

# 다중 참여자 가상환경에서의 촉각상호작용기술

최혁렬\*, 류성무\*\*

## Haptic Display in Multi-user Virtual World

Hyouk Ryeol Choi\*, and Sung Moo Ryew\*\*

### ABSTRACT

Virtual reality is becoming a powerful tool for various applications such as training, entertainment, surgery, tele-robotics etc. One potential use for virtual reality is to allow several users to interact in a single virtual environment, for example several students sitting in front of different computers connected over a network. In this paper, we present a loosely coupled architecture of haptic display in the multi-user virtual world. The method of controlling haptic devices as well as the way of configuring individual haptic display system are addressed. We will develop an experimental virtual reality system for two remote users and conclude with an experimental work for the task of a multi-player ping-pong and grasping of a common object.

**Key Words** : Haptic Display(촉각상호작용기술), Virtual World(가상현실), Multiple Users(다중참여자)

### 1. 서론

최근 가상현실(virtual reality, artificial reality)기술이 많은 관심을 불러일으키고 있다. 가상현실은 실제로 존재하지 않는 상황을 컴퓨터로 시뮬레이션하고 이에 사용자가 몰입하거나 참여할 수 있는 방법을 제공함으로써 현실과 유사한 가공의 상황을 경험하도록 하는 기술을 말한다. 가상현실의 응용 분야는 교육, 오락, 의료, 군사, 원격조작에 이르기 까지 다양하며 새롭고 부가가치가 높은 응용분야들이 제공되고 있다.

작업자와 가상세계간의 상호작용을 위한 방법으로 가장 중요한 것은 시각적인 정보의 전달이다. 이를 위해서 가상세계를 컴퓨터 모니터나 HMD

(Head Mounted Display)와 같은 장착형 도구에 그래픽을 이용하여 나타내고 작업자가 시각적으로 경험하도록 하고 있다. 가상세계와 상호 작용하면서 현실적인 상황처럼 느끼는 감각을 몰입감(sense of immersion) 혹은, 존재감(sense of presence)이라고 한다. 최근의 가상현실에 관한 응용 예들을 살펴보면 대부분이 사용자에게 좋은 시각적 효과를 전달하기 위한 기술의 개발에 관심을 기울이고 있으나 시각적인 효과만으로는 정상적인 몰입감을 제공하기에는 부족하다. 실제로 물체를 만지거나 조작함으로써 얻어지는 촉감(tactile sensation), 운동감(kinesthetic sensation)의 교감 없이는 현실감 있게 가상환경을 경험하는 것은 불가능하다<sup>(1)</sup>. 촉감이나 운동감을 작업자에게 제공하여 주는 기술을 촉각상호작용기술(haptic display)이라고 한다.

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 성균관대학교 기계설계학과 대학원

많은 응용분야에 있어서 2인 이상의 작업자가 가상세계에 동시에 몰입하여 가상세계를 공유할 것이 요구된다. 다수의 사용자들이 네트워크(network)을 통하여 참여하는 MUD(Multi-User Dungeons, Multi-User Dimensions)는 문자정보를 기반으로 하는 대화형 복수 플레이어 어드벤처 게임(Interactive Multi-player Adventure Game)이며 시각적인 효과를 교환하는 다중참여자 가상현실의 초보적인 형태로 생각될 수 있다. 특히, 군사용이나 의료용 시스템 등에는 다중의 작업자가 참여하여 공동의 가상작업을 수행할 필요성이 증대되고 있으며 이러한 경우 작업자들간의 촉각의 교환이 필수적이다.

Gossweiler 등은 다수의 프로그램을 조정하는 방법을 제안한 바 있으며<sup>(2)</sup> 정보교환 및 통신방법에 관하여 중점적으로 언급하였다. Ishii 등은 Networked SPIDAR라는 다수의 작업자가 참여할 수 있는 가상현실 시스템을 개발하였으며 이 시스템은 시각, 촉각 및 청각을 포함한 다중의 감각을 교환할 수 있는 시스템이었다<sup>(3)</sup>. Buttolo 등은 이중의 촉각 상호작용기구(haptic device)를 소유한 원격지에 존재하는 두 작업자간의 촉각상호작용방법을 제안하였으나 구체적인 촉각상호작용기구의 제어방법은 제시한 바 없다<sup>(4)</sup>. 또한, Yoshikawa 등은 단일 작업자에 관한 촉각상호작용 알고리즘을 바탕으로<sup>(6)</sup> 다수의 작업자 혹은 다수의 물체가 존재하는 가상현실시스템의 촉각상호작용방법을 제안하였다<sup>(7)</sup>. 가상현실에서 원격지에 존재하는 다중의 작업자간에 발생하는 시간지연을 극복하기 위한 방법에 관해서는 Choi 등이 제안한 방법이 있으며 이들은 시뮬레이션을 통하여 가상현실의 변화를 추정하고 촉각상호작용기구를 제어하는 방법을 제안하였다<sup>(5)</sup>.

본 논문에서는 다중의 작업자가 참여하는 가상현실 시스템의 촉각상호작용기술을 제안한다. 공간적으로 떨어져 있는 다수의 작업자가 참여하는 가상환경에서 각 작업자간의 데이터 전송과 이들이 갖고 있는 이중의 시스템과 촉각상호작용기구의 제어방법에 관하여 제안하려고 한다. 2절에서는 다중 참여자를 위한 가상현실시스템의 기본구성에 관하여 제안하고 3절에서는 촉각상호작용기구의 동역학을 고려한 제어알고리즘에 관하여 언급한다. 4절에서는 제안된 방법을 이용하여 두 작업자가 참여하는 시스템을 실험적으로 구성하고 실험을 통하여 이의 효용성을 입증하게 될 것이며 5절에서는 결론을 내리게 될 것이다.

## 2. 다중작업자 가상공간의 기본구성

다중의 작업자가 참여하는 가상현실시스템의 특징은 작업자에게 나타내어지는 가상현실이 정확하게 시간적으로 일치할 필요는 없다는 점이다. 물론 이들간에 상호작용이 있고 이의 결과로 가상세계가 수정되기도 하지만 중요한 것은 작업자들이 동일한 가상세계만을 경험하면 될 뿐이지 시간마저 동일할 필요는 없다는 것이다. 이는 시간적인 동시성이 중요한 원격조작시스템(teleoperation system)과는 다른 점이다. 다중의 작업자가 참여하는 가상현실은 서로 다른 시스템에서 돌아가는 복수의 프로그램과 작업자들간의 통신의 필요성 때문에 구현상 어려움이 있다.

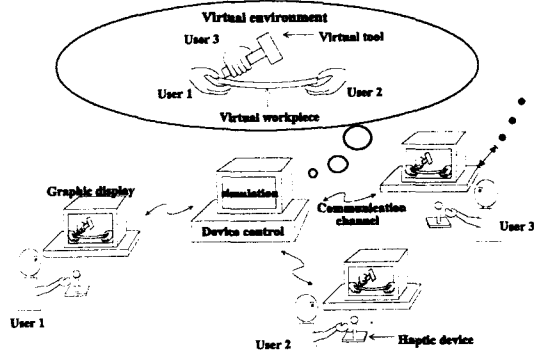


Fig. 1 Concept of tightly-coupled haptic display system in collaborative workspace

가상세계의 공유방법으로는 가상세계에 대한 표현이 존재하는 메모리를 공유하는 강결합(tightly-coupled)방법과 지역적으로 변경된 가상환경에 대한 정보를 메시지교환을 통하여 전달하고 반영하는 약결합(loosely-coupled)방법이 있다. Fig. 1은 강결합 형태의 촉각상호작용기술이 포함된 가상현실시스템을 예시한 것이다. 이 방식은 지금까지 구현된 많은 시스템에서 예를 찾아볼 수 있다<sup>(3)</sup>. 이 경우 정해진 공간에 소수의 작업자들만이 참여하며 이들을 위해서 만들어진 가상현실만을 경험하게 된다. 이러한 형태에서는 작업자들이 항상 시스템이 존재하는 공간에 있어야 하며 다른 가상현실을 시뮬레이션하는 도중에 자의적으로 새로운 작업자가 참여하거나 제외되는 것은 원천적으로 불가능

하다. 따라서, 이는 대중적으로 즐길 수 있는 시스템이라기 보다는 실험용, 군사용 장비나, 외과수술용 시스템 등과 같이 고부가가치를 창출할 수 있는 제한된 용도에 적합하다.

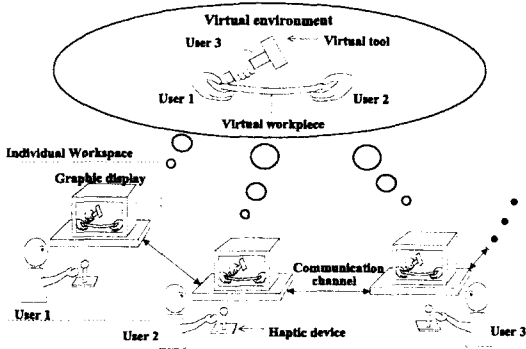


Fig. 2 Concept of loosely-coupled haptic display system in collaborative workspace

Fig. 2는 약결합방식의 시스템이며 본 연구에서 제안하는 다중작업자 가상환경의 구성을 나타낸다. 이 방식은 공간적으로 분산된 다중의 작업자들간에 가상현실을 구현하기에 적합한 형태이다. 실제로 Fig. 2에 보여준 시스템은 저가의 촉각상호작용기구를 개인용 컴퓨터처럼 소유한 다수의 사용자들이 구성한 가상현실 시스템을 나타낸다. 이들이 사용하는 컴퓨터에는 가상현실을 시뮬레이션 할 수 있는 소프트웨어가 작동되고 있으며 상호간의 통신과 촉각상호작용기구의 제어를 통하여 공통의 가상현실을 경험하게 된다. 이와 같은 시스템에서 각 사용자는 가상현실과 참여하는 작업자들을 임의로 선택하여 가상현실을 즐길 수 있으며 필요에 따라서 새로운 가상현실을 공동으로 구현할 수 있는 것이다. 따라서 이 방식은 공간적인 제한이 없으며 필요에 따라서 작업자들의 참여와 탈퇴가 유연한 가상세계를 만들 수 있는 장점이 있다. 이 방식에서 어려운 점은 공간적으로 떨어져 있는 사용자들 사이에 존재하는 시간지연을 어떻게 극복하고 동일한 가상세계를 경험할 수 있도록 하는 가이다. 다음 절에는 이를 위한 촉각상호작용방법에 관하여 기술한다.

### 3. 다중작업자 촉각상호작용기술

이 절에서는 먼저 강결합 방식의 시스템을 위한

촉각상호작용방법에 관하여 언급하고 다음으로 Fig. 2에 제안된 약결합 방식의 시스템을 위한 방법을 제안한다.

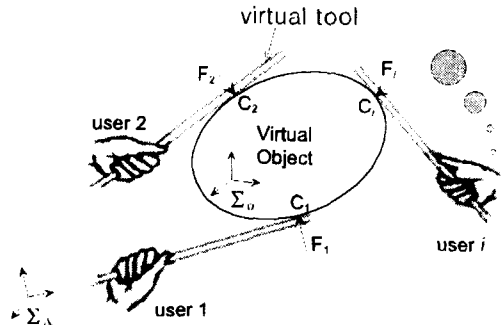


Fig. 3 Object manipulated by multiple users

Fig. 3은 다중의 작업자들이 가상도구(virtual tool)를 가지고 하나의 물체를 조작하는 가상현실을 나타낸 것이다. 작업자들은 공간적으로 떨어져 있으며 네트워크로 통신하고 있다고 하자. 이 그림에 나타낸 상황은 매우 제한적이기는 하나 일반적인 경우로 쉽게 확장할 수 있다. Fig. 3에 의하면  $k$ 명의 작업자는 각자 자신의 컴퓨터와 촉각상호작용기구를 가지고 가상현실에 참여하고 있으며 각 작업자들은  $1, 2, \dots, k$ 로 번호가 붙어 있다. 각 작업자가 가지고 있는 가상도구와 가상물체와의 접촉은 마찰이 있는 점접촉으로 모델링하며 가상도구는 강체라고 가정한다. 가상세계의 기준좌표계는  $\Sigma_A$ 로 나타내며 물체좌표계는  $\Sigma_o$ 로 표시한다. 물체의 위치와 방향은 이들 좌표계를 기준으로  $\mathbf{x}_o \in \mathbf{R}^3$ 과  $\boldsymbol{\phi}_o \triangleq [\phi \ \theta \ \psi]^T \in \mathbf{R}^3$ 로 각각 나타내며 일반적으로 물체의 방향은  $\Sigma_o$ 의  $\Sigma_A$ 에 대한 오일러(Euler) 각으로 표시한다.  $\mathbf{x}_o$ 와  $\boldsymbol{\phi}_o$ 를 가상물체의 일반화된 좌표(generalized coordinate)  $\mathbf{r}_o \triangleq [\mathbf{x}_o \ \boldsymbol{\phi}_o^T]^T \in \mathbf{R}^6$ 로 생각하면  $i$ 번째 조작자가 조작하는 가상도구가 가상물체와 접촉할 때 접촉점에서의 기구학적 구속 조건식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{r}_o) \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{r}_i$ 는  $i$ 번째 사용자의 가상도구와 가상물

체간의 접촉점의 위치이다. 식(1)을 미분하면 다음과 같이 속도에 관한 관계식을 얻을 수 있게 되며

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_{oi}(\mathbf{r}_o) \dot{\mathbf{r}}_o \quad (2)$$

여기에서  $\mathbf{J}_{oi}(\mathbf{r}_o) \triangleq \partial \mathbf{r}_i / \partial \mathbf{r}_o^T \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ 는  $\mathbf{r}_i$ 의  $\mathbf{r}_o$ 에 관한 자코비안(Jacobian)행렬이 된다. 가상일의 원리로부터 접촉점  $C_i$ 에 작용되는 힘  $\mathbf{F}_i \in \mathbf{R}^3$ 에 상당하는 일반화된 힘  $\mathbf{F}_{oi} \in \mathbf{R}^6$ 는 다음과 같이 된다.

이로부터 가상물체의 운동방정식을 구할 수 있으며

$$\mathbf{M}_o(\mathbf{r}_o) \ddot{\mathbf{r}}_o + \mathbf{h}(\mathbf{r}_o, \dot{\mathbf{r}}_o) = \sum_{i=1}^k \mathbf{J}_{oi}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_e \quad (3)$$

여기에서  $\mathbf{M}_o(\mathbf{r}_o) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 은 가상물체의 관성행렬,  $\mathbf{h}(\mathbf{r}_o, \dot{\mathbf{r}}_o) \in \mathbf{R}^6$ 은 원심력, 코리올리력, 중력이 포함된 항이다.  $\mathbf{F}_e \in \mathbf{R}^6$ 은 다른 물체 혹은 환경과의 접촉에 의하여 가상물체에 가해지는 일반화된 외력(generalized external force)을 표시한다.  $i$ 번째 촉각상호작용기구를 조작하고 있는 사용자에게 대한 기구학적 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{q}_i) \quad (4)$$

여기에서  $\mathbf{q}_i \in \mathbf{R}^{n_i}$ 는 촉각제시기구의 관절변위벡터,  $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) = \partial \mathbf{r}_i / \partial \mathbf{q}_i^T \in \mathbf{R}^{3 \times n_i}$ 는 자코비안행렬,  $n_i$ 는 촉각상호작용기구의 자유도를 나타낸다. 조작자의 도구와 물체와 접촉력은 도구와 물체가 단순한 강성체로 모델링된다고 할 때 후크의 법칙(Hook's law)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{K}_o \Delta \mathbf{r}_i \quad (5)$$

위의 식에서  $\mathbf{K}_o$ 는 가상물체의 강성을 나타내는 상수,  $\Delta \mathbf{r}_i$ 는  $i$ 번째 조작자와의 접촉점에서 함입량(penetration depth)이다. 외력  $\mathbf{F}_e$ 도 이와 유사한 방법으로 구할 수 있으며 접촉력의 계산에서 마찰에 관한 고려사항은 참고문헌(6)의 방법을 사용한다.

위에서 유도한 운동방정식과 계산된 접촉력을 이용하여 물체의 가속도와 촉각상호작용기구의 관절구동력을 구할 수 있다. 먼저 작업자들간에 시간

지연이 없다고 하면 각 작업자가 주는 힘들은 동시에 작용하게 되며 이러한 힘을 받는 물체의 가속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\ddot{\mathbf{r}}_o = \mathbf{M}_o^{-1}(\mathbf{r}_o) \left\{ \sum_{i=1}^k \mathbf{J}_{oi}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_e - \mathbf{h}(\mathbf{r}_o, \dot{\mathbf{r}}_o) \right\} \quad (6)$$

식 (6)에서 구한  $\ddot{\mathbf{r}}_o$ 를 이용하여 물체의 속도와 위치는 구해지며 변화된 물체의 위치와 이의 접촉여부와 식(5)를 이용하여 접촉력은 촉각상호작용기구를 제어하기 위한 기준력(reference force)  $\mathbf{F}_i$ 가 된다.  $\mathbf{F}_i$ 를 기준력으로 서보제어(servo control)를 수행하면 각 작업자는 물체와의 접촉감을 느낄 수 있게 된다. 각 작업자의 촉각상호작용기구를 제어하기 위한 서보보상기는 다음과 같은 비례적분 제어를 사용하는 것이 일반적이다<sup>(6)</sup>.

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{K}_{Pi}(\mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{mi}) + \mathbf{K}_{Di} \int (\mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{mi}) dt + \mathbf{F}_i \quad (7)$$

위의 식에서  $\boldsymbol{\tau}_i$ 는  $i$ 번째 조작자가 조작하고 있는 촉각상호작용기구의 관절구동력,  $\mathbf{K}_{Pi}$ ,  $\mathbf{K}_{Di}$ 는 비례이득과 적분이득,  $\mathbf{F}_{mi}$ 는 측정된 조작자의 조작력이다. 이 방법은 일반적으로 단일 조작자의 경우에 사용되어 왔던 방법이며 강결합 방식의 시스템에 대한 촉각상호작용기술로 사용될 수 있다. 그러나 통신상에 발생하는 불규칙한 시간지연 및 사용자들이 소유하고 있는 시스템간의 차이 등이 존재하는 약결합 방식의 시스템에 이 방법을 적용하기에는 어려움이 있다. 다음에는 앞서 정리된 식을 바탕으로 약결합 형태의 가상현실시스템을 위한 새로운 방법을 제안한다.

먼저 가상현실에 참여하는 모든 촉각상호작용기구들을 단지 물체의 운동에 영향을 미치는 하나의 부시스템(subsystem)으로 간주하여 보자. 이 때, 각 작업자에 있어서 물체에 가해지는 힘은 자기 자신이 주는 힘밖에 없으며 다른 사용자가 가하는 힘은 물체의 운동을 수정하는 제한조건이 된다. 따라서, 특정한 시간에 가상세계에는 단일 조작자만이 물체를 능동적으로 조작하고 있으며 다른 작업자들의 영향은 변화가 없다고 생각할 수 있다. 식 (3)을 다음과 같이 수정하여 보자.

$$\mathbf{M}_o(\mathbf{r}_{on}) \ddot{\mathbf{r}}_{oi} + \mathbf{h}(\mathbf{r}_{on}, \dot{\mathbf{r}}_{on}) = \mathbf{J}_{oi}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_e \quad (8)$$

식 (8)은  $i$ 번째 작업자가 바라본 물체의 운동방정

식이며, 여기에서  $\ddot{\mathbf{r}}_{oi}$ 는  $i$ 번째 조작자가 주는 힘에 의하여 생겨난 가상물체의 가속도,  $\mathbf{r}_{on}$ 과  $\dot{\mathbf{r}}_{on}$ 은 가상물체의 위치와 속도에 관한 최근의 정보를 표시한다. 따라서,  $i$ 번째 작업자에게 있어서 물체의 가속도는 다음과 같이 되며

$$\ddot{\mathbf{r}}_{oi} = \mathbf{M}_o^{-1}(\mathbf{r}_{on})[\mathbf{J}_{oi}^T \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_e - \mathbf{h}(\mathbf{r}_{on}, \dot{\mathbf{r}}_{on})] \quad (9)$$

가속도  $\ddot{\mathbf{r}}_{oi}$ 를 적분하여  $i$ 번째 작업자는 자신의 조작에 의하여 바뀐 물체의 상태  $\mathbf{r}_{on}$ 과  $\dot{\mathbf{r}}_{on}$ 을 구할 수 있게 된다. 이 때 작업자  $i$ 는 물체의 상태의 변화를 공지한다. 공지하는 방법은 네트워크 다자간 통신구현 기능의 하나인 broadcast나 multi-cast를 이용할 수 있다. 이 때 공지되는 정보는 물체와 자신이 조작하는 가상도구의 위치와 접촉력에 관한 수정된 정보이며 수정한 시각도 함께 포함된다. 다른 작업자도 자신이 물체와 접촉할 경우 유사하게 물체에 가속도를 주게 되고 이 때 각 작업자는 공지되어진 정보중 최신의 상태를 이용하여 식(8)을 계산하게 된다. 이 때 물체의 샘플링 주기내에 새로운 정보가 전달되지 않게 되면 각 작업자들은 현재의 상태를 바탕으로 물체의 상태를 추정하여 가상세계를 생성하게 된다. 상태는 가상세계를 동적으로 시뮬레이션하여 예측되며 새로운 정보가 전달되어 수정된 가상세계의 정보가 전달될 때까지 계속된다.

제안한 방법에서는 각 작업자들의 힘은 물체의 상태에 관한 최신정보를 수정하게 되며 가속도를 변화시키므로 물체의 운동에 미치는 각 작업자의 접촉력의 영향은 중첩(superposition)될 수 있다. 단지 제안한 방법은 이와 같은 중첩의 원리를 순차적으로 적용했다는 것일 뿐이다. 마지막으로  $i$ 번째 조작자가 사용하고 있는 촉각제시기구는 식 (7)을 이용하여 제어한다.

Fig. 4는 제안한 알고리즘의 흐름도를 간략하게 나타낸 것이다. 알고리즘은 먼저 접촉을 검사하여 조작자가 느껴야 하는 힘의 크기를 계산하고 이를 기준값으로 촉각상호작용기구를 제어한다. 구한 힘과 물체의 운동방정식을 이용하여 가상환경의 변화를 시뮬레이션하고 이의 결과를 조작자에게 그래픽 화면을 통하여 보여주게 된다. 끝으로 변화된 물체의 상태를 바탕으로 다시 가상의 도구와 접촉을 계

산하는 식으로 알고리즘이 수행된다. 이 과정에서 가상세계의 변화를 시뮬레이션한 후  $i$ 번째 조작자는 다른 조작자들에게 공지하여 변화된 정보를 알려주게 된다. 새로운 상태에 관한 정보에는 가상세계가 수정된 시각에 관한 정보가 추가되어 전달되게 되며 이를 바탕으로 다른 조작자들은 가상환경을 시뮬레이션하게 된다.

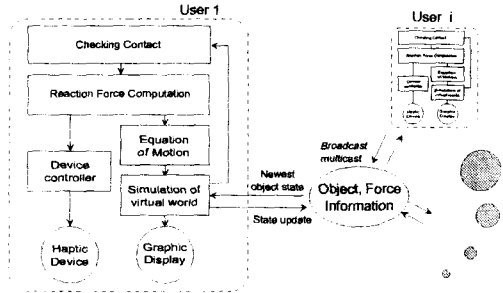


Fig. 4 Flowchart of algorithm

#### 4. 실험

제안된 방법의 효용성을 증명하기 위하여 복수의 작업자가 참여하는 실험장치를 개발하였다. 본 절에서는 이 시스템의 자세한 내용과 실험결과를 기술한다.

##### 4.1 실험장치의 개요

실험에 사용된 장치의 개념도는 Fig. 5와 같다. 촉각상호작용기구는 개별적으로 컴퓨터에 의하여 제어되며 LAN을 통하여 정보를 공유한다. 첫 번째 작업자(user1)의 촉각상호작용기구는 3자유도 스카라로봇(FARA Robot SS2)을 Pentium 90MHz CPU 퍼스널 컴퓨터가 제어하는 구조를 가지며, 두 번째 작업자(user2)의 촉각상호작용 기구는 같은 구조의 로봇을 Pentium 166MHz CPU 퍼스널 컴퓨터로 제어하는 구조이다. Fig.6은 실험에 사용된 장치이다. 로봇의 관절 변위는 관절에 부착된 리졸버(resolver)에 의하여 측정되며, 속도와 가속도는 수치미분을 통하여 구한다. 로봇의 끝에 달려 있는 6축 힘/토크 센서(JR3 67M25)에 의해 작업자가 가해주는 힘을 측정할 수 있다. 각 로봇을 제어하는 컴퓨터는 각각 제어알고리즘이 500Hz와 600Hz의 샘플링 주기를 가지도록 하였으며, LAN을 통한 공유 정보는 각각 20Hz와 90Hz마다 갱신되도록 하였다.

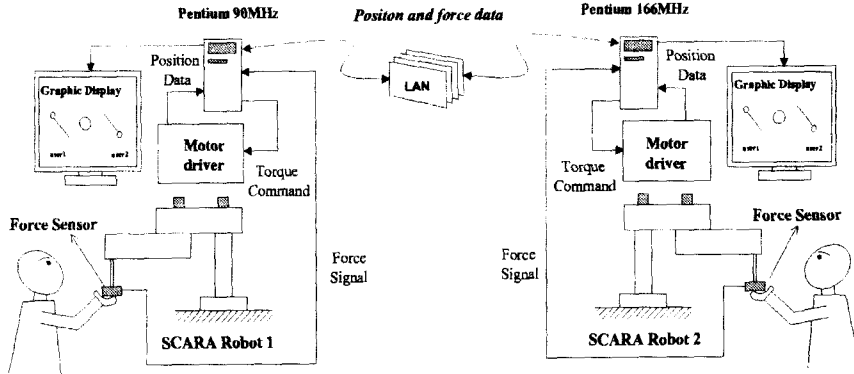


Fig. 5 Schematic diagram of haptic display system

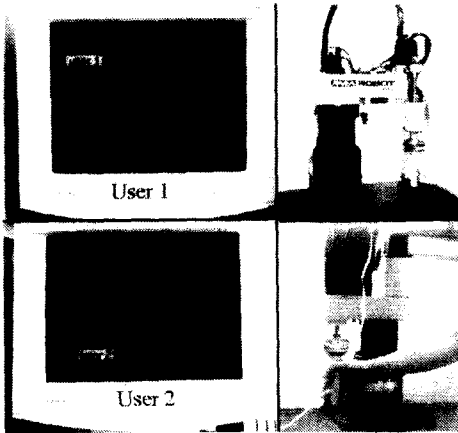


Fig. 6 Overview of haptic display system

작업자들간의 통신은 이더넷(ethernet)과 TCP/IP 통신규약을 이용한 통신방법을 사용하고 있으며 Fig. 7에 예시한 것과 같이 0.05~0.3초정도의 불규칙한 시간지연이 존재한다.

#### 4.2 실험개요

실험에서는 공간적으로 떨어져 있는 두 작업자들이 가상도구를 사용하여 원형의 가상물체를 조작하도록 하였다. 먼저 작업자들은 가상물체를 통겨서 서로 주고받도록 하고 다음에는 협력하여 가상물체를 파지하는 작업을 수행하였다. 가상도구는 Fig. 8에서 보여지는 바와 같은 막대와 같은 형상으로 가상막대의 끝점은 촉각상호작용기구인 SCARA 로봇의 엔드이펙터의 위치에 따라 운동한다. 가상

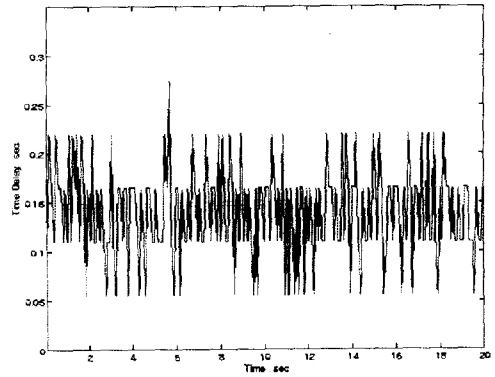


Fig. 7 Generated time delay

물체는 질량  $M_o=0.1Kg$ , 반경  $r=0.04m$ 의 구이고 조작의 편의를 위하여 중력상수는 실제의 1/3로 설정하였다. 또한 물체의 움직임을 세밀히 관찰하기 위하여 시간을 실제시간보다 5배 느리게 한 후 결과를 보정하도록 하였다.

Fig. 8은 작업의 개요를 나타낸다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 먼저 (a)단계에서 작업자 1의 가상도구가 물체와 접촉하고 (b)단계에서 작업자 2에게 물체를 밀어 보낸다. (c)~(d)단계에서는 물체가 작업자 2의 가상도구와 접촉하게 된다. (e)~(f)단계에서는 두 작업자가 쥐고 조작하는 가상도구가 동시에 물체를 파지하고 (g)~(h)단계에서는 두 작업자가 가상도구를 이용하여 물체를 압착하여 미끄러뜨리고 물체는 파지상태로 부터 벗어난다. 작업단계 (a)~(d)까지는 작업자 1과 2가 각각 순차적으로 물체를 조작하고 있으며 작업단계 (e)~(h)에서는

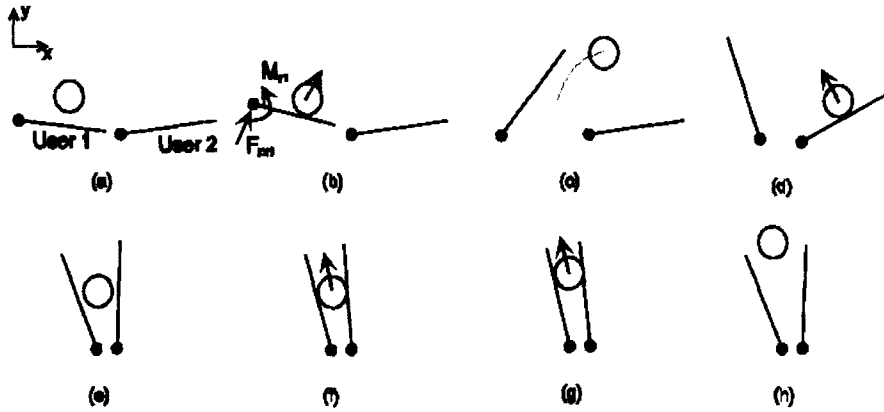


Fig. 8 Task in experiment

두 작업자가 공동으로 한 물체를 조작하므로 서로의 조작력 및 중력의 영향을 느끼게 된다.

실험에서는 두 가지 알고리즘을 구현하여 보았다. 첫 번째 실험에서는 식 (6)을 이용하여 강결합방식의 알고리즘을 적용하였고 두 번째 실험에서는 제안된 방법인 식 (9)를 이용하여 구현하였다.

### 4.3 실험결과

Fig. 9와 Fig. 10은 첫 번째 실험중에 측정된 조작자의  $x, y$ 방향 힘,  $z$ 방향 모멘트, 가상물체의 궤적을 나타낸다.  $r_{ox}, r_{oy}$ 는 가상물체의  $x, y$ 방향 위치를 의미하며  $(*)_{x(*)1}$ 와  $(*)_{y(*)1}$ 는 작업자 1의 기준값과 측정된 값을,  $(*)_{x(*)2}$ 와  $(*)_{y(*)2}$ 는 작업자 2의 기준값과 측정된 값을 각각 나타낸다. 예를 들어,  $F_{cx2}$ 와  $F_{cy2}$ 는 작업자 2의 측정된  $x$ 방향과  $y$ 방향 조작력을 각각 표시한다. 측정된 값은 조작자가 쥐고 있는 촉각상호작용기구의 핸들에 부착된 힘/토크 센서에서 측정된 것이므로 조작자가 실제로 느끼는 힘을 나타낸다고 할 수 있다. 데이터의 시간축을 관심있게 살펴보자. 이 데이터는 실험을 시작해서 1.4초정도 동안 얻어진 것임을 알 수 있다. Fig. 9 (b)와 Fig. 10 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 두 작업자에게 보여지는 가상물체의 위치는 이미 많이 차이가 나고 있으며 1.4초 이상 경과할 때 쯤되어서는 두 작업자는 물체를 전혀 조작할 수 없었으므로 주어진 작업을 성공적으로 끝마치는 것이 불가능하였다.  $F_{cx1}$ 에 의하면 처음으로 작업

자 1이 구를 통겨서 조작자 2에게 보낼 때에는 적절한 힘을 느낄 수 있음을 알게 된다(이 때 작업자 2는 접촉을 하고 있지 않은 상태이다). 그러나, 시간이 갈수록 작업자 1과 2가 조작하는 가상물체의 궤적에 차이가 생기며 결국 조작을 할 수 없게 된다. 첫 번째 실험으로부터는 강결합 방식에 사용되는 촉각상호작용기술은 예상했던 것과 같이 사용할 수 없음을 알 수 있었다.

두 번째 실험결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11과 Fig. 12에서 점선으로 표시된 수직선은 실험시작후 1.4초 경과시의 위치를 표시한다. 실험 1과 비교하여 볼 때 두 작업자에게 나타나는 가상물체의 궤적은 일치하며 성공적으로 주어진 작업을 완료할 수 있었다. 측정된 힘데이터로부터 (a)단계에서는 작업자 1만이 물체와 접촉함을 알 수 있으며 (c)~(d)단계에서는 작업자 2가 물체와 접촉한 후 (f)~(g)단계에서는 물체를 파지함을 알 수 있다. 측정된 힘의 데이터를 분석하여 볼 때 기준값과 측정값과의 차이를 볼 수 있으나 이는 촉각상호작용기구가 관성과 마찰이 큰 스카라 로봇을 사용하였기 때문에 생기는 제어상의 문제라고 여겨진다. 다른 기구를 사용하거나 제어방법을 향상시킴으로서 극복할 수 있다고 생각된다. 두 번째 실험에서 두 사용자가 소유하고 있는 시스템이 차이와 시간간연이 있음에도 불구하고 실험결과는 마치 하나의 컴퓨터가 촉각상호작용기구를 제어하고 가상현실을 시뮬레이션하는 것처럼 느끼게 된다는 것을 보일 수 있었다.

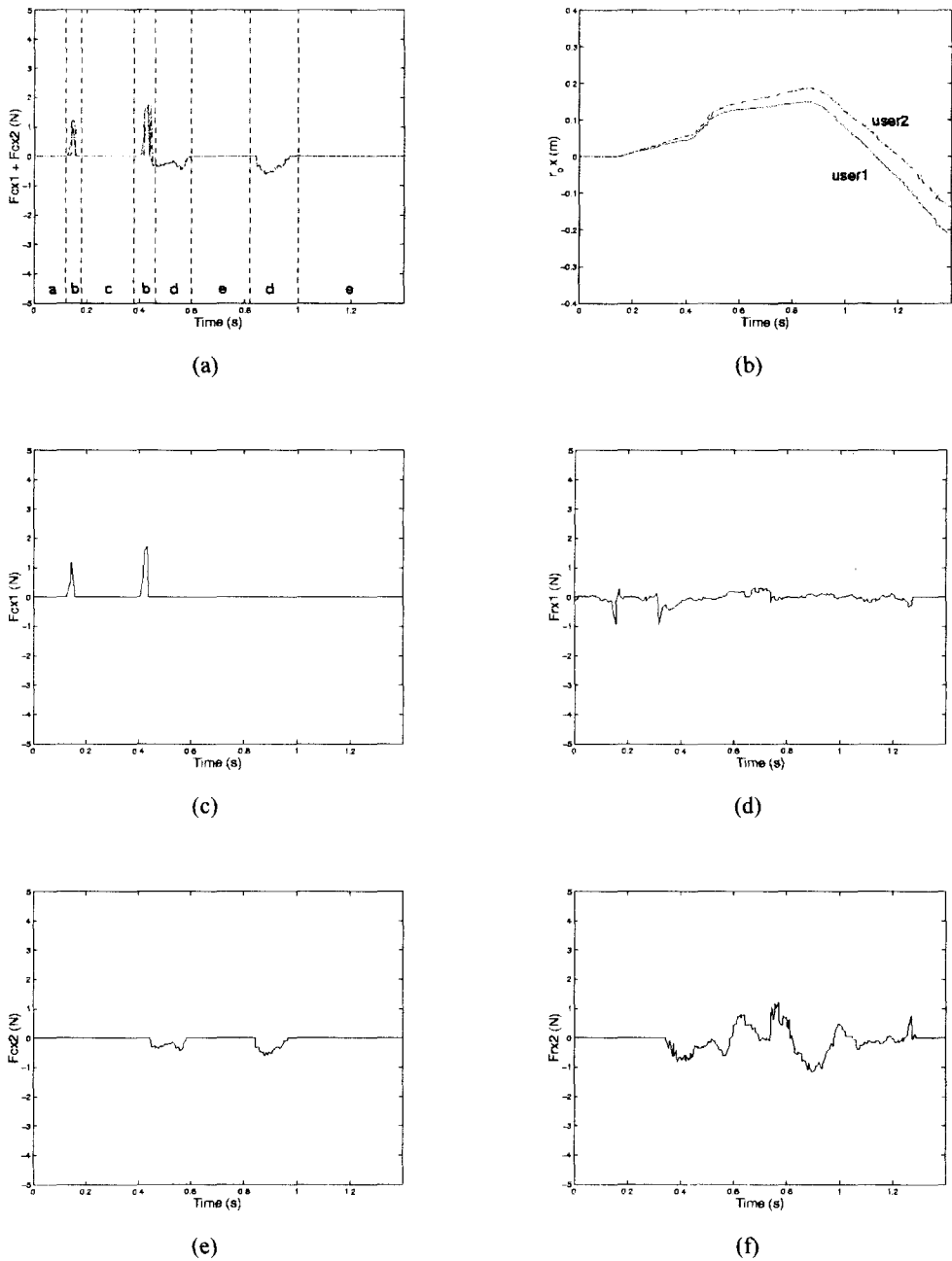


Fig. 9 Experimental result 1 (X-directional force)



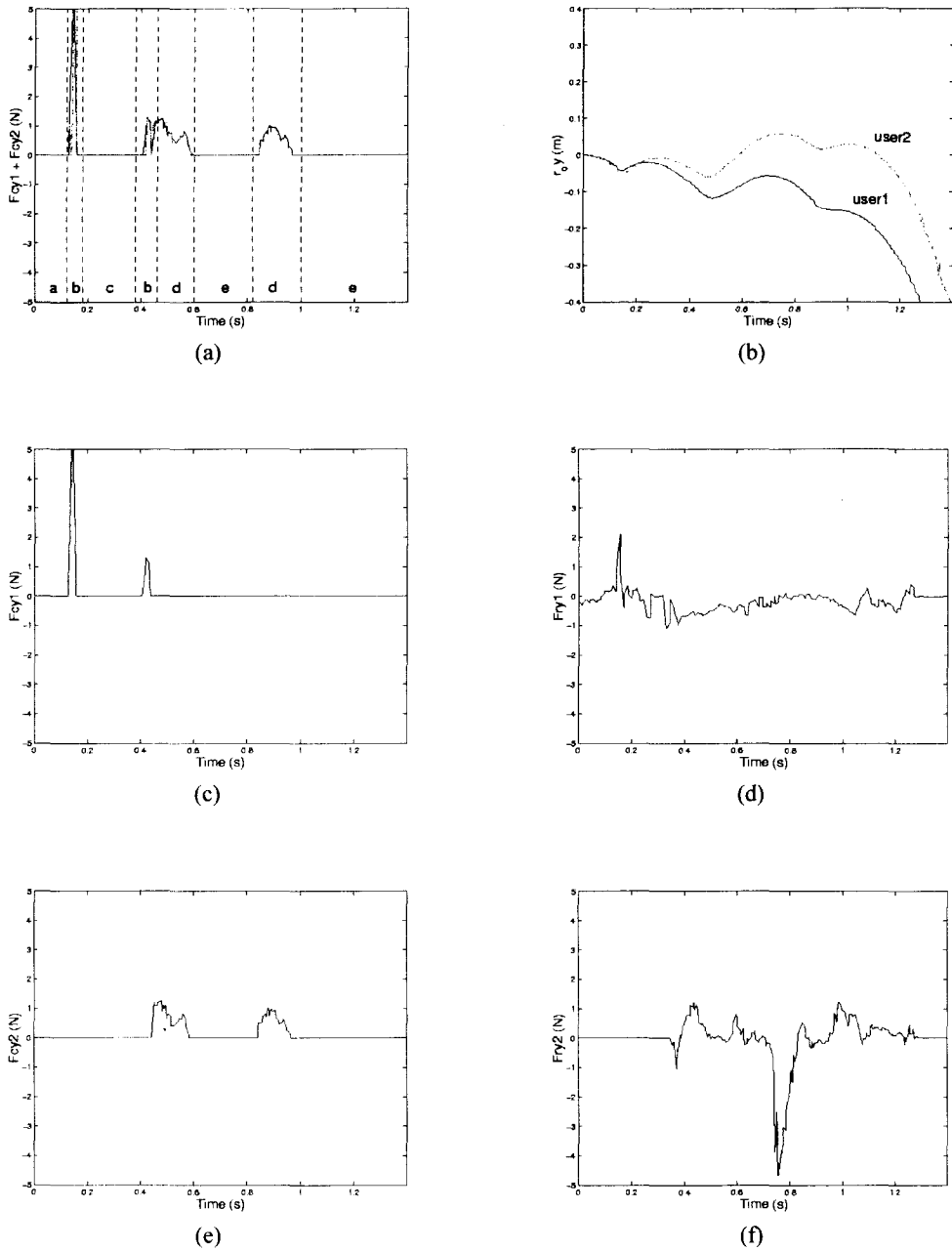


Fig. 10 Experimental result 1 (Y-directional force)

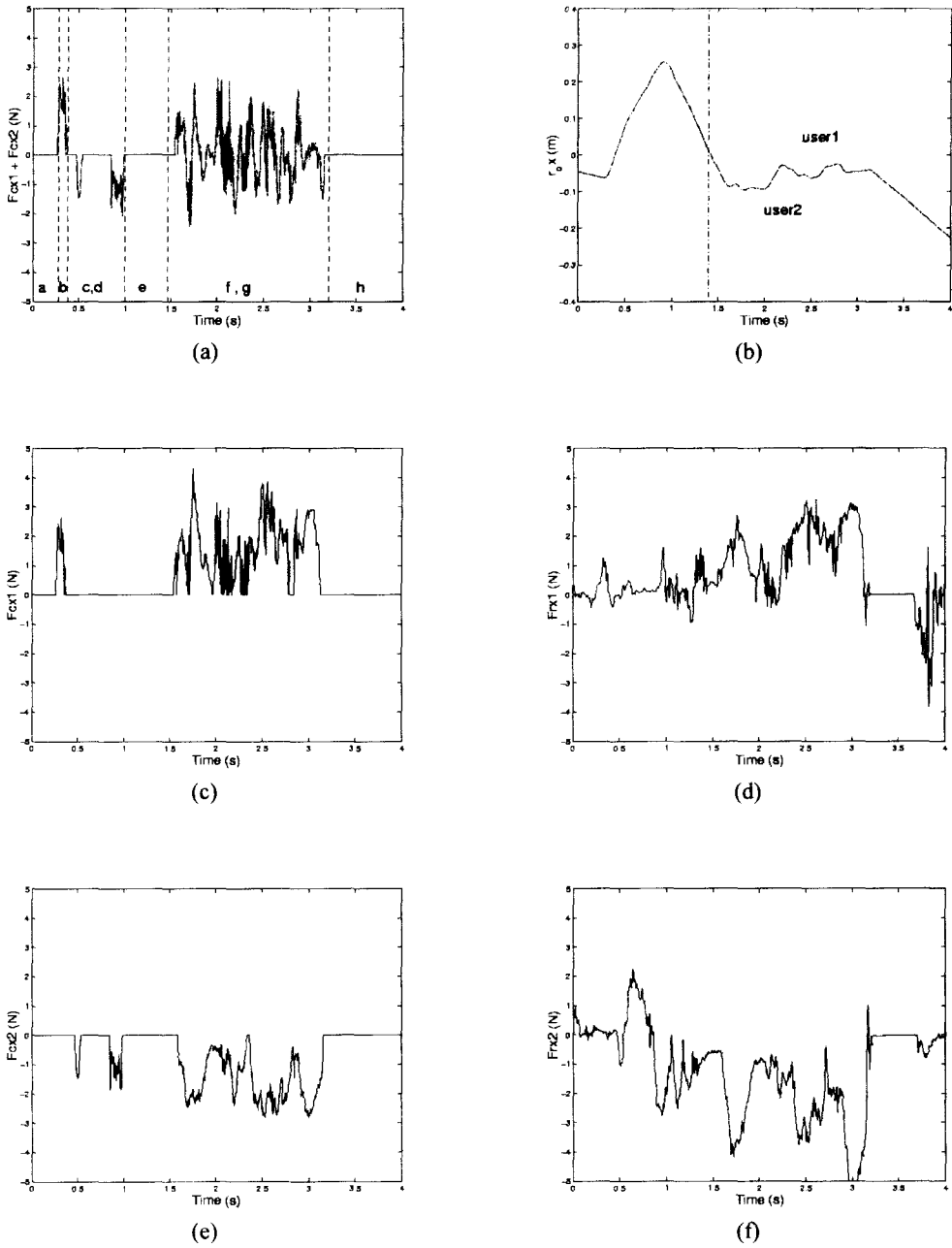


Fig. 11 Experimental result 2 (X-directional force)

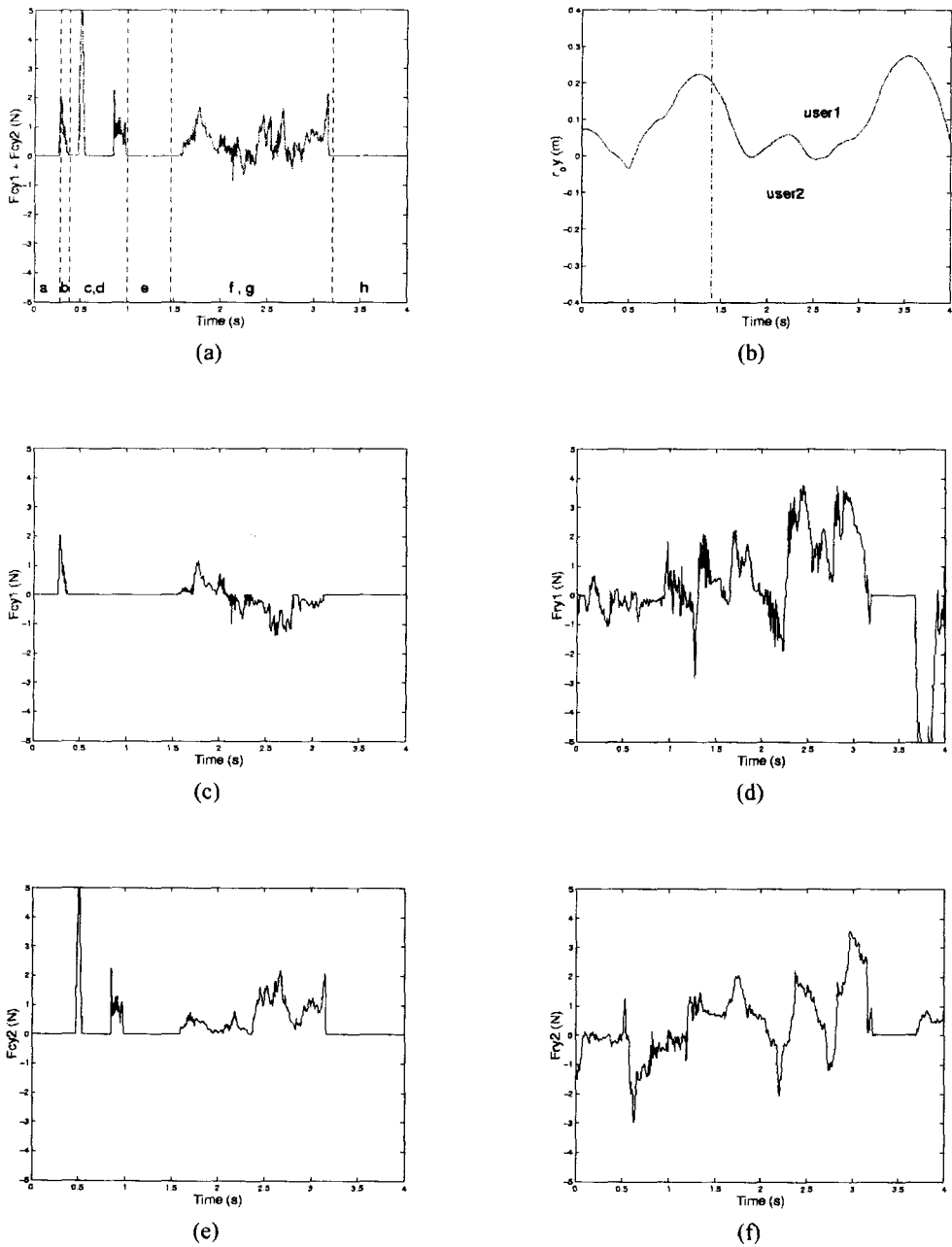


Fig. 12 Experimental result 2 (Y-directional force)

## 5. 결 론

네트워크상에 존재하는 다수의 사용자가 참여하는 가상세계를 위한 촉각상호작용시스템의 구성 및 촉각상호작용알고리즘을 제안하였다. 제안된 구성은 향후 개인용 컴퓨터와 같이 촉각상호작용기구가 포함된 개인용 가상현실시스템이 현실화 될 경우 참여와 탈퇴가 자유로운 가상현실의 구현을 위한 것이다. 실험을 통하여 제안된 알고리즘이 성공적으로 구현될 수 있음을 보였고 알고리즘의 효용성이 입증되었다. 공간적으로 떨어져 있는 사용자들 간에 존재하는 시간지연과 시스템의 차이 등을 극복하기 위한 방법으로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 후기

본 논문은 한국과학재단 핵심전문연구 (과제번호 971-1001-008-2)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. B. Hannaford, L. Wood, D. McAfee, and H. Zak, "Performance Evaluation of a Six Axis Generalized Force Reflecting Teleoperator," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 21, pp. 620-633, 1991.
2. R. Gossweiler, R. J. Laferriere, M. L. Keller and R. Pausch, "An Introductory Tutorial for Developing Multiuser Virtual Environment," PRESENCE, Vol. 3, No. 4, pp. 255-264, 1994.
3. M. Ishii, M. Nakata, and M. Sato, "Networked SPIDAR: A Networked Virtual Environment with Visual, Auditory, and Haptic Interactions," PRESENCE, Vol. 3, No. 4, pp. 351-359, 1994.
4. P. Buttolo, D. Kung, and B. Hannaford, "Manipulation in Real, Virtual and Remote Environment," Proc. IEEE Int. Conf. on System, Man and Cybernetics, Vol. 5, pp. 4656-4661, 1995.
5. H. R. Choi, B. H. Choi, and S. M. Ryew, "Haptic Display in the Virtual Collaborative Workspace Shared by Multiple Users," Proc. 6th IEEE Int.

- Workshop on Robot and Human Communication, pp. 478-483, 1997.
6. T. Yoshikawa, Y. Yokokohji, T. Matsumoto, and Xin-Zhi Zheng, "Display of Feel for the Manipulation of Dynamic Virtual Objects," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 117, No. 4, pp. 554-558, 1995.
  7. T. Yoshikawa and H. Ueda, "Construction of Virtual World Using Dynamics Modules and Interaction Modules," Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2358-2364, 1996.
  8. K. Tanie and T. Kotoku, "Force Display Algorithms," Lecture Notes for IEEE Workshop on Force Display in Virtual Environments and its Application to Robotic Teleoperation, pp. 60-78, 1993.