

원격 로봇 비주얼 가이드를 위한 가상벽 가시화 방법론 비교

Methodological Comparison of Visualization for Tele-operated Robot Visual Guidance

김 동 엽*, 신 동 인, 황 정 훈, 김 영 옥

(Dong Yeop Kim^{1,*}, Dong-In Shin¹, Jung-Hoon Hwang¹, and Young-Ouk Kim¹)

¹Intelligent Robotics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

Abstract: Disaster robots have accepted tele-operation in order to share the intelligence of human operators and robot systems. Virtual wall is one of the tele-operation technology to support recognition of human operator. If the virtual wall can block the robot from dangers, the operator will feel comfortable and can concentrate on fundamental missions. In this paper, we propose and compare three methods for virtual wall visualization in tele-operation using 3D reconstruction. First is a virtual wall visualized only with edges. A wall filled with transparent color is the second method. Finally, third method is a texture-mapped virtual wall. In the experiments, we discuss their merits and demerits in view of robot tele-operation.

Keywords: tele-operation, robot, visualization, virtual wall, haptic

1. 서론

로봇을 실제 현장에서 사용하는 방법은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 직접 또는 간접 교시를 통해서 로봇이 움직이는 방법을 제어기가 저장한 후, 그 절차에 따라 로봇을 제어하는 방법이다. 이는 도장로봇의 공장자동화 등 산업현장에서 널리 쓰이는 방법이다. 둘째, 로봇이 센서를 통해서 주변 정보를 파악한 후, 갖고 있는 지능에 따라 판단하여 스스로를 제어하는 방법이다. 로봇 청소기나 물류 자동화 로봇 등이 여기에 해당된다. 셋째, 사람이 탑승하거나 또는 원격지에서 통신을 통해 명령을 내려서 로봇을 제어하는 방법이다. 이것은 건설장비 무인화 등에서 오랫동안 필요가 제기되어온 형태이다.

로봇의 원격 제어(tele-operation)하는 것은 로봇이 스스로의 지능으로 자율 제어하는 것이 아니라 사람의 지능을 활용한다는 장점이 있다. 그렇기 때문에, 잘못된 판단으로 큰 피해가 발생하는 로봇 시스템일수록 원격제어의 형태를 선호한다. 재난현장의 비정형 복잡 환경에서 원격제어 로봇은 많은 강점을 갖는다. 로봇의 센싱이나 제어 성능이 부족할 경우 인간이 갖는 지능으로 극복 또는 대처가 가능하기 때

문이다. 실제로 후쿠시마 원자력발전소 사고 현장에 투입되는 로봇들도 원격 제어되는 형태가 많다[1,2]. 이와 더불어서, 우주선의 도킹이나 유지보수를 위한 매니퓰레이터는 지상의 관제센터나 우주선 내부에서 조작자가 카메라와 보조 센서 데이터를 활용하여 원격제어를 한다. 굴삭기 같은 건설 중장비는 장비의 각 자유도를 유압 조이스틱으로 직접 제어하는 형태를 갖고 있다.

원격지에 있는 조작자는 로봇에 장착되어있는 센서로부터 얻어지는 정보에만 의존하여 로봇을 조작하게 된다. 가장 일반적인 센서는 2D RGB 카메라이다[3,4]. RGB 텍스처 정보는 많은 정보를 갖고 있다. 로봇의 자율제어라면 이 정보를 취득하기 위한 각종 인식 알고리즘 등이 필요하나 사람이 이를 보고 판단을 할 경우에는 시스템이 RGB 데이터를 전송해주는 것으로 충분하다는 장점이 있다. 하지만 2D RGB카메라는 깊이 정보가 없기 때문에 실제로 로봇을 제어하다 보면 정확한 제어를 하는데 어려움이 있다. 간단하게 막대기를 들어서 구멍에 넣는 작업을 원격제어할 때에도 조작자가 막대기의 크기와 구멍의 크기에 대한 사전정보가 없을 시에는 많은 시행착오를 겪어야 한다.

이를 극복하기 위하여 다중 카메라를 장착하여 로봇 시스템을 구성하는 경우가 많다[5-7]. 기술의 발전으로 고해상도 RGB 카메라의 가격이 낮아져서 이러한 시스템이 많아지고 있는 추세이다. 하지만, 이러한 시스템이 효과적이기 위해서는 관심 원격조작 영역을 중심으로 다양한 시야 방향과 다양한 위치를 가진 다중 카메라 시스템이어야 한다는 한계가 있다. 즉, 많은 공간이 필요로 한다는 것이다. 로봇이 소형화되면서 원격제어 센서 시스템에 이러한 공간을 제공하기가 점점 어려워지고 있다.

3D 센서는 단일 센서로 3차원 정보를 취득하여 위와 같은 문제를 해결했다. 대표적인 것이 Kinect와 Velodyne이다 [8,9]. Kinect는 IR ToF 센서칩을 사용하여 3차원 정보를 얻

* Corresponding Author

Manuscript received August 10, 2016 / revised October 1, 2016 / accepted October 17, 2016

김동엽, 신동인, 황정훈, 김영옥: 전자부품연구원 지능로봇기술연구센터

(sword32@keti.re.kr/di_shin@keti.re.kr/hwangjh@keti.re.kr/kimyo@keti.re.kr)

* 본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 산업융합원천기술개발사업과 산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음.

(10047636, 고난이도 작업 수행을 위한 관절 각속도 160deg/s 이상, 반복오차 0.3deg 이하의 힘제어 기반 유압 구동 로봇 제어 기술 개발).

(10052967, 재난재해 대응용 특수목적기계 통합제어시스템 개발).

고, Velodyne은 레이저 펄스를 송수신하여 3차원 스캐닝을 한다. 스테레오 카메라도 3차원 정보를 취득할 수 있는 단일 센서라 할 수 있다. 2개 또는 3개의 카메라를 지그에 고정하여 카메라 간 extrinsic parameter를 통해 3차원 정보를 얻는 방법을 사용한다.

본 논문에서는 3D 센서를 통해서 얻어진 3차원 정보를 처리하여 원격지의 조종자에게 정보를 전달하는 방법을 제안한다. 우리는 조종자에게 정보를 제공하는 방법을 다양화하기 위하여 2D, 3D 영상정보를 디스플레이하는 것뿐만 아니라 조종기 자체가 힘반영을 할 수 있는 햅틱 마스터/슬레이브를 사용하고 있다. 이를 위하여, 3차원 데이터에서 II장에서 설명할 가상벽(virtual wall)을 추출하고 가상화하는 연구를 하고 있다.

가상벽 가상화와 관련하여 자동차를 운전하기 위한 원격 시스템에서 Mixed Reality의 일환으로 가상벽 가상화를 활용하고 있다[10]. 본 논문은 로봇 주변에 대한 임의 시점에서의 시점변환을 반영하고 있는 반면에 자동차의 특성 상 운전석의 한정된 시야만을 고려하고 있다는 차이점이 있다. [11]에서는 로봇 주변의 가상벽이 아니라 조종기인 햅틱 슬레이브에 가상벽을 가상화하여 사용자에게 편의를 주는 연구를 하고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 로봇 원격조종에서 가상벽이 갖는 의미와 구체적으로 활용되는 방법에 대해서 기술하였다. III장에서는 가상벽을 가상화하는 방법을 제안하고 이에 대한 비교를 통해 어떠한 상황에 이러한 가상화 방법이 필요한지 기술하였다.

II. 로봇 원격조종에서의 가상벽

1. 가상벽의 물리적인 의미

건설장비 자동화의 경우 굴삭기가 주변에 부딪치는 것이 허용될지도 모른다. 하지만 재난현장에서는 발생해서는 안 되는 일이다. 재난로봇이 폭발할 수 있는 위험물 취급할 수도 있고, 로봇이 부딪친 콘크리트 더미 밑에 요구조자가 매몰되어있을 수도 있기 때문이다. 로봇수술에서도 유사한 상황이 발생한다. 수술이 필요한 부위 근처에 로봇이 절대로 건드려서는 안되는 장기가 있는 경우가 있다.

위와 같은 필요성 때문에 종래의 원격 조작과 햅틱 마스터/슬레이브 관련된 연구해서 가상벽이라는 개념이 오랫동안 적용되어왔다[12,13]. 로봇(햅틱 슬레이브)이 진입할 수 없는 영역을 설정해두고 그 경계면에 조종기(햅틱 마스터)가 접근했을 시에 조종기에서 반력이 형성되어 조종자에게 경계면에 접근했음을 알림과 동시에 해당 영역에 로봇이 진입하는 것을 방지하는 것이다. 즉, 실재하지 않는 벽을 지정해두고 이를 로봇 원격제어에 활용하는 것이다.

2. 가상벽의 추정 방법

본 논문에서는 [1]과 같은 매니퓰레이터가 장착된 모바일 로봇을 가정하고 가상벽 가상화에 대한 시나리오를 제안한다. 모바일 로봇이 복잡한 지형지물 사이로 주행을 해야 하고 로봇이 지형지물과 접촉해서는 안 된다. 그리고 로봇에 장착된 매니퓰레이터가 밸브 잠금 등의 물체조작을 하면서 관심 물체 외의 접촉을 피해야 하는 시나리오이다.

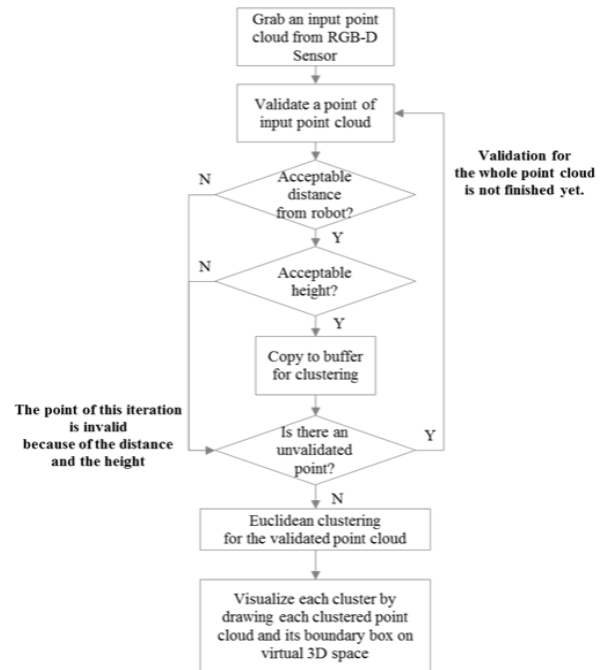


그림 1. 가상벽 추정을 위한 순서도.

Fig. 1. Flowchart for virtual wall estimation.

이 시나리오를 달성하기 위한 가상벽 추정 알고리즘은 그림 1과 같다. 이에 대한 구체적인 설명은 다음과 같다. 로봇에 장착된 RGB-D 센서에서 얻어진 3차원 포인트 클라우드를 클러스터링하기 전에 포인트 클라우드를 구성하는 점들의 유효성(valid)을 확인하고 유효한 것만 클러스터링의 입력 데이터로 사용한다. 각 포인트가 센서로부터 떨어진 거리와 포인트의 높이를 유효성의 기준으로 삼았다. 앞에서 서술한 가상벽의 사용목적인 로봇과 포인트 클라우드와의 충돌 여부를 판단할 때 지나치게 멀리 떨어진 포인트나 높이 있는 포인트는 관심영역 밖이기 때문이다. 그 다음 [9]과 같이 포인트 클라우드를 클러스터링(clustering) 또는 세그멘테이션(segmentation)하는 것이다. 클러스터링된 포인트 클라우드를 포함하는 직육면체를 생성하고, 이 직육면체의 면을 가상벽으로 활용하는 것이다.

III. 가상벽 가상화 방법

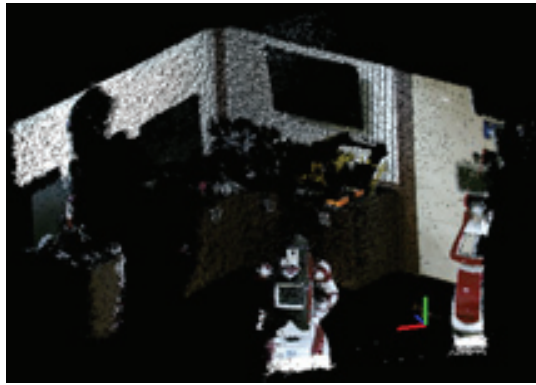
1. 실험의 구성 및 가상벽의 필요성

그림 2는 가상벽 가상화 방법을 비교하기 위한 포인트

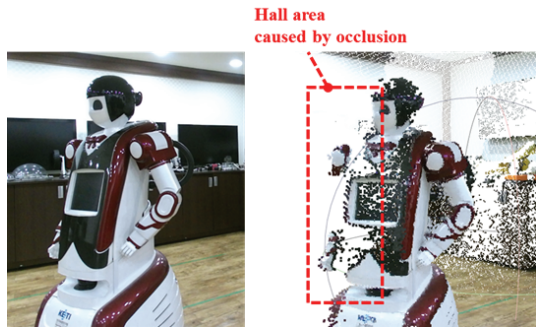


그림 2. 실험을 위한 환경.

Fig. 2. Experiment setting.



(a)



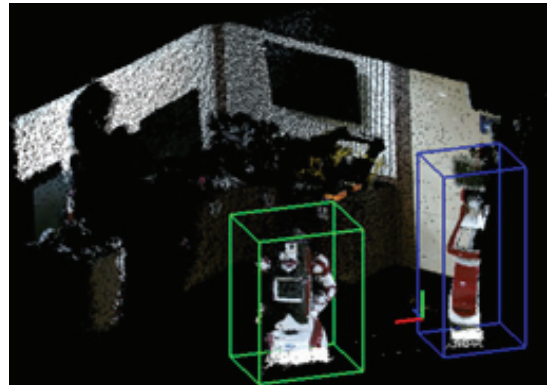
(b)

그림 3. (a) 실험을 위한 환경에서 취득한 포인트 클라우드 (b) 취득된 포인트 클라우드에서의 음영지역.

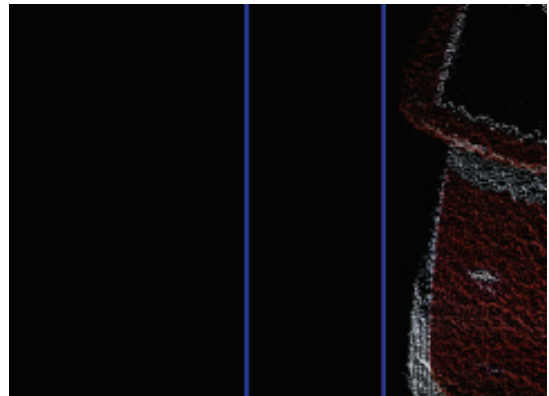
Fig. 3. (a) Point cloud grabbed at experiment setting of Fig. 1 (b) Hall area on the point cloud.

클라우드 환경이다. 그림 2의 두 로봇 사이를 제 3의 로봇이 지나가는 것을 가정하여 가시화 방법에 대한 고찰을 할 것이다. 위 환경에서 Kinect V2로 취득한 포인트 클라우드가 그림 3(a)이다. 오른쪽 밑의 빨강, 초록, 파랑으로 되어 있는 3축이 만나는 지점이 3D 센서의 위치이다.

3D센서에 가깝고 로봇의 대부분이 센서의 시야각 안에 들어온 왼쪽 로봇도 확대해보면 포인트 클라우드의 음영지역이 있음을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생한 이유는 첫째, 3D센서의 발광부로부터 방출된 IR 레이저가 물체에 의해 가려지는 현상이 발생한 것이다. 그림 2와 같이 2D 카메라 데이터로만 원격지를 모니터링할 때에는 그 현상이 두드러지지 않는다. 하지만 그림 3(b)와 같이 3D 데이터로 모니터링하면서 임의시점에서 기울여보기를 하면 음영지역의 존재를 알 수 있다. 이 로봇의 오른쪽 팔이 손과 어깨를 제외하고는 가려짐(occlusion)에 의해 보이지 않는다. 둘째, 앞에서 이야기했듯이 3D 센서의 원리 상 발생하는 3차원 정보 추출 불가 영역이 발생하는 것이다. Kinect와 같이 IR 레이저 ToF 센서는 IR 흡수체라거나 반사되는 광택면 등에서 데이터가 나올 수 없다. 그림 3(b)에서 모니터 왼쪽 모서리의 아래위를 보면 흰색 플라스틱 부분은 depth 데이터가 치밀한 반면에 광택이 많은 검은색 플라스틱 부분은 depth 데이터가 드물다. 순수하게 RGB 데이터로만 3차원 정보를 추출하는 RGB 스테레오 카메라도 이와 유사하게 텍스처 정보 부족이나 반사체에 의한 오인식 등의 문제로



(a)



(b)

그림 4. (a) 모서리만 표시된 가상벽 (b) 화면 확대 시 발생하는 정보 손실.

Fig. 4. (a) Virtual wall with edge only (b) Information loss when the view is magnified.

음영지역이 발생한다.

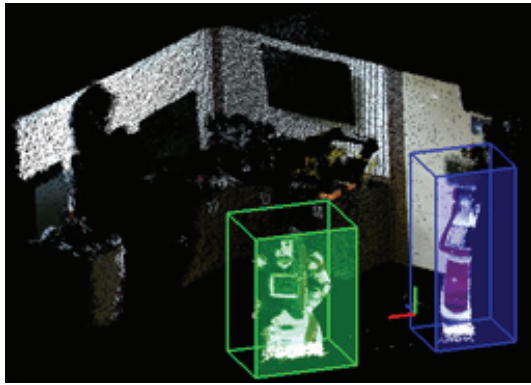
원격제어 되는 재난로봇이 두 로봇 사이를 지나간다고 했을 때 이러한 음영지역은 조종자에게 부담으로 다가온다. 특히 그림 3(a)의 뒤편처럼 사람이 음영지역 안을 예상할 수 없을 정도로 복잡하다면 이 문제는 더욱 심화된다. 이를 극복하기 위하여 가상벽 가시화가 필요하다.

2. 모서리만 표시된 가상벽

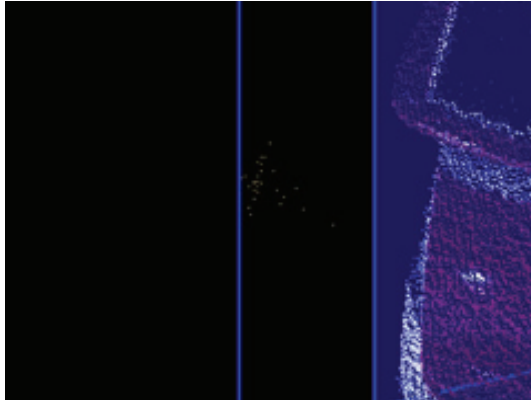
그림 4(a)는 그림 1의 가상벽 추출 알고리즘을 통해 얻어진 가상벽의 모서리만 가시화한 영상이다. 물체인식이나 보행자인식 등에서 널리 쓰이는 가시화 방법이다. 재난환경에서 주의해야 하는 물체를 가시화하는데 시스템 부하가 가장 적은 방법이다. 하지만 이 가시화 방법은 그림 4(a)와 같이 가상벽과 그 주변의 정보가 충분히 전달되어야만 의미가 있다. 그림 4(b)와 같이 정밀작업을 위해 가시화된 포인트 클라우드를 확대하는 경우에는 모서리의 일부만 보이기 때문에 벽으로서의 정보는 제공되지 않는다. 정밀작업 뿐만이 아니라 모바일 로봇이 주행 중에 가상벽에 접근하는 경우에도 이와 같은 문제가 발생할 수 있다.

3. 투명한 색상이 채워진 가상벽

그림 5(a)는 그림 4의 가상벽 가시화의 단점인 화면 확대 시 발생하는 정보손실을 방지하기 위하여 투명한 색상을 가상벽 내에 채운 것이다. 이 가시화 방법은 BMW에서



(a)



(b)

그림 5. (a) 투명한 색상이 채워진 가상벽 (b) 화면 확대 후 정보 유지.

Fig. 5. (a) Virtual wall filled with transparent color (b) Information upkeep when the view is magnified.

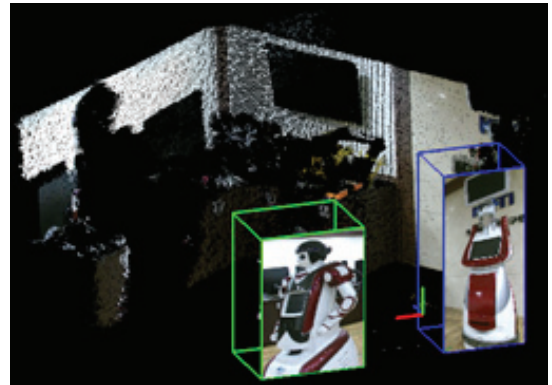
후방카메라에 장애물 정보를 표시하는 것으로 상용화된 방법이다[14]. 영화나 게임에서도 가상벽을 표시하는 방법으로도 널리 쓰이고 있다. 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 로봇 원격제어에서 발생하는 화면 확대에서도 정보의 손실이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

이 방법은 가상벽 내부의 정보가 원격의 조종자에게 전달될 때 왜곡된다는 문제가 있다. 즉, 내부의 텍스처 정보가 손실되는 것이다. 모바일 로봇의 주행할 때 가상벽을 피하기만 하면 되는 사용처는 그림 5의 방법이 적합하지만, 가상벽 내부의 물체를 통해 위치파악을 해야 하는 경우에는 적합하지 않을 수도 있다.

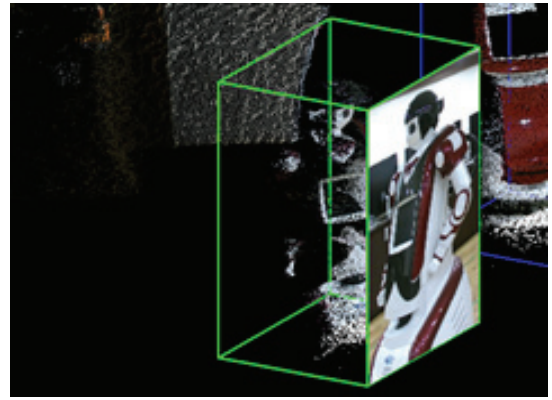
4. 텍스처 맵핑된 가상벽

앞에서 말했듯이 투명한 색상으로 가상벽을 채울 경우 가상벽 내부의 정보가 원격지의 조종자에게 전달되지 않는다. 이와 더불어서, 3차원 재구성이 음영영역에 의해 조종자에게 인지 피로도를 증대시키는 문제도 여전히 남아있다. 이것을 극복하기 위하여 제안하는 방법이 그림 6과 같이 가상벽에 텍스처 매핑(texture mapping)을 하는 것이다.

그림 7은 텍스처 매핑을 위한 순서도로서, RGB-D 센서로부터 얻어진 RGB 데이터와 depth 데이터를 활용하는 알고리즘에 대한 것이다. depth 데이터는 그림 1에서 제시된 알고리즘으로 가상벽을 추출하는 데 사용한다. 이 추출된



(a)



(b)

그림 6. (a) 텍스처 매핑된 가상벽 (b) 텍스처 뒤의 포인트 클라우드.

Fig. 6. (a) Virtual wall with texture mapping (b) Point cloud behind texture mapping.

가상벽을 RGB-D 센서에서 얻어진 RGB 이미지에 투영(Projection)하여 가상벽에 출력될 텍스처 정보만 선별한다. 선별된 텍스처 정보를 가상벽에 매핑하는 것이다.

$$P_{rgb} = TP_{depth} \quad (1)$$

식 (1)은 투영을 위한 기본 변환 식이다. P_{depth} 는 그림 1에서 언급된 클러스터링 알고리즘으로 얻어진 가상벽의 모서리 좌표 $[xyz1]^T$ 이다. P_{rgb} 는 가상벽의 모서리가 RGB-D 센서로부터 얻어진 RGB 이미지에 매핑된 좌표 $[uv1]^T$ 이다. 이를 위한 변환행렬 T 를 위해 많이 쓰이는 방법이 Pseudo Inverse를 활용한 변환행렬 계산이다[15-17]. 식 (2)는 Pseudo Inverse를 적용한 결과이다.

$$T = P_{rgb} P_{depth}^T (P_{depth} P_{depth}^T)^{-1} \quad (2)$$

3차원 가상공간의 P_{depth} 의 위치에 가상벽을 생성하고, 입력 RGB이미지 위 P_{rgb} 위치로부터 텍스처를 갖고 와서 3차원 가상공간에 출력하는 것이다. 이번 실험에서 얻어진 데이터에 대하여 식 (2)를 적용한 결과는 다음과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} 19.2732 & -408.2154 & 153.5762 & 74.9495 \\ 291.1001 & -6.7833 & 8.1136 & 253.2113 \\ -2.2204 \times 10^{-16} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

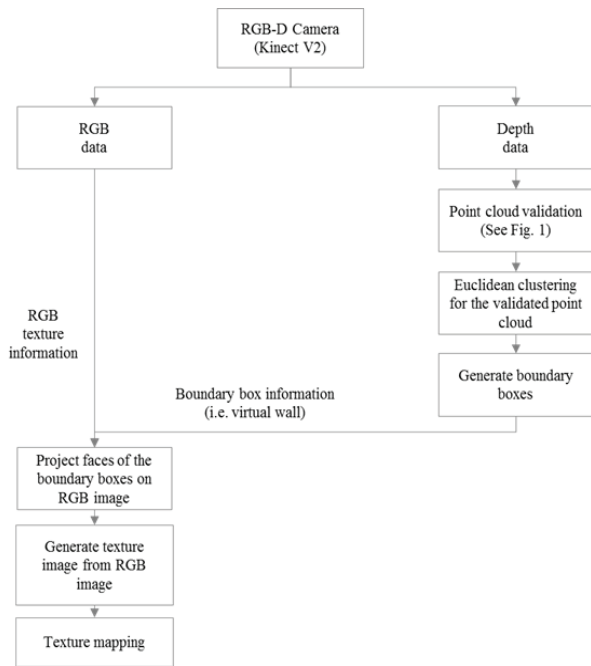


그림 7. 텍스처 매핑을 위한 순서도.
Fig. 7. Flowchart for texture mapping.

표 1. 가상벽 가시화 방법 비교.

Table 1. Comparison of virtual wall visualization methods.

	모서리만 표시된 가상벽	투명한 색상이 채워진 가상벽	텍스처 매핑된 가상벽
가상벽의 모서리	O	O	O
가상벽의 면	X	O	O
텍스처 정보	X	X	O
포인트 클라우드 표현	O	O	O

이 방법은 텍스처 매핑된 면에 대해서는 2D 영상과 같이 텍스처 정보가 풍부한 영상을 조작자에게 제공할 수 있다는 장점이 있다. 3차원 공간상에 평면으로 표현되기 때문에 평면까지의 거리감도 여전히 유효하다. 그림 6(b)처럼 가상벽 뒤의 3차원 재구성 정보도 확인할 수도 있다.

반면에 단점으로는 계산량이 많고 그림 4(b)에서 언급된 것과 반대로 한 화면에 텍스처 매핑된 가상벽이 많아질 경우에 조작자에게 부담으로 다가올 수도 있다. 왜냐하면 그림 6(b)에서 보이듯이 3차원 재구성 중간에 불연속적인 정보가 제공되기 때문이다.

IV. 결론

재난현장에서 사용되는 로봇은 원격제어로 작동되는 경우가 많다, 그리고 원격지의 조작자가 효과적으로 재난현장을 인지하기 위하여 다양한 센서 기술들이 적용되고 있다. 이 논문에서는 3차원 재구성 기술을 활용한 가상벽 가시화 방법들을 제안하고 이에 대한 장단점을 고찰하였다. 제시된 방법으로는 첫째 가상벽의 모서리만 표시하는 방법, 둘째로 투명한 색상으로 가상벽을 채우는 방법, 셋째로 가상벽에

텍스처 매핑을 하는 방법 등이 있다. 이에 대한 장단점을 비교해본 결과, 표 1에서 볼 수 있듯이 조작자에게 제공하는 정보의 양(量)은 가상벽에 텍스처 매핑을 하는 것이 가장 많다. 원격 로봇 시스템에서는 한정된 시간에 한정된 공간에서 최대한 많은 데이터가 조작자에게 전달되어야 하므로, 이 방법이 가장 좋은 성능을 낼 수 있다.

향후 연구 계획은 특이점 기반의 SLAM(feature based SLAM)이 사람이 공간을 인지하는 것과 다른 방법으로 지도를 구축하는 경우가 많은 데 이것을 본 논문에서 제안한 텍스처가 매핑된 가상벽의 개념을 SLAM에 적용하여 가시성을 높이는 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] H. Kinoshita, R. Tayama, E. Y. Kometani, T. Asano, and Y. Kani, "Development of new technology for Fukushima Daiichi nuclear power station reconstruction," *Hitachi Review*, vol. 63, no. 4, pp. 183-190, 2014.
- [2] E. Stickland, "Fukushima's next 40 years," *IEEE Spectrum*, vol. 51, no. 3, pp. 46-53, 2014.
- [3] N. Shiroma, N. Sato, Y. H. Chiu, and F. Matsuno, "Study on effective camera images for mobile robot teleoperation," *Robot and Human Interactive Communication, 2004. ROMAN 2004. 13th IEEE International Workshop on*, pp. 107-112, 2004.
- [4] J. Woo and N. Kim, "Vision-based obstacle collision risk estimation of an unmanned surface vehicle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2015)*, vol. 21, no. 12, pp. 1089-1099, Dec. 2015.
- [5] B. Keyes, R. Casey, H. A. Yanco, B. A. Maxwell, and Y. Georgiev, "Camera placement and multi-camera fusion for remote robot operation," *Proc. of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 22-24, 2006.
- [6] S. H. Kim and W. S. Jung, "Convergence of AVM image and OBD information for analysis of car accident," *Proc. of Korean Society for Precision Engineering 2015 Spring Conference*, vol. 15, no. 3, pp. 358-359, 2015.
- [7] S.-J. Yi and J.-B. Song, "Unmanned forklift docking using two cameras," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2015)*, vol. 21, no. 10, pp. 930-935, Oct. 2015.
- [8] I. Almetwally and M. Malleem, "Real-time tele-operation and tele-walking of humanoid robot Nao using Kinect depth camera," *Proc. of Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on*, pp. 463-466, 2013.
- [9] P. Hebert, J. Ma, J. Borders, A. Aydemir, M. Bajracharya, N. Hudson, K. Shankar, S. Karumanchi, B. Douillard, and J. Burdick, "Supervised remote robot with guided autonomy and teleoperation (SURROGATE): A

framework for whole-body manipulation,” *Proc. of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5509-5519, May 2015.

- [10] A. Hosseini and M. Lienkamp, “Enhancing telepresence during the teleoperation of road vehicles using HMD-based mixed reality,” *Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2016 IEEE*, pp. 1366-1373, Jun. 2016.
- [11] Y. Chen, “Intuitive robot teleoperation based on haptic feedback and 3-D visualization,” Doctoral dissertation, University of Hertfordshire, United Kingdom, Oct. 2015.
- [12] T. Qiu, W. R. Hamel, and D. Lee, “Design and control of a low cost 6 DOF master controller,” *Proc. of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5313-5318, May 2014.
- [13] J. Huang, Y. Shi, and J. Wu, “Transparent virtual coupler design for networked haptic systems with a mixed virtual wall,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 480-487, 2012.
- [14] BMW Intelligent Parking. http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/connecteddrive/2013/driver_assistance/intelligent_parking.html#parkingassistant, 2013. [Online; accessed 19-August-2016].
- [15] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Trans. PAMI*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [16] J. Park, H. Kim, Y. W. Tai, M. S. Brown, and I. Kweon, “High quality depth map upsampling for 3D-TOF cameras,” *Proc. of 2011 International Conference on Computer Vision*, pp. 1623-1630.
- [17] J. M. Lee, D. Y. Kim, I.-S. Kim, S. Jun, and C.-W. Park, “A study on heterogeneous sensor calibration between ToF sensor and RGB camera,” *Proc. of Korean Society for Precision Engineering 2016 Spring Conference*, pp. 108-109, May 2016.



김 동 엽

2008년 연세대학교 전기전자공학부 졸업. 2010년 동 대학원 석사. 2010년~현재 전자부품연구원 전임연구원/선임연구원. 관심분야는 지능시스템, SLAM, Sensor Fusion, 3D Reconstruction, Machine Learning, Virtual Reality.



신 동 인

2008년 경희대학교 전기전자공학부 졸업. 2012년 동 대학원 석사. 2012년~2015년 현대자동차. 2010년~현재 전자부품연구원 전임연구원. 관심분야는 Image Enhancement, Advanced Driver Assistance System, 3D Reconstruction, Deep Learning.



황 정 훈

1997년 연세대학교 기계공학부 졸업. 1999년 KAIST 대학원 석사. 2007년 동 대학원 박사. 2007년~현재 전자부품연구원 선임연구원/책임연구원. 관심분야는 Human-Robot Interaction, Surgical Robots, 3D Reconstruction, Series Elastic Actuator, Deep Learning.



김 영 옥

1995년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 석사. 2009년 중앙대학교 첨단영상대학원 박사. 1997년~현재 전자부품연구원 전임연구원/선임연구원/책임연구원/수석연구원. 관심분야는 컴퓨터 비전, SLAM, 3D Reconstruction, Visualization.