖ 힘 피드백(Force/Torque feedback),  
 움직임 제약(Motion constraints) 등의 정보.
  - ❖ 사용자와 햅틱 장비간의 상호작용.
- ✓ 햅틱 인터페이스에서의 바람직한 특성:
  - ❖ 좋은 동적 범위 및 대역폭.
  - ❖ 가상 자유 공간에서 자유로운 움직임:
    - 낮은 관성(Inertia), 낮은 마찰(Friction),  
 투명성(Transparency) 등
  - ❖ 단단한 가상 물체는 딱딱한 느낌이 있어야 함:
    - 힘 피드백을 제공하는 모터가  
 적절한 강성을 제공 할 수 있어야 함.
  - ❖ 제약 조건은 엄격히 준수.



<https://www.researchgate.net/figure>



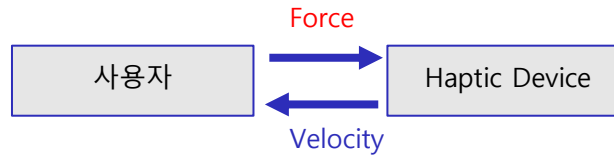
## Force feedback(또는 Force feedback) Device

### ■ Admittance 햅틱 디바이스:

- ✓ 힘(Force) 센싱, 위치(Velocity 렌더링) 생성.
- ✓ 힘 센서가 필요하여, 고가의 생산 비용.
- ✓ 힘의 높은 범위 제공:
  - ❖ HapticMaster : 250N.
- ✓ Force:
  - ❖ 전기적 시스템 : 전압.
  - ❖ 사용자가 다양한 Force로 입력을 주면 햅틱 디바이스는 Velocity Feedback.

Admittance Type :  $Y(s)$

$$I(s) = Y(s) E(s)$$

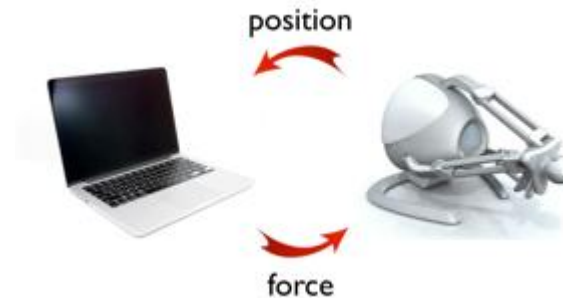
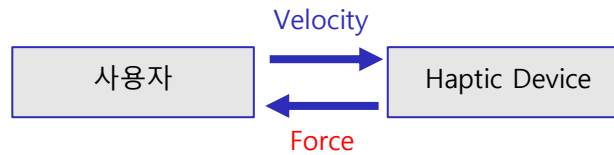


### ■ Impedance 햅틱 디바이스:

- ✓ 위치(Position) 센싱, 힘(Force 렌더링) 생성.
- ✓ 힘 센서가 필요 없어, 저렴한 구축비용.
- ✓ Back-Drivable로 되돌아가기 구동이 가능함.
- ✓ Velocity:
  - ❖ 전기적 시스템 : 전류.
  - ❖ 사용자가 다양한 Velocity로 입력을 주면 햅틱 디바이스는 Force Feedback.

Impedance Type :  $Z(s)$

$$E(s) = Z(s) I(s)$$



## Force Feedback (또는 Kinesthetic) Device 메커니즘

### ■ Serial Type:

- ✓ 넓은 작업영역.
- ✓ 기구학적으로 정 위치 해석 및 동역학적 해석이 용이.

### ■ Parallel Type:

- ✓ 여러 개의 링크가 병렬로 연결 되어 상대적으로 큰 출력과 안정된 구조.
- ✓ 관절에서 발생하는 오차의 누적 최소화 및 물리적 관성 최소화.

#### ◆ 특이점:

- 움직이는 자유도(DOF)가 줄어들어 정상적인 제어가 불가능한 지점.

#### ◆ 정 위치 해석:

- 각 관절의 위치로부터 최종적인 조작 장치의 위치를 계산하는 것.



목록	Serial Type	Parallel Type
작업공간(Workspace)	넓음	좁음
정 위치 해석(Forward kinematics)	단일 해(Unique solution)	어렵다
역 위치 해석(Inverse kinematics)	복수 해(Multi-Solution)	단일 해(Unique solution)
특이점 분석(Analysis of Singularity)	간단	복잡
강성(Stiffness)	작음	큼
관성(Inertia)	큼	작음

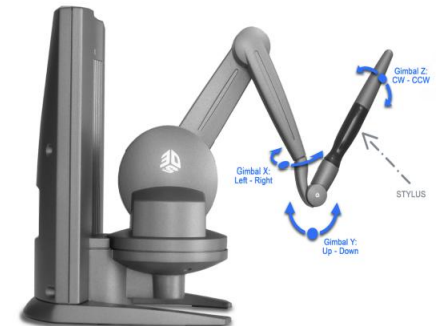
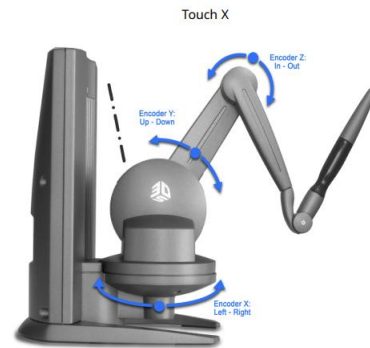
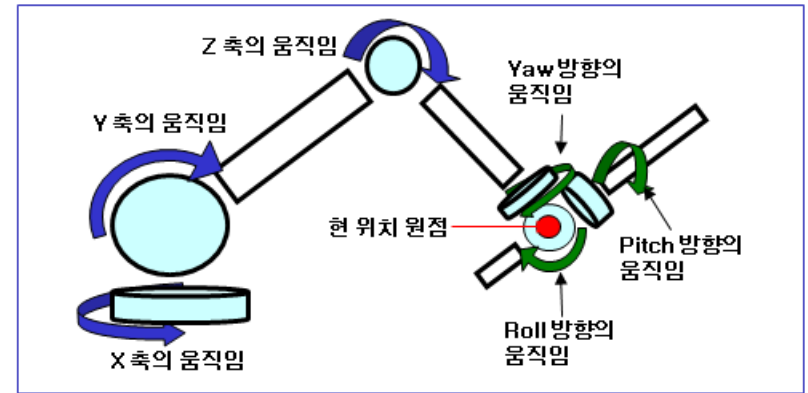
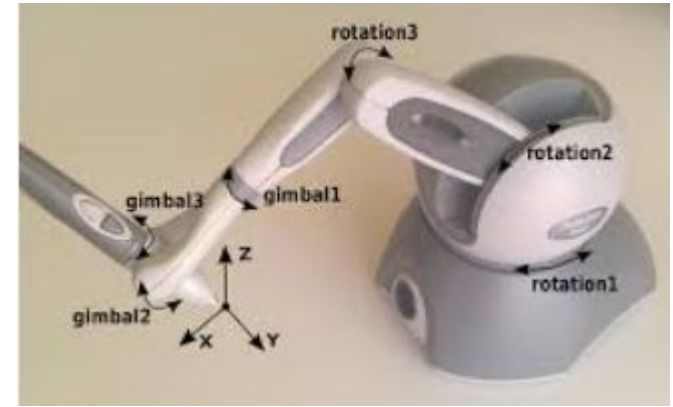
## 입력 자유도(DOF, Degree-Of-Freedom)

### Input 또는 Passive DOF:

- ✓ 디바이스가 상하, 좌우, 앞뒤 또는 회전의 움직임을 표현 할 수 있는 동작의 수 (또는 필요한 좌표 축):
  - ❖ 일반적으로 하나의 수동 자유도 당 하나의 인코더를 사용하기에 기구의 인코더의 수 또는 관절의 수.

### PHANTOM 디바이스의 예:

- ✓ 3 자유도 입력:
  - ❖ 3 자유도 위치 표현(Position):
    - X, Y, Z.
- ✓ 6 자유도 입력:
  - ❖ 3 자유도 위치 표현(Position):
    - X, Y, Z.
  - ❖ 3 자유도 방향(Orientation) 표현 추가:
    - Roll, Pitch, Yaw.



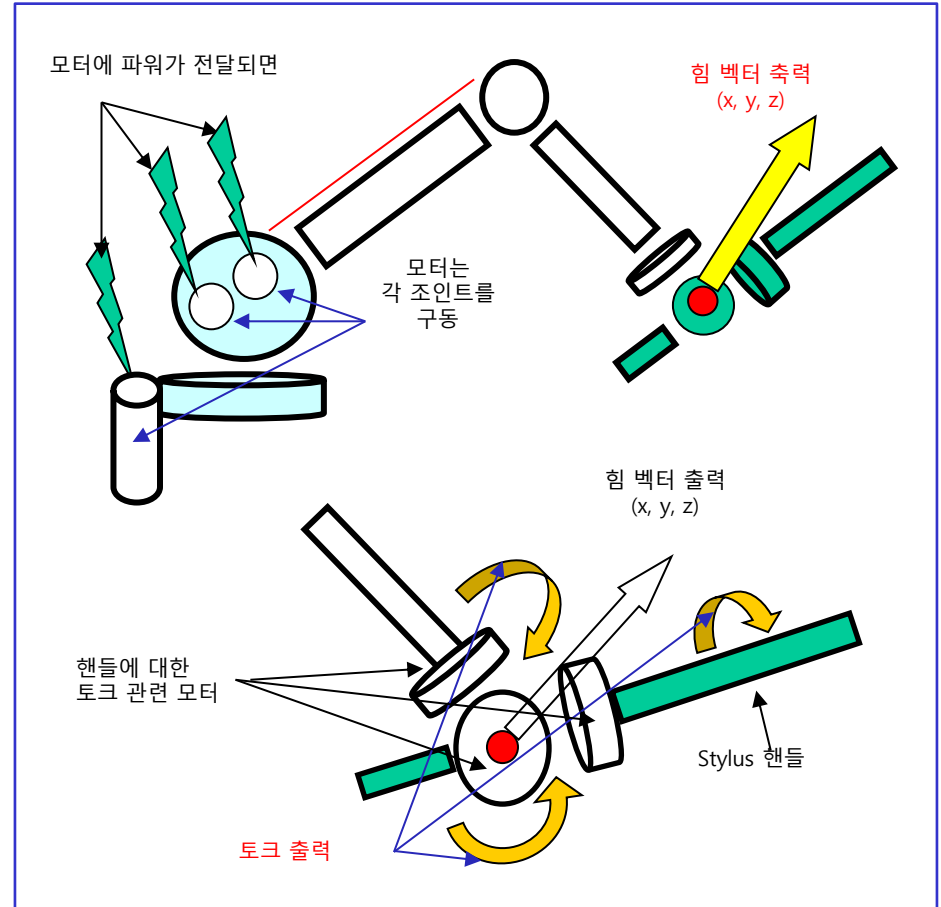
## 출력 자유도(DOF, Degree-Of-Freedom)

### Output 또는 Active DOF:

- ✓ 디바이스가 상하, 좌우, 앞뒤 또는 회전 출력 수로 일반적으로 하나의 출력에 하나의 모터 사용.

### PHANTOM 디바이스의 예:

- ✓ Cartesian Space 또는 Joint Space 사용.
- ✓ 3 자유도 출력은 3 개의 모터 사용:
  - ❖ X, Y, Z축 모터에 관련 힘들은 사용자의 손잡이 중심축에 힘 벡터 출력.
  - ❖ 직교(Cartesian) 좌표 계로 명시:
    - N ( $F_x, F_y, F_z$ ).
    - 또는 Base Joint:
      - $mNm (T_{j1}, T_{j2}, T_{j3})$ .
- ✓ 6 자유도 출력은 6 개의 모터 사용:
  - ❖  $F_x, F_y, F_z$  + Torque(Twisty Forces):
    - 3 자유도 X, Y, Z축 출력 및 Stylus 손잡이의 방향성에 회전 운동성 힘인 토크 출력.
  - ❖ 직교(Cartesian) 좌표 계에 토크 출력 추가:
    - $mNm (T_x, T_y, T_z)$ .
  - ❖ 또는 Base Joint에 Gimbal Joint로 토크 출력 추가:
    - $mNm (T_{j4}, T_{j5}, T_{j6})$ .

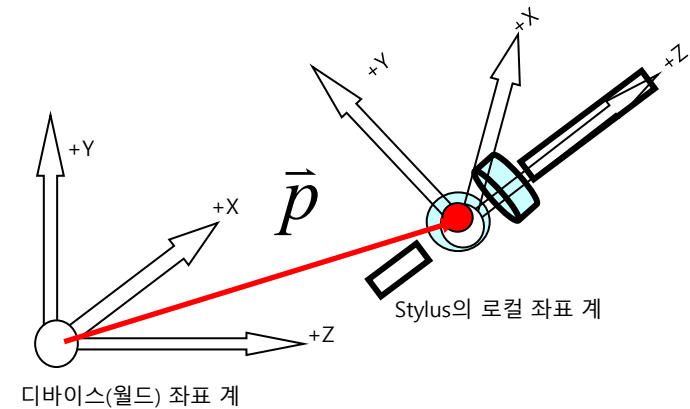
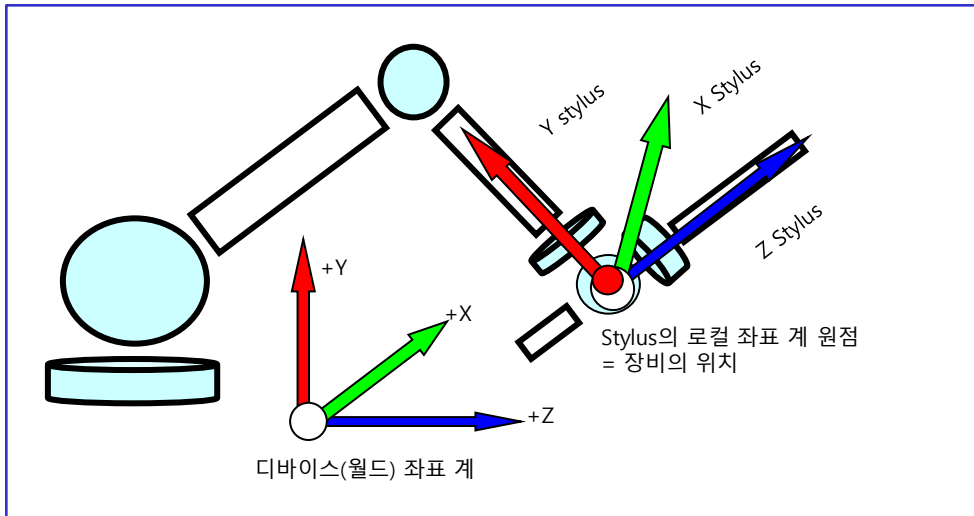


## 자유도(DOF, Degree-Of-Freedom) 관련 좌표 계 (1/2)

- PHANTOM은 Stylus(End-Effector) 위치에 대한 6개의 연결각도(Joint Angles) 생성:
  - ✓ Stylus(End-Effector)는 디바이스의 키네마틱스 체인의 끝.
- PHANTOM Joint Space:
  - ✓ 연결 각도를 직접 적용:
    - ❖  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ .
- PHANTOM Cartesian Space:
  - ✓ Stylus(End-Effector) 로컬 좌표 계에서 위치와 방향성 획득:
    - ❖ 디바이스의 위치:
      - Cartesian 좌표의  $x, y, z$ 로 표현.
    - ❖ Stylus 방향:
      - 일반적으로 Rotation Matrix로 표현.

$$\text{Position } \vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$$

$$T_{stylus} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & p_x \\ x_2 & y_2 & z_2 & p_y \\ x_3 & y_3 & z_3 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



## 자유도(DOF, Degree-Of-Freedom) 관련 좌표 계 (2/2)

### ■ 베이스 이동(Translation):

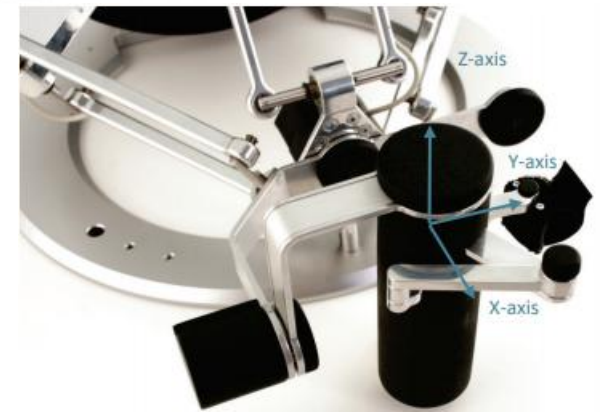
- ✓ End-Effector(핸들)의 중심 위치는 데카르트 좌표와 IUS (미터법) 단위로 표시 됨.
- ✓ 좌표 계 (0, 0, 0)의 실제 원점은 햅틱 장치의 물리적 작업 공간(Workspace) 중앙에 위치한 가상 지점에 있음.

### ■ 손목 방향(Orientation):

- ✓ omega.6 및 omega.7 햅틱 장치에는 회전 손목이 통합되어 있음.
- ✓ 손목 방향은 3 x 3 회전 행렬을 사용하여 수치적으로 표현되는 참조 프레임(Reference frame)  $R_{wrist}$ 로 표현 됨:
  - ❖ 이 기준 좌표계는 월드 좌표계와 관련하여 표현되며 손목의 각 회전 축에 장착된 관절 센서에 의해 반환된 각도 값에서 계산됨.

### ■ 그리퍼 각도:

- ✓ 힘 그리퍼의 각도 위치는 도 또는 라디안으로 반환 됨.
- ✓ 오른손 omega.7 햅틱 장치에 대해 양의 각도 값이 반환 됨.
  - ❖ 왼쪽 햅틱 장치에 대해 음의 각도 값이 반환 됨.
- ✓ 0 에 가까운 각도 값은 힘 그리퍼가 닫힌(Closed) 구성에 있는 구성에 해당 함:
  - ❖ 포스 그리퍼를 열면(Opening) 각도의 크기가 증가.



## Haptic Workspace

### ■ 햅틱 디바이스의 햅틱 처리기 (HIP)가 움직일 수 있는 공간:

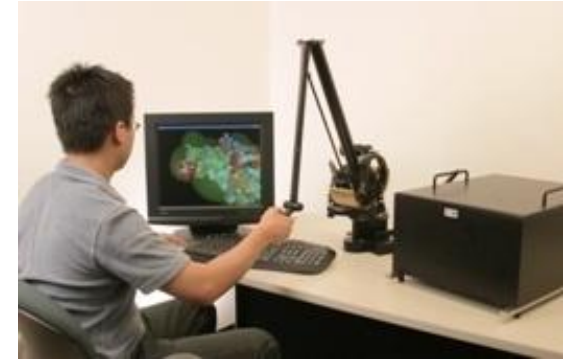
#### ✓ 햅틱 디바이스에 의해 접촉(Contact)될 수 있는 물리적 공간:

##### ❖ 기구 메커니즘에 따른 최대 작업공간:

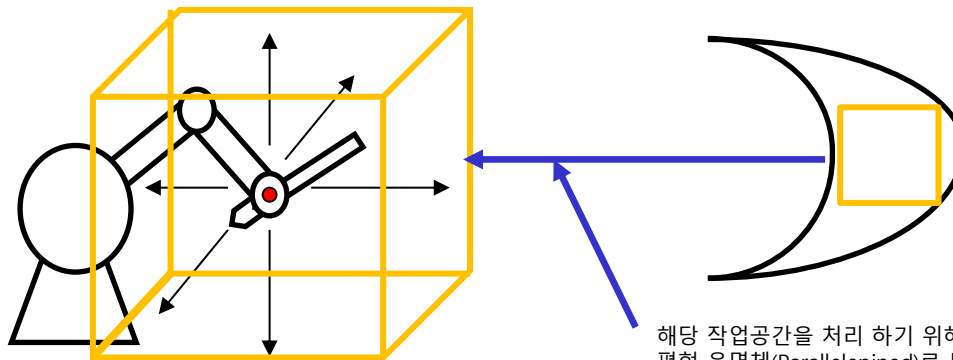
- Touch : 160 mm x 120 mm x 70 mm
- Touch X : 160 mm x 120 mm x 120 mm
- Premium 1.5 & 1.5HF & 1.5 6DOF & 1.5HF 6DOF : 381 mm x 267 mm x 191 mm
- Omega.x :  $\varnothing$  160 mm x 110 mm
- Delta.3 :  $\varnothing$  400 mm x 260 mm
- Sigma.7 :  $\varnothing$  190 mm x 130 mm
- lambda.7 :  $\varnothing$  240 mm x 170 mm

#### ✓ PHANTOM의 작업공간의 예:

- ❖ 최대 가용 공간의 일부로 힘에 대한 안정적인 렌더링을 보장하는 평형 육면체(Parallelepiped)의 공간.



장비의 기구학적 특성상, PHANTOM의 작업 가능한 영역은 썩기 모양 혹은 나폴레옹의 모자처럼 보임.



PHANTOM 작업공간을 위에서 본 절단면

해당 작업공간을 처리 하기 위해 서는 많은 어려움이 있어 평형 육면체(Parallelepiped)로 단순화 하여 처리.

## 햅틱 디바이스 비교

	Touch	Touch X	Premium 1.5	Premium 1.5HF	Premium 1.5 6DOF	Premium 1.5HF 6DOF
작업 공간 (mm)	160 x 120 x 70	160 x 120 x 120	381 x 267 x 191	381 x 267 x 191	381 x 267 x 191	381 x 267 x 191
이동 해상도 (mm)	~ 0.055 mm	~ 0.023 mm	0.03 mm	0.03 mm	0.03 mm	0.007 mm
최대 출력 힘 (N)	3.3 N	7.9 N	8.5 N	37.5 N	8.5N	37.5 N
연속 적인 힘 (24h)	0.88 N	1.75 N	1.4 N	6.2 N	1.4 N	6.2 N
최대 토크 출력					Yaw & Pitch : 515 mNm, Roll : 170 mNm	
Stiffness		3.16 N/mm	3.5 N/mm	3.5 N/mm	3.5 N/mm	3.5 N/mm

	Omega.3	Delta.3	Omega.6	Omega.7	Sigma.7	Lambda.7
작업 공간 (Degree)	∅ 160 x 110	∅ 400 x 260	∅ 160 x 110 240 x 140 x 320°	∅ 160 x 110 240 x 140 x 320° 25 mm	∅ 190 x 130 235 x 140 x 200° 25 mm	∅ 240 x 170 180 x 140 x 290° 15°
이동 해상도 (Degree)	< 0.01 mm	< 0.02 mm	< 0.01 mm 0.09°	< 0.01 mm 0.09° 0.006 mm	< 0.0015 mm 0.013° 0.006 mm	< 0.0015 mm 0.0067 X 0.0067 X 0.0135° 0.006 mm
최대 출력 힘 (N)	12 N	20 N	12 N	12 N 8.0 N	20 N	20 N
최대 토크 출력					400 mNm Grasping : 8.0 N	200 (y), 400 (p), 100(r) mNm Grasping : 8.0 N
Stiffness	14.5 N/mm	14.5 N/mm	14.5 N/mm	14.5 N/mm	14.5 N/mm	14.5 N/mm

## Servo 루프 또는 Servo 스퀘드

### ■ 햅틱 렌더링 루프는 보다 빠를수록 좋음:

- ✓ Geomagic 햅틱 장비:
  - ❖ Touch:
    - 500~1600 Hz.
  - ❖ 다른 PHANTOM:
    - 500~1000 또는 2000 Hz.
- ✓ Force Dimension 햅틱 장비:
  - ❖ Omega.X & Delta.3:
    - 최대 4 KHz 까지의 재생 빈도(Refresh rate).
  - ❖ Sigma.7:
    - 최대 4 KHz 까지의 재생 빈도.
- ✓ Haply 햅틱 장비:
  - ❖ Inverse3 & Inverse3 X:
    - 최대 4 KHz 까지의 재생 빈도.

