

論文2001-38SP-11-4

헤드램프의 시계성 평가를 위한 야간도로 영상 재현 알고리즘

(A reproduction algorithm of nighttime road-image for visibility evaluation of headlamps)

李 徹 熙 * , 河 永 浩 **

(Cheol-Hee Lee and Yeong-Ho Ha)

요 약

본 연구는 헤드램프가 조명된 야간도로의 실사영상 재현 알고리즘을 제안한다. 램프가 조명된 야간도로 영상 추정시, 색재현성을 향상시키기 위해 헤드램프 혼합광의 분광분포와 각 물체의 표면 분광반사율에 기초한 색재현 알고리즘을 개발하였다. 물체의 분광반사율을 추정하기 위해서 주성분 분석법이 사용되었고, 영상의 각 영역에서 헤드램프 혼합광의 분광분포를 추정하기 위하여 거리에 따른 조도와 각 헤드램프의 분광분포를 계산하였다. 실험을 위한 헤드램프로는 HID와 할로겐 램프를 사용하였다. 헤드램프가 조명된 도로의 시계성 평가를 위해 주간의 도로 영상을 촬영한 뒤 일광의 강도를 감쇄하여 야간도로 영상을 얻고 이를 이용해 각 헤드램프의 빔패턴을 평가하였다. 제안된 알고리즘으로 단수 및 복수 개의 헤드램프에 대해 예측 영상을 만들어 모니터에 재현한 후 실영상과 비교하였으며 결과, 제안된 방법이 기존의 그래픽 기반의 시계성 평가 방법에 비해 실영상에 더욱 근접함을 확인하였다.

Abstract

This study proposes a new calculation method for generating real nighttime lamp-lit images. In order to improve the color appearance in the prediction of a nighttime lamp-lighted scene, the lamp-lit image is synthesized based on spectral distribution using the estimated local spectral distribution of the headlamps and the surface reflectance of every object. The principal component analysis method is introduced to estimate the surface color of an object, and the local spectral distribution of the headlamps is calculated based on the illuminance data and spectral distribution of the illuminating headlamps. HID and halogen lamps are utilized to create beam patterns and captured road scenes are used as background images to simulate actual headlamp-lit images on a monitor. As a result, the reproduced images presented a color appearance that was very close to a real nighttime road image illuminated by single and multiple headlamps compared to the conventional graphic-based algorithm.

* 正會員, 慶雲大學校 컴퓨터工學科

(Department of Computer Engineering Kyungwoon University)

** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electrical Engineering and Computer Science Kyungpook University)

接受日字2001年4月19日, 수정완료일:2001年10月5日

I. 서 론

헤드램프의 배광 해석을 통한 시계성 평가는 헤드램프 개발과정에 필요한 시간과 비용을 줄이기 위해 매우 중요하다.^[1] 즉 헤드램프 제작시 비용의 대부분을 차지하는 램프 금형을 직접 제작하지 않고 컴퓨터 시뮬레이션으로 미리 제작중인 헤드램프의 입체각에 따른 광도값을 얻은 뒤 이를 그래픽 영상에 적용하여 헤

드램프의 시계성을 평가하는 방법이 많이 응용되고 있다.^[2] 그러나 그래픽 영상의 경우 실제 헤드램프가 조명된 도로의 느낌을 잘 전달하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 헤드램프가 조명된 야간도로 영상에 대한 정확한 예측을 위해 사진 촬영한 노면 영상을 바탕으로, 광원 및 물체색의 분광분포에 추정에 기반한 야간 도로의 실사영상 재현 알고리즘을 개발하였다. 개발된 방법에서는 배경영상으로 사용할 야간의 도로 영상을 만들기 위해 낮 영상을 이용하였다. 즉 야간 영상을 디지털 카메라로 촬영할 경우 주변의 광량이 CCD의 정상 입력 허용 범위보다 낮으므로 획득된 영상에 노이즈가 많다. 그러므로 이러한 배경 영상에 헤드램프 광원을 투사할 경우 영상에 포함된 노이즈가 더욱 증폭되어 재현된 예측 영상에서 노이즈로 인한 왜곡이 심한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 낮 영상을 카메라로 촬영한 후 광원의 세기를 줄인 후 이를 헤드램프의 빔 패턴을 평가하기 위한 배경 영상으로 이용하였다.

배경 영상으로부터 주성분 분석 방법을 이용하여 영상의 물체색의 분광반사율을 추정하고, 각 화소의 조도 값과 각 헤드램프의 추정된 분광분포를 이용하여 화소 단위로 광원의 분광 분포를 추정한 뒤 이를 이용하여 복수 개의 헤드램프가 조명된 도로에 대한 예측 영상을 만들었다. 개발된 알고리즘의 유용성을 평가하기 위하여 추정된 광원의 분광분포와 실제 측정된 분광 분포를 비교하였고, 예측 영상과 실영상에 대한 주관적인 실험을 통하여 결과를 평가하였다. 실험 결과 예측 영상이 실제 환경에서 헤드램프에 조명된 도로와 시각적으로 매우 근접함을 확인하였다.

II. 헤드램프로부터의 거리에 따른 조도 계산

운전자가 실제 노면에서 운전을 하는 경우 램프의 빛은 노면과 주변 구조물에 조명된다. 이때 노면에 조사된 헤드램프의 분광분포를 추정하기 위해서는 점등된 헤드램프 자체의 분광 분포와 배경 노면 영상의 위치에 대한 조도 값이 필요하다. 헤드램프 자체의 분광 분포는 분광 광도계를 이용하여 측정하여 구할 수 있으나 조도 계산을 위해서는 램프의 배광을 시험한 광도 값과 배경 영상에서 각 지점과 헤드램프 사이의 거

리 정보가 필요하다. 제안된 연구에서는 카메라의 초점을 중심으로 하는 좌표계를 이용하여 카메라의 CCD에 맺힌 상의 거리 정보를 계산하고 좌표계에서 얻은 거리 정보를 직각 좌표계로 변환한 뒤 측정된 운전자 시각의 높이 정보를 이용하여 영상의 각 영역과 헤드램프 사이의 실제거리를 추정하는 방법을 제안하였다.

1. 구 좌표계에서의 거리 정보의 계산

그림 1은 카메라를 이용한 영상의 획득 과정을 나타낸다. 그림에서 r, θ, ϕ 는 구좌표의 각 성분이며, 카메라 렌즈의 중심 O 로부터 CCD 혹은 실영상의 각 지점에 대한 거리정보를 나타낸다. r 은 카메라의 초점 거리이며, R 은 렌즈와 배경 영상의 중심점간의 거리를 나타낸다. θ 와 ϕ 는 CCD에 맺힌 상 및 노면 영상의 각 지점과 렌즈와의 거리 정보를 나타낸다. 그리고 D 는 노면영상의 각 지점에서 헤드램프와의 거리를 나타낸다. 헤드램프 조명시 배경 노면 영상의 조도 계산을 위해서는 노면 영상의 모든 화소에 대한 D 값을 계산하여야 한다. 그러나 배경 영상에서 각 지점과 헤드램프 간의 거리 D 를 실제로 측정하는 것은 매우 어렵다. 즉 영상의 각 지점에 대한 실제 도로 상의 위치를 찾는 것이 힘들며 또한 모든 배경 영상에 대하여 수작업으로 거리를 측정해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이미 알고 있는 초점 거리 r 을 이용하여 구좌표의 중심 O 와 배경 영상의 각 중심점에 대한 거리 R 을 구하고 좌표계 변환을 통해 임의의 배경 영상에 대해, 헤드램프와 배경 영상의 각 지점에 대한 거리를 추정하는 방법을 제안하였다. 먼저 구좌표의 중심 O 로부터 카메라 중심까지의 거리 r 을 이용하여 카메라의 필름 혹은 CCD에 맺힌 상의 위치, θ 와 ϕ 를 계산하면 식(1) 및 (2)와 같다.

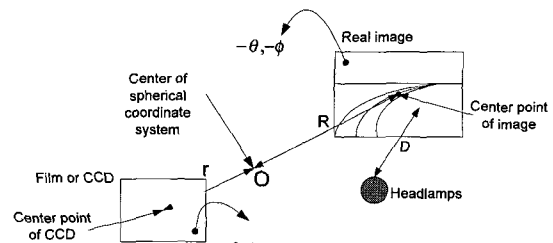


그림 1. 카메라를 이용한 영상의 획득
Fig. 1. Image capture using a camera.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(x - x_c)}{H_{img}} \times \frac{H_{ccd}}{r} \right) \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(y - y_c)}{V_{img}} \times \frac{(V_{ccd} \cdot \cos(\theta_{ccd}))}{r} \right) \quad (2)$$

위 식에서 r 은 카메라의 초점 거리이며 x 와 y 는 영상에서 가로 및 세로 방향의 위치를 나타낸다. x_c 및 y_c 는 영상의 중심점을 나타내고 H_{ccd} 및 H_{img} 는 가로 방향으로 CCD의 길이(m) 및 영상의 크기(화소)를 나타내고 V_{ccd} 및 V_{img} 는 세로 방향으로 CCD의 길이(m) 및 영상의 크기(화소)를 나타낸다. 따라서 CCD에 맺힌 상의 거리 정보 (r, θ, ϕ)는 알고 있는 카메라의 초점 거리, r 과 앞서 언급한 CCD의 길이 및 영상의 크기 정보를 식 (1)과 (2)에 대입하여 계산한다. 여기에서 카메라의 초점 거리 r 대신에 실제 노면에서의 영상 중심과 구좌표의 중심 O 사이의 거리 R 을 구하면 카메라 위치에서 영상의 각 화소가 갖는 실제 거리 정보는 ($R, -\theta, -\phi$)의 구좌표로 표시될 수 있고 이것을 직각 좌표계로 바꾸면 식 (3) ~ (5)와 같다.

$$d_{cam} = R \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad (3)$$

$$w_{cam} = R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad (4)$$

$$h_{cam} = R \cdot \sin(\phi) \quad (5)$$

카메라 위치에서, 직각 좌표계로 표시한 영상의 각 화소에 대한 거리 정보 ($d_{cam}, w_{cam}, h_{cam}$)는 그림 2와 같다. 즉 카메라 위치를 좌표계의 원점으로 하고, 영상에 표시된 각 지점의 실제 거리를 직각 좌표계로 표시한 값을 나타낸다.

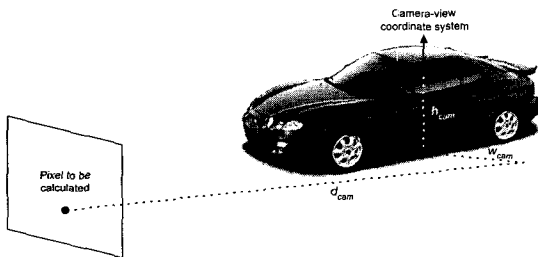


그림 2. 카메라 좌표계에서 각 축의 정의
Fig. 2. Definition of each axis in camera-view coordinate system.

직각 좌표계에서 카메라, 램프, 운전자의 눈 및 지면의 위치를 원점으로 하여 좌표계를 정의하면 그림 3과 같다. 전체 좌표계의 기준이 되는 world coordinate

system은 운전자의 눈 위치를 지면에 내린 것으로 영상에서 얻는 모든 거리 정보의 기준점이 된다. 다음 운전자 눈의 위치와 카메라의 위치가 동일하다고 가정하고 시야 좌표계(eye-view coordinate system)와 카메라 좌표계(camera-view coordinate system)를 정의하였다.^[3] 그러나 운전자의 눈의 위치와 동일한 위치에 카메라를 장착하더라도 영상의 촬영시 카메라의 지향 방향을 고려하여 시야 좌표계와 카메라 좌표계는 일정한 각도로 어긋난 상태라고 정의하였다. 마지막으로 램프 좌표계의 중심은 시야 좌표계의 중심으로부터 축 이동으로 정의하였다. 따라서 배경 영상에서 각 화소와 램프간의 거리는 이 램프 좌표계의 원점을 중심으로 계산된다.

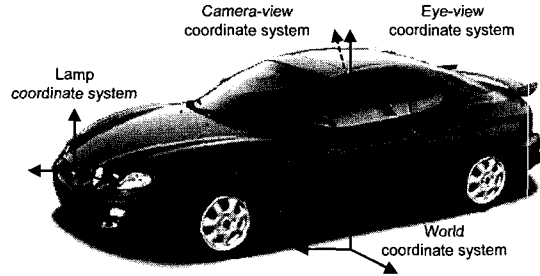


그림 3. View에 따른 좌표계
Fig. 3. Coordinate system with respect to view.

2.시야 좌표계로 축변환

카메라 좌표계에서 계산된 영상의 거리 정보는 카메라와 영상의 각 지점 사이의 거리를 나타낸다. 따라서 램프와 영상의 각 지점 사이의 거리를 계산하기 위해서는 식 (3)~(5)의 카메라 좌표계에서 계산된 거리 정보를 램프 좌표계로 변환하는 과정이 필요하다. 그러나 카메라로 영상을 촬영하는 경우 램프의 지향 방향과 카메라의 지향 방향이 항상 일치하지는 않는다. 그러므로 램프 좌표계로 변환시 카메라의 지향 방향에 대한 보정 과정이 필요하다. 본 연구에서는 램프 빛의 지향 방향이 운전자 시각인 시야 좌표계의 소실점과 같다고 가정했다. 즉 1점 소실 원근 투사법을 이용하여 램프를 점등할 때 소실점 아래쪽은 램프의 빛이 지면에 도달하게 되고 소실점 위쪽에서는 일정한 소실거리에 램프의 빛이 도달한다고 가정하였다. 그러므로 그림 4와 같이 카메라 좌표계로 표시되는 영상의 중심점과 시야 좌표계로 표시되는 소실점 간의 거리를 보상하기 위한

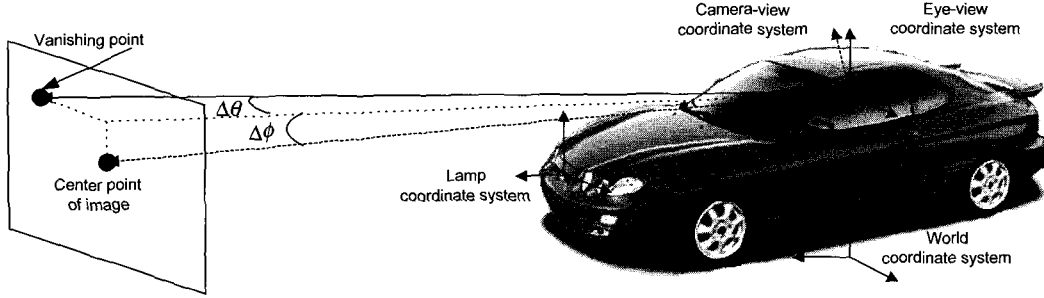


그림 4. 시야 좌표계의 소실점과 카메라 좌표계에서 영상의 중심

Fig. 4. Vanishing point in eye-view coordinate system and center point of image in camera-view coordinate system.

여, 카메라 좌표계에서 구한 $(d_{cam}, w_{cam}, h_{cam})$ 값을 축 변환을 통해 시야 좌표계로 변환하였다.

시야 좌표계와 카메라 좌표계의 회전 각도 $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ 는 식 (6)과 (7)을 이용해 계산할 수 있다.

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(x_c - x_v)}{H_{img}} \cdot \frac{H_{ccd}}{r} \right) \quad (6)$$

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(y_c - y_v)}{V_{img}} \cdot \frac{V_{ccd} \cdot \cos(\Delta\theta)}{r} \right) \quad (7)$$

위 식에서 (x_c, y_c) 는 수평 및 수직 방향으로 영상의 중심 화소를 나타내며, (x_v, y_v) 는 영상의 소실점을 가르킨다. H_{ccd}, V_{ccd} 는 각각 CCD의 가로 세로 방향으로의 길이(m)를 나타내며 r 은 카메라의 초점 거리를 나타낸다. 좌표계 사이의 회전 각도를 계산한 후, 카메라 좌표계로부터 시야 좌표계로의 축변환 식은 아래와 같다.

$$(d_{eye}, w_{eye}, h_{eye}) = (d_{cam}, w_{cam}, h_{cam}) \cdot T_{\theta}(\Delta\theta) \cdot T_{\phi}(\Delta\phi) \quad (8)$$

$$T_{\theta}(\Delta\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & -\sin(\Delta\theta) & 0 \\ \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\phi}(\Delta\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\phi) & 0 & \sin(\Delta\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Delta\phi) & 0 & \cos(\Delta\phi) \end{bmatrix}$$

식 (8)에 식 (3) ~ (5)를 대입하여 다시 정리하면 구좌표의 중심과 영상 중심점사이의 실제 노면 거리, R 을 미지수로 갖는 아래의 식으로 표현된다.

$$d_{eye} = R \cdot (\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\Delta\theta) \cdot \cos(\Delta\phi) - \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\Delta\theta) \cdot \cos(\Delta\phi) + \sin(\phi) \cdot \sin(\Delta\phi)) \quad (9)$$

$$w_{eye} = R \cdot (\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\Delta\theta) + \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\Delta\theta)) \quad (10)$$

$$h_{eye} = R \cdot (-\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\Delta\theta) \cdot \sin(\Delta\phi) + \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\Delta\theta) \cdot \sin(\Delta\phi) + \sin(\phi) \cdot \cos(\Delta\phi)) \quad (11)$$

소실점 아래의 거리 정보를 찾고자 하는 화소들의 경우 램프의 빛이 모두 지면에 도달하므로 높이, h_{eye} 는 모든 좌표축의 기준이며 그 크기가 지면에 존재하는 world coordinate system (그림 4참조)과 시야 좌표계의 높이의 차인 카메라 높이와 같게 된다. 실험에서는 표준 앓은 키를 갖는 성인 운전자의 눈의 높이를 지면으로부터 측정하여 사용하였으며 이를 시야 좌표계에서 보면 높이 h_{eye} 는 카메라 높이와 크기는 같고 부호가 다른 값을 갖게 된다. 따라서 이 값을 식(11)에 대입하면 미지수 R 을 구할 수 있으며 이 값을 식 (9)와 (10)에 대입하여 모든 거리 정보를 계산할 수 있다. 소실점 위쪽의 화소들의 경우 1점 소실 원근법을 적용해 임의의 고정된 소실 거리를 사용하였으며 이 값을 식 (9)에 대입하여 미지수 R 을 구한 뒤 나머지 거리 정보를 계산하였다.

3. 램프 좌표계로 축변환

시야 좌표계로부터 최종 램프 좌표계로의 변환은 아래 식과 같은 간단한 축이동으로 가능하다.

$$\begin{aligned} d_{lamp} &= d_{eye} - \Delta d \\ w_{lamp} &= w_{eye} - \Delta w \\ h_{lamp} &= h_{eye} - \Delta h \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 $\Delta d, \Delta w, \Delta h$ 는 시야 좌표계의 원점과 램프 좌표계의 원점 사이의 거리이며 그림 5와 같다.

식 (12)를 통해 구한 $(d_{lamp}, w_{lamp}, h_{lamp})$ 는 실제 노면에서의 거리 정보를 램프 좌표계에서 직각 좌표로 표현한 값이다. 그러므로 배경 영상에서 (x, y) 화소가 갖

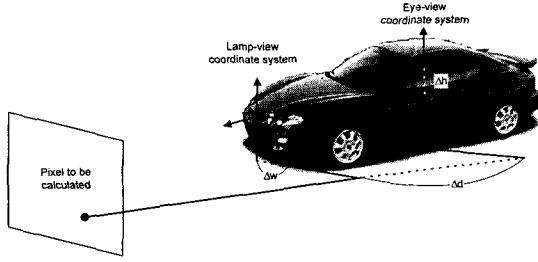


그림 5. 시야 좌표계와 램프 좌표계의 원점 사이의 거리
Fig. 5. Distance between origin of eye-view coordinate system and that of lamp-view coordinate system.

는 헤드램프로 부터의 실제 거리는 식 (13)을 통해 계산할 수 있다.

$$D(x, y) = \sqrt{d_{lamp}(x, y)^2 + w_{lamp}(x, y)^2 + h_{lamp}(x, y)^2} \quad (13)$$

최종적으로 헤드램프가 조명될 경우 임의의 화소의 거리에 따른 조도(il)는, (x, y) 화소의 위치에 해당하는 구좌표를 식 (14) ~ (16)과 같이 계산한 후, 식 (17)을 이용하여 광도(l)를 거리의 제곱으로 나누어 줌으로써 계산할 수 있다.

$$r_{lamp}(x, y) = D(x, y) \quad (14)$$

$$\theta_{lamp}(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{w_{lamp}(x, y)}{d_{lamp}(x, y)} \right) \quad (15)$$

$$\phi_{lamp}(x, y) = \sin^{-1} \left(\frac{h_{lamp}(x, y)}{r_{lamp}(x, y)} \right) \quad (16)$$

$$il_{d, w, h}(x, y) [lux] = \frac{l_{r, \theta, \phi}(x, y) [cd]}{D(x, y)^2 [m^2]} \quad (17)$$

위 식에서 구좌표로 주어지는 광도 값은 헤드램프 모의실험 혹은 배광 시험 장비를 통해 미리 계산된 값을 이용한다.

III. 조명된 헤드램프의 분광분포 추정

계산된 조도 데이터와 헤드램프 자체의 분광분포를 이용하여 배경 영상에서 화소 단위로 헤드램프의 분광분포를 추정할 수 있다. 제안된 연구에서는 HID(low beam), HI(high beam), H3(fog beam) 세 가지 헤드램프 조명을 사용하였다. 복수 개의 헤드램프가 조명되었을 때 각 영역에서 분광분포의 합은 아래 식과 같이 표현된다.

$$E_{lamps}(\lambda) = \sum_{k=1}^m il_k E_k(\lambda) \quad (18)$$

위 식에서 m 은 조명된 램프의 수이며, $E_k(\lambda)$ 는 그림 6과 같이 규격화된 헤드램프의 분광분포이다. $il_k(\lambda)$ 는 노면 영상의 위치에서 각 헤드램프의 계산된 조도를 나타낸다. 즉 식 (18)에서 $E_k(\lambda)$ 는 헤드램프의 색을 결정하며 $il_k(\lambda)$ 는 각 램프의 상대적인 밝기를 고려함으로써 조명된 복수 개의 램프 광원에 대한 총합적인 분광분포를 추정하였다.

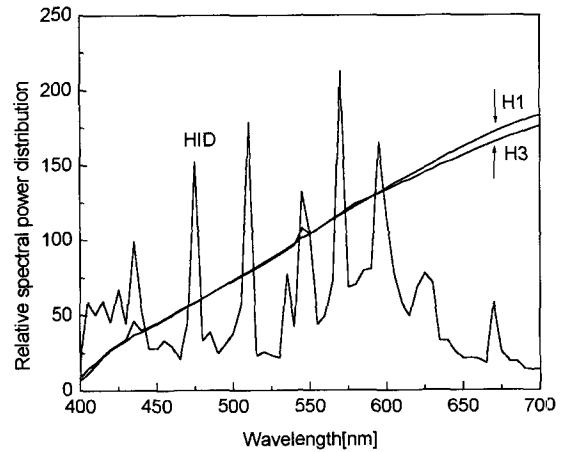


그림 6. 각 헤드램프의 분광전력분포
Fig. 6. Spectral power distribution of each headlamp.

그림 6에서 보는 바와 같이 각 헤드램프의 분광분포는 400nm부터 700nm까지 10nm간격으로 표시되며, 총합적인 분광분포는 식 (19)와 같이 비시감도의 최대값의 파장에서 D65광원의 해당하는 분광분포 값을 갖도록 다시 규격화 된다.

$$E'_{lamps} = \frac{E_{lamps}(\lambda)}{E_{lamps}(555)} \times E_{D65}(555) \quad (19)$$

제안된 복수 광원의 분광분포 추정방법의 정확성을 시험하기 위하여 계산된 분광분포와 실제 측정된 분광분포를 비교하였다. 실측한 복수광원의 분광분포를 얻기 위해 HID, HI, H3 램프를 이용하여 보름달에서의 조도 환경인 0.1[lux]의 암실에서 세 개의 램프를 점등한 후 보정용 표준 백색면에 조사하고 Minolta CS-1000 분광광도계를 이용하여 반사광을 측정하였다.

그림 7은 실측한 반사광의 분광분포와 계산된 분광분포를 보여준다.

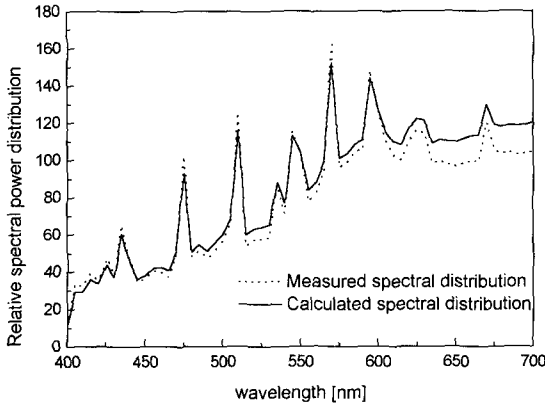


그림 7. HID, H1, H3 동시 점등시 실측한 분광분포와 계산된 분광분포

Fig. 7. Measured and calculated spectral distribution when HID, H1, and H3 headlamps are simultaneously illuminated.

그림 7에서 보는 바와 같이 계산된 복수램프 광원의 분광분포는 실측한 분광분포에 거의 근접하며, 정량적인 평가 결과 색차(ΔE_{ab}) 및 평균자승오차는 각각 2.1474 및 2.3408을 나타냈다.

IV. 야간 노면 영상의 분광반사율 추정

1. 야간노면 영상으로 사용할 배경 영상의 획득

표 1은 일상적으로 접하는 다양한 조명 환경에 따른 조도를 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 일반적으로 가로등 및 주변 조명이 없는 야간 도로 환경의 경우 전형적인 조도의 범위는 0.1[lux]미만이다. 이때의 조도 범위는 상업용 디지털 카메라가 허용하는 최소 조도보다 낮으므로 실제의 야간 노면 영상을 디지털카메라로 촬영할 경우 영상에 노이즈가 많이 포함된다.

특히 본 연구와 같이 야간 영상을 배경으로 하여 헤드램프가 조명된 도로를 재현할 경우 배경 영상에 포함된 노이즈는 더욱 증폭된다. 따라서 본 연구에서는 헤드램프의 시계성 평가를 위한 배경 영상으로 낮 영상을 사용하였다. 즉 낮에 노면 영상을 촬영하고 일광의 분광분포를 측정한 다음, 식 (20)을 이용하여 일광을 세기를 줄여줌으로써 배경 영상으로 사용할 야간 노면영상을 얻었다.

표 1. 조명에 따른 조도^[4]

Table 1. Illuminance according to light source.

Circumstances	Illuminance (lux)
Bright sunlight	10^9
Dull daylight	10^4
Shop windows	10^3
Living rooms	10^2
Good street lighting	10^1
Poor street lighting	10^0
Full moon	10^{-1}
Crescent moon	10^{-2}
Bright star light	10^{-3}
Dim star light	10^{-4}

$$\begin{aligned}
 X &= K_{daylight} \alpha \sum_{\lambda=400}^{700} E_{daylight}(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) \\
 Y &= K_{daylight} \alpha \sum_{\lambda=400}^{700} E_{daylight}(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) \quad (20) \\
 Z &= K_{daylight} \alpha \sum_{\lambda=400}^{700} E_{daylight}(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) \\
 K_{daylight} &= 100 / \sum_{\lambda=400}^{700} E_{daylight}(\lambda) \bar{y}(\lambda).
 \end{aligned}$$

위 식에서 $R(\lambda)$ 는 노면 영상의 분광반사율을 나타내며, $E_{daylight}(\lambda)$ 는 노면 영상 촬영시, Minolta CS-1000 분광 광도계로 측정된 일광의 분광분포이다. 이때 야간 노면영상의 밝기를 결정하기 위한 일광의 감쇄상수 α 는 실험적으로 결정되었다.

2. 주성분 분석을 이용한 분광반사율의 계산

RGB로 표현되는 야간 노면 영상의 분광반사율을 추정하기 위해서 주성분 분석을 이용하였다. 물체의 분광 반사율은 먼셀복과 같은 현색 공간의 색표본에 대한 주성분을 계산한 다음, 몇 개의 주성분의 선형조합으로 근사화 할 수 있다는 것이 많은 연구에서 보고되고 있다.^[5]

$$\begin{aligned}
 R(\lambda) &\cong \bar{R}(\lambda) + c_1 u_1(\lambda) + c_2 u_2(\lambda) + c_3 u_3(\lambda) \quad (21) \\
 \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix}^{-1} \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} \right]
 \end{aligned}$$

위 식에서 $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ 는 실험에 사용한 1269개 먼셀 색표본의 평균 분광 반사율의 삼자극치이며, X_i, Y_i, Z_i ($i=1, 2, 3$)은 3개의 주성분(principal component)의 삼자극치이다. 1269 먼셀 색표본에 대한 3개의 주성분을 찾기 위하여 Minolta CM-3600d 분광

광도계를 이용해 1269 색시료를 측정하여 분광반사율을 얻었다. 다음 식(22)와 같이 측정된 분광반사율의 자기공분산 행렬, K 를 구하고 이 행렬에 대한 고유벡터를 찾은 후 고유치가 큰 순서대로 3개의 고유벡터를 얻어 1269 면셀 색표본에 대한 주성분 벡터로 이용하였다.

$$K = E[(R - \mu)(R - \mu)^T] \quad (22)$$

위 식에서 R 은 400nm에서 700nm까지 10nm간격으로 측정된 각 면셀 색시료의 분광반사율이며 μ 는 측정된 1269면셀 색시료의 평균 분광반사율을 나타낸다. 그림 8은 1269의 면셀 색표본에 대한 3개의 주성분 벡터를 나타낸다.

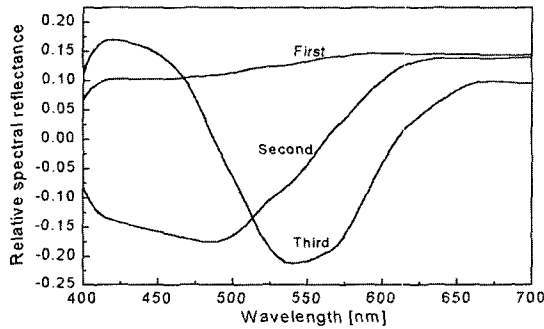


그림 8. 1269 면셀 색표본으로부터 얻은 3개의 주성분 벡터

Fig. 8. Three principal component vectors obtained from 1269 Munsell chips.

V. 헤드램프가 점등된 야간노면 영상의 재현

배경 영상으로 사용한 야간 노면 영상의 각 화소에 대한 헤드 램프 광원의 분광분포와 물체색의 분광반사율을 추정한 후 RGB출력을 위해 광원 및 물체색의 분광 데이터를 X, Y, Z 삼자극치로 변환한다. 이때 도로에 헤드 램프 이외에 조명광은 없다고 전제하였으며 달 빛이나 별 빛과 같은 야간 환경에서 자연광의 분광 분포는 측정된 낮 광원에 근접하다고 가정했다.

실제로 보름달의 분광 분포를 Minolta CS-1000 분광 휘도계를 이용하여 측정할 경우 분광 분포의 형태는 완전 백색광의 분광분포에 임펄스 노이즈가 많이 실린 형태를 보인다. 그러나 표 1와 같이 보름달의 경우에도

0.1lux의 미만의 광량을 나타내므로 야간 환경에서 자연광의 분광분포는 헤드램프 조명 광원의 분광분포에는 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서 헤드 램프가 조명된 도로 영상의 각 화소에 대한 삼자극치는

$$\begin{aligned} X &= \sum_{\lambda=400}^{700} (K_{\text{night}} E_{\text{night}}(\lambda) + K_{\text{lamps}} L^*_{\text{lamps}} E^*_{\text{lamps}}(\lambda)) \bar{x}(\lambda) R_{\text{night}}(\lambda) \\ Y &= \sum_{\lambda=400}^{700} (K_{\text{night}} E_{\text{night}}(\lambda) + K_{\text{lamps}} L^*_{\text{lamps}} E^*_{\text{lamps}}(\lambda)) \bar{y}(\lambda) R_{\text{night}}(\lambda) \\ Z &= \sum_{\lambda=400}^{700} (K_{\text{night}} E_{\text{night}}(\lambda) + K_{\text{lamps}} L^*_{\text{lamps}} E^*_{\text{lamps}}(\lambda)) \bar{z}(\lambda) R_{\text{night}}(\lambda) \\ K_{\text{night}} &= 100 / \sum_{\lambda=400}^{700} E_{\text{night}}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\ K_{\text{lamps}} &= 100 / \sum_{\lambda=400}^{700} E^*_{\text{lamps}}(\lambda) \bar{y}(\lambda). \end{aligned} \quad (23)$$

위 식에서 L^*_{lamps} 은 계산된 조도 값과 모니터에 재현된 영상의 인지되는 밝기를 연관시키기 위해 적용되었다. 즉 헤드램프로부터의 거리정보에 의해 계산된 조도 값은 아래 식과 같이 CIELAB모델을 이용하여 명도 값으로 변환된 값이다.^[6]

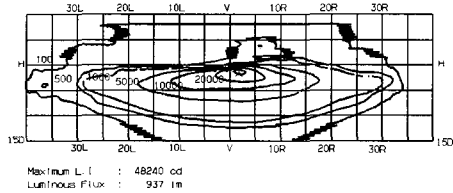
$$\begin{aligned} L^*_{\text{lamps}} &= 116 \cdot f\left(\frac{a}{a_{\text{std}}}\right) - 16 \\ f(a) &= \begin{cases} \sqrt[3]{a} & \text{if } a \geq 0.008856 \\ 7.787a + 16/116 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

VI. 실험 결과

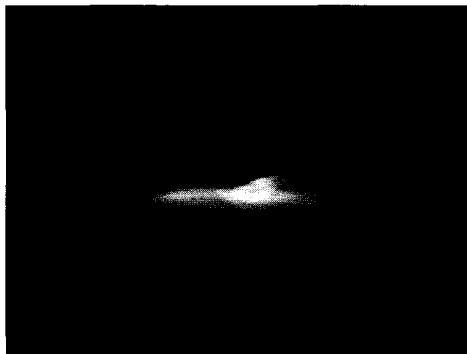
제안된 헤드램프 시계성 시험 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 HID, H1, H3 헤드램프를 이용하여 배광 스크린 및 실제 도로 영상에 대하여 헤드램프가 조명된 야간 영상을 추정하였다. 그림 9(a)는 HID low beam에 대하여 배광 시험기를 통해 광도(luminous intensity) 데이터를 계산한 후 lm단위로 표시한 그림이며 그림 9(b)는 제안된 조도 계산법을 이용하여 암실 조건 하에서 7.5m 배광 스크린에 나타나는 조도 값을 계산한 뒤 256 명암 단계를 갖는 그레이영상으로 표현한 그림이다. 전술한 바와 같이 광도 값은 램프 제작 과정에서 램프에 대한 배광 시뮬레이션만으로 얻을 수 있으며 이미 제작된 램프의 경우 LMT장비와 같은 배광 시험기를 이용하여 측정할 수 있다.^[7]

그림 10은 제안된 방법을 이용하여 HID의 low beam을 조명하였을 때의 스크린에 나타난 결과를 암실 조건 아래에서 예측한 영상이다 그림 10(a)는 7.5m 미터 떨어진 배광 스크린을 약 5 lux의 형광등 조명 아래에서 촬영한 영상이며, 그림 10(b)는 HID low beam을 조명했을 때의 예측 영상이며 그림 10(c)는 HID low

beam과 HI high beam을 동시에 스크린에 조명했을 때 나타난 결과를 예측한 영상이다.



(a)

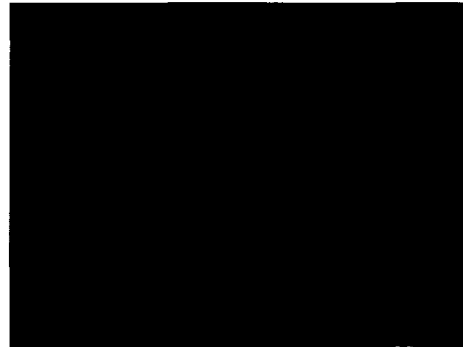


(b)

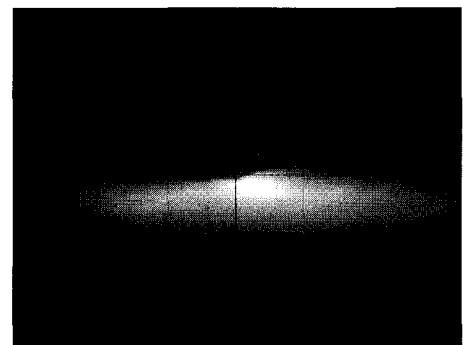
그림 9. 7.5m 거리에 위치한 흰색 테스트 스크린에 조명된 헤드램프 빔의 예측 영상 (a) 광도곡선 (b) 광도 곡선에 대한 조도 영상

Fig. 9. Predicted image of headlamp beam for a white test screen at 7.5m distance (a) Graph of luminous intensity (b) illuminance image for luminous intensity graph.

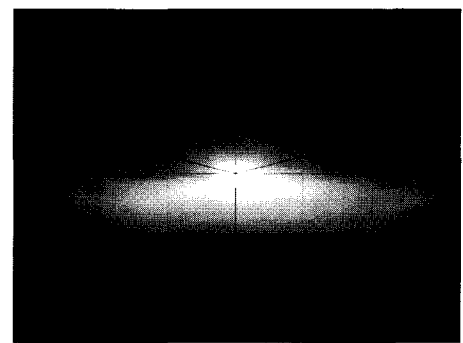
그림 11은 실제 노면 영상에 대한 결과이다. 그림 11(a)는 일광 아래에서 찍은 노면 영상이며 그림 11(b)는 HID빔을 점등하였을 때의 노면을 예측한 영상이고 그림 11(c)는 HI빔을 점등하였을 때의 예측 영상이며 마지막으로 그림 11(d)는 두 개의 헤드램프를 동시에 점등하였을 때의 예측 영상이다. 그림 10과 마찬가지로 제안된 영상을 보정된 모니터에 재현한 후 헤드램프 개발 전문가들에 대한 주관적인 평가를 하였으며, 결과 헤드램프 개발자의 주관적인 평가에 의해 재현된 예측 영상이 헤드램프가 조명된 실제의 야간 노면 환경을 매우 근접하게 예측하였음을 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 10. 배경 스크린에 대한 예측 결과 (a) 배경으로 사용된 배경 스크린 (b) HID low beam에 대한 예측 영상 (c) HID low beam과 HI high beam의 동시 조명했을 때의 예측 영상.

Fig. 10. Prediction image for a test screen (a)Test screen utilized as background image (b) Predicted image for HID with low beam (c)Predicted image for HID with low beam and HI with high beam.

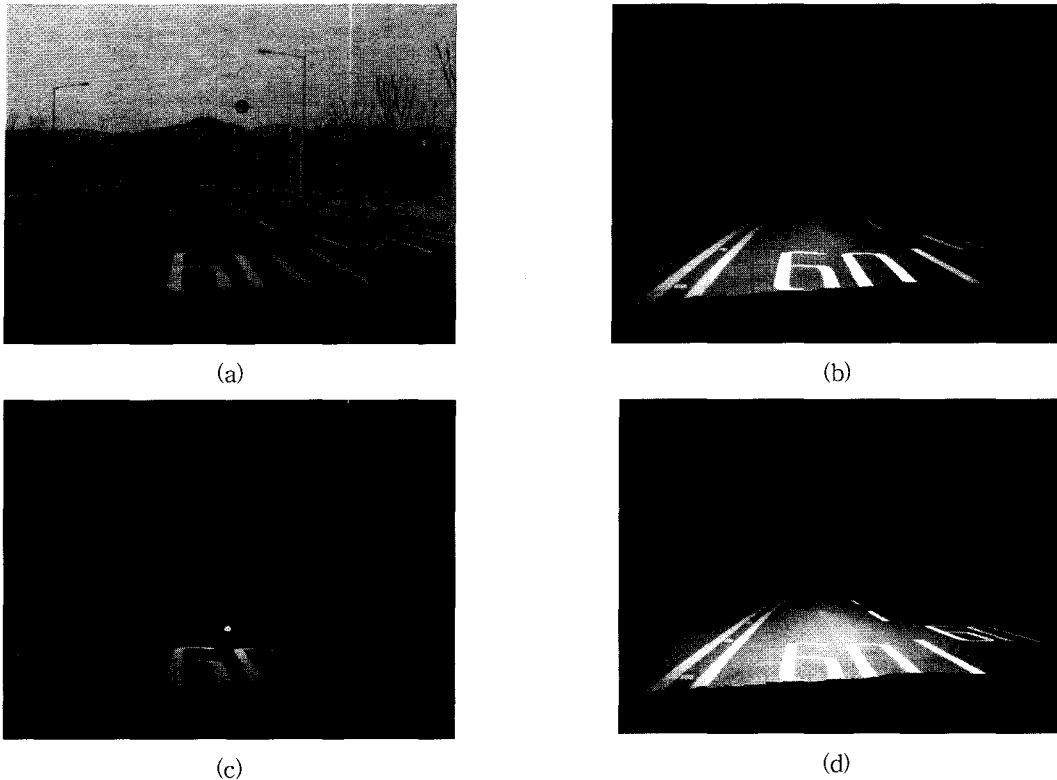


그림 11. 배경 노면 영상과 헤드램프가 조명된 야간 노면 추정 영상 (a) 배경 노면 영상 (b) HID램프 점등시 예측 영상 (c) H1 램프 점등시 예측 영상 (d) HID와 H1램프를 동시 점등한 예측 영상

Fig. 11. Background road image and predicted nighttime road images under automotive headlamps (a) background road image (b) predicted image under HID headlamps (c) predicted image under H1 headlamps (d) predicted image under HID and H1 headlamps.

VII. 결 론

본 논문은 헤드램프의 분광분포 및 거리에 따른 조도를 이용하여 촬영한 배경 노면영상으로부터 헤드램프가 점등된 야간 노면영상을 추정하는 배광 해석을 위한 실사영상 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 야간 노면 영상의 분광반사율을 추정하기 위해 주성분 분석 방법을 이용하였으며 위치에 따른 복수개의 헤드램프의 분광분포를 추정하기 위하여 조도의 크기에 따른 분광분포의 파형의 변화는 선형적이라는 가정 아래에서 선형모델에 의한 방법으로 복수개의 헤드램프에 대한 분광분포를 계산하였다. 제안된 실사영상 재현 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 헤드램프의 추정된 분광분포와 실측된 분광분포를 비교하였으며 실 영상과 모니터에 재현된 예측 영상에 대해 헤드램프 개발자들

에 의한 주관적인 재현성 평가 실험을 하였으며 결과 제안된 방법이 실제 도로 환경에서의 빔 패턴 및 빔의 색과 매우 근접함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Kitagawa and T. Abe, "Color appearance of a scene under automotive headlamp light," *SAE Technical Paper Series* 1999-01-0707, 1999.
- [2] J. Damasky, "A new software tool for performance simulation of headlamp pattern," *SAE Technical Paper Series* 1999-01-1215, 1999.
- [3] E. Angel, *Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1990.

- [4] Robert W. G. Hunt, "An eye for all seasons," *IS&T Reporter* vol. 13, no. 4, pp. 2-4, Dec. 1998.
- [5] Y. Miyake and Y. Yokoyama, "Obtaining and reproduction of accurate color images based on human perception," *Proc., SPIE* vol. 3300, pp. 190-197, 1998.
- [6] M. D. Fairchild, *Color appearance model* Addison-Wesley Longman, Inc., Massachusetts, 1997.
- [7] H. J. Song, K. Sakong, C. H. Lee, and Y. H. Ha, "Calculation of nighttime road image under automotive headlamp lights," *SAE Technical Paper Series* 2001-01-0300, 2001.

 저 자 소 개

李 徹 熙(正會員)

1995년 경북대학교 전자공학과(공학사), 1997년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사), 2000년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사), 2000년 3월~현재 경운대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 주관심분야는 색재현, 칼라프린팅, 컴퓨터비전

河 永 浩(正會員) 第32卷 B編 12號 參照

현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수