

# 촉각기술의 핵심요소기술 및 응용

류 제 하 · 광주과학기술원 기전공학과, 교수   \_e-mail : ryu@gist.ac.kr

이 글에서는 촉각기술 분야에서 요구되는 기전공학적 핵심요소기술을 간단히 정리하고 획기적인 발전을 거듭하고 있는 정보통신기술을 바탕으로 사이버 시대에 맞는 설계, 촉각체험, 엔터테인먼트 분야 등 저자가 속한 연구실에서 중점적으로 연구하는 몇 가지 새로운 응용분야에 대해 간단히 소개하고자 한다.

## 촉각기술 분류 및 기전공학적 연구 분야

1950년대의 원격조작기술 (teleoperation)을 시작으로 1990년대 가상현실기술의 태동과 더불어 가상환경을 만질 수 있는 촉각기술(haptics technology)이 지속적으로 발전되어 왔다. '만지다'라는 의미의 그리스어 'haptesthai'로부터 유래된 햅틱스(haptics)는 사용자에게 가상 혹은 실제 환경의 다양한 정보를 촉감을 통해 제공하는데 필요한 모든 하드웨어, 소프트웨어 및 심리학적 연구를 의미한다. 촉감은 컴퓨터 그래픽스 기술로 인위적으로 생성되거나 카메라로 직접 측정된 원격지의 시각

정보 및 다 채널 청각 정보의 제시와 더불어 더욱 현실감 있는 환경을 경험하고 참여하기 위한 새로운 감각 정보의 요구에 의해 주목받기 시작하였으며, 사용자의 몰입감을 증가시켜 효과적으로 가상 혹은 실제 환경 내의 객체들을 느끼고 조작할 수 있도록 도와준다. 사용자가 촉감을 통해 인지하는 정보는 다음과 같이 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

1) 역감(kinesthetic sense) : 손가락 또는 팔 등의 근감각을 통해 만지고 느끼는 과정으로서 가상객체의 강성, 무게, 관성 등의 정보를 제공한다.

2) 질감(tactile sense) : 피부의 직접적인 접촉을 통해 느끼는 과정으로서 가상객체 표면의 거

칠기, 온도 등의 정보를 제공한다.

3) 공간감(proprioceptive sense) : 근육 및 힘줄에 있는 센서를 통해 사용자의 손가락 또는 팔의 상대적인 그리고 주변 공간에 대한 위치 및 운동 정보를 제공한다.

이 기술은 기본적으로 machine haptics(로봇 메커니즘, 액츄에이터의 설계, 제어), computer haptics(가상객체와의 접촉감지 및 접촉력 계산 등 햅틱 장치에 힘 혹은 촉감정보를 만들어 주는 정보처리(haptic rendering)기술), human haptics(사람의 신체에서 느끼는 촉감의 정신물리학적 연구, 사람 신체의 물리적 변수측정 및 사용자

평가 등 기술) 등 크게 세 가지 분야로 나눌 수 있으며 기전공학 적 관점에서 보면 Machine Haptics 분야가 가장 가깝다고 할 수 있으나 자세히 들여다보면 Computer Haptics도 Mechanics의 기본 이론(뉴턴역학(동역학, 유체/고체 역학))을 바탕으로 실시간 알고리즘을 개발한다는 면에서 기계공학의 연구영역 이고 Human Haptics 분야는 사람의 피부, 근력 등에 관계되는 강성, 댐핑, 등가질량 등을 측정하고 모델링한다는 면에서 고체 역학이론, 제어이론, 진동이론 등이 바탕이 되어야 하므로 기계공학 적 접근이 매우 필요한 연구 분야이다.

### 기전공학 관점에서의 핵심 요소기술

일반적으로 가상환경과의 촉감 상호작용 시스템은 그림 1에서 보듯이 조작자, 햅틱장치, 제어기

그리고 가상환경으로 이루어진다. 가상환경은 가상공간을 구성하는 여러 객체에 대해 촉감정보를 제공하기 위한 햅틱 제시 알고리즘 과 시각정보를 제공하기 위한 그래픽 제시 알고리즘 및 청각정보를 생성하는 청각제시 알고리즘을 포함한다. 그리고 필요에 따라 동역학 및 유한요소 해석 등을 담당하는 실시간 시뮬레이션 엔진을 포함하기도 한다. 제어기는 햅틱장치를 구동하기 위한 함수 들을 포함하며, 일반적으로 액츄 에이터와 엔드이펙터의 관계를 결정하는 기구학 연산 및 전체 촉감 상호작용 시스템의 안정성을 담보하고 성능을 최대화하기 위한 제어알고리즘 등이 이에 해당된다.

#### 1) 햅틱장치의 설계 기술

역감제시장치는 힘과 위치정보를 매개로하는 입출력장치로서 로보틱스 기술을 바탕으로 사용자에 원격지 혹은 가상환경에

존재하는 객체의 물리적 특성을 역감을 통해 느끼게 하는 장치를 의미한다. 이를 위해 역감제시장 치는 사용 목적에 맞는 자유도, 작업 공간, 그리고 요구되는 힘의 최대 크기 및 대역폭 등을 고려 하여 설계된다. 대표적인 역감제시장치로는 그림 2에 제시된 Phantom 등이 있다. 직렬형 기구로 설계된 햅틱장치(그림 2(a)) 넓은 작업공간을 갖지만 최대 출력이 작고 표현할 수 있는 힘의 대역폭이 작은 반면 병렬형 기구로 설계된(그림 2(b)) Omega는 작업공간은 작지만 넓은 대역폭의 큰 힘을 사용자에게 제공 해 줄 수 있다. 이들 역감제시장 치는 하나의 손가락 혹은 손에만 역감을 제시할 수 있으며 손가락 하나하나에 독립적으로 역감을 제시하기 위한 CyberForce(그림 2(c))는 손으로 가상객체를 쥐고 조작할 수 있도록 개발되었다. 그러나 이러한 메커니즘의 경우 경량화 설계, 미끄럼 마찰의 최소

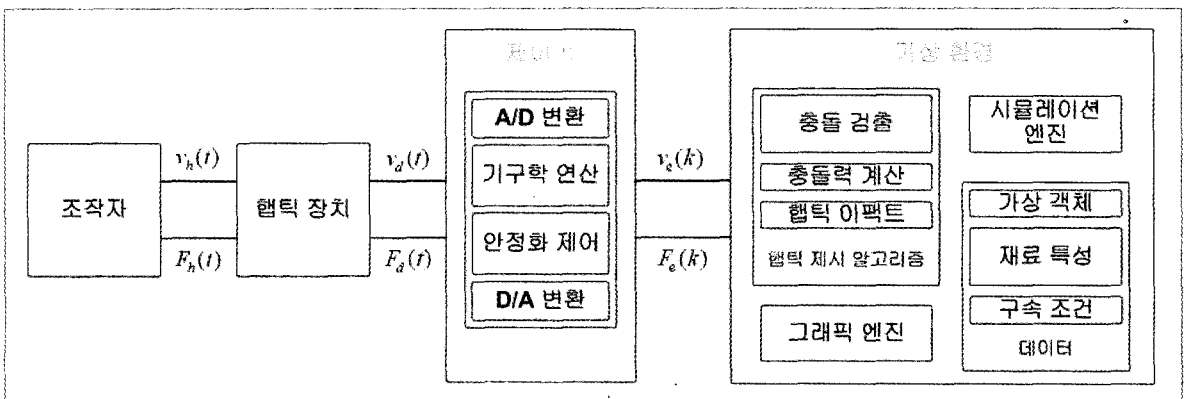


그림 1 촉감 상호작용 시스템의 기본 구성

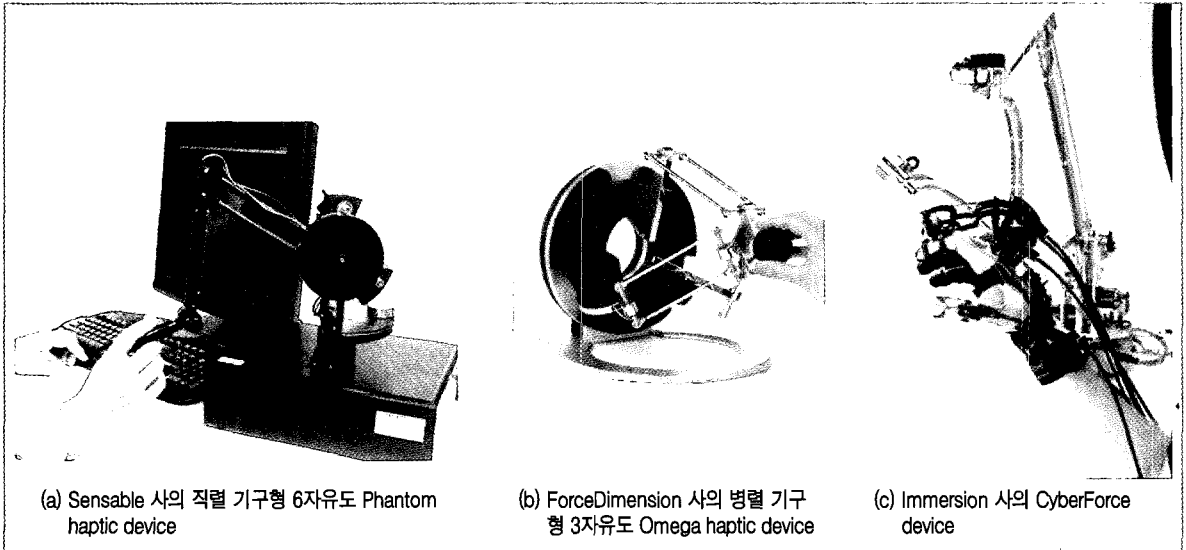


그림 2 역감제시장치

화, 탈부착 용이화 등의 설계가 요구된다.

질감제시장치는 그림 3에서 보듯이 사용되는 구동기에 따라 전기촉감제시장치, 공기촉감제시장치, 진동촉감제시장치, 그리고 얇은 핀 배열을 사용한 촉감제시장치가 있다. 전기촉감제시장치는 피부와 접촉하여 피부의 촉감 수용기에 작은 전류(약 1mA 정도)를 직접 흘려 질감을 느끼도록 하는 장치이다. 공기 촉감제시장치는 공기의 압력을 조절하여 피부에 촉감을 주는 방식이며 진동을 이용한 장치는 구동기로 보이스 코일을 이용한 진동자와 편심추를 사용한 진동자가 주로 사용된다. 이러한 진동자는 회로구성이 간단하여 작은 크기로 구성할 수 있고 제어가 비교적 쉽기 때문에 다른 촉감장치에 비해 많이 쓰이고 있다. 핀어레이 타입의 촉

감제시장치는 조그만 변위를 발생시키는 하나 또는 여러 개의 핀을 배열하고 각각의 핀의 위치를 제어하여 핀에 접촉하고 있는 피부의 수직/수평방향의 변형을 통하여 촉감을 제공하는 방식이다.

보다 사실적인 촉감을 사용자에게 제공해 주기 위한 역감제시장치의 설계에 있어서는 다음과 같은 주요 사항을 고려해야 한다.

(1) 공간 분해능 : 센서가 장착된 조인트가 아닌 출력단(예 : 손잡이 부분)에서의 공간분해능을 의미하며, AD변환기의 비트수 및 센서 위치부터 출력단까지의 기구부 정밀도에 의해 제한된다. 이것은 해당 장치가 제공할 수 있는 정밀도(precision) 및 양자화(quantization)에 따른 제어성에 영향을 미친다.

(2) 관성 및 마찰 : 햅틱장치의 가장 기본적인 설계 요구사항인

최소 무한소 및 최대 무한대의 임피던스를 제공하기 위해서는 기구의 경량화 및 저마찰 조인트의 설계가 매우 중요하다.

(3) DA/AD의 대역폭 : 이산화 및 Quantization에 의한 정보의 손실 및 DA가 포함하는 시간지연은 햅틱장치의 안정화 및 성능에 영향을 미치는 가장 큰 요소 중 하나이므로 가급적 고성능(16bit 이상 10kHz 이상)의 AD/DA 변환기가 바람직하다.

### 2) 햅틱장치의 제어 기술

촉감 상호작용은 시각 및 청각 제시와 달리 양방향 에너지 전달을 포함하며, 가상환경 및 AD/DA에서 발생하는 여러 이유에 의한 불필요한 에너지는 햅틱장치의 불안정한 거동을 발생시켜 사용자를 다치게 하거나 표현해야 할 촉감 질의 저하를 초래

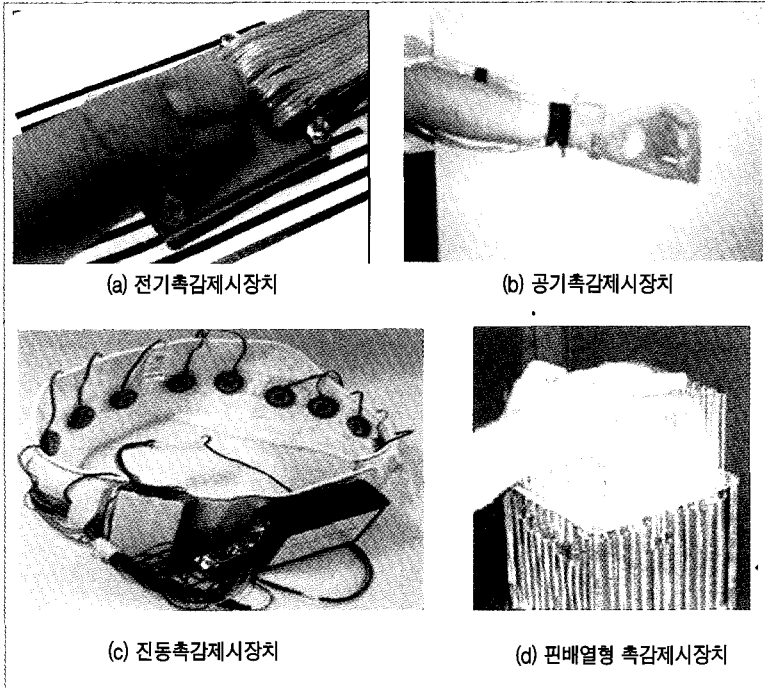


그림 3 질감제시장치

한다. 일반적으로 다음과 같은 요소들이 불필요한 에너지들을 발생시키는 것으로 알려져 있다.

- (1) 동적 가상환경 시뮬레이션에 사용되는 명시적 적분(explicit integration) 및 복잡한 가상환경의 계산에 따른 시간지연
- (2) 네트워크에 존재하는 통신 지연
- (3) 제어알고리즘이 포함하는 마찰 및 중력보상 방법
- (4) 피드백 시그널 필터에 존재하는 위상 지연
- (5) DA가 포함하는 시간지연

특히, AD/DA에 의한 에너지 발생은 사용자와 컴퓨터에서 구현되는 가상환경을 포함하는 촉

감 상호작용에 있어 피할 수 없는 문제이며 따라서 사실적이고 안정적인 촉감제시를 위한 햅틱 장치의 안정화 제어 방법의 개발이 매우 중요한 연구 주제이다.

### 3) 촉감제시알고리즘

촉감제시알고리즘은 햅틱장치를 통해 가상환경 내에 구현된 객체의 물리적 특성을 사실적으로 제공해주기 위한 일련의 실시간 계산과정을 의미하며, 크게 충돌검출 및 반력계산을 포함한다. 예를 들어 사용자가 햅틱장치를 움직이면 가상환경 내에서는 햅틱장치의 위치에 해당하는 포인트 또는 객체의 위치가 갱신된다.

이것이 가상환경 내의 다른 객체와 충돌이 발생하는지를 검사하는 것이 충돌검출이며, 충돌이 발생하였을 경우 적절한 힘을 계산하는 과정이 반력계산이다. 반력에는 객체의 강성에 의한 힘뿐 아니라 객체 표면의 거칠기 및 마찰에 의한 힘들이 포함된다. 이를 통해 사용자는 가상환경의 객체들을 능동적으로 만지고 조작할 수 있다.

충돌검출 및 반력계산 방법은 객체를 기술하는 방법에 따라 달라지며, 일반적으로 표면(surface) 기반 방법과 볼륨(volume) 기반 방법으로 분류될 수 있다. 표면 기반 방법에서는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 전통적으로 사용되어온 삼각메시를 주로 그 대상으로 하는데 촉감 계산에 필요한 연산시간은 메시가 포함하는 삼각형의 수에 의존하므로 가상환경의 복잡도가 커질수록 계산량이 증가하는 단점이 있어 빠른 충돌 검출을 위해서 바운딩 박스 등과 같은 계층적 데이터 구조를 사용한다. 볼륨기반 방법은 의료용 영상 등에 사용되는 볼륨데이터를 주로 그 대상으로 하며, 객체 표면뿐 아니라 내부에 대한 정보도 제시할 수 있는 장점이 있다. 또한 볼륨데이터의 양에 상관없이 빠른 충돌검출을 수행할 수 있지만 데이터가 불연속적이기 때문에 정확한 촉감계산을 위해서는 상당히 많은 메모리가 필요하다.

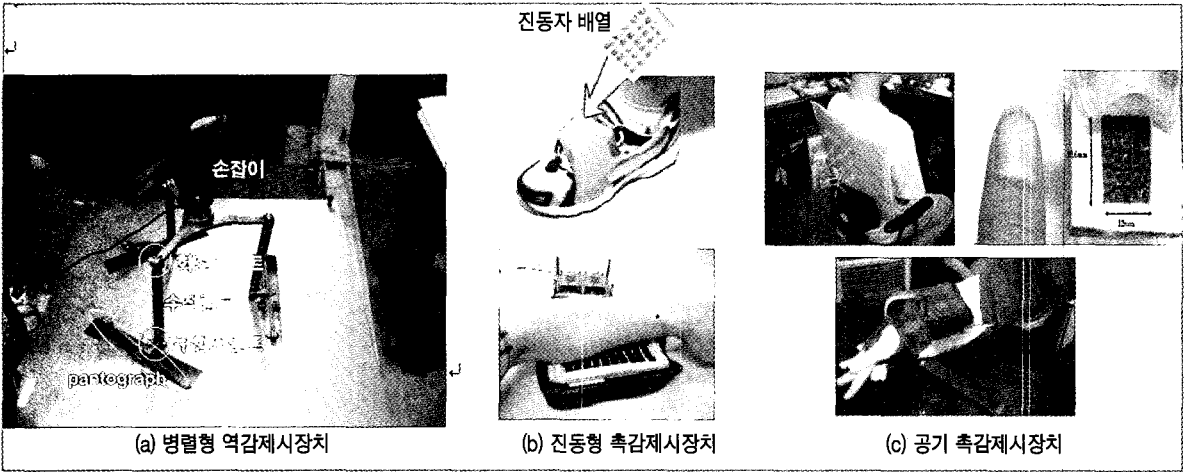


그림 4 개발된 햅틱장치

## 저자가 속한 실험실의 최근 연구 활동 및 새로운 응용분야 제시

### 1) 햅틱장치 개발

그림 4(a)에서 보듯이 넓은 작업공간과 넓은 대역폭의 큰 힘을 사용자에게 제공하기 위해 팬토그래프-구형조인트-수직링크-회전조인트로 구성된 3개의 링크지를 병렬로 배열한 하이브리드 형태의 병렬형 역감제시장치를 개발하였다. 이 장치의 장점은 일반적인 병렬형 기구에 비해 상대적으로 큰 작업공간 및 쉬운 순기구학 해석, 그리고 일반적인 직렬형 기구에 비해 넓은 대역폭의 큰 힘을 낼 수 있다는 점이다. 질감제시장치로는 발등 및 팔에 문자, 숫자, 방향정보 등을 표시할 수 있는 진동 촉감제시장치(그림 4(b))를 개발하였고 사용자의 손가락 끝, 손, 팔, 등, 발등, 허리 등에 부착하여 다양한 응용분야에 맞게

촉감을 제시하기 위한 공기 촉감장치를 개발하였다.(그림 4(c))

### 2) 촉감 상호작용의 안정화 제어 알고리즘

햅틱 상호작용의 안정성을 담보하고 사실성을 증대시키기 위해 Multirate로 구성된 에너지제한 알고리즘을 개발하였다. 수동성(passivity) 이론에 근거하여 유도된 에너지 제한 알고리즘은 AD/DA에 의해 발생할 에너지를 햅틱장치에 의해 전부 소모될 수 있도록 제한하고 가상환경을 수동화하여 안정한 햅틱 상호작용을 보장한다. 촉감제시알고리즘과 독립된 Thread로 동작하기 때문에 느린 촉감 제시 연산 속도에 대해서도 넓은 범위의 가상환경 임피던스를 표현할 수 있다.

### 3) 촉감제시알고리즘

촉감제시알고리즘에 있어서 가장 핵심적인 사항은 얼마나 빠른

시간에 얼마나 사실적인 힘을 계산해 내는지에 있다. 이를 위해 지역 점유지도(Local Occupancy Map)를 이용한 충돌검출 및 반력계산 방법 및 관련 SDK(Software Development Toolkit) 및 Haptic Modeler 등을 개발하였다. 지역 점유지도는 표면, 볼륨, 또는 깊이 정보를 포함하는 이미지 데이터를 참조하여 갱신되기 때문에 다양한 데이터 형식으로 기술된 각종 객체를 포함하는 가상환경에 대해 효과적이며 효율적으로 촉감을 계산할 수 있다.

### 4) 촉감 기술의 응용

촉감기술은 실제 환경(원격지) 및 가상환경(100% 컴퓨터 그래픽 기술을 사용한 가상현실환경)에서의 촉감상호작용 혹은 촉감제시기술로서 여러 분야에 다양하게 쓰일 수 있다. 한 가지 예로 그림 5(a)에서 보듯이 현재 개발되고 있는 실감 모델링 응용의

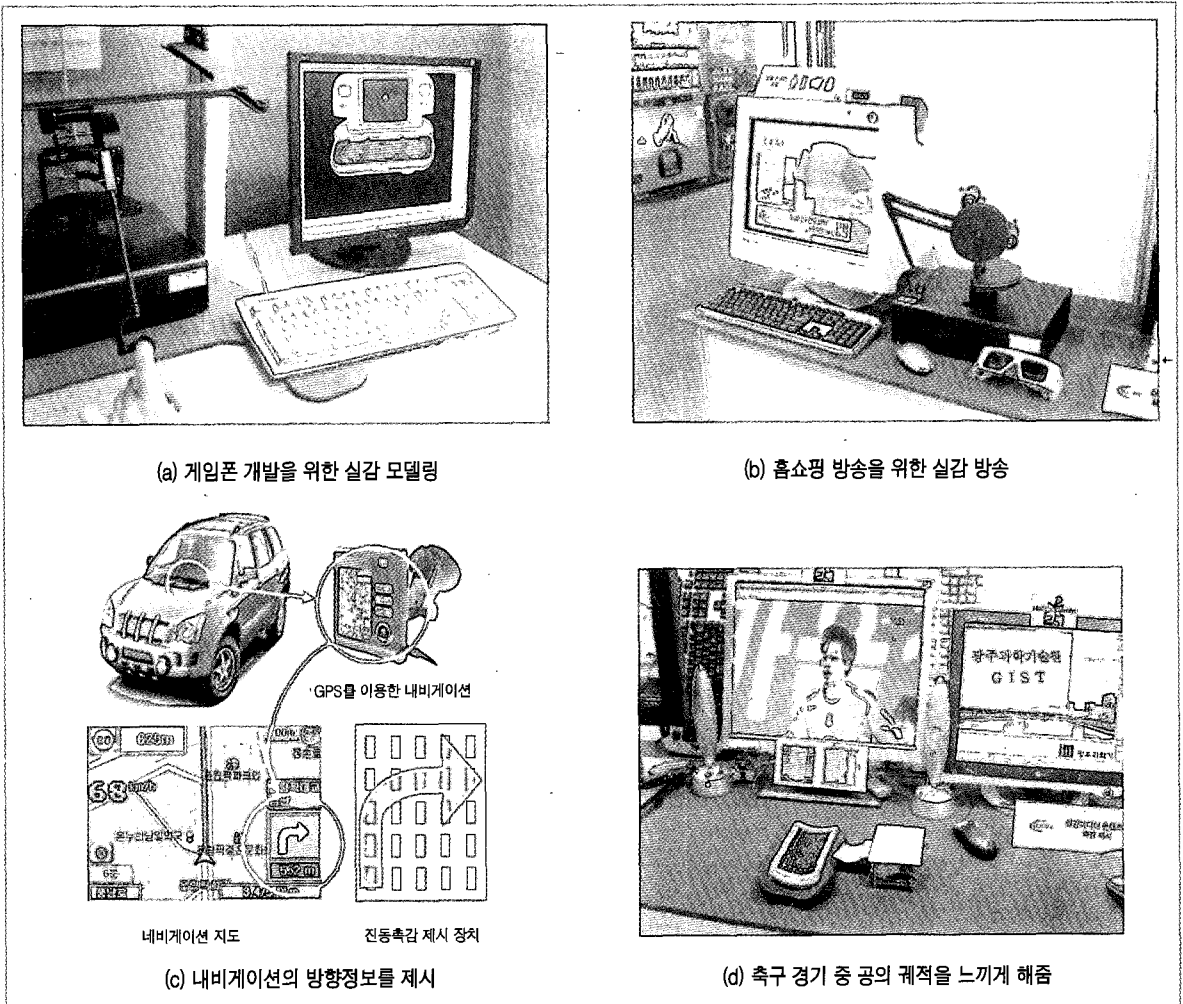


그림 5 촉감 상호작용을 이용한 실감 모델링 및 실감 방송 어플리케이션

경우 가상으로 구성된 휴대용 가전제품(MP3 플레이어, PDA, 또는 휴대폰 등)의 각종 버튼들을 직접 눌러볼 수 있는 역촉감을 제시하여 제품의 설계, 평가뿐 아니라 소비자를 위한 라이브 매뉴얼 등으로 이용될 수 있다. 또한 최근에 활발한 연구가 진행되고 있는 증강현경(카메라로 획득된 실사 환경과 가상객체를 혼합한 환경)에서의 촉감제시/상호작용

기술로 좀더 다양한 분야로의 응용이 실험되고 있다. 대표적인 예로 그림 5(b)에서 보듯이 현재 개발되고 있는 실감 방송 응용의 경우 "시청자"가 방송을 보고 들을 뿐만 아니라 만지고 조작할 수 있게 한다. 예를 들어 사용자는 홈쇼핑 또는 교육용 방송프로그램을 시청하면서 방송 중인 상품 또는 문화유산 등을 만지면서 체험할 수 있다. 또 다른 예로 햅

틱 커뮤니케이션 장치를 들 수 있는데 여러 개의 진동자를 신체의 특정 위치에 착용하여 문자형태의 정보 또는 방향 정보를 모바일 기기로부터 전달 받아 내비게이션 정보제공(그림 5(c)) 또는 축구경기에서의 공의 궤적정보를 제공하는(그림 5(d)) 등에 이용할 수 있다.