

논문 2014-51-6-23

초음파를 이용한 실측 두께 측정과 재질 렌더링

(A Novel Method for Material Rendering and Real Measurement of Thickness Using Ultrasound)

최 태 영*, 진 성 아**

(Taeyoung Choi and Seongah Chin[Ⓢ])

요 약

본 논문에서는 초음파를 이용하여 재질의 두께를 실측하고 렌더링하는 방법을 제안한다. 두께는 광학특성과 함께 반사율과 투과율을 결정하는데 중요한 요소로서 물체를 더욱 사실적으로 표현하는데 영향을 준다. 지금까지의 연구는 두께를 추정하여 렌더링에 사용해왔다. 제안된 방법은 육안으로 두께를 측정할 수 없는 물체의 두께를 초음파를 이용하여 측정하여 렌더링하는 처음 시도된 방법이다. 이를 위해 기준시편의 음속을 측정하고, 같은 성질을 갖는 다른 물체들의 두께를 측정한다. 측정된 물체의 특성들은 최종적으로 렌더링되고, 영상 분석 모델을 통해 결과를 확인하며, 이를 통해 렌더링에서 두께의 중요성을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we present a method for optical parameter-based material rendering with measuring the thickness of a material using ultrasonic waves. Thickness is an important element in determining the reflectance and transmittance of a material along with its optical characteristics and plays a crucial role in more realistic object rendering. In studies conducted thus far, thickness has been measured and used for rendering. The proposed method is a novel method attempted for the first time ever to render a material considering the thickness of a material whose thickness cannot be measured by visual assessment, using ultrasonic waves. It was implemented by measuring the sound velocity of the reference sample and applying the results to the thickness measurement of other objects that have the same characteristics. The characteristics of the objects measured are reflected in the quality of the final rendering, thus verifying the importance of thickness in rendering.

Keywords : 광학 파라미터, 두께측정, 재질 렌더링, 초음파, BSSRDF

* 학생회원, ** 정회원, 성결대학교 멀티미디어공학부
(Dept. of Multimedia Engineering, Sungkyul Univ.)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: solideochin@gmail.com)

※ “이 논문은 한국산업기술평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(디지털콘텐츠 원천기술 CiMR, No.10043453).”

※ 본 논문은 2013년도 UCES2013 Conference 발표 논문의 확장판임을 밝힙니다.

접수일자: 2014년05월09일, 수정일자: 2014년05월26일

수정완료: 2014년05월27일

I. 서 론

실제 세계에 존재하는 물체를 표현하는 것은 3D 그래픽 분야의 주요 쟁점 중 하나이다. 물체는 구성되어있는 물질들의 물리적 특성, 두께와 표면의 거칠기 등에 따라서 각기 다른 시각적 특성을 보인다. 이러한 특성은 물체의 정반사광과 확산광의 형태^[1], 물체의 색상과 반투명함 등이 있다^[2].

BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)는 광원과 관찰자의 위치에 따른 물체 표면의 반사율을 결정한다^[1,3]. BSSRDF (Bidirectional Subsurface Scattering Reflectance Distribution Function)은 표면 하부에서 발생하는 빛의 산란에 의한 반사율을 결정하며, 이 반사율은 재질의 흡수 계수, 산란 계수, 굴절률 등에 따라 결정된다^[2,4].

지금까지 물리기반 광학 파라미터를 측정하여 렌더링에 사용한 연구는 많이 있었다^[5-6]. 그러나 두께를 사용하는 렌더링에서는 두께를 직접 측정하기보다는 추정된 값을 사용한다. 두께를 측정하기 위해서는 마이크로미터 같이 두께를 육안으로 측정하는 장비를 이용한다. 그러나 실제 물체들 중에서는 육안으로 측정 불가능하거나, 여러 개의 물질들이 층을 이루어 구성되는 물체들이 존재한다. 이러한 물체의 두께를 측정하는 방법으로 초음파를 이용한 Pulse-echo Technique를 사용한 두께 측정이 있다. 이는 탐촉자로 발생시킨 초음파 펄스를 물체로 보내고 재질 내 결함, 산란체 혹은 층의 경계에서 반사되어 되돌아오는 에코를 이용한다^[7]. 이 에코들을 이용해 얻을 수 있는 데이터는 재질 혹은 코팅의 두께, 재질 내 초음파의 감쇠계수와 산란체로부터 발생한 후방산란계수 등이 있다^[8].

본 연구에서는 두께를 사용하는 렌더링 모델에 실측으로 얻은 물체의 두께를 측정하여 사용하는 새로운 방법을 제안한다. 또한 광학 파라미터와 두께를 사용하는 물리기반 렌더링 방정식을 이용하여 재질을 렌더링한다. 제안 방법의 타당성을 위해 두께를 사용하지 않는 렌더링 방법과 비교실험 하였다. 비교실험은 시각적 판단을 위한 렌더링 결과와 정량적 분석을 위해 영상 분석 모델인 PSNR과 DRIM을 이용하였다^[9-10].

II. 본 론

1. 렌더링에서의 두께

본 장에서는 물체를 현실세계와 거의 똑같은 수준으로 재현하기 위해 두께가 중요한 요소임을 밝히기 위한 기초연구를 제시한다.

가. Layered BRDF

물체의 밝기는 물체 속으로 들어간 빛이 재질 내부의 산란, 흡수와 다른 물체를 만날 때 반사되어 되돌아

나오는 빛으로 결정된다. Layered Blinn-Phong 등의 Layered BRDF 렌더링 모델에서는 재질의 코팅 층에서 흡수되는 빛을 고려하기 위해 Bouguer Lambert Beer 법칙을 사용하는데 코팅의 두께가 두꺼워질수록 흡수되는 빛이 많아 최종적인 반사율은 낮아진다^[1]. 이렇게 빛이 들어갔다가 되돌아 나오는 양을 결정하기 위해 내부에서 감쇠되는 빛을 계산하는 식 (1), (2)는 다음과 같다.

$$I = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

$$l = d \left(\frac{1}{\cos \theta_i'} + \frac{1}{\cos \theta_r'} \right), \quad (2)$$

여기서 I 는 감쇠된 빛의 세기이고, I_0 는 입사광의 세기, α 는 감쇠 계수, d 는 물체의 두께, θ_i' 과 θ_r' 은 각각 재질 내부로 들어가는 각도와 외부로 나오는 각도이다.

나. 다층 물체의 확산 반사

물체의 특성 중에서 두께 외에도 빛의 각 성분 별 흡수, 산란을 함께 고려한 BSSRDF 렌더링 모델이 있다. 이 중 하나인 multipole 모델은 흡수 계수 σ_a , 감소된 산란 계수 σ'_s 와 함께 두께가 반사율과 투과율을 결정하는 중요 요소 중 하나이다^[4]. 이 모델은 dipole 모델을 다층에 맞도록 수정한 것으로 식 (3)과 (4)는 각각 multipole에서 거리 d 에 따른 반사율 $R(r)$ 과 투과율 $T(r)$ 을 나타낸다.

$$R(r) = \sum_{i=-n}^n \left\{ \frac{\alpha' z_{r,i} (1 + \sigma_{tr} d_{r,i}) e^{-\sigma_a d_{r,i}}}{4\pi d_{r,i}^3} - \frac{\alpha' z_{v,i} (1 + \sigma_{tr} d_{v,i}) e^{-\sigma_a d_{v,i}}}{4\pi d_{v,i}^3} \right\}, \quad (3)$$

$$T(r) = \sum_{i=-n}^n \left\{ \frac{\alpha' (d - z_{r,i}) (1 + \sigma_{tr} d_{r,i}) e^{-\sigma_a d_{r,i}}}{4\pi d_{r,i}^3} - \frac{\alpha' (d - z_{v,i}) (1 + \sigma_{tr} d_{v,i}) e^{-\sigma_a d_{v,i}}}{4\pi d_{v,i}^3} \right\} \quad (4)$$

여기서 $\alpha' = \sigma'_s / \sigma'_t$, $\sigma'_t = \sigma'_s + \sigma_a$, $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a + \sigma'_t}$ 이고, $z_{r,i} = 2i(d + 2Z_b) + 1/\sigma'_t$, $z_{v,i} = 2i(d + 2Z_b) - 1/\sigma'_t - 2Z_b$ 은 각각의 dipole 과

빛이 들어가는 지점과의 거리를 의미한다. $d_{r,i}$ 와 $d_{v,i}$ 는 빛이 나오는 거리를 의미하며, 거리 r 을 통해 구할 수 있다. $Z_b = 2(1 + F_{dr}) / (3\sigma'_t(1 - F_{dr}))$ 이고, F_{dr} 은 프레넬 확산 반사율이다.

multipole 모델에서 두께의 영향을 알아보기 위해 광학 파라미터인 $\sigma'_s = 48$, $\sigma_a = 2.1$, $g = 0$, $\eta = 1.4$ 로 고정하고, 두께를 0에서 0.3까지 증가시키면서 총 반사율(blue line)과 총 투과율(red line)을 분석하였다. 분석 결과 두께가 증가하면 투과율은 0.4322에서 0.0036으로 수렴하여 크게 감소하였으며, 반사율은 0.3500에서 0.4058로 증가하며 수렴하는 것을 확인하였다.

추가로 감소된 산란계수의 영향을 알아보기 위해 쌍극모델에서 감소된 산란계수를 증가시키며 광원의 입사점과 산란되어 빛이 나오는 지점까지의 거리 r 에 따른 반사율과 투과율을 분석하였다. $\sigma_a = 2.1$, $g = 0$, $\eta = 1.4$, $d = 0.03$ 으로 고정하고, σ'_s 는 48에서 58까지 1씩 증가시켰으며 결과는 그림 1과 같다. 여기서 파란 선은 반사율을 나타내고 빨간 선은 투과율을 나타낸다. 분석결과에 따르면 감소된 산란 계수가 증가함에 따라 반사율은 증가하지만, 투과율은 감소하는 것을 알 수 있다.

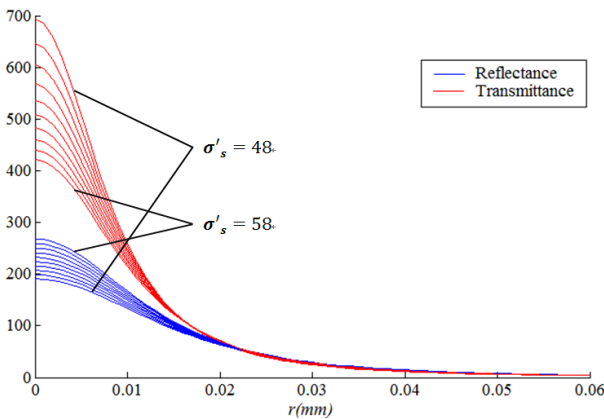


그림 1. 쌍극모델에서 $\sigma_a = 2.1$, $g = 0$, $\eta = 1.4$, $d = 0.03$ 으로 고정하고, σ'_s 를 48에서 58까지 1씩 증가할 때의 반사 분포(blue line)와 투과 분포(red line)

Fig. 1. Distributions of reflectance denoted by a set of blues line and transmittance made by a set of red lines using dipole model with $\sigma_a = 2.1$, $g = 0$, $\eta = 1.4$, $d = 0.03$ and σ'_s ranging 48 to 58.

2. 초음파를 이용한 데이터 획득

일반적으로 초음파를 이용한 측정은 ‘Pulse-echo technique’를 사용한다. 탐촉자를 이용해 재질로 초음파 펄스를 보내면 재질 내 결함, 산란체 혹은 층의 경계에서 반사된 에코가 탐촉자로 되돌아온다. 이 에코들을 이용해서 측정할 수 있는 데이터는 재질 혹은 코팅의 두께, 재질 내에서 초음파 세기의 감쇠와 산란체로부터 발생한 후방산란이 있다^[7].

가. 초음파의 산란 계수

재질로부터 되돌아오는 에코들 중에는 반사면에 의한 에코가 아닌 재질 내부의 산란에 의해 발생한 노이즈도 포함된다. 여기서 산란을 일으키는 주요 요인은 빛의 산란원인과 같은 분자의 영향이 아닌 재질 내부에 존재하는 공기방울 등에 의해 발생하는 반사 형태의 산란이다. 그림 2의 아래 그림은 초음파에서 산란으로 추정하는 산란체의 산란 형태를 보여준다. 이러한 산란은 Backscatter라 불리며 후방산란 계수는 Scattering Cross Section으로 표현한다. 이를 구하는 방법은 측정값을 이용한 것 외에도 재질 내 초음파의 속도, 산란체의 크기, 재질의 밀도와 음향 임피던스, 주파수와 산란체의 크기에 의해 결정되는 Form Factor 등 다양한 변수들에 의해 계산된다^[8].

일반적으로 빛에서 사용되는 산란은 주로 레일리(Rayleigh) 산란과 미(Mie) 산란에 의한 것이다. 레일리 산란은 빛의 파장보다 훨씬 더 작은 분자들과 입자들에 의한 산란이다. 이는 전형적인 공기의 산란으로 하늘이 파란색으로 보이는 원인이다. 미 산란은 입자의 크기가

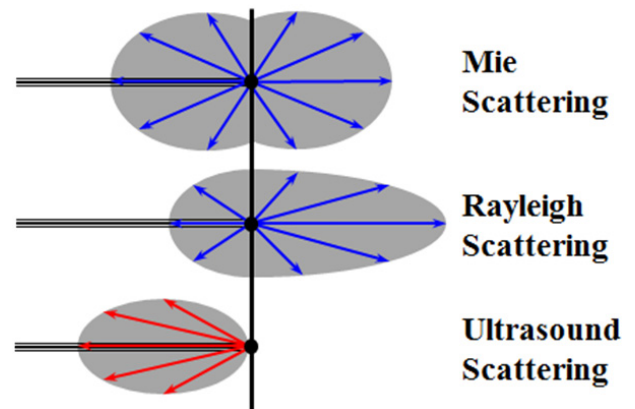


그림 2. 산란의 종류
Fig. 2. The type of scattering.

빛의 파장과 같거나 큰 경우에 발생하며, 대기 중에서 먼지와 같은 미립자나 빗방울에 의한 산란이다. 이들의 산란형태는 그림 2의 위와 중간과 같다.

결론적으로 초음파는 빛과 달리 질량이 없이 에너지만 존재하며, 광학의 흡수 산란과 초음파의 흡수 산란은 측정 데이터를 유도하는 원인이 다르다. 또한 초음파의 산란과 흡수계수는 특정 식으로 결정될 수 있다. 초음파의 주파수가 증가하면 산란과 흡수계수가 커지고, 감소하면, 같이 감소하여 그 관계가 명확하다. 하지만 재질에 입사된 빛은 파장에 따라 일정한 규칙을 보이지 않는다. 하얀 물질은 모든 파장을 고루 흡수하며, 빨간 물질은 빨간색이 강한 파장은 흡수가 적고, 다른 파장에서 흡수가 많이 일어난다. 따라서 초음파의 재질 내 산란 흡수를 사용해 빛의 산란 흡수를 추정하기에는 여러 가지 문제점이 있다.

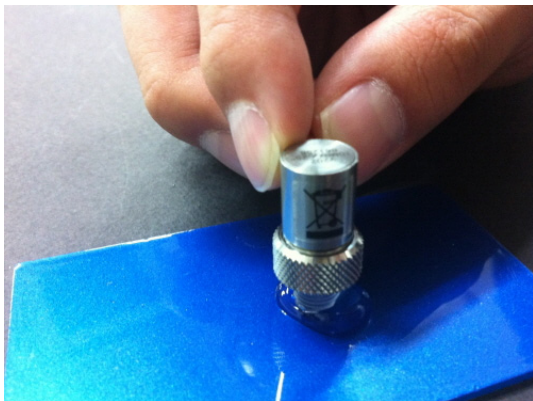


그림 3. 탐촉자를 이용한 재질의 두께 측정
Fig. 3. Thickness measurement using Transducer

나. 초음파 두께 측정

초음파를 이용한 두께 측정은 간단한 방법으로 이루어진다. 그림 3과 같이 검사하고자 하는 재질 내부에 초음파를 송신하고, 결함이나 반사면에서 반사되어 되돌아오는 초음파의 수신시점까지 걸린 시간 t 를 측정하고, 초음파의 진행속도 c 를 식 (5)에 적용하여 거리 S 를 계산한다.

$$S = \frac{ct}{2} \quad (5)$$

여기서 속도와 시간의 곱을 2로 나누어주는 이유는 송신된 신호가 반사면까지 도달하고, 되돌아와 수신되기 때문이다. 또한 반사되지 않고 투과된 신호가 다음

경계에서 또 다른 에코를 발생시킬 수 있는데 이를 이용해 다층 물체에서 각 층의 두께를 측정할 수 있다.

이 방법은 재질의 속도를 알아야 하는데, 이는 두께를 알고 있는 기준 시편을 이용한다. 즉, 식 (5)에 두께와 기준 시편에서 측정된 시간을 대입하면 재질 내 음속을 계산할 수 있다. 이렇게 기준시편의 음속을 알면 같은 종류의 물질로 이루어진 물체에 대해 시각적으로 두께를 측정할 수 없을 때 초음파를 이용하면 물체의 정확한 두께를 측정할 수 있게 된다.

다. 측정된 재질의 파라미터

본 연구에서는 재질의 물리적 특성을 추출하기 위해 자체 제작한 물질을 사용하였다. 이 물질은 아크릴을 기본 베이스로 하고 그 위에 자동차의 코팅과 동일한 코팅을 하여 제작하였다.

시편의 두께를 측정하기 위해 필요한 음속은 기본 아크릴에 대해 앞에서 설명한 방법대로 측정하였으며 이때 탐촉자는 5MHz를 사용하였다. 측정 결과 기본시편의 두께는 1.86(mm)이고, 음속은 2.463.6(m/s) 이었다.

금색 코팅에 대해 측정하였을 때 0(us)에 가까운 부분은 dead zone 때문에 코팅이라 판단되는 에코를 확인할 수 없었다. 그러나 기본시편 위에 코팅되어 있기에 전체 두께와 기본 시편 두께의 차를 코팅의 두께로 판단하였다.

최종적으로 초음파로 측정된 코팅시편의 두께가 정확한지 확인하기 위해 버니어 캘리퍼스와 마이크로미터를 이용하여 시편의 두께를 측정하여 비교하였다. 비교를 위해 두 방법으로 측정된 두께 차이의 분산을 살펴

표 1. 버니어 캘리퍼스, 마이크로미터와 초음파 두께 측정의 비교

Table 1. Comparison of Thickness measured by vernier calipers, micrometer and ultrasound.

Material	Vernier Calipers	Micro meter	Ultra sound	Variance
Gold	2.00	1.97	2.032	0.000641
Blue	2.10	2.115	2.118	0.000062
Red	2.10	2.12	2.106	0.000070
White	1.85	1.81	1.921	0.002107
Navy	2.05	2.06	2.204	0.005950
Dark Red	2.10	2.11	2.143	0.000338
Average	2.0333	2.0308	2.0873	0.001361

표 2. 렌더링 파라미터
Table 2. Rendering Parameter.

Material		σ'_s (mm^{-1})	σ_a (mm^{-1})	η	d
Gold	R	1.793	0.002183	1.7146	2.032
	G	1.919	0.003418		
	B	1.846	0.029375		
Blue	R	1.189	1.189000	1.9432	2.118
	G	1.742	0.090597		
	B	1.865	0.016372		
Red	R	1.668	0.006355	1.7674	2.106
	G	1.124	0.124000		
	B	0.840	0.839700		
White	R	1.940	0.000905	1.4635	1.922
	G	1.951	0.001083		
	B	1.874	0.002038		
Navy	R	0.786	0.293082	2.4504	2.205
	G	0.978	0.566992		
	B	1.437	0.256414		
Dark Red	R	1.604	0.054033	2.0742	2.143
	G	1.191	0.649052		
	B	1.041	0.413705		

보았으며 분산의 평균은 0.047818로 평균 두께 2.0817(mm)에 비해서 상당히 낮은 오차를 보였다. 비교에 대한 자세한 데이터는 표 1과 같다.

표 2는 직접 제작한 10개의 코팅 재질 중 6개에 대한 측정 결과로 두께 d 는 앞의 방법대로 측정하였으며, 감소된 산란 계수 σ'_s , 흡수 계수 σ_a , 그리고 굴절률 η 는 본 연구팀의 광학 특성 추출방법을 통해 획득하였다^[11].

3. 파라미터 검증방법

이 장에서는 위에서 설명한 방법으로 추출한 파라미터를 적용한 렌더링 결과의 합리성과 우수성을 검증하기 위한 방법을 설명한다. 광학 파라미터를 추출하고 이를 이용한 물리기반 렌더링의 최종 목표는 대상으로 한 재질을 3D 그래픽스 기술을 이용해서 극사실적으로 재현하는데 있다.

따라서 결과의 검증을 위해 이전 연구에서 반투명한 물체를 렌더링하기 위해 제안된 렌더링 방정식을 사용하였다. 이 렌더링 방정식은 물체의 색상을 표현하기 위해 광학 파라미터인 흡수 계수, 감소된 산란 계수, 굴절률과 물체의 두께를 포함한다.

다음으로 렌더링 된 결과를 PSNR과 DRIM을 이용해

서 실제 재질을 촬영한 영상과 비교하였다.

가. 검증을 위한 물리기반 렌더링 모델

우리는 반투명한 물체를 렌더링하기 위해 제안된 렌더링 방정식을 사용하였다. 물체의 색상은 빛이 각 파장 별로 물체 고유의 흡수, 산란 계수와 물체의 두께 등에 의해 되돌아 나오는 각 파장의 세기에 의해 결정된다. 감소된 흡수계수 σ'_s , 산란계수 σ_a 는 단위부피당 얼마나 많은 양의 빛이 흡수, 산란되어 감쇠되는지를 결정한다. 물체 속에서 일어나는 빛의 산란의 방향과 세기는 위상함수 g 를 통해 알 수 있다^[12]. 이를 이용해 결정된 투과율 $T(d)$ 와 반사율 $R(d)$ 은 식 (6), (7)과 같다.

$$T(d) = (L - \sigma_a d - \sigma'_s P(g)d)(L - F_{dr,b}), \quad (6)$$

$$R(d) = (1 - F_{dr,t}) \left(\int_0^d (L - 2\sigma_a x) \sigma'_s P(g) dx + F_{dr,b} (L - 2d(\sigma_a - \sigma'_s P(g))) \right) \\ = (1 - F_{dr,t}) (\sigma'_s P(g) \{Ld - \sigma_a d^2\} + F_{dr,b} (L - 2d(\sigma_a - \sigma'_s P(g)))) \quad (7)$$

여기서 L 은 빛의 세기이고, $P(g)$ 는 위상 함수에서 후방에 대해 적분하여 얻은 산란체의 후방 산란율이다. $F_{dr,b}$, $F_{dr,t}$ 는 각각 물체의 위, 아래의 경계에서 반사되는 프레넬 확산 반사율이다.

광원의 위치와 시점에 따른 영향은 정반사광은 Ward's BRDF^[13]를 사용하고, 확산광은 oren-nayar^[1]를 사용하였다.

나. 영상 분석 모델

초음파로 획득한 두께를 적용한 것과 적용하지 않은 렌더링 결과를 비교하기 위해서 대상 재질을 DSLR (Canon EOS 650D) 카메라로 직접 촬영한 영상과 얼마나 유사한지를 비교하였다. 비교 모델은 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ration)과 DRIM(Dynamic Range Independent Metrics)를 이용하였다.

PSNR은 두 개의 영상이 얼마나 유사한지를 평가하는 것으로 결과 값이 30 이상일 때 가시적으로 판단할 수 없으며, 30보다 작을수록 차이를 느낄 수 있다. 식 (8)과 (9)는 PSNR과 이를 계산하기 위한 MSE이다^[9].

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right), \quad (8)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y \frac{(|A_{ij} - B_{ij}|)^2}{xy}, \quad (9)$$

여기서 x, y 는 이미지의 크기이다. i, j 는 각 픽셀의 좌표 값이고, A_{ij}, B_{ij} 는 비교할 이미지의 해당 좌표의 픽셀 값이다.

PSNR 등 현재까지 연구된 이미지 품질 평가방법은 동적 범위 이미지에 대한 영상비교에 부적합하다. 그러나 DRIM은 이러한 이미지에서도 정확하게 평가할 수 있는 평가모델이다. 여기서는 인간 시각 시스템의 모델을 사용한 것이다. 결과는 영상을 비교한 이미지로 밝을수록 차이가 있고, 어두울수록 유사하다^[10].

III. 연구결과 및 토의

1. 실험 환경 및 인터페이스

렌더링 시뮬레이션은 MFC에서 OpenGL API 와 CG shader를 사용하여 구현하였다. 사용된 모델은 “<http://graphics.im.ntu.edu.tw/~robin/courses/cg03/model/>”에서 프리웨어로 제공되는 모델을 사용하였다. 모델은 4,721개의 정점과 9,395개의 트라이앵글로 구성되어 있다.

그림 4는 측정된 물체의 두께 및 광학특성 파라미터를 시뮬레이션하기 위해 자체 제작한 렌더링 시스템의 인터페이스를 보여준다. 시스템은 비교평가를 위해서 9개 셰이더 컴포넌트와 5종의 모델을 제공한다. 또한 다이얼로

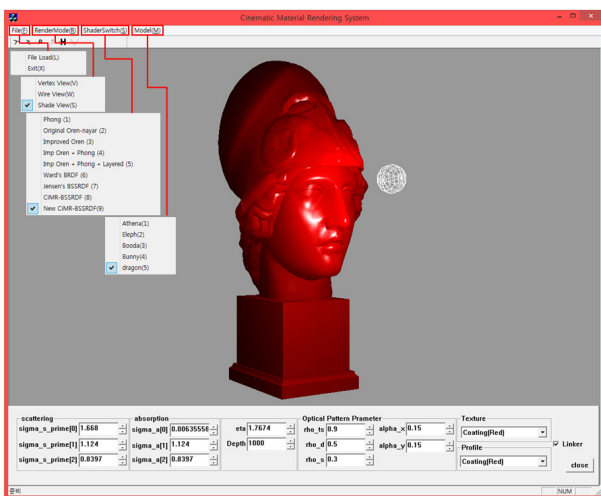


그림 4. 렌더링 시스템 인터페이스
Fig. 4. Rendering system interface.

그를 통해 기본적으로 설정된 파라미터를 수정할 수도 있다.

2. 렌더링 결과비교

렌더링 결과 실험에 사용한 셰이더는 두께 파라미터를 사용하며, 실시간 렌더링이 가능한 Layered Oren-Layar 와 분론 3장의 렌더링 방법 두 가지이다.

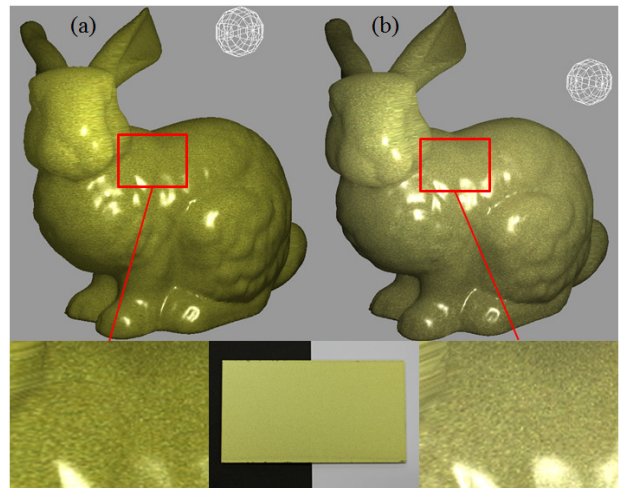


그림 5. 금색 재질 렌더링 결과 (a) : 깊이 무한대, (b) : 초음파로 측정된 깊이를 사용한 결과
Fig. 5. Result of gold material rendering (a): with thickness ∞ , (b): with the ultrasonically measured thickness.

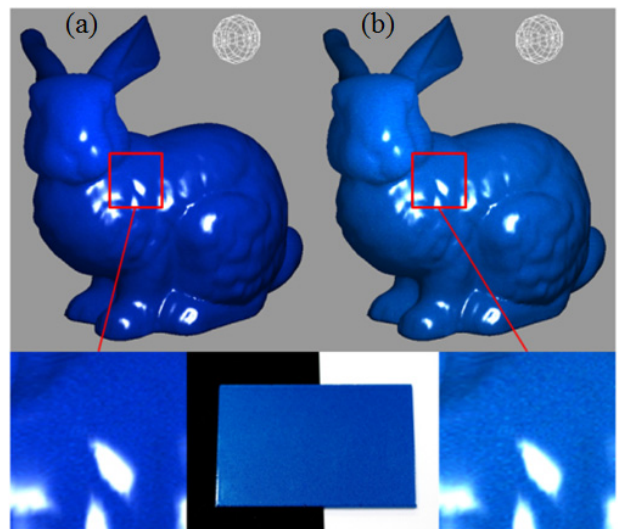


그림 6. 파란 재질 렌더링 결과 (a) : 깊이 무한대, (b) : 초음파로 측정된 깊이를 사용한 결과
Fig. 6. Result of blue material rendering (a): with thickness ∞ , (b): with the ultrasonically measured thickness.

그림 5와 6은 각각 표 2에서 Gold 코팅재질과 Blue 코팅 재질에 대해 두께와 함께 재질의 물리기반 광학특성 렌더링 파라미터를 사용하여 렌더링한 결과이다. 렌더링 모델의 특성상 계수에 따른 반투명한 효과와 함께 물체의 색상을 확인할 수 있다. (a) 는 이 모델에 두께를 무한대로 가정한 결과이고, (b) 는 초음파를 이용해 측정된 두께를 적용한 결과이다.

그림 5와 6의 (a), (b)를 비교하였을 때 공통적인 성질은 두께를 무한대로 한 (a)가 측정된 두께를 사용한 결과 (b)에 비해서 채도가 더욱 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그림 5와 6의 중앙 하단에 위치한 그림 속 물체는 광학 특성과 두께를 이용한 렌더링을 위해 직접 제작한 코팅재질을 보여주고 있다. 이 물체의 색상과 렌더링 된 결과 색상을 비교하였을 때, 깊이를 측정하여 렌더링 한 (b)가 더욱 실제 물체와 더욱 비슷한 결과를 보였다.

3. 영상 분석 모델을 이용한 정량적 비교

앞에서는 측정된 두께를 적용하지 않은 렌더링과 적용한 렌더링 결과를 시각적으로 비교하였다. 이 장에서는

표 3. Gold 코팅재질에 대해서 영상분석모델을 이용한 비교분석 결과

Table 3. Quantitative analysis on a gold coating material.


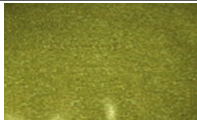
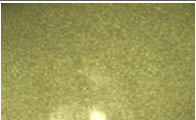
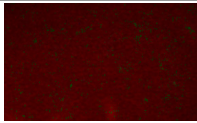
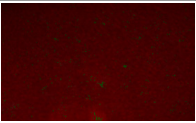

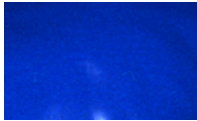
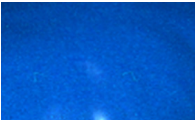
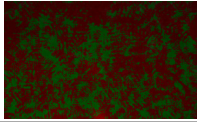
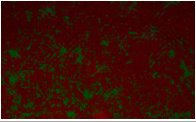
시편 촬영	두께 무한	측정 두께
		
PSNR	15.38	18.87
DRIM		

표 4. Blue 코팅재질에 대해서 영상분석모델을 이용한 비교분석 결과

Table 4. Quantitative analysis on a blue coating material.

시편 촬영	측정 두께 미적용	측정 두께 적용
		
PSNR	22.55	25.37
DRIM		

두 방법에 대한 정량적인 비교를 위해서 본문 3장에서 소개된 영상 분석모델을 이용하였다.

영상 분석 모델인 PSNR과 DRIM은 두 이미지의 유사성을 분석하는 것이다. 따라서 두께의 적용여부에 따른 결과의 비교를 위해서 각각을 대상 시편과의 유사도를 조사하였다. 표 3과 4는 각각 Gold 코팅과 Blue 코팅재질에 대해서 영상분석모델 PSNR과 DRIM로 비교 분석 결과이다.

Gold 코팅재질의 PSNR은 두께를 측정하여 사용하지 않은 결과가 15.38로 측정하여 사용하였을 때인 18.87보다 작았으며, DRIM 결과에서는 두께를 무한으로 했을 때가 지역적으로 더 밝은 픽셀 값을 가졌다. Blue 코팅재질은 PSNR이 각각 22.55와 25.37이고, DRIM에서는 측정 두께를 적용하지 않았을 때 녹색이 더 많이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

따라서 두 재질에 대한 실험 결과 PSNR과 DRIM 두 분석 모델 모두 두께를 측정하여 렌더링한 결과가 상대적으로 좋게 평가되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 실세계에 존재하는 물체를 더욱 사실적으로 표현하기 위해서 초음파를 이용하여 두께를 측정하고 이를 렌더링에 사용한 방법을 제안하였다. 초음파를 이용해 두께를 측정된 물체는 자동차코팅에 사용되는 방법으로 아크릴판에 코팅한 코팅 재질을 사용하였다. 두께의 측정은 Pulse-echo Technique를 사용하여 간단하게 수행되었으며, 코팅되지 않은 아크릴판을 기준시편으로 사용하여 음속을 측정하고, 코팅 재질의 두께를 측정하였다. 최종적으로는 두께와 함께 기존에 연구된 방법으로 추출된 물체의 광학 특성을 이용해 물체를 렌더링 하였으며 결과실험을 통해 두께에 따른 렌더링 결과의 차이를 시각적으로 확인하였다. 또한 영상 분석 모델을 사용하여 정량적으로 분석하였다.

REFERENCES

[1] Y. Gotanda, "Beyond a Simple Physically Based Blinn-Phong Model in Real-Time," *SIGGRAPH 2012 course*, 2012.
 [2] H.W. Jensen, S.R. Marschner, N. Levoy, and P. Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface

Light Transport,” *ACM Transactions on Graphics*, pp. 511-518, 2001.

- [3] A. Ghosh, W. Heidrich, S. Achutha, and M. O’Toole, “A Basis Illumination Approach to BRDF Measurement,” *International Journal of Computer Vision*, Vol. 90, pp. 183-197, 2010.
- [4] C. Donner, and H.W. Jensen, “Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials,” *ACM Transactions on Graphics*, pp. 1032-1039, 2005.
- [5] D.B. Kim, and K.H. Lee, “Computer-aided appearance design based on BRDF measurements,” *Computer-Aided Design*, Vol. 43, No. 9, pp. 1181-1193, 2011.
- [6] G.I. Petrov, A. Doronin, H. T. Whelan, I. Meglinski, and V.V. Yakovlev, “Human Tissue Color as Viewed in High Dynamic Range Optical Spectral Transmission Measurements,” *Biomedical Optics Express*, Vol. 3, No. 9, pp. 2154-2161, 2012.
- [7] D.G. Aggelis, E. Leonidou, and T.E. Matikas, “Subsurface crack determination by one-sided ultrasonic measurements,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 140-146, 2012.
- [8] K.A. Wear, T.A. Stiles et al, “Interlaboratory Comparison of Ultrasonic Backscatter Coefficient Measurements From 2 to 9 MHz,” *J Ultrasound Med*, Vol. 24, pp. 1235-1250, 2005.
- [9] Q. Huynh-Thu, M. Ghanbari, “Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment,” *Electronics Letters*, Vol. 44, No. 13, 2008.
- [10] T.Q. Aydin, R.Mantiuk, K. Myszkowski, and H.P. Seidel, “Dynamic Range Independent Image Quality Assessment,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 3, 2008.
- [11] T. Choi, S. Lee and S. Chin, “A method of combining the spectrophotometer and optical imaging equipment to extract optical parameters for material rendering,” *Journal of Sensors*, review, 2014.
- [12] R.A.J. Groenhuis, H.A. Ferwerda and J.J.T. Bosch, “Scattering and absorption of turbid materials determined from reflection measurements. 1: Theory,” *Applied Optics*, Vol. 22, No. 16, pp. 2456-2462, 1983.
- [13] B. Walter, “Notes on the Ward BRDF,” *Technical Report PCG-05-06 Cornell Program of Computer Graphics*, 2005.

— 저 자 소 개 —



최 태 영 (학생회원)
2009년~현재 성결대학교 멀티미
디어공학부 학사과정
2011년~현재 성결대학교
Xicom Lab 연구원

<주관심분야 : GPU 프로그래밍, 렌더링>



진 성 아 (정회원)-교신저자
1999년 (미) Stevens Institute of
Technology, 전산학 박
사
2000년~2001년 서강대학교
영상대학원 미디어공학과
연구교수

2007년~2008년 (미) Wayne State University방
문연구교수

2001년~현재, 성결대학교 멀티미디어공학부 교
수, Xicom Lab 디렉터

<주관심분야 : 재질렌더링, 시각정보처리, BCI,
얼굴모델링, 가상현실>