

라이팅 시뮬레이션을 위한 분광특성기반의 렌더링 기법

이명영, 조양호, *이철희, 하영호
경북대학교 전자전기컴퓨터학부, *안동대학교 컴퓨터공학과
e-mail : *mylee@ee.knu.ac.kr*, *yha@ee.knu.ac.kr*

Spectral-based rendering technique for lighting simulation

Myong-Young Lee, Yang-Ho Cho, *Cheol-Hee Lee, Yeong-Ho Ha
School of Electrical Engineering and Computer Science
Kyungpook National University
*Major of Computer Engineering
Andong National University

Abstract

This study proposes an effective algorithm that can render a realistic image of a lighting environment, especially an automotive rear lamp, using the backward ray tracing method. To produce a realistic image similar to that perceived by the human eye, the incident light energy at the eye point estimated by a ray tracing algorithm is represented by XYZ tri-stimulus values, which are then converted into RGB values considering the particular display device.

I. 서론

자동차 및 건축물의 가상경험, 그리고 항공 시뮬레이션 등과 같은 시제품 개발에 앞선 가상의 3차원 체험기술에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다. 라이팅 시뮬레이션을 위한 필수요건으로 광원과 3차원 환경에 대한 정확한 모델링을 들 수 있고, 이러한 3차원 형상 모델링과 광원의 빛 방사특성 등을 고려한 사실감 있는 영상을 렌더링하기 위해서 광선추적기법(ray tracing method) 기술이 많이 사용되고 있다.

본 논문은 이러한 라이팅 환경의 정확한 시뮬레이션을 위한 분광특성기반의 렌더링 기법을 제안한다. 관찰자의 시야에 들어오는 영상을 보다 정확하게 재현하기 위해 분광에너지 기반의 광선추적기법을 제안하고 추적된 빛에너지의 정확한 색자극 변환을 위해 디스플레이 특성화과정을 수행하였다. 아울러 광선추적기법 [1,2]을 이용한 정확한 빛에너지의 추적을 위해 광원과 3차원 물체의 특성을 물리적인 분광특성에 기반하여 모델링하였다. 본 논문에서는 검증을 위하여 자동차 리어 램프(rear lamp)에서의 광원과 3차원 기하모델을 사용하였고, 위치별 물리적 색자극을 비교하고 결과영상을 관찰실험을 통해 확인함으로써 실제의 인지영상과 유사한 실사영상을 재현하였다.

II. 분광특성기반의 광선추적기법

2.1 광선추적기법을 이용한 빛에너지 추정

광선추적기법은 거울이나 투명한 물체 등을 더욱 현실에 가깝게 표현할 수 있는 강력한 렌더링 기법이다 [1]. 역방향 추적기법은 관찰시점이 되는 인간의 눈에서 시공간(viewing space)이 되는 스크린으로 이어지는 광선(ray)의 경로를 하나하나 추적하여 눈에 들어오는 빛만을 찾아내는 효율적인 방법이다. 본 논문에서는 이러한 역방향 추적기법을 사용하여 자동차 리어

램프의 실사영상의 시뮬레이션을 위한 모델링 알고리즘을 구현하였다. 먼저, 3차원 리어 램프 모델과 사용되는 광원의 정보를 가상의 3차원 공간좌표로 설정하고, 스크린으로 표현되는 시공간을 통과하는 광선들의 경로를 따라 반사와 굴절을 반복하여 추적함으로써 최종적인 빛의 스펙트럼 에너지를 추정한다.

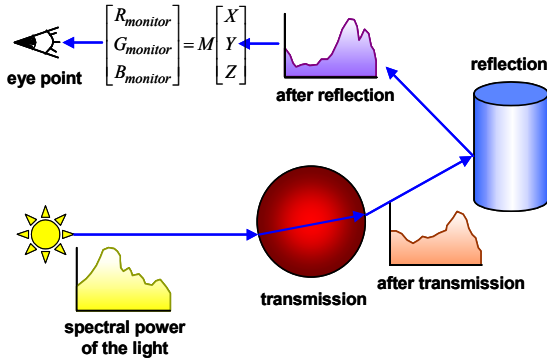


그림 1. 분광특성기반의 광선추적기법 과정

시점에서 출발한 광선과 3차원 공간상의 물체간의 교차점에서의 빛에너지를 계산하기 위한 음영모델은 빛의 물리적 현상을 고려하기 위해 파장의 함수로 확장되어 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$I(P) = I_{local}(P) + I_{global}(P) \\ = I_{local}(P) + k_{rg}I(P_r) + k_{tg}I(P_t) \quad (1)$$

$$I_{local}(P) = I_i(\lambda)F(\lambda)(k_d(L \cdot N)^n + k_s(R \cdot V)^{n'}) \\ + k_a I_i(\lambda)F(\lambda) \quad (2)$$

여기서, $I(P)$, $I_i(\lambda)$, $F(\lambda)$, 그리고 k 는 각각 교차점에서의 분광에너지, 광원의 분광에너지, 물체의 분광반사 또는 투과특성 및 계수를 나타낸다. 그리고 $(L \cdot N)$ 과 $(R \cdot V)$ 는 각각 면의 법선과 광원의 방향, 시야각과 반사각의 내적을 나타낸다. n 과 n' 는 확산 및 경면 계수를, k_{rg} 과 k_{tg} 는 반사 및 투과계수를, 그리고 P_r 과 P_t 는 각각 다음 교차점을 나타낸다.

2.2 물리적 기반의 광원모델링

리어램프의 점등실사영상을 렌더링하기 위해서는 무엇보다 광원의 정확한 모델링이 요구된다. 일반적으로 형광램프를 비롯한 공간적으로 균일한 광량을 방사하는 광원의 경우는 몬테카를로적분법(Monte carlo integration)[4]을 사용하여 효과적으로 광원의 영향을 고려할 수 있으나, 필라멘트 전구와 같이 공간적 휘도 분포가 다른 전구광원에 대해서는 모델링이 매우 어렵

다. 본 논문에서는 물리적으로 더욱 정확한 시뮬레이션을 위해 광원의 방향에 따른 세기를 측정된 RAYSET 데이터를 광선추적기법에 적용하였다. 아래의 그림은 P21W 필라멘트 전구의 RAYSET 데이터를 보여주는데, 가운데 점들은 중요성 샘플링(Importance sampling)에 의해 표본화된 점광원집합이며 이에 대한 방향성분포 선으로 나타내고 있다.

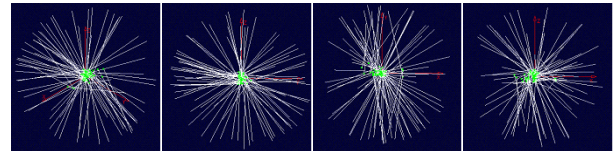


그림 2. P21W 필라멘트광원의 RAYSET 3D PLOT

본 논문에서는 이러한 RAYSET 데이터를 기반으로 매 교차점에서의 빛에너지를 계산할 때, RAYSET의 각 성분을 점광원으로 사용하여 특정방향으로의 정확한 빛에너지의 기여량을 계산하였다.

III. 디스플레이 특성화를 이용한 XYZtoRGB 색변환

본 논문에서는 최종적인 픽셀의 색을 계산하기 위하여 디스플레이 장치의 색 재현특성을 고려하였다. 광원에서 출발한 빛에너지의 분광분포가 반사와 투과를 반복하면서 물체의 반사와 투과특성에 따라 변형의 과정을 거쳐서 최종적으로 눈에 도달하는 빛에너지 $S(\lambda)R(\lambda)$ 는 다음 식을 통해 물체의 고유색을 대표하는 XYZ 삼자극치로 변환된다[5].

$$X = \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \\ Y = \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \\ Z = \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \quad (3)$$

여기서 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 그리고 $\bar{z}(\lambda)$ 은 CIE 표준등색함수(color matching function)이다. 이러한 표준 삼자극치를 디스플레이에 재현하기 위해 본 논문에서는 GOG 모델을 사용한 모니터 특성화(characterization)를 수행한다[6]. 이 과정에서 색자극치 XYZ와 모니터 RGB 값과의 관계를 다음의 식(4)와 같이 모델링하고 각 채널의 가법혼색으로 식 (5)와 같이 삼자극치를 계산한다.

$$R = [k_{g,r} \{d_r / (2^n - 1)\} + k_{o,r}]^r \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_{pixel} \\ Y_{pixel} \\ Z_{pixel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5)$$

다음의 표 1과 그림 3에서는 GOG 모델의 각 파라미터를 최적화기법을 이용해 추정된 결과와 실제 모니터의 각 채널의 디지털 값과 측정된 휘도 그리고 추정된 함수를 보여준다.

표 1. 최적화기법을 이용하여 추정된 채널의 파라미터

	k_g	k_o	γ
Red	1.0204	-0.0204	1.9095
Green	1.0220	-0.0220	1.8642
Blue	0.8997	0.1003	2.1514

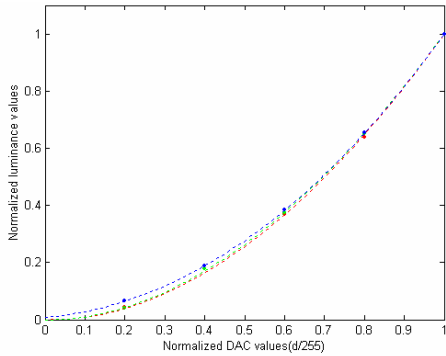


그림 3. 모니터의 각 채널에 대한 디지털값과 그에 상응하여 추정된 피팅함수

따라서 표 1의 추정 파라미터와 식 5의 역행렬을 이용하여 최종 XYZtoRGB 변환행렬을 식 6에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} R_{monitor} \\ G_{monitor} \\ B_{monitor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0304 & -0.0129 & -0.0048 \\ -0.0097 & 0.0178 & 0.0004 \\ 0.0005 & -0.0017 & 0.0077 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{input} - X_B \\ Y_{input} - Y_B \\ Z_{input} - Z_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 X_B, Y_B 그리고 Z_B 는 모니터의 디지털값을 $d_r = d_g = d_b = 0$ 으로 설정하여 측정된 ‘블랙’영상의 삼자극치를 나타내며, 본 논문에서 $[X_B = Y_B = Z_B] = [0.41 \ 0.53 \ 0.37]$ 로 측정되었다.

$$\begin{aligned} d_r &= [(2^n - 1)/k_{g,r}](R^{1/\gamma_r} - k_{o,r}) \quad \text{if } 0 \leq R \leq 1 \\ d_g &= [(2^n - 1)/k_{g,g}](R^{1/\gamma_g} - k_{o,g}) \quad \text{if } 0 \leq G \leq 1 \\ d_b &= [(2^n - 1)/k_{g,b}](R^{1/\gamma_b} - k_{o,b}) \quad \text{if } 0 \leq B \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

식 7에서는 식 6의 계산된 RGB 값을 이용한 최종 모니터의 디지털값을 나타내고 있다.

IV. 렌더링 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 분광특성기반의 역방향 광선추적기법을 이용하여 자동차 리어램프의 점등실사영상을 재현하는 시뮬레이션 실험을 하였다. 가상의 공간상에 위치한 리어램프는 반사경(reflector), 렌즈 core, 렌즈 cavity 로 이루어지며 30만~40만개의 삼각메쉬로 구성되었다. 다음의 표 2에서는 시뮬레이션 수행 시 측정기반으로 설정된 모든 환경변수를 나타내고 있다.

표 2. 시뮬레이션을 위한 음영모델의 파라미터

Parameters	Reflector	Lens
Transmittance, K_{tg}	0.05	0.95
Reflectance, K_{rg}	0.95	0.05
Diffuse coefficient, n	10	50
Specular coefficient, n'	15,000	15,000
Proportion of diffuse, K_d	0.08	0.08
Proportion of specular, K_s	0.92	0.92

다음의 그림 4는 실험에 사용된 광원과 반사경 및 렌즈의 분광광도계(spectro-radiometer, CS-1000)로 측정된 분광특성을 보여주고 있다.

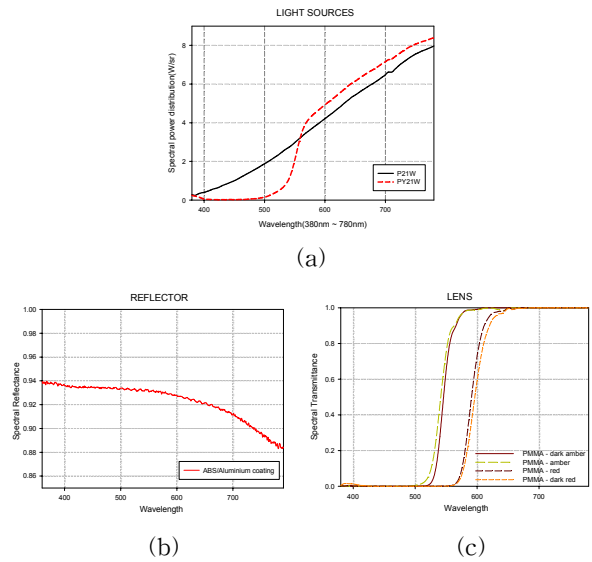
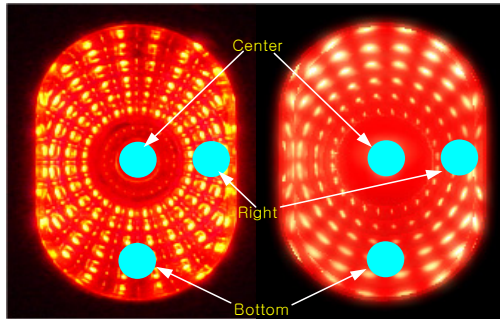


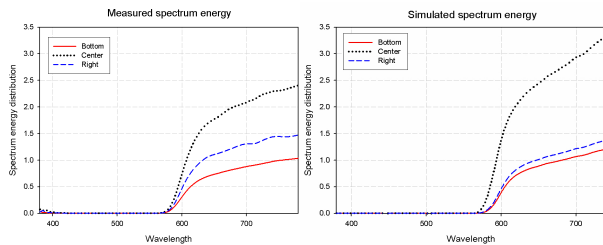
그림 4. 측정된 분광특성: (a)P21W와 PY21W의 분광방사곡선 (b)반사경의 분광반사특성 (c)렌즈의 분광투과특성

제안한 알고리즘을 적용한 렌더링 결과를 검증하기 위해서 렌더링 결과에서의 특징지점의 분광에너지 분포와 실제 분광광도계로 측정된 분광에너지를 비교분석하였다. 다음의 그림 5의 (a)는 리어램프 B150 모델

의 렌더링 결과를 보여주며 알고리즘의 검증에 위해 세 지점 center, right, bottom을 선택하여 렌더링 결과와 측정결과를 그림 5의 (b)에서 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 5. 시뮬레이션 결과와 측정결과의 비교:

- (a) 렌더링결과와 촬영영상의 비교 및 세 지점 선택
- (b) 세 지점에 대한 렌더링 결과와 측정치의 분광분포

장비의 적분영역과 렌더링 결과에서의 적분영역의 차이로 인한 총에너지의 불일치는 존재하지만 그림 5에서 볼 수 있듯이 추정된 분광에너지의 분포는 측정결과와 매우 유사하게 근접함을 알 수 있다.

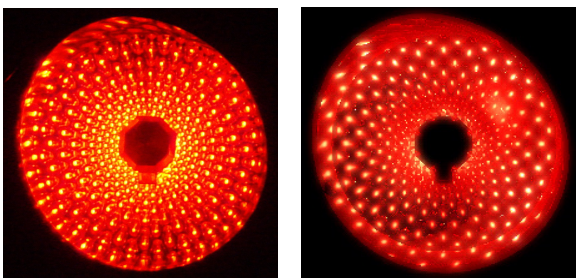


그림 6. GK 모델 리어램프의 촬영영상과 렌더링 결과

알고리즘의 검증에 위해 다른 모델들에게도 동일한 시뮬레이션을 수행하여 촬영영상과 측정결과를 비교하였다. 그림 6과 다음의 그림 7에서는 이러한 결과영상들을 보여주고 있다.

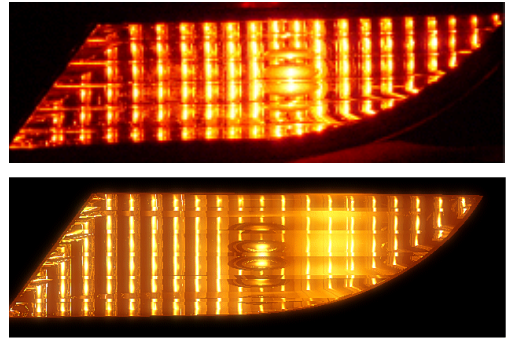


그림 7. 방향지시등 램프의 사진영상과 렌더링 결과

실험으로부터 제안한 알고리즘은 3D 리어램프의 가상의 실사영상 재현과 향후 라이팅 모델의 시제품 개발에 앞선 물리적 기반 시뮬레이션에 적용할 수 있음을 검증하였다.

V. 결론

본 논문은 3차원 영상의 현실감 있는 재현을 위해 기존의 단순한 RGB 기반의 렌더링 방법이 아닌 광원과 물체의 실제적인 분광분포를 고려한 물리적 기반에서 모델링 하였으므로, 시제품의 개발에 앞선 가상의 모델실험을 위한 실사영상의 재현분야에 응용할 수 있는 모델링 알고리즘이다. 알고리즘의 성능평가를 위해 제안된 분광분포기반의 색 결정법과 RGB기반의 색 결정법을 이용하여 실사영상 재현하였고, 이를 실제로 촬영된 샘플영상과 비교하여 제안된 방법의 우수성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Andrew Woo, Pierre Poulin, and Alain Fournier, "A Survey of Shadow Algorithms," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 10, No. 6, Nov. 1990, pp. 13-32.
- [2] J. Arvo, "Backward Ray Tracing," Tutorial Notes on the Developments in Ray Tracing SIGGRAPH 86, Aug. 1986.
- [3] Alan Watt, 3D Computer Graphics, Addison-Wesley, 2000.
- [4] Peter Shirley and Changyaw Wang, "Direct Lighting Calculation by Monte Carlo Integration," Proceedings of the 2nd Eurographics Rendering Workshop, June 1991.
- [5] Roy S. Berns, "Methods for characterizing CRT displays," Displays, Vol. 16, No. 4, 1996, pp. 173-182.