

힘 반향 가상원격조작 시스템을 이용한 가상 물체 탐색에 관한 연구

권혁조* · 김기호** · 오재윤†

(2000년 11월 29일 접수, 2001년 3월 5일 심사완료)

A Study on a Virtual Object Exploration Using a Force Reflection Virtual Teleoperation System

HyokJo Kwon, KiHo Kim and ChaeYoun Oh

Key Words: Teleoperation(원격조작), Force Reflection(힘 반향), Master Manipulator(주조작기), Slave Manipulator(종조작기), Graphic Simulator(그래픽 시뮬레이터), Virtual Object Exploration(가상물체 탐색)

Abstract

This paper develops a master manipulator which can reflect a force from a slave manipulator effectively. It may have a big workspace, can represent a human operator's manipulation perfectly, and is composed of a position control part, an orientation control part and an end effector control part. This paper also develops a graphic simulator using the Visual C++ and OpenGL in the Window operating system. It can be used to make a virtual slave manipulator and set a virtual working environment, and provide a visual information from a desired view point. A virtual teleoperation system is developed by connecting the developed master manipulator to the graphic simulator using an interfacing hardware bilaterally. It is used for performing a virtual object exploration experiment. In the experiment, two virtual objects are used. They are virtual wall and virtual hexahedron which have 0.7N/mm and 2.2 N/mm stiffness respectively. The experiments are performed under six different working conditions. The experiment results will show the effectiveness of the reflected force from the slave manipulator for improving the efficiency and stability of the teleoperation task.

1. 서 론

현재까지는 인공지능을 가지고 있어서 작업자의 감시를 받지 않고 자율적으로 작업을 수행할 수 있는 로봇에 관한 연구가 많이 수행되어 왔다. 그러나 이 같은 자율 로봇을 이용하여 작업

자가 접근하기 어려운 원격지나 위험한 환경에서 작업자 대신 작업을 수행하는 데는 많은 문제점들이 있다. 그래서 최근에는 이 같은 작업자가 접근하기 어려운 곳에서 작업을 수행하기 위한 종조작기(slave manipulator)와 주조작기(master manipulator) 및 이들의 양 반향 통신을 위한 인터페이싱 하드웨어(interfacing hardware)로 구성된 원격조작시스템(teleoperation system)의 개발에 관한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.

원격조작시스템은 작업자가 주조작기를 직접 조작하고, 인터페이싱 하드웨어가 주조작기의 움직임, 즉 작업자의 작업 명령을 종조작기에 전달한다. 종조작기는 인터페이싱 하드웨어를 통해

* 전북대 정밀기계공학과 대학원

** 한국 원자력연구소

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학과 메카트로닉스 연구센터

E-mail : ohcy@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2377 FAX : (063)270-2388

전달된 명령에 따라 작업자가 접근하기 어려운 곳에서 원격작업을 수행한다. 원격조작시스템에서는 작업 상황을 모니터링 하기 위한 비전시스템의 이용이 필수적이다. 그러나 비전시스템은 3차원 공간에서 수행되는 작업 상황을 2차원 화면에 보여주므로 부정확한 거리 정보를 제공하고 작업자에게 착시 현상을 유발하기도 한다. 따라서 작업자가 원격조작 작업을 수행하는데 시각정보에만 의존한다면 원격작업 효율이 급격하게 저하될 수 있고, 경우에 따라서는 원격작업 수행이 불가능한 상황이 일어날 수 있다. 이런 문제들을 극복하기 위하여 최근에는 시각정보에 부가하여 종조작기와 작업환경사이에 발생하는 힘을 작업자에게 반향하는, 즉 인간의 근 감각을 종조작기 측으로 확장하기 위한 연구를 활발하게 수행하고 있다. 이 같이 반향된 힘은 작업자에게 원격존재(telepresence) 감을 가지게 하여 작업효율을 현저하게 향상시킬 수 있다.

원격조작에 관한 연구는 주로 효율적인 제어 기술의 개발,^(1~6) 힘반향 시스템의 동적 거동의 안정성 평가 기법 개발,⁽⁷⁾ 반향되는 힘정보의 왜곡을 줄이기 위한 힘 반향 알고리즘 개발,⁽⁸⁾ 반발력의 정보를 얻기 위한 기법 개발^(9,10) 등에 관해 많이 수행되었다. 1980년대 중반부터는 조작이 용이하고, 종조작기로부터 반향되는 힘을 작업자에게 효율적으로 전달할 수 있는 주조작기의 개발에 관한 연구도 활발하게 수행되고 있다.

최근 들어 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 기술의 급격한 발전은 효율적인 컴퓨터 그래픽스 기법의 사용을 가능하게 하였고, 고 해상도의 화질을 가지기도 실시간으로 가상 환경을 나타낼 수 있게 되었다. 이 같은 컴퓨터 그래픽스 기법들을 이용하면 실제의 종조작기와 작업환경에 매우 유사하게 가상의 종조작기와 작업환경을 나타낼 수 있을 뿐 아니라 이들의 움직임을 실시간으로 관찰할 수 있다. 이 같이 발달된 컴퓨터 그래픽스 기법을 이용하여 개발된 그래픽 시뮬레이터와 실제의 주조작기 및 인터페이스 하드웨어로 구성되는 가상의 원격조작시스템을 구성할 수 있다. 가상 원격조작시스템은 작업자의 시스템 운용 훈련, 효율적인 제어 알고리즘과 힘 반향 알고리즘의 개발, 개발된 알고리즘이 원격조작 효율성과 시스템 안정성에 기여하는 정도의 평가 및 실제의 주조작기와 가상의 종조작기 사이의 작업공간과 힘의 스케일링 변수

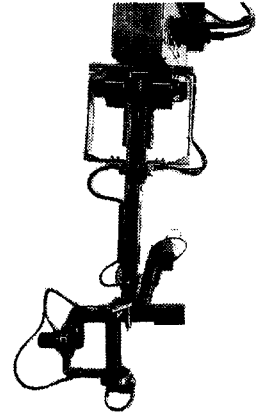


Fig. 1 Force reflection master manipulator

선정 등과 같은 원격조작에 관한 연구에 광범위하게 활용되고 있다.^(11~13)

본 연구에서는 종조작기와 작업환경사이에 발생하는 힘을 반향 할 수 있고, 조작이 용이하며, 위치결정부와 방향결정부 및 말단효과장치로 구성되는 주조작기를 개발한다. 그리고 원격지 작업환경에 관한 시각정보를 원하는 시점에서 실시간으로 제공해 줄 수 있고, 가상의 작업환경과 종조작기를 용이하게 구성할 수 있는 그래픽 시뮬레이터를 Visual C++ 과 OpenGL을 이용하여 개발한다. 또한 이 같이 개발된 주조작기와 그래픽 시뮬레이터를 양방향으로 통신이 가능하게 하여 가상의 원격조작시스템을 개발한다. 이 같이 개발된 가상의 원격조작시스템을 이용하여 두 가지의 물체와 두 가지의 강성 및 여섯 가지의 실험 조건에서 가상 물체 탐색 실험을 수행한다.

2. 힘 반향 주조작기의 개발

본 연구에서는 3자유도의 짐볼(gimbals) 구조를 갖는 방향결정부와 3자유도의 위치결정부, 1자유도의 말단효과장치 등으로 구성된 힘 반향 주조작기를 개발하였다. 따라서 개발된 주조작기는 3차원 공간상에서 작업하는 종조작기의 제어를 위해 6+1 자유도를 가지고 있다. Fig. 1은 개발된 주조작기를 보여준다.

원격조작시스템에서는 작업자가 주조작기를 잡고 시각정보와 힘정보를 참고하여 종조작기를 제

Table 1 Maximum torques, angular resolutions, and rotational ranges of the master manipulators joints

Joint	Max cont. Torque(Nm)	Resolution	Range
1	2.7214	0.015°	+180° ~ -180°
2	2.5918	0.016°	+162° ~ -162°
3	2.2162	0.019°	+67° ~ -247°
4	0.2637	0.077°	+180° ~ -180°
5	0.2079	0.083°	+180° ~ -180°
6	0.2079	0.083°	+180° ~ -180°
7	0.0511	0.339°	+180° ~ -180°

어하여 원격작업을 수행한다. 그러므로 주조작기의 동특성은 작업자의 이질감(heterogeneous feeling) 및 피로(fatigue)에 직접적인 영향을 미치며, 이는 원격 작업 효율에 간접적으로 영향을 미친다. 따라서 주조작기의 동특성에 의한 작업자의 이질감과 피로를 감소시키기 위해 균형이 잘 잡히고 가벼운 주조작기가 되도록 설계하여 제작하였다. 주조작기의 무게를 줄이기 위하여 응력이 크게 발생하는 축 이외의 부위는 알루미늄 70계열의 합금을 사용하여 제작하였다. 그리고 각 링크의 안쪽을 파내어 주조작기의 무게를 줄였으며 그 공간에 동력전달용 타이밍 벨트와 각종 전선을 배치하였다. 또한 각 관절을 구동하는 7개의 액추에이터가 주조작기의 카운터 밸런싱에 주된 역할을 수행할 수 있도록 제작하였다. 7개 조인트의 각 변위는 DC 서보모터에 장착된 엔코더를 이용하여 측정한다.

Table 1은 주조작기의 각 조인트에서 액추에이터의 최대 토크값과, 각 조인트의 각도 해상도 및 각 조인트의 회전 범위를 보여준다. Table 1이 보여주는 바와 같이 주조작기의 작업공간을 최대화하기 위하여 조인트 회전각도를 가능한 크게 하였다. 두 개의 조인트를 제외한 모든 조인트는 360°의 회전 범위를 갖는다. 비록 이 두 조인트의 회전각도가 360°가 되지 않더라도 이들은 360°에 가까운 회전 각도를 가진다.

각 링크의 길이는 작업자 상박(upper arm) 및 하박(lower arm) 길이와 비슷하도록 링크 1의 길이는 280mm로 링크 2의 길이는 270mm로 하였다. 작업자가 인지할 수 있는 관절의 최소 움직임(resolution)은 어깨 관절의 경우 0.8°이고, 팔꿈

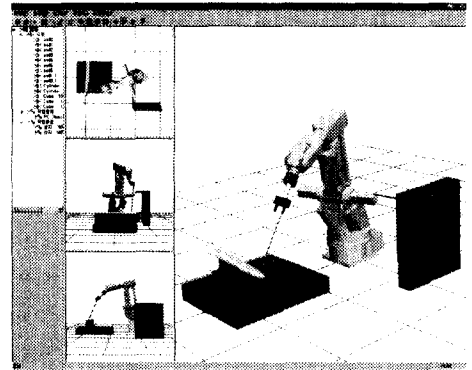


Fig. 2 Graphic simulator

치 관절의 경우는 2.0°이며, 손목관절의 경우는 2.0°이고, 손가락 관절의 경우는 2.5°이다. 그리고 일반적으로 주조작기의 조인트가 작업자의 조인트 움직임을 완벽하게 나타내기 위해서는 작업자 각 관절이 가지는 최소한의 해상도보다 4배 이상의 해상도를 가져야 한다고 보고되었다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에서 개발한 주조작기는 작업자의 상박 길이의 평균과 하박 길이의 평균으로 각 링크 길이를 설계하였으므로 위의 각 관절 최소 움직임 감지를 위한 각도(resolution)를 직접 적용할 수 있다. 또한, Table 1에서 보여주는 바와 같이 본 연구에서 개발한 주조작기의 조인트는 작업자 관절의 최소 움직임 보다 4배 보다 월등히 좋은 해상도를 가지고 있으므로 작업자의 움직임을 완벽하게 나타낼 수 있다고 할 수 있다.

3. 그래픽 시뮬레이터의 개발

그래픽 시뮬레이터는 Windows OS 환경에서 프로그램 언어로 Visual C++을 사용하고, 프로그래머와 인터페이스 하는 그래픽 응용프로그램으로 OpenGL을 사용하여 개발하였다. 그래픽 시뮬레이터는 메뉴 바 영역, 툴 바 영역, 트리 구조(tree structure) 영역 및 뷰(view) 영역으로 구성되었다. Fig. 2는 그래픽 시뮬레이터의 한 장면을 보여준다.

메뉴 바 영역은 주조작기와 종조작기가 통신을 하기 위한 주소를 설정하고 통신망을 연결하거나 중단할 수 있는 기능(data communication)과 해상도와 같은 그래픽 환경을 설정할 수 있는 기능등을 가지고 있다. 툴 바 영역은 현재 작업환경

을 저장하고 필요시 이를 다시 불러올 수 있는 기능(data load/save), 물체를 모델링 할 수 있는 기능(simple modeler), 회전과 이동 기능 및 줌 기능 등을 가지고 있다. 그리고 이 영역에 있는 물체를 회전하고 이동하는 기능을 이용하여 원하는 시점을 세팅할 수 있다. 트리 구조 영역은 현재의 모델링 상태를 나타낸다. 그러므로 현재 가상 원격작업 상황에 사용되는 모든 그래픽 모델은 그래픽 모델들 간의 상호 관계를 분명히 보여 줄 수 있는 트리 구조로 나타내진다. 이 구조를 이용하여 물체들 사이의 최소거리 계산을 위한 두 세트의 물체를 세팅할 수 있다. 그리고 각 물체의 기하학적 속성과 물리적 속성을 바꿀 수 있다. Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 "뷰" 영역을 네 영역으로 나누어 작업 상황을 나타내었다. 즉, 정면, 측면, 평면 및 등방(isometric) 시점(view point)에서 작업 상황을 보여준다. 만약 필요하다면 이들 네 개의 영역 중 하나의 영역만을 보여 줄 수 있게 하였다. 이 같은 화면의 구성은 작업자에게 좀 더 나은 시각정보를 제공해 줄 수 있으리라 생각된다.

본 연구에서 사용하는 그래픽 모델은 볼록하고 평평한 다각형에(convex and flat polygon) 의해 물체가 한 곳도 빠짐이 없이 둘러 싸여있다고 가정하였다. 그리고 참고문헌⁽¹⁵⁾에서 개발된 알고리즘을 이용하여 종조작기와 작업 대상물 사이의 최소거리 뿐 아니라 필요시 종조작기와 주위환경, 즉 장애물과의 최소거리 정보를 계산하여 작업자에게 시각적으로 제공할 수 있게 하였다. 이 같은 물체간 최소거리 정보를 이용하면 비전 시스템으로는 제공하기가 불가능한 종조작기와 주변 작업환경의 충돌 가능성에 대한 경고 메시지를 보낼 수 있다. 그리고 궁극적으로 이 같은 물체간 최소거리 정보는 화면으로부터 제공되는 시각정보에 의지하여 원격작업을 수행하는데 많은 도움을 줄 수 있으리라 생각한다.

본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 주변 환경과 작업 대상물의 그래픽 모델링을 수행할 수 있게 하였다. 한 방법은 그래픽 시뮬레이터 툴 바 영역에 있는 모델링 기능을 이용하는 것이고, 다른 방법은 외부의 CAD 프로그램을 이용하여 모델링한 후 툴 바 영역에 있는 데이터 "load/save" 기능을 이용하여 그래픽 시뮬레이터 내로 불러오는 것이다. 이 그래픽 시뮬레이터는

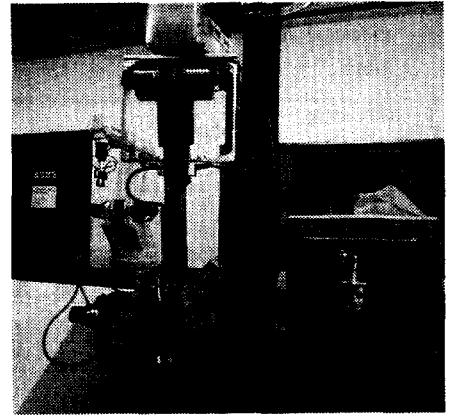


Fig. 3 A virtual teleoperation system

인텔 펜티엄 600MHz CPU와 Winfast Geforce 256 그래픽카드(VGA)가 장착된 퍼스널 컴퓨터를 기반으로 운영되며 1152×826의 해상도와 16비트 칼라에서 Fig. 2에서 보여주는 정도의 그래픽 모델을 75Hz의 속도로 화면을 재생할(refresh) 수 있다.

4. 힘 반향 가상 원격조작시스템의 개발

본 연구에서는 개발된 주조작기와 그래픽 시뮬레이터를 이용하여 가상 원격조작시스템을 구성하였다. 여기서 그래픽 시뮬레이터는 가상의 종조작기와 작업환경을 설정하고 작업자에게 필요한 작업 상황에 관한 시각정보를 제공하는데 사용되었다. Fig. 3은 개발된 가상 원격조작시스템을 보여준다.

Fig. 4의 블록 선도는 작업자의 명령이 종조작기에 전달되는 과정과 가상원격조작시스템에서 가상의 종조작기와 작업 대상물 사이에서 발생하는 힘이 작업자에게 반향되는 과정을 보여준다. Fig. 4에서 "X"는 직교 좌표계에서 주조작기의 손잡이 중심점과 종조작기 툴 중심점의 위치를 나타낸다. "T"는 각 조인트에서의 토크를 나타내며, "F"는 주조작기와 종조작기의 힘을 나타내며, "J"는 주조작기의 자코비안 행렬을 나타낸다. 그리고 아래첨자 "M"은 주조작기와 관련된 항들을 나타내며, 아래첨자 "S"는 종조작기와 관련된 항을 나타낸다.

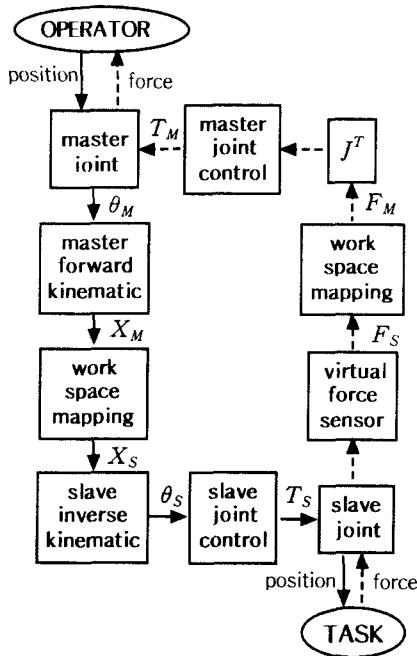


Fig. 4 A block diagram showing the control procedure of the virtual teleoperation system

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 주조작기는 작업자에 의해 직접 구동되며, 주조작기의 움직임은 조인트 각도로 변환된다. 주조작기 정기구학을 이용하여 조인트 각도를 주조작기 손잡이 중심점의 위치와 방향으로 변환한다. 주조작기 손잡이 중심점의 위치와 방향을 좌표계 매핑 기법을 이용하여 종조작기 툴 중심점(tool center point)의 위치와 방향으로 변환한다. 그리고 종조작기 역기구학을 이용하여 종조작기 툴 중심점의 위치와 방향을 종조작기 조인트 각도로 변환한다. 이 같이 구해진 종조작기 조인트 각도는 종조작기를 조종하기 위한 입력으로 사용된다. 그래픽 환경에서 종조작기가 작업을 수행하는 동안, 종조작기와 작업 대상 물체 사이에서 접촉력이 발생한다. 여기서 발생하는 접촉력은 가상의 힘 센서를 사용하여 측정된다. 이 같이 측정된 힘은 힘 매핑 알고리즘을 이용하여 주조작기의 손잡이 중심점의 힘으로 변환된다. 전치된 자코비안 행렬을 이 힘에 곱하여 주조작기의 조인트 토크로 변형시킨다. 여기서 구해진 조인트 토크

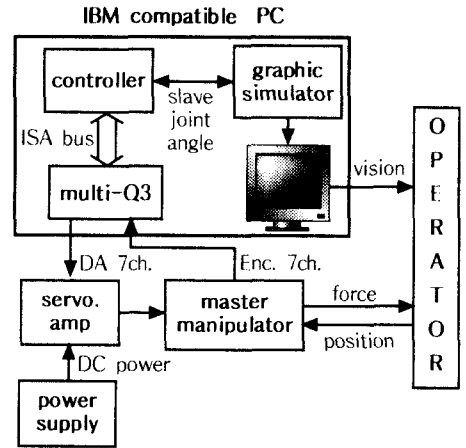


Fig. 5 A schematic diagram showing the hardware interfacing of the virtual teleoperation system

값은 주조작기의 액추에이터 구동 입력으로 사용되며, 이 토크 값은 주조작기를 통하여 스케일된 직교좌표계 상의 힘으로 나타나며 이 힘이 종조작기로부터 발생된 힘이 작업자에게 반향되는 힘이 된다.

Fig. 5는 개발된 가상 원격조작시스템의 하드웨어 인터페이스를 보여주는 개략도이다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 가상의 종조작기와 실제의 주조작기 사이의 양방향 통신을 위해 입/출력 보드를 사용하였다. 가상의 종조작기가 가상의 작업을 수행하는 도중에 발생하는 힘은 7 채널 아날로그 시그널을 이용하여 작업자에게 반향하였고, 작업자로부터 작업명령은 7 채널 엔코더 시그널을 이용하여 가상의 종조작기에 전달하여 가상의 원격작업을 수행하였다.

5. 가상물체 탐색 실험

본 연구에서는 종조작기와 주위 물체와의 접촉을 스프링과 댐퍼가 병렬로 존재하는 계로써 단순하게 모델링하였다. 이 때 가상환경의 종조작기가 주변 환경과 접촉하였을 때 발생하는 힘은 다음 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$F = \lambda(F_K + F_C) \quad (1)$$

식 (1)의 F_K 와 F_C 는 각각 탄성과 댐핑에 의한 힘을 나타내고 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산된다.

$$F_K = K(x - x_{wall}) \quad (2)$$

$$F_C = C\dot{x} \quad (3)$$

여기서 K 는 가상물체의 스프링 상수, C 는 가상물체의 댐핑 상수, λ 는 가상의 종조작기와 가상물체와의 접촉 여부를 나타내는 계수로 접촉시에는 1로 비접촉시에는 0으로 세팅되는 상수이다. x_{wall} 은 가상물체의 표면 위치를 나타내며, x 는 종조작기 툴 중심점의 현재 위치를 나타낸다.

일반적으로 원격조작은 제한된 정보에 의존하여 작업자가 주조작기를 통해 종조작기를 조작하므로 종조작기는 매우 느린 속도로 운용된다. 그리고 종조작기가 작업물에 접촉할 때, 처음 아주 짧은 시간동안의 과도기적 반응 이후에는 종조작기 접촉점의 속도는 작아지므로 댐핑에 의한 힘의 발생은 무시할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 사용하는 가상 힘은 다음 식 (4)와 같은 간략화 된 방법으로 계산되며, 이는 본 논문에서 가상 힘 센서가 종조작기와 작업물 사이의 접촉력을 계산하는데 사용되었다.

$$F = \lambda K(x - x_{wall}) \quad (4)$$

가상 물체 형상 탐색 실험을 위하여 가상 벽과 가상 육면체의 두 종류 물체를 고려하였다. 가상 벽은 종조작기 기준 좌표계에 대하여 y 축 방향으로 -50 mm 지점에 y 축과 수직하게 고정하였다. 그리고 150 mm(x) \times 200 mm(y) \times 200 mm(z) 크기를 가지는 가상 육면체는 x 축 방향으로 $+475$ mm에 중심이 위치하게 고정하였다. 이 두 가상 물체가 각각 0.7 N/mm와 2.2 N/mm의 강성을 가지는 경우에 대해 탐색 실험을 수행하였다. 그리고 각 가상 물체와 각 강성에 대해 다음 6가지의 실험조건을 가지고 형상 탐색 실험을 수행하였다.

- ① 실시간 시각정보만을 이용한 경우
- ② 실시간 힘정보만을 이용한 경우
- ③ 시각정보, 힘정보 모두 실시간으로 이용한 경우
- ④ 시간지연 된 시각정보만을 이용한 경우
- ⑤ 시각정보, 힘정보 모두 시간지연 된 경우

Table 2 Virtual wall exploration result when the force information is used in real time

실험	1	2	3	4	5	6
강 성 (N/mm)	0.7	2.2	0.7	2.2	0.7	2.2
실 시간 힘정보	○	○	○	○	○	○
정 보 실 시간 시각정보	×	×	○	○	×	×
시간지연 시각정보	×	×	×	×	○	○
시간지연 힘정보	×	×	×	×	×	×
평 균 (mm)	-58.01	-52.84	-54.44	-51.38	-54.80	-52.18
분 산 (mm ²)	11.64	1.23	7.75	0.82	9.05	0.62
표준편차 (mm)	3.41	1.11	2.78	0.91	3.01	0.79
작업시간 (sec.)	18.4	15.8	16.0	14.6	19.5	15.1

⑥ 시간지연 된 시각정보와 실시간 힘정보를 같이 이용한 경우

가상 벽의 형상 탐색 실험은 종조작기의 툴 중심점이 가상 벽 위에 직경 30 cm 정도의 원을 그린 후에, 이 위에 두 직선을 십자 모양을 이루게 그리 는 것이다. 그리고 가상 육면체의 형상 탐색 실험 은 가상 육면체의 면을 따라 종조작기의 툴 중심 점을 이동하여 "ㄷ"자 모양을 그리도록 하는 것이 다.

Table 2는 힘정보를 실시간으로 이용하는 경우 의 가상 벽 탐색 실험 결과를 정리하여 보여준다. Table 2에서 평균, 분산, 표준편차는 가상 벽 탐색 을 수행하는 동안에 감지된 벽의 y 좌표 값의 평 균, 분산, 표준편차를 의미한다. 그리고 작업시간 은 종조작기의 툴 중심점이 가상 벽에 원을 그리 기 위해 접촉하는 순간에서부터 십자가 모양을 그리 고 난 후에 떨어지는 순간까지의 시간을 의미한 다. Fig. 6(a)와 6(d)는 각각 실시간 시각정보만을 이용하여 수행한 가상 벽과 가상 육면체 탐색 실험 결과를 보여준다. Fig. 6(b)와 6(e)는 시간지연된 시각정보와 시간지연된 힘정보를 이용하여 수행한 가상 벽과 가상 육면체 탐색 실험 결과를 보여준 다. 여기서 시각정보와 힘정보의 시간지연은 모두 2초로 하였다. Fig. 6(c)와 6(f)는 실시간 시각정보

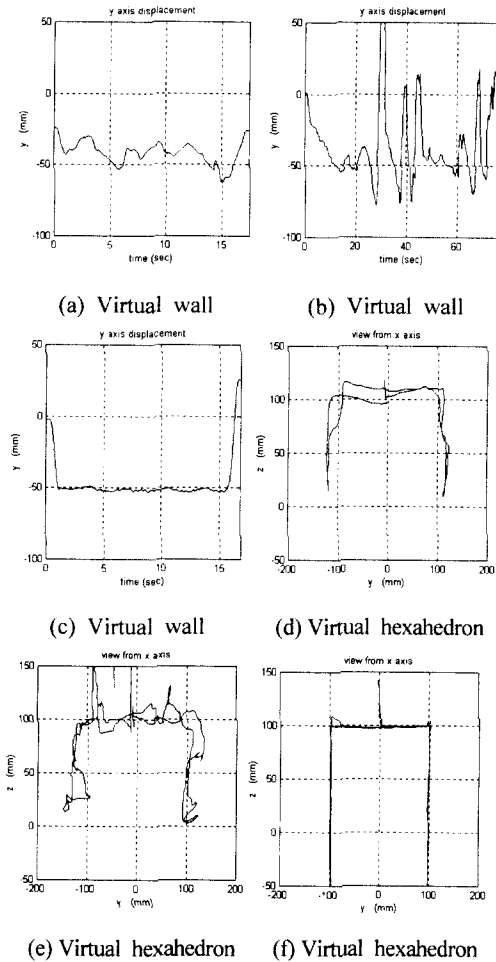


Fig. 6 Virtual wall exploration result(a, b, c) and virtual hexahedron exploration result(d, e, f) (a,d) only with visual infor. (b,e) with time delayed visual and force infor. (c,f) with real time visual and force infor.

와 실시간 힘정보를 이용하여 수행한 가상 벽과 가상 육면체 탐색 실험 결과를 보여준다.

Fig. 6(a)와 6(d) 및 Table 2에서 보여주는 바와 같이 만약에 반향되는 힘정보를 이용하지 않고 2차원 시각정보만에 의존하면 형상 탐색 작업 수행이 용이하지 않음을 알 수 있었다. 이것은 그래픽 시뮬레이터에 의하여 제공되는 2차원적인 시각정보를 이용해서는 작업자가 정확한 깊이 인식을 가질 수 없기 때문이다. Fig. 6(b)와 6(e) 및 Table 2로부터 시간지연된 정보는 원격조작 작업의 효율과

안정성을 크게 저하시킨다는 사실을 확인 할 수 있었다. 이 같은 상황은 물체의 강성이 커짐에 따라 악화되었다. Fig. 6(c)와 6(f) 및 Table 2는 실시간 시각정보에 부가하여 사용되는 실시간 힘정보는 원격조작 작업의 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

실험 결과 가상 벽과 같이 불연속적인 경계면을 가지지 않는 단순한 형상의 탐색 작업에서는 힘정보가 실시간으로 반향되어 이용되는 경우 시각정보의 이용 여부 및 시각정보의 시간지연 여부는 작업성에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 육면체와 같이 불연속적인 경계면을 가지는 좀 더 복잡한 형상의 탐색 작업에서는 힘정보가 작업자에게 실시간으로 반향된다 하더라도 시각정보의 사용여부 및 시간지연 여부가 원격작업의 효율성과 안정성에 많은 영향을 미쳤다. 이것은 시각정보는 힘정보에 의해 불연속적인 경계면을 느끼기에 앞서서 이 같은 불연속적인 경계면을 예측할 수 있게 하기 때문이다. 따라서 불연속적인 경계면을 가지는 물체를 탐색하기 위해서는 실시간 힘정보 뿐 아니라 실시간 시각정보의 제공이 필요함을 알 수 있었다. 또한 가상 물체 탐색 작업을 수행할 때 가상 물체의 강성이 커짐에 따라 탐색 작업의 평균 오차 감소하지만 너무 크면 안정성 저하하는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 종조작기와 작업환경사이에서 발생하는 힘을 반향할 수 있는 위치결정부와 방향결정부 및 말단효과장치의 세 부분으로 구성되는 6+1 자유도의 주조작기를 개발하였다. 그리고 본 연구에서는 원격지 작업환경의 시각정보를 실시간으로 얻기 불가능할 경우 작업 상황을 예측할 수 있는 시각정보를 제공해 줄 수 있고, 가상의 종조작기와 가상의 작업환경을 용이하게 만들 수 있는 Window OS 환경에서 운용되는 그래픽 시뮬레이터를 Visual C++와 OpenGL을 이용하여 개발하였다. 이같이 개발된 힘 반향 주조작기와 그래픽 시뮬레이터를 인터페이스 하드웨어를 이용하여 양방향으로 통신이 가능하게 하여 가상의 원격조작시스템을 개발하였다. 이러한 가상의 원격조작시스템을 이용하여 가상의 종조작기가 가상의 물체를 탐색하는 실험을 수행하였다. 본 연

구에서는 가상 물체 형상 탐색에 각각 0.7 N/mm와 2.2 N/mm의 강성을 가지는 가상 벽과 가상 육체면의 두 가지 종류의 물체를 이용하였다. 각 가상 물체와 각 강성에 대해 6가지의 실험 조건을 가진 경우에 대해 형상 탐색 실험을 수행하였다. 실험 결과 힘정보 없이 그래픽 시뮬레이터로부터 제공되는 시각정보만에 의존하여 형상 탐색 작업을 수행하기는 어려웠다. 그리고 시각정보와 힘정보가 시간지연되는 경우 원격작업의 효율성과 안정성이 크게 저하되었고, 물체의 강성이 증가됨에 따라 이 같은 상황은 악화되었다. 또한 불연속적인 경계 면을 가지지 않는 단순한 형상 탐색의 경우는 힘정보가 실시간으로 제공되는 경우 시각정보의 제공 여부는 작업성에 거의 영향을 미치지 않았으나, 불연속적인 경계 면을 가지는 좀 더 복잡한 형상의 경우는 실시간 힘정보를 이용한다 하더라도 실시간의 시각정보는 불연속적인 경계면을 힘정보를 이용하여 느끼기에 앞서 예측을 할 수 있게 하므로 이 정보의 제공 여부가 작업성에 많은 영향을 미쳤다.

참고문헌

- (1) Mason M. T., 1981, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-11. No. 6, pp. 360~374.
- (2) Kim W. S., Hannaford B., and Bejezy A. K., 1992, "Force-Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telem manipulators with Time Delay," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8. No. 2, pp. 176~185.
- (3) Miyazaki T. and Hagihara S., 1989, "Parallel Control Method for a Bilateral Master-Slave Manipulator," *JRSJ* Vol. 7 No. 5, pp. 46~52.
- (4) Yokokohji Y. and Yoshikawa T., 1994, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators of Ideal Kinesthetic Coupling - Formulation and Experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation* Vol. 10, No. 5, pp. 605~620.
- (5) Sheridan T. B., 1993, "Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No 5, pp. 592~605.
- (6) Colgate J. E., 1993, "Robust Impedance Shaping Telem manipulation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 374~384.
- (7) An C. H. and Hollerbach J. M., 1987, "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators," *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 890~897.
- (8) Ellis R. E., Sarkar N., and Jenkins M. A., "Numerical Methods for the Force Reflection of Contact," *ASME Trans. Dyn. Sys. Meas. Cont.* 119(4), pp. 768~774
- (9) Martin K. F., Lockman H., 1987, "Force Sensing in Magnitude, Direction, and Position," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 286~290.
- (10) Bicchi A. and Salisbury K., David L. Brock, 1990, "Contact Sensing from Force Measurements," Massachusetts Institute of Technology, A.I. Memo No. 1262.
- (11) Diego C. Ruspini, Krasimir Kolarov, Oussama Khatib, 1997, "Haptic Interaction in Virtual Environments," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, IROS Sept. 97 Grenoble, France, pp. 128~133.
- (12) Diego C. Ruspini, Krasimir Kolarov, Oussama Khatib, Aug. 1997, "The Haptic Display of Complex Graphical Environments," *Proc. SIGGRAPH 97*, pp. 345~352.
- (13) Haruo Noma, Yoshifumi Kitamura, Tsutomu Miyasato, Fumio Kishino, 1996, "Haptic and Visual Feedback for Manipulation Aid in a Virtual Environment," *ASME DSC Vol. 58*, pp. 469~476.
- (14) Grigore C. Burdea, 1996, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, INC.
- (15) 오재윤, 김기호, 1998, "삼차원 공간에서 두 다면체 사이의 최소거리 계산을 위한 효율적인 알고리즘의 개발," 한국정밀공학회 제15권 제11호, pp. 130~136.