

# 광학적 다중 법선 벡터 기반 혼색(暈色)현상 BRDF 압축 기법 (Optical Multi-Normal Vector Based Iridescence BRDF Compression Method)

유 세 운 <sup>†</sup>      이 상 화 <sup>\*\*</sup>      박 종 일 <sup>\*\*\*</sup>  
(Sae-Woon Ryu)    (Sang Hwa Lee)    (Jong-Il Park)

**요 약** 본 논문은 생물체 표면에서 변적이고 다채로운 색깔의 반사특성을 보이는 혼색(暈色)현상의 양방향 반사율 분포 함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)의 압축방법을 제안한다. 그래픽스 기술에서 혼색 현상의 용어를 보통 이리테센스(Iridescence) 또는 구조적 색상(structural colors)라고 부른다. 이러한 현상의 주요한 특징은 시점에 따라 다채로운 색상과 밝기를 갖는 것이다. 이것을 구현하기 위해 기존의 그래픽스 기술들은 BRDF를 이용한 방법을 사용한다. BRDF 방법은 많은 시점의 영상을 직접 활용하여 사실적인 표현이 가능한 장점이 있지만, 데이터양이 커서 연산량이 많은 단점이 있다. 본 논문에서는 혼색(暈色: Iridescence)현상의 BRDF로부터 반사맵을 작성하고, 반사맵을 여러 개의 색상 기반의 동심원으로 반사맵을 표현할 수 있는 방법을 제안한다. 이때 동심원 1개는 1개의 법선벡터에 의한 반사광의 범폭을 의미한다. 본 논문에서는 여러 개의 가상의 광학적 법선벡터를 사용하여 울퉁불퉁한 동심원을 합성한다. 그리고 동심원의 중심을 통과하는 한 선분으로부터 1차원 스펙트럼 정보를 취득한다. 제안하는 방법은 BRDF의 막대한 데이터양을 효과적으로 줄여서 단지 1장의 텍스처를 사용하여 사실적인 밝기 차이와 스펙트럼 표현이 가능한 영상기반 렌더링 기법(IBR: image based rendering)으로 사용할 수 있다.

**키워드** : 혼색(暈色), 구조적 색상, 다중 법선벡터, 반사 모델, 양방향 반사율 분포 함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function), 압축, 영상기반 모델링 및 렌더링(IBM: Image Based Modeling and Rendering)

**Abstract** This paper proposes a biological iridescence BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function) compression and rendering method. In the graphics technology, iridescence sometimes is named structure colors. The main features of these symptoms are shown transform of color and brightness by varying viewpoint. Graphics technology to render this is the BRDF technology. The BRDF methods enable realistic representation of varying view direction, but it requires a lot of computing power because of large data. In this paper, we obtain reflection map from iridescence BRDF, analyze color of reflection map and propose representation method by several colorfully concentric circle. The one concentric circle represents beam width of reflection ray by one normal vector. In this paper, we synthesize rough concentric by using several virtually optical normal vectors. And we obtain spectrum information from concentric circles passing through the center point. The proposed method enables IBR(image based rendering) technique which results is realistic illuminance and spectrum distribution by one texture from reduced BRDF data within spectrum.

· 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(KI002058).

논문접수 : 2009년 8월 31일  
심사완료 : 2010년 3월 11일

<sup>†</sup> 학생회원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부  
ryuseun@mr.hanyang.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 정 회원 : 서울대학교 전기공학부 BK 교수  
lsh@ipl.snu.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수  
jipark@hanyang.ac.kr  
(Corresponding author임)

Copyright©2010 한국정보과학회: 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 시스템 및 이론 제37권 제3호(2010.6)

**Key words** : Iridescence, Structural Colors, Multi-Normal, Reflection Model, BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function), Compression, IBMR(Image Based Modeling and Rendering)

### 1. 서론

최신 컴퓨터 그래픽스 기술의 경향은 실세계 생물체의 모습이나 자연현상을 사실적으로 구현하는 것에 집중되어있다. 본 논문은 생물체 표면에서 번쩍이고 다채로운 색깔의 반사특성을 보이는 혼색(暈色)현상을 주목하고, 혼색현상의 객체를 효과적으로 렌더링하는 방법을 제안한다. 이러한 혼색 현상의 주요한 특징은 시점에 따라 다채로운 색상과 밝기를 갖는 것이다. 그래픽스 기술에서 혼색 현상의 용어를 보통 이리데센스(Iridescence) 또는 구조적 색상(structural colors)라고 부른다. 이리데센스(Iridescence)는 실세계에서 나비의 날개, 딱정벌레의 곤충 표면, 물고기나 파충류의 비늘, 그리고 공작새의 깃털 등에서 흔히 볼 수 있는 현상을 지칭하는 단어이다. 이 현상이 발생하는 객체의 표면을 전자현미경 등을 사용하여 관찰하고 미세 구조물에서 빛의 간섭현상이 어떻게 발생하는지 원인을 분석하는 것을 구조적 색상(structural colors)이라 한다.

시점에 따라 보이는 영상 정보를 그래픽스 기술로 렌더링하기 위해서는 대개 양방향 반사율 분포 함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)를 사용한다. 이것은 모든 방향 시점의 조명에 의한 반사 특성을 함수로 사용하는 방법이다. 이 방법은 모든 방향에 대해 촬영한 영상을 실제로 사용하므로 데이터양이 매우 많은 특징을 갖는다. 하지만 렌더링 수행시에 실제의 다양한 시점에 대한 실제의 영상 정보를 반영할 수 있어서 매우 사실적인 표현이 가능한 장점이 있다.

그래서 본 논문에서 다루는 혼색(暈色)현상을 사실적인 효과를 갖도록 렌더링하기 위해서는 BRDF를 사용하는 것은 필연적이다. 그러나 BRDF를 사용하는 방식이 데이터양과 렌더링 연산량이 매우 크므로 실시간 구현이 어렵다. 본 논문은 혼색 현상 BRDF를 효과적으로 압축하여 데이터양을 줄여서 텍스처매핑 기법으로 사용 가능하고, 고속 연산이 가능한 방법을 제안한다. BRDF 압축의 기본적인 원리는 다음 2단계로 이루어진다. 첫째, BRDF로부터 고정된 시점에 대한 모든 방향의 조명에 대한 반사맵을 촬영하여, 스펙트럼 색상 분포를 갖는 울통불퉁한 동심원 반사맵을 도출한다. 이때 동심원 1개는 1개의 법선벡터에 의한 반사광의 빔폭을 의미한다. 울통불퉁한 동심원은 여러 개의 동심원으로 구성된 형태라 가정할 수 있다. 둘째, 도출된 반사맵을 여러 개의 가상의 광학적 법선벡터를 사용하여 스펙트럼 색상 기

반의 여러 개의 동심원으로 구성한다. 여기서 가상의 광학적 법선벡터는 혼색 현상 객체 표면의 미세한 구조적인 법선벡터와 대응되며, 빛의 간섭현상의 분포 범위를 표현 가능한 요소이다.

그리고 혼색 현상 객체는 각 사물마다 시점이 변화할 때 보이는 스펙트럼 색상이 변화가 서로 다르다. 이를 측정하기위해 동심원의 중심을 통과하는 한 선분으로부터 1차원 스펙트럼 정보를 취득한다. 이것은 외부의 조명이 객체 표면에서 빛의 간섭현상에 따라 변화하는 특성을 갖기 때문에, 백색조명에 의한 측정치를 이용하여 시점의 변화율에 대한 색상 채널의 변화율을 실험적 함수(empirical function)로 작성하여 적용한다.

제안하는 방법을 사용하면 BRDF의 막대한 데이터양을 효과적으로 줄여서 단지 1장의 영상으로 시점의 변화에 따라 사실적인 밝기 차이와 색상 스펙트럼 표현이 가능한 텍스처를 정의할 수 있다. 이것을 영상기반 모델링 및 렌더링 기법(IBMR: image based rendering)에 적용하여 사용할 수 있다. 일반적으로 영상기반 모델링 및 렌더링 기술은 기본적인 기하학 모델과 텍스처 영상을 사용하여 비교적 적은 컴퓨팅 비용으로 고품질의 영상을 생성할 수 있다. 이것은 텍스처의 해상도와 화질이 생성되는 영상의 품질을 결정한다.

본 논문은 혼색 현상의 객체에 대해 BRDF를 측정하고 한 장의 텍스처로 압축하는 방법을 제시하고, 이를 이용한 영상기반 렌더링 결과를 실제 영상과 비교함으로써 효율성을 입증한다.

#### 1.1 관련연구

본 논문의 연구와 관련된 분야는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫째는 컴퓨팅 비용은 높지만 매우 사실적인 렌더링 결과를 도출할 수 있는 방법인 BRDF 렌더링 방법이다. 둘째는 혼색 효과의 객체 표면을 미세하게 관측하여 스펙트럼 색상을 연구하는 구조적 색상(structural colors) 표현 기법이다. 셋째는 저 비용으로 효과적인 렌더링 결과를 도출할 수 있는 영상기반 모델링과 렌더링 기술이다.

• BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function):

이것은 모든 방향의 조명과 시점을 고려하여 관계를 도출하는 것으로서, 근래에는 조명환경과 객체들 간에 재반사되는 정보까지 고려한다[1]. Murat Kurt등의 연구[2]에서는 빛의 입사 반사의 모든 데이터를 처리하려면 막대한 연산량이 필요하므로 특징적인 요소를 분석

하고 최적화시켜서 측정각을 줄임으로써 데이터양을 줄이는 샘플링 방법을 제시하였다. 이를 활용하여 본 논문에서는 광학적 법선벡터를 샘플링하여 3.2.2절에서 적용하였다. Michael H. 등의 연구[3]는 표면에서의 빛의 입사 및 반사는 기울기 정보에 의해 결정되는데, 이러한 성질을 이용하여 객체의 기울기 벡터를 도출하여 모델을 생성하는 방법을 제시하였다. 이를 활용하여 본 논문에서는 BRDF로부터 광학적 법선벡터를 추출하는데 3.2.2절에서 적용하였다. Ewen C.-P. 등의 연구[4]에서는 비선형적인 매질 특성을 근사화시켜 범프매핑과 함께 사용하여 다중 매질특성을 표현하는 기법을 제시하였다. 또한 Jiaping W. 등의 연구[5]에서는 이방질체 매질에 대해서 각각 성질이 다른 BRDF를 혼합하여 다중매질의 표현을 할 수 있다. 본 논문에서 적용하는 혼색 매질 또한 표면에 여러 가지 반사특성을 반영하는 기술이 2.2절에서 적용하였다. Peter V. 등의 연구[6]에서는 옥과 같이 약간의 투명한 광석 같은 매질에서 BRDF를 표현하는 방법을 제시하였다. 또한 Kun Xu 등의 연구[7]와 Mahajan D. 등의 연구[8]에서는 매질에서 빛의 주파수에 따라 반사특성이 다른 것을 표현하는 방법을 연구하였다. Sun B. 등의 연구[9]에서는 시간이 지남에 따라 반사특성이 변화하는 매질에 대한 BRDF 모델을 제시하였다. 대체로 BRDF는 실제로 매질에서 일어나는 현상을 분석하고 관찰하는 파라미터의 수를 늘림으로써 세밀한 표현이 가능하다. 그러나 렌더링에 고려하는 변수가 늘어날수록 컴퓨팅 비용이 증가하는 단점이 있어서 최근에는 매질의 물리 광학적인 현상을 최적화하기 위해 미세한 구조적인 특성을 분석하여 BRDF에 비해 더 간단한 반사모델을 정의하여 사용한다.

• 구조적 색상(Structural Colors):

Vukusic [10]의 '생물체의 광학작용'에 관한 연구에서 나비 날개 표면의 단층면을 전자현미경으로 살펴보면 여러 개의 미세한 레이어로 구성되어 있다. 이러한 다중레이어의 간섭 모델(multilayer interference model)을 이용하여 생물체의 무지개빛깔의 색변화(iridescence) 효과를 구현할 수 있다[11,12]. 미세구조체 렌더링의 효과를 영상기반 모델링 및 렌더링 기법에 손쉽게 사용이 가능하도록 특별한 툴을 이용하여 텍스처 매핑기법으로 시도한 기술이 있다[13]. 구조적 색상을 체계적으로 설명하고 원리를 분석한 연구들도 있다[14,15].

• 영상기반 모델링 및 렌더링:

객체의 기하정보와 영상정보를 사용하여 모델에 텍스처를 매핑하여 렌더링 하는 방식이다. 최근에는 영상을 이용하여 해상도가 향상된 모델을 생성하고 고품질의 텍스처를 매핑하여 복잡한 모델을 렌더링할 수 있는 기법도 연구되고 있다[16]. 초창기 연구는 단순한 기본적

인 모델에 고품질의 텍스처를 매핑하는 방식이었다[17]. 일반적으로 영상기반 모델링 기법은 컴퓨팅 비용이 낮은 장점이 있다. 이러한 특성을 활용하여 본 논문에서는 혼색현상 BRDF를 압축하여 텍스처를 생성한 후 기하 모델에 매핑하여 렌더링이 가능한 방법을 제안한다.

1.2 알고리즘 개요

BRDF는 사실적인 반사효과의 매질특성을 렌더링 할 수 있지만, 데이터의 양이 큰 단점이 있어서 최근에는 데이터를 줄이는 방향으로 연구가 진행중이다. 그중에서 Natalya Tatarchuk 등의 연구[13]에서는 2차원 범프맵(bump map)을 사용하여 모델 표면의 기울기정보를 표현하고, 시점의 변화에 따라 기울기값이 변화하는 1차원 스펙트럼 맵으로부터 색을 선택해서 시점에 따라 여러 가지의 색을 표현한다. 기존의 방법이 균일한 매질특성을 표현하는데 비하여 본 논문에서는 실측 데이터를 기반으로 표면상의 다양한 매질 특성을 사실적으로 표현 가능한 정밀한 렌더링 기법을 제안한다.

본 논문에서는 혼색(暈色) 현상을 대상으로 한 양방향 반사율 분포 함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)의 막대한 데이터를 난반사 성분 색상(diffuse component)과 8개의 다중 법선벡터를 표현하는 4채널의 한 장의 텍스처 맵과 실측 스펙트럼 변화 함수를 9개의 파라미터로 표현하여 데이터를 압축하는 방법을 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 혼색 BRDF의 압축 및 렌더링 알고리즘을 나타낸다. 표 1은 본 논문의 수식 기호의 인자를 설명한다.

제안하는 알고리즘은 크게 3가지 핵심 단계로 구성된다. 첫째는 혼색 객체 영상으로부터 반사 특성이 유사한 영역을 분할하는 것이고, 둘째는 각 분할된 영역에 대하여 실측 스펙트럼 변화 함수를 생성하는 것이고, 셋째는 표면의 광학적인 반사특성을 표현할 수 있는 법선벡터를 추출하는 것이다.

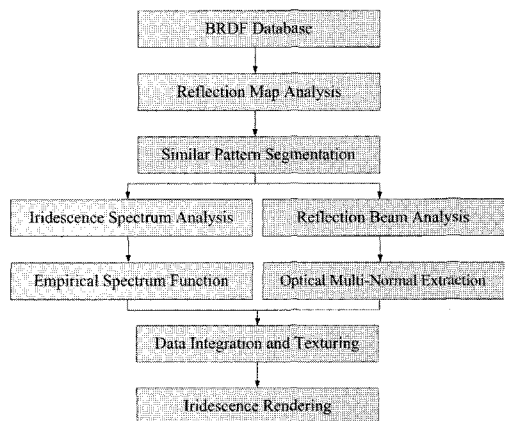


그림 1 혼색 BRDF 압축 및 렌더링 알고리즘

표 1 Index of BRDF Notations

Notation	Index
$k_d$	Diffuse Parameter (0~1)
$k_s$	Diffuse Parameter (0~1)
$i_d$	Diffuse Color
$i_s$	Specular Color
$Rem(\beta, i_s)$	Empirical Spectrum function
$\hat{j}(g)$	Normalized Lighting Direction
$\hat{r}_{vj}$	Normalized Virtual Reflection Vector
$\hat{n}_{vj}$	Normalized Virtual Normal Vector
$\hat{v}$	Normalized viewing direction
$\Omega_+$	Half-angle space over the hemisphere
$a$	Inner angle of normal and view
$\beta$	Inner angle of reflection and view
$\theta$	Latitude angle
$\phi$	Longitude angle

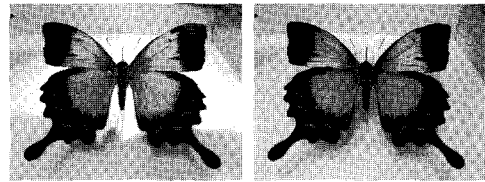
본 논문에서 제안하는 기술을 사용하여 렌더링 할 수 있는 대표적인 예제는 그림 2의 (a)와 같이 실세계에서 나비 표면을 다양한 시점에서 바라볼 때 나타나는 스펙트럼의 변화와 날개 무늬에서 나타나는 반짝이는 효과이다. 이렇게 바라보는 시점 방향에 따라 서로 다른 영상이 보이는 다중 방향성의 성질을 갖게 되는데, 이러한 다중 방향성의 성질은 다르게 표현하면 한 지점에 여러 개의 법선 벡터를 갖는 것과 같다. 그래서 입사되는 광원에 여러 개의 방향으로 반사되어 시점이 변화할 때 다양한 색과 모습으로 보이게 되는 것이다. 이러한 관찰에 기초하여 본 논문에서는 광학적인 다중 법선벡터를 활용하여 혼색현상을 표현하는 방법을 제시한다.

2. 혼색(暈色: Iridescence) 현상 BRDF

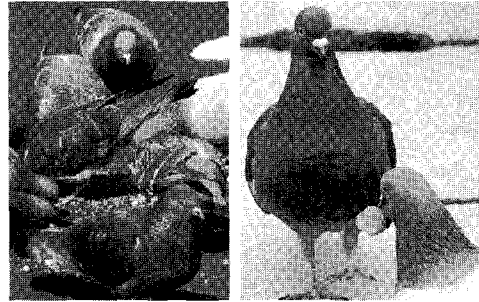
혼색 현상의 용어를 보통 이리데센스(Iridescence) 또는 구조적 색상(structural colors)라고 부른다. 혼색 현상(Iridescence)은 그림 2의 예시와 같이 실세계에서 나비의 날개, 비둘기나 공작새의 깃털, 딱정벌레의 곤충 표면 등에서 흔히 볼 수 있는 현상을 지칭하는 단어이다. 이 효과의 특징은 바라보는 방향에 따라서 표면의 색상과 밝기가 달라진다는 점이다. 그래서 시점의 변화에 따라 반사특성 정보를 효과적으로 반영할 수 있는 양방향 반사율 분포 함수(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)의 방법을 사용하여 분석한다.

2.1 반사특성 측정

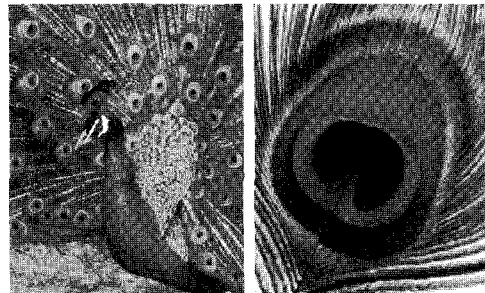
반사특성을 분석하기위해 고정된 한 시점에서 모든 방향의 조명에 의한 반사 영상을 그림 3의 (a)와 같은



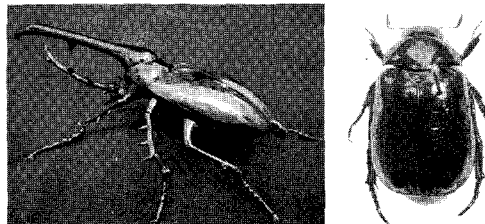
(a) 페리클레스 제비나비 (좌:측면조명, 우:중앙조명)



(b) 비둘기 가슴깃털(시점별 보라색과 청색이 교차함)



(c) 공작새의 깃털(좌:공작새, 우:깃털확대영상)



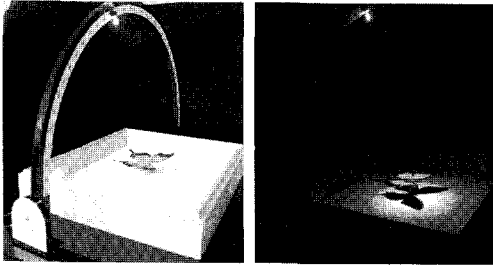
(d) 풍뎅이류 곤충(표면의 기울기 따라 점진적 색변화)

그림 2 혼색(暈色: Iridescence) 현상 사물들

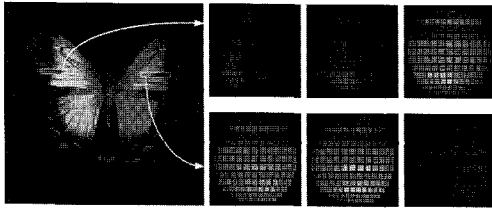
장치를 사용하여 취득한다. 이때 각  $\theta$ 와  $\phi$ 를 일정 간격으로 조명을 움직이면서 영상을 취득한다. 취득된 영상들로부터 각 픽셀의  $\theta$ 와  $\phi$ 위치의 조명에 대한 반사 색상을 도출하여 그림 3의 (b)와 같은 반사맵을 취득할 수 있다. 반각  $h$ 와 법선벡터 $n$ 으로 정의되는 반구상의 공간을 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\Omega_+ = \Omega_+(n) = \{h|n \cdot n > 0\} \tag{1}$$

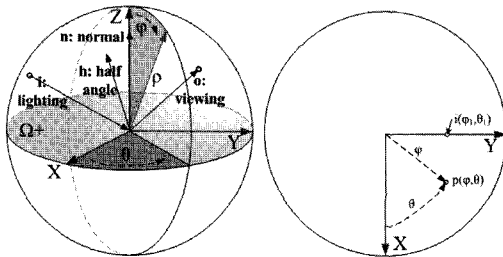
그림 3의 (c)는 반사맵 측정 장치의 3차원 좌표계를 나타낸다. (d)는 x-y평면에 투영되는 좌표계를 나타낸



(a) BRDF 측정 장치(좌:측정장치, 우:외부조명차단)



(b) BRDF 측정 결과(좌:나비표본, 우:픽셀당 반사맵)



(c) BRDF 극 좌표계 (d) 평면 좌표계  
그림 3 BRDF측정 장치 및 반사 영상

다. 식 (2)와 (3)처럼 반사맵으로부터  $\theta$ 와  $\phi$ 를 이용하여 식 (1)과 같은 반구 공간상의 모든 방향의 반사특성을 쉽게 표현 가능하다.

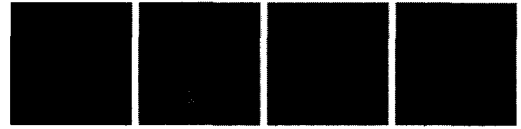
$$(x, y, z) = (\rho \cos \theta \sin \phi, \rho \sin \theta \sin \phi, \rho \cos \phi) \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}, \phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (3)$$

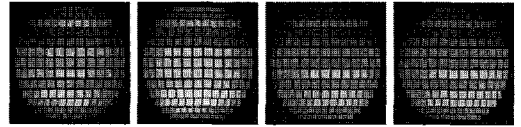
2.2 유사 반사특성 영역별 분할

반사맵으로부터의 색상을 기준으로 서로 다른 반사 특성을 갖는 영역을 분할할 수 있다.

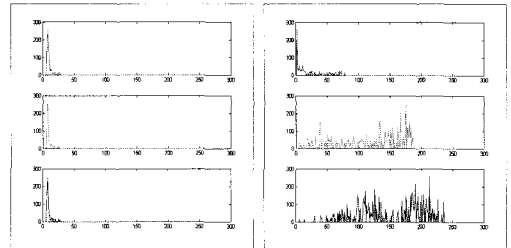
그림 4의 (a)와 (b)는 생물학적 학명이 ‘페리클래스 제비나비’인 표본을 BRDF데이터로 도출한 뒤 반사맵을 추출하여 각각 흰색과 검은색의 스펙트럼과 녹색과 파란색의 스펙트럼으로 구분하였다. 색상을 기준으로 서로 다른 특성을 갖기 때문에 (c)와 (d)와 같이 히스토그램을 비교하여 서로 유사한 스펙트럼 특성을 갖는 영역끼리 같은 매질특성으로 간주하고 서로 다른 매질 영역들을 스펙트럼을 기본으로 구분하는 영상이다. (e)는 실제 나비의 영상이고, (f)는 반사특성이 다른 영역을 서로 분할하여 회색의 레벨차이를 두면서 표현한 영상이다.



(a) 흰색과 검은색의 스펙트럼 분포 영역



(b) 녹색과 파란색의 스펙트럼 분포 영역



(c) (a)패턴의 히스토그램

(d) (b)패턴의 히스토그램



(e) 나비 표본 원본 영상 (f) 유사 반사특성 영역 분할  
그림 4 유사 반사 특성 영역의 구분

이때 혼색 현상 객체의 특성상 그림 4의 (a)와 같이 무채색의 방향성 반사 경향을 나타내는 영역과 (b)와 같이 방향성을 나타내는 스펙트럼 분포도가 다른 영역으로 표현된다. 추출된 스펙트럼의 특성을 정량화하기 위해 색상별로 사인함수를 이용한 방법을 식 (6)을 사용하여 분석할 수 있다.

3. 혼색(暈色: Iridescence) BRDF의 근사화

반사맵의 영상을 3차원 좌표계의 개념으로 표현하면 그림 5와 같이 표현할 수 있다. 혼색 BRDF를 압축하기 위하여 반사맵의 스펙트럼 근사화 및 공식화 방법을 제안한다.

3.1 스펙트럼 근사화 및 공식화

그림 6의 (a)는 x-y평면에 투영되는 반사맵을 나타낸다. 색상을 기준으로 동심원으로 스펙트럼이 표현되고, 중심으로부터 바깥쪽까지 색상을 추출하여 (b)와 같이 세 가지 색상으로 분리하여 표현할 수 있다.

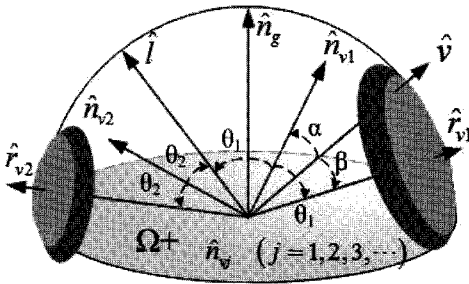
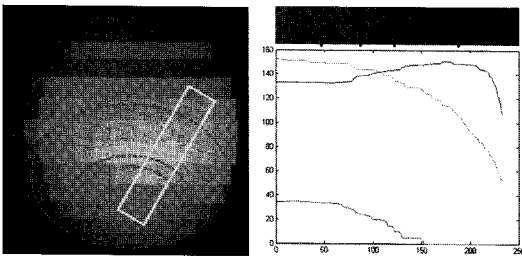


그림 5 혼색 BRDF 반사모델의 3차원 좌표계



(a) 스펙트럼 분포 영상 (b) 실측 스펙트럼 분포  
그림 6 스펙트럼 분석 과정

$$R_{empirical}(\beta, i_s) = i_{s,r} k_r R + i_{s,g} k_g G + i_{s,b} k_b B$$

$$= i_{s,r} k_r \sin(\beta + \gamma_r) + i_{s,g} k_g \sin(\beta + \gamma_g) + i_{s,b} k_b \sin(\beta + \gamma_b) \quad (4)$$

본 논문에서는 실제 측정한 스펙트럼의 분석을 위한 함수를 식 (4)와 같이 제안한다. 각 색상별로 스펙트럼의 경향이 사인(sin)함수의 특성을 갖는 것을 관찰하고 삼각함수의 응답특성을 갖는 합성함수로 공식화 한다. 여기서  $\beta$ 는 동심원의 중심으로부터 바깥쪽까지의 각도를 의미하고, 식 (5)  $i_s$ 는 외부에서 인가되는 조명 색상 또는 전반사 색상(specular component)을 의미한다.

$$i_s = (i_{s,r}, i_{s,g}, i_{s,b}) \quad (0 \leq i_{s,x} \leq 1) \quad (5)$$

실측 스펙트럼 함수로부터 파라미터 계산을 위해 행렬로 표현하면 식 (6)과 같이 표현 가능하다. 이때 외부 조명의 색상을 백색광원으로 사용하여 식 (5)의 값을 (1,1,1)로 정의하고  $h, w, p$  파라미터를 계산할 수 있다.

$$R_{empirical}(\beta, i_s) = \begin{bmatrix} i_{s,r} R_\beta \\ i_{s,g} G_\beta \\ i_{s,b} B_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s,r} h_r \sin(w\beta + \gamma_r) \\ i_{s,g} h_g \sin(w\beta + \gamma_g) \\ i_{s,b} h_b \sin(w\beta + \gamma_b) \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.2 다중 법선 기반 반사모델

#### 3.2.1 광학적 다중 법선 개념

혼색 BRDF로부터 반사맵의 경향을 분석하면 불완전한 동심원의 형태를 관찰 할 수 있다. 이것의 원인은 그림 6과 같이 전자현미경을 사용한 미세 분석을 결과로

알 수 미세한 얇은 평면들이 규칙적으로 평행한 구조가 아니기 때문에 반사되는 빛의 분포도 불규칙한 특성을 보이기 때문이다. 그림 7의 (a)는 나비 표본의 표면 영상이고, (b)와 (c)는 표면의 단면을 확대한 영상으로서 미세한 얇은 층의 구조를 보여준다. 이를 간략화 하면 (d)과 같이 서로 기울기가 다른 평면으로 구성된 구조체로 나타낼 수 있는데, 이것은 매우 작은 구조체이기 때문에 인간의 시각에서는 (e)와 같이 마치 여러 개의 법선을 갖고 있는 평면으로 표현할 수 있다.

그림 7의 다중 법선의 개념을 식 (4)와 (6)의 스펙트럼 함수와 연계하면 최종적으로 혼색 BRDF를 하나의 텍스처로 표현 가능한 식 (7)로 정의할 수 있다. 그리고 한 비트당 8가지 종류를 표현할 수 있으므로  $j$ 는 1부터 8까지의 범위를 갖는다.

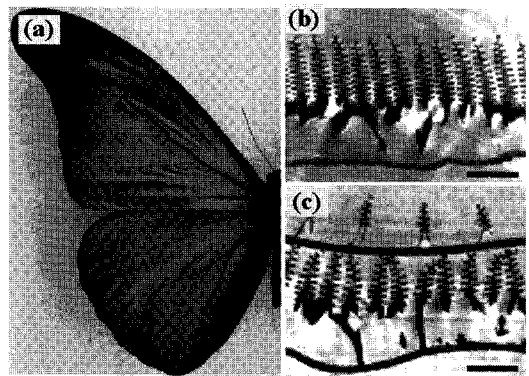
$$C = \int_{\Omega^+} \{ k_d (\hat{l}^{(s)} \cdot \hat{n}_{vj}) i_d + k_s R_{empirical}(\beta, i_s) (\hat{r}_{vj} \cdot \hat{v})^n \} d\hat{l} \quad (7)$$

$$(1 \leq j \leq 8) \quad (0 \leq \beta \leq \theta)$$

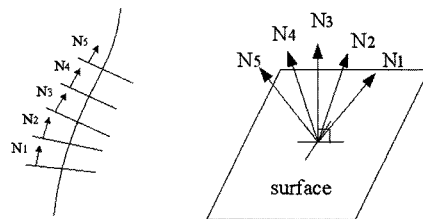
이때,  $\hat{r}_{vj}$ 는 반사벡터로서 식 (9)와 같다.

$$\hat{r}_{vj} = 2(\hat{l} \cdot \hat{n}_{vj})\hat{n}_{vj} - \hat{l} \quad (8)$$

그리고 한 채널의 비트수는 8개이고, 한 비트당 한 가지 방향의 법선벡터의 유무를 표현할 수 있다. 그래서 텍스처맵 알파채널을 사용하면 1채널당 총 8가지의 법선벡터의 유 무를 표현할 수 있다.



(a) 나비표본 (b), (c) 표면의 전자현미경 실측사진



(d) 다중 레이어구조 (e) 다중 법선벡터 구조

그림 7 다중 법선 기반 구조 해석

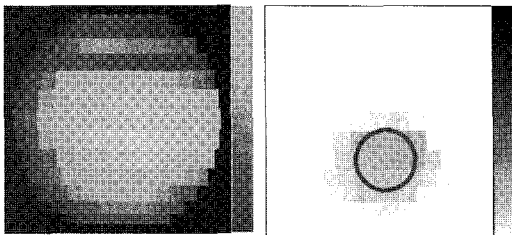
3.2.2 광학적 다중 법선 반사 패턴 분석

극좌표 계에서 식 (1)과 (2)의 과정을 이용하여 2차원 영상으로부터 3차원 방향 정보를  $\theta$ 와  $\phi$  파라미터로 도출하여 광학적 다중 법선을 추출한다. 그림 8은 그림 4의 (b) 반사 특성을 갖는 영역들에서 스펙트럼 성분에 대응하는 상관관계를 분석하여 반사패턴을 분석한다. 그림 8의 (a)의 반사맵에 스펙트럼을 대응하면 반사빔폭 영상을 도출할 수 있는데, 색상이 어두울수록 빔의 중심에 가까운 것을 표현하고 있다.

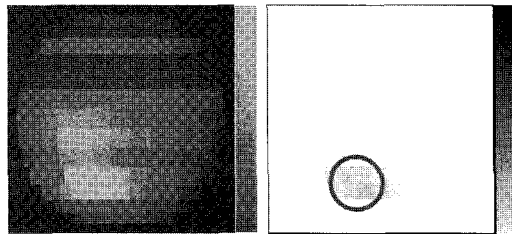
여기서 빔폭의 중심이 반사광선의 중심축에 해당한다. 여기에서 중심축을 찾아내어 법선벡터를 추출할 수 있다. 스펙트럼의 분포를 이용해서 반사광선의 축과 카메라 방향벡터 사이에 법선벡터가 존재한다.

반사맵의 스펙트럼 영상으로부터 도출되는 반사광선의 중심축을 이용하여 객체 표면의 법선 정보와 빔의 폭을 도출한다. 이 방법을 사용하면 혼색현상 객체 표면의 정교한 기울기 정보와 매질특성을 추출할 수 있다.

본 논문에서는 많은 정보의 데이터를 한 장의 텍스처로 압축하는 방법을 필요로 하기 때문에 객체 표면의 법선벡터를 근사화시켜 유사한 방향들을 같은 법선벡터로 근사화하여 알파채널에 기록한다. 한 채널당 8가지 방향을 기록할 수 있다.



(a) 반사맵, 스펙트럼, 반사빔폭, 빔세기



(b) 반사맵, 스펙트럼, 반사빔폭, 빔세기

그림 8 광학적 다중 법선 반사 패턴 분석

그림 8은 광학적 다중 법선 반사패턴을 도출할 때 빔의 중심을 계산하는 장면을 나타낸다. 반사맵으로부터 스펙트럼의 분포를 고려하여 빔의 중심을 추출한 것이다. 빔의 방향은 미세하게 차이가 있지만 Murat Kurt 등의 연구[2]를 참고하여 전체 화질의 큰 저하 없이 샘플링 하여 사용한다.

플링 하여 사용한다.

최근의 그래픽 기술에서는 다중 텍스처를 사용하여 보다 많은 채널 정보를 사용할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방법을 다중 텍스처링 기법을 사용하여 보다 많은 채널에서 다양한 법선벡터를 기록하면 보다 정밀한 기하학적 표현이 가능하다. 그림에도 불구하고 제안하는 혼색 현상 BRDF 압축 영상 데이터는 시점방향에 따른 실측에 의한 스펙트럼의 경향의 변화를 정밀하게 표현이 가능하다.

그림 9는 GPU 파이프라인을 새롭게 설계하여 8개의 광학적 법선벡터를 텍스처의 알파채널(A)에 저장하고 객체 색상(R,G,B) 혼합하여 텍스처를 생성하고, GPU에서 다시 디코딩하여 렌더링하는 과정을 나타낸다.

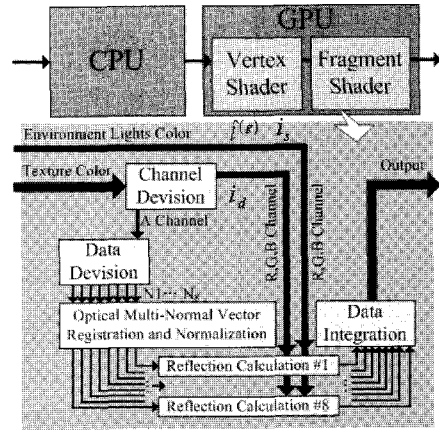


그림 9 GPU를 이용한 광학 법선 텍스처 렌더링 파이프라인

4. 실험 결과

본 논문에서 실험에 사용한 나비 표본의 학명은 페리클레스 제비나비(papilio pericles)이다. 이것은 조명의 위치가 변화하거나 사용자 시점이 이동할 경우에 표면에 보이는 색상이 녹색에서 파란색으로 변화하는 영역과 검은색에서 흰색으로 변화하는 영역들로 구성된 혼색 현상을 갖는 생물체이다.

이 생물체 표본에 대하여  $\theta$ 각에 대하여 13간격을  $\phi$ 각에 대하여 13간격의 조명을 이동하면서 총 169컷의 2592\*1944(5백만)해상도 영상을 촬영하였다. 이 영상들을 이용하여 다시 반사특성 맵을 생성하고 제안하는 반사맵의 스펙트럼 근사화와 방향표현방법을 사용하여 1장의 5백만화소 4채널 텍스처 영상으로 렌더링을 수행하였다.

표 2는 제안하는 방법을 사용하여 데이터량의 감축한 비율을 나타낸다. 제안하는 방법은 대략 126배의 압축 효과를 보여주었으며 무엇보다도 데이터 처리량이 적어

표 2 데이터량 감축 비율

항목	결과값
해상도	2592*1944 (500만화소)
영상의 수	169컷
총 데이터	2592*1944*169*3(채널)≒2.55*10 <sup>9</sup> (bit)
압축된 데이터	2592*1944*4(채널)=20155392(bit)
압축률	총데이터/압축데이터=126.75배

실시간으로 구현이 가능하다는 것을 확인하였다. 그리고 GPU를 이용한 렌더링 파이프라인을 사용하면 실시간으로 처리할 수 있다.

제안하는 방법을 사용하여 스펙트럼 반사맵을 도출하여 동심원의 중심으로부터 바깥쪽으로 스펙트럼의 경향을 분석하면 간단한 함수로 정리가 가능하다. 반사법의 스펙트럼 근사화를 위해 그림 10의 (a)는 녹색과 파란색의 스펙트럼을 도출하여 3원색으로 분리한 결과이고, (b)는 제안된 식 (6)에 의해 재구성한 결과이다. 그리고 식 (6)의 연산과정에 의해 표 3과 같은 계산 결과값을 도출할 수 있었다.

그림 10(a)와 (b) 두 그림의 수평축은 각도 범선벡터와 시점벡터의 사잇각  $\beta$ 를 의미하고 수직축은 각 채널별로 레벨값을 의미한다. 다만 (a)수평축은 degree값으로 표현하였고, (b) 수평축은 radian값으로 표현하였다.

그림 11은 본 논문에서 제안하는 혼색 텍스처 매핑 모델의 렌더링 결과를 나타낸다. 그림 9에서 보여주는 것처럼 식 (6)의 연산 결과값을 활용하여 정사각형 기하학적 모델에 텍스처 매핑하여 모델을 기울이면서 렌더링한 결과이다.

그림 11의 (a)는 실험에 사용한 정사각형 기하학 모델에 제안하는 혼색 텍스처를 매핑한 결과이다. 초기값은 조명이 투명되지 않은 상태이므로 초록색의 경향을

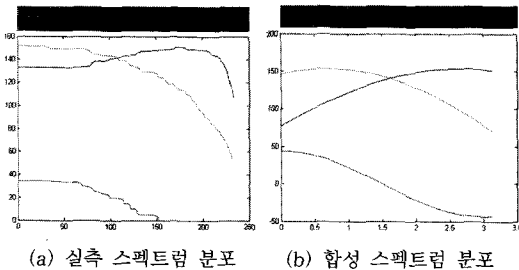
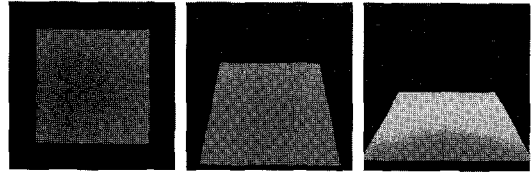


그림 10 나비 혼색(暈色: Iridescence)반사특성 분석결과

표 3 스펙트럼 파라미터 연산 결과값

항목	연산 결과값
h (진폭)	[0.17 0.6 0.6]T
w (파장)	[ $\pi/3$ $\pi/7$ $\pi/8$ ]T
p (위상)	[ $\pi/2$ $\pi/2.5$ $\pi/6$ ]T



(a) 혼색 텍스처 매핑 (b) 비스듬한 기울기 (c) 수평한 기울기  
그림 11 제안하는 혼색 텍스처 매핑 모델 렌더링 결과

보여준다. (b)는 비스듬하게 기울한 상태의 렌더링 상태이며 시점으로부터 멀리있는 부근에서는 푸른색 색상을 보여주고 시점으로부터 가까운 부근에서는 연한 초록색 색상을 보여준다. (c)는 혼색 텍스처 모델을 수평하게 기울인 상태의 렌더링 결과이며 (b)의 결과보다 더 뚜렷한 색상변화를 보여준다.

그림 12는 본 논문에서 사용한 페리클레스 제비나비 (papilio pericles)의 실제 촬영 텍스처를 이용한 실험 결과이다. 그림 12의 (a)는 나비 객체에 비스듬한 방향으로 조명을 투영했을 때 파란색상의 빛깔을 보여주는 실측 영상이다. (b)는 (a)의 상황을 가상의 그래픽으로 구현한 결과이다. (c)는 수직으로 조명을 투영한 상태에서 초록색상의 빛깔을 보여주는 실측영상이다. (d)는 이러한 상황을 가상의 그래픽으로 구현한 결과이다. 특히 (c)와 (d)에서 나비영상의 오른쪽 중간높이 부근에 흰색의 영역이 2개가 두드러지게 나타나는 현상이 있다. 반면 (a)와 (b)에서는 그러한 현상이 나타나지 않는다. 조명의 위치에 따른 실측 혼색 현상의 영역별 반영이 정밀하게 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 비스듬한 조명투사 원본영상 (b) 합성한 렌더링 영상



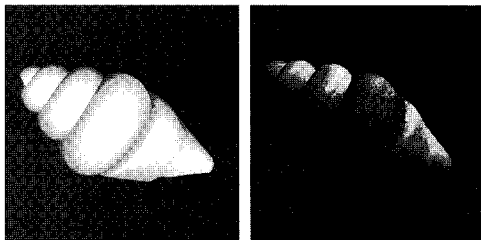
(c) 수직조명 투사 원본영상 (d) 합성한 렌더링 영상

그림 12 '나비' 혼색현상(暈色: Iridescence) 렌더링 결과

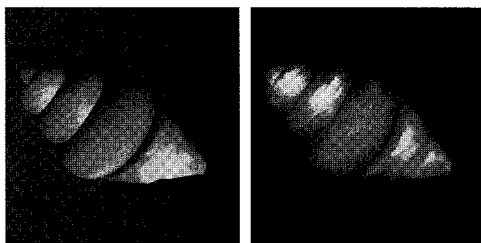


그림 12에서 수행한 실험결과는 2장에서 사용한 장치로부터 도출한 실측 영상 (a)와 (c)의 조명 방향을 그대로 반영하여 렌더링한 결과로서 화질의 차이가 거의 미미한 수준이다. 본 논문에서는 샘플링된 8개의 법선벡터만을 사용하였으나, 더많은 채널을 사용하는 멀티 텍스처를 사용하면 매우 정교한 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 본 논문은 실측에 기반한 혼색 매질의 BRDF데이터를 압축하는데 효과적인 결과를 보여 준다.

그림 13은 '바다고동'의 혼색현상을 제안하는 방법을 사용하여 압축한 뒤 새로운 기하모델에 텍스처 매핑하여 렌더링한 결과이다. 조명을 움직임에 따라 색상의 변화를 관찰할 수 있다. 그림 13 (a)는 바다고동의 그래픽스적인 기하모델이고, (b)는 텍스처를 맵핑한 후 조명을 위에서 투사할 때 장면이다. (c)는 정면의 조명이 투영될 때, (d)는 아래에서 조명이 투영될 때를 렌더링한 결과이다. 조명의 변화에 따라 표면에서 색상의 변화를 관찰할 수 있다.



(a) 바다고동의 기하모델 (b) 조명을 위에서 투사



(c) 정면 조명 투영 (d) 아래 조명 투영

그림 13 '바다고동' 혼색현상 텍스처 적용 렌더링 결과

5. 결론

본 논문은 마치 BRDF를 적용한 것과 같은 여러 방향의 시점에서의 이미지 생성이 가능하면서 영상기반 렌더링에 적용 가능한 혼색현상 BRDF를 압축하는 방법을 제시하였고, 이를 기존의 그래픽 하드웨어 파이프라인에서 동작이 가능한 텍스처링 방법을 제안하였다. 제안하는 텍스처는 알파채널에 다중법선 벡터정보와 스펙트럼의 파라미터를 기록한다. 그래픽스 텍스처 매핑

표 4 관련연구와 제안하는 기술의 비교.

항목	IBM&R	BRDF	제안하는 방법
특성	기본적인 모델에 텍스처로 매핑	표면의 모든 입사, 반사 표현.	다중 방향 법선 및 스펙트럼 가능
장점	컴퓨팅 비용절감	세밀한 매질특성 표현	컴퓨팅 비용절감 다중방향성 표현
단점	고품질 사진필요 방향성 표현불가	데이터구조가 큼 연산량이 많음	BRDF에 비해 미세한 화질 저하

기법을 사용하여 고속연산처리를 가능하게 한다[18].

표 4는 제안하는 기술과 기존의 렌더링 방법들과의 비교를 나타내었다. 본 논문은 실제세계에서의 자연현상의 예제를 분석하고 구현할 수 있는 파이프라인 설계방법을 제시한다.

본 논문은 단일 텍스처 영상을 사용하여 8개의법선 텍스처 렌더링 결과를 생성하였지만 향후 다중텍스처를 이용하면 더 많은 수의 레이어를 표현할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] Aner Ben-Artzi, Kevin Egan, Ravi Ramamoorthi, Fredo Durand, "A precomputed polynomial representation for interactive BRDF editing with global illumination," *ACM Trans. on Graphics*, vol.27 Issue 2, no.13, April, 2008.
- [2] Murat Kurt, Muhammed Gokhan Cinsdikici, "Representing BRDFs using SOMs and MANs," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics Session*, vol.42, Issue 3, no.2, Aug., 2008.
- [3] Michael H., Jason L., Greg H., Todd Zickler, "A photometric approach for estimating normals and tangents," *ACM Trans. on Graphics*, vol.27, no.5, Article 133, Dec., 2008.
- [4] Ewen C.-P., Rui Wang, Oskar A., Fabio P., "Fast, realistic lighting and material design using non-linear cut approximation," *ACM Trans. on Graphics*, vol.27, no.5, Article 128, Dec., 2008.
- [5] Jiaping W., Shuang Z., Xin T., John S., Baining G., "Modeling anisotropic surface reflectance with example-based microfacet synthesis," *ACM Trans. on Graphics*, vol.27, no.41, Article 128, Dec., 2008.
- [6] Peter V., Philip D., "Shape-dependent gloss correction," *International Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pp.123-130, August, 2008.
- [7] Kun Xu, Yun-Tao Jia, Hongbo Fu, Shi-Min Hu, Chiew-Lan Tai, "Spherical Piecewise Constant Basis Functions for All-Frequency Precomputed Radiance Transfer," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol.14, Issue 2, pp.454-467, March. 2008.
- [8] Mahajan D., Ramamoorthi R., Curless B., "A

Theory Of Frequency Domain Invariants: Spherical Harmonic Identities for BRDF/Lighting Transfer and Image Consistency," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.30, Issue 2, pp.197-213, Feb., 2008.

- [9] Sun B., Kalyan S., Ravi R., Belhumeur P.N., Nayar S.K., "Time-Varying BRDFs," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol.13, Issue 3, pp.595-609, May, 2007.
- [10] Vukusic P., Sambles J.R., "Photonic structures in biology," *Nature* 424, pp.852-855, 2003.
- [11] Yinlong Sun, "Rendering biological iridescences with RGB-based renderers," *ACM Trans. on Graphics*, vol.25, Issue 1, pp.100-129, Jan., 2006.
- [12] Prusten Mark, "Photo-real rendering of bioluminescence and iridescence in creatures from the abyss," *SPIE The Nature of Light*, vol.7057, pp.70570D-70570D-9, 2008.
- [13] Natalya Tatarchuk, Chris Brennan, "Simulation of Iridescence and Translucency on Thin Surfaces," [http://ati.amd.com/developer/ShaderX2\\_IridescenceAndTranslucency.pdf](http://ati.amd.com/developer/ShaderX2_IridescenceAndTranslucency.pdf), ATI Research.
- [14] S Kinoshita, S Yoshioka and J Miyazaki, "Physics of structural colors," [http://www.iop.org/EJ/article/0034-4885/71/7/076401/rpp8\\_7\\_076401.pdf](http://www.iop.org/EJ/article/0034-4885/71/7/076401/rpp8_7_076401.pdf), Jan. 2008.
- [15] Shuichi K., "Structural Colors in the Realm of Nature," World Scientific Publishing Company, Oct. 2008.
- [16] Guo W., Zhang Y., Han D., Li W., "A hybrid modeling method of Chinese ancient architecture," *ACM VRCIA*, No.25, 2008.
- [17] P. E. Debevec, C. J. Taylor, and J. Malik, "Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry and Image Based Approach," *In SIGGRAPH 96*, Aug. 1996.
- [18] Sae-Woon Ryu, Sang Hwa Lee, Sang Chul Ahn, and Jong-II Park, "Tangible video teleconference system using real-time image-based relighting," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.55, Issue 3, pp.1162-1168, August 2009.



이 상 화

1994년 2월 서울대학교 전자공학과 학사  
 1996년 2월 서울대학교 전자공학과 석사  
 2000년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사. 2005년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 BK 조교수. 관심분야는 스테레오 및 3D 시스템, 비디오/영상신호처리, 패턴인식 및 자동화, 컴퓨터비전



박 종 일

1987년 서울대학교 전자공학과 학사. 1989년 서울대학교 전자공학과 석사. 1995년 서울대학교 전자공학과 박사. 1992년~1994년 일본 NHK방송기술연구소 객원연구원. 1995년~1996년 한국방송개발원 선임연구원. 1996년~1999년 일본 ATR 지능영상통신연구소 연구원. 1999년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 교수. 관심분야는 가상현실, 증강현실, HCI, 3차원 영상처리, 컴퓨터그래픽스/비전



유 세 운

2002년 2월 동국대학교 전자전기공학부 학사. 2005년 3월 한양대학교 전자컴퓨터공학부 석사. 2005년~현재 한양대학교 전자 컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 3D 컴퓨터 비전, 모델 렌더링, GPGPU