

폴리곤기반 CGH 생성에서의 실용적인 준해석적 텍스처링

*오승택¹, **염한주², ***전상훈², ****박중기²

¹울프스랩

²한국전자통신연구원

*oh.seungtaik@gmail.com

Abstract

본 논문에서는 폴리곤기반 CGH 생성에서 텍스처 적용을 위한 준해석적 기법을 소개한다. 각각의 단위 폴리곤의 근방에서 폴리곤에 의해 회절되는 파면을 서로 독립인 기하학적 필드와 텍스처 필드의 곱으로 표현한다. 기하학적 필드는 기존의 해석적 방법을 적용하고 텍스처 필드는 FFT 기반의 비해석적 방법을 적용하여 폴리곤 근방에서의 각스펙트럼을 얻고 이들의 FFT기반 합성곱을 통해 폴리곤 근방의 텍스처가 포함된 폴리곤의 회절 파면을 얻고 이를 홀로그래프 평면까지 진행시켜 최종 홀로그래프를 생성한다. 본 방법은 기하학적 필드에 해석적 방법을 적용하여 FFT기반의 비해석적 방법에 비해 복원 영상의 품질이 우수하며 CGH 생성속도 측면에서는 텍스처가 없는 경우의 해석적 방법과 유사하며 텍스처 이미지의 해상도에 상관없이 홀로그래프 해상도에만 의존하는 장점이 있다.

1 서론

폴리곤 기반의 CGH(Computer-Generated Hologram) 생성 방법은 중요한 CGH 생성방법 중의 하나로써 포인트기반의 CGH 생성과 달리 폴리곤을 기본 생성 단위로 한다[1, 3]. 폴리곤을 개구(aperture)로 간주하여 폴리곤의 로컬 평면과 홀로그래프 평면 간의 회절 계산으로부터 홀로그래프를 생성한다. 이때, 평행하지 않은 두 평면간의 회절 계산이 핵심 요소가 되며 이를 계산하는 방식에 따라 크게 2가지 방법이 사용되고 있다. 먼저, FFT기반의 비해석적(non-analytic) 방법을 살펴보면 로컬평면에서 얻어진 필드에 FFT를 적용하여 각스펙트럼(angular spectrum)을 계산하고 이의 적당한 이동(shift)를 통해 각스펙트럼을 회전하여 홀로그래프 평면 방향으로 진행(propagation)하는 각스펙트럼을 얻게된다. 이때, 로컬 평면에서의 샘플링과 홀로그래프 평면에서의 샘플링 위치가 서로 일치하지 않아 홀로그래프 평면에서 보간(interpolation)을 통한 재샘플링(resampling)이 필요하다. 이 방법은 재샘플링에서의 보간 에러로 인하여 복원 영상에서 노이즈가 발생하여 품질이 저하되는 단점이 있다. 다른 방법은 해석적(analytic) 방법을 통하여 홀로그래프 평면에서 정확하게 각스펙트럼을 계산함으로써 복원 영상에서의 품질을 향상시킬수 있다.

쉐이딩(shading)과 텍스처링(texturing)은 컴퓨터

그래픽스에서 렌더링 영상의 품질을 향상 시키는 중요한 기법이다. 이들 기법을 홀로그래프 생성에 적용하여 홀로그래프의 품질을 높이는 시도는 매우 의미있는 일이다. 쉐이딩은 빛이 어떻게 오브젝트 표면에서 반사되는 지를 통해 표면의 색깔을 결정하는 방법이다. 폴리곤의 평면 노말과 빛의 입사각의 내적으로부터 폴리곤의 쉐이딩 값을 결정하는 단색 쉐이딩(flat shading) 방법은 폴리곤 CGH 에서 쉽게 구현이 가능하다. 단색 쉐이딩은 폴리곤 수가 충분하지 않을 경우 오브젝트 표면이 각지게 표현될 수 있다. 이에 비해 스무드(smooth) 쉐이딩은 폴리곤의 벡터스 노말을 이용하여 폴리곤 내부 및 폴리곤 간에 부드럽게 변화하는 쉐이딩 값을 계산한다. 폴리곤 CGH에서의 스무드 쉐이딩을 위한 해석적 방법이 연구 되었다[6]. 또한, 분산(diffusive), 스펙쿨러(specular) 반사를 모두 고려한 일반적인 폰г(Phong) 반사 모델을 해석적인 폴리곤 CGH 생성에 적용하는 방법이 제안되었다[7]. 폰г 반사 모델을 비해석적 방법으로 폴리곤 CGH 생성에 적용하는 방법 또한 소개되었다[5].

텍스처링은 쉐이딩에 비해 폴리곤 CGH 생성에의 적용이 어렵다. 비해석적 방법으로 텍스처 적용이 가능하나 앞의 설명대로 재샘플링 과정에서 발생한 노이즈로 복원 품질이 저하되며 해석적 방법은 텍스처 이미지가 일반적으로 단일한 픽셀 값을 갖지 않기 때문에 이에 대한 각스펙트럼 계산에서 해석적 공식이

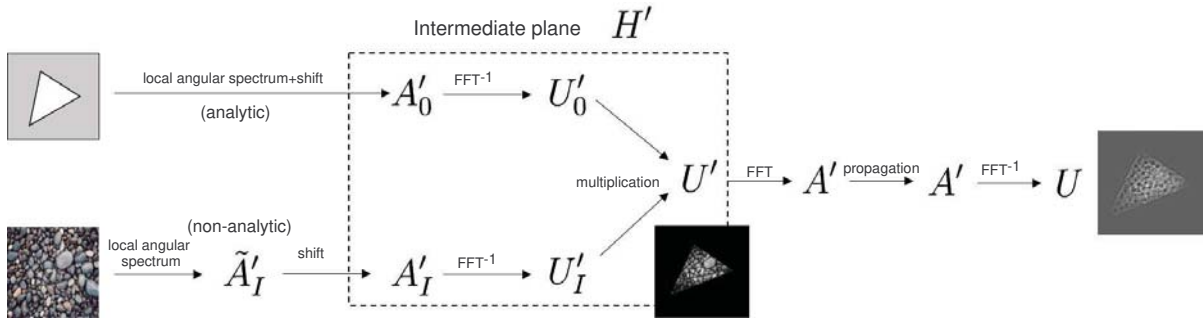


Figure 1: 텍스처 적용을 위한 준해석적 폴리곤 CGH 합성.

존재하지 않게 된다. 폴리곤의 분할을 통해 얻어진 서브 폴리곤에서 단일한 텍스처 값을 갖도록하여 해석적 방법으로 CGH 생성에 텍스처를 적용하는 방법이 제안되었다[2]. 이때, 폴리곤의 뒀음을 이용하여 계산 효율을 높이는 방법이 적용되었다. 그러나 높은 디테일의 텍스처 이미지 적용에는 제한이 존재한다. 합성곱(convolution)을 이용한 준해석적(semi-analytic) 방법이 제안되었으나 계산시간이 텍스처 이미지의 해상도에 따라 증가하여 고해상도 텍스처 이미지 적용에 어려움이 있다[4].

본 논문에서는 준해석적 방법으로 폴리곤 CGH에 텍스처를 추가하는 실용적인 방법을 제안한다. 각각의 폴리곤에 의해 회절되는 파면을 폴리곤 근방에서 독립적인 2개의 필드, 기하학적 필드와 텍스처 필드의 곱으로 근사적으로 표현한다. 폴리곤 근방에 홀로그램 평면에 평행한 중간 평면(intermediate plane)을 설정하여 기하학적 필드와 텍스처 필드의 각스펙트럼을 각각 해석적 방법과 비해석 방법을 통해 계산하고 수치적인 합성곱을 통해 빠르게 텍스처가 적용된 폴리곤의 회절 파면을 계산한다. 이를 홀로그램 평면으로 진행시킴으로써 최종 홀로그램을 생성한다. 이 방법은 기하학적 필드에 해석적 방법을 적용하여 복원 영상의 품질을 확보하고 텍스처가 없는 해석적 폴리곤 CGH 생성 방법과 유사한 계산 속도를 보이며 텍스처 이미지의 해상도에 상관없이 홀로그램 해상도에만 의존하는 특징을 보인다.

2 FFT기반의 합성곱을 이용한 준해석적 텍스처

먼저, 로컬 평면에서 텍스처가 적용된 폴리곤에 대한 파면 필드를 생각한다. 이때, 폴리곤 파면 필드 \tilde{u} 는 폴리곤의 모양에 의해 결정되는 기하학적 필드 \tilde{u}_0 와 텍스처에 의해 결정되는 텍스처 필드 \tilde{u}_I 의 곱으로

표현됨을 알 수 있다.

$$\tilde{u}(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{u}_0(\tilde{x}, \tilde{y}) \tilde{u}_I(\tilde{x}, \tilde{y}). \quad (1)$$

여기에 푸리에 변환과 합성곱 정리를 적용하면

$$\tilde{u} = \mathcal{F}^{-1}(\tilde{A}_0) \mathcal{F}^{-1}(\tilde{A}_I) \quad (2)$$

$$= \mathcal{F}^{-1}(\tilde{A}_0 * \tilde{A}_I) \quad (3)$$

이고,

$$\tilde{A} = \mathcal{F}(\tilde{u}) = \tilde{A}_0 * \tilde{A}_I \quad (4)$$

이 된다. 이로부터 로컬 평면에서의 폴리곤 파면 필드의 각스펙트럼은 기하학적 필드의 각스펙트럼과 텍스처 필드의 각스펙트럼의 합성곱으로 주어짐을 알 수 있다.

이제 회절된 폴리곤 필드가 폴리곤 근방에서도 기하학적 필드와 텍스처 필드의 곱으로 근사적으로 표현된다고 하고 폴리곤 근방에 홀로그램 평면을 평행 이동한 중간 평면을 설정한다. 이제, 기하학적 필드와 텍스처 필드를 로컬 평면에서 중간 평면으로의 회절 진행을 통해 중간 평면에서의 각스펙트럼을 독립적으로 계산한다. 이때, 기하학적 필드는 텍스처가 없는 경우와 같이 해석적 기법을 이용하고 텍스처 필드는 FFT와 보간기반의 resampling을 적용한 비해석적 기법을 이용한다. 이제, 기하학적 필드와 텍스처 필드의 각스펙트럼에 대해 역(inverse) FFT를 적용하여 중간 평면에서의 기하학적 필드와 텍스처 필드를 얻고 이들의 곱으로 중간 평면에서 텍스처 폴리곤으로부터 회절된 파면 필드를 계산할 수 있다. 이 과정은 각각의 각스펙트럼에 합성곱을 적용한 결과로 이해할 수 있다. 중간 평면에서 텍스처 폴리곤의 회절 파면이 계산되면 홀로그램 평면으로의 진행을 통해 최종 홀로그램을 계산한다(그림 1).

로컬 평면에서의 텍스처 필드의 각스펙트럼 계산에 대해 좀 더 자세히 설명한다. 먼저, 텍스처 이미지를 홀로그램 해상도에 맞추어 사이즈를 조정한다. 텍스처 이미지가 사이즈 조정 되어도 $[0, 1] \times [0, 1]$ 에서

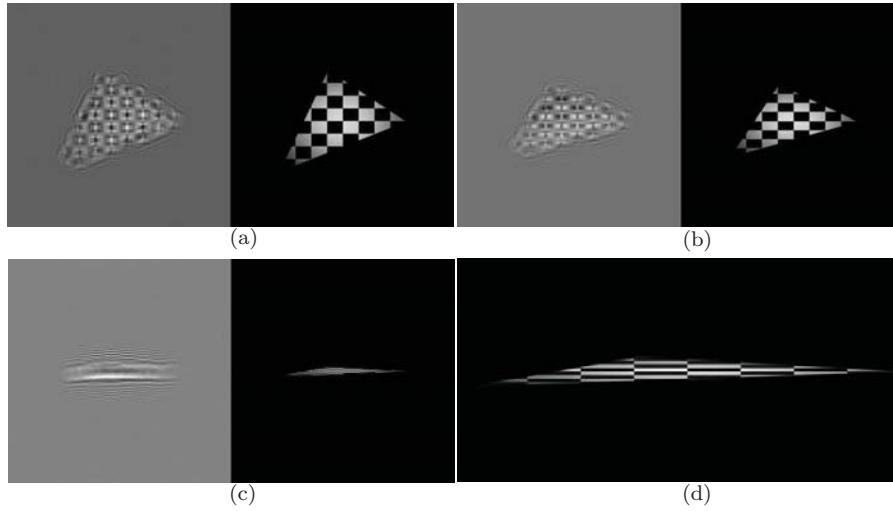


Figure 2: 기울어진 삼각형에 대한 텍스처 홀로그램 프린지 패턴과 수치적 복원 결과. 삼각형의 기울기는 0°(a), 45°(b), 85°(c) 이다. (d)는 (c)의 확대 이미지이다.

정의된 텍스처 맵핑(mapping)은 동일하게 사용가능하다. 로컬 평면에서 텍스처 평면으로 가는 텍스처 맵핑을 2차원 아핀맵(affine map) $\psi(\tilde{\mathbf{x}}) = M\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{b}$ 으로 표현할 수 있고 이를 이용하면 로컬 평면에서의 텍스처 필드는

$$\tilde{u}_I(\tilde{\mathbf{x}}) = I(\psi(\tilde{\mathbf{x}})) = I(M\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{b}) \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서 $I(p, q)$ 는 픽셀 (p, q) 에서의 세기(intensity) 값이다. 그러면, 로컬 평면에서의 텍스처 필드에 대한 각스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tilde{A}_I(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) &= \iint \tilde{u}_I(\tilde{\mathbf{x}}) \exp(-j2\pi\langle \tilde{\mathbf{k}}, \tilde{\mathbf{x}} \rangle) d\tilde{\mathbf{x}} \\ &= \iint I(M\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{b}) \exp(-j2\pi\langle \tilde{\mathbf{k}}, \tilde{\mathbf{x}} \rangle) d\tilde{\mathbf{x}} \\ &= \frac{\exp(j2\pi\langle M^{-T}\tilde{\mathbf{k}}, \mathbf{b} \rangle)}{|M|} \mathcal{F}(I)(M^{-T}\tilde{\mathbf{k}}), \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\tilde{\mathbf{k}} = (\tilde{\alpha}, \tilde{\beta})^T$. 위의 식으로부터, 텍스처 이미지의 푸리에 변환 $\mathcal{F}(I)$ 를 미리 계산해 놓으면 서로 다른 텍스처 맵핑과 모양의 폴리곤에 대해서도 텍스처 필드의 각스펙트럼을 효과적으로 계산할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 텍스처 이미지가 홀로그램과 동일한 해상도를 가짐으로써 계산 속도는 텍스처 이미지의 해상도에 무관하고 홀로그램 해상도에만 의존함을 알 수 있다.

3 결과

제안된 준해석적 기반의 텍스처 추가 방법을 이용하여 폴리곤 CGH를 생성하고 이에 대한 수치적 복원 결과에 대해 설명한다. 먼저, 체스보드 패턴을 텍스처 이미지로 가지는 기울어진 삼각형에 대해 생각한다. 그림 2는 0°, 45°, 85° 각도로 삼각형의 기울기를 조정하면서 본 논문에서 제안한 준해석적 방법의 텍스처 CGH 생성 결과와 이를 수치적 복원한 결과이다. 90°에 가까운 각도로 기울어진 삼각형에 대해서도 노이즈 없는 복원 영상이 획득 됨을 볼 수 있다(그림 2(d)).

다음은 버니모델에 대한 텍스처 적용 CGH 생성 및 복원 결과이다. 버니 모델은 69,664개의 폴리곤으로 구성되어 있으나 뒷면을 향하는 폴리곤은 계산에서 제외하여 실제 CGH 생성에는 32,763개의 폴리곤이 사용되었다. 홀로그램의 해상도는 1024×1024 이고 픽셀 간격은 $25\mu\text{m}$ 이다. $\lambda = 633\text{nm}$ 의 단일 파장 광원을 사용하여 CGH를 생성 하였다. 그림 3은 텍스처 유무에 따른 수치적 복원의 비교 결과이다. 계산속도 향상을 위해 GPU를 사용하였으며 버니 모델의 경우 CGH 생성 시간은 약 209초 소요 되었다.

감사의글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019-0-00001, 홀로그램 영상 서비스를 위한 Holo-TV 핵심 기술 개발).

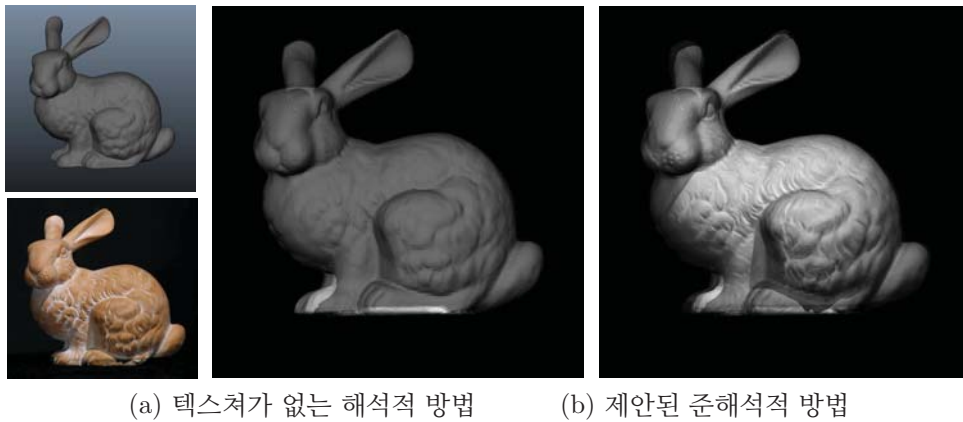


Figure 3: 버니 모델 CGH에 대한 텍스처 적용 전/후의 수치적 복원 결과 비교. 첫번째 열은 CG 렌더링 및 텍스처 이미지

References

- [1] L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor, and J. Watson. “computer generated holograms from three dimensional meshes using an analytic light transport model. *Appl. Opt.*, 47(10):1567–1574, 2008.
- [2] Y.-M. Ji, H.-J. Yeom, and J.-H. Park. Efficient texture mapping by adaptive mesh division in mesh-based computer generated hologram. *Opt. Express*, 24(24):28154–28169, 2016.
- [3] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee. Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography. *Appl. Opt.*, 47(19):D117–D127, 2008.
- [4] W. Lee, D. Im, J. Paek, J. Hahn, and H. Kim. Semi-analytic texturing algorithm for polygon computer-generated holograms. *Opt. Express*, 22(25):31180–31191, 2014.
- [5] H. Nishi, K. Matsushima, and S. Nakahara. Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms. *Appl. Opt.*, 50(34):H245–H252, 2011.
- [6] J.-H. Park, S.-B. Kim, H.-J. Yeom, H.-J. Kim, H. Zhang, B. Li, Y.-M. Ji, S.-H. Kim, and S.-B. Ko. Continuous shading and its fast update in fully analytic triangular-mesh-based computer generated hologram. *Opt. Express*, 23(26):33893–33901, 2015.
- [7] H.-J. Yeom and J.-H. Park. Calculation of reflectance distribution using angular spectrum convolution in mesh-based computer generated hologram. *Opt. Express*, 24(17):19801–19813, 2016.