

# 분산 촉각 가상 환경에서 촉각 데이터의 전송 효율에 관한 실험 \*

김동훈<sup>1</sup>, 성미영<sup>2</sup>, 전경구<sup>3</sup>, 박남일<sup>4</sup>, 이상락<sup>5</sup>, 박종승<sup>6</sup>  
인천대학교<sup>123456</sup>

{dinoman<sup>1</sup>, mysung<sup>2</sup>, kjun<sup>3</sup>, nam1park<sup>4</sup>, srlee<sup>5</sup>, jong<sup>6</sup>}@incheon.ac.kr

## An Experimental Study on the Transmission Efficiency of Haptic Data in Distributed Haptic Virtual Environment

Dong Hoon Kim<sup>1</sup>, Mee Young Sung<sup>2</sup>, Kyungkoo Jun<sup>3</sup>, Namil Park<sup>4</sup>, Sangrak Lee<sup>5</sup>, Jong-Seung Park<sup>6</sup>  
University of Incheon<sup>123456</sup>

### 요약

본 논문에서는 분산 촉각 가상 환경(DHVE; Distributed Haptic Virtual Environments)에서 촉각(haptic) 데이터가 어느 정도의 네트워크 트래픽을 가지며 또 효율적으로 통신 하는지에 대하여 실험하고 그 결과를 기술한다. 본 연구에서 제시하는 실험 데이터는 차세대 인터페이스로 떠오르는 촉각 장치의 높은 전송량과 실시간성을 요구하는 데이터가 분산 환경에서 서비스될 때 어떤 문제점을 가지는지에 대한 실질적이고 의미 있는 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 논문을 통해 우리는 기존의 분산 가상 환경들의 주요 논쟁점인 확장성(scalability), 안정성(safety) 등이 촉각 가상 환경에서는 어떻게 달라지는지 예측하고, 분산 가상 환경에서의 촉각 장치 활용의 유용성, 효율적인 네트워크 사용 방법, 촉각 기반 가상 환경이 구동될 수 있는 최저의 조건에 대해 고찰해 볼 수 있다. 본 논문은 차세대 인터페이스인 촉각 장치를 기존의 시스템에 안정적으로 추가하는 작업에 도움을 주며, 미래의 실감형 네트워크 가상 현실(Immersive Network Virtual Environment) 연구에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

Keyword : Distributed Haptic Virtual Environment, Virtual Reality, Immersive Virtual Environment

## 1. 서론

최근의 가상 환경에서는 3D 그래픽스와 오디오 및 비디오 데이터 등의 시각과 청각 데이터 활용 뿐 아니라, 본 논문의 관심인 촉각 데이터의 추가적인 활용을 통하여 사용자 몰입(immersion)의 정도가 점점 높아지고 있다. 여기서 가상환경(Virtual Environment; VE)이란 컴퓨터가 만들어 낸 3D 환경에서 사용자가 각각의 다른 사용자들과 상호 작용을 하는 환경을 말한다[1]. 이 VE 에 촉각장치를 이용한 인터페이스를 추가하면 촉각가상환경(Haptic Virtual Environment; HVE)이라고 부

르며, 이는 교육시뮬레이션 같은 촉각장치와 VE 가 한 시스템에서 같이 존재 하는 상태를 말한다 [1].

본 연구에서 목표로 하는 환경은 HVE 를 네트워크를 통하여 원격으로 컨트롤 하거나 협업을 지원 하는 분산 촉각 가상 환경(Distributed Haptic Virtual Environment; DHVE)이다.

본 논문의 2 장에서는 관련 연구 내용을 살펴보고, 3 장에서 DVE 에서 발생하는 데이터들과 이슈에 대해 확인하고 촉각장치의 데이터가 추가되었을 때 어떤 새로운 변화가 생기지는지를 예측해 본다.

\* 본 연구는 산업자원부(MOCIE)의 지원으로 인천정보산업진흥원(IITPA)을 통하여 수행되었다.

4 장에서는 촉각장치에서 발생하는 데이터를 실제로 측정하기 위해 테스트베드를 구성하고 다중의 사용자가 접속하였을 때의 서버의 전송량과 처리량을 확인해 본다. 5 장에서는 실험 결과를 토대로 특정 응용에서 발생할 수 있는 데이터량을 추측해 본다. 마지막으로 6 장에서는 본 논문의 결과들을 어떻게 적용할지를 말한다.

## 2. 관련 연구

관련 연구에서는 촉각 렌더링의 의미와 분류를 확인하고 실험 구현에 사용되는 OpenHaptics Toolkit, Quanta 네트워크 라이브러리와 기술들에 대하여 알아본다.

### 2.1 촉각 렌더링(Haptic Rendering)

촉각 렌더링[10]은 우리가 가상의 물체들과 상호작용을 하면서 발생하는 벡터를 계산하여 장치에 전달하여 사용자로 하여금 촉감을 느낄 수 있게 하는 역할을 한다. 일반적인 촉각 렌더링은 Penalty 기반 방법과 Constraint 기반 방법으로 나누어 구분한다. Penalty 기반 방법은 촉각장치가 적용된 가상물체가 어느 정도의 관통성을 지니고 있는지를 정해주어 융통성 있는 렌더링을 지원한다. 이 방법의 단점은 계속된 힘의 증가로 포인터가 물체의 반대편이나 다른 물체에 닿으면 관통해 버리는 현상이 일어난다는 것이다. Constraint 기반 방법은 Virtual Haptic Interaction Point (VHIP)를 물체 표면에 설정하여 표면을 관통하지 못하도록 하는 방법이다.

### 2.2 OpenHaptics

SensAble 사의 OpenHaptics Toolkit 은 3D 환경에서 손쉽게 PHANTOM 촉각 장치를 추가하여 사용할 수 있도록 해주는 응용프로그램[6]으로, OpenGL API 를 기반으로 동작한다. 그 구조는 그림 1 과 같다.

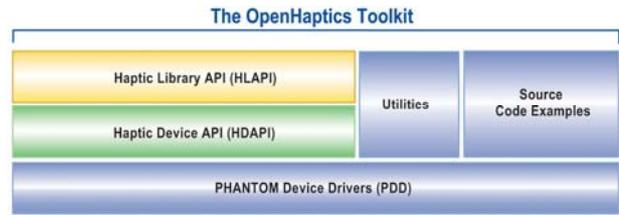


그림 1. OpenHaptics 설계도.

HDAPI(Haptic Device API)는 촉각장치의 저수준(하드웨어계층)의 접근을 지원하여, 프로그래머가 직접적으로 힘을 렌더링 할 수 있다. 또한 쉽고 편리한 유틸리티와 디버그를 지원한다.

HLAPI(Haptic Library API)는 고수준(응용계층)의 촉각 렌더링을 지원하며 OpenGL API 와 잘 어울리도록 설계되었다. HLAPI 는 간단하게 촉각장치를 사용하기 위해 유용하다.

Utilities 는 vector/matrix 관련 수학함수들과 촉각 장치를 사용하는데 필요한 다양한 기능들을 포함하고 있는 부분이다.

### 2.3 QUANTA 네트워크 라이브러리

QUANTA(The Quality of Service Adaptive Networking Toolkit)는 크로스 플랫폼의 고속데이터 전송을 목표로 하는 네트워크 툴이다[5]. TCP, UDP 를 사용하여 Reflector TCP/UDP, Parallel TCP, Reliable Blast UDP 같은 다양한 기능을 지원하며, IPv4, IPv6, thread, mutex 같은 기능들도 지원한다. 또한 CAVE(CAVE Automatic Virtual Environment)시스템의 CAVERN(CAVE Automatic Virtual Environment Research Network) 라이브러리[11]가 그 전신으로 DVE 시스템에 알맞은 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 이런 장점을 지닌 QUANTA 라이브러리를 이용하여 네트워크 모듈을 구현하였다.

## 3. DVE 환경과 촉각장치

### 3.1 VE 와 DHVE

VE 는 사용자가 확인할 수 있으며 물체에 영향을 줄 수 있도록 고안된 컴퓨터에서 만들어진 3D 세계로 이루어진 공간이다. 이런 VE 는 좀더 크고, 또 다른 사용자와의 의사소통을 고안하여 발전하였고 이는 DVE 를 만들게 되었다. DVE 는 원격 시

플레이션부터, 가상 군사훈련, 게임, 도시계획 등 많은 분야에서 적용되어 왔다. 특히 시뮬레이션이나 게임분야에서는 좀더 현실감을 느끼게 하기 위하여 다양한 시도를 하고 있다. 5.1 채널의 사운드 시스템과 입체 화면, 물리이론에 따른 실감나는 효과들이 그 대표적인 분야다. 그리고 최근 주목 받는 촉각장치는 이 VE 에 촉감이란 인간을 지배하는 감각을 추가함으로써 더욱 몰입도를 높일 수 있다. 촉각장치를 지원하는 VE 응용은 의료분야의 원격 수술과 인간이 갈수 없는 방사능 지대 등의 로봇조종을 좀더 정교하게 만들어 준다. 이런 촉각장치를 DVE 환경에 접목시킨 것을 DHVE 라고 부른다[1].

### 3.2 프로토콜

DHVE 시스템의 통신은 일반적으로 Transmission Control Protocol(TCP)[8]이나 User Datagram Protocol (UDP)[9]를 기반으로 이루어 진다. TCP 는 연결지향으로 연결되는 TCP 는 데이터에 대한 신뢰성을 가지는데, 이는 패킷 손실이 발생하면 재전송을 하여 잃어버린 부분을 자동으로 복구하기 때문이다. 그러나, TCP 는 일반적으로 패킷을 잘 받았는지 확인 절차를 거치므로 느리다. UDP 는 비연결지향으로 데이터를 보낼 때, 확인을 하지 않으므로 패킷이 손실되어도 알 수가 없다. 그러나 확인 절차가 없기 때문에 빠르게 통신이 가능하다. TCP 와 UDP 는 보낼 데이터의 종류에 따라 알맞게 선택을 함으로써 더 나은 효과를 누릴 수 있다.

### 3.3 DHVE 데이터

기술적인 측면에서 DHVE 는 여러 네트워크상의 PC 들이 함께 활동할 수 있는 시뮬레이션 환경이며, 각각의 PC 들은 DHVE 응용을 실행하여 이 환경을 구성한다[2]. 가상환경이 네트워크를 통하여 확장되면, 네트워크를 통해 그들의 정보들을 공유하게 되며, 효과적인 DHVE 환경을 구성하기 위하여 많은 실시간 데이터가 오가게 된다. 또한, 촉각장치는 촉각을 느끼게 하기 위해 0.5KHz ~ 1KHz 의 갱신률을 가지는 높은 실시간을 요하는 데이터 들을 발생시킨다. 이외에도 DHVE 환경은 영상이나

소리, 동기화 정보 등의 다양한 데이터를 가지며, 각 데이터들은 네트워크상에서 다양한 특성을 지니게 된다. 이런 데이터들의 종류별 특성은 표 1 과 같다[3].

표 1. DHVE-데이터 유형별 속성.

Type	Reliable	Multicast	Security	Streaming
Control	Yes	No	High	No
Text	Yes	No	Medium	No
Audio	No	Yes	Medium	Yes
Video	No	Yes	Low	Yes
Tracking	No	Yes	Low	Yes
Database	Yes	Maybe	Medium	No
Simulation	Mixed	Maybe	Medium	Maybe
Haptic	Mixed	Maybe	Low	Maybe
Rendering	No	Maybe	Low	Maybe

촉각장치에서 신뢰성은 클라이언트간의 협동에 영향을 미친다. 협동의 상황에서 벡터정보의 손실이 발생하면 예기치 못한 문제가 생길 수 있다. 그러나 협동의 상황을 제외한다면 신뢰성은 크게 중요하지 않다. 물체와 접촉상황이 아니면 단지 위치 값만이 중요하며 초당 500 회 이상 발생하는 위치데이터는 조금 손실 된다고 해도 문제가 없기 때문이다. 신뢰성을 제외한 멀티캐스트나 보안 스트리밍은 촉각장치에서 중요한 요소는 아니다.

표 2. DHVE-데이터 유형별 QoS 요구사항.

Type	Latency	Bandwidth
Control	< 30 ms	64 Kb/s
Text	< 100 ms	64 Kb/s
Audio	< 30 ms	128 Kb/s
Video	< 100 ms	5 Mb/s
Tracking	< 10 ms	128 Kb/s
Database	< 100 ms	>1 Gb/s
Simulation	< 30 ms	>1 Gb/s
Haptic	< 10 ms	>1 Mb/s
Rendering	< 30 ms	>1 Gb/s

표 2 는 각 데이터의 지연과 대역폭을 보여준다. 촉각장치에서 발생하는 데이터는 위치와 벡터에 대한 값으로 단지 얼마간의 Kbps 대역폭만을 필요로 하기 때문에 서버의 대역폭은 중요하게 작용하지 않을 것이라 예상 할 수 있다. 그러나 매우 짧은 지연시간을 가지기 때문에 다중의 촉각데이터를 발생시키는 클라이언트는 문제가 될 수 있을 것이다. 이는 기존의 DVE 에 촉각장치를 추가하여 발생하는 이슈가 짧은 지연(latency)으로 인한 처리량의 증가에 있을 것이라 생각하여 볼 수 있다.

처리량이 증가하면 필연적으로 패킷 손실이 발생하게 되어 전체적인 시스템 성능에 문제를 일으킬 수 있다. 패킷 손실과 대역폭의 문제는 지연(delay)과 지터를 발생시키게 되고, 이는 촉각장치를 이용한 협동작업을 어렵게 만든다. 일반적으로 10ms 의 지연(delay)과 많은 지터가 발생하는 상황은 200ms 의 지연(delay)과 지터가 발생하는 경우와 마찬가지로 눈에 띄게 성능의 저하를 가져온다[4].

#### 4. 실험

##### 4.1 실험 목표와 계획

3 장에서 살펴본 내용으로 촉각장치의 데이터는 대역폭에는 그다지 영향을 주지 않음을 예상할 수 있다. 대신 짧은 지연(latency)으로 인해 서버에서 많은 부하를 예상할 수 있다. 그렇기 때문에 실험의 초점은 클라이언트 당 어느 정도의 처리량이 발생하는지를 테스트하고 그로부터 다중의 클라이언트를 접속시켜 서버에 생기는 부하를 실험을 통하여 확인한다.

본 실험에서는 순수한 촉각장치의 부하를 확인하여 VE 환경에 적용시킬 수 있는 데이터를 얻는 것이 목적이므로, 서버와 클라이언트를 그림 2 처럼 100Mbps 허브로 연결하여 네트워크상의 문제를 최소화하고, 각각의 클라이언트는 동일한 환경을 가지도록 구성하였다.

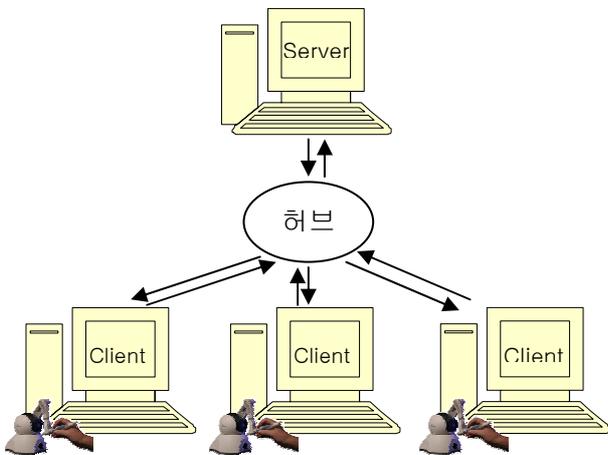


그림 2. 테스트베드 구성도.

실험 모델은 UDP 와 TCP 로 나누어 클라이언트/서버 모델로 테스트한다. 각 클라이언트가 접속하

면 일련의 ID 를 부여 받아 자신을 구분하며 종료 시 서버에서 나머지 클라이언트에게 종료자의 ID 를 전송하여 리스트에서 제거하도록 하였다. 클라이언트 또한 자신의 촉각장치 데이터를 전송하고 다른 클라이언트의 자료를 리스트로 관리하며 새로운 데이터가 들어오면 갱신하여 화면에 출력하도록 하였다. 구현은 윈도우 환경에서 하였으며, 네트워크 모듈은 QUANTA[5]를 사용하였다. 촉각장치는 PHANTOM-Omni[6]. SDK 로는 OpenHaptics[6]를 사용하였다. 패킷 전송량은 서버 측에서 측정하였다.

##### 4.2 실험과정 및 결과

첫 번째 실험에서는 단독의 클라이언트로 클라이언트당 전송률을 측정하였다. 결과는 그림 3, 그림 4 와 같다. 표에서 가로는 시간(sec), 세로는 패킷 수를 나타내고 있다.

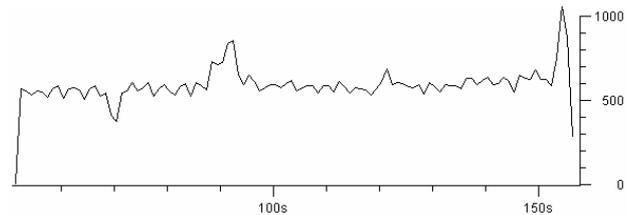


그림 3. TCP 기반 촉각 데이터 처리량.

TCP 는 평균 579.222 packets/sec 가 발생하였다.

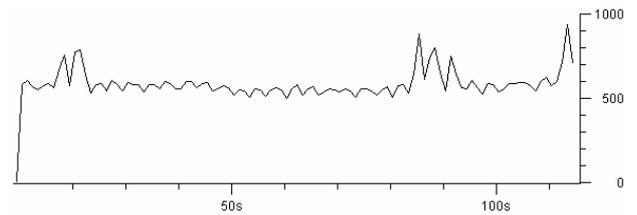


그림 4. UDP 기반 촉각 데이터 처리량.

UDP 는 평균 592.750 packets/sec 가 발생하였다.

결과로부터 평균적인 전송량에서 UDP 가 조금 더 많다는 것을 알 수 있다. 패킷의 크기는 137 바이트로 클라이언트당 약 81 Kbytes/sec 를 보여주었다. 이는 2 장의 내용과 마찬가지로 촉각 데이터는 대역폭에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다. 그래프 상에서 보았을 때 UDP 그래프가 TCP 그래프보다 좀더 완만하고 부드러운

모양을 가지고 있는데 이는 UDP 서버가 데이터를 잘 처리해 주고 있다는 것을 나타낸다.

두 번째 실험에서는 서버의 부하량을 측정하기 위해 다중 클라이언트 접속 실험을 실시하였다. 실제 측정장치는 2 대뿐이기 때문에, 첫 번째 실험결과에서 얻은 실제 측정장치를 사용하는 클라이언트의 평균 packets/sec(TCP 클라이언트: 579.222 packets/sec, UDP 클라이언트: 592.750 packets/sec)를 보내는 가짜 클라이언트들을 제작하였다. 양쪽 서버 모두 더 이상 클라이언트 접속이 되지 않을 때까지 클라이언트를 연결하여 패킷을 보내어 그림 5, 그림 6 과 같은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

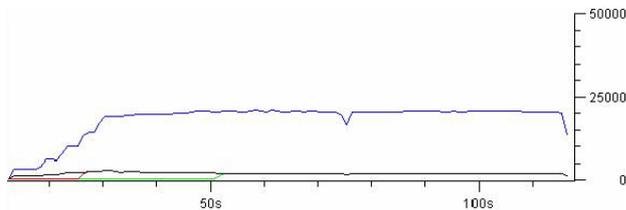


그림 5. UDP 서버 처리량.

UDP 서버는 클라이언트가 9 명이 넘어서자 접속이 되지 않았다. 녹색선의 클라이언트가 접속을 하였을 때 서버의 전송은 늘어나지 않았고, 기존에 존재하던 클라이언트들은 여전히 자신들의 데이터를 송수신 하는데 영향을 끼치지 않았다. 패킷은 평균 16160.828 packets/sec 를 기록하였다. 그림 5 로부터 약 20000 packets/sec 정도를 수용할 수 있음을 알 수 있다.

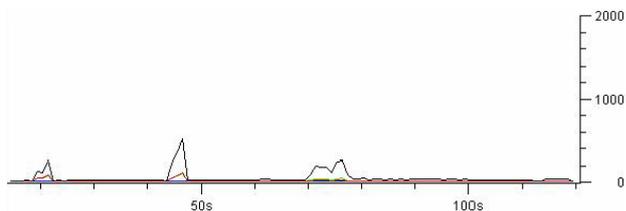


그림 6. TCP 서버 처리량.

멀티쓰레드 서버로 구현된 TCP 서버는 클라이언트 수가 6 명이 넘어가자 더 이상 접속이 되지 않았으며 서버가 다운되는 현상을 보였다.

실험 결과, 높은 전송량을 보이는 측정장치에는 UDP 구조가 TCP 구조보다 더 많은 사용자를 처리할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 TCP 서버 보다

나은 처리량을 보여주었던 UDP 서버도 최대 9 명의 사용자만을 처리할 수 있었으므로 DHVE 의 클라이언트/서버 모델에서는 소수의 협동관계만을 구성할 수 있다고 추측할 수 있다.

## 5. DHVE 응용의 유형

DHVE 를 활용하면 특정 장소에 기술자가 직접 접근을 요하는 작업을 원격으로 처리할 수 있게 된다. 이러한 응용의 예제는 외과 시뮬레이션이나 미술, 조각, 건축 디자인 혹은 군사, 항공 같은 가상 시뮬레이션 등이 있다. 각 응용은 표 1, 표 2 의 인자들을 데이터 집합으로 가지며, 집합의 내용은 응용 별로 차이가 있다. 각 응용 별 특성은 다음과 같다.

- 외과 시뮬레이션과 트레이닝 시스템

원격의 장소나 가상의 서버와 1:1 통신이 일반적인 상황으로, 환자의 상태를 실시간으로 보여주는 영상데이터(video)와 환자의 혈압, 맥박 등의 수치를 알려주는 데이터(text), 수술 기구로부터 얻어지는 촉각 데이터(haptic)를 받게 되어 6Mb/s(bits per second) 이상의 대역폭을 가지게 된다. 이때 데이터간의 동기화 신뢰성이 가장 중요한 요소이다.

- 그림, 조각, CAD등 미술, 디자인 분야

이 유형은 가상 협동 조각 작업이나, 건축 디자인 환경을 생각해 볼 수 있다. 여기서 공유하고 있는 작업의 영상데이터(video), 작업도구의 촉각데이터(haptic)가 발생하므로 약 6Mb/s이내의 대역폭을 지닐 것이다. 그리고 이 경우에는 클라이언트간의 상호작용이 중요한 요소이다.

- 게임, 가상 시뮬레이션

게임 및 가상 시뮬레이션 분야는 VE 의 대표적인 분야로 측정장치를 사용하면 다양한 실감형 협동을 할 수 있다. 서로의 화면을 공유하는 영상데이터(video), 소리(audio), 컨트롤(control), 촉각(haptic), 데이터베이스(database) 등 표 2 의 모든 요소를 포함한다. 그러므로, 이 경우에는 거의 모든 최소 1Gb/s 이상의 대역폭 요구가 필요하다.

각 응용 별 지연과 대역폭을 나열하면 표 3 과

같다.

표 3. 응용별 지연과 대역폭.

Application	Latency	Bandwidth
의료	<10 ms/sec	>6 Mb/sec
미술, 디자인	<10 ms/sec	<6 Mb/sec
게임	<10 ms/sec	>1 Gb/sec

이상의 경우와 표 2 의 내용으로부터 촉각장치 보다 낮은 지연을 가지는 데이터가 없기 때문에 특성의 차이는 대역폭에서만 생긴다고 할 수 있다. 만약 다중 사용자 환경을 생각한다면, 서버를 분산화 하여 촉각데이터를 다루는 서버를 따로 두어 처리하면 지연시간의 이득을 볼 수 있으므로 결과적으로 더 나은 성능을 낼 수 있을 것으로 보인다.

## 6. 결론

본 논문의 내용을 종합하면, 실험을 통하여 클라이언트/서버 모델의 다중 분산 환경에서 촉각데이터의 처리는 서버가 어느 정도의 처리량을 가지고 있는가가 중요한 것을 알 수 있었다. 또한 TCP 프로토콜과 UDP 프로토콜 중에서 UDP 프로토콜이 촉각 데이터를 처리하는데 유리하다는 사실도 확인하였다. 또한 다양한 촉각응용의 특성을 예측해 보았다.

이후 연구에서는 네트워크 상황의 변화로 인해 지연(delay)와 지터, 패킷 손실에 따른 촉각 데이터의 변화를 확인하고, 촉각데이터 분산 서버 시스템의 성능을 측정해 볼 필요도 있다. 이 논문의 실험 데이터는 DHVE 시스템을 제작하는데 있어 기초적인 참고자료로서 활용될 수 있을 것이다.

## References

[1] Hosseini, Mojtabe et al. "A Haptic Virtual Environment for Industrial Training". In Proceedings of HAVE'2002 IEEE International Workshop on Haptic Audia Visual Environments and their Applications; Ontario, Canada, November 2002

[2] Georganas D., Nicolas et al. "DIVERTIONS Project". University of Ottawa  
<http://www.mcrlab.uottawa.ca/research/DIVERTI>

[ONS.html](#)

[3] Defanti, Tom et al. "Technologies for Virtual Reality/Tele-Immersion Applicatins: Issues of Research in Image Display and Global Networking". In Proceedings of the EC/NSF Workshop on Research Frontiers in Virtual Environments and Human-Centered Computing. Chateau de Bonas, France, 1-4 June 1999.

[4] Park, K.S. and Kenyon R. "Effects of Network Characteristics on Human Performance in a Collaborative Virtual Environment". In Proceeding of IEEE conference on Virtual Reality (VR'99), Huston, Texas, 1999.

[5] He, E., Alimohideen, J., Eliason, J., Krishnaprasad, N. K., Leigh, J., Yu, O., DeFanti, T. A. "Quanta a toolkit for high performance data delivery over photonic networks". Future Generation Computer Systems, Special Issue: IGRID 2002, Volume 19(2003), Number 6, August 2003

[6] PHANTOM-Omni <http://www.sensable.com/>

[7] Ethereal <http://www.ethereal.com/>

[8] Postel, Jon. "Transmission Control Protocol". RFC 793, September 1981.

[9] Postel, Jon. "User Datagram Protocol". RFC 768, August 1980.

[10] Mark, W., Randolph, S., Finch, M., Verth, J. V., and Taylor R. M. "Adding force feedback to graphics systems: Issues and solutions". SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pages: 447-452, August. 1996

[11] C. Cruz-Neira, D. Sandin, T. A. DeFanti. "Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE". 93 Computer Graphics Conference, ACM SIGGRAPH, pp. 135-142, August 1993.