

논문 2016-53-5-13

# 다중 분광 필터 배열 영상의 색수차 문제를 고려한 영상 복원 알고리즘

(Image Restoration Considering Chromatic Aberration Problem  
of Multi-Spectral Filter Array Image)

권 지 용\*, 강 문 기\*\*

(Ji Yong Kwon and Moon Gi Kang<sup>Ⓞ</sup>)

## 요 약

저조도 환경에서 근적외선은 사람 눈에 보이지 않는 추가적인 정보를 제공하여 물체를 보다 분명하게 구별하고 인식하도록 도움을 준다. 컬러 영상과 근적외선 영상을 동시에 획득하기 위해서 다중 분광 필터 배열을 사용하였다. 그러나 렌즈의 굴절률은 빛의 파장 길이에 따라 다르기 때문에 초점면에 상이 다르게 맺히게 된다. 그 결과 색수차 문제가 발생하고 영상은 흐려지게 되며 영상의 해상도가 떨어지게 된다. 본 논문에서는 이러한 색수차 문제를 고려한 영상 복원 알고리즘을 제안하고자 한다. 다중 분광 필터 배열 영상에 컷오프 주파수가 추정된 저주파 통과 필터를 적용하여 기반 영상을 추정하도록 하였다. 이 영상을 이용하여 다중 분광 영상의 색수차 문제가 해결된 영상을 추정하도록 하였다. 영상 획득 과정에서, 색수차 문제와 기반 영상 형성 과정을 모델링하였다. 이러한 모델을 바탕으로, 기반 영상과 다중 분광 영상 간의 고주파 성분 차이에 대한 최소 자승법을 풀어 다중 분광 영상을 획득하도록 하였다. 실험 결과는 제안하는 알고리즘이 색수차 문제가 최소화된 고품질의 다중 분광 영상을 추정할 것을 보여준다.

## Abstract

To capture color and near-infrared images simultaneously, a multi-spectral filter array(MSFA) sensor is used. This is because an NIR band gives additional invisible information to human eyes to see subject under extremely low light level. However, because lenses have different refractive indices for different wavelengths, lenses may fail to focus widely different rays to the same convergence point. This is why a chromatic aberration(CA) problem occurs and images are degraded. In this paper, the image restoration algorithm for an MSFA image, which removes the CA problem, is presented. The obtained MSFA image is filtered by the estimated low-pass kernel to generate a base image. This base image is used to remove CA problem in multi-spectral(MS) images. By modeling the image degradation process and by using the least squares approach of the difference between the high-frequencies of the base and MS images, the desired high-resolution MS images are reconstructed. The experimental results show that the proposed algorithm performs well in estimating the high-quality MS images and reducing the chromatic aberration problem.

**Keywords** : 색수차, 다중 분광 필터 배열, 근적외선, 영상 복원, 최소 제곱법

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과  
(Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Yonsei University)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail : mkang@yonsei.ac.kr)

※ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A2A1A14000912)

Received ; April 6, 2016

Revised ; April 11, 2016

Accepted ; May 2, 2016

## I. 서 론

하나의 센서로 컬러 영상을 획득하기 위하여, 비용을 절감하고 카메라의 크기를 줄인, 반복적 표본화(sub-sampled periodic)된 컬러 필터 배열(color filter array: CFA) 컬러 필터 배열이 제안되었다. 이 컬러 필터를 센서의 앞에 설치하여 한 픽셀에서 하나의 컬러 값이 측정된다.

이를 위하여, 가장 유명한 베이어 패턴(Bayer pattern)<sup>[1]</sup>이 있고, 다른 형태의 패턴도 많이 연구되고 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 컬러 필터 배열 영상으로부터 전해상도(full resolution)의 컬러 영상을 구성하기 위하여, 컬러 채널들의 고주파 성분들 간의 상관관계(correlation)를 이용하는 컬러 보간(color interpolation) 방법이 있다<sup>[3]</sup>. 또한 수평 및 수직 방향으로의 보간(interpolation)을 수행하는 에지 방향성(edge-directed) 컬러 보간 알고리즘이 있다<sup>[4]</sup>. 최근에는 채널들의 기울기(gradient)를 기반으로 하여 색차(color difference) 영역에서 추정된 방향성 가중치를 이용하여 컬러 값을 추정하였다<sup>[5]</sup>.

앞서 언급한 컬러 필터의 확장된 형태로써, 하나의 센서로 네 개 이상의 분광 대역을 획득하기 위한 다중 분광 필터 배열(multi-spectral filter array: MSFA)이 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이진 트리(binary tree) 기반의, 체스판(checkerboard) 배열 구조로 설계되는 다중 분광 필터 배열과 이를 위한 컬러 보간 알고리즘(binary tree-based edge sensing: BTES)이 설계되었다<sup>[7]</sup>. 다섯 개의 분광 대역들을 획득하기 위한 다중 분광 필터 배열과 하나의 채널을 기준으로 하여 다른 채널을 추정하는 가이드 필터링(guided filtering: GF) 기법이 소개되었다<sup>[8]</sup>.

컬러 대역 외에, 사람 눈에는 보이지 않는 근적외선(near-infrared: NIR)은 야시경(night vision) 및 원격 탐사(remote sensing) 분야에서 널리 사용되고 있다<sup>[9]</sup>. 또한 동공 패턴의 근적외선 민감도(sensitivity)를 활용하여 신분 정보로 활용할 수 있다<sup>[10]</sup>. 컬러대역과 근적외선 및 자외선 정보를 함께 획득하기 위하여 베이어 패턴으로부터 발전된 형태의 패턴이 제안되었고, 이를 위한 컬러 보간 알고리즘이 설계되었다<sup>[11]</sup>. 더 나아가서, 컬러 대역과 근적외선 필터를 각 픽셀에 설치한 이미지 센서(complementary metal oxide semiconductor: CMOS)가 연구되었다<sup>[12]</sup>.

그러나 소형 카메라를 이용하여 컬러 대역과 근적외선 대역을 동시에 획득할 때, 색수차(chromatic aberration: CA) 문제가 발생한다. 이는 렌즈의 굴절률(refractive indices)이 파장 길이에 따라 다르기 때문에 하나의 컨버전스 포인트(convergence point)로 초점을 맺지 못한다<sup>[13]</sup>. 이 문제는 영상을 흐리게 하고 기하학적 오차를 발생시켜 영상의 화질을 떨어뜨린다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 블러 커널(blur kernel)을 추정하고 선명한 영상을 가이드로 활용하여 근적외선 영상을 추정하도록 하는 알고리즘이 제안되었다<sup>[14]</sup>. 또한 채널 간의 상관관계를 기반으로 하여 컬러 보간시 디블러닝 간의

R +NIR	G +NIR	R +NIR	G +NIR
B +NIR	NIR	B +NIR	NIR
R +NIR	G +NIR	R +NIR	G +NIR
B +NIR	NIR	B +NIR	NIR

그림 1. 다중 분광 필터 배열  
Fig. 1. Multi-spectral filter array.

상관관계를 기반으로 하여 컬러 보간시 디블러닝(deblurring)을 함께 수행하는 알고리즘이 있다<sup>[15]</sup>. 본 논문에서는 색수차 문제를 고려하여 고해상도의 다중 대역 영상을 추정하는 영상 복원(image restoration) 알고리즘을 제안하고자 한다.

## II. 다중 분광 필터 배열

기존의 센서와 사람 눈의 한계를 넘어서 다중 분광 필터 배열은 광결정 컬러 필터(photonic crystal color filter)를 이용하여 컬러 정보 외에 추가적으로 700 nm 이상의 파장을 획득할 수 있다. 이 센서는 사용 유무 변경이 가능한 적외선 차단 필터(infrared cutoff filter: IRCF)를 사용하여 낮에는 사용하고 밤에 사용하지 않도록 하였다. 또한 이 센서는 단결정 실리콘 밴드갭(single-crystal silicon bandgap)을 사용하여 1100 nm 이하 파장의 근적외선을 흡수한다.

적외선 차단 필터를 이용하여 근적외선 대역 이상의 파장을 차단하였을 때, 영상이 어둡고 물체를 식별하기 어렵다. 저조도 상황에서는 노이즈가 더욱 심하게 발생할 수 있고, 선글라스와 같은 렌즈 뒤의 물체를 식별할 수 없다. 적외선 차단 필터를 사용하지 않았을 때에는 근적외선 파장대역이 함께 흡수되기 때문에 밝은 영상이 획득되며 선글라스와 같은 렌즈를 통과할 수 있어서 그 뒤의 물체도 확인할 수 있게 된다. 또한 근적외선 대역의 특성으로 인하여 물체의 재질도 구별할 수 있다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 다중 분광 필터 배열을 나타낸다. 기존의 컬러 필터 배열과 다르게 적외선 차단 필터를 사용하지 않아서 컬러 정보뿐만 아니라 비가시 대역의 근적외선 정보도 획득할 수 있다. 그림 1과 같이, 이 센서의 패턴은 R+NIR과 G+NIR, B+NIR, NIR 채널로 구성되어 있다.

위에 언급되어 있듯이, 다중 분광 필터 배열을 이용할 때, 각 채널들은 두 개 이상의 분광 대역이 함께 획득되기 때문에 초점이 하나의 초점면(focal plane)에 맞지 않게 된다. 이 문제는 렌즈의 굴절률이 파장 길이에

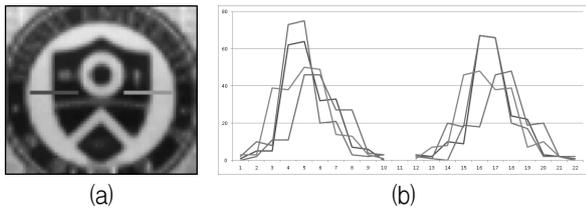


그림 2. (a) 색수차 문제가 있는 다중 분광 영상, (b) 일차원으로 표현된 고주파 신호

Fig. 2. (a) MS image containing chromatic aberration problem, (b) High-frequencies presented in 1-D.

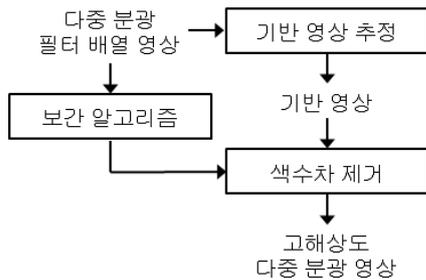


그림 3. 제안하는 알고리즘의 전체 블록도  
Fig. 3. Overall block diagram of proposed algorithm.

따라 다르기 때문에 발생한다. 이러한 색수차 문제는 색수차 문제를 발생시키고 영상을 블러(blur)시켜서 영상의 화질을 저하시킨다. 그림 2(a)은 실제 다중 분광 필터 배열을 사용하여 획득한 영상의 위에 언급한 문제를 보여준다. 표시된 두 부분의 다중 분광(multi-spectral : MS) 채널들의 기울기 값을 그림 2(b)와 같이 1차원으로 표현하였다. 그래프에 나타나있듯이, 색수차 문제로 인하여 에지(edge)에서 일치해야하는 기울기 정보들이 다른 것을 확인할 수 있다. 이 문제는 영상의 가장자리로 갈수록 더욱 심하게 나타날 수 있다. 또한 작은 카메라에서 작은 렌즈를 사용하거나 센서의 해상도가 높아질 때 심하게 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해서 무색(achromatic) 혹은 고차색(apochromatic) 렌즈를 사용하면 되지만 카메라의 가격이 증가하고 부피가 커질 수 있는 문제가 있다. 그렇기 때문에 이러한 문제를 신호 처리 기반의 알고리즘으로 해결하는 것은 비용 문제나 적용 가능한 범위에서 도움이 되고 다중 분광 영상(multi-spectral image)을 이용하는 분야에 필수적이다.

기존의 다중 분광 필터 배열로 획득한 영상에 대하여 다중 분광 영상을 추정하는 알고리즘은 색수차 문제를 고려하지 않았다. 그 결과 정확한 값을 추정할 수 없고, 잡음을 증가시킬 수 있는 문제가 있다. 본 논문에서는 영상 열화 과정(image degradation model)과 기반 영상 형성(formation) 과정을 모델링하여 고해상도 고화질의 다중 분광 영상을 추정하도록 하였다.

### III. 제안하는 방법

그림 3은 제안하는 방법의 전체 개요를 나타낸다. 먼저, 다중 분광 필터 배열 영상으로 부터 기반 영상(base image)을 추정하고, 이를 이용하여 전 해상도로 보간된 영상에 대해서 색수차가 제거된 고해상도의 다중 분광 영상을 추정하도록 한다. 이 때, 영상 열화 모델과 기반 영상 형성 모델을 바탕으로 비용 함수(cost function)를 설계하고 이것의 해를 찾아서 최종적으로 색수차가 제거된 다중 분광 영상을 추정하도록 한다.

#### 1. 기반 영상 추정

영상의 크기가 수평 방향으로  $0 \leq n_1 \leq N_1 - 1$ , 수직 방향으로  $0 \leq n_2 \leq N_2 - 1$ 일 때,  $N_1 \times N_2$ 의 다중 분광 필터 배열 영상을  $g_S[n_1, n_2]$ 로 정의한다. 그림 1에 표현된 패턴에 따라, 획득된 다중 분광 채널을  $g_b[n_1, n_2]$   $b \in \{1, 2, 3, 4\}$ 로 표현할 때, 다중 분광 필터 배열 영상을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 다중 분광 필터 배열 영상  $g_S[n_1, n_2]$ 을 표현하기 위하여, 기존 컬러 보간 알고리즘의 컬러 필터 배열 영상 표현법을 이용하였다<sup>[2,3]</sup>. 이를 기반 신호  $g_B[n_1, n_2]$ 와 세 개의 크로미넌스(chrominance) 신호  $g_{C_1}[n_1, n_2]$ ,  $g_{C_2}[n_1, n_2]$ ,  $g_{C_3}[n_1, n_2]$ 를 이용하여 표현하고, 푸리에 변환(Fourier transform)을 하면,  $G_B(u, v)$ 와  $G_{C_1}(u - \pi, v - \pi)$ ,  $G_{C_2}(u - \pi, v)$ ,  $G_{C_3}(u, v - \pi)$ 로 구성된 것을 확인할 수 있다. 여기서 크로미넌스 신호들은  $(u, v)$ 로부터  $(u - \pi, v - \pi)$ 와  $(u - \pi, v)$ ,  $(u, v - \pi)$ 로  $\pi$ 로 조정되어 나타난다.

보통의 신호의 푸리에 변환된 신호의 주요한 부분이 저주파 부분에 집중되어 있고, 이 신호를 근사화(approximation) 하는데 라플라시안 분포(Laplacian distribution)를 이용할 수 있다<sup>[16]</sup>. 그 결과, 기반 신호와 크로미넌스 신호의 푸리에 변환된 신호를 평균과 분산으로 표현되는 라플라시안 분포로 근사화 할 수 있다. 여기서  $b_B$ 와  $b_{C_1}$ ,  $b_{C_2}$ ,  $b_{C_3}$ 은 각 분포의 분산을 나타낸다. 푸리에 영역에서 기반 신호와 크로미넌스 신호는  $(0, 0)$ 와  $(\pi, \pi)$ ,  $(\pi, 0)$ ,  $(0, \pi)$ 에 중심으로 하여 존재하고, 이러한 신호를 라플라시안 분포를 통해 근사화한다.

이 두 근사화된 분포를 이용하여 두 분포가 만나는 지점을 구하여 이를 컷오프 주파수(cutoff frequency)로 정할 수 있다. 그림 4와 같이 기반 신호와  $G_B(u, v)$ 와

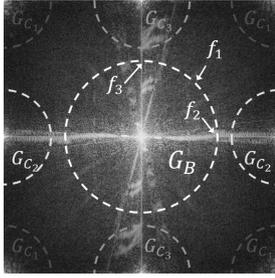


그림 4. 푸리에 영역에서의 컷오프 주파수  
Fig. 4. Cutoff frequency in Fourier domain.

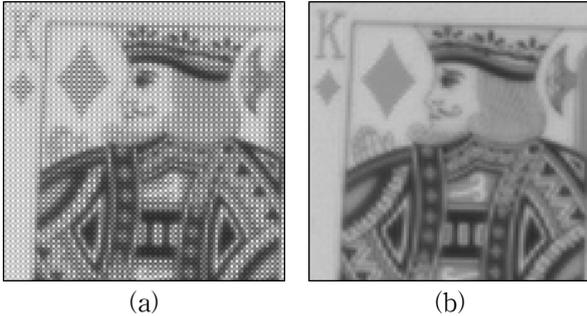


그림 5. (a) Test07 다중 분광 필터 배열 영상, (b) (a)로부터 추정된 기반 영상  
Fig. 5. (a) Test07 MSFA image, (b) Base image generated from (a).

$$\begin{aligned}\tilde{G}_B(u, v) &= \frac{1}{2b_B} e^{-\frac{|u|+|v|}{b_B}} \\ \tilde{G}_{C_1}(u-\pi, v-\pi) &= \frac{1}{2b_{C_1}} e^{-\frac{|u-\pi|+|v-\pi|}{b_{C_1}}} \\ \tilde{G}_{C_2}(u-\pi, v) &= \frac{1}{2b_{C_2}} e^{-\frac{|u-\pi|+|v|}{b_{C_2}}} \\ \tilde{G}_{C_3}(u, v-\pi) &= \frac{1}{2b_{C_3}} e^{-\frac{|u|+|v-\pi|}{b_{C_3}}}\end{aligned}\quad (1)$$

크로미넨스 신호  $G_{C_2}(u-\pi, v-\pi)$  간의 컷오프 주파수  $f_2$ 를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 컷오프 주파수로 이루어진 저주파 통과 필터(low-pass filter)를 이용하여 다중 분광 필터 배열 영상으로부터 기반 신호를 추정할 수 있다. 주파수 영역에서, 이러한 저주파 통과 필터  $H_c(u, v)$ 를 다중 분광 필터 배열 영상  $G_S(u, v)$ 과 곱을 다음과 같이 하게 되면,

$$\hat{G}_B(u, v) = H_c(u, v)G_S(u, v) \quad (2)$$

기반 신호를 추정할 수 있다. 이러한 기반 신호는, 추정된 컷오프 주파수의 저주파 통과 필터를 이용하여 추정되었기 때문에, 크로미넨스 신호를 최소한으로 포함

하고 기반 영상의 고주파 정보를 최대한으로 포함하고 있다. 그림 5는 다중 분광 필터 배열 영상으로부터 기반영상을 추정한 결과를 나타낸다. 본 논문에서 추정된 저주파 통과 필터를 이용하여, 그림 5(a)의 다중 분광 필터 배열 영상으로부터 그림 5(b)의 기반 영상으로 추정된 결과를 확인할 수 있다. 다중 분광 필터 배열 영상의 고주파 정보를 최대한으로 포함하고 있고, 크로미넨스 신호로부터 발생할 수 있는 앨리어싱(aliasing)이 최소화된 기반 영상이 추정되었다. 이 영상은 다중 분광 영상을 추정하는데 이용된다.

## 2. 고해상도 다중 분광 영상 추정

이번 장에서는, 영상 열화 모델과 기반 영상 형성 모델, 다중 분광 배열 영상으로부터 기반 영상 추정 모델에 기초하여 다중 분광 영상을 추정하고자 한다.  $N_B$ 를 다중 분광 대역의 수로 나타낼 때,  $b$  채널의 열화된 영상  $g_b[n_1, n_2]$ 과 원본 영상  $f_b[n_1, n_2]$ 을 각각 하나의 벡터로 표현하면 각각  $N_B N \times 1$ 의  $\mathbf{g}$ 와  $\mathbf{f}$ 로 표현할 수 있다. 여기서  $N$ 은  $N = N_1 \times N_2$ 로 구해지며 영상의 픽셀 수를 의미한다. 행렬  $\mathbf{B}$ 는 열화와 점상 강도 분포 함수(point spread function)를 나타낸다. 벡터  $\mathbf{w}$ 은 가우시안 랜덤 노이즈(Gaussian random noise)는 나타낸다. 원본 영상으로부터 열화된 영상이 획득되는 과정을 모델링하면 다음과 같다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{B}\mathbf{f} + \mathbf{w} \quad (3)$$

기반 영상 형성 모델에 따르면, 기반 영상은 다중 분광 영상과 계수  $\alpha_b$ 의 가중치 합으로 획득될 수 있다<sup>[17]</sup>.  $\alpha$ 를 각 분광 대역의 가중치 벡터들로 이루어진 행렬이라고 생각했을 때,  $N \times N_B N$ 의 크기로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = (\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_{N_B}) \quad (4)$$

여기서  $N_B$ 는 다중 분광 채널의 총 수를 나타낸다. 이를 이용하여 기반 영상  $g_B[n_1, n_2]$ 을 벡터 형태로 표현하면  $\mathbf{g}_B$ 이 된다. 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{g}_B = \alpha \mathbf{g}, \quad (5)$$

(3)번 식의 열화된 다중 분광 영상  $\mathbf{g}$ 을 (5)번 식에

대입하면 다음의 식으로 표현된다.

$$\mathbf{g}_B = \alpha \mathbf{B} \mathbf{f} + \mathbf{w}' \quad (6)$$

즉, 원본의 다중 분광 영상  $\mathbf{f}$  으로부터 기반 영상  $\mathbf{g}_B$  이 획득되는 것이다.

추정된 기반 영상, 저주파 통과 필터, 다중 분광 필터 배열 영상을  $N \times 1$  의  $\hat{\mathbf{g}}_B$  와  $N \times N$  의  $\mathbf{H}_c$ ,  $N \times 1$  의  $\mathbf{g}_S$  로 각각 표현할 때, (2)번 식을 행렬 형식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\hat{\mathbf{g}}_B = \mathbf{H}_c \mathbf{g}_S \quad (7)$$

영상의 저주파 성분은 물체의 특성과 색을 나타내기 때문에 변화가 없어야 한다. 반면에 고주파 성분은 해상도를 결정하는데 중요한 역할을 하기 때문에 이를 복원함으로써 화질을 향상시킬 수 있다.

다중 분광 영상의 고주파 성분을 추정하기 위하여, (6) 번 식을 고주파 성분에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{g}_B^h = \alpha \mathbf{B} \mathbf{f}^h + \mathbf{w}'^h \quad (8)$$

다중 분광 채널의 고주파 성분  $\mathbf{f}_b^h$  은 (7)번 식에서 추정된 기반 영상  $\hat{\mathbf{g}}_B^h$  과 (8)번 식과 같이 형성된 기반 영상  $\mathbf{g}_B^h$  의 차이  $\|\hat{\mathbf{g}}_B^h - \mathbf{g}_B^h\|$  를 최소화하는 해를 찾음으로써 추정된다. 영상을 추정할 때 기존의 방법으로 L1 norm을 이용하는 방법<sup>[18]</sup>과 총변이(Total variation)<sup>[19]</sup> 추정 방법이 있다. 본 논문에서는 안정적인 결과를 추정하는 미분 가능한 방법의 제약적 최소 자승법(constraint least squares: CLS)<sup>[20]</sup>에 기초하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\hat{\mathbf{f}}^h = \underset{\mathbf{f}^h}{\operatorname{argmin}} \{ \|\hat{\mathbf{g}}_B^h - \alpha \mathbf{B} \mathbf{f}^h\|^2 + \lambda \|\mathbf{C} \mathbf{f}^h\|^2 \} \quad (9)$$

$\mathbf{C}$  와  $\lambda$  는 고주파 통과 필터(high-pass filter)와 영상 사전 정보(image prior)  $\|\mathbf{C} \mathbf{f}^h\|^2$  를 통제하는 매개 변수(parameter)를 각각 나타낸다. 특정 제약 요건(regularization term)  $\|\mathbf{C} \mathbf{f}^h\|^2$  은 구해지는 해의 고주파 성분을 억제하는 역할을 한다.

(9)번 식은 다중 분광 영상의 고주파 성분  $\mathbf{f}^h$  에 대해

서 볼록 함수(convex function)이기 때문에, 기울기가 0 이 되는 곳을 찾는 것이 함수의 최소점을 찾는 것과 같게 된다.

$$(\mathbf{B}^T \alpha^T \alpha \mathbf{B} + \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{f}^h = \mathbf{B}^T \alpha^T \hat{\mathbf{g}}_B^h \quad (10)$$

이를 푸리에 변환된 신호로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{F}^h(u, v) = \frac{\alpha^*(u, v) B^*(u, v) \hat{G}_B^h(u, v)}{|\alpha(u, v)|^2 |B(u, v)|^2 + \lambda |C(u, v)|^2} \quad (11)$$

여기서  $\alpha(u, v)$  와  $B(u, v)$ ,  $C(u, v)$ ,  $\hat{F}^h(u, v)$  는  $\alpha$  와  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\hat{\mathbf{f}}^h$  의 각각의 푸리에 변환된 신호를 나타낸다.  $\alpha^*(u, v)$  와  $B^*(u, v)$  는  $\alpha(u, v)$  와  $B(u, v)$  각각의 에르미트 전치 행렬(Hermitian transpose)을 나타낸다.

획득된 다중 분광 영상의 저주파 성분  $\mathbf{g}^l$  은 그대로 보존되고, 이것과 추정된 다중 분광 영상의 고주파 성분  $\hat{\mathbf{f}}^h$  과 결합되어, 최종적으로 다중 분광 영상  $\hat{\mathbf{f}}$  이 추정된다. 다중 분광 영상의 고주파 성분만 추정함으로써 영상의 해상도를 향상시킬 수 있다.

#### IV. 실험 결과

제안하는 방법과 기존 방법들의 성능을 비교하기 위해서 두 종류의 실험 영상을 사용하였다. 다중 분광 필터 배열을 이용하여 200 lx의 백열등 조명에서 해상도 차트와 디테일이 있는 물체들을  $800 \times 520$  의 해상도로 촬영하였다. 이 영상들로 처리한 결과에 대해서 영상들과 고주파 정보 에너지(high-frequency energy)<sup>[21]</sup> 값을 비교하였다. 또한 본 논문에서 사용된 센서의 획득 환경을 가정하여 컬러 영상을 이용한 시뮬레이션 실험을 하였다. Kodak 영상( $768 \times 512$ )에 대해서 G 채널에 초점이 맞고, R과 B 채널에 대해서는 각각 중색수차와 황색수차 열화를 가정하였다. R채널은  $766 \times 510$ , B채널은  $770 \times 514$  로 크기가 조정되었고 0.5의 가우시안 블러로 열화된 영상을 생성하였다. 이러한 영상에 대해서 베이어 패턴으로 배열 영상을 만들고 다중 분광 영상을 복원하고 컬러 최대 신호 대 잡음비(Color Peak-signal-ratio: CPSNR) 값을 비교하였다<sup>[22]</sup>.

실험에서,  $b$  번째 채널의 블러 행렬  $\mathbf{B}$  는 0.5의 가우시안 블러로 가정되었다. 매개변수  $\lambda$  은 0.01로 설정되었다. (8)번 식에서, 채널이 네 개일 때  $N_B = 4$ , 채널들

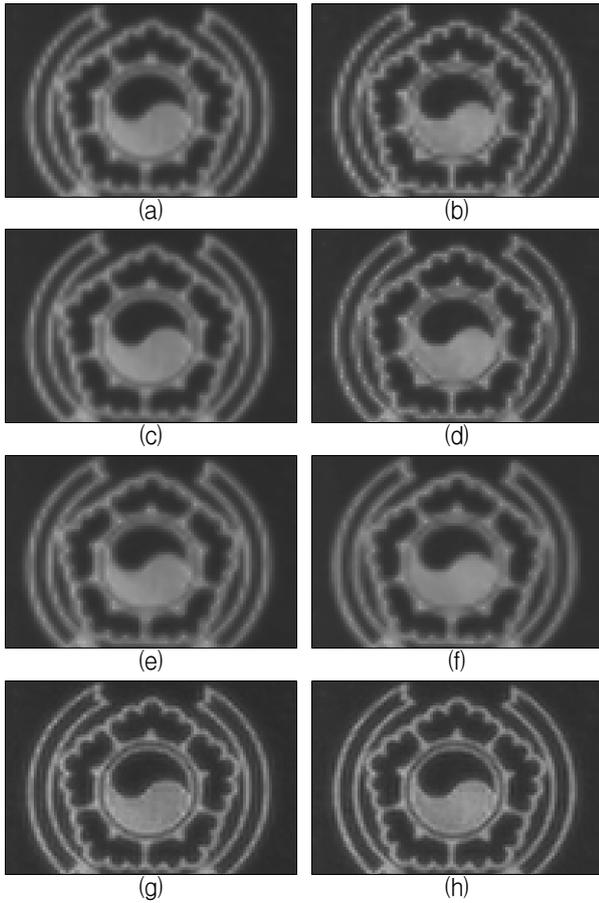


그림 6. 획득된 영상에 대한 실험 결과 (부분 확대된 *Test08* 영상), (a) 와 (b) 선형 보간법을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (c) 와 (d) BTES<sup>[7]</sup>을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (e) 와 (f) GF<sup>[8]</sup>을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (g) 와 (h) 제안하는 방법을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상

Fig. 6. Experimental results of captured images (zoomed-in part of the *Test08* image), (a) and (b) RGB and NIR images derived from bilinear interpolation method, (c) and (d) RGB and NIR images derived from BTES<sup>[7]</sup>, (e) and (f) RGB and NIR images derived from GF<sup>[8]</sup>, (g) and (h) RGB and NIR images derived from proposed algorithm.

의 계수들은  $\alpha_b, 0 \leq b \leq 3$  에 대해서 각각 1/4로 설정되었다. 컬러 채널에 대해서는  $N_B = 3$ , 채널들의 계수들은  $\alpha_b, 0 \leq b \leq 2$  에 대해서 각각 1/4, 1/2, 1/4로 설정되었다. 저주파 및 고주파 성분을 구할 때, 저주파 통과 필터  $[0.25, 0.5, 0.25]$ 와 고주파 통과 필터  $[-0.25, 0.5, -0.25]$ 가 사용되었다.

다중 분광 영상의 채널들은 그림 1에 표현된 패턴에 따라 표본화되어 획득 된다. 실험실에서 획득한 영상들을 이용하여 제안하는 방법과 선형 보간(bilinear

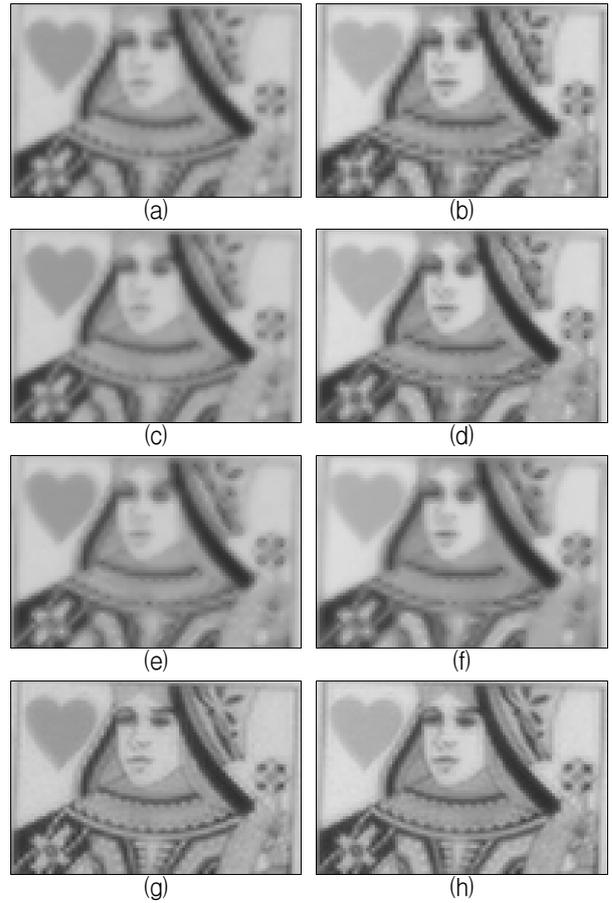


그림 7. 획득된 영상에 대한 실험 결과 (부분 확대된 *Test03* 영상), (a) 와 (b) 선형 보간법을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (c) 와 (d) BTES<sup>[7]</sup>을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (e) 와 (f) GF<sup>[8]</sup>을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상, (g) 와 (h) 제안하는 방법을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상.

Fig. 7. Experimental results of captured images (zoomed-in part of the *Test03* image), (a) and (b) RGB and NIR images derived from bilinear interpolation method, (c) and (d) RGB and NIR images derived from BTES<sup>[7]</sup>, (e) and (f) RGB and NIR images derived from GF<sup>[8]</sup>, (g) and (h) RGB and NIR images derived from proposed algorithm.

interpolation) 방법, BTES<sup>[7]</sup>, GF<sup>[8]</sup>의 성능을 비교하였다. BTES는 이진 트리 구조 기반의 다중 분광 컬러보간 방법을 제안하였다. GF는 가이드 방법으로 다중 분광 영상을 추정하였다.

그림 6은 *Test08* 영상에 대하여 제안하는 방법과 기존의 방법들<sup>[7,8]</sup>을 적용한 결과들을 보여준다. 그림 6(a) 와 (b)는 다중 분광 배열 영상으로부터 선형 보간 방법을 적용한 컬러 및 근적외선 결과 영상이다. 그림 6(c) 와 (d)는 BTES<sup>[8]</sup>을 적용한 결과인데, 잘못된 색(false

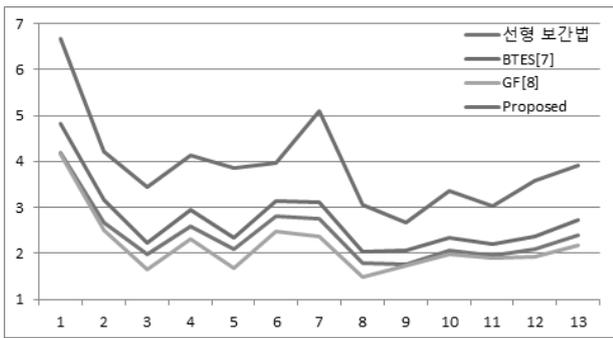


그림 8. 고주파 정보 에너지 비교  
Fig. 8. High Frequency Energy Comparison.

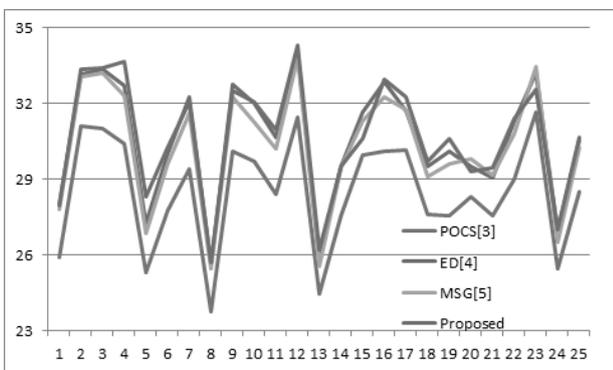


그림 9. 컬러 최대 신호 대 잡음비 비교  
Fig. 9. CPSNR Comparison.

color)과 지퍼 효과(zipper effect)가 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 6(e)와 (f)는 하나의 채널을 기준으로 하여 여러 채널을 복원하기 때문에 에지 영역에서 잡음들이 발생하지는 않지만 선명하지 못한 결과를 보여준다. 그러나 제안하는 방법을 적용한 결과의 그림 6(g)와 (h)는 잡음의 증폭 없이 에지와 세부 영역이 복원되고 영상의 해상도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

Test03 영상에 대해서 제안하는 방법과 기존 알고리즘<sup>[8,9]</sup>을 적용한 결과를 그림 7에 나타내었다. 선형 보간법에 의한 결과인 그림 7(a)와 (b)에서 보이듯이, 에지와 디테일이 흐리고 잘못된 색들이 많이 나타나있다. BTES<sup>[7]</sup>를 적용한 결과인 그림 7(c)와 (d)에도 에지들이 복원되지 못하여 끊어져 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(e)와 (f)는 GF<sup>[8]</sup>를 적용한 결과를 보여준다. 에지들이 연결되고 잡음이 없지만 영상이 여전히 흐리다. 그러나 제안하는 방법을 적용한 결과(그림 7(g)와 (h))에는 에지가 모두 복원되어 깨끗하게 연결되어 있고 잡음과 블러가 모두 없는 선명한 고품질의 영상이 추정된 것을 확인할 수 있다.

고주파 영역의 복원 정도에 대해서 객관적인 수치를 비교하기 위하여, 실험 결과들에 대해서 고주파 정보

에너지<sup>[21]</sup>를 구하였다. 12개의 실험 영상들에 대한 결과의 고주파 정보 에너지와 평균값을 그림 8에 그래프로 나타내었다. 제안하는 방법을 이용하여 추정된 결과들의 수치가 다른 알고리즘으로 얻어진 결과보다 높았다. 이는 제안하는 방법이 색수차 문제를 고려하였고, 또한 기반 영상을 이용하여 고주파 성분만 복원하였기 때문에 우수한 결과가 추정된 것으로 해석된다.

컬러 영상들을 베이어 패턴에 따라 표본화하고 보간하여 비교하였다. 제안하는 방법과 POCS(Projection onto convex)<sup>[3]</sup>, 에지에 따른 보간 방법(Edge directed, ED)<sup>[4]</sup>, 다중 스케일의 기울기 보간 방법(multiscale gradient: MSG)<sup>[5]</sup>의 성능을 비교하였다. 24개의 Kodak 영상들에 대하여 컬러 최대 신호 대 잡음비 값을 구하여 평균값과 함께 그림 9에 나타내었다. 제안하는 방법을 이용하여 추정된 결과들의 수치가 다른 알고리즘으로 얻어진 결과보다 높았다. 제안하는 방법이 색수차 문제를 고려하였기 때문에 우수한 결과가 추정된 것으로 해석된다.

## V. 결론

본 논문에서는 다중 분광 필터 배열 영상의 색수차 문제를 고려한 영상 복원 알고리즘을 제안하였다. 다중 분광 필터 배열 영상으로부터 기반 영상을 추정하고, 색수차 문제가 고려하여, 영상 열화 모델을 바탕으로 하여 고해상도의 다중 분광 영상을 추정하였다. 제안하는 방법은 다중 분광 영상을 이용하는 감시 카메라나 생물 측정 분야에 활용될 수 있다. 또한 컬러 영상에서 색수차 문제가 발생하였을 때에도 사용 가능하며, 다른 패턴의 컬러 필터 배열에 대해서도 적용할 수 있다.

## REFERENCES

- [1] B. Bayer, "Color imaging array," US Patent 3,971,065, 1976.
- [2] K. Hirakawa and P. Wolfe, "Spatio-spectral color filter array design for optimal image recovery," IEEE Transactions on Image Processing, 17, 1876-1890, 2008.
- [3] B. Gunturk, Y. Altunbasak, and R. Mersereau, "Color plane interpolation using alternating projections," IEEE Transactions on Image Processing, 11, 997-1013, 2002.
- [4] Hyun Mook Oh, Du Sic Yoo, and Moon Gi Kang, "Edge-Directed Color Interpolation on

- Disjointed Color Filter Array,” *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea* Vol. 47-SP, NO. 1, pp. 53-61, Jan 2010.
- [5] I. Pekkucuksen and Y. Altunbasak, “Multiscale gradients-based color filter array interpolation,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 22, 157-165, 2013.
- [6] P.-J. Lapray, X. Wang, J.-B. Thomas, and P. Gouton, “Multispectral filter arrays: Recent advances and practical implementation,” *Sensors* 14(11), 21626, 2014.
- [7] L. Miao, H. Qi, R. Ramanath, and W. Snyder, “Binary tree-based generic demosaicking algorithm for multispectral filter arrays,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 15, 3550-3558, 2006.
- [8] Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi, “Multispectral demosaicking using adaptive kernel upsampling,” *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 3157-3160, 2011.
- [9] K. Kidono and Y. Ninomiya, “Visibility estimation under night-time conditions using a multiband camera,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1013-1018, 2007.
- [10] J. H. Park and M. G. Kang, “Multispectral iris authentication system against counterfeit attack using gradient-based image fusion,” *Optical Engineering* 46(11), 117003-117003-14, 2007.
- [11] D. Kiku, Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi, “Simultaneous capturing of rgb and additional band images using hybrid color filter array,” *Proc. SPIE 9023*, 90230V-90230V-9, 2014.
- [12] S. Koyama, Y. Inaba, M. Kasano, and T. Murata, “A day and night vision mos imager with robust photonic-crystal-based rgb-and-ir,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, 55(3), 754-759, 2008.
- [13] J. Chang, H. Kang, and M. G. Kang, “Correction of axial and lateral chromatic aberration with false color filtering,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 22, 1186-1198, 2013.
- [14] Z. Sadeghipoor, Y. M. Lu, and S. Süssstrunk, “Gradient-based correction of chromatic aberration in the joint acquisition of color and near-infrared images,” *Proc. SPIE 9404*, 94040F-94040F-11, 2015.
- [15] Du Sic Yoo, Ki Sun Song, and Moon Gi Kang, “A Deblurring Algorithm Combined with Edge Directional Color Demosaicing for Reducing Interpolation Artifacts,” *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea* Vol. 50, NO. 7, pp. 1833-1843, July 2013.
- [16] L. Fang, O. Au, K. Tang, X. Wen, and H. Wang, “Novel 2-d mmse subpixel-based image down-sampling,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 22, 740-753, 2012.
- [17] Y. Zhang, “A new merging method and its spectral and spatial effects,” *International Journal of Remote Sensing* 20(10), 2003-2014, 1999.
- [18] Farsiu, Sina, et al. “Fast and robust super-resolution.” *Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2003.
- [19] Babacan, S. Derin, Rafael Molina, and Aggelos K. Katsaggelos. “Parameter estimation in TV image restoration using variational distribution approximation.” *Image Processing, IEEE Transactions on* 17. 3, 326-339, 2008.
- [20] R. Hardie, K. Barnard, and E. Armstrong, “Joint map registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 6, 1621-1633, 1997.
- [21] L. Fang, O. Au, K. Tang, X. Wen, and H. Wang, “Novel 2-d mmse subpixel-based image down-sampling,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 22, 740-753, 2012.
- [22] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2006.

저 자 소 개



권 지 용(학생회원)  
2009년 연세대학교 전기전자공학부  
학사 졸업.  
2016년~연세대학교 전기전자공학과  
석박사 통합과정.  
<주관심분야: 컬러 보간, 초해상  
도 영상복원>



강 문 기(정회원)-교신저자  
1986년 서울대학교 전자공학과 학  
사 졸업.  
1988년 서울대학교 전자공학과 석  
사 졸업.  
1994년 Northwestern University  
박사 졸업.

1994~1997년 Assistant Professor.  
1997~1999년 연세대학교 전기전자공학과 조교수.  
1999~2004년 연세대학교 전기전자공학과 부교수.  
2004년~연세대학교 전기전자공학과 정교수.  
<주관심분야: 영상복원, 초해상도 영상복원, 비선  
형 필터링, 비디오 분석 및 처리 부화소단위의 움  
직임 추정>