이동형 햅틱 장치의 실제적 문제점과 그 향상 방안

Practical Issues of Mobile Haptic Interface and Their Improvements

이인, In Lee[1], 황인욱, Inwook Hwang[2], 한경룡, Kyung-Lyoung Han[3], 최오규, Oh Kyu Choi[4], 이진수, Jin S. Lee[5], 최승문, Seungmoon Choi[6]

요약 본 논문은 이동형 햅틱 장치(mobile haptic interface; MHI)의 실제적인 문제점과 그 개선사항들에 대해 다루고 있다. 1) 전체 좌표계에서의 haptic interface point (HIP) 위치 추정 정확도에 대한 개선, 2) MHI 가 사용자와 장애물들을 피해 움직이도록 하는 포텐셜-필드 방식에 기반한 이동 계획 알고리즘, 3) MHI 의 움직임으로부터 발생하는 원하지 않는 힘이 사용자에게 전해지는 것을 막기 위한 closed-loop 컨트롤 등을 소개한다.

Abstract In this paper, we present practical issues in a Mobile Haptic Interface (MHI) and their improvements. The improvements can be categorized in three parts: 1) high-accuracy estimation of the world position of the haptic interface point, 2) motion planning algorithm to move the mobile base while avoiding collisions with the user and other objects, and 3) closed-loop force control to compensate the undesired effect of mobile base dynamics on the final rendering force perceived by the user.

핵심어: Mobile Haptic interface, Large Virtual Environments, Haptics

본 논문은 2008 년 한국과학재단의 No. R01-2006-000-10808-0 및 No. R0A-2008-000-20087-0 연구비 지원에 의해서 연구되었음.

[1] 주저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 통합과정 e-mail: inism@postech.ac.kr

[2] 공동저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 통합과정 e-mail: inux@postech.ac.kr

[3] 공동저자 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정 e-mail: sidabari@postech.ac.kr

[4] 공동저자 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정 e-mail: hyh1004@postech.ac.kr

[5] 공동저자 : 포항공과대학교 전자전기공학과 교수 e-mail: jsoo@postech.ac.kr

[6] 교신저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수; e-mail: choism@postech.ac.kr

1. 서론

햅틱 디스플레이는 사용자에게 가상의 촉감을 제시하여 사용자의 가상환경 내의 실재감 및 몰입감을 높이는 것을 목적으로 한다. 햅틱 디스플레이를 위해 많은 햅틱 장치들이 개발·상용화되어 왔으며, 대표적인 예로 SensAble 의 PHANToM 시리즈를 들 수 있다. 하지만 이러한 상용 햅틱 장비들은 작은 크기와 고정되어 사용해야 하는 특징으로 인해 좁은 작업공간(햅틱 장치가 햅틱 디스플레이를 제공할 수 있는 공간)을 가질 수 밖에 없었다. 이를 극복하고 대형 가상환경에서 사용자가 이동하면서 촉감을 느낄 수 있을 정도로 넓은 작업공간을 제공하기 위해 대형 매니퓰레이터형, SPIDAR 형, 외골격형 등의 다양한 시도가 있었다 [1-3]. 하지만 이러한 시도들은 세밀한 물체 표현 능력·안전성·내구성 등의 측면에서 좋지 않은 성능을 보이고 있다 [4].

이동형 햅틱 장치(Mobile Haptic Interface; MHI)는 이동형 로봇에 일반적인 데스크-탑 햅틱 장치를 얹은 것으로, 이론적으로 무한한 수평방향 작업공간을 가지며 안전성·재사용성·세밀한 물체 표현 능력 등에서 기존의 방법보다 우위에 있는 방법이다. MHI 는 2003 년에 Nitzsche 등에 의해 제안 되었으며, 그들이 만든 MHI 는 간단한 가상의 벽이나 기둥 등을 표현할 수 있었다 [5]. Nitzsche 이후 여러 연구자들이 MHI 에 대한 연구를 해오고 있으며, 가장 최근의 것으로 2 개의 7-자유도 로봇 팔을 2 개의 상하 가이드 유닛에 장착한 형태의 MHI 가 Peer 등에 의해 2007 년에 소개한 바 있으며 [6], 이 연구를 개선하여 2008 년에는 사용자의 팔의 작업공간을 고려한 MHI 이동 계획 방법을 Unterhinninghofen 등이 제안하였다 [7].

본 논문의 저자들은 MHI 의 안전하고 효율적인 이동과 Haptic Interface Point (HIP; 사용자가 가상환경과 상호작용하는 위치)의 정확한 위치 계산, 그에 따른 적절한 힘 표현 등에 대한 연구를 수행하고 있으며, 궁극적으로는 CAVE™ 등의 대형 가상 환경에 MHI 를 실제로 접목시키고, 이 때 발생 가능한 문제들을 연구하고자 한다. 이를 위해 개발한 MHI 시스템인 POSTECH MHI (pMHI)의 초기 모습과 pMHI 의 이동 계획 알고리즘을 2007 년에 소개한 바 있다 [4]. 이 논문은 초기형 pMHI 시스템의 취약점을 보완하고 성능을 향상시키기 위한 내용들을 소개하고 있으며, 그 중에서도 특히 소프트웨어적으로 변경·개선된 사항들에 대해 다루고자 한다.

2. MHI 시스템 구조

〈그림 1〉은 pMHI 시스템의 하드웨어·소프트웨어 구조를 보여주고 있다. 가상환경 내에서의 pMHI 와 사용자의 자세(위치와 기울기)를 얻기 위해 IS-900 SimTracker 트래킹 시스템(InterSense Inc, USA)를 이용하며, 이를 위해 pMHI 와 사용자가 머리에 착용한 착용형 디스플레이 장치(Head Mounted Display)에는

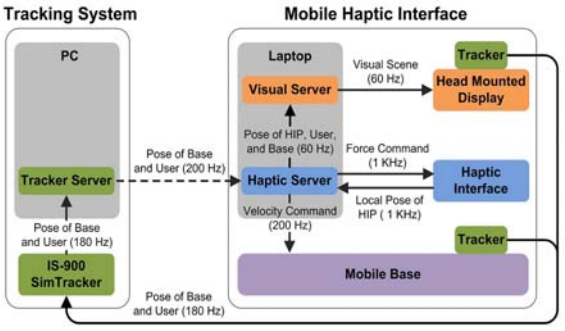

그림 1. pMHI 시스템 구조.

트래커가 장착되어 있다. pMHI 와 사용자의 자세 정보는 트래킹 시스템과 연결된 PC 내부에서 구동되는 프로그램인 트래커 서버가 갈무리하여 무선 네트워크(UDP 프로토콜)를 통해 pMHI 내부에 탑재된 랩탑에 전송한다.

랩탑 내부에서 실행되는 햅틱 서버 프로그램이 트래커 서버에서 보내어진 사용자와 pMHI 의 자세 정보를 수신하며, 이 정보와 데스크-탑 햅틱 장치인 PHANToM 1.5A (SensAble Inc., USA)에서 얻은 local HIP 위치 정보를 합쳐서 1) 전체 좌표계에서의 HIP 의 위치를 계산하고, 2) 사용자가 가상환경과 상호작용하기에 적절한 위치로 pMHI 를 이동시키고, 3) HIP 의 위치와 가상환경의 상태에 따른 촉감 피드백을 사용자에게 제공하고, 4) 비쥬얼 서버에 사용자·pMHI·HIP 의 자세정보를 제공하는 등의 핵심적인 역할을 수행한다.

비쥬얼 서버는 햅틱 서버로부터 제공받은 자세 정보를 바탕으로 적절한 시각 피드백을 사용자에게 제공하는 독립된 프로그램이다. 시각 피드백 루프를 독립적인 프로그램으로 구현하는 것은 다양한 시각 디스플레이 장치에 pMHI 를 접목시킬 수 있는 유연성을 확보할 수 있고 [8], 동시에 둘 이상의 시각 디스플레이 장치(예를 들어, HMD 와 빔 프로젝터)에서 pMHI 의 시각 피드백을 표현할 수 있으므로 사용자뿐만 아니라 주변의 관찰자들에게도 사용자가 바라보는 것과 똑같은 시각 피드백을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

각 시스템 구성 요소 사이에 전달되는 데이터와 전달 방향, 갱신속도 또한 〈그림 1〉에 정리되어 있다.

3. pMHI 하드웨어 개선

pMHI 의 모습이 〈그림 2〉에 나타나 있다. [4]에서 소개한 바 있듯이 초기형 pMHI 는 3 개의 바퀴를 가지는 형태였다. 이 구조는 평평한 바닥에서 별다른 완충장치 없이도 모든 바퀴가 지면에 접하는 것을 보장한다는 장점으로 인해 채택되었으나, 이동 방향에 따른 주행 특성이 많이 다르고 고속 이동 시 바퀴 별로 받는 하중에 차이가 많이 발생하는 등의 문제로 인해 원하는 위치로의 정확한 이동이 어려웠다. 이러한 문제들을 해결하여 보다 쉽고 정확하게 이동할 수 있도록 하기 위해 완충장치가 장착된 4 개의 바퀴를 가지는 구조로 변경하였으며,

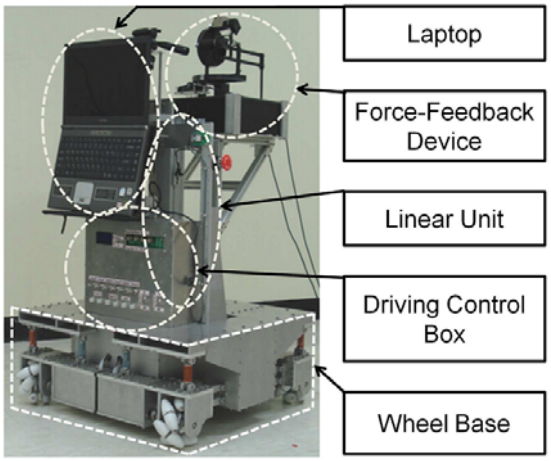

그림 2. pMHI 의 모습.

안정적인 지지를 위해 무게중심을 낮추고 바퀴 사이의 거리를 최대한 넓게 하였다. 그리고 pMHI 의 작업공간을 수직 방향으로 확장하기 위해 햅틱 장치 받침대 부분에 약 50 cm 의 이동 범위를 가지는 리니어 유닛이 추가되었다. 또한, 보다 부드럽고 정확하게 원하는 위치로 pMHI 를 이동시키기 위해 새로운 모터 컨트롤 알고리즘이 적용되었으며, 컨트롤 주기 또한 50 Hz 에서 500 Hz 로 향상되었다. pMHI 의 하드웨어적 개선에 대한 내용은 [9]에 상세히 소개되어 있다.

4. pMHI 소프트웨어 개선

pMHI 의 성능을 개선하기 위해 다양한 노력이 수행되었으며, 이를 크게 HIP 추정 · 위치 이동 · 촉감 피드백의 세가지로 나누어 정리하였다.

4.1 HIP 위치 추정

일반적으로 손이 움직이는 속도에 대해 햅틱 피드백을 안정적으로 하기 위해서는 1 kHz 이상의 샘플링 속도와 매우 높은 위치 정확도가 필요하다. 이러한 요구조건을 만족시키지 못하면 햅틱 렌더링의 안정성이 훼손되어 미세한 진동 또는 소리가 나고, 심한 경우 햅틱 피드백의 방향이 갑작스럽게 변하는 등의 문제가 발생하여 햅틱 렌더링을 제대로 할 수 없게 된다. pMHI 에서 사용된 IS-900 트래킹 시스템의 샘플링 속도(약 180 Hz)와 위치 정확도(약 4 mm)는 햅틱 렌더링을 안정적으로 하기 위한 요구조건에 비해 매우 떨어지며, 때문에 end effector (HIP 의 물리적 위치)에 트래커를 장착하고 트래커로부터 직접 HIP 의 위치를 얻어내는 방법을 사용할 수 없다. 하지만 180 Hz 의 샘플링 속도는 손에 비해 느리게 움직이는 pMHI 의 위치를 추적하는 데는 충분하며, 따라서 트래커로 pMHI 의 전체 좌표계에서의 위치를 추적하고, 보다 높은 샘플링 속도(1 kHz)와 위치 정확도(0.003 mm)를 가지는 PHANToM 으로부터 pMHI 와 HIP 의 상대적인 위치차이를 구하여 트래커에서 얻어진

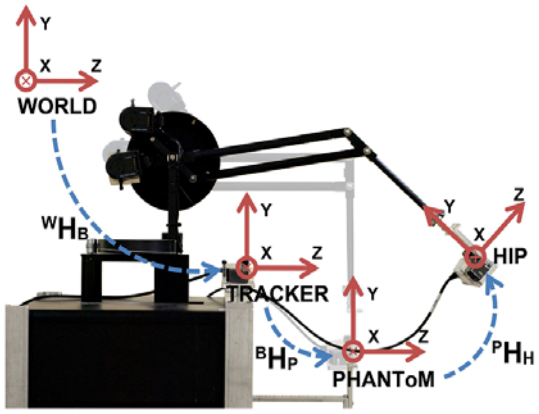

그림 3. HIP 자세 계산 흐름.

pMHI 의 위치에 더하는 방식으로 HIP 의 전체 좌표계에서의 위치를 추정한다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다:

$$ {}^{W}\hat{\mathbf{H}}_{H} = {}^{W}\mathbf{H}_{B}\,{}^{B}\mathbf{H}_{P}\,{}^{P}\mathbf{H}_{H} . \qquad (1) $$

수식에서, 데스크-탑 햅틱 장치의 원점에서 본 HIP 의 자세 ${}^{P}\mathbf{H}_{H}$ 는 햅틱 장치로부터, 그리고 전체 좌표에서 본 pMHI 의 자세 ${}^{W}\mathbf{H}_{B}$ 는 트래킹 시스템으로부터 얻어지는 변환행렬이며, pMHI 에서 본 햅틱 장치 원점의 자세 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 는 pMHI 설계 시 정해지는 상수행렬이다. 〈그림 3〉은 이해를 돕기 위해 〈수식 1〉을 도식화한 것이다.

${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 는 기본적으로는 설계 시 정해지는 값이지만, 제조 및 조립시의 오차와 구동시의 흔들림 등으로 인해 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 는 설계 시 정해지는 값으로부터 멀어지게 된다. 그리고, ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 의 값이 의도된 값에서 멀어질수록 추정되는 전체 좌표계에서의 HIP 의 위치 또한 참값에서 멀어지게 된다. 이로 인해 초기형 pMHI 에서는 HIP 의 위치 추정 오차가 30~50 mm 가량 되었다. 부정확한 HIP 위치 추정은 햅틱 렌더링의 안정성을 해칠 수 있고, CAVE™ 나 see-thru 타입 HMD 와 같이 실제 환경에 시각적 가상환경이 겹쳐지는 형태의 디스플레이 장치에서는 end effector 의 위치와 시각적으로 표현된 HIP 사이의 위치 차이로 인해 사용자를 혼란스럽게 하고 가상환경으로의 몰입을 방해할 수 있다.

트래커를 pMHI 본체의 PHANToM 의 원점과 최대한 가까운 지점에 위치시키고 pMHI 의 각 연결부를 단단하게 죔으로써 흔들림으로 인한 오차는 손쉽게 억제할 수 있다. 하지만, 제조 및 조립시의 오차는 그 크기가 미세하고 PHANToM 의 원점이 허공에 떠있는 점 등으로 인해 직접 측정하는 것이 매우 힘들다. 때문에, end effector 에 임시의 트래커를 추가로 장착하고 해당 트래커에서 얻어진 값과 pMHI 에 장착된 트래커와 PHANToM 에서 얻어지는 값들로부터 오차가 포함된 실제 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 의 값을 추정하였으며, 그 방법은 아래와 같다.

PHANToM 의 작업 공간을 3×3×3 의 격자로 나누어, 모든 교점에 대해 한번씩 end effector 를 위치시키고, 해당 위치에서의 ${}^{W}\mathbf{H}_{B}$ 와 ${}^{P}\mathbf{H}_{H}$, 그리고 HIP 의 실제 자세인 ${}^{W}\mathbf{H}_{H}$ (end effector 에 장착된 트래커로부터 얻어짐)를 구한다. 추정의 정확도를 위해 동일한 데이터 수집 절차를 총 5 번 반복하여 총 135 개의 샘플을 모은다. 추정의 목표는 모든 데이터에 대한 HIP 의 실제 위치와 추정된 위치 사이의 오차제곱합이 최소가 되게 하는 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 를 찾는 것이다. 수식으로 표현하면 다음와 같다:

$$\arg\min_{{}^{B}\mathbf{R}_{P},\,{}^{B}\mathbf{t}_{P}}\left(\sum_{i}^{5}\sum_{j}^{27}\varepsilon_{(ij)}^{2}\right), \tag{2}$$

$$\varepsilon_{(ij)}=\left\|{}^{W}\mathbf{t}_{H(ij)}-{}^{W}\hat{\mathbf{t}}_{H(ij)}\right\|, \tag{3}$$

i 는 샘플 번호를, j 는 샘플링된 교점의 번호를 나타내며, ${}^{B}\mathbf{R}_{P}$ 와 ${}^{B}\mathbf{t}_{P}$ 는 각각 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 의 회전행렬 부분과 이동행렬 부분을 나타낸다. 주어진 데이터에 대해 위 수식에 대한 해는 MATLAB 에 내장된 최소자승문제 풀이 방법인 subspace trust-region 방법을 사용하여 얻을 수 있다.

위의 방법을 통해 구해진 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 에 대한 성능을 평가하기 위해 pMHI 를 제자리에 정지시킨 상태에서 PHANToM 의 작업공간의 임의의 100 개의 점에 대해 HIP 의 실제 위치와 추정한 위치 사이의 평균오차를 계산한 결과, 설계상의 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 를 사용한 경우에 6.5 mm 인 평균오차가 추정한 ${}^{B}\mathbf{H}_{P}$ 를 사용한 경우에는 5.6 mm 로 약 13% 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 기대에 비해 감소량이 다소 미약하지만 이것은 제조와 조립이 정교하게 이루어졌음을 의미하는 것이며, 위의 방법은 제조·조립시의 오차의 영향이 최소화되는 것을 보장해준다는 것에 의의가 있다.

위에서 언급한 과정들을 통해 현재 pMHI 의 전체적인 오차는 IS-900 트래킹 시스템의 정확도를 감안할 때 얻을 수 있는 최소값에 근접한 약 7~10 mm 의 위치오차를 보이고 있다.

4.2 이동 계획

[4]에서 본 논문의 저자들은 규칙에 기반한 MHI 의 이동 계획 알고리즘에 대해 소개하였으며 본 연구에 사용된 형상 공간(configuration space)의 구성과 로봇의 목표 위치와 방향 설정 방법은 [4]에서의 방법과 같다.

규칙에 기반한 로봇의 이동 계획 방법은 단순한 환경에서는 구현이 용이하고 직관적이지만, 규칙의 수가 많아질수록 직관성이 떨어지고 규칙의 정의에 많은 고려를 필요로 하기 때문에 복잡한 환경에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 포텐셜-필드 방법에 기반한 pMHI 이동 계획 알고리즘을 새로이 적용하였다.

일반적으로 모바일 로봇의 형상 (configuration)은 전체 좌표계에서 2차원 위치좌표 $\mathbf{q}_{B}=(x_{B},y_{B})$ 와 방향 B 로

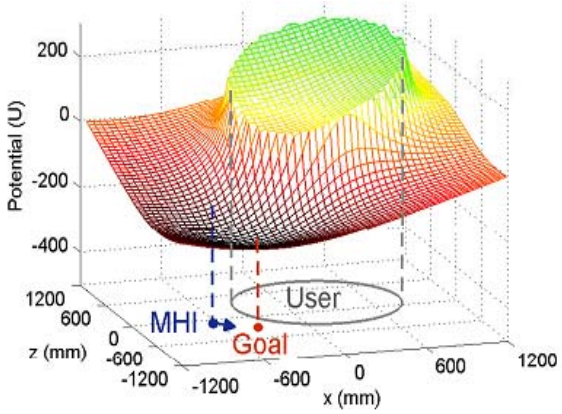

그림 4. pMHI 시스템의 포텐셜 필드의 예.

나타낼 수 있으며 이 정보들은 로봇에 장착된 트래커를 통해서 얻을 수 있다. 포텐셜 필드는 attractive 함수와 repulsive 함수의 weighted-sum으로 나타낼 수 있으며, 모바일 로봇의 형상이 $\mathbf{q}_{B}$ 일 때 로봇에 내려지는 속도 명령 $\mathbf{v}(\mathbf{q}_{B})$ 는 아래의 수식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
&\mathbf{v}(\mathbf{q}_{B})=c_{att}\mathbf{v}_{att}(\mathbf{q}_{B})+c_{rep}\mathbf{v}_{rep}(\mathbf{q}_{B}),\\
&\mathbf{v}_{att}(\mathbf{q}_{B})=\min(\|\mathbf{d}_{goal}(\mathbf{q}_{B})\|,d_{\max})\frac{\mathbf{d}_{goal}(\mathbf{q}_{B})}{\|\mathbf{d}_{goal}(\mathbf{q}_{B})\|},\\
&\mathbf{v}_{rep}(\mathbf{q}_{B})=\frac{1}{\max(\|\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{q}_{B})\|,d_{\min})}\frac{\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{q}_{B})}{\|\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{q}_{B})\|}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Attractive 함수는 현재 위치 $\mathbf{q}_{B}$ 에서 목적지까지의 벡터 $\mathbf{d}_{goal}(\mathbf{q}_{B})$ 에 비례하는 함수로 설정하였으며, repulsive 함수는 장애물 (사용자 또는 가상환경의 경계면 등)로부터 현재 위치까지의 벡터 $\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{q}_{B})$ 에 반비례하는 함수로 설정하였다. repulsive 함수는 pMHI가 존재하는 공간 내에 있는 모든 장애물로부터 각각 계산되어 합산될 수 있다. $d_{\max}$ 와 $d_{\min}$ 은 pMHI의 속도가 지나치게 커지는 것을 제한하기 위한 상한 값이다.

pMHI는 형상 공간 상에서 현재 위치보다 낮은 포텐셜을 가지는 위치를 향해 이동하며 $\nabla U(\mathbf{q}_{B})=-\mathbf{v}(\mathbf{q}_{B})$ 로 정의된다. 〈그림 4〉는 pMHI의 포텐셜 필드의 예와 해당 포텐셜 필드에서의 로봇의 이동방향을 보여주고 있다.

모바일 로봇의 방향에 대한 이동 계획은 목표방향에 대해서 현재 방향과의 오차를 이용한 P-제어로 속도 명령이 내려졌다. 상하 이동의 경우에는 HIP 의 높이와 햅틱 장치의 원점과의 높이 차이를 오차로 보고 역시 P-제어를 통해 속도 명령이 만들어졌다. 방향 이동과 상하 이동에서 오차의 값이 정의된 허용치보다 작은 경우에는 로봇의 이동 방향이 바뀌면서 떨리는 것을 막기 위해 속도는 0 으로 명령되었다.

[10]의 Formaglio 가 제안한 이동 계획 알고리즘에서는 대상 MHI 가 자체적으로 스크린을 가지고 있었고 외부 트래커가 포함되지 않았기 때문에 HIP 의 위치만을 정보로

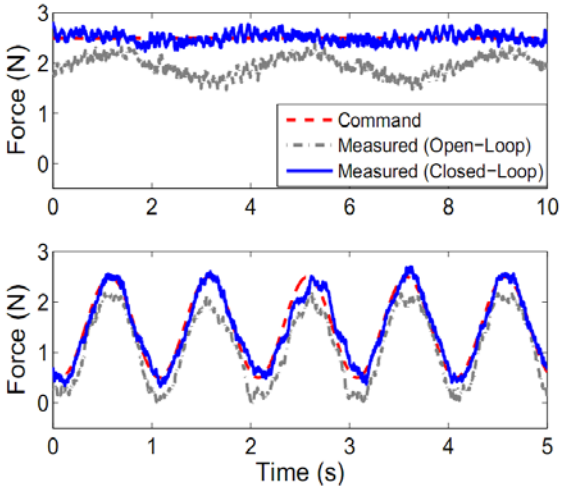

그림 5. pMHI 의 움직임으로 인해 발생하는 힘의 보정 전과 보정 후.

이동 계획이 이루어졌다. 이러한 방법은 효율적이나 MHI 와 사용자와의 충돌방지에 대해서 적극적인 대처가 이루어지지 않았다고 볼 수 있다. [7]의 양손형 MHI 를 위한 또 다른 기존의 이동 계획 알고리즘에서는 본 연구에서와 유사한 방법으로 목표 위치를 설정한다. 그러나 앞서의 두 방법에서는 모두 PD-제어에 기반하여 속도명령이 이루어지기 때문에 작업환경에 있는 다양한 장애물들의 추가 및 충돌회피가 형상공간에 기반한 알고리즘을 사용하는 본 연구에 비해 직관적이지 못하다는 단점이 있다.

4.3 촉감 렌더링

MHI 의 특징 중 하나는 특정 위치에 고정된 것이 아니라 사용자와 HIP 의 위치에 따라 이동한다는 것이며, 이로 인해 햅틱 장치에서 생성하는 힘 피드백 외에 MHI 가 움직이면서 발생하는 힘이 추가로 사용자에게 전해질 수 있다. 이러한 원치 않는 힘의 영향을 줄이고 의도한 만큼의 힘을 사용자에게 전달하기 위해 햅틱 장치의 사용자가 쥐는 부분에 힘/토크 센서를 내장하고, 센서로부터 얻어진 실제 사용자가 받는 힘과 촉감 피드백을 위해 의도한 힘 사이의 오차를 줄이는 방향으로 햅틱 장치가 발생하는 힘을 조절하는 closed-loop 제어 방법을 사용하였다.

HIP 에서의 힘은 10 kHz 의 주기로 측정되었으며 센서로부터의 노이즈를 제거하기 위해 창 크기 10 의 평균 필터와 100 Hz 를 차단 주파수로 하는 저주파통과 필터가 적용되었다. closed-loop 제어 방법으로는 PID-제어기가 적용되었으며 다음의 〈수식 5〉와 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{f}_c(n) = \mathbf{f}_d(n) + \mathbf{f}_{PID}(n), \\
&\mathbf{f}_{PID}(n) = k_p \mathbf{f}_e(n) + k_i \sum_{i=1}^{n} \mathbf{f}_e(i) + k_d \Delta \mathbf{f}_e(n), \\
&\mathbf{f}_e(n) = \mathbf{f}_d(n-1) - \mathbf{f}_m(n),
\end{aligned} \tag{5}$$

표 1. 명령된 힘과 측정된 힘과의 오차 통계
(단위: N)

상수 힘 고정 조건					
축	힘	Open-Loop		Closed-Loop	
		평균	표준편차	평균	표준편차
x	0.0	-0.0034	0.0914	0.0009	0.0875
y	0.63	0.7288	0.0857	0.0022	0.0619
z	2.5	0.5762	0.1924	0.0042	0.0960
가변 힘 추적 조건					
축	힘	Open-Loop		Closed-Loop	
		평균	표준편차	평균	표준편차
x	0.0	0.0495	0.0677	0.0006	0.1068
y	0.63	0.2257	0.1922	0.0001	0.0817
z	0.5-2.5	0.3878	0.1491	0.0009	0.0966

$\mathbf{f}_c(n)$ 은 시각 n 에서의 햅틱 장치에 내려지는 힘 명령 벡터이며 $\mathbf{f}_d(n)$ 은 햅틱 렌더링 알고리즘에서 계산된 목표 힘 벡터를 나타낸다. $\mathbf{f}_{PID}(n)$ 은 PID-컨트롤러에서 계산된 오차를 보상하기 위한 힘 벡터를 나타내며 k_p, k_i, k_d 는 PID 이득을, $\mathbf{f}_m(n)$ 은 힘/토크 센서에서 측정된 현재 작용되는 힘을, $\mathbf{f}_e(n)$ 은 목표 힘과 측정된 힘 사이의 오차를 나타낸다. PID 이득 값의 적절한 선택을 통해 햅틱 렌더링 알고리즘에서 계산된 목표값과 센서에서 측정된 값과의 오차를 효과적으로 보상할 수 있다. 본 연구에서 PID의 이득 값들은 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 결정하였다.

구현된 Closed-loop 제어 방법의 성능을 확인하기 위해 z 축(앞-뒤 방향)으로 2.5 N 의 상수 힘을 렌더링 할 때와 0.5~2.5 N 의 1 Hz 주기의 정현 파형을 갖는 힘을 렌더링 할 때로 나누어, 각각 pMHI 가 z 축으로 0.12 m/s 의 진폭과 4 Hz 의 주기로 움직일 때 사용자가 실제로 받는 힘을 힘/토크 센서를 통해 측정하였다. y 축으로는 중력 보상을 위해 0.63 N 의 힘이 상수로 주어졌다. 〈그림 5〉와 〈표 1〉은 실험에서 측정한 결과를 보여주며, pMHI 의 움직임으로 인한 힘을 보정한 경우 (closed-loop)가 아무런 보정을 하지 않은 경우 (open-loop)보다 의도한 힘을 더 잘 따르는 것을 볼 수 있다.

그러나 closed-loop 제어에서 모바일 로봇의 움직임에 의한 영향이 완전히 보상되지는 않는다. 예로 〈그림 5〉의 위에 나타난 힘이 2.5 N 으로 고정되는 조건에서 힘을 보정하는 경우에도 로봇의 움직임과 일치하는 약 4 초의 주기로 힘의 크기가 오르내리는 것을 볼 수 있다. 또한 이보다 높은 주파수의 노이즈들이 관찰되며 이것은 메카넘 바퀴의 접촉면이 다른 보조바퀴로 바뀌는 경우와 같은 모바일 로봇의 역학 관계에서의 비선형성으로 인해 나타난다.

현재 보정된 힘 값과 목표값과의 오차는 사람이 느낄 수 있는 차이 (JND; Just Noticeable Difference)에 비해 크지 않다 (2.5 N 의 기준 힘일 때 0.2 N [11]). Closed-loop 제어 성능은 PID 의 이득값 조정을 통해 향상시킬 수 있으나 사용된 햅틱 장치인 PHANToM 의 역학적 안정성이

충분하지 못하여 더 높은 이득 값에서는 공진과 같은 불안정한 상태가 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 pMHI 의 성능을 향상시키기 위해 변경 및 개선된 사항들에 대해 소개하였으며, 그 중에서도 특히 소프트웨어적인 개선사항들이 중점적으로 다루어졌다. 우선 HIP 의 위치 정확도를 높이기 위한 노력이 소개되었으며, 포텐셜-필드 방법에 기반한 이동 계획 알고리즘이 소개되었다. 또한, pMHI 의 움직임으로 인해 발생한 원치 않는 힘이 사용자에게 전해지는 것을 막기 위해 적용한 closed-loop 제어 방법이 소개되었다.

이러한 노력들을 바탕으로, 개선된 pMHI 시스템은 기존의 시스템에 비해 보다 복잡한 형태의 가상 물체에 대한 시각적·촉각적 피드백을 사용자에게 사실적으로 제공할 수 있게 되었으며, 〈그림 6〉은 이러한 pMHI 시스템을 이용한 가상 환경의 시연 모습을 보여주고 있다. 시연을 위해 약 1 만 폴리곤으로 구성된 길이 1.67 m, 너비 0.46 m, 높이 1.0 m 의 소 모델이 채택되었으며, HIP 의 위치는 빨간 구로써 표현하여 사용자에게 자신이 만지고 있는 부분을 시각적으로 인지할 수 있도록 하였다 (〈그림 6(c)〉 참조).

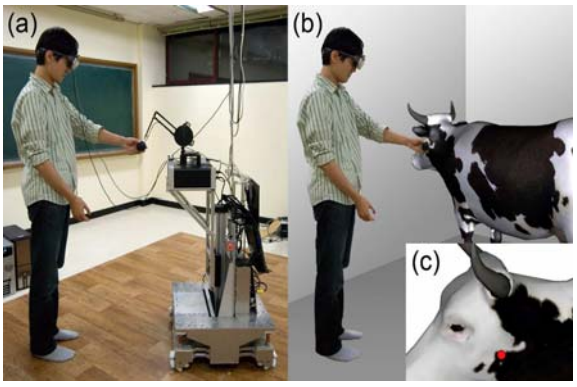

그림 6. (a) pMHI 의 시연 모습, (b) 사용자가 체험하고 있는 가상환경의 모습, (c) 사용자 시점에서의 가상환경.

참고문헌

[1] F. P. Books, M. Ouh-Young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick, "Project GROPE – Haptic Displays for Scientific Visualization," In *Proceedings of the 17th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 177–185, 1990.

[2] L. Buoguila, M. Ishii, and M. Sato, "Multi-Modal Haptic Device for Large-Scale Virtual Environment," In *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Multimedia*, pp. 277–283, 2000.

[3] N. Hashimoto, S. Jeong, Y. Takeyama, and M. Sato, "Immersive Multi-Projector Display on Hybrid Screens with Human-Scale Haptic and Locomotion Interfaces," In *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds*, pp. 361–368, 2004.

[4] 이채현, 이인, 최승문, "이동형 햅틱 디스플레이를 위한 동작 계획," *한국 HCI 학술대회논문집*, pp. 578–584, 2007.

[5] N. Nitzsche, U. D. Hanebeck, and G. Schmidt. "Design issues of mobile haptic interfaces," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 20, No. 9, pp. 549–556, 2003.

[6] A. Peer, Y. Komoguchi, and M. Buss. "Towards a mobile haptic interface for bimanual manipulations," In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 384–391, 2007.

[7] U. Unterhinninghofen, T. Schauss, and M. Buss, "Control of a mobile haptic interface," In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2085–2090, 2008.

[8] E. Dorjgotov, S. Choi, S. R. Dunlop, and G. R. Bertoline. "Portable haptic display for large immersive virtual environments," In *Proceedings of the 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 06)*, pp. 321–327, 2006.

[9] K. L. Han, O. K. Choi, I. Lee, I. Hwang, J. S. Lee, and S. Choi, "Design and control of omni-directional mobile robot for mobile haptic interface," In *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1290–1295, 2008.

[10] A. Formaglio, D. Prattichizzo, F. Barbagli, and A. Giannitrapani, "Dynamic performance of mobile haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 559–575, 2008.

[11] X. D. Pang, H. Z. Tan, and N. I. Durlach. "Manual discrimination of force using active finger motion," *Perception & Psychophysics*, Vol. 49, No. 6, pp. 531–540, 1991.