

# Semi-analytic 텍스처 폴리곤 CGH 합성 알고리즘과 이의 고속화 방법

□ 김희 / 고려대학교

## 1. 서론

최근 홀로그래픽 3D 디스플레이에 대한 기대와 관심이 증가하면서, 홀로그래픽 3D 디스플레이에 대한 연구 개발이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 홀로그래픽 3D 디스플레이의 많은 기술적 이슈 중, Computer Generated Hologram (CGH)의 고속 생성 알고리즘 개발은 CGH 계산 효율, 즉 속도를 향상하고자 하는 잘 정의된 목표를 가지고 있다.

3D 영상을 표현하는 수학적 모델에 따라, 기본적으로 CGH 알고리즘을 점구름(point cloud) CGH 알고리즘과 폴리곤 CGH 알고리즘으로 나눌 수 있다. 이 두 모델의 범주 내에서 다양한 변형의 알고리즘 연구 개발이 이루어지고 있으며, 속도향상 뿐만 아니라 텍스처링, 렌더링 등 다양한 주제들이 파생되어 나오고 있다. 결국 궁극적 목적은 실세계와

동일한 영상 데이터를 담은 CGH를 실시간으로 변환하는 알고리즘의 개발이다.

점구름 CGH 모델은 모델의 단순성과 명료성으로 가장 일반적이고 널리 연구되는 CGH 모델이다. 다양한 버전의 향상된 속도를 갖는 알고리즘들이 개발되고 있으며, GPU(Graphics Processing Unit)를 사용하여 실시간에 가까운 CGH 생성이 가능해지고 있다[1,2].

3D 물체를 폴리곤 모델로 표현하는 것을 기반으로 하는 폴리곤 CGH 모델은 물체의 표면에 있는 점광원들의 위상을 정의하여 연속적인 점광원 분포를 집합적으로 다루게 됨으로써 모델 표현의 정확성과 속도 향상을 꾀하는 방법론이다. 일반적으로 비선형 보간 FFT를 사용하여 계산론이 확립되어 있는데[3,4], 이의 변형들이 다양하게 연구되고 있다.

최근 비선형 보간 FFT 기반 폴리곤 CGH 방법의

속도 한계를 극복하기 위해 semi-analytic algorithm에 대한 연구가 파생되었다[5-7]. 본 고에서는 최근 저자의 연구그룹이 연구한 내용[8, 9]을 바탕으로 semi-analytic 텍스처 폴리곤 CGH 알고리즘에 대한 소개와 이의 고속화 방안에 대해 논하고자 한다.

## II. 텍스처 폴리곤 CGH의 두 가지 기법: 비선형 보간 FFT 기반 알고리즘과 semi-analytic 알고리즘

폴리곤 CGH의 기초 이론은 지난 방송공학회지에 소개한 바 있다[5]. 이를 토대로 본고에서는 비선형 보간 FFT 기반 CGH 알고리즘과 semi-analytic CGH 알고리즘을 주제로 삼는다.

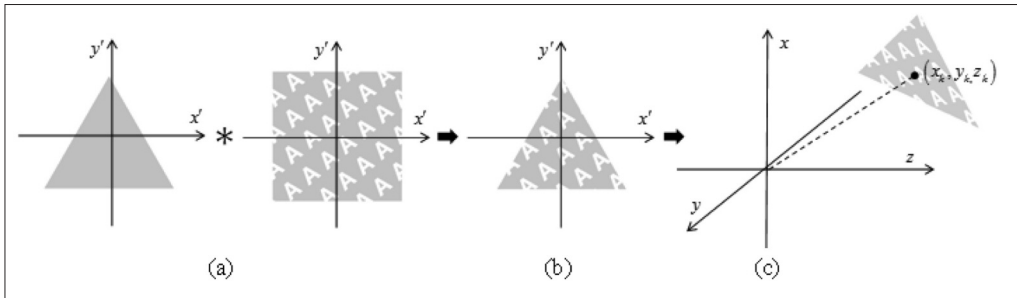
일반적으로 비선형 보간 FFT 기반 폴리곤 CGH의 수학적 모델링은 크게 두 단계로 이루어진다[3,4]. 첫째, 국소좌표계에서 텍스처를 갖는 삼각형 면의 각스펙트럼 복소행렬을 FFT를 통해 구하는 작업, 둘째, 국소좌표계에서 균일 샘플링의 각스펙트럼

복소행렬을 비선형 보간을 통해 균일 샘플링의 대역좌표계 각스펙트럼 복소행렬로 변환하는 작업이다. <그림 1>에 알고리즘을 도식화하였는데, <그림 1>(a)에서 나타낸 삼각형의 국소좌표계  $(x', y', z')$ 에서 텍스처가 없는 민무늬 삼각형 facet의 각스펙트럼 표현은 식 (1)과 같다[5, 6].

동일한 국소좌표계에서의 텍스처 패턴을  $T(x', y')$  (<그림 1>(a))라고 할 때, 텍스처 삼각형의 광파 분포는  $\vec{W}_{k, \text{tex}}(x', y', 0) = W_k(x', y', 0)T(x', y')$  이 되는데, FFT를 사용하여 텍스처 삼각형 facet의 국소좌표계 각스펙트럼 복소행렬을 구하게 된다(그림 1(b)). 앞서 이야기한 두 번째 단계에서는 삼각형의 국소좌표계에서의 균일 샘플링 각스펙트럼 복소행렬을 대역좌표계에서의 균일 샘플링 각스펙트럼으로 변환하는 작업을 하게 된다. (<그림 1>(c))

국소좌표계에서 텍스처 삼각형의 FFT를 수행한 후, 이를 비선형 보간법을 사용하여 대역좌표계로 환산하는 작업이 일반적으로 확립된 폴리곤 CGH 알고리즘이라고 한다면, semi-analytic CGH 알고리즘은 좀 더 수학적인 공식화를 통해 장점을 만들어내려 한다. 이를 <그림 2>에 도식화 하였다. 면

$$W_k(x', y', z') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{L,k}(\alpha' - \alpha'_k, \beta' - \beta'_k) \exp[j2\pi(\alpha'x' + \beta'y' + \gamma'z')] d\alpha' d\beta' \quad (1)$$



<그림 1> 비선형 보간 FFT 기반 텍스처 폴리곤 CGH 계산 알고리즘 (a) 국소좌표계에서 삼각형 facet와 텍스처의 곱하기 연산 (b) 텍스처를 갖는 삼각형 facet의 FFT 기반 각스펙트럼 연산 (c) 국소좌표계 각스펙트럼으로 비선형 보간을 통해 대역좌표계 각스펙트럼 환산

저, 텍스처 패턴의 푸리에 시리즈 표현을 쓰면,

$$T(x', y') = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \tilde{T}'_{m,n} \exp(j2\pi(\Delta\alpha'_m x' + \Delta\beta'_n y')) \quad (2)$$

이고, 이를 식(1)과 결합하여 텍스처 삼각형의 각스펙트럼을 구하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

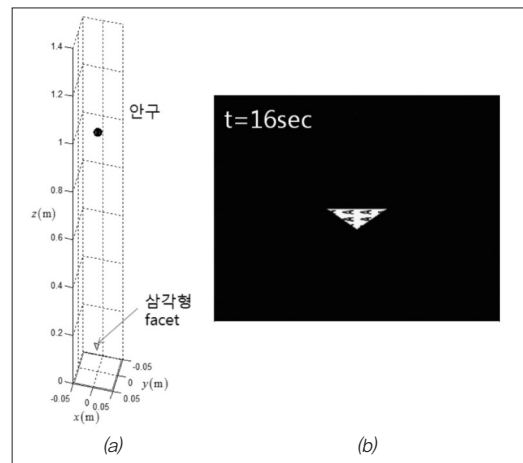
$$\begin{aligned} & \bar{A}_{l,k}(\alpha', \beta') \\ = & \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \tilde{T}'_{m,n} A_{L,k}(\alpha' - \Delta\alpha'_m - \alpha'_k, \beta' - \Delta\beta'_n - \beta'_k) \quad (3) \end{aligned}$$

식 (2)의 텍스처 패턴에서 국소좌표계 각스펙트럼 영역의 샘플 격자  $\Delta\alpha'_m$ 과  $\Delta\beta'_n$ 을 이에 대응되는 대역좌표계 각스펙트럼 영역의 샘플링 격자가 균일한 분포를 갖도록 비균일하게 설정한다면 [그림 2](b)의 왼쪽 그림], 대역좌표계에서 식 (3)을 텍스처 각스펙트럼과 대역좌표계에서의 삼각형 facet의 각스펙트럼과의 콘볼루션 연산 [그림 2] (b)] 으로 근사화할 수 있다. 대역좌표계에서의 삼각형 facet은 이미 수학기식으로 확립되어 있고, 텍스처 각스펙트럼의 밴드폭, 즉, 식 (3)에서 M과 N의 값을 자유롭게 정할 수 있어, 계산 정확도와 계산 속도의 타협관계를 얻을 수 있게 된다. 즉, M( 및 N)을 작게 하면 텍스처의 명료성은 저감되나 콘볼루션 연산이 빨라져 계산 속도가 향상된다.

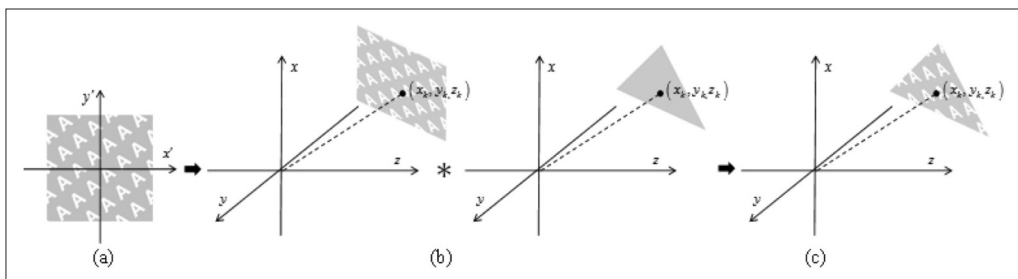
이러한 semi-analytic algorithm은 특정 밴드폭을 갖는 텍스처들에 대해서는 비선형보간 FFT 기반의 기존 알고리즘보다 텍스처 표현의 질을 크게 떨어뜨리지 않는 한도 내에서 계산속도 향상을 이끌어 낼 수 있게 된다.

### III. 계산적 비교

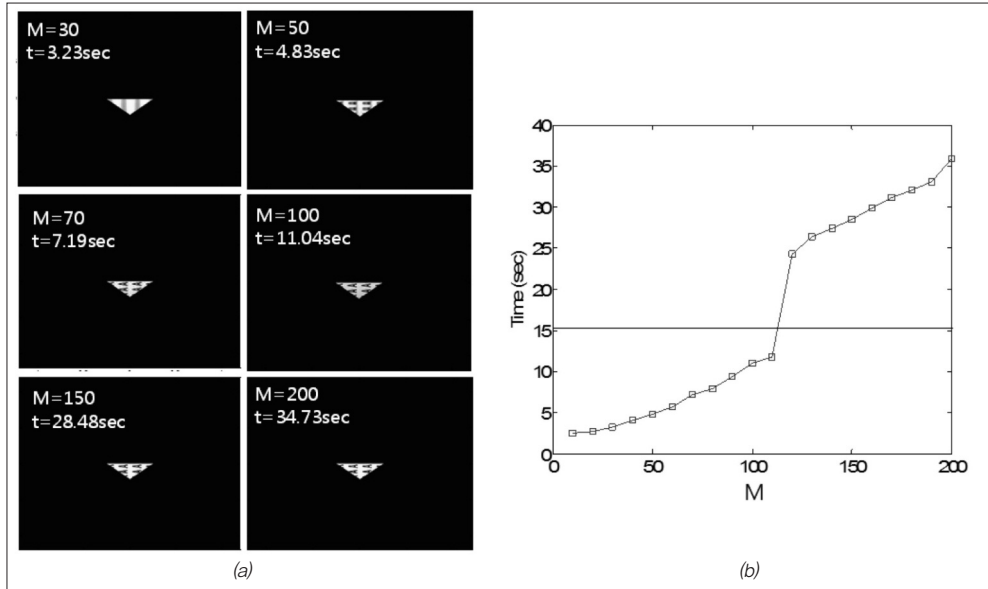
앞에서 설명한 비선형 보간 FFT 기반 텍스처 폴리곤 CGH와 semi-classical 텍스처 폴리곤 CGH



(그림 3) (a) 홀로그래픽 3D 이미지 관측 (b) 비선형 보간 FFT 기반 CGH 이미지의 관측 영상, (CGH 크기 801×801, MATLAB 계산 시간 16sec)



(그림 2) Semi-analytic 텍스처 폴리곤 CGH 계산 알고리즘 (a) 비선형 보간을 통한 대역좌표계의 텍스처 각스펙트럼 계산, (b) 수학기식을 통한 대역좌표계에서의 삼각형 facet의 각스펙트럼 계산, (c) 대역좌표계에서 텍스처 각스펙트럼과 삼각형 facet의 각스펙트럼 연산



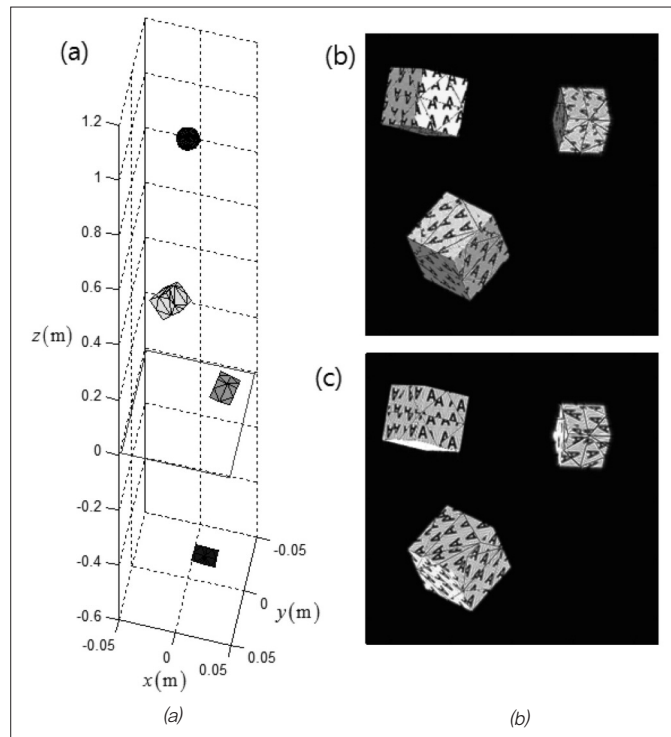
〈그림 4〉 Semi-analytic 텍스처 폴리곤 CGH 계산 결과 및 시간; (a) 텍스처 각스펙트럼의 하모닉 개수 M 및 MATLAB 계산 시간 t, (b) 텍스처 각스펙트럼 하모닉 개수 M에 대한 CGH 계산 시간 t. 검은색 횡방향 선분은 비선형 보간 FFT CGH 계산 시간 16sec임

의 계산 시간을 비교해 보고 semi-analytic 알고리즘에 내제되어 있는 타협관계를 보이도록 한다. 〈그림 3〉(a)에서는  $z=0.2(m)$ 에 떠 있는 60도 기울어진 삼각형 면의 홀로그래픽 3D 이미지를  $z=1(m)$ 에 위치한 단안이 관측하고 있는 모습을 보여준다. 〈그림 3〉(b)는 비선형 보간 FFT 기반 CGH의 관측 영상과 계산시간 ( $t=16s@MATLAB$ )을 보여준다. 알고리즘의 특징상 텍스처 패턴의 복잡도에 관계없이 CGH 계산 시간이 일정하다.

〈그림 4〉에서는 텍스처 패턴의 각스펙트럼 밴드폭 ( $M=N$ )을 조절하면서 텍스처 패턴 표현 명료도와 계산 시간의 타협관계를 분석하였다. 〈그림 4〉(a)에 나타난 바와 같이 텍스처 패턴 밴드폭 M이 작을수록 텍스처 표현의 명료도는 떨어지고 CGH 계산 속도는 빠르다는 것을 알 수 있다. 〈그림 4〉(b)에서 나타난 바와 같이, 밴드폭 M을 200까지 변화시키면서 계산시간을 비교한 결과를 보면, 약

$M=110$ 이하에서는 비선형 보간 FFT CGH의 계산 속도 16sec보다 계산 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 민무늬 삼각형인 경우, 비선형 보간 FFT는 16sec 계산 시간의 변화가 없으나, semi-analytic 방법은 0.2초로 계산 속도가 FFT 기반 방법보다 현저하게 빠르다. 〈그림 4〉(a)에서  $M=100$ 인 경우, 계산 시간이 11sec로 FFT 기반 알고리즘 계산 속도보다 빠르지만, 텍스처가 명료하게 표현된 것을 확인할 수 있다. 또한 삼각형 facet의 경계선이 명확히 표현된다는 것이 analytic 알고리즘의 특징이다. 텍스처 패턴이 단순할수록 semi-analytic 방법이 효율적이라고 할 수 있다.

〈그림 5〉에는 비선형 보간 FFT 기반 텍스처 CGH 알고리즘과 semi-analytic 텍스처 CGH 알고리즘으로 간단한 입체 도형의 CGH를 합성하여 단안으로 관측한 이미지를 비교하고 있다. 두 방법 모두 입체 물체의 표면에 텍스처를 성공적으로 입



〈그림 5〉 (a) 3D 모델과 이의 단안 관측, (b) 비선형 보간 FFT 기반 텍스처 CGH 알고리즘과 (c) semi-analytic 텍스처 폴리곤 CGH 관측 이미지 비교

힐 수 있음을 보이고 있다. 그러나 삼각형의 각스펙트럼을 구하는 수학기공식의 계산에서 보다 효율적인 알고리즘 구현이 필요하다[9].

#### IV. 결론

본고에서는 현재 저자의 연구실에서 연구하고 있는 텍스처 폴리곤 CGH 합성 방법론의 일부 결과를 소개하였다. 본고에서 비교 결과를 보이지 않았으나, 〈그림 5〉에서 보인 모델을 홀로그래픽 3D 점구름 CGH 모델로 합성하는 경우, 수천 개에서 수만 개의 점광원이 필요한데 비해, 폴리곤 CGH는 약 40개 정도의 텍스처 삼각형 폴리곤으로 이루어져

계산시간과 물체 표현의 정밀도에서 우위를 갖는다고 할 수 있다. 물론 표현하고자 하는 물체가 애초부터 점구름 모델로 표현이 용이하다면 폴리곤 CGH 모델보다는 점구름 CGH 모델을 사용하는 것이 더 효율적일 것이다. 어떤 계산 알고리즘을 사용하느냐는 표현하고자 하는 물체의 특성에 따라 결정될 수 있다. 비선형 보간 FFT를 사용하는 방법은 애초에 일본 연구자들에 의해 주로 연구되었고, 사용되고 있으며, semi-analytic 알고리즘은 국내에서 자체적으로 발상하여 연구하고 있는 모델이라고 할 수 있다. 텍스처 표현성과 계산속도의 타협관계를 조절할 수 있는 장점이 있고, 해석 공식의 계산을 보다 빠르게 최적화 할 수 있는 여지가 충분히 있어 계속적인 속도 향상이 가능한 방법이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] H. Kang, F. Yaras, and L. Onural, "Graphics processing unit accelerated computation of digital holograms," Applied Optics, vol. 48, no. 34, pp. H137-H143, 2009.
- [2] H. Kang, "Quality improvement of the coherent holographic stereogram for natural 3D display and its applications," PhD. Thesis, Nihon University, 2008.
- [3] K. Matsushima, "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," Applied Optics, vol. 44, 4607-4614 (2005).
- [4] K. Yamamoto, T. Senoh, R. Oi, and T. Kurita, "8K4K-size computer generated hologram for 3D visual system using rendering technology," 4<sup>th</sup> Universal Communication Symposium (IUCS), Beijing, China, 2010.
- [5] 김휘, "삼각형 메쉬 3D 모델의 computer generated hologram 계산 이론", 방송공학회지 16권 2호, 2011.
- [6] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, "Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography," Applied Optics, vol. 47, no. 19, pp. D117-D127, 2008.
- [7] J. Cho, J. Hahn, and H. Kim, "Fast reconfiguration algorithm of computer generated holograms for adaptive view direction change in holographic three-dimensional display," Optics Express, vol. 20, pp. 28282-28291, 2012.
- [8] W. Y. Lee, D. Lee, D. Im, J. Hahn, and H. Kim, "Semi-analytic texturing algorithm for polygon computer generated holograms," (in preparation).
- [9] J. Cho, Deokhwan Lee, J. Hahn, D. Im, and H. Kim, "Accelerated semi-analytic synthesis algorithm of polygon computer generated holograms," (in preparation).

필자 소개



김 휘

- 1996년 ~ 2000년 : 서울대학교 전기공학부 학사
- 2001년 ~ 2002년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
- 2003년 ~ 2007년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2008년 ~ 2009년 : 삼성전자 LCD 책임연구원
- 2010년 ~ 현재 : 고려대학교 세종캠퍼스 전자및정보공학부 조교수