
유색 스크린의 굴곡과 영상의 평균밝기를 고려한 프로젝터용 색 보정 기법

성수진* · 이철희**

A color compensation method for a projector considering non-flatness of color
screen and mean lightness of the projected image

Soo-Jin Sung* · Cheol-Hee Lee**

요 약

본 논문에서는 보정 영상을 프로젝터가 표현할 수 있는 범위로 콘트라스트(contrast)를 조절하여 주는 요소 (scaling factor)를 적용하여 색 보정영상을 획득하는 방법을 제안한다. 이 조절 요소는 입력영상과 사용된 표면의 평균 밝기를 이용하여 계산하였다. 또한 사용된 프로젝터 및 카메라의 특성화 과정에서 오는 오차와 부정확성을 해결하기 위하여 프로젝터와 카메라 양단간의 관계를 적용한다. 실험 결과에서 제안한 색 보정 방법이 임의의 표면으로 입력된 다양한 영상에 대하여 밝기를 유지하면서 클리핑 결함은 감소되어 화질이 개선된 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an algorithm both geometric correction using a grid point image and radiometric adaptive projection that dependent upon the luminance of the input image and that of the background. This method projects and captures the grid point image then calculates the geometrically corrected position by difference between the two images. Next, to compensate color, a corrected image is calculated by the ratio divided luminance of an input image by luminance of arbitrary surface. In addition, we found the scaling factor which controls the contrast to avoid clipping error. At this time, the scaling factor is dependent on mean image lightness when background is determined. Experimental results show that the proposed method achieves good performance and is able to reduce the perceived color clipping and artifacts, better approximating the projection on a white screen.

키워드

프로젝터, 색 보정, 기하보정, 유색표면

Key word

Projector, Color Collection, Radiometric Compensation, Color Screen

* 경북대학교 대학원 전자공학과
** 안동대학교 컴퓨터공학과 (교신저자)

접수일자 : 2009. 08. 03
심사완료일자 : 2009. 08. 31

I. 서 론

일반적으로 프로젝터는 백색 스크린을 필요로 한다는 환경적인 제약을 가지고 있다. 이러한 환경적인 제한은 휴대용 프로젝터의 경우에 더욱 문제가 된다. 휴대용 프로젝터의 경우 이동성의 장점을 가지는 데에 반해 백색 스크린을 항상 보유할 수 없기 때문에 사용에 제한이 될 수 있다. 따라서 현재 이러한 프로젝터의 환경적인 제약 없이 유색 곡면위에 고화질의 영상을 재현하는 프로젝터-카메라 시스템이 개발되고 있다.[1]~[5]

프로젝터-카메라 시스템이란 영상을 투영하였을 때, 백색 스크린에서 획득할 수 있는 고화질의 영상을 임의의 스크린에서 획득하기 위한 것으로 기하학적 형태와 색상의 왜곡을 보정하기 위하여 카메라를 장착한 시스템이다. 기하학적 보정은 투영면의 굴곡이나 객체의 모형에 의해 투영된 영상의 왜곡현상을 제거하는 것을 말한다. 이 보정방법에는 프로젝터 입력 영상과 사용자 시점 영상 사이의 기하 변환 행렬을 계산한 후, 프로젝터 입력 영상에 변환 행렬의 역함수를 적용하여 보정하는 방법이 있다.[6] 또 다른 방법으로 기하 변환 행렬을 위하여 structured light 기술을 이용하여 선형 삼각 방법(linear triangulation method)을 적용하는 것이 있다.[7]

또, 색이나 질감(texture)을 가지는 임의의 표면에 영상을 투영하면 공간적인 위치에 따른 반사율의 차이에 의해서 투영된 영상이 왜곡된다. 여기서 색 보정이란 백색 스크린에 투영하였을 때와 같은 결과를 얻도록 원본영상을 보정하는 것을 말한다. Oliver Bimber는 입력 영상의 휘도와 사용된 표면의 반사율을 이용하여 보정 영상을 계산하는 방법을 제안했다.[1][8] 이 방법은 간단한 수식으로 계산 될 수 있으나 표면이 어두운 경우 보정된 결과영상이 입력 영상의 계조를 다 표현하지 못하는 문제가 발생한다. 이러한 현상을 클리핑 결함(clipping error) 또는 클리핑 결점(artifact)이라고 표현하며 Bimber는 이를 해결하기 위하여 여러 대의 프로젝터들을 이용하여 영상을 투영함으로써 충분히 표현하지 못했던 입력 영상의 계조를 표현하였다. Nayar는 프로젝터와 카메라의 채널 사이에 색 혼합을 수행하기 위하여 각 화소별로 3x3의 색변환 행렬을 사용하고 있다.[2] 이 경우 채널별 색 변환이 선형적이라는 가정에서 수행함으로 정확도가 떨어지며 결과 영상에 대하여 클리핑

결점이 발생한다. Wang은 보정영상에서 발생하는 클리핑 결함을 제거하기 위하여 입력영상의 대비(contrast)를 압축하는데 이때 인간 시각 시스템의 속성을 적용하였다.[3] 이 방법은 흑백영상에 대하여 적용이 된다는 단점을 가지고 있다. 마지막으로 Park은 휘도 보상(radiometric compensation) 모델링에기반하여 카메라와 프로젝터간의 출력 특성을 구하여 보정된 영상을 만든다.[6] 이 방법은 컬러 영상에 히스토그램 평활화(histogram equalization)를 적용하여 보정 영상에 대비를 향상하기 위한 기술이다. 이것은 원본 영상의 대비도(contrast ratio)를 유지하지 못하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 정확한 카메라의 특성 커브를 적용하기 힘들다는 점과 색보정 시 발생하는 클리핑 결함을 해결하기 위하여 먼저, $m \times n$ 개로 구성된 격자점 영상을 사용하여 격자점간의 위치차를 이용하여 기하보정을 한다. 입력 영상의 평균 밝기에 따라 다른 비율을 적용하여 클리핑 결함을 줄여 영상의 밝기를 보존 하는 방법을 제안하였다. 이와 같은 방법을 적용하여 기존 방법의 문제점을 해결함으로써 투영된 영상의 화질을 향상 할 수 있다.

II. 기존의 프로젝터 영상의 화질 향상 기법

2.1 기존 카메라 특성곡선을 이용한 색보정 방법

Oliver Bimber는 사용된 표면의 색이나 질감에 의해 왜곡된 영상을 보정하기 위하여 시스템 경로를 고려한 보색 영상을 획득하는 색 보정 방법을 제안하였다.[1][8] 입력 영상이 프로젝터에 의해서 임의의 스크린에 투영이 되고 표면에 투영된 영상은 카메라를 이용하여 촬영을 하게 된다. 카메라로 촬영하는 것은 사용된 표면의 공간적인 위치에 따른 기하 및 색상을 측정하기 위하여 수행된다. 이후 획득된 표면 영상을 이용하여 입력 영상을 보정하여 표면에 투영하게 되며, 사용자는 백색 스크린에서와 같은 결과 영상을 볼 수 있다.

프로젝터로부터의 휘도 I 가 반사율 M 을 가지는 표면에 투영되었다고 가정한다. 사용된 표면의 한 화소에 대하여 프로젝터와 표면간의 형태인수(form factor) F 는 $F = f \cdot dA \cdot \cos(\alpha) / (r^2 \cdot \pi)$ 로 정의 된다. 여기에서 α

는 광선과 표면 사이의 각도이고, dA 는 표면 패치의 미소 영역, r 은 광원과 표면 사이의 거리이다. 비례 상수인 f 는 알려지지 않은 프로젝터의 매개변수를 처리하기 위하여 추가적으로 조절된다.

주변광원 E 와 투영된 영상의 휘도 I 는 각각 반사율 M 을 가지고 표면에 반사된다. 이때 카메라에 의해 촬영될 수 있는 휘도 R 은 다음과 같다.

$$R = EM + IFM \quad (1)$$

R, F, M , 그리고 E 값의 측정 및 추정이 가능하다면, 투영된 영상 휘도 I 는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$I = (R - EM) / FM \quad (2)$$

그러나 E, F , 그리고 M 은 직접적으로 측정할 수 없으므로, 암실 상황에서($E = 0$) 투영된 백색 영상($I = 1$)을 카메라로 촬영함으로써 FM 을 획득할 수 있고, EM 은 주변광원 하에서 투영된 흑색 영상($I = 0$)을 촬영함으로써 획득될 수 있다. 여기에서 EM 은 프로젝터의 블랙 레벨(black-level)을 포함한다.

그리고 사용되는 디지털 카메라는 실제 장면의 밝기인 휘도(radiance)와 최종으로 얻어진 그레이레벨(gray-level)과의 관계가 선형적이지 않다. 이 비선형적인 관계를 카메라 응답 곡선(Camera response curve) 또는 카메라 특성 곡선(Camera characteristic curve)이라 하고, 이를 추정하기 위해 많은 연구가 행해져 왔다.[10][11] 카메라 응답 곡선은 주로 휘도(radiance)와 노출 시간의 곱을 그레이레벨과의 관계로 나타내고, 다음과 같이 표현한다.

$$r \cdot t = f(z) \quad (3)$$

r 은 radiance, t 는 노출 시간, z 는 그레이레벨, 그리고 f 는 카메라 응답 곡선을 나타낸다. 기존의 방법에서 Mitsunaga와 Nayar는 두 영상의 radiance의 비율이 노출 시간의 비와 같음을 이용하여 카메라 응답 곡선을 다항식으로 모델링하여 추정하였는데, 이 방법에 대해 구체적으로 알아보겠다.[9] Mitsunaga와 Nayar는 카메라의 응답 곡선을 식 (4)와 같이 다항식으로 가정하였다.

$$I = f(z) = \sum_{n=0}^N c_n z^n \quad (4)$$

I 는 radiance, z 는 그레이레벨, N 은 다항식의 차수, c_n 은 계수를 나타낸다. 그리고 카메라의 응답 곡선의 추정은 노출 시간의 비율을 이용하였다.

$$\frac{I_{p,q}}{I_{p,q+1}} = \frac{k_p t_q}{k_p t_{q+1}} = R_{q,q+1} \quad (5)$$

p 는 화소, q 는 영상을 나타내고, k 는 카메라 설정에 의한 상수, t 는 노출 시간이고, $R_{q,q+1}$ 은 q 번째와 $q+1$ 번째 영상의 노출의 비율을 나타낸다. 식 (5)에서 보면 radiance의 비율이 노출 시간의 비율과 같음을 알 수 있다.

$$R_{q,q+1} = \frac{f(z_{p,q})}{f(z_{p,q+1})} = \frac{\sum_{n=0}^N c_n z_{p,q}^n}{\sum_{n=0}^N c_n z_{p,q+1}^n} \quad (6)$$

$R_{q,q+1}$ 은 알고 있는 값이고, 식 (6)을 풀어 c_n 으로 식 (4)의 카메라의 응답 곡선을 추정할 수 있다. 일반적인 카메라 응답 곡선은 그림 1과 같다.

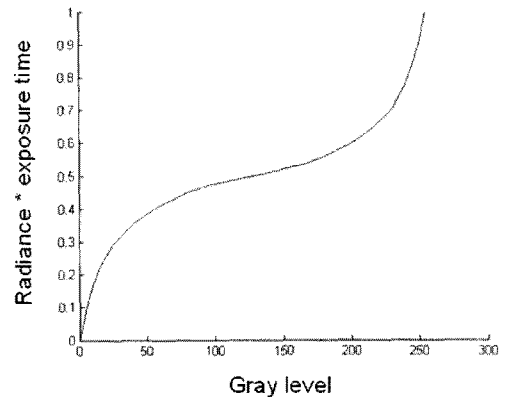


그림 1. 카메라 응답 곡선
Fig. 1. A camera response curve

2.2 기존의 기하학적 변환 및 색 보정 방법의 문제점

제시된 기하 보정 방법은 여러장의 gray-coded binary 패턴을 스크린에 투영하여야 하므로 프로젝터와 카메라간의 동기화를 맞춰줄 수 있는 추가적인 하드웨어를 필요로 한다. 또한 획득된 패턴을 이용하여 선형 삼각 방법을 이용하여 스크린이 평평한 조각들의 모임으로 구성되어 있다는 가정 하에 스크린의 표면을 삼각형 단위의 매쉬형태로 재구성한다. 이렇게 얻어진 삼각형의 작은 영역으로 구성된 매쉬들을 정상적인 매쉬와의 각 영역별 호모그래피를 구하여 각기 작은 삼각형 단위로 워핑하여 보정된 결과 영상을 얻는다. 이러한 과정에서 각 매쉬에 대한 각각의 3x3 행렬의 호모그래피를 구해야 하므로 계산량의 증가와 긴 처리시간, 그리고 각 매쉬 마다의 3x3 행렬을 저장하기 위한 메모리 등이 문제화 될 수 있다.

기존의 색 보정 방법은 수식 (2)에서 보는 것과 같이 원본 영상과 표면 영상과의 비율로 계산이 된다. 만약 표면 영상(FM)이 입력 영상보다 어두울 경우, 보정영상 I 는 1보다 큰 값이 되어 클리핑 결함이 발생하게 된다. 이는 입력 영상의 계조를 보정 영상이 다 표현하지 못하기 때문이다. 이와 같이 사용된 표면의 색이 보이게 되면 사용자는 많은 불편함을 가지게 된다.

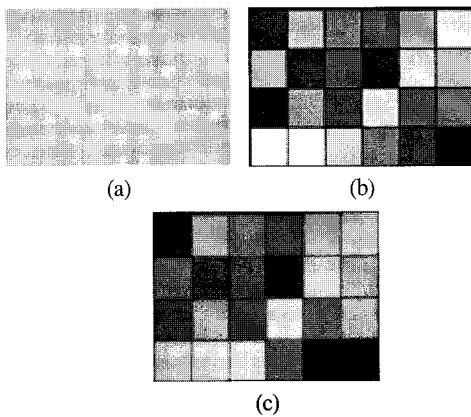


그림 2. 기존의 색 보정 방법의 문제점; (a) 카메라로 촬영된 표면 영상 (b) 원본 영상 (c) 클리핑 결함을 포함하는 결과

Fig. 2. The problem of the conventional radiometric compensation; (a) captured image of the surface (b) original image (c) resulting image including the clipping error

그림 2는 클리핑결함을 포함하는 결과 영상을 보여주고 있다. 그림 2의 (a)와 같은 색과 무늬를 가지고 있는 표면에 그림 2의 (b)와 같은 맥베스 차트(macbeth chart) 영상을 투영한 경우, 기존 방법을 적용한 결과 영상은 그림 2의 (c)에서 보여주는 것처럼 어두운 영역에서는 바른 결과를 얻을 수 있지만, 밝은 영역에서는 클리핑 결함이 발생하여 원영상의 계조가 다 표현되지 않는 것을 볼 수 있다.

III. 제안한 프로젝터 영상의 화질 향상 기법

제안한 프로젝터-카메라 시스템에서 기하 및 색 보정 방법은 기하학적 보정에 있어서 데이터 양이나 계산량을 줄이기 위하여 한 장의 격자점 영상을 사용하였으며, 색 보정에서의 클리핑 결함 등을 최적으로 하기 위하여 입력 영상에 의존적인 색 보정을 고려한다. 그림 3은 제안한 보정방법의 전체 흐름도를 나타낸다. 먼저, 스크린의 기하학적 왜곡을 보정하기 위하여 $n \times m$ 개의 격자점 (grid point)으로 구성된 한 장의 영상을 투영한다. 투영된 영상은 공간적인 위치에 따른 곡률에 의해 기하학적으로 왜곡된다.

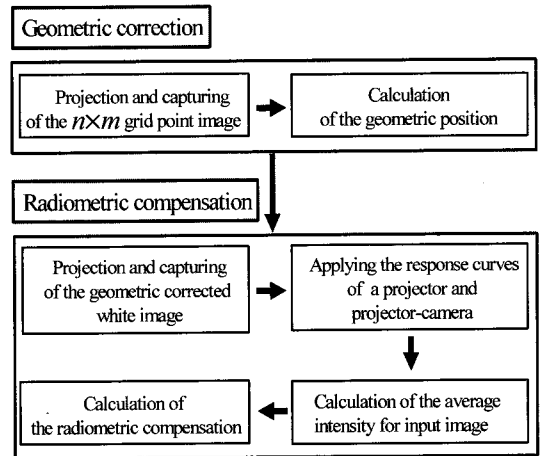


그림 3. 유색 곡면에서 제안한 프로젝터 영상의 화질향상 방법의 흐름도

Fig. 3. Block-diagram of the proposed method for the quality improvement at everyday surface

이를 카메라로 촬영하여 원본 격자점 영상과 비교하여 각 포인트들이 얼마나 이동되었는지를 비교한다. 이동 정도를 이용하여 기하학적 왜곡을 고려한 위치 보정 값을 얻는다. 격자점 이외에 화소에 대하여는 이진 선형 보간 방법을 수행한다. 다음으로 색 보정을 위하여 사용된 표면의 반사율을 얻기 위하여 백색영상을 기하 보정한 후 투영한다. 이를 카메라로 촬영하여 프로젝터와 카메라 특성 곡선을 적용하여 프로젝터의 출력휘도 값으로 변경한다. 입력영상도 프로젝터의 출력휘도 값으로 변경한 후 두 값을 이용하여 색 보정영상을 계산하게 된다. 입력영상이 사용된 표면의 밝기보다 밝은 경우에 발생하는 클리핑 결함을 해결하기 위하여 입력영상의 밝기를 고려한 영상의존적인 색 보정 방법을 제안한다.

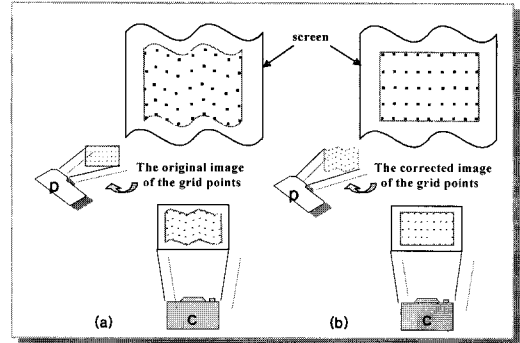


그림 4. 곡면에 투영된 그리드 포인트 영상; (a) 기하 보정 전 (b) 기하 보정 후
Fig. 4. The projected grid points on the arbitrary surface: (a) before geometric correction (b) after geometric correction

3.1 격자점 영상을 이용한 입력 영상의 기하변환

임의의 표면에 영상을 투영하게 되면 표면이 가지는 굴곡이나 모양에 의해 투영된 영상이 형태적으로 왜곡되게 된다. 이를 해결하기 위하여 격자점 영상을 사용하여 보정한다. $n \times m$ 개의 격자점(grid point)을 가지는 한 장의 영상을 투영하게 되면 영상이 그림 4(a)에서 보는 것과 같이 왜곡되게 된다. 이를 카메라를 이용하여 촬영하게 되고, 이렇게 획득된 영상과 투영한 원본 영상을 이용하여 각각의 포인트들을 대응시킨다. 각 대응된 포인트들은 그림 5에서와 같이 원본 포인트와 투영된 포인트 간의 위치를 비교한다. 기하학적 왜곡에 의해 두 포인트 간의 위치 차이가 발생하게 된다.

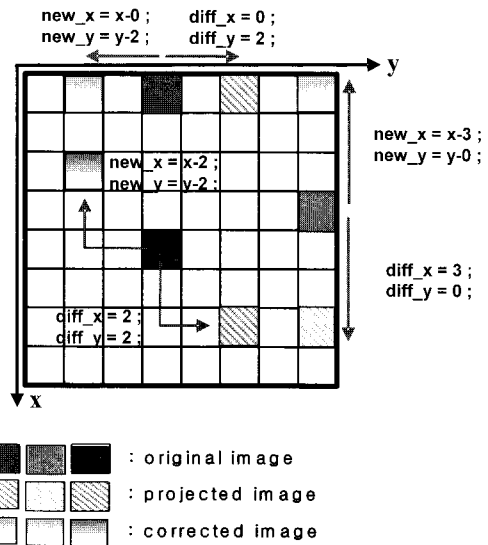


그림 5. 기하학적 보정을 위한 선형 기하변환
Fig. 5. Linear transform for the geometric compensation

$$\begin{aligned} diff-x &= x-x' \\ diff-y &= y-y' \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 x, y 는 원본 영상의 행과 열의 좌표 값이며, x', y' 는 투영된 영상의 행과 열의 좌표 값이다. 발생한 위치 차이만큼 영상이 왜곡되는 것이므로 보정영상의 투영될 위치 값은 원 영상의 포인트에서 차이 값 만큼을 반대 방향으로 이동한다.

$$\begin{aligned} n-x &= x+diff-x \\ n-y &= y+diff-y \end{aligned} \quad (8)$$

예를 들면, 그림 5에서 원본영상에 (5, 4) 위치에 존재하는 한 포인트가 사용된 표면에 투영되면서 (7, 6) 위치에 놓여졌다면 원본 영상과 투영된 영상간의 위치 차는 x방향으로 2, y방향으로 2만큼이 된다. 이 값을 이용하여 위치 보정에 의해 투영될 새로운 좌표 값 (3, 2)이 되는 것이다. 모든 포인트에 대하여 같은 방법으로 보정된 위치 값을 구했다면 포인트 이외에 내부 화소에 대하여는 이

진 선형 보간법을 이용하여 계산한다. 이렇게 입력 영상의 모든 화소에 대하여 보정된 위치 값을 영상 크기의 룩업테이블에 저장해 두고 투영할 영상의 위치 값을 변경하여 투영하게 되면 사용자는 평평한 스크린에서와 같은 결과 영상을 볼 수 있게 된다. 계산한 보정된 위치 값은 사용된 표면이 바뀔 때마다 처음 한번 계산 처리를 한 후 계속 사용 가능하게 된다.

3.2 프로젝터 영상의 색 보정을 위한 수학적 모델링
기존에 사용된 색 보정 방법에 대하여 본 논문에서 프로젝터와 카메라의 특성 곡선을 적용하기 위하여 수식을 다음과 같이 유도한다. 그림 6은 프로젝터-카메라 시스템에 대한 데이터 경로를 보여주고 있다.

백색 스크린에 원본 영상을 투영하였을 경우에 결과 영상과 같은 영상을 임의의 스크린에서 획득하기 위하여 보정영상을 투영하게 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_p^c(x, y) \cdot s(x, y) = I_p^o(x, y) \cdot s^w(x, y) \quad (9)$$

여기에서 $I_p^c(x, y)$ 는 보정된 영상, $I_p^o(x, y)$ 는 원본 영상, $s^w(x, y)$ 는 백색 스크린의 반사율, 그리고 $s(x, y)$ 는 사용된 표면의 반사율이다.

이때, 백색 스크린의 반사율($s^w(x, y)$)을 1로 가정하자. 이때에 보정된 영상($I_p^c(x, y)$)에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$I_p^c(x, y) = \frac{I_p^o(x, y)}{s(x, y)} \quad (10)$$

표면의 색(반사율)을 획득하기 위하여 백색 영상($I_p^w(x, y)$)을 투영한다. 투영된 백색 영상은 카메라에 의해 촬영이 되는데 획득된 영상($d_c^w(x, y)$)은 다음과 같다.

$$f_c(I_p^w(x, y) \cdot s(x, y)) = d_c^w(x, y) \quad (11)$$

여기서, $I_p^w(x, y)$ 는 투영될 백색 영상이며, $d_c^w(x, y)$

는 투영된 백색 영상을 카메라로 획득한 영상이 된다. 백색 영상의 휘도($I_p^w(x, y)$)를 1로 보면 표면 영상은 다음과 같다.

$$s(x, y) = f_c^{-1}(d_c^w(x, y)) \quad (12)$$

수식 (10)과 (12)를 정리하면 보정영상은 원본영상의 휘도 값과 백색영상을 투영했을 때 촬영된 영상의 비율로 계산된다.

$$I_p^c(x, y) = \frac{I_p^o(x, y)}{f_c^{-1}(d_c^w(x, y))} \quad (13)$$

여기에서 입력영상의 휘도 값은 원본 영상에 프로젝터 응답 곡선(response curve)을 적용한 값이므로 $I_p^o(x, y) = f_p(d_p^o(x, y))$ 로 표현할 수 있다. 이를 적용한 보정 영상에 대한 수식은 다음과 같다.

$$d_p^c(x, y) = f_p^{-1}\left(\frac{f_p(d_p^o(x, y))}{f_c^{-1}(d_c^w(x, y))}\right) \quad (14)$$

이 수식은 프로젝터와 카메라의 응답함수를 적용하여야 한다. 카메라 응답함수를 대신하여 프로젝터와 카메라 간의 응답함수에 기반한 색 보정을 하기 위하여 다음과 같이 수식을 유도할 수 있다.

$$d_p^c(x, y) = f_p^{-1}\left(\frac{f_p(d_p^o(x, y))}{f_p(f_p^{-1}(f_c^{-1}(d_c^w(x, y))))}\right) \quad (15)$$

프로젝터와 카메라 간의 관계를 확인하기 위하여 백색 스크린($s^w(x, y)$)에 투영된 영상과 카메라로 획득한 영상과의 관계를 파악한다. 원본 영상은 획득된 영상을 카메라와 프로젝터의 역 응답곡선을 각각 순차적으로 적용함으로써 얻을 수 있다.

이것은 $d_p(x, y) = f_p^{-1}(f_c^{-1}(d_c(x, y)))$ 으로 표현할 수 있다. 즉, $f_p^{-1}(f_c^{-1}())$ 은 다음에 언급되어진 프로젝터와 카메라 간의 응답함수를 표현한 것이다.

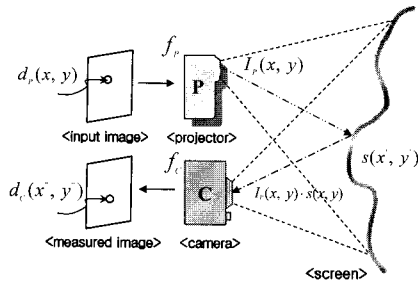


그림 6. 프로젝터-카메라 시스템 경로

Fig. 6. The data-flow pipeline for a projector-camera system

3.3 프로젝터와 카메라의 응답 함수의 추정

색 보정 영상을 계산하기 이전에 카메라와 프로젝터 간의 장치 특성화를 수행한다. 프로젝터의 경우 분광 측색기를 이용하여 쉽고 정확하게 특성화가 가능하지만 카메라의 경우 정확한 장치 특성화를 얻는 것이 힘들다. 본 논문에서는 카메라로 획득한 표면 영상에 대하여 카메라의 역 응답함수를 적용하는 대신 프로젝터와 카메라 간의 RGB 대 RGB 응답함수를 사용함으로써 정확하면서 간단히 처리한다. 특성화를 획득하기 위한 실험은 암실에서 기존의 사용되고 있는 방법을 이용한다.[15][16] 프로젝터의 특성화는 각 채널당 일정간격의 레벨값을 가지는 17장의 패치를 투영하고 이를 분광 측색기를 이용하여 각 패치의 XYZ값을 측정한다. 측정된 XYZ 값과 프로젝터에서 투영한 RGB간의 관계를 도출한 것이 그림 7(a)이다. 그리고 프로젝터와 카메라 간의 응답함수는 프로젝터와 같은 환경에서 일정간격의 그레이 패치 17장을 투영하고 이를 카메라로 촬영한다. 이렇게 얻어진 카메라의 RGB와 프로젝터에서 투영한 RGB 간의 관계를 도출하며, 이를 프로젝터-카메라 응답 함수라 한다.

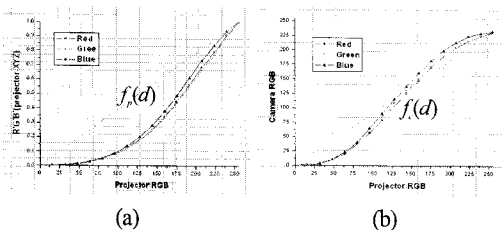


그림 7. 특성 곡선; (a) 프로젝터 (b) 프로젝터-카메라
Fig. 7. Response curves; (a) projector (b) projector-camera

그림 7(b)는 원본 패치와 카메라로 획득한 패치 영상의 RGB 대 RGB에 대한 그래프를 보여주고 있다. 각 얻어진 응답함수는 수식 (15)의 색 보정 처리에 적용된다.

3.4 클리핑 결합제거를 위한 프로젝터영상의 색 보정

앞서 언급 한 것처럼 수식(15)의 경우 원본영상의 휘도가 사용된 표면의 최대 반사율 보다 큰 경우에 계산된 휘도가 1이 넘게 되어 클리핑 결합이 발생한다. 이는 표면의 최저 밝기로 정규화하여 보정하는 방법을 사용하여 해결할 수 있다. 즉, 사용된 표면의 최저값을 갖는 화소에 255가 투영되도록 하는 인수를 적용한다. 이는 다음과 같이 백색 영상의 휘도와 사용된 표면의 반사율간의 최대 비율을 분모에 적용하여 계산할 수 있다.

$$d_p^c(x, y) = f_p^{-1} \left(\frac{f_p(d_p^o(x, y))}{f_p(f_p^{-1}(f_c(d_c^w(x, y)))) * sclae} \right)$$

$$sclae = \max \left(\frac{f_p(d_p^w(x, y))}{f_p(f_p^{-1}(f_c(d_c^w(x, y))))} \right) \quad (16)$$

수식 (16)의 경우 사용된 표면에서 최저 밝기를 가지는 화소에 대응하는 원본영상의 화소 값을 투영하여 주는 방법을 사용하였다. 이 방법을 사용할 경우 클리핑 결합 없이 표면의 색이 보정되지만 사용된 표면의 최저 밝기 값이 많이 어두울 경우, 결과 영상의 밝기가 감소하게 된다. 영상의 밝기 감소는 화질을 떨어뜨리게 된다.

이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 입력영상의 평균 밝기를 이용하여 사용되는 표면과의 클리핑 결합 정도에 따른 색 보정 방법을 제안한다. 이는 사용된 표면이 가지는 밝기영역에 대하여 다른 비례 인자를 적용함으로써 밝기 손실을 최소화 하면서 클리핑 결합을 최대 보정할 수 있다. 먼저 표면의 최대 또는 최소 밝기값을 찾는다. 그림 8은 사용된 표면 일부분과 밝기를 표현한 것이다. 이는 사용된 표면 영상(백색 영상을 투영한 후 카메라로 획득한 영상)를 프로젝터의 출력 휘도 $(f_p(f_p^{-1}(f_c^{-1}(d_c^w(x, y)))))$ 로 변경한 것이다. 그림에서와 같이 스크린의 범위는 3개의 영역으로 고려한다. 이 영역은 사용된 표면의 최대 밝기 이상의 영역, 최소 밝기 이하의 영역, 그리고 최대 밝기와 최소 밝기의 중간 영역으로 나누어 고려한다.

그림 9는 원본 영상의 밝기를 구하는 과정을 보여준다. 입력 영상의 모든 화소에 대하여 $CIEXYZ$ 값을 획득한다.[16] 획득된 XYZ 값을 이용하여 입력영상에 대한 밝기 값을 계산하게 된다. Lab 공간의 L 요소가 밝기에 있어서 인간의 인지적 측면이 적용되어져 있다. 따라서 본 논문에서는 계산된 XYZ 의 Y 값이 아닌 인간 시각을 근사화하여 디자인된 모델로 사람이 색 혹은 밝기를 인지하는데 균일성을 가지는 Lab 의 L (lightness)을 사용한다. 입력 영상에 대하여 밝기(L)값을 계산하고 평균함으로써, 입력 영상의 평균 밝기를 계산할 수 있다.

그리고 앞서 언급된 특성 곡선을 구하기 위하여 각 채널 당 17단계의 패치를 사용하였다. 이에 대한 정확도를 확인하기 위하여 특성화에 대한 색차(ΔE_{ab}^*)를 계산하였다. 색차를 구하기 위하여 먼저 계산된 XYZ 공간의 값을 Lab 공간으로 변환한다. $CIELAB$ 값이 계산되면 수식 (17)에 의해 색차(ΔE_{ab}^*)를 계산할 수 있다.

$$\Delta E_{ab}^* = \left[\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} \right]^{1/2} \quad (17)$$

여기에서 ΔL^* , Δa^* 그리고 Δb^* 값은 백색 스크린에 투영된 패치를 분광 측색기를 이용하여 측정된 값과 수식 (18)을 이용하여 계산한 값 사이에 Lab 차의 의미한다. 계산된 색차를 막대그래프(histogram)로 표현하면 그림 10과 같다. 사용된 테스트 패치는 각 채널당 5단계의 등 간격으로 125개의 패치가 사용되었으며 평균 색차가 0.7031로 높은 정확도를 얻었다.

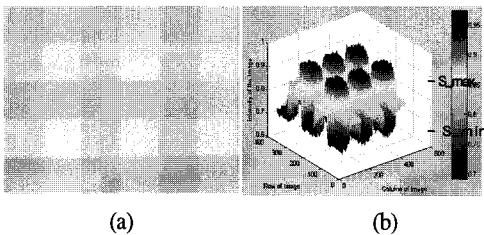


그림 8. 사용된 표면과 그 밝기범위; (a) 색과 질감이 있는 표면 영상 (b) 표면영상의 밝기 범위
Fig. 8. The used surface and the intensity range; (a) a colored and textured surface (b) the intensity range reflected by surface

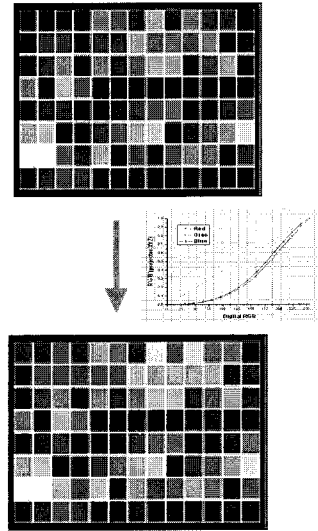


그림 9. 입력 영상의 밝기 획득 과정
Fig. 9. The process obtaining the intensity of the input image

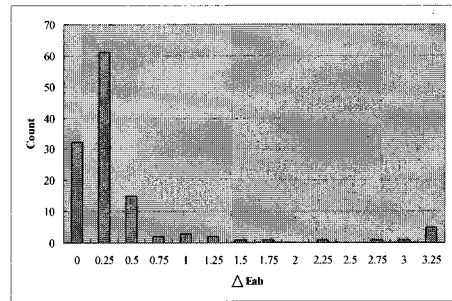


그림 10. 프로젝터의 측정값과 계산값의 색차그래프
Fig. 10. A histogram of color difference between the measured and estimated data for the projector

사용된 표면의 분석과 입력 영상의 평균 밝기를 계산했다면 이를 이용하여 색 보정영상을 영상에 의존적으로 계산할 수 있다. 입력 영상의 평균 밝기가 사용된 표면의 최대 밝기(s_{max}) 보다 크다면 입력영상이 대체로 밝아 결과 영상의 많은 부분에서 클리핑 결점이 발생하여 관찰자로 하여금 불편함을 야기 할 수 있다. 또 사용된 표면의 최소 밝기(s_{min}) 보다 작다면 입력영상은 대체로 어둡게 되어 결과 영상에서 클리핑 결점이 발생하는 화소가 적게 되므로 상대적으로 관찰자가 잘 인지하지 못하게 된다. 따라서 이 경우에는 비례 요소의 값을

적용하지 않는다. 다음으로 입력영상의 평균밝기가 최대 밝기(s_{max})와 최소 밝기(s_{min})의 중간 영역에 존재할 경우이다. 이 경우에 입력 영상의 평균 밝기가 해당 영역에 놓여진 위치에 따라 비례적으로 적용할 수 있게 된다. 입력 영상의 평균 밝기가 최소 밝기(s_{min})에 가까울수록 영상이 어두우므로 변수, $interp$ 의 값을 크게 하여 사용된 비례 요소(scale factor)의 값을 적게 한다. 즉, 입력 영상이 어두울수록 클리핑 결함을 적게 제거하고 영상의 밝기를 유지하게 되고 입력 영상이 밝을수록 클리핑 결함이 크기 때문에 영상의 밝기 보다는 결함을 줄이는데 더 큰 비중을 둔다. 이를 수식으로 적용하게 되면 다음과 같다.

$$scale = \begin{cases} \frac{f_p(d_p^w)}{s_{min}} & , L_{avg} \geq s_{max} \\ \frac{f_p(d_p^w)}{interp} & , s_{min} \leq L_{avg} < s_{max} \\ 1 & , L_{avg} < s_{min} \end{cases}$$

$$interp = s_{max} * (1.0 - L_{avg}) + s_{min} * L_{avg} \quad (18)$$

여기에서 s_{min} 과 s_{max} 는 그림 8의 (b)에서 보는 것처럼 사용된 표면의 최소 밝기 값과 최대 밝기 값을 나타낸다. $f_p(d_p^w)$ 는 백색 영상을 투영했을 때의 휘도 값이므로 1로 적용할 수 있다.

입력 영상에 의존하여 영상을 처리하므로 밝은 영상은 밝기를 조금 줄더라도 색 보정을 좀더 잘 처리하는데 중점을 두고 어두운 영상의 경우 클리핑 결함이 적게 발생하므로 클리핑 결함을 줄이는 색 보정 보다 밝기를 유지하는데 중점을 두어 처리한다.

IV. 실험 및 결론

보다 밝기를 유지하는데 중점을 두어 처리한다. 실험에 사용된 표면은 색과 질감이 있는 커튼 천을 사용하여 여러 영상을 투영하였다. 위에서 제안한 방법은 주변 광원을 고려하지 않았으므로 실험은 암실에서 진행되었다. 또한 사용된 표면의 기하학적 모양이 바뀔 때 마다 표면의 기하관계를 획득하여야 하므로 이 실험에서는 고정된 표면을 사용하였다.

4.1 기하학적 보정에 대한 결과

그림 11은 그리드 포인트 영상을 이용한 기하학적 보정을 위한 변환 위치 값을 구하는 과정이다. 그림 11의 (a)는 14×19 개의 그리드 포인트 영상이다. (b)는 이 영상을 굴곡이 있는 스크린에 투영하여 카메라로 촬영한 것이다. 두 영상을 이용하여 각각의 대응하는 포인트들을 매핑하고 이 두 포인트들의 위치 차를 계산하여 변형된 위치 값을 계산한다. (c)는 기하 보정한 영상이며 (d)는 사용된 표면에 보정 영상을 투영하였을 때 결과 영상으로 사용된 굴곡면에서 영상이 보정된 것을 볼 수 있다. 그리드 포인트 영상은 사용된 스크린의 왜곡 정도에 따라 변형하여 사용할 수 있다.

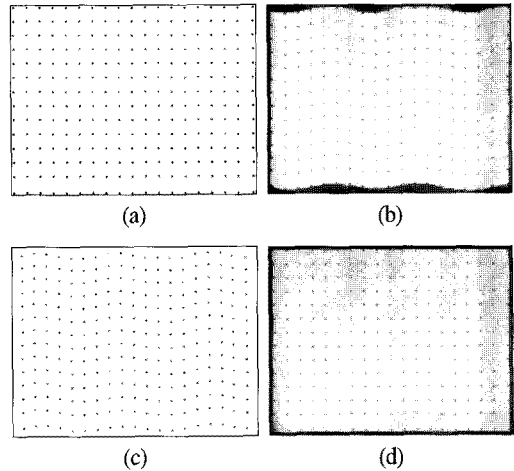


그림 11. 그리드 포인트를 이용한 기하학적 보정 영상;
(a) 원본 영상 (b) 투영된 영상
(c) 기하학적 보정 영상 (d) 결과 영상
Fig. 11. Geometric correction with the grid point:
(a) original image (b) projected image (c) geometric corrected image (d) projected resulting image

그림 12는 실영상을 사용한 경우이다. (a)에서 보이는 굴곡을 가지는 커튼에 (b)영상을 투영하면 표면이 가지는 굴곡에 의해 (c)와 같이 보이게 되고 이를 보정하게 되면 (d)와 같은 보정 영상을 얻을 수 있게 된다. 이 영상이 투영되면 관찰자는 (e)와 같은 결과 영상을 볼 수 있게 된다.

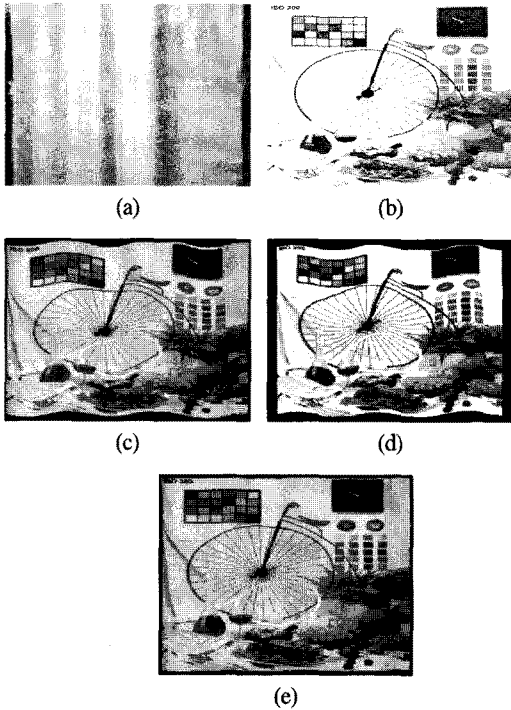


그림 12. 실영상의 기하학적 보정 결과 영상;
 (a) 사용된 표면 (b) 원본 영상 (c) 투영된 영상
 (d) 기하학적 보정 영상 (e) 결과 영상

Fig. 12. Geometric correction with the real image;
 (a) used screen (b) original image (c) projected image
 (d) geometric corrected image (e) resulting image

4.2 색 보정에 대한 결과

입력 영상의 평균 밝기를 이용하여 3영역으로 나누어 고려하였다. 사용된 표면의 반사율에 대하여 최대 값 (s_{max})과 최소 값(s_{min})을 기준으로 입력 영상의 평균 밝기가 최대 값 이상, 최대 값과 최소 값 사이, 그리고 최소 값보다 작은 경우로 나뉜다. 먼저 그림 13은 사용된 표면의 최고 밝기와 최저 밝기 사이에 있는 경우이다. 이 경우는 영상의 밝기 정도에 따라 적용 비율을 달리 한다. 밝은 영상은 적용 비율을 크게 하여 클리핑 결함을 감소 시키는데 중점을 두고 어두운 영상은 비율을 낮추어 밝기 손실을 줄이는데 중점을 둔다. (a)에서와 같이 노란색의 체크무늬가 있는 커튼에 (b)의 영상이 투영되었을 경우, 기존 방법에 의한 결과 영상은 (c)에서 보는 것처럼 밝은 영역에서 클리핑 결함이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이를 앞서 언급한 표면의 최저 반사율로 정규화한 경우

의 결과를 (d)에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 클리핑 결함 없이 보정된 것을 확인할 수 있다. 하지만 원본 영상과 비교하여 많이 어둡다. 이를 제한한 방법으로 처리한 경우 (e)에서처럼 클리핑 결함을 최소로 줄이면서 밝기를 유지할 수 있다.

$$s_{min} \leq L_{avg} < s_{max}$$

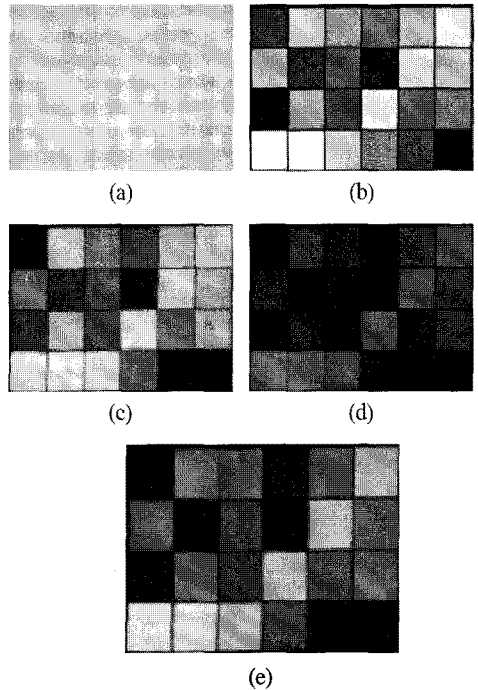


그림 13. 색 보정 결과 영상; (a) 사용된 스크린
 (b) 원본 영상 (c) 기존 방법 (d) 스크린의 최저 밝기로 정규화한 방법 (e) 제안한 방법

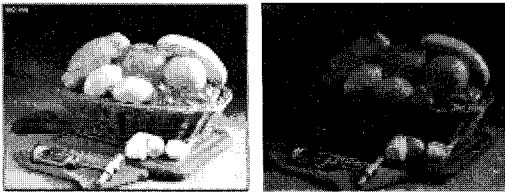
Fig. 13 The resulting images of the radiometric compensation;
 (a) used screen (b) original image (c) previous method (d) qualified method to the lowest intensity (e) proposed method

그림 14는 사용된 표면의 최저 밝기보다 어두운 영상의 경우이다. (a)는 기존 방법에 의한 결과 영상이며, (b)는 사용된 표면의 최저 밝기로 정규화한 결과 영상이다. 이 경우에는 기존의 색 보정 방법을 적용하여도 클리핑 결함의 발생이 적다. 따라서 비례 요소를 적용하지 않고 기존 방법을 그대로 사용하게 된다.

그림 15는 입력 영상이 사용된 표면의 최고 밝기보다 밝은 경우이다. (a)는 기존 방법에 의한 결과 영상이며,

(b)는 사용된 표면의 최저 밝기로 정규화한 결과 영상이다. 이 경우에는 입력 영상의 밝기가 대체적으로 밝기 때문에 많은 부분에서 클리핑 결함이 발생한다. (b)결과 영상에서 볼 수 있듯이 입력영상이 밝기 때문에 최저 밝기로 정규화하여 클리핑 결함을 줄일 수 있게 된다.

$L_{avg} < s_{min}$

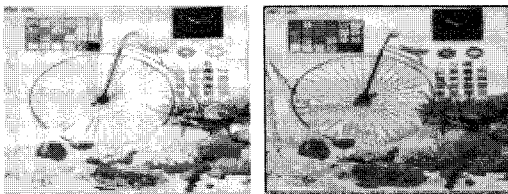


(a) (b)

그림 14. 색 보정 결과 영상; (a) 기존 방법 (d) 스크린의 최저 밝기로 정규화한 방법

Fig. 14. The resulting images of the radiometric compensation; (a) previous method (b) the qualified method to the lowest intensity

$L_{avg} > s_{max}$



(a) (b)

그림 15. 색 보정 결과 영상; (a) 기존 방법 (d) 스크린의 최저 밝기로 정규화한 방법

Fig. 15. The resulting images of the radiometric compensation; (a) previous method (b) the qualified method to the lowest intensity

V. 결론

결과에서 보여주듯이 입력 영상에 따라 다른 비율을 적용함으로써 입력 영상의 밝기가 감소되는 것을 최소화하면서 기존 방법의 문제점이었던 클리핑 결함 및 결점이 감소되었던 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 일상생활에서 볼 수 있는 표면에 투영

된 프로젝터 영상의 화질을 기하 및 색 보정을 통하여 향상하는 방법을 제시하였다. 색 보정에 대하여 기존의 카메라의 특성화에 대하여 정확한 특성화를 구하는 것이 어렵다는 문제를 해결하기 위하여 프로젝터와 카메라 간의 응답함수를 사용하여 카메라의 특성곡선을 대체하였다. 그리고 색 보정 영상을 계산하기 위하여 사용된 표면의 반사된 밝기를 분석하고 표면의 최대, 최소 휘도와 입력 영상의 평균 밝기에 따라 3영역으로 나누어 고려하였다. 이와 같이 처리한 결과는 입력 영상의 밝기를 최대한 유지하면서 클리핑 결함을 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 입력영상이 밝은 경우에 클리핑 결함이 많이 발생하게 된다. 이 경우에 입력영상의 밝기는 조금 감소하였지만 클리핑 결함이 줄어들어든 것을 확인할 수 있으며, 입력영상이 어두운 경우에는 클리핑 결함이 대부분 발생하지 않기 때문에 이 경우에는 수행을 하지 않는다. 마지막으로 입력영상의 평균 밝기가 너무 밝거나 너무 어둡지 않다면 이는 그 비율에 맞추어 적용 계수를 조절하는 것으로 클리핑 결함을 줄일 수 있었다.

그러나 제안한 방법은 입력영상의 평균밝기를 사용하여 영상 전체를 조절하는 방법으로 극단적인 경우에 대하여 결과가 좋지 않을 수 있다. 이는 본 논문에서 제안된 방법이 입력영상의 평균밝기를 이용하여 영상 전체에 같은 요소를 적용하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 향후 영상 전체에 적용한 다음 부분적으로 발생하는 부분을 고려하는 방법을 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] O.Bimber and A.Emmerling, "Embedded Entertainment with Smart Projectors," *IEEE Computer*, vol. 38, no. 1, pp. 56-63, 2005.
- [2] S.Nayar, H.Peri, M.Grossberg, and P.Belhumeur, "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfection," *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems*, 2003.
- [3] D.Wang, I.Sato, T.Okabe and Y.Sato, "Radiometric Compensation in a Projector-Camera System based on the Properties of Human Vision System," *IEEE International Workshop on Projector-Camera System*,

2005.

- [4] K.Fujii, M.D.Grossberg and S.K.Nayar, "A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments," *conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 20-25, 2005.
- [5] M.D.Grossberg, P.Harish, and S.K.Nayar, "Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System," *conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 452-459, 2004.
- [6] H.Park, M.H.Lee, S.J.Kim and J.I.Park, "Surface-Independent direct projected augmented Reality," *ACCV*, pp. 892-901, 2006.
- [7] J.Giibring, "Dense 3D Surface Acquisition by Structured Light Using Off-the Shelf Components," *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measuring, SPIE*, vol. 4309, pp. 220-231, 2001.
- [8] O.Bimber and A.Emmerling, "Multifocal Projection: A Multi-projector Technique for Increasing Focal Depth," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, no. 4, pp. 658-667, July/Aug., 2006.
- [9] T.Mitsunaga and S.K.Nayar, "Radiometric self calibration," *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 374-380, 1999.
- [10] M.Brown, A.Majumder and R.Yang, "Camera-Based Calibration Techniques for eamless Multi-projector Displays," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 11, no. 2, pp. 193-206, Mar-Apr. 2005.
- [11] L.Cerman and V.Hlaváč, "Exposure Time Estimation for High Dynamic Range Imaging with Hand Held Camera," *Computer Vision Winter Workshop*, 2006.
- [12] Y.Kwak and L.MacDonald, "Characterisation of a desktop LCD projector," *Displays 21*, pp. 179-194, 2000.
- [13] D.R.Wyble and M.R.Rosen, "Color Management of Four-Primary Digital Light Processing Projectors," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 17-24, 2006.

저자소개



성수진(Soojin Sung)

2006년 2월 : 경주대학교
정보통신공학과 학사
2008년 2월 : 경북대학교 대학원
전자공학과 석사

2008년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과
박사과정

※ 관심분야 : 영상처리, 정보통신일반



이철희(Cheolhee Lee)

1995년 2월 : 경북대학교
전자공학과 학사
1997년 2월 : 경북대학교 대학원
전자공학과 석사

2000년 8월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사
2000년 3월 ~ 2003년 8월 : 경운대학교 컴퓨터공학과
전임강사

2003년 9월 ~ 현재 : 안동대학교 컴퓨터공학과 부교수
※ 관심분야 : 영상처리, 색재현, 디스플레이 특성화