

<초청논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.283

# 햅틱 제어 기술 동향

류제하<sup>†</sup> · 김재하\* · 서창훈\* · 임요안\* · 김종필\*\*

(2008년 12월 6일 접수, 2009년 3월 11일 수정, 2009년 3월 11일 심사완료)

## A Survey of Haptic Control Technology

Jeha Ryu, Jaeha Kim, Changhoon Seo, Yo-An Lim and Jong-Phil Kim

**Key Words :** Haptics(촉각학), Haptic Interaction Control(촉각 상호작용 제어), Stability(안정성), Transparency(투명성), Passivity(수동성), Teleoperation(원격조작), Virtual Environment(가상환경)

### Abstract

Haptics technology allows one to interact with virtual environments, augmented environments, and real environments providing tactual sensory information. Science and technology of haptics can in general be classified into three groups: machine haptics, computer haptics, and human haptics. This paper surveys the state-of-the-art of haptic control technology for virtual environments and teleoperation (real environments) and then proposes possible future research directions in the following areas: haptic stability control, bilateral teleoperation control, and stability enhancement control.

### 1. 서론

‘만지다’라는 의미의 그리스어인 ‘haptesthai’에서 유래된 용어인 햅틱(haptic)은 최근 ‘햅틱폰’의 출시로 대중에게 친숙한 용어가 되었다. 2006년 포브스(Fobes)지는 “앞으로 우리가 사는 방법을 바꿀 10가지(10 things that will change the way we live)” 중 하나로 햅틱 기술을 포함하기도 하였다.

햅틱 기술은 사용자에게 가상(virtual), 증강(augmented), 혹은 실제(real, for teleoperation) 환경의 다양한 정보를 촉감을 통해 제공하는 데

필요한 모든 하드웨어, 소프트웨어, 및 인지심리학적 과학기술을 의미한다. 햅틱, 즉 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 주목 받기 시작하였으며, 사용자의 몰입감을 증가시켜 가상, 증강, 혹은 실제 환경 내의 객체들을 효과적으로 느끼고 조작할 수 있도록 도와준다.

이러한 햅틱 기술은 크게 햅틱 장치 메커니즘, 액츄에이터의 설계 및 제어를 다루는 머신 햅틱스(machine haptics), 가상 객체와의 접촉 감지 및 접촉력 계산 등 햅틱 장치에 힘 혹은 촉감 정보를 계산해주는 햅틱 렌더링(haptic rendering)을 연구하는 컴퓨터 햅틱스(computer haptics), 신체에서 느끼는 촉감의 정신물리학적 연구, 신체의 물리적 변수측정 및 사용자 평가 등의 기술에 관한 휴먼 햅틱스(human haptics)의 세 가지로 분류할 수 있다.

† 책임저자, 회원, 광주과학기술원 기전공학과

E-mail : ryu@gist.ac.kr  
TEL : (062)970-2389 FAX : (062)970-2384

\* 광주과학기술원 기전공학과  
E-mail: {kjh81, search, yo-an}@gist.ac.kr

\*\* 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터  
E-mail: lowtar74@imrc.kist.re.kr

본 논문에서는 세 가지 기술 분야 중에서 머신 햅틱스, 좀 더 세부적으로는 햅틱 제어 기술에 관한 최신의 연구 현황에 대해 살펴보고 향후 연구 방향을 나름대로 제시하고자 한다. 그러나 햅틱 제어 기술이 매우 광범위하므로 본 고에서는 최근에 주목 받는 수동성 기반의 제어 기술 중심으로 정리하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장은 안정한 햅틱 상호 작용을 위한 제어 기술을 다루며 3 장에서는 양방향 원격 제어를 개괄한다. 4 장에서는 물리적 댐핑을 추가하여 재현 가능한 임피던스(impedance)의 범위를 확장하는 기술을 정리하였고 마지막 5 장에서 나름대로의 결론을 맺었다.

## 2. 햅틱 안정화 제어

햅틱 장치를 통한 인간과 컴퓨터 혹은 원격지환경과의 상호 작용에 있어서, 안정성 확보는 반드시 고려해야 할 중요한 요소이자, 햅틱 분야에 있어서 가장 중요한 연구 주제 중 하나이기도 하다. 왜냐하면 햅틱 상호 작용은 사용자와 햅틱 시스템 간의 양방향 에너지 교환이 이루어지기 때문에, 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 선행되어야 할 요소이다.

### 2.1 수동성 이론(passivity theory) 기반 햅틱 안정화 제어

수동성 이론은 시스템이 선형적이든 비선형적이든 관계없이 그 시스템에 유입, 유출되는 물리량(예. 에너지)을 관측함으로써 해당 시스템의 안정성 여부를 가늠해 주는 이론이다.<sup>(1)</sup>

(Fig. 1)의 네트워크 모델에서 만약 2-포트 요소의 이미턴스 매핑(immittance)  $y = Pu$ 가 초기 에너지 보존량  $E(0)$ 와 허용 가능한 effort

( $F_1, F_2$ )와 flow ( $v_1, -v_2$ )에 대해 식 (1)과 같은 조건을 만족한다면, 수동적(passive)이라 한다.<sup>(2)</sup>

$$\int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau + E(0) \geq 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (1)$$

수동성 이론은 안정성을 나타내는 충분조건으로서 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 수동적이다라고 말하고, 따라서 안정하다. 수동성 이론은 로봇 시스템, 원격 조작 시스템, 햅틱 시스템 등 상호 작용하는 환경과 복잡하게 연계된 시스템의 안정성을 분석할 때 유용하게 쓰인다.

햅틱 시스템은 (Fig. 2)처럼 사용자와 햅틱 장치, 샘플 & 홀드(sample & hold), 제어기, 그리고 가상(혹은 증강) 환경 등의 다섯 요소들로 표시할 수 있는데, 햅틱 상호 작용 시스템의 안정성을 보이는 것은 쉬운 일이 아니다. 시스템을 구성하는 다섯 요소의 특성을 결정 짓는 파라미터들을 정확히 다 알기 어렵고, 각 요소들이 서로 연결되어 영향을 주고 받기 때문에 이들 파라미터들의 변화를 완벽하게 계산하거나 예측하는 것은 거의 불가능하기 때문이다. 또한 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.

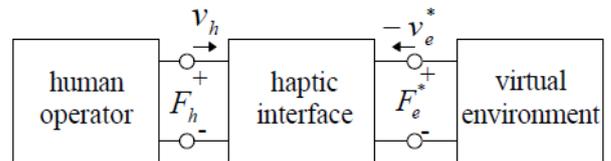


Fig. 1 A haptic interaction system is made up of a two-port haptic interface with one-port human operator and one-port virtual environment<sup>(2)</sup>

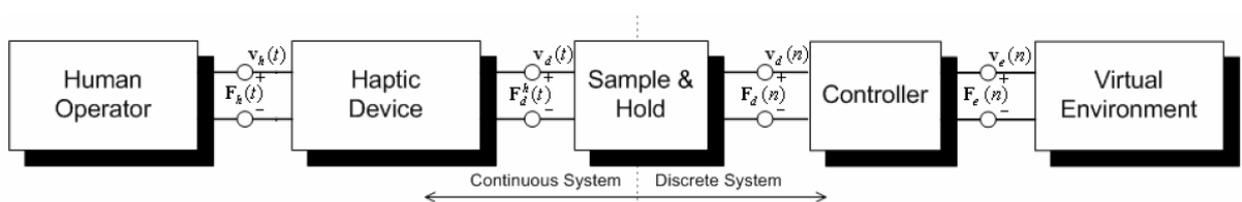


Fig. 2 Overall configuration of haptic interaction system

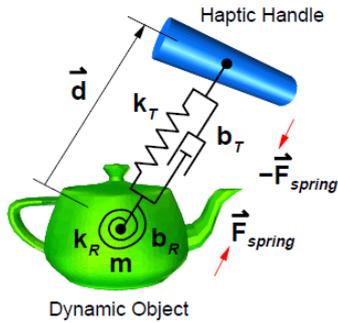


Fig. 3 Dynamic model based on virtual coupling<sup>(6)</sup>

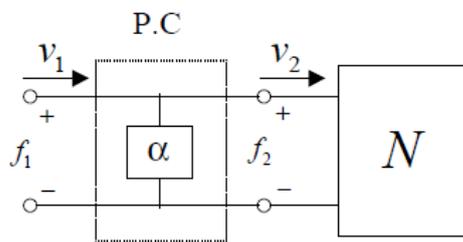


Fig. 4 Configuration of passivity controller<sup>(8)</sup>

그러나, 수동성 이론은 여러 구성 요소가 연결되어 있거나 혹은 비선형적인 거동을 포함하는 시스템이라 할지라도 단순히 에너지 입출력과 소모 관계만을 살펴봄으로써 시스템의 안정성 여부를 판단해줄 수 있다. 수동성 이론의 이러한 특성은, 햅틱 시스템을 분석하고 제어 알고리즘을 설계하는데 있어서 수월한 접근 방법을 제공해주었다. 햅틱 안정화 제어 분야에 수동성 이론은 십 년이 넘게 사용되었으며, 다음과 같은 많은 연구가 진행되었다.

Colgate와 Schenkel<sup>(4)</sup>은 수동성 이론에 근거하여 안정성을 논의하였고, (Fig. 3)과 같이 안정적인 햅틱 정보의 제시를 위해 햅틱 장치와 가상 환경간의 가상 커플링(virtual coupling) 개념을 제안하였다. (Fig. 3)은 가상 주전자와 햅틱 장치의 손잡이가 병진 운동에 대한 강성(  $k_T$  ) 및 감쇠(  $b_T$  )와 회전 운동에 대한 강성(  $k_R$  ) 및 감쇠(  $b_R$  )로 모델링되는 가상 커플링으로 연결됨을 보여준다. 이러한 연계시스템에서 보통 가상 강체(rigid body)는 매우 큰 강성(  $K$  )과 작은 값의 감쇠(  $B$  )로 모델링되는데 (가상벽 모델링) 이러한 가상벽은 햅틱 상호작용 시스템의 안정성 제어에서 하나의 Benchmark 문제로 활용된다.

속도 변수를 후행 차분 방정식으로 모사하는 제한적인 조건에 대해서, 안정적인 햅틱 정보의 제시를 가능케 하는 햅틱 장치의 물리적 감쇠(physical damping)  $b$ 와 샘플링 시간(sampling time)  $T$ ,

가상벽의 강성(stiffness)  $K$ 와 감쇠(damping)  $B$  등과 같은 파라미터들의 상관 관계는 식 (2)와 같이 정리될 수 있으며 이와 같은 결과는 수동성을 만족시키기 위하여 각 파라미터들이 어떤 범위 이내의 값을 가져야 하는지 알려준다. 가상 커플링의 도입으로 가상 환경의 설계와 햅틱 상호 작용을 위한 안정화 제어기의 설계가 상호 독립적으로 이루어질 수 있다. 이와 같은 간단함 덕분에 많은 햅틱 렌더링 알고리즘이 햅틱 상호 작용의 안정화를 위해 이 알고리즘을 사용하고 있다.<sup>(5)</sup>

$$b \geq \frac{KT}{2} + |B| \tag{2}$$

수동성 조건 기술에 대한 다른 대안으로, 시간 영역(time-domain)에서 수동성 조건을 기술하는 방법이 제안되었다. Hannaford와 Ryu<sup>(8)</sup>는 매 샘플마다 햅틱 상호 작용 시스템 혹은 서브시스템에 유입, 유출되는 에너지의 양을 관측하는 수동성 조건 관측기(passivity observer, PO)와 관측된 에너지량으로부터 수동성 조건을 만족시키기 위한 적응적 에너지 소모 요소를 발동시키는 수동성 제어기(passivity controller, PC)로 구성되는 시간 영역 수동성(time-domain passivity) 알고리즘을 제안하였다. (Fig. 4)에서 보는 것처럼, 이 알고리즘은 어떤 시스템 네트워크에 입출력되는 에너지 관계를 수동성 관측기로 모니터링하다가 에너지 조건이 수동성 조건에 위배될 경우 가상의 댐핑(  $\alpha$  )을 적응적으로 생성하여 최종 출력에 추가해줌으로써 (  $f_1 = f_2 + \alpha v_2$  ) 전체 시스템의 수동성을 보장, 안정성을 확보하게 한다.

이 알고리즘의 주요 장점은 햅틱 장치의 동역학적 파라미터에 대해 정확히 알고 있을 필요가 없다는 점이다. 그러나, 초기의 시간 영역 수동성 알고리즘<sup>(8)</sup>은 전체 햅틱 상호 작용 시스템을 순수 이산적인 시스템으로 간주하였기 때문에 샘플 & 홀드의 영향이 신중하게 고려되어 있지 않았고, 따라서 샘플 & 홀드에서 발생된 에너지 생성을 효과적으로 보상해주지 못했다. Ryu 등<sup>(9)</sup>은 이러한 샘플 & 홀드에서 발생하는 에너지를 처리해주기 위하여 간단한 속도 예측기를 포함하는 수정된 시간 영역 수동성 알고리즘을 제시하였다. 이후에 Ryu 등<sup>(10)</sup>은 고주파 대역에서 발생하는 햅틱 장비의 미세한 떨림 현상을 피하기 위하여, 0으로 고정된 에너지

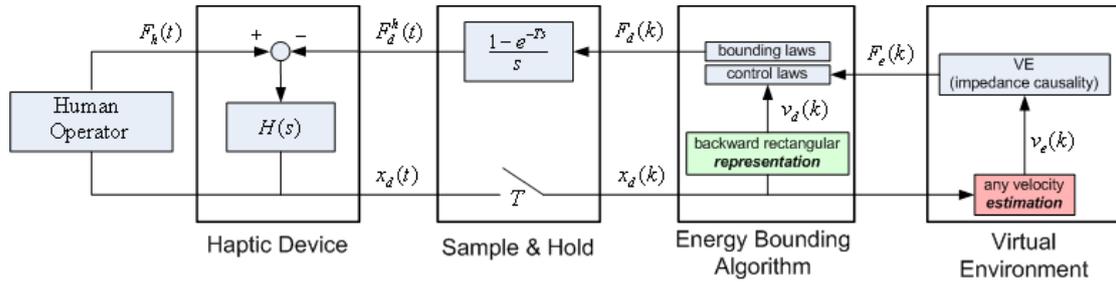


Fig. 5 Location of the energy bounding algorithm

기준선 대신, 참조 에너지를 추종하도록 하는 기법을 제안하였다.

Kim과 Ryu<sup>(11)</sup>는 샘플 & 홀드에서 생성되는 에너지를 햅틱 시스템에서 소모할 수 있는 범위에 내로 제한함과 동시에, 가상 환경을 수동적으로 만들어줌으로써 수동성 조건을 만족시켜 햅틱 안정화를 달성하는 에너지 제한(energy-bounding) 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 (Fig. 5)에서 보듯이, 샘플 & 홀드 직전에 위치하며, 작동 메커니즘은 가상 커플링과 유사하나, 장점은 가상 환경 설계자가 가상 환경의 강성이나 감쇠 값들을 설정할 때 식 (2)와 같은 조건을 고려할 필요가 없다는 점과, 매우 느린 샘플링 타임에 대해서도 항상 안정적으로 동작한다는 것이다.

이외에, Gillespie와 Cutkosky<sup>(13)</sup>는 가상 벽에 대한 햅틱 렌더링 중에 불안정성을 유발할 수 있는 에너지 누수(energy-leak) 현상에 대한 다양한 원인들에 대해 논하였다. Abbott과 Okamura,<sup>(14)</sup> 그리고 Diolaiti등<sup>(15)</sup>은 양자화와 샘플링이 가상벽의 수동성에 어떠한 영향을 미치는지 논하였다. 이들은 햅틱 상호 작용 시스템이 사용자가 원하는 강성을 안정적으로 제공하기 위하여 모터 파라미터, 엔코더 해상도, 서보 레이트 등 햅틱 상호 작용 시스템의 다양한 구성 요소가 어떻게 설계되어야 하는지에 대한 방안을 제시하였다.

2.2 멀티레이트 기법을 통한 고사실성 햅틱 상호 작용

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).<sup>(16)</sup> 그런데 햅틱 렌더링 과정에서의 충돌 검출이나 변형체에 대한 유한요소해석(FEM), 동역학 시뮬레이션 등은 계산량이 많아 일반적으로 느리게 수행될 수 밖에 없다. 한편 햅틱 제어 과정은 보통

저수준의 관성 및 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 수 밖에 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.

Adachi 등<sup>(17)</sup>은 가상 공간에서의 햅틱 렌더링은 낮은 주기로 갱신하는 반면, 반력(force-feedback) 제어는 빠른 주기로 갱신하는 방법을 제안하였다. 이를 위해, 충돌 검출시 가상 객체의 국소 지역을 대상으로 하여 빠른 충돌 검출이 가능하게 하였다. Mahvash와 Hayward<sup>(18)</sup>는 느린 프로세스로는 변형체에 대한 시뮬레이션을 수행하고 하고, 빠른 프로세스는 힘 정보를 렌더링하게 하여 변형체와 햅틱 상호 작용 시 높은 사실성을 얻었다. Lee와 Lee<sup>(19)</sup>는 비선형 가상 커플링을 갖는 햅틱 장치에 대한 멀티레이트 제어 기법을 제안하였고, Cho 등<sup>(20)</sup>은 느리게 갱신되는 가상 환경에 대한 햅틱 정보 제시를 위하여 멀티레이트 파동 변환(multi-rate wave transform) 기법을 제안하였다. 한편 Kim 등<sup>(21)</sup>은 안정화 제어 알고리즘을 저수준의 제어 주기보다 더 빠른 주기를 가지는 쓰레드로 수행하는 수정된 에너지 제한 알고리즘을 제시하여 안정적으로 제시 가능한 임피던스 범위를 크게 확장시킬 수 있었다.

2.3 다자유도 햅틱 안정화 알고리즘

의료 훈련 시뮬레이션, 디지털 조립 훈련 등과 같은 고차원 분야에 햅틱 기술을 응용할 때는 더 복잡한 과업에 필요한 정교한 조작감을 제공해야 한다. 이를 위해서는 한 점에 대한 상호 작용(point-interaction)만으로는 부족하며, 다자유도 상호 작용을 고려해야 한다. 즉 3 차원 도구나 부품을 사용하는 섬세하고 복잡한 상호 작용에는

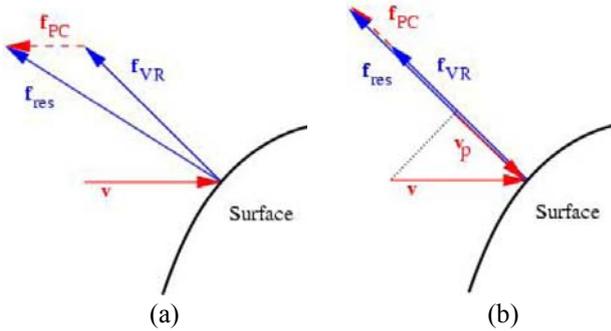


Fig. 6 (a) resultant forces with standard 1-dof PO/PC, (b) resultant forces with multiple-dof PO/PC<sup>(22)</sup>

본질적으로 6 자유도 이상의 자유도가 요구된다.<sup>(6)</sup> 다자유도로 햅틱 정보를 제공하기 위한 햅틱 렌더링은 많은 연구가 이루어졌다. 반면에, 다자유도 상호 작용에서의 안정성 확보를 위한 제어 알고리즘의 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

최근에 Preusche 등<sup>(22)</sup>은 시간 영역 수동성 알고리즘<sup>(8)</sup>을 다자유도 경우로 확장하였다. 또한 다자유도 경우에 발생할 수 있는 방향 왜곡 문제와 그에 대한 간단한 해법을 제시하였다. 햅틱 상호 작용 시스템의 수동성을 보장하기 위해 적응적으로 생성되는 가상의 댐핑을 방향 보정의 과정 없이 적용할 경우, (Fig. 6(a))와 같이 실제 가상 환경의 법선 방향이 아닌 엉뚱한 방향으로 힘이 출력되는 방향 왜곡의 문제가 발생한다. 방향 왜곡 문제는 사용자로 하여금 가상 객체의 기하 형상을 올바르게 인식하지 못하게 하여 현실감 있는 햅틱 상호 작용을 크게 저해한다. 이를 보정하기 위해 이들은 간단한 투영(projection)을 해줌으로써 최종적으로 산출하는 힘이 가상 환경에서 계산된 힘( $f_{VR}$ )의 방향과 일치하게 하여 문제를 해결하였다 (Fig. 6(b)).

한편 시스템에 유입되는 총 에너지량이 양의 값을 갖도록 하여 수동성을 보장하는 제어 전략은 투명한(transparent) 다자유도 햅틱 상호 작용을 제시하기 어렵다는 것이 Kim 등<sup>(23)</sup>에 의해 제기되었다. 예를 들어, 법선 방향으로는 높은 강성을 갖고 접선 방향으로는 속도에 비례하는 점성 감쇠(viscous damping)가 있는 가상벽에 대한 2 자유도 상호 작용 실험에서, 전체 시스템이 수동성을 만족하여 안정함에도 불구하고 높은 강성을 갖고 있는 법선 방향으로는 진동이 발생하여 투명한 상호 작용이 저해 받을 수 있음이 관측되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 기 제안된 에너지 제한 알고리즘<sup>(12)</sup>을 각

독립축에 적용함으로써 다자유도 햅틱 상호 작용에서 안정함을 보장함과 동시에 방향 왜곡 및 각 축별로의 떨림 등을 제거하여 투명한 상호 작용을 제공할 수 있었다.

### 2.4 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 주요한 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 모사하는데 주력한 반면, 향후에는 비선형 변형체라던가 점탄성체, 혹은 국소적으로 다른 강성을 갖는 객체 등의 모사 등에서도 안정적이고 투명한 햅틱 상호 작용이 이루어지게끔 연구가 확장되어야 할 것이다.

## 3. 양방향 원격 조작 제어

원격 조작(Teleoperation) 시스템은 (Fig. 7)과 같이 조작기를 이용하여 원격지에 있는 로봇(slave robot) 혹은 차량 등을 조작함으로써 조작자가 현장에서 직접 작업하는 것과 같은 효과를 만들어 내는 시스템으로 정의할 수 있다.<sup>(24)</sup> 심해, 우주공간, 방사능 지역 등 사람이 직접 작업하기 힘든 극한 작업환경에서 주로 사용되며 최근 우주 로봇, 원격 수술 로봇 등 고도의 정밀도와 능숙도가 요구되는 분야로 사용 범위가 확장되고 있다. 이러한 원격 조작 분야에서 촉감 정보의 제시는 현실감 제공 및 작업능력 증대 측면에서 아주 유용하다.

일반적인 원격 조작 시스템은 마스터(master)와 슬레이브(slave)로 구성되며, 양방향 원격 조작 시스템에서는 마스터의 위치 또는 속도 정보가 통신 채널을 통하여 슬레이브 측으로 전송이 되고 슬레이브 측에서는 힘 정보가 통신 채널을 통하여 마스터 측으로 전송이 된다. 이 때 통신 채널에서 발생하는 시간 지연이나 정보 누락 등이 원격

조작 시스템의 안정성에 상당히 부정적인 영향을 미치게 된다.

촉감이 가미된 양방향 원격 조작 시스템의 제어에 있어서 조작자가 누구인지, 또는 어떤 환경인지에 관계없이 전체 시스템의 안정성 (Stability)을 보장하는 것과 사람이 직접 현장에서 작업하는 것과 같은 현실감을 주는 투명성 (Transparency)은 아주 중요한 요소가 되는데, 일반적으로 안정성과 투명성을 동시에 보장하기는 매우 어렵다. 안정성을 강조하면 투명성이 떨어지고 투명성을 강조하면 안정성에 문제가 발생하는 등 서로 상충되는 요소이다.

3.1 양방향 원격 조작 제어의 연구 동향

1950년대 중반 Goertz<sup>(25)</sup>가 처음으로 기계적으로 제어되는 원격 조작 시스템을 구성한 이후 원격 조작 시스템에서의 시간 지연 요소의 영향을 알아보기 위한 실험적 연구<sup>(26)</sup>가 시작되었다. 1960년대 초반 Sheridan과 Ferrell<sup>(26)</sup>은 시간 지연이 있을 경우에 움직임과 정지를 반복하면서 작업을 수행하는 Move-and-wait strategy를 제안하였다. 이후 시간 지연 문제를 해결하기 위하여 관리 제어

방법,<sup>(28)</sup> 원격조작지향적 컴퓨터 소프트웨어 언어,<sup>(29)</sup> 및 움직임을 예측하여 재현하는 방법<sup>(34)</sup> 등이 등장하였다.

이러한 기초적인 연구부터 시작하여 현재까지 다양한 원격 조작 제어 기법들이 제안되었다. 1980년대 중반부터 원격 조작과 관련한 제어 이론에 대한 연구(Lyapunov-based analysis,<sup>(38)</sup> internal virtual model<sup>(39)</sup>)가 본격적으로 시작되었다. 원격 조작 제어 연구의 역사가 (Fig. 8)에 간략히 정리되어 있다.

한편 1990년대 초반, Lawrence<sup>(44)</sup>는 투명성 (Transparency)을 만족하기 위해서는 조작자 측에서 바라본 입력 임피던스와 작업 환경의 임피던스가 같아야 함 ( $Z_i = Z_e$ )으로 이 조건을 만족시키기 위하여 마스터와 슬레이브 각 측의 속도 및 힘 변수들( $v_m, f_m, v_s, f_s$ )를 각각 전송할 수 있는 4-채널 구조를 제안하기도 하였다. 이러한 4-채널 구조에서는 모델 기반의 고정 제어기를 구성하기 위하여 조작자, 마스터, 슬레이브, 작업 환경의 임피던스를 가급적 정확히 획득하는 것이 필수적이다.

그러나 각 구성 요소의 동역학적 특성을 정확히 알아내는 것은 무척 어려운 일이기 때문에 각 파라미터의 불확실성(uncertainty)을 보상하기 위해 적응 제어(adaptive control) 기법<sup>(45)</sup>이 제안되었다. 또한 플랜트(plant)의 모델을 이용하여 슬레이브 로봇 측의 상황을 예측하여 시간 지연 문제를 해결하는 예측 제어(Predictive control) 기법<sup>(49),(54)</sup>도 제안되었다. 그 외  $H_\infty$  제어,<sup>(56)</sup> 슬라이딩 모드 제어 (Sliding mode control),<sup>(58)</sup> Finite spectrum assignment<sup>(59)</sup> 등 다양한 제어 기법이 제안되어 사용되었다.

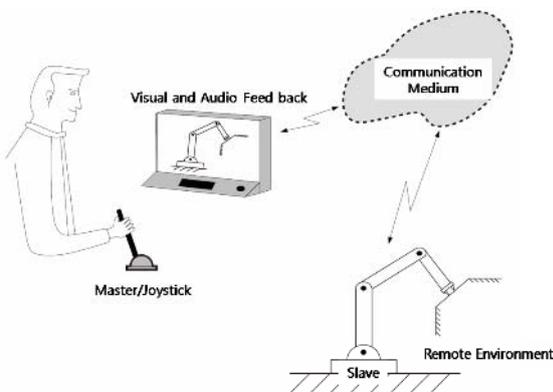


Fig. 7 Teleoperation system<sup>(24)</sup>

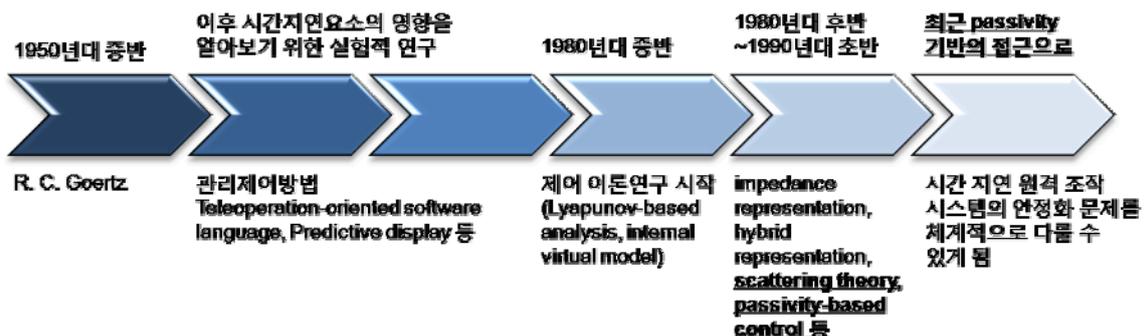


Fig. 8 Teleoperation control history



Fig. 9 2-port network representation of teleoperation system

3.2 수동성 이론 기반의 원격 조작 제어 연구 동향

언급한 것처럼 시간 지연에 의한 원격 조작 시스템의 불안정성을 극복하기 위해 다양한 제어 기법들이 제안되었다. 본 논문은 다양한 원격 조작 제어 이론들 중에서 수동성 이론에 기반한 제어 이론들에 대해 좀 더 살펴보도록 한다.

1980년대 후반에서 1990년대 초반에 이르러서는 원격 조작 시스템을 수동성 이론을 사용하여 해석하는 시도들이 이루어졌다. 대표적으로는 impedance representation,<sup>(40)</sup> hybrid representation,<sup>(41)</sup> scattering theory,<sup>(42)</sup> wave variables<sup>(43)</sup>와 같은 수동성 이론에 기반을 둔 원격 조작 제어 이론들이 등장하였다. 그리하여 수동성 기반의 접근으로 시간 지연이 있는 원격 조작 시스템의 안정화 문제를 체계적으로 다룰 수 있게 되었다. (Fig. 9)는 전체 원격 조작 시스템을 마스터, 슬레이브, 조작자, 작업 환경의 2-포트 네트워크 요소들로 모델링한 것을 보여준다.

Anderson과 Spong<sup>(42)</sup>은 일정한 시간 지연이 존재하는 힘 반향 양방향 원격 제어의 안정성을 유지하기 위하여 산란 이론(Scattering theory)을 제안하였고 이것을 Neimeyer와 Slotine<sup>(43)</sup>이 파동 변수(Wave variables)로 확장하였다. 이들은 통신 채널의 수동성을 만족시키기 위하여 U, V로 통칭하는 파동 변수들을 정의하고 위치/속도, 힘 등의 물리량을 파동 변수로 치환하여 전송하는 기법을 제안하였다. 이들은 시간 지연이 일정하다고 가정을 하여 이론을 전개함으로써 시간에 따라 변하는(time-varying) 지연에 대해서는 position drift라고 하는 정상상태 오차가 발생한다. 따라서 이를 극복하기 위한 추가적인 제어 기법<sup>(60)</sup>이 필요하다. 한편Hannaford와 Ryu가 햅틱 시스템의 안정성을 위해 제안한 시간 영역 수동성 알고리즘<sup>(8)</sup>이 Artigas 등<sup>(51)(53)</sup>과 Ryu와 Preusche등<sup>(52)</sup>에 의해 원격 조작 제어에 응용되었다. Lee와 Spong<sup>(64)</sup>은 PD 제어를 이용하여 양방향 원격 제어를 위한 프레임워크를 제안하였다. 이 연구에서는 시간 지연의 최대값을 파악하고 버퍼를 사용하여 시변하는 시간 지연을 일정한 시간 지연으로 만들어

처리하였다. Seo등<sup>(65)</sup>은 햅틱 상호 작용 안정화를 위해 제안한 에너지 제한 알고리즘<sup>(12)</sup>을 원격 조작 제어에 적용하였다. 이들은 고정 시간 지연 및 시변하는 시간 지연뿐만 아니라 데이터 손실에 대해서도 강건함을 보였다.

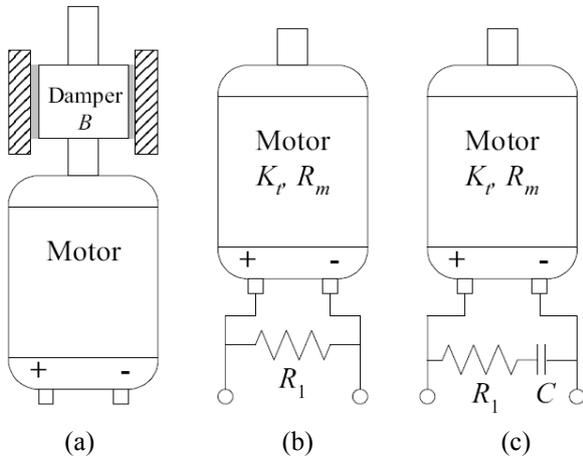
최근에는 양방향 원격 제어의 안정화뿐만 아니라 투명성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Radi 등<sup>(66)</sup>은 Yokokohji등<sup>(67)</sup>이 제안한 투명성 지표(index)와 Colgate등이 제안한 Z-width<sup>(3)</sup>를 이용하여 투명성의 정도를 양적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하였으며 Slawiński등<sup>(68)</sup>은 시간 영역에서의 투명성을 정의하고 측정하는 방법을 제안하였다. Aziminejad 등<sup>(69)</sup>은 투명성을 높이기 위하여 Lawrence가 제안한 4-채널 구조<sup>(44)</sup>에 파동 변수 기법을 적용하는 방법을 제안하였다.

3.3 향후 연구 과제

양방향 원격 제어는 사람이 일할 수 없는 극한환경 및 원격지에서도 업무의 수행을 가능하게 하며, 또한 촉감 정보 제시를 수반하는 원격 제어의 경우 현실감 제공 및 작업능력의 향상에 있어 아주 유용하다. 그러나 원격 진찰 및 원격 수술 같은 의료서비스, 위험지역에서의 구조 업무, 그리고 나노(nano) 레벨에서의 조작 등에서 요구하는 복잡하고 숙련된 조작을 아주 현실감 있게 제공하기 위해서는 더 깊은 연구가 필요하다. 이를 위해서는, 가변적인 환경에서도 원활한 원격 조작이 이루어지도록 강건한(robust) 안정화에 대한 연구가 이루어져야 하며, 능란한(dexterous) 조작이 가능하도록 투명성을 심화시키는 연구가 요구된다.

4. 임피던스 범위 증가를 위한 물리적 댐핑의 추가

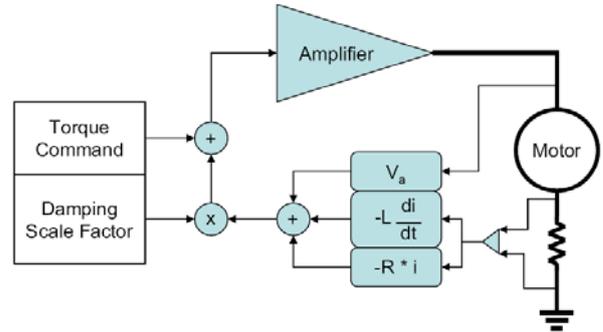
햅틱 장치가 안정적으로 표현할 수 있는 가상환경의 임피던스 범위는 투명성의 한 중요한 지표로서 여러 요인들(샘플링 주기, 시스템 댐핑,



**Fig. 10** (a) mechanical damper, (b) electrical damper without frequency-dependency, (c) electrical damper with frequency-dependency<sup>(71)</sup>

정지 마찰 등)에 의해 정해진다. 이 중에서 햅틱 시스템에 댐핑을 추가하여 성능을 향상시키려는 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Colgate 등<sup>(3)</sup>은 햅틱 시스템의 성능지수로 햅틱 장치의 수동성 조건을 만족하면서 안정하게 표현할 수 있는 임피던스의 동적인 범위인 Z-Width를 제안하고, 이 성능지수에 영향을 미치는 샘플 & 홀드, 장치의 동력학적 특성, 엔코더 양자화(encoder quantization), 속도 필터링 등의 요소들에 대해 논하고, 이러한 요소들 중에서 햅틱 장치의 고유한 물리적 댐핑이 가장 중요한 요소임을 보였다. 또한 햅틱 장치에 기계적인 댐핑을 추가한 실험을 통하여 시스템 댐핑을 증가시키는 것이 Z-Width 향상에 중요한 역할을 한다는 것을 보였다. 하지만 물리적인 댐핑은 햅틱 장치가 움직이는 경우에는 항상 작동하기 때문에 접촉이 없는 자유 공간에서의 제어에서도 저항력을 발생시켜 햅틱 상호 작용의 투명성을 저해하는 결과를 낼 수 있다.

물리적 댐핑을 추가하는 최근의 연구로서 Mehling 등<sup>(71)</sup>은 모터와 병렬로 주파수 의존적인(frequency-dependent) 아날로그 회로를 추가하였다(Fig. 10(c)). 이 아날로그 댐핑 회로는 높은 주파수의 입력이 발생할 경우 에너지를 소모시키는 역할을 하는데, 이는 높은 주파수의 입력이 햅틱 시스템을 불안정하게 만들어 안정하게 표현할 수 있는 임피던스의 범위를 감소시키기 때문이다. 하지만 이러한 주파수 의존적인 댐핑 회로는 모터와 직접 연결되어 있기 때문에 자유 공간에서의 제어에서도 역기전력의 영향으로 저항력을 발생시키는 단점을 가지고 있고,

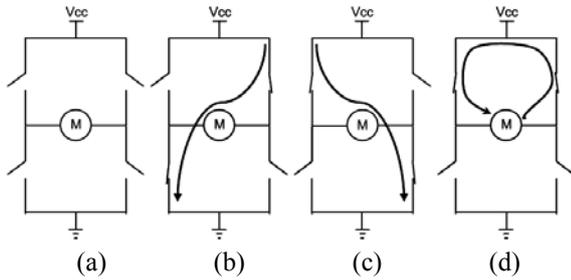


**Fig. 11** Electrical damping using back EMF estimation<sup>(73)</sup>

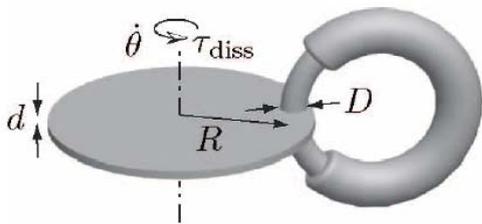
또한 회로의 설계가 모터의 전기적인 파라미터에 영향을 받기 때문에 모터의 종류가 바뀔 경우에는 추가된 댐핑 회로도 모터의 특성에 맞게 교체하여야만 하는 단점이 있다.

자유 공간 제어에서의 이러한 단점들을 보완하기 위해 Lim<sup>(72)</sup> 등은 AIS(analog input shaper)를 제안하였다(Fig. 9). 이는 주파수 의존적인 비선형 아날로그 회로를 모터 앰프 전단에 추가하여 기존에 자유 공간에서 발생하던 댐핑에 의한 저항력을 제거하고, 또한 댐핑 설계가 모터 파라미터에 영향 받지 않게 하였다. AIS는 필터와 반과정류기 등으로 구성된 비선형 아날로그 회로이며, 높은 주파수의 에너지를 소모하여 시스템의 안정성을 높이는 것을 목적으로 하였다. 회로내의 필터는 높은 주파수 입력을 감소시키는 역할을 하고, 반과정류기는 햅틱 상호 작용 지점이 가상물체와 접촉을 유지하다가 떨어질 때에 필터의 영향으로 임피던스가 느리게 감소하는 것을 방지하여 에너지 발생을 감소시키는 역할을 한다. AIS는 필터의 영향으로 인하여 시스템을 불안정하게 만들 수 있는 시간 지연도 함께 발생하는 단점이 있지만, 물리적 댐핑을 증가시켜 시스템의 안정성을 높일 수 있다.

아날로그 회로를 이용하여 물리적 댐핑을 추가하는 다른 방법으로 Weir 등<sup>(73)</sup>은 (Fig. 11)와 같이 아날로그 회로를 이용하여 모터의 역기전력을 추정하고 이에 비례한 댐핑을 시스템에 추가하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 모터의 역기전력이 모터의 회전 속도에 비례하므로 점성 댐핑(viscous damping)을 추가하는 것이며, 댐핑 계수를 제어기에서 디지털적으로 쉽게 가변시킬 수 있었다. 하지만 이 방법은 그림처럼 모터의 입력 전압과 전류 등을 측정하여 역기전력을 추정하기 때문에 모터에서 발생하는 정류(commutation)에 의해 추정된 결과에 많은 노이즈가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 그들은 모터의 회전 범위를 정류가 발생하는



**Fig. 12** Configuration of an H-Bridge, (a) Free running, (b) Clockwise, (c) Counterclockwise, (d) Damping<sup>(74)</sup>



**Fig. 13** Schematic diagram of eddy current brake

않는 좁은 범위로 한정시켜 사용하였고, 이러한 제한적인 조건으로 인해 제안된 방법은 일반적인 햅틱장치에서 사용되기에는 많은 한계가 있다. Srikanth 등<sup>(74)</sup>은 햅틱 시스템에 댐핑을 추가하는 방법으로 (Fig. 12)와 같이 모터 앰프 H-Bridge 회로의 구동 방법을 변경하는 것을 제안하였다. 일반적으로 H-Bridge를 구동하는 PWM 신호는 ON/OFF 신호 사이에 (Fig. 12(a))와 같은 free running 상태가 존재하게 되는데, 제안된 방법에서는 ON/OFF 신호 사이에 (Fig. 12(d))와 같이 모터의 회전에 대한 저항력이 발생되게 구동회로를 조작하여 댐핑을 시스템에 추가하는 효과를 만들었다. 하지만 제안된 방법에서는 추가된 댐핑의 크기가 PWM 신호의 듀티비(duty ratio)에 의해 결정되기 때문에 사용자가 원하는 크기의 댐핑을 추가하는 데에는 한계가 있다.

햅틱 시스템에 댐핑을 추가하는 또 다른 방법으로 Gosline 등<sup>(75)</sup>은 와전류 브레이크(Eddy current brake, ECB)의 사용을 제안하였다. ECB의 기본 원리는, 자기장 내에서 도체가 움직이는 경우에 도체의 움직임에 따라 와전류가 유도되고, 유도된 전류의 크기에 비례한 저항력이 발생하는 것으로, 제안된 방법에서는 자기장 내에서 모터에 연결된 디스크가 회전하고, ECB에 의해 모터의 회전 속도에 비례한 저항력이 발생하게 된다 (Fig. 13). 따라서 제안된

방법은 점성 댐핑을 시스템에 추가하여 안정성을 높일 수 있었고, 수동성 이론 기반 제어 기법에 적용하여 효율성을 보였다.<sup>(76)</sup> 그러나 제안된 방법은 모터 크기 등에 비해서 상대적으로 큰 기계적인 도체 회전날 등을 추가해야 하기 때문에 햅틱 장치의 운동부위의 질량을 증가시켜 자유운동에서의 투명성을 감소시키는 단점이 있다.

위에서 살펴본 바와 같이, 햅틱 시스템에 에너지를 소모할 수 있는 댐핑 요소를 추가하여 성능을 향상시키기 위한 연구들은 추가하려는 댐핑의 특징에 따라 점성 댐핑(viscous damping)을 추가하는 방법<sup>(3)(73)(75)</sup> 과 주파수 의존적인 댐핑 (frequency-dependent damping)을 추가하는 방법<sup>(71)</sup>으로 크게 나눌 수 있다. 또한 수동성 기반 제어방법에서 이용되는 비선형 댐핑 또한 이러한 범주에 포함될 수 있다.

#### 4.1 향후 연구 과제

햅틱 시스템에 댐핑을 추가하여 성능을 향상시키려는 연구의 궁극적인 목적은 햅틱 시스템의 주요 성능지수인 안정성과 투명성을 최대화 하는 것으로서, 햅틱 장치가 안정적으로 표현할 수 있는 임피던스(가상환경의 임피던스가 아닌 햅틱 장치가 실제 만들어내는 임피던스)의 범위를 극대화하는 것이다. 이를 위해서, 향후에 최적화된 적응형 댐핑이 설계되어야 하며 또한 이러한 댐핑은 자유 공간에서의 제어에서는 햅틱 장치에 영향을 끼치지 않아야 하고, 모터의 종류 혹은 움직이는 범위에 관계없이 성능을 최대화 할 수 있는 방향으로 설계되어야 할 것이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 수동성 기반의 최근의 햅틱 제어 기술의 현황과 향후 연구 방향을 제시하였다. 안전한 햅틱 상호 작용을 위한 수동성 이론 기반의 안정화 제어 기술과 양방향 원격 조작 제어 기술, 그리고 투명성의 중요한 척도인 임피던스의 범위를 확대하기 위한 햅틱 장치의 물리적 댐핑을 증가시키는 기술 등을 살펴보았다. 향후 햅틱 제어 기술은 사용자가 마치 실제의 환경을 직접 만지고 조작하는 것처럼 느껴지게끔 높은 몰입감 및 사실성을 제공하는 쪽으로 발전해나갈 것이다. 또한 단순한 강체뿐 아니라 변형체 및 점탄성체, 혹은 국소적으로 강성이 변하는 객체 등 매우 다양한 객체 등에 대하여,

그리고 다자유도 상호 작용, 매우 불확실한 원격 조작에서도 안정적이고 투명한 상호 작용이 이루어지게끔 투명성 제고를 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(IITA-2009-C1090-0902-0008), 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD070018AD), 광주과학기술원 의료시스템공학연구소(iMSE)의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Astrom, K. J., Wittenmark, B., 1995, "Adaptive Control," Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 2<sup>nd</sup> Edition.
- (2) Adams, R. J., Hannaford, B., 1999, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3, pp. 465~474.
- (3) Colgate, J. E. and Brown, J. M., 1994, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3205~3210.
- (4) Colgate, J. E. and Schenkel, G. G., 1997, "Passivity of a Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces," *Journal of Robotic System*, Vol. 14, No. 1, pp. 37~47.
- (5) Gregory, A., Mascarenhas, A., Ehmann, S., Lin, M., and Manocha, D., 2000, "Six Degree-of-Freedom Haptic Display of Polygonal Models," *Proceedings of the IEEE International Conference on Visualization*, pp.139~146.
- (6) McNeely, W. A., Puterbaugh, K. D., and Troy, J. J., 2006, "Voxel-Based 6-DOF Haptic Rendering Improvements," *Haptics-e*, Vol. 3, No. 7
- (7) Otaduy, M. A., Lin, M. C., 2005, "Stable and Responsive Six-Degree-of-Freedom Haptic Manipulation Using Implicit Integration," *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 247~256.
- (8) Hannaford, B. and Ryu, J. -H., 2002, "Time Domain Passivity Control of Haptic Interfaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, pp. 1~10.
- (9) Ryu, J. -H., Kim, Y. S., and Hannaford B., 2004, "Sampled- and Continuous-Time Passivity and Stability of Virtual Environments," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, Issue 4, pp. 772~776.
- (10) Ryu, J. -H., Preusche, C., Hannaford, B., and Hirzinger, G., 2005, "Time Domain Passivity Control with Reference Energy Following," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 13, Issue 5, pp.737~ 742.
- (11) Kim, J. -P., 2007, "Energy Bounding Control and LOMI-Based Rendering for Haptic Interaction with Virtual Environments," *Ph. D. dissertaion*, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea
- (12) Kim, J. -P. and Ryu, J., 2004, "Stable Haptic Interaction Control Using Energy Bounding Algorithm," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Vol. 2, pp. 1210~1217.
- (13) Gillespie, R. B. and Cutkosky, M. R., 1996, "Stable User-Specific Haptic Rendering of the Virtual Wall," *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*, Vol. 58, pp. 397~406.
- (14) Abbott, J. J. and Okamura, A. M., 2005, "Effects of Position Quantization and Sampling Rate on Virtual-Wall Passivity," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, Issue 5, pp.952~964.
- (15) Diolaiti, N., Niemeyer, G., Barbagli, F., and Salisbury, J. K., "A Criterion for the Passivity of Haptic Devices," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2452~2457.
- (16) Salisbury, J. K., Conti, F., Barbagli, F., 2004, "Haptic Rendering: Introductory Concepts," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, Issue 2, pp. 24~32.
- (17) Adachi, Y., Kumano, T., and Ogino, K., 1995, "Intermediate Representation for Stiff virtual Objects," *Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'95)*, pp. 203~210.
- (18) Mahvash, M. and Hayward, V., "Passivity-Based High-Fidelity Haptic Rendering of Contact," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 3722~3728.
- (19) Lee, K. and Lee, D. Y., "Multirate Control of Haptic Interface for Stability and High Fidelity," *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 2542 ~2547.
- (20) Cho, C., Kim, M., Hwang, C. -S., Lee, J., Song, J. -B., "Stable Haptic Display of Slowly Updated Virtual Environment with Multirate Wave Transform," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2465~2470.

- (21) Kim J. -P., Seo C., Ryu J., 2006, "A Multirate Energy Bounding Algorithm for High Fidelity Stable Haptic Interaction Control," *International Joint Conference on SICE-ICASE*, pp.215~220.
- (22) Preusche, C., Hirzinger, G., Ryu, J. -H., Hannaford, B., 2003, "Time Domain Passivity Control for 6 Degrees of Freedom Haptic Displays," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2944-9249.
- (23) Kim, J., Seo, C., Ryu, J., 2008, "Six Degree-of-Freedom Energy Bounding Algorithm for Stable and Directionally Transparent Haptic Interaction," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.260~265.
- (24) Hokayem, P. F. and Spong, M. W., 2006, "Bilateral Teleoperation: An Historical Survey," *Automatica*, Vol. 42, Issue 12, pp. 2035-2057.
- (25) Goertz, R. C., 1954, "Mechanical master-slave manipulator," *Nucleonics*, Vol. 12, No. 11, pp.45~46.
- (26) Ferrell, W. R., 1965, "Remote Manipulation with Transmission Delay," *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. 6, pp. 24~32.
- (27) Sheridan, T. B. and Ferrell, W. R., 1963, "Remote Manipulative Control with Transmission Delay," *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol.4, pp. 25~29.
- (28) Ferrell, W. R. and Sheridan, T. B., 1967, "Supervisory Control of Remote Manipulation," *IEEE Spectrum*, pp. 81~88.
- (29) Fong, C., Dotson, R., and Bejczy, A., 1986, "Distributed Microcomputer Control System for Advanced Teleoperation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 987~995.
- (30) Lee, S., Bekey, G., and Bejczy, A. K., 1985, "Computer Control of Space-Borne Teleoperators with Sensory Feedback," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 205~214.
- (31) Madni, A., Chu, Y. Y., and Freedy, A., 1983, "Intelligent Interface for Remote Supervision and Control of Underwater Manipulation," *OCEANS*, Vol. 15, pp.106~110.
- (32) Sato, T. and Hirai, S., 1987, "Language-Aided Robotic Teleoperation System (Larts) for Advanced Teleoperation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 5, pp. 476~481.
- (33) Bejczy, A. and Szakaly, Z., 1987, "Universal Computer Control Systems (UCCS) for Space Telerobots," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 318~324.
- (34) Bejczy, A. K. and Kim, W. S., 1990, "Predictive Displays and Shared Compliance Control for Time-Delayed Telemanipulation," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 407~412.
- (35) Buzan, F. T. and Sheridan, T. B., 1989, "A Model-Based Predictive Operator Aid for Telemanipulators with Time Delay," *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 1, pp. 138~143.
- (36) Hirzinger, G., Heindl, J., and Landzettel, K., 1989, "Predictive and Knowledge-Based Telerobotic Control Concepts," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1768~1777.
- (37) Stark, L., Kim, W. S., Tendick, F., Hannaford, B., Ellis, S., Denome, M., Duffy, M., Hayes, T., Jordan, T., Lawton, M., Mills, T., Peterson, R., Sanders, K., Tyler, M., and Dyke, S., 1987, "Telerobotics: Display, Control, and Communication Problems," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 1, pp. 67~75.
- (38) Miyazaki, F., Matsubayashi, S., Yoshimi, T., and Arimoto, S., 1986, "A New Control Methodology Toward Advanced Teleoperation of Master-Slave Robot Systems," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 997~1002.
- (39) Furuta, K., Kosuge, K., Shiote, Y., and Hatano, H., 1987, "Master-Slave Manipulator Based on Virtual Internal Model Following Control Concept," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 567~572.
- (40) Raju, G. J., Verghese, G. C., and Sheridan, T. B., 1989, "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Manipulation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1316~1321.
- (41) Hannaford, B. and Fiorini, P., 1988, "A Detailed Model of Bilateral Teleoperation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 1, pp. 117~121.
- (42) Anderson, R. J. and Spong, M. W., 1989, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494~501.
- (43) Niemeyer, G. and Slotine, E., 1991, "Stable Adaptive Teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 152~162.
- (44) Lawrence, D. A., 1992, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 625~637.
- (45) H-Zaad, K. and Salcudean, S. E., 1996, "Adaptive Transparent Impedance Reflecting Teleoperation,"

- Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1369~1374.
- (46) Lee, H. K. and Chung, M. J., 1998, "Adaptive Controller of a Master-Slave System for Transparent Teleoperation," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 15, No. 8, pp. 465~475.
- (47) Zhu, W. H. and Salcudean, S. E., 2000, "Stability Guaranteed teleoperation : An Adaptive Motion/Force Control Approach," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 45, No. 11, pp. 1951~1969.
- (48) Ryu, J. H. and Kwon, D. S., 2001, "A Novel Adaptive Bilateral Control Scheme Using Similar Closed-Loop Dynamic Characteristics of Master/Slave Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 18, No. 9, pp. 533~543.
- (49) Bemporad, A., 1998, "Predictive Control of Teleoperated Constrained Systems with Unbounded Communication Delays," *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 2133~2138.
- (50) Prokopiou, P. A., Tzafestas, S. G., and Harwin, W. S., 1999, "Towards Variable Time Delays Robust Telemanipulation Through Master State Prediction," *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 305~310.
- (51) Artigas, J., Vilanova, J., Preusche, C. and Hirzinger, G., 2006, "Time Domain Passivity Control-based Telepresence with Time Delay," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 4205~4210.
- (52) Ryu, J. -H. and Preusche, C., 2007, "Stable Bilateral Control of Teleoperators Under Time-varying Communication Delay: Time Domain Passivity Approach," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3508~3513.
- (53) Artigas, J., Preusche, C., Hirzinger, G., 2007, "Time Domain Passivity for Delayed Haptic Telepresence with Energy Reference," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 1612~1617.
- (54) Sheng, J. and Spong, M. W., 2004, "Model Predictive Control for Bilateral Teleoperation Systems with Time Delays," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 4, pp. 1877~1880.
- (55) Pan, Y. J., Canudas-de-Wit, C. and Sename, O., 2006, "A New Predictive Approach for Bilateral Teleoperation with Application to Drive-by-Wire Systems," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1146~1162.
- (56) Leung, G. M. H., Francis, B. A., and Apkarian, J., 1995, "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via  $\mu$ -Synthesis," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 1, pp. 105~116.
- (57) Sename, O., and Fattouh, A., 2005, "Robust  $H_\infty$  Control of a Bilateral Teleoperation System Under Communication Time-Delay," *16th IFAC World congress*.
- (58) Cho, H. C., Park, J. H., Kim, K., and Park, J.-O., 2001, "Sliding Mode-Based Impedance Controller for Bilateral Teleoperation Under Varying Time-Delay," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 1025~1030.
- (59) Fattouh, A. and Sename, O., 1997, "Finite Spectrum Assignment for Teleoperation Systems with Time Delay," *Proceedings of the IFAC Robot Control*, pp. 599~604.
- (60) Kosuge, K., Murayama, H., and Takeo, K., 1996, "Bilateral Feedback Control of Telemanipulators via Computer Network," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1380~1385.
- (61) Yokokohji, Y., Imaida, T., and Yoshikawa, T., 2000, "Bilateral Teleoperation with Energy Balance Monitoring under Time-Varying Communication Delay," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2684~2689.
- (62) Munir, S. and Book, W. J., 2001, "Wave-Based Teleoperation with Prediction," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 6, pp. 4605~4611.
- (63) Ching, H. and Book, W. J., 2006, "Internet-Based Bilateral Teleoperation Based on Wave Variable with Adaptive Predictor and Direct Drift Control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 128, Issue 1, pp. 86~93.
- (64) Lee, D. and Spong, M. W., 2006, "Passive Bilateral Teleoperation with Constant Time Delay," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 269~281.
- (65) Seo, C., Kim, J., Kim, J.-P., Yoon, J. H., Ryu, J., 2008, "Stable Bilateral Teleoperation using the Energy-Bounding Algorithm: Basic Idea and Feasibility Tests," *AIM2008*, pp. 335~390.
- (66) Radi, M., Artigas, J., Preusche, C., Roth, H., 2008, "Transparency Measurement of Telepresence Systems," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 5024 LNCS*, pp. 766~775.
- (67) Yokokohji, Y., Yoshikawa, T., 1994, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.

10, No. 5, pp. 605~620.

(68) Slawiński, E., Mut, V., 2008, "Transparency in Time for Teleoperation Systems," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 200~205.

(69) Aziminejad, A., Tavakoli, M., Patel, R. V., Moallem, M., 2008, "Transparent Time-Delayed Bilateral Teleoperation Using Wave Variables," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16 (3), pp. 548~555.

(70) Bogado, J. M., Ferre, M., Aracil, R., Azorin, J. M., Fernández, E. M., Baca, J., 2008, "Transparency Analysis of Bilateral Controllers Based on the Methodology of State Convergence," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 5024 LNCS*, pp. 122~128.

(71) Mehling, J. S., Colgate, J. E., Peshkin, M. A., 2005, "Increasing the Impedance Range of a Haptic Display by Adding Electrical Damping," *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 257~262.

(72) Lim, Y. -A., Kim, J. -P., Yoon, J. H., Ryu, J., 2008, "An Analog Input Shaper for Stability Enhancement of Haptic Interfaces and Its Application to Energy-Bounding Algorithm," *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pp. 14687~14692.

(73) Weir, D. W., Colgate, J. E., Peshkin, M. A., 2008, "Measuring and Increasing Z-Width with Active Electrical Damping," *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperators Systems*, pp. 169~175.

(74) Srikanth, M. B., Vasudevan, H., Muniyandi, M., 2008, "DC Motor Damping: A Strategy to Increase Passive Stiffness of Haptic Devices," *M. Ferre (Ed.), Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Vol. 5024 of LNCS*, Springer, pp. 53~62.

(75) Gosline, A. H., Hayward, V., 2008, "Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 13, No. 6, pp. 669~677.

(76) Gosline, A. H., Hayward, V., 2007, "Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces with Tunable Damping Hardware," *Proceedings of World Haptics (The Second Joint Eurohaptics Conference And Symposium On Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems)*, pp. 164~169.

저 자 소 개



**류 제 하**

1959 년 생  
광주과학기술원 정보기전공학부  
(기전공학과) 교수  
병렬 로봇 기구학, 동역학 및 제어,  
햅틱 인터페이스 설계 및 제어, 컴퓨터  
시뮬레이션 등에 관심을 두고 있다.

햅틱스, 동역학  
ryu@gist.ac.kr



**김 재 하**

1981 년 생  
광주과학기술원 정보기전공학부  
(기전공학과) 박사과정

햅틱 안정화 제어, 다자유도 햅틱  
제어 및 렌더링, 물리기반 햅틱  
렌더링 알고리즘, 실시간 처리 등에 관심을 두고 있다.  
kjh81@gist.ac.kr



**서 창 훈**

1977 년 생  
광주과학기술원 정보기전공학부  
(기전공학과) 박사 과정

햅틱 안정화 제어, 양방향 원격 조작  
제어, 햅틱 인터페이스 개발 등에  
관심을 두고 있다.  
search@gist.ac.kr



**임 요 안**

1973 년 생  
광주과학기술원 정보기전공학부  
(기전공학과) 박사과정

햅틱 안정화 제어, 햅틱 인터페이스  
개발 및 신경망, 퍼지 제어, 생체  
모방형 로봇틱스 연구 등에 관심을 두고 있다.  
yo-anl@gist.ac.kr



**김 종 필**

1974 년 생  
한국과학기술원 영상미디어 연구센터  
Post-Doc

햅틱 안정화 제어, 다자유도 햅틱  
렌더링 알고리즘 개발, 병렬 로봇의  
기구학, 동역학 분석 및 제어, 원격 조작 제어 등에  
관심을 두고 있다.  
lowtar74@imrc.kist.re.kr