

가상현실 기술을 이용한 가상 조립 시뮬레이션에 대한 연구

김용완[†], 박진아^{**}

요 약

인간의 손은 현실의 사물과 인터랙션하는 가장 직접적이고 자연스러운 인터페이스라고 할 수 있으나, 가상 환경에서는 인간 손 관절체의 높은 자유도와 관련 인터페이스 장치의 한계로 말미암아 가상현실 애플리케이션에 활발히 도입되고 있지 못한 상황이다. 특히, 가상 조립 시뮬레이션은 제품 개발 단계에서 디지털 mockup의 검증에 대한 프로세스로서 가상현실 애플리케이션 중 도전적인 주제라고 할 수 있다. 하지만, 가상의 객체를 파지(grasp)하기 어렵고 지속적으로 세밀하게 조작 할 수 없는 집 등은 핸드 햅틱 인터랙션이 가상 조립 등의 가상현실 애플리케이션에 적용 시 커다란 장벽으로 인식되고 있다. 본 논문에서는 핸드 햅틱 인터랙션을 두 관점에서 분석하여 각 단계별로 단계적 절차를 수행하는 방법을 제안하고자 한다. 인간이 사물을 쥐고 조작할 때, 손 안에서 사물이 빠져나가지 않도록 사물의 외형에 따라 손의 힘의 균형을 조절하는 견고함과 일단 사물을 쥐게 되면 손 안에서 인간의 의도를 반영한 정밀한 사물 조작이 가능한 세밀성이 가능한 핸드 햅틱 인터랙션을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘은 초기 grasp를 용이하게 하기 위해 품질평가 척도를 통해 grasp의 견고함을 확보하고, 세밀한 조작성을 확보하기 위해 물리 기반의 시뮬레이션을 수행한다. 제안된 방법의 효율성을 평가하기 위하여 서로 다른 디스플레이 환경-모노, 입체 디스플레이-에서 실험을 수행하였다. 그리고 2-way ANOVA 테스트를 통하여 본 연구에서 제안한 충돌 전 grasp 단계와 충돌 후 조작 단계로 구분된 알고리즘이 앞서 언급한 두 관점을 모두 만족함을 보였다. 마지막으로, 제안된 인터랙션 방법을 이용하여 복잡한 그래픽 모델에 관한 가상 조립 시뮬레이션에 적용된 실 사례를 보였다.

A Study on Virtual Assembly Simulation Using Virtual Reality Technology

Yongwan Kim[†], Jinah Park^{**}

ABSTRACT

Although a hand haptic interaction which provides direct and natural sensation is the most natural way of interacting with VR environment, the hand haptic interaction has still limitations with respect to the complexity of articulated hand and related hardware capabilities. Particularly, virtual assembly simulation which refers to the verification process of digital mockup in product development lifecycle is one of the most challenging topics in virtual reality applications. However, hand haptic interaction is considered as a big obstacle, because difficulty initial grasping and non-dextrous manipulation remain as unsolved problems. In this paper, we propose that common hand haptic interactions involves two separate stages with different aspects. We present the hand haptic interaction method enables us to stably grasp a virtual object at initial grasping and delicately manipulate an object at task operating by one's intention. Therefore, proposed method provides the robustness using grasping quality and dextrous manipulation using physically simulation. We conducted experiments to evaluate the effectiveness of our proposed method under different display environments -monoscopic and stereoscopic. From 2-way ANOVA test, we show that the proposed method satisfies two aspects of hand haptic interaction. Finally, we demonstrated an actual application of various assembly simulation for relatively complex models.

Key words: Assembly Simulation(조립 시뮬레이션), Haptic Interaction(햅틱 인터랙션), Grasping(파지), Virtual Reality(가상현실)

※ 교신저자(Corresponding Author): 박진아, 주소: 대전광역시 유성구 과학로 335(구성동379-1) 한국과학기술원 전산학과(E3-1) #4401(305-701), 전화: 042-350-3555, FAX: 042-350-6222, E-mail: jinah@cs.kaist.ac.kr
접수일: 2010년 5월 12일, 수정일: 2010년 8월 9일
완료일: 2010년 10월 8일

[†] 정회원, 한국전자통신연구원 선임연구원
(E-mail: ywkim@etri.re.kr)

^{**} 정회원, 한국과학기술원 부교수

※ 본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업(10035223)과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0000242).

1. 서 론

가상현실 분야에서 빈번한 이슈가 되고 있고 있는 연구 중의 하나는 인간과 가상환경 간의 자연스러운 핸드 햅틱 인터랙션에 관한 주제라고 할 수 있다 [1]. 최근까지 가상환경에서 견고하고(robust) 세밀한(dextrous) 핸드 햅틱 인터랙션을 가능케 하기 위해, 가상 객체를 파지(grasp)하고 조작하는 다양한 알고리즘이 제안되어 왔다 [2]. 하지만, 기존 핸드 햅틱 인터랙션 방법들은 조작에서의 자연스러움과 시각적인 grasp 품질 및 몰입 환경에서의 사용성 측면에서 한계를 가지고 있다. 기존 제안된 방법들은 높은 자유도의 인간 손 동작을 자연스럽게 모사하기에는 어려움이 있으며, 객체를 grasp 했을 때 품질(quality)이 나빠 조작이 불안정해졌다. 또한, grasp 후 핸드 안에서 객체를 세밀히 조작하기 위해 고려해야 할 물리요소(마찰, 중력 등)를 적용하기에도 어려움이 있었다. 이런 이유로, 다양한 가상현실 애플리케이션에 핸드 햅틱 인터랙션을 본격적으로 적용하지는 못하고 있다.

이러한 이슈들을 해결하기 위해, 인간 손 동작을 모사하고 시뮬레이션하는 방법에 대해 다수의 연구자들이 20여 년 간 연구를 수행하여 왔다. 관련 선행 연구들은 사실적인 인간 손에 대한 모델링을 기반으로 grasp 문제를 해결하는 대표적인 방법론은 (1) 발견적 실험(heuristic)에 기반 한 방법, (2) 특정 하드웨어에 의존적인 알고리즘 기반 방법, (3) 물리 시뮬레이션을 이용한 방법, (4) 애니메이션 기반의 방법, 이렇게 4가지로 분류할 수 있다.

- 1) 발견적 실험(heuristic)에 기반 한 방법은 여러 시행 착오를 거쳐 중력, 마찰 등 소수의 물리요소들을 효과적으로 모방하고 이를 기반으로 객체를 grasp하는 방법이라고 할 수 있다. 1996년 Boulic 등은 인터랙티브 grasp 오토마타를 통한 보완적인 방법으로서, 효과적인 가상 객체 조작을 위해 Coulomb 물리 법칙과 유사하게 가상 충돌 모델에 대한 모사 모델을 제시하였다 [3]. 또한, 2006년 Zhu 등은 인간 핸드에 관한 해부학적 지식에 기반하여 손가락 움직임 궤적을 이용한 grasp 인터랙션을 제안하였으며 [4], 2000년에는 Ullmann 등은 휴먼 grasp 행동에 따른 세밀한 사실적인 grasp 제스처를

반영하는 인터랙션 알고리즘을 제안하였다 [5].

- 2) 하드웨어에 의존적인 방법들은 특정 하드웨어에 적합한 객체 grasp에 관한 제한적 인터랙션 방법들이라고 할 수 있다. 대표적으로, 1999년 Popescu 등은 햅틱 인터랙션을 계산하는 햅틱 메쉬를 이용하여 가상 핸드 햅틱 인터랙션을 모델링하는 방법과 [6], 2005년 Kurillo 등은 가상 환경 내에서 다중 손가락 grasp를 위한 3By6 손가락 장치와 알고리즘 등을 예로 들 수 있다 [7].
- 3) 물리 시뮬레이션 방법들은 시각적으로 사실성 있는 grasp를 위해 동적 시뮬레이션을 이용하여 정확한 힘(force) 렌더링을 계산하는 grasp 방법이라고 할 수 있다. 2006년 Borst 등은 선형과 비틀림(torsional) 가상 스프링-댐퍼를 이용하여 실제 손과 가상 관절형 핸드 모델 간을 가상 결합(virtual coupling)하고 동적 시뮬레이션을 통해 사실적으로 grasp를 하는 방법을 제시하였다 [8].
- 4) 애니메이션 기반의 방법들은 주로 고품질 CG 영화 등에서 쓰이는 기법들과 유사하게 미리 캡처 된 휴먼 핸드 애니메이션 DB를 적절히 이용하여 객체를 정확히 grasp하기 위한 자세를 구하는 방법이라고 할 수 있다. 2006년 Weber 등은 미리 정의된 서로 다른 grasp 타입들을 이용하여 장면 내에 객체들을 정확히 조작하기 위한 플랜, 행동 방식, 운동 제어 프로그램 등으로 구성된 계층적 제어 구조를 제시하였으며 [9], 1994년 Sanso 등은 grasp 분류 체계에 기반하여 가상 액터의 핸드를 제어하기 위한 자동화된 grasp 시스템을 제안하였다 [10].

보통 인간은 현실의 사물을 쥐고 조작할 때, 손 안에서 사물이 빠져나가지 못하도록 사물의 외형에 따라 쥐는 힘의 균형을 조절하는 능력과 사물을 쥐 후에는 손 안에서 자신의 의도를 반영하여 정밀하게 사물을 조작할 수 능력을 가지고 있다. 위에서 언급한 대표적인 grasp 방법들은 두 운동 능력을 부분적으로만 만족할 뿐, 모두 만족하는 방법은 찾아보기 힘들다. 따라서, 본 논문에서는 현실에서의 사물을 쥐고 조작하는 인간의 손 운동 능력을 가상현실에서 동일하게 반영할 때 고려해야 할 관점들에 대해서 강조하고자 한다.

- 1) 견고성(robustness): 모노(monoscopic) 디스플레이와 같은 시각적 깊이감을 인지하기 힘든 상황에서도, 가상 조립과 같은 어려운 조작 작업을 할 때 가상 객체를 얼마나 용이하게 grasp 할 수 있는지에 대한 기준
- 2) 세밀성(dexterity): 사용자의 의도를 반영하여 가상 객체를 얼마나 섬세히 조작할 수 있는지에 대한 기준
- 3) 실제감(reality): 햅틱 피드백을 통해 시각적 깊이감을 용이하게 인지하고 사실감을 전달할 수 있는지에 대한 기준

본 논문에서는 사실적 핸드 햅틱 인터랙션을 위해 고려해야 할 관점들 측면에서, 인간의 사물을 쥐고 조작하는 운동 능력을 모사하는 단계적 인터랙션 방법을 제안하고자 한다. 2장에서는 견고성과 세밀성 측면을 만족할 수 있도록 고안된 grasp 및 조작 알고리즘을 제안하였다. Grasp 단계에서는 품질평가척도를 통해 더욱 견고한 grasp가 가능하고, 조작 단계에서는 물리 요소를 시뮬레이션하여 사용자의 의도를 잘 반영하는 세밀성이 강조된 알고리즘에 대해서 기술한다. 3장에서는 햅틱 피드백을 통해 실제감을 전달할 수 있는 가상현실 인터페이스 중의 하나인 글로브 기반 핸드-암 햅틱 인터랙션 시스템을 제안하고자 한다. 마지막으로, 4에서는 제안된 핸드 햅틱 인터랙션 시스템을 검증하기 위해, 가상 조립 애플리케이션에 적용한 결과를 보였다.

2. 핸드 기반의 인터랙션 시스템

2.1 휴먼 핸드 모델링

가상환경에서는 사용자의 실제 손과 연동된 그래픽 핸드 모델을 이용하여 가상 객체와의 핸드 햅틱

인터랙션을 가능하게 한다. 높은 자유도를 가진 인간 손 움직임 정보 표현을 위해서는, 인간 손의 다관절 운동학적 구조를 이에 대응하는 가상 핸드 모델로 적절히 모델링하여야 한다 [11,12]. 실제의 높은 자유도를 그대로 가지고 가상 객체를 grasp하고 조작하면 알고리즘의 복잡도(complexity)가 높아지게 되므로, 최대한 인터랙션의 정확도를 희생하지 않는 가정하에 인간의 손을 가장 단순화된 그래픽 핸드로 모델링하여야 한다. 일반적으로 총 21 DOF의 가상 핸드 모델을 고려해 볼 수 있으며, 이는 엄지를 제외한 4 손가락은 DIP(distal interphalangeal), PIP(Proximal) 각 1 DOF이며 MCP의 경우 2 DOF로 표현하고, 엄지의 경우는 총 5 DOF로서 IP는 1 DOF이며 MCP(metacarpophalangeal), CMC는 각 2 DOF로 모델링한다. 하지만 본 연구에서는 엄지를 제외한 4 손가락의 DIP 관절은 PIP 관절에 종속적으로 움직인다는 해부학적 특성을 이용하여, 그림 1과 같이 DIP 관절에 관한 관계를 구하여 총 21 DOF의 핸드 모델을 17 DOF 모델로 단순화하였다.

단순화된 핸드 모델을 이용하여 실제 손과 가상 핸드 간의 핸드 좌표 시스템을 정의할 수 있고, 가상 핸드는 추후에 논의될 핸드 글로브 인터페이스의 움직임 정보를 통해 업데이트 된다. 가상 핸드는 충돌 처리 과정을 통해 가상 객체를 grasp 할 때 가상 객체를 뚫고 들어가지 못하게 처리를 하는 등의 grasp 알고리즘을 적용하게 된다.

2.2 Grasp 기반의 햅틱 인터랙션 알고리즘

앞서 언급한 바와 같이 발견적 방법, 특정 하드웨어에 기반 방법, 물리 시뮬레이션을 이용한 방법, 애니메이션에 기반한 방법 등 다양한 가상 grasp 방법들이 grasp 품질(quality)을 높이기 위해서 제안되어

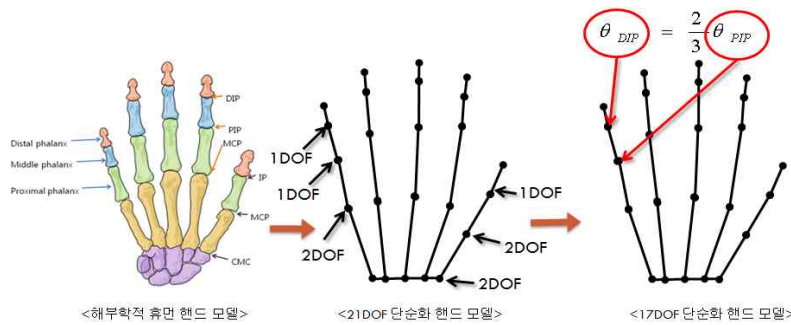


그림 1. 단순화된 휴먼 핸드 모델

왔다 [13,14]. 기존 grasp 방법들 중 물리 시뮬레이션을 이용한 grasp 방법은 정확한 grasp 자세를 지원하지만 핸드 움직임이 빠를 시 스프링-조인트 시뮬레이션에 의한 진동이 발생하고, 초기 grasp 시 엄지와 검지의 축이 최대한 반대 방향을 유지해야 객체가 안정적으로 grasp가 되는 등의 한계를 갖고 있다 [15]. 따라서, 본 논문에서는 초기 grasp 단계에서 grasp 품질평가척도를 이용하여 안정적으로 grasp가 되도록 견고성을 높이고, 물리 요소가 고려된 섬세한 조작이 가능한 인터랙션 방법론을 제공하고자 한다.

그림 2와 같이, 제안된 방법은 충돌 전 grasp 단계

와 충돌 후 조작 단계로 구성되어 있다. 충돌 전 grasp 단계에서는 가상의 객체와 손가락 움직임 추정 궤적 간에 충돌이 검출 될 경우 가상 핸드의 위치와 방향을 그림 3과 같이 핸드 움직임의 연장선 상으로 위치를 변위시킨다. 가상 환경에서는 사용자가 정확한 시각적 깊이감과 실제 핸드와 가상 핸드 사이의 일체감을 느끼기가 어렵기 때문에 품질평가척도에 따라 위치를 변위시켜 더욱 안정한 grasp 상태로 변화시키고자 함이다. 이후, 실제 핸드와 가상 객체를 터치하였을 경우에는 글로브 및 핸드-암 햅틱 장치를 통해 사용자의 손에 역감이 전달 될 수 있도록 하였다 [16,17].

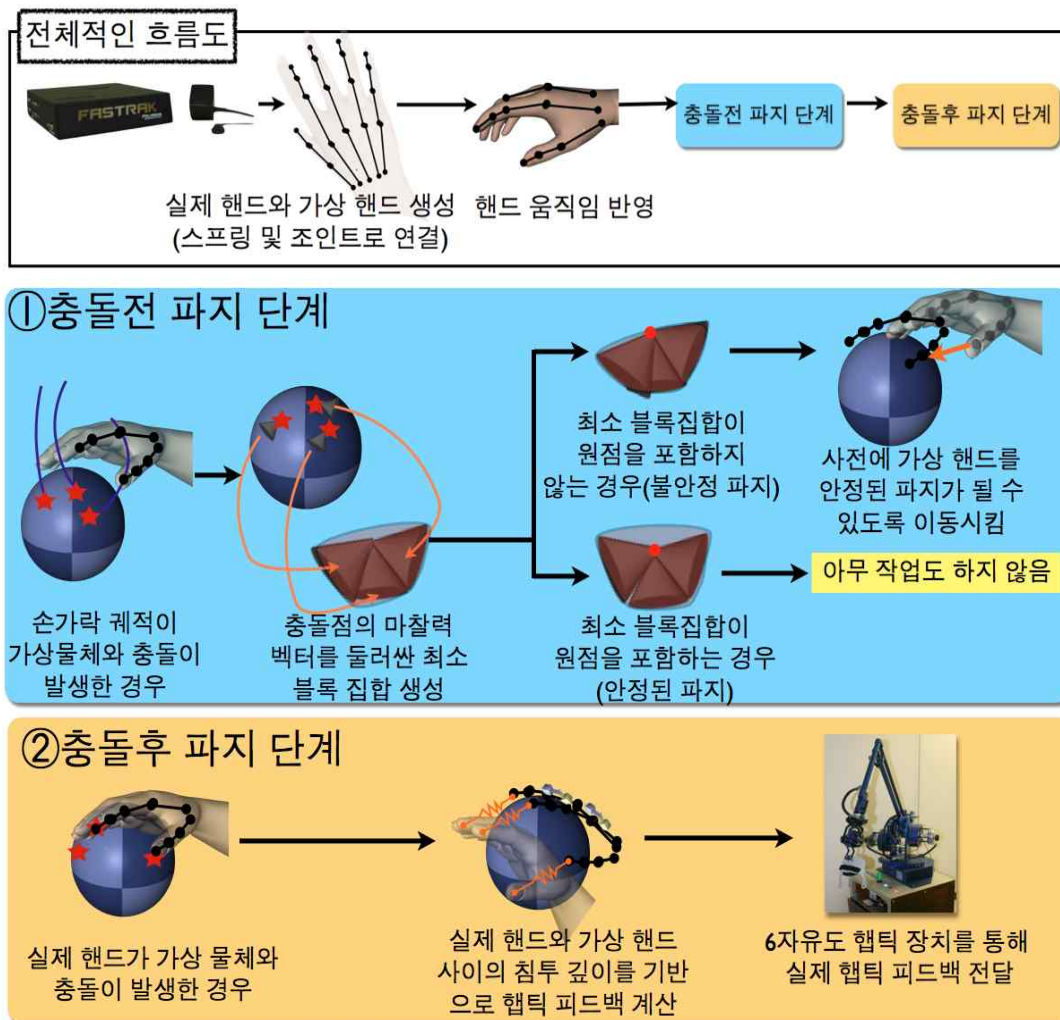


그림 2. Grasp 기반 햅틱 인터랙션 알고리즘의 전체적인 흐름도

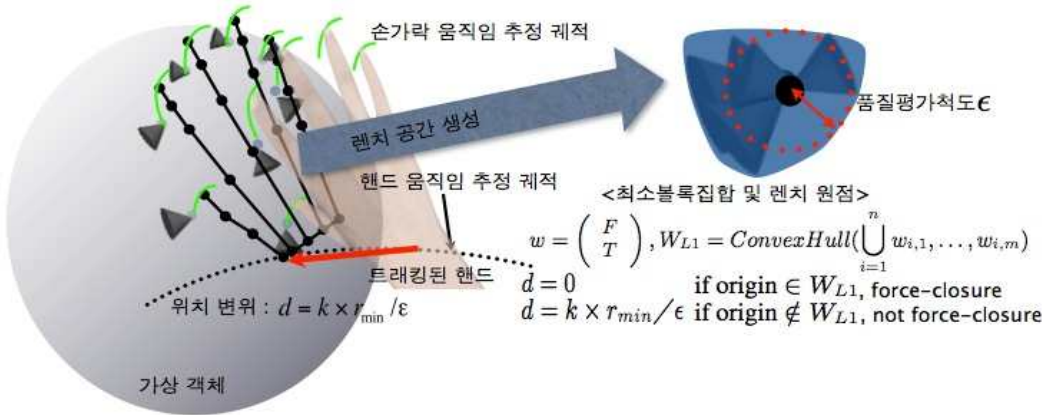


그림 3. 충돌 전 grasp 단계

앞서의 과정을 상세하게 단계적으로 기술하고자 한다. 충돌점에서의 힘 벡터를 렌치(wrench)로 일컫고, 렌치 공간은 grasp 렌치 공간(grasp wrench space)으로 부를 수 있다. 단위 법선 힘이 주어질 때, 충돌점에 적용된 렌치는 그림 3과 같이 마찰 원뿔체로 근사화시킬 수 있다. 식 1과 같이 렌치는 특정 충돌점에서의 힘과 토크 벡터로서 정의될 수 있고, 전체 렌치들을 포함하는 최소 블록 집합(convex hull) W_{L1} 을 생각해 볼 수 있다.

$$w = \begin{pmatrix} F \\ T \end{pmatrix}, W_{L1} = \text{ConvexHull}(\bigcup_{i=1}^n w_{i,1}, \dots, w_{i,m}) \quad (1)$$

여기서, F와 T는 특정 충돌점에서의 힘과 토크 벡터이며 $w_{i,m}$ 은 충돌점 i에서의 마찰 원뿔체의 경계를 이루는 m개의 요소 힘 벡터를 의미한다. 최소 블록 집합을 이용하여, grasp가 충돌 전 단계에서 힘 단합(force-closure) grasp인지 아닌지를 판별한다. 힘 단합 grasp는 어떠한 외부 교란(disturbance) 힘에 대해서도 저항이 가능한 grasp 상태를 의미한다. 만약 렌치 공간의 원점이 최소 블록 집합의 내부에 있다면, 힘 단합 grasp로 간주하고 가상 핸드의 위치를 변위시키지 않는다. 그렇지 않은 경우, 식 2의 변위 d에 해당하는 값만큼 핸드 움직임 궤적을 따라 가상 핸드를 변위 시킨다.

$$\begin{cases} d = 0 & \text{if origin} \in W_{L1} \\ d = k \times r_{\min} / \epsilon & \text{if origin} \notin W_{L1} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, k는 위치 조정 스케일 값(본 논문의 경우 0.1)이며, d는 위치 조정 값, r_{\min} 은 기하학적 중력 중심으로부터 객체 반경의 최소 값이다. 품질평가척도

ϵ 은 최소 블록 집합 내에 존재할 수 있는 최대 6D 공의 반경으로 정의할 수 있다. 품질평가척도가 나날수록 변위 d가 커짐을 알 수 있다.

충돌 전 단계에서 가상핸드를 위치 변위시킴으로써, 충돌 후 조작단계에서의 견고한 grasp를 보장할 수 있다. 즉, 객체를 안정적으로 grasp할 수 있는 상태가 된다면, 조작 단계에서 용이하게 객체를 조작할 수 있는 확률이 높아진다.

손가락 움직임 추정 궤적이 아닌 실제 손과 가상 객체가 충돌이 발생한다면, 정지마찰, 동적 마찰, 중력, 탄성과 같은 물리 요소를 반영하는 충돌 후 조작 단계로 전환된다. 그림 4와 같이, 충돌 후 조작 단계는 안정하게 grasp된 가상 객체를 세밀하게 조작이 가능하도록 한다. 손 전체에 대한 힘과 토크를 반영할 수 있는 세밀한 조작을 위해서, 트래킹된 손과 가상 핸드 사이에 물리엔진에 의한 조인트-스프링을 이용하여 가상 연결(virtual coupling)을 구성한다. 폴리곤 레벨의 충돌처리 시 동적 시뮬레이션을 통해 가상 핸드가 가상 객체를 침투(penetration)해 들어가는 것을 방지 할 수 있다. 트래킹된 손과 가상 핸드 사이의 침투 깊이로부터 6 DOF 핸드-암 햅틱 장치로 전달하는 힘과 토크를 식 3과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} f_{palm} = k_f(P_t - P_s) + b_f(V_s - V_t) \\ T_{palm} = k_t(\theta_t - \theta_s) + b_t(\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_t) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, k_f , b_f 는 선형 스프링의 강성(stiffness)과 댐핑(damping) 계수이며 P_t , P_s , V_s , V_t 는 각각 트래킹된 핸드와 가상 핸드의 기저 위치 및 속도를 의미한다. 그리고 k_t , b_t 는 힌지와 볼 조인트의 강성과 댐

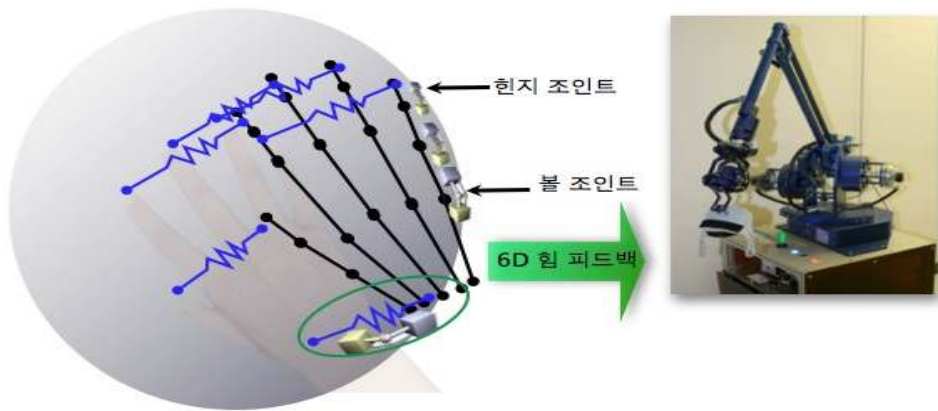


그림 4. 총동 후 조작 단계

평 계수이며, $\dot{\theta}_s, \dot{\theta}_t$ 는 방향 및 각회전 속도를 의미한다.

3. 핸드 기반 가상현실 인터페이스

3.1 글로브 타입 햅틱 장치

본 논문에서는 재현성(repeatability)이 좋은 새로

운 고정밀 손가락 트래킹 방법을 제안한다. 손가락 트래킹 센서로서 LVDT(Linear Variable Differential Transducer) 타입의 선형 위치 변위 센서는 사용자의 손의 크기에 무관한 강인성을 특징으로 하는 센서이다. 그림 5(좌)와 같이 LVDT 센서는 1차 코일과 코일을 둘러싼 2차 코일로 구성되어 있다. 강

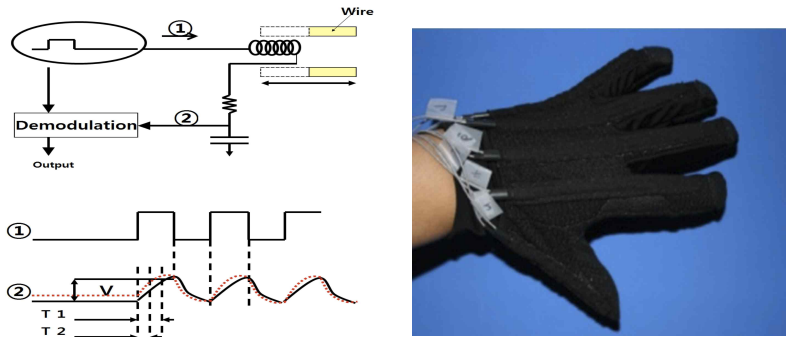


그림 5. LVDT 센서(좌)와 핸드 트래킹 글로브(우)

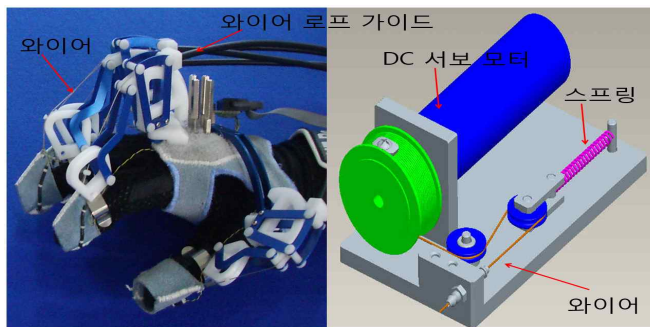


그림 6. 햅틱 글로브 장치(좌)와 구동 매커니즘(우)

자성(ferromagnetic) 코어는 2차 코일로부터 1차 코일에 의한 전자기장의 영향을 받는다. 코일의 출력을 차분(differencing)하면 코일에 대한 코어의 상대적 움직임에 비례하여 전압이 출력된다. 센서 코어의 상대적 움직임을 이용하여 인간 관절의 굽힘 각을 측정한다면, 손가락 관절의 각 변위는 센서 출력 전압에 선형 비례함을 알 수 있다.

센서 코어의 상대적 움직임(관절각 θ = 손가락 관절길이 $r \times$ 코어 변위 l)으로부터 순간 관절 각을 직접적으로 측정이 가능하다. 순간 관절 각은 식 4와 같이 구할 수 있다.

$$A_t(i) = \frac{V_t(i) - V_{\min}(i)}{V_{\max}(i) - V_{\min}(i)} \times A_{\max}(i) \quad (4)$$

여기서, $A_t(i)$ 는 순간 i 번째 관절 각, $V_t(i)$ 는 순간 전압이며 $V_{\max}(i)$, $V_{\min}(i)$ 은 최대/최소 전압, $A_{\max}(i)$ 는 i 번째 관절 각의 최대 값이다. 최대, 최소 전압은 손을 최대로 폈을때와 쥐었을 때 측정되는 최소, 최대 전압으로 측정할 수 있다.

손가락 역감 전달을 위해서, 기구부 설계 및 제어에 용이한 저소음 전자기 모터를 이용한 텐던 구동 방식의 햅틱 글로브 장치를 구현하였다. 그림 6(좌)는 손가락 트랙킹 글로브와 햅틱 글로브의 결합 외관 모습이며, 그림 6(우)는 DC 서보 모터를 이용한 햅틱 글로브 역감 제어 매커니즘을 나타낸다. 실제 사람의 손가락이 가상 객체를 뚫고 들어 갈 때 역감 제어 장치의 DC 서보 모터는 손가락 끝에 연결된 와이어를 당김으로써 역감을 전달한다. 사용자의 갑작스런 강한 grasp 움직임에 의해 와이어가 끊어지는 것을 방지하기 위해, 스프링-기어 메커니즘을 통해 모터의 능력을 초과하는 갑작스러운 grasp 입력이 들어

와도 유연하게(compliant) 반응하도록 설계하였다. 사용자의 손가락에 최대한 효율적인 역감을 전달하기 위해서, 햅틱 글로브의 연결 프레임은 손가락 위 표면에 직교 방향으로 배치하여 최대 힘 전달이 가능한 구조로 설계하였다.

3.2 6DOF 핸드-암 역감 전달 장치

제한적인 DOF 햅틱 피드백만 가능한 기존 유사 장치와 비교하여, 6DOF 핸드-암 역감 피드백이 가능한 햅틱 장치를 제시하고자 한다.

그림 7(중)과 7(우)는 각각 위치 및 자세(Roll, Pitch, Yaw) 피드백 매니플레이터의 축 관계를 나타내는 상세설계를 나타낸다. 제안된 햅틱 장치의 운동학적 특성은 Denavit-Hartenberg 파라미터를 기반으로 구형 손목 기구부(spherical wrist)와 인간형(anthropomorphic) 암의 관계로 기술할 수 있다 [18].

그림 8은 6DOF 핸드-암 햅틱 장치의 각 링크의 좌표 관계를 나타내며, 각 링크의 동차 변환에 대한 유일해가 존재하기 위해서는 i 번째 링크의 x_i 축은 $i-1$ 번째 링크의 z_{i-1} 축과 수직하고 x_i 축은 z_{i-1} 축과 교차해야 한다. 자세 매니플레이터와 실제 사용자의 암(arm) 사이의 작업 공간 간섭을 최소화하기 위해서, 자세 매니플레이터는 그림 7(좌)에서와 같이 매니플레이터의 z 축에 대해서 β° 만큼 기울어져 설계되었다. 따라서, 3번째와 4번째 링크 사이의 관계는 그림 8과 같이 D-H 표기를 만족시키지 못한다. i 번째 링크의 좌표 프레임에 대한 j 번째 링크의 좌표 프레임을 나타내는 동차 변환 행렬을 T_{ji} 라고 한다면, 식 5와 같이 자세 및 위치 변환 행렬에 관한 일반 동차 변환으로 유도할 수 있다.

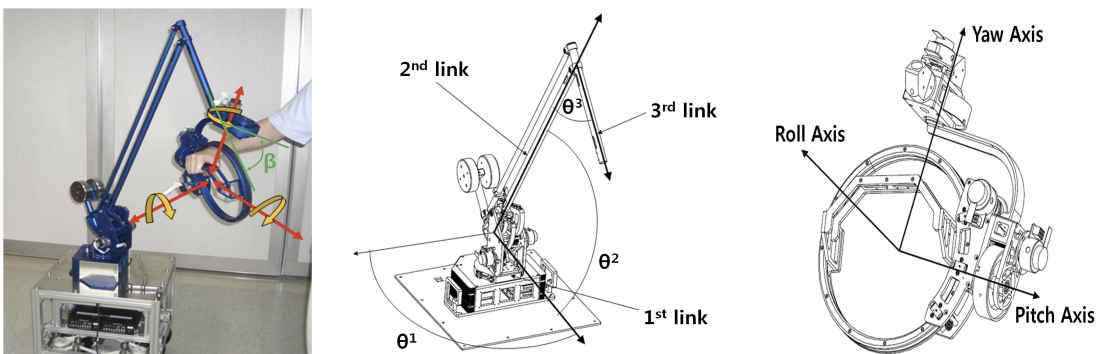


그림 7. 6DOF 핸드-암 햅틱 장치(좌), 위치 피드백 매니플레이터(중), 자세 피드백 매니플레이터(우)

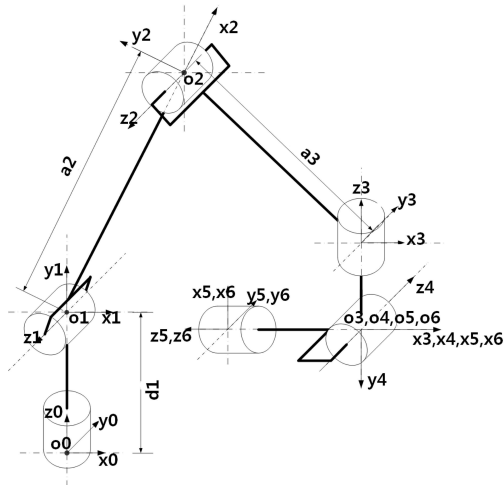


그림 8. 6DOF 햅틱 장치의 좌표 관계

$$T_2^3 = A_3 = Rot(z_2, \theta_3) Trans(x', a_3) Rot(z'', \beta) Rot(x''', -\frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

최종적으로, 최종 동차 변환 행렬은 $T_0^6 = T_0^2 T_3^2 T_6^3$ 으로 구할 수 있다.

4. 시스템 평가 및 응용

4.1 입체 워크벤치 기반 햅틱 인터랙션 환경 구축

그림 9와 같이 입체 워크벤치 기반의 디스플레이 시스템을 이용하여 핸드 햅틱 인터랙션 환경을 구축하였다. 기존 디스플레이 장치는 가상 객체가 존재하는 위치를 시각적으로 가늠하기 어려운 반면, 워크벤치 시스템은 사용자의 손이 실제로 존재하는 위치에 가상 객체가 자연스럽게 오버랩되어 사용자의 응시점과 일치하게 된다는 장점을 가지고 있다. 19인치 입체 CRT 디스플레이가 반투명 거울 상단에 45° 각도로 위치하여, 효과적으로 거울 하단의 작업 공간에

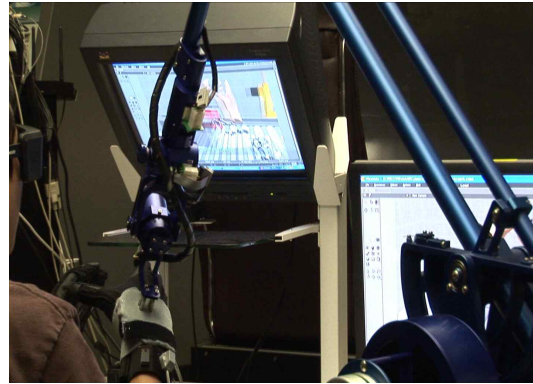


그림 9. 입체 워크벤치 기반 햅틱 인터랙션 환경

서 가상 환경과 인터랙션을 할 수 있다. CRT 디스플레이는 CrystalEyes 서터 글래스를 통한 입체 렌더링을 지원하며, Polhemus FASTRAK 자기식 센서를 통해 실제 사용자의 핸드 위치 및 자세를 트래킹하였다.

4.2 햅틱 하드웨어 장치 성능

글로브 타입 햅틱 장치에 쓰인 손가락 센서는 0.01부터 15mm의 스트로크 범위 내에서 정상 작동하고, 최대 비선형구간은 최대 범위 대비 0.4%이다. 손가락 센서는 4kHz의 업데이트율과 12bit 고해상도 및 좋은 재현성을 보인다. 그림 10은 손가락 센서의 선형 특성을 이용하여 센서 출력값과 손가락 굽힘각의 식 4에 의한 매핑 예를 보이고 있다.

또한, 표 1에서는 제안된 6DOF 핸드-암 역감 전달 장치와 대표적인 상용 장치인 이머전 사의 Haptic Workstation과의 작업 공간과 역감 생성 성능을 비교하였다. 작업 공간은 X 축을 제외하고는 제안된 장치가 보다 넓은 공간을 제공하며, 역감 생성 성능에 있어서도 비교 장치에 비하여 우수한 결과를 보임

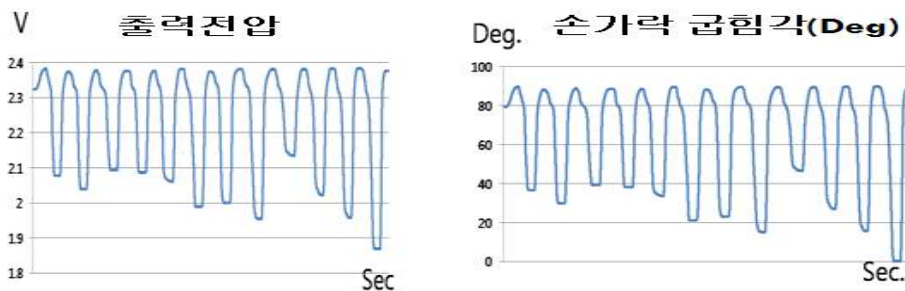


그림 10. 센서 출력값과 손가락 굽힘각 매핑 예

표 1. 6DOF 핸드-암 역감 전달 장치의 작업 공간 및 역감 성능 비교

	축	작업 공간		역감 생성	
		제안된 장치	Haptic Workstation (이머전)	제안된 장치	Haptic Workstation (이머전)
위치	X	최대 300mm	최대 467mm	최대 11.2N-최소 6.3N	최대 8.8N-최소 6.6N
	Y	최대 400mm	최대 320mm	최대 11.2N-최소 6.3N	최대 8.8N-최소 6.6N
	Z	최대 700mm	최대 500mm	최대 11.2N-최소 6.3N	최대 8.8N-최소 6.6N
회전	롤	±360°	±360°	714mNm	회전 역감 생성 없음
	피치	±300°	±360°	798mNm	회전 역감 생성 없음
	요	±300°	±360°	832mNm	회전 역감 생성 없음

을 알 수 있다. 위치 역감 성능의 최대치가 11.2N으로서 Haptic Workstation의 8.8N에 비해 강한 최대 역감을 생성 할 수 있으며, 특히 Haptic Workstation은 회전 역감을 지원하지 못하는데 반해 제안된 장치는 회전 역감을 생성 가능하여 보다 사실적인 역감 전달이 가능하다고 할 수 있다.

4.3 Grasping 기반 인터랙션 성능 평가 I (가상 인터랙션과 실제 인터랙션 간 비교)

제안된 핸드 햅틱 인터랙션 방법의 성능 평가를 위해, 가상 인터랙션과 동일한 실제 인터랙션을 수행하여 두 환경 사이의 성능 차이점을 보이고자 한다. 실제 인터랙션과 최대한 동일한 가상 인터랙션을 시뮬레이션하는 반복적 grasp 시나리오를 구성하였다. 그림 11(좌)와 같이 큐브를 3분 내에 가능한 빨리 반대쪽 사각형 구역 내로 이동하여야 하며, 이동에 성공시 적색으로 피실험자에게 결과를 알린다. 피실험

자는 그림 11(우)와 같이 동일한 크기의 실제 큐브에 대하여 가상 시나리오와 동일 작업을 수행한다. 또한, 피실험자 머리 움직임에 따른 입체 가시화를 반영하여 피실험자의 실제-가상 간 시간적 차이에 의한 인자를 줄였다.

실험은 총 6명의 피실험자에 대하여 수행하였으며, 표 2에 각 실험 시도에 관한 수행오류 및 총 수행 횟수를 정리하였다. 가상 핸드 햅틱 인터랙션이 실제 대비 약 1/2의 총 수행 횟수를 보였으며, 실제 시나리오의 피실험자 간 총 수행 횟수는 변화가 심하였으나 가상 시나리오는 피실험자 간 총 수행 횟수의 변화가 적음을 알 수 있다. 평균 2.8회의 수행오류 횟수(전체 총 수행 횟수 대비 11.5%)와 평균 24.3회의 총 수행 횟수는 지금까지의 핸드 햅틱 기반 인터랙션이 제한된 자유도 만을 제공하여 가상현실 애플리케이션에서 실 적용 사례가 극히 적음을 고려할 때 우수한 결과로 판단되며, 향후 실제 인터랙션과 유사한 수준

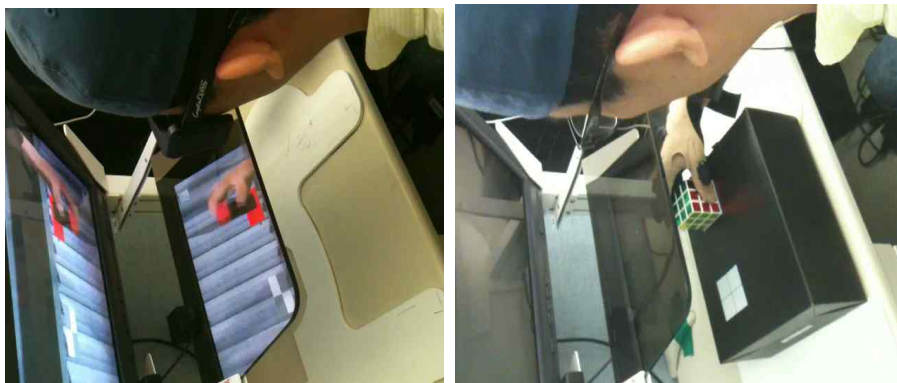


그림 11. 가상 핸드 햅틱 인터랙션 수행(좌)와 실제 핸드 햅틱 인터랙션 수행(우)

표 2. 가상과 실제 인터랙션 간 성능 비교

	가상 핸드 햅틱 인터랙션		실제 핸드 햅틱 인터랙션	
	수행오류횟수	총 수행 횟수	수행오류횟수	총 수행 횟수
피실험자 1	2	36	0	64
피실험자 2	5	20	0	41
피실험자 3	1	23	0	36
피실험자 4	4	24	0	62
피실험자 5	4	24	0	42
피실험자 6	1	19	0	51
평균	2.8	24.3	0	53.6
표준편차	1.7	6.0	0	19.5

으로 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 가상 인터랙션의 총 수행횟수와 오류 횟수에는 기존 트랙커 및 입체 가시화 성능의 한계도 영향을 미쳤음을 밝혀둔다.

4.4 Grasping 기반 인터랙션 성능 평가 II (가상 인터랙션 방법 간 비교)

먼저, 본 실험을 수행하게 된 배경에 대해서 설명하고자 한다. 기존 핸드 햅틱 인터랙션에서는 사용자가 시각적인 깊이감을 불완전하게 인지한다면, 초기 grasp 시 객체를 용이하게 잡기 어렵고 안정된 grasp를 지속적으로 유지하기 어려웠다. 그림 12(좌)와 같이, 견고한 grasp를 위해서는 엄지와 검지가 서로 반대 축으로 최대한 조정되어야 가상 객체가 손 안에서 이탈하는 것을 방지할 수 있다. 초기 grasp 시 품질평가척도가 나쁘면, 그림 12(우)에서와 같이 안정한 grasp 유지는 어렵게 된다.

따라서, 다음의 실험 평가를 통해 제안된 방법이

이러한 어려움을 극복할 수 있음을 보이고자 한다. 본 실험은 충돌 전 grasp 단계에서의 초기 grasp 능력을 테스트하고자 하며, 실험에서는 모노 및 입체 디스플레이 워크벤치 환경 하에서 견고한 초기 grasp와 세밀한 조작이 가능한지에 대한 기본적인 grasp 테스트를 수행하였다.

실험 수행을 위해 각 피실험자는 가능한 빠르게 단순 큐브를 잡아야 한다. 연속된 실험 시도에서의 경험적 학습 효과를 최소화하기 위해서 큐브는 무작위로 위치하게 된다. 총 6명의 피실험자에 대해서 각 테스트 당 30번의 시도를 하며, 시도 당 3초의 제한 시간이 주어진다. 실험은 모노 및 입체 디스플레이 환경에서 충돌 전과 충돌 후에 의한 단계적 방법 (grasp 품질평가척도 및 물리 시뮬레이션 적용)과 충돌 후 조작 단계만을 이용한 방법(물리시뮬레이션만 적용)의 두 가지 방법에 대해서 구분하여 테스트를 수행하였다.

각 피실험자에 대해서 제한된 시간 내 성공 시도

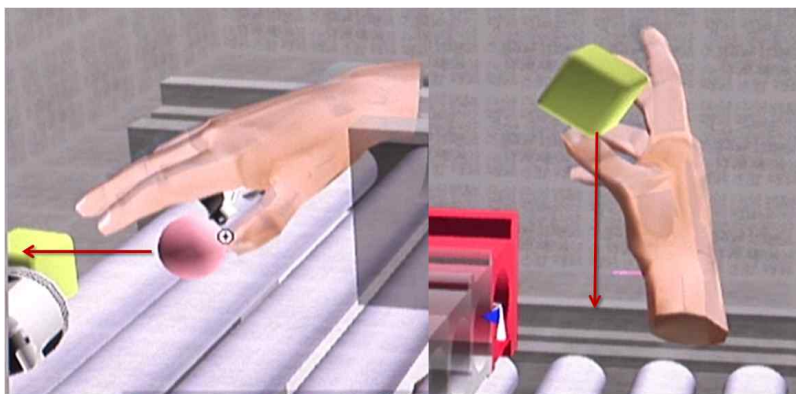


그림 12. 초기 grasp 시 엄지와 검지를 이용한 grasp의 어려움(좌)과 안정한 조작 상태 유지의 어려움(우)

를 카운트하고, 각 실험 시도 간 2-way ANOVA 테스트 수행 결과를 표 3에 보였다. 표 3은 각 요소인자간(grasp 방법 및 디스플레이)의 기술 통계 정보를 보여준다. 충돌 전과 충돌 후에 의한 단계적 방법(grasp 품질평가척도 및 물리 시뮬레이션 적용)이 높은 grasp 성공률을 보이고 있으며, 입체 가시화를 통한 시각적 깊이감이 성공률에도 높은 기여를 하고 있음을 알 수 있다.

표 4는 분산 분석에 대한 정보를 나타내며 grasp 방법*디스플레이 간 영향을 제외하고, 각 인자의 유의 값은 0.05보다 작으며 따라서 유의하다고 판단할 수 있다.

표 4의 Grasp 방법에 대한 유의 값은 충돌 전과 후의 단계적 제안 방법으로 객체를 빠르고 용이하게 grasp할 수 있음을 보여주고 있다. 디스플레이 인자에 관한 유의 값은 가시적 깊이감을 사용자가 불완전하게 인지하더라도 견고하게 가상 객체를 grasp할 수 있음을 나타내고 있다.

또한, 햅틱 하드웨어 장치는 역감 제시를 통해 가시적 깊이감을 용이하게 인지하도록 도움을 주는 것을 알 수 있다. 결론적으로 초기 grasp 시 충돌 전

단계를 통해 충돌 후 조작 단계만을 이용한 결과보다는 우수한 결과를 보였으며, 품질평가척도를 이용한 충돌 전 grasp 단계는 디스플레이 환경에 강인하게 핸드 햅틱 인터랙션에 견고한 grasp 상태를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

4.5 응용 애플리케이션

제안된 핸드 햅틱 인터랙션 방법을 자동차 엔진 설계를 위한 가상 조립 시뮬레이션 사례에 적용해보았다. 그림 13와 같이 자동차 엔진 조립을 위한 단계는 피스톤을 실린더에 삽입하고, 크랭크를 피스톤 로드와 결합 후 브래킷을 나사로 조이는 절차로 나눌 수 있다. 가상 조립 시뮬레이션 적용 사례를 통해 안정한 grasp와 정밀 조작(핀치(pinch), 꼭집기(power grip), 담배형태집기(cigarette grasping), 열쇠형태집기(key grasping))이 가능함을 알 수 있다. 그림 14는 자동차 부품 조립시 grasp 시도 및 객체 삽입을 할 때 충돌처리로 인해 시뮬레이션 율이 저하됨을 알 수 있다. 시뮬레이션 율의 저하는 스프링-조인트 동적 시뮬레이션시 가상 핸드의 진동을 야기시킬 수

표 3. 실험에 관한 기술 통계

방 법	디스플레이	평 균	표준 편차
충돌전 & 충돌후	모노	21.0000	2.00000
	입체	24.0000	2.44949
	총	22.5000	2.64579
충돌후 단계만 적용	모노	12.3333	2.58199
	입체	18.8333	3.60093
	총	15.5833	4.52183
총	모노	16.6667	5.03322
	입체	21.4167	3.98767
	총	19.0417	5.06032

표 4. 인자 간 영향 실험

소스	제 3 유형 제곱합	자유도	평균제곱(MS)	검정통계량(F)	유의확률
수정 모델	440.792	3	146.931	19.833	.000
절편값	8702.042	1	8702.042	1174.629	.000
방법 간	287.042	1	287.042	38.746	.000
디스플레이 간	135.375	1	135.375	18.273	.000
방법*디스플레이	18.375	1	18.375	2.480	.131
오차	148.167	20	7.408		
합계	9291.000	24			
수정합계	588.958	23			

a. R 제곱=.742(수정된 R 제곱=.711)

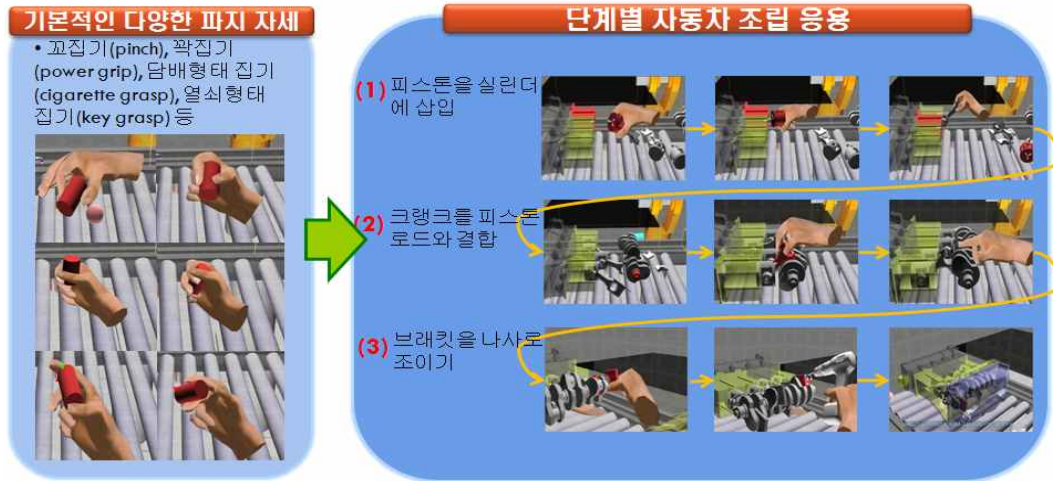


그림 13. 자동차 엔진 조립에 적용된 핸드 햅틱 인터랙션 적용 사례

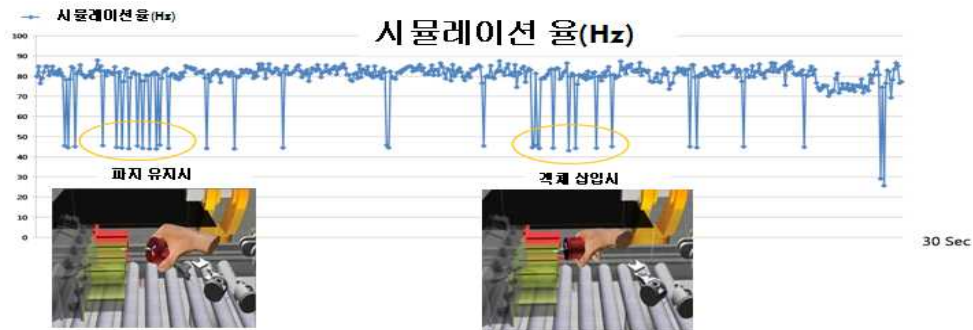


그림 14. 자동차 조립 인터랙션시 시뮬레이션 울

있어 향후 이에 대한 보완이 필요함을 밝힌다.

5. 결 론

핸드 햅틱 인터랙션은 가상환경과 인터랙션을 하는 궁극적인 인터페이스라고 할 수 있다. 현재까지 다수의 관련 연구가 진행되어 왔지만, 인간 손 관절체의 복잡성 및 관련 하드웨어의 한계점으로 인해 본격적으로 가상현실에 도입이 되지 못하고 있다.

본 연구는 가상 환경과 사실적인 인터랙션이 가능하도록, 견고하고 세밀한 핸드 햅틱 인터랙션 방법을 제안하였다. 충돌 전 grasp 단계에서는 품질평가척도를 이용하여 견고한 grasp이 가능하고, 충돌 후 조작 단계에서는 객체를 세밀하게 조작 할 수 있도록 인간 손 운동 특징을 분석하여 단계적 방법론을 제시하였다. 또한, 제안된 알고리즘을 효과적으로 이용 할 수 있는

핸드 햅틱 가상현실 인터페이스를 제시하였다. 실험을 통해서 제안된 알고리즘이 모노 및 입체 디스플레이 등 다양한 시각적 환경 하에서도 가시적 깊이감을 인지하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] D. Sturman and D. Zeltzer, "A survey of glove-based input," *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp 30-39, 1994
- [2] D.Bowman, E. Kruijff, and I. Poupyrev, *3D user interfaces*, Addison-Wesley, 2005
- [3] R. Boulic, S. Rezzonico, and D. Thalmann, "Multi-finger manipulation of virtual objects," *Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp 67-74, 1996

- [4] Z. Zhu, S. Gao, H. Wan, and W. Yang, "Trajectory-based grasp interaction for virtual environments," LNCS 4035:CG, pp 300-311, 2006
- [5] T. Ullmann and J. Sauer, "Intuitive virtual grasping for non haptic environments," Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp 373, 2000
- [6] V. Popescu, G. Burdea, and M. Bouzit, "Virtual reality simulation modeling for a haptic glove," Proceedings of the Computer Animation, pp 195-200, 1999
- [7] G. Kurillo, M. Mihelj, M. Munih, and T. Bajd, "Grasping and manipulation in virtual environment using 3By6 finger device," IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics", pp131-134, 2005
- [8] C. Borst and A. Indugula, "A spring model for whole-hand virtual grasping," *Presence: Teleoperators & virtual Environments*, Vol. 15, No. 1, pp 47-61, 2006
- [9] M. Weber, G. Heumer, H. Armor, and B. Jung, "An animation system for imitation of object grasping in virtual reality," Proceedings of ICAT 2006, pp65-76, 2006
- [10] R. Sanso and D. Thalmann, "A hand control and automatic grasping system for synthetic actors," Proceedings of Eurographics, pp 167-177, 1994
- [11] I. Albercht, J. Haber, and H. Seidel, "Construction and animation of anatomically based human hand models," Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Graphics, pp 98-109, 2003
- [12] J. Lee, S. Yoon, and M. Kim, "Realistic human hand deformation," *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 17, pp 479-489, 2006
- [13] M. Ciocarlie, A. Miller, and P. Allen, "Grasp analysis using deformable fingers," IROS 2005, pp 4122-4129, 2005
- [14] C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps," IEEE. International Conference on Robotics and Automation, pp 2290-2295, 1992
- [15] M. Goodale, *Vision and action: the control of grasping*, Ablex Pub, 1990
- [16] M. Lin and M. Otaduy, *Haptic rendering: foundations, algorithms and applications*, AK Peters, 2008
- [17] G. Burdea, *Force and touch feedback for virtual reality*, John Wiley & Sons, 1996
- [18] M. Spong, S. Hurchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*, John Wiley & Sons, 2005.



김 용 완

1996년 인하대학교 공학사
 1998년 광주과학기술원 공학석사
 2007년~현재 한국과학기술원 박사과정
 1998년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 가상 현실, 햅틱 렌더링



박 진 아

1988년 컬럼비아대학교 공학사
 1991년 펜실베이니아대학교 공학석사
 1996년 펜실베이니아대학교 공학박사
 1999년~2002년 한국과학기술원 대우교수및초빙교수
 2002년~2009년 한국정보통신대학교 조교수 및 부교수
 2009년~현재 한국과학기술원 부교수
 관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 햅틱 렌더링, 정보 가시화