

논문 2016-53-12-13

에일리어싱 영역 검출을 통한 컬러 영상 복원

(Color Image Restoration in Detected Aliasing Region)

권 지 용*, 강 문 기**

(Ji Yong Kwon and Moon Gi Kang[©])

요 약

디지털 카메라의 생산 비용을 낮추며 작게 만들기 위하여 부표본화된 컬러 필터 배열 영상이 사용되고, 이러한 컬러 필터 배열 영상에 비어 있는 컬러 값을 추정하는 컬러 보간 과정이 수행된다. 그러나 신호들이 부표본화 되면서 주파수 영역에서 보았을 때, 신호가 겹치는 에일리어싱이 발생한다. 이 문제가 컬러 보간 과정에서 제대로 해결되지 못하면 가색상과 지퍼 현상과 같은 에일리어싱 아티팩트가 발생한다. 본 논문에서는, 컬러 영상에 존재하는 에일리어싱 아티팩트를 제거하는 알고리즘을 제안한다. 컬러 필터 배열 영상의 부표본화된 신호들을 사용하여 에일리어싱 영역 지도를 추정한다. 에일리어싱 영역 지도와 추정된 휘도 영상을 이용하여, 영상 획득 모델의 최소 자승 추정 방법으로 에일리어싱 아티팩트를 제거하여 고해상도의 컬러 영상을 추정하도록 하였다. 실험에서는 제안하는 알고리즘이 컬러 영상에 존재하는 에일리어싱 아티팩트를 효과적으로 제거한 것을 보여준다.

Abstract

To reduce the cost and volume of a digital camera, a subsampled color filter array(CFA) image is used and demosaicking is applied to estimate the missing color values. However, aliasing, the overlaps of signals in the frequency domain, occurs when signals are subsampled. This causes aliasing artifacts such as false colors and zipper effects in demosaicking processes. In this paper, the algorithm estimating high-quality color images by removing aliasing artifacts in them is proposed. The aliasing region map is estimated using the sub-sampled signals of the CFA image. By using the aliasing region map and the estimated luminance image, the least squares problem of the observation models is designed and aliasing artifacts are eliminated. The experiments demonstrate that the proposed algorithm restores color images without aliasing artifacts.

Keywords : 에일리어싱, 에일리어싱 아티팩트, 컬러 영상 복원, 컬러 보간

I. 서 론

영상 획득 장치에서 비용을 낮추고 크기를 줄이기 위하여 하나의 센서(sensor)로 컬러(color) 영상을 획득하도록 하는 베이어 (Bayer) 컬러 필터 배열(color filter array: CFA) 이 널리 사용되고 있다^[1]. 베이어 컬러 필

터 배열은 센서 앞에 설치되어 한 픽셀에서 주요 색상 적색(red), 녹색(green), 청색(blue) 중에서 하나의 색만 획득하도록 한다. 이러한 반복적 표본화(periodically sub-sampled)된 영상으로부터 전 해상도(full-resolution)의 컬러 영상을 추정하기 위하여 컬러 보간(demosaicking) 과정이 수행된다. 그러나 반복적 표본화로 인하여 주파수 영역에서 분석하였을 때 에일리어싱(aliasing)으로 불리는 신호의 겹침(overlapping)이 발생하게 되고, 컬러 보간 과정에서 가색상(false colors)과 지퍼 현상(zipper effects)과 같은 에일리어싱 아티팩트(aliasing artifacts)가 발생하게 된다.

컬러 보간 방법은 에지(edge)의 방향을 고려하는 방법과 영상 획득 모델(acquisition model)을 바탕으로 하

* 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 ; August 24, 2016 Revised ; October 5, 2016

Accepted ; November 13, 2016

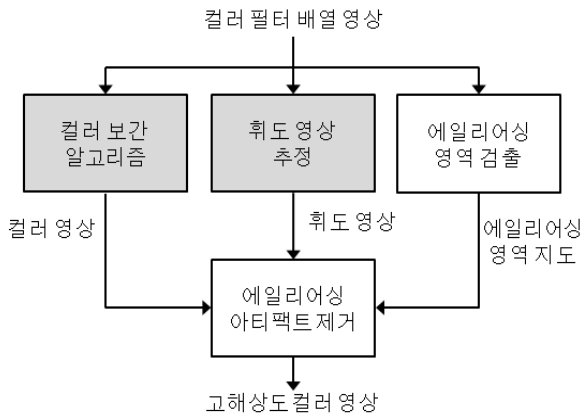


그림 1. 제안하는 알고리즘의 전체 블록도
Fig. 1. Overall block diagram of proposed algorithm.

여 설계된 비용 함수(cost function)로 영상을 추정하는 방법이 있다. 컬러 비율 모델을 이용하여 에지 방향성을 따라 보간하는 방법이 제안되었다^[2]. 색차 영역에서 에지의 방향을 추정하여 컬러 값을 추정하는 방법이 있다^[3]. 또한, 공간(spatial) 및 분광(spectral) 대역 상관관계를 고려한 컬러 보간 방법을 소개하였다^[4]. 또한, 상관관계(correlation)가 높은 채널들의 다중 계층 미분(multiscale gradients; MSG)을 이용하여 색차 영역에서 컬러 보간을 수행하는 방법이 최근에 제안되었다^[5]. 하지만 이와 같은 방법들은 에지의 방향을 결정할 때 발생할 수 있는 오차(error)로 인하여 고주파 영역에 가색상과 지퍼 현상이 발생할 수 있다.

비용 함수를 이용하는 컬러 보간 방법은 컬러 필터 배열과 점상 강도 분포 함수(point spread function; PSF)을 고려한다. 이를 기반으로 하여 일반 영상들의 사전 정보(prior knowledge)를 이용한 정규화(regularization) 방법의 컬러 보간 방법이 제안되었다^[6]. 링잉 노이즈(ringing artifact)와 왜곡된 색이 없는 선명한 에지를 추정하기 위해 총변이(total variation) 정규화 방법이 소개되었다^[7]. 또한 누화(crosstalk) 문제를 해결하며 컬러 보간을 수행하는 최소 자승법(least squares)의 역 필터링(inverse filtering)을 분광 상관관계 정도에 따라 적용적으로 적용되도록 하는 방법을 제안하였다^[8]. 최소 자승법을 이용하여 대역 필터(band-pass filter)를 휘도(luminance)와 크로미넌스(chrominance)에 적용하는 방법이 있다^[9]. 이처럼 비용 함수를 이용하여 컬러 영상을 추정하는 방법은 영상 획득 모델의 오차로 아티팩트가 발생할 수 있다.

컬러 보간된 영상의 에일리어싱 아티팩트를 제거하기 위한 후처리 알고리즘이 소개되어왔다. 눈에 보이는

G	R	G	R	G
B	G	B	G	B
G	R	G	R	G
B	G	B	G	B
G	R	G	R	G

그림 2. 베이어 컬러 필터 배열
Fig. 2. Bayer color filter array.

색 아티팩트를 억제하기 위하여 반복적으로 색차 값을 부드럽게 만들고 하나의 물체 내에서 일정해지도록 하였다^[10]. 가색상을 효과적으로 제거하기 위하여 국부 영역 내에서 색차 값의 분산 특성에 따라 다른 크기의 중앙값(median) 필터를 적용하는 방법이 제안되었다^[4]. 또한, 컬러 비율(ratio) 모델을 이용하여 에지 영역에서 색차 값의 차이를 줄이도록 하는 후처리 알고리즘이 있다^[11]. 이러한 방법들은 가색상을 줄이기 위하여 고안되었기 때문에 컬러 보간된 영상에 지퍼 현상이 여전히 남아있고 영상의 화질 향상에는 한계가 있다.

본 논문에서는 에일리어싱 영역을 검출하고 에일리어싱 아티팩트를 제거하여 고해상도의 컬러 영상을 추정하는 영상 복원(image restoration) 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. 제안하는 방법

제안하는 방법의 전체 블록도를 그림 1에 표현하였다. 컬러 필터 배열 영상으로부터 컬러 보간 과정을 거치고 획득된 컬러 영상의 해상도를 향상시키기 위하여 제안하는 알고리즘에서는 휘도 영상을 이용한다. 본 논문에서 사용하는 휘도 영상은 에일리어싱을 최소한으로, 고주파 성분을 최대한으로 포함하고 있다^[12]. 제안하는 방법을 통하여 에일리어싱 영역을 검출하고 그 영역에 대하여 에일리어싱 아티팩트를 제거하도록 한다.

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 전 해상도 컬러 영상을 $f_R[n_1, n_2]$, $f_G[n_1, n_2]$, 그리고 $f_B[n_1, n_2]$, 그리고 부표본화된 컬러 채널 영상들을 $f_R^s[n_1, n_2]$, $f_G^s[n_1, n_2]$, 그리고 $f_B^s[n_1, n_2]$ 로 표현된다. 그림 2의 베이어 컬러 필터 배열 영상을 $f_C[n_1, n_2]$ 로 정의한다. 컬러 필터 배열 영상은 휘도 신호와 조정된(modulated) 크로미넌스 신호로 표현할 수 있다.

$$F_c(u, v) = F_L(u, v) + F_{C_1}(u - \pi, v - \pi) + F_{C_2}(u - \pi, v) - F_{C_2}(u, v - \pi) \quad (1)$$

부표본화된 컬러 영상들을 푸리에 변환(Fourier transform)을 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_R^s(u, v) &= (F_R(u, v) - F_R(u - \pi, v - \pi) - F_R(u - \pi, v) + F_R(u, v - \pi))/4 \\ F_G^s(u, v) &= (F_G(u, v) + F_G(u - \pi, v - \pi))/2 \\ F_B^s(u, v) &= (F_B(u, v) - F_B(u - \pi, v - \pi) + F_B(u - \pi, v) - F_B(u, v - \pi))/4 \end{aligned} \quad (2)$$

(0,0)을 중심으로 하는 신호와 π 로 조정된 반복적으로 존재하는 신호로 표현된다.

어떠한 신호 $f[n_1, n_2]$ 에 대해서 저주파 및 고주파 통과 필터 h_0 과 h_1 을 이용하여 다음과 같이 네 개의 부분대역으로 분리할 수 있다^[13].

$$\begin{aligned} S_1 f[n_1, n_2] &= h_0[n_1] * (h_0[n_2] * f[n_1, n_2]) \\ S_2 f[n_1, n_2] &= h_1[n_1] * (h_0[n_2] * f[n_1, n_2]) \\ S_3 f[n_1, n_2] &= h_0[n_1] * (h_1[n_2] * f[n_1, n_2]) \\ S_4 f[n_1, n_2] &= h_1[n_1] * (h_1[n_2] * f[n_1, n_2]) \end{aligned} \quad (3)$$

저주파 부분 대역 S_1 과 고주파 부분 대역 S_2, S_3 , 그리고 S_4 로 나눌 수 있다.

컬러 필터 배열 영상과 부표본화된 컬러 신호들의 부분 대역 신호들은 (0,0)을 중심으로 하는 본래의 신호와 π 를 중심으로 하는 반복적 신호(replica)로 구성되어 있다. 이로 인하여 신호가 겹치고 에일리어싱이 발생한다. 보통의 컬러 영상에서 휘도 신호와 컬러 신호의 상관 관계는 높다^[13]. 이를 기반으로 하여 컬러 채널 신호와 컬러 필터 배열 신호에서 (0,0)을 중심으로 하는 신호를 제거하고 남아있는 신호들을 에일리어싱으로 간주할 수 있다.

먼저 저주파 부분 대역 신호를 공간 영역에서 1/2의 크기로 줄이고, 여기에 (2)식을 이용하여 저주파 부분 대역을 구하고 다시 원래의 크기로 복원하여 좁은 저주파 부분 대역을 구한다. 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{11}^2 F_b^s(u, v) &= F_b^{ll}(u - \pi, v)/4 \\ S_{11}^3 F_b^s(u, v) &= F_b^{ll}(u, v - \pi)/4 \\ S_{11}^4 F_b^s(u, v) &= F_b^{ll}(u - \pi, v - \pi)/4 \\ S_{11}^4 F_G^s(u, v) &= F_b^{ll}(u - \pi, v - \pi)/2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $b \in \{R, B\}$ 이다. 컬러 채널 고주파 부분 대역 신호에서 좁은 저주파 부분 대역 신호를 빼서 중주파

부분 대역 신호를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} S_2' F_R^s(u, v) &= S_2 F_R^s(u, v) + S_{11}^2 F_R^s(u, v) \\ S_2' F_B^s(u, v) &= S_2 F_B^s(u, v) - S_{11}^2 F_B^s(u, v) \\ S_3' F_R^s(u, v) &= S_3 F_R^s(u, v) + S_{11}^3 F_R^s(u, v) \\ S_3' F_B^s(u, v) &= S_3 F_B^s(u, v) - S_{11}^3 F_B^s(u, v) \\ S_4' F_G^s(u, v) &= S_4 F_G^s(u, v) - S_{11}^4 F_G^s(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

이러한 중주파 컬러 신호는 (0,0)을 중심으로 하는 컬러 신호와 에일리어싱을 발생시키는 신호들로 구성되어 있다. 이와 마찬가지로, 컬러 필터 영상의 고주파 부분 대역으로부터 컬러 신호의 좁은 저주파 부분 대역을 빼서 컬러 필터 영상의 중주파 부분 대역 신호를 구한다.

$$\begin{aligned} S_2' F_C(u, v) &= S_2 F_C(u, v) - S_{11}^2 F_R^s(u, v) + S_{11}^2 F_B^s(u, v) \\ S_3' F_C(u, v) &= S_3 F_C(u, v) + S_{11}^3 F_R^s(u, v) - S_{11}^3 F_B^s(u, v) \\ S_4' F_C(u, v) &= S_4 F_C(u, v) + S_{11}^4 F_R^s(u, v) + S_{11}^4 F_B^s(u, v) - S_{11}^4 F_G^s(u, v) \end{aligned} \quad (6)$$

중주파 컬러 필터 배열 신호는 (0,0)을 중심으로 하는 휘도 신호와 에일리어싱 신호로 이루어져 있다. 이러한 두 신호의 차이를 구함으로써 컬러 신호와 휘도 신호는 상쇄되고 에일리어싱 신호는 남게 된다.

$$\begin{aligned} A_2(u, v) &= 4S_2' F_b^s(u, v) - S_2' F_C(u, v) \\ A_3(u, v) &= 4S_3' F_b^s(u, v) - S_3' F_C(u, v) \\ A_4(u, v) &= 2S_4' F_G^s(u, v) - S_4' F_C(u, v) \end{aligned} \quad (7)$$

최종적으로 세 개의 부분 대역 정보들을 더하여 에일리어싱의 크기를 구하도록 하였다.

$$A[n_1, n_2] = \left(\sum_{k=2}^4 A_k[n_1, n_2] \right) / C \quad (8)$$

여기서 상수 C 는 에일리어싱 $A[n_1, n_2]$ 을 가중치로 표현하기 위하여 사용된다. 그림 3은 입력으로 들어오는 컬러 영상에 대해서 제안하는 방법을 이용하여 검출된 에일리어싱 영역이다. 이 영역에 대해서 휘도 영상을 이용하여 컬러 영상의 에일리어싱 아티팩트를 제거한다^[12]. 구해진 에일리어싱 가중치는 영상 추정 시에 휘도 영상을 이용하여 에일리어싱 아티팩트를 제거하는데 이용된다.

전 해상도의 열화된 컬러 채널 $g_R[n_1, n_2]$ 와 $g_G[n_1, n_2]$, $g_B[n_1, n_2]$ 와 원본 영상 $f_R[n_1, n_2]$ 와 $f_G[n_1, n_2]$, $f_B[n_1, n_2]$ 를 순서대로(lexicographically) 하여 하나의

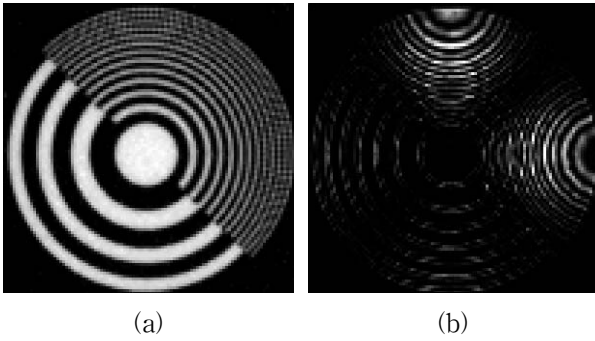


그림 3. (a) *Test03* 영상의 컬러 보간된 결과, (b) (a)로부터 검출된 에일리어싱 영역
Fig. 3. (a) Demosaicked result of *Test03* image, (b) Detected aliasing region.

벡터로 표현하면 각각 $3N \times 1$ 의 \mathbf{g} 와 \mathbf{f} 로 표현할 수 있다. 여기서 N 은 영상의 픽셀 수를 의미하여 $N = N_1 \times N_2$ 로 구해진다. 행렬 \mathbf{B} 는 열화와 점상 강도 분포 함수(point spread function; PSF)를 나타낸다. 벡터 \mathbf{w} 은 가우시안 랜덤 노이즈(Gaussian random noise)를 나타낸다. \mathbf{g}_L 을 획득된 휘도 영상이라고 했을 때, 채널들로부터 휘도 영상을 얻기 위해 사용되는 계수 α 를 이용하여, 원본 영상으로부터 열화된 영상이 획득되는 과정을 표현하면 다음과 같다^[12].

$$\mathbf{g}_L = \alpha \mathbf{B} \mathbf{f} + \mathbf{w}. \quad (9)$$

컬러 영상 \mathbf{f} 은 (7)번 식에서 추정된 휘도 영상 $\hat{\mathbf{g}}_L$ 과 (8)번 식의 형성된 휘도 영상 \mathbf{g}_L 의 차이 $\|\hat{\mathbf{g}}_L - \mathbf{g}_L\|^2$ 를 최소화하는 해를 찾으므로써 추정된다. 제약적 최소 자승법(constraint least square: CLS) 방법^[14]에 기초하여 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{f}} = \underset{\mathbf{f}}{\operatorname{argmin}} \{ \|\mathbf{A}(\hat{\mathbf{g}}_L - \alpha \mathbf{B} \mathbf{f})\|^2 + \lambda \|\mathbf{C} \mathbf{f}\|^2 \} \quad (10)$$

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

(10)번 식은 컬러 영상 \mathbf{f} 에 대해서 볼록 함수(convex function)이기 때문에, 기울기가 0이 되는 곳을 찾는 것이 함수의 최소점을 찾는 것과 같게 된다. 푸리에 영역에서 해를 구하는 식을 표현하면 다음과 같다.

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

$\hat{F}(u, v)$ 를 역 푸리에 변환 하면 최종적으로 컬러 영상 $\hat{\mathbf{f}}$ 이 추정된다.

III. 실험 결과

제안하는 방법의 성능을 평가하기 위하여 두 개의 영상 세트를 이용하였다. 16장의 Kodak 영상과 4장의 Test영상이 사용되었다. Kodak 영상들은 필름 카메라로 획득되고 512×768 픽셀, 그리고 픽셀당 24 비트로 디지털화 되었다. 해상도 차트와 여러 물체들로 이루어진 Test 영상은 실험실에서 형광등 광원 하에서 세 개의 컬러 필터를 이용한 영상 획득 장치(charge coupled device; CCD)를 이용하여 1600×1200 크기의 영상을 획득하였다. 실험 영상들은 모두 전 해상도의 컬러 영상들이기 때문에 그림 2의 베이어 컬러 필터 배열을 따라서 부표본화 시키고 이 영상에 대해서 컬러 보간을 수행하였다. 그리고 그 결과들에 대해서 후처리 방법들을 적용하였다.

제안하는 방법과 다음의 방법들을 비교하였다: 1) 에지 적응적인 방법 (edge-adaptive method; EAM)^[10]; 2) 가색상 제거 방법 (false color removal; FCR)^[4]; 3) 다중 방향성 가중치 방법 (multidirectional weighted interpolation; MDWI)^[11]. 다중 계층 미분 방법^[5]으로 컬러 보간된 영상에 대해서 후처리 방법을 적용하였다. 다중 계층 미분 방법에서 에지의 방향을 추정하기 위하여, 색차 영역에서 다중 계층 미분값을 사용하였다. 알고리즘들이 적용된 결과들에 대해서 주관적인 비교와 객관적인 수치 비교로 컬러 최대 신호 대 잡음비(color-peak signal-to-noise ratio; CPSNR)를 사용하였다^[15].

블러 행렬 \mathbf{B} 는 분산 0.1의 가우시안 블러로 가정되었다. 매개변수 λ 은 0.01로 설정되었다. (9)-(11)번 식에서, α 는 적과 녹, 청 채널에 대해서 각각 1/4와 1/2, 1/4로 설정되었다.

그림 4와 5는 *Test01*과 *Test02* 영상에 대하여 다중 계층 미분 방법으로 컬러 보간된 결과에 기존의 방법들^[10, 4, 11]과 제안하는 방법을 적용한 결과들을 보여준다. 그림 4(a)와 5(a)는 원본 영상이고 이를 베이어 컬러 필터 배열 영상으로 만든 후 다중 계층 미분 방법으로 컬러 보간한 결과를 그림 4(b)와 5(b)에 나타내었다. 그림 4(c)-(e)와 5(c)-(e)는 기존의 후처리 방법을 통한 에일리어싱 아티팩트를 제거한 결과를 보여준다. 가색상과 지퍼 현상이 여전히 남아있는 것을 보여준다. 하지만,

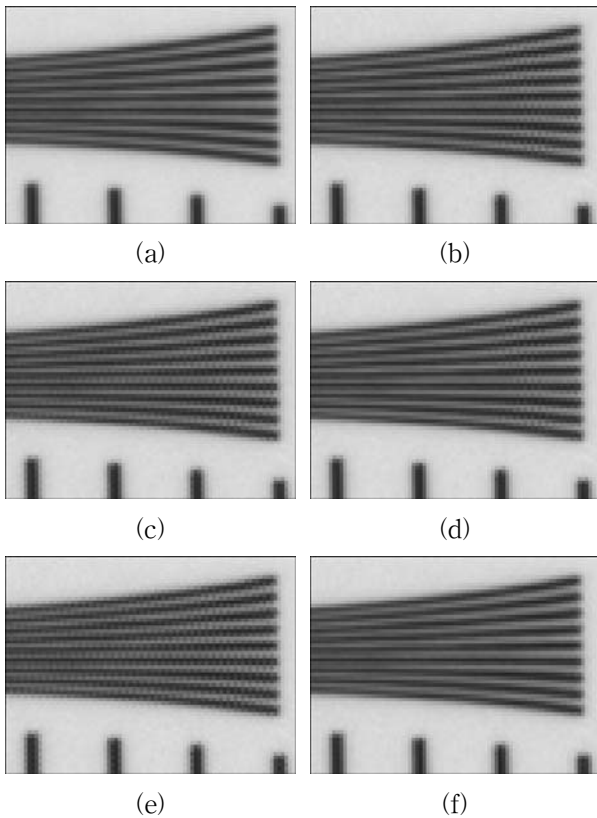


그림 4. 실험 결과 (부분 확대된 Test01 영상), (a) 원본 영상, (b) 다중 계층 미분 방법, (c) 다중 계층 미분 방법 + 에지 적응적인 방법, (d) 다중 계층 미분 방법 + 가색상 제거 방법, (e) 다중 계층 미분 방법 + 다중 방향성 가중치 방법, (f) 다중 계층 미분 방법 + 제안하는 방법

Fig. 4. Experimental results of captured images (zoomed-in part of the Test01 image), (a) original image, (b) MSG, (c) MSG + EAM, (d) MSG + FCR, (e) MSG + MDWI, (f) MSG + proposed.

제안하는 방법을 적용한 결과인 그림 4(f)와 5(f)에 보이듯이, 에일리어싱 영역을 검출하여 에일리어싱 아티팩트를 효과적으로 제거한 것을 확인할 수 있다.

컬러 영상의 화질을 평가하기 위한 방법으로 결과 영상들에 대해서 컬러 최대 신호 대 잡음비 수치를 측정하였다. Kodak 영상들과 실험실에서 촬영한 영상들에 대한 컬러 최대 신호 대 잡음비를 그림 6에 나타내었다. 다른 후처리 방법에 비하여 제안하는 방법의 가색상과 지퍼 현상에 대한 제거 성능이 더욱 우수하다는 것을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문은 컬러 보간된 영상의 에일리어싱 아티팩트를 제거하여 영상의 화질을 향상시키는 알고리즘을 제

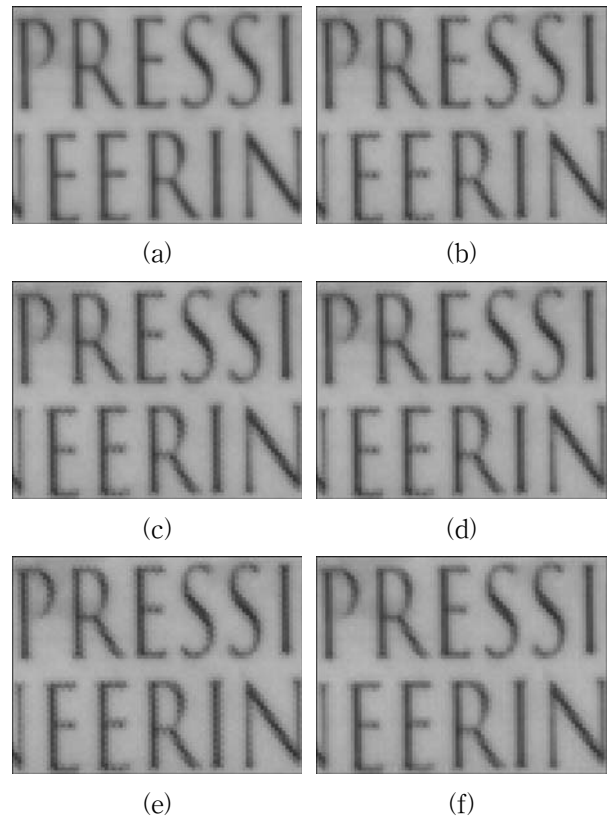


그림 5. 실험 결과 (부분 확대된 Test02 영상), (a) 원본 영상, (b) 다중 계층 미분 방법, (c) 다중 계층 미분 방법 + 에지 적응적인 방법, (d) 다중 계층 미분 방법 + 가색상 제거 방법, (e) 다중 계층 미분 방법 + 다중 방향성 가중치 방법, (f) 다중 계층 미분 방법 + 제안하는 방법

Fig. 5. Experimental results of captured images (zoomed-in part of the Test02 image), (a) original image, (b) MSG, (c) MSG + EAM, (d) MSG + FCR, (e) MSG + MDWI, (f) MSG + proposed.

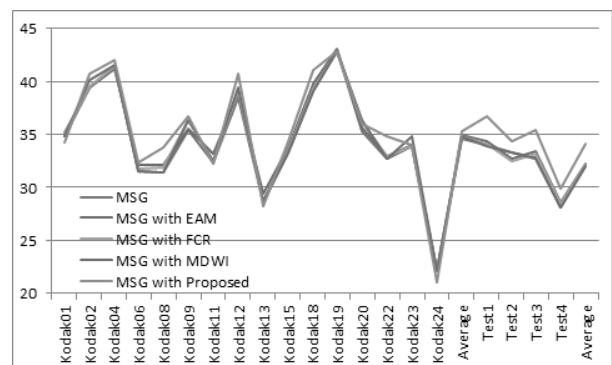


그림 6. 컬러 최대 신호 대 잡음비 비교

Fig. 6. CPSNR Comparison.

안하였다. 제안하는 방법은 휘도 및 컬러 영상 획득에 대한 모델을 이용하였고, 검출된 에일리어싱 영역에 대해서 휘도 영상을 이용하여 에일리어싱 아티팩트를 제

거하였다. 그 결과, 가색상과 지퍼 현상이 제거된 고품질의 컬러 영상을 추정할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] B. Bayer, "Color imaging array," US Patent 3,971,065, 1976.
- [2] 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.
- [3] S.-C. Pei and I.-K. Tam, "Effective color interpolation in ccd color lter arrays using signal correlation," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 503-513, Jun. 2003.
- [4] W. Lu and Y. P. Tan, "Color filter array demosaicking: new method and performance measures," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 12, no. 10, pp. 1194-1210, Oct. 2003.
- [5] I. Pekkucuksen and Y. Altunbasak, "Multiscale Gradients-Based Color Filter Array Interpolation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 1, pp. 157-165, Jan. 2013.
- [6] D. Menon and G. Calvagno, "Regularization approaches to demosaicking," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 18, no. 10, pp. 2209-2220, Oct. 2009.
- [7] T. Saito, and T. Komatsu, "Demosaicking approach based on extended color total-variation regularization," in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process., pp. 885-888, Oct. 2008.
- [8] X. Wu and X. Zhang, "Joint Color Decrosstalk and Demosaicking for CFA Cameras," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 19, no. 12, pp. 3181-3189, Dec. 2010.
- [9] B. Leung, G. Jeon, and E. Dubois, "Least-squares luma-chroma demultiplexing algorithm for bayer demosaicking," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 7, pp. 1885-1894, Jul. 2011.
- [10] C. Y. Tsai and K. T. Song, "A new edge-adaptive demosaicking algorithm for color filter arrays," *Image and Vision Computing*, vol. 25, no. 9, pp. 1495-1508, 2007.
- [11] M. Guarnera, G. Messina, and V. Tomaselli, "Adaptive color demosaicking and false color removal," *J. Electron. Imaging*, vol. 19, no. 2, 2010.
- [12] J. Y. Kwon and M. G. Kang, "Multispectral demosaicking considering out-of-focus problem for red-green-blue-near-infrared image sensors," *J. Electron. Imaging*, vol. 25, no. 2, Mar. 2016.
- [13] B. Gunturk, Y. Altunbasak, and R. Mersereau, "Color plane interpolation using alternating projections," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 11, no. 9, pp. 997-1013, Sep. 2002.
- [14] R. Hardie, K. Barnard, and E. Armstrong, "Joint map registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 6, no. 12, pp. 1621 - 1633, Dec 1997.
- [15] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*, Prentice-Hall, 2006.

저 자 소 개



권 지 용(학생회원)

2009년 연세대학교 전기전자공학부 학사 졸업.

2017년 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정 졸업.

<주관심분야 : 컬러 보간, 초해상도 영상복원>



강 문 기(정회원) - 교신저자

1986년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.

1988년 서울대학교 전자공학과 석사 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, 비선형 필터링, 비디오 분석 및 처리 부화소단위의 움직임 추정>