

---

# 촉감 기반 시스템을 위한 네트워크 적응형 전송 기법

## ↳ Network-Adaptive Transport techniques for Haptic-enhanced Techniques

이석희, Seokhee Lee\*, 김종원, JongWon Kim\*\*

---



**요약** ~ ~ 본 논문은 촉감기반 네트워크 시스템을 위한 적응형 전송기법들에대한 기존의 연구들을 소개한다. 우선 촉감기반 네트워크 시스템의 구조와 데이터 유형에 따라서 촉감기반 네트워크 시스템을 분류하고 촉감기반 시스템을 위한 네트워크 QoS 요구 조건에 관한 기존의 연구들을 정리한다. 촉감기반 시스템을 위한 기존의 네트워크 적응형 전송기법에 대해서 네트워크 지연 및 지터 보상 기법, 손실 제어, 그리고 전송률 제어 기법들로 나누어 소개한다. 촉감기반 네트워크 시스템을 위한 기존의 연구들을 정리하므로써 더 효율적인 네트워크 적응형 전송 기법들의 개발을 위한 기반을 마련하고자 한다.



**Abstract** ~ ~ This paper introduces the existing network-adaptive transport techniques for haptic-enhanced system. First we classify haptic-based network systems according to the communication architecture and data type. Then the existing studies concerning network QoS requirements for haptic-based network system are depicted. Finally, the survey of network-adaptive transport schemes is introduced divided into three key issues: delay and jitter compensation, error control, and transmission control.



**핵심어:** *Haptic Interaction, haptic-based network system, stability, transparency, network QoS, network adaptation, and network-adaptive transport.*

---

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (계약번호 UD070018AD).

\*주저자 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사과정 e-mail: [shlee@nm.gist.ac.kr](mailto:shlee@nm.gist.ac.kr)

\*\*교신저자 : 광주과학기술원 정보통신공학과 부교수; e-mail: [jongwon@nm.gist.ac.kr](mailto:jongwon@nm.gist.ac.kr)

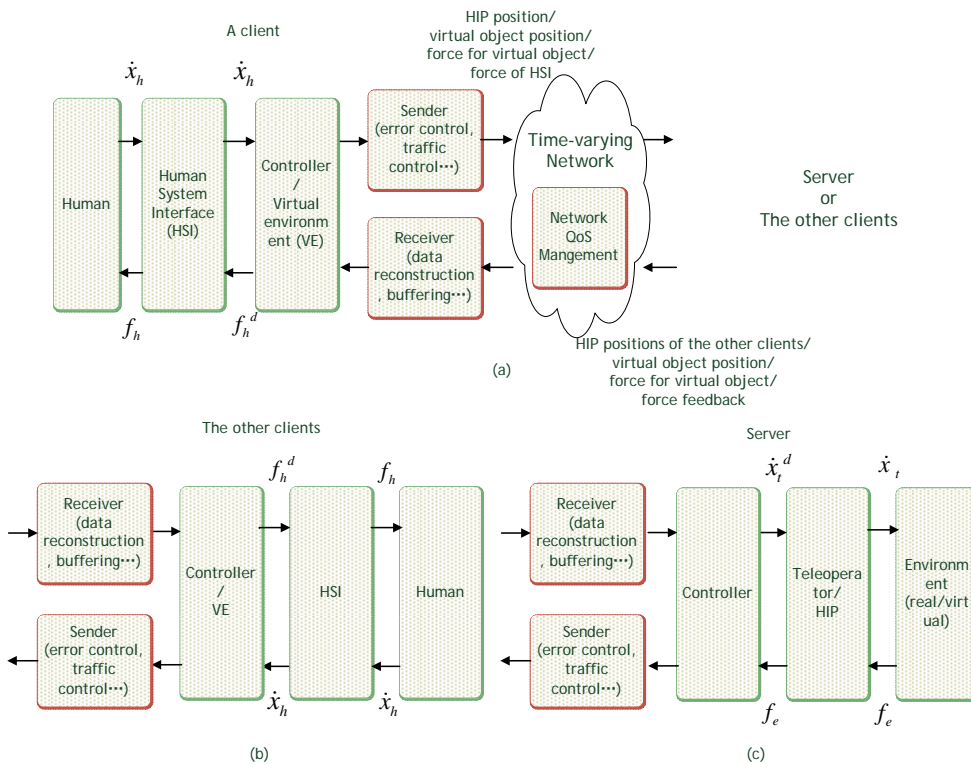


그림 1. 촉각기반 네트워크 시스템: (a)일반적인 촉각기반 네트워크 시스템 구조, (b)원격지의 클라이언트 구조 (P2P), 그리고 (c) 원격지의 서버 구조 (클라이언트/서버).

## 1. 서론

촉각 기술의 발전과 네트워크의 급속한 보급으로 인해 시각과 청각뿐 만 아니라 촉각까지 제공하는 네트워크 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 촉각 상호작용 기반의 네트워크 시스템은 원격조작, 원격진료, 온라인 게임, 그리고 원격 공동 작업과 같은 분야에서 이미 그 유용성이 입증되었다 [1].

하지만 아직까지 최선형 방식의 인터넷상에서 현실감있는 촉각기반 네트워크 시스템을 구현하기 위해서는 다음과 같은 문제점이 있다 [2]. 사람의 촉각은 시/청각에 비하여 외부 자극에 매우 민감하게 반응한다. 이것은 촉각 상호작용을 하는 사용자가 네트워크 상에 작은 변화 (지연/손실/대역폭) 에도 본래 느껴야 하는 촉감과 크게 다른 느낌을 받을 수 있다. [3]에서는 이를 투명성이 저하된다고 표현하고, 본래 느껴야 하는 촉감과 실제 사용자가 받는 촉감이 일치할때 투명한 촉각 시스템이라한다. 촉각의 투명성 문제는 다수의 사용자가 촉감을 기반으로 상호작용하는 경우에 일관성 문제와 동일시 될 수 있다. 모든 사용자가 일관된 시점을 공유하는 문제는 이미 네트워크 가상현실 분야에서 많은 연구가 되어왔다. 하지만 시각적인 일관성이 촉각에서의 일관성을 보장하지 않는다는 것이 촉각기반 네트워크 시스템의 새로운 문제점이 될 수 있다. 또 다른 문제점으로써 안정성을 들 수 있다. 입력과 출력이 동시에 이루어지는 촉각 디바이스 (HSI: human system interface) 의 특성상

촉각 디바이스는 원격지에 있는 가상환경 혹은 다른 촉각 디바이스 및 로봇 (teleoperator) 과 closed-loop 을 형성한다 (그림 1 참조). 텔레오퍼레이션 분야에서는 이미 이러한 closed-loop 시스템들이 네트워크 지연 및 손실의에해 불안정해 질 수 있음을 보였고 passivity 이론 및 wave variable, energy bounding 알고리즘 등을 사용하여 시스템을 안정화시키기 위한 노력을해왔다 [4, 7].

위에 제시된 촉각기반 네트워크 시스템의 투명성 및 안정성 보장하기위해서는 우선 촉각기반 시스템이 요구하는 네트워크 QoS 조건을 명확히 이해하는 것이 선행되어야 한다. 이를 기반으로 네트워크 QoS 조건을 만족시킬 수 있도록 네트워크 상황에 맞추어 적응적으로 전송하는 기법이 필요하다. 본 논문은 이러한 촉각기반 네트워크 시스템을 위한 기존의 연구들을 정리함으로써 안정하고 투명한 촉각기반 네트워크 시스템을 구축할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 촉각기반 네트워크 시스템의 구조와 데이터 유형에 따라서 분류하고 촉각기반 시스템을 위한 네트워크 QoS 요구 조건에 관한 기존의 연구들을 소개한다. 3 절에서는 촉각기반 시스템을 위한 네트워크 적응형 전송기법에 대한 기존 연구들을 소개한다. 4 절에서는 기존의 연구들에서 보안될 점들을 간략하게 토의한다.

## 2. 촉감기반 네트워크 시스템의 분류 및 QoS 요구조건

촉감기반 네트워크 시스템의 구조는 그림 1 과 같이 크게 두가지로 나뉜다. 촉감 디바이스를 가진 두개이상의 대칭적인 클라이언트들간의 통신으로 촉감 상호작용을 하는 P2P (peer-to-peer) 구조와 로봇 및 가상환경을 관리하는 서버와 클라이언트 간에 촉감 상호작용을 하는 클라이언트/서버 구조가 있다 (그림 1.(b) 와 (c) 참조).

클라이언트/서버 구조는 시각적인 일관성 유지가 용이하여 구현이 쉬운 반면에 확장성 및 네트워크 지연 증가의 문제점이 있다 [9]. P2P 구조는 확장성 및 네트워크 지연 측면에서는 유리하지만 일관성을 유지시켜주기 위해서는 별도의 동기화 기법들이 필요하다[9, 10].

각각의 구조는 전달되는 데이터의 유형에 따라 세가지 촉감 상호작용 유형으로 다시 구분될 수 있다. Position-position 상호작용은 서로 위치데이터들만 교환을 하고 힘계산은 각각 분산적으로 수행되기 때문에 안정성 측면에서 유리하다. 하지만 긴밀하게 연관있는 두 위치정보를 공유할 때는 투명성 측면에서 단점을 가진다 [9, 11]. 특히 P2P 구조에서 사용되어질 때는 일관성을 유지시키기 위해 많은 노력이 필요하다. Force-force 상호작용은 position-position 상호작용의 투명성을 보완할 수 있지만 힘데이터가 네트워크를 통해서 전달되기때문에 안정성 문제를 야기시킬 수 있다. 하지만 보다 개선된 일관성으로 인해서 P2P 기반의 네트워크 가상환경을 촉감 상호작용에 널리 사용된다 [9, 10]. Position (velocity)-force 상호작용은 position 혹은 force 만을 사용한 경우들의 장점을 취할 수 있지만 각각이 내포하는 단점을 보완하기 위한 안정화 및 투명성 보장 기법 등이 필요하다.

촉감기반 네트워크 시스템을 위한 네트워크 QoS 요구 조건은 사용되는 제어 알고리즘 및 응용 분야에 따라 다양하게 정의 될 수 있다. 따라서 아직까지 촉감기반 네트워크 시스템을 위한 네트워크 QoS 요구 조건들을 수치적으로 명확히 정의하는 연구는 부족하다.

Hirche 등은 [8, 12] wave variable transformation 을 사용한 경우 투명한 원격조작을 위한 종단간 최대 지연 및 허용가능한 지연 변동을 수치화하는 연구를 수행하였다. Lee 등은 [30] 클라이언트/서버 구조의 네트워크 가상현실 시스템에서의 허용가능한 최대 힘 피드백을 보장을 위한 네트워크 최대 지연을 수치화하는 연구를 수행하였다.

네트워크 손실이 촉감 시스템에 미치는 영향은 [13]과 [15]에서 언급되었지만 정량적인 요구조건은 제시되지 않았다. [13]에서는 wave variable transformation 을 사용하고 HLS (hold-last-sample algorithm) 을 통해서 손실된 데이터를 복원할 경우 안정화 문제점을 지적하였다. 또한 zeroing strategy 을 통해서 손실된 데이터를 복원할 경우 투명성 문제점을 지적하였다. Cen 등은 [15] 이벤트 기반의 원격 조정시스템에서 신뢰적인 전송의 필요성을 제기하였다.

촉감 기반 원격 조정 분야에서 다음과 같은 촉감 데이터의 대역폭 요구조건을 제시하였다. Hirche 등은 [13] wave variable transformation 을 사용하고 energy supervised HLS 을 통해서 데이터를 복원할때 약 90%의 전송률 감소에도 투명성이 보장됨을 실험을 통해서 보여주었다. Liu 등은 [17] 원격조작을 위한 TCP 의 혼잡제어 방식의 문제점을 지적하고 투명한 원격조작을 위해서 최대한 부드러운 전송률 변화가 필요하다고 언급하였다.

## 3. 촉감기반 시스템을 위한 네트워크 관련 연구

촉감기반 네트워크 시스템을 위한 네트워크 촉의 연구는 크게 두 가지로 나뉜다: 촉감 상호작용을 지원하는 QoS 네트워크를 구축하는 연구와 제한된 네트워크 상에서 효율적으로 촉감데이터를 송/수신하는 전송 기법에 대한 연구.

### 3.1 촉감 상호작용을 위한 QoS 네트워크 구축

촉감 상호작용의 네트워크 지연 요구조건이 매우 엄격하기 때문에 QoS 네트워크 구축을 위한 연구는 주로 전송지연을 최소화하는 방향으로 진행되었다. Cen 등은 [15] 원격 조정을 위한 오버레이 네트워크를 제안하였다. 전송해야할 데이터를 가장 빠르게 보낼 수 있는 경로 수를 계산하고 경로들을 선택하여 촉감 상호작용의 지연 요구 조건을 만족시킨다. LaMarche 등은 [18] 기존의 패킷 스위칭 네트워크보다 더욱 빠르고 안정적인 광네트워크를 기반으로 원격조작 시스템을 구축하였다. 원격조작을 위한 네트워크 지연 요구조건을 화상회의를 위한 지연 조건 (e.g. H.323) 인 300 msec 로 가정하고 실험을 통해서 원격거리 (2000 miles) 원격조작에서도 지연 요구 조건이 충족됨을 확인하였다.

### 3.2 촉감 상호작용을 위한 네트워크 적응형 전송기법

촉감기반 네트워크 시스템을 위한 네트워크 적응형 전송기법은 관련 네트워크 QoS 인수에 따라 세가지로 분류된다: 지연 및 지터 보상, 손실 제어, 그리고 전송률 제어 기법.

#### 3.2.1 네트워크 지연 및 지터 보상 기법

촉감 상호작용시에 네트워크 지연은 시스템의 불안정성과 촉감의 왜곡, 즉 투명성 및 일관성의 저하를 초래한다. 네트워크 지연이 존재하더라도 촉감지원 네트워크 시스템의 안정성을 보장하기 위해서 텔레오퍼레이션 분야에서는 passivity 이론 및 wave variable 등의 기법들이 널리 사용되어왔다 [4].

Cheong 등은 [10] 지연에 따른 가상 물체의 일관성 저해를 완화하기 위해서 선형 보간과 smith predictor 를 사용하는 motion 동기화 기법을 제안하였다. Sankaranarayanan 등도 [9] 지연에 따른 가상 물체의 일관성 저해에 중점을 두고 force-force 상호작용에 기반한 virtual coupling 기법을 제안하였다.

원격 조정 시스템의 네트워크 지연에 따른 투명성 저해를 완화하기 위해서 Hirche 등은 [8] 네트워크 지연과 사용자 인지하는 힘과의 관계를 정립하였다. Ishibashi 등은 [29] 클라이언트/서버 구조의 촉감기반 네트워크 가상환경에서 네트워크 지연이 증가할수록 물체로부터 전달받는 힘피드백이 증가하는 문제를 언급하였다. 그리고 네트워크 지연에 적응적으로 스프링 상수를 변화시켜주는 투명성을 위한 네트워크 지연 보상기법을 제안하였다.

기존의 비디오 및 오디오 스트리밍 기법과 마찬가지로 촉감데이터의 네트워크 지터를 완화하기 위해서 촉감 데이터 버퍼링 방법들이 연구되어 왔다. 주로 비디오 및 오디오를 위한 버퍼링 기법들을 촉감 데이터로 확장하는 방식으로 연구가 진행되어왔고 버퍼링 시간을 촉감 상호작용에 최적화 시키는 것에 초점이 맞추어져 있다. Wongwirat 등은 [19] 원격수술 시에 네트워크 상에서 존재하는 지연 변동을 완화하기 위한 네트워크 적응형 버퍼링 기법을 제안하였다. Ishibashi [21-23] 와 Hikichi [24-25] 등은 각각 VTR (virtual-time rendering) 과 QM (queue monitoring) 알고리즘을 네트워크 가상환경의 촉감 상호작용에 적용을 하였다. 그리고 실험을 통해서 버퍼링이 약간의 종단간 지연을 증가시키지만 지터에 대한 영향을 완화시킴으로써 촉감 상호작용의 투명성을 증가시킬 수 있음을 언급하였다. 또한 Ishibashi 등은 [5] 클라이언트/서버 구조에서 다수의 사용자가 서로 이질적인 네트워크 환경에 존재했을 때의 사용자들간의 일관성 문제를 다루었다. Synchronization maestro 라는 동기화 관리 서버를 두어 각각 클라이언트들의 재생 시간을 일치시켜주었다. Berestesky 등은 [6] 버퍼키를 네트워크에 적용시킬때 유발되는 불안정화 문제를 다루었다. Compressor 와 Expander 컴포넌트를 통해서 에너지의 생성없이 버퍼내의 데이터를 관리하여서 시스템의 불안정화를 억제할 수 있었다.

### 3.2.2 촉감 데이터 손실 조정 기법

촉감 상호작용의 지연 요구조건이 엄격하기때문에 촉감 데이터의 손실 조정 기법은 그 처리 지연을 최소화 하는 방향으로 연구가 진행되어왔다. LaMarche 등은 [18] 원격조작을 위한 손실 요구조건을 충족시키기위한 teleoperation layer 를 제안하였다. Teleoperation layer 는 전송 데이터의 특성에 따라 적절한 전송 프로토콜을 할당하며 신뢰적 전송을 위해서는 TCP 를 할당한다. Smoothed SCTP (synchronous collaboration transport protocol) [26] 역시 촉감 기반 네트워크 가상환경을 위해서 ACK (automatic repeat request) 기반의 손실 조정 기법을 사용한다. 단 재전송이 초래하는 지연을 줄이기 위해서 선택적으로 재전송하는 방법을 사용한다. 마지막 갱신 메시지와 같은 중요한 데이터를 key update messages 로 정의하고 이에 속하는 데이터만을 재전송하고 그 외에 메시지는 best-effort 방식으로 전송한다. Cen 등은 [15] 촉감 데이터 전송 프로토콜인 STRON (supermedia transport over overlay networks)

을 제안하였다. STRON 은 ARQ 방식이 큰 종단간 지연을 유발하는 문제점을 해결하기 위해서 FEC (forward error correction) 를 사용한다. 실험을 통해서 손실이 존재하는 네트워크 상에서 기존의 다른 전송프로토콜 (TCP, SCTP (stream control transmission protocol) 보다 더 작은 종단간 지연을 보장함을 보였지만, 사용된 Reed-Solomon 코드 역시 큰 처리 지연을 유발한다. 따라서 더 엄격한 QoS 요구조건을 가지는 응용을 위해서는 촉감 데이터에 특화된 손실 조정 방법이 필요하다.

촉감 기반 원격 조정 분야에서 네트워크 손실은 투명성외에도 안정화에 큰 영향을 미친다. 따라서 Hirche 등은 [13] 현재 시스템 상에서 생성된 energy 를 모니터링하면서 손실된 데이터를 복구하는 energy supervised HLS 기법을 제안하였다.

### 3.2.3 촉감 데이터 전송률 조절 기법

촉감데이터 전송률 조절 기법은 크게 전송률을 감소 시키는 연구와 촉감데이터 혼잡제어 방법으로 나뉜다. Liu 등은 [17] 원격조작을 위해 TCP 를 사용할 때 네트워크가 혼잡한 상황에서 전송량을 급격히 변화시키기 때문에 원활한 원격조작에 지장을 초래하는 문제점을 지적했다. 따라서 다른 TCP 트래픽과 형평성을 유지하면서 보다 부드럽게 전송량을 변화시키는 원격조작에 특화된 전송률 제어 기법을 제안하였다.

촉감데이터의 전송률 감소를 위한 방법으로 촉감데이터 필터링, aggregation, 압축등의 연구들이 있다. Hirche 등은 [8, 16] wave variable transformation 을 사용하고 energy supervised HLS 을 통해서 데이터를 복원하는 원격 조정 시스템에서 dead-band 기반의 필터링 기법을 제안하였다. 실험을 통해서 약 90%의 전송률 감소에도 투명성이 보장됨 보였다. Ishibashi [27] 와 Hikichi [24-25] 는 촉감 기반 네트워크 가상 환경을 위한 dead-reckoning 기반의 필터링 기법을 제안하였다. Dead-reckoning 기반의 필터링 방법은 네트워크 손실이 없다고 가정했을때 촉감 상호작용의 투명성에 저해없이 효율적으로 촉감데이터의 전송률을 감소시킬 수 있다. 하지만 네트워크 손실이 존재할때 촉감 상호작용의 질적저하가 크기때문에 이를 보완하는 방법이 필요하다.

Ishibashi 등은 [28] 다수의 촉감 데이터 하나의 패킷에 취합하여 전송하는 haptic event aggregated packetization scheme 을 제안하였다. 촉감상호작용의 지연 요구조건때문에 최적의 packetization interval 을 구하는 것이 중요하다. [28] 에서는 실험을 통해서 8ms 의 packetization interval 이 최적의 성능을 제공함을 언급하였다. Hikichi 등은 [25] quantization 과 huffman coding 에 기반한 촉감 데이터에 특화된 압축 방법을 제안하였다. 주관성 평가로 부터 quantization level 이 0.01 에서 0.4 mm 까지 변해도 사용자는 촉감 상호작용의 질적 저하를 거의 인지하지 못함을 언급하였다. Quantization level 이 0.4 인 경우 24 kbps 까지 데이터를 감소시킬 수 있다.

#### 4. 토의

본 논문은 촉감기반 네트워크 시스템을 위한 적응형 전송기법들에 대한 기존의 연구들을 소개하였다. 제안된 연구들을 촉감지원 네트워크 시스템의 안정성, 투명성 및 일관성 측면에 많은 문제점들을 해결하였고 촉감 상호작용을 위한 다른 연구들의 바탕이 되고 있다. 하지만 1ms 마다 생성되는 모든 촉감데이터들의 네트워크 QoS 요구조건을 충족시키는 것은 시간에 따라 가변적인 현재 인터넷상에서 아직까지 불가능하다.

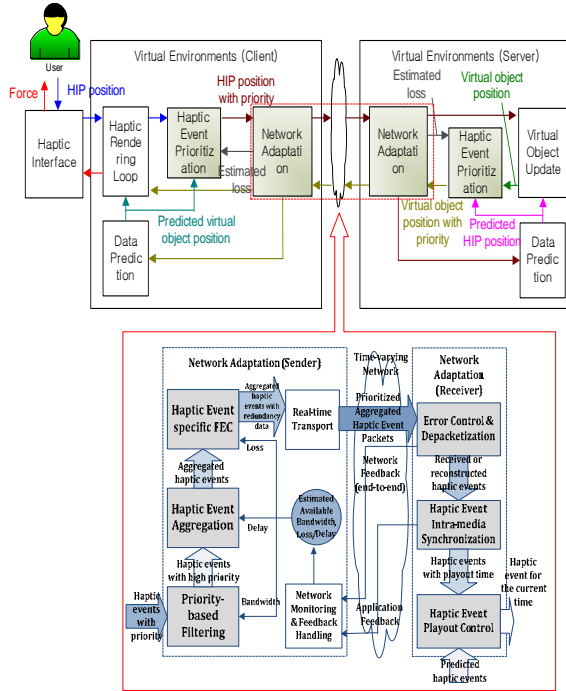


그림 2. 촉감데이터 우선순위화 기반의 네트워크 가상환경 프레임워크 [20].

[20]에서 우리는 기존 연구들을 바탕으로 보다 효율적으로 촉감데이터의 네트워크 QoS 요구조건을 충족시키기 위해서 촉감데이터 우선순위화에 기반한 전송 프레임워크를 제안하였다 (그림 2 참조). 수신측은 dead-reckoning 과 같은 데이터 예측 킴포넌트가 있다고 가정하고 예측된 데이터와 실제 데이터간의 차이를 이용하여 각각의 촉감데이터에 중요도 (loss effect) 를 부여한다. 이에 따라 촉감데이터들을 세단계의 우선순위로 분류한다 (0: predictable haptic event, 1: unpredictable but not critical, 2: unpredictable and critical).

우선 순위가 부여된 촉감데이터들은 그림 2 과 같이 보다 효율적으로 전송될 수 있다. 촉감우선순위가 2 인 촉감데이터는 항상 전송을 보장하고 촉감우선순위가 1 인 촉감데이터는 현재 네트워크 상황이 혼잡하면 필터링되고 충분한 대역폭이 지원되는 경우에는 전송된다. 촉감우선순위가 0 인 데이터는 항상 필터링되어도 사용자의 현실감에 영향을 주지 않는다. 필터링을 거친 촉감데이터들은 촉감데이터 지연 요구조건을 고려하여 aggregation 된다. Aggregation 간격은 촉감상호작용의 지연요구조건 (약 60ms)를 충족시키는 범위에서

1ms 에서부터 8ms 까지 동적으로 조정될 수 있다. 손실 제어를 위해서는 haptic-specific low-delay FEC 기법을 사용한다. 촉감손실지연우선순위가 2 인 촉감데이터에 한해서 신뢰적인 전송을 보장하며 손실 보상을 위한 프로세싱 지연을 최소화하기 위해서 패킷의 가장 처음 촉감데이터와의 차분코딩으로 부가데이터 생성한다. 수신측에서는 네트워크 지연 보상을 위해서 네트워크 지연으로 인해 생기는 힘의 왜곡을 근사화하고 왜곡된 값만큼 스프링 계수를 변경시켜주어서 투명한 촉감상호작용이 가능하게 한다 [30].

실험을 통해서 다음과 같은 촉감우선순위화 기반 네트워크 적응형 전송의 유용함 증명하였다 [20]. 네트워크 손실이 가변적인 네트워크 상황에서 dead-reckoning 기반 필터링 [27] 에 의해서 촉감상호작용의 질이 심하게 저하되는 것을 완화하였다. 또한 시간에 따라 가변적인 네트워크 상황에서 보다 적은 전송량과 작은 종단간 지연을 보장하여 더욱 현실감있는 촉감 상호작용을 제공할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] M. O. Alhalabi, S. Horiguchi, and S. Kunifuji, "An experimental study on the effects of network delay in cooperative shared haptic virtual environment," *Computers and Graphics*, vol. 27, pp. 205-213, 2003.
- [2] T. Hudson, M. C. Weigle, K. Jeffay, and R.M. Taylor II, "Experiments in best-effort multimedia networking for a distributed virtual environment," in *Proc. SPIE Multimedia Computing and Networking*, vol. 4312, pp. 88-98, 2001.
- [3] D.A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, pp. 624-637, 1993.
- [4] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 152-162, 1991.
- [5] Y. Ishibashi, T. Hasegawa, and S. Tasaka, "Group synchronization control for haptic media in networked virtual environments," in *Proc. IEEE International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems(HAPTICS' 04)*, 2004, pp. 106-113.
- [6] P. Berestesky, N. Chopra, and M. W. Spong, "Discrete time passivity in bilateral teleoperation over the Internet," in *Proc. IEEE ICRA*, 2004.
- [7] Jongphil Kim and Jeha Ryu, "Stable haptic interaction control using energy bounding

- algorithm," IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp 351–357, 2004.
- [8] S. Hirche. "Haptic telepresence in packet switched communication networks." Ph.D thesis, 2005.
- [9] G. Sankaranarayanan and B. Hannaford, "Virtual coupling schemes for position coherency in networked haptic environments," in Proc. IEEE/RAS-EMBS BioRob, pages 853–858, 2006.
- [10] J. Cheong, M. A. Srinivasan, S. I. Niculescu, A. Anuradha, "Motion synchronization in virtual environments with shared haptics and large time delays," in Proc. of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 277–282, 2005.
- [11] J. Kim, M. A. Srinivasan, H. Kim, B. K. Tay, M. Muniyandi, J. Jordan, J. Mortensen, M. Oliveira, and M. Slater, "Transatlantic touch: a study of haptic collaboration over long distance," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2004.
- [12] S. Hirche et al, "Transparency of haptic telepresence systems with constant time delay," in Proc. of IEEE Control Applications, 2005.
- [13] S. Hirche et al, "Packet loss effects in passive telepresence systems," in Proc. of IEEE Decision and Control, 2004.
- [14] S. Lee and K. Kim, "Dynamic network adaptation scheme employing haptic event priority for collaborative virtual environments," IMMERSCOM, 2007.
- [15] Zhiwei Cen et al, "Supermedia transport for teleoperations over overlay networks", in Proc. of NETWORKING, 2005
- [16] S. Hirche et al, "Network traffic reduction in haptic telepresence systems by deadband control," in Proc. of International Federation of Automatic Control, 2005.
- [17] P. X. Liu, Max Q.-H. Meng, Polley R. Liu, and Simon X. Yang, "An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over IP networks," IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2005.
- [18] B. L. LaMarche, D. F. Hopkins, C. O. Hughes, T. McKenna, and E. W. Fulp, "A network layer for teleoperations in high speed environments," INFOCOM High-Speed Networks Workshop May 11, 2007.
- [19] Olarn Wongwirat et al, "Haptic media synchronization using time adjustment algorithm for noncollaborative telehaptics", in Proc.s of IEEE International Conference on Mechatronics, 2005
- [20] S. Lee and J. Kim, "Haptic event prioritization and network adaptation scheme for collaborative virtual environments," IEEE Globecom, 2007.
- [21] Y. Ishibashi, H. Kasugai, and M. Fujimoto, "An intrastream synchronization algorithm for haptic media in networked virtual environments," in Proc. ACM SIGCHI ACE, pp. 127–133, Jun. 2004.
- [22] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multi-media communications," in Proc. IEEE INFOCOM, pp. 1010–1019, Apr. 1995.
- [23] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, "The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environments," in Proc. the 16th International Workshop on Communication Quality and Reliability (CQR), pp. 213–217, May 2002.
- [24] K. Hikichi, H. Morino, I. Arimoto, K. Sezaki, and Y. Yasuda, "The evaluation of delay jitter for haptics collaboration over the Internet," in Proc. IEEE GLOBECOM, vol. 2, pp. 1492–1496, Nov. 2002.
- [25] K. Hikichi, H. Morino, I. Arimoto, I. Fukuda, S. Matsumoto, M. Iijima, K. Sezaki, and Y. Yasuda, "Architecture of haptics communication system for adaptation to network environments," in Proc. IEEE ICME, pp. 563–566, Aug. 2001.
- [26] S. Dodeller and N.D. Georganas, "Transport layer protocols for telehaptics update messages," in Proc. Biennial Symp. On Communic., Jun. 2004.
- [27] T. Kanbara, Y. Ishibashi, and S. Tasaka, "Haptic media synchronization control with dead-reckoning in networked virtual environments," in Proc. the 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics, and Informatics (SCI), vol. 3, pp. 158–163, Jul. 2004.
- [28] M. Fujimoto and Y. Ishibashi, "Packetization interval of haptic media in networked virtual environments," in Proc. ACM NetGames, pp. 1–6, Oct. 2005.
- [29] M. Fujimoto and Y. Ishibashi, "A compensation scheme for network delay jitter of haptic media

in networked virtual environments,” in Proc. SCI, 2004.

- [30] S. Lee and J. Kim, “Networked haptic virtual environments based on stability and transparency,” in Proc. HCI, 2008 (will be published).