

정확한 돌출 형상의 표현을 위한 변위매핑

(Displacement Mapping for the Precise Representation of Protrusion)

유병현[†] 한순흥^{**}
(Byounghyun Yoo) (Soonhung Han)

요약 물체의 표면에 돌출된 형상을 실시간으로 표현하는 변위매핑 방법에 대하여 설명한다. 기존의 이미지 기반 변위매핑 방법이 기준면에서 함몰된 형상만을 표현할 수 있는 것과 달리, 기준면에서 수직방향으로 돌출된 높이를 표현하여, 표면에서 돌출된 형상의 상세를 실시간으로 표현한다. 또한 폴리곤의 경계부분에서 시점에 따라 수직인 두 개의 면을 추가하여, 기준면의 경계 외부로 초과하는 픽셀의 변위를 표현하였다. 이로써 경계부분의 돌출 형상에 대한 정확한 외곽선을 표현할 수 있다. 제안된 방법은 부드러운 돌출 형상의 표현과 더불어 돌출 형상의 급격한 경사면에 텍스처 정보를 추가하여, 수직 돌출 형상을 포함한 급격한 경사면을 표현할 수 있다. 이 방법은 GPU에서 수행 가능한 픽셀 단위 계산으로 이루어져 실시간으로 가시화가 가능하며, 경계부위의 정확한 외곽선의 표현과 급격한 돌출 형상의 표현이 가능하며, 건물과 같이 기준면에서 돌출된 형상의 상세 표현에 사용된다.

키워드 : 돌출 형상 표현, 실루엣 표현, 실시간 렌더링, 이미지 기반 렌더링, 표면의 상세 표현

Abstract This paper describes a displacement mapping technique which represents protruded shapes on the surface of an object. Previous approaches for image-based displacement mapping can represent only shapes depressed from the polygon surface. The proposed technique can represent shapes protruded from the underlying surface in real-time. Two auxiliary surfaces which are perpendicular to the underlying surface are added along the boundary of the polygon surface, in order to represent the pixels which overflow over the boundary of the polygon surface. The proposed approach can represent accurate silhouette of protruded shape. It can represent not only smooth displacement of protruded shape, but also abrupt displacement such as perpendicular protrusion by means of adding the supplementary texture information to the steep surface of protruded shape. By per-pixel instructions on the programmable GPU this approach can be executed in real-time. It provides an effective solution for the representation of protruded shape such as high-rise buildings on the ground.

Key words : image-based rendering, motion parallax, protruded shape representation, real-time rendering, silhouette rendering, steep displacement mapping, surface details

1. 서론

객체의 표면 형상에 대한 상세 정보의 추가는 렌더링 된 영상의 품질을 높이는 데 중요한 역할을 한다. Blinn이 제안한 범프 매핑[1]과 Cook이 제시한 변위매핑[2]은 객체 표면의 상세 표현에 대한 다양한 연구[3-5]의 기초가 되어왔다. 변위 매핑은 표면의 법선 벡터만을 이

용하는 범프 매핑과 달리 물체의 표면으로부터 변위만큼 경계를 확장하여 물체 표면의 높낮이를 표현할 수 있다. 그러나 표면의 상세를 표현하기 위한 방법 중 삼각망 생성을 이용한 변위매핑 방법들[6-8]은 많은 수의 미세한 폴리곤을 생성하기 때문에 인터랙티브 프로그램에 사용하는데 제약이 따른다. 미세한 폴리곤들에 의한 명시적인 렌더링을 하지 않고, 변위매핑을 가속하여 표현하는 기술들은 광선 투사법[9-12]과 3차원 역방향 이미지 워핑 방법[13], 3차원 텍스처 매핑[14,15], 그리고 가시정보를 미리 계산하여 저장하는 방법[16,17]에 기반을 두고 있다. 광선 투사법과 역방향 이미지 워핑에 기반한 방법들은 계산량이 많기 때문에 실시간 응용에 적

[†] 학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과
yoo@kaist.ac.kr

^{**} 종신회원 : 한국과학기술원 기계공학과 교수
shhan@kaist.ac.kr
논문접수 : 2005년 11월 22일
심사완료 : 2006년 7월 16일

합하지 않다. 3차원 텍스처 매핑 방법은 2차원의 텍스처가 있는 폴리곤을 적층하여 변위매핑을 렌더링하기 때문에 시점에 따라 부자연스러운 결과가 생기기도 한다. 가시정보를 미리 계산하는 방법은 많은 양의 메모리를 사용해야 한다. 국내에서는 표면의 상세를 표현하기 위한 하드웨어 구조에 대한 연구[18,19]가 진행되었고, 변위매핑 관련 연구로는 다 시점 변위맵을 이용한 적응형 텍스처 매핑에 대한 연구[20]와 지형공간 정보의 이미지 기반 표현 방법에 대한 연구[21]가 있다.

최근에는 간략화된 ray-tracer를 사용하여 적은 양의 메모리를 사용하면서 self-occlusions, 그림자, 그리고 합몰을 실시간으로 표현하는 방법[22-24]이 고안되었다. 이러한 방법은 물체의 표면에 근접한 시점의 상세는 잘 표현하고 있으나 범프 매핑[1]과 같이 물체의 경계부분에서 외곽형을 표현하지 못하여 실루엣(silhouette)을 표현하지 못하는 단점이 있다. 물체의 실루엣을 표현하기 위하여 곡면을 이차 곡선을 이용하는 방법[25]이 고안되었으나, 평탄한 물체의 표면에서 돌출(protrusion)된 형상은 표현이 불가능하며, 표면에서 합몰(interpenetration)된 형상만을 표현하고 있다.

미세한 폴리곤들을 생성하지 않고 물체의 표면에서 돌출된 형상을 표현하기 위해서는 표현할 물체의 표면이 렌더링되는 폴리곤 위에 위치하여 돌출된 형상이 폴리곤으로부터 튀어나온 모습이 되어야 한다. 또한 물체의 경계부근의 외곽선을 정확하게 표현할 수 있어야 한다.

이 논문은 물체를 표현하고 있는 기준면이 변형되거나 왜곡되지 않으면서 기준면에서 돌출된 형상의 상세를 표현하는 방법에 대해서 소개한다. 이 연구에서는 기준면에서 돌출된 표면의 높이맵에 대한 정의를 하고, 이로부터 ray-tracer를 이용하여 돌출을 표현한다. 돌출된 물체의 경계부분에서 일어나는 변위의 초과(overflow)를 해결하기 위하여 두 개의 추가적인 면을 기준면에 추가하여 실루엣을 표현한다. 기존의 연구와 같이 self-occlusions과 그림자를 표현하면서 추가로 돌출된 형상에 대한 적용이 가능하고, 추가적인 정보를 이용하여 급격한 높이의 변위에 따라 발생하는 영상의 왜곡을 해결한다. 그림 1은 이 논문에서 설명하고 있는 방법을 사용하여 지표면에서 돌출된 건물의 형상을 기준면의 폴리곤을 변형하지 않고 표현한 것이다.

2. 관련 연구

미세한 폴리곤을 생성하지 않고 표면의 형상을 표현하는 방법 중 변위매핑을 이용한 표현 방법으로는 relief texture mapping[5]이 있다. Oliveira는 이미지 워핑 방식을 pre-warping과 텍스처 매핑 과정으로 분리한 relief texture mapping을 제안하고, 이를 확장하여 여



그림 1 돌출 변위매핑을 이용한 도시의 표현

러 장의 relief texture를 사용한 객체와 장면을 구성하는데 이용하였다[5]. 그러나 relief texture mapping은 기준면에서 깊이 방향으로 합몰된 형상만을 표현하고 있다.

LRT(Layered relief texture)[26]는 relief texture mapping과 layered depth image[27]의 장점을 융합하였고, Cylindrical relief texture[28]는 relief texture mapping을 cylindrical 좌표계로 확장하여 곡면의 상세를 표현하였다. LRT는 이미지 워핑 과정에서 일어나는 픽셀의 초과 문제를 해결하기 위하여 투영 평면의 scale-and-shift 개념을 이용하여 relief texture mapping의 문제점을 개선하였다. 하지만 LRT도 시점의 변화에 따라 물체의 상세표현의 해상도가 떨어지는 것을 보상하기 위해서 서로 다른 면의 relief texture를 여러 장 사용하였다. 따라서 relief texture mapping을 기반으로 한 방법은 물체의 표현에 독립적인 면의 개수만큼 relief texture가 필요한 단점이 있다.

Welsh는 self-occlusion과 parallax 효과를 포함하는 parallax mapping[29]을 프로그래밍 가능한 GPU에서 구현하고 변위에 제한을 두어 시점의 각도가 표면과 근접할 때 나타나는 왜곡을 제한하였다[30,31]. McGuire는 텍스처 필터링에 MIP-map LOD bias를 이용하여 경사가 가파른 형상에 대한 parallax의 표현이 가능하도록 하였다[23]. Donnelly는 3차원 텍스처를 사용하는 voxel ray-tracer와 구 형태의 광선 투사 자료 구조를 제안하고, 이를 픽셀 단위의 변위매핑에 이용하였다[32]. Brawley와 Tatarchuk는 높이맵을 시선의 반대 방향으로 광선 투사하는 방법을 이용하여 GPU 상에서 parallax occlusion mapping을 구현하고[33], 시점에 따라

텍스처를 샘플링 하는 회수를 동적으로 조절하여 적용하는 방안을 제시하였다[24]. Policarpo는 탄젠트 공간에서 바이너리 검색을 이용하여 비교적 정확한 ray-tracer를 제안하였다[22].

2.1 Ray Tracing Approaches

최근 제안된 표면의 상세를 표현하기 위한 연구들은 프로그래밍이 가능한 GPU를 사용하여 가속할 수 있도록 하기 위하여 광선 투사법과 유사한 방법을 사용하고 있다. 이들은 표 1과 같이 표면의 상세를 보다 정밀하게 표현할 수 있도록 ray-tracer를 간략화 하거나 모사하는 기법을 사용하고 있다.

그러나 이 방법들의 공통적인 문제점은 폴리곤 면에서 깊이 방향으로 합몰된 물체의 깊이를 표현하고 있다는 것이다. 이들은 물체 표면의 높이 정보를 이용하여 표면의 상세를 표현하기 위한 것이나 실제 사용하고 있는 변위맵과 구현 과정에서는 폴리곤 면 아래로 합몰된 깊이만을 표현하고 있다. (실제 변위매핑이 렌더링되기 위해서 존재하는 vertex로 구성된 폴리곤 면을 기저면(base surface)이라 하며, 본 논문에서는 그림 2 및 4와 같이 간단히 폴리곤 면이라고 표현한다.)

Welsh[30]는 높이 정보를 사용하고 있으나 parallax를 추정하는 수준이기 때문에 실루엣과 돌출을 표현하지는 못한다. 나머지 방법들[22-24,32]은 그림 2와 같이 실제 폴리곤 면이 높이맵으로 이루어진 가상의 볼륨에서 윗면에 위치하기 때문에 높이의 개념을 사용하고 있으나, 실제로는 깊이를 나타내고 있다. 따라서 이 방법들은 기준면에서 합몰된 형상을 표현하는 데에는 적합하지만, 표면에서 돌출된 형상을 표현하는 데에는 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 이를 Relief mapping의 예를 들어 설명하면 다음과 같으며, 이러한 현상은 기존의 방법에서 공통적으로 발생하는 문제점이다.

Relief mapping[22]에 돌출된 형상을 갖는 높이맵을 적용하면 그림 3의 (b),(c)와 같이 바닥면이 기준면 아래로 내려가는 현상이 나타나게 된다. 돌출된 형상을 표현하기 위해서는 더 낮은 면을 더욱 아래로 낮춰야 하기 때문이다. 또한 (c)와 같이 돌출된 형상의 높이를 증가시키기 위해서는 (b)와 비교해서 더욱 바닥면을 낮추

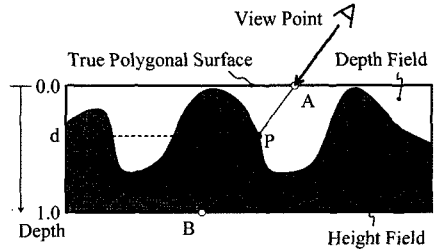


그림 2 변위 매핑을 위한 높이 및 깊이의 표현

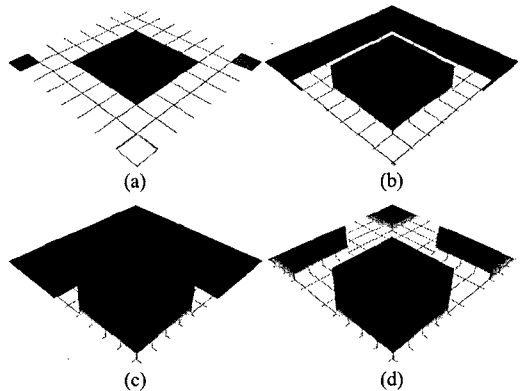


그림 3 Relief mapping을 이용한 돌출 형상의 표현:

- (a) 텍스처 매핑을 이용한 사각형 폴리곤의 표현,
- (b) Relief mapping을 이용한 표현 결과,
- (c) 돌출 형상의 높이를 두 배로 늘리고 (b)와 동일한 방법으로 표현한 결과,
- (d) 주변부를 타일 형태의 반복된 형상으로 표현한 결과

어야 한다. 이때 발생하는 구체적인 문제점은 다음과 같다.

- 물체의 실제 표면에 해당하는 바닥면의 합몰: 폴리곤 면 위로 돌출된 형상이 아니라 실제로는 폴리곤 아래 방향으로 합몰된 형상만을 표현하고 있다. 따라서 높이를 변화시키면 돌출된 물체의 높이뿐만 아니라 바닥면의 깊이가 변하게 된다(그림 3(b)와 (c)).
- 표면 상세의 위치 변화: 바닥면의 합몰로 인하여 실제 상세의 위치가 변하게 된다. 그림 3(a)와 (b)를 비교하면 격자의 위치가 변경된 것을 볼 수 있다.

Table 1 Ray-tracing을 이용한 GPU 기반의 기존 연구 비교

	Ray-tracer	Displacement field
Welsh 2004 [30]	Approximation + Offset limit	Height*
McGuire 2005 [23]	Linear search + MIP-map LOD bias	Depth**
Donnelly 2005 [32]	Voxel ray-tracer	Depth**
Tatarchuk 2005 [24]	Linear search + Dynamic sampling rate	Depth**
Policarpo 2005 [22]	Linear search + Binary search	Depth**

* Ray-tracing을 모사하는 근사값으로 표현한다.

** 높이 값을 사용하고 있으나 실제 표현은 표면으로부터 깊이를 이용하고 있다.

• 경계부근에서 텍스처의 왜곡: 돌출되지 않은 바닥면의 경계부근에서는 투영 중심에서 더욱 멀어지기 때문에 수축하는 현상이 나타난다. 그림 3(b),(c)와 같이 경계 주변에 텍스처의 정보가 누락된 부분이 발생하게 된다. 이러한 문제점은 주변에 인접한 폴리곤의 relief map에 대한 정보를 이용하여 해결할 수 있으나, 이 경우 5개의 relief map을 사용하는 단점이 있다. 따라서 일반적으로 (d)와 같이 타일 형태의 relief map을 사용한다. 이때에는 메모리의 증가 없이 공백을 제거할 수는 있으나, 여전히 바닥면이 수축하는 현상 (a)와 (d)의 격자를 비교하여 확인할 수 있다.

Oliveira[25]는 곡면의 경계부분의 실루엣을 표현하기 위하여 이차 곡선을 이용하고 곡면까지의 거리를 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 이차 곡면을 정의하는 두 개의 계수가 평면을 나타낼 때에는 실루엣을 표현하지 못한다.

근본적으로 이 연구들은 그림 3의 렌더링 결과와 같이 변위맵의 가장 높은 면이 폴리곤 면에 위치하고 있어 실제로 돌출을 표현하는 것이 아니라 함몰된 형상을 표현하게 된다. 또한 MIP-map LOD bias를 이용한 방법[23] 외에는, 경사가 급격한 변위를 갖는 표면의 상세는 제대로 표현하지 못하고 있다.

3. 돌출 변위매핑

폴리곤을 변형하지 않고 물체의 표면에 돌출된 형상을 표현하여 상세를 추가하기 위해서는 높이를 표현할 수 있어야 한다. 함몰된 형상과는 달리 높이에 따라 픽셀이 폴리곤 밖으로 돌출될 수 있기 때문에, 정확한 실루엣을 표현하기 위해서는 폴리곤 밖으로 초과하여 나가는 변위도 표현하여야 한다. 경계부분의 초과 문제를 해결하기 위하여 폴리곤을 변형하는 방법과 새로운 면을 추가하여 표현하는 방법을 고려할 수 있다. 돌출된 형상의 기울기에 따라 가파른 변위를 표현하기도 한다. 이를 위해서는 급격한 경사면에서 발생하는 텍스처의 왜곡을 제거하여, 렌더링 품질을 향상시킬 수 있는 방법이 필요하다. 다음 각 절에서는 이러한 문제점의 해결 방법에 대하여 설명한다.

3.1 Protruded Displacement Mapping

표면에서 돌출된 형상을 표현하기 위하여 돌출된 변위의 표현방법을 제안한다. 변위맵을 기준면에서의 깊이 정보가 아닌 높이에 대한 정보로 정의하였다. 그림 4는 돌출을 표현하는 변위맵의 단면과, 시점에서 렌더링할 픽셀까지의 시선을 기존의 변위맵과 비교하여 나타낸 것이다. 기존 연구의 변위맵과 달리, 실제 렌더링되는 폴리곤 면은 변위맵으로 구성되는 단면의 아랫면에 위치한다.

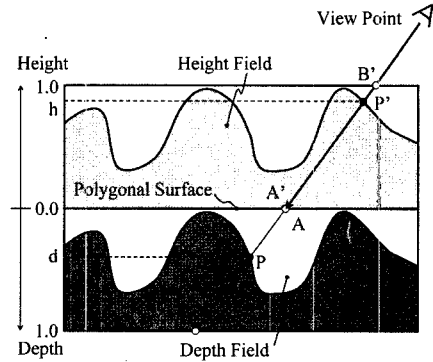


그림 4 돌출과 함몰의 표현을 위한 정의

돌출된 형상의 바닥면에 해당하는 표면의 높이를 0으로 가장 높은 위치를 1로 표현하여 표면에서 돌출된 형상의 변위맵을 정의한다. 기존의 연구들과는 달리 변위매핑을 적용할 폴리곤 면을 높이가 0인 (기존에는 깊이가 0) 면으로 설정한다. 따라서 렌더링할 픽셀은 폴리곤 면에 있는 A'가 되며, 실제 보여주어야 하는 점은 높이에 의하여 돌출된 P'가 된다. Relief mapping과 달리 돌출의 방향은 시선 벡터와 반대 방향으로 A'를 렌더링할 때 높이맵과 교차하는 점 P'를 찾아야 한다. 그러나 시선 벡터가 높이맵에 의해 돌출된 표면과 여러 번 교차할 경우 가장 높은 변위의 교차점을 찾기 위하여 B'에서부터 A' 방향으로 교차점을 찾는다. 따라서 변위맵과 시선 벡터의 교차점을 찾는 방법은 relief mapping [22]과 유사하다.

먼저 그림 5의 위쪽에 있는 그림과 같이 시점에서 높이맵이 구성하는 가상의 볼륨의 윗면과 시선이 교차하는 점 B로부터 실제 렌더링할 픽셀인 A까지 일정한 간격으로 높이맵에 저장된 값을 검사한다. 시선과 높이맵이 구성하는 돌출된 면 사이의 교차점을 구하기 위하여 순차적으로 높이 값을 검사하여 검사 시점의 높이 값이 그 점의 높이맵에 저장된 값보다 작을 때 검사를 멈춘다. 그림 5에서 순차적으로 검사를 진행하여 3번째 점을 검사한 후, 4번째 점에서 검사한 높이보다 이 점에서의 높이맵의 높이 값이 더 높기 때문에 검사를 마치게 된다. 이후 보다 정확한 교점을 얻기 위해서 그림 5의 아래 있는 그림과 같이 3번과 4번 점 사이를 바이너리 검색을 통해서 정확한 교점의 높이를 찾는다.

이러한 방법을 그림 6(a)와 같은 사각형 폴리곤에 적용하면 그림 6(b)와 같은 형상을 나타낼 수 있다. 높이맵은 가운데 파란색 부분만 돌출된 형상이다. 돌출된 변위매핑에 의하여 격자가 있는 노란색 바닥은 높이가 0인 평면으로 변형되지 않고 폴리곤 면 위에 정확하게 위치하고 있다. 돌출된 높이를 갖고 있는 파란색 박스 형태만 돌출되어 폴리곤 면 위쪽으로 튀어나온 형상을

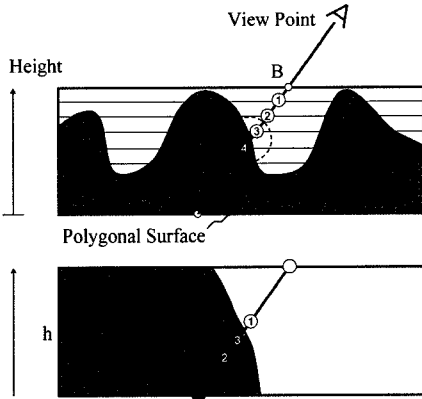


그림 5 순차 검색(위)과 바이너리 검색(아래)을 이용한 ray tracing

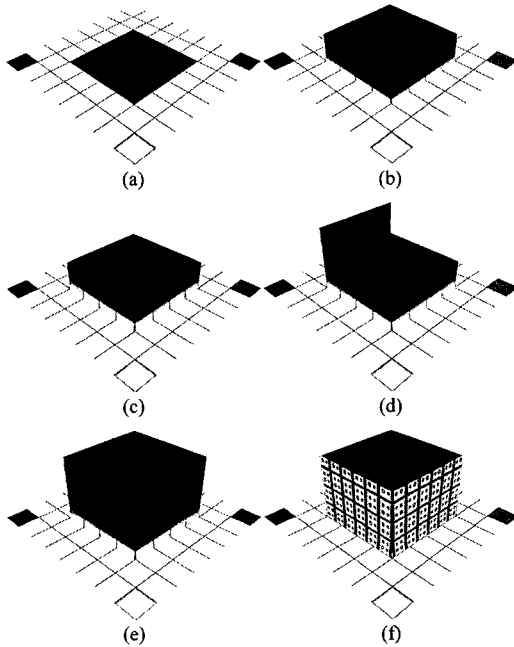


그림 6 돌출 변위 매핑: (a) 텍스처 매핑을 이용한 표현 결과, (b) 돌출 변위 매핑을 적용한 결과, (c) 돌출 형상의 높이를 (b)의 두 배로 증가시킨 결과 이미지, (d) 변위에 의한 픽셀의 초과문제를 해결하기 위하여 하나의 면을 추가시킨 결과, (e) 완전한 실루엣 표현을 포함하는 돌출 변위 매핑, (f) 급격한 변위를 갖는 돌출형상의 상세표현을 위하여 추가적인 텍스처 정보를 이용한 결과 이미지

나타내고 있다. 동일한 높이맵을 사용하면서 박스의 높이를 두 배로 표현하여도 (c)와 같이 바닥면에 해당하는 노란색 평면은 폴리곤 면에 변함없이 위치하고 있고, 파

란색 박스의 높이만 두 배로 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이 돌출된 변위매핑에 의한 렌더링 결과물은 그림 3의 (b),(c)에서 바닥면이 움직이면서 왜곡되는 것과 비교된다.

3.2 Displacement Overflow

돌출된 변위매핑의 계산은 픽셀 단위로 이루어 지기 때문에, 표면에서 돌출된 형상을 변위매핑으로 표현하면 그림 7과 같이 시선 벡터 E-V보다 위쪽으로 돌출된 영역은 표현하는 것이 불가능 하다. 예를 들어 그림 8의 점 P와 같이 시선 VE의 위쪽에 있는 돌출된 부분이 변위매핑으로 표현되려면 폴리곤 면의 경계를 벗어나는 점 A로부터 계산이 이루어져야 한다. 그러나 실제 폴리곤이 존재하지 않는 경계 밖의 영역에서는 픽셀 단위의 변위매핑 계산이 수행되지 않는다. 이와 같은 픽셀의 영역 초과 문제는 이미지 기반의 변위매핑 방법에서 공통적으로 일어나는 문제중의 하나이다. 변위에 의한 픽셀의 초과를 표현하지 못하면 폴리곤 면의 경계부근에서 돌출된 형상의 외곽선을 제대로 표현하지 못한다.

Parilov[26]는 폴리곤 면의 크기와 위치를 조절하여 초과 문제를 해결하였다. Oliveira[5]는 추가적인 보조면(auxiliary view plane)을 사용하고, 각 면에 평행한 relief texture를 사용하였다. 그러나 Oliveira의 방법은 추가되는 면의 개수만큼 relief texture를 사용하여 메모리 사용량이 증가하는 단점이 있다.

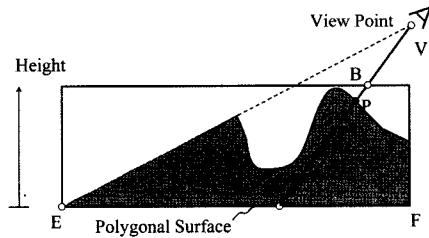


그림 7 폴리곤 면의 경계에서 발생하는 돌출 형상의 픽셀 초과문제

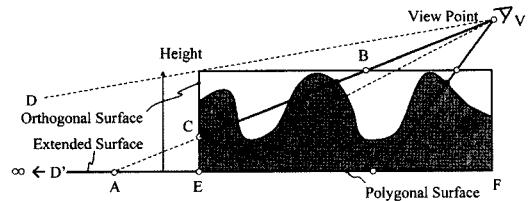


그림 8 픽셀 초과 문제의 관리

3.2.1 Extended Surface

그림 8의 점 P는 폴리곤 면의 끝점 E와 시점 V를 연결하는 선분 EV 보다 위에 있어 변위매핑만으로는 표

현이 불가능하다. P점이 폴리곤 면의 연장 평면 ED'와 만나는 점 A을 렌더링하여 EV보다 위에 있는 높이맵의 돌출 형상을 표현한다.

LRT[26]는 투영 평면보다 깊이 방향으로 들어간 물체를 표현하였으나, 본 연구에서는 그림 8과 9에서와 같이 돌출된 형상을 표현하기 위해서 폴리곤 면을 확장한다. 그림 8의 VD는 높이맵에 의한 돌출 형상을 모두 표현하기 위한 시점의 방향으로, VD와 EF의 연장선이 만나는 교점 D'까지 폴리곤 면을 확장해야 모든 픽셀의 초과를 제거할 수 있다. 즉 면 EF를 D'F로 확장해야 한다.

그러나 점 P를 바라보고 있는 시점 VA의 기울기가 폴리곤 면 EF에 근접할수록 점 A의 위치는 점 E에서 멀어지게 된다. 따라서 VA가 기울어질수록 D'는 무한대에 가까워져 그림 9에서 표시한 확장된 면의 길이 Ex와 Ey는 무한대에 가까워진다. 따라서 시점의 기울기에 따라 텍스처의 해상도가 떨어져 이미지의 품질이 저하되는 문제점이 있다. Parilov는 여러 장의 LRT를 시점의 방향에 따라 변경하면서 사용하였으나, 이는 메모리와 컨텐츠 저장의 관점에서 단점으로 작용한다.

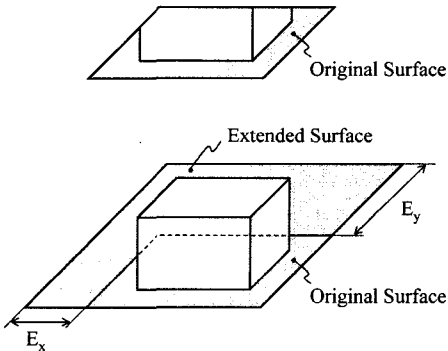


그림 9 폴리곤 면의 확장: 원래의 폴리곤 면(위)과 픽셀 초과를 해결하기 위한 면의 확장(아래)

3.2.2 Auxiliary Surface

폴리곤 면을 변형하는 방법은 vertex의 수를 증가시키지 않는 장점이 있으나, 확장되는 크기를 시점의 변화에 따라 계산해야 하고, 시점에 따라 이미지의 품질이 떨어지는 단점이 있다. 또한 vertex 단위의 계산과 픽셀 단위의 계산을 모두 수행해야 하기 때문에 GPU 상에서 구현하는데 제약이 따른다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 추가적인 면을 사용하는 방법을 사용한다.

그림 10은 그림 8을 3차원으로 확장하여 표현한 것이다. 그림 8의 점 P는 EF와 수직인 면과 점 C에서 교차한다. 따라서 수직인 면을 만들고 픽셀 C에 점 P의 면

EF상의 텍스처 좌표에 해당하는 정보를 렌더링하여 초과 문제를 해결한다. 점 C를 가상의 확장면 ED' 위에 존재하는 점 A로 매핑하고 이 점의 텍스처 좌표를 이용하면 한 장의 높이맵과 텍스처만을 이용하여 수직인 면 위에 존재하는 점 C를 표현할 수 있다. 그림 10의 선분 AV의 성분 비율 (vx, vy, vz)는 탄젠트 공간에서 시점의 좌표로부터 얻을 수 있다. 수직인 면 위의 점 C의 uv 공간 좌표는 dx, dy로 표현된다. 이들의 관계로부터 삼각 비례를 이용하면, 가상의 확장면에 매핑된 점 A의 uv 공간 좌표는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$x' = \frac{dx \times vx}{vz}$$

$$y' = \frac{dx \times vy}{vz} + dy$$

여기서 vx, vy, vz 는 폴리곤 면의 탄젠트 공간 좌표계를 사용하고, dx, dy는 수직인 면의 uv 공간 좌표계, x', y'는 가상의 확장면의 uv 공간 좌표계를 사용한다. 가상의 확장면의 uv 공간은 폴리곤 면의 경계를 기준으로 워핑 된 uv 공간으로 정의한다. 그림 10의 수직인 면의 탄젠트 공간 좌표는 그림 11과 같이, 폴리곤 면과 인접한 면들 사이의 탄젠트 공간 좌표계의 관계를 이용하여 계산할 수 있다. 그림 11의 바닥면을 폴리곤 면이라고 할 때 좌측에 위치한 면의 탄젠트 공간은 다음과 같이 변환된다.

$$normal = -tangent$$

$$tangent = normal$$

$$binormal = binormal$$

그림 11의 탄젠트 공간 좌표계의 정의를 이용하면 다른 방향으로 인접한 면들에 대해서도 탄젠트 공간의 매핑이 가능하다. 그림 12와 같이 시점의 방향에 따라서 초과가 발생하는 경계에 인접한 수직인 면을 추가한다. 경계에 인접한 두 개의 면에 돌출에 의한 변위를 표현함으로써 경계 부근의 돌출된 물체의 실루엣을 표현하는 것이 가능하다.

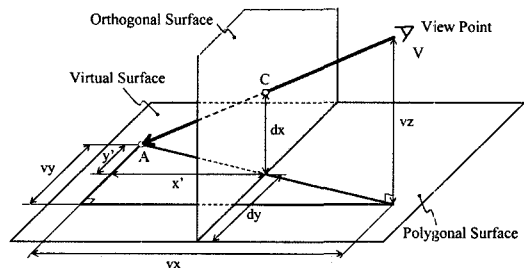


그림 10 픽셀의 초과 문제를 위한 가상의 확장 면과 추가 면 사이의 매핑

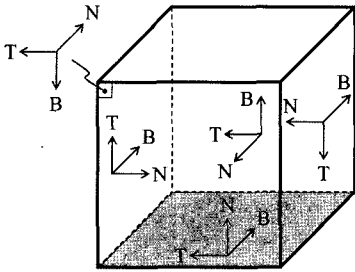


그림 11 탄젠트 공간 좌표계의 정의

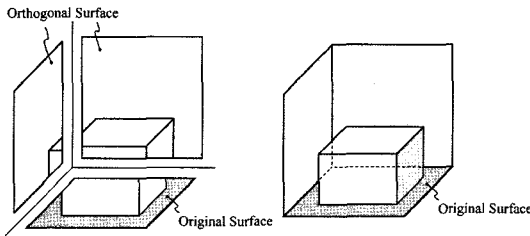


그림 12 두 개의 수직인 추가 면을 이용한 픽셀 초과 문제의 관리

추가된 수직인 면의 렌더링은 알파 블렌딩을 사용하여 물체의 돌출된 영역만을 선택적으로 가시화 한다. 본 논문에서 제시한 방법은 Oliveira의 relief object[5]와 달리 탄젠트 공간의 매핑을 통하여 하나의 텍스처와 높이맵으로 표현이 가능하다. 따라서 적은 메모리 사용량으로 물체의 실루엣을 표현할 수 있고, 정확한 경계의 표현이 가능하여 타일 형태의 표현을 적용하지 않아도 된다.

그림 6(c)로부터 경계에 수직인 한 개의 면을 추가하여 초과가 발생하는 영역을 표현하면 그림 6(d)와 같은 형상이 표현된다. 그림 6(e)는 초과가 발생하는 모든 경계에 수직인 면을 선택적으로 추가하여 돌출 변위매핑의 경계부근에서 완전한 실루엣을 표현하고 있다.

4. 급격한 변위의 표현

이 논문에서 제시한 돌출된 변위매핑 방법은 돌출된 형상의 경사가 급한 물체들, 특히 건물과 같이 수직 방향으로 돌출된 물체의 표현에도 적용이 가능하다. 수직으로 돌출된 물체는 돌출된 방향의 경사가 매우 급하여 높이에 따라 텍스처 좌표상의 한 점이 넓은 영역을 표현하기도 한다. 따라서 기존의 방법만으로는 좋은 영상 품질을 얻을 수 없다.

부드러운 변위맵은 변위에 의해 변형되는 텍스처 좌표의 크기가 인접한 픽셀과 큰 차이를 갖지 않기 때문에 부드럽게 표현되는데 반하여, 수직 방향으로 돌출된 물체의 수직면은 변위맵 상에서 하나의 점 또는 선으로

표현되기 때문에 시점에 따라 텍스처의 왜곡이 매우 커진다. 따라서 급격한 경사의 돌출 변위매핑에는 이를 보상할 수 있는 방법이 필요하다.

4.1 Sampling Rate

높이맵에 의해 돌출된 면과 시선 사이의 교점을 구하기 위하여 앞서 설명한 순차 검색은 부드러운 변위에서 좋은 결과를 보여준다[22-24]. 그러나 급격한 변위에서는 순차 검색만으로는 돌출된 형상을 겹겹이 쌓아 놓은 것과 같은 왜곡된 이미지를 생성한다. 순차 검색과 함께 바이너리 검색을 통해서 보다 정확한 교차점을 찾아 왜곡을 방지할 수 있다. 그러나 기본적으로 간략화된 광선 투사 방법은 폭이 좁은 돌출 형상에 대해서는 순차 검색 과정에서 교차점을 찾지 못하고 간과할 가능성을 가지고 있다. 이를 위하여 변위맵에 따라 순차 검색의 폭을 조절하는 것이 필요하다. 그러나 변위맵의 변화율에 대한 정보를 미리 생성하지 않고서는 실시간 응용이 어렵다.

4.2 Steep Displacement Detection

급격한 경사를 갖는 돌출 형상을 과장하면 그림 13과 같이 수직으로 돌출된 육면체 형상으로 가정할 수 있다. 수직으로 돌출된 형상을 표현할 수 있다면 어떠한 급한 경사면에 대한 돌출도 표현이 가능하다.

그림 6(f)는 (e)에 추가적인 텍스처 정보를 더하여 박스의 옆면을 표현한 것이다. 이 경우 박스의 옆면이 플리곤 면에서 수직이기 때문에 텍스처 좌표상에서 하나의 픽셀이 박스 옆면의 최저점부터 최고점까지 모두 표현하게 된다. 따라서 (e)와 같이 텍스처를 옆면에 길게 늘어놓은 형상으로 표현되고 있다. 그림 6(a)의 파란 네모와 노란 바탕 사이의 경계선이 (e)에서 돌출된 형상의 옆면 전체를 표현해야 하고, 픽셀 단위의 순차 검색 및 바이너리 검색 과정에서 미세한 오차가 발생하기 때문에 실제로는 경계에 해당하는 검정색 선분 주변의 픽셀들이 박스의 옆면 전체에 선형 보간이 된 것과 같은 효과가 나타난 것을 그림 6(e)에서 확인할 수 있다. 박스의 옆면(급한 경사면)과 윗면(낮은 경사면)으로 구분하면, 왜곡이 심하게 발생하는 급한 경사면에 추가적인 텍스처 정보를 입력하여 왜곡을 보정하는 것이 가능하다.

급격한 경사면의 검출은 다음과 같은 방법으로 가능하다. 그림 13은 그림 6에서 사용한 높이맵의 단면과 유사하다. 완만한 경사면에 존재하는 점 P_A 의 경우 순차 검색 과정에서 1번 점의 uv 좌표상의 높이맵을 읽어 P_{A1} 의 높이 값으로 h_{A1} 를 검출한다. 다음 단계인 2번 위치에서는 높이 값이 높이맵에서 읽은 값보다 낮아 순차 검색을 중단하게 된다. 이후 바이너리 검색에서 얻어지는 정확한 교점은 P_A 가 되고, 이 점의 높이는 h_A 로 결정된다. 이때 경사가 완만한 면에 존재하는 점 P_A 의 높

이 h_A 는 h_{A1} 과 거의 유사한 값을 갖는다. 반면 급격한 경사면에 위치한 점 P_B 의 경우에는 다음과 같은 결과를 얻는다. 순차 검색 과정에서 2번 위치까지 높이맵에서 읽은 값(h_{B2})이 바닥면에 위치하게 된다. 다음 단계인 3번 위치에서는 테스트에 사용된 높이 값이 높이맵에서 읽은 값(h_{A1} 과 동일)보다 작아 순차 검색을 중단하게 된다. 이후 바이너리 검색에서 얻은 교점 P_B 의 높이 값은 h_B 로 결정된다. 이때 급격한 경사면에 위치한 P_B 점의 높이 h_B 는 h_{B2} 와 큰 차이를 갖는다. 이와 같이 두 경우의 차이를 이용하여 급격한 경사면에 위치한 점을 구분해 낼 수 있다. 구분 과정은 다음과 같다.

- 순차 검색 과정에서 검출이 끝나기 직전의 좌표에서 읽은 높이맵의 값 a 를 저장한다.
- 바이너리 검색 결과 얻은 교점의 높이 값 b 를 얻는다.
- 두 값 사이의 격차 $b-a$ 가 한계 값 δ 보다 크면, 급한 경사를 갖는 면에 위치한 점으로 판단한다.

이와 같은 방법에서 검출한 급격한 경사면에는 적은 메모리를 차지하는 타일 형태의 텍스처를 uv 좌표와 검출된 높이 값을 이용하여 매핑이 가능하다. 그 결과 그림 6의 (e)와 같은 형상을 얻을 수 있다.

이 방법은 건물과 같이 수직 방향으로 돌출된 물체의 표현 등에 사용될 수 있다. 이때 δ 의 값을 화면과 높이맵의 해상도에 따라 적절히 조절하여야 한다. 만약 δ 를 너무 작게 잡으면 평평한 면까지 급격한 경사면으로 판단하여 그림 14의 (a), (c)와 같이 건물의 지붕에 경사면으로 검출되는 픽셀들이 섞이는 문제가 발생한다. 이러한 문제는 높이맵의 값에 미세한 오차들이 있을 경우에 더욱 커지게 되며 δ 값의 조절로 그림 14의 (b), (d)와 같이 오류를 제거할 수 있다.

5. 구현 및 결과

본 논문에서 설명하고 있는 돌출 형상의 변위매핑 방법을 Microsoft HLSL(High Level Shading Language)를 이용하여 pixel shader로 구현하고, 이를 폴리곤으로 이루어진 도시 지형 모델에 건물의 상세를 추가하는데 적용하였다. 지형 정보 중 건축물은 실제환경에 존재하

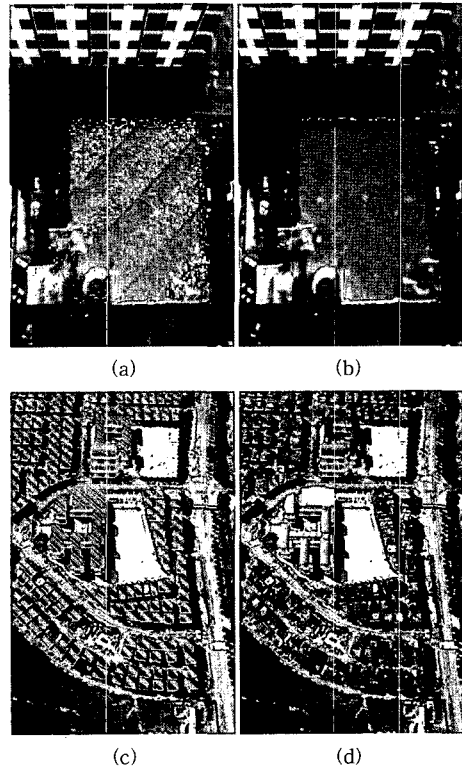


그림 14 급격한 면의 검출 오류로 인한 추가적인 텍스처 정보의 부정확한 매핑(a, c)과 이를 해결한 정확한 매핑 결과(b, d)

는 대표적인 돌출 형상으로 본 연구에서 설명하고 있는 돌출 변위매핑의 응용에 적합하다. 기본적인 vertex 단위의 좌표 변환 등의 계산은 vertex shader에서 이루어진다.

그림 3과 6에는 512×512 texel 크기의 텍스처와, 256×256 RGBA 텍스처로 구성된 높이맵을 사용하였다. 그 외의 실험에 사용된 도시 지역의 건물 모델은 1024×1024 texel과 1024×1024 RGBA 텍스처로 구성하였다.

출력된 이미지의 크기와 순차 검색의 회수에 따라서 렌더링 속도의 차이가 발생하는데, nVidia GeForce 6600GT를 사용하는 2.8GHz의 PC에서는 다음과 같은 렌더링 속도를 보여 주었다. 640×480 해상도의 출력 이미지 생성할 때 순차 검색을 10회로 제한할 경우 약 60 프레임을 보여주었다. 같은 조건에서 순차 검색을 50회로 늘려서 보다 정밀한 돌출 형상을 렌더링할 때에는 초당 약 25 프레임을 보여주었다. 1000×1000 해상도의 출력 이미지를 렌더링하는데 10회의 순차 검색의 경우 초당 약 30 프레임 이상의 속도를 보여주었고, 50회로 증가시키면 초당 약 10 프레임의 속도로 렌더링되었다. 일반적인 응용 프로그램을 가정할 때 640×480 해상도의

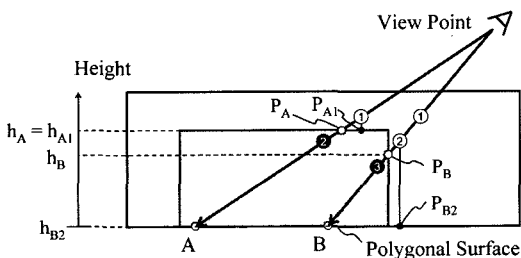


그림 13 급격한 돌출 형상의 검출

출력 이미지에서 초당 약 60 프레임의 렌더링 속도로 만족할 만한 결과를 보여주었다.

이 실험은 픽셀 단위의 계산으로 이루어지고 GPU를 이용한 것이기 때문에 이미지 상의 돌출 형상의 복잡도나 개수, 텍스처의 크기에 거의 영향을 받지 않는다.

그림 6은 단순한 박스 모양의 돌출 형상에 본 논문에서 설명한 돌출 형상을 위한 변위매핑 방법을 적용한 것이다. 그림 15는 건물의 형상 표현에 적용한 것이다. 그림 15의 (a)는 1024×1024 텍스처를 가지화 한 것으로 시점에 무관하게 항상 건물의 지붕만 보인다. (b)는 relief mapping[22] 방법으로 렌더링한 것으로 지표면이 폴리곤 면 아래로 함몰되고, 경계부근에서 텍스처의 정보가 누락되는 문제점을 볼 수 있다. (c)는 돌출 형상을 위한 변위매핑 방법을 적용하여 렌더링한 것이다. 폴리곤 면의 경계부근에서 변위에 의한 픽셀의 초과가 일어난 것을 볼 수 있다. 이로 인하여 돌출된 건물의 윗부분이 잘려 나간 것처럼 왜곡되었다. (d)는 (c)에서 나타난 초과 현상을 논문에서 설명한 방법으로 해결한 것이다. 건물의 경계부근에서 정확한 실루엣을 표현하고 있는 것을 볼 수 있다. (e)는 급격한 경사를 갖는 건물의 옆면에 추가적인 텍스처 정보를 이용하여 보다 사실적인 돌출 형상을 생성한 것이다. 건물의 옆면 정보를 타일 형태의 텍스처로 가공하여 이용하였다. (e)와 (f)는 동일한 대상을 서로 다른 배율로 적용한 것으로, 본 논문에서 설명하고 있는 방법이 표현할 대상의 배율과 관계없이 잘 적용되고 있음을 보여준다. 건물의 실루엣과 급격한 변위를 갖는 건물 옆면의 상세가 잘 표현되고 있다.

그림 16은 이 결과를 이용하여 지표면에서 돌출된 건물이 존재하는 도시 지역의 가상환경을 가지화 하는데 이용한 것이다. 일반적인 텍스처 매핑만을 이용하여 도시 환경을 가지화 하면 (b)와 같다. 이를 본 논문에서 사용한 기술을 이용하면 (a)와 같이 각 건물의 폴리곤 모델의 추가 없이 실시간으로 건물의 상세를 표현할 수 있다. (c)는 (a)와 동일한 가상환경을 다른 방향에서 바라본 것이다. (d)는 도시 가상환경을 수직 아래방향으로

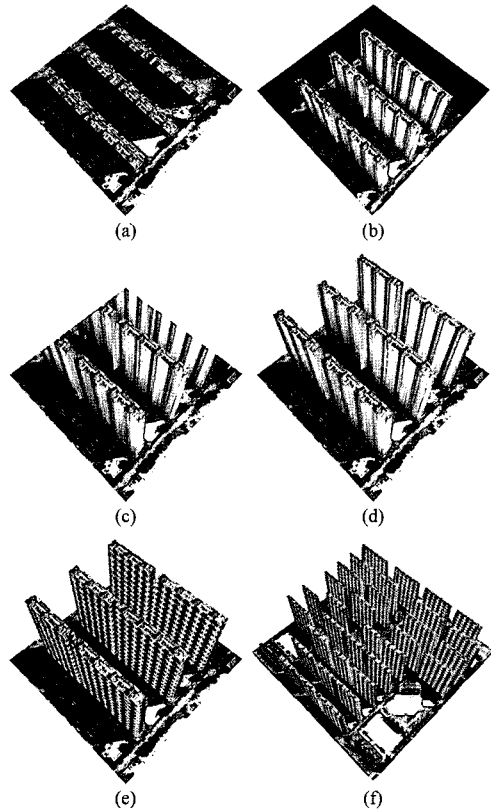


그림 15 돌출 형상의 표현: (a) 텍스처 매핑을 이용한 결과, (b) Relief mapping, (c) 돌출 변위 매핑, (d) 픽셀 초과 문제를 해결한 돌출 변위 매핑, (e)~(f) 추가적인 텍스처 정보를 적용한 결과

내려다 본 것으로, 텍스처 매핑만으로 표현된 (e)에 비하여 건물의 돌출에 의한 parallax와 occlusion이 현실감을 높여주고 있음을 보여준다. (f)는 (a)의 중앙부분을 close-up한 것으로, 시점의 위치에 관계없이 표면의 상세를 잘 나타내어 주고 있다. (g)는 (d)를 close-up한 것이다. (h)는 건물의 지붕과 옆면에 매우 가깝게 접

Table 2 기존 연구와 제안된 방법의 비교

	Features	Protrusion	Steep displacement	Silhouette
Welsh 2004 [30]	Offset limit	X unavailable	X unavailable	X infeasible
McGuire 2005 [23]	MIP-map LOD bias	▲ distorted*	● potential	X infeasible
Donnelly 2005 [32]	Voxel ray-tracer	▲ distorted*	▲ not bad	X infeasible
Tatarchuk 2005 [24]	Dynamic sampling rate	▲ distorted*	▲ not bad	X infeasible
Policarpo 2005 [22]	Binary search	▲ distorted*	X ineffective	X infeasible
Protruded displacement mapping (Present study)	Protruded displacement Binary search Steep displacement detection	● available	● good	● available

* 높이맵을 사용하고 있으나 실제 표현에는 돌출이 아닌 함몰을 표현하고 있다.

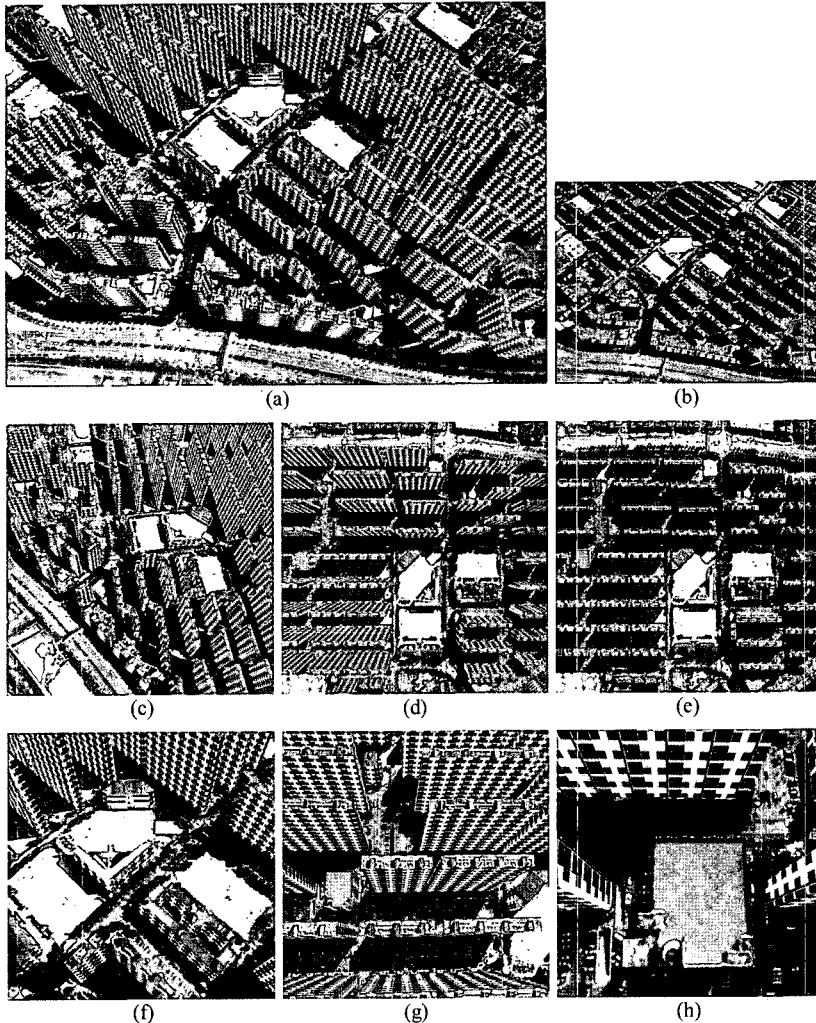


그림 16 제안된 돌출 변위 매핑 방법을 적용한 도시 모델의 렌더링 이미지: (a) 돌출 변위 매핑 적용 결과, (b) 동일한 지역의 텍스처 매핑 결과, (c) 다른 시점에서의 렌더링 이미지, (d) 수직 시점에서 바라본 이미지, (e) 실험에 사용된 텍스처, (f)~(h) 가까운 곳에서 바라본 결과 이미지

근한 것으로, 급격한 경사를 갖는 건물 옆면도 잘 표현되고 있음을 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 돌출 형상의 변위매핑을 위한 기술을 소개하였다. 최근의 프로그래밍이 가능한 GPU를 이용한 이미지 기반의 변위매핑 방법들이 기준면에서 함몰된 형상만을 표현할 수 있는 것과 달리, 실제 폴리곤 면에서 돌출된 형상을 표현할 수 있도록 높이맵을 정의하고, 돌출된 형상의 실루엣을 표현할 수 있는 방법을 제시하였다. 그 결과 돌출된 물체의 형상과 함께 정확한 실루엣을 표현할 수 있다. 또한 폴리곤 면의 형상을 변

형하지 않고, 단지 보조적인 두 개의 면을 추가함으로써 전체 모델의 vertex 수의 증가량은 작다.

본 논문에서 제안하고 있는 돌출 변위매핑 방법의 특징을 기존의 연구와 비교하면 표 2와 같다. 기존의 이미지 기반 변위매핑방법이 변위맵을 이용하여 표면의 상세를 표현하고는 있으나, 실제로는 폴리곤 면에서 함몰된 형상만을 표현할 수 있고, 물체의 실루엣을 표현하지 못하는 것과 대조적이다.

픽셀 단위의 계산 과정에서 경사면의 상세를 추가하여 급격한 경사를 갖는 돌출 형상의 표현이 가능하다. 급격한 경사면의 상세는 매우 작은 타일 형태의 텍스처를 이용하였기 때문에 렌더링 성능에 영향을 미치지 않는다.

이 논문에서 제시하고 있는 돌출 형상을 위한 변위매핑 방법은 특히 고층 건물 등과 같이 수직으로 돌출된 형상에도 적용이 가능하며, 폴리곤 모델에 기반한 그래픽 알고리즘과 병행하여 사용하는 것이 가능하다.

본 논문에서 사용한 광선 투사 방법은 relief mapping[22]과 유사하여 실시간으로 렌더링이 가능하나 돌출된 형상이 매우 좁고 높을 때에는 순차 검색 과정에서 검출을 하지 못할 가능성이 남아 있다. 또한 수직 방향으로 돌출된 형상의 높이보다 시점이 낮아질 때에는 돌출된 영상의 품질이 저하될 수도 있다. 이는 향후 연구를 통하여 개선할 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] Blinn, J. F., "Simulation of Wrinkled Surfaces," Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 286-292, 1978.
- [2] Cook, R. L., "Shade Trees," Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 223-231, 1984.
- [3] Max, N. L., "Horizon Mapping: Shadows for Bump-mapped Surfaces," The Visual Computer, Vol. 4, No. 2, pp. 109-117, 1988.
- [4] Heidrich, W., Daubert, K., Kautz, J., and Seidel, H., "Illuminating Micro Geometry Based on Pre-computed Visibility," Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 455-464, 2000.
- [5] Oliveira, M. M., Bishop, G., and McAllister, D., "Relief Texture Mapping," Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 359-368, 2000.
- [6] Doggett, M. and Hirche, J., "Adaptive View Dependent Tessellation of Displacement Maps," Proceedings of SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware, pp. 59-66, 2000.
- [7] Moule, K. and McCool, M. D., "Efficient Bounded Adaptive Tessellation of Displacement Maps," Proceedings of Graphics Interface, pp. 171-180, 2002.
- [8] Boo, M., Amor, M., Doggett, M., Hirche, J., and Strasser, W., "Hardware Support for Adaptive Sub-division Surface Rendering," Proceedings of SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware, pp. 33-40, 2001.
- [9] Patterson, J. W., Hoggar, S. G., and Logie, J. R., "Inverse Displacement Mapping," Computer Graphics Forum, Vol. 10, No. 2, pp. 129-139, 1991.
- [10] Pharr, M. and Hanrahan, P., "Geometry Caching for Ray-Tracing Displacement Maps," Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, pp. 31-40, 1996.
- [11] Heidrich, W. and Seidel, H., "Ray-Tracing Procedural Displacement Shaders," Proceedings of Graphics Interface, pp. 8-16, 1998.
- [12] Smits, B., Shirley, P., and Stark, M. M., "Direct Ray Tracing of Displacement Mapped Triangles," Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering Techniques, pp. 307-318, 2000.
- [13] Schaufler, G. and Priglinger, M., "Efficient Displacement Mapping by Image Warping," Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, pp. 175-186, 1999.
- [14] Meyer, A. and Neyret, F., "Interactive Volumetric Textures," Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, pp. 157-168, 1998.
- [15] Kautz, J. and Seidel, H., "Hardware Accelerated Displacement Mapping for Image Based Rendering," Proceedings of Graphics Interface, pp. 61-70, 2001.
- [16] Wang, L., Wang, X., Tong, X., Lin, S., Hu, S., Guo, B., and Shum, H., "View-Dependent Displacement Mapping," ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 334-339, 2003.
- [17] Wang, X., Tong, X., Lin, S., Hu, S., Guo, B., and Shum, H., "Generalized Displacement Maps," Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, pp. 227-234, 2004.
- [18] 이승기, 박우찬, 김상탁, 한탁돈, "각 연산을 이용한 효과적인 범프매핑 하드웨어 구조 설계", 한국정보과학회 논문지: 시스템 및 이론, 제30권, 제11·12호, pp. 663-674, 2003.
- [19] 경우남, 이승기, 박우찬, 한탁돈, "영상 기반렌더링을 지원하는 가속기 구조에 관한 연구", 한국정보과학회 추계학술발표회 논문집, pp. 9-11, 2001.
- [20] 이웅, 다시점 변위매핑을 이용한 얼굴 모델에의 적응적 텍스처 매핑, 석사학위 논문, p.53, 고려대학교, 서울, 2003.
- [21] 유병현, 한순홍, "항공사진과 수치지도를 이용한 도시 건물의 이미지 기반 모델링", 한국지리정보학회지, 제8권, 제1호, pp. 49-62, 2005.
- [22] Policarpo, F., Oliveira, M. M., and Comba, J. L. D., "Real-time Relief Mapping on Arbitrary Polygonal Surfaces," Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 155-162, 2005.
- [23] McGuire, M. and McGuire, M., "Steep Parallax Mapping," Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. Posters Session, 2005.
- [24] Tatarchuk, N., "Practical Dynamic Parallax Occlusion Mapping," SIGGRAPH2005 Sketch, 2005.
- [25] Oliveira, M. M. and Policarpo, F., "An Efficient Representation for Surface Details," UFRGS Technical Report RP-351, p.8, UFRGS, Brasil, 2005.
- [26] Parilov, S. and Stuerzlinger, W., "Layered Relief Textures," Journal of WSCG, Vol. 10, No. 2, pp. 357-364, 2002.
- [27] Shade, J., Gortler, S., He, L., and Szeliski, R., "Layered Depth Images," Proceedings of International Conference on Computer Graphics and

- Interactive Techniques, pp. 231-242, 1998.
- [28] ElHelw, M. A. and Yang, G., "Cylindrical Relief Texture Mapping," Journal of WSCG, Vol. 11, No. 1, pp. 125-132, 2003.
- [29] Kaneko, T., Takahei, T., Inami, M., Kawakami, N., Yanagida, Y., Maeda, T., and Tachi, S., "Detailed Shape Representation with Parallax Mapping," Proceedings of , pp. 205-208, 2001.
- [30] Welsh, T., Parallax Mapping with Offset Limiting: A Per-Pixel Approximation of Uneven Surfaces, http://www.infiscape.com/doc/parallax_mapping.pdf, Infiscape Corporation, 2004.
- [31] Welsh, T., "Parallax Mapping," Shader X3 Advanced Rendering with DirectX and OpenGL, Charles River Media, pp. 89-95, 2005.
- [32] Donnelly, W., "Per-Pixel Displacement Mapping with Distance Functions," GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation, Addison Wesley, pp. 123-136, 2005.
- [33] Brawley, Z. and Tatarchuk, N., "Parallax Occlusion Mapping: Self-Shadowing, Perspective-Correct Bump Mapping Using Reverse Height Map Tracing," Shader X3 Advanced Rendering with DirectX and OpenGL, Charles River Media, pp. 135-154, 2005.



유 병 현

1997년 연세대학교 공과대학 기계공학과 학사. 1999년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 2006년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 2006년 3월~현재 한국과학기술원 Post-Doc, ㈜부품다미 기술연구소 수석 연구원. 관심분야는 영상기반 모델링 및 렌더링, 가상현실 시뮬레이션, 물리기반 가상현실 시스템, 가상환경 구축 기술, 다감각 가상현실 시스템



한 순 홍

1977년 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사. 1979년 서울대학교 공과대학 조선공학과 석사. 1990년 University of Michigan 박사. 1979년~1992년 해사기술연구소 연구원. 1993년~1995년 한국과학기술원 자동화설계공학과 교수. 1996년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. International Journal of CAD/CAM 편집위원. 관심분야는 STEP, 가상현실 응용, 지능형 CAD