

일반논문-08-13-6-15

컬러 보정의 고속화를 위한 프로젝터-카메라 시스템의 컬러 혼합 성분 제거

이 문 현^{a)}, 박 한 훈^{a)}, 박 종 일^{a)†}

Eliminating Color Mixing of Projector-Camera System for Fast Radiometric Compensation

Moon-Hyun Lee^{a)}, Hanhoon Park^{a)}, and Jong-Il Park^{a)†}

요 약

프로젝터를 사용해서 영상을 프로젝션할 때의 결과는 스크린의 형태나 컬러, 주변 조명 등의 제반 환경에 의해서 달라진다. 원하는 영상을 얻기 위해서는 이러한 환경적인 요소를 고려하여 출력 영상을 화소별로 보정하는 기술이 필요하다. 컬러 보정은 이러한 기술 중 대표적인 것으로 스크린을 카메라로 촬영해서 주변 조명 상태나 스크린의 반사 특성 등에 대한 정보를 화소별로 얻은 뒤, 출력할 대상 영상을 이에 맞게 미리 변형해서 출력하는 기술이다. 이런 연산은 영상의 모든 화소에 대해 각기 다른 연산을 수행해야 되기 때문에 실시간 연산을 위해서는 계산 과정을 간략히 하는 것이 매우 중요한 일이다. 본 논문에서는 컬러 필터를 사용해서 프로젝터-카메라 시스템에서 서로간의 컬러 혼합을 제거함으로써 계산을 간략히 하는 방법을 제안한다. 실험을 통해, 컬러 혼합 요소를 충분히 감소시키면 채널 간 상호 간섭은 무시할 수 있으며, 제시된 방법이 영상 보정 결과의 품질을 유지하면서 계산 속도를 44%가량 증가시킬 수 있음을 보였다. 제시된 방법은 프로젝터를 사용한 대화면, 고화질 영상장치를 위해 중요한 요소 기술이 될 것으로 생각된다.

Abstract

The quality of projector output image is influenced by the surrounding conditions such as the shape and color of screen, and environmental light. Therefore, techniques that ensure desirable image quality, regardless of such surrounding conditions, have been in demand and are being steadily developed. Among the techniques, radiometric compensation is a representative one. In general, radiometric compensation is achieved by measuring the color of the screen and environmental light based on an analysis of camera image of projector output image and then adjusting the color of projector input image in a pixel-wise manner. This process is not time-consuming for small sizes of images but the speed of the process drops linearly with respect to image size. In large sizes of images, therefore, reducing the time required for performing the process becomes a critical problem. Therefore, this paper proposes a fast radiometric compensation method. The method uses color filters for eliminating the color mixing between projector and camera because the speed of radiometric compensation depends mainly on measuring color mixing between projector and camera. By using color filters, there is no need to measure the color mixing. Through experiments, the proposed method improved the compensation speed by 44 percent while maintaining the projector output image quality. This method is expected to be a key technique for widespread use of projectors for large-scale and high-quality display.

Keywords : Color mixing, Projector-Camera system, Color compensation, Projector-based Display system

a) 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

Hanyang Univ. Dept. of Electronics and Computer Engineering

† 교신저자 : 박종일(jipark@hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 문화체육관광부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-031-01, 영상 및 비디오 콘텐츠를 위한 계산사진학 기술 개발]

I. 서론

프로젝터가 널리 보급되면서 스크린의 형태나 컬러에 상관없이 보기 좋은 이미지를 출력할 수 있도록 하기 위한 많은 방법들이 연구되어왔다. 대표적인 방법으로 카메라와 프로젝트가 결합한 프로젝터-카메라 시스템을 이용한 연구를 들 수 있으며^{[1][2][3][7][8][11]}, 특히 일반적인 흰색 스크린이 아닌 곳에 프로젝트 영상을 투영할 경우에 미리 컬러를 보상하여 출력함으로써 사용자가 마치 흰색 스크린에서 영상을 보는 듯 정확히 영상을 재현하는 기술은 매우 흥미로운 연구 주제이다^{[6][7][9][11]}. 본 논문의 주된 목적은 이러한 프로젝터-카메라 컬러 보정에서 속도를 향상시키는 방법을 제안하는 것이다.

컬러 보정의 정의 및 방법은 일반적으로 Nayar 등이 제안한 컬러 광학 모델을 사용한다^{[5][6][7]}. 이 모델은 카메라와 프로젝트 사이의 컬러 변환을 3x3 행렬로 비교적 정확하게 표현할 수 있다. Bimber 등은 이를 발전시켜 다양한 빛 성분(inter-reflection, sub-surface scattering 등)을 고려한 보다 일반화된 광학 모델을 제안하였다^{[8][9][10]}. 이 모델들은 컬러 채널 간의 컬러 혼합(color mixing)을 고려하며 혼합 성분은 비대각 행렬의 값으로 표현된다. 컬러 혼합은 일반적인 프로젝터와 카메라의 각 채널의 응답 특성이 서로 간섭하기 때문에 발생하는 문제로, 정확한 컬러 보정을 하기 위해서는 컬러 혼합에 대한 고려가 반드시 필요하다. 그러나 이는 연산 속도 면에서 컬러 보정의 성능을 크게 저해하는 요소이다.

본 논문에서 컬러 보정의 연산 속도를 개선하기 위해서 제안하는 방법은 컬러 혼합을 제거하여 프로젝터-카메라 간의 컬러 변환 모델을 단순화 하는 것이다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위해 기존의 컬러 혼합을 고려한 방법과 품질, 속도 면에서 결과를 비교한다. 제안된 방법은 기존의 컬러 혼합을 모두 계산하는 방법들과 비교할 때 보정된 영상의 품질은 유지하면서 속도를 크게 향상시킬 수 있다.

본 논문의 구성은, 2장에서 컬러 보정을 수행하기 위한 광학 모델을 제시하고, 3장에서 컬러 혼합 성분을 모두 계산하는 컬러 보정 방법을 설명한다. 4장에서는 컬러 혼합 성분을 무시하는 컬러 보정 방법을 기술하고 그런 경우에

도 색 보정 성능을 유지하기 위한 방안을 제안한다. 이어 실험 결과를 제시하고 결론을 이끌어낸다.

II. 컬러 보정을 위한 광학 모델

컬러 보정은 투영될 영상의 컬러를 조절해서 결과 영상이 스크린 컬러나 주변 조명에 영향을 받지 않는 것처럼 보이도록 하는 기술이다. 이와 같은 기술을 위해서는 우선 프로젝터와 스크린, 카메라간의 광학 모델을 정의할 필요가 있다. 프로젝터 입력 영상으로부터 카메라 영상으로의 광학 모델은 그림 1과 같으며, 다음과 같이 표현된다.

$$C = \int c(\lambda) [a(\lambda)p(\lambda)I + f(\lambda)] d\lambda \tag{1}$$

프로젝터 입력값 I 에 프로젝터 스펙트럼 특성 $p(\lambda)$ 를 곱한 프로젝터 출력 스펙트럼은 $I_p(\lambda)$ 가 되며, 이것이 스크린 반사 특성 $a(\lambda)$ 에 곱해진다. 여기에 주변광 $f(\lambda)$ 가 더해지고 이를 카메라 스펙트럼 응답 특성 $c(\lambda)$ 에 의해 관측하면 카메라 출력값 C 가 결정된다.

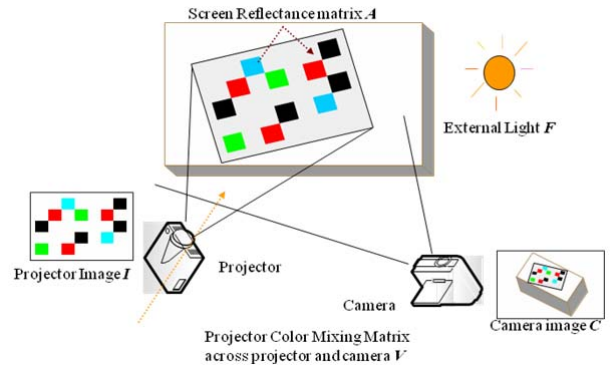


그림 1. 프로젝터-카메라 시스템의 광학 모델 개념도
Fig. 1. Modeling the color transform from projector to camera via screen.

여기서 프로젝터 출력 스펙트럼은 그 형태는 일정하고 출력의 강도만 변한다. 따라서 프로젝터에 대한 Red, Green, Blue 채널의 입력값 I_R, I_G, I_B 에 대한 스펙트럼 출

력 특성은 $p_{RGB}(\lambda) = p_R(\lambda)I_R + p_G(\lambda)I_G + p_B(\lambda)I_B$ 의 형태가 된다. 스크린이 이상적인 흰색이고 주변광이 없을 경우 카메라에서 본 프로젝터의 출력 특성은 프로젝터 출력 $p_{R,G,B}(\lambda)$ 에 카메라 응답특성 $c_{R,G,B}(\lambda)$ 를 곱한

$$\begin{aligned} C_R &= \int c_R(\lambda) [p_R(\lambda)I_R + p_G(\lambda)I_G + p_B(\lambda)I_B] d\lambda \\ C_G &= \int c_G(\lambda) [p_R(\lambda)I_R + p_G(\lambda)I_G + p_B(\lambda)I_B] d\lambda \\ C_B &= \int c_B(\lambda) [p_R(\lambda)I_R + p_G(\lambda)I_G + p_B(\lambda)I_B] d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

가 된다. 이를 행렬식으로 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int c_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_R(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_R(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \\ \int c_G(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_G(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \\ \int c_B(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_B(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int c_R(\lambda)a(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_R(\lambda)a(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_R(\lambda)a(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \\ \int c_G(\lambda)a(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_G(\lambda)a(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_G(\lambda)a(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \\ \int c_B(\lambda)a(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda & \int c_B(\lambda)a(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda & \int c_B(\lambda)a(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int c_R(\lambda)f(\lambda)d\lambda \\ \int c_G(\lambda)f(\lambda)d\lambda \\ \int c_B(\lambda)f(\lambda)d\lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 쓸 수 있다. 이는 스크린 반사 특성 $a(\lambda)$ 가 1이고, 주변광 $f(\lambda)$ 가 0인 경우에 대한 표현이 된다.

$a(\lambda)$ 와 $f(\lambda)$ 를 포함해서 일반적인 경우에 대해 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에 실험에 사용한 프로젝터와 카메라의 스펙트럼을 나타냈다. 일반적인 프로젝터-카메라 시스템의 스펙트럼은 그림 2와 크게 다르지 않다. 여기서 식 3의 전달 행렬의 각 줄은 그림 2(b)와 같은 형태가 된다. 그림 2(b) 그래프에서 큰 크기를 가지는 부분은 프로젝터와 카메라의 같은 채널이 곱해지는 부분으로 행렬의 대각성분이고, 작은 크기를 가지는 부분은 비대각 성분으로 프로젝터와 카메라의 스펙트럼 범위가 정확히 일치하지 않기 때문에 다른 채널과 겹치는 부분이다. 프로젝터의 출력을 카메라에서 관찰하면 프로젝터의 단일 출력에 대해서도 카메라의 모든 채널에서 응답이 나타나기 때문에 컬러 혼합 행렬에서도 주

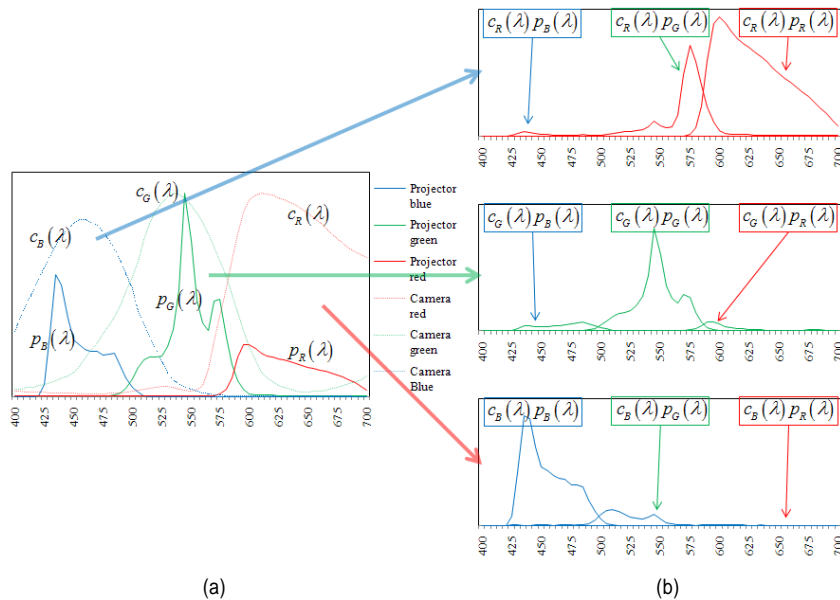


그림 2. (a) 프로젝터-카메라의 스펙트럼 특성, (b) (a) 구성에서 프로젝터 각 채널에 대한 카메라 출력 그래프

Fig. 2. (a) Projector and camera spectral reflectance curves, (b) channel-wise camera output spectrum determined by the reflectance curves of (a).

성분인 대각 원소들뿐만 아니라 비대각 성분에 대해서도 고려할 필요가 있다.

III. 컬러 혼합 행렬을 고려한 컬러 보정 방법

$c(\lambda), p(\lambda), a(\lambda), f(\lambda)$ 각각은 절대적인 크기를 갖지만, 본 논문에서는 이를 프로젝터 입력값 I 와 카메라 출력값 C 사이의 전달 함수로서만 다루고 있기 때문에 I 와 C 에 대한 상대값으로만 다룰 것이다.

식 4의 프로젝터-카메라 시스템의 전달함수에서

$$\int c_k(\lambda)a(\lambda)p_i(\lambda)d\lambda \approx A_{ki} \int c_k(\lambda)p_i(\lambda)d\lambda = A_{ki}V_{ki} \quad (5)$$

로 근사하고,

$$F_k = \int c_k(\lambda)f(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

로 나타내면 식 1은

$$\begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{RR} & V_{RG} & V_{RB} \\ V_{GR} & V_{GG} & V_{GB} \\ V_{BR} & V_{BG} & V_{BB} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} A_{RR} & A_{RG} & A_{RB} \\ A_{GR} & A_{GG} & A_{GB} \\ A_{BR} & A_{BG} & A_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 정리할 수 있다. 여기서 \otimes 기호는 행렬의 각 원소 간에 곱하라는 의미이다. 이때 카메라의 응답 특성과 프로젝터의 출력 특성의 비선형성은 이미 선형으로 보정된 것으로 가정한다⁴⁾.

컬러 혼합 행렬 V 는 특성을 알고 있는 카메라와 프로젝터를 사용하므로 미리 계산될 수 있다. 프로젝터의 스펙트럼 출력은 대부분의 경우 데이터시트가 없으므로 분광방사휘도계(spectroradiometer) 등을 사용해서 측정하고, 카메라의 스펙트럼 응답특성은 카메라 이미지 센서의 데이터시트로부터 구할 수 있다. 그 형태는 일반적으로 그림 2(a)와 같다. 그림 2(b)와 같이 프로젝터, 카메라 각 채널간의 스펙트럼을 서로 곱하고, 그 결과를 적분하면 V 의 각

원소값을 구할 수 있다. 주의할 점은 구한 값은 카메라 화이트밸런스나 노출 설정 등에 의해 달라지기 때문에 절대값으로는 의미가 없으며 각 대각원소에 대한 상대값으로만 의미가 있다.

C 와 I, V 를 제외한 A 와 F 를 계산하기 위해서는 몇 장의 임의의 영상을 프로젝터에서 출력하고 스크린에 반사된 영상을 카메라에서 캡처한 후, 식 7을 연립해 계산함으로써 구할 수 있다. 예를 들어 Red 채널만 달리한 두 장의 영상

$$I^{(1)} = [I_R^{(1)} \quad I_G^{(1)} \quad I_B^{(1)}]^T \quad \text{와} \quad I^{(2)} = [I_R^{(2)} \quad I_G^{(1)} \quad I_B^{(1)}]^T \quad \text{에 대해}$$

$$C^{(2)} - C^{(1)} = (V \otimes A)(I^{(2)} - I^{(1)}) \quad (8)$$

로 정리할 수 있고, 여기서 $(V \otimes A)$ 를 $V\%$ 이라고 하면,

$$\begin{aligned} \Delta C_R &= V_{RR}^{\%} \Delta I_R \\ \Delta C_G &= V_{GR}^{\%} \Delta I_R \\ \Delta C_B &= V_{BR}^{\%} \Delta I_R \end{aligned} \quad (9)$$

로 정리하여 A 중의 일부를 구할 수 있다. 유사하게 Green 채널과 Blue 채널만을 달리한 영상을 이용해서 A 의 모든 원소를 구할 수 있다. 프로젝터의 Green 채널만을 달리한 영상에 대한 카메라 값의 차이를 ΔC^{Green} , Blue 채널에 대한 카메라 값의 차이를 ΔC^{Blue} 라고 하면 $V\%$ 의 나머지 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta C_R^{Green} &= V_{RG}^{\%} \Delta I_G & \Delta C_R^{Blue} &= V_{RB}^{\%} \Delta I_B \\ \Delta C_G^{Green} &= V_{GG}^{\%} \Delta I_G & \Delta C_G^{Blue} &= V_{GB}^{\%} \Delta I_B \\ \Delta C_B^{Green} &= V_{BG}^{\%} \Delta I_G & \Delta C_B^{Blue} &= V_{BB}^{\%} \Delta I_B \end{aligned} \quad (10)$$

F 는 프로젝터에서 아무것도 비추지 않을 경우, 즉 $I^{(0)} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$ 에 대해서 식 7를 정리하면 $F = C^{(0)}$ 로

구할 수 있다. 또는 이미 $V^{\mathcal{C}}$ 를 알고 있다면, 식 7을 정리해 $F = C - V^{\mathcal{C}}I$ 로 구할 수도 있다.

일반적으로 $V^{\mathcal{C}}$ 과 F 를 구하기 위해서는 $I^{(0)} = [I_0 \ I_0 \ I_0]^T$, $I^{(R)} = [I_R \ I_0 \ I_0]^T$, $I^{(G)} = [I_0 \ I_G \ I_0]^T$, $I^{(B)} = [I_0 \ I_0 \ I_B]^T$ 의 4장의 영상을 사용한다.

스크린과 주변광을 고려했을 때 원하는 카메라 화소값 C 를 얻기 위해 미리 변형한 영상 I 는 식 7를 I 에 대해 정리해서 얻을 수 있다.

$$I' = V^{\mathcal{C}1}(C - F) \tag{11}$$

이 식 11을 사용해서 얻은 영상 I' 를 프로젝션한 결과를 카메라로 촬영한 결과 영상 C 는 원본 영상 I 와 동일하게 보이게 될 것이다.

IV. 컬러 혼합 행렬을 고려하지 않을 경우의 컬러 보정

행렬 V 는 프로젝터의 각 채널의 출력 스펙트럼이 카메라의 RGB 채널에서 받아들여질 때 각 채널에 간섭하는 정도를 나타낸다. 그림 2(b)의 경우에서 보듯이 카메라의 한 채널은 이에 해당하는 프로젝터 채널뿐만 아니라 다른 채널의 스펙트럼에도 반응하게 되어 그 곱은 그림 2(b)와 같이 9개의 성분을 가진다. 행렬 V 에서 프로젝터와 카메라간의 상응하는 채널간의 곱은 대각성분에 위치하게 되며, 다른 채널로부터의 결과는 비대각성분에 위치하게 된다. 프로젝터의 한 채널의 출력에 대한 결과로 카메라는 RGB 세 채널 모두에서 결과값을 가지게 되므로 컬러 보정에서는 이에 대한 고려가 필요하다.

식 7의 계산은 3번의 뺄셈과 6번의 덧셈 그리고 9번의 곱셈으로 구성되는데 프로젝터의 모든 화소에 대해 계산해야 하므로 많은 연산량을 필요로 하게 된다. 만약 행렬 V 의 비대각 성분이 없다면, 다시 말해 프로젝터의 한 채널에 대해 항상 카메라의 같은 채널에서만 반응하도록 한다면 식 7

은 다음의 식 12의 형태로 간략화 할 수 있다. 마찬가지로 식 11은 다음의 식 13과 같이 바꿀 수 있다. 따라서 전체 계산은 3번의 뺄셈과 3번의 곱셈으로 축소된다.

$$\begin{aligned} C_R &= V_{RR}^{\mathcal{C}}I_R + F_R \\ C_G &= V_{GG}^{\mathcal{C}}I_G + F_G \\ C_B &= V_{BB}^{\mathcal{C}}I_B + F_B \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} I'_R &= \frac{1}{V_{RR}^{\mathcal{C}}}(C_R - F_R) \\ I'_G &= \frac{1}{V_{GG}^{\mathcal{C}}}(C_G - F_G) \\ I'_B &= \frac{1}{V_{BB}^{\mathcal{C}}}(C_B - F_B) \end{aligned} \tag{13}$$

이 경우 $V^{\mathcal{C}}$ 과 F 를 구하기 위해 서로 다른 값을 가지는 두 장의 영상 $I^{(1)} = [I_R^1 \ I_G^1 \ I_B^1]^T$, $I^{(2)} = [I_R^2 \ I_G^2 \ I_B^2]^T$ 이 필요하다. 이 경우 특별한 컬러를 가지는 패턴 영상이 아니더라도 서로 다른 컬러를 가지는 두 장의 영상으로 계산이 가능하기 때문에 동영상을 재생하는 도중에도 $V^{\mathcal{C}}$ 나 F 를 실시간으로 계산할 수 있다.

이처럼 행렬 V 의 비대각 성분을 제거하기 위해서는 프로젝터나 카메라의 스펙트럼 특성을 변경하여 서로 간의 채널 사이에 교차하는 부분이 없도록 해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 카메라에 컬러 필터를 추가해서 카메라 각 채널의 스펙트럼 대역을 제한하는 방법을 제안한다.

그림 3은 실험에 사용한 프로젝터와 카메라, 필터의 스펙트럼 특성과 카메라와 프로젝터 각 채널을 곱했을 때의 결과를 나타낸 것이다. 그림 3(a)(b)에서 보듯이 원래의 프로젝터와 카메라 간에서는 상당량의 간섭이 존재하기 때문에 이를 무시하기가 어렵지만 적당한 필터를 사용하면 그림 3(d)와 같이 채널간의 교차되는 성분을 대부분 감소시킬 수 있다. 필터를 사용한 경우의 컬러 혼합 행렬은 식 14, 사용하지 않은 경우의 컬러 혼합 행렬은 식 15와 같다.

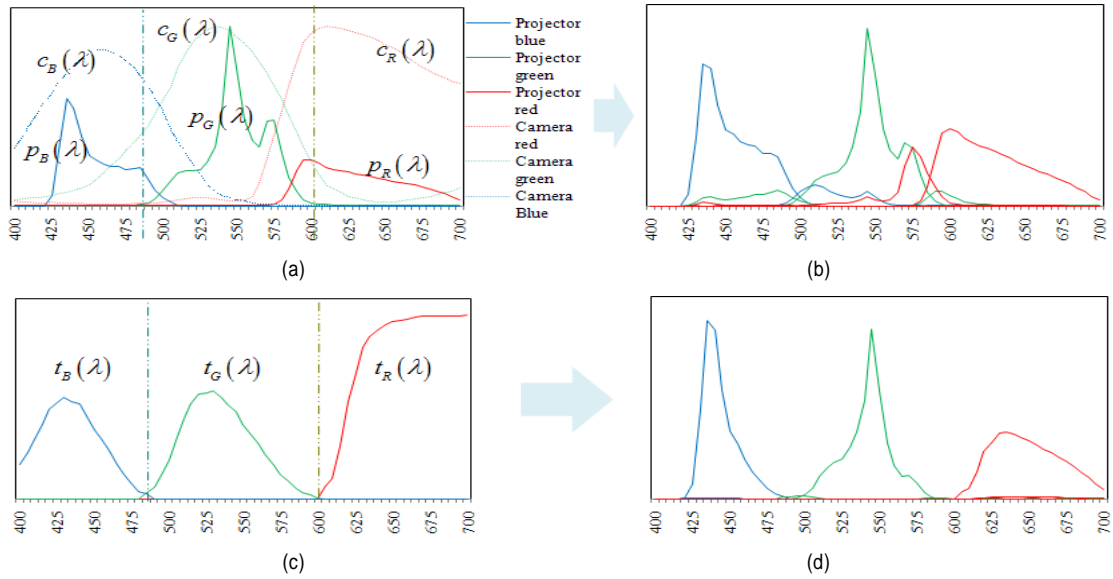


그림 3. (a) 프로젝터와 카메라의 스펙트럼 특성, (b) 프로젝터와 카메라 채널간의 곱, (c) 실험에 사용한 컬러 필터의 투과 특성, (d) (b)와 (c)의 곱
 Fig. 3. (a) Original camera and projector spectral reflectance, (b) multiplications between two reflectance curves of (a), (c) color filter transmittance, (d) multiplication between (b) and (c).

$$\begin{bmatrix} \frac{\int c_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_R(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_R(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} \\ \frac{\int c_G(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_G(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} \\ \frac{\int c_B(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_B(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0.2927 & 0.02192 \\ 0.0858 & 1 & 0.1380 \\ 0.0066 & 0.1768 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_R(\lambda)t_R(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda} \\ \frac{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_G(\lambda)t_G(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda} \\ \frac{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_R(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_G(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} & \frac{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda}{\int c_B(\lambda)t_B(\lambda)p_B(\lambda)d\lambda} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0.0195 & 0.0019 \\ 0.0068 & 1 & 0.0138 \\ 0.0026 & 0.0052 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $t_{R,G,B}(\lambda)$ 는 컬러 필터의 응답 특성이다. 식 14는

비대각성분의 크기가 대각성분의 10~30% 정도로 크기 때문에 무시하기 어렵지만, 필터를 사용해서 스펙트럼 대역을 제한한 경우에는 식 15에서 보듯이 색 혼합 성분을 2% 이하로 감소시킬 수 있기 때문에 무시해도 큰 차이가 없다.

V. 실험 결과

그림 4에 실험 환경을 나타내었다. 실험에 사용된 프로젝터는 SONY VPL-CX70^[12], 카메라는 Pointgrey Research Dragonfly^[13]이며 컬러 필터는 Kodak's WRATTEN filters^[14]를 사용했다. 분광방사휘도계는 Luzchem SPR-03 Spectroradiometer^[15]이며 프로젝터의 출력 스펙트럼을 측정하기 위해 사용했다.

그림 5은 식 7을 사용해서 텍스처가 있는 스크린에 컬러 보정한 결과로서 (a)원본 영상, (b)컬러 보정 없이 투영한 영상, (c)컬러 보정을 위해 변형한 영상, (d)컬러 보정된 결과 영상을 차례로 제시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 컬러 보정 후에는 스크린의 텍스처가 거의 눈에 띄지 않으며 원본 영상과 유사한 결과를 보인다.

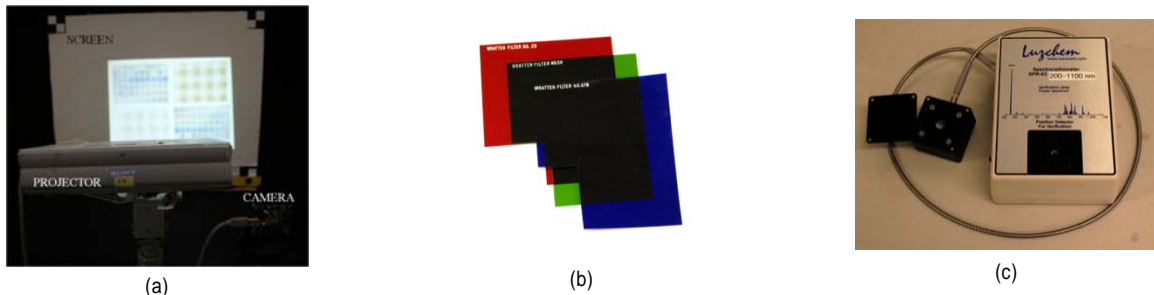


그림 4. (a) 프로젝터, 카메라, 스크린, (b) 컬러 필터, (c) 분광방사휘도계
 Fig. 4. Experimental environments. (a) Projector, camera, and screen with color texture, (b) color filters, (c) spectroradiometer



그림 5. 텍스처가 있는 스크린에서의 컬러 보상 결과. (a) 원본 영상, (b) 컬러 보정없이 투영한 스크린 영상, (c) 컬러 보정을 위해 변형한 프로젝터 입력 영상, (d) 보정 후 스크린 영상
 Fig. 5. An example of radiometric compensation results. (a) Original projector input image, (b) projection of (a), (c) pre-corrected projector input image, (d) projection of (c)



그림 6. 컬러 보정 결과비교. (a)는 흰 스크린에 대한 프로젝션이며, (b), (c), (d), (e)는 각각 텍스처가 있는 스크린에 대한 영상 보상 결과이다. (b) 컬러 필터 없이 비대각 요소를 고려했을 때, (c) 컬러 필터 없이 비대각 요소를 무시했을 때, (d) 컬러 필터를 사용하고 비대각 요소를 포함했을 때, (e) 컬러 필터를 사용하고 비대각 요소를 무시했을 때
 Fig. 6. Radiometric compensation results using different methods. (a) Projection on an ideal white screen, (b) not using color filters but using off-diagonal elements, (c) neither using color filters nor using off-diagonal elements, (d) using color filters but using off-diagonal elements, (e) using color filters and not using off-diagonal elements

그림 6은 컬러 혼합 행렬의 비대각 요소에 대한 고려와 컬러 필터를 사용하는 각각의 경우에 대한 컬러 보상 결과이다: (a) 흰색 스크린에 대한 프로젝션, (b) 컬러 필터를 사용하지 않고 컬러 혼합 성분을 고려했을 때, (c) 컬러 필터를 사용하지 않고 컬러 혼합 성분을 고려하지 않을 때, (d) 컬러 필터를 사용하고 컬러 혼합 성분을 고려했을 때, (e) 컬러

필터를 사용하고 컬러 혼합 성분을 고려하지 않을 때이다. 표 1은 그림 6의 (a)와 비교한 (b), (c), (d), (e)의 RMS 오차 측정 결과이다. 여기서 RMS 오차는

$$Error = \sqrt{\frac{\sum (I_{ideal} - I_{result})^2}{N_{all\ pixel}}} \quad (16)$$

표 1. 그림6의 컬러 보정 결과에서의 RMS 오차.

Table 1. RMS errors of radiometric compensation result in Fig. 6

Methods	Red	Green	Blue
(b) Not using color filters, using off-diagonal elements	3.274968	2.784226	2.807906
(c) Not using color filters, not using off-diagonal elements	10.377945	13.262959	6.922409
(d) Using color filters, using off-diagonal elements	3.865729	2.895452	7.220171
(e) Using color filters, not using off-diagonal elements	4.626186	6.195741	3.228133



그림 7. 컬러 보정 결과의 차이 영상. (a) 그림6(a) 영상과 6(b) 영상간의 차이영상이며, (b)는 6(a) 영상과 6(c) 영상간의 차이영상, (c)는 6(a) 영상과 6(d) 영상간의 차이영상, (d)는 6(a) 영상과 6(e) 영상간의 차이영상이다.

Fig. 7. Difference images of radiometric compensation results using different methods. (a) difference image between Fig. 6(a) to 6(b), (b) difference between 6(a) to 6(c), (c) difference between 6(a) to 6(d), (d) difference between 6(a) to 6(e).

이다.

그림 7은 그림 6의 각 결과(b), (c), (d), (e)와 (a)영상 간에 차이 영상이다. 모든 영상은 2배로 밝기를 조절했다. (a)와 (c), (d)는 별차이가 없지만, 컬러 필터를 사용하지 않고 컬러 혼합 성분을 고려하지 않은 (b)에서는 큰 오차를 보인다.

표 2는 색 혼합 성분을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 영상 보정 속도를 비교한 것이다. 이를 살펴보면 물리적인 컬러 필터를 사용하지 않고 비대각 요소를 무시했을 때는 결과가 큰 오차를 보이지만 컬러 필터를 사용해 컬러 혼합 성분을 제거했을 경우에는 고려하지 않았을 경우와 별 차이가 없었으며, 컬러 필터를 사용하지 않고 비대각 요

소를 고려했을 경우와도 큰 차이를 보이지 않았다. 결과적으로 제안된 방법을 이용하면 컬러 보정 성능에는 큰 차이가 없으면서도 속도 면에서는 44% 가량의 향상을 보였다.

VI. 결론

프로젝터-카메라 시스템을 이용한 컬러 보정에서 카메라와 프로젝터 간의 컬러 혼합 성분은 연산의 대부분을 차지하고, 실제 결과에도 많은 영향을 끼치는 요소이다. 컬러 혼합 성분은 카메라나 프로젝터의 스펙트럼 대역이 일치하지 않는데서 발생하는 문제이기 때문에 프로젝트에 컬러 필터를 사용하거나, 카메라에 컬러 필터를 사용해서 스펙트럼 대역을 제어하는 방법으로 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 카메라에 컬러 필터를 사용하여 컬러 혼합 요소를 제거함으로써 컬러 보정 성능의 저하 없이 연산량을 크게 감소시킬 수 있었다. 실제 임베디드 시스템을 사용하는 상용 컬러 보정 시스템에서는 연산 속도가 화면의 해상도를 제약하는 중요한 요소가 되므로, 컬러 필터를 사용하는 것은 화질을 떨어뜨리지 않으면서 성능을 향상시킬 수 있는

표 2. 컬러 보정 속도 [ms]

Table 2. Compensation Speed [ms]

Image size	Color mixing computed	Color mixing not computed
1024768	23.429	13.246
12801024	39.212	21.949
19201080	62.402	34.657
40002000	238.203	133.972

좋은 방법이 될 것이다.

사람의 시각 특성은 각 스펙트럼 대역이 매우 넓게 교차해서 분포하는 특성을 가지고 있기 때문에 카메라의 특성을 조작하는 컬러 보정 시스템은 한계가 있다. 컬러 보정의 목적은 인간의 눈에 최적의 영상을 제공하는 것이므로, 인간의 시각 특성과 가까운 스펙트럼 특성을 갖는 카메라와 레이저처럼 매우 좁은 파장을 가지는 광원을 사용하는 프로젝터를 사용하여 대각 성분이 제거된 프로젝터-카메라 시스템을 구성한다면 보다 효과적일 것이다.

참 고 문 헌

- [1] H. Park, M.-H. Lee, S.-J. Kim and J.-I. Park, "Surface-Independent Direct-Projected Augmented Reality," Proc. of ACCV'06, 892-901, Jan. 2006.
- [2] <http://www.merl.com/people/raskar/raskar.html#pubs>
- [3] O. Bimber and R. Raskar, Spatial Augmented Reality, A K Peters, 2005.
- [4] T. Mitsunaga and S.K. Nayar, "Radiometric Self Calibration," Proc. of IEEE CVPR'99, Vol.1, pp.374-380, Jun. 1999.
- [5] S.K. Nayar, H. Peri, M.D. Grossberg and P.N. Belhumeur, "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections," ICCV Workshop on Projector-Camera Systems 2003, Oct. 2003.
- [6] M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar and P.N. Belhumeur, "Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System," Proc. of IEEE CVPR'04, Vol.1, pp.452-459, Jun. 2004.
- [7] K. Fujii, M.D. Grossberg and S.K. Nayar, "A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments," Proc. of IEEE CVPR'05, Vol.1, pp.814-821, Jun. 2005.
- [8] O. Bimber, A. Emmerling and T. Klemmer, "Embedded Entertainment with Smart Projectors," IEEE Computer, Vol.38, No.1, pp.48-55, Jan. 2005.
- [9] A. Grundhöfer, and O. Bimber, "Real-Time Adaptive Radiometric Compensation," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 14, No. 1, pp. 97-108, Jan. 2008.
- [10] S. Zollmann, and O. Bimber, "Imperceptible Calibration for Radiometric Compensation," EUROGRAPHICS'07, Vol.26, pp. 61-64, Sep. 2007.
- [11] 박한훈, 서병국, 진윤중, 오지현, 박종일, "휴대형 지능형 프로젝션 시스템 개발," 대한전자공학회논문지 제44권 SP편, pp. 26-34, 2007년 7월.
- [12] Sony VPL-CX70 Projector. <http://bssc.sel.sony.com/BroadcastandBusiness/docs/brochures/vpl-cx70.pdf>.
- [13] Dragonfly Camera. <http://www.ptgrey.com/products/dragonfly/dragonfly.pdf>.
- [14] Kodak's WRATTEN filters. <http://www.edmundoptics.com/online-catalog/DisplayProduct.cfm?productid=1326>.
- [15] Luzchem SPR-03 Spectroradiometer. http://www.luzchem.com/pdf/SPR-03_specs.pdf.

저 자 소 개



이 문 현

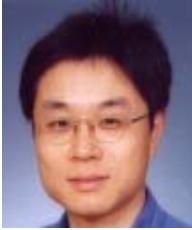
- 2005년 : 한양대학교 전자전기컴퓨터공학과 학사 졸업
- 2007년 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 석사 졸업
- 2008년 현재 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : 가상현실, 증강현실, HCI, 3차원 영상처리



박 한 훈

- 2000년 : 한양대학교 전자통신전파공학과 학사 졸업
- 2002년 : 한양대학교 전자통신전파공학과 석사 졸업
- 2007년 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사 졸업
- 2008년 : 현재 NHK 연구소 연구원
- 주관심분야 : 가상현실, 증강현실, HCI, 3차원 영상처리

저 자 소 개



박 종 일

- 1987년 : 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1989년 : 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1995년 : 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
- 1992년~1994년 : 일본 NHK방송기술연구소 객원연구원
- 1995년~1996년 : 한국방송개발원 선임연구원
- 1996년~1999년 : 일본 ATR지능영상통신연구소 연구원
- 1999년~현재 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 교수
- 주관심분야 : 가상현실, 증강현실, HCI, 3차원 영상처리, 컴퓨터그래픽스비전