촉각지원 네트워크 협업 테스트베드의 구현

이석희, Le Hai Dao, 김종원
광주과학기술원 정보통신공학과 네트워크미디어 연구실
{shlee, daolehai, jongwon}@netmedia.gist.ac.kr

Network Emulation for Networked Haptic Collaboration Testbed

Seokhee Lee , Le Hai Dao, JongWon Kim
Networked Media Lab., Dept. Info. & Commun.,
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

요 약

본 논문에서는 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드의 구현을 소개한다. 네트워크 촉감 상호작용을 위한 효율적인 실험 환경을 구축하기 위해서는 네트워크 제약 조건들을 정밀하게 조절하는 것이 가능하면서 사용자가 직접 경험을 통해서 현실감의 정도를 느낄 수 있어야 한다. 제안된 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드는 본 요구사항을 만족시키기 위하여 두 대의 Phantom Omni 디바이스를 마스터 슬레이브 구조로 연결하고 FreeBSD (dummynet) 기반의 네트워크 에뮬레이터를 포함한다. 본 네트워크 에뮬레이터는 다양한 환경의 네트워크 시나리오를 지원하기때문에 촉감 상호작용의 질과 네트워크 간의 상관성 파악 및 네트워크 제약 보상 기법의 검증에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 한 예로써 이를 기반으로 UDP 가 TCP 보다 촉감 상호작용에 더 적합한 프로토콜임을 보이는 실험을 소개하고 현실감있는 촉각지원 네트워크 협업 시스템을 위한 네트워크의 요구 조건을 살펴본다.

Keyword : Haptic Interaction, Networked Collaboration Testbed, TCP, and UDP.

.

1. 서 론

가상현실 기술의 발전과 네트워크의 급속한 보급으로 인해 몰입형 콘텐츠를 이용한 원격 상호작용에 대한 관심이 증가하고 있다. 이미, 고화질 영상, 다채널 오디오, 그리고 3D CG 를 기반으로 다양한 원격 상호작용 응용프로그램들이 여러 분야에서 현실 세계의 한계를 극복하는 데에 많은 공헌을 하고 있다. 최근에는 촉감 장비의 보급으로 인해 시각과 청각뿐 만 아니라 촉감까지 제공하는 분산 가상 환경 (DVE: Distributed Virtual Environments) 에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고 이러한 촉감 상호작용 기반의 협업 시스템은 원격 진료, 온라인 게임, 그리고 원격 공동 작업과 같은 분야에서 이미 그 유용성이 입증되었다 [1].

안정되고 현실감있는 촉감 협업 시스템을 구성하기 위해서 촉감 장비는 1kHz 이상의 높은 입출력률을 요구한다. 다시말해서, 촉감 장비와 협업 응용프로그램간에 최소 1ms 마다 데이터 교환이 이루어져야 하며, 지연 및 손상된 데이터와 불규칙한 갱신은 촉감 상호작용의 현실감에 심한 저하를 유발한다. 따라서 높은 네트워크 지연(지터)와 패킷 손실률를 피할 수 없는 현재의 인터넷 환경에서 현실감있는 햅틱 상호작용을 제공하기 위해서는 아직 많은 문제점이 있다 [2].

DVE 에서의 촉감 상호작용에 대한 연구는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다: 내삽 혹은 외삽에 의한 손실 및 지연된 데이터의 복구, 촉감 데이터를 효율적으로 전송하기 위한 전송 프로토콜 및 통신 구조, 네트워크 지연 지터를 보상하기 위한 동기화 알고리즘. I. Belghit 등은 네트워크 지연이 존재하는 경우에 촉감 상호작용을 위한 dead-

reckoning 알고리즘을 제안하였다 [3]. 실험 결과에 따르면 10 에서 100 ms 의 지연하에서는 삼차 dead-reckoning 에서 가장 적확한 결과를 얻을 수 있었다. Wilson 등은 네트워크 지연에 의해 발생하는 촉감 출력의 오차를 줄이기 위해서 passive transmission line 모델을 제안하였다 [4]. Ishibashi 등은 네트워크 지연이 변화하는 상황을 고려하여 spring-damper 모델의 스프링 상수를 실시간으로 변화시키는 기법을 제안하였다 [5]. Hikichi 등은 네트워크 지연 지터를 보상하기 위해서 queue monitoring (QM) 알고리즘을 사용하였고 촉감 데이터의 양을 줄이기위해서 허프만 코딩과 양자화 기법을 사용하였다 [6, 7]. S. Dodeller 은 촉감 상호작용을 위한 새로운 전송 프로토콜인 smoothed SCTP (synchronous collaboration transport protocol) 를 제한하였다. 그들은 smoothed SCTP 를 light TCP 및 SCTP 와 비교함으로써 제안한 프로토콜이 지터가 존재하는 네트워크 환경에서 협업 환경의 성능을 개선시킬 수 있음을 보였다 [8].

소개된 기존의 연구들은 각각 고유한 실험환경을 구축하여 제안한 기법들의 효율성을 검증하였다. 하지만 각각 제안한 기법들을 서술하는데에 중점을 두었기 때문에 효율적인 실험 환경을 구현하는 방법에 관한 설명은 다소 부족한 점이 있다. 촉감 데이터는 네트워크 지연 (지터) 및 손실에 민감하고 응용 프로그램과 상호작용의 성격에 따라 요구되는 네트워크 요구 조건이 다양하다. 따라서 네트워크 촉감 상호작용을 위한 효율적인 실험 환경을 구축하기 위해서는 네트워크 제약 조건들을 정밀하게 조절하는 것이 가능하면서 사용자가 직접 경험을 통해서 현실감의 정도를 느낄 수 있어야 한다.

본 논문에서는 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드의 구현을 소개한다. 본 테스트베드는 현실감있는 촉감 상호작용을 지원하기 위한 네트워크 조건을 규명하는데 사용될 수 있다. 또한 촉감 상호작용의 질과 네트워크 간의 상관성 파악 및 네트워크 제약 보상 기법의 검증에도 적용될 수 있다. 본 논문에서는 한 예로써 이를 기반으로 UDP 가 TCP 보다 촉감 상호작용에 더 적합한 프로토콜임을 보이는 실험을 소개한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 제안된 네트워크 촉감 협업 테스트베드의 구축 방법을 설명한다. 3 절에서는 이를 기반으로 네트워크 촉감 상호작용을 위한 네트워크 요구조건에 관한 실험을 소개한다. 마지막으로 4 절에서는 논문의 결론을 맺는다.

2. 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드

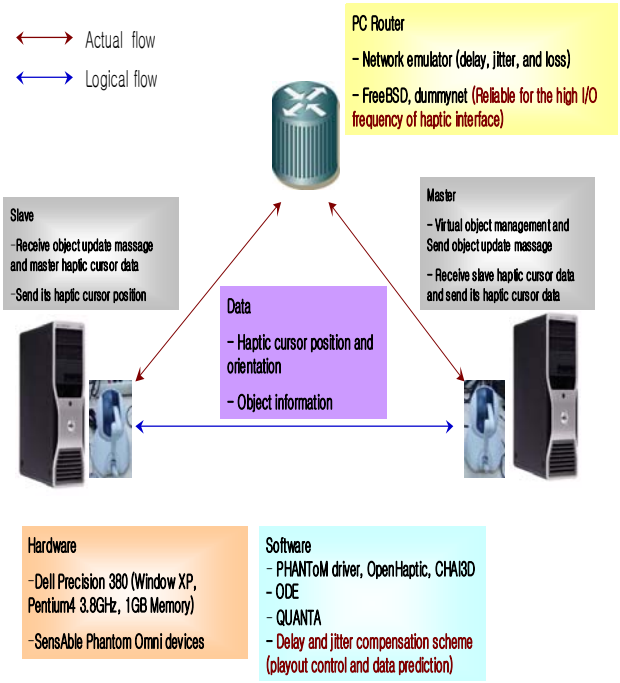


그림. 1. 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드.

본 테스트베드는 그림 1 과 같이 마스터 슬레이브 구조로 구성된다. 마스터 노드는 가상 협업 공간에 있는 촉감 지원 가상 물체들의 정보를 관리하며 갱신된 정보를 슬레이브 노드에 전달한다. 슬레이브 노드는 마스터 노드로 부터 전달된 가상 물체 정보에 기반하여 가상 물체를 이동 및 변경시켜서 마스터 노드와 일치성을 유지한다. 마스터와 슬레이브 노드에는 각각 Phantom Omni 촉감 디바이스가 연결되고 이를 통해서 서로 촉감 기반 상호작용을 수행한다 [9].

마스터와 슬레이브 노드들은 PC 라우터를 통해서 서로 통신한다. PC 라우터는 다양한 네트워크 환경을 제공하는 네트워크 트래픽 에뮬레이터

의 역할을 한다. 운영체제로 FreeBSD 를 사용하고 트래픽을 제어하기 위해서 커널 설정에 Dummynet 옵션을 추가한다 [10]. Dummynet 은 커널의 네트워크 스택에서 지연, 대역폭, 및 손실들을 제어할 수 있는 기능을 제공해 주는 커널 모듈로서 이미, 게임 및 다른 여러 응용을 통해서 그 유용성과 정확성이 알려져있다 [11, 12].

Dummynet 을 촉각지원 협원 테스트베드에 응용하기 위해서는 다음과 같은 작업이 필요하다. 먼저 dummynet 이 촉감 장치의 높은 입출력률 (1000Hz 이상) 을 지원하기 위해서는 FreeBSD 의 내부 'tick' 카운터를 그것에 맞게 조절해 주어야 한다. Dummynet 은 FreeBSD 의 내부 'tick' 카운터에 맞추어 네트워크 입출력을 처리하도록 되어있다. 하지만, 'tick' 카운터가 기본적으로 100Hz 로 설정이 되어있기 때문에 1000Hz 로 수정하고 커널을 재컴파일하여야 한다.

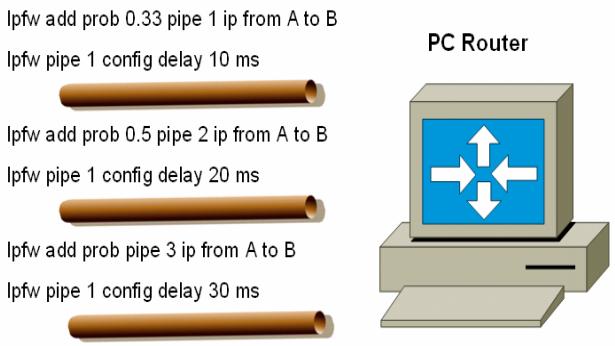


그림. 2. 네트워크 지연 지터의 생성을 위한 Multipath 시뮬레이션.

다음으로, dummynet 은 지연과 손실을 위한 기능은 포함하고 있으나 네트워크 지터를 위한 기능은 제공하지 않는다. 따라서 그림 2 와 같이 multipath 를 구성하여 원하는 지터 모델을 구성해야한다. 그림 2 는 10 ~ 30 ms 의 지연 지터를 생성할 수 있고 패킷의 50%는 20 ms 지연을 따르게 된다.

그림 3 은 본 테스트베드 상에서 수행되는 촉감 상호작용 응용프로그램이다. 네트워크로 연결된 두 사용자는 상자를 향하여 서로 반대방향으로 힘을 가하여 상자를 들어올릴 수 있고 다른 상자 위에 쌓을 수 있다. 가상 물체의 정보는 마스터 노드에서 슬레이브 노드쪽으로만 전달되고 한 가상 물체당 88 bytes 데이터를 포함한다. 마스터와 슬레이브간에 주고 받는 촉감 장치 커서 정보는 각각 152 bytes 이며 아무런 네트워크 제약 조건을 부여하지 않으면 마스터와 슬레이브상에 1ms 의 지연만 존재한다. 마스터 슬레이브 모두 가상 환경에 변화가 있는 경우에만 갱신된 데이터를 전달하도록 구성되었고 최대 전송률은 805 packets/sec 임을 확인하였다. 따라서 패킷당 데이터 크기는 작지만 네트워크 입출력률이 높아서 4 Mbps 의 대역폭이 보장되어야 한다. 촉감 랜더링을 위해서 CHAI3D 를 사용하였고 가상 물체의 움직임을 시뮬레이션 하기 위해서 ODE (open dynamic engine)을 사용하였다 [13, 14].

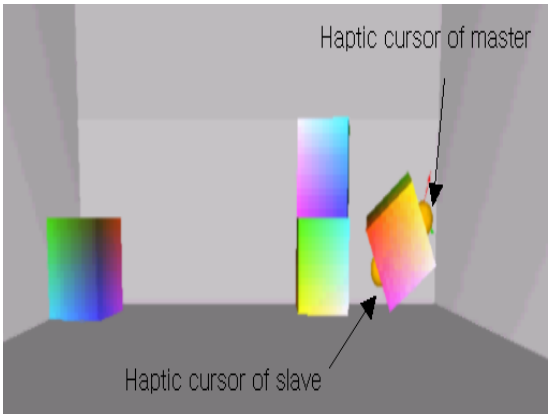


그림. 3. 촉각지원 상자 쌓기 응용프로그램.

3. 촉감 상호작용을 네트워크 요구조건 실험

제안된 테스트베드와 응용프로그램을 기반으로 현실감있는 촉감 상호작용을 위한 네트워크 요건에 대한 실험을 하였다. 실험은 TCP 와 UDP 각각을 사용하여 진행되었고 이를 기반으로 네트워크 촉감 협업을 위한 새로운 전송 프로토콜의 필요성을 도출하였다. 촉감 상호작용의 현실감은 응용프로그램 마다 다르고 지극히 주관적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 촉감 상호작용의 효율성을 측정하는 도구로 가상 물체를 밀었을때 물체와 가상환경으로 부터 받는 힘 피드백 (force feedback)을 사용하였다. 힘 피드백은 네트워크에 영향을

많이 받는 슬레이브 노드에서 측정되었고 각각 기준값과 차이를 비교하였다.

그림 4 는 네트워크 지연 변화에 따른 힘 피드백 곡선이다. 그림에서 보듯이 UDP 와 TCP 의 경우 모두 네트워크 지연이 증가할 수록 사용자가 받는 힘의 패턴이 달라짐을 알 수 있다. i ms 지연상의 힘 피트백과 1 ms 지연상의 힘 피트백 간의 상관계수를 r_i 라 하면 UDP 의 경우 r_{20} = 0.9204, r_{40} = 0.8513, r_{60} = 0.8315, r_{80} = 0.7857 임을 확인 할 수 있다. 반면에 TCP 의 경우에는 지연에 따른 상관계수의 변화가 더 심하게 나타남을 알 수 있다 (r_{10} = 0.9249, r_{20} = 0.8919, r_{30} = 0.8862, r_{40} = 0.7134). 이는 TCP 가 UDP 보다 네트워크 지연에 따른 힘의 왜곡이 더 심함을 보여준다.

네트워크 지연에 따라서 힘 피드백의 변화를 더욱 자세히 알기 위하여 네트워크 지연에 따른 힘 피드백의 분포 곡선을 그려 보았다. 그림 5 는 네트워크 지연의 변화 (1~120ms) 에 따른 핵밀도 추정 (Kernel density estimation) 곡선이다 (커널 함수: Gaussian, bandwidth: rule-of-thumb). TCP 와 UDP 모두 지연이 커지면서 평균 힘 피드백과 그 분산도 증가한다. TCP 의 경우 그 증가량이 커서 30 ~ 40 ms 이후에 촉감 상호작용의 현실감이 현저하게 떨어지지만 UDP 의 경우에는 60 ~ 80 ms 지연까지 안정성을 제공해 준다. 이는 신뢰적인 전송을 위한 TCP 의 내부 메커니즘이 빠른 전송을 요구하는 촉감 상호작용을 위해서는 적절하지 않음을 뜻한다.

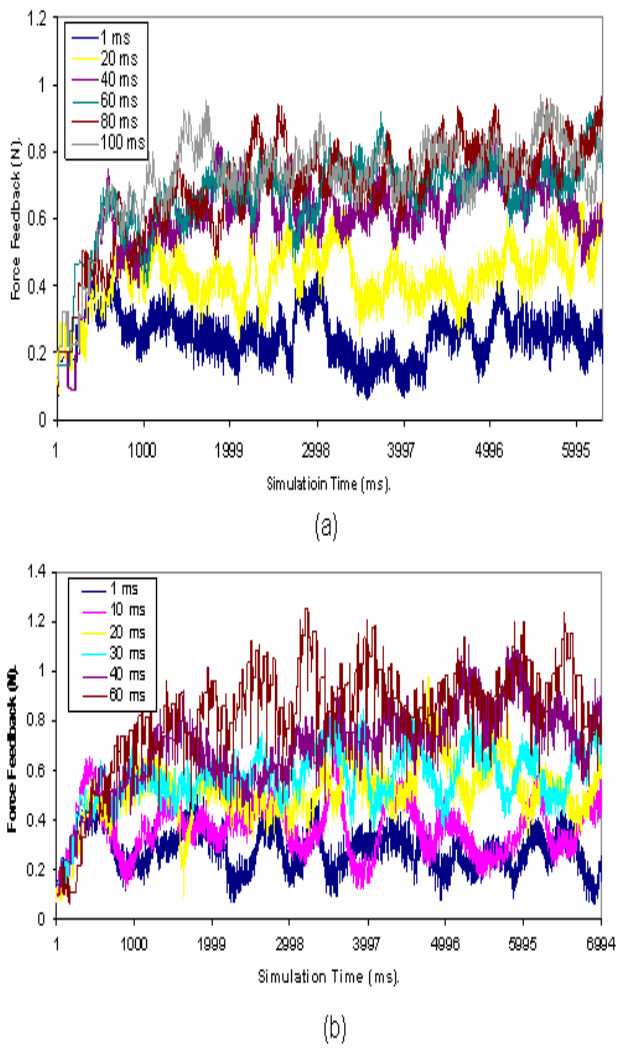


그림. 4. 네트워크 지연에 따른 힘 피드백의 변화: (a) UDP 그리고 (b) TCP.

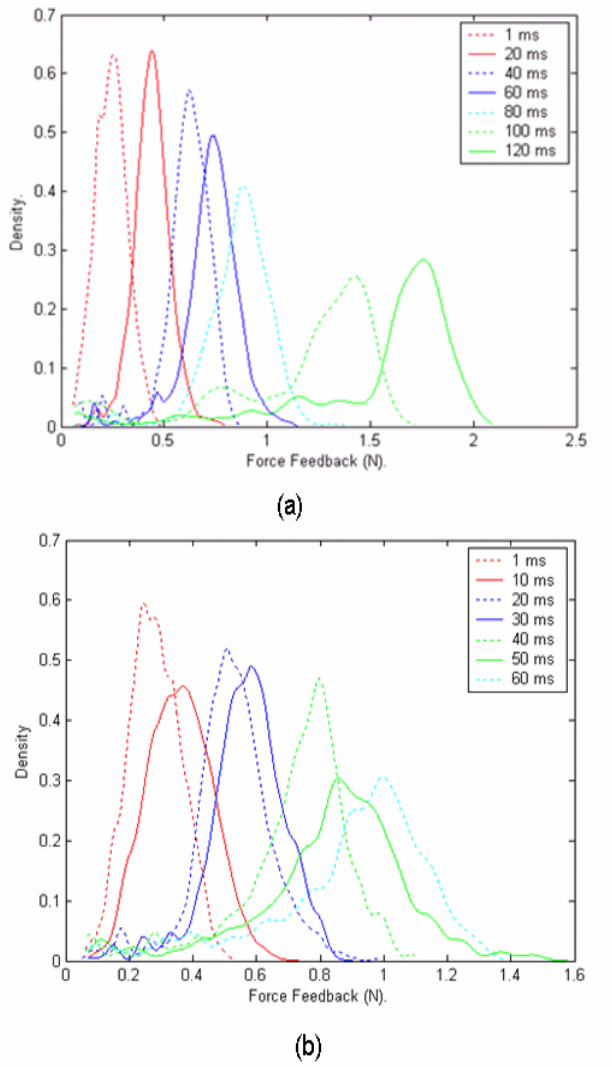


그림. 5. 네트워크 지연에 따른 힘 피드백의 분포: (a) UDP 그리고 (b) TCP.

지터의 영향은 그 최소 및 최대값과 그 분포에따라 다르다. 본 논문에서는 실험의 편리함을 위해서 유니폼 분포를 가정하여 지터를 생성하였다. 그리고 그림 6 과 같이 UDP 와 TCP 의 경우 각각 안정한 촉감 상호작용이 가능했던 지연시간 (60 ms 와 30 ms) 를 최대 지연시간으로 정하였다. 지터에 의한 패킷 순서의 변화 및 불규칙한 데이터 갱신 주기로 인하여 UDP 와 TCP 의 모든 경우에서 심각한 현실감 저하를 느낄 수 있었다. 특히, TCP 의 경우, 지연 지터를 보상하려는 자체적인 노력은 힘 피드백의 갑작스러운 증가를 유발 시켰다. 결과적으로 TCP 가 5 ~ 10 ms 의 지터에 안정함에 비해서 UDP 는 10 ms ~ 20 ms 의 지연 변화를 지원할 수 있었다.

그림 7 은 네트워크 지터에 따른 힘 피드백의 핵 밀도 추정 곡선을 보여준다. 최대 지연값은 모두 일정하므로 지터에 의한 평균 힘 피드백이 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 지연의 변화가 증가할 수록 힘 피드백 분포의 분산이 커져서 지연의 변화가 큰 경우에는 지연이 없는 경우에 받을 수 있는 힘 피드백에서 크게 왜곡된 힘 피드백을 받을 수 있다. 특히 TCP 의 경우 모든 경우에서 평균 힘 피드백은 0.5 ~ 1N 사이에서 형성 됨을 알 수 있다. 그리고 지연의 변화가 심한 경우 (10~30ms) 에는 밀도는 높지않지만 1.5 N 이상의 높은 힘 피드백이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 촉감 상호작용의 심각한 현실감 저하를 유발한다.

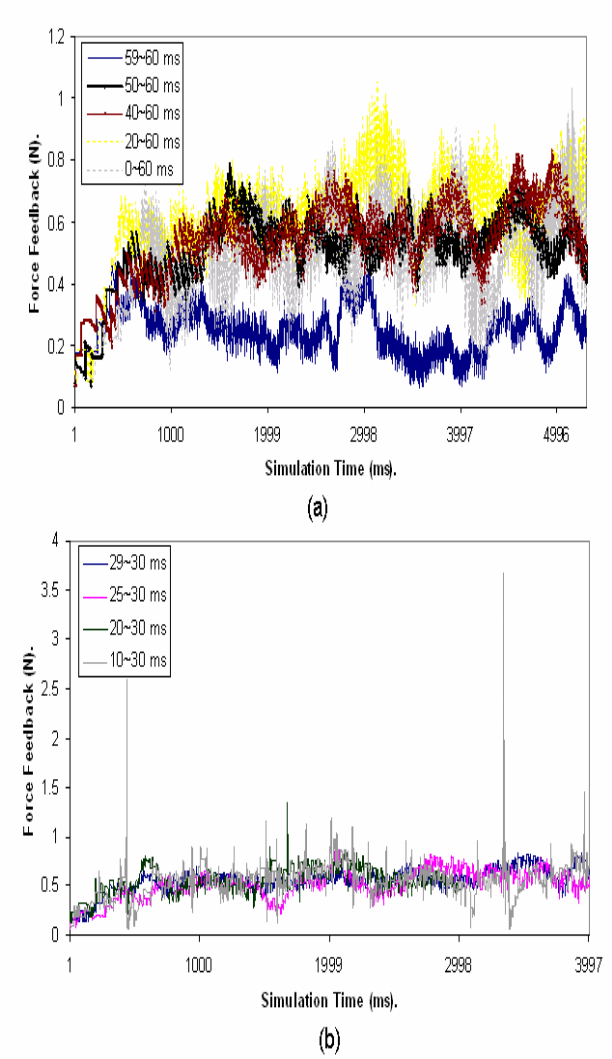


그림. 6. 네트워크 지터에 따른 힘 피드백의 변화: (a) UDP 그리고 (b) TCP.

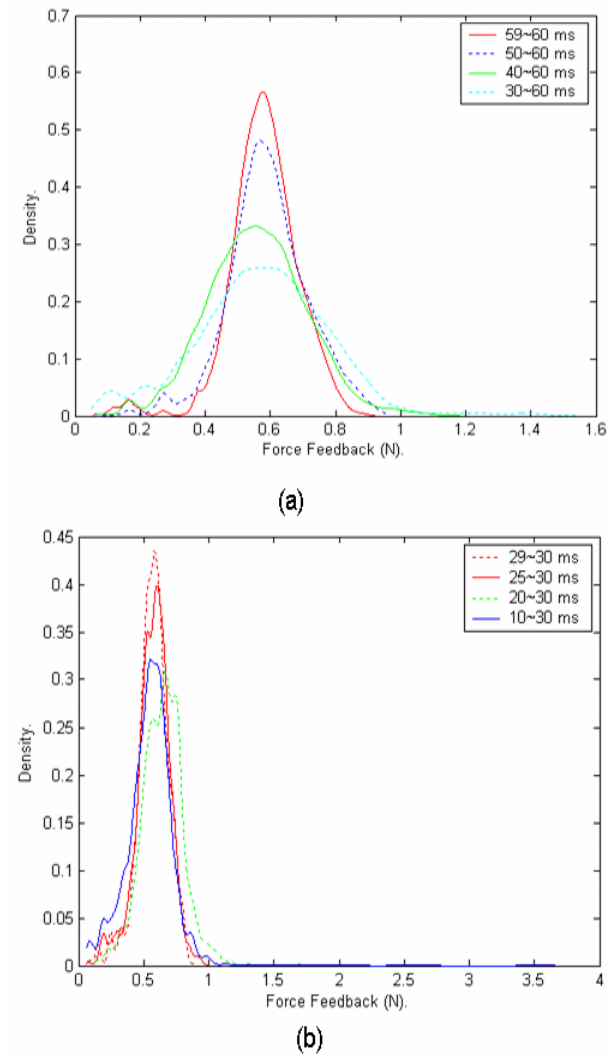
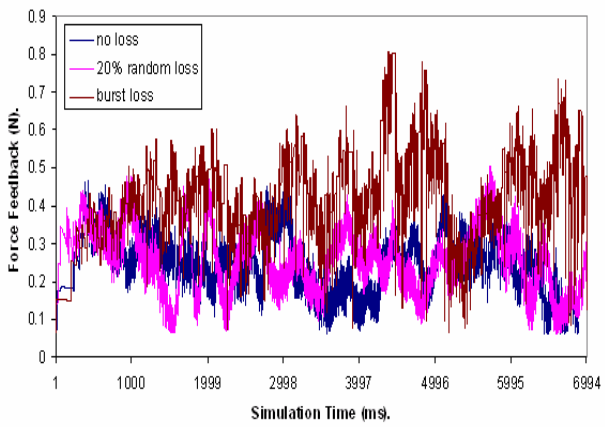
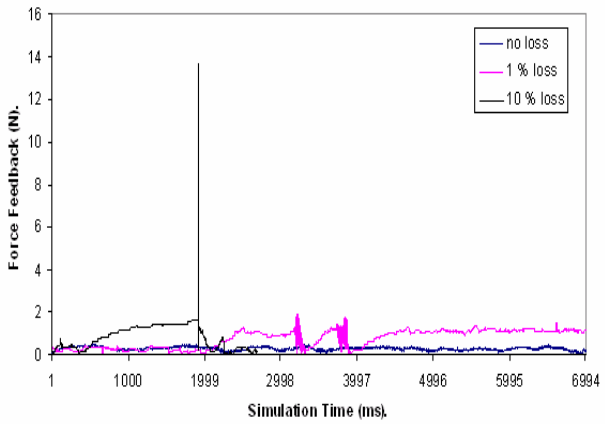


그림. 7. 네트워크 지터에 따른 힘 피드백의 분포: (a) UDP 그리고 (b) TCP.

네트워크 손실은 가상 물체 혹은 촉감 장치 커서의 잘못된 움직임을 유발시키므로 지연 및 지터에 비해 촉감 상호작용의 현실감을 더욱 심각하게 저하시킬 수 있다. 그림 8(a)와 같이 UDP 는 큰 시간 간격동안에 임의적으로 발생하는 손실에 대해서는 20 ~ 40 % 이하의 손실에서도 안정성하다. 이것은 촉감 상호작용에 관여하는 데이터들이 대부분 위치 데이터이고 그 전송 률이 약 1kHz 이기 때문에 손실된 데이터는 그 이전 혹은 이후 데이터를 기반으로 보상할 수 있기때문이다. 하지만 같은 양의 손실이라 할 지라도 짧은 시간에 버스트하게 발생하는 손실에 대해서는 큰 현실감 저하를 유발시킨다. 그림 8(b)에서 보는 바와 같이, TCP 의 경우에는 단 1 % 의 손실이 있더라도 재전송을 하기 때문에 촉감 상호작용을 수행하기 어렵다.



(a)



(b)

그림. 8. 네트워크 손실에 의한 힘 피드백의 변화: (a) UDP 그리고 (b) TCP.

4. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드의 구현을 소개하였다. 제안된 촉각지원 네트워크 협업 테스트베드는 마스터 슬레이브 구조로 구성되고 FreeBSD (dummynet) 기반의 네트워크 에뮬레이터로 포함한다. 본 논문에서는 한 예로써 이를 기반으로 현실감있는 촉각지원 네트워크 협업 시스템을 위한 네트워크의 요구 조건을 파악하는실험을 소개하였다.

실험 결과에 의하면 촉감 상호작용을 위해서는 UDP 가 TCP 보다 더 적합한 프로토콜임을 알 수 있다. 하지만 버스트한 손실이 존재하는 경우와 인터넷과 같이 best effort 네트워크 상에서 촉감 상호작용을 하기 위해서는 언급된 네트워크 촉감 상호작용의 한계점을 극복하는 것이 필요하다. 즉 허용가능 최대 지연을 보상하기 위한 전송 기법, 손실된 데이터를 보상할 수 있는 데이터의 외삽 및 내삽 방법, 그리고 네트워크 지연 지터를 완화시킬 수 있는 버퍼링 기법들에 관한 연구가 필요하고 이를 기반으로 촉감 상호작용을 위한 새로운 프로토콜도 제안될 수 있다.

5. 감사의 글

본 논문은 인천산학협력단을 통하여 한국산업진흥평가원(ITEP)의 지원을 받아 수행되었음.

6. 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] I. Belghit, B. Hennion, and A. Guerraz, “Predictive algorithms for distant touching,” in *Proc. EuroHaptics’02*, 2002.

[4] J. P. Wilson, R. J. Kline-Schoder, M. A. Kenton, and N. Hogan, “Algorithms for network-based force feedback,” in *Proc. the Fourth PHANToM Users Group Workshop*, Nov. 1999.

[5] M. Fujimoto and Y. Ishibashi, “A compensation scheme for network delay jitter of haptic media in networked virtual environments,” in *Proc. SCI’04*, vol. 3, pp. 30-34, Jul. 2004.

[6] K. Hikichi, H. Morino, Y. Yasuda, I. Arimoto, and K. Sezaki, “The evaluation of adaptive control for haptics collaboration over the Internet,” in *Proc. CQR’02*, pp. 218-222, May 2002.

[7] 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’01*, Aug. 2001.

[8] S. Dodeller and N. D. Georganas, “Transport Layer Protocols for Telehaptics Update Messages,” in *Proc. BiennealSymp. On Communic.*, Kingston, 2004.

[9] SensAble technologies http://www.sensable.com/

[10] L. Rizzo, “Dummynet: a simple approach to the evaluation of network protocols”, *ACM Computer Communication Review*, vol. 27, no.1, pp.31-41, Jan. 1997.

[11] G. Armitage and L. Stewart, “Some Thoughts on Emulating Jitter for User Experience Trials,” In *Proc. ACM NETGAMES*, pp. 157-160, 2004.

[12] W. A. Vanhonacker, “Evaluation of the FreeBSD dummynet network performance simulation tool on a Pentium 4-based Ethernet Bridge”, Technical Report CAIA-TR-031202A, Centre for Advanced Internet Architectures, Swinburne University of Technology, 2003.

[13] CHAI 3D, http://www.chai3d.org.

[14] Open Dynamics Engine http://www.ode.org/