

# IT의료융합-의료훈련시뮬레이터기술동향

GIST | 류제하  
 KAIST | 박진아\* · 김 정  
 GIST | 최희병

## 1. 서론

과학 기술의 발전과 더불어 의학 기술에도 많은 진보가 발생하고 있다. 과거에는 개복, 개흉을 해야 할 수 있었던 외과 수술들이 최근에는 내시경을 이용한 수술로 많이 대체 되고 있다. 이런 수술법을 최소침습법이라고 하는데, 환부 주위에 10mm 내외의 작은 구멍을 3~4개 가량 뚫고, 그 구멍에 내시경과 긴 막대형의 수술 도구를 삽입한 후 이를 조작하여 수술을 하는 것이다. 이 방법은 환자의 외상을 최소화하고 입원 및 회복 기간도 줄이는 장점이 있는 반면 내시경으로 획득한 영상에서 수술도구와 환자 장기간의 거리가 어느 정도 되는지 파악하는 것이 어렵고, 수술 도구 및 내시경의 움직임도 상당부분 제한을 받는 단점도 있다. 이와같이 수술이 어려워진 이유로 환자들은 경험이 많은 전문의들에게 수술을 받고 싶어하고 인턴이나 레지던트들의 기술 기회는 상대적으로 줄어들게 되었다. 줄어든 기술 기회를 마네킹, 시체, 돼지 등을 이용한 기술 훈련으로 대체하고는 있지만 마네킹이나 시체는 혈압처럼 살아 있는 사람에게 나타나는 특성을 완벽하게 표현하지 못하고, 돼지 역시 사람의 피부, 장기와는 차이를 보이고 있다. 더불어서 시체나 돼지는 윤리적 문제를 야기할 소지가 있고, 한 번의 기술 기회만 제공한다는 제한도 있다.

의사들이 실제 수술에 앞서 충분한 연습을 하면, 결과적으로 의료 사고의 확률이 낮아지고 환자가 겪는 고통이 줄어들게 된다. 따라서 충분한 연습의 기회를 제공하기 위해 의료 훈련 시뮬레이터의 개발은 반드시 필요하다. 의료 훈련 시뮬레이터의 개발을 위해서는 가상현실, 생리학, 햅틱 기술 등 다양한 기술 분야

의 융합이 요구된다. 의료 훈련 시뮬레이터의 궁극적 목표는 실제 사람, 실제 수술실의 환경을 가상현실 속에 구성하고, 의사가 기술 과정에서 겪는 다양한 상황을 가능한 똑같이 재현하는 것이다. 현재 상용화되어 있는 의료 훈련 시뮬레이터 중에는 그림 1과 같이 인조 장기, 모형, 혹은 마네킹을 대상으로 하는 것도 있고, 가상현실 속의 가상의 장기를 대상으로 훈련하는 것도 있다. 그 중에서 가상의 장기를 대상으로 훈련을 할 때는 가상장기의 정확한 물리적 거동을 반영하는 그래픽 시뮬레이션과 화면상의 수술도구가 가상의 장기와 접촉이 일어났을 때, 그에 맞는 정확한 촉감을 제공해주는 햅틱시뮬레이션이 필요하며, 그 실감도가 훈련 효과에 지대한 영향을 끼치게 된다. 따라서 의사에게 올바른 촉감을 제공해주기 위해 실제 장기의 정확한 물성치 획득, 촉감의 정확하고 안정한 제시, 촉감 제시에 적절한 햅틱 장비의 제작 등이 필요하게 된다. 최근에 획기적으로 발전하고 있는 GPU(Graphic Processing Unit) 및 관련 모델링/렌더링 알고리즘들의 개발로 그래픽 시뮬레이션은 매우 현실적으로 할 수 있는 반면 매우 정교하고 심도있는 기술의 개발이 필요한 햅틱 시뮬레이션은 아직 개발의 초기 단계에 있다. 따라서 본 기술보고서에서는 주로 햅틱 시뮬레이션과 관련된 기술동향을 정리하였다.

본고는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 의료훈련시뮬레이터 아키텍처에 대해 개관하고 3장에서는 변형체 모델링 및 햅틱 렌더링에 대한 기술동향을 기술하고 4장에서는 의료훈련시뮬레이터용 햅틱디바이스에 대한 최신 기술을 개략적으로 정리하고 5장에서는 햅택상호작용제어에 대한 기술을 요약제시한다. 마지막으로 6장에서는 이러한 기술들에 대한 전체적인 결론을 내리며 향후 연구방향에 대한 저자들 나름대로의 의견을 제시한다.

\* 중신회원

† 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C1090-1031-0006).

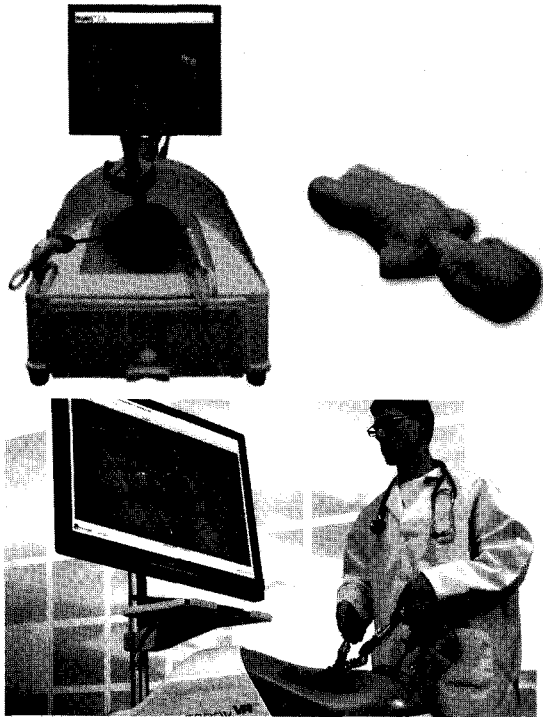


그림 1 인조장기[1], 마네킹[2], 가상장치[3]

## 2. 의료훈련시뮬레이터 아키텍처

의료 훈련 시뮬레이터는 가상현실 시스템의 대표적인 응용분야의 하나로 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째로 실시간 상호작용이 가능한 범위에서 실제 시술처럼 사실적이고 몰입감 높은 환경을 제공해야 한다. 이를 위해 훈련에 필요한 환자와 수술 도구를 시각적, 물리적으로 모델링해야 하며 입출력 장치와 훈련 시나리오를 고려해 멀티 모달 상호작용 기법을 개발해야 한다. 그리고 궁극적으로는 사용자의 숙련도를 평가할 수 있어야 한다.

이와 같이 의료 훈련 시뮬레이터는 시각, 청각, 촉각을 통한 멀티 모달 상호작용을 기반으로 하기 때문에 각각에 필요한 부분들을 개별적으로 개발해야 할 뿐만 아니라 이들을 통합하고 동기화하기 위해 많은 노력을 기울여야 한다. 또한 의료훈련을 필요로 하는 분야는 간단한 정맥주사 훈련에서부터 복잡한 복강경 수술에 이르기까지 다양하다. 따라서 의료 훈련 시뮬레이터를 위한 아키텍처를 정립하고 이를 바탕으로 재사용이 가능한 의료 훈련 시뮬레이터 프레임워크를 개발한다면 시뮬레이터 개발의 생산성을 높일 수 있을 것이다.

### 2.1 의료 훈련 시뮬레이터 아키텍처

일반적인 의료 훈련 시뮬레이터의 아키텍처는 그림 2와 같이 입출력 장치, 시뮬레이션 엔진, 데이터베이스

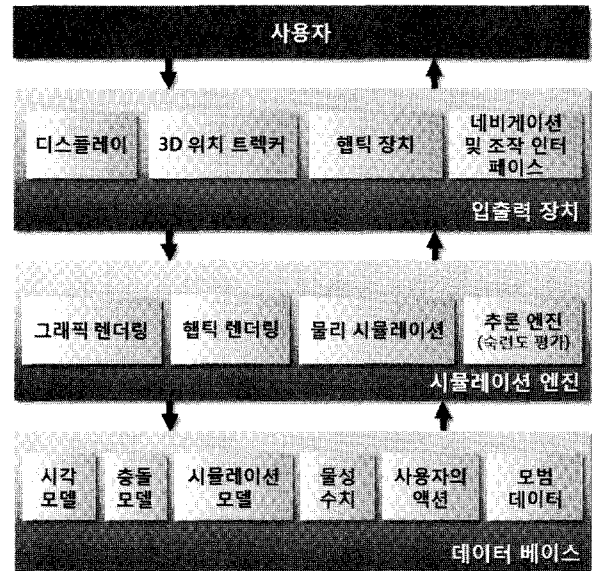


그림 2 의료 훈련 시뮬레이터 아키텍처

으로 구성된다. 시뮬레이터를 구축하기 전에 훈련을 위한 시나리오와 요구사항 분석을 통해 입출력장치를 정하고 데이터베이스를 구축한다. 데이터베이스에 있는 시각, 충돌, 시뮬레이션 모델, 물성 수치는 각각 기하학, 운동역학, 물리 모델링을 통해 생성된다. 시뮬레이션 엔진에는 시각화를 위한 그래픽 렌더링 엔진과 충돌 처리 및 햅틱 피드백을 위한 햅틱 렌더링 엔진 그리고 피부나 장기의 변형을 시뮬레이션하기 위한 물리 시뮬레이션 엔진이 포함된다. 또한 숙련도 평가를 위해 사전에 전문가로부터 획득한 모범 데이터를 데이터베이스에 저장하고 훈련이 시작될 때에는 사용자의 액션이나 결과를 데이터베이스에 저장해두었다가 훈련이 끝난 후에 추론엔진을 통해 사용자의 숙련도를 평가할 수 있어야 한다.

### 2.2 의료 훈련시뮬레이터를 위한 프레임워크

의료 훈련 시뮬레이터 아키텍처에서 입출력 장치와 데이터베이스는 훈련 시나리오에 따라 상이할 수 있지만 멀티 모달 상호작용을 처리하는 시뮬레이션 엔진은 공통된 요소들이 많기 때문에 이를 하나의 프레임워크로 통합하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 대표적인 사례가 프랑스의 INRIA 연구소에서 개발 중인 Simulation Open Framework Architecture(SOFA) 프로젝트이다[4]. SOFA는 의료 시뮬레이션을 위한 유연한 프레임워크 개발을 목표로 질량-스프링, 유한요소법과 같은 변형모델과 계층적인 바운딩 볼륨 충돌처리를 지원하고 물리 시뮬레이션을 위한 수치 적분방법을 제공한다. SOFA는 멀티 모달 상호작용을 위해 하나의 객체가 여러 개의 모델(예: 시각, 충돌,

역학모델 등)로 표현되고 각각의 모델은 서로 간의 맵핑을 통해서 동기화된다. 역학 모델은 자유도, 질량, 힘의 장(Force field), 솔버(Solver)와 같은 기본 요소로 분해된다. 이렇게 분해된 모델과 기본 요소들은 장면 그래프(Scene-graph)를 통해 조직화시켜 처리한다. 미국의 스탠퍼드 대학에서 개발되고 있는 CHAI3D는 멀티 모달 상호작용을 기반으로 하는 프로그램 개발에 널리 사용되는 프레임워크이다[5]. CHAI3D는 구조가 단순하여 햅틱 장비로 처음 연구를 하는 사람이 쉽게 사용이 가능하며 브리지 패턴을 적용해 햅틱 디바이스에 관계없이 동일한 인터페이스를 지원한다. 또한 CHAI3D는 외부 모듈을 통해 강체 시뮬레이션과 변형체 시뮬레이션을 지원한다. 그 밖에 물리기반 애니메이션을 위한 자료 구조와 알고리즘을 제공하는 Open-Tissue[6], 생체검사(Biopsy) 시뮬레이션을 목적으로 Java 언어로 개발되고 있는 ViMeT[7], 숙련도 평가를 위해 사용자의 액션을 수집하고 이를 평가할 수 있는 기능을 제공하는 CyberMed[8] 등이 있다.

### 2.3 결론 및 향후 연구과제

최근에는 새로운 의료 시술법이 빠르게 개발됨에 따라서 의료 훈련을 필요로 하는 분야가 점점 확대되고 있어 시뮬레이터 개발의 생산성을 높일 수 있는 의료 시뮬레이션 프레임워크 개발이 절실하다. 하지만 현재까지 개발된 프레임워크는 한정된 입출력 장치만을 지원하고 있으며 대부분의 경우는 숙련도 평가를 위한 모듈은 제공하고 있지 않기 때문에 이에 대한 지속적인 개발이 필요하다.

## 3. 변형체 모델링 및 햅틱 렌더링

의료시뮬레이션을 위해서는 필연적으로 부드러운 생체 조직으로 이루어진 장기와 수술도구와의 상호작용에 대한 모델링을 수반한다. 이를 위해 생체조직의 비선형성을 반영하는 복잡한 반력과 변형의 구현과 절개, 봉합, 침술 등 다양한 시술법을 시뮬레이션 하는 작업이 필수적이다. 이를 위한 수술 시뮬레이션 개발이 활발히 진행되고 있으며 많은 상용화 노력이 이루어지고 있다. Immersion사의 Laparoscopic Surgical Workstation장비는 담낭절제술, 식도질환시술 등을 시뮬레이션 할 수 있다. 또한 Symbionix사의 LAP MENTOR는 직장결장시술, 비만치료술, Haptica사의 ProMISTM는 자궁내막절제술 등의 의료 시술을 시뮬레이션한다. 하지만 부족한 햅틱 디바이스의 기술력 때문에, 실제 생체의 물리적 특성에 근거를 두지 않은 단순하고 초보적인 형태의 햅틱 피드백만을 제공하고 있는 실정이다.

기술적으로 볼 때 변형체 모델링은 기계공학분야에 오랫동안 수행해온 구조해석 분야와 유사한 형태이다. 즉 대상물의 3차원 형태를 생성하고 실험에 의해 결정된 물성과 결합하여 모델을 완성한 후 도구로부터 발생하는 외력에 대한 거동을 시뮬레이션 하는 것이다. 따라서 이 분야에서 오랫동안 검증된 경계 요소법, 유한 요소법 등을 적용한 시뮬레이션에 관해 많은 연구가 집중되고 있다. 그러나 이러한 수치해석 기법을 이용한 햅틱 렌더링의 경우 도구에 의한 변형거동 계산을 수 msec 내에 완료해야 하는 어려움이 있으며, 현재 구조 해석 분야에서 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 수 일에 걸쳐 계산하는 것을 보면 사실적인 햅틱 렌더링의 구현에 있어 이러한 제한 조건의 어려움을 짐작할 수 있다.

생체 장기의 모델링을 위해서는 먼저 각종 장기의 형상 모델과 생체의 물성에 대한 데이터가 필요하다. 현재 CT, MRI, PET 등의 의료 영상기술의 발전과 Visible Human Dataset으로 대표되는 대중적으로 공개된 인체 의료 영상의 출현으로 말미암아 인체 각종 장기의 3차원 형상모델에 대한 연구는 많이 진행되었으나, 생체조직의 물성 측정/데이터베이스화 및 이를 위한 전용 장비의 개발/해석에 대한 기술적 난제가 존재한다.

기술한 바와 같이 변형체 모델링 및 햅틱 렌더링 분야에서는 현재 구현 가능한 기술과 기대하는 성능 사이에 큰 간격이 존재한다. 그러나 연구자에게 다행스러운 것은 온전하지는 않으나 기하학적 변형 기법, 질량-스프링 모델 등의 근사화 기법을 이용하는 ‘cheap solution’이 존재하며, 각 분야의 요구사항에 맞추어 적용할 수 있는 가능성 또한 존재하고 있다. 이러한 배경아래 변형체 모델링 및 햅틱 렌더링분야에서는 다음과 같은 기술적 문제의 해결이 요구된다.

- 1) 생체 조직의 3차원 형상 모델 추출 및 구역화
- 2) 생체 조직의 물성 측정 장비 개발 및 실험
- 3) 다양한 비선형 형태의 생체 거동 시뮬레이션 및 햅틱 렌더링 기법
- 4) 수술부위의 절개, 봉합에 대한 시뮬레이션 기법
- 5) 3차원 조직과 3차원 형상 도구와의 상호작용 모델링
- 6) 대량의 계산량을 실시간으로 처리할 수 있는 계산 아키텍처

## 4. 의료훈련시뮬레이터용 햅틱 디바이스

상용화된 의료훈련 시뮬레이터용 햅틱 디바이스는

Table 1 상업용 햅틱 디바이스의 종류

Company	Devices	Degrees of Freedom	Degrees of Force Feedback	Workspace mm	Max Force Nm / Torque mNm	Stiffness N/mm	Price €x1000
SensAble Technologies www.sensable.com	Omni	6	3	160 x 120 x 70	3.3 / 0	1.02	2
	Desk top	6	3	160 x 130 x 130	7.9 / 0	1.7	11
	Premium 1.0	6	6	127 x 178 x 254	8.5 / 0	3.5	18
	Premium 1.5	6	6, 3	191 x 267 x 381	8.5 / 515	3.5	24 - 51
	Premium 3.0	6	6, 3	406 x 584 x 838	22 / 515	1	53 - 70
Force Dimensions www.forcedimension.com	Omega 3, 6, 7 Delta 3, 6	3, 6, 7 3, 6	3 3, 6	160 x 160 x 110 360 x 360 x 300	12 / 8.0 20 / 200	14.5 15	14 - 24 22 - 40
Novint http://home.novint.com/	Falcon	3	3	101 x 101 x 101	~9 / 0	NA	0.2
Immersion Corp www.immersion.com	CyberForce	6	3	304 x 304 x 495	8.8 / 0	NA	45
	CyberGrasp	5	5	Finger	12 / 0	NA	
Haption www.haption.com	Virtuose:						
	6D Desk top	6	6	129 x 120 x 120	10 / 500	2.5	30
	3D15-25	6	3	500 x 644 x 350	15 / 0	2	25
	6D35-45	6	6	1080x 900 x 600	35 / 3000	2.5	85
	6D40-40	6	6	400 x 400 x 400	100 / 10000	NA	120
INCA 6D *	6	6	Variable	40 / 5000	NA	80 *	
Mimic www.mimic.ws	Mantis	6	3	325 x 270 x 260	15.2 / 0	5.5	10
Quanser www.quanser.com	Mirage F3D-35	6	3	400 x 200 x 300	25 / 0	2	35
	HD2	6	5	530 x 300 x 500	19.7 / 1725	10	60 - 70
	Pantograph:						
	2DOF	2	2	270 x 240	10.1 / 0	3	20
3DOF	3	3	270 x 240	10.1 / 255	3	25	
3DOF	5	5	480 x 250 x 450	9 / 750	10	50	
Moog FCS Robotics www.fcs-cs.com/robotics	HapticMaster	3	3	1000x 400 x 360	250 / 0	10	43
MPB Technologies www.mpb-technologies.ca	Cubic 3	3	3	330 x 290 x 220	2.5 / 0	NA	NA
	Freedom 6S	6	6	170 x 220 x 330	2.5 / 150	2	25
	F7S	7	7	170 x 220 x 330	2.5 / 150	2	29

사용자와 가상 객체가 상호작용이 가능하도록 기계적인 I/O 디바이스를 갖추고 있다(Table 1)[10]. 사용자는 실제 공간상에 놓여있는 햅틱디바이스의 위치센서를 통하여 수술도구의 위치를 추적하고(입력), 수술도구가 인체 장기 모델과 접촉할 때 햅틱렌더링을 통해 계산된 힘 혹은 토크를 사용자에게 제시해준다(출력). 의료훈련 시뮬레이터에서의 햅틱 디바이스는 촉진(palpaton), 주사(needle insertion), 복강경 수술(laparoscopy), 내시경 수술(endoscopy) 및 관절경 수술(arthroscopy)용 등 서로 다른 의과 분야에 다양하게 적용되어 왔다.

#### 4.1 촉진(palpaton)용 햅틱 디바이스

촉진은 의사가 환자의 특정 검사부위를 손가락으로 만져보면서 어떤 특징이나 이상 유무를 확인하는 것을 말한다. 초기의 촉진 예로서는 Rutgers Master의 force feedback glove interface를 사용한 무릎 촉진 시뮬레이터가 있고[10], 이 시뮬레이터는 이후에 종양(sub-surface tumors) 촉진용으로 재개발 되었다[11]. 1999년에는 SensAble PHANTOM[11]을 사용하여 개발된 전립선암 촉진 시뮬레이터와 6자유도 PHANTOM Premium을 이용한 유방암 촉진 시뮬레이터의 예도 있다[13]. Royal Veterinary College(London, UK)에서는 수의학 분야에서 소의 가임여부를 판단하기 위한 직장 촉진 훈련 시뮬레이터 개발을 위해 PHANTOM Premium

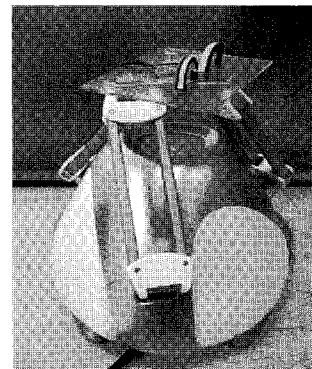


그림 3 맥박 촉진 시뮬레이터용 햅틱디바이스

1.5 힘반향 디바이스를 사용하였다[14]. 이 밖에도 촉진용 햅틱 디바이스로서는 HOPS[15]와 Wingman 힘반향 마우스[16], 맥박 촉진용 시뮬레이터(그림 3) 등이 있다.

#### 4.2 주사(needle insertion)용 햅틱 디바이스

힘반향 기능이 있는 상업용 주사(needle insertion) 시뮬레이터로서는 Mediseus Epidural이 있다[17]. 이 시뮬레이터는 상대적으로 저가인 SensAble PHANTOM Omni를 사용하고 주사 위치에 개량된 주사기형태의 말단장치를 사용하며, 사용자가 실수를 할 경우 음성을 통해 알려 주는 기능도 갖추고 있다(그림 4 참조).

이와 비슷한 형태의 시뮬레이터로서 MIT에서 개발된 경막의 마취(epidural anaesthesia) 시뮬레이터가 있다[18]. 또한 바늘은 상처의 봉합에도 사용되는데 이

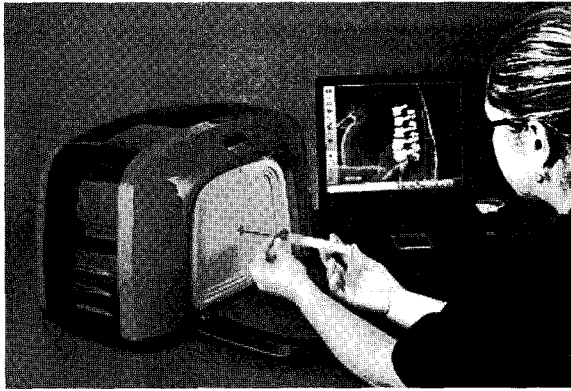


그림 4 MedCAP의 주사 시뮬레이터용 햅틱디바이스

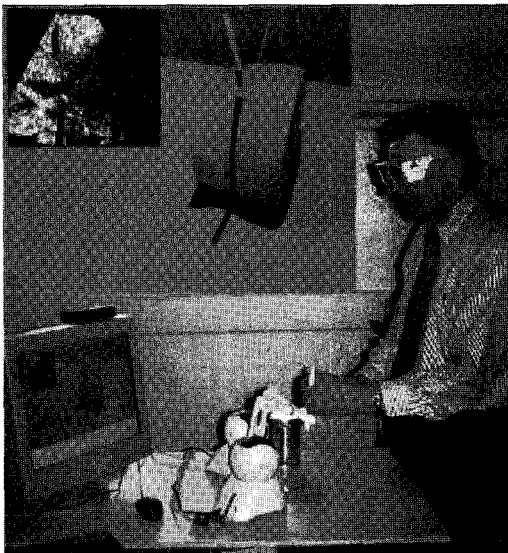


그림 5 BIGNePSi: 봉합 시뮬레이터용 햅틱 디바이스

러한 목적으로 실제적이면서도 경제적인 햅틱 봉합 시뮬레이터가 BINNePSi가 그림 5와 같이 개발되었다[19].

KAIST의 척추침생검 시뮬레이터는 CT 영상을 볼륨 렌더링 하였으며, 속이 빈 마네킨에 바늘을 삽입하는 동안 가상으로 모델링된 피부와 생체조직 및 장기를 PHANTOM을 통하여 느낄 수 있게 하였다[20]. 이 밖에도 주사용 햅틱 디바이스로서는 DiMaio[21], Planar Pantograph Mechanism[22], Quansar[23] 등이 있다.

#### 4.3. 복강경 수술(laparoscopy)용 햅틱 디바이스

복강경 수술 또는 최소 침습 수술(MIS, Minimally Invasive Surgery) 시뮬레이터로는 Mentice社의 Proceidicus MIST가 최초로 상업화된 시뮬레이터이고, 이 장비를 이용한 많은 평가가 진행되어 왔다[24]. Immersion Medical社는 LapVR이라 불리는 복강경 수술 시뮬레이터를 개발하여 상용화 하였다. 이 장비는 물체(geometric object)를 다루는데 있어서 보다 실제 환경(realistic environment)과 같은 여건을 제공하는 모듈을 제공한다.

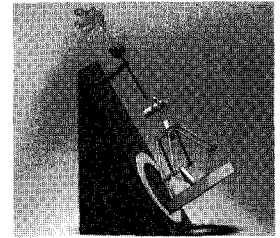
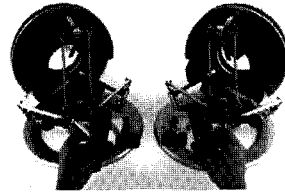


그림 6 GIST의 복강경수술 시뮬레이터용 햅틱 디바이스

GIST에서는 두 대의Omega 7을 사용하여 힘반향 의 료시뮬레이터를 개발하고 있다(그림 6). 이 밖에도 복강경 수술 시뮬레이터로서는 LAP Mentor[25], LapSim [26], Simendo[27], SkillSetPro[28], VirtaMed[29] 등이 있다.

#### 4.4 내시경 수술용 햅틱 디바이스

내시경 수술을 위해서 내시경을 환자의 몸속에 삽입하는데 이때 임상에서는 내시경 장비와 환자의 몸 사이에서 발생하는 마찰을 경험하게 된다. 이런 느낌을 경험할 수 있도록 개발된 시뮬레이터로서는 VIRGY이 있고, Smbionix社의 GI, URO와 Immersion社의 Endoscopy AccuTouch가 있다.

#### 4.5 고관절 수술용 햅틱디바이스

고관절 수술을 위해서는 소형 카메라와 무릎 속으로 삽입이 가능하도록 특수 제작된 장비가 필요하다. 이 과정에서 의사가 삽입하는 장치는 무릎을 감싸고 있는 피부와 뼈 사이에 마찰을 발생시키는데 이는 시뮬레이터에서 구현되어야 할 중요한 부분이다. 이러한 시뮬레이터로서는 SensAble社의 Omni를 사용한 ArthroVR이 있고, SensAble社의 PHANTOM Desktop을 두 개 사용한 ToLTech, SensAble社의 PHANTOM에 gimbal 기구를 사용한 MERL등이 있다.

#### 4.6 결론 및 향후연구방향

현재, 의료훈련 시뮬레이터용 햅틱 디바이스로서는 SensAble社의 PHANTOM Premium과 Omni 장비같이 범용장치들이 사용되고 있기도 하지만 의료훈련시뮬레이터의 특성 상 고정도의 안정한 응답성능을 제공하는 의료훈련시뮬레이터 전용 햅틱디바이스가 연구개발 될 필요가 있다.

### 5. 햅틱 상호작용 제어

햅틱 장치를 사용하는 의료훈련시뮬레이션 환경과의 상호 작용에 있어서, 안정성 확보는 반드시 고려해야 할 중요한 사항인데, 햅틱 상호 작용은 사용자와 햅틱 시스템 간의 양방향 에너지 교환이 이루어지는 시

시스템으로 햅틱 시스템의 불안정한 거동은 사용자에게 상해를 입히거나 장비에 물리적인 손상을 줄 수 있다. 또한, 거칠기, 딱딱함 등의 촉감과 힘/토크와 같은 역감 정보를 현실감, 몰입감 있게 사용자에게 전달하기 위해서는 안정성 확보가 선결되어야 할 요소이다.

### 5.1 수동성 이론기반 햅틱 안정화 제어

수동성 이론은 로봇 시스템, 원격 조작 시스템, 햅틱 시스템 등 상호 작용하는 환경과 복잡하게 연계된 시스템의 안정성을 분석할 때 유용하게 쓰인다. 수동성 이론은 시스템에 유입, 유출되는 물리량(예. 에너지)을 관측함으로써 해당 시스템의 안정성 여부를 가늠해 주는 이론으로서 수동적인 시스템이면 안정하다고 할 수 있다. 예를 들어, 질량, 스프링, 댐퍼로 구성된 일반적인 기계 시스템이라던가, 선형 저항, 축전기, 유도자로 구성된 전기 시스템 등은 에너지를 소모하는 요소들로만 구성되어 있기 때문에 에너지 유출이 에너지 유입보다 클 수 없어서 이들 시스템은 수동적이고, 따라서 안정하다.

햅틱 상호작용 시스템은 그림 7에 보듯이 크게는 사용자와 햅틱 장치, 그리고 가상(혹은 증강) 환경 등의 세 요소들로 표시할 수 있는데, 이러한 시스템의 안정성을 보이는 것은 쉬운 일이 아니다. 시스템을 구성하는 세 요소의 특성을 결정짓는 파라미터들을 정확히 다 알기 어렵고, 가상 환경은 정적이거나 동적일 수 있으며, 또 한편 선형적이거나 비선형적일 수도 있고, 수동적일 수도 있으며 능동적일 수도 있다. 더욱이 사람의 동역학적 특성은 너무 불확실하여 모델링이 쉽지 않다.

여러 연구자들이 수동성 이론에 근거하여 안정성을 논의하였는데 대표적으로는 첫째, 안정적인 햅틱 정보의 제시를 위해 햅틱 장치와 가상 환경간의 가상 커플링(virtual coupling) 개념으로, 햅틱 장치의 물리적 감쇠와 샘플링 시간, 가상벽의 강성과 감쇠 등과 같은 파라미터들의 상관관계를 유도하였고, 둘째, 시간 영역에서 수동성 조건을 기술하는 방법이 제안되었는데 때 샘플마다 햅틱 상호 작용 시스템 혹은 서브시스템에 유입, 유출되는 에너지의 양을 관측하는 수동성 조건 관측기와 관측된 에너지량으로부터 수동성 조건을

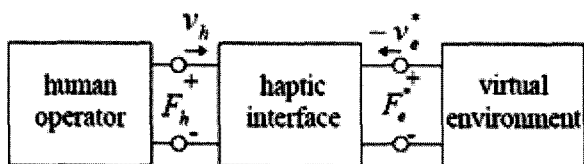


그림 7 햅틱 상호작용 시스템

만족시키기 위한 적응적 에너지 소모 요소를 발동시키는 수동성 제어기로 구성되는 알고리즘을 제안되었다. 또한 셋째, 샘플 & 홀드에서 생성되는 에너지를 햅틱 시스템에서 소모할 수 있는 범위 이내로 제한함과 동시에, 가상 환경을 수동적으로 만들어줌으로써 수동성 조건을 만족시켜 햅틱 안정화를 달성하는 에너지 제한알고리즘 등이 활발히 제안되었다.

### 5.2 멀티레이트기법을 통한 고사실성 햅틱상호작용

사람의 촉각 기관이 가상으로 재현되는 촉감 정보를 사실적으로 느끼기 위해서는 힘/토크 정보를 계산하는 과정(haptic rendering process)과 계산된 반력을 햅틱 장치에 인가하는 과정(haptic control process)이 빠르게 이루어져야 한다(대개 1kHz 이상). 그런데 햅틱 렌더링 과정에서의 충돌 검출이나 변형체에 대한 유한 요소해석(FEM) 등은 계산량이 많아 일반적으로 느리게 수행될 수밖에 없다. 한편 햅틱 제어 과정은 보통 저수준의 관성, 마찰 보상 제어 과정 및 고수준의 햅틱 상호 작용을 포함하며 햅틱 렌더링 과정에 비해 상대적으로 매우 빠르게 수행될 수 있다. 이처럼 빠른 처리 과정과 느리게 처리될 수밖에 없는 과정이 혼재할 경우 고사실성(high-fidelity)을 획득하기 위하여 다양한 멀티레이트(multi-rate) 기법들이 제안되었다. 멀티레이트 기법은 각기 다른 수행 주기를 갖는 서로 다른 쓰레드(thread)를 사용하여 계산 과정을 분할함으로써 높은 사실성을 가능하게 한다. 느린 프로세스로는 변형체에 대한 시뮬레이션을 수행하고 하고, 빠른 프로세스는 힘 정보를 렌더링하게 하거나 더 빠른 최하위 제어 프로세서로 안정화제어 등을 수행함으로써 변형체와 햅틱 상호 작용 시 높은 사실성을 얻을 수 있다.

### 5.3 다자유도 햅틱 안정화 알고리즘

의료 훈련 시뮬레이션 등과 같은 고차원 분야에 햅틱 기술을 응용할 때는 더 복잡한 과업에 필요한 정교한 조작감을 제공해야 한다. 이를 위해서는 다자유도 상호 작용을 고려해야 한다. 이 방향으로의 연구로는 기존의 수동성 알고리즘을 다자유도 경우로 확장하고 다자유도 경우에 발생할 수 있는 방향 왜곡 문제를 해결하는 연구가 진행되고 있다.

### 5.4 향후 연구 과제

수동성 이론은 다루고자 하는 시스템의 해석이 용이하며 복잡하거나 비선형적인 거동을 보이는 시스템 등에도 적용이 가능하다는 장점이 있지만, 수동성 이론에 기반하지 않은 다른 제어 알고리즘 등에 비해 더

보수적(conservative)이어서 가상 환경이 제시해주어야 하는 목표 임피던스를 다른 제어 알고리즘에 비해 이론적으로는 상대적으로 적게 제시해준다는 문제점이 있다. 따라서 향후 햅틱 안정화 제어에 있어서 가장 중요한 연구 방향 중 하나는 안정성을 기본적으로 확보함과 동시에 투명성을 최대한 증대시키는 방향의 연구가 요구된다. 또한, 기존의 연구가 단순한 가상벽 실험 위주로 강성이 크고 선형 탄성적인 가상 환경을 묘사하는데 주력한 반면, 향후에는 비선형 변형체라던가 점탄성체, 혹은 국소적으로 다른 강성을 갖는 객체 등의 묘사 등에서도 안정적이고 투명한 햅틱 상호작용이 이루어지게끔 연구가 확장되어야 할 것이다.

## 6. 결론 및 향후 연구방향

의료훈련시뮬레이터의 가장 중요한 요소 중 하나인 햅틱 모델링 및 실시간 렌더링은 아직 개발 초기 단계로서 장기의 In Vivo 물성치 측정, 장기의 물리적 거동에 대한 정확한 시뮬레이션 등이 고난이도의 기술을 필요로 하며 따라서 의료기술자 및 엔지니어의 협업개발이 필요하고 좀 더 오랜 시간의 개발이 필요하다고 사료된다.

## 참고문헌

- [ 1 ] ProMIS, <http://www.haptics.com/>
- [ 2 ] Patient simulation, <http://www.simulab.com/>
- [ 3 ] LaparoscopyVR, <http://www.immersion.com/>
- [ 4 ] Simulation Open Frame Architecture, <http://www.sofa-framework.org/>
- [ 5 ] CHAI3D, <http://www.chai3d.org/>
- [ 6 ] OpenTissue, <http://www.opentissue.org/>
- [ 7 ] de Oliveira AC, Dos Santos Nunes, FD, "Building a Open Source Framework for Virtual Medical Training," *Journal of Digital Imaging*, September 2009 (online publication).
- [ 8 ] Machado, LS, Moraes RM, Souza DF, Souza LC, Cunha IL, "A Framework for Development of Virtual Reality-Based Trainig Simulators," *Studies in Health Technology and Informatics: Medicine Meets Virtual Reality 17*, vol. 142, pp. 174-176, 2009.
- [ 9 ] N.A. Langrana, G. Burdea, K. Lange, D. Gomez, and S. Deshpande, "Dynamic Force Feedback in a Virtual Knee Palpation," *Artif Intell Med*, vol. 6, no. 4, pp. 321-333, Aug,1994.
- [10] Timothy Coles, Dwight Meglan, and Nigel W. John, "The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State-of-the-art", *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS* (In press)
- [11] M.O. Gastal, M. Henry, A.R. Beker, E.L. Gastal, N. Langrana, G. Burdea, J. Ladeji, and M. Dinsmore, "Human Performance Using Virtual Reality Tumor Palpation Simulation," *Computers and Graphics*, vol. 21, pp. 451-458, 1997.
- [12] G. Burdea, G. Patounakis, V. Popescu, and R.E. Weiss, "Virtual Reality-Based Training for the Diagnosis of Prostate Cancer," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 10, pp. 1253-1260, 1999.
- [13] M. McLaughlin, I. Cohen, M. Desbrun, L. Hovanesian, M. Jordan-Marsh, S. Narayanan, G. Sukhatme, P. Georgiou, S. Ananthkrishnan, W. Peng, and W. Zhu, "Haptic Simulator for Training in Clinical Breast Examination," *Annenberg School for Communication, Annenberg*, 2003.
- [14] A. Crossan, S. Brewster, S. Reid, and D. Mellor, "A Horse Ovary Palpation Simulator for Veterinary Training," *Haptic Human-Computer Interaction*, pp. 157-164, 2001.
- [15] Logitech. "Wingman Force Feedback Mouse," <http://immr.client.shareholder.com/ReleaseDetail.cfm?ReleaseID=111502>
- [16] Z. Mayoaran, L. Watterson, P. Withers, J. Line, W. Arnett, and R. Horley, "Mediseus Epidural: Full-Procedure Training Simulator for Epidural Analgesia in Labour," *SimTecT Healthcare Simulation Conference 2006*, 2006.
- [17] T. Dang, T.M. Annaswamy, and M.A. Srinivasan, "Development and Evaluation of an Epidural Injection Simulator with Force Feedback for Medical Training," *Stud Health Technol Inform*, vol. 81, pp. 97-102, 2001.
- [18] R.W. Webster, D.I. Zimmerman, B.J. Mohler, M.G. Melkonian, and R.S. Haluck, "A Prototype Haptic Suturing Simulator," *Stud Health Technol Inform*, vol. 81, pp. 567-569, 2001.
- [19] S.P. Dimaio, and S.E. Salcudean, "Interactive Simulation of Needle Insertion Models," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 7, pp. 1167-1179, 2005
- [20] S.P. Dimaio, "Modelling, Simulation, and Planning of Needle Motion in Soft Tissues," PhD Thesis, Univ. Br. Columbia 2003.
- [21] A. Okraimec, M. Farcas, O. Henao, I. Choy, J. Green, M. Fotoohi, R. Lesle, D. Wight, P. Karam, N. Gon-

zalez, and J. Apkarian, "Development of a Virtual Reality Haptic Veress Needle Insertion Simulator for Surgical Skills Training," *Stud Health Technol Inform*, vol. 142, pp. 233-238, 2009.

- [22] N. Taffinder, C. Sutton, R.J. Fishwick, I.C. Mcmanus, and A. Darzi, "Validation of Virtual Reality to Teach and Assess Psychomotor Skills in Laparoscopic Surgery: Results from Randomised Controlled Studies Using the Mist Vr Laparoscopic Simulator," *Stud Health Technol Inform*, vol. 50, pp. 124-130, 1998.
- [23] F.H. Halvorsen, O.J. Elle, and E. Fosse, "Simulators in Surgery," *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies*, vol. 14, no. 4, pp. 214-223, 2005.
- [24] *Surgical Science Ab*. "LapSim Validation Studies," 03/12/2008, 2008; [http://www.surgical-science.com/index.cfm/en/lapsim\\_\\_\\_a\\_validated\\_training\\_system/](http://www.surgical-science.com/index.cfm/en/lapsim___a_validated_training_system/).
- [25] E. Verdaasdonk, J. Dankelman, J. Lange, and L. Stassen, "Transfer Validity of Laparoscopic Knot-Tying Training on a VR Simulator to a Realistic Environment: A Randomized Controlled Trial," *Surgical Endoscopy*, vol. 22, no. 7, pp. 1636-1642, 2008.
- [26] T. Pham, L. Roland, K.A. Benson, R.W. Webster, A.G. Gallagher, and R.S. Haluck, "Smart Tutor: A Pilot Study of a Novel Adaptive Simulation Environment," *Stud Health Technol Inform*, vol. 111, pp. 385-389, 2005.
- [27] D. Bachofen, J. Zatoryi, M. Harders, G. Szekely, P. Fruh, and M. Thaler, "Enhancing the Visual Realism of Hysteroscopy Simulation," *Stud Health Technol Inform*, vol. 119, pp. 31-36, 2006.
- [28] C. Baur, D. Guzzoni, and O. Georg, "Virgy: A Virtual Reality and Force Feedback Based Endoscopic Surgery Simulator," *Stud Health Technol Inform*, vol. 50, pp. 110-116, 1998.
- [29] S.F.F. Gibson, J. Samosky, A. Mor, C. Fyock, W.E.L. Grimson, T. Kanade, R. Kikinis, H.C. Lauer, N. McKenzie, S. Nakajima, T. Ohkami, R. Osborne, and A. Sawada, "Simulating Arthroscopic Knee Surgery Using Volumetric Object Representations, Real-Time Volume Rendering and Haptic Feedback," in *Proceedings of the First Joint Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine and Medial Robotics and Computer-Assisted Surgery*, 1997.

## 약 력



### 류 제 하

1982 서울대학교 기계공학과(학사)  
1984 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
1991 University of Iowa, 기계공학과(박사)  
1994~현재 광주과학기술원 정보기전공학부 기  
전공학과 교수

관심분야 : 촉각기술, 촉각렌더링, 촉각장치 설계  
및 제어, 촉각방송, 촉각모델링, 의료훈련시뮬레이터 등

E-mail : ryu@gist.ac.kr



### 박 진 아

1988 Columbia University(학사)  
1991 University of Pennsylvania(석사)  
1996 University of Pennsylvania(박사)  
2002~2009 (구)한국정보통신대학교 공학부 조  
교수/부교수  
2009~현재 KAIST 전산학과 부교수

관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 컴퓨터햅틱스, 시각화, 가변형모델, 의료  
영상 등

E-mail : jinahpark@kaist.ac.kr



### 김 정

1991 KAIST(학사)  
1993 KAIST(석사)  
2004 MIT(박사)  
~ 현재 KAIST 기계공학과 부교수

관심분야 : Soft tissue modeling, biorobotics, Biome-  
chanics, haptics, Surgical tool for Minimally

Invasive Surgery

E-mail : jungkim@kaist.ac.kr



### 최 희 병

1998 전북대학교(학사)  
2001 전북대학교(석사)  
2004 Tohoku University(박사)  
2004~2008 (주)삼성중공업 책임연구원  
2009~현재 GIST 연구교수

관심분야 : 병렬로봇의 설계, 제어 및 공장자동화

를 위한 응용

E-mail : hbchoi@gist.ac.kr