

논문 2010-47SP-1-7

분리된 컬러 필터 배열을 이용한 에지 방향 컬러 보간 방법

(Edge-Directed Color Interpolation on Disjointed Color Filter Array)

오 현 목*, 유 두 식*, 강 문 기**

(Hyun Mook Oh, Du Sic Yoo, and Moon Gi Kang)

요 약

본 논문은 새로운 에지 방향 추정 방법과 영상의 영역 세분화에 기반을 둔 컬러 보간 알고리즘을 제안한다. 제안하는 에지 방향 추정은 컬러 필터 배열(color filter array: CFA)의 채널 별 분리와 표본 줄임(down-sampling)을 통해 획득한 영상 사이에 존재하는 에지 방향성 상관관계를 바탕으로 이루어진다. 에지 방향성 상관관계는 영상 간의 샘플링 위치와 각 영상의 국부 위치에서의 에지 방향성 사이에 존재하는 방향의 유사성을 바탕으로 정의한다. 영상의 영역을 분류함에 있어서 평탄, 에지 영역뿐만 아니라 반복되는 에지가 나타나는 패턴 에지 영역을 구분함으로써 영역을 세분화 한다. 이렇게 구분한 영역 각각에 대해 수직 혹은 수평 방향 에지를 검출하여 에지 방향에 따라 보간함으로써 오류를 최소화 하는 에지 방향성 컬러 보간이 이루어진다. 실험 결과를 통해 제안하는 방법이 기존 방법에 비해 수치적인 면과 시각적인 면에서 뛰어난 결과를 보임을 확인할 수 있으며, 제안하는 영역 세분화와 에지 방향 추정을 통해 영상의 고주파 영역에서 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we present a color interpolation algorithm that uses novel edge direction estimator and region classifier. The proposed edge direction estimator accurately determines the edge direction based on the correlation between the images obtained by the channel separated and down-sampled Bayer color filter array(CFA) pattern. The correlation is defined based on the similarity between the edge direction in the local region of the image and the shifting direction of the images. Also, the region of an image is defined as the flat, the edge, and the pattern-edge regions, where the edges are appeared repeatedly. When all the pixels in the image are classified into the three different regions, each pixel is interpolated horizontally or vertically according to the estimated direction. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms the conventional edge-directed methods on objective and subjective criteria.

Keywords : Color Filter array(CFA); Demosaicing; Bayer pattern; Region classification

I. 서 론

디지털 이미징 장치를 이용하여 전 채널 컬러 영상을 획득하기 위해서는, 적색, 녹색, 혹은 청색 컬러 필터를

사용한 세 개의 독립된 CCD(혹은 CMOS) 센서를 사용한다. 그런데 이 경우 센서의 단가로 인한 고비용의 문제와 영상 장치의 부피가 커지는 문제가 발생하기 때문에 상용화된 카메라에서는 주로 단일 센서와 함께 특별히 디자인 된 컬러 필터 배열(color filter array: CFA)을 이용한다. 이 중 베이어 패턴(Bayer pattern)^[1]은 가장 널리 사용되는 CFA로, 그림 1과 같이 센서의 각 화소 위치에서 적색, 녹색, 혹은 청색에 해당하는 성분 중 하나만을 획득한다. 컬러 보간(color interpolation)^[2]은 베이어 패턴과 같은 CFA를 이용함으로써 인해 소실되는 컬러 성분을 이웃하는 화소 정보를 바탕으로 추정하여 전 채널 컬러 영상을 획득하는 방법을 말한다.

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학과 TMS 정보기술사업단
(Institute of TMS Information Technology, Yonsei University)

※ 본 연구는 서울시 산학연협력사업으로 구축된 서울 미래형콘텐츠컨버전스 클러스터 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다.
(No.2009-0079024)

접수일자: 2009년9월16일, 수정완료일: 2009년12월28일

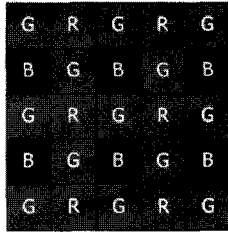


그림 1. 베이어 패턴
Fig. 1. Bayer Pattern.

컬러 영상의 특성에 기반하여 다양한 컬러 보간 방법이 제안되었다. 먼저 채널 내 상관관계(within-channel correlation)를 바탕으로 소실된 컬러 성분을 보간 하는 방법이 제안되었다. 채널 내 상관관계는 한 채널 내 이웃하는 화소들 사이의 유사성을 가정한 것으로, 선형 보간(bilinear interpolation) 방법에서는 동일 컬러 평면에서 이웃하는 CFA 표본의 평균으로 소실된 컬러를 추정한다. 하지만 이와 같은 접근은 CFA 샘플링에 의해 획득한 정보와 소실된 정보 사이의 관계 대한 고려가 없기 때문에, 채널 내 상관관계와 함께 채널 간 상관관계(cross-channel correlation)를 고려하는 컬러 보간 방법이 제안되었다. 채널 간 관계를 정의함에 있어서 크게 두 가지 가정으로 나뉘는데, 먼저 색조 변화의 유사성(smooth hue transition)을 이용한 방법에서는 동일한 위치에서 밝기와 색도 사이의 비율이 국부 영역에서 고정적이라는 가정을 바탕으로 소실된 컬러를 보간한다.^[3-4] 유사하게 채널 간 컬러 차의 유사성(constant cross-channel color difference)을 가정하는 방법에서는 인접한 영역에서 밝기와 색도 사이의 차는 고정적이라는 가정을 바탕으로 소실된 컬러 정보를 추정한다.^[5-6]

이상 언급한 방법은 가정을 바탕으로 주변부 픽셀 평균을 취하기 때문에 일반 에지에서 만족할 만한 성능을 가진다. 하지만 복잡한 에지와 같은 경우 경계를 가로 지르는 컬러의 융합으로 인해 지퍼 현상(zipper effect), 모아레(Moire), 블러(blur) 등의 열화가 발생한다. 따라서 이와 같은 문제를 극복하기 위한 다양한 알고리즘이 제안되었다. Zhang은 보간 에러를 잡음으로 간주하고, 컬러 보간 시 발생하는 에러를 최소화 하는 필터 기반 컬러 보간을 제안하였다.^[7] Gunturk은 채널 간 상관관계를 바탕으로 제약조건을 정의하고, POCS(projection-onto-the-convex-sets) 기술에 기반 한 컬러 보간 방법을 제안하였다.^[8] 또한 Alleysson은 주파수 영역에서 베이어 패턴의 특징을 분석하고, 주파수 선택적 필터를 이용하여 보간하는 방법을 제안하였다.^[9]

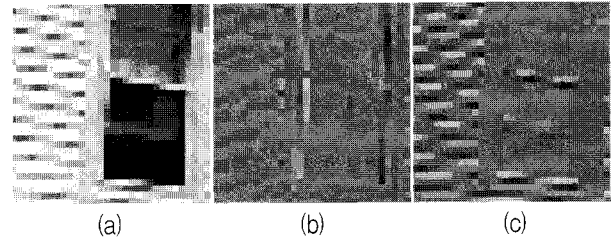


그림 2. (a) 원본 영상 (b) 수평 이동 영상 사이의 차영상 (c) 수직 이동 영상 사이의 차영상
Fig. 2. (a) Original image (b) difference image between the horizontally shifted LR images (c) difference image between the vertically shifted LR images.

또한 에지 방향에 대한 기울기(gradient) 분석을 바탕으로 방향 선택적으로 에지를 보간하는 에지 방향성 컬러 보간(edge-directed color interpolation) 알고리즘이 있다.^[10-14] Kim은 최소 미분계수를 가지는 방향으로 보간 방향을 결정하여 잡음에 강한 컬러 보간을 제안했다.^[11] Wu는 미리 보간한 수평, 수직 방향 보간 값 중 하나를 선형 판별식에 기반한 경판정(soft decision) 방법으로 선택하였다.^[12] 수평, 수직으로 미리 보간된 값 중에서 선택하는 또 다른 방법으로써 Hirakawa는 인접 영역 사이에서의 밝기와 색도의 유사성을 바탕으로 homogeneity map을 구성하였다.^[13]

에지 방향성 컬러 보간은 방향 선택을 통해 보다 선명한 에지를 복원한다는 점에서 이웃 화소 평균에 기반한 방법에 비해 좋은 성능을 나타낸다. 하지만 방향 선택의 극단성으로 인해 선택 방향이 옳은 경우 최소에 근접한 에러를 갖는 반면, 틀린 경우에는 최대에 근접한 에러를 갖는다. 따라서 반복되는 에지와 같이 방향성 판단이 모호한 영역에서 에지 방향 판단이 실패하는 경우, 잘못된 방향으로 에지 성분이 연결되거나 오류가 불규칙적으로 나타나는 등 평균값 기반 알고리즘에 비해 에러가 두드러지게 나타난다. 따라서 영역에 따라 세밀하게 고주파 성분을 보간하는 방법이 필요하다.

본 논문은 분리된 CFA 영상에서의 기울기 비교를 바탕으로 한 에지 방향성 컬러 보간 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방법은 베이어 패턴에 의해 획득된 영상을 채널별로 분리하고 표본 줄임(down-sampling)하여 얻은 저해상도(low-resolution: LR) 영상을 이용한다. 이 때 동일 채널 및 다른 채널 간 저해상도 영상 사이에 존재하는 에지 방향에 따른 상관관계를 이용한다. 기존 에지 방향성 컬러 보간 알고리즘이 고주파 영역에서 발생시키는 에러를 해결하기 위해 저해상도 영상 사

이의 상관관계를 바탕으로 새로운 에지 방향 판단 기준을 제안한다. 또한 현재 화소 위치에 대해 평탄 영역, 에지 영역, 반복되는 에지 패턴 영역으로 분류하고, 영역의 특성에 따라 서로 다른 에지 방향 판단 기준을 적용함으로써 판단의 정확성을 높인다. 제안하는 판단 기준은 주어진 베이어 패턴 영상에서의 에지 정보를 효율적으로 사용함으로써 에지를 가로지르는 보간을 피하고 이에 따른 열화를 최소화 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장 1절에서는 표본 줄임을 통해 획득한 저해상도 영상 사이의 상관관계를 분석한다. II장 2, 3절에서는 새로운 에지 방향 판단 기준을 제시하고, 소실된 컬러를 찾기 위한 방법을 구체적으로 논한다. III장에서는 실험을 통해 기존 방법의 성능을 분석하며, IV장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 본 론

1. 저해상도 영상에서의 상관관계

고해상도(high-resolution: HR) 영상(G)으로부터 저해상도 영상(G_{xy})을 획득하는 표본 줄임 과정을 화소 단위 (i, j)에서 나타내면 다음과 같다.

$$G_{xy}(i, j) = G(2i + x, 2j + y) \quad (1)$$

이 때, x, y 는 각각 수직, 수평 방향에 대한 표본 위치를 나타내며, 표본 위치는 $\{xy|00, 01, 10, 11\}$ 로 정의한다. 수식 (1)에 따라 G 채널의 원본 영상을 저해상도 영상으로 변환하면 $G_{00}, G_{01}, G_{10}, G_{11}$ 의 네 가지 영상을 획득하게 된다. 이 때 Gunturk^[8]이 제시한 것과 같이 영상의 성분을 저주파 성분과 수직, 수평 방향성을 갖는 고주파 성분의 합으로 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{xy} = \bar{G}_{xy} + \hat{G}_{xy}^v + \hat{G}_{xy}^h \quad (2)$$

이 때, \bar{G}_{xy} 는 G_{xy} 의 저주파 성분이며, $\hat{G}_{xy}^v, \hat{G}_{xy}^h$ 는 각각 G_{xy} 의 고주파 성분으로 수직, 수평 방향성을 갖는 에지 정보이다.

수식 (1), (2)를 바탕으로 고해상도 영상 G 채널의 수직 방향 에지 영역에서 저해상도 영상을 샘플링 하는 경우를 생각해 보자. 고해상도 영상의 수직 방향 에지 영역에 대해 수평 방향으로 이웃하는 화소 위치에서 샘플링 하는 경우 서로 다른 영역에 있는 값을 획득하게

되는 반면, 수직 방향으로 이웃하는 화소 위치에서 샘플링 하는 경우 동일한 영역에 속한 성분을 갖게 된다. 즉, 한 저해상도 영상의 수직 에지 성분은 수직방향으로 평행이동 관계에 있는 다른 영상과 유사한 성분을 갖게 되는데, 이를 일반적으로 확장하면 동일한 수직(수평) 방향으로 평행이동 관계에 있는 저해상도 영상들 사이에서는 해당 방향으로의 에지 성분이 유사하다는 결론을 내릴 수 있다. 이는 각 저해상도 영상이 수직, 수평, 혹은 양 방향에 대해 0.5 픽셀의 부화소 단위의 평행이동 관계를 갖기 때문이다. 이를 바탕으로 두 저해상도 영상 사이의 유사성을 판단하기 위해 차를 구할 수 있는데, 다음 수식과 같이 G 채널 상의 두 영상간의 차를 구하면 유사한 성분은 상쇄되는 반면 상이한 성분은 그 차이만큼 큰 값을 갖게 된다.

$$\begin{aligned} G_{00} - G_{01} &= \hat{G}_{00}^v - \hat{G}_{01}^v \\ G_{10} - G_{11} &= \hat{G}_{10}^v - \hat{G}_{11}^v \\ G_{00} - G_{10} &= \hat{G}_{00}^h - \hat{G}_{10}^h \\ G_{01} - G_{11} &= \hat{G}_{01}^h - \hat{G}_{11}^h \end{aligned} \quad (3)$$

즉, 두 저해상도 영상의 차를 구하면 평행이동 방향과 동일 성분은 제거되는 반면 반대되는 방향의 에지 성분은 그 차이만큼의 값이 남게 된다.

저해상도 영상과 에지 방향 사이의 상관관계를 그림 2에 영상으로 나타내었다. 그림 2(a)는 'lighthouse' 영상의 한 부분으로 G 채널에서 수평방향 패턴 성분과 수직, 수평 방향 선 에지 성분이 있는 영역이다. 수식 (2)의 분리를 바탕으로 영상의 수평 에지 영역에 대해서 수직 방향 에지 성분이 존재하지 않는 것으로 간주하였을 때, 차 영상 $G_{00} - G_{01}$ ($G_{10} - G_{11}$)은 수평 에지 영역에 대해서 평탄한 영상으로 나타날 것을 예상할 수 있다. 반대로 영상의 수직 에지 영역에 대해서 수평 방향 에지 성분이 존재하지 않는 것으로 간주하였을 때, $G_{00} - G_{10}$ ($G_{01} - G_{11}$)은 수직 에지 영역에서 평탄할 것이다. 이러한 고찰을 바탕으로 저해상도 영상들에 대해서 각각의 차 영상 $G_{00} - G_{01}$ 과 $G_{00} - G_{10}$ 을 각각 그림 2(b)와 (c)에 나타내었다. 그림 2(b), (c)를 비교하였을 때 수평 에지에 대해서는 그림 2(b)가 평탄한 반면에 수직 에지에서는 그림 2(c)가 평탄한 것을 확인할 수 있다. 두 영상의 차가 평탄한 경우에 대해 수식 (3)을 통해 두 영상의 유사한 성분이 상쇄된 것으로 볼 수 있으며 해당 영역에 대한 두 영상의 높은 상관관계를 유추할 수 있다. 결국 영상의 평행 이동 방향과 국부 에지 방향

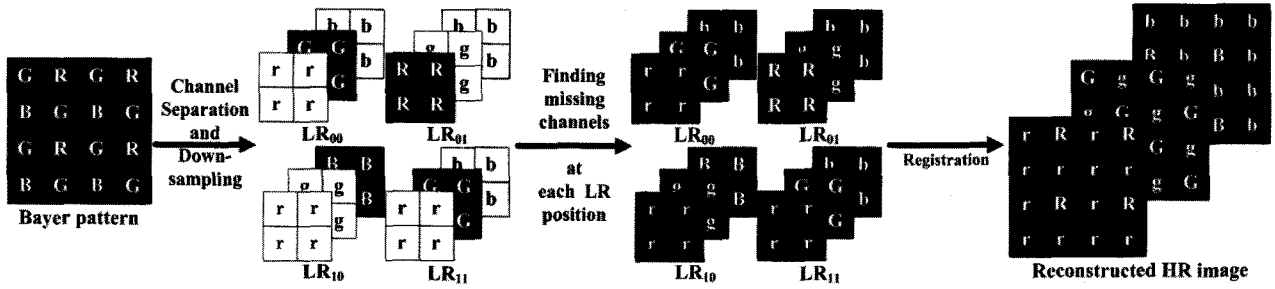


그림 3. 저해상도 영상으로 변환 된 Bayer 패턴에 대한 컬러 보간 방법
Fig. 3. Color interpolation of disjointed Bayer color filter array.

성이 일치하는 경우 해당영역에서 두 저해상도 영상 사이의 상관관계가 높음을 알 수 있으며, 이는 수식 (3)과 같이 두 영상 사이의 차의 특성을 이용하여 유추할 수 있다.

2. 분리된 베이어 패턴에서 컬러 보간

제안하는 방법은 그림 3과 같이 진행된다. 먼저 베이어 패턴을 수식 (1)을 이용하여 저해상도 영상으로 분리한 뒤, 저해상도 영상 간 상관관계를 바탕으로 영역 적응적 보간을 수행한다. 그 후 저해상도 영상을 융합하여 최종 결과 영상을 획득한다. 여기에서는 앞서 살펴 본 상관관계를 바탕으로 에지 방향 판단 기준을 제시하며, 이를 바탕으로 한 컬러 보간 방법을 제안한다.

가. 에지 방향성 판단 기준 및 영역 판단 방법

앞서 수식 (3)을 통해 살펴본 것과 마찬가지로 온전한 컬러 영상을 저해상도 영상으로 분리했을 때 영상의 평행이동 방향과 에지 방향이 일치하는 경우 높은 상관관계를 가진다. 따라서 평행이동 관계에 있는 두 저해상도 영상의 차가 반대 방향에 대한 차보다 국부 영역에서 상대적으로 평탄한 경우, 해당 방향에 위치한 두 영상간의 유사성이 높다고 판단할 수 있으며, 해당 영상의 평행이동 방향과 동일한 방향으로의 에지 성분을 가지고 있다고 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 다음과 같은 에지 방향성을 판별할 수 있는 기준을 제안한다.

$$s_{ver}^G(i,j) = 1 / \left(\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 |G_{00}(i+k,j+l) - \hat{G}_{10}(i+k,j+l)| + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 |G_{11}(i+k,j+l) - \hat{G}_{01}(i+k,j+l)| \right) \quad (4)$$

$$s_{hor}^G(i,j) = 1 / \left(\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 |G_{00}(i+k,j+l) - \hat{G}_{01}(i+k,j+l)| + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 |G_{11}(i+k,j+l) - \hat{G}_{10}(i+k,j+l)| \right)$$

$s_{ver}^G(i,j), s_{hor}^G(i,j)$ 는 각각 (i,j) 위치에서 G 영상 사이의 수직, 수평 유사성이다. 이 때, 베이어 패턴으로부터 획득한 저해상도 영상에서는 G 채널의 저해상도 영상이 모두 존재하는 것이 아니므로 색차 영역에서 주변부 평균을 이용하여 임시 보간 한 \hat{G}_{01} 과 \hat{G}_{10} 를 사용한다.

동일 채널 영상에 대한 상관관계를 확장하여 베이어 패턴으로부터 획득한 저해상도 영상 간 관계를 생각해 볼 수 있다. 즉, 서로 다른 채널 사이에서 에지 성분 사이에 존재하는 유사성을 바탕으로 수식 (3)의 G 채널 영상들 대신에 R_{01} 과 B_{10} 을 적용하는 것이다. 베이어 패턴에 의해 획득된 저해상도 영상 사이의 유사성에 기반을 둔 에지 방향성 판단 기준은 다음과 같다.

$$d_{ver}^R(i,j) = 1 / \sum_{(k,l) \in N} |\Delta_{ver}^R(i+k,j+l) - \Delta_{ver}^R(i,j)| \quad (5)$$

$$d_{hor}^R(i,j) = 1 / \sum_{(k,l) \in N} |\Delta_{hor}^R(i+k,j+l) - \Delta_{hor}^R(i,j)|$$

$d_{ver}^R(i,j), d_{hor}^R(i,j)$ 는 각각 (i,j) 화소 위치에서 수직, 수평 방향 평행이동 관계에 있는 영상 간 변화량을 의미하고, $N = \{(k,l) | (\pm 1, \pm 1), (\pm 1, \mp 1), (\pm 1, 0), (0, \mp 1)\}$ 은 이웃 화소 위치를 나타낸다. 또한 $\Delta_{ver}^R(i,j), \Delta_{hor}^R(i,j)$ 는 (i,j) 에서 수직, 수평으로 위치한 녹색, 적색 저해상도 영상 사이의 차로 정의하며, 각각은 다음과 같다.

$$\Delta_{ver}^R(i,j) = G_{11}(i,j) - R_{01}(i,j) \quad (6)$$

$$\Delta_{hor}^R(i,j) = G_{00}(i,j) - R_{01}(i,j)$$

이 때, $R_{01}(i,j)$ 는 중심영상이고, G_{11}, G_{00} 은 R_{01} 과 이웃에 위치한 이웃 영상으로써 수식 (6)은 R_{01} 위치에 대해서 G_{01} 을 획득하는 경우를 예로써 나타낸 것이다.

제안하는 컬러 보간은 수식 (4)와 (5)에서 제안한 에지 방향성 판단 기준을 사용하여 그림 4와 같이 각 채널에 따라 영역을 구분하고 에지 방향성을 추정한 후 소실된 정보를 보간한다. 영역 구분은 평탄, 에지, 패턴

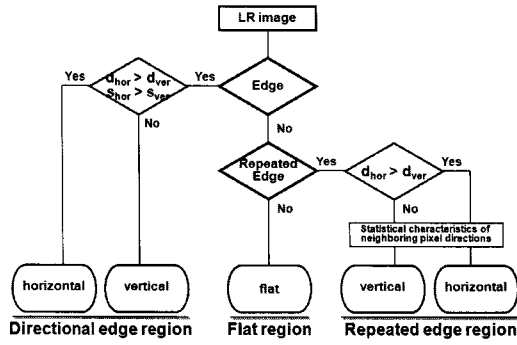


그림 4. 영상의 영역에 따른 구분 방법
Fig. 4. Region classification scheme.

에지 영역으로 구분한다. 먼저, 수식 (4), (5)의 판단 기준을 모두 사용하여 에지 방향 결정과 동시에 에지 영역 여부를 판단한다. 남은 영역은 에지가 존재하지 않거나 방향이 불분명한 영역이므로, 판단 기준을 채널 내 판단 기준으로 제한하여 한 번 더 방향성 여부를 판단하여 패턴 에지 영역을 결정한다.

나. G 채널 보간

G 채널 보간에서는 베이어 패턴에 의해 샘플링 되지 못한 저해상도 영상 G_{01}, G_{10} 을 보간한다. 이 때, 두 영상이 대칭적으로 위치하기 때문에 하나의 보간 방법을 다른 영상 보간에 적용할 수 있다. 여기에서는 G 채널 영상의 소실 된 화소에 대해 영역 구분 후 추정 된 에지 방향을 따라 G_{01} 을 보간 하는 방법을 기술하겠다.

각 채널의 소실된 화소를 추정할 때 채널 간 상관관계를 이용한다. 현재 고려하고 있는 G_{01} 에 대해서 컬러 차 영역 K_R 을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} K_R^u &= G_{11}(i-1, j) - r_{01}(i-1, j) \\ K_R^d &= G_{11}(i, j) - r_{01}(i+1, j) \\ K_R^l &= G_{00}(i, j) - r_{01}(i, j-1) \\ K_R^r &= G_{00}(i, j+1) - r_{01}(i, j+1) \end{aligned} \quad (7)$$

이 때, $K_R^p, p \in \{u, d, l, r\}$ 는 (i, j) 의 상, 하, 좌, 우 방향의 녹색과 적색 채널 저해상도 영상의 차를 의미하며, $r_{01}(i, j)$ 는 (i, j) 위치에서 R_{01} 을 사용하여 일시적으로 보간 된 영상으로 다음과 같은 선형보간법으로 구한다.

$$\begin{aligned} r_{01}(i-1, j) &= (R_{01}(i, j) + R_{01}(i-1, j))/2 \\ r_{01}(i+1, j) &= (R_{01}(i, j) + R_{01}(i+1, j))/2 \\ r_{01}(i, j-1) &= (R_{01}(i, j) + R_{01}(i, j-1))/2 \\ r_{01}(i, j+1) &= (R_{01}(i, j) + R_{01}(i, j+1))/2 \end{aligned} \quad (8)$$

최종적으로 영역이 판단된 후 이미 판단 된 방향성에

따라 다음과 같이 최종 화소값을 계산한다.

$$G_{01}(i, j) = \begin{cases} \frac{w^l K_R^l + w^r K_R^r + R_{01}(i, j)}{w^l + w^r} & \text{horizontal} \\ \frac{w^u K_R^u + w^d K_R^d + R_{01}(i, j)}{w^u + w^d} & \text{vertical} \\ \frac{w^l K_R^l + w^r K_R^r + w^u K_R^u + w^d K_R^d + R_{01}(i, j)}{w^l + w^r + w^u + w^d} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

이 때, w^p 는 주변 화소 간의 차이에 반비례 하도록 설계 된 가중치 함수이며, 위치 $p \in \{u, d, l, r\}$ 는 각각 중심 화소로부터 $\{(-1, 0), (1, 0), (0, -1), (0, 1)\}$ 에 위치한 화소를 나타낸다.

다. R, B 채널 보간

베이어 패턴의 컬러 분포 특성으로 인해 R, B 채널은 G 채널에 비해 절반의 샘플링 빈도를 갖기 때문에, R, B 채널의 정보가 상대적으로 부족하다. 따라서 R, B 채널을 보간 할 때에는 G 채널 보간값을 이용한다. 주어진 베이어 패턴에 대해 보간할 대상은 각 채널에 따라 R_{00}, R_{10}, R_{11} 과 B_{00}, B_{01}, B_{11} 이다. 이 때 CFA에 의해 획득된 R_{01} 과 B_{10} 의 대각선 방향에 존재하는 R_{10} 과 B_{01} 의 경우에는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} R_{10}(i, j) &= \frac{K_R(i, j-1) + K_R(i, j) + K_R(i+1, j-1) + K_R(i+1, j)}{4} \\ &\quad + G_{10}(i, j) \\ B_{01}(i, j) &= \frac{K_B(i, j-1) + K_B(i, j) + K_B(i+1, j-1) + K_B(i+1, j)}{4} \\ &\quad + G_{01}(i, j) \end{aligned} \quad (10)$$

위의 수식에 대해 $K_R(i, j) = G_{01}(i, j) - R_{01}(i, j)$, $K_B(i, j) = G_{10}(i, j) - B_{10}(i, j)$ 로 정의되며, G_{01}, G_{10} 은 이전 보간 과정에서 얻은 G 채널 저해상도 영상이다. R_{10}, B_{01} 보간 후 남은 네 개의 영상에 대해서는 G 채널과 동일한 방법으로 보간한다. 본 단원에서는 R 채널 중에서 R_{00} 보간 과정을 대표적으로 기술하겠다.

영역 구분과 영역에 따른 방향성 추정은 R 채널에서의 방향성 판단을 위해 정의된 다음의 변화량을 사용하여 수식 (4)와 (5)를 이용하여 이루어진다.

$$\begin{aligned} \Delta_{ver}^R(i, j) &= G_{00}(i, j) - R_{10}(i, j) \\ \Delta_{hor}^R(i, j) &= G_{00}(i, j) - R_{01}(i, j) \end{aligned} \quad (11)$$

이 때, G_{00} 와 R_{01} 은 베이어 CFA에서 얻은 영상이고,

R_{10} 은 식 (10)을 이용하여 계산된 영상이다. 각 화소에 대해서 영역을 구분하고 에지 방향성을 추정한 후, 각 방향성에 대해 색차영역에서의 보간이 이루어진다. R_{00} 영상 보간을 위한 색차 K_R 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_R^u &= G_{10}(i-1, j) - R_{10}(i-1, j) \\ K_R^d &= G_{10}(i, j) - R_{10}(i, j) \\ K_R^l &= G_{01}(i, j-1) - R_{01}(i, j-1) \\ K_R^r &= G_{01}(i, j) - R_{01}(i, j) \end{aligned} \quad (12)$$

수식 (12)에 따라 계산된 색차 영역을 이용하여 다음과 같이 에지 방향을 따라 보간이 이루어진다.

$$R_{00}(i, j) = \begin{cases} G_{00}(i, j) - \frac{w^l K_R^l + w^r K_R^r}{w^l + w^r} & \text{horizontal} \\ G_{00}(i, j) - \frac{w^u K_R^u + w^d K_R^d}{w^u + w^d} & \text{vertical} \\ G_{00}(i, j) - \frac{w^l K_R^l + w^r K_R^r + w^u K_R^u + w^d K_R^d}{w^l + w^r + w^u + w^d} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

III. 실험 결과

제안하는 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 기존 알고리즘과 비교하였다. 비교 알고리즘으로써 색차 영역(color difference domain) 보간을 제안한 Pei의 알고리즘^[6]을 사용하였으며, 이는 주변부 평균 방법 대비 제안하는 방법의 성능 분석을 위해 비교하였다. 또한 에지 방향성 보간 방법(edge-directed demosaicing) 중에서는 Hamilton^[10]의 알고리즘, 연판정 방법으로 에지 방향성을 추정한 Wu^[12]의 알고리즘(primary consistency soft decision : PCSD), 동질성 기반 영역 판정 방법을 제안한 Hirakawa^[13]의 알고리즘(homogeneity-directed decision)을 사용하였다.

실험에 사용된 대표적인 영상은 표 1에 나타내었다. 각각의 영상은 컬러 보간 성능 비교에 주로 사용되는 Kodak 영상 중에서 에지나 패턴 에지 등의 고주파 성분이 많은 영상을 선별한 것이다. 각 영상에 대한 실험을 하기 위해 전 채널 컬러 영상에 대해 그림 1을 이용한 베이어 패턴 샘플링 후 각각의 컬러 보간 알고리즘을 적용하였다. 표 1에서는 보간 결과와 원본 영상 간의 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)를 측정함으로써 수치적으로 비교했다. PSNR은 $10 \log_{10}(255^2/MSE)$ 로 정의하고, MSE(Mean Square Error)는 원본과 결과 영상 사이의 에러의 제곱의 평균이다.

표 1. PSNR 결과 비교

Table 1. The comparison of PSNRs of the conventional and the proposed algorithms.

		Pei	Hamilton	Wu	Hirakawa	Proposed
	R	34.54	34.80	36.31	37.92	38.62
	G	36.99	36.10	38.01	39.01	39.59
	B	34.09	34.34	35.63	37.06	37.55
	R	34.53	36.67	36.68	38.03	39.23
	G	37.23	38.32	38.82	39.63	40.82
	B	34.77	37.01	37.19	38.35	39.83
	R	36.20	35.83	35.90	36.15	36.77
	G	41.10	39.43	40.04	41.13	41.95
	B	39.13	37.77	38.02	39.33	40.26
	R	34.78	34.98	34.51	34.53	35.84
	G	37.88	37.27	37.36	37.98	39.27
	B	35.16	35.21	34.90	35.34	36.70
	R	38.64	39.41	39.66	40.54	41.30
	G	41.38	41.38	42.06	42.79	43.51
	B	39.33	40.04	40.34	40.78	42.06
	R	33.21	33.19	33.22	34.76	35.90
	G	35.64	34.72	35.27	36.17	37.27
	B	33.25	33.27	33.30	35.06	36.08
	R	29.93	31.69	31.45	33.28	34.95
	G	33.10	33.48	34.07	35.31	36.80
	B	29.89	31.70	31.50	33.31	35.03

표 1을 바탕으로 보았을 때 일반적으로 에지 방향성 보간 방법이 주변부 평균을 이용한 Pei의 방법에 비해 수치적으로 좋은 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 영상에 따라 성능 우위가 변하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기존 에지 방향성 알고리즘이 디테일 등의 고주파 영역에서 잘못 된 방향으로 보간하는 경우 평균적으로 더 큰 에러로써 나타내기 때문이다. 하지만 제안하는 방법의 경우에는 기존의 알고리즘에 대해 각각의 채널에 대해 모두 높은 PSNR을 보인다. 이것은 제안하는 알고리즘이 에지 혹은 패턴 에지 영역의 소실된 정보를 보간 함에 있어서 기존 알고리즘 보다 정확하게 보간하고, 적은 에러를 발생시킴을 나타낸다.

그림 5, 6에서는 실험 결과 중 고주파 성분인 에지나 패턴 에지가 많은 영역에 대해 각 알고리즘의 실제 결과 영상을 비교했다. 기존 알고리즘의 경우 해당 영역에서 나타나는 에러를 줄이기 위한 방법으로써 별도의 정제 과정(refinement step)을 거치지만, 본 결과 비교에서는 컬러 보간 알고리즘의 성능만을 공정하게 비교하기 위해 각 알고리즘의 정제 과정 없이 비교 하였다. 그림 5는 'lighthouse' 영상의 일부분으로써, 수직 방향의 선 에지 성분이 평행하게 정렬되어 있으며 오른쪽 방향으로 수직 선분의 밀도가 높아짐으로써 수평 방향 고주파 성분이 많아진다. 그림 5(b)에서는 방향성을 고려

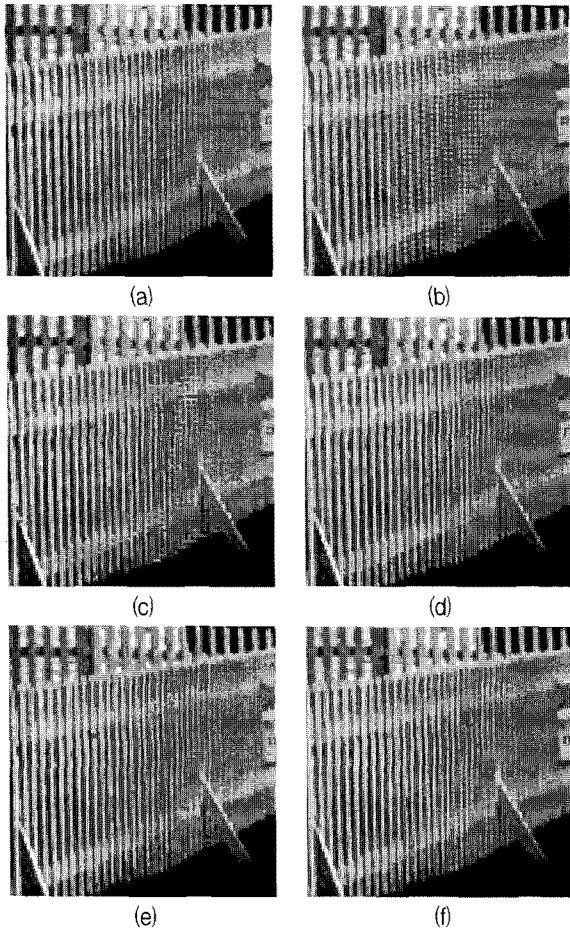


그림 5. 실험 결과 (a) 원본 영상 (b) Pei (c) Hamilton (d) Wu (e) Hiramkawa (f) 제안하는 방법
 Fig. 5. Resultant images (a) original, (b) Pei (c) Hamilton (d) Wu (e) Hiramkawa (f) the proposed method.

하지 않음으로써 지퍼 현상(zipper effect)과 모아레(Moire)가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 5(c)에서는 에지 방향성을 고려함으로 인해 지퍼 효과와 모아레 패턴이 줄어든 반면, 방향이 정확하게 판단되지 않은 경우 에러가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 5(d), (e)에서는 보다 정확하게 방향성을 추정함으로써 많은 에러가 줄어들었다. 하지만 수직방향 패턴 에지와 수평방향 텍스처가 만나는 부분에서는 방향 추정의 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(f)에 나타난 제안하는 알고리즘의 결과에서는 대부분의 에러가 제거되어 원본과 유사한 결과를 획득한 것을 볼 수 있다.

그림 6에서는 수평 방향으로의 패턴 에지가 있는 영역을 비교하였다. 그림 6(b)에서 패턴 에지 영역에서 지퍼 현상과 모아레 현상이 발생하는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 그림 6(c)~(e)에서는 오류가 많이 줄었

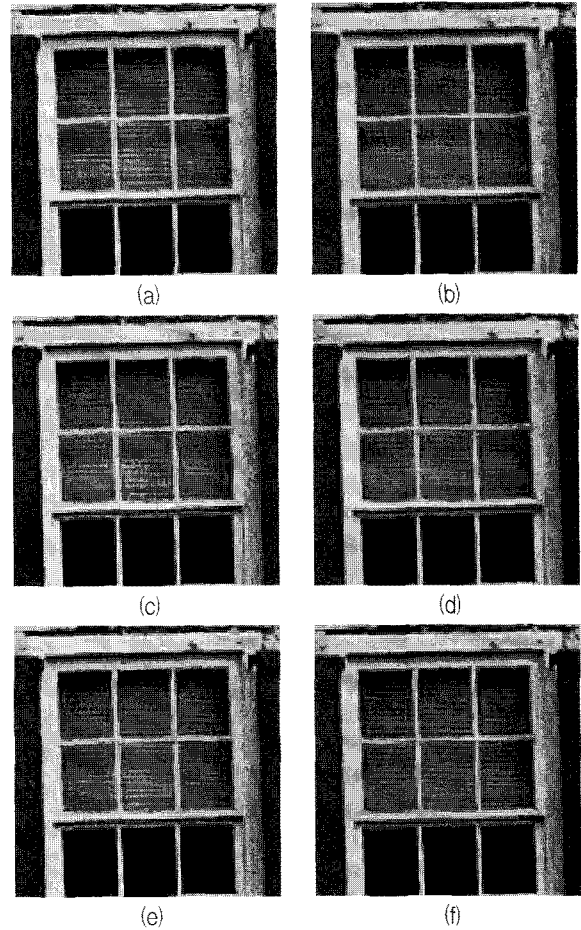


그림 6. 실험 결과 (a) 원본 영상 (b) Pei (c) Hamilton (d) Wu (e) Hiramkawa (f) 제안하는 방법
 Fig. 6. Resultant images (a) original, (b) Pei (c) Hamilton (d) Wu (e) Hiramkawa (f) the proposed method.

지만, 에지 방향성이 바뀌는 부분에서는 여전히 문제가 발생한다. 그림 6(f)에서 나타난 것과 마찬가지로 제안하는 방법에서는 기존 알고리즘에서 발생하는 컬러 열화 문제가 개선되어 패턴 에지와 에지 방향이 바뀌는 영역에서도 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

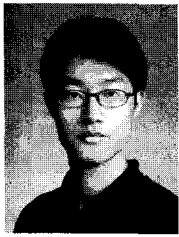
본 논문에서는 에지와 패턴 에지 영역에서의 성능을 향상시킨 에지 방향성 컬러 보간 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법은 영상의 영역을 평탄, 에지, 패턴 에지 영역으로 분류하고, 각 화소 위치에서 영역 구분에 따라 보간하였다. 특히 에지와 패턴 에지 영역에 대해서는 효율적인 판단 기준을 적용해서 에지 방향을 수평 혹은 수직 방향으로 추정하도록 하였다. 에지 방향성을

판단하는 기준은 베이어 패턴에 의해 열화된 영상을 저 해상도 영상으로 분리하여 얻은 영상 사이에 존재하는 상관관계에 대한 분석을 바탕으로 제안하였다. 제안하는 방법은 영상의 영역 세분화와 에지 방향에 대한 정확한 추정을 바탕으로 영상의 고주파 영역에 대한 보간 성능을 향상시켰다. 실험 결과에서 수치적 결과와 실제 영상을 통해 제안하는 알고리즘이 객관적, 주관적 측면에서 기존 알고리즘보다 좋은 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] B. E. Bayer, "Color imaging array," U.S. Patent 3 971 065, Jul. 1976.
- [2] B. K. Gunturk, J. Glotzbach, Y. Altunbasak, R. W. Schafer, and R. M. Mersereau, "Demosaicking: color filter array interpolation in single chip digital cameras," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 22, no. 1, pp. 44-54, Jan. 2005.
- [3] R. Kimmel, "Demosaicking: Image reconstruction from color CCD samples," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 8, no. 9, pp. 1221-1228, Sep. 1999.
- [4] S. W. Park and M. G. Kang, "Color interpolation with variable color ratio considering cross-channel correlation," *SPIE Opt. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 34-43, Jan. 2004.
- [5] J. E. Adams Jr., "Interactions between color plane interpolation and other image processing functions in electronic photography," *Proc. SPIE*, vol. 2416, pp. 144-151, Feb. 1995.
- [6] S. C. Pei and I. K. Tam, "Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 503-513, Jun. 2003.
- [7] L. Zhang and X. Wu, "Color demosaicking via directional linear minimum mean square-error estimation," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 14, no. 12, pp. 2167-2178, Dec. 2005.
- [8] B. K. Gunturk, Y. Altunbasak and R. M. Mersereau, "Color plane interpolation using alternating projections," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 11, no. 9, pp. 997-1013, Sep. 2002.
- [9] D. Alleysson, S. Susstrunk and Jeanny Herault, "Linear demosaicking inspired by the human visual system," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 14, no. 4, pp. 439-449, Apr. 2005.
- [10] J. E. Adams and J. F. Hamilton, "Design of practical color filter array interpolation algorithms for digital cameras," *Proc. SPIE*, vol. 3028, pp. 117-125, 1997.
- [11] C. W. Kim and M. G. Kang, "Noise insensitive high resolution color interpolation scheme considering cross-channel correlation," *SPIE Opt. Eng.*, vol. 44, no. 12, pp. 127006:1-15, Dec. 2005.
- [12] X. Wu and N. Zhang, "Primary-consistent soft-decision color demosaicking for digital cameras (patent pending)," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 13, no. 9, pp. 1263-1274, Sep. 2004.
- [13] K. Hirakawa and T. W. Parks, "Adaptive homogeneity-directed demosaicking algorithm," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 360-369, Mar. 2005.
- [14] K. Chung and Y. Chan, "Color demosaicking using variance of color differences," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 15, no. 10, pp. 2944-2955, Oct. 2006.

저 자 소 개



오 현 목(학생회원)
 2005년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업.
 2007년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업.
 2007년~연세대학교 전기전자
 공학과 박사과정.

<주관심분야 : 컬러보간, 오토화이트밸런스>



유 두 식(학생회원)
 2006년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업.
 2008년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업.
 2008년~연세대학교 전기전자
 공학과 박사과정.

<주관심분야 : 컬러보간, 디블러링, 영상보간>



강 문 기(정회원)-교신저자
 1986년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1988년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1994년 Northwestern University
 박사 졸업.

1994년~1997년 Assistant Professor.

(University of Minnesota, Duluth)

1997년~1999년 연세대학교 전기전자공학과
조교수.

1999년~2004년 연세대학교 전기전자공학과
부교수.

2004년~연세대학교 전기전자공학과 정교수.

<주관심분야 : 영상복원, 초해상도 영상복원, 비
선형 필터링, 비디오 분석 및 처리 부화소단위의
움직임 추정>