

# 전통적 사진 기법에 기반한 컬러 영상의 흑백 변환

장혁수<sup>°</sup>

최민규

광운대학교

hsjang@cs.kw.ac.kr, mgchoi@kw.ac.kr

## Color2Gray using Conventional Approaches in Black-and-White Photography

Hyuk Su Jang<sup>°</sup>

Min Gyu Choi

Kwangwoon University

### 요약

본 논문에서는 전통적인 사진 기법에 기반하여 대비가 뚜렷한 흑백 영상을 얻기 위한 새로운 방법을 제안한다. 사진가들은 대비가 뚜렷한 흑백 사진을 얻기 위해 촬영 시 대비 필터(contrast filter)를 사용하여 특정 색이 부각된 흑백 필름을 얻고, 인화 시 버닝(burning)과 닷징(dodging) 같이 국지적 노출을 조절하는 기법을 사용하였다. 본 논문에서는 이러한 흑백 사진 기법에 대한 디지털 버전을 제안하고 이에 기반하여 영상의 시각적 특징을 최대한 유지하는 최적화 기법을 제안한다. 또한, 인접 픽셀 간의 유사 가중치를 이용하여 경계를 감안한 연속적인 국지적 노출을 얻게 한다. 제안한 기법은 GPU상에서 구현 가능하며 메가픽셀 영상에 대해서도 시각적 특징을 유지하는 흑백 영상을 대화적 시간 안에 획득할 수 있다.

### Abstract

This paper presents a novel optimization-based saliency-preserving method for converting color images to grayscale in a manner consistent with conventional approaches of black-and-white photographers. In black-and-white photography, a colored filter called a *contrast filter* has been commonly employed on a camera to lighten or darken selected colors. In addition, *local exposure controls* such as dodging and burning techniques are typically employed in the darkroom process to change the exposure of local areas within the print without affecting the overall exposure. Our method seeks a digital version of a conventional contrast filter to preserve visually-important image features. Furthermore, conventional burning and dodging techniques are addressed, together with image similarity weights, to give *edge-aware local exposure* control over the image space. Our method can be efficiently optimized on GPU. According to the experiments, CUDA implementation enables 1 megapixel color images to be converted to grayscale at interactive frames rates.

**키워드:** 비사실적 렌더링, 인지기반 렌더링, 대비 필터링, 닷징, 버닝

**Keywords:** non-photorealistic rendering, perceptually-based rendering, contrast filtering, dodging and burning

## 1. 서론

디지털 영상 매체의 큰 발전으로 흑백텔레비전이나 모니터가 사라졌음에도 불구하고, 여전히 흑백 인쇄 장치들이 널리 사용되고 있다. 또한, 디지털 카메라 시대에도 흑백 사진은 여전히 인기 있는 분야로써 디지털 카메라의 번들 소프트웨어나 포토샵 같은 상용 프로그램을 통해 컬러영상의 색상 정보를 제거하여 흑백 영상을 쉽게 만들 수 있다. 컬러영상을 흑백 영상으로 변환하는 가장 일반적인 방법은 색이 지닌 명도, 색상, 채도 정보 중 명도를 이용하는 것이다. 이 방법은 간단하면서도 효율적이기 때문에 널리 사용되고 있지만, 색의 명도만을 고려하기 때문에 그림 2에서와 같이 컬러영상에서 색차에 의해 보이던 시각적 특징이 흑백 영상에서 사라지는 문제가 발생할 수 있다.

컬러 영상의 시각적 특징을 유지한 흑백 영상을 얻기 위해

최근 여러 연구들이 제안되고 있다[1, 2, 3, 4, 5]. 하지만, 이러한 연구들은 이미 동일한 문제를 풀기 위해 널리 사용되고 있는 여러 흑백 사진 기술에 기반하지 않았다. 본 논문에서는 컬러영상의 흑백 변환 시 시각적 특징을 유지하기 위해 흑백 사진가들이 사진 촬영이나 인화 시 사용한 방법들[6, 7]과 최근에 제안된 최적화 기반의 방법[1]에 착안한 새로운 흑백 변환 방법을 제안한다.

흑백 사진가들은 색차에 의해 생기는 시각적 특징을 유지하기 위해 카메라에 대비 필터라고 불리는 유색 필터를 사용하였다. 대비 필터는 선택된 색에 따라 필름에 감광되는 빛의 양을 조절하여 특정 색이 부각된 흑백 사진을 얻게 할 수 있다[6]. 예를 들어, 붉은색의 대비 필터는 녹색 잎사귀에 비해 붉은색의 꽃을 밝게 하기 위해 사용된다. 또한, 인화 과정에서 버닝과 닷징 같이 국지적으로 노출을 조절하여 대비를 향상시키는 방법도 사용되고 있다[7]. 버닝은 추가적인 노출을 주어 국지적



PCA[min, max]



[Gooch et al. 2005]



[Smith et al. 2008]



대비 필터링+ 국지적 노출

그림 1: 일출(모네 작)에 대한 기존연구와 본 연구의 결과 흑백 영상 비교



그림 2: 포토샵을 이용한 일출(모네 작)에 대한 흑백변환

으로 어둡게 만드는 기법이고, 닷징은 노출을 위한 빛을 물리적으로 차단하여 국지적으로 밝게 하는 기법이다. 포토샵 같은 상용 프로그램들은 이러한 흑백 사진 기술들을 기능적으로 제공하고 있다. 포토샵에서 사용자는 대비 필터 기능을 하는 채널 믹서와 국지적 노출을 조절하는 번 및 닷지 도구들을 이용하여 원하는 흑백 영상을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 대비 필터, 버닝, 닷징 같은 흑백 사진의 전통적인 대비 조절 기법을 적용하여 원본 컬러영상의 시각적 특징이 흑백 영상에서도 유지될 수 있도록 하였다.

본 논문의 목표는 원본 컬러 영상의 시각적 특징이 흑백 영상에서도 충분히 유지되도록 하는 것이다. 이를 위해 원본 영상에서 인접한 픽셀 간의 명도와 색차에 의한 시각적 특징을 Gooch 등[1]이 제안한 방식을 이용하여 정의한 후, 전통적인 흑백 사진술의 대비 필터 및 국지적 노출 조정 방법을 통해 시각적 특징을 최대한 만족시키기 위한 목적함수를 설계하였다.

Gooch 등이 제안한 방법과의 본질적인 차이는 목적함수에서 고려되는 인접 픽셀의 개수이다. Gooch 등은 한 픽셀의 인접 픽셀로 주어진 영상의 모든 픽셀들을 고려한데 반해, 본 논문에서 제안한 방법은 인접 픽셀과의 유사 가중치 및 그에 따른 경계를 감안한 국지적 노출을 이용함으로써 어느 한 픽셀에 가장 인접한 8개의 픽셀만을 고려하였다. 이러한 차이는 목적함수의 구조를 병렬 연산을 수행하는데 매우 효율적으로 만들었으며 GPU를 활용할 경우 메가픽셀의 컬러 영상도 대화적 시간(5-10fps) 안에 흑백 영상으로 변환할 수 있게 하였다.

## 2. 기존 연구

컬러 영상을 흑백 영상으로 변환하는 것은 3차원 색 공간을 1차원 흑백 공간으로 사상하는 문제가 된다. 따라서 어떻게 공간을 축소하는 것이 가장 좋은 방법인지를 찾아 해결할 수 있다. 가장 대표적인 방법은 주성분 분석을 이용하는 것이다. 색 공간상에서 색들의 분포를 통해 가장 큰 고유 값에 대응하는 고유벡터를 찾은 후 그 위에 색들을 투영함으로써 흑백 영상을 얻는 것이다. 하지만 이 방법은 색 공간에 전적으로 의존

하기 때문에 주성분 벡터 위에 투영된 값들을 어떻게 스트레치(stretch)할 것인가에 따라 흑백 영상의 질이 크게 달라진다. 또한, 아령 같이 특정한 모양의 색 분포를 가진 영상의 경우 결과 영상이 만족스럽지 못할 뿐 아니라 색의 역전현상도 발생할 수 있다[4].

Gooch 등은 원본 컬러 영상에서 인접한 픽셀들 간의 시각적 특징을 변환된 흑백 영상의 픽셀들 간에서도 최대한 유지시키기 위한 목적함수를 설계하였다[1]. 이 목적함수는 어느 한 픽셀에 가장 인접한 8개의 픽셀들만을 고려할 경우 연속적으로 인접해 있는 동일 색의 픽셀들 간에 일관성을 유지할 수 없는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 Gooch 등은 어느 한 픽셀의 인접 픽셀들로서 모든 픽셀들을 고려하였다. 이는 부수적으로 영상 공간 전체에 걸쳐 색의 일관성을 보장해 줄 수 있기도 하지만, 픽셀 수의 제곱에 비례하는 수행 시간을 요구함으로써 메가픽셀 같은 큰 사이즈의 영상에는 적용할 수 없는 치명적인 결함이 있다.

Rasche 등은 색의 역전 현상을 방지하는 동시에 원본 영상의 시각적 특징을 최대한 유지하는 부분적으로 선형적인 사상을 통해 컬러 공간을 흑백 공간으로 변환하였다[4]. 우선, 원본 영상을 대표하는 256개의 주요한 색들을 선별한 후, 역전 현상 방지를 위한 부등식 조건을 만족하며 원본 영상의 시각적 특징 유지를 최대화 하는 최적화를 수행하였다. 그 이외의 색들은 색의 일관성을 유지하도록 미리 배치된 256개의 주요한 색들을 이용하여 흑백 공간상에서 선형보간 하였다. 이 방법은 색의 일관성을 보장하며 역전 현상으로부터 자유롭지만, 최적화를 위한 목적함수에 매우 많은 제약조건들이 추가되어야 하며 이로 인해 수행시간이 현저히 느려지는 단점이 있다.

Smith 등은 시각적으로 정확한 흑백 영상을 획득하기 위한 빠르고 간단한 방법을 제안하였다[5]. 먼저, 헬름홀츠 콜라우슈(Helmholtz-Kohlrausch) 색 효과를 바탕으로 Nayatani 모델을 사용하여 흑백영상으로 변환한다. 그리고 멀티-스케일 접근법을 사용하여 전역적으로 사상된 흑백 영상의 명도 값을 조절하여 국지적 대비를 향상시켰다. 이 방법은 전역적 사상 방법에서 색에 대한 정렬을 통해 흑백영상으로 변환하기 때문에 비디오 같은 일련의 연속적인 영상에도 쉽게 적용될 수 있다. 하지만, 색의 시각적 밝기에 초점을 맞추어 사상하기 때문에 색 간에 시각적 차이를 축소시킬 수 있다.

전통적인 흑백 사진가들은 이미 오래 전부터 흑백 필름으로 촬영할 경우 자신들이 촬영할 장면의 인상적인 특징들이 사라질 수 있다는 문제점을 파악하고 있었으며, 이를 극복하기 위해 촬영 시에 대비 필터를 사용하거나 인화 시에 버닝이나 닷징 같은 후 보정 작업을 취하였다. 하지만, 계산 사진학의 기존 연구들[1, 2, 3, 4, 5]에서는 특징을 유지한 흑백 영상을 얻는데 있어서 전통적인 흑백 사진술에서 실제로 사용되어왔던 기법들과는 무관한 접근 방법을 택하였다. 본 논문에서는 원본 영상의 시각적 특징을 유지하기 위해 대비 필터, 버닝, 닷징



그림 3: 대비 필터링을 이용한 일출(모네 작)의 흑백영상 변환 과정

같은 흑백 사진의 대비 조절 기법에 대응하는 디지털 버전을 제안하고, 이를 실질적으로 적용하기 위한 목적함수를 설계한다. 또한, 제안하는 목적함수는 GPU를 이용하여 실시간에 최적화 할 수 있다. 그림 1은 일출에 대한 기존 연구들의 방법과 본 논문에서 제안한 방법의 결과 흑백 영상을 비교한 것이다.

### 3. 대비 필터를 이용한 흑백 변환

본 절에서는 흑백 사진술에서의 대비 필터 기법을 간략히 살펴본 후, 그에 대응되는 디지털 대비 필터 모델을 제안한다. 디지털 대비 필터는 흑백 사진술에서와 유사하게 원본 컬러 영상의 특징을 유지하는 흑백 영상의 획득에 사용된다. 원본 영상의 특징을 가장 잘 유지하는 대비 필터를 구하기 위하여 특정 색을 가지는 대비 필터를 특정 노출 시간 동안 적용하였을 경우 어느 정도의 특징을 유지할 수 있는지에 관한 목적 함수를 설계하고, 이를 최적화하여 대비 필터의 색 및 노출 시간을 결정한다.

#### 3.1 대비 필터의 디지털 모델

흑백 사진술에서 사용되는 대비 필터는 빛의 여러 색(파장) 중 특정 색의 전달을 제한하기 위해 광학적으로 균일한 재료인 젤라틴이나 고품질 유리 물질로 만들어진다. 대비 필터는 선택된 색에 따라 필름에 감광되는 색(파장)의 양을 조절하여 선택된 색은 밝게, 그 색의 보색은 어둡게 하여, 사진가들이 흑백 사진에서 대비를 조절할 수 있게 하였다[6]. 본 논문에서는 이러한 대비 필터의 실제 역할에 초점을 맞춰 디지털 대비 필터 모델을 제안한다.

원본 영상이  $t_o$ 의 노출 시간에 획득되었다고 가정한다면,  $(R, G, B)$ 의 색을 가진 어느 한 픽셀은 단위 시간당  $(R, G, B)/t_o$ 의 빛이 렌즈를 투과하여 형성되었다고 할 수 있다. 대비 필터링의 파라미터를 RGB 각 채널에 대한 투과율  $(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma})$ 과 그 노출 시간을  $t_c$ 라고 하면,  $t_c$ 의 시간 동안  $(R, G, B)/t_o$ 의 빛이 대비 필터를 투과하여 감광시킨 픽셀의 색은 다음과 같다:

$$(R', G', B') = (\alpha R, \beta G, \gamma B). \quad (1)$$

여기에서  $\alpha = t\hat{\alpha}$ ,  $\beta = t\hat{\beta}$ ,  $\gamma = t\hat{\gamma}$ ,  $t = t_c/t_o$ 이다. 앞으로  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 를 대비 필터링을 위한 단위 (노출) 시간 파라미터라고 하겠다. 빛이 실제로 흑백 필름에 감광되어 인화되는 과정은 매우 복잡하지만, 본 논문에서는 최종 흑백 프린트에서의 명도  $L$ 을 NTSC의 Y채널로 근사한다. 즉,  $L = 0.2989R' + 0.5870G' + 0.1140B'$ 이다. 식 (1)을 이용하면, 이러한 명도  $L$ 은 원본 영상에서의 색  $(R, G, B)$ 와 디지털 필터링을 위한 단위 시간 파라미터  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 를 이용하여 보다 간략히 다음과 같이

표현될 수 있다:

$$L = [0.2989R \quad 0.5870G \quad 0.1140B] [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T. \quad (2)$$

이와 같은 간단한 근사는 앞으로 기술할 대비 필터링을 이용한 컬러 영상의 흑백 변환에 있어서 근간이 된다.

#### 3.2 대비 필터링을 이용한 흑백 변환의 목적함수

본 논문에서는 흑백 영상에서 원본 컬러 영상의 시각적 특징을 최대한 유지하기 위해 Gooch 등[1]이 제안한 최적화 기반 접근법을 택하였다. 즉, 원본 영상에서의 인접 픽셀들 간의 시각적 차이를 흑백 영상에서도 최대한 유지하도록 하는 것이다. 하지만, 최적화를 위한 목적함수의 공식화에 있어서 Gooch 등의 방법과 본질적인 차이가 있다. 본 논문에서는 대비 필터를 통해 흑백 영상에서의 명도 값을 구한다. 따라서 본 논문에서 설계한 목적함수는 디지털 대비 필터를 결정하기 위한 것이며, Gooch 등이 설계한 목적함수는 흑백 영상에서 명도 값을 곧바로 결정하기 위한 것이다.

원본 영상이 주어지면, 미지의 단위 시간 파라미터  $\mathbf{x} = [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T$ 를 가진 대비 필터를 통해 변환된 흑백 영상이 원본 영상에서의 인접 픽셀들 간의 시각적 차이  $\delta$ 를 최대한 만족하도록 하기 위해서 다음의 목적함수를 최소화한다:

$$f_g(\mathbf{x}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} \{(\mathbf{c}_i^T \mathbf{x} - \mathbf{c}_j^T \mathbf{x}) - \delta_{ij}\}^2. \quad (3)$$

여기에서  $\mathbf{c}_i = [0.2989R_i \quad 0.5870G_i \quad 0.1140B_i]^T$ 는  $i$ 번째 픽셀의 RGB 채널 값을 NTSC의 Y 채널로 변환하기 위해 스케일링한 것이고,  $N(i)$ 는  $i$ 번째 픽셀에 인접한 픽셀들의 개수를 뜻한다.  $\mathbf{c}_i^T \mathbf{x}$ 는 미지의 대비 필터를 적용한 후에 식 (2)에 주어진 NTSC 변환을 적용하여 얻은  $i$ 번째 픽셀의 흑백 명도 값이다. 따라서 식 (3)은 대비 필터 및 NTSC 변환을 통해 의해 얻은 흑백 영상에서의 인접 픽셀들 간의 시각적 차이와 원본 영상에서의 시각적 차이  $\delta_{ij}$  사이의 오차를 측정한다. 시각적 차이  $\delta_{ij}$ 를 결정하기 위해서는 CIE  $L^*a^*b^*$  색 공간에서 Gooch 등[1]의 방법을 이용하여 결정하였다.

식 (3)을 최적화하면 대비 필터링을 위한 단위 시간 파라미터  $\mathbf{x}$ 만을 결정할 수 있다<sup>1</sup>. 대비 필터의 색뿐만 아니라 노출 시간을 구하기 위해서  $\mathbf{x}$ 를 다음과 같이 분해한다:

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\alpha} \quad \hat{\beta} \quad \hat{\gamma}]^T = \frac{1}{t} \mathbf{x}, \quad t = \max(\alpha, \beta, \gamma). \quad (4)$$

<sup>1</sup> 원본 컬러 영상에 적용할 디지털 대비 필터는 물리적으로 올바른 값을 가지는 것이 바람직하다. 즉 대비 필터의 색은 RGB 각 채널 별로 0과 1 사이의 값이어야 하며 노출 시간은 0보다 커야 한다. 이러한 제약조건을 만족하며 식 (3)을 최적화하는 방법은 설명의 편의상 부록 1에서 다룬다.





그림 4: 대비 필터링 후 국지적 노출을 이용한 일출(모네 작)의 흑백영상 변환 과정

여기에서  $\hat{x}$ 은 대비 필터의 색이고,  $t$ 는 대비 필터를 적용할 노출 시간이다. 즉  $\hat{x}$ 의 색을 가진 대비 필터에 원본 컬러 영상  $I_c$ 를  $t$  시간 동안 노출시키면 중간 생성물으로써 컬러 영상  $I'_c$ 를 얻을 수 있으며, 이 영상의 NTSC Y채널이 최종 흑백 영상  $I_g$ 가 된다. 이를 보다 간략히 정리하면 다음과 같다:

$$\mathbf{I}_c \times \hat{\mathbf{x}} \times t = \mathbf{I}'_c \xrightarrow[\text{NTSC}]{} I_g. \quad (5)$$

그림 3은 식 (5)와 같이 디지털 대비 필터링을 이용하여 원본 영상을 흑백으로 변환하는 과정을 나타낸다. 그림 3(a)는 원본 컬러 영상  $I_c$ 를, (b)는 RGB 빛의 투과율과 대응되는 대비 필터의 색을, (c)는 대비 필터를 통해 감광된 컬러 영상  $I'_c$ 을, 그리고 (d)는 (c)에 노출 시간  $t$ 를 곱하여 NTSC의 Y채널로 근사한 최종 흑백 영상이다. 식 (3)을 최적화하여 결정된 디지털 대비 필터링을 통해 변환된 흑백 영상은 성공적으로 일출의 시각적 특징을 유지하였다.

#### 4. 국지적 노출의 고려

디지털 대비 필터링 이용한 흑백 변환은 흑백 사진술에서 대비 필터 기법이 효과적이었던 것처럼 디지털 컬러 영상을 흑백으로 변환하는데도 효과적이었다. 하지만, 대비 필터는 필름 전역에 가해지기 때문에 최종 인화된 사진에서 국지적 대비를 감소시킬 수 있다. 전통적인 흑백 사진가들은 이러한 문제를 해결하기 위하여 인화 시 버닝이나 닷징과 같이 국지적으로 노출을 조절할 수 있는 기법을 통하여 최종 인화 사진에서의 국지적인 대비를 향상시켰다[7]. 흑백 사진술에서 버닝과 닷징은 인화지에 노출되는 빛을 국지적으로 조절하는 간단한 원리에 기반을 두고 있지만, 이러한 과정을 물리적으로 엄밀히 모델링 하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문에서는 국지적으로 노출을 조절한다는 기본 원리만을 앞 절에서 제안한 대비 필터 결정을 위한 목적함수에 적용하고자 한다.

#### 4.1 국지적 노출의 디지털 모델

본 논문에서는 전통적인 버닝이나 닷징과 유사하게 노출 시간을 국지적으로 조절함으로써 흑백 영상에서의 대비를 향상시키고자 한다. 흑백 사진술의 국지적 노출 조절에 대한 디지털 모델을 제안하기에 앞서서 우선 필름의 현상과 사진 인화 작업을 소개하고 이를 간략히 근사하겠다. 원본 컬러 영상  $I_c$ 로부터 흑백 필름상의 영상  $I_g$ 를 얻는 과정은 이미 식 (5)에서 다루었다. 필름 현상은 단순히 적절한 현상 시간 동안 흑백 영상  $I_g$ 를 재연하는 과정이라고 하면, 사진 인화는  $L$ 이라는 밝기를 가진 빛을 흑백 필름  $I_g$ 를 투과시켜  $T$  시간 동안 인화지에 노출하는 것이라 할 수 있다. 이때 노출 시간  $T$ 는 버닝이나 닷징 같은 기법을 통해 국지적으로 조절이 가능하다. 픽셀  $i$ 에서의

국지적 노출 시간의 변화를  $\Delta T_i$ 라고 하면 대비 필터와 국지적 노출을 이용한 흑백 사진술의 전 과정<sup>2)</sup>은 다음과 같이 간결하게 표현될 수 있다:

$$\underbrace{\mathbf{I}_c \cdot \hat{\mathbf{x}} \times t = \mathbf{I}'_c}_{\text{감광}} \xrightarrow{\text{NTSC}} I_g \xRightarrow{\text{현상}} \underbrace{I_g \times L \otimes (T + \Delta T_i)}_{\text{인화}}. \quad (6)$$

여기에서  $\otimes$ 는 픽셀 별 곱 연산이다.

식 (6)에서의  $L$ 과  $T$ 는 서로 반비례관계에 있으며 영상 전체의 밝기는 추후 조정이 가능하므로, 일반성을 잃지 않고 각각의 크기를 1로 가정할 수 있다. 따라서 최종 프린트는 감광된 흑백 필름과 국지적 노출 시간의 픽셀 별 곱 연산을 통해 얻을 수 있다. 즉,  $I_g \otimes (1 + \Delta T_i)$ 이다. 픽셀  $i$ 에서  $I_g$ 의 흑백 명암도는  $\mathbf{c}_i^T \mathbf{x} t$ 이므로, 이에 따른 최종 프린트에서의 명암도는  $(\mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{x}}) t (1 + \Delta T_i)$ 가 된다. 새로운 변수  $t_i$ 를 도입하면 최종 흑백 프린트에서 픽셀  $i$ 의 명암도  $I_p(i)$ 는 다음과 같이 간결하게 정의된다:

$$I_p(i) = (\mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{X}}) t_i \quad \text{and} \quad t_i = t(1 + \Delta T_i). \quad (7)$$

여기에서  $t_i$ 는 두 가지 종류의 노출 시간 즉 필름 감광과 사진 인화를 위한 노출 시간을 포함하고 있지만, 편의상 픽셀  $i$ 에서의 국지적 노출 시간이라 부르겠다. 또한, 픽셀  $i$ 의 명암도가  $t_i$ 인 흑백 영상을 이용하여 영상 전체에 대한 국지적 노출 시간을 시각적으로 표현할 수 있으므로 앞으로는 이와 같은 흑백 영상을 국지적 노출 영상이라 부르고 이를 지칭하기 위하여  $t$ 를 사용하겠다. 국지적 노출 영상  $t$ 는 흰색 영상에 버닝이나 닳징 기법을 적용하여 획득한 영상으로 생각할 수 있다.

그림 4는 디지털 대비 필터링을 거쳐 현상한 영상을 식 (6)과 (7)을 이용하여 국지적으로 노출을 조절함으로써 대비를 높인 예제를 보여준다. 그림 4(a)는 단위 시간 동안 감광된 컬러 영상  $I_c$ 를, (b)는 현상된 흑백 영상  $I_g$ 를, (c)는 국지적 노출 영상  $t$ 를, 마지막으로 (d)는 (b)와 (c)를 픽셀 별로 곱한 후 NTSC Y 채널로 변환한 최종 흑백 영상이다. 그림 3에 예시되어 있는 대비 필터링만을 이용한 흑백 영상에 비해 태양 주변과 태양이 물결 위에 반사된 영역 주변에서 국지적 대비가 향상되었음을 확인할 수 있다.

## 4.2 국지적 노출을 고려한 목적함수

대비 필터만을 이용한 흑백 변환의 목적함수 (3)에 각 픽셀 별 노출 시간  $t_i$ 를 포함시키고 식 (7)에 주어진 최종 흑백 영상에서의 명암도를 이용하면 대비 필터뿐만 아니라 국지적 노출 조절을 이용하여 원본 컬러 영상에서의 특징을 최대한 유지

<sup>2</sup> 필름을 현상할 때와 사진을 인화할 때 각각 영상의 반전이 일어나서 서로 상쇄되기 때문에 영상의 반전을 따로 고려하지 않았다.

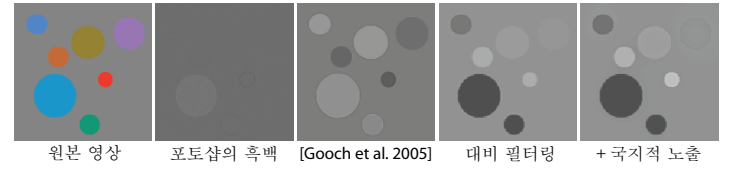
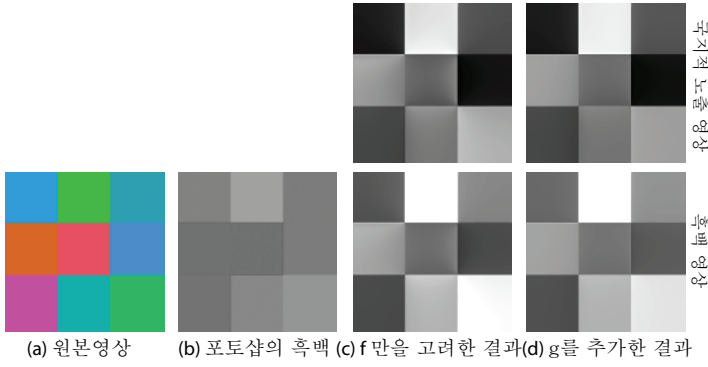


그림 6: 동떨어진 등휘도 영역을 가진 컬러 영상의 흑백변환

함수  $g$ 의 합을 매개변수 최소화(argument minimization)하는 문제로 정의된다<sup>3</sup>:

$$\arg \min_{\mathbf{t}} (f(\mathbf{t}) + w_c g(\mathbf{t})). \quad (11)$$

여기에서  $w_c$ 는 국지적 노출에 연속성을 강조하기 위한 가중치이다. 경계를 감안하여 연속적인 국지적 노출의 유효성은 그림 5(d)에서 확인할 수 있다.

#### 4.4 논의

본 논문에서 제안한 방법은 원본 컬러 영상의 흑백 변환 시 영상 공간에서 인접 픽셀과의 시각적 특징을 최대한 유지하도록 하는 최적화 방법이라는 점에서 Gooch등이 제안한 방법과 매우 유사하다[1]. 하지만 Gooch등은 한 픽셀의 인접 픽셀로 이미지 전체를 고려한대 반해 본 논문은 가장 인접한 8개의 픽셀만을 고려한다는 차이가 있다. 결과적으로, 두 방법은 수행 시 비교할 수 없는 시간 복잡도를 가진다. 영상의 크기가  $n \times n$ 인 경우 Gooch등의 선형시스템은 조밀 행렬로 생성하는데  $O(n^4)$ 의 시간 복잡도를 필요로 하지만, 본 논문의 선형시스템은 희소 행렬로  $O(n^2)$ 의 시간 복잡도를 가진다. 따라서, 메가픽셀 컬러 영상의 경우 Gooch등의 방법은 적용하지 못하지만 본 논문의 방법은 GPU상에서 실시간에 풀 수 있다. 그럼에도 불구하고, 그림 8에서와 같이 Gooch등이 제안한 방법과 견줄 만큼 좋은 결과를 획득할 수 있다.

본 논문에서 한정된 수의 인접 픽셀만을 고려하였음에도 불구하고 성공적으로 흑백 영상을 획득할 수 있었던 주요한 이유는 대비 필터링을 적용한 후 경계를 감안하여 국지적 노출을 조절하였기 때문이다. 전통적인 흑백 사진술에 착안한 본 논문의 공식화 과정은 연속성을 부여하는 함수를 사용하지 않고  $(\mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{x}})t_i$ 를  $g_i$ 로, 즉 결정하기 위한 각 픽셀의 명도 값으로 치환하면 Gooch등의 방법과 동일하게 변환할 수 있다. 따라서, 한정된 수의 인접 픽셀만을 고려한 Gooch등의 결과에 대한 국지적 노출 영상을 획득할 수 있고, 그림 5(c)에 대응되는 국지적 노출 영상은 그다지 좋아 보이지 않는다. 이에 반해, 그림 5(d)에 대응되는 국지적 노출 영상은 경계를 감안함으로써 의미 있는 영상을 획득하였다.

다른 한편으로, 가장 인접한 픽셀만을 고려하는 것은 한 픽셀과 멀리 떨어진 픽셀과의 색차를 무시할 수 있다. 따라서 Gooch등이 언급한 것과 같이 멀리 떨어진 등휘도의 영역에 대해 만족스럽지 못한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 본 논문에서 제안한 흑백 변환 과정은 전역적(대비 필터링) 및 국지적인(노출 조절) 맵핑 과정을 통해 이루어지기 때문에 멀리 떨어진 등휘도의 영역에 대한 문제를 해결할 수 있다. 그림 6에서와 같이, 우선 대비 필터를 통해 전역적인 대비를 향상시킨 흑백 영상을 얻고, 이를 국지적인 노출 조절을 통해 앞서 획득된 흑백

<sup>3</sup>식 (11)을 최소화하기 위해 풀어야 하는 선형시스템은 대각성분이 지배적이지 못할 수 있으며, 이러한 경우 일반적으로 선형시스템의 수렴성이 좋지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법은 설명의 편의상 부록 2에서 다룬다.

그림 5: 경계를 감안한 국지적 노출의 조절에 따른 결과 비교

하는 흑백 영상을 얻기 위한 목적함수를 다음과 같이 공식화할 수 있다:

$$f(\mathbf{t}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} [\{(\mathbf{c}_i^T \hat{\mathbf{x}})t_i - (\mathbf{c}_j^T \hat{\mathbf{x}})t_j\} - \delta_{ij}]^2. \quad (8)$$

여기에서  $\hat{\mathbf{x}}$ 은 식 (4)을 최적화하여 얻은 대비 필터의 색이다.

본 논문에서 제안한 컬러 영상의 흑백 변환은 먼저 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 대비 필터의 색  $\hat{\mathbf{x}}$ 을 결정한 후, 이를 이용해 식 (8)을 최적화하여 국지적 노출 영상  $\mathbf{t}$ 를 획득한다. 그리고, 식 (7)에 국지적 노출 영상을 적용하면 최종 흑백 영상을 얻을 수 있다.

하지만 시각적 특징을 유지하기 위한 목적함수  $f$ 만을 최적화 하는 것은 그림 5(c)와 대응되는 국지적 노출 영상에서와 같이 색의 시각적 차이가 나타나는 경계에서의 오차를 전체 영상의 픽셀들이 동등하게 부담해야 하기 때문에, 오차가 전체 픽셀로 퍼져 블러링된 듯한 흑백 영상을 획득할 수 있다. 따라서, 경계를 감안하여 국지적 노출을 조절할 필요가 있다.

#### 4.3 경계를 감안한 국지적 노출의 조절

국지적 노출 시간에 연속성을 부여할 뿐만 아니라 영상의 경계를 감안하기 위하여 시각적으로 유사한 색을 가진 인접 픽셀들은 유사한 노출 시간을 가져야 한다고 가정한다. 이러한 가정은 다음과 같은 추가적인 목적함수를 통해 달성될 수 있다:

$$g(\mathbf{t}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} w_{ij}(t_i - t_j)^2. \quad (9)$$

여기에서  $w_{ij}$ 는 원본 영상에서의 색의 시각적 차이에 따른 Gaussian 가중치이며 CIE  $L^*a^*b^*$  색 공간에서 다음과 같이 측정하였다:

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{\Delta L_{ij}^2 + \Delta a_{ij}^2 + \Delta b_{ij}^2}{2\sigma^2}\right). \quad (10)$$

$\sigma$ 는 영상에서의 경계를 조절하는 용도로 사용될 수 있는 사용자 입력 상수이다. 이러한 가중치는 양방향 필터링(bilateral filtering)[8]에서와 유사하게 영역의 경계에서 한 영역에 속하는 픽셀의 노출 시간이 다른 영역에 속하는 픽셀의 노출 시간에 영향을 미치는 것을 방지한다.

최종적으로 대비 필터링 및 국지적 노출을 이용한 원본 컬러 영상의 흑백 변환은, 원본 영상에서의 시각적 특징을 유지하기 위한 함수  $f$ 와 경계를 감안하여 연속성을 부여하기 위한





그림 7: 국지적 노출 조절을 위한 선형시스템의 풀이

영상의 명도 값을 약간 변화시키기 때문이다. 같은 맥락에서, 전역적인 색의 일관성 문제를 살펴 보면 대비 필터링 단계에서는 확실히 해결 될 수 있지만 국지적 노출을 조절하는 단계에서는 문제를 야기할 수 있다. 하지만 그림 8(c)에서와 같이 국지적 노출 조절이 눈으로 보기에 전역적인 색의 일관성 문제를 크게 야기하지는 않는 것처럼 보인다.

## 5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 특징을 유지하는 흑백 변환 방법은 NVIDIA CUDA를 이용하여 GPU상에서 구현되었으며, 메가 픽셀 컬러 영상을 실시간에 흑백 영상으로 변환할 수 있었다. 모든 실험에서는 Intel Pentium Core2 Duo 2.6GHz 프로세서와 2GB 메모리, NVIDIA GeForce 8800GT 512MB 그래픽 카드를 장착한 PC를 사용하였다.

GPU상에서 제안한 방법을 구현하기 위해서는 대비 필터와 국지적 노출 시간을 결정하기 위한 선형시스템을 만들고 풀어야 한다.

대비 필터의 경우, 식 (3)과 같이 설계된 목적함수를 최소화하기 위해서는  $3 \times 3$  행렬이 필요하다. 이를 위해 두 번의 합산 과정을 수행한다. 우선, 각 픽셀 별로 할당된 쓰레드는 인접 픽셀과의 관계를 통해 생성되는 8개의 행렬들을 합산한다. 인접 픽셀과의 관계가 상호 대칭인 점을 감안하면 쓰레드 별로 수행되는 합산 과정을 절반으로 단축시킬 수 있다. 다음으로 픽셀 별로 연산된 행렬들은 병렬적인 리덕션(parallel reduction)을 통해 합산 과정을 수행하여, 최종적으로 대비 필터 값을 결정하기 위한 선형시스템을 만든다.

국지적인 노출의 경우, 식 (11)의 최적화를 위해 만들어지는 선형시스템은 큰(large), 희소(sparse), 정사각(square), 대칭(symmetric), 양반한정(positive semi-definite)인 행렬이다. 효율적으로 선형시스템을 풀기 위해 본 논문에서는 멀티 그리드와 유사한 멀티 레벨 접근법을 사용하였다. 우선, 그림 7(a)에서와 같이 상위 레벨의 컬러 영상의 크기를 1/4로 줄여 각 레벨별로 컬러 영상을 획득한다. 그리고, 획득된 컬러 영상을 이용하여 각 레벨별 선형시스템을 세운다. 각 레벨의 해는 감쇠되는(damped) Jacobi 방법을 이용하여 스무딩(smoothing)하고, 하위 레벨의 해는 그림 7(b)에서와 같이 상위 레벨의 초기치로 이용하기 위해 리사이즈 한다. 각 단계의 컬러 영상과 하위 레벨의 해를 리사이즈 하기 위해 서로 대응되는 연산자를 사용하였다. 즉, 제한 연산자는 풀 웨이팅(full weighting)을, 연장 연산자는 양선형 보간법(bilinear interpolation)을 사용하였다[9].

그림 8은 작은 크기의 다양한 영상에 대해 본 논문에서 제안한 방법과 포토샵을 이용한 방법, Gooch등이 제안한 방법의 결과(흑백) 영상을 비교한 것으로, (c)는 대비 필터에 국지적 노출 영상을 곱하여 획득한 영상이다. 4.4절에서 언급한 것과 같이 본 논문의 방법은 가장 인접한 픽셀만을 고려하지만, 그

결과 영상은 Gooch등의 방법과 견줄 만 하다. 이와 대조적으로, 본 논문의 방법은 그림 9에서와 같이 큰-크기의 영상도 실시간에 흑백 영상으로 변환할 수 있다.

## 6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 전통적인 흑백 사진에서의 기법[6, 7]과 최적화 기반의 방법[1]에 착안하여 컬러 영상을 흑백으로 변환하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 우선, 주어진 컬러 영상의 시각적 특징을 최대한 유지하는 대비 필터를 찾고, 국지적 노출을 경계를 감안하여 변화시킴으로써 대비 필터링된 흑백 영상의 대비를 향상시켰다. 그리고, 가장 인접한 픽셀만을 고려한 목적함수는 GPU상에서 효과적으로 최적화 되어, 메가 픽셀의 컬러영상도 대화적 시간 안에 흑백 영상으로 변환할 수 있게 하였다.

또한, 제안한 방법은 흑백 변환 과정에서 부수적으로 국지적 노출 영상을 획득 하였다. 앞으로 사용자에게 의도가 반영되도록 국지적 노출 영상의 특정 영역을 편집하기 위한 대화형 도구를 제공할 것이다. 그리고 현재의 단일 영상에 대한 변환 방법에 시간적인 일관성을 추가하여 비디오 같은 일련의 연속적인 영상에 대해서도 적용하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술 개발사업(2008-F-032-01, Digital Clothing SW 기술 개발) 및 대학 IT 연구센터 지원사업(IITA-2008-C1090-0801-0018)과 서울시 산학연 협력사업(10581)의 일환으로 수행하였다.

## 부록 1. 대비 필터의 물리적 제약 조건

물리적으로 의미 있는 단위 시간 파라미터  $\mathbf{x} = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ 를 결정하기 위해,  $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ 라는 제약 조건을 추가하여  $\mathbf{x}$ 를 통해 감광되는 빛의 양이 음수가 되지 않도록 하고, 결과(흑백) 영상의 평균 밝기가 원본 영상의 명도 채널에 평균 밝기와 같아지도록  $\mathbf{a}^T \mathbf{x} = \mathbf{b}$ 라는 제약 조건을 추가한다. 그러면 식 (3)는 다음과 같이 변환 할 수 있다:

$$\arg \min \|\mathbf{Q}\mathbf{x} - \mathbf{d}\|^2. \quad (12)$$

$$\text{subject to } \alpha, \beta, \gamma \geq 0 \text{ and } \mathbf{a}^T \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

식 (3)을 미분하여 얻는 선형시스템을  $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$ 라고 할때,  $\mathbf{A} = \mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$ 이고  $\mathbf{b} = \mathbf{Q}^T \mathbf{d}$ 이므로, Cholesky 분해를 통해  $\mathbf{Q}$ 와  $\mathbf{d}$ 를 구할 수 있다. 식 (12)에서 동등 제약조건을  $\gamma = a\alpha + b\beta + c$ 로 소

거하면, 다음과 같이 변환 할 수 있다:

$$\begin{aligned} \arg \min \|\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{d}}\|^2 \\ \text{subject to } \alpha, \beta, a\alpha + b\beta + c \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서  $\bar{\mathbf{Q}}$ 와  $\bar{\mathbf{d}}$ 는  $\gamma$ 의 소거에 의해  $\mathbf{Q}$ 와  $\mathbf{d}$ 가 변형된 형태이며  $\bar{\mathbf{x}} = [\alpha, \beta]^T$ 으로, 식 (13)은 축이  $\alpha, \beta$ 인 2차원 평면 위에서 정의되며, 부등 제약 조건을 만족하기 위한 영역은  $\alpha = 0, \beta = 0, a\alpha + b\beta + c = 0$ 인 세 직선에 의해 생기는 삼각형 모양의 영역이다. 우선, 제약 조건을 고려하지 않고 식 (13)를 최적화하는  $\bar{\mathbf{x}}$ 를 구한다. 만약 구해진  $\bar{\mathbf{x}}$ 이 삼각형 영역 안에 속하지 않으면, 삼각형의 세 변 중 식 (13)을 가장 최소화하는  $\bar{\mathbf{x}}$ 을 구하면 된다.

## 부록 2. 국지적 노출의 목적함수 개선

식 (11)을 최소화하기 위해 풀어야 하는 선형시스템은 대각성분이 지배적이지 못할 수 있으며, 이러한 경우 일반적으로 선형시스템의 수렴성이 좋지 않다. 이런 문제를 해결하기 위해 각 픽셀에서의 명도를 로그에 의해 정의한다[10]. 그러면, 식 (8)은 다음과 변환 될 수 있다:

$$\tilde{f}(\mathbf{t}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} [\{\log(\hat{g}_i t_i) - \log(\hat{g}_j t_j)\} - \hat{\delta}_{ij}]^2. \quad (14)$$

여기에서  $\hat{g} = \mathbf{c}^T \hat{\mathbf{x}}$ 이고,  $\hat{\delta}_{ij}$ 를 결정하기 위해 로그에서의 대비에 대한 정의에 따라, 즉 명도에 의한 대비( $=\log(L_i^*/L_j^*)$ )와 색차에 의한 대비( $=\sqrt{G(a^*)_{i,j} + G(b^*)_{i,j}}$ )에 대해 Gooch 등[1]이 제안한 방식을 적용한다. 식 (14)를 log의 성질을 이용하여 정리 하면, 시각적 특징을 유지하기 위한 식 (11)로 공식화된 목적함수  $f$ 는 다음과 같이 변형된다:

$$\tilde{f}(\mathbf{s}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} [\{s_i - s_j\} - \bar{\delta}_{ij}]^2.$$

여기에서  $s_i = \log t_i$ ,  $\bar{\delta}_{ij} = \hat{\delta}_{ij} - \log(\hat{g}_i/\hat{g}_j)$ 이다. 마찬가지로, 경계를 감안하여 연속성을 부여하기 위해 식 (9)로 공식화된 목적함수  $g$ 는 다음과 같이 변형된다:

$$\tilde{g}(\mathbf{s}) = \sum_i \sum_{j \in N(i)} w_{ij}(s_i - s_j)^2.$$

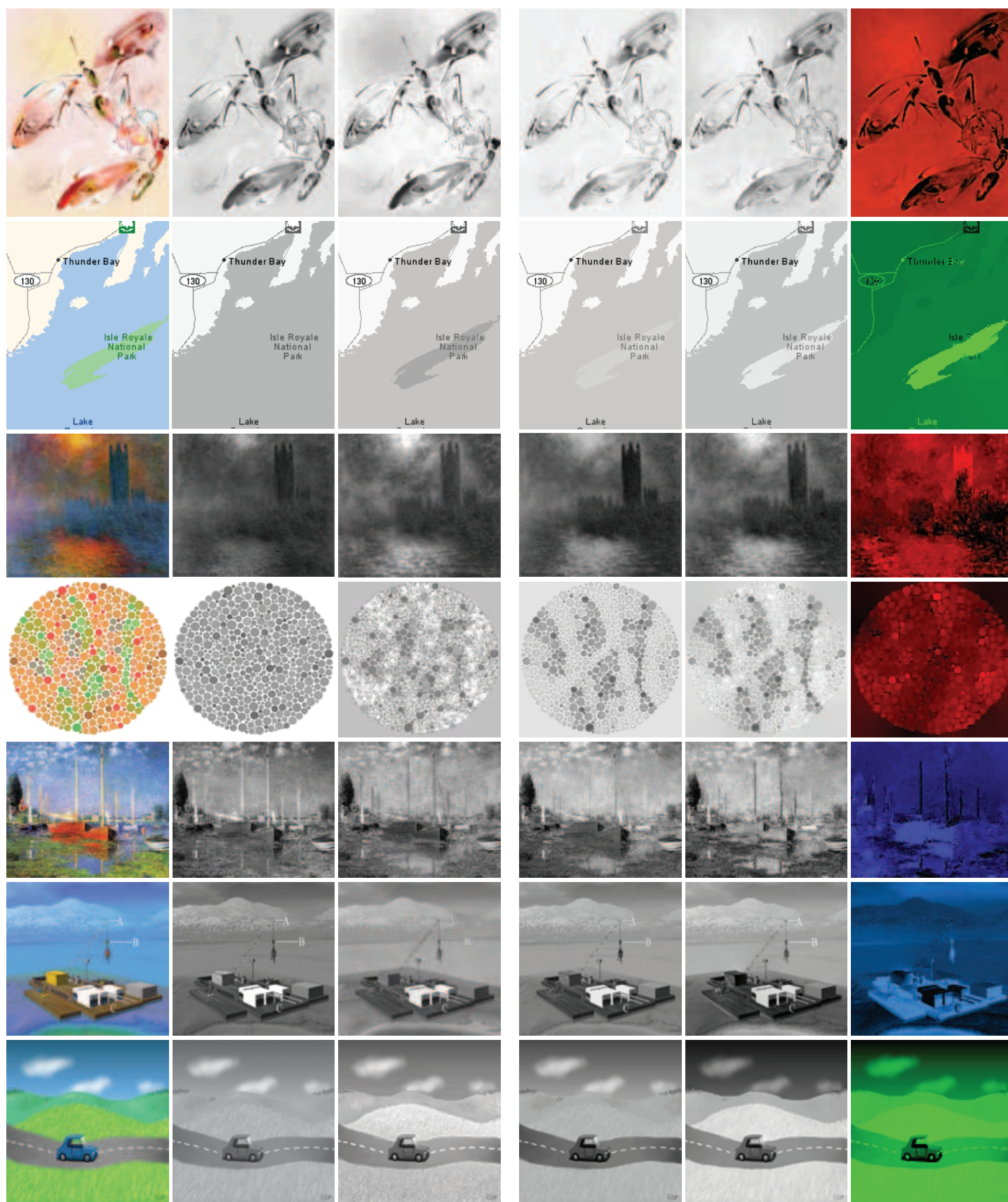
결과적으로, 개선된 선형시스템은 대각성분이 지배적이 된다. 또한, 5절에서 설명한 것과 같이 양반한정 행렬(positive semi-definite)로 해는 하나의 자유도를 지니게 된다. 따라서, 국지적 노출 영상  $\mathbf{t}$ 는 결과(흑백) 영상의 평균 밝기가 원본 영상의 명도 채널에 평균 밝기와 같아지도록 스케일 될 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] A. A. Gooch, S. C. Olsen, J. Tumblin, and B. Gooch, "Color2gray: Salience-preserving color removal," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 634–639, 2005.
- [2] M. Grundland and N. A. Dogson, "Decolorize: Fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion," *Pattern Recognition*, vol. 40, no. 11, pp. 2891–2896, 2007.

- [3] L. Neumann, M. Cadik, and A. Nemcsics, "An efficient perception-based adaptive color to gray transformation," in *Proc. of Computational Aesthetics 2007*, 2007, pp. 73–80.
- [4] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall, "Re-coloring images for gamuts of lower dimension," *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, vol. 24, no. 3, pp. 423–432, 2005.
- [5] K. Smith, P.-E. Landes, J. Thollot, and K. Myszkowski, "Apparent greyscale: A simple and fast conversion to perceptually accurate images and video," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 2, pp. 193–200, 2008.
- [6] A. Adams, *The Negative. The Ansel Adams Photography Series / Book 2*. Little, Brown and Company, 1981.
- [7] —, *The Print. The Ansel Adams Photography Series / Book 3*. Little, Brown and Company, 1983.
- [8] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," in *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 1998, pp. 839–846.
- [9] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C++: the art of scientific computing / Second Edition*. Cambridge, 2002.
- [10] R. Mantiuk, K. Myszkowski, and H. Seidel, "A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images," *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 3, no. 3, pp. 286–308, 2006.





원본 영상

포토샵의 흑백 영상

[Gooch et al. 2005]

(a) 대비 필터링

(b) + 국지적 노출

(c) 필터x국지적 노출

그림 8: 작은 크기의 영상에 대한 포토샵 및 Gooch등의 방법과 본 논문의 결과 영상 비교





원본 영상

포토샵을 이용한 흑백 영상

대비 필터링+ 국지적 노출

그림 9: 큰 크기의 영상에 대한 포토샵과 본 논문의 결과 영상 비교