

영상 기반 실내 환경 모델링을 위한 3D 파노라믹 메쉬 생성 기법*

이원우^o, 우운택

광주과학기술원 U-VR 연구실

3D Panoramic Mesh Model Generation for Image-based Indoor Scene Reconstruction

Wonwoo Lee^o, Woonack Woo

GIST U-VR Lab.

wlee@gist.ac.kr, woo@gist.ac.kr

요 약

본 논문에서는 영상 영상 기반 실내 환경 모델링을 위한 3D 파노라믹 메쉬 생성 기법을 제안한다. 제안된 메쉬 모델 생성 기법은 멀티뷰 카메라를 이용해 실내 환경의 점 데이터를 다시점에서 얻고, 이로부터 3D 메쉬 모델을 생성한다. 먼저, 미리 구해진 카메라 파라미터를 이용해 입력된 임의의 3D 점 데이터를 여러 개의 하위 점군으로 분할한다. 각각의 하위 점군의 3D 공간을 복셀로 세분하고 각 시점에서 얻어진 영상과의 상관관계를 이용해 깊이 데이터에 존재하는 노이즈를 줄인다. 각각의 하위 점군들에 대해 적응적 샘플링을 통해 특징에 기반한 새로운 점 군을 생성하고, Delanay 삼각화를 통해 각 하위 점군의 메쉬 모델을 만든다. 모든 하위 점군으로부터 생성된 메쉬 모델을 연결하여 하나의 통합된 메쉬 모델을 생성한다. 제안된 메쉬 모델링 방법은 점군의 분할을 통해 각 부분의 메쉬 모델을 독립적으로 생성하므로 실내 환경과 같은 넓은 영역의 모델링에 알맞다. 복셀 공간을 이용해 깊이 데이터 획득 시에 발생하는 노이즈를 제거하여 보다 사실감 있는 모델을 생성한다. 또한 적응적 샘플링을 통해 불필요한 데이터를 제거하여 가상 환경 모델의 크기를 줄인다. 생성된 가상 환경 모델은 가상/증강현실 응용 어플리케이션 등에 적용이 가능하다.

1. 서 론

최근 디지털 콘텐츠가 보급됨에 따라서 보다 실감있는 고품질의 콘텐츠에 대한 수요가 늘어나고 있다. 디지털 콘텐츠를 체험할 수 있는 가상 현실 응용 어플리케이션을 만드는 데 있어서, 사실감있는 가상 환경을 구축하는 것은 사용자의 몰입감을 고려할 때 매우 중요하다. 기존의 가상 환경들은 CG 모델링 소프트웨어를 통해 만들어지는 것이 일반적이었다. 그러나 모델링 소프트웨어를 통해 사실감 있는 가상 환경을 만드는 작업은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 또한, 이렇게 제작된 가상 환경은 실제 환경과 동일하지 않으므로 사용자가 느끼는 실재감을 저하시키는 원인이 된다. 영상 기반 모델링 기술은 실제 환경으로부터 콘텐츠를 생성할 수 있다는 측면에서 보다 사실감 있는 모델을 만들어 낼 수 있다. 이러한 측면에서 실제 환경을 모델링

하여 가상 환경을 만들어내기 위한 여러가지 방법들이 제안되었다.

실제 환경을 모델링하는 방법에는 range 스캐너를 이용하여 데이터를 얻은 후 모델링하는 방법 [1][2][3], 2차원 영상으로부터 3차원 정보를 복원하여 모델링하는 방법 [4], 그리고 파노라마 영상을 이용하여 모델링하는 방법 [5][6] 등이 있다. 실제 환경을 모델링하여 가상 환경 모델을 만들기 위해서는 앞서 언급한 세 가지 방법 모두 최종적으로 메쉬 모델을 생성하는 과정이 필요로 한다. Levoy는 다수의 range 데이터로부터 iso-surface를 생성하는 알고리즘을 제안하였고 [7], Hoppe 등은 임의의 점군으로부터 signed-distance를 이용하여 메쉬 모델을 생성했다 [8]. Fua는 노이즈가 있는 점 데이터로부터 클러스터링을 통해 점 데이터를 분리하고 각각을 메쉬로 만드는 알고리즘을 제안하였다 [9]. 그러나 기존의 메쉬 생성 방법들은 데이터의 분포가

본 연구는 광주과학기술원 문화기술연구센터의 지원으로 수행되었음

균일하거나, 알고리즘의 적용 대상이 일정한 크기의 물체에 한정되어 있으므로 넓은 영역을 모델링 하여 가상 환경을 생성하기 위한 방법으로는 적합하지 않다.

본 논문에서는 영상 기반 실내 환경 모델링을 위한 3D 파노라믹 메쉬 생성 기법을 제안한다. 제안된 메쉬 모델링 방법은 멀티뷰 카메라를 통해 다 시점에서 얻은 실내 환경의 3D 데이터로부터 메쉬 모델을 생성한다. 먼저, 입력된 다시점 3D 점 데이터를 각 시점의 카메라의 내/외부 파라미터를 이용해 여러개의 하위 점군으로 분할한다. 각 하위 점군이 점유하는 3D 공간을 복셀을 이용해 세분화하고 각 복셀내부에 존재하는 점 데이터를 각 시점의 카메라로 투영하고, 영상의 픽셀과의 상관관계를 이용해 노이즈를 제거한다. 각각의 분할된 하위 점군으로부터 적응적 샘플링을 통해 특징에 기반한 새로운 대표 점군을 생성한다. 새로운 대표 점군을 triangulation 하여 각각의 부분별 메쉬 모델을 만들고, 하나의 가상 환경 메쉬 모델을 생성하기 위해서 각 부분별 메쉬 모델을 통합하여 하나의 가상 환경 모델을 생성한다. 그림 1은 제안된 메쉬 모델링 방법의 과정을 보인 것이다.

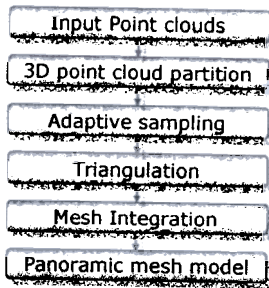


그림 1. 메쉬 모델링 과정

제안된 메쉬 모델링 방법은 점군의 분할을 통해 각 부분의 메쉬 모델을 독립적으로 생성하므로 실내 환경과 같은 넓은 영역의 모델링에 알맞다. 복셀 공간을 이용해 깊이 데이터 획득 시에 발생하는 노이즈를 제거하여 보다 사실감 있는 모델을 생성한다. 또한 적응적 샘플링을 통해 불필요한 메쉬를 제거하여 가상 환경 모델의 크기를 줄인다. 생성된 가상 환경 모델은 가상/증강현실 응용 어플리케이션 등에 적용이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 제안된 메쉬 모델링 알고리즘을 각 단계별로 설명하고, 3 장에서는 실험 결과를 보인다. 4 장에서는 결론 및 후속 과제에 대해서 언급한다.

2. 3D 파노라믹 메쉬 생성

2.1 실내 환경의 데이터 획득

가상환경 생성을 위한 3D 점 데이터는 멀티뷰 카메라로부터 얻는다. 모델링하고자 하는 실제 환경에서 멀티뷰 카메라를 이동해 가면서 각 위치마다 3D 점 데이터를 획득한다. 각 시점에서 얻어진 영상으로부터 카메라 보정을 통해 카메라들의 외부 파라미터를 추정한다. 카메라의 내부 파라미터는 미리 알려져 있는 것을 사용하며, 변하지 않는 것으로 가정한다.

서로 다른 위치에서 얻어진 3D 점 데이터는 각각 서로 다른 카메라 좌표계에 존재하고 있으므로 이를 투영 기반 정합 방법을 통해 하나의 공통된 기준 좌표계로 변환한다 [10]. 데이터 획득 과정이 끝나면 모델링의 대상인 실내 환경의 3D 점 데이터와 각 시점의 영상, 그리고 각 위치에서의 카메라의 외부 파라미터를 얻는다.

2.2 3D 점군 분할

입력된 임의의 점 데이터를 모델링 하기 위해 실내 환경의 점 데이터를 여러 개의 하위 점군들로 분할한다. i 번째 카메라 C_i 에서 보이는 점들만을 선택하기 위하여 먼저 카메라의 절두체 내부에 있는 점들을 찾는다. 식(1)과 같이 j 번째의 평면 L_{ij} 에 대해 γ 를 계산하여 점 $p_k(x_k, y_k, z_k)$ 가 평면의 위 또는 아래에 있음을 알 수 있다. p_k 가 가 절두체를 구성하는 모든 평면들의 위쪽 영역에 있는 경우 p_k 는 절두체의 내부에 존재한다.

$$L_{ij} : a_{ij}x + b_{ij}y + c_{ij}z + d_{ij} = 0 \quad p_k : (x_k, y_k, z_k)$$

$$\gamma_j = a_{ij}x_k + b_{ij}y_k + c_{ij}z_k + d_{ij} \quad (1)$$

If $\gamma_j \geq 0$ for all j : p_k is in the viewing frustum
else p_k is out of the viewing frustum

카메라의 절두체 내부에 있는 점들일지라도 점 데이터가 얻어진 위치에 따라 카메라에서 보이지 않을 수 있다. 그림 2에서 점군 S_1 과 S_2 가 모두 카메라 C_1 의 절두체 내부에 있으나, 실제로 S_2 는 C_1 으로부터 보이지 않는다. 그러므로 점 데이터의 분할 시 카메라들 간의 폐색에 대한 고려가 필요하다.

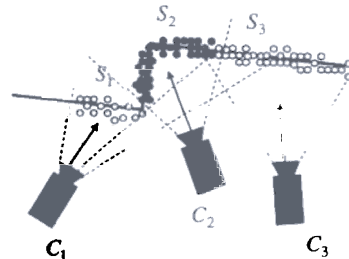


그림 2. 카메라 사이의 폐색

각 시점 사이에 존재할 수 있는 폐색을 고려하

기 위해 절두체 내부에 있는 점들에 대해 Visibility 값을 계산한다. 카메라 C_i 와 3D 공간의 점 p_k 에 대해 Visibility는 식(2)와 같이 정의된다. 점 p_k 가 서로 다른 두 개 이상의 카메라들의 절두체 내부에 있는 경우 Visibility 값이 큰 카메라에서 보이는 것으로 가정한다.

$$Visibility = -\frac{Dot(V_i, N_k)}{d^2} \quad (2)$$

위 식에서 V_i 는 카메라가 바라보는 방향 벡터, N_k 는 점 p_k 의 법선 벡터, 그리고 d 는 카메라와 p_k 사이의 거리이다. $Dot(V_i, N_k)$ 는 두 벡터 사이의 내적을 나타낸다.

스테레오 알고리즘을 이용하는 멀티뷰 카메라에서 얻어진 3D 점 데이터에는 노이즈가 존재한다. 카메라를 기준으로 깊이 방향으로 존재하는 노이즈는 매쉬 모델의 왜곡을 유발하게 된다. 이러한 노이즈를 제거하기 위해 3D 복셀 공간과 다시점의 제약 조건을 이용한다.

각 하위 점군이 점유하는 3D 공간의 경계 상자의 크기를 구한다. 일정한 크기를 갖는 단위 복셀로 경계 상자가 점유하는 공간을 일정 크기로 세분하여 복셀 공간을 구성한다. 내부에 점 데이터가 존재하는 복셀들의 집합을 V 라 하고, 하나의 복셀을 V_m 이라 한다. V_m 의 중심점과 카메라의 중심을 연결하는 선분이 다른 복셀을 지나지 않는 경우 V_m 은 카메라에서 보이는 것으로 가정한다. 각 카메라로부터 V_m 이 보이는 경우 V_m 내부에 존재하는 점들을 카메라로 투영한다.

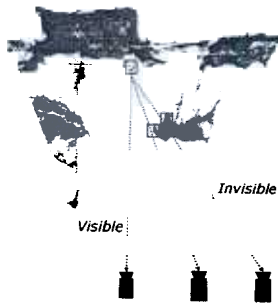


그림 3. 복셀의 투영

i 번째 카메라에 투영된 점 데이터들의 컬러값과 영상의 pixel들의 컬러값 사이의 normalized correlation δ_i 를 구한다. 2차원 영상 평면으로 투영된 점 데이터는 정수 값이 아닌 실수값의 좌표를 갖기 때문에 가장 가까운 픽셀들을 찾고 이들에 대해 correlation을 계산한다.

$$\delta_i = \frac{\sum_r \sum_s (p_r - p_m)(p_{is} - p_i)}{\sqrt{\sum_r \sum_s (p_r - p_m)^2 (p_{is} - p_i)^2}} \quad (3)$$

위 식에서 p_r 은 V_m 내부에 있는 점들의 intensity 값이고, p_m 은 이들의 평균값이다. p_{is} 는 i 번째 카메라

의 영상에서 p_i 에 대응되는 픽셀들의 intensity 값이며, p_i 는 p_{is} 의 평균이다.

V_m 을 볼 수 있는 모든 카메라들의 영상으로부터 계산된 normalized correlation의 합인 δ_m 이 문턱 값 δ_n 보다 큰 경우 V_m 내부에 분포하는 점들은 노이즈로 판별하고 제거한다.

$$\delta_m = \sum_k \delta_k \quad \begin{cases} \delta_m < \delta_n : \text{Leave the voxel} \\ \delta_m > \delta_n : \text{Delete the voxel} \end{cases} \quad (4)$$

2.3 적응적 샘플링

다시점에서 3D 점 데이터를 얻을 경우, 카메라의 시야가 서로 중첩되는 영역에서는 중복되는 3D 데이터가 존재한다. 적응적 샘플링 단계에서는 분할된 각각의 하위 점군으로부터 새로운 대표 점군을 생성한다.

먼저, 그림 4와 같이 i 번째 카메라 C_i 의 투영 행렬을 이용해 점군 S_i 를 카메라로 투영한다.

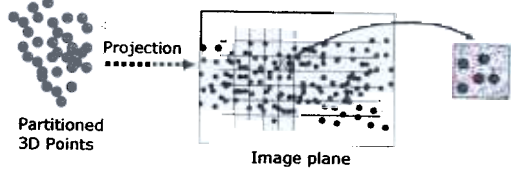


그림 4. 영상 평면으로의 투영 및 그리드 생성

샘플링을 위해 영상 평면 위에 데이터 획득시 사용한 카메라의 영상 해상도와 동일한 숫자의 셀(cell)을 갖는 그리드를 생성한다. 하나의 셀을 영상의 픽셀로 동일한 것으로 보고 각 셀마다 내부에 있는 점들에 대해 비용 η_i 를 계산하고 그 중 가장 η_i 가 가장 작은 값을 갖는 점을 대표점으로 선정한다.

$$\eta_i = \lambda_1 \sum_{p \in Adj} diff_{color}(p, p_i) + \lambda_2 \sum_{p \in Adj} dist_{3D}(p, p_i) \quad (5)$$

위 식에서 $diff_{color}$ 는 두 점이 갖는 컬러값의 차이를 나타내는 함수이고 $dist_{3D}$ 는 3D 공간에서의 두 점 사이의 거리를 나타내는 함수이다. 모든 셀에 대해 대표점 선정이 끝나면 각 카메라에 대응하는 새로운 2D 및 3D 점군 V_i 와 G_i 를 얻게 된다.

카메라로부터 얻는 3D 점 데이터는 영상의 해상도가 증가할 수록 조밀한 데이터를 얻을 수 있으나 이는 매쉬 모델의 용량을 증가시키는 원인이 된다. 매쉬 데이터의 용량이 큰 경우 가상현실 및 증강현실 응용 분야에서 사용하기 어려우므로 매쉬 데이터의 크기를 줄일 필요가 있다.

3D 점 데이터로부터 매쉬 모델을 만드는 경우 평평한 면이라도 많은 수의 점 데이터가 존재하고 있기 때문에 각각의 점들 사이를 연결하여 매쉬 모델을 만드는 경우 삼각형의 갯수가 크게 늘어난다. 깊이 값의 변화가 적은 3D 점 데이터로 이루어진 부분은 점들을 동일 평면에 있는 것으로 볼 수 있으

므로 보다 적은 수의 삼각형을 이용해서 나타낼 수 있다.

이를 위해 영상 평면의 그리드에서 생성된 대표 점의 집합 G_i 의 점 $g(x, y, g_z)$ 의 깊이값이 갖는 1차 gradient를 영상 평면의 u 와 v 축에 대해서 계산하고 식(6)을 통해 얻어진 δ 의 값이 정해진 임계값 보다 작으면 점을 삭제하고 큰 경우는 남겨둔다. 적응적 샘플링의 결과로 카메라 C_i 에 대응하는 샘플링된 2D 및 3D 점군 V_i 와 G_i 를 얻는다.

$$\delta_u = \frac{\partial g_z}{\partial u} \quad \delta_v = \frac{\partial g_z}{\partial v} \quad (6)$$

$$\delta = \|(\delta_u, \delta_v)\|$$

2.4 매쉬 모델 생성

샘플링의 결과로 생성된 점 데이터로부터 삼차 매쉬 모델을 만들기 위해서 영상 평면에서의 삼각화를 수행하고 각 점들 사이의 연결 정보를 3D 점군에 적용한다.

먼저, 영상 평면 위의 2D 점군 V_i 에 Delaunay 삼각화 [11] 방법을 적용하여 매쉬의 연결 정보를 생성한다. Delaunay 삼각화는 2D 평면에 분포하는 점들의 convex hull을 생성하므로 불필요한 외부의 삼각형을 제거해야 한다. 이를 위해 그림 6과 같이 투영된 점 데이터로부터 V_i 의 외곽선에 존재하는 점들을 찾고, Delaunay 삼각화의 결과로 생성된 삼각형들 중 외곽선에 분포하는 점들로만 이루어진 삼각형을 제거한다. 점 데이터의 외곽선에 분포하는 점들은 적응적 샘플링 단계에서 얻는다. 마지막으로 V_i 의 매쉬 정보를 G_i 에 적용함으로써 G_i 에 대한 매쉬 모델을 얻는다. 그림 5에서 붉은색 점선은 투영된 점 데이터의 외곽선이다.

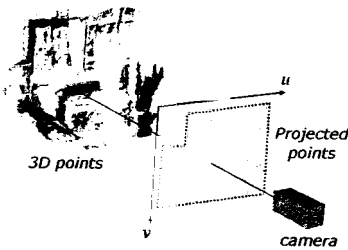


그림 5. 영상 평면으로의 투영 및 삼각화

각 부분별 매쉬 모델은 서로 독립되어 생성되었기 때문에 인접한 두 매쉬 모델 사이가 연결이 되어있지 않다. 인접한 두 매쉬 모델 사이를 연결하기 위해서, 매쉬 모델의 좌/우의 경계에 존재하는 점들을 삼각화하여 두 매쉬 사이를 연결한다.

3. 실험 결과 및 분석

실험을 위한 3D 데이터 획득에는 640x480의 해상도를 갖는 PointGrey사의 Digiclops [12]가 사용되었다. 조명 등의 변수를 제어하지 않은 일반적인 상태에서 모델링의 대상이 된 실내 환경에 대한 데이터 획득이 이루어졌다. 각 시점에서 얻어진 실제 환경의 3D 점 데이터와 각 점의 컬러값, 그리고 카메라 보정을 통해 얻은 카메라의 내/외부 파라미터들이 입력 데이터로 사용되었다.

그림 6은 3D 점 데이터의 분할 결과를 보인 것이다. 그림 6(a)는 다시점에서 얻은 입력 3D 점 데이터이고, 그림 6(b)는 선택된 3대의 카메라에 대해 3개로 분할된 점 데이터를 각각 다른 색으로 나타낸 것이다.

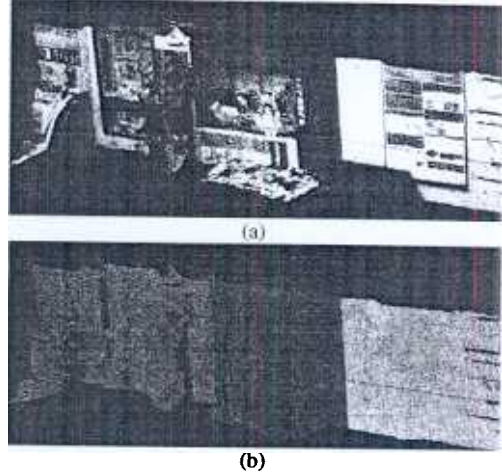


그림 6. 입력된 3D 점 데이터의 분할 (a) 입력된 점 데이터 (b) 3개로 분할된 점 데이터

그림 7은 적응적 샘플링 과정에서 사용된 임계값에 따라 점 데이터가 줄어드는 경향을 나타낸 그래프이다. 임계값이 증가함에 따라서 점 데이터의 양도 줄어드는 것을 볼 수 있으나, 점차 줄어드는 비율이 작아지는 것을 알 수 있다. 점 데이터가 계속 줄어들지 않는 이유는 특징이 뚜렷한 점 데이터가 적응적 샘플링 후에도 유지되기 때문이다.

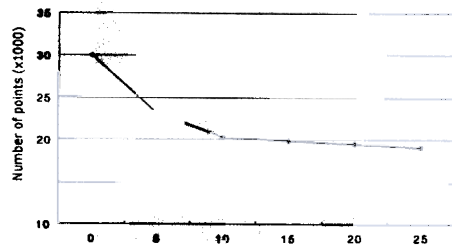


그림 7. 임계값 값에 따른 점데이터의 변화

그림 8은 적응적 샘플링의 결과를 전체 입력

데이터 중 일부분에 적용한 결과를 나타낸 것이다. 그림 8(d)는 적응적 샘플링을 그림 8(a)의 점 데이터에 적용한 결과이다. 적응적 샘플링의 결과 깊이 데이터의 변화가 큰 곳의 데이터가 보존되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 8(b)는 적응적 샘플링 적용 전의 메쉬 모델이다. 매우 조밀하여 삼각형의 형태가 거의 보이지 않는다. 이에 비해 적응적 샘플링 적용 후의 메쉬 모델인 그림 8(e)는 적은 숫자의 삼각형으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그림 8 (c)와 그림 8 (f)에서 보이는 것과 같이 적응적 샘플링 전후의 메쉬 모델 사이에는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

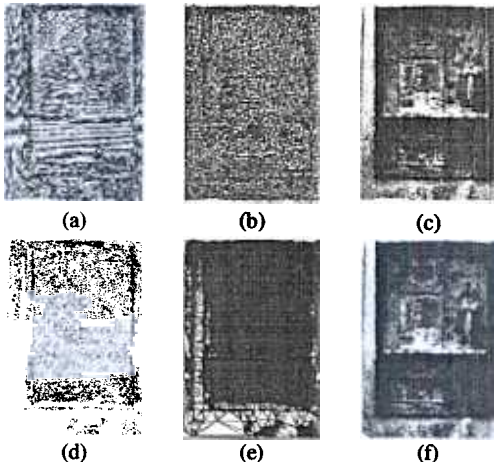


그림 8. 적응적 샘플링의 결과 (a) 입력 점 데이터 (b) 적응적 샘플링 결과 생성된 점 데이터 (c) 삼각화로 생성된 메쉬 모델 (d) 텍스처가 입혀진 모델

그림 9는 메쉬 모델 통합 전/후의 결과이다. 그림 9(a)와 그림 9(c)에서는 메쉬 통합 전에 존재하는 부분별 모델 사이의 틈을 볼 수 있다. 메쉬 통합 후에는 그림 9(b) 및 그림 9(d) 같이 두 메쉬 모델 사이의 틈새가 제거된다.

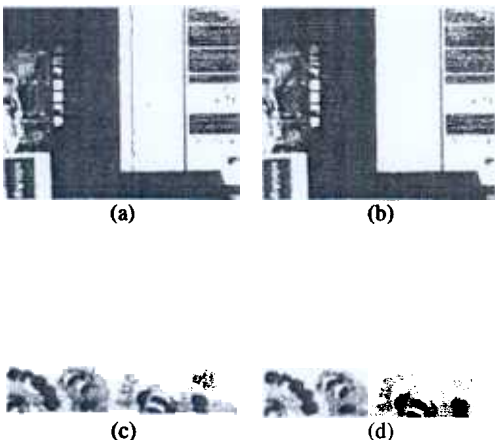


그림 9. 인접한 두 메쉬 모델의 통합 (a)(c) 메쉬 통합 전 (b)(d) 메쉬 통합 후

그림 10은 제안된 메쉬 모델링 방법을 통해 생성된 실내 환경의 두 벽면을 모델링한 결과이다. 기존의 영상기반 2D 파노라마와는 달리 실내 공간에 존재하는 물체들이 깊이값을 가지고 입체적으로 모델링된 것을 볼 수 있다.

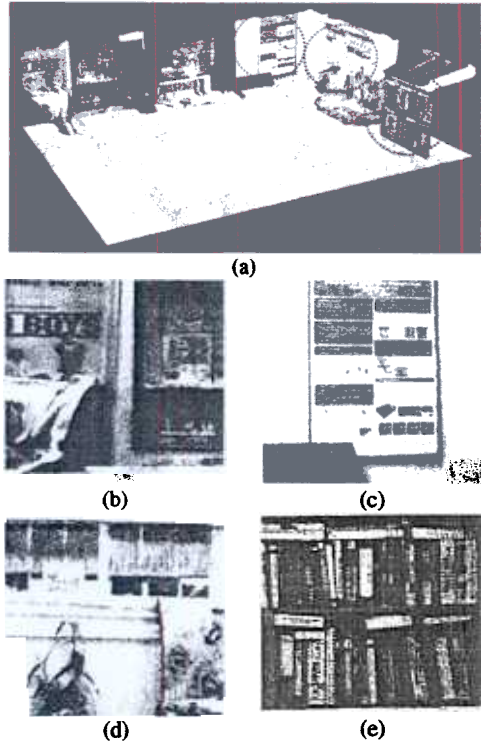


그림 10. 3D 파노라믹 가상 환경 모델과 각 부분별 확대 (a) 실내 환경 모델 (b) 장식장 (c) 포스터 (d) 창문 (e) 책꽂이

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 영상 기반 실내 환경 모델링을 위한 3D 파노라믹 메쉬 생성 기법을 제안하였다. 제안된 메쉬 모델링 방법은 멀티뷰 카메라를 이용해 실내 환경으로부터 얻어진 실제 환경의 점 데이터로부터 파노라믹 메쉬 모델을 생성한다. 입력된 점 데이터를 각 카메라 사이의 폐색을 고려하여 여러 개의 하위 점군들로 나누고, 복셀 공간을 이용해 노이즈를 제거한다. 적응적 샘플링을 통해 하위 점군으로부터 새로운 점 데이터를 생성한다. 각 부분별 점 데이터로부터 메쉬 모델을 생성하고, 메쉬 통합 과정을 통해 하나의 가상 환경 모델을 생성한다.

생성된 가상 환경 모델을 가상/증강현실 응용 어플리케이션 등에 적용함으로써 보다 사실감있는 가상 환경 구축이 가능하다.

생성된 파노라믹 가상 환경은 전경에 있는 물체와 배경과의 구분이 없이 하나의 메쉬 모델로 이루어져 있다. 이는 전경과 배경 사이의 비어있는 공간에도 메쉬를 생성하여 사실감을 떨어뜨리고 시점 변환을 제한하는 요소가 된다. 따라서 향후에는 전경과 배경을 분리하여 모델링 하는 부분에 대한 연구를 진행할 예정이다.

5. 참고문헌

- [1] V. Sequeira, K. C. Ng, E. Wolfart, J.G.M Gonçalves, and D.C. Hogg., "Automated 3D reconstruction of interiors with multiple scan-views", Proceedings of SPIE, Electronic Imaging, 1999.
- [2] Y.Sun, J.K.Paik, A.Koschan, and M.A.Abidi, "3D reconstruction of indoor and outdoor scenes using a mobile range scanner", Pattern Recognition, vol.3, pp 653-656, 2002.
- [3] S. Elgazzar, R. Liscano, F. Blais, and A. Miles, "3D Data Acquisition for Indoor Environment Modeling Using a Compact Active Range Sensor", Proceedings of IMTC97, 'Sensing, Processing, Networking, Vol. 1, pp 586-592, 1997.
- [4] Johnson, S. Kang, "Registration and Integration of Textured 3-D Data" Tech. report CRL96/4, Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Lab, 1996.
- [5] McMillan, L., G. Bishop, "Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System", Proceedings of SIGGRAPH 95, pp. 39-46, 1995.
- [6] H.Y. Shum, M. Han, and R. Szeliski, "Interactive construction of 3d models from panoramic mosaics", In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'98), pp 427-433, 1998.
- [7] Curless, B., and Levoy, M., "A volumetric method for building complex models from range images," Proceedings of SIGGRAPH'96, pp. 303-312, 1996.
- [8] H. Hoppe, "Surface Reconstruction from Unorganized Points", PhD Thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1994.
- [9] P. Fua. From Multiple Stereo Views to Multiple 3-D Surfaces. International Journal of Computer Vision, pp. 19-35, August 1997.
- [10] S. Kim and W. Woo, "Projection-based Registration using Multi-view camera for Indoor Scene Reconstruction," 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp. 484-491, 2005.
- [11] H. Edelsbrunner. "Algorithms in Computational Geometry", Springer-Verlag, New York, 1987.
- [12] PointGrey Research, <http://www.ptgrey.com>
- [13] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision", 2nd Ed. Cambridge University Press.