

논문 2006-43SD-11-5

# 화소 간 상관관계를 이용한 CCD/CMOS 이미지 센서용 색 보간 기법 및 VLSI 설계에 관한 연구

(A Study on the VLSI Design of Efficient Color Interpolation  
Technique Using Spatial Correlation for CCD/CMOS Image Sensor)

이원재\*, 이성주\*\*\*, 김재석\*\*

(Wonjae Lee, Seongjoo Lee, and Jaeseok Kim)

## 요 약

본 논문에서는 화소간의 상관관계를 이용한 CCD/CMOS 이미지 센서용 효율적인 색 보간 기법을 제안한다. 최근 각광받고 있는 CCD/CMOS 이미지 센서는 컬러 필터 배열(Color Filter Array)을 사용하기 때문에, 각 화소는 컬러 영상을 만들기 위한 3가지 색 채널 중 한 가지 채널만 갖고 있게 된다. 따라서 컬러 영상을 만들기 위해서는 색 보간 구조가 필요하다. 최근 제안되는 색 보간 기법은 보간된 영상의 품질 향상에만 주력하고 있는데 반해, 본 논문에서는 낮은 복잡도를 갖으면서 잘못된 색을 최소화하기 위한 방법을 제안한다. 제안된 색 보간 기법에서는 인접한 화소간의 상관관계를 이용하여, 현재 화소의 방향성을 결정할 때 이웃 화소의 방향성 정보를 이용하였다. 기존의 방향성을 고려한 색 보간 기법에 제안된 기법을 적용한 결과, 알고리즘의 종류에 따라 PSNR이 0.09 ~ 0.47dB 향상되었고, 대부분의 잘못된 색(False color)을 최소화함으로써 색 보간된 컬러 영상의 품질이 향상되었다. 제안된 색 보간 기법은 Verilog HDL 및 FPGA를 이용하여 실시간으로 구현 검증되었다. 0.25um CMOS 표준 셀 라이브러리를 이용하여 합성하였을 때, 총 게이트 수는 12K개였으며 5개의 라인 메모리가 사용되었다.

## Abstract

In this paper, we propose a cost-effective color filter array (CFA) demosaicing method for digital still cameras in which a single CCD or CMOS image sensor is used. Since a CFA is adopted, we must interpolate missing color values in the red, green and blue channels at each pixel location. While most state-of-the-art algorithms invest a great deal of computational effort in the enhancement of the reconstructed image to overcome the color artifacts, we focus on eliminating the color artifacts with low computational complexity. Using spatial correlation of the adjacent pixels, the edge-directional information of the neighbor pixels is used for determining the edge direction of the current pixel. We apply our method to the state-of-the-art algorithms which use edge-directed methods to interpolate the missing color channels. The experiment results show that the proposed method enhances the demosaiced image quality from 0.09 ~ 0.47dB in PSNR depending on the basis algorithm by removing most of the color artifacts. The proposed method was implemented and verified successfully using verilog HDL and FPGA. It was synthesized to gate-level circuits using 0.25um CMOS standard cell library. The total logic gate count is 12K, and five line memories are used.

**Keywords :** 색 보간, 컬러 필터 배열(Color filter array), Bayer pattern, 화소간 상관관계, VLSI

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과

(Department of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University)

\*\*\* 정회원, 세종대학교 정보통신공학과

(Department of Information and Communication Engineering Sejong University)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원 대학 IT연구센터 육성·지원사업 및 2006년도 교육인적자원부 BK21 사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS 사업단의 지원을 받아 연구되었고, CAD Tool은 IDEC으로부터 지원 받았음.

접수일자: 2006년5월30일, 수정완료일: 2006년10월9일

## I. 서 론

최근 CCD/CMOS 이미지 센서를 이용한 디지털 카메라에 대한 관심이 높아지고 있다. 이는 디지털 카메라가 기존의 필름 카메라에 비해 여러 가지 장점이 많기 때문이다. 컬러 영상을 만들기 위해서는 최소한 3가지 색이 필요한데, CCD/CMOS 이미지 센서는 빛의 밝기만을 인식할 수 있다. 따라서 디지털 카메라는 컬러 영상을 위한 3가지 색을 얻기 위해, 3개의 이미지 센서와 각 센서마다 특정 색만을 통과 시키는 컬러 필터를 필요로 하게 된다. 그러나 이미지 센서가 값비싼 소자이기 때문에, 가격을 낮추기 위해 보통 단일 센서를 사용하는 대신 센서의 표면에 컬러 필터 배열(Color Filter Array)를 채용하고 있다. 컬러 필터 배열은 이미지 센서 앞단에 마이크로 렌즈의 형태로 부착되어 있고, 한 화소마다 한 가지 컬러를 나타내는 빛만을 통과 시키며 규칙적으로 배열된 구조를 갖는다. 컬러가 배열된 구조에 따라 여러 가지 형태를 갖고 있으나, 가장 널리 사용되는 패턴은 Bayer 패턴이다.<sup>[1]</sup> 그림 1에서 보듯이, 각 화소를 통해 한 가지 색만을 얻을 수 있으므로, 다른 두 색은 인접 화소의 값을 통해 얻어야만 한다. 이 때 색 보간이 제대로 되지 않으면, 생성된 컬러 영상은 잘못된 색으로 인해 품질이 떨어지게 된다.

최근 많은 색 보간 기법이 제안되었다. 이러한 기법은 크게 4가지로 분류될 수 있다. 첫 번째 분류는 방향성을 고려하지 않은 단순 보간 기법이다.<sup>[2]</sup> Bilinear나 cubic 색 보간 기법이 여기에 속하는데, 이들 기법은 화소가 속한 영역의 특징을 고려하지 않고 보간을 수행한다.

따라서 계산량이 적고 구현이 쉽다는 장점을 갖지만 경계 영역을 고려하지 않기 때문에, 경계 영역에서 잘못된 색으로 보간하게 되어 영상의 품질이 좋지 못하다는 단점이 있다.

두 번째 기법은 R, G, B 채널간의 상호 상관관계를 이용한 보간 기법이다.<sup>[3-6]</sup> 이들 기법은 같은 물체 내에서 채널의 비는 변하지 않는다고 가정한다. 채널 간 상호 상관관계를 이용하기 위해, 우선 데이터 수가 가장 많은 G 채널을 보간한다. G 채널과 R, B 채널의 비, 혹은 차가 일정하다는 가정 하에, G 채널을 이용하여 R, B 채널에 대한 보간을 수행한다. 단순 보간 기법에 비해 우수하기는 하지만, 경계 영역에서는 채널의 비가 변하지 않는다는 가정이 성립하지 않으므로, 품질이 떨어지게 된다.

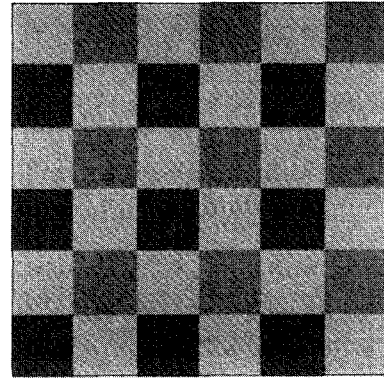


그림 1. Bayer 컬러 필터 배열 패턴

Fig. 1. Bayer color filter array pattern.

세 번째는 영상의 특징을 고려한 보간 기법이다.<sup>[7-12]</sup> 먼저 가로와 세로 방향의 2개의 구배(gradient)를 계산한다. 가로 방향의 구배가 세로 방향의 구배보다 크면, 해당 화소는 가로 방향의 경계에 있을 가능성이 크므로, 세로 방향으로 색 보간을 수행한다.<sup>[9]</sup> 세로 방향의 구배가 크면 가로 방향으로 색 보간을 수행하고, 같은 값을 가질 경우 평균을 취하게 된다. 두 번째 채널간의 상호 관계를 이용하는 기법과 함께 사용함으로써 우수한 성능을 가질 수 있지만, 경계 구분이 어려운 특정 영역에서는 여전히 성능이 떨어진다.

네 번째 기법은 후처리 기법이다.<sup>[13-18]</sup> 이들은 앞서 설명한 여러 종류의 색 보간 기법을 통해 초기 색 보간을 수행한 뒤, 초기 색 보간에서 발생한 잘못된 색을 최소화하기 위한 다양한 방법의 후처리를 한다. 이들 기법을 통해 대부분의 잘못된 색을 제거할 수 있으나, 일부 심각한 잘못된 색의 경우는 제거할 수 없다. 또한 반복 수행을 하는 이들 기법의 특성상, 전체 색 보간 기법의 안정성을 위협하기도 한다는 단점이 있다. 이외에도 계산량이 매우 많다는 점도 이들 기법의 단점이다.

다양한 색 보간 기법들에 의해, 영상의 품질이 향상되기는 했으나, 여전히 특정 영역에서의 잘못된 색을 해결하지 못하고 있고, 높은 복잡도 역시 문제가 되고 있다. 따라서 본 논문에서는, 효율적으로 색 보간 기법의 성능을 높일 수 있는 기법을 제시한다. 인접한 화소간의 상관관계를 이용하여, 현재 화소의 방향성을 결정할 때 인접 화소의 방향성 정보를 이용한다. 이를 통해 전체 색 보간 기법의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 기존의 색 보간 기법에 대해 요약하고, III장에서는 제안한 색

보간 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 실험을 통해 제안된 기법과 기존 기법에 대한 비교를 하고, V장에서 하드웨어 구현에 관해 설명한 뒤 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존 색 보간 기법

기존에 제안된 여러 색 보간 기법 중, 제안된 알고리즘과의 비교 실험에 사용된 세 가지 색 보간 기법에 대해 간단히 설명한다. 이들 기법은 모두 경계 영역을 고려한 색 보간 기법이다.

### 1. Edge-adaptive Interpolation

Edge-adaptive interpolation 기법은 경계 영역의 특징에 따라 색을 보간하는 기법이다.<sup>[9]</sup> 경계 영역에 대한 정보를 얻기 위해, 가로 및 세로 방향에 대한 구배를 구한다. 그림 2의 B7을 기준으로, 가로 및 세로 방향의 구배는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} DH &= |G_6 - G_8| \\ DV &= |G_3 - G_{11}| \end{aligned} \quad (1)$$

계산된 구배를 이용하여, G7은 식(2)를 이용하여 계산될 수 있다.

$$G_7 = \begin{cases} \frac{G_6 + G_8}{2} & \text{if } DH < DV \\ \frac{G_3 + G_{11}}{2} & \text{if } DH > DV \\ \frac{G_3 + G_6 + G_8 + G_{11}}{4} & \text{if } DH = DV \end{cases} \quad (2)$$

R 채널과 B 채널의 보간은 단순 색 보간 기법 혹은 채널간의 상호 상관관계를 이용한 색 보간 기법을 이용한다.

### 2. Adaptive Color Plane Interpolation

J.E. Adams 등은 경계 영역의 특징을 고려하여, 우선 G 채널에 대한 보간을 수행하였는데, 이 때 R, B 채널을 이용하여 결과 값을 보상한다.<sup>[11]</sup> 이러한 보상을 통해 에일리어징(aliasing) 현상을 최소화하였다. 그림 2의 B7에서 G7을 구하고자 할 때, 가로 및 세로 방향의 구배는 식 (3)과 같이 계산된다. 이들 구배는 G 채널의 구배와 R, B 채널의 이차 도함수 항으로 구성되어 있다.

B	G	B <sub>1</sub>	G	B
G	R <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	G
B <sub>5</sub>	G <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	G <sub>8</sub>	B <sub>9</sub>
G	R <sub>10</sub>	G <sub>11</sub>	R <sub>12</sub>	G
B	G	B <sub>13</sub>	G	B

그림 2. 참고 컬러 필터 배열 패턴

Fig. 2. Reference Bayer color filter array pattern.

$$\begin{aligned} DH &= |-B_5 + 2B_7 - B_9| + |G_6 - G_8| \\ DV &= |-B_1 + 2B_7 - B_{13}| + |G_3 - G_{11}| \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 얻어진 가로 및 세로 방향 정보를 이용하여, G7은 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$G_7 = \begin{cases} \frac{G_6 + G_8}{2} + \frac{-B_5 + 2B_7 - B_9}{2} & \text{if } DH < DV \\ \frac{G_3 + G_{11}}{2} + \frac{-B_1 + 2B_7 - B_{13}}{2} & \text{if } DV < DH \\ \frac{G_3 + G_6 + G_8 + G_{11}}{4} + \frac{-B_1 - B_5 + 4B_7 - B_9 - B_{13}}{8} & \text{if } DH = DV \end{cases} \quad (4)$$

식(4)에서 G 채널 값은 방향에 따른 G 채널의 평균 값 및 R, B 채널의 이차 도함수 항으로 구성되어 있다.

R 및 B 채널에 대한 보간은 G 채널에서 가로 및 세로 방향의 구배가 이용되었던 것과는 달리, 대각선 방향의 구배를 이용한다. 결정된 방향에 따라, G 채널과 유사한 방식으로 보간을 수행한다. G 채널과 마찬가지로 R 및 B 채널의 보간 식은 각 채널의 평균값과 G 채널의 이차 도함수로 구성되어 있다.

### 3. Iterative interpolation

X. Li에 의해 제안된 색 보간 기법은 우선 일반적인 색 보간 기법을 이용하여 초기 영상을 얻은 후, 색 보간된 영상에서 발생하게 되는 잘못된 색을 최소화하기 위한 후처리를 반복적으로 수행하였다.<sup>[18]</sup> 먼저 식(5)와 같이 두 색 간의 차이를 나타내기 위한 식을 정의하였다.

$$D_R = R - G, \quad D_B = B - G \quad (5)$$

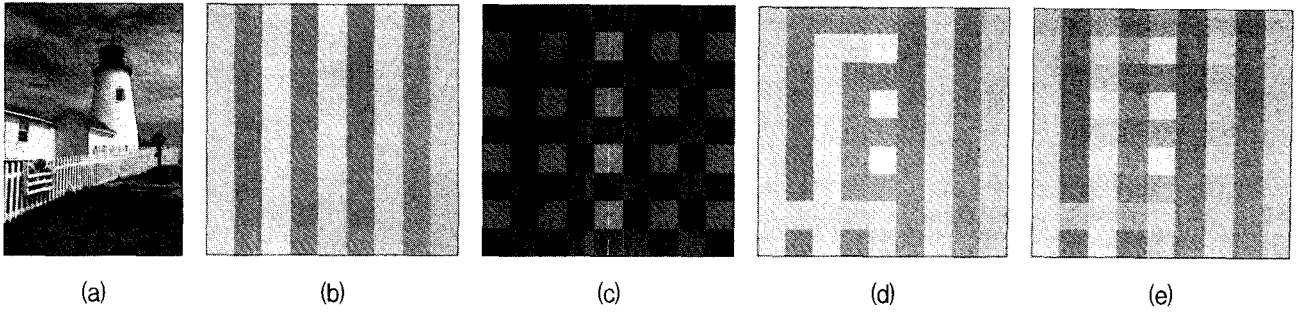


그림 3. 모호한 영역에서 잘못된 색이 발생하게 되는 예  
 (a) 원영상 (b) 원영상의 부분 확대 영상 (c) Bayer 패턴 영상 (d) Adaptive Color Plane Interpolation으로 보간된 영상 (e) Iterative interpolation으로 보간된 영상  
 Fig. 3. Examples to illustrate the color artifacts generated by the ambiguous regions: (a) Original image (b) Zoomed part of fence region (c) The mosaic image (d) Demosaiced image by Adaptive Color Plane Interpolation, (e) Demosaiced image by Iterative interpolation.

그림 2의 B7에서의 G7은 식 (6)을 이용하여 갱신된다.

$$\hat{D}_{B7}^n = \frac{D_{B7}^n + D_{B6}^n + D_{B8}^n + D_{B1}^n}{4} \quad (6)$$

$$\hat{G}_7^n = \hat{B}_7^n - \hat{D}_{B7}^n \quad (7)$$

여기서,  $\hat{D}_{B7}^n$  은 갱신된 색 간의 차이를 말하고, n은 반복 수행된 횟수를 말한다. R 채널에서의 G 채널 보간도 비슷한 방법으로 수행된다.

R 및 B 채널의 경우 두 단계를 거쳐 갱신된다. 그림 2에서 G6에서의 R6는 다음과 같은 식에 의해 갱신된다.

$$\hat{D}_{R6}^n = \frac{D_{R2}^n + D_{R0}^n}{2} \quad (8)$$

$$R_6^{n+1} = G_6^n - \hat{D}_{R6}^n \quad (9)$$

그리고 B7에서의 R7은 다음과 같은 식에 의해 갱신된다.

$$\hat{D}_{R7}^n = \frac{D_{R2}^n + D_{R4}^n + D_{R0}^n + D_{R2}^n}{4} \quad (10)$$

$$R_7^{n+1} = G_7^n - \hat{D}_{R7}^n \quad (11)$$

B 채널의 경우도 R과 같은 방법으로 갱신한다. 각 채널에 대한 갱신은 특정 조건을 만족하게 될 경우 중단하게 된다.

### III. 제안된 색 보간 기법

잘못된 색을 최소화하기 위해, 대부분의 색 보간 기법에서는 경계 영역에 대한 특성 및 채널 간의 상관관계를 고려하여 색 보간을 수행하였다. 이러한 색 보간 기법들은 G 채널을 보간할 때 경계 영역을 정확히 판단하고, 그에 따라 색 보간을 수행하였을 경우 좋은 결과를 얻을 수 있다. 보간된 G 채널을 이용하여 R 및 B 채널에 대한 보간도 수행하므로, R과 B 채널의 결과 역시 우수하게 된다. 그러나 이러한 색 보간 기법들은 가로 및 세로 방향의 구배가 비슷하여 정확한 판단을 내리기 어려운 경우, 가로 방향의 경계에서 세로 방향으로 보간을 하거나 세로 방향에서 가로 방향으로 보간을 하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 잘못된 경계 영역의 판단으로 인해 잘못된 색이 발생하게 된다. 그림 3은 실영상에서는 정확한 방향성의 판단이 가능하나, Bayer 패턴에서 경계 영역을 판단하기 모호한 경우의 예이다. 그림 3(a)가 원래의 컬러 영상이고, 그림 3(b)는 울타리 영역을 확대한 영상이다. 그리고 그림 3(c)는 그림 3(b)에 해당하는 Bayer 패턴의 영상이다. 그림 3(b)에서는 울타리 영역이 세로 방향으로 보간을 하면 될 것이 확실하지만, 그림 3(c)의 영상을 앞서 설명한 색 보간 기법을 이용하여 가로 방향 및 세로 방향의 구배를 구할 경우 비슷한 값이 나오게 된다. 보간하고자 하는 화소를 중심으로 위아래 화소들은 모두 밝고, 좌우 화소들은 모두 어둡기 때문에 차이가 적어 구배가 비슷하기 때문이다. 따라서 주위에 있는 화소들의 평균값을 취하게 되고, 결과적으로 그림 3(d)나 그림 3(e)와 같은 영상을 얻게 된다. 그림 3(d)는 Adaptive Color Plane

Interpolation 방식을 이용한 결과 영상이고, 그림 3(e)는 Iterative interpolation 방식을 이용하여 보간된 영상이다. 후처리 과정을 수행한 영상에서도 잘못된 색을 줄이지 못하고 있음을 볼 수 있다. 이는 초기 보간된 영상에 잘못된 색이 너무 많이 있기 때문이다.

이러한 잘못된 색을 최소화하기 위해서는 정확하게 영상의 경계를 정확하게 판단해야 한다. 이를 위해서 보다 큰 영역을 설정하여 영상의 경계를 판단하는데 사용할 수 있지만, 이러한 방법을 사용하게 되면 추가적인 라인 메모리가 필요하게 되어 하드웨어 복잡도가 증가한다. 또한 위와 같은 반복 패턴의 영상에서는 더 큰 영역을 설정한다 해도 정확한 판단이 어렵다.

보다 큰 영역을 설정하는 대신, 본 논문에서는 인접 화소간의 상관성을 이용한 색 보간 기법을 제안한다. 동일한 영상 내에서는 인접 화소 간의 비슷한 값을 갖게 된다. 따라서 경계 영역에 있는 인접한 화소 간에는 같은 방향성을 갖게 된다. 그림 4는 이러한 인접 화소의 방향성의 유사성을 보여준다. 세로 및 가로 방향의 경계에 따라, 같은 영역 내의 화소들은 같은 방향성을 갖게 된다. 따라서 인접 화소의 방향성 정보를 현재 화소의 방향성을 결정하는데 활용할 수 있다.

본 논문에서는, 제안된 방법을 G 채널 보간에 적용했다. 앞서 설명한 대로 R 및 B 채널은 G 채널을 이용하여 보간되기 때문에, G 채널이 정확하게 보간되면 R 및 B 채널에 결과도 함께 개선된다.

제안된 기법을 적용하기 위해,  $(i, j)$ 에서의 화소의 방향성 정보( $d_{i,j}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$d_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } DH < DV \\ -1 & \text{if } DH > DV \\ 0 & \text{if } DH = DV \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)에 따라, 현재 화소가 가로 방향의 경계일 경우  $d_{i,j}$ 는 '1'로 설정되고, 세로 방향일 경우는 '-1'로 설정된다. 어느 방향도 아닐 경우에는 '0'으로 설정한다. 식 (12)를 이용하여, 새로운 가로 및 세로 방향의 구배 ( $DH'$ ,  $DV'$ )를 다음과 같이 정의 한다.

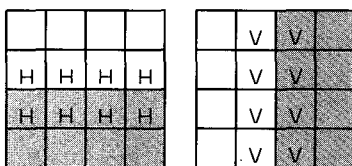


그림 4. 인접화소간의 유사성의 예

Fig. 4. Spatial correlation between the adjacent pixels.

$$\begin{aligned} DH' &= DH - w \cdot d_{i,j-2} \\ DV' &= DV + w \cdot d_{i-2,j} \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서  $w$ 는 가중치이고,  $d_{i,j-2}$ 는 좌측의 G 채널에서의 방향성 정보,  $d_{i-2,j}$ 는 위쪽의 G 채널에서의 방향성 정보를 나타낸다.  $DH$ 와  $DV$ 는 기존의 경계 영역의 특징에 따라 색 보간을 수행하는 방법에서 사용되는 가로 및 세로 방향의 구배이다.

$d_{i,j-2}$ 가 1일 경우, 좌측의 G 채널이 가로 방향의 경계 영역임을 나타낸다. 따라서 새롭게 계산되어지는 가로 방향의 구배  $DH'$ 는 원래의 값보다 더 작은 값을 갖게 된다. 더 작은  $DH'$ 는 해당 화소가 가로 방향의 경계 영역으로 판정될 가능성을 높여 주게 된다. 반대로,  $d_{i,j-2}$ 가 -1이면 위쪽 화소가 세로 방향의 경계임을 의미하고, 가로 방향의 구배  $DH'$ 는 원래의 값보다 큰 값을 갖게 되어 가로 방향으로 판정될 가능성을 낮추게 된다.  $d_{i,j-2}$ 가 0이면 현재 화소의 경계 영역 판단에 아무런 영향을 주지 않게 된다.

R 및 B 채널의 경우, 제안된 기법의 적용 없이 기존의 방법대로 보간을 수행한다. G 채널의 보간 결과의 정확도가 높아졌으므로, R 및 B 채널의 결과 역시 향상된다.

제안된 기법을 이용하면, 경계 영역에 대한 판단의 정확도가 증가되므로, 대부분의 잘못된 색이 제거된다. 제안된 기법은 기존의 경계 영역을 고려한 색 보간 기법에 손쉽게 적용할 수 있고, 성능도 우수하다. 기존의 고성능 색 보간 기법들의 경우 우수한 결과 영상을 얻기 위해 반복된 후처리 과정을 요구하지만, 이러한 방법들은 실시간 하드웨어 구현에는 적합하지 않다. 따라서 제안된 기법은 높은 성능과 간단한 구조를 요구하는 실시간 하드웨어 구현에 매우 적합하다.

#### IV. 실험 결과 및 성능 고찰

제안된 기법은 그림 5에 있는 여러 종류의 컬러 영상 (768x512)을 이용하여 평가하였다. II장에서 설명한 기존의 3가지 색 보간 기법에 제안된 기법이 적용하여 성능 비교를 하였다.

제안된 기법의 성능을 정량적으로 평가 하기위해 PSNR과 MSE(Mean squared error)를 사용했다. PSNR은 다음과 같이 정의된다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 \cdot N}{\|x - x'\|^2} \quad (14)$$



그림 5. 실험에 사용된 컬러 영상  
Fig. 5. Color images used in the experiments.

여기서  $N$ 은 영상 내의 화소들의 총 숫자이고,  $x$ 는 원래 영상의 화소값,  $x'$ 는 보간된 영상의 화소값이다.  
성능 평가를 위해서는 우선 식(13)의 가중치  $w$ 값을 결정해야 한다. 이를 위해  $w$ 값을 변화시켜 가면서 보간된 영상의 품질을 비교하였다.  $w$ 가 0이 되면 기존의 색

표 1. 성능 비교(MSE)  
Table 1. Performance comparison (MSE).

		기존 방식	제안기법적용	비교
Edge-adaptive	R	42.61	38.68	3.93 ↓
	G	40.85	37.39	3.46 ↓
	B	44.70	40.82	3.88 ↓
Adaptive Color Plane	R	18.54	17.44	1.1 ↓
	G	13.09	12.12	0.97 ↓
	B	19.92	18.81	1.11 ↓
Iterative	R	11.39	11.27	0.12 ↓
	G	5.10	5.01	0.09 ↓
	B	11.42	11.33	0.09 ↓

보간 기법을 그대로 이용하는 것이 된다. 그림 6과 그림 7은  $w$ 값의 변화에 따른 결과 영상이다.  $w$ 값이 증가함에 따라 잘못된 색이 줄기 때문에 결과 영상의 품질이 좋아짐을 확인할 수 있다. 그림 6(b)-(g)의 경우,  $w$ 가 증가함에 따라 대부분의 잘못된 색이 없어지고 있다. 그러나 그림 7에서는,  $w$ 가 15보다 커지게 되면,  $w$ 값으로 인해 잘못된 판단을 내리게 되어 오히려 새로운

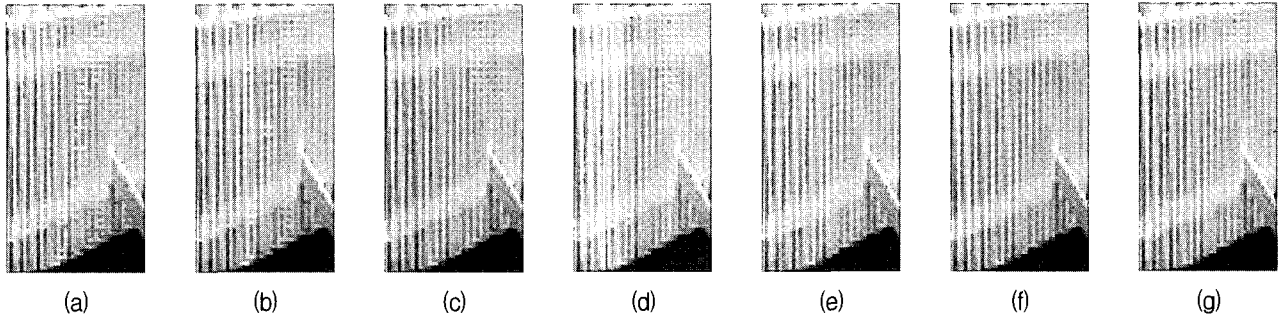


그림 6. 가중치( $w$ ) 변화에 따른 결과 영상(Adaptive Color Plane Interpolation 기법에 제안된 기법을 적용, 그림 3(a)의 부분 확대 영상) (a)  $w=0$  (b)  $w=5$  (c)  $w=10$  (d)  $w=15$  (e)  $w=20$  (f)  $w=25$  (g)  $w=30$   
Fig. 6. Enlarged parts of the demosaiced image by Adaptive Color Plane Interpolation corresponding to (a)  $w=0$  (b)  $w=5$  (c)  $w=10$  (d)  $w=15$  (e)  $w=20$  (f)  $w=25$  (g)  $w=30$ .

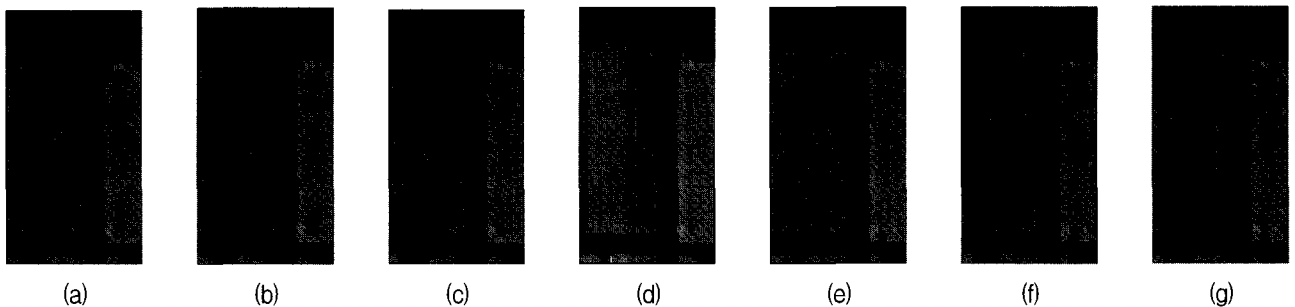


그림 7. 가중치( $w$ ) 변화에 따른 결과 영상(Adaptive Color Plane Interpolation 기법에 제안된 기법을 적용, 그림 3(a)의 부분 확대 영상) (a)  $w=0$  (b)  $w=5$  (c)  $w=10$  (d)  $w=15$  (e)  $w=20$  (f)  $w=25$  (g)  $w=30$   
Fig. 7. Enlarged parts of the demosaiced image by Adaptive Color Plane Interpolation corresponding to (a)  $w=0$  (b)  $w=5$  (c)  $w=10$  (d)  $w=15$  (e)  $w=20$  (f)  $w=25$  (g)  $w=30$ .

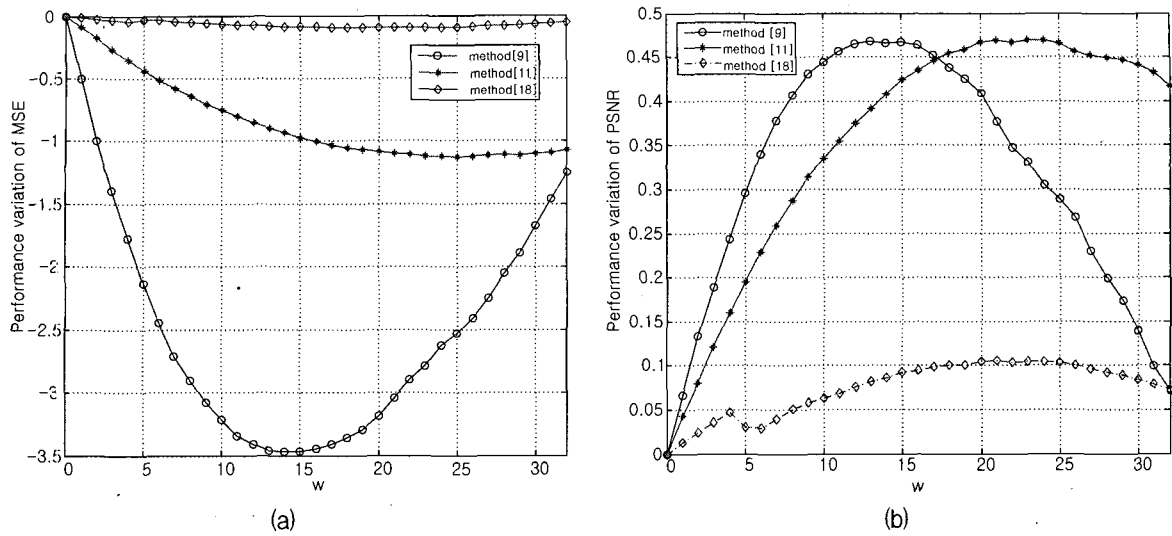


그림 8. 그림 5의 컬러 영상에 대한 제안된 기법의 가중치( $w$ )값의 변화에 따른 성능 변화 (a) MSE, (b) PSNR  
 Fig. 8. The performance variations of the proposed method depending on  $w$  related to the images in Fig. 5. (a) MSE, (b) PSNR.

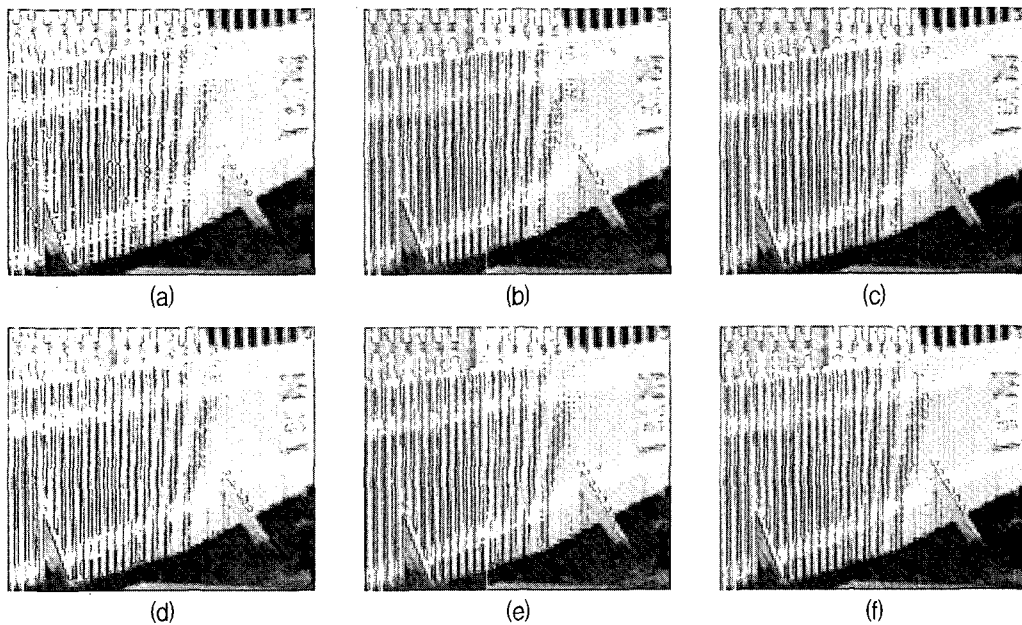


그림 9. 색 보간된 영상의 부분 확대 (a) Edge adaptive interpolation (b) Adaptive color plane interpolation (c) Iterative interpolation (d) 제안된 기법이 적용된 Edge adaptive interpolation (e) 제안된 기법이 적용된 Adaptive color plane interpolation (f) 제안된 기법이 적용된 Iterative interpolation

Fig. 9. Enlarged parts of the demosaiced image (a) Edge adaptive interpolation (b) Adaptive color plane interpolation (c) Iterative interpolation (d) Edge adaptive interpolation with the proposed method (e) Adaptive color plane interpolation with the proposed method (f) Iterative interpolation with the proposed method

잘못된 색이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 적절한  $w$ 값의 결정을 위해, 여러 영상에 걸쳐  $w$ 값을 0에서 32까지 1씩 변화시키면서 그 결과를 확인하였다. 그림 8은 그림 5의 영상들을 이용한  $w$ 값에 따른 MSE 및 PSNR의 평균값의 변화를 보여준다.  $w$ 가 0일 때 (기본 색 보간 기법)의 PSNR 및 MSE를 기준(0으로 설정)으

로 하여,  $w$  값의 변화에 따른 PSNR 및 MSE의 차이를 그래프로 나타내었다. 그림 8에서 보듯이  $w$ 가 약 15~20일 때 성능이 가장 우수하지만, 20일 경우에는 잘못된 색이 발생하였다. 영상에 따라 최적의  $w$ 값이 다르긴 하지만,  $w=15$ 일 때가 최적으로 판단되어,  $w$ 는 15로 설정하고 성능 평가를 수행하였다.

표 2. 성능 비교(PSNR)

Table 2. Performance comparison (PSNR).

		기존 방식	제안기법적용	비교
Edge-adaptive	R	33.02	33.50	0.48 ↑
	G	33.32	33.79	0.47 ↑
	B	32.86	33.33	0.47 ↑
Adaptive Color Plane	R	36.45	36.79	0.31 ↑
	G	38.25	38.67	0.42 ↑
	B	36.27	36.59	0.32 ↑
Iterative	R	37.44	37.48	0.04 ↑
	G	41.04	41.13	0.09 ↑
	B	37.82	37.88	0.06 ↑

표 1과 표 2는 그림 5에 있는 여러 컬러 영상들을 이용하여 제안된 기법이 적용된 경우와 적용되지 않은 경우의 성능에 대한 정량적인 평가이다. 표 1은 MSE를 비교 결과이고 표 2는 PSNR 비교 결과이다.

실험 결과에서 알 수 있듯이 제안된 기법을 기존 방식에 적용하면, 성능이 우수해짐을 확인할 수 있다. 특히 대부분의 잘못된 색이 없어지게 되어 주관적인 측면에서 특히 우수하였다. 그림 9는 제안된 기법이 적용된 경우와, 적용되지 않은 경우의 결과 영상이다. 그림 9는 그림 3(a)의 울타리 영역으로, 정확한 방향의 결정이 어려워 잘못된 색이 많이 발생하는 영역지만 제안된 기법을 적용되면 대부분의 잘못된 색이 제거됨을 확인할 수 있다.

### V. 제안된 색 보간 기법의 VLSI 설계

제안된 기법은 Verilog HDL 및 FPGA를 이용하여 설계 및 검증되었다. II장에서 설명한 3가지 색 보간 기법 중 Edge-adaptive Interpolation의 경우 가장 간단하지만 성능이 다른 두 가지 방식에 비해 떨어진다. Iterative interpolation 방법의 경우 성능은 가장 우수하지만 반복적인 후처리 과정이 필요하므로, 실시간 하드웨어 구현에는 적합하지 않은 방식이다. 이에 반해 Adaptive Color Plane Interpolation 방식은 복잡도도 높지 않고 성능도 우수하다. 따라서 본 논문에서는 Adaptive Color Plane Interpolation 방식을 기반으로 제안된 기법을 적용하여 설계하였다. 그림 10은 설계된 색보간 블록의 블록 다이어그램이다. G 채널 보간을 위해서는 5x5 윈도우가 필요하므로, 이를 위해 4개의 라인 메모리가 필요하다. 또한 보간된 G 채널을 저장하기 위한 1개의 라인 메모리가 필요하므로 총 5개의 라인

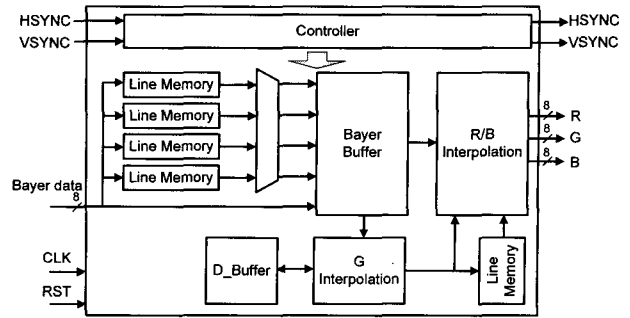


그림 10. 색 보간 블록의 하드웨어 구조  
Fig. 10. Block diagram of color interpolation.

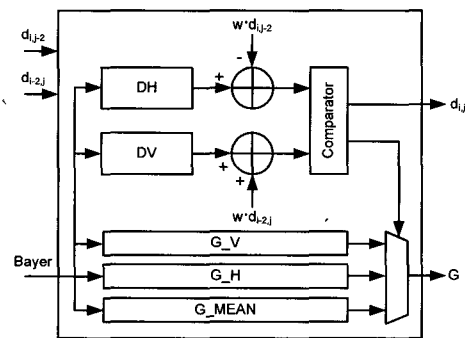


그림 11. G\_Interpolation 블록의 하드웨어 구조  
Fig. 11. Block diagram of G\_Interpolation.

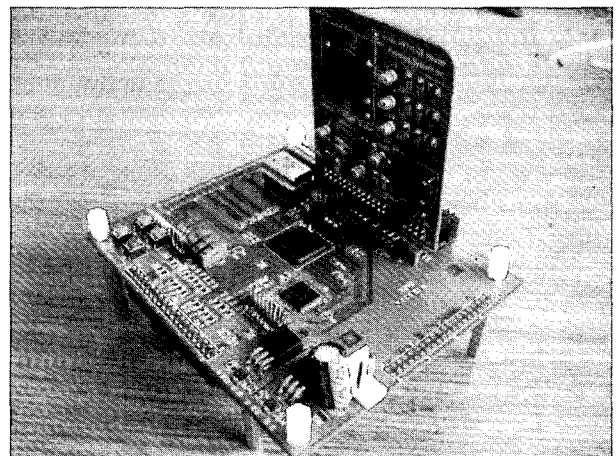


그림 12. 검증용 FPGA 테스트 보드  
Fig. 12. FPGA test board.

메모리가 쓰였다. Bayer\_buffer는 라인 메모리에 저장된 데이터를 읽어 들여 5x5 윈도우를 구성하고, G\_Interpolation 블록에서는 G 채널을 보간하면서, 방향 정보를 D\_Buffer에 저장한다. 방향 정보는 3가지 경우가 있으므로 이를 저장하기 위해서는 2bit가 필요하고, G 채널에 대한 정보만 있으면 되므로 라인 길이의 절반의 숫자만 있으면 된다. 따라서 필요 라인 길이/2 \* 2bits 크기의 버퍼가 필요하다. 보간된 G 채널은 라인



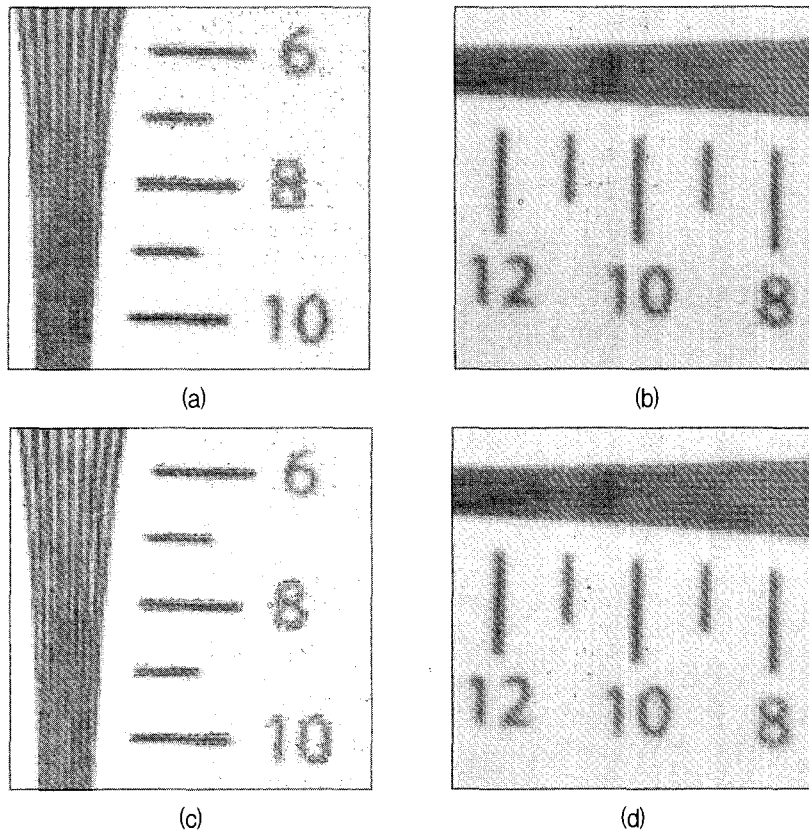


그림 13. FPGA 검증 보드를 이용하여 캡처된 영상 (a), (b) 제안된 기법이 적용되지 않은 경우 (c), (d) 제안된 기법이 적용된 경우

Fig. 13. The images captured by FPGA test board (a), (b) without the proposed method (c), (d) with the proposed method

메모리에 저장됨과 동시에 R/B\_Interpolation 블록으로 보내져서 R/B 채널 보간에 사용된다.

그림 11은 제안된 알고리즘이 적용된 G\_Interpolation 블록이다. Bayer 데이터 및  $d_{i-2}$ ,  $d_{i-2j}$  등의 정보를 받아 가로 및 세로 방향의 구배를 계산하고, 여기에 인접 화소의 방향 정보를 더하여 최종 경계 표시자를 구한다. 이를 이용하여 가로 방향 보간 결과, 세로 방향 보간 결과, 평균값 중 한 가지 값을 선택하여 출력하게 된다.

그림 12는 설계된 색 보간 블록을 FPGA를 이용해 구현한 것이고, 0.25 CMOS 표준 셀 라이브러리를 이용하여 합성했을 때, 12K개의 게이트로 구현되었다. 그림 13(a)와 (b)는 제안된 기법이 적용되지 않은 경우 (Adaptive color plane interpolation)의 캡처 영상이고, 그림 13(c)과 (d)는 제안된 기법이 적용된 경우의 캡처된 영상이다. 잘못된 색이 발생하기는 하지만, 제안된 기법이 적용되지 않았을 경우와 비교했을 때보다 정확하게 색 보간을 수행하여 더 높은 해상도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 인접 화소간의 상관관계를 이용한 효율적인 색 보간 기법이 제안되었다. 인접한 화소들의 방향 정보를 현재 화소의 경계 영역의 방향성을 결정하는데 활용함으로써, 보다 정확한 판단이 가능해졌고, 이로 인해 잘못된 색이 최소화되어 결과 영상의 품질이 향상되었다. 제안된 기법을 기존의 여러 가지 색 보간 기법에 적용한 결과, 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 특히 대부분의 잘못된 색이 제거되어, 정량적인 측면에서의 향상(PSNR이 0.09~0.47dB 향상) 외에 주관적인 측면에서도 우수한 결과를 실험적으로 보였다. 또한 정확한 경계 영역 판정을 위해 넓은 영역을 사용할 필요도 없고, 복잡한 수식이나 반복 수행 등 없이 간단한 덧셈 및 방향 정보를 저장하기 위한 버퍼만 추가하면 된다. 따라서 제안된 기법은 하드웨어 구현 측면에서도 용이하다는 장점을 갖는다. 제안된 알고리즘은 verilog HDL을 이용하여 하드웨어로 구현되었으며, 0.25um 표

준 셀 라이브러리를 이용하여 합성했을 때, 12K 게이트로 구현되었다. 또한 FPGA를 이용하여 성공적으로 검증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Bayer, Bryce E. "Color imaging array" U.S. Patent 3,971,065
- [2] Keys, Robert.G. et.al., "Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing" IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, Vol ASSP-29, P1153-1160, 1981
- [3] D.R. Cok, "Signal processing method and apparatus for producing interpolated chrominance values in a sampled color image," U.S. patent 4,642,768
- [4] J. A. Weldy, "Optimized design for a single-sensor color electronic camera system," Proc. SPIE, vol. 1071, pp. 300 - 307, 1988.
- [5] Adams, James E. "Interactions between color plane interpolation and other image processing functions in electronic photography," Proceedings of SPIE Vol. 2416 P.144-151 .
- [6] S.-C. Pei and I.-K. Tam, "Effective color interpolation in CCD color filter arrays using signal correlation," IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, vol. 13, no. 6, pp. 503 - 513, June 2003.
- [7] R. Kakarala and Z. Baharav, "Adaptive demosaicing with the principle vector method," IEEE Trans. Consumer Electron., vol. 48, pp. 932 - 937, Nov. 2002.
- [8] C. A. Laroche and M. A. Prescott, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients," U.S. Patent 5,373,322, 1994.
- [9] R. H. Hibbard, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing luminance gradients," U.S. Patent 5,382,976, 1995.
- [10] J. E. Adams and J. F. Hamilton Jr., "Adaptive color plane interpolation in single color electronic camera," U.S. Patent 5 506 619, Apr. 1996.
- [11] J. E. Adams and J.F.Hamilton Jr., "Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera" U.S. Patent 5,629,734
- [12] X. Li and M. T. Orchard, "New edge directed interpolation," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 10, no. 10, 2001.
- [13] R. Kimmel, "Demosaicing: image reconstruction from CCD samples," IEEE Trans. Image Processing, vol. 8, pp. 1221 - 1228, 1999.
- [14] S. S. D. Alleysson and J. Herault, "Color demosaicing by estimating luminance and opponent chromatic signals in the fourier domain," Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, pp. 331 - 336, 2002.
- [15] B. S. Hur and M. G. Kang, "High definition color interpolation scheme for progressive scan CCD image sensor," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 47, no. 1, pp. 179-186, Feb. 2001.
- [16] B. K. Gunturk, Y. Altunbasak and R. M. Mersereau, "Color plane interpolation using alternating projections," IEEE Transactions on Image Processing, vol.11, no.9, 2002.
- [17] W. Lu, and Y.Tan, "Color filter array demosaicing: New method and performance measure," IEEE Trans. Image Processing, vol. 12, no. 10, pp. 1194-1210, Oct. 2003.
- [18] X. Li, "Demosaicing by Successive Approximation, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 14, no. 3, March 2005.

저 자 소 개



이 원 재(학생회원)  
 2001년 연세대 전기전자공학과  
 학사 졸업.  
 2003년 연세대 전기전자공학과  
 석사 졸업.  
 2003년~현재 연세대 전기전자  
 공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 영상처리, SoC 설계>



이 성 주(정회원)  
 1996년 연세대 전자공학과 학사  
 졸업.  
 1998년 연세대 전자공학과 석사  
 졸업.  
 2002년 연세대 전기전자공학과  
 박사 졸업.

2002년~2003년 연세대 ITSoC센터 전문연구원  
 2003년~2005년 삼성전자 DM총괄 책임연구원  
 2005년~2006년 연세대 IT연구단 연구교수  
 2006년~현재 세종대 정보통신공학과 조교수  
 <주관심분야 : 초고속데이터 통신용 모뎀의 SoC  
 설계, 영상처리, 프로세서의 SoC설계, 무선통신용  
 모뎀 알고리즘>



김 재 석(정회원)  
 1977년 연세대 전자공학과 학사  
 졸업.  
 1979년 KAIST 전기전자공학과  
 석사 졸업.  
 1988년 Rensselaer Polytechnic  
 Institute, NY, 박사 졸업.

1993년~1995년 한국전자통신연구원 책임연구원  
 1996년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수  
 <주관심분야 : 통신 및 영상 시스템, VLSI 신호  
 처리, 임베디드 S/W 및 SoC 구현>