

Laplacian of Gaussians (LoG)와 캐니 에지 검출법을 접목한 색상 보간 알고리즘

*최연희 **김일승 ***정제창

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

*yonni27@naver.com, **ghanjang@gmail.com, ***jjeong@hanyang.ac.kr

Color Filter Interpolation Algorithm using Laplacian of Gaussians (LoG) and Canny Edge Detection Method

*Yeonhee Choi **Ilseung Kim ***Jechang Jeong

Dept. Electronics and Computer Eng. Hanyang University

요 약

본 논문은 Laplacian of Gaussians (LoG)에 캐니 에지 검출 기법을 접목한 새로운 색상 보간 알고리즘을 제안한다. 캐니 에지 검출 기법은 영상 스무딩, 기울기 크기와 각도 계산, 세션화, 이중 문턱치 처리 과정으로 이루어진다. 이때 앞의 두 과정을 LoG를 이용하여 처리함으로써 기존의 캐니 에지 검출법보다 정확한 방향 정보를 얻을 수 있다. 실험결과를 통해 기존의 색상 보간 알고리즘에 비해 Peak Signal to Noise Ratio (CPSNR)이 상승함을 확인하였으며, 에지 영역 주변에서 발생하였던 무지개 에러가 현저히 감소하였음을 확인할 수 있었다.

1. 서론

최근 휴대폰, 태블릿 PC 등 디지털 이미징 장치가 많이 보급되고 있으며, 기존보다 더 가볍고 저렴한 기기가 요구됨에 따라 단일 이미지 센서를 이용하고 있다. 디지털 카메라에서 컬러 이미지를 표현하기 위해서는 보통 RGB 세 가지 컬러 채널이 필요하다. 그러나 이미지 센서들은 빛의 밝기 정보만을 받아들이기 때문에 컬러 이미지를 모두 얻기 위해서 이미징 장치에서 컬러 필터 배열 보간(Color Filter Array : CFA)을 사용한다.

CFA와 같은 단일 이미지 센서를 사용하게 되면 각 픽셀에서 한 가지의 색상 정보만을 받아들이게 된다[1]. 따라서 필요한 나머지 두 가지 색상 정보는 보간되어야 한다. 이러한 과정을 색상 보간 혹은 디모자이킹이라 부른다[2]. 컬러 필터 배열로는 다양한 패턴들이 존재하지만 가장 널리 사용되고 있는 것이 그림1과 같은 베이어 배열이다[3]. 베이어 패턴은 인간의 눈이 녹색 정보에 민감함을 착안해 빨강과 파랑에 비해 녹색 화소를 두 배 많은 비율로 받아들이게 된다.

Bilinear보간법과 같은 기본적인 컬러 필터 배열 보간법들은 다양한 장점을 가지고 있지만, 무지개 에러를 동반하였다. 현재까지 많은 사람들이 이러한 에러를 줄이고자 다양한 보간법을 시도하고 있다. Dubois는 주파수 도메인에서 파워 스펙트럼 밀도 (Power Spectral Density)를 확인하였다[4]. 이를 통해 휘도와 색차 성분 사이에

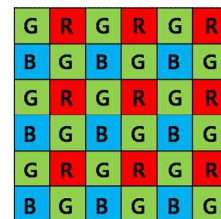


그림 1. 베이어 패턴(Bayer Pattern)

간섭이 생기는 것을 발견하고, 색차 성분을 가로와 세로 방향으로 나누어 필터링하는 방법을 통해 보간하였다. 이를 베이어 패턴 기반 디모자이킹 알고리즘 (Frequency-Domain Methods for Demosaicking of Bayer-Sampled Color Images: FMD)이라 한다. FMD에 기반을 두고 조금 더 향상된 결과를 얻기 위해 최소 제곱법을 활용한 기법도 제안되었는데 이를 최소 제곱법을 활용한 디모자이킹 알고리즘 (Least-Squares Luma-Chroma Demultiplexing Algorithm for Bayer Demosaicking : LSLCD) 이라고 한다[5]. 이 방법 또한 좋은 성능을 보이지만 에지 부근에 여전히 무지개 에러를 발견할 수 있었다.

Pekkucuksen은 무지개 에러가 에지 주변에서 주로 발생한다는 점을 착안해 에지 정보를 효율적으로 이용해 보간하는 디모자이킹 알고리즘 (Edge Strength Filter

Based Color Filter Array Interpolation : ESF)을 제안하였다[6]. 에지 강도를 찾는 필터를 통해 에지를 찾고 보간 과정에 에지정보를 활용한다. 찾아진 에지 정보를 녹색 화소를 보간하는데 활용하고 다시 한 번 더 복원하는 과정을 통해 보다 정밀한 결과를 예측한다. 파란색과 빨간색 화소의 보간은 이미 보간된 녹색화소를 이용한다.

ESF는 근래에 제안된 알고리즘 중 객관적 화질 비교에서 우수한 성능을 보였지만 여전히 결과 이미지에서 무지개 형태의 에러를 확인할 수 있었다. 이러한 형태의 에러는 에지 정보를 잘 찾는다면 줄어들 것으로 보고 효율적인 에지 검출 방법을 고안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 에지 강도 필터를 기반으로 한 디모자이킹 과정에 대하여 기술하고 제 3장에서는 새로운 캐니 에지를 기반으로 하는 검출법을 이용하여 정밀하게 찾은 에지정보를 적용하여 무지개 형태의 색상 오류를 개선하는 알고리즘을 제안한다. 제 4장에서는 실험 결과를 통해 기존의 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 주관적 화질과 CPSNR을 비교하고 제 5장에서 결론을 맺는다.

2. 기존의 알고리즘

I. 에지 강도 필터

에지 강도 필터를 기반으로 한 디모자이킹 알고리즘에서는 색상의 차이가 급격한 부분을 에지 영역이라 한다. 픽셀 레벨에서 어떤 방법으로 의미 있는 에지 정보를 찾고, 그 정보를 이용하여 디모자이킹 결과를 향상시키는 것이 주된 문제이다. 그 결과 3x3 크기의 에지 강도 필터를 사용하였다. 입력 이미지가 들어왔을 때, P_6 위치에서의 에지 강도 S_{P_6} 을 구하는 식은 다음과 같다 :

$$S_{P_6} = \frac{|P_1 - P_{11}|}{2} + \frac{|P_3 - P_9|}{2} + |P_2 - P_{10}| + |P_5 - P_7| \quad (1).$$

위의 식을 이용하여 모든 픽셀에서 에지 강도를 구할 수 있다. 구해진 에지맵 내에서는 하나의 픽셀이 에지를 나타내기 보다는 대각선과 좌우의 픽셀 값의 차이를 이용하여 에지 강도를 나타낸다.

위 필터를 이용하여 입력 이미지의 모든 픽셀에서 에지 강도를 얻을 수 있다. 여기서 제안된 필터는 흑백 이미지에서 에지를 찾는데 매우 유용하지만 CFA 이미지에서는 각 색상 채널이 완전한 것이 아니기 때문에 모든 픽셀에서 완벽하게 휘도 정보를 가진다고 볼 수 없다. 그렇기 때문에 에지 강도 필터를 통해 예측된 값의 차이를 이용하여 녹색정보를 복원하고 이어서 한 번 더 복원하는 과정을 거친다.

II. 녹색 채널 보간

앞서 구해진 에지 강도 필터의 결과를 이용하여 수평

방향 또는 수직방향으로 모든 위치에서의 녹색 정보를 복원한다. (i, j) 에서의 에지 강도 필터 결과인 $S_{i,j}$ 를 구한 후 5x5 크기에서 아래와 같은 식을 이용하여 수평 방향 $H_{i,j}$ 와 수직 방향 $V_{i,j}$ 값을 구한다 :

$$\begin{aligned} H_{i,j} &= \sum_{m=-2}^2 \left(\sum_{n=-2}^2 (|S_{i+m, j+n} - S_{i+m, j+n+1}|) \right) \\ V_{i,j} &= \sum_{m=-2}^2 \left(\sum_{n=-2}^2 (|S_{i+m, j+n} - S_{i+m+1, j+n}|) \right) \end{aligned} \quad (2).$$

여기서 $H_{i,j}$ 의 값이 $V_{i,j}$ 의 값 보다 작으면 대상 픽셀이 수평으로 결정되고, 반대의 경우도 마찬가지다. 결정된 방향을 기반으로 파란색이 위치한 픽셀에서의 녹색 정보는 아래의 식을 따라 보간된다 :

$$\widetilde{G}_{i,j} = \begin{cases} B_{i,j} + \frac{\widetilde{G}_{i,j}^H - B_{i,j}}{2} + \frac{G_{i,j-1} - \widetilde{B}_{i,j-1}^H}{4} + \frac{G_{i,j+1} - \widetilde{B}_{i,j+1}^H}{4} \\ B_{i,j} + \frac{\widetilde{G}_{i,j}^V - B_{i,j}}{2} + \frac{G_{i-1,j} - \widetilde{B}_{i-1,j}^V}{4} + \frac{G_{i+1,j} - \widetilde{B}_{i+1,j}^V}{4} \end{cases} \quad (3).$$

두 식은 $H_{i,j}$ 와 $V_{i,j}$ 의 대소 비교를 통해 수평 방향일 때는 위의 식을, 수직 방향일 땐 아래의 식을 이용하여 계산한다. 식을 계산할 때 필요한 방향 예측 정보는 다음과 같다 :

$$\begin{aligned} \widetilde{G}_{i,j}^H &= \frac{G_{i,j-1} + G_{i,j+1}}{2} + \frac{2 \times B_{i,j} - B_{i,j-2} - B_{i,j+2}}{4} \\ \widetilde{G}_{i,j}^V &= \frac{G_{i-1,j} + G_{i+1,j}}{2} + \frac{2 \times B_{i,j} - B_{i-2,j} - B_{i+2,j}}{4} \\ \widetilde{B}_{i,j}^H &= \frac{B_{i,j-1} + B_{i,j+1}}{2} + \frac{2 \times G_{i,j} - G_{i,j-2} - G_{i,j+2}}{4} \\ \widetilde{B}_{i,j}^V &= \frac{B_{i-1,j} + B_{i+1,j}}{2} + \frac{2 \times G_{i,j} - G_{i-2,j} - G_{i+2,j}}{4} \end{aligned} \quad (4).$$

위 식에서 예측 정보는 주변의 색상 정보의 평균을 통해 임의로 보간한다. 빨간색이 위치한 픽셀에서의 녹색 정보 보간은 위의 식에서의 B 를 R 로 대체하여 계산할 수 있다.

III. 녹색 채널 갱신

다음 과정으로 보다 정확한 보간을 위하여 연속되는 추정 색차와 에지 강도 필터를 결합하여 녹색 채널을 갱신한다. 앞의 과정에서는 3x3 크기로 보간 되었지만 이번에는 대상 픽셀에서 한 픽셀 더 떨어져 있는 네 가지 픽셀 값까지 고려하여 계산한다. 주변 에지 강도 차이와 대상 값은 반비례하므로 주변 에지 강도 차이를 가중치로 적용한다. 즉, 주변 에지 강도간의 차이가 크면 서로 비슷하지 않은 값이 되므로 가중치를 적게 적용하고 반대의 경우 가중치를 크게 적용한다. 파란색이 위치한 픽셀에서의 녹색 정보를 갱신하는 과정은 다음과 같다 :

$$\begin{aligned} D_1 &= |S_{i,j} - S_{i-1,j}| + |S_{i-1,j} - S_{i-2,j}| + |S_{i-2,j} - S_{i-3,j}| + C_1 \\ D_2 &= |S_{i,j} - S_{i,j-1}| + |S_{i,j-1} - S_{i,j-2}| + |S_{i,j-2} - S_{i,j-3}| + C_1 \\ D_3 &= |S_{i,j} - S_{i,j+1}| + |S_{i,j+1} - S_{i,j+2}| + |S_{i,j+2} - S_{i,j+3}| + C_1 \\ D_4 &= |S_{i,j} - S_{i+1,j}| + |S_{i+1,j} - S_{i+2,j}| + |S_{i+2,j} - S_{i+3,j}| + C_1 \\ M_1 &= D_2 \times D_3 \times D_4 & M_2 &= D_1 \times D_3 \times D_4 \\ M_3 &= D_1 \times D_2 \times D_4 & M_4 &= D_1 \times D_2 \times D_3 \end{aligned}$$

$$\widehat{G}_{i,j} = B_{i,j} + W \times (\widehat{G}_{i,j} - B_{i,j}) + (1 - W) \times \left[\begin{aligned} & \frac{M_1}{M_{Total}} (\widehat{G}_{i-2,j} - B_{i-2,j}) \\ & + \frac{M_2}{M_{Total}} (\widehat{G}_{i,j-2} - B_{i,j-2}) \\ & + \frac{M_3}{M_{Total}} (\widehat{G}_{i,j+2} - B_{i,j+2}) \\ & + \frac{M_4}{M_{Total}} (\widehat{G}_{i+2,j} - B_{i+2,j}) \end{aligned} \right] \quad (5).$$

$$M_{Total} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4.$$

$\widehat{G}_{i,j}$ 는 $\widehat{G}_{i,j}$ 를 갱신한 결과이며, C_1 은 D 값이 0이 되는 것을 방지하는 값이다. 마찬가지로 빨간색이 위치한 픽셀에서의 녹색 정보를 갱신할 때는 식 (5)의 B 위치에 R 을 넣어서 같은 방법으로 계산하면 된다. 녹색 채널을 갱신함으로써 무지개 모양의 에러가 줄어들었고 PSNR값 역시 상승하였다.

IV. 빨간색과 파란색 채널 보간

앞의 과정을 통해 녹색 채널 보간이 완료되면, 빨간색과 파란색 채널을 색차를 이용하여 보간한다. 앞서 녹색 채널이 완벽하게 보간 되었다고 가정하므로 녹색 채널 값을 사용하여 아래와 같이 방향성을 적용한다 :

$$\begin{aligned} M_1 &= |G_{i-2,j-2} - \widehat{G}_{i,j}| + |G_{i-1,j-1} - G_{i+1,j+1}| + |\widehat{G}_{i,j} - G_{i+2,j}| \\ M_2 &= |G_{i-2,j+2} - \widehat{G}_{i,j}| + |G_{i-1,j+1} - G_{i+1,j-1}| + |\widehat{G}_{i,j} - G_{i+2,j-2}| \end{aligned} \quad (6).$$

파란색 위치에서 빨간색 채널을 보간할 때와 빨간색 위치에서 파란색 채널을 보간할 때 대각선 방향의 이웃한 픽셀의 차이로 방향성을 파악할 수 있다.

만약 (i,j) 위치의 값이 빨간색이면, 파란색 정보는 다음과 같이 계산된다 :

$$\begin{aligned} \widehat{B}_{i,j} &= \widehat{G}_{i,j} - \frac{M_2 \times (G_{i-1,j-1} - B_{i-1,j-1} + G_{i+1,j+1} - B_{i+1,j+1})}{2 \times (M_1 + M_2)} \\ &\quad - \frac{M_1 \times (G_{i-1,j+1} - B_{i-1,j+1} + G_{i+1,j-1} - B_{i+1,j-1})}{2 \times (M_1 + M_2)} \end{aligned} \quad (7).$$

위의 식은 파란색 위치에서의 빨간색 채널을 보간할 때도 비슷하게 쓰인다.

녹색위치에서 빨간색과 파란색 채널의 보간은 다음과 같다 :

$$\begin{aligned} \widehat{B}_{2i,2j} &= G_{2i,2j} - \frac{(G_{2i-1,2j} - B_{2i-1,2j}) + (G_{2i+1,2j} - B_{2i+1,2j})}{2} \\ \widehat{B}_{2i+1,2j+1} &= G_{2i+1,2j+1} - \frac{(G_{2i+1,2j} - B_{2i+1,2j}) + (G_{2i+1,2j+2} - B_{2i+1,2j+2})}{2} \end{aligned} \quad (8).$$

이전에 보간된 녹색 채널 값을 이용해 위의 식처럼 단순히 주변의 두 픽셀만으로 보간하는 것이 가능하다. 이 과정이 끝나면 모든 채널이 보간되어 세 가지 채널의 이미지를 얻을 수 있다.

3. 제안하는 알고리즘

앞의 과정을 통하여 좋은 디모자이킹 결과를 얻을 수 있지만 여전히 무지개 형태의 에러가 발생한다.

제안하는 방법은 먼저 베이어 패턴 영상에서 기울기

값을 구하고, 이 값들을 바탕으로 주변 픽셀들과의 평균 비교와 문턱치 처리를 통해 에지를 검출한다. 이렇게 얻은 에지를 이용하여 수직과 수평 방향의 강도를 비교하여 녹색 채널 보간과 갱신을 하고, 보간된 녹색 채널 값을 이용하여 빨간색과 파란색 채널을 보간한다.

기존의 알고리즘에서 주변 픽셀의 차를 이용해 에지를 검출했던 것에 비해, 제안하는 알고리즘에서는 LoG와 캐니 검출법을 접목하여 보다 정확한 에지를 검출함으로써 에지영역에 두드러지게 나타났던 무지개 형태의 에러를 현저히 줄일 수 있었다.

제안하는 알고리즘에서는 에지를 검출하는 과정은 세 단계로 구분하여 구하였다. 먼저 에지를 검출하는데 우수한 성능을 보이는 Laplacian of Gaussians (LoG)를 이용하여 에지 정보를 구하였다[7]. LoG를 이용한 Gradient는 다음과 같다 :

$$Gradient(x,y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} - 1 \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (9).$$

위의 식을 통해 구해진 Gradient 값을 이용하여 각 대상 픽셀과 주변 8개 픽셀의 평균을 비교하여 평균치보다 대상 픽셀이 높으면 1 그렇지 않으면 0으로 결정하는 과정을 통해 간단히 에지를 구분하였다.

마지막으로 앞서 구해진 값과 픽셀마다 갱신되는 문턱치를 비교하여 다시 한 번 에지를 구분하여 준다. 높은 문턱치보다 중심 픽셀이 클 경우 값을 그대로 두고, 낮은 문턱치보다 중심 픽셀이 작을 경우 값을 0으로 두며, 두 문턱치의 중심에 있을 경우 주변 픽셀에 1이 있으면 그 값을 남기고 그렇지 않을 경우 0으로 두는 방법을 통해 마무리 하였다. 이렇게 구해진 에지 값을 $S_{i,j}$ 로 두고 디모자이킹 과정을 진행하였다.

4. 실험 결과



그림 2. KODAK 영상. 왼쪽 상단부터 오른쪽 하단까지 1~9.

실험은 그림2의 서로 다른 9개의 Kodak 이미지를 이용하였으며 모든 이미지의 크기(768×512)는 동일하다. 이미지는 먼저 베이어 CFA 패턴으로 처리한 후 제안된 알고리즘을 통해 세 개의 채널로 보간하는 과정을 거쳤다. 또한 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘들의 성능 비교를 위하여 화질 비교에 자주 사용되는 복원 영상의

CPSNR을 사용하였다. 디모자이킹의 성능 비교에서 중요한 의미를 가지는 주관적 화질 비교를 위해 결과 이미지 중 결과의 특성을 잘 나타낼 수 있는 부분을 덧붙여 비교하였다.

표 1은 기존의 알고리즘인 Bilinear와 HMS, ESF 그리고 제안하는 알고리즘의 CPSNR[dB]을 비교한 결과이다. Hamilton과 Adams는 2차 미분값을 보정하는 기법을 사용하여 수직, 수평 변화도를 이용하여 보간한다[8][9].

표 1. 기존 알고리즘들과 제안하는 알고리즘의 CPSNR 비교 (dB)

Image	Method			
	Bilinear	Hamilton& Adams[8]	ESF[6]	Proposed
1	26.34	33.78	42.17	42.42
2	27.81	34.83	44.37	44.70
3	23.53	32.09	40.55	40.68
4	29.13	36.16	44.20	44.48
5	33.49	40.80	47.53	47.73
6	23.86	29.63	38.94	39.10
7	29.20	35.33	41.99	42.08
8	31.30	38.49	48.02	48.37
9	28.49	35.24	43.33	43.47
Average	28.13	35.15	43.45	43.67

제안하는 알고리즘은 기존의 알고리즘들에 비해 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 정확한 에지정보를 통해 개선된 알고리즘의 CPSNR은 최대 0.35dB까지 향상되었고, 평균적으로 약 0.2dB 정도 향상되었음을 볼 수 있었다. 비록 CPSNR이 월등히 향상되지는 않았지만 그림3을 보면 무지개 에러가 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있다.

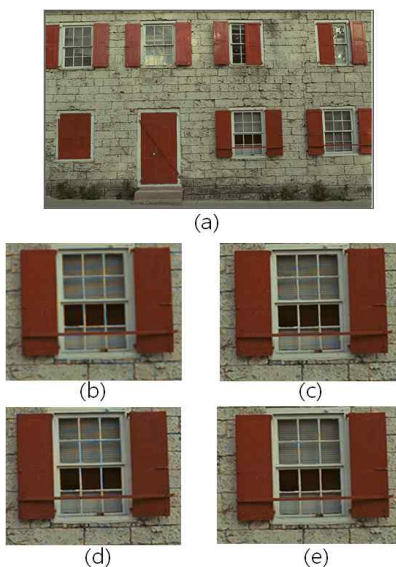


그림 3. 복원된 1번 영상의 화질 비교
(a) 원본 이미지 (b) 양선형 (c) Hamilton & Adams (d) ESF (e) 제안하는 알고리즘

4. 결론

본 논문에서는 캐니 에지 검출법에 LoG를 접목시킨 새로운 에지 검출 방법을 사용한 디모자이킹 알고리즘을 제안하였다. 실험 결과를 통해 제안하는 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 PSNR 측면에서 소폭 상승하였고 결과 이미지에서 나타나는 무지개 형태의 색상 오차를 현저히 줄인 것을 확인할 수 있었다. 색상을 보간하는 것이 주목적인 디모자이킹에서 색상 오차를 현저히 줄여 평탄한 영역은 물론 에지 영역에서도 무지개 형태를 거의 발견할 수 없었다.

참고문헌

- [1] J. A. Weldy, "Optimized design for a single-sensor color electronic camera system," *Proc. SPIE*, Vol. 1071, pp.300-307, Jan. 1989.
- [2] R. Kimmel, "Demosaijing: Image reconstruction from CCD samples," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 8, pp. 1221-1228, Sep. 1999.
- [3] B. E. Bayer, "Color imaging array," *U.S. Patent 3971065*, Jul. 1976.
- [4] E. dubois, "Frequency-domain methods for demosaicking of Bayer sampled color image," *IEEE signal Process. Lett.*, Vol. 12, No.12, pp.847-850, Dec. 2005.
- [5] 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.
- [6] I. Pekkucuksen, Y. Altunbasak, "Edge strength filter based color filter array interpolation," *IEEE Trans. Image Process.*, Vol. 21, No. 1, pp.393-397, Jan. 2012.
- [7] J. S. Chen, "Fast Convolution with Laplacian-of-Gaussian Masks," *IEEE Transactions on*, Vol.9, No.4, pp. 584-590, Jul. 1987.
- [8] J. F. Hamilton and J. E. Adams, "Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera," *U.S. Patent 5 629 734*, pp734 - 740, May. 1997.
- [9] J. E. Adams and J. F. Hamilton, "Adaptive color plane interpolation in single color electronic camera," *U.S. Patent 5 506 619*, April 1996.