

주곡률 해석 기반의 투영 텍스처를 이용한 스타일 반사 효과

이 환직¹ 최 정주²
아주대학교 미디어학과^{1,2}
{fchnature¹, jungju²}@ajou.ac.kr

Stylized Specular Reflection Using Projective Textures Based on Principal Curvature Analysis

Hwan Jik Lee¹ Jung-Ju Choi²
Department of Digital Media, Ajou University^{1,2}

요약

물체의 반사(specular reflection)는 물체의 재질 및 기하학적 모양을 표현하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 사진품질의 사실적 렌더링에서는 기존의 국소 반사 모델을 사용하여 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 사용자의 주관이 증시되는 비사실적 렌더링(non-photorealistic rendering)에서는 사용자가 원하는 반사 효과를 표현할 수 있어야 한다. 텍스처는 사용자가 직관적으로 원하는 반사 효과를 표현할 수 있는 수단이며, 이를 모델에 투영하면 원하는 반사 효과를 얻을 수 있다. 이 때 사용자는 텍스처가 투영될 위치와 크기, 방향을 직접 키프레임으로 정해 줄 수 있다. 그러나 모든 반사 효과를 사용자가 직접 정해준다는 것은 번거로운 일이며, 실시간 응용분야에는 적용할 수 없다. 본 논문에서는 국소반사모델(local reflection model)과 주곡률(principal curvature) 해석을 통해 반사 효과의 위치, 방향, 크기를 결정하기 위한 텍스처 투영기의 새로운 설정 방법을 제시한다. 광원과 시점 정보를 사용하여 투영기의 위치를 정하고, 물체의 주방향(principal direction)과 곡률반지름(radius of curvature)을 이용하여 투영기의 방향과 투영 피라미드의 크기를 정한다. 텍스처 투영기의 단순한 이동, 회전을 통하여 반사 영역의 이동, 회전 및 확대/축소가 가능하다. 본 논문에서 제시한 방법은 DirectX 9.0c와 프로그래밍 가능한 셰이더 2.0을 사용하여 GeForce FX 7800 그래픽 카드에 구현되었다. 본 논문의 연구 결과는 게임과 같은 실시간 응용분야에 사용될 수 있으며, 실험 결과에 의하면 수천 개의 다면체 모델에 대한 렌더링을 실시간에 수행할 수 있다.

Keyword : Non-Photorealistic Rendering, Projective Texture, Principal Curvature Analysis, Stylized Specular Reflection

1. 서론

컴퓨터 그래픽스 연구분야에서 물리학적 특성에 기반한 사실성을 추구하는 애니메이션 및 렌더링 분야에 비해 인간 감성의 특수성에 기반한 비사실적(non-photorealistic) 애니메이션 및 렌더링 분야의 발전이 최근 두드러지고 있다. 회화, 만화, 만화영화와 같이 익숙한 분야에서 부터 게임과 같이 최근에 주목받는 분야에 이르기까지 비사실적 애니메이션 및 렌더링 분야의 응용이 확대되는 추세이다. 비사실적 렌더링 연구 분야는 대개 회화, 만화 및 일러스트레이션에서 보여지는 숙련된 아티스트의 기법을 컴퓨

터를 이용하여 흉내내어 보다 흥미로운 화면을 얻는데 주요한 목적이 있다.

특히 최근 게임은 전반적으로 3차원 그래픽스의 기술을 사용하고 있으며 실시간성의 제약으로 인해서 국소 반사 모델(local reflection model)에 기반한 만화적 셰이딩(toon shading) 기법을 주로 사용하고 있다 [1, 2, 3]. 그러나, 기존의 만화적 셰이딩 기법은 산란(diffuse reflection) 효과에 기반하여 모델에서 색상의 변화를 단순화하는 방법을 사용하고 있기 때문에 금속 혹은 유리재질의 매끄러운 표면에서 반사하는 반사광(specular reflection)의 표현에 취약하다. 반

사광은 물체의 질감 표현과 모델의 국소적 모양, 환경 변수의 영향 등을 반영하는 주요한 표현의 수단이다. 셰이더를 사용하면 국소 반사 모델과 기존의 만화적 셰이딩 모델로 반사광을 표현할 수 있다. 그러나 게임에서 자주 등장하는 자동차의 표면 혹은 창, 칼과 같은 금속성의 재질을 만화적으로 표현하는데는 한계가 있다. 만화적인 반사 효과가 사실에 근거한 물리적 모델보다는 사용자의 주관을 반영하기 때문이다. 반면에 텍스처에 반사 효과를 포함시키는 경우에는 광원, 시점과 모델이 움직이는 효과를 표현할 수 없다는 단점이 있다 [2].

본 논문에서는 게임과 같은 실시간 응용 분야에 사용할 수 있는 만화적 반사효과 표현을 위해 텍스처 투영기법 [4]을 개선하여 프레임 일관성을 향상시킨 새로운 방법을 제시한다.

2. 관련 연구

2-1 비사실적 반사 효과 렌더링

3차원 모델에 대한 만화적 표현기법을 최초로 제시한 Lake의 연구는 모델의 법선 벡터와 광원을 향하는 벡터(light vector)의 내적값을 임계값으로 하여 몇 개의 단순한 영역으로 구분한 텍스처를 사용하여 렌더링하는 방법을 사용하였다 [5]. 비록 여러 단계의 임계값을 두어 반사 영역과 같이 두드러지게 밝은 부분을 처리할 수 있지만, 시점과 광원의 위치에 따른 반사 효과의 특성을 표현할 수 없었다. 광원과 시점에 따른 모델의 반사 효과를 표현하기 위해 Blinn의 반사 모델 및 폰 셰이딩 모델을 사용할 수 있다 [6, 7]. 이러한 반사 모델은 물리학적 특성에 따라 사실적 화면을 얻을 수는 있으나, 의도적인 비사실적 결과를 얻는데는 한계가 있다.

Anjyo와 Hiramitsu는 Blinn의 반사모델에 의하여 계산된 반사영역에서 중간 벡터(halfway vector)를 수정하여 셀 애니메이션에서 사용할 수 있는 비사실적 반사효과를 얻는 방법을 제시하였다 [8]. 반사영역의 이동, 회전, 축소/확대 및 모양의 변경을 위해서 반복적으로 반사영역의 중간 벡터에 대한 기하 및 부울 변환을 수행하여 원하는 모양을 얻을 수 있다. 하지만, 이 방법은 반사영역의 모양을 변화시키기 위해 중간 벡터를 수정하는 연산이 직관적이지 않아 사용자가 미

세한 수정을 하기에 적합하지 않으며, 아울러 게임과 같은 실시간 응용 분야에 적용하기 어려운 단점이 있다.

실시간 응용을 위해서 텍스처 투영기법을 이용한 만화적 반사효과를 얻는 방법을 사용할 수 있다 [4]. 텍스처 투영기법은 만화적 셰이딩에서 많이 사용하는 하드웨어 가속기의 기능을 효과적으로 사용할 수 있으며, 투영되는 텍스처의 모양을 변경하여 반사영역의 모양을 직관적으로 변경할 수 있고, 반사영역의 이동, 회전, 축소/확대가 투영기의 이동 및 회전으로 손쉽게 이루어지는 장점이 있다. 그러나 기존의 연구결과는 모델, 광원, 시점이 이동하는 경우 프레임 일관성을 유지하기 어려운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 텍스처 투영기법을 이용한 기존의 연구결과에서 프레임 일관성을 개선하기 위해, 주곡률 해석(principal curvature analysis)에 기반하여 텍스처 투영기의 위치와 방위를 설정하는 새로운 방법을 제시한다. 텍스처 투영기의 위치와 방위는 전적으로 광원과 시점 및 모델의 내재적 특성(intrinsic property)인 주곡률(principal curvature)과 주곡률 방향(principal direction)으로 부터 얻어진다. 모델의 내재적 특성은 선형 변환에 무관한 성질이 있으므로 전처리 단계에서 한번만 계산하여 실행시간의 계산 양을 줄여 수행속도를 개선하는 효과가 있다.

2-2 모델의 곡률 해석

본 연구에서는 반사 영역의 방향과 크기를 정하기 위해 주곡률 방향과 주곡률 정보를 이용한다. 입력으로 주어지는 모델이 자유곡면(freeform surface)인 경우에는 미분기하학의 연구결과를 사용하여 주곡률 및 주곡률 방향을 결정할 수 있다 [9]. 다면체 모델이 입력으로 주어지는 경우, 다면체 모델의 정점(vertex) \mathbf{v} 에 대한 주곡률 및 방향은 다음과 같은 식(1)로 부터 결정할 수 있다 [10].

$$\mathfrak{S}(\mathbf{v}) = \frac{1}{|\mathbf{B}|} \sum_{\text{edges } e} \beta(e) |e \cap \mathbf{B}| \bar{e} \bar{e}^t, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{B} 는 정점 \mathbf{v} 를 둘러싼 영역, $|\mathbf{B}|$ 는 영역 \mathbf{B} 의 넓이, e 는 정점 \mathbf{v} 를 공유하는 선분(edge), $|e|$ 는 선분 e 의 길이, $\beta(e)$ 는 선분 e 를 공유하는 인접한 두 면이 이루는 부호 없는 각(unsigned angle), \bar{e} 는 선분 e 의 단위 벡

터이다.

본 논문에서는 곡률 텐서의 정확한 값보다는 속도 향상을 위해 영역 \mathbf{B} 를 정점 \mathbf{v} 를 중심으로 반지름 r 을 갖는 구에 포함되는 삼각형들로 근사하였으며, 삼각형의 한 정점이라도 포함된다면 삼각형 전체를 영역 \mathbf{B} 에 포함시켰다. 이 경우에 $|e \cap \mathbf{B}|$ 는 $|e|$ 가 되고, $|\mathbf{B}|$ 는 포함된 삼각형들의 넓이 합이 된다.

식(1)에 대하여 고유치 해석(eigen analysis)을 수행하면 3개의 고유벡터(eigenvector)와 고유값(eigenvalue)을 얻을 수 있다. 이 중에서 최소값을 갖는 고유값에 해당하는 방향은 정점 \mathbf{v} 에서의 법선 벡터에 해당하며, 나머지 두개의 벡터가 정점 \mathbf{v} 에서의 주곡률 방향이 되고 두 주곡률 방향은 서로 수직이다. 최소 고유값을 제외한 두개의 고유값 중에서 큰 값에 해당하는 고유벡터가 최소곡률 방향이 되며, 다른 하나의 고유벡터가 최대곡률 방향으로 결정된다.

3. 텍스처 투영기의 설정

본 논문에서는 모델의 주곡률 정보를 이용하여 비사실적 반사 효과를 표현하기 위한 텍스처 투영기를 설정하는 방법을 제시한다. 제시되는 방법의 개략적인 과정은 다음과 같다. 먼저, 다면체 모델을 분석하여 정점 단위의 주곡률과 주곡률 방향을 결정한다. 광원과 시점의 정보로부터 모델의 최대 조명점을 찾아, 텍스처 투영기의 투영 중심(center of projection)으로 삼는다. 텍스처 투영기를 모델의 주방향에 따라서 일치시킨 후, 주곡률에 따라서 투영 피라미드의 크기를 결정한다. 반사 영역에 투영할 텍스처를 이상과 같이 설정된 투영기를 사용하여 모델에 투영하면 비사실적 반사 표현을 얻을 수 있다.

3-1 최대 조명점

본 논문에서는 반사 영역의 최대 조명점을 찾아 투영 중심으로 설정하기 위해 Blinn의 반사 모델을 사용하며, 다음과 같은 식으로 나타난다 [6].

$$\begin{aligned} I_s &= k_s(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n, \\ \mathbf{H} &= (\mathbf{L} + \mathbf{V})/2, \end{aligned} \quad (2)$$

이때, I_s 는 반사 조명도(specular intensity)이며, k_s 는 반사 상수(specular coefficient), n 은 반사영역의 집중도 제어 상수(specular exponent), \mathbf{N} 는 모델의 법선 단위

벡터, \mathbf{L} 은 광원을 향하는 단위 벡터, \mathbf{V} 는 카메라를 향하는 단위 벡터이며, \mathbf{H} 는 중간 벡터이다.

반사 영역을 I_s 가 주어진 임계치 이상인 영역이라고 할 때, I_s 가 최대값을 갖는 지점(최대 조명점)을 반사 영역의 투영 중심으로 결정한다. k_s 와 n 은 상수이기 때문에 최대 조명값을 갖는 정점을 구하는데 영향을 주지 않는다. \mathbf{N} 과 \mathbf{H} 는 단위 벡터이므로 본 논문에서는 최대 조명점을 $\mathbf{N} \cdot \mathbf{H} = 1$ 인 지점으로 정의한다. 따라서 최대 조명점을 찾기 위한 식은 다음과 같이 간략하게 표현될 수 있다.

$$\mathbf{N} = \mathbf{H}. \quad (3)$$

모델의 정점 단위로 투영 중심을 결정할 경우 시점, 광원, 모델이 움직일때 반사 영역이 정점 단위로 이동하게 되어 프레임간의 일관성을 해치게 된다. 따라서, 애니메이션 시에 보다 부드러운 반사 영역의 이동을 위해서는 정점 단위보다 세밀한 방법으로 투영 중심을 구해야 한다. 푹 셰이딩과 같은 가정으로서, 삼각형 내에서 \mathbf{N} 과 \mathbf{H} 가 지역적으로 선형적이라 할 때, 최대 조명점을 포함하는 삼각형 F_i , $i = 0, \dots, k-1$ 의 세 정점에서의 \mathbf{N} 과 \mathbf{H} 를 알면 $\mathbf{N} = \mathbf{H}$ 인 지점을 다음과 같은 방법으로 찾을 수 있다.

삼각형 F_i 에서 각의 정점 위치를 $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ 라 하고, 각 정점에서의 법선 벡터를 $\mathbf{N}_0, \mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2$, 각 정점에서의 중간 벡터를 $\mathbf{H}_0, \mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ 라 하자. 최대 조명점을 \mathbf{p}_{max} 라 하면 중심 좌표계(barycentric coordinate system)로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_{max} = \alpha(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) + \beta(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0) + \mathbf{p}_0, \quad (4)$$

여기서 $0 \leq \alpha, \beta, \alpha + \beta \leq 1$ 이다.

같은 방법으로 최대 조명점에서의 \mathbf{N}_{max} 와 \mathbf{H}_{max} 는 식(5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{max} &= \alpha(\mathbf{N}_1 - \mathbf{N}_0) + \beta(\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_0) + \mathbf{N}_0, \\ \mathbf{H}_{max} &= \alpha(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_0) + \beta(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_0) + \mathbf{H}_0. \end{aligned} \quad (5)$$

식(3)로부터 $\mathbf{N}_{max} = \mathbf{H}_{max}$ 이므로 이를 식(5)에 적용

하면 다음과 같은 행렬식을 구할 수 있다.

$$[\Delta \mathbf{N}_1 - \Delta \mathbf{H}_1 \quad \Delta \mathbf{N}_2 - \Delta \mathbf{H}_2] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = [\mathbf{H}_0 - \mathbf{N}_0], \quad (6)$$

여기서 $\Delta \mathbf{N}_i = \mathbf{N}_i - \mathbf{N}_0$, $\Delta \mathbf{H}_i = \mathbf{H}_i - \mathbf{H}_0, i = 1, 2$ 이다. 의 사역행렬(pseudoinverse matrix)를 사용하여 위의 행렬식(6)을 풀 후, 그 해를 식(4)에 대입하면 최대 조명점 \mathbf{p}_{max} 을 구할 수 있다. 수치적 오류를 고려하여 충분히 작은 ε 에 대해 $0 - \varepsilon \leq \alpha, \beta, \alpha + \beta \leq 1 + \varepsilon$ 을 만족하는 해만을 사용한다. 인접한 면에서 구한 최대 조명점의 위치가 중복되는 경우에는 하나만을 선택한다.

최대 조명 정점에서의 주곡률 및 주곡률 방향으로 부터 최대 조명점에서의 주곡률 및 주곡률 방향을 같은 방법을 적용하여 구할 수 있다.

3-2 투영기의 시점 변환 행렬

본 논문에서는 반사영역에서의 주곡률 방향을 텍스처 투영기의 방위 설정에 사용한다.

최대 조명점에서의 주곡률 방향을 e_{max}, e_{min} 라 하면 $(e_{min}, e_{max}, -\mathbf{N})$ 는 서로 수직인 단위 벡터로서 3차원 공간을 확장(span)하므로 $(\pm e_{min}, \pm e_{max}, -\mathbf{N})$ 을 텍스처 투영기의 방위로 사용할 수 있다(그림 1 참조). 여기서, e_{max} 와 e_{min} , \mathbf{N} 은 각각 최대 조명점에서의 최대 곡률 방향, 최소 곡률 방향, 법선 벡터이다. 이때 투영기의 상향 벡터를 최대 곡률 방향 혹은 최소 곡률 방향 중에서 한 방향으로 결정하면, 투영기의 우향 벡터는 나머지 하나로 자연스럽게 결정된다. 여기서 e_{max}, e_{min} 의 부호는 문제가 되지 않으며, 오른손 좌표계 혹은 왼손 좌표계의 선택 여부에 따라서 적절히 선택할 수 있다.

투영되는 텍스처에 방향성이 없이 점대칭인 경우에는 투영기의 상향 벡터로 최대 혹은 최소 곡률 방향 중 어느 것을 선택하여도 문제가 되지 않는다. 투영기의 상향 벡터 설정은 텍스처의 특징에 의존적이며, 본 논문에서는 e_{max} 의 방향을 상향 벡터로 사용하였다(그림 2 참조).

본 논문에서는 평행 투영 행렬을 사용하기 때문에, 투영 중심과의 거리에 상관없이 투영기의 방위만으로 투영기의 시점 변환 행렬을 다음과 같이 설정할 수

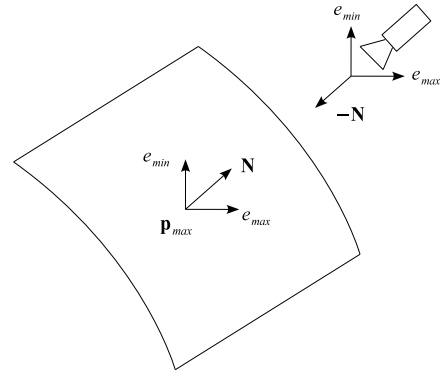


그림 1: 투영기의 방위 설정.

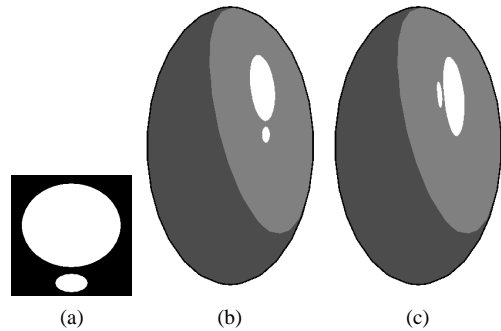


그림 2: (a) 방향성이 있는 텍스처, (b) 상향 벡터로 최대 곡률 방향을 사용한 경우, (c) 상향 벡터로 최소 곡률 방향을 사용한 경우.

있다.

$$V_p = [e_{min} \quad e_{max} \quad -\mathbf{N}]^T. \quad (7)$$

3-3 투영기의 투영 변환 행렬

텍스처 투영기의 설정을 위해 마지막으로 남은 문제는 투영기의 투영 변환 행렬(projection transformation matrix)을 구하는 문제이다. 본 논문에서는 투영의 중심을 향하는 방향에서 상하, 좌우로 대칭적인 크기를 갖는 투영을 가정한다. 투영기의 투영 변환 행렬은 투영 피라미드의 상하, 좌우의 크기에 영향을 받는다. 반사 영역에서의 주곡률 방향이 그대로 투영기의 상향 및 우향 벡터로 설정 되었으므로, 투영 변환 행렬을 구하는 문제는 반사 영역의 주곡률 방향으로의 크기를 구하는 문제로 단순화 된다.

본 논문에서는 곡률 반지름(radius of curvature)을 이용하여 투영 피라미드의 크기를 근사적으로 계산하는 방법을 제시한다. 식(1)의 곡률 텐서로부터 얻은 고유값을 κ 라 한다면, 곡률 반지름은 $1/|\kappa|$ 이 된다.

그림 3에서 투영 중심이 식(3)을 만족하고 \mathbf{H} 가 변

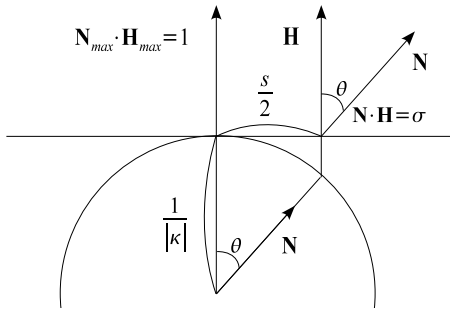


그림 3: 투영 피라미드의 크기.

하지 않는다면, 투영 피라미드의 크기는 식(8)와 같이 표현된다.

$$s = \min \left\{ 2r, \frac{2}{|k|} \sqrt{1 - \sigma^2} \right\}, \quad (8)$$

여기서 σ 는 임의로 주어진 임계치로서, 반사영역은 $\mathbf{N} \cdot \mathbf{H} > \sigma$ 로 결정된다. r 은 곡률 텐서를 구하기 위해 설정한 영역 \mathbf{B} 의 반지름으로 k 가 0에 가까워져 투영 피라미드의 크기가 지나치게 커지는 것을 제한하기 위해 사용되었다.

이상과 같은 방법으로 투영의 중심으로 부터 투영 피라미드의 상하, 좌우의 크기를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 평행 투영 행렬을 구할 수 있다.

3-4 투영 텍스처의 이동, 회전, 확대 및 축소

기존의 비사실적 반사영역을 표현하는 방법은 반사영역의 위치 및 모양을 이동, 회전, 확대 및 축소하기 위해서 다면체 모델의 정점에서 중간 벡터를 기하 변환을 통하여 의도적으로 왜곡하는 방법을 사용하고 있다 [8]. 정점에 대한 중간 벡터를 변경하면 $\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}$ 의 결과가 달라져 쉐이딩 기법을 적용하여 반사영역의 위치 및 모양에 대한 선형변환 결과를 얻을 수 있다. 하지만 기하연산을 위해서 정점에서 회전, 이동, 축소 확대하여 변경될 영역의 정점을 얻은 후, 변화되는 양에 대한 방향과 크기를 미리 알아야 연산식을 계산할 수 있어, 사용자가 직접 직관적으로 제어하기 어려운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서 제시한 방법을 사용하면 반사영역의 이동, 회전 축소 및 확대가 각각 투영기 위치의 방향 및 우향 벡터를 따른 이동, 시선 벡터에 대한 회전, 투영 피라미드의 크기 조절을 통해서 직관적으로 제어할 수 있다. 그림 4는 동일한 모델에 대하여 반사영역

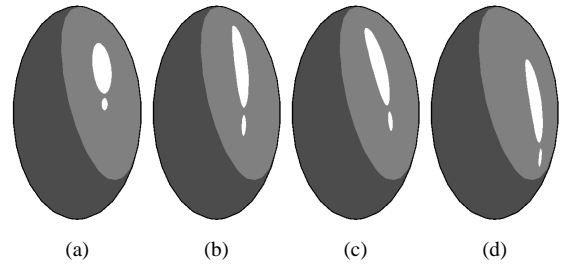


그림 4: (a) 본래의 반사 영역, (b) 반사 영역의 축소 및 확대, (c) 반사 영역의 회전, (d) 반사 영역의 이동.

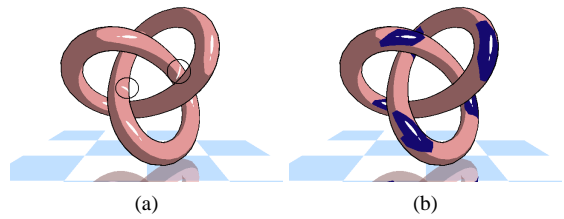


그림 5: (a) 원으로 표시된 부분은 잘못된 투영의 예, (b) 진한 영역은 적절한 투영을 위해 제한된 영역.

을 이동, 회전 축소 및 확대 연산을 적용한 예이다.

4. 투영 텍스처의 렌더링

4-1 텍스처 좌표 설정

투영 텍스처가 적용될 모델의 정점 위치를 \mathbf{p} 라 할 때, 투영기의 시점-투영 변환 행렬 M 으로 부터 정점 \mathbf{p} 의 텍스처 좌표 (u, v) 는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= M\mathbf{p}, \\ \langle u, v \rangle &= \left\langle \frac{\mathbf{q}_x + 1}{2}, \frac{1 - \mathbf{q}_y}{2} \right\rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)는 정점의 정보를 변경할 필요가 없기 때문에, 프로그램이 가능한 정점 셰이더를 사용하여 빠른 시간에 계산이 가능하다.

4-2 투영 영역

텍스처 투영 방식은 투영기가 바라보는 방향으로 투영 피라미드 내에 위치하는 모든 정점에 텍스처가 투영된다. 따라서 그림 5(a)에서처럼 투영기에서 바라보았을 때 원하는 투영영역의 뒤쪽 혹은 앞쪽에 반사 효과가 맺히는 경우가 발생할 수 있다. 원하는 영역에만 반사 효과가 맺히도록 하기 위해서 너비우선 탐색(breadth-first-search)을 사용한다. 반사 영역에 포함되는 삼각형은 투영 피라미드 내에 일부 또는 전체

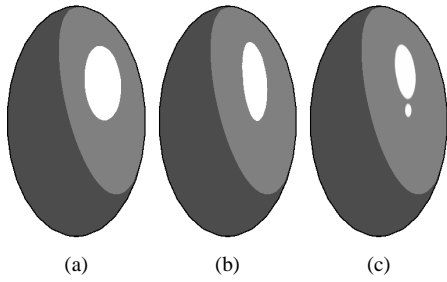


그림 6: 투영 텍스처를 사용한 방법과 풍 셰이딩을 사용한 방법의 결과 비교, (a) 반사 영역에 풍 셰이딩을 사용한 결과, (b) 원 텍스처를 투영한 결과, (c) 느낌표 텍스처를 투영한 결과.

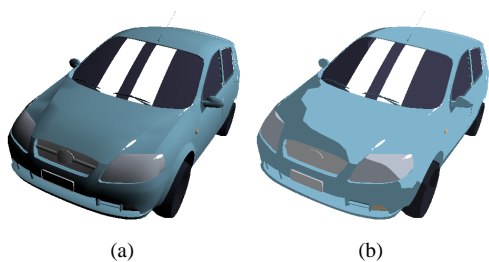


그림 7: 비사실적 반사 영역 렌더링 결과를 (a) Gouraud 셰이딩에 적용한 결과와 (b) 만화적 셰이딩에 적용한 결과.

가 포함되어 하며, 삼각형 면의 법선 벡터를 N 이라 할 때, $N \cdot N_{max} > 0$ 을 만족해야 한다(그림 5(b) 참조).

5. 실험 결과

그림 6은 본 논문에서 제시한 방법과 사실적 반사 영역을 표시하는 풍 셰이딩의 렌더링 결과를 비교하였다. 그림 7은 각각 Gouraud 셰이딩과 만화적 셰이딩의 결과에 대하여 반사 효과를 적용한 결과물이다. 반사영역의 표현은 별도의 렌더링 과정(rendering pass)를 사용하여 적용되기 때문에 반사영역을 제외한 물체의 셰이딩에 어떠한 방법을 사용하더라도, 반사 영역만을 비사실적으로 표현할 수 있도록 구현할 수 있다. 그림 8은 매듭끈 모델을 회전시켜 얻은 애니메이션의 결과이다. 물체가 움직일 때 반사영역의 이동과 크기의 변화가 모델의 전 영역에 걸쳐서 부드럽게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

표 1은 본 논문에서 제시한 방법의 수행 성능을 보여준다. 본 논문에서 제시한 반사영역의 비사실적 렌더링 방법을 AMD AthlonXP 3200 프로세서, Nvidia Geforce 7800의 환경에서 DirectX 9.0을 이용하여 구현하였다. 전체적인 수행 속도는 반사 영역의 수에 많

모델	면수	반사영역수	FPS
구	840	1	2164
매듭끈	2880	6	808
		7	750
천사	2232	19	418
		29	289
자동차	23829	9	147
		11	137

표 1: 수행 성능.

은 영향을 받으며, 모델의 정점의 수나 면의 수에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 구현에서 시간을 가장 많이 소비하는 부분은 렌더링 영역을 결정하는 과정이었다. 반사 영역을 여러 번의 패스에 걸쳐 렌더링하는 시간이 수행 성능에 끼치는 영향은 상대적으로 미비했다.

6. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 다면체 모델의 곡률 정보를 이용하여 반사 영역의 비사실적 표현을 위한 텍스처 투영기의 위치와 방위, 투영 피라미드의 크기를 정하는 새로운 방법과 실험결과를 제시하였다.

주어진 다면체 모델에 대한 정점 단위 곡률 텐서 행렬을 구하고, 곡률 텐서의 고유치 해석으로부터 3개의 서로 수직인 고유 벡터를 구한다. 3개의 고유벡터로부터 텍스처 투영기의 방위가 결정되며, 광원의 위치와 시점의 위치로부터 최대 조명점을 구하여 투영의 중심으로 한다. 반사 영역의 비사실적인 모양을 텍스처로 만들어, 텍스처 투영기를 통하여 모델에 투영하면 반사영역에서 원하는 모양의 비사실적인 반사 영역 렌더링 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서 제시한 방법은 모델의 내재적인 특성(intrinsic property)들이 국소적으로 선형적이라는 가정에서 출발하였으며, 실험결과 애니메이션에서 프레임의 일관성을 크게 개선한 결과를 얻을 수 있었다. 아울러 반사영역의 이동, 회전, 축소 및 확대가 투영기의 이동 및 회전, 투영 피라미드의 크기 조절을 통해서 직관적으로 제어될 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서 제시한 방법은 프로그램 가능한 셰이더에서 손쉽게 구현할 수 있으며, 수천개 단위의 다면체 모델에 대하여 실시간 렌더링이 가능하며, 게임과 같은 응용 분야에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있

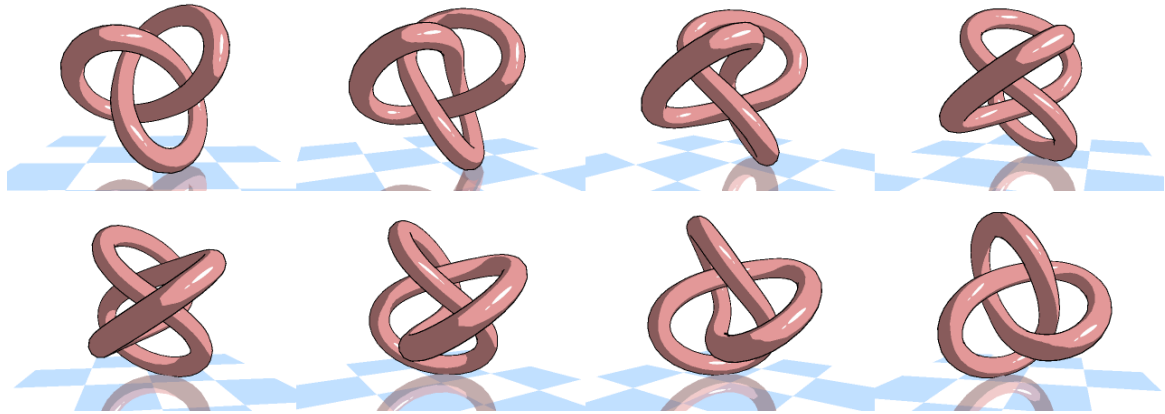


그림 8: 매듭끈을 회전시킨 애니메이션 결과.

다.

본 논문에서는 위상적으로 복잡한 모델과 광원의 위치에 따라서 발생하는 자기-그림자(self-shadow) 영역의 반사문제, 모델이 여러개의 독립된 계층적 다면체 구조를 갖는 경우 여러개의 하위 다면체 구조에 반사 영역이 걸쳐 있는 문제, 국소적으로 비다양체(non-manifold) 부분에 반사영역이 발생하는 문제에 대한 고려를 하지 않았다. 이러한 문제는 기본적으로 본 논문의 고려사항이 아니며, 이미 알려진 여러가지 해결 기법을 그대로 적용 할 수 있다.

주어진 모델에서 국소적으로 곡률이 급격이 변하고, 적은 수의 면으로 이루어진 모델을 사용할 경우 반사 영역이 급격히 분리되거나 합쳐지는 문제가 자주 발생한다. 이러한 영역에서도 실제로 모델의 내재적인 성질은 변화하지 않기 때문에 동일 반사영역에 대해서 두 개의 투영기가 사용되는 문제와, 분리된 영역에 대한 투영기의 설정을 다시 계산하는 문제를 투영기의 분리와 통합을 통해서 해결해야 하는 것이 향후 연구 과제로 남아 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원의 정보통신연구개발사업 위탁연구과제 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

[1] Nintendo. The legend of zelda : Wind waker. <http://www.zelda.com/gcn/>, 2003.

[2] Nexon. KartRider. <http://kart.nexon.com/>, 2004.

[3] JC Entertainment. FreeStyle. <http://fs.joycity.com/>, 2004.

[4] Soon-Jae Hwang, Jung-Ju Choi, and Seung-Yong Lee. Rendering cartoon-style specular reflection using projective textures. In *Proceedings of Korea Computer Graphics Society*, pages 15–20. KCGS, 2004.

[5] Adam Lake, Carl Marshall, Mark Harris, and Marc Blackstein. Stylized rendering techniques for scalable real-time 3d animation. In *NPAR '00: Proceedings of the 1st international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, pages 13–20, New York, NY, USA, 2000. ACM Press.

[6] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *SIGGRAPH '77: Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 192–198, New York, NY, USA, 1977. ACM Press.

[7] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317, 1975.

[8] Ken-Ichi Anjyo and Katsuaki Hiramitsu. Stylized highlights for cartoon rendering and animation. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 23(4):54–61, 2003.

[9] Manfredo P. DoCarmo. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice Hall, 1976.

[10] Pierre Alliez, David Cohen-Steiner, Olivier Devillers, Bruno Lévy, and Mathieu Desbrun. Anisotropic polygonal remeshing. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):485–493, 2003.