creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

치의학석사 학위논문

삼차원 공간에서 치아의 텍스쳐 구현을 위한 준분석적 컴퓨터 홀로그램 텍스쳐링 알고리즘

Semi-analytic texturing algorithm of computer-generated hologram for reconstructing texture of tooth in three dimensions

2018년 2월

서울대학교 치의학대학원

치의학과

이 우 영

삼차원 공간에서 치아의 텍스쳐 구현을 위한 준분석적 컴퓨터 홀로그램 텍스쳐링 알고리즘

지도교수 서 광 석

이 논문을 치의학석사 학위논문으로 제출함

2017년 10월

서울대학교 치의학대학원

치의학과

이 우 영

이우영의 치의학석사 학위논문을 인준함

2017년 11월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

삼차원 공간에서 치아의 텍스쳐 구현을 위한 준분석적 컴퓨터 홀로그램 텍스쳐링 알고리즘

서울대학교 치의학대학원

치의학과

이우영

본 논문에서는 텍스쳐 구현을 위한 준분석적 홀로그램 텍스쳐링 알고리즘(semi-analytic texturing algorithm)을 제안하여 기존의 해석적 방법을 이용한 홀로그램(analytic hologram)에서 구현하지 못했던 표면 질감(texture pattern)을 구현할 수 있는 방법을 제시했다. 먼저 새로운 approximate function 제안하고, 이를 기존의 홀로그램을 구성하는 analytic equation 에 적용하여 기존 수식의 형태를 바꾸어 주었다. 변경된 수식의 가장 큰 특징은 연산 과정이 준분석적(semi-analytic)이라는 것이다. 전체 연산 과정이 해석적 연산(analytic calculation) 과정과 수치 해석적 방법인 이중 선형 보간법(numerical bilinear interpolation)을 이용하는 과정으로 나누어진다. 이 방법을 이용하면 단위 폴리곤(polygon)과 표면의 텍스처(surface texture)을 나타내는 spectrum 의 matrix 의 크기를 각각

독립적으로 조절할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 기존의 해석적 방법을 이용한 홀로그램과 달리 texture spectrum 의 matrix 의 크기가 free parameter 가 되어 자유도(degree of freedom)가 증가한다는 장점이 있다.

제안된 방법을 이용하여 삼차원 치아 구조물을 구성하는 삼각망(triangular mesh)의 표면에 임의의 숫자를 구현하였다. 다양한 종류와 크기의 texture spectrum 의 matrix 을 이용하여 삼차원 치아에 표면 질감을 구현해 보았다.

제안된 방법을 이용하면 기존의 해석적 방법을 이용한 홀로그램이 표면의 텍스처를 구현하기 어려워 많은 분야에 응용되지 못한 한계를 극복할 수 있을 것이다. 또한 개별 삼각망의 윤곽선(outline)의 해상도(resolution)의 제한 없이 texture spectrum 의 해상도를 독립적으로 조절할 수 있어 다양한 분야에 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : Digital holography, Holographic display, Digital dentistry

학번 : 2014-23059

`

목 차

초 록 i

목 차 iii

그림 목차 iv

표 목차 v

제 1 장 서론 1

제 2 장 해석적 방법에 대한 연구 3

2.1. 해석적 방법에 대한 기존 연구 3

2.2. 표면 질감 구현에 관한 연구 6

2.3. 연산자를 이용한 추상화 9

제 3 장 준해석적 방법 10

3.1. 준해석적 방법에서 표면 질감 구현 10

제 4 장 시뮬레이션 결과 14

4.1. 텍스쳐를 포함한 단일 삼각망 15

4.2. 치아 형태에 대한 시뮬레이션 24

제 5 장 결론 26

참고 문헌 28

Abstract 30

`

그림 목차

그림 2.1. 대구치 삼차원 모형과 triangular mesh. (a) 104개의 삼각망으로 구성된 대구치. (b) k번째 삼각망에서 local coordinate system과 global coordinate system.....3

그림 2.2 FFT을 이용한 방법 모식도. (a) 국소 좌표계에서 $\bar{W}_{k,text}(x',y')=W_k(x',y',0)T(x',y')$ 을 이용하여 텍스쳐를 입힌 삼각망 구하기. (b) 텍스쳐를 입힌 삼각망의 angular spectrum의 국소-전역 좌표 변환……8

그림 3.1 준해석적 방법 모식도. (a) 전역 좌표계에서 texture pattern 과 triangular facet 의 함수를 직접 multiplication하는 과정. (b) (a)와 동일한 과정을 제안된 연산자를 사용하여 추상화.……..…..…….…13

그림 4.1 수치해석 방법과 해석적 방법을 이용한 단일 삼각망의 홀로그램 시뮬레이션 결과. (a) 원형 구멍의 질감을 포함하는 단일 삼각망 모식도. (b) 수치해석 방법으로 구현한 텍스처가 없는 경우 단일 삼각망. (c) 수치해석 방법으로 구현한 텍스처가 있는 경우 단일 삼각망. (d) 해석적 방법으로 구현한 텍스처가 없는 경우 단일 삼각망…….….15

그림 4.2. 고정된 삼각망에 다양한 해상도의 텍스처 적용……19

그림 4.3. 다양한 해상도의 texture pattern의 확대도..…….....21

그림 4.4. 준해석적 방법과 수치해석적 방법의 연산 시간 비교……..…22

그림 4.5. 삼차원 치아 모형에 준해석적 방법의 적용…….……..…….25

`

표 목차

표 1. 연산자의 종류와 의미 9

`

제 1 장 서론

홀로그래피(holography)는 빛의 간섭성(interference)을 이용해서 삼차원 입체 정보를 기록(record), 재생(reconstruct)하는 기술로 *Dennnis Gabor* 가 홀로그래피(holography)[1]의 기본 원리를 제시한 이후 가간섭 광원(coherent light source)인 Laser 의 개발, holographic recoding media 의 발전과 다양한 홀로그래피 구현 방법의 연구를 통해서 발전해왔다.

최근 들어 다양한 홀로그래피 구현 방법 중에서도 computer-generated holograms(CGHs)의 놀라운 발전[2]으로 다양한 분야에서 홀로그래피의 응용이 실제로 가능해졌다. 특히 CGHs 을 이용한 기술은 의학 및 치의학분야에서도 다양하게 이용될 수 있는 가능성을 가지고 있어 연구의 필요성이 높다. 의학 및 치의학분야에서 활용 가능한 대표적 분야는 three dimensional visualization [3], diagnostic Tool [4], guided surgery tool in operating room, medical Education [5], forensic medicine [6]로 나누어 볼 수 있다

다양한 분야에서 응용이 가능하게 만든 CGH synthesis algorithm 은 그 구현 방법에 따라 point cloud CGH synthesis algorithm 과 polygon CGH synthesis algorithm 으로 분류할 수 있다.

첫번째 방법인 point cloud CGH synthesis algorithms[7,8]은 점군 데이터 분포(point cloud distribution)에 존재하는 공간상의 개별 점(point)의 위상(phase)과 진폭(amplitude)를 조절(modulate)하는 방법으로, 개별 점의 광학적 특성을 조절할 수 있기 때문에 자유도(degree of freedom)가 높고, 임의의 표면의 텍스처(surface texture)을 구현하기 용이하다. 하지만 공간상에 존재하는 모든 점에 대한 연산이 필요하기 때문에 연산

`

시간(computation time)이 매우 길어서 대면적 홀로그램(large scale hologram)을 구현하는 것에는 적절하지 않다.

두번째 방법인 polygon CGH synthesis[9,10,11]은 단위 삼각면(triangular facet)의 light field 의 모음으로 전체를 구현하는 방법이다. 이 방법이 point cloud CGH synthesis algorithms 보다 더 많이 연구와 응용되고 있다. polygon CGH synthesis algorithms 은 다시 세부 구현 방법에 따라서 fast Fourier transform (FFT)를 이용한 수치 계산법(numerical method)[9,12]과 단위 폴리곤(polygon facet)의 angular spectrum 를 수학적으로 구현한 해석적 방법 (analytic method)[11,13]으로 구분할 수 있다.

CGHs 가 의료 영상 분야에 상용화되기 위해서 필요한 조건은 대면적(large-scale), 광시야각(wide-viewing angle)의 홀로그램을 보다 정확(accurate)하게 구현하는 것이다. 특별히 정확성이 요구되는 의료 분야를 위해서는 수치 계산법보다는 해석적 방법을 이용한 홀로그래피의 구현이 이상적으로 생각된다. 하지만 관련 기술의 부재로 해석적 방법을 이용한 홀로그램이 많이 응용되지 못하고 있다. 해석적 방법을 이용하면 수치 계산법보다 빠르고, 정확하게 홀로그램을 구현을 할 수 있지만 개별 mesh 의 표면 질감 (surface texture)을 구현할 수 있는 알고리즘의 부재로 관련 연구에 어려움을 겪고 있다. 하지만 최근 새롭게 제안된 Semi-analytic texturing algorithm[14]에서 해석적 방법에서도 표면 질감(surface texture)을 구현할 수 있는 기본 원리가 제안되었다. 본 논문에서는 새롭게 제안된 알고리즘을 응용하여 단순한 직육면체를 넘어서 복잡한 삼차원 구조물의 한 예인 치아에 표면 질감(surface texture)을 해석적 방법에 기반하여 구현하는 것을 목표로 한다. 이를 통해서 새로운 알고리즘이 임상에서 가질 수 있는 의미와 응용 가능성을 확인하고자 한다.

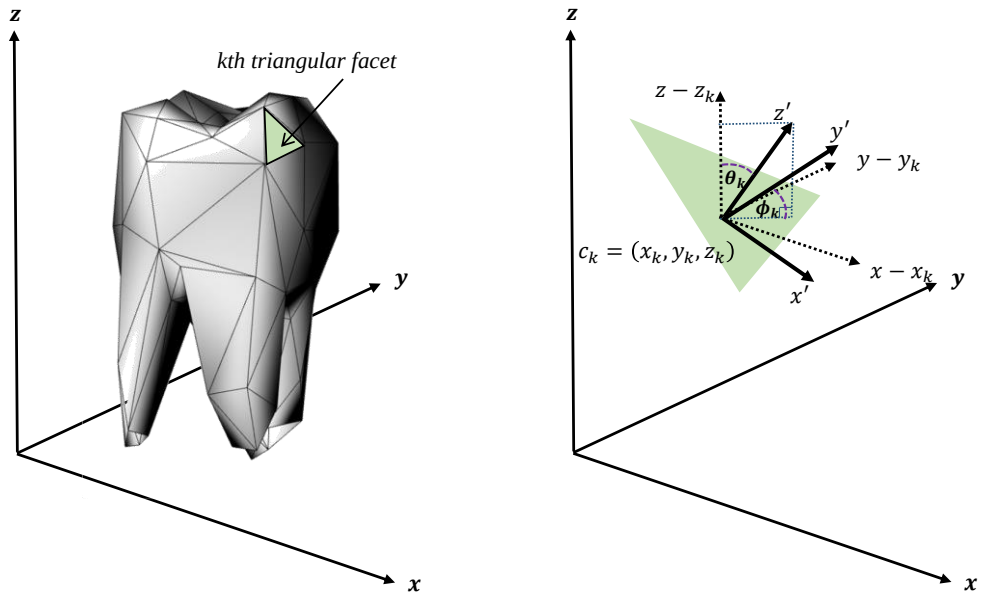
`

제 2 장 해석적 방법에 대한 연구

본 장에서는 CGH 을 구현하는 기본 방정식(fundamental equation)에 대하여 설명한 기존의 논문[15, 16]을 따라서 해석적 방법(analytic method)을 기반으로 하는 텍스처를 포함한 방정식의 유도에 대해서 설명하고자 한다.

2.1. 해석적 방법에 대한 기존 연구

해석적 방법에서 삼차원 개체(object)의 표면(surface)은 그림 2.1(a)와 같이 다수의 삼각망(triangular mesh)으로 나눌 수 있다.



(a) (b)

그림 2.1. 대구치 삼차원 모형과 triangular mesh

(a) 104 개의 삼각망으로 구성된 대구치

(b) k 번째 삼각망에서 local coordinate system 과 global coordinate system

`

k 번째 삼각망에 대한 국소 좌표계(local coordinate)와 전역 좌표계(global coordinate) 사이의 관계는 그림 2.1(b)과 같이 나타낼 수 있다. k 번째 삼각망이 이루는 삼각면(triangular facet)에서 light field 은 $W_k(x,y,z)$로 정의하고, 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_k(x,y,z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}A_{G,k}(\alpha,\beta)\exp\left[j2\pi(\alpha x+\beta y+\gamma z)\right]d\alpha d\beta \qquad (2.1)$$

식 (2.1)에서 $A_{G,k}(\alpha,\beta)$ 은 $W_k(x,y,z)$ 의 angular spectrum 으로 전역 좌표계에서의 angular spectrum CGH (ASCGH)으로 정의한다. $(\alpha_k,\beta_k,\gamma_k)$ 는 전역 좌표계에서 공간 주파수 벡터(spatial-frequency vector)이다. k 번째 삼각면의 무게 중심을 $\mathbf{c}_k=(x_k,y_k,z_k)$ 로 정의하고, $\mathbf{c}_k$ 에 수직인 벡터를 $\mathbf{n}_k=(a_k,b_k,c_k)=(\cos\phi_k\sin\theta_k,\sin\phi_k\sin\theta_k,\cos\theta_k)$ 로 정의한다. 법선 벡터(normal vector) 에 대해서 θ_k 은 longitudinal angle 로 정의하고, ϕ_k 은 azimuthal angle 로 정의한다. 이를 이용하여 국소 좌표계에 해당하는 (x',y',z') 를 정의할 수 있다. 전역 좌표계의 점 (x,y,z) 에서 국소 좌표계의 점 (x',y',z')로의 변환을 식 (2.2.1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\theta_k\cos\phi_k & \cos\theta_k\sin\phi_k & -\sin\theta_k\\ -\sin\phi_k & \cos\phi_k & 0\\ \sin\theta_k\cos\phi_k & \sin\theta_k\sin\phi_k & \cos\theta_k\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x-x_k\\y-y_k\\z-z_k\end{pmatrix} \qquad (2.2.1)$$

유사하게 국소 좌표계에서 공간 주파수 벡터에 해당하는 (α',β',γ') 도 식 (2.2.1)과 동일한 회전 변환을 이용하여 식 (2.2.2)와 같이 전역 좌표계의 공간 주파수 벡터인 (α,β,γ)로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix}\alpha'\\\beta'\\\gamma'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\theta_k\cos\phi_k & \cos\theta_k\sin\phi_k & -\sin\theta_k\\ -\sin\phi_k & \cos\phi_k & 0\\ \sin\theta_k\cos\phi_k & \sin\theta_k\sin\phi_k & \cos\theta_k\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\alpha-\alpha_k\\\beta-\beta_k\\\gamma-\gamma_k\end{pmatrix} \qquad (2.2.2)$$

`

식 (2.2.1)과 식 (2.2.2)의 회전 변환을 사용하여 식 (2.1)은 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_k(x',y',z') = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} A_{L,k}(\alpha'-\alpha_k',\beta'-\beta_k')\exp\left[j2\pi(\alpha'x'+\beta'y'+\gamma'z')\right]d\alpha' d\beta' \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서 γ' 은 $\gamma' = \left((1/\lambda)^2 - \alpha'^2 - \beta'^2\right)^{1/2}$ 로 정의하고, 이때 λ 는 자유 공간에서의 파장(free space wavelength)에 해당한다. 참고문헌 [15, 16, 17]에 의해서 유도된 $A_L(\alpha',\beta')$ 을 이용하면 전역 좌표계에서의 ASCGH 인 $A_{G,k}(\alpha,\beta)$ 은 국소 좌표계의 ASCGH 인 $A_L(\alpha',\beta')$ 로 식 (2.4.1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &A_{G,k}(\alpha,\beta) \\ &= \eta_0 e^{-j2\pi([\alpha-\alpha_k]x_k+[\beta-\beta_k]y_k+[\gamma-\gamma_k]z_k)} \\ &A_{L,k}\left(\alpha'(\alpha,\beta)-\alpha_k'(\alpha_k,\beta_k),\beta'(\alpha,\beta)-\beta_k'(\alpha_k,\beta_k)\right)|J| \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

$$\begin{aligned} &\alpha'(\alpha,\beta)-\alpha_k'(\alpha_k,\beta_k) \\ &= (\alpha-\alpha_k)\cos\theta_k\cos\phi_k + (\beta-\beta_k)\cos\theta_k\sin\phi_k - (\gamma-\gamma_k)\sin\theta_k \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

$$\begin{aligned} &\beta'(\alpha,\beta)-\beta'(\alpha_k,\beta_k) \\ &= -\sin\phi_k(\alpha-\alpha_k)+\cos\phi_k(\beta-\beta_k) \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

식 (2.4.1)에서 $|J|$ 은 Jacobian 으로 $d\alpha' d\beta' = |J| d\alpha d\beta$ 로 정의된다. $\alpha'(\alpha,\beta)-\alpha_k'(\alpha_k,\beta_k)$ 과 $\beta'(\alpha,\beta)-\beta'(\alpha_k,\beta_k)$ 은 식 (2.4.2)와 식 (2.4.3)과 같이 나타낼 수 있다.

2.2. 표면 질감 구현에 관한 연구

국소 좌표계에서 삼각망의 표면의 질감에 해당하는 함수인 $T(x',y')$ 을 non-uniform discrete Fourier series 로 이루어진 complex function 으로 식 (2.5)와 같이 정의할 수 있다.

$$T(x',y') = \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \tilde{T}'_{m,n} \exp\left(j2\pi \left(\alpha'_m x' + \beta'_n y' \right) \right) \tag{2.5}$$

표면의 질감을 입힌 light field 을 $\bar{W}_{k,text}$ 로 정의하고, 다음 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{W}_{k,text}(x',y') = W_k(x',y',0) T(x',y') \tag{2.6}$$

식 (2.3)과 (2.5)를 식 (2.6)에 대입하여 아래 식 (2.7)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\bar{W}_{k,text}(x',y',0) = W_k(x',y',0) T(x',y') \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \tilde{T}'_{m,n} A_{L,k}(\alpha' - \alpha'_m - \alpha'_k, \beta' - \beta'_n - \beta'_k) \right] \exp\left[j2\pi(\alpha' x' + \beta' y') \right] d\alpha' d\beta' \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta') \exp\left[j2\pi(\alpha' x' + \beta' y') \right] d\alpha' d\beta' \end{aligned} \tag{2.7}$$

식 (2.7)에서 $\bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta')$ 은 질감을 입힌 light field 의 angular spectrum 에 해당하고, 식 (2.8)과 같이 정의한다.

$$\bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta') = \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \tilde{T}'_{m,n} A_{L,k}(\alpha' - \alpha'_m - \alpha'_k, \beta' - \beta'_n - \beta'_k) \tag{2.8}$$

식 (2.8)의 의미는 삼각망에서 $T(x',y')$ 의 Fourier series coefficients 과 triangle facet 의 shifted angular spectrums 을 합성 곱(convolution)하는 것이다. 전역 좌표계에서 텍스쳐가 추가된 삼각망의 light field 의 angular spectrum 인 $\bar{A}_{G,k}(\alpha,\beta)$ 은 아래 식 (2.9)와 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} &\bar{A}_{G,k}(\alpha,\beta) = \eta_0 e^{-j2\pi([\alpha-\alpha_k]x_k + [\beta-\beta_k]y_k + [\gamma-\gamma_k]z_k)} \\ &\times |J| \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \tilde{T}'_{m,n} A_{L,k}\left(\alpha'(\alpha,\beta) - \alpha'_m - \alpha'_k(\alpha_k,\beta_k), \beta'(\alpha,\beta) - \beta'_n - \beta'_k(\alpha_k,\beta_k) \right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

textured triangular facet 에 의한 전역 좌표계에서의 light field 은 다음 식 (2.10)과 같이 나타난다.

$$\bar{W}_k(x,y,z) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \bar{A}_{G,k}(\alpha,\beta)\exp\left[j2\pi(\alpha x+\beta y+\gamma z)\right]d\alpha d\beta \qquad (2.10)$$

표면 질감이 구현된 홀로그램을 재생하기 위해서는 식 (2.9)를 계산하는 것이 가장 핵심적인 문제이다. 식 (2.9)를 계산하는 것은 크게 두가지 방법으로 나눌 수 있다. $\bar{A}_{G,k}(\alpha,\beta)$를 기존의 FFT 기반의 texturing algorithm 로 계산하는 수치 해석적 방법과 analytic function 의 해를 구하는 해석적 방법으로 나눌 수 있다.

먼저 국소 좌표계의 unifrom gird 에서 texture pattern 인 $T(x',y')$ 과 triangular facet 을 합성곱하여 $\bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta')$을 계산하고, 계산된 $\bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta')$ 을 이중 선형 보간법(bilinear interpolation)을 이용하여 리샘플링(resampling) 하여 전역 좌표계에서의 $\bar{A}_{G,k}(\alpha,\beta)$ 을 구한다. $\bar{A}_{L,k}(\alpha',\beta')$ 을 계산하기 위하여 합성곱을 계산에 시간이 오래 소모되기 때문에 텍스쳐를 입히 삼각망인 $\bar{W}_{k,text}(x',y',0)$ 을 직접 FFT 하는 방법이 일반적으로 사용된다. 이와 같은 FFT-based texturing algorithm 을 도식으로 설명하면 그림 2.2 와 같다. 그림 2.2(a)는 식 (2.6)을 이용하여 triangular facet 에 텍스쳐를 입힌 과정을 나타낸다. 그림 2.2(b)는 국소 좌표계의 uniform grid 에서 구한 angular spectrum 을 리샘플링하여 전역 좌표계에서 angular spectrum 을 구하는 과정을 나타낸다.

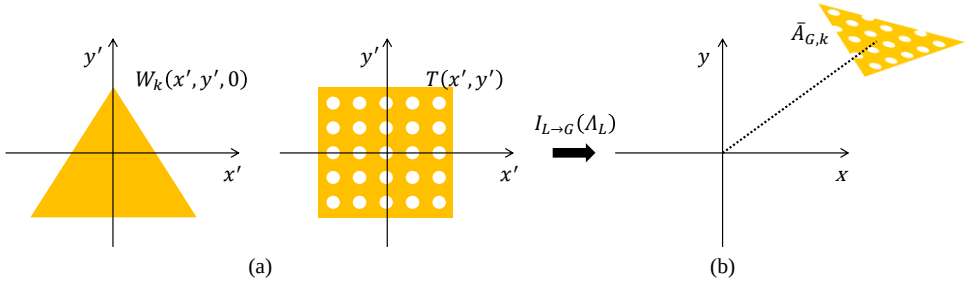


그림 2. 2 FFT 을 이용한 방법 모식도

(a) 국소 좌표계에서 $\bar{W}_{k,text}(x', y') = W_k(x', y', 0)T(x', y')$ 을 이용하여 텍스쳐를 입힌 삼각망 구하기

(b) 텍스쳐를 입힌 삼각망의 angular spectrum 의 국소-전역 좌표 변환

`

2.3. 연산자를 이용한 추상화

이와 같은 과정은 다른 논문[18]에서 제안한 아래 표 1 과 같은 연산자(operator) 을 이용하여 추상화 할 수 있다.

표 1. 연산자의 종류와 의미

Notation	*Mean*
Λ	*angular spectrum of the textured triangle facet*
Δ	*angular spectrum of triangle facet without texture pattern*
I	*coordinate transformation (nonlinear interpolation process)*
Subscript L	*local coordinate*
Subscript G	*global coordinate*
Subscript $L \to G$	*coordinate transform from the local coordinate to the global coordinate*
Subscript $G \to L$	*coordinate transform from the global coordinate to the local coordinate*
subscript k	*k th triangular facet*

그림 2.2 에서 설명하는 텍스쳐를 포함하는 삼각면의 angular spectrum 을 구하는 일련의 과정은 표 1 의 연산자를 사용하여 $\bar{A}_{G,k} = I_{L\to G}(\Lambda_L)$ 로 나타낼 수 있다. 텍스쳐가 없는 삼각면의 angular spectrum 을 구하는 과정은 $A_{G,k} = I_{L\to G}(\Delta_L)$로 나타낼 수 있다.

`

제 3 장 준해석적 방법

본 장에서는 텍스쳐를 포함하는 삼각망의 angular spectrum을 보다 효율적으로 구하기 위해서 준해석적 방법을 새롭게 제안하고, 그 의미에 대해서 고찰하고자 한다.

3.1. 준해석적 방법에서 표면 질감 구현

해석적 방법을 이용하여 표면 질감을 구현하기 위해서는 2장에서 설명한 것과 같이 식 (2.9)를 효율적으로 계산하는 것이 중요하다. 식 (2.9)을 합성곱을 이용하여 계산할 경우 (α'_m, β'_n)에 대해서 $(2M+1)(2N+1)$ 번씩 $A_{L,k}(\alpha', \beta')$을 반복 계산해야 하기 때문에 텍스처를 포함하지 않은 삼각망 계산에서 기존의 해석적 방법이 가지고 있던 장점이 없어지고, 계산과정이 비효율적으로 변하게 된다. 따라서 의료 영상에 필요한 실시간(real-time) 구현을 어렵게 한다. 이 문제를 해결하기 위해서 최근 논문[18]에서 세부 연산 순서를 바꾸는 novel mathematical approximation이 제안 되었다. 식 (2.9)의 세부 요소는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}&\alpha'(\alpha_p, \beta_q) - \alpha'_m - \alpha'_k(\alpha_k, \beta_k)\\ &= (\alpha_p - \alpha_m - \alpha_k)\cos\theta_k \cos\phi_k + (\beta_q - \beta_n - \beta_k)\cos\theta_k \sin\phi_k - (\gamma_{p,q} - \gamma_{m,n} - \gamma_k)\sin\theta_k\end{aligned} \tag{3.1.1}$$

$$\begin{aligned}&\beta'(\alpha_p, \beta_q) - \beta'_n - \beta'_k(\alpha_k, \beta_k) = (-\alpha_p + \alpha_m + \alpha_k)\sin\phi_k + (\beta_q - \beta_n - \beta_k)\cos\phi_k\\ &= (\alpha_{-p+m} + \alpha_k)\sin\phi_k + (\beta_{q-n} - \beta_k)\cos\phi_k\\ &= \alpha_{-p+m}\sin\phi_k + \beta_{q-n}\cos\phi_k - \beta'_k(\alpha_k, \beta_k)\end{aligned} \tag{3.1.2}$$

위 식에서 p 와 q 는 global spatial frequency coordinate 에서 (p, q)번째 sampling point 을 말한다. 위 식의 계산 과정을 효율적으로 하기 위해서 식 (3.2)과 같은 approximate function 을 제안했다.

$$\Gamma(\alpha_{p-m}, \beta_{q-n}) \approx \sqrt{(1/\lambda)^2 - \alpha_p^2 - \beta_q^2} - \sqrt{(1/\lambda)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2} \tag{3.2}$$

식 (3.2)을 이용하면, 식 (3.1.1)를 α_{p-m} 와 β_{q-n} 대하여 shift-invariant form 으로 변화 시킬 수 있다. 이를 유도하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
&\alpha'\left(\alpha_p,\beta_q\right)-\alpha'_m-\alpha'_k\left(\alpha_k,\beta_k\right)\\
&\approx\left(\alpha_{p-m}-\alpha_k\right)\cos\theta_k\cos\phi_k+\left(\beta_{q-n}-\beta_k\right)\cos\theta_k\sin\phi_k-\left(\Gamma\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)-\gamma_k\right)\sin\theta_k \qquad (3.3)\\
&=\alpha_{p-m}\cos\theta_k\cos\phi_k+\beta_{q-n}\cos\theta_k\sin\phi_k-\Gamma\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)\sin\theta_k-\alpha'_k\left(\alpha_k,\beta_k\right).
\end{aligned}$$

식 (3.3)에 의해서 $A_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_p,\beta_q,\alpha_m,\beta_n\right)$ 은 $\tilde{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)$ 로 approximation 될 수 있다. 이를 통해서 얻은 ASCGH 을 $\tilde{\Delta}_G$ 로 정의한다. 식 (3.1.2)와 식 (3.3)를 식 (2.9)에 대입하면 아래의 식 (3.4.1)을 유도할 수 있다.

$$\bar{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_p,\beta_q\right)=\eta_0 e^{-j2\pi\left(\left[\alpha_p-\alpha_k\right]x_k+\left[\beta_q-\beta_k\right]y_k+\left[\gamma_{p,q}-\gamma_k\right]z_k\right)}\left|J\right|\sum_{m=-M}^{M}\sum_{n=-N}^{N}\tilde{T}'_{m,n}\tilde{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right) \quad (3.4.1)$$

위 식에서 $\tilde{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)$ 은 아래의 식 (3.4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\tilde{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)\\
&=A_{L,k}\begin{pmatrix}\alpha_{p-m}\cos\theta_k\cos\phi_k+\beta_{q-n}\cos\theta_k\sin\phi_k-\Gamma\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)\sin\theta_k-\alpha'_k\left(\alpha_k,\beta_k\right)\\ ,-\alpha_{p-m}\sin\phi_k+\beta_{q-n}\cos\phi_k-\beta'_k\left(\alpha_k,\beta_k\right)\end{pmatrix} \qquad (3.4.2)
\end{aligned}$$

연산을 줄이기 위해서 $\Gamma\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)\sin\theta_k$ 를 0 으로 가정하고 이에 대한 논의는 이전 논문[18]에서 다루어 졌다. Fourier coefficient 인 $\tilde{T}'_{m,n}$ 은 국소 좌표계에서 non-uniform grid 에서 선택된다

$$\left(\alpha'_m,\beta'_n\right)=\left(\alpha_m\cos\theta_k\cos\phi_k+\beta_n\cos\theta_k\sin\phi_k-\gamma_{m,n}\sin\theta_k,-\alpha_m\sin\phi_k+\beta_n\cos\phi_k\right) \quad (3.4.3)$$

여기서 대응하는 전역 좌표계의 sampling point 인 $\left(\alpha_m,\beta_n\right)$ 가 uniform computation grid 에서 구성된다. $\Gamma\left(\alpha_{p-m},\beta_{q-n}\right)\sin\theta_k$ 를 0 으로한 가정을 식 (3.4.2)에 적용하면 전역 좌표계에서 삼각면의 angular spectrum 과 texture 의 angular spectrum 의 합성곱으로 식 (3.4.4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\bar{A}_{\mathrm{G},k}\left(\alpha_p,\beta_q\right)=\eta_0 e^{-j2\pi\left(\left[\alpha_p-\alpha_k\right]x_k+\left[\beta_q-\beta_k\right]y_k+\left[\gamma_{p,q}-\gamma_k\right]z_k\right)}\left|J\right|\left(\tilde{T}'*\tilde{A}_{\mathrm{G},k}\right) \qquad (3.4.4)$$

식 (2.5)에서 나타난 것과 같이 texture pattern 인 $T(x',y')$는 local spatial frequency (α'_m,β'_n)를 위해 non-uniform discrete Fourier series 로 나타난다. 이 non-uniform sampling (α'_m,β'_n) 은 식 (3.4.3)에 의해서 uniform sampling (α_m,β_n) 로 나타낼 수 있게 된다. 실제 계산에서 non-uniform Fourier coefficients 인 $\tilde{T}'_{m,n}$ 은 the same bilinear interpolation process 인 $I_{L\to G}(\cdot)$ 에 의해서 얻을 수 있다. 이 과정에서 the local spatial frequency domain 에 있는 uniform sampling grid 의 the uniform Fourier coefficients $\tilde{T}_{L,m,n}$ 으로부터 $\tilde{T}'_{m,n}$ 가 얻어진다. 따라서 $\tilde{T}'_{m,n}$ 은 $I_{L\to G}\left(\tilde{T}_L\right)$의 과정으로 추상화 될 수 있다. $I_{L\to G}\left(\tilde{T}_L\right)$을 texture angular spectrum matrix 인 $\tilde{T}_G$로 나타내면 식 (3.4.4)는 $\tilde{T}_G * \tilde{\Delta}_G$ 로 나타낼 수 있다. 이 식의 가장 큰 특징은 semi-analytic 하다는 것과 전체 연산 과정이 analytic calculation $\tilde{\Delta}_G$ 과 the numerical bilinear interpolation $I_{L\to G}\left(\tilde{T}_L\right)$과 numerical convolution 하는 과정으로 나누어진다는 것이다. 따라서 이 방법을 이용하면 $\tilde{\Delta}_G$ 와 $\tilde{T}_G$ 의 matrix 의 크기가 독립적이 된다. $\tilde{T}_G$가 free parameter 가 될 수 있고, 이는 texture pattern 의 resolution 을 결정하게 되는 것이다.

`

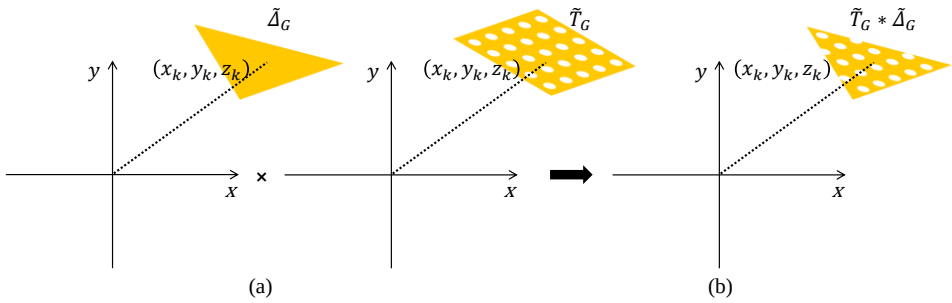


그림 3. 1 준해석적 방법 모식도

(a) 전역 좌표계에서 texture pattern 과 triangular facet 의 함수를 직접 multiplication 하는 과정

(b) (a)와 동일한 과정을 제안된 연산자를 사용하여 추상화

준해석적 방법에 대한 모식도가 그림 3.1 에 있다. 이 방법을 사용하면 FFT-based method 와 다르게 bilinear interpolation 에 의한 연산량이 감소한다. FFT-based method 에서는 triangular facet 의 ASCGH 의 matrix 크기와 동일한 크기의 matrix 에 대해서 bilinear interpolation 이 이루어져야 했다. 그러나 제안된 방법은 global coordinate 에서 $\tilde{T}_G$ 의 크기가 독립적으로 선택될 수 있다. 이는 the texture pattern 의 matrix size 가 사용자의 의도에 따라서 조절할 수 있다는 것을 의미한다. matrix size 가 커지면 texture pattern 의 resolution 이 높아지고, matrix size 가 작아지면 texture pattern 의 resolution 이 감소하는 것이다. 결국 이는 semi-analytic texturing process 과정에서 삼각망의 outline 의 resolution 과는 별개로 texture 자체의 resolution 을 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 texture pattern matrix 의 크기를 조절해서 the triangular facet outline 은 유지하면서 내부 pattern 의 resolution 을 감소시켜 전체 연산 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

제 4 장 시뮬레이션 결과

전 장에서는 새로운 수학적 근사치(mathematical approximation)을 이용한 매우 효율적인 준해석방법을 제안하고, 그 의미와 연산자를 사용한 추상화에 대해서 논의했다. 본 장에서는 간단한 개별 삼각망과 복잡한 구조로 임상적으로 의미를 지닐 수 있는 단위인 개별 치아 형태에 임의의 텍스쳐를 입히는 시뮬레이션을 진행하였다.

`

4.1. 텍스쳐를 포함한 단일 삼각망

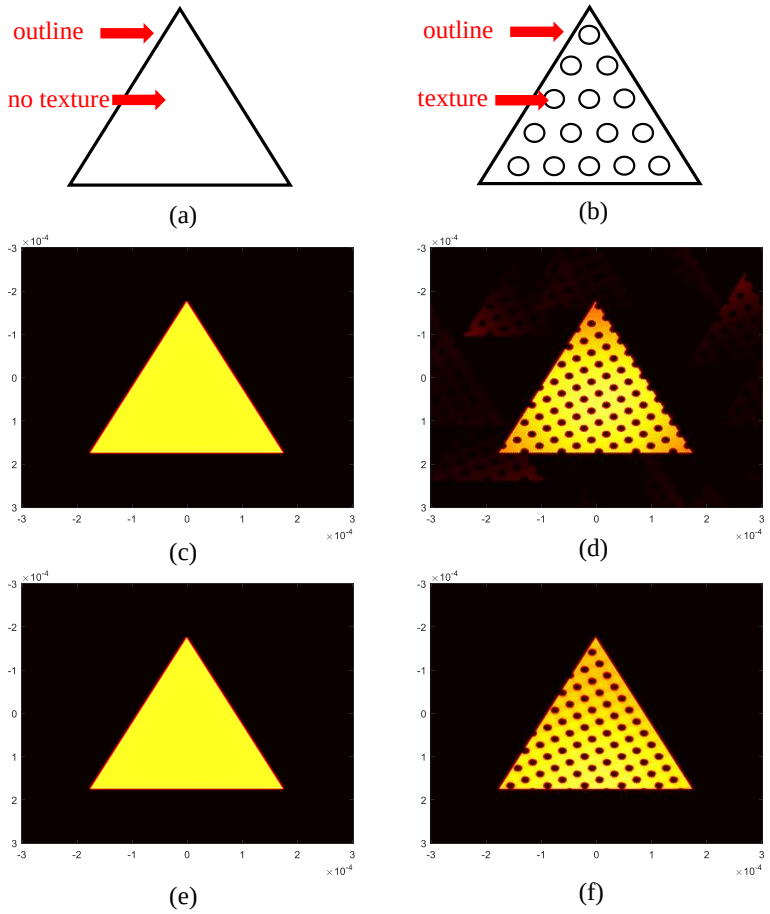


그림 4.1 수치해석 방법과 해석적 방법을 이용한 단일 삼각망의 홀로그램 시뮬레이션 결과

(a) 단일 삼각망 모식도

(b) 원형 구멍의 질감을 포함하는 단일 삼각망 모식도

(c) 수치해석 방법으로 구현한 텍스처가 없는 경우 단일 삼각망

(d) 수치해석 방법으로 구현한 텍스처가 있는 경우 단일 삼각망

(e) 해석적 방법으로 구현한 텍스처가 없는 경우 단일 삼각망

(f) 해석적 방법으로 구현한 텍스처가 있는 경우 단일 삼각망

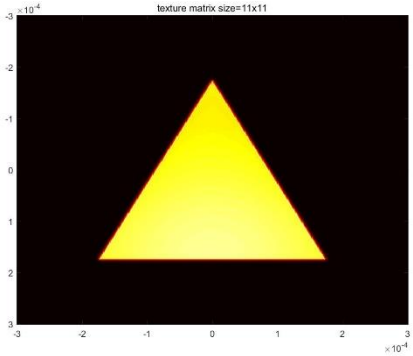
본 논문의 모든 시뮬레이션 결과는 intel core I5-6200U CPU, 8.00GB RAM 사양에서 이루어졌다. 단일 삼각망에 대하여 원형 구멍의 질감을 포함할 때와 포함하지 않는 경우에 대해서 기존의 FFT기반의 수치 해석적 방법과 해석적 방법을 이용하여 시뮬레이션 결과는 그림 4.1과 같다. 그림 4.1(a)와 그림 4.1(b)는 원형 구멍의 질감을 포함하지 않는 단일 삼각망과 원형 구멍의 질감을 포함하는 단일 삼각망의 모식도를 나타낸다. 기존의 수치 해석적 방법을 이용해서 401×401의 matrix size을 갖는 그림 4.1(c)의 텍스처가 없는 단일 삼각망과 그림 4.1(d)의 텍스처를 포함한 단일 삼각망의 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다. 수치 해석적 경우에 반복적인 원형 구멍(hole)의 표면 질감을 포함한 단일한 삼각망에 대한 시뮬레이션 연산 시간(computation time)은 평균 3.501초로 텍스처에 포함 유무에 따른 유의미한 차이가 없다. 이는 FFT 기반의 방법은 텍스처를 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우에서 수학적으로 차이가 없기 때문이다. 수학적으로 연산 시간은 texture pattern 의 유무가 아니라 matrix size에만 의존하기 때문이다.

이와 비교하여 그림 4.1(e)는 해석적 방법을 이용한 텍스처가 없는 경우 단일 삼각망, 그림 4.1(f)는 해석적 방법을 이용한 텍스처를 포함한 경우 단일 삼각망의 시뮬레이션 결과이다. 해석적 방법을 이용한 텍스처가 없는 경우 시뮬레이션 연산 시간은 0.15초로 수치해석적 방법에 비해서 23.34배 빠르다. 텍스처가 없는 경우에 해석적 방법을 이용하면 기존의 수치해석적 방법보다 수학적으로 엄밀하여 왜곡이 적을 뿐만 아니라 빠른 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 수치 해석적 방법에 사용된 coordinate transformation 과정이 nonlinear interporation을 포함하고 있어 오차가 포함될 수 밖에 없는데 비하여 해석적 방법은 수식(analytic formula)의 해를 이용하였기 때문에 오차가

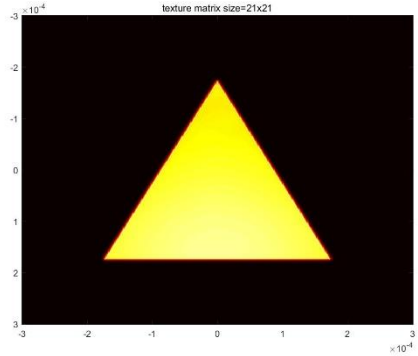
없을 뿐만 아니라 빠른 결과를 보여 주는 것이다.

그러나 이 해석적 방법을 이용하여 그림 4.1(f)와 같이 texture 포함한 삼각망의 홀로그램을 효율적으로 구현하기는 매우 어렵다. 그 이유는 앞서 3.1장에서 설명한 바와 같아 식 (2.9)을 합성곱을 이용하여 계산할 경우 (α'_m, β'_n) 에 대해서 $(2M+1)(2N+1)$ 번 반복 연산을 하여야 하기 때문에 연산 시간이 급증하기 때문이다. 따라서 해석적 방법을 이용한 텍스처를 포함한 삼각망의 구현은 매우 어려운 문제로 남아 있었다.

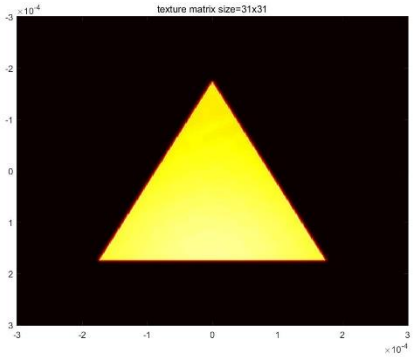
그림 4.2은 새롭게 제안된 준해석적 방법을 이용하여 기존에 해석적 방법을 구현할 수 없었던 표면 질감을 갖는 단일 삼각망을 효율적으로 나타낼 수 있음을 보여준다. 이를 통해 준해석적 방법을 이용한 다양한 형태의 다각형 면(polygonal facet)에 텍스쳐를 부여한 홀로그램이 구현 가능하다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 단일 삼각망의 matrix size을 401 × 401로 고정하고, 준해석적 방법을 이용하여 texture pattern을 표현하는 matrix의 크기만을 바꾸어 가면서 홀로그래피를 구현한 시뮬레이션 결과도 비교해 볼 수 있다.



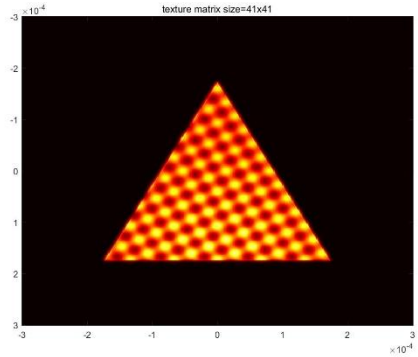
(a) 11×11



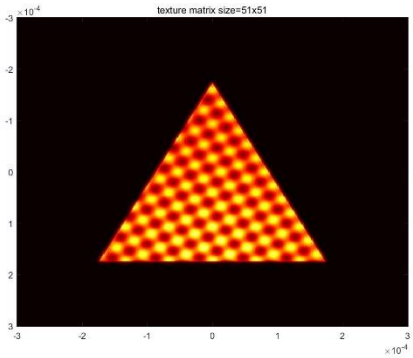
(b) 21×21



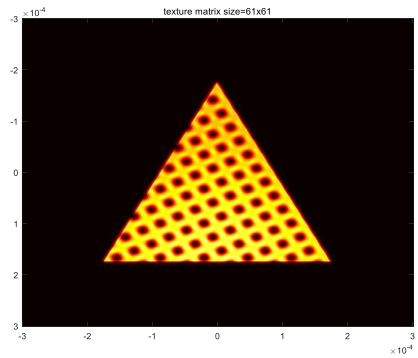
(c) 31×31



(d) 41×41

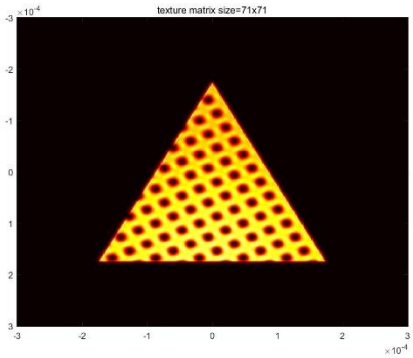


(e) 51×51

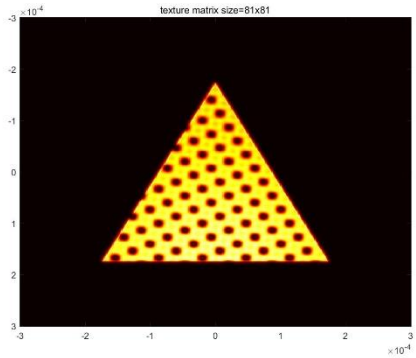


(f) 61×61

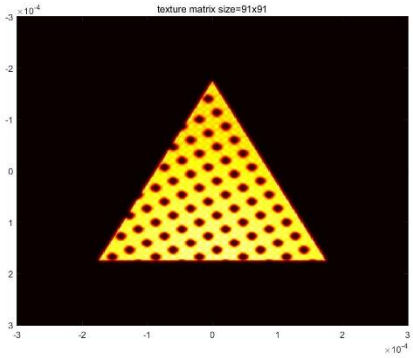
`



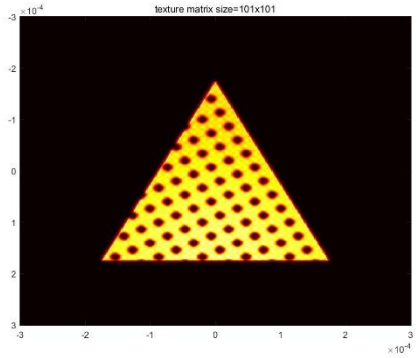
(g) 71×71



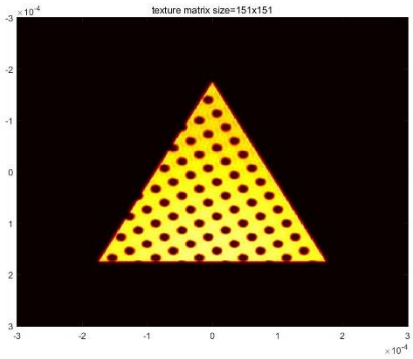
(h) 81×81



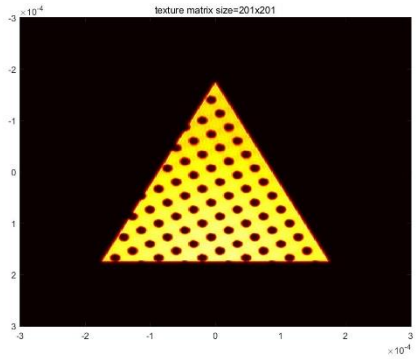
(i) 91×91



(j) 101×101



(k) 151×151

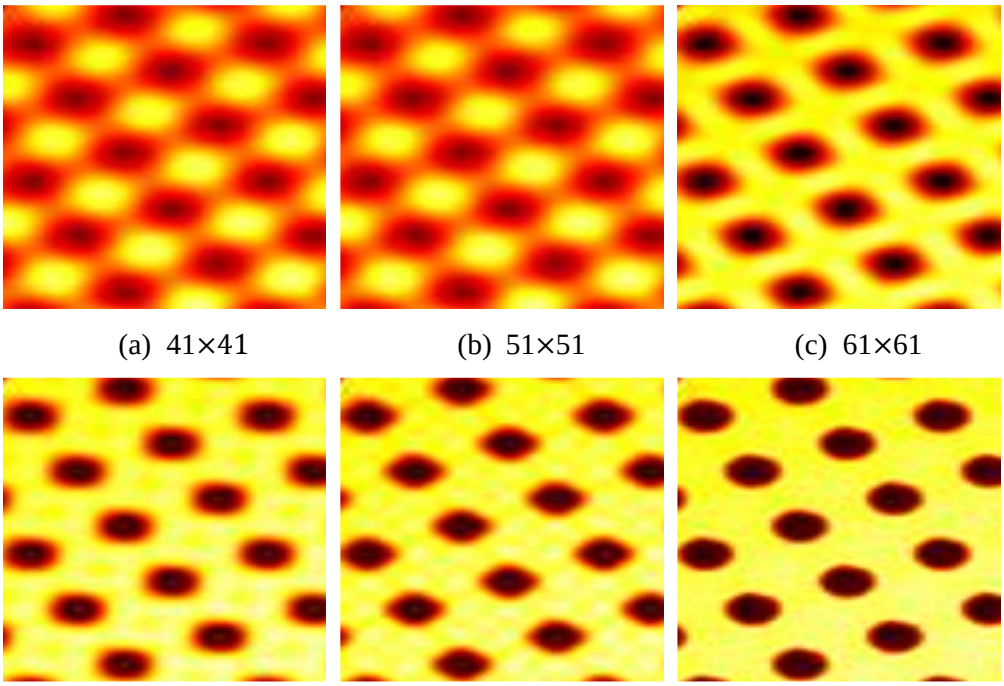


(l) 201×201

그림 4.2. 고정된 삼각망에 다양한 해상도의 텍스처 적용

그림 4.2는 삼각형의 윤곽의 resolution을 결정하는 단일 삼각망의 matrix의 크기는 401×401으로 고정하고, 원형 구멍(hole)의 표면 질감의 resolution을 나타내는 texture pattern의 matrix size를 조절한 시뮬레이션 결과이다. 그림 4.2에서 texture pattern의 matrix size는 (a) 11×11, (b) 21×21, (c) 31×31, (d) 41×41, (e) 51×51, (f) 61×61, (g) 71×71, (h) 81×81, (i) 91×91, (j) 101×101, (k) 151×151, (l) 201×201 이고, 이때 연산 시간은 0.5301, 0.6515, 0.8012, 1.0467, 1.3088, 1.6131, 1.9491, 2.3703, 2.9139, 3.3726, 6.6763, 10.5499초로 texture의 resolution을 증가시킴에 따라 증가한 것을 확인 할 수 있다. 그러나 삼각형의outline의 resolution을 조절하는 삼각형의 matrix의 크기는 401 × 401로 일정하게 고정되어 단일 삼각망의 외부 윤곽선에 해당하는 outline의 resolution은 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉 texture matrix size 변화에 따른 연산 시간과 texture 해상도의 변화와는 별개로 삼각형 외부 outline의 해상도는 그대로 유지 된다.

수치 해석적 방법과 다르게 기존의 해석적 방법으로는 표면 질감을 입힐 수 있는 효율적 알고리즘이 없다는 단점을 극복한 것을 확인할 수 있다. 또한 수치 해석적 방법에서는 outline과 texture의 resolution이 비례하는데 비해서 새롭게 제안된 방법은 삼각형의 outline과 texture pattern의 resolution을 별개로 분리한다. 즉, 홀로그램 구현에 있어서 degree of freedom을 증가 시켰다. 기존의 numerical method의 경우 texture pattern과 outline of triangular mesh가 동일한 matrix size여야 하기 때문에 두개의 resolution이 상호 의존적이나 새롭게 제안된 알고리즘의 두개의 resolution이 서로 독립적이다. 이 의미를 조금 더 살펴보면 그림 4.3과 같다.



(a) 41×41 (b) 51×51 (c) 61×61

(d) 81×81 (e) 101×101 (f) 201×201

그림 4.3 다양한 해상도의 texture pattern의 확대도

그림 4.3은 texture pattern의 matrix size을 (a) 41×41, (b) 51×51 (c) 61×61, (d) 81×81, (e) 101×101, (f) 201×201로 증가 시킴에 따라서 나타나는 texture pattern을 확대한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이texture pattern의 matrix size가 증가함에 따라서 resolution만이 독립적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

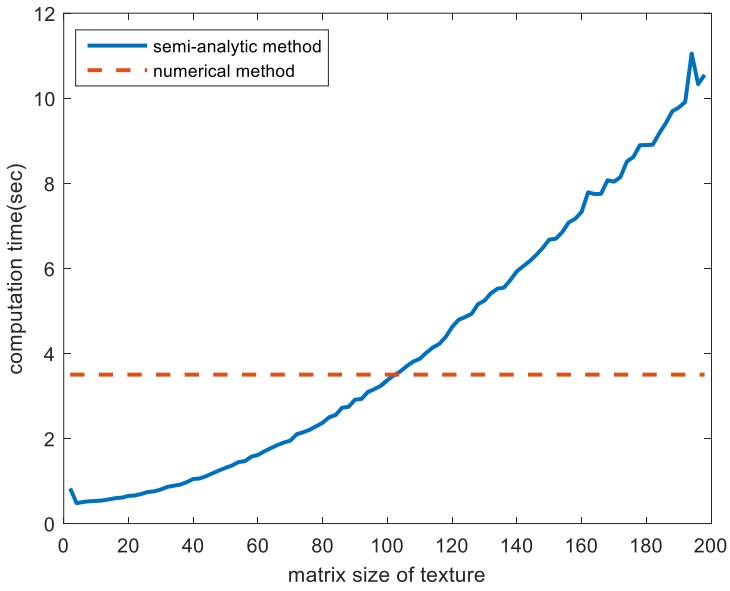


그림 4.4. 준해석적 방법과 수치해석적 방법의 연산 시간 비교

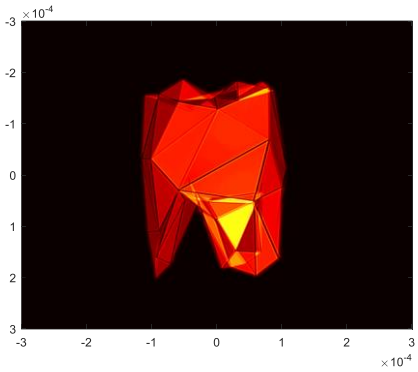
기존의 수치 해석적 방법을 이용하면 텍스처가 없는 $A_{G,k}$ 이나 텍스처가 있는 $\bar{A}_{G,k}$ 을 계산하는데 걸리는 시간은 평균적으로 3.501초 동일한 시간이 소비된다. 이는 texture 유무에 상관 없이 동일한 크기의 matrix에 대해서 동일한 연산하기 때문이다. $I_{L\to G}$ 과정 역시 texture 유무에 관계없이 동일한 시간이 소모된다. 또한 texture의 matrix 크기만을 독립적으로 바꾸지 못하기 때문에 texture의 matrix에 독립적인 연산 시간을 갖는다. 이와 반대로 준해석적 방법은 국소 좌표계에 전역좌표계로 ASCGH를 resampling 하는 연산 양을 줄일 수 있었기 때문에 texture pattern의 matrix size을 줄이면 수치해석적 방법보다 더 빠른 결과를 얻을 수 있다. 그림 4.2(h)의 texture pattern의 matrix size가 81×81인 경우를 보면 연산 시간은 2.3703초로 수치 해석적 결과보다 빠른 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 물론 이때 texture pattern의

해상도는 수치 해석적 방법보다 조금 낮지만 육안으로 확인하기에 큰 차이는 없다. texture pattern의 matrix size가 401×401인 경우의 연산 시간은 13.84초로 3.95배 느리지만 기존의 해석적 방법에서는 효율적으로 계산할 수 있는 방법이 없었다는 것을 고려하면 매우 의미 있는 결과이다.

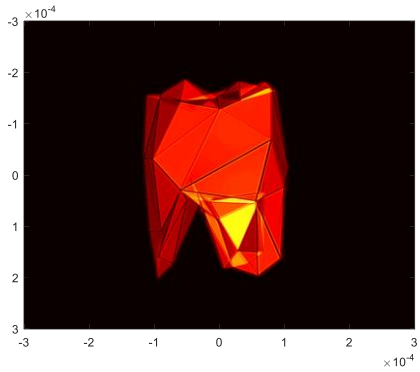
4.2. 치아 형태에 대한 시뮬레이션

간단한 도형이 아닌 104개의 삼각망으로 구성된 복잡한 삼차원 치아 형태에 제안된 알고리즘을 적용해보았다. 그림 4.5은 삼각망의 matrix의 크기는 401×401로 고정하고, texture pattern의 matrix 크기를 (a) 1×1, (b) 21×21, (c) 41×41, (d) 71×71, (e) 101×101, (f) 201×201로 변경한 시뮬레이션 결과이다. texture pattern의 matrix 크기가 상대적으로 작은 (a), (b), (c), (d)의 시뮬레이션 결과에서는 texture을 분명하게 구분하게 어렵지만 의 pattern의 matrix 크기가 (e), (f) 와 같이 점점 증가함에 따라서 texture pattern의 해상도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이 때 중요한 점은 그림 4.5의 (a), (b), (c), (d), (e) 모두에서 치아의 외형을 결정하는 삼각망의 matrix의 크기가 401×401로 고정되어 있기 때문에 외부 윤곽선은 동일한 해상도를 갖는다는 것이다.

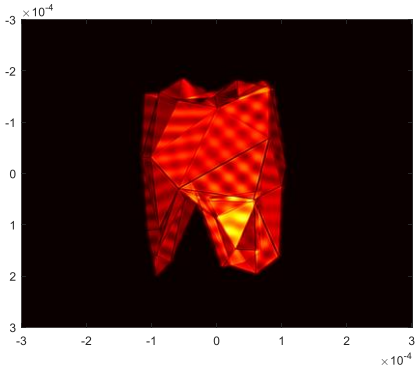
`



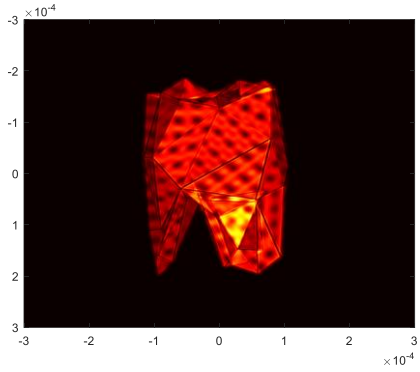
(a) 1×1



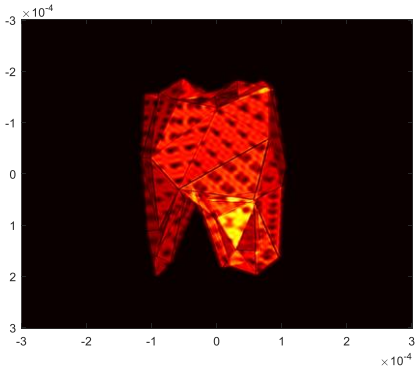
(b) 21×21



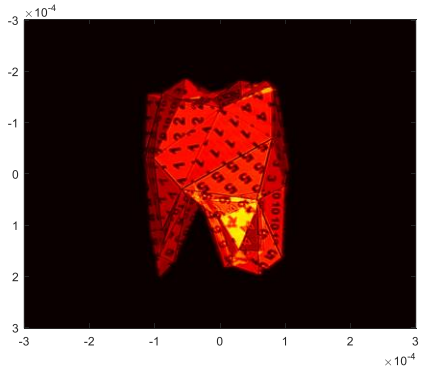
(c) 41×41



(d) 71×71



(e) 101×101



(f) 201×201

그림 4.5 삼차원 치아 모형에 준해석적 방법의 적용

제 5 장 결론

홀로그램에 대한 연구는 *Dennnis Gabor*가 홀로그래피의 기본 원리를 제안한 이래 꾸준히 발전되고 있다. 특히 computer-generated holograms의 발전과 하드웨어 및 관련 알고리즘의 꾸준한 발전에 따라서 실시간 홀로그래피의 가능성이 증가하고 있는 시점이다. 정확한 실시간 대면적 홀로그래피의 구현에 대한 기대가 높아짐에 따라서 의학 및 치의학분야를 포함한 다양한 전문 분야에 이용될 수 있는 가능성도 높아지고 있다.

가장 정확한 홀로그램을 구현할 수 있는 해석적 방법의 발전이 특히 기대되고 있다. 하지만 해석적 방법의 실용화를 위해서는 아직 풀어야 할 다양한 문제가 있다. 표면 질감을 입히는 효과적인 알고리즘의 부재로 표면 질감에 관련된 기술에 분명한 한계가 있다는 것이 이런 주요한 문제점 중 하나이다. 본 논문에서는 이를 해결하고자 준해석적 방법을 제안 하였다.

새롭게 제안된 알고리즘에서는 먼저 새로운 approximate function 제안하고, 이를 기존의 analytic equation에 적용하여, 수식의 형태를 바꾸어 주었다. 변경된 수식의 가장 큰 특징은 semi-analytic 하다는 것으로 전체 연산 과정이 해석적 계산 과정과 bilinear interpolation을 이용한 수치 해석적 과정, 그리고 이들의 합성 곱하는 과정으로 나누어진다.

새롭게 제안된 준해석적 방법을 이용하면 기존의 해석적 방법에서는 구현하기 어려운 표면 질감을 삼차원 구조에 효과적으로 적용하는 것이 가능하다. 이 방법의 가장 큰 장점은 개별 삼각망에서 외부 윤곽선의 해상도과 texture의 해상도를 독립적으로 구현 가능하다는 것이다. 따라서 이를 이용하면 연산 가능 자원(resource)의 한계 범위에서 외부 윤곽선의

해상도의 변화없이 표면 질감의 해상도와 연산 시간을 트레이드오프(trade-off)할 수 있다.

본 논문에서 제안한 준해석 방법은 삼각망을 포함한 다양한 다각망의 해석적 방법에 응용할 수 있기 때문에 해석적 방법의 실용화에 크게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Gabor, Dennis. "Holography, 1948-1971." Proceedings of the IEEE 60.6 (1972): 655-668.
2. Tricoles, G. "Computer generated holograms: an historical review." Applied Optics 26.20 (1987): 4351-4360.
3. Marquet, Pierre, et al. "Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy." Optics letters 30.5 (2005): 468-470.
4. Bruckheimer, Elchanan, and Cannel Rotschild. "Holography for imaging in structural heart disease." EuroIntervention: journal of EuroPCR in collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology 12 (2016): X81-X84.
5. Hackett, Matthew. Medical holography for basic anatomy training. ARMY RESEARCH LAB ORLANDO FL, 2013.
6. Frey, Susanne. Three-dimensional facial measurement by portrait holography and texture based focus detection. Diss. University of Düsseldorf, Germany, 2005.
7. M. Janda, I. Hanák, and L. Onural, “Hologram synthesis for photorealistic reconstruction,” J. Opt. Soc. Am. A 25, 3083-3096 (2008).
8. T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, “Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography,” Opt. Express 13, 1923-1932 (2005).
9. K. Matsushima, “Wave-field rendering in computational holography,” 9th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, 846-851 (2010).
10. K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Arima, H. Nishi, H. Yamashita, Y. Yoshizaki, and K. Ogawa, “Computer holography: 3D digital art based on high-definition CGH,” 9th International Symposium on Display Holography (ISDH2012), 012053 (2013).
11. 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, 1567-.1574 (2008)
12. H. Nishi, K. Matsushima, and S. Nakahara, “Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms,” Appl. Opt. 50, H245-H252 (2011).
13. Y.-Z. Liu, J.-W. Dong, Y.-Y Pu, B.-C. Chen, H.-X. He, and H.-Z. Wang, “High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes,” Opt. Express 18, 3345-3351 (2010).
14. Lee, Wooyoung, et al. "Semi-analytic texturing algorithm for polygon

computer-generated holograms." Optics express 22.25 (2014): 31180-31191.

15. J. Cho, J. Hahn, and H. Kim, “Fast reconfiguration algorithm of computer generated holograms for adaptive view direction change in holographic three-dimensional display,” Opt. Express 20, 28282-28291 (2012).
16. H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, “Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography,” Appl. Opt. 47, D117-D127 (2008).
17. 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, 1567-1574 (2008).
18. Lee, Wooyoung, et al. "Semi-analytic texturing algorithm for polygon computer-generated holograms." Optics express 22.25 (2014): 31180-31191.

Abstract

Semi-analytic texturing algorithm of computer-generated hologram for reconstructing texture of tooth in three dimensions

Wooyoung Lee

School of Dentistry

Seoul National University

In this paper, we propose a semi-analytic texturing algorithm as an alternative method to implement texture that could not be efficiently reconstructed in conventional analytic computer generated hologram algorithm.

We proposed novel approximate function and apply this equation to conventional analytic equation. The whole computation process is divided into the analytic calculation process and the numerical bilinear interpolation process. Therefore, the main characteristic of the modified formulas is that they are semi-analytic.

The size of the matrix of the triangular spectrum and the texture spectrum can be changed independently using this method. Unlike conventional analytic holograms, the size of the matrix of the texture spectrum can be a free parameter. As a result,

`

we can get an additional degree of freedom in computation process. In other words, we can adjust the resolution of the texture spectrum without limiting the resolution of the outline.

By using the proposed method, arbitrary texture is applied to the surface of the triangular mesh in the three-dimensional tooth structure. This result show that semi-analytic method has a great potential for medical and dental imaging area. We expect that this method can contribute for further improvement in analytic computer generated hologram area and digital dentistry area.

Keywords : Digital holography, Holographic display, Digital dentistry

Student Number : 2014-23059

`