

# 가상현실을 이용한 원격시스템에 관한 연구

\*최승욱, \*\*허화라, \*\*\*이장명  
 \*창원전문대 정보처리과  
 \*\*송호대학  
 \*\*\*부산대학교 공과대학 전자공학과

## Study of Virtual Reality for Tele-Operation System

Sung-Yug Choi\*, Hwa-Ra Hur\*\* and Jang-Myung Lee\*\*\*  
 \*Chan-won College, \*\*Song-ho College, \*\*Pusan National Univ.  
 E-mail : svchoi3@korea.com

### Abstract

This paper presents virtual reality using 6 DOF Haptic interface. It is proposed reappearance of force using 6 DOF Haptic device that was designed by previous studies and 3D image considered time delay. The performance of conventional control is excellent in the case of the exactly known dynamic model of the robot, but degrades seriously as the uncertainty of the model increases. The virtual reality using 6 DOF Haptic interface is presented here to overcome such that, and verified though the experiment.

**Keywords :** virtual reality, tele-operation, time delay, impedance control

### 1. 서론

현대의 가상 현실은 실제환경과 유사하게 만들어진 컴퓨터 모델 속에서 시각, 청각, 촉각, 힘 등과 같은 감각을 이용하여 그 속에서 정의된 세계를 경험하며, 대화식으로 상호간에 정보를 주고 받을 수 있는 것을 의미한다. 이는 기존에 단순히 TV와 영화를 보는 것과 같이, 사용자가 그 상황을 제어할 수 없으면서 수동적인 경험을 하는 1세대 가상현실 수준과, 사용자의 일방적인 동작에 따라 가상현실의 전개순서에 변화가 발생하는 2세대 가상현실 수준을 넘어서고 있다.

따라서, 본 논문의 목적은 시각정보와 힘 정보를 사용하여 원격의 작업 환경을 가상현실 감각으로 재현하여, 조작자가 원격에서의 작업을 현재 눈 앞에서 경험하듯이 구성함으로써, 보다 즉각적인 로봇의 제어가 가능하도록 하는데 있다.

이러한, 원격의 작업에 대한 감각정보 재현에 관한 연구는 원자력 발전소와 같이 위험 환경에서의 원격 로봇 제어와 함께 별도의 의료진을 상주시키기 힘든 오지에서의 원격 수술에서와 같이 많은 비용이 요구되는 반복적인 기계조작 훈련 등을 위하여 반드시 선행되어야 할 분야이다.

현재 이에 관해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 가상현실 공간에 대한 감각정보를 제공하는 하나의 방법으로 응용되고 있다. 제안하는 원격의 작업환경은 그림 1과 같으며, 작업대상 물체의 특정 위치를 일정 깊이로

절개하는 것으로 가정한다. 이는 그림 2와 같은 순서에 의해 작업 수행된다.

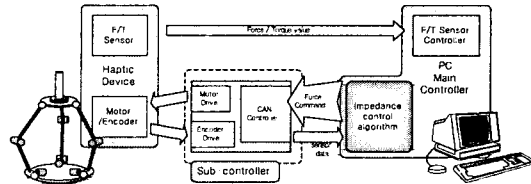


그림 1. 가상현실 재현을 위한 시스템

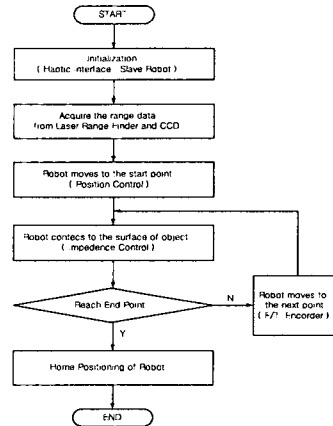


그림 2. 작업 순서도

## 2. 원격의 작업환경

원격의 작업은 먼저, 실제 작업에 앞서 원격의 작업환경을 확인한다. 이는 작업대상을 촬영하여 전송되는 2차원의 영상과 로봇의 엔드툴(End-Tool)에 위치한 Laser 센서에 의해 측정되어진 깊이정보를 사용하여 재생한 작업대상의 3차원 정보를 사용하여 작업대상을 정확히 이해하고, 이의 형태를 따라 절개 작업의 시작위치 및 종료위치를 결정한다. 이는 그림 3, 그림 4와 같다.



그림 3. 30cm 수직 위

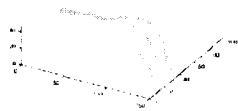


그림 4. Laser센서 측정

작업위치를 충분히 파악한 후, 결정된 절개의 시작위치로 로봇의 엔드툴을 위치시키기 위하여 로봇의 자세제어가 이루어진다. 이때, 로봇의 자세를 결정하기 위하여 기존에 많은 연구가 이루어지고 있으나[1][2], 본 논문에서는 위치제어를 사용하며, 정확한 로봇의 자세를 보정하기 위하여 앞서 Laser 센서에 의해 측정된 깊이 정보를 사용한다. 이러한 로봇의 정밀 위치제어는 로봇의 엔드툴이 접촉면에 접촉하기 직전까지 유효하다. 로봇의 엔드툴이 작업대상의 접촉면에 접하여 조작자의 제어명령에 의해 작업대상과 상호작용이 이루어지는 상태에서 작업을 수행하기 위해서는 원격의 작업 현장에 있는 로봇과 조작자 사이에 식 (1)과 같은 상호 정보교환이 이루어진다. 즉, 로봇에 장착된 F/T센서로부터 전송된 정보를 의사의 haptic 감각으로 재현해주는 폐회로 제어루프를 구성하기 위하여 6개의 링크의 모터에 포함된 각각의 엔코더의 정보( $e_1 \sim e_6$ )를 로봇에서 전달된 F/T값( $f_1 \sim f_6$ )값으로 재현한다.

$$f_{1 \dots 6} \xrightarrow{\rho \text{ transform}} e_{1 \dots 6} \quad (1)$$

$$\xleftarrow{\text{Measuremen}}$$

이러한 작업 상황은 다음의 네 가지가 고려되어야 원활히 이루어질 수 있다.

- 첫째, 원격이라는 제약환경에서 유발되는 시간지연
- 둘째, 조작자와 로봇 사이의 상호 힘작용과 이로 인한 위치사이의 관계 정의
- 셋째, 조작자와 로봇의 3차원 공간감각을 느끼고 동시에 힘정보와 위치정보를 전달할 수 있는 조작기구
- 넷째, 조작자에게 원격의 작업환경을 현실감 있게, 즉시 전달하기 위한 3차원 시각정보

### 2.1. 시간지연

네트워크를 통한 원격의 현장이 빈번한 현대의 산업환경으로 인하여, 시간지연을 극복하기 위한 연구는 많이 연구되고 있다[3][4]. 본 논문에서는 선행 연구된바 있는 예측제어기를 이용한 시간지연 보상을 사용하여 시간지연에 따른 정보의 부정확성을 예측하고 있으며, 과거의 출력과 현재의 출력 사이에 상관관계가 크며, 출력이 랜덤하지 않은 가정에서 식 (2)와 같다.

$$y[n+d] = y[n] + f_L\{d, y[n], \dots, y[n-N]\} \cdot f_P\{f_L, m_N, \sigma^2\} \quad (2)$$

여기에서

$d$  : 시간지연

$y[n]$  : 현 시점의 출력값

$y[n+d]$  : 시간지연을 고려하여 예측한 출력값

$y[n-N]$  :  $y[n]$ 을 기준으로  $N$ 샘플 이전 시점에 출력값

$f_L$  : 선형예측함수

$f_P$  : 확률함수

$m_N$  : 현 시점을 기준으로 과거  $N$ 개의 출력값에 대한 평균

$\sigma^2$  : 현재 시점을 기준으로 과거  $N$ 개의 출력값에 대한 분산이다.

이는  $n$  시점에서  $N$ 개의 이전값으로부터  $d$ 이후의 값을 예측할 수 있다.

### 2.2. 임피던스 컨트롤

앞서 식 (1)에서 원격의 작업 현장에 있는 로봇과 조작자사이의 상호 힘과 위치정보를 교환하려면, 이를 임피던스 관계로 정의하고 로봇을 제어하는 방식이 사용되며, 기존에 많은 연구가 있어왔다[5][6]. Hogan에 의해 제안된 방식은 힘과 위치 사이의 관계를 임피던스 관계로 보고, 이 관계로부터 매니플레이터의 위치를 제어함으로써 힘제어를 하게 되는 임피던스 방식[1], 힘제어하는 방향과 위치제어하는 방향을 분리하여 각각 독립적으로 수행하는 하이브리드 위치/힘제어 방식[2][5], 그리고 매니플레이터가 접촉면과의 구속조건을 만족시키기 위해 필요한 구속력을 이용한 구속움직임제어[6][7]가 있다.

본 논문에서는 선행연구를 통해 완성된 Haptic Interface를 사용하며, 임피던스를 모델링한 후, 슬레이브 로봇의 F/T 센서를 통해 전송되어온 force 및 torque 값을 원격지에 위치한 작업자에게 정확히 재현할 수 있도록 한다. 이때, 슬레이브 로봇의 F/T 센서에서 측정된 값  $f_d$ 를 Haptic Interface의 입력으로 하고, Haptic Interface가 조작자에게 가하는 힘  $f_c$ 이 입력값  $f_d$ 에 수렴해야 한다. 접촉환경 임피던스를 식 (3)과 같다고 할때, 그림 5와 같이 힘의 오차를 입력으로 하여 접촉점의 속도를 생성하는 식 (4)의 어드미턴스의 형태가 되어야 한다.

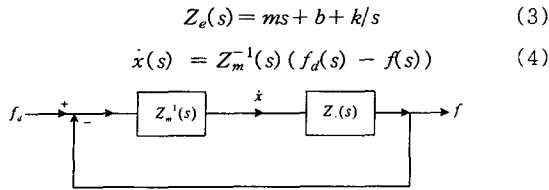


그림 5. 임피던스 필터에 의한 힘제어

### 2.3. 힘정보를 이용한 감각정보 재현

제한한 환경에서와 같은 힘제어 방식을 통한 원격제어에서, 원격지의 작업자가 작업대상물체의 변화에 따라 이를 감지할 수 있고, 능동적으로 대처할 수 있는 원격 조작기를 Haptic Interface라 하며, 이의 개발이 가상현실 감각을 재현하기 위한 핵심이 된다.

이러한 원격 조작기에 의해 인간의 감각과 지능을 원거리까지 확장할 수 있으므로 작업자는 위험한 작업장에 갈 필요가 없이 안전한 곳에서 원격 조작기를 통해 자신이 실제 작업장에서 작업하는 것처럼 원하는 과제를 수행할 수 있다. 원격조작을 할 경우 조작자는 실제로 작업현장을 보거나 모니터를 통해 멀리 떨어진 작업장의 상황을 파악하면서 슬레이브 조작기를 작동하기 때문에 단방향 제어만으로도 일정 성능을 보장할 수 있다. 그러나 슬레이브 로봇이 정교한 작업을 하거나, 부서지기 쉬운 물건이나 위험한 물건을 취급할 때는 섬세하고 정교한 작업이 요구되므로, 단방향 제어만으로는 원하는 성능을 기대할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 시각정보의 되먹임과 함께 힘센서에 의한 정보를 이용하는 양방향제어를 사용하므로, 작업자가 실제로 작업 현장에서 작업을 수행하는 것과 같은 현실감을 느낄 수 있게하여 섬세하고 정교한 손놀림을 필요로 하는 작업에서 탁월한 성능을 보장할 수 있다. 사용된 Haptic Interface는 그림 6과 같다.

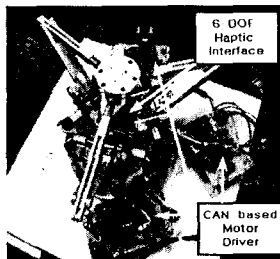


그림 6. Haptic Interface

조작자와 로봇의 3차원 공간감각을 느끼고 동시에 힘 정보와 위치정보를 전달하기 위하여, 단순화된 동역학으로 인해 발생하는 모델링 오차를 극복할 수 있도록 선행 연구된 강인한 제어기를 사용하였다[11][12].

Haptic Interface를 사용할 때, 3차원 공간에서 조작자가 자유로와야 하며, 슬레이브 로봇이 작업 대상과 접촉이 발생할 때, 접촉힘을 조작자가 정확히 느낄 수 있어

야 한다. 이는 조작자의 운동을 인식하여 그에 대응하는 기구의 동특성을 인식하고, 그에 대응하는 Haptic Interface의 동특성을 보상하므로써 가능하다. Haptic Interface의 직교 공간상의 동역학 방정식으로 부터 일정 힘  $f_c$ 를 발생시키는 것은 식 (5)와 같다.

$$f = M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + f_c \quad (5)$$

힘 토크의 관계식이 식 (6)과 같을 때, 식 (7)과 같이 능동관절토크를 얻을 수 있다.

$$f = J(x)^T \tau \quad (6)$$

$$\tau = J^{-T}(x)[M(x)\ddot{x} + V(x, \dot{x}) + G(x) + f_c] \quad (7)$$

### 2.4. 원격의 작업환경에 대한 시각정보 재현

현대의 산업용 로봇들은 이미 결정된 작업환경에서 미리 프로그램되어진 명령에 따라 반복적인 작업을 하기 때문에 위치제어만으로도 작업의 수행이 용이하다. 하지만, 매니플레이터의 엔드볼과 작업 환경사이에 접촉이 발생하는 경우에는 약간의 위치오차 만으로도 큰 힘오차를 유발할 수 있으므로 매니플레이터 뿐만 아니라 접촉 대상에도 큰 손상을 초래할 수 있다.

또한, 이러한 반복작업이 원격환경에서 실시간으로 이루어지기 위해서는 정보의 지연에 따른 예측과 보상으로 로봇의 작업을 원활히 할 수 있다. 만약, 정보의 지연을 고려치 않는 원격환경에서의 로봇의 동작은 조작자에 의한 로봇의 제어가 이미 로봇의 엔드볼 위치가 변경되었음에도 불구하고, 이전 시점의 엔드볼 위치에 의한 조작에 따르게 되므로, 이 역시도 로봇과 접촉면에 심각한 손상을 발생시키는 원인이 된다. 현시점에서 원격의 작업환경에서 조작자에게 전송되어온 시간지연이 또한 된 2차원 영상은 그림 7과 같다.

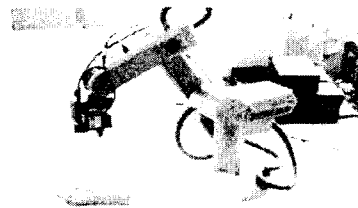


그림 7. 슬레이브 로봇의 작업환경

따라서, 본 논문에서는 힘 정보와 함께 시각정보를 사용하여 원격의 작업 환경을 가상현실 감각으로 재현함으로써, 조작자가 원격에서의 작업을 현재 눈앞에서 경험하듯이 구성하여 보다 즉각적인 로봇의 제어가 가능하도록 하는데 있다.

앞서 언급한 시간지연 극복 알고리즘을 고려하여 재현

된 영상은 그림 8과 같다.

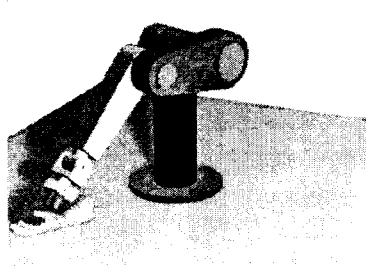


그림 8. 재현된 작업환경

### 3. 실험결과

실험에 사용한 시스템의 구성도는 그림 9와 같다.

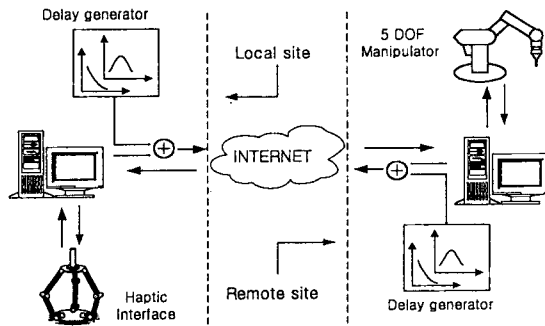


그림 9. 전체 시스템 구성도

시스템에 사용한 주 제어기는 PC Pentium 120MHz를 사용하였으며 PC에서의 제어명령은 CAN BUS를 통해 250Kbps의 통신속도로서 haptic interface 기구의 관절토크를 발생시키는 하부제어기로 전달된다. haptic interface의 각 관절을 제어하는 하부제어기는 87C196CA microprocessor를 사용한 6개의 관절모터 제어기로 구성하였고 외부로부터의 힘과 토크를 입력받을 수 있는 F/T sensor는 ATI INDUSTRIAL AUTOMATION의 ISA F/T 16 model을 사용하였다.

본 논문에서는 강인제어 알고리즘을 사용하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 Haptic Interface의 기준 입력  $f_d$ 를 단위 제단입력으로 하여 이에 대해 Haptic Interface가 작업자에게 가하는 힘 즉, 작업자가 실제로 느끼는 힘  $f_c$ 의 명령추종 성능을  $x, y, z$  축에 대하여 각각 실험하였다. 그림 11-13에서 알 수 있듯이 각 관절모터의 최대토크를 제한하여 정확한 명령추종은 어렵지만, Haptic Interface의 상판에 부착된 F/T 센서에서 측정된 힘  $f_c$ 가 기준입력  $f_d$ 의 형상을 그대로 추종해 감을 알 수 있다.

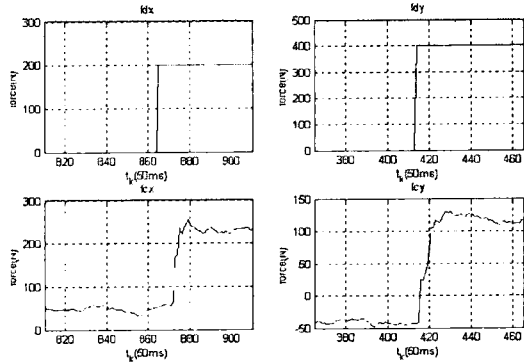


그림11. x방향의 명령추종성능 그림12. y축방향의 명령추종성능

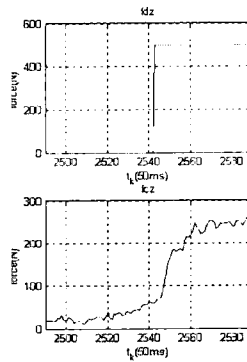


그림13. z축방향의 명령추종성능

### 4. 결론

본 논문에서는 6자유도 운동을 자유롭게 생성하고 복원하기 위해 선행 연구되어진 Haptic Interface 기구를 사용하여 원격의 슬레이브 로봇에 명령을 내리고, 슬레이브 로봇에 장착된 F/T센서를 통한 힘정보와 함께 시간지연을 고려한 3차원 영상을 이용하여 작업자가 실제 작업장에 위치한 듯한 가상현실 감각을 느끼도록 하였다. 재생된 영상은 해상도의 한계로 인하여, 미세한 움직임에 대해서는 조작자에게 전달되는 시각정보가 미흡하나, 접촉이전의 슬레이브 로봇의 위치제어에는 전승되는 2차원 영상에 비해 실시간 조작의 정보를 제공한다. 이를 강인한 임피던스제어기를 통해 검증하였다.

차후의 과제로는 작업자의 조작특성에 따른 보다 안정적인 가상현실감각의 재현에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

### [참고문헌]

[1] N. Hogan, "Impedance control : An approach to manipulator, part I,II,III" ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 3, pp.1-24, 1985.

- [2] M. H. Railbert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," Trans. ASME: J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.102, pp.101-133, 1981.
- [3] W. Barfield and T. A. Furness, Virtual Environments and advanced interface design, *Oxford University Press*, 1995.
- [4] Grigore C. Burdea, "The Synergy Between Virtual Reality and Robotics," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, no.3, June 1999.
- [5] T. Yoshikawa, "Dynamic hybrid position /force control of robot manipulators-Description of hand constraints and calculation of joint driving force," IEEE J. Robotics and Automation, vol.3, no.5, pp.386-392, 1987
- [6] N. H. McClamroch and D. Wang, "Feedback stabilization and tracking of constrained robots," IEEE Trans. Automatic Control, vol.33, no.5, pp.419-426, 1988.
- [7] C. Y. Su and Y. Stepanenko, "Adaptive variable structure tracking control for constrained robots," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol.30, no.2, pp. 493-503, 1994..
- [8] Gary M. H. Leung and Bruce A. Francis, "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via  $\mu$ -Synthesis," Trans. on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 1, pp. 105 ~ 116, 2, 1995.
- [9] J. E. Colgate and J. M. Brown "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," Proc. of the 1994 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, 5, 1994.
- [10] 김병화, 최승욱, 이장명, "패턴인식을 통한 카메라 위치와 방향의 정밀한 능동보정," 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 660-663, 10, 1998.
- [11] 한승준, 주재율, 최승욱, 이장명, "6자유도 Haptic 인터페이스 기구의 동적 특성 보상과 LQG/LTR 선형제어기법을 이용한 강인 제어," 한국통신학회 대한전자공학 학회 부산·경남지부 춘계 합동 학술발표회 논문집, 제8권 제1호, pp. 236-241, 6, 1999
- [12] 이수성, 한승준, 이원구, 하성기, 이장명, "원격 작업을 위한 6자유도 Haptic 인터페이스 설계," 대한전자공학 학회 부산경남지부 추계합동 학술논문발표회 논문집, pp.323 ~ 328, 12, 1998.
- [13] 허화라, 박재한, 이장명, "예측제어기를 이용한 시간 지연보상," 대한전자공학 학회 논문지, 제36권 S편 제2호, pp. 46-56, 2, 1999.
- [14] T. A. Lasky and T. C. Hsia, "On Force-Tracking Impedance Control of Robot Manipulators", Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, April 1991.