

Dental Surgery Simulation Using Haptic Feedback Device

Yoon Sang Yeun[†] · Sung Su Kyung^{††} · Shin Byeong Seok^{†††}

ABSTRACT

Virtual reality simulations are used for education and training in various fields, and are especially widely used in the medical field recently. The education/training simulator consists of tactile/force feedback generation and image/sound output hardware that provides a sense similar to a doctor's treatment of a real patient using real surgical tools, and software that produces realistic images and tactile feedback. Existing simulators are complicated and expensive because they have to use various types of hardware to simulate various surgical instruments used during surgery. In this paper, we propose a dental surgical simulation system using a force feedback device and a morphable haptic controller. Haptic hardware determines whether the surgical tool collides with the surgical site and provides a sense of resistance and vibration. In particular, haptic controllers that can be deformed, such as length changes and bending, can express various senses felt depending on the shape of various surgical tools. When the user manipulates the haptic feedback device, events such as movement of the haptic feedback device or button clicks are delivered to the simulation system, resulting in interaction between dental surgical tools and oral internal models, and thus haptic feedback is delivered to the haptic feedback device. Using these basic techniques, we provide a realistic training experience of impacted wisdom tooth extraction surgery, a representative dental surgery technique, in a virtual environment represented by sophisticated three-dimensional models.

Keywords : Virtual Reality, Haptic Feedback, Force Feedback, Dental Surgery Simulation, HCI

햅틱 피드백 장치를 이용한 치과 수술 시뮬레이션

윤상연[†] · 성수경^{††} · 신병석^{†††}

요약

가상 현실 시뮬레이션은 다양한 분야에서의 교육과 훈련에 활용이 되며, 특히 최근에는 의료 분야에서 많이 사용되고 있다. 교육/훈련용 시뮬레이터는 의사가 실제 수술 도구를 이용하여 실제 환자에 대해 처치를 하는 것과 같은 느낌이 나게 하는 촉감/역감 생성 및 영상/음향 출력 하드웨어와 여기에 실감 나는 영상과 촉감을 생성해주는 소프트웨어로 이루어진다. 기존의 시뮬레이터들은 수술 시에 사용되는 다양한 수술 도구들을 모사하기 위해 다양한 형태의 하드웨어들을 사용해야 하므로 복잡하고 비용이 많이 소요되는 문제가 있다. 이 논문에서는 포스 피드백 장치와 변형 가능한 햅틱 컨트롤러를 이용한 치과 수술 시뮬레이션 시스템을 제안한다. 햅틱 하드웨어들은 수술 도구와 수술 부위의 충돌 여부를 파악하고 그에 따른 저항감과 진동감을 제공한다. 특히 길이 변화, 굽힘과 같은 변형이 가능한 햅틱 컨트롤러는 여러 수술 도구들의 형태에 따라 느껴지는 다양한 감각을 표현할 수 있다. 사용자가 햅틱 피드백 장치를 조작하면 햅틱 피드백 장치의 움직임이나 버튼 클릭 등의 이벤트가 시뮬레이션 시스템에 전달되어 치과용 수술 도구와 구강 내부 모델들 사이의 상호작용이 발생하고 이에 따른 햅틱 피드백이 햅틱 피드백 장치로 전달된다. 이러한 기반 기술들을 활용하여 정교한 3차원 모델로 표현된 가상 환경에서 대표적인 치과 수술기법인 매복 사랑니 발치 수술의 현실적인 훈련 경험을 제공한다.

키워드 : 가상 현실, 햅틱 피드백, 포스 피드백, 치과 수술 시뮬레이션, 인간 컴퓨터 상호작용

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1A2B5B01001553 / No. NRF-2022R1A4A1033549).

※ 이 논문은 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00155915, 인공지능융합혁신인재양성(인하대학교)).

※ 이 논문은 2022년 한국정보처리학회 ACK 2022의 “햅틱 컨트롤러를 이용한 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이션”의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것이다.

† 준회원 : 인하대학교 전기컴퓨터공학과 석사과정

†† 준회원 : 인하대학교 전기컴퓨터공학과 박사과정

††† 종신회원 : 인하대학교 컴퓨터공학과 교수

Manuscript Received : December 20, 2022

First Revision : February 24, 2023

Second Revision : March 27, 2023

Accepted : April 3, 2023

* Corresponding Author : Shin Byeong Seok(bsshin@inha.ac.kr)

1. 서론

가상현실 기술을 활용한 교육/훈련용 시뮬레이터들은 재현하기 어려운 상황을 가상적으로 만들어 제공함으로써 훈련의 효과를 높이고 현실에서는 한번 밖에 할 수 없는 과정을 여러 번 반복할 수 있도록 함으로써 교육비용을 크게 절감할 수 있는 장점이 있다. 특히 의료 분야는 인체를 대상으로 한 다양한 치료와 시술을 수행해야 하므로 특별히 많은 반복 훈련이 필요하다[1].

외과 수련의들은 수술 훈련을 통해 기본적인 수술기법에 익숙해질 수 있다. 또한, 수술 훈련은 전문적인 수술 도구에 대한 숙련도를 높여 수술 후 회복 기간을 단축하고 환자의 안

전을 보장하기 위해 필수적이다. 이 때문에 더욱 현실적인 수술 훈련을 지원하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

그중 하나는 동물 사체나 마네킹과 같은 수술용 모형을 사용하여 실제 수술과 비슷한 환경에서 연습하는 방법이다. 하지만 동물 사체는 한번 사용하면 더는 사용할 수 없고 모형은 구매와 관리하는 데에 상당한 비용이 발생하므로 지속적으로 훈련이 이루어지기 힘들다. 또한, 환자 치료와 수술을 해야 하는 외과 의사들이 수련의들에게 시범을 보이거나 실시간으로 피드백을 제공할 수 있는 수술 훈련에 많은 시간을 사용하는 것은 현실적으로 어려움이 많다. 수술 훈련을 위해 실제 수술을 해야 하는 수술실을 지속해서 점유하는 것도 문제가 된다.

이 때문에 수술실 이외의 장소에서 반복적으로 수술 훈련을 하기 위한 대안으로 수술 시뮬레이션이 제안되고 있다[2]. 실제 모형을 사용하지 않기 때문에 수련의들이 수술 과정과 기법에 충분히 숙달될 때까지 여러 번 반복할 수 있으며 외과 의사들이 원격 모니터링을 통해 많은 시간을 들이지 않고도 수술에 대한 피드백을 제공할 수 있다. 또한, 훈련 과정을 기록하고 훈련 결과에 대해 평가를 하여 부족한 기법만 반복적으로 훈련하는 데도 활용할 수 있다.

더욱 현실적인 시뮬레이션을 위해 촉감(tactile feedback)과 역감(force feedback)을 표현할 수 있는 햅틱 장치에 관한 연구들이 진행되어왔다[3]. 햅틱 장치는 사용자에게 몰입감 있는 피드백을 제공하여 눈에 보이는 가상 환경과 현실 사이의 이질감을 줄이고 현실적인 수술 경험을 제공하는 데 도움을 준다.

이 논문에서는 변형 가능한 햅틱 컨트롤러를 이용하여 다양한 상황에 대응할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하고 이를 대표적인 치과 수술인 매복 사랑니 발치 수술 훈련에 적용한 것을 제안한다. 이 시뮬레이션 시스템에서는 포스 피드백 장치(force feedback device)와 여기에 연결된 변형 가능한 햅틱 컨트롤러(MHC: Morphable Haptic Controller) [4, 5]가 사용되어 사용자가 매복 사랑니 발치 수술에 사용되는 다양한 수술 도구들과 수술 중 신체 부위와의 접촉에서 발생하는 감각을 느낄 수 있도록 한다. 기존 시뮬레이터는 개별 수술 도구를 모사하기 위해 여러 개의 장치를 사용해야 하는 문제가 있다. 이는 수술 도구마다 길이, 두께, 무게중심, 작동 범위들이 다르기 때문이다. 유사한 형상을 가지는 수술 도구들을 한 장치로 모사하게 하더라도 워낙 수술 종류별로 다양한 기구들이 사용되기 때문에 여러 가지 햅틱 컨트롤러들이 사용되어야 한다. 이것은 여러 가지 하드웨어를 제작하기 위해 큰 비용이 소요되고 소프트웨어를 복잡하게 하여 안정성을 저해시킨다. 이에 반해 MHC는 길이가 변하거나 일정 각도 내에서 굽힘이 발생하는 등의 변형을 통해 수술 도구의 형태를 모사할 수 있으므로 단일 컨트롤러로 여러 수술에 사용되는 다양한 도구의 감각을 재현할 수 있다. MHC를 제어하기 위한 명령어를 수정하여 다수의 MHC를 사용할 수 있도록 하는 등의 확장성 또한 동시에 여러 수술 도구를 사용하는

감각을 제공하여 몰입감이 높이는 데에 도움을 줄 수 있다. 또한, 포스 피드백 장치를 이용하여 수술 과정에서 발생하는 수술 도구와 인체 모델과의 충돌로 인한 역감을 표현함으로써 현실적인 훈련 경험을 제공한다. 범용 그래픽 엔진인 유니티를 이용하여 현실적인 수술실과 정교한 치아 모델, 치과용 수술 도구를 포함한 수술 환경에서 매복 사랑니 발치 수술을 훈련할 수 있는 애플리케이션을 구현하였다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 이전에 연구된 수술 시뮬레이션과 VR 시스템, 햅틱 장치를 소개하고 이들을 접목하여 현실성을 높이는 방법을 소개한다. 3장에서는 역감을 제공하는 변형 가능한 햅틱 컨트롤러와 이를 이용한 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이션 시스템을 설명하고 4장에서 시뮬레이션 결과를 설명하며 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

1990년대 이후부터 실제 수술 훈련을 대체할 수 있도록 아킬레스건 복구[6], 담낭 절제[7], 괴사조직 제거 및 봉합[8] 등의 VR 수술 시뮬레이션이 개발되었다. 낮은 컴퓨팅 성능으로 인한 느린 반응 때문에 몰입감이 부족했던 초기의 시뮬레이션에 비해 최근에는 컴퓨팅 성능이 향상되어 더 현실적이고 해부학적으로 정확한 시뮬레이션들이 개발되고 있다. 또한, 특정 외과 수술을 위해 전용 장치가 필요한 과거와 달리 최근에는 하나의 기기로 미세 해부, 종양 흡인, 종양축소술, 지혈 등 다양한 외과 수술을 할 수 있는 NeuroTouch VR 신경외과 시뮬레이터가 개발되었다[9]. CT, MRI 영상 등 2차원 영상으로 3차원 모델을 만드는 기술이 개발되면서 환자 맞춤형 모델을 활용한 VR 시뮬레이터도 개발됐다. 이러한 시뮬레이터는 범절제술, 간절제술[10], 신장 수술[11] 및 손 수술[12]에 사용되어 수술 전 환자 및 수술 팀의 동료 의사들과 수술 계획에 관한 시각적 의사소통을 가능하게 한다.

VR 시스템에서 HMD(Head Mounted Display)는 고해상도의 영상을 표현하여 몰입감을 높이기 위해 사용되며, 컨트롤러는 사용자로부터 입력을 받기 위해 사용된다[13]. 이 컨트롤러에는 사용자가 명령을 입력할 수 있는 버튼과 공간 내에서의 위치를 파악할 수 있도록 하는 위치 추적 장치가 내장되어있다. 햅틱 피드백 기능을 포함한 최근의 컨트롤러들은 다양한 촉감과 운동감각을 제공할 수 있다. 수술 시뮬레이션에서 중요한 요소 중 하나인 가상 환경에서 컨트롤러를 움직일 때 수술 도구의 이동에 따른 수술 부위에서 발생하는 역감은 햅틱 기술의 중요성을 더욱 높이고 있다.

수술 시뮬레이션에 활용되는 햅틱 장치는 데스크톱(desktop)과 웨어러블(wearable) 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 데스크톱 햅틱 장치[14]는 책상 등의 표면에 올려놓고 스타일러스 형태의 핸들을 사용하지만, 웨어러블 햅틱 장치는 햅틱 장갑[15, 16]을 착용하여 손이나 손가락의 움직임을 직접 감지하고 가상 환경과 상호 작용할 수 있기 때문에 몰입감

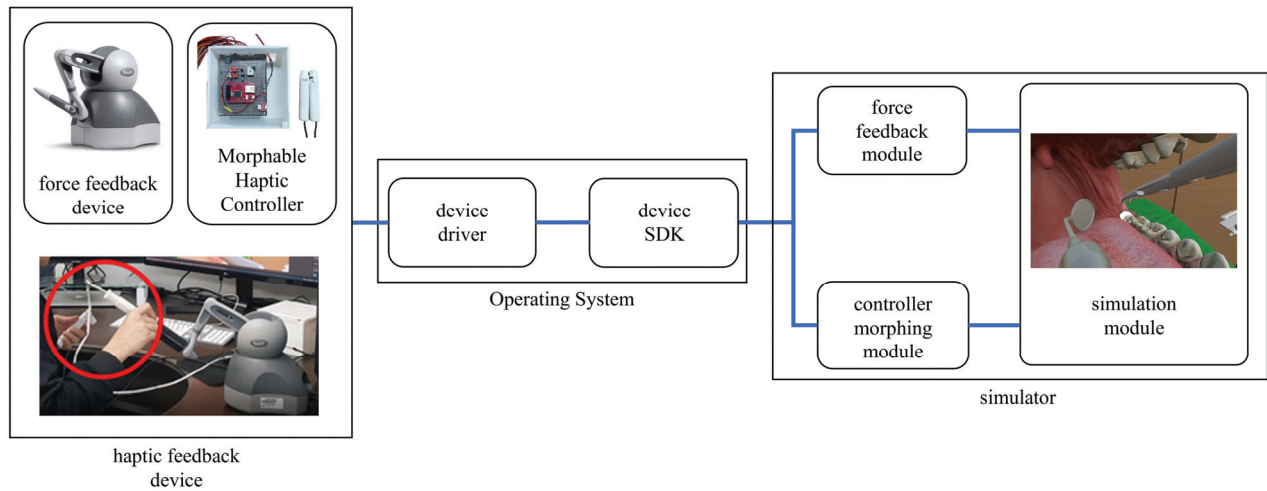


Fig. 1. Configuration of the proposed simulation system. The force feedback device of our haptic feedback device transmits the position and direction of the morphable haptic controller to the force feedback module of the simulator. The force feedback module uses those data to calculate collisions between surgery tools and teeth or oral objects. In the event of collisions, it activates the motor of the force feedback device to generate a force feedback. The MHC receives a string command delivered through the controller morphing module of the simulator, changes its shape, and transmits data to the controller morphing module when a button click event occurs.

이 향상된다. 하지만 웨어러블 햅틱 장치는 탈착이 어려우므로 최근에는 HTC VIVE 컨트롤러와 같은 간단한 수준의 햅틱 피드백만을 제공하는 리모컨 형태의 햅틱 장치가 널리 사용되고 있다[17].

범용 햅틱 컨트롤러를 사용하는 방법보다 몰입도가 높은 수술 시뮬레이션 경험을 제공할 수 있도록 전용 햅틱 컨트롤러를 사용하는 방법들이 많이 연구되고 있다. 내시경 부비동 및 두개골 기저 질환 수술 훈련을 위한 두 개의 햅틱 장치와 페달을 사용하는 시뮬레이션[18], 3D 가상 환경에서 수술 과정을 볼 수 있도록 입체 안경을 착용하고 사용하는 햅틱 장치를 이용한 크라운 치료 훈련[19], 복강경 수술에 사용되는 수술 도구를 구현하기 위해 실제 수술 도구에 마커를 부착하는 시뮬레이션 방법[20] 등이 제안되었다. 본 연구진의 기존 연구에서는 사용자가 하나의 장치로 다양한 운동 감각과 촉각을 경험할 수 있도록 단일 장치로 여러 수술 도구를 표현할 수 있는 정형외과 수술 시뮬레이션[21]을 제안하였다. 이 논문에서 제안하는 수술 시뮬레이션에서는 기존의 정형외과 시뮬레이터와 달리 MHC를 치과 수술에 맞게 소형화하고, 수술 도구의 위치를 정확히 파악하여 기구와 신체 부위 간의 충돌 발생 시 생기는 역감을 사실적으로 표현할 수 있도록 하였다.

3. 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이션

3.1 시스템 구성

이 연구에서는 햅틱 피드백 장치를 이용하여 매복 사랑니 발치 수술의 과정을 훈련할 수 있도록 한다. 여기서는 HMD에 환자의 환부와 수술에 사용되는 도구를 보여주고 그 사용

방법을 재현한다. 사용자는 화면에 시현되는 예시에 따라서 수술 동작을 따라 하고 그 동작이 시행될 때 발생하는 시청각 및 촉각 반응을 HMD와 햅틱 피드백 장치로 재현해준다. 시스템은 가상 환경 내에서 수술 도구와 치아의 상호작용을 제공하는 시뮬레이터와 사용자가 실제 수술 도구처럼 손에 쥐고 사용하는 햅틱 피드백 장치로 구성되어 있다. 이 햅틱 피드백 장치는 트래커(tracker)가 내장되어 위치와 방향을 감지할 수 있고 저항감과 같은 역감을 재현하는 상용 포스 피드백 장치인 Touch[22, 23]와 길이 변화, 굽힘과 같은 변형으로 여러 도구의 감각을 재현하는 MHC로 구성되어 있다. Fig. 1은 이 연구에서 제안하는 가상 수술 시스템의 구성도를 보여준다. 포스 피드백 장치와 MHC로 이루어진 햅틱 피드백 장치는 각각의 장치 드라이버와 장치 SDK(Software Development Kit)가 제공하는 API(Application Programming Interface)를 통해 시뮬레이터와 데이터를 주고받는다. 먼저 포스 피드백 장치는 시뮬레이터의 포스 피드백 모듈(force feedback module)에 햅틱 피드백 장치의 위치와 방향에 대한 정보를 전달한다. 포스 피드백 모듈은 이를 이용하여 시뮬레이션 모듈(simulation module) 내에서의 도구와 치아나 구강 객체들과의 충돌을 계산하고 충돌이 발생한 경우 포스 피드백 장치의 모터를 작동시켜 저항감을 생성한다. MHC는 시뮬레이터의 컨트롤러 변형 모듈(controller morphing module)을 통해 전달한 문자열 형태의 명령어를 받아 MHC 내부의 모터를 작동시킴으로써 형태를 변화한다. 명령어는 장치에 고유한 식별자, MHC의 내부 모터 식별자, 진동 강도, 모터 작동 시간 등의 정보를 포함하고 있어 시뮬레이션 도중 바뀌는 수술 도구의 형태에 따른 다양한 변형을 만들어 낼 수

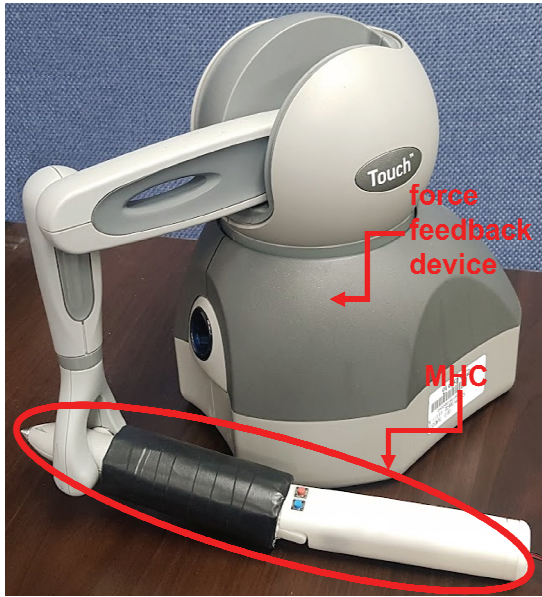


Fig. 2. Prototype of haptic feedback device. The MHC consists of a handle that the user can hold and move and a top connection unit to the arm of the force feedback device with a button attached.

있다. 또 컨트롤러 변형 모듈은 MHC의 두 버튼을 누를 때 발생하는 입력값을 시뮬레이션 모듈에 전달하여 시뮬레이션 모듈에 정의된 각 수술 도구의 기능들을 사용할 수 있도록 만든다. 시뮬레이션 모듈은 매복 사랑니 발치 수술 진행에 따른 치아와 구강 내부 객체들의 상태 변화와 이에 따른 이벤트를 제어하며 포스 피드백 모듈과 컨트롤러 변형 모듈을 통해 햅틱 피드백 장치의 포스 피드백 장치를 통한 역감과 햅틱 피드백 장치의 MHC를 변형함으로써 촉감을 생성한다.

3.2 햅틱 피드백 장치

제안하는 시스템에서는 몰입감이 높은 시뮬레이션 경험을 제공하기 위해 포스 피드백 장치에 부착된 MHC를 햅틱 피드백 장치로 사용했다. 이 햅틱 피드백 장치는 마찰과 같은 저항감을 표현하고 길이 변형, 굽힘, 진동을 표현할 수 있는 데스크톱 햅틱 장치로 분류할 수 있다. Fig. 2는 햅틱 피드백 장치의 프로토타입을 보여준다. Fig. 2의 하단 부분에 위치한 MHC는 사용자가 잡고 움직일 수 있고 버튼이 부착된 핸들과 포스 피드백 장치의 스타일러스 팁에 부착되는 상단 연결부로 이루어져 있다. 포스 피드백 장치의 스타일러스는 장치의 팔에 연결되어 팔 관절에 존재하는 센서에 의해 위치와 방향이 감지된다. 또한, 포스 피드백 장치의 팔 관절과 본체에는 모터가 내장되어 팔의 각도를 제어한다.

가상 객체와 햅틱 피드백 장치 사이의 역감을 위해 3D Systems의 Touch 장치를 사용하였다. 이 장치는 X, Y, Z, roll, pitch, yaw의 6자유도를 가지므로 3차원 공간상의 위치와 3축 회전 감지 기능을 제공하며 X, Y, Z의 3자유도 역

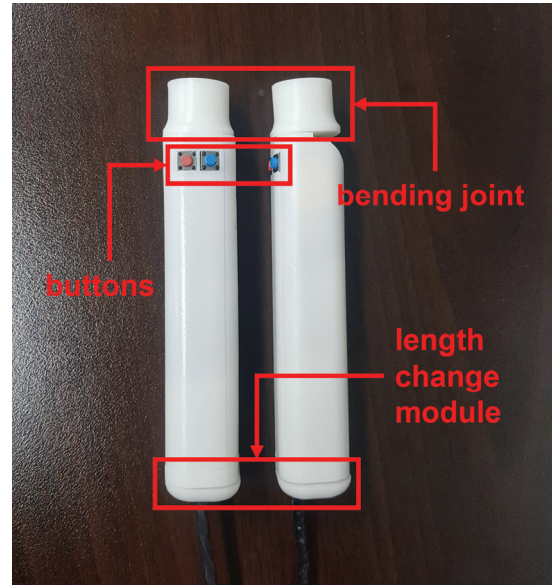


Fig. 3. Components of the MHC. It consists of a length change module with a built-in DC motor, a bending joint with a built-in step motor, a vibration motor, and a button.

감을 제공한다. 사용자가 햅틱 피드백 장치를 움직이는 동안 시뮬레이터에서의 구강 모델과 사용자가 움직이는 햅틱 피드백 장치와 사이 충돌이 발생하면 햅틱 피드백 장치로 모터를 작동시키도록 하는 역감 신호가 전달되어 특정 방향으로 작용하는 힘을 느끼게 한다. 이를 이용하여 매복 사랑니 발치 수술 시 치아나 잇몸 등 객체들과 상호작용함으로써 발생하는 마찰, 진동 등의 감각을 경험할 수 있다.

다양한 수술 도구의 감각을 재현하기 위해 MHC를 사용하였다. Fig. 3은 MHC의 구성 요소들을 보여준다. MHC의 길이 변형과 굽힘은 각각 길이 변형 모듈(length change module), 굽힘 관절(bending joint)에 내장된 모터들을 작동시켜 이루어진다. 시뮬레이터가 길이 변형 명령어를 전송하면 햅틱 피드백 장치에 연결된 MHC 제어시스템이 내장된 DC 모터를 작동시켜 하단의 길이 변형 모듈이 위아래로 움직이며 길이를 조정한다. Fig. 4A는 MHC의 길이가 증가된 모습을 보여준다. 시뮬레이터가 굽힘 명령어를 전송하면 MHC 제어시스템은 스텝 모터와 연결된 MHC 상단 연결부의 굽힘 관절을 회전시켜 최대 90도의 범위에서 자유롭게 각도를 변경할 수 있다. Fig. 4B는 MHC의 굽힘 변형을 보여준다. MHC에 내장된 진동 모터는 주파수, 세기, 지속 시간이 포함된 진동 명령어를 수신하여 각 수술 도구의 특성에 맞는 특정한 진동을 발생시킨다. 이러한 기능들을 이용하여 수술 도구가 변경될 때마다 수술 도구의 형태를 모사하여 길이, 각도를 변형시키고 진동을 발생시킨다. 예를 들어, 수술 도구를 드릴로 변경하여 치아 절삭을 진행할 경우 MHC에 부착된 버튼을 누를 때 MHC가 진동하여 사용자에게 실제 드릴과 유사한 감각을 제공한다. 또 다른 예로, 이물질 흡입을 위한



Fig. 4. MHC morphing states. A is the state of increasing the length of the MHC. B is a bending state of the MHC.

수술 도구인 흡인기를 사용하여 치아 절삭 과정 중 발생하는 치아 파편을 제거하는 경우 MHC의 길이가 늘어나며 굽힘이 발생하여 사용자가 흡인기의 형태를 실제처럼 느낄 수 있다.

또한, 우리의 기존 연구[24]를 확장하여 두 개의 MHC를 사용하여 더욱 현실적인 수술환경을 재현하였다. 하나는 기존과 동일하게 포스 피드백 장치에 연결하여 치아나 구강 내부의 객체들과 직접 충돌하거나 상호작용하는 도구에 사용된다. 추가된 MHC는 매복 사랑니 발치 수술에서 치아와 직접 상호작용하지 않고 사용되는 도구에 사용된다. 예를 들어 수술 과정 중 혈액이나 치아 파편을 빨아들이기 위해 사용되는 흡인기, 수술 과정 중 구강 내부에서 직접 볼 수 없는 부분을 볼 수 있도록 사용하는 치경과 같은 도구들은 수술 시에 사용되기는 하지만 환부와 직접 접촉하지는 않는다. 따라서 사용자는 두 개의 MHC를 양손에 들고 사용함으로써 실제 수술 과정 동안 사용되는 도구의 상호작용을 좀 더 현실적으로 느낄 수 있다.

3.3 시뮬레이터

제안된 시뮬레이터는 범용 그래픽 엔진인 유니티를 사용하여 구현되었으며 포스 피드백 장치와 MHC를 제어하기 위한 모듈들과 3D 모델로 구성된 가상 환경에서 수술 과정을 재현하는 시뮬레이션 모듈로 구성되어 있다.

실감 나는 수술 시뮬레이션을 위해서는 사용자가 조작하는 햅틱 피드백 장치에 가상 환경 내의 충돌로 인한 역감을 전달하는 것이 필요하다. 이를 위해 포스 피드백 장치를 제어할 수 있는 모듈을 사용하였다. 포스 피드백 모듈은 사용자의 손

움직임에 의한 위치와 방향 변화 데이터를 시뮬레이터에 전달하고 이를 이용하여 가상 환경 내의 수술 도구의 위치와 방향을 변화시킨다. 수술 도구가 움직임에 따라 치아와 잇몸 등 객체들과 충돌하는 경우 움직임을 제한하는 명령어를 햅틱 피드백 장치에 전달하여 현실적인 수술 도구의 움직임에 따른 역감을 경험할 수 있게 한다.

시뮬레이션 과정 동안 바뀌는 수술 도구의 형태에 따른 촉감을 표현하기 위해 사용된 MHC는 시뮬레이터 내부의 컨트롤러 변형 모듈과 명령어를 주고받는 방식으로 작동한다. 하나의 장치로 가상 환경 내의 다양한 수술 도구를 시뮬레이션할 수 있도록 컨트롤러 변형 모듈은 MHC의 길이 변화와 굽힘, 진동을 발생시키는 명령어를 제공한다. 시뮬레이션 모듈이 컨트롤러 변형 모듈의 명령어를 통해 수술 도구의 변경에 따른 길이 변화, 굽힘 명령을 내리면 컨트롤러 변형 모듈은 스트림을 통해 햅틱 피드백 장치에 변형 명령어에 매핑된 문자열 데이터를 전달한다. 진동의 경우 사용자가 진동 명령어가 할당된 햅틱 피드백 장치의 버튼을 클릭하면 컨트롤러 변형 모듈이 버튼 입력 데이터를 수신하여 진동 명령어에 매핑된 문자열 데이터를 스트림을 통해 햅틱 피드백 장치에 전달한다.

동시에 다양한 수술 도구의 감각을 느낄 수 있도록 두 개의 MHC에 개별적으로 매핑된 명령어를 사용하여 서로 다른 변형을 적용할 수 있도록 하였다. 컨트롤러 변형 모듈을 통해 두 MHC에 전달되는 명령어는 두 개의 MHC 중 어느 장치를 변형할 것인지에 대한 정보를 포함한다. 기존의 연구에서 길이가 변하는 정도와 굽히는 각도를 조절할 수 없던 것을 보완하여 길이 변형과 굽힘이 발생하는 시간을 조절할 수 있도록 명령어를 수정하였다. 따라서 두 MHC는 도구의 형태에 따라 각기 다른 길이와 각도로 변화한 형태를 취할 수 있어 보다 현실적인 도구의 형태를 모방하고 사용자에게 현실적인 훈련 경험을 제공할 수 있다. 또한, 수술 과정 중 도구의 변화를 자연스럽게 느낄 수 있도록 사용자가 이전 수술 단계에서 사용한 도구를 HMD의 뷰포트에서 보이지 않게 움직였을 때 도구의 형태를 변화시켜 시뮬레이션 도중 몰입감이 떨어지는 것을 보완하였다.

시뮬레이션 모듈은 시뮬레이션 과정에서 수술 도구와 가상 객체들의 상호작용을 제어하기 위해 햅틱 피드백 장치의 움직임 및 버튼 클릭과 같은 입력값을 활용한다. 구강 내부의 잇몸과 치아 모델은 시뮬레이션 모듈에 정의된 수술 단계별로 실제 수술과 같은 방식으로 변화하도록 설계되어 있다. 시뮬레이션의 편의성을 위해 우리의 시뮬레이션 모듈은 HMD와 구강 내부 모델들과의 거리를 계산하여 일정 거리 이하가 되었을 때 구강 외부의 모델을 투명하게 처리하였다. 이를 통해 사용자는 수술 부위에만 집중할 수 있다.

시뮬레이션 모듈은 각 수술 단계에서 사용되는 수술 도구의 형태를 모사하기 위한 변형 상태를 정의하고 컨트롤러 변

형 모듈을 통해 햅틱 피드백 장치에 전달한다. 또한, 각 수술 단계에서 발생하는 수술 도구와 치아나 구강 내부 객체들과의 상호작용에 의한 역감을 표현하기 위해 포스 피드백 모듈을 통해 햅틱 피드백 장치의 위치와 방향을 제어한다. 매복 사랑니 발치 수술은 잇몸 절개, 치아 절삭, 치아 분리, 치아 탈구, 잇몸 봉합의 단계로 이루어져 있으며 먼저 잇몸 절개 단계에서는 메스를 사용하여 발치할 매복 사랑니를 덮고 있는 잇몸을 절개한다. 이때 메스로 절개하는 잇몸 모델을 보여주고 잇몸을 절개할 때 실제 잇몸이 갈라지는 형태와 비슷한 애니메이션을 적용하였다. 치아 절삭 단계에서는 드릴을 사용하여 제거할 치아를 감싸고 있는 치조골과 치아를 분리하고 치아를 제거하기 위하여 여러 개의 조각으로 절삭하는 단계이다. 이 단계에서 시뮬레이션 모듈은 잇몸 절개 단계에서의 절개를 통해 드러난 치조골과 치아 모델을 보여준다. 또한, 치아를 절삭하는 동안 치아 모델 상단에 치아 절삭 진행도를 나타내는 원형 UI를 표시하고 실제 치아가 절삭되며 파편이 생기는 듯한 애니메이션을 적용하였다. 이어서, 치아 분리 단계에서는 수술 겸자를 사용하여 여러 조각으로 분쇄된 치아 중 치조골에서 완전히 분리된 치아들을 제거한다. 이때 사용자는 치아 절삭 단계에서 분쇄한 치아 모델 조각을 볼 수 있으며 이를 구강 내부에서 완전히 제거해야 한다. 치아 탈구 단계에서 치조골과 완전히 분리되지 않은 치아 조각을 제거하며 잇몸 봉합 단계에서는 수술 겸자로 수술용 바늘을 움직여 수술 부위를 봉합한다. 잇몸 봉합 단계를 마치면 수술 부위는 봉합이 끝난 잇몸 모델로 표현된다.

두 개의 수술 도구를 사용하여 수술을 진행할 경우 발생할 수 있는 수술 도구 간의 상호작용을 모사하기 위해 한 MHC의 진동이 다른 MHC로 전파될 수 있도록 진동이 발생하는 도구에 접촉한 객체와 진동이 발생하지 않는 도구가 충돌할 경우 발생하는 이벤트를 정의하고 적용하였다. 예를 들어 치경이 강한 세기로 진동하고 있는 드릴과 접촉하고 있는 치아에 충돌할 때 치아를 통해 전파되는 지속적이고 세기가 약한 진동을 느낄 수 있는 것을 모사하기 위해 시뮬레이션 모듈은 포스 피드백 장치가 연결되지 않은 MHC에 약한 진동 명령을 전달한다.

4. 실험 결과

실험은 인텔 i9-9900K 3.60GHz CPU와 32GB 메모리가 장착된 PC에서 수행되었다. GPU는 8GB 메모리를 탑재한 NVIDIA GeForce RTX 2080이 사용되었다. VR 시뮬레이터는 유니티 엔진을 사용하여 구현되었다.

개발된 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이터는 사용자가 시뮬레이션을 수행하는 동안 실제 수술과 같은 순서로 수술 도구를 사용할 수 있도록 구현되었다. 또한, 우리는 햅틱 피드백 장치가 실제 수술 도구의 형태와 유사하게 변형되는지 확

인하였다. 햅틱 피드백 장치의 버튼을 누를 시 실제 수술 도구와 유사하게 진동하는지에 대한 검증도 수행하였다.

제안된 햅틱 피드백 장치가 사용자가 실제 수술 도구를 사용하는 것과 유사한 감각을 제공하는 것을 확인하였다. Fig. 5A에서 볼 수 있는 잇몸 절개 단계에서 햅틱 피드백 장치는 길이가 늘어나 메스의 형태를 모사하였다. Fig. 5B에 나타난 치아 절삭 단계에서 햅틱 피드백 장치는 드릴의 형태와 같이 굽힘이 발생하였으며 버튼을 누를 때 진동이 발생하였다. 이때 치아 파편을 제거하기 위해 사용되는 흡인기가 치아와 접촉한 경우 드릴의 진동이 치아를 통해 전달되는 것처럼 흡인기를 모사한 햅틱 피드백 장치가 진동하였다. 이어서 Fig. 5C에서 볼 수 있는 수술 겸자를 사용하는 치아 분리 단계에서 햅틱 피드백 장치는 길이가 감소하여 수술 겸자의 형상을 모방하였다. Fig. 5D에서는 전반적인 수술 과정에서 사용할 수 있는 흡인기의 작동화면을 보여준다. Fig. 5E에 나타난 치아 탈구 단계에서 햅틱 피드백 장치는 굽힘이 복원되어 수술용 올림기의 형태를 모사하였다. 마지막으로 Fig. 5F에서 볼 수 있는 잇몸 봉합 단계에서는 햅틱 피드백 장치가 굽힘이 발생하여 수술용 바늘이 부착된 수술 겸자의 형태를 모사하였다. 그 결과 여러 개의 수술 도구를 각각의 햅틱 장치로 모사하는 것보다 장치가 차지하는 공간을 줄이면서도 다양한 수술 도구를 하나의 장치로 모사함으로써 사용자들의 편의성을 증진시킬 수 있었다. 또한, 우리의 기존 연구[24]를 확장하여 두 개의 MHC를 통해 수술 과정 동안 사용되는 도구 사이의 상호작용으로 발생하는 감각을 제공함으로써 더욱 현실적인 수술 경험을 제공할 수 있었다.

또한, 수술 과정 전반에서 햅틱 피드백 장치에 연결된 포스 피드백 장치를 통해 마찰이나 일정 방향으로 작용하는 힘을 발생하여 수술 도구와 치아와 구강 내부 객체들의 상호작용을 모사하는 것을 확인하였다. 메스를 사용하여 잇몸을 절개하는 단계에서 햅틱 피드백 장치에 메스의 날 방향으로 마찰력이 작용하였다. 또한, 치아 분리 단계에서 수술 겸자를 사용하여 치아를 이동시킬 때 햅틱 피드백 장치에 중력을 모사한 아래 방향으로 일정한 힘이 작용하였다. 이어서 치아 탈구 단계에서 수술용 올림기를 사용하여 치아를 들어 올리는 동안 햅틱 피드백 장치에 치조골과 치아 사이에 작용하는 마찰력을 모사한 일정한 힘이 작용하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 개발된 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이터에서 사용자가 볼 수 있는 수술 환경과 작동 모습을 보여준다.

시뮬레이션 시스템의 몰입감 및 교육적 효과를 증명하기 위해 설문 조사를 진행하였다. 10명의 일반인을 대상으로 설문을 진행하였으며, 응답자들은 매복 사랑니 발치 수술의 진행 과정을 보여주는 동영상을 통해 수술 과정, 도구의 사용법 등 배경 지식을 습득한 뒤, Fig. 7과 같이 HMD를 착용하고 햅틱 피드백 장치를 직접 움직이며 실제 수술 과정과 시뮬레이션 시스템의 유사성을 확인하였다. 설문은 시뮬레이션 시스템의

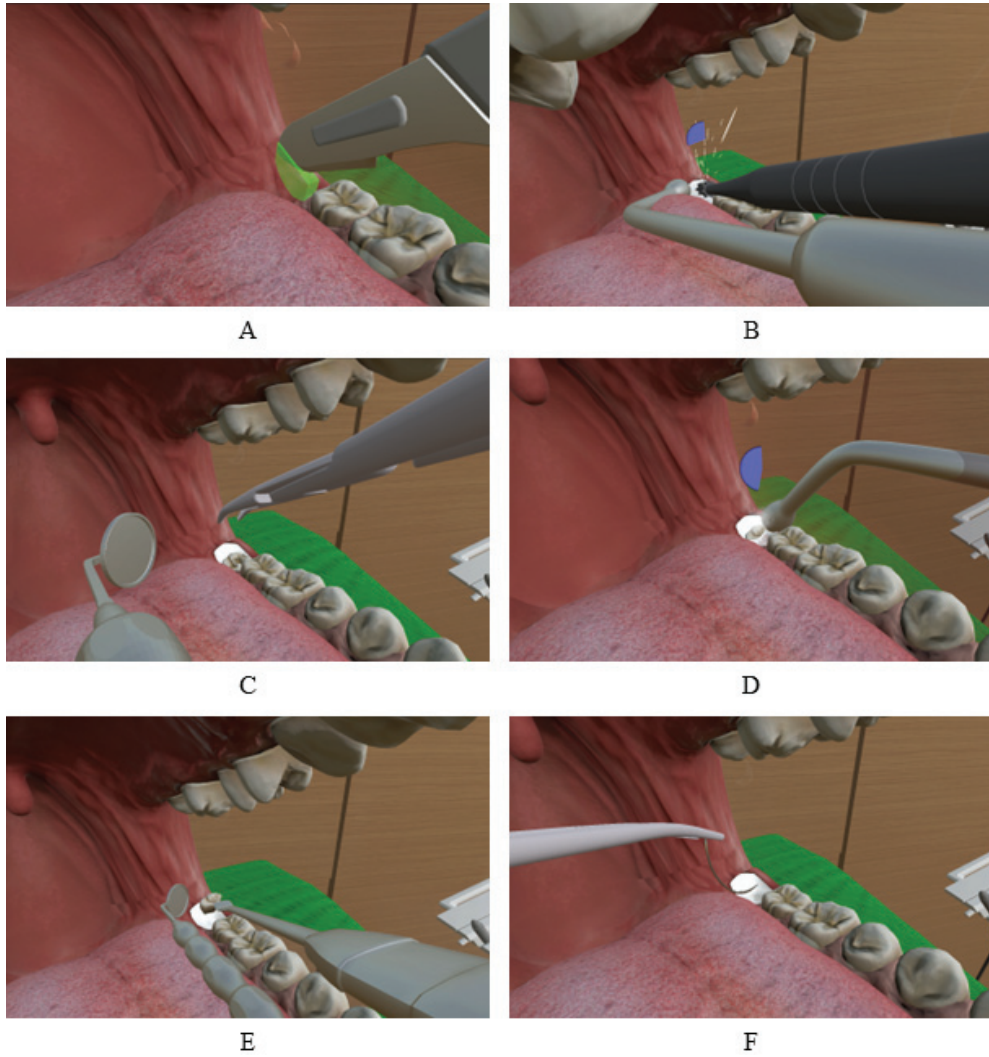


Fig. 5. Simulation results. A is a gum incision using a scalpel, B is a tooth cutting using a drill and a suction device, C is a tooth separation using a dental mirror and a surgical forceps, D is a fragment inhalation using a suction device, and E is a tooth dislocation using a dental mirror and a surgical elevator, F is a gum suture using a surgical needle and a surgical forceps.



Fig. 6. Surgical Environment from the User's Perspective.



Fig. 7. Execution of the impacted wisdom tooth extraction surgery simulator. The red circle shows a deformation of the MHC.

Table 1. Survey on Immersion and Educational Effectiveness of Simulation

Question number	Question contents										Mean
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
	Score (1: Very No, 2: No, 3: Neutral, 4: Yes, 5: Very Yes)										
1	Is the environment of the simulation(teeth model, operating room, etc.) similar to the actual surgical environment?										4.3
	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	
2	Are the actual surgical tools similar to the use of the surgical tools in the simulation?										3.8
	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	
3	Is haptic feedback due to the shape change of the surgical tool in the simulation similar to the senses when using actual surgical tools?										3.8
	5	4	4	4	3	3	4	4	3	4	
4	Does the simulation clearly inform the learner of the next surgical objective?										4.3
	4	4	3	4	5	5	4	4	5	5	
5	Do you think this simulation will allow surgical trainees to understand the sequence of ambush wisdom tooth extraction?										4.6
	4	5	5	4	5	4	5	5	4	5	
6	Do you think each process of virtual surgery simulation will help trainees learn basic surgical tooling skills?										4.1
	3	4	4	4	4	3	5	4	5	5	

몰입감과 교육적 효과를 조사하기 위한 총 6개의 문항에 대한 점수를 1점(매우 아니다)부터 5점(매우 그렇다) 사이로 응답하도록 구성되었으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 각 응답자는 ①에서 ⑩으로 표기하였다. 실제 매복 사랑니 발치 수술과 시뮬레이션 시스템의 유사성을 측정하는 1, 2, 3번 문항은 각각 평균 4.3점, 3.8점, 3.8점을 받았으며, 몰입감이 떨어지는 것을 방지하기 위해 시뮬레이션 도중 명확한 목표 제공이 가능한지를 측정하는 4번 문항은 평균 4.3점을 받았다. 시뮬레이션의 교육적인 효과를 측정하는 5, 6번 문항은 각각 평균 4.6점, 4.1점을 받았다. 설문 결과 모든 항목은 평균 3.8 이상의 점수를 받아 시뮬레이션 시스템이 매복 사랑니 발치 수술의 훈련에 적합하게 구현되었음을 확인하였다.

5. 결 론

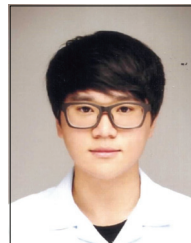
이 논문에서는 포스 피드백 장치에 변형 가능한 햅틱 컨트롤러를 부착하여 하나의 장치로 여러 종류의 수술 도구를 사용할 수 있는 매복 사랑니 발치 수술 시뮬레이션 시스템을 제안하였다. 제안된 시뮬레이션 시스템은 다양한 수술 도구의 형태를 하나의 햅틱 피드백 장치로 표현하여 사용자에게 현실적인 수술 훈련 경험을 제공할 수 있다. 이 논문에서 제안한 시뮬레이션 시스템을 다양한 분야의 교육 시뮬레이션에 적용하여 적합한 햅틱 피드백을 제공하는 햅틱 피드백 장치를 사용할 수 있는 시스템을 개발할 수 있다.

References

- [1] J. Falah et al., "Virtual reality medical training system for anatomy education," *2014 Science and information conference*, IEEE, pp.752-758, 2014.
- [2] T. Mahmood, M. A. Scaffidi, R. Khan, and S. C. Grover, "Virtual reality simulation in endoscopy training: Current evidence and future directions," *World Journal of Gastroenterology*, Vol.24, No.48, pp.5439-5445, 2018.
- [3] D. Escobar-Castillejos, J. Noguez, L. Neri, A. Magana, and B. Benes, "A review of simulators with haptic devices for medical training," *Journal of Medical Systems*, Vol.40, pp.1-22, 2016.
- [4] K. B. Jin, S. Y. Kim, and I. H. Lee, "A hand-held controller with haptic feedback for virtual reality," *2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*, pp.129-132, 2017.
- [5] D. S. Choi, S. H. Lee, and S. Y. Kim, "Transparent and soft haptic actuator for interaction with flexible/deformable devices," *IEEE Access*, Vol.8, 2020.
- [6] S. L. Delp, J. P. Loan, and M. G. Hoy, "An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.37, No.8, pp.757-767, 1990.

- [7] R. M. Satava, "Virtual reality surgical simulator," *Surgical Endoscopy*, Vol.7, No.3, pp.203-205, 1993.
- [8] R. M. Satava, "Historical review of surgical simulation—a personal perspective," *World Journal of Surgery*, Vol.32, No.2, pp.141-148, 2008.
- [9] S. Delorme, D. Laroche, and R. DiRaddo, "NeuroTouch: a physics-based virtual simulator for cranial micro-neurosurgery training," *Operative Neurosurgery*, Vol.71, pp.32-42, 2012.
- [10] K. Endo et al., "A patient-specific surgical simulator using preoperative imaging data: An interactive simulator using a three-dimensional tactile mouse," *Journal of Computational Surgery*, Vol.1, p.10, 2014.
- [11] K. Makiyama, M. Nagasaka, and T. Inuiya, "Development of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery," *International Journal of Urology*, Vol.22, No.6, pp.572-576, 2015.
- [12] J. Eschweiler, J. P. Stromps, M. Fischer, F. Schick, B. Rath, N. Pallua, and K. Radermacher, "Development of a bio-mechanical model of the wrist joint for patient-specific model guided surgical therapy planning: Part 1," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol.230, No.4, pp.310-325, 2016.
- [13] O. Bamodu and X. M. Ye, "Virtual reality and virtual reality system components," *Advanced Materials Research*, Vol.765, pp.1169-1172, 2013.
- [14] G. C. Burdea, "Haptics issues in virtual environments," In *Proceedings Computer Graphics International 2000*, pp.295-302, 2000.
- [15] D. Wang, M. Song, and A. Naqash, "Toward whole-hand kinesthetic feedback: A survey of force feedback gloves," *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.12, pp.189-204, 2019.
- [16] C. Pacchierotti, S. Sinclair, and M. Solazzi, "Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives," *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.10, pp.580-600, 2017.
- [17] V. Nanjappan, H. N. Liang, F. Lu, K. Papangelis, Y. Yue, and K. L. Man, "User-elicited dual-hand interactions for manipulating 3D objects in virtual reality environments," *Human-centric Computing and Information Sciences*, Vol.8, No.1, pp.1-16, 2018.
- [18] D. H. Kim, H. M. Kim, J.-S. Park, and S. W. Kim, "Virtual reality haptic simulator for endoscopic sinus and skull base surgeries," *Journal of Craniofacial Surgery*, Vol.31, No.6, pp.1811-1814, 2020.
- [19] F. Wang, Y. Liu, M. Tian, Y. Zhang, S. Zhang and J. Chen, "Application of a 3D haptic virtual reality simulation system for dental crown preparation training," *2016 8th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, pp.424-427, 2016.
- [20] M. Zahiri, R. Booton, K. C. Siu, and C. A. Nelson, "Design and evaluation of a portable laparoscopic training system using virtual reality," *Journal of Medical Devices*, Vol.11, No.1, 2016.
- [21] S. W. Han, S. K. Sung, and B. S. Shin, "Virtual reality simulation of high tibial osteotomy for medical training," *Mobile Information Systems 2022*, 2022.
- [22] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects," In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Tele-operator Systems*, Vol.55, No.1, pp.295-300, 1994.
- [23] S. Y. Ko, W. C. Bang, and S. Y. Kim, "A measurement system for 3D hand-drawn gesture with a PHANTOM TM device," *Journal of Information Processing Systems*, Vol.6, No.3, pp.347-358, 2010.
- [24] S. Y. Yoon, S. K. Sung, and B. S. Shin, "Impacted wisdom tooth extraction simulation using haptic controllers," *Proceedings of the Annual Conference of Korea Information Processing Society Conference (KIPS) 2022*, Vol.29, No.2, pp.689-691, 2022.

윤 상 연



https://orcid.org/0009-0001-4172-6938
 e-mail : sangyeunyon@inha.edu
 2022년 인하대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2022년~현 재 인하대학교
 전기컴퓨터공학과 석사과정
 관심분야 : Graphics, HCI, Physical Simulation

성 수 경



https://orcid.org/0000-0003-2886-7063
 e-mail : rebirth87@inha.edu
 2013년 인하대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2015년 인하대학교 전기컴퓨터공학과(석사)
 2020년~현 재 인하대학교
 전기컴퓨터공학과 박사과정
 관심분야 : Physical Simulation, Machine Learning



신 병 석

<https://orcid.org/0000-0001-7742-4846>

e-mail : bsshin@inha.ac.kr

1990년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)

1990년 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)

1997년 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)

2000년 ~ 현 재 인하대학교 컴퓨터공학과
교수

관심분야: Real-time Rendering, Volume Graphics, Medical
Imaging, HCI, Fluid Simulation