

이동형 햅틱 디스플레이를 위한 동작 계획

Motion Planning for Mobile Haptic Display

이채현, Chaehyun Lee, 이인, In Lee, 최승문, Seungmoon Choi

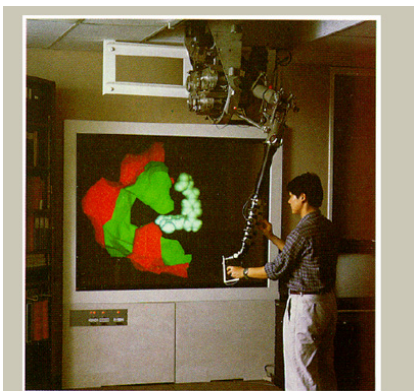
포항공과대학교 컴퓨터공학과 가상현실 연구실

요약 사용자는 햅틱 장비를 통해 촉감을 느낄 수 있다. 하지만 일반적인 햅틱 장비들은 바닥에 고정된 형태이고, 또한 장치의 크기가 제한되어 있으므로, 제한된 작업공간을 가진다. 이로 인해 사용자들은 햅틱 장비의 작업공간보다 작은 물체 혹은 작업공간에 맞게 축소된 물체만을 느낄 수 있다. 이러한 햅틱 장비의 한계를 극복하고자, 햅틱 장비와 이동형 로봇을 결합한 이동형 햅틱 디스플레이를 제안한다. 이동형 햅틱 디스플레이를 위한 시스템 구성을 소개하고, 이동형 로봇의 움직임을 조종하기 위한 새로운 알고리즘을 제안한다. 이러한 이동형 햅틱 디스플레이를 사용하면 사용자는 햅틱 장비의 작업공간보다 큰 물체를 느낄 수 있으며, 가상 환경을 자유롭게 이동하면서 햅틱 피드백을 받을 수 있다.

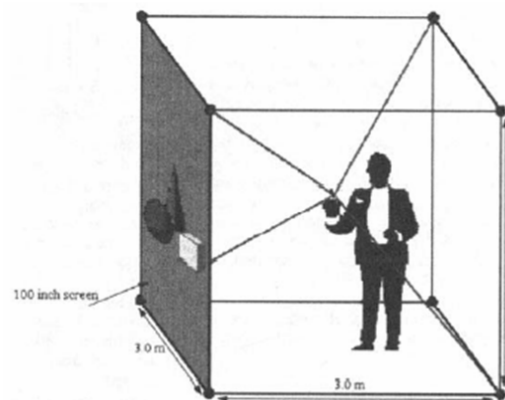
핵심어: Haptics, Mobile Haptic Display, Large Virtual Environments

1. 서론

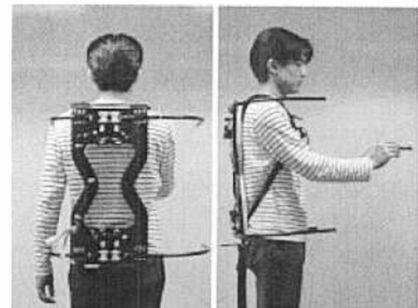
햅틱 디스플레이는 햅틱 장비를 통해 사용자에게 촉감을 제시하고, 이를 통해 가상환경 내의 사용자의 실재감 및 몰입감을 높이는 것을 목적으로 한다[1]. 하지만 대부분의 상용 햅틱 장비들이 고정된 장치이고, 제한된 작업공간을 가지고 있다. 그러므로 사용자는 햅틱 장비의 작업공간보다 작은 물체나 실제보다 작은 크기로 축소된 물체만을 촉감으로 느낄 수 있다. 이를 극복하기 위해서 대형 매니퓰레이터형, SPIDAR형, 외골격형 등의 대형 환경용 햅틱 장비가 개발되고 있다.<그림1>



(a) GROPE - manipulator type



(b) SPIDAR – tensioned string



(c) HapticGEAR- exoskeleton type

그림 1. 대형 환경용 햅틱 장비의 예

대형 매니플레이터형은 대형 환경의 작업 공간의 크기에 맞추어 제작된 대형의 햅틱 장비를 말한다[2]. SPIDAR형은 사용자가 손으로 잡는 도구를 여러 개의 끈으로 연결하여 각 끈들의 장력을 조절함으로써 힘을 전달해 주는 장치를 말한다[3][4]. 외골격형 햅틱 장비는 사용자의 팔, 어깨 등에 착용하여 사용자가 입고 움직일 수 있는 형태의 기계적 장치이다[5]. 각각의 플랫폼의 장단점은 <표1>에 정리되어 있다.

표 1. 대형 환경용 햅틱 장비의 형태별 장단점

대형 매니플레이터형	SPIDAR 형	외골격형	이동형 햅틱 디스플레이	
위치측정분해능	좋음	매우 나쁨	중간	매우 좋음
작업공간 크기	좋음	좋음	매우 좋음	매우 좋음
안전성	매우 나쁨	중간	중간	매우 좋음
물체세부특징재현	나쁨	매우 나쁨	나쁨	매우 좋음
고강도 재현	매우 좋음	중간	나쁨	좋음
재사용성	매우 나쁨	매우 나쁨	매우 좋음	매우 좋음

이외에도, 작은 햅틱 장비의 작업공간을 사용자의 환경 인지에 방해를 주지 않을 정도로 점진적으로 이동시켜 대형 환경을 느낄 수 있도록 하는 방법도 연구되고 있다[6].

이동형 햅틱 디스플레이의 개념은 2003년에 소개되었고 [7], 초보적 형태의 프로토타입이 2005년 초에 햅틱스에 관련된 학술회의에서 전시되었다[8]. 본 논문에서는 포항공대 가상현실 연구실과 로보틱스 및 자동화 연구실에서 공동으로 개발하고 있는 이동형 햅틱 디스플레이<그림 2>를 위한 시스템을 소개하고, 이동형 햅틱 장비에 적합하도록 개발된 동작 계획 알고리즘을 설명한다.



그림 2. 이동형 햅틱 디스플레이의 개념도

2. 시스템 구성

이동형 햅틱 디스플레이란 일반적인 데스크톱 햅틱 장비 하단에 이동형 로봇을 추가하여 사용자의 움직임에 따라 이동형 로봇을 적절히 움직여줌으로써, 사용자로 하여금 마치 햅틱 장비의 작업공간이 한계가 없는 것처럼 느끼도록 하는 시스템이다. 우리는 이 장치를 위해 시스템을 <그림 3>과 같이 크게 두 부분으로 나누었다.

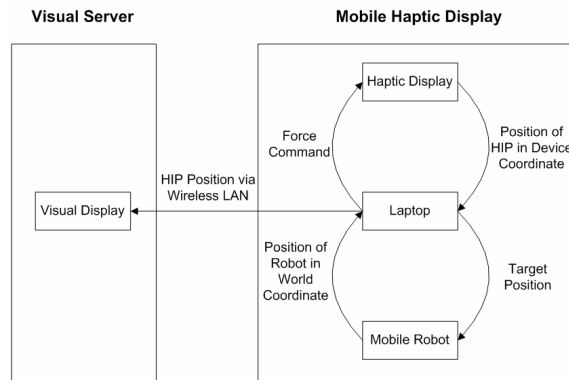


그림 3. 시스템의 구성도

2.1 이동형 햅틱 디스플레이

이동형 햅틱 디스플레이에서는 이동형 로봇 내부에 장착된 휴대용 컴퓨터가 햅틱 장비와 이동형 로봇을 제어한다. 먼저 이동형 로봇에 부착된 위치추적장치로부터 전체 좌표계에서의 로봇 위치를 추정하고, 햅틱 장비로부터 Haptic Interface Point (HIP)의 위치를 구한 다음, 전체 좌표계에서의 HIP 위치를 계산한다. 이를 기반으로 HIP와 다른 물체와의 충돌을 계산한 뒤, 햅틱 장비에게 적절한 Force 명령을 준다. 그리고 현재 이동형 로봇의 위치와 HIP의 위치로부터 사람의 위치를 추정한 뒤, 이를 기반으로 이동형 로봇의 다음 위치를 결정한다. 그리고 최종적으로 전체 좌표계에서의 HIP 위치를 Visual 서버로 무선랜을 통해 전송한다.

현재 포항공대에서 개발하고 있는 이동형 햅틱 디스플레이는 <그림 4>와 같으며, 3개의 전방향성 바퀴로 움직이는 이동형 로봇과 PHAMToM Premium 1.5 햅틱 장치로 구성되어 있다.

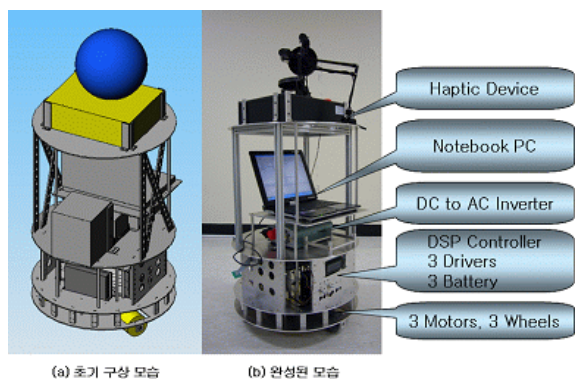


그림 4. 현재 개발되고 있는 이동형 햅틱 디스플레이

2.2 Visual 서버

Visual 서버에서는 이동형 햅틱 디스플레이로부터 HIP의 현재 위치를 전송 받은 다음, 이를 이용하여 사용자에게 가상환경의 화면을 구성하여 보여준다.

3. 로봇 동작 계획

이동형 로봇은 기본적으로 사용자와 충돌하지 않도록 움직여야 한다. 또한 이동형 햅틱 디스플레이에서 햅틱 장비로 사용한 PHANTOM Premium 1.5의 제작사인 Sensable사에 따르면, 햅틱 장비의 전체 가동 범위 중에서 장비가 주어진 힘을 정확하고 확실하게 전달할 수 있는 작업공간은 <그림 5>와 같다[9].

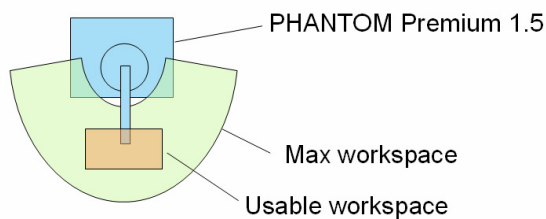


그림 5. PHANTOM의 작업공간과 안정적인 영역(평면도)

즉, 사용자가 햅틱 장비로부터 가장 정확한 힘을 전달 받기 위해서는 사용자의 손이 최대한 햅틱 장비의 가동 범위 중앙에 위치하도록 이동형 로봇을 움직여야 한다.

이러한 요구 조건들을 고려하면서 로봇을 적절히 움직이도록 하기 위한 로봇 동작 계획 알고리즘을 개발하였다.

3.1 형상 공간(Configuration Space)의 구성

로봇 동작 계획 알고리즘에서 로봇의 움직임을 단순히 하기 위해서 x, y, θ 로 이루어지는 3차원의 형상 공간(Configuration Space)을 정의하였다. <그림 6(b)>는 이동형 로봇의 일반적인 작업 공간을 위에서 본 그림이다. 3차원의 형상 공간 안에서 로봇은 하나의 점으로 표현되고, 로봇의 방향은 z 축에 대응된다. 그리고 사용자는 이동형 로봇과 충돌하지 않아야 하므로, 사용자의 크기와 이동형 로봇의 반지름의 합을 반지름으로 가지고, 로봇의 방향에 상관없이 충돌하지 않아야 하기 때문에, 형상 공간 안에서 하나의 큰 원기둥의 장애물로 대응된다. <그림 6>에서 (a), (c), (d)는 작업공간 (b)의 상황과 일치하는 형상 공간을 각각 위, 앞, 옆에서 바라본 그림이다. 이동형 로봇의 동작 계획 알고리즘은 이렇게 정의된 형상 공간 안에서 원 기둥 형태의 장애물(사용자)을 피해 목표 지점까지 다다르는 3차원 상의 경로를 만들어 내는 것을 목표로 한다.

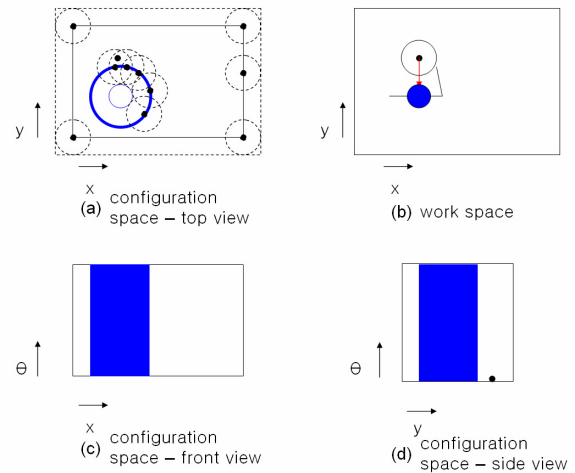


그림 6. 형상 공간의 구성

3.2 로봇 목표 위치와 방향 설정

이동형 로봇의 목표 위치는 로봇이 사용자와 충돌하지 않고, 이동 중에 햅틱 장비의 작업공간이 사람의 손을 벗어나지 않도록 하기 위해 <그림 7>과 같이 사용자의 현재 위치와 손의 위치(HIP의 위치)를 사용하여 사용자와 사용자의 손과 로봇의 위치가 일직선이 되도록 설정된다. 그리고 방향은 햅틱 장비가 항상 사용자를 보고 있을 수 있도록 이동형 로봇은 사용자와 마주보는 방향으로 설정된다. 사용자와 이동형 로봇 사이의 거리는 사용자가 안정적인 영역에서 힘을 전달 받을 수 있도록 하기 위해, 사용자의 팔의 길이와 이동형 로봇의 반지름만큼 더한 거리를 유지한다. 이와 같은 로봇의 목표 위치 설정은 사용자의 손의 움직임에 따른 이동형 로봇의 움직임을 단순화시키며, 항상 사용자와 일정 거리를 두고 움직이게 되므로, 사용자와 이동형 로봇간의 충돌을 근본적으로 막을 수 있다.

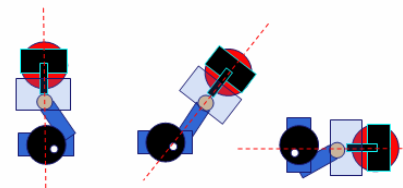


그림 7. 사용자의 손의 움직임에 따른 로봇의 목표 위치

3.3 로봇의 경로 설정

이동형 로봇의 현재 위치와 목표 위치 사이의 거리가 가까우면, 이동형 로봇은 다음 목표 위치로 직선을 그리며 나아가면 된다. 하지만, 사용자가 순간적으로 많이 움직여서 로봇의 현재 위치와 목표 위치 사이의 거리가 멀어지면, 사용자로부터 크게 벗어나지 않으면서도 사용자와 충돌하지는 않도록 사용자 주위를 부드러운 곡선을 그리며 나아가야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 <그림 8>과 같은 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘에서 π 는 사용자로부터 이동형 로봇의 현재 위치와 목표 위치 사이의 각도를 나타내고, π' 는 알고리즘에서 정의한 각도, d 와 d' 은 각각 이동형 로봇과 사용자 사이의 거리, 이동형 로봇과 사용자 사이에 유지

되어야 하는 거리를 나타낸다.

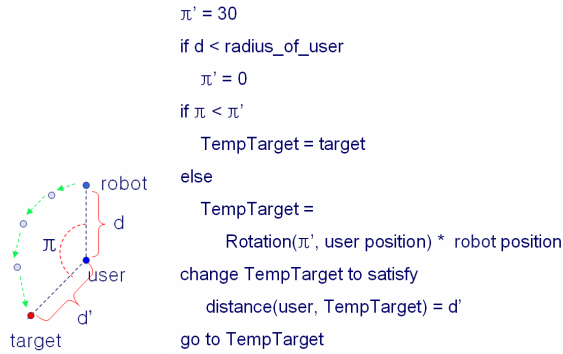


그림 8. 로봇 동작 계획 알고리즘

본 논문에서 제안한 동작 계획 알고리즘은 로봇의 현재 위치와 목표 위치에 따라 크게 세 가지로 나뉘어 경로를 설정한다.

3.3.1 로봇과 사용자가 충돌한 경우

<그림 9>부터 <그림 11>까지는 모두 형상 공간을 위에서 본 그림이며, 작은 점은 형상 공간 상에서 로봇의 현재 위치를 나타내고, 작은 사각형은 3.2절에서 설명된 로봇의 목표 위치를 나타낸다. 그리고 큰 원은 형상 공간 상에서의 사용자를 나타낸다.

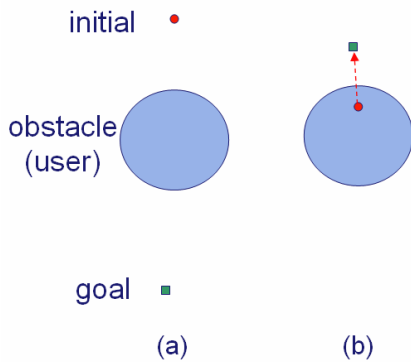


그림 9. 로봇과 사용자가 충돌하는 경우

알고리즘에서 가장 먼저 확인하는 경우는 <그림 9>와 같이 로봇과 사용자가 충돌한 경우이다. 물론 알고리즘 자체에서 근본적으로 이동형 로봇이 사용자와 충돌하지 않도록 경로를 설정하지만, 로봇 바퀴의 미끄러짐이나 명령 처리 오류 등으로 인해 사용자와 충돌하는 경우가 발생할 수 있다. 형상 공간에서 작은 점(로봇의 현재 위치)이 큰 원(사용자) 안에 있는 경우 로봇이 사용자와 부딪힌 것을 나타내므로, 이동형 로봇을 사용자로부터 떨어지도록 해야 한다. 이런 경우, 동작 계획 알고리즘상의 π' 가 0으로 설정되어, 임시 목표 위치가 사용자로부터 가장 빨리 벗어날 수 있는 방향으로 설정되고, 이동형 로봇은 빠른 속도로 사용자에게서 벗어나게 된다.

3.3.2 목표 위치로 바로 나아가는 경우

두 번째 경우는 이동형 로봇과 사용자가 충돌하지 않았거나, 충돌에서 벗어난 후에 적용되는 경우이며, <그림 10>에서와 같이 사용자로부터 이동형 로봇의 현재 위치와 목표 위치 사이의 각도 π 가 알고리즘에서 정의한 각도 π' 보다 작을 때 적용된다.

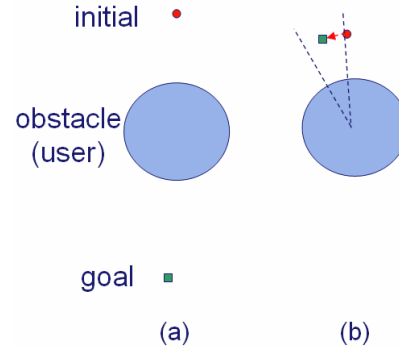


그림 10. 로봇이 목표 위치로 바로 나아가는 경우

실제로 이동형 햅틱 디스플레이에 이 동작 계획 알고리즘을 적용시켜보면 대부분의 경우가 여기에 해당된다. 이 경우에는 별다른 설정 없이 이동형 로봇이 목표 위치를 향해 일직선으로 나아가도록 설정된다.

3.3.3 임시 목표 위치를 설정하는 경우

세 번째 경우는, 사용자가 순간적으로 많이 움직여서 이동형 로봇의 현재 위치와 사용자, 목표 위치 사이의 각도 π 가 알고리즘에서 정의한 각도 π' 보다 큰 경우이다.

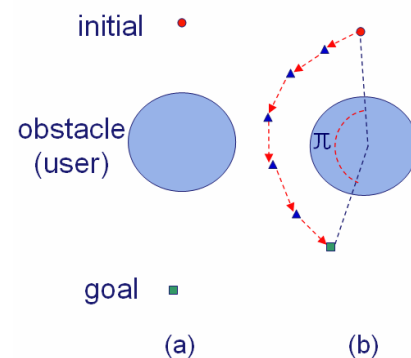


그림 11. 로봇이 목표 위치로 바로 나아가지 못하는 경우

이 경우, 이동형 로봇은 사용자와 충돌하지 않으면서도 사용자가 햅틱 장비를 계속 잡고 있을 수 있도록 <그림 11>과 같이 사용자로부터 일정 거리를 유지하는 곡선을 따라 움직여야 한다. 이를 위해 알고리즘에서는 이동형 로봇의 현재 위치와 최종 목표 위치 사이에 임시 목표 위치들을 설정하고, 이동형 로봇이 임시 목표 위치들을 따라 나아가게 함으로써, 이동형 로봇이 적절한 곡선 형태의 경로를 따라 움직이도록

한다. <그림 11>에서 삼각형들은 알고리즘에서 설정된 임시 목표들을 나타낸다.

3.4 로봇의 방향 설정

이동형 로봇의 동작 계획에서 위치뿐만이 아니라, 이동형 로봇의 방향을 설정하는 것도 중요하다.

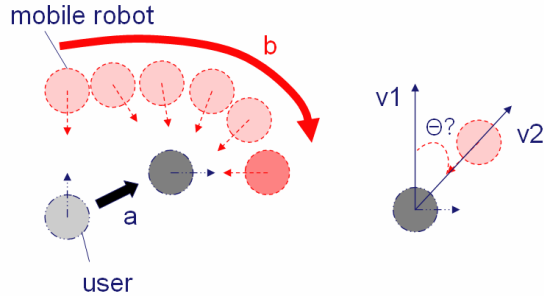


그림 12. 이동형 로봇의 방향 설정

<그림 12>에서 보는 것과 같이 사용자가 **a** 방향으로 움직이면 동작 계획 알고리즘에 따라 이동형 로봇은 **b** 모양의 곡선을 그리며 움직이게 된다. 이때, 이동형 로봇은 햅틱 장비의 작업공간이 최대한 사용자 쪽을 향하도록 방향이 설정되어야 한다. 이를 위해 매 순간마다 이동형 로봇의 전체 좌표계에서의 방향, θ 를 아래 식과 같이 계산한다.

$$\theta = \arccos\left(\frac{\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_2}{|\bar{v}_1| * |\bar{v}_2|}\right) \quad \text{sign} = \text{sign}(\bar{v}_1 \times \bar{v}_2)$$

여기에서 $\bar{v}_1$ 은 <그림 12>에 나타나있듯이 사용자로부터 한쪽 축 방향으로 나온 벡터이고, $\bar{v}_2$ 는 사용자에서 이동형 로봇으로 향하는 벡터이다. 이 두 벡터 사이의 각도 θ 는 위 식에도 나와있듯이, 내적의 성질을 이용하여 구할 수 있다. 이때, θ 의 방향은 두 벡터를 외적 하여 구한다.

4. 결과

동작 계획 알고리즘의 성능을 확인하기 위해서 제한된 최대 속도와 각속도 하에서 이론적으로 이동형 로봇이 햅틱 장비의 작업공간이 사용자의 손을 벗어나지 않도록 유지하면서 사용자의 움직임을 어디까지 쫓아갈 수 있는지를 시뮬레이션하여 그래프로 나타내 보았다.<그림 13(a)> 이 시뮬레이션에서는 계산의 편의를 위해 로봇은 항상 최대 속도를 낼 수 있다고 가정하였고, 사용자의 손이 햅틱 장비의 작업공간 안에 내접하는 구에 포함되면 이동형 로봇이 사용자의 움직임을 문제없이 쫓아간 것으로 하였다.

4.1 이동형 로봇의 최대 속도 변화에 따른 성능 평가

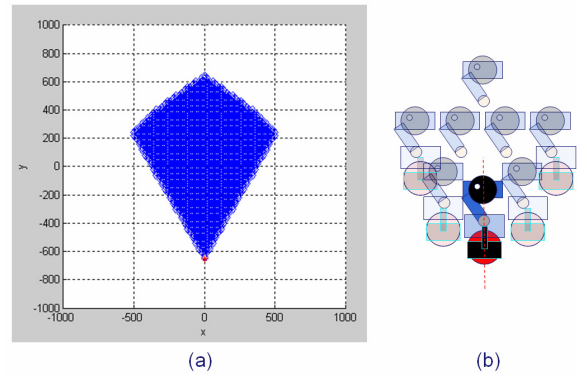


그림 13. 사용자의 움직임에 대한 이동형 로봇의 반응

<그림 13(a)>는 이동형 로봇이 쫓아갈 수 있는 사용자의 위치를 나타낸 그래프이고, <그림 13(b)>는 이를 이해하기 쉽게 그림으로 도식화 한 것이다. 초기에 사용자는 (0, 0)의 위치에서 이동형 로봇을 바라보며 서 있고, 이동형 로봇은 사용자의 맞은 편에 서 있다. <그림 13(a)>그래프는 1초 뒤의 사용자의 움직임에 대하여 이동형 로봇이 적절하게 쫓아간 경우를 점으로 찍어 영역으로 표시하였다. 그래프의 단위는 mm이다. 점이 찍힌 영역이 넓을수록 이동형 로봇이 사용자를 잘 쫓아가며, 동작 계획 알고리즘의 성능이 좋다고 볼 수 있다.

4.1.1 이동형 로봇의 최대 각속도에 따른 성능의 변화

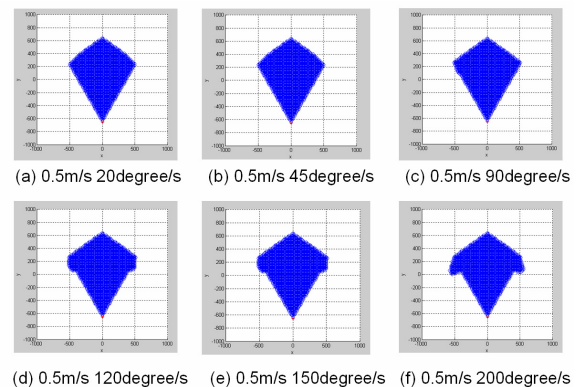


그림 14. 최대 각속도에 따른 영역의 변화

<그림 14>는 이동형 로봇의 최대 선속도는 동일하게 하고, 최대 각속도 변화시켰을 때의 영역의 변화를 나타낸 그림이다. <그림 14>와 <그림 15>의 결과 그래프에서 단위는 <그림 13>의 단위와 같다. <그림 14>의 결과에서 볼 수 있듯이, 사용자의 방향 변화가 없다면 이동형 로봇의 최대 각

속도에 따른 영역 변화는 미미하다. 특히, 사용자의 안전을 고려하였을 때 일반적인 이동형 로봇에서 실질적으로 낼 수 있는 최대 각속도인 45~90°/s에서의 영역의 차이는 거의 없다.

4.1.2 이동형 로봇의 최대 선속도에 따른 성능의 변화

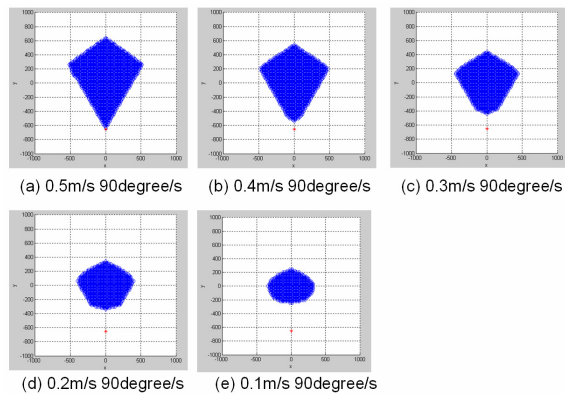


그림 15. 최대 선속도 변화에 따른 영역의 변화

반면, <그림 15>에서 볼 수 있듯이 이동형 로봇의 최대 각속도를 고정하고 최대 선속도를 변화시켰을 때 최대 선속도에 따른 영역의 변화는 매우 크다. 최대 선속도가 0.5m/sec인 경우에는 사용자가 전후 좌우로 약 0.5m까지 움직인 영역 대부분을 포함하지만, 최대 선속도가 0.1m/sec인 경우에는 사용자의 처음 위치에서 0.2m까지 움직인 영역만을 포함한다. 이 그래프들을 통해서 이동형 로봇의 최대 선속도가 줄어들수록 사용자가 움직일 수 있는 범위가 좁아지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 최대 선속도가 0.3m/sec 이하로 떨어지면 그래프의 영역이 급속도로 작아지는 것을 확인할 수 있다.

4.2 시뮬레이터를 이용한 성능 평가

이동형 로봇의 동작 계획 알고리즘이 로봇을 사용자와 충돌하지 않으면서도 사용자의 손이 햅틱 장비의 작업공간 안에 위치하도록 움직인다는 것을 확인하기 위해서 <그림 16>과 같은 시뮬레이터를 개발하여 테스트하였다. <그림 16>에 나와 있는 시뮬레이터는 우측 상단부터 각각 이동형 로봇의 작업 공간, 동작 계획 알고리즘에서 사용하는 형상 공간을 위, 앞, 옆 시점에서 본 화면을 실시간으로 보여주므로, 이동형 로봇과 사용자의 움직임에 따른 형상 공간의 변화를 쉽게 알 수 있도록 도와준다.

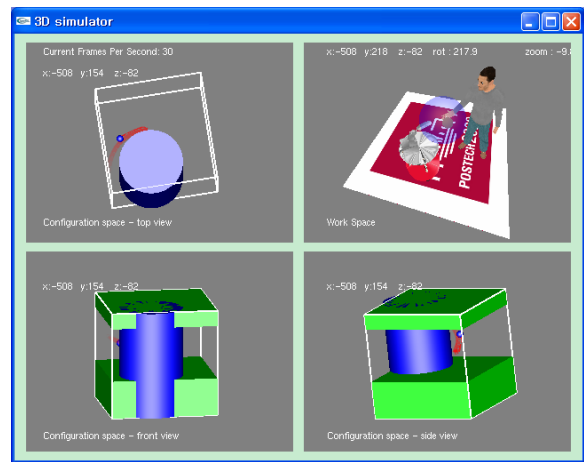


그림 16. 성능평가를 위한 시뮬레이터

실제 사용자의 움직임을 센서를 사용하여 측정한 다음, 로봇의 이동 속도를 0.5m/sec, 각속도를 90°/sec로 제한하고 시뮬레이션한 결과, 대부분의 경우 사용자와의 충돌 없이 사용자의 움직임을 따라가는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이동형 햅틱 디스플레이를 통해 사용자로 하여금 일반적인 햅틱장치의 작업공간보다 큰 물체를 느낄 수 있도록 할 수 있다. 이동형 햅틱 장비의 시스템 구성을 설명하고 이에 적합한 동작계획 알고리즘을 제안하였다. 사용자의 움직임에 따라 동작계획 알고리즘이 어떻게 동작하는지를 테스트 하기 위해 이동형 로봇의 최대 각속도와 최대 선속도를 제한하고, 시뮬레이션을 통해, 이동형 로봇이 쫓아갈 수 있는 사용자의 움직임을 살펴보았다. 그리고 시뮬레이터를 제작하여, 실제 사용자의 움직임에 따른 이동형 로봇의 움직임을 실시간으로 살펴보았다.

6. 감사의 글

본 프로젝트는 과학기술부의 특정기초연구사업 (R01-2006-000-10808-0)의 지원을 받았다.

참고문헌

- [1] K. Salisbury, F. Conti and F. Barbagli, "Haptic Rendering: Introductory Concepts", IEEE CG&A, March/April 2004.
- [2] F. P. Brooks, 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, 1990, pp. 177-185.
- [3] L. Buogila, M. Ishii, and M. Sato, "Multi-Modal Haptic Device for Large-Scale Virtual Environment," in Proceedings of the 8th ACM International Conference on Multimedia, 2000, pp. 277-283.

- [4] 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, 2004, pp. 361-368.
- [5] M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige, "HapticGEAR: The Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays," in Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference, 2001, pp. 123-129.
- [6] F. Conti and O. Khatib, "Spanning large workspaces using small haptic devices", in Proceedings of the 1st joint Eurohaptics conference and symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, WHC2005, Pisa
- [7] N. Nitzsche, U. D. Hanebeck, and G. Schmidt, "Design Issues of Mobile Haptic Interfaces," Journal of Robotic Systems, vol. 20, pp. 549 - 556, 2003.
- [8] A. Formaglio, A. Gian-nitrapani, M. Franzini, D. Prattichizzo, F. Barbagli, "Current Issues in Haptics Rendering Using Mobile Haptic Interfaces", In Proceedings of WorldHaptics Conference, 2005
- [9] SensAble Technologies, Inc, OPENHAPTICS™ TOOLKIT, MA, USA, 2005, pp. 94.