

가상협동 공간에서의 Haptic Display Haptic Display in the Virtual Cooperative Workspace

류성무*(성균관대 대학원), 최혁렬(성균관대)

S. M. Ryew, H. R. Choi (School of Mechanical Design, S.K.K.Univ.)

ABSTRACT

This paper presents a haptic display of a cooperative work between the networked multiple users. Excluding the possibility of large time delay among the users, it is presented the way of configuring individual haptic display systems including the computation of interaction forces, joint driving forces of haptic devices and simulation of the virtual objects. A haptic display system is developed consisting of two haptic display devices operated by two remote users and experimental results to show the validity of the proposed method are also presented.

Key Words : haptic display, cooperative work, haptic device, time delay, interaction force

1. 서론

지금까지 가상현실에 관한 대부분의 연구는 가상물체의 움직임과 상호작용의 시각화에 초점이 두어져 왔으나[1, 2], 최근 역감 및 촉감 제시(haptic display)의 중요성이 인식되기 시작하고 있으며, 이 분야에 관하여 많은 연구가 수행되어지고 있다.

기존의 역감 및 촉감제시에 관한 연구자들은 대개 가상 물체의 모양, 힘, 무게 또는 동특성 등을 역감 제시기구(haptic device)를 이용하여 단일조작자에게 적용하기 위한 방법을 제안하였다[3, 4, 5, 6, 7]. 가상공간의 가장 일반적인 경우는 원격지에 존재하는 복수작업자들이 인터넷등의 통신망으로 연결되어 있으며 이들이 협동하여 만들어내는 가상공간의 물체들을 조작하는 경우이다(Fig. 1). 이러한 경우에 대하여 기존의 단일 작업자의 경우에 사용해 왔던 것처럼 하나의 컴퓨터가 가상물체의 움직임을 시뮬레이션하고 모든 역감제시기구를 제어하는 방법을 공간적으로 떨어져 원격지에 존재하는 다수의 작업자들의 경우에 사용하기에는 부적합하다. 복수의 물체를 조작하는 것은 이미 여러 방법들이 제안되어져 있지만[8], 단일 작업자의 경우와는 다른 문제를 가지고 있다. 일반적으로 복수작업자가 조작하는 상황은 각 작업자가 다른 역감 제시기구를 가지고 있고 다른 컴퓨터로 원격지에서 네트워크를 통하여 조작하는 경우이다. 그러므로 복수 작업자가 참여하는 역감제시의 경우에는 통신에서의 시간 지연현상, 힘제시 기구의 차이점, 컴퓨터 성능의 차이등 많은 문제점을 가지고 있다. 복수의 조작자가 참여하는 가상공간에서의 협조작업은 원격조작(teleoperation)과 유사한 점이 많으나 한가지 차이점은 원격조작과 같이 동시성을 가질 필요가 없다는 점이다. 즉, 가상공간에서 복수작업자가 협조하는 경우 역감제시의 목표는 각각의 작업자가

동일 시간에는 느끼지 못하더라도 결국 같은 결과를 느끼도록 해야 한다는 것이다.

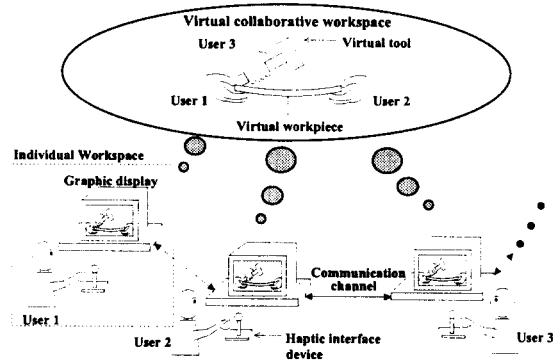


Fig. 1: Concept of haptic display system in collaborative workspace

Yamamoto등은 컴퓨터를 분리하고 비디오 네트워크를 연결하여 역감 제시를 하는 가상 협동 작업공간의 구조의 예를 보여주었으나 엄밀하게 복수 작업자의 경우라고는 할 수 없으며[9], Yoshikawa와 Ueda는 복수 작업자와 복수 물체에 관한 역감제시의 일반화된 방법을 제시하였지만 원격지의 각각 다른 시스템에서의 작업시 발생하는 문제점들은 고려하지 못하였다[8]. Choi등은 원격지의 복수작업자가 참여하는 역감제시방법을 제안하였으나 가상물체가 실제보다 무겁게 느껴지는 단점을 가지고 있다[11].

이에 착안하여 본 논문에서는 협동공간에서 각각 다른 역감 제시기구를 가지는 복수 조작자의 역감 제시 방법을 제안하려고 한다. 또한 기존의 단일 조작자에 의한 역감 제시

기법을 협동공간에 적용할때의 문제점을 분석하고 제안된 방법의 유효성을 실험을 통하여 보여주게 될 것이다.

2. 역감 제시 알고리즘

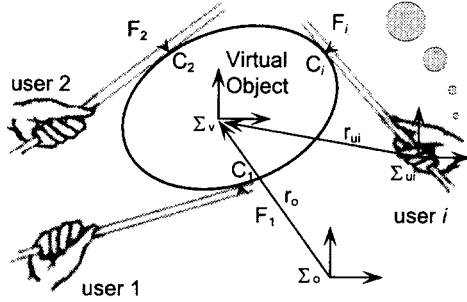


Fig. 2: Object manipulated by multiple users

본 장에서는 먼저 협동 가상공간에서의 복수 작업자의 역감 제시 방법에 대해서 논하고 가상 협동 공간에서의 발생하는 문제점들을 해결하기 위한 방법들을 제안한다.

Fig. 2와 같이 가상공간이 가상물체와 복수 작업자로 구성된다고 가정하자. 여기서 작업자의 수를 k , 그리고 각 작업자들이 물체의 표면에서 마찰접촉을 하는 그 접촉점을 C_i 라 하자. 이 때 가상물체의 위치와 방위는 각각 $p_o \in \mathbf{R}^3$ 와 $\phi_o \triangleq [\phi \ \theta \ \psi]^T \in \mathbf{R}^3$ 으로 정의되며, 가상물체의 일반화된 좌표계(generalized coordinate)를 오일러각(Euler angle)으로 표현한 방위와 위치로 나타내면 $r_o \triangleq [p_o^T \ \phi_o^T]^T \in \mathbf{R}^6$ 이 된다. 물체가 i 번째 작업자와 접촉하고 있을 때 작업자의 위치에서 가상물체는

$$r_{ui} = f_{ui}(r_o) \quad (1)$$

으로 표현될 수 있으며, 식 (1)을 미분하면,

$$\dot{r}_{ui} = J_{oi}(r_o)\dot{r}_o \quad (2)$$

를 얻게 된다. $J_{oi}(r_o) \triangleq \partial r_{ui} / \partial r_o^T \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 은 r_o 에서 r_{ui} 로의 자코비안 행렬이다. 따라서, 가상물체의 운동방정식은

$$M_o(r_o)\ddot{r}_o + h(r_o, \dot{r}_o) = \sum_{i=1}^k J_{oi}^T(r_o)F_i + J_{oE}^T(r_o)F_e \quad (3)$$

이 되며, 이 때 $M_o(r_o) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 은 가상물체의 관성행렬, $h(r_o, \dot{r}_o) \in \mathbf{R}^6$ 은 원심력, 코리올리(Coriolis), 그리고 중력의 항이다. $F_e \in \mathbf{R}^6$ 은 가상 물체가 벽에 충돌할 때와 같이 외부에서 전달되는 일반화된 힘(generalized force)이며,

$F_i \in \mathbf{R}^6$ 은 가상물체와 작업자 사이의 접촉점 C_i 에서 작업자에 의해 가상물체에 전달되는 힘을 말한다. 여기에 작용되는 힘 F_i 는 일반적으로 가상물체의 접촉점 C_i 의 힘입량과 물체의 강성에 비례한다고 가정하여[3],

$$F_i = K_o \Delta r_i \quad (4)$$

로 계산한다. 여기에서 $K_o \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 는 가상물체의 탄성계수이며 $\Delta r_i \in \mathbf{R}^3$ 는 i 번째 작업자와의 접촉점이다. 외부힘 F_e 역시 유사하게 구할 수 있으며, 접촉에서 발생하는 마찰의 효과는 동적 마찰과 정적 마찰상태를 고려하여 구할 수 있다.[6]. 지금까지 설명한 방법은 다수의 작업자가 동일한 공간에서 하나의 컴퓨터에서 제어되는 역감제시 시스템에서는 기대하는 효과를 얻을 수 있으나 조작자들이 서로 독립적으로 원격지에 존재하는 문제점을 발생하게 된다.

이제 원격지에 존재하는 다수의 작업자들로 구성된 협동 가상 공간에 적용할 수 있는 역감제시 방법을 제안한다. 제안하는 방법들은 통신상의 시간 지연현상과 각 시스템간의 통신에서의 샘플링 성능의 오차를 극복하는 능력이 비교의 초점이 될 것이다.

2.1 작업자 공유법(Public operator method)

이 방법은 작업자 상호간의 공유 자원으로서 작업자의 힘 벡터 F_i 만을 교환하는 방법이며 단일 공간에서의 힘제시 방법과 같은 방법을 다수의 작업자로 확장한 것이다. 작업자 간에 통신중 발생하는 시간 지연 현상을 고려한 가상물체의 운동방정식은

$$M_o(r_o)\ddot{r}_o + h(r_o, \dot{r}_o) = \sum_{i=1}^k J_{oi}^T(r_o)\hat{F}_i + J_{oE}^T(r_o)F_e \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, $\hat{F}_i \in \mathbf{R}^6$ 은 다른 작업공간에서 전송된 작업자의 힘벡터로

$$\hat{F}_i = F_i(t - \Delta t_i) \quad (6)$$

과 같이 표현되어 진다. 이 때 Δt_i 는 i 번째 작업공간과의 통신에서의 지연시간이다. 시간 t 일때 Fig. 1의 개인 작업공간(a)에서 가상물체의 운동방정식을 식 (5)와 식 (6)로 유도하면,

$$M_o(r_o)\ddot{r}_o + h(r_o, \dot{r}_o) = J_{o1}^T(r_o)F_1(t) + \sum_{i=2}^k J_{oi}^T(r_o)F_i(t - \Delta t) + J_{oE}^T(r_o)F_e(t) \quad (7)$$

이 때 $F_1(t)$ 와 $F_i(t)$ 는 각각 시간 t 일때 개인 작업공간에서 작업자의 힘과 공유된 다른 작업자의 힘을 나타낸다.

식 (7)은 샘플링 간격(sampling interval)이 일정하고 동기화($\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t$) 되었을 때를 가정하여 유도

되어진 것이다. 그러나 통신상에서 시간지연과 시스템 성능의 차이등으로 힘의 동기화가 불가능하며 발생된 다른 공간에서 발생된 오차를 회복하기가 어렵다.

2.2 물체공유법(Public object method)

물체공유법은 작업자공유법과 달리 가상물체를 공유하는 것으로, 이것은 마치 탁구공을 치는 것과 같은 개념으로 변갈아 가며 가상 물체에 힘을 가하고 작업자의 힘의 영향은 가상물체의 움직임으로 표현되어 다른 공간의 작업자에게 영향을 주게 된다. 따라서 i 번째 작업공간에서의 가상물체의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M_o(r_{on})\ddot{r}_{oi} + h(r_{on}, \dot{r}_{on}) = J_{oi}^T(r_{on})F_i + J_{oE}^T(r_o)F_e \quad (8)$$

이 때, \ddot{r}_{oi} 은 i 번째 작업자의 힘에 의해 가상물체에 발생되는 가속도이며, r_{on} 과 \dot{r}_{on} 은 각각 가상물체의 새로운 위치와 속도이다. 계산된 가속도는 가상물체의 새로운 속도 \hat{r}_{on} 과 변위 \hat{r}_{on} 을 계산하고 그 값을 공유함으로써 k 번째 작업자에게 새로운 가상물체의 상태를 설정할 수 있게 한다.

이 방법은 가속도의 수준에서 힘의 영향을 공유하게 되며 가상물체의 움직임에 접촉력을 추가할 수 있도록 해준다. 다른 공간과의 오차가 발생하지 않고 조작의 결과가 모든 환경에서 결국 일치한다는 장점을 가지고 있으나 두 시스템 환경의 샘플링 간격의 차가 커질수록 힘제시 기구의 제어가 어렵고 조작이 무거워지는 문제점을 발생하게 된다.

따라서 각 작업자가 개인 영역에서 자신의 힘만을 물체에 작용할때의 단점을 극복하기 위하여 다른 작업자의 힘을 외부환경의 힘처럼 작용하고 새로 설정된 물체의 상태를 평균치로 고려하면

$$\hat{r}_{on} = \frac{\sum_{i=1}^k r_{oi}}{k}, \quad (9)$$

$$\hat{\dot{r}}_{on} = \frac{\sum_{i=1}^k \dot{r}_{oi}}{k}, \quad (10)$$

이 된다. 이때 가상물체의 가속도를 식 (9)와 (10)을 사용하면

$$\ddot{r}_{on} = M_o^{-1}(\hat{r}_{on}) \left[\sum_{i=1}^k J_{oi}^T(\hat{r}_{on})F_i + J_{oE}^T(r_o)F_e - h(\hat{r}_{on}, \hat{\dot{r}}_{on}) \right] \quad (11)$$

로 유도할 수 있다.

계산된 가상공간에서의 힘은 각각의 개별 공간에 있는 힘제시 장치를 통하여 작업자에게 가상물체의 조작감을 제시하게 되며 이때 힘제시 장치는

$$\tau_i = J_i^T(q_i)[F_i + K_p(F_i - F_{mi}) + K_i \int (F_i - F_{mi}) dt] \quad (12)$$

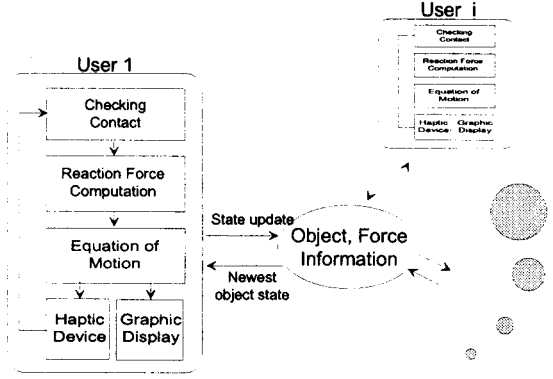


Fig. 3: Flowchart of algorithm

로 제어할 수 있다. 여기서, F_i 는 가상 공간에서 작업자에게 기대되는 힘, F_{mi} 은 측정되어지는 힘이고, $K_p \in R^{n_i \times n_i}$ 은 비례 게인, $K_i \in R^{n_i \times n_i}$ 은 적분 게인이다. Fig. 3 은 제안된 알고리즘의 흐름도이며 각 작업자는 전달되는 정보에 의해 다른 공간의 작업자와의 협동 작업을 가능하게 한다. 기존의 방법 적용과 제안한 두가지 방법은 가상공간사이에서 전달하는 정보가 다르며, 다음 장에서 실험을 통하여 협동공간에서의 적용 결과를 살펴보게 될 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

실험에 사용되는 역감제시 기구의 개념도는 Fig. 4와 같다. 힘제시 장치는 개별적으로 컴퓨터에 의하여 제어되며 LAN을 통하여 정보를 공유한다. 첫번째 작업자(user1)의 역감제시 기구는 3자유도 SCARA 로봇을 Pentium 90MHz CPU 퍼스널 컴퓨터가 제어하는 구조를 가지며, 두번째 작업자(user2)의 역감제시 기구는 같은 구조의 로봇을 Pentium 166MHz CPU 퍼스널 컴퓨터로 제어하는 구조이다(Fig. 5). 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 비율을 가지도록 하였으며, LAN을 통한 공유 정보는 각각 20Hz와 90Hz마다 갱신되도록 하였다. 실험은 작업자 공유법의 실험과 본 논문에서 제안하고 있는 물체공유법을 차례로 수행하였다. 사용된 가상물체는 반지름 0.04m, 질량 0.1Kg의 구체이고, 조작의 편이를 주기위하여 중력가속도는 지구중력의 1/3로 하였다. 또한 공의 움직임을 세밀히 관찰하기 위하여 시간을 실제시간

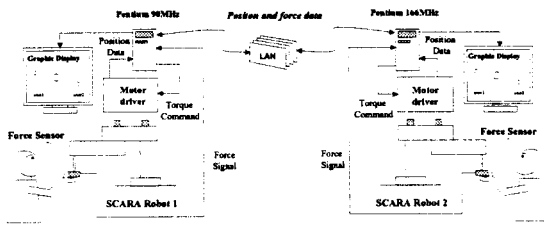


Fig. 4: Schematic diagram of haptic display system

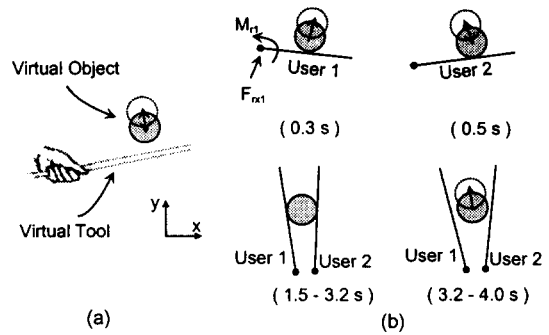


Fig. 6: Tasks in experiment

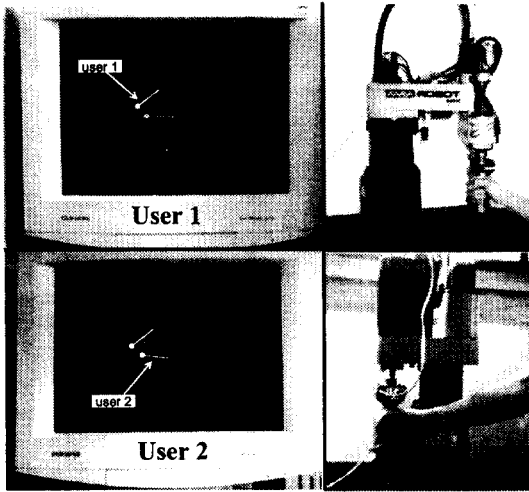


Fig. 5: Overview of haptic display system

보다 5배 느리게한 후 결과의 시간을 보정하도록 실험하였다.

첫번째 실험은 기존의 단일공간에 사용되어온 역감제시 방법을 서로 다른 원격지의 조작자로 구성된 협동가상공간에 적용하였다. Fig. 6의 (a)와 같이 작업자(user2)가 공을 세번 위로 치고, 그 변위를 다른 원격지의 작업자(user1)에서 나타난 가상물체의 변위와 비교하였다. 첫번째 실험결과는 Fig. 7이며, Fig. 7(b)와 (d)에서 보여지듯이 0.1-0.2초, 0.4-0.6초, 0.8-1.0초에서 가상물체에 작업자가 힘을 가하였으며, 또한 Fig. 7 (a)와 (c)에서 가상물체의 변위가 x와 y축 방향으로 발생 하였다. 이 때 발생한 움직임을 살펴보면 힘을 가한 작업자와 원격지에 존재하는 작업자가 같은 결과를 얻어야 함에도 불구하고 시스템간의 격차와 지연시간의 문제로 결과 변위가 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 제안한 작업자 공유법을 사용하여 두번째 실험을 수행하였다. 두명의 서로다른 원격지에 존재하는 작업자가 협동 가상공간에서 물체에 힘을 가한다. 0.3초에 작업자1, 0.5초와 0.8초에 작업자2의 힘이

가해지며 1.5-3.2초 동안은 서로 물체를 잡고 힘을 가하는 작업이다(Fig. 6(b)). Fig. 8의 변위 그래프(a)와 (c)에서와 같이 서로 다른 작업자에게 제시되는 가상물체의 변위가 같음을 알 수 있으며, Fig. 9에서 작업자가 가하는 힘((a),(b))과 실제 느끼는 힘((c),(d))이 거의 유사하며, 작업자가 가하는 x방향 힘((a),(b))과 y방향 힘((e),(f))가 각각 합력으로 표현되어 물체에 가해진 힘의 그래프 Fig. 8의 (b)와 (d)가 됨을 확인 할 수 있다. Fig. 9에서 F_{cx} , F_{cy} , M_c 는 각각 물체와의 접촉에서 기대되는 x, y 성분의 힘과 모멘트 이고 F_{rx} 는 역감제시장치를 통하여 작업자가 실제 느끼는 x방향 힘이다.

4. 결론

원격지에 있는 다수의 작업자가 참여하는 가상협동공간에 적용하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 실험을 통하여 두 명의 작업자 사이에 성공적인 역감제시를 수행하였고 서로 다른 시스템의 성능차와 작은 지연시간을 극복하는데 성공하였다. 더 나아가 네트워크상의 큰 시간지연을 고려한 역감제시 기법과 가상협동 작업의 응용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] V. V. Kamat, "A Survey of Techniques for Simulation of Dynamic Collision Detection and Response", *Computer & Graphics*, Vol. 17, No.4, 1993.
- [2] C. B. Philips, J. Zhao, N. I. Badler, "Interactive Real-time Articulated Figure Manipulation Using Multiple Kinematic Constraints", *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.245-250, 1990.
- [3] K. Tanie and T. Kotoku, "Force Display Algorithms", *Lecture Notes for IEEE Workshop on*

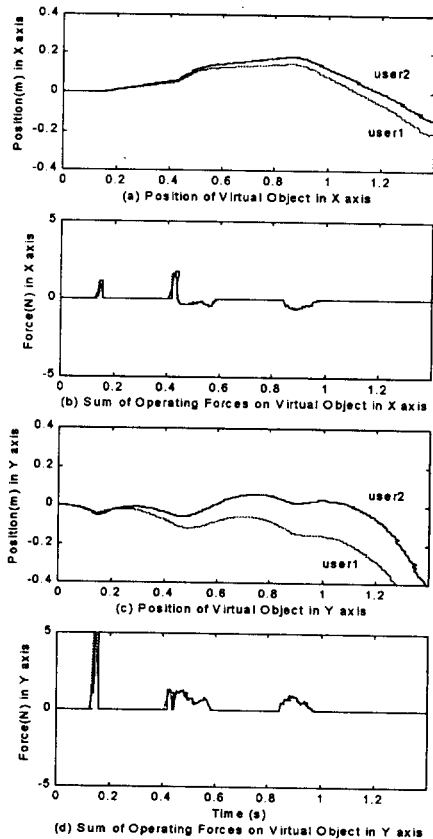


Fig. 7: Experimental results of task 1

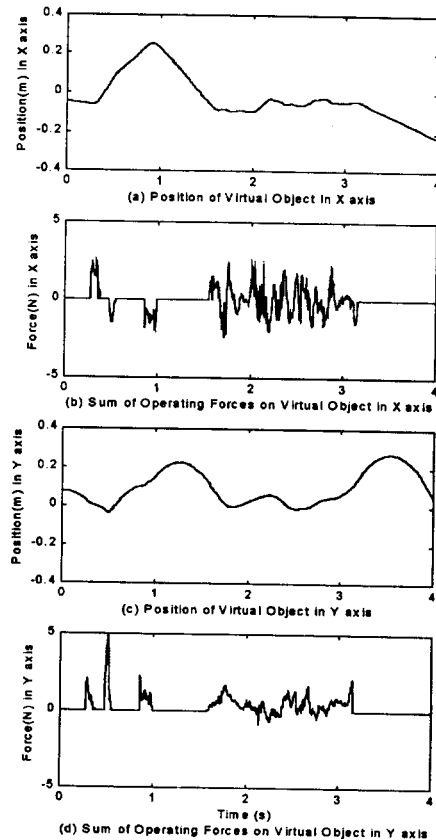


Fig. 8: Experimental results of task 2

Force Display in Virtual Environments and its Application to Robotic Teleoperation, pp. 60–78, 1993.

- [4] K. Yamamoto, A. Ishiguro, and Y. Uchikawa, "A Development of Dynamic Deforming Algorithms for 3D Shape Modeling with Generating Interactive Force Sensation", *VRAIS '93*, pp. 504–511, 1993.
- [5] H. Iwata, "Artificial Reality with Force-feedback", *ACM Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.165–170. 1990.
- [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. H. Massie and S. J. Kenneth, "The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Object," *ASME DSC-C55-1*, pp. 295–301, 1994.
- [8] 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.
- [9] Y. Yamamoto, M. Ishii, R. Takanatsu, and M. Sato, "A Virtual Collaborative Workspace with Force Sensation", *10th Symp. on Human Interface*, pp. 203–206, 1994.

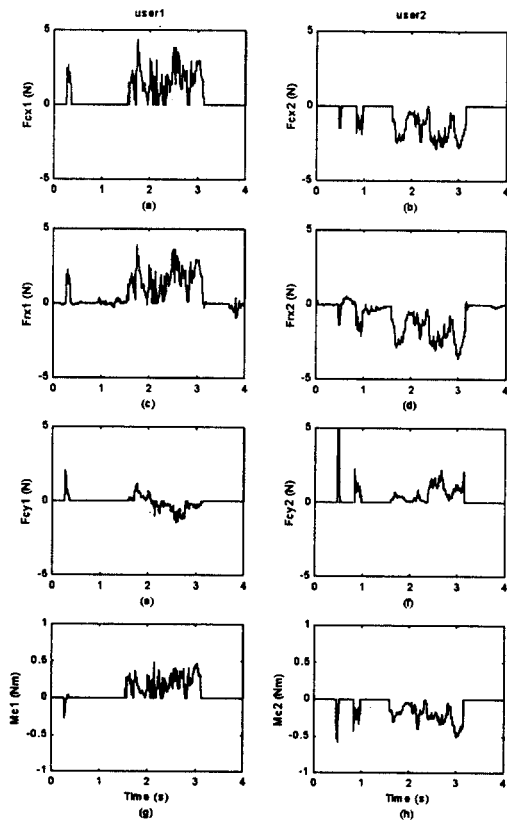


Fig. 9: Experimental Results

- [10] M. Ishii, M. Nakata and M. Sato, "A Networked Virtual Environment with Virtual, Auditory, and Haptic Interactions", *PRESENCE*, Vol. 3, No. 4, Fall 1994, pp. 351-359.
- [11] H. R. Choi, B. H. Choi and S. M. Ryew, "Haptic Display in the Virtual Collaborative Workspace Shared by Multiple Users", *Proc of Robot and Human Communication*, pp. 478-483, 1997.