실시간 햅틱 렌더링 기술을 통한 시각 장애인을 위한 원격현장감(Telepresence) 로봇 기술

Telepresence Robotic Technology for Individuals with Visual Impairments Through Real-time Haptic Rendering

박 정 혁¹, 아야나 하워드²

Park, Chung Hyuk¹, Howard, Ayanna M.²

Abstract This paper presents a robotic system that provides telepresence to the visually impaired by combining real-time haptic rendering with multi-modal interaction. A virtual-proxy based haptic rendering process using a RGB-D sensor is developed and integrated into a unified framework for control and feedback for the telepresence robot. We discuss the challenging problem of presenting environmental perception to a user with visual impairments and our solution for multi-modal interaction. We also explain the experimental design and protocols, and results with human subjects with and without visual impairments. Discussion on the performance of our system and our future goals are presented toward the end.

Keywords: 3D Haptic Rendering, Depth Camera, Telepresence Robot, Assistive Robotics, Visual Impairment

1. 서 론

국제 보건기구에 의하면 약 2억8천5백만명의 인구가 시각장애인이며, 이들 중 3천9백만명이 맹인으로 집계된다 [7]. 이들이 주위 환경을 인식함에 있어 비시각 감각의 활용은 매우 중요하며, 일반적으로 주위 환경과의 직접적인 접촉을 동반하게 된다. 본 연구에서는 시각장애인들의 접근성(accessibility)을 높이기 위해 telepresence 로봇을 통해 원거리의 환경과의 상호작용을 위한 수단을 제공하고 자 한다. 원거리 환경의 공간정보를 비시각 감각으로 변환하기 위해, 우리는 RGB-D 3차원 카메라 센서, 모바일

로봇, 그리고 3차원 햅틱 렌더링^[10]을 위한 햅틱 인터페이스를 이용하는 보조로봇 프레임워크를 제안하고자 한다.

원거리의 환경 정보를 전달하기 위하여 보조로봇과 사용자 간에 햅틱 연결점이 생성되며, 본 연구에서는 모바일 로봇이 인지하는 공간의 3차원적 시각 정보를 시각장애인에게 제공하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 시각장애인은 로봇의 “눈”을 통하여 인식되는 원거리 환경을 햅틱 인터페이스를 통해 3차원적으로 탐색할 수 있게 된다.

2장에서는 보조공학 및 햅틱 분야의 기존 연구와 현재 진행중인 연구들에 대해 살펴보고, 3장에서는 본 연구에서 제안하는 햅틱 렌더링 알고리즘 및 telepresence 로봇 시스템의 구조와 더불어 시스템의 제어 방법과 인간과의 상호작용을 소개한다. 4장에서는 실험의 설계와 인간 실험 프로토콜에 대해 소개하며, 5장에서는 시각장애인 및 비시각 장애인들과의 실험결과를 기술한다. 마지막으로 6장에서는 시스템의 성능에 대해 논의하고 향후 연구방향을 소개

Received : May 30, 2013; Reviewed : Jun. 25, 2013; Accepted : Jul. 25, 2013

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2012R1A1A4A01017682).

† Corresponding author: Mechatronics Engineering, Chungnam National University (jihong@cnu.ac.kr)

¹ Mechatronics Engineering, Chungnam National University (jaya@cnu.ac.kr)

하며 본 고를 마무리한다.

2. 관련 연구

시각장애인을 보조하는 로봇기술에 관해서는 소수의 선행연구들이 존재한다. Ulrich 등은 주변 환경을 인식하여 사용자의 보행경로를 안내하는 로봇 지팡이^[12]를 개발하였고, Kulyukin 등은 RFID 장치와 모바일 로봇을 이용한 시각장애인을 위한 주변 공간 탐색 시스템^[13]을 제안하였다. 최근의 연구로는 햅틱 vest를 이용한 시각장애인의 자동차 운전시스템^[2]이 있으며, 로봇 cart를 사용한 시각장애인의 장보기 보조 시스템^[11]이 존재한다. 상기 연구들은 로봇시스템을 이용한 시각장애인의 일상생활을 돕는 보조공학적인 측면에서 선구적인 업적을 이루었다. 하지만, 위 시스템들은 사용자가 장비와 함께 환경가운데 늘 존재하거나 주변 환경이 RFID 장치 등으로 세팅이 되어있어야 한다는 제약조건이 존재하고, 원격지의 공간정보를 사용자에게 전달할 수는 없는 단점이 존재한다.

시각장애인들에게 공간적인 정보를 전달함에 있어서 햅틱 감각은 유용한 수단이 될 수 있다. 이는 시각장애인들이 여전히 애용하는 보조수단이 촉감 정보를 제공하는 지팡이와 점자임을 통해 살펴볼 수 있다. 이러한 촉감적인 정보와 더불어 햅틱장비의 힘-되먹임 (force-feedback)을 이용한 입체정보의 전달은 사용자와 시스템간의 상호작용에 있어 향상된 상호작용을 제공할 수 있다. Virtual-proxy 기술^[4]로 3차원 물체의 햅틱 렌더링은 더 효율적으로 발전하였으며, 최근의 GPU (graphics processor unit)의 발달^[13]은 이를 가속화 하고 있다.

Kinect로 대표되는 최근 RGB-D (red/green/blue and depth) 3차원 카메라의 발전은 point-cloud 를 통해 3차원 정보의 표현을 편리하고 빠르게 제공하고 있으며, 이는 실시간, 혹은 오프라인 프로세스를 통한 햅틱 렌더링^[8,9,11]에 일부 적용되고 있다. 우리의 기존 연구^[5,6]의 연장선에서, 본 고에서는 선행모델이 없는 상태에서의 실시간 햅틱 렌더링을 통해 시각장애인에게 원격지 공간정보를 제공하는 방법을 제안하고자 한다.

3. 햅틱 Telepresence 로봇 시스템

시각장애인을 위한 telepresence 로봇은 다음의 3가지를 갖추어야 한다.: 1) 센서들을 이용한 환경의 인식과 3차원 맵 (모델)의 생성, 2) 생성된 환경 정보의 비시각적인 감각을 통한 사용자에게로의 전달, 그리고 3) 환경 인식 후 사용자의 입력에 반응하는 로봇의 원격 제어 시스템이 그 조건들에 해당된다. 본 장에서는 본 연구에서 구성한 시스템 (그림 1)의 구조와, virtual-proxy를 사용하는 햅틱 렌더링 알고리즘과 이를 통한 3차원 공간지각의 전달, 그리고 사용자에 의한 로봇의 제어를 통한 telepresence 로봇 시스템을 기술한다.

(a) Robot in an environment (b) Graphic user interface & a haptic device
Fig. 1. Telepresence robot for haptic exploration for the visually impaired.

3.1 시스템 구성

우리의 telepresence 로봇은 기본적으로 모바일 로봇 베이스, 통합된 시스템 컨트롤러, 그리고 휴먼 인터페이스를 위한 햅틱 장치로 구성된다. 모바일 로봇은 비전 센서와 RGB-D 센서 등의 센서부가 포함되며, 시스템 컨트롤러는 사용자의 입력을 통해 로봇시스템을 제어함과 동시에 로봇의 센서부에 접속하여 얻은 공간정보를 햅틱 장치 등을 통해 사용자에게 제공하게 된다.

위와 같은 구성에 의해 본 연구에서의 햅틱 장치는 다음의 두가지 역할—로봇의 제어장치이자 환경정보의 피드백 장치—을 동시에 갖게 된다. 마찬가지로, telepresence 로봇은 3차원 원격정보를 적극적으로 수집하여 사용자에게 원격 환경정보를 제공하는 중간자의 역할과 동시에, 사용자의 제어의지를 구현하는 원격 에이전트의 역할을 동시에 수행하게 된다.

하드웨어 플랫폼으로는 Pioneer 3AT 로봇과 Kinect 센서, 원격제어 PC와 PHANTOM Omni 햅틱 인터페이스로 구성되며, 원격제어 PC에서는 로봇 제어, 센서 처리, 3차원 지

각, 햅틱 상호작용들을 관장하는 통합 소프트웨어가 운영되게 된다.

3.2 3D 맵 형성과 Virtual-proxy 알고리즘

[6]에서 기술되었듯이, 우리는 스테레오 카메라를 이용하여 생성된 3차원 point-cloud 정보를 이용한 실시간 햅틱 렌더링 기법을 개발해 왔다. 이를 확장하여 본 연구에서는 Kinect 센서를 사용하기로 한다. Kinect 센서는 Microsoft사의 RGB-D 센서이며, 컬러 이미지와 깊이 정보를 초당 30프레임의 속도로 제공해준다. 우리는 2단계 파이프라인 구조를 통해 Kinect 정보를 토대로 3차원 맵을 구성한다.

3.2.1 RGB-D 카메라 센서를 통한 실시간 3D 맵 형성

1단계 파이프라인에서는, 먼저 Kinect에서 출력되는 센서 정보가 버퍼링 된 후, 640x480 개의 point-cloud 데이터에 대해 3차원 좌표로 투영시키고, 이는 다시 640x480x1024의 규격을 갖는 3D 맵으로 형성되게 된다(그림 2). 실질적으로는 occupancy-grid map 방식을 사용한 후, occupied grid 뒤의 grid 들에 대해서는 occupancy를 채워줌으로써 2.5D의 맵이 구성되는 셈이다. 이렇게 occupied point와 unoccupied point들이 구분되면, 사용자의 햅틱 인터페이스 조작에 따른 햅틱 상호작용 포인트(HIP: haptic interaction point)를 3D 맵상에 투영시키고,

Fig. 2. An example of a 3D point map of an object for the generation of virtual-proxy forces (For visual purposes, the points are arranged in a grid-style. Actual point cloud has shorter distances between points closer to the sensor and longer distances between points further away from the sensor, due to the optical characteristics of the sensor).

occupancy map에서의 virtual proxy 힘이 생성되게 된다(이 부분은 3.2.2. 장에서 다루기로 한다). 이 방식은, HIP 주변 일정 영역에서의 이웃 point-cloud 들간의 평균 벡터로 햅틱 힘을 생성하는 Rydén 등의 방식^[8]과 다른 방식을 취한다. 본 고에서의 알고리즘은 로봇에서 생성된 3D 맵을 이용하여 복잡한 3차원 모양에 대해서도 좀 더 정확한 virtual proxy를 계산함을 목적으로 하며, 독립된 3D 맵을 구성함으로 인해 로봇 motion/manipulation planning이나 가상/증강 현실등의 다양한 응용분야에 유용하게 쓰일 수 있다.

3.2.2 3D 맵을 이용한 3D 햅틱 렌더링

2단계 파이프라인에서는 햅틱 상호작용을 담당하게 되며, HIP와의 virtual proxy 힘(그림 3-a)을 실시간으로 계산함과 동시에 3D 맵을 꾸준히 업데이트 하게 된다. Virtual proxy 힘의 계산 속도를 향상시키기 위해 이웃포인트 사이의 surface-normal 벡터 연산은 look-up table 방식으로 구현하였다(그림 3-b).

3D 맵 상에서 HIP와 3차원 물체 간의 virtual proxy 벡터를 계산하기 위해서는, 먼저 HIP의 좌표를 3D 맵 상에 투영시키고, 이 위치에서의 이웃 grid point들의 occupancy를 조사하게 된다. 만약 모든 이웃 grid point들이 occupied 되어 있다면 이는 HIP가 3차원 물체 내부에 완전히 들어가

Fig. 3. Illustration of a virtual-proxy force calculation within neighbor 3D points.

있음을 의미하며, 일부는 occupied 되어 있고 일부는 unoccupied 되어 있다면 이는 물체의 표면 근처에 HIP가 존재함을 의미한다. 이 두가지 경우에 대해, 물체 표면까지의 최단 거리를 3차원 search 를 통해 도출한 후, 표면 부분의 surface normal 벡터에 따라 최종 virtual proxy 벡터를 생성하게 된다 (그림 4).

Virtual proxy 벡터를 통해 햅틱 렌더링을 구현하기 위해서 일반적인 spring-damper 모델을 이용하였다 (Eq.1). Virtual proxy의 위치벡터 $\vec{p}_{proxy}$ 와 HIP의 위치 벡터 $\vec{p}_{probe}$, 또 proxy와 HIP의 속도벡터 $\vec{v}_{proxy}$ 와 $\vec{v}_{probe}$ 에 대해 virtual proxy 되먹임 힘 (feedback force) $\vec{f}_{feedback}$ 은 수식 1과 같이 정의된다. 이때 k는 스프링상수, b는 댐핑계수를 의미한다. Proxy와 HIP의 위치벡터 차이로 발생하는 penetration depth 벡터 정보를 통해 물체의 모양이 표현되며, 속도 벡터 차이로 발생하는 댐핑 보정을 통해 사용자의 움직임에 따른 자연스러운 햅틱 렌더링을 제공하게 된다.

$$\vec{f}_{feedback} = k(\vec{p}_{proxy} - \vec{p}_{probe}) + b(\vec{v}_{proxy} - \vec{v}_{probe}) \quad (1)$$

Fig. 4. Haptic virtual-proxy algorithm for calculating interaction force with a 3D map.

위 알고리즘의 장점들로는 RGB-D 센서정보를 이용한 직접적인 햅틱 렌더링과, 이를 통한 동적인 환경에서의 실시간 햅틱 렌더링을 가능케 함에 있다. 이로 인하여 로봇을 통한 원격지 햅틱 탐색과 실시간 상호작용이 가능하여지며, 사용자에게 원격 현장감을 제공하게 된다. 실시간 상호작용이 주는 부가적인 이득으로는, 시스템의 여유 처리능력으로 원격지의 소리 정보를 추가적으로 전달하거나, 햅틱 피드백과 더불어 음성 피드백을 추가하거나, 동적인 환경변화를 실시간으로 전달할 수 있는 점들이 있다. 그림 5에서는 Rydén 등^[8]의 실험에서 보여진 가상 상호작용 실험도 본 시스템으로 실현 가능함을 보여주고 있다.

Fig. 5. Haptic interaction with a human in the scene.

3.3 원격지각: 3D 공간지각의 전달

이전 장에서 설명된 알고리즘을 통해 우리는 일반 사용자에게 햅틱 인터페이스를 통해 (또한 일반적으로 그래픽 표현과 더불어) 3차원 공간지각을 전달할 수 있고, 또 사용자는 이를 바탕으로 원격 로봇을 제어할 수 있게 되었다. 하지만, 시각 장애인들에게 있어서 원격 지각을 얻기 위하여서는 추가적인 감각정보의 제공이 필요하게 된다. 단순한 3차원 공간지각과 더불어 원격 로봇의 상태 파악이나, 원격지의 공간적인 구성에 추가하여 색깔 정보까지 전달하기 위해서는 햅틱 감각 외에 복합감각적인 정보 전달이 필요하게 된다. 따라서 우리는 로봇의 상태와 시각적인 색깔 정보를 음성피드백을 통해 사용자에게 제공하여 원격지의 세부적인 파악에 도움을 주고자 한다.

음성 피드백은 두가지 정보를 포함한다. 첫째는 로봇의 움직임 상태에 대한 음성적인 묘사로, “정지”, “전진”, “후진”, “좌회전”, “우회전” 상태가 전달되며, 둘째로는 원격지의 색깔과 거리 정보로, 사용자의 햅틱 인터페이스 조작에 따른 HIP가 원격지와 접촉하는 부분의 색깔과 로봇으로부터 그 원격지점의 거리 정보가 이에 해당된다. 색깔

Table 1. List of color names differentiable with verbal feedback.

#	Color	#	Color	#	Color
1	Aqua	23	Indian red	45	Peach
2	Aquamarine	24	Ivory	46	Pink
3	Black	25	Khaki	47	Plum
4	Blue	26	Lawn green	48	Purple
5	Blue violet	27	Light blue	49	Red
6	Bronze	28	Light coral	50	Royal blue
7	Brown	29	Light gold	51	Scarlet
8	Cadet blue	30	Light sky blue	52	Sea green
9	Chartreuse	31	Lime green	53	Sienna
10	Chocolate	32	Magenta	54	Sky blue
11	Coral	33	Maroon	55	Slate blue
12	Dark green	34	Medium purple	56	Spring green
13	Dark grey	35	Midnight blue	57	Steel blue
14	Deep pink	36	Navy blue	58	Summer sky
15	Deep sky blue	37	Neon blue	59	Turquoise
16	Dodger blue	38	Olive	60	Violet
17	Forest green	39	Olive green	61	Violet red
18	Gold	40	Orange	62	White
19	Green	41	Orange red	63	Wood
20	Green yellow	42	Orchid	64	Yellow
21	Grey	43	Pale green	65	Yellow green
22	Hot pink	44	Pale violet		

과 거리 정보는 Kinect에서 얻어지는 컬러 이미지 스트림과 depth 정보가 버퍼링되며 얻어지게 되고, HIP와의 상호작용에 따른 원격 탐색 지점의 색깔과 거리정보는 text-to-speech(TTS) 기술을 통해 사용자에게 전달되게 된다.

시각장애인들에 대해 일반적으로 존재하는 잘못된 편견 중의 하나가 바로 색깔에 관한 부분이다. 시각장애에는 약시에서부터 맹인까지 여러 단계가 존재하며, 또 장애의 심화 단계에도 퇴행성 시각장애, 선천성 시각 장애 등의 다양한 양상이 존재한다. 일반적으로 대부분의 시각장애인은 색깔에 대해 사전적인 인식과 경험이 존재하거나, 혹은 교육이나 주변인들의 설명을 통해 색깔을 인지하고 있다. 여러 실험을 통한 우리의 경험상, 시각 장애인들은 복합감각적인 정보를 통해 일반인들과 동일하거나, 심지어는 더 정확하게 공감각적인 정보를 인식할 수 있으며, 따라서 이 장의 접근 방법이 타당함을 알 수 있다.

3.4 원격제어: 사용자의 입력을 위한 제어시스템

이제 사용자에게 원격지의 공간감 정보가 복합감각적으로 제공되는 시점에서 필요한 부분은 바로 로봇이 사용자의 제어 입력정보를 어떻게 효율적으로 처리하는지의 여부이다. 로봇의 여러 기능들을 하나의 통합된 제어기로 관리하기 위해 본 고에서는 FSM (finite-state machine) 기법을 사용하여 햅틱 인터페이스나 휴먼 인터페이스를 통하여 사용자의 제어 정보를 통해 로봇을 조정하게 된다. 본

고의 실험을 위하여서는 3가지의 상태 (state)들로 구성된 FSM 이 구현되었으며, 그 상태로는 정지, 정적 햅틱 탐색, 그리고 동적 햅틱 탐색이 개발되었다 (그림 6). 세부적인 FSM의 설정은 전체 실험 디자인과 시스템 성능의 평가를 위해 두가지 시나리오에 맞추어 제안되었으며, 그 두가지 시나리오는 다음과 같다.

- 시나리오 1: 수동 제어와 복합감각적인 원격지각: 사용자는 한 손으로 햅틱 인터페이스를 잡고 3차원 공간을 탐색하며 햅틱 피드백과 음성 피드백을 통해 원격지를 인지하게 된다. 다른 손으로는 키보드의 화살표 키를 이용하여 로봇의 전진, 후진, 좌회전, 우회전의 동작 제어를, 그리고 Ctrl 키를 이용해 정지명령을 전달하게 된다.
- 시나리오 2: 반자율주행과 복합감각적인 원격지각: 또한 햅틱장치의 버튼을 이용한 “Clickable world”. 사용자는 한 손으로 햅틱 장치를 잡고 3차원 공간을 탐색하며 햅틱 피드백과 음성 피드백을 통해 원격지를 인지하게 되며, 탐색 중 목적 장소나 물체를 인식하는 순간 햅틱 인터페이스의 버튼을 클릭하면, 로봇이 자율주행 모듈을 이용하여 명령받은 지점으로 접근하게 된다. 로봇은 사용자의 “클릭” 명령에 반응하여 자율주행을 시작하므로 “반자율주행”이라 표현한다.

Fig. 6. Finite-state machine (FSM) for our haptic telepresence system. Only three states are enabled for this study, but more states that connect multiple functionalities of the robotic system and the user interface are hidden.

4. 실험 구성

위에서 제안한 두가지 시나리오를 이용하여 시스템의 성능을 측정하기 위해 실험을 아래와 같이 구성하였다.

실험 구성의 세부 목표로는 시각 장애인이 본 시스템을 통해 3차원 원격 지각을 습득하고, 물체를 구분하여 원하는 물체를 찾아내며, telepresence 로봇 시스템을 직관적으로 제어하여 원격 상호작용을 이룰 수 있는지를 연구함에 있다. 실험은 3차원 햅틱 인터페이스와 음성 피드백 채널 및 2가지 제어방법을 통해 이루어지며, 이전 장에서 설명한 수동 제어와 반자율주행을 사용하게 된다. 실험공간의 구성은 그림 7과 같이 5m x 6m의 실내 공간에 다양한 색으로 구성된 박스, 삼각콘, 두개의 공 (붉은색, 파란색)이 놓여져 있다.

적용된 실험 프로토콜은 다음과 같다.

- 피실험자의 실험참가 여부를 구두로 동의를 구한다
- 로봇 시스템, 컴퓨터, 그리고 햅틱 인터페이스에 대해 설명한다.
- 햅틱 탐색에 대한 실습교육을 제공한다. 피실험자는 그림 7의 실험 공간과는 다른 공간에 마련된 3차원 공간 (박스와 삼각콘이 있는)을 탐색할 수 있다.
- 제어 방식—수동제어 와 반자율주행—에 대해 설명한다.
- 음성 피드백 정보—색감, 거리, 그리고 로봇의 상태—에 대해 설명한다.
- 교육이 마친후, 피실험자는 시스템을 조종하여 지정된 색의 공을 찾아야 한다. 비시각장애인은 안대로 눈을 가리고 같은 환경에서 실험을 진행한다.

실험기간동안 다음의 항목에 대해 측정을 한다: 1) 작업 완료 시간, 2) 로봇의 주행 궤적, 그리고 3) 사용자의 HIP 궤적과 햅틱 피드백 포스 정보가 기록된다. 각 실험의 목표는 붉은색이나 파랑색 공을 찾아내어 로봇을 성공적으로 접근시키는 것이며, 목적 공의 색은 피실험자가 시스

Fig. 7. Experimental setup.

템에 충분히 익숙해 진 후에야 전달된다.

5. 실험 결과

총 12명의 피실험자가 참가하였으며, 이들 중 9명은 비 시각 장애인, 3명은 시각장애인 (1명의 부분시각장애인과 2명의 맹인)이며, 연령대는 15세에서 40세 사이였다. 각 피실험자는 5~10분 가량의 설명 및 학습시간이 주어지고, 이후에 두가지 실험목표 (시나리오 1,2에 해당하는 제어방법으로 푸른/붉은 공을 찾는것)가 무작위로 주어지게 된다. 실험 결과와 분석을 아래에 기술한다.

5.1 사용자의 임무 성공도

사용자의 각 임무를 수행할 때에, 임무의 완료 여부와 작업 시간을 측정하였다. 완료여부는 사용자가 시스템을 얼마나 잘 활용하여 정확한 원격지각을 이루어 내는지를 판별하기 위함이고, 작업 시간은 두 제어 방법에 따른 시스템의 효용성을 비교하기 위함이다. 아래 그래프에 도시되었듯이, 시나리오1의 평균 수행시간은 58.2초였고, 시나리오2의 평균 수행시간은 32.28초로 나타났다.

시나리오 1과 2에 대한 임무완료도는 아래 표와 같다. 전체 성공도는 각각 50%와 75%로 나타났지만, 비시각 장애인은 시나리오 1과 2에 대해 각각 55.6%, 66.7%의 낮은 성공률을 보인 반면에 시각장애인들은 각각 33%, 100%의 상반된 결과를 보여주었다.

위 결과를 토대로 볼 때, 사용자에 따른 시스템 성능은 제어 방법에 따라 영향을 받는 것으로 조사되었고, 반자

Fig. 8. Task time comparison between manual and semi-autonomous control.

Table 2. Success rates of human subjects

	Total human subjects	Sighted subjects (blind-folded)	Visually-impaired subjects
Scenario 1	50%	55.6%	33.3%
Scenario 2	75%	66.7%	100%

울주행이 더 효율적임이 드러났다. 특히 수동제어의 경우, 시각장애인들의 작업 성능이 현저히 둔화됨을 보이는데, 이는 로봇 시스템이 사용자의 판단을 돕기위한 충분한 데이터와 피드백을 제공하기 못하고 있음을 의미한다. 로그 기록을 좀 더 자세히 분석한 결과, 시각장애인들에게 있어 로봇의 회전이나 연속적인 움직임을 인식하지 못할 경우 로봇의 상태 및 자세에 따라 올바른 판단을 내리기가 어려운 상황이 있음을 알게 되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 각 로봇의 회전 명령에 대해서는 제한된 각도만 회전할 수 있도록 한다.

5.2 로봇 궤적

피실험자의 조종에 따른 로봇의 궤적이 그림 9에 도시되었다. 또한 각 조종명령에 따른 로봇의 중간 경로에 따른 환경인식 이미지가 그림 10에 표시되어 있다. 실험 물체들의 위치설정은, 피실험자가 원격 로봇을 통해 환경을 인식할때, 처음에는 모든 물체를 다 인식할 수 있도록 구성되었다. 결과를 살펴보면, 반자율주행의 경우가 상대적으로 깨끗하고 부드러운 궤적을 그림을 알 수 있고, 더 효율적임을 알 수 있다. 5.1장의 결과와 맞물려, 본 시스템이 시각 장애인에게 원격 지각을 습득하고 원격 제어를 가능케 함에 있어, 본 시스템이 사용자를 돕는데 충분히 일조할 수 있음을 파악하였다.

Fig. 9. Resulting trajectories of Scenario 1 & 2.

Fig. 10. Sequential images on each control commands during Scenario 1.

Fig. 11. Sequential images on each control commands during Scenario 2.

5.3 햅틱 탐색

피실험자들의 햅틱 탐색 습관을 관찰하여 보니, 다양한 탐색 습관이 섞이어 나타남을 알 수 있었다. 첫째는 “만져 보기”(혹은 표면 훑기)로서 물체 표면의 궤적을 따라 쓰다듬듯이 탐색하는 방법이고, 둘째는 “찔러보기”로써, 무작위의 지점을 찔러 보듯이 햅틱 상호작용을 관찰하는 방법이었다. 아래 그림에 표시된 바와 같이, 하나의 물체를 파악하는 것이 아니라 넓은 공간에 존재하는 여러 물체들을 효율적으로 파악하기 위해서는 이 두가지 방법이 자연스러운 결론임을 알 수 있었다 (그림 12). 또한, 피실험자의 햅틱 인터페이스에 대한 친숙도 여부에 따라 햅틱 탐색 습관이 다르게 나타남을 알 수 있었다 (그림 13). 이에 대한 세부적인 연구와 분석은 향후 연구계획에 포함할 예정이다.

6. 결 론

본 고에서는 시각장애인을 위한 telepresence 로봇 시스템과 원격제어/원격지각을 위해 RGB-D 카메라를 이용한 실시간 햅틱 렌더링 기술을 제시하였다. 본 실험의 구성

Fig. 12. Visualization of haptic exploration for 20sec.

Fig. 13. Haptic force plots for novice and experienced users for 120sec.

은 원격제어나 telepresence 기술적인 측면에서 보기엔 기초적인 실험이 될 수 있으나, 햅틱, 로보틱스, 보조공학기술, 그리고 telepresence 기술을 통합하여 이를 햅틱 렌더링 형태로 시각장애인에게 제공하는 도전적인 프로젝트로서 의미가 있다. Telepresence 기술이 아직 진화하는 단계에 있음을 고려할 때, 우리의 연구목표는 햅틱 탐색과 telepresence 분야에 있어 본 실험에서 얻은 지식을 바탕으로

로 지속적인 공헌을 하고자 한다. 향후 연구단계로는 시스템 성능의 향상, 피드백과 사용자 중심의 더 편리한 제어 방법 설계, 그리고 더 깊이있는 user study를 목표로 한다.

References

- [1] C. P. Gharpure and V. Kulyukin. Robot-assisted shopping for the blind: issues in spatial cognition and product selection. *Intelligent Service Robotics*, 1(3):237–251, 2008.
- [2] D. Hong, S. Kimmel, R. Boehling, N. Camoriano, W. Cardwell, G. Jannaman, A. Purcell, D. Ross, and E. Russel. Development of a semi-autonomous vehicle operable by the visually-impaired. In *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 539–544. IEEE, 2008.
- [3] V. Kulyukin, C. P. Gharpure, J. Nicholson, and S. Pavithran. RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, volume 2, pages 1979–1984. IEEE, 2004.
- [4] K. Lundin, B. Gudmundsson, and A. Ynnerman. General proxy-based haptics for volume visualization. In *World Haptics, First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 557–560. IEEE, 2005.
- [5] C. H. Park and A. M. Howard. Towards real-time haptic exploration using a mobile robot as mediator. In *Proceedings of IEEE Haptics Symposium(HAPTICS)*, pages 289–292. IEEE, 2010.
- [6] C. H. Park and A. M. Howard. Real World Haptic Exploration for Telepresence of the Visually Impaired. In *Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction(HRI)*. IEEE, 2012.
- [7] D. Pascolini and S. P. Mariotti. Global estimates of visual impairment: 2010. In *British Journal Ophthalmology Online*, 2011.
- [8] F. Ryd'en, H. J. Chizeck, S. N. Kosari, H. King, and B. Hannaford. Using kinect and a haptic interface for implementation of real-time virtual fixtures. In *Proceedings of the 2nd Workshop on RGB-D: Advanced Reasoning with Depth Cameras (in conjunction with RSS'11)*, 2011.
- [9] F. Ryd'en, S. N. Kosari, and H. J. Chizeck. Proxy

method for fast haptic rendering from time varying point clouds. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 2614–2619, September 2011.

- [10] K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli. Haptic rendering: introductory concepts, March–April 2004.
- [11] K. G. Sreeni and S. Chaudhuri. Haptic rendering of dense 3d point cloud data. In Proceedings of IEEE Haptics Symposium(HAPTICS), pages 333–339, March 2012.
- [12] I. Ulrich and J. Borenstein. The GuideCane-applying mobile robot technologies to assist the visually impaired. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 31(2):131–136, 2002.
- [13] M. Yang, J. Lu, Z. Zhou, A. Safonova, and K. Kuchenbecker. A gpubased approach for real-time haptic rendering of 3d fluids. Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia Sketches, 2009.

Ayanna M. Howard

1989 브라운 대학 Brown University (공학 학사)

1993 남가주대학 University of Southern California 전자공학전공(공학 석사)

1994 남가주대학 University of Southern California 전자공학전공 (공학 박사)

1994~2005 NASA 제트추진연구소 Jet Propulsion Lab. 프로젝트 리더/선임로봇연구원

2005~현재 조지아공대 전자컴퓨터공학과 교수
관심분야: 로봇틱스, 인간-로봇 상호작용 (HRI), 보조공학기술 (Assistive Technologies)

박 정 혁

1996 서울대학교 전기공학부 (공학 학사)

2000 서울대학교 전기컴퓨터공학전공(공학 석사)

2002 LG전자 SystemIC 연구소 주임연구원

2006 조지아공대 전자컴퓨터공학전공 (공학 박사)

2012~현재 조지아공대 전자컴퓨터공학과 박사후연구원
관심분야: 로봇틱스, 인공지능 시스템, 햅틱스, 인간-로봇 상호작용 (HRI), 보조공학기술 (Assistive Technologies)