

Frequency Domain Methods for Demosaicking of Single-Chip RGB/NIR Image Sensors

Kil-Hyun Jeong*

Abstract

In this paper, We proposed an effective demosaicking method for single chip RGB-NIR sensors to recover RGB and NIR images. As the method operates in the spatial frequency domain, the frequency domain characteristics of the sampled CFA data are investigated. Using the luminance signal in the frequency domain and the chrominance signals are processed separately with different filters. The simulated images using the real images are compared with other state-of-art methods.

As a result, the proposed demosaicking method resulted an effective calculation by a single processing which the existing alternating projection method requires repeated calculation.

▶Keywords: Color Demosaicking, Near-Infrared, CFA(Color Filter Array)

I. Introduction

적외선 이미지는 과거로부터 군사정찰, 원격센싱 등의 분야에서 오랫동안 활용되어왔다. 디지털 카메라에서 사용되는 CFA(Color Filter Array) 센서는 적외선 에너지의 칼라신호에 대한 간섭을 막기 위해 적외선 차단필터를 사용하여 왔다. 그러나 주야간 감시를 위한 카메라, 심도측정을 위한 특수용도의 카메라[1-3] 등에서는 칼라 이미지와 적외선 이미지를 동시에 촬영하는 것이 필요하다. 또한, 최근에는 컴퓨터 비전인식 등의 분야에서 RGB와 적외선 이미지를 동시에 활용하여 이미지 품질향상, 노이즈제거, 압부 이미지 검출 등에 이용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1],[4-5]. RGB 데이터와 적외선 이미지 촬영을 위해, 종래에는 2대 이상의 카메라를 사용하거나 동일 카메라로 다중의 촬영이 필요하였으나 움직이는 물체의 촬영이나 조도의 변화 등에 대한 대처가 매우 어렵다. 최근에는 반도체 기술의 발전으로 동일한 센서 내에 RGB 센서와 NIR(Near Infrared) 센서를 동시에 장착한 CFA(Color Filter Array)가 구현되어 한 번의 촬영으로 동시에 칼라이미지와 적외선 이미지를 촬영하여 얻을 수 있게 되었다. 이에 따라, RGB/NIR 단일 센서의 demosaicking 방법과 최적의 RGB-NIR 배열 구조 등에 대하여 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다[6-8].

대부분의 디지털 카메라는 단일 칩의 CCD(Charge Coupled Device)를 사용하며 이 CCD는 CFA 구조를 이루고 있다. CFA의 각 센서에는 Fig. 1.(b)의 색정보로부터 특정한 색 영역만을 통과하는 필터가 부착되어 있으며 가장 전형적인 구조인 Bayer CFA는 Fig. 1.(a)의 conventional과 같은 구조를 갖고 있다.

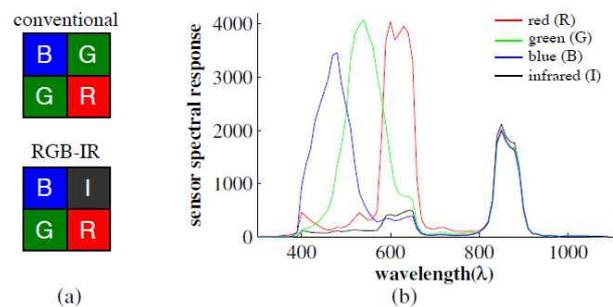


Fig. 1. Pixel multiplexing, channel crosstalk and chromatic aberration of our prototype RGB-IR camera.
(a) Sensor Structure of Color filter array
(b) Spectral response curves

• First Author: Kil-Hyun Jeong, Corresponding Author: Kil-Hyun Jeong
*Kil-Hyun Jeong (khjeong@jangan.ac.kr), Dept. of Internet Communication, Jangan University
• Received: 2017. 09. 06, Revised: 2017. 10. 01, Accepted: 2017. 10. 30.
• This work was supported by Jangan University.

RGB-NIR CFA는 Bayer CFA의 2개의 G 센서 중 하나를 NIR 센서로 대체하는 구조이다.(Fig. 1.(a) RGB-IR). 따라서 이러한 CFA에서 R, G, B, NIR신호는 규칙적인 샘플링 구조를 이루고 있으며 이 신호로부터 모든 위치에서의 RGB-NIR 신호를 추정하는 과정을 demosaicking 이라 부른다. 일반적인 Bayer 구조에서 RGB 값을 추정하는 것은 CFA 내의 각 지점을 중심으로 인터폴레이션 필터를 적용하여 간단하게 계산할 수 있으나 옛지와 같은 이미지의 고주파영역의 재현에 만족할 만한 결과를 기대할 수 없으므로 칼라플레인 간의 상호 correlation 특성을 이용한 방법들에 의한 많은 연구가 이루어지고 있다[9-10].

그러나 옛지 영역과 같은 이미지의 공간주파수가 상대적으로 높은 영역에서 칼라정보와 이미지 디테일이 왜곡되는 등 해결해야할 많은 문제점을 안고 있다. 이러한 왜곡은 주로 CFA의 샘플링 구조에 따른 주파수 영역에서의 aliasing에 기인한 것이다. Fig. 2.에는 Bayer CFA에서 발생하는 aliasing을 나타내었다. Fig. 2.의 Green 채널의 경우에는 Bayer 구조에서 Red와 Blue 채널에 비해 2배의 샘플링을 수행하므로 고주파 영역에서 aliasing이 발생하지 않으나 Red와 Blue 채널은 고주파 영역에서 aliasing이 발생한다. 이와 같이 샘플링 구조의 주파수 도메인 특성을 관찰하여 demosaicking 과정에서 발생하는 왜곡을 예측할 수 있다.

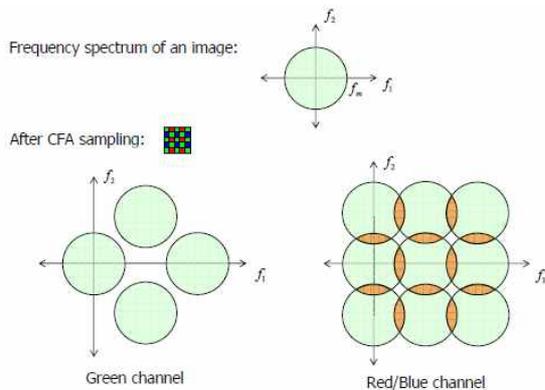


Fig. 2. Aliasing of Bayer CFA

Alleysson[10] 등은 CFA의 이미지를 베이스밴드에서의 조도(luminance) 신호와 고주파로 변조된 색차(chrominance) 신호로 표현하였고 Dubois[9]는 주파수 대역에서 적절하게 설계된 필터를 통해 효과적으로 aliasing을 억제하는 Bayer CFA의 demosaicking 방법을 제안하였다.

한편 Gunturk[11]등은 기존의 여러 가지 demosaicking 방법에 대한 이미지 품질 특성을 평가하고 alternating projection에 의한 demosaicking 알고리즘을 제안하였으며 매우 높은 이미지 품질을 구현하였다. 주파수 도메인에서의 demosaicking은 일반적인 iterated processing이 아닌 필터에 의한 단일 처리과정 이므로 효율적인 방식이다.

본 연구에서는 위에서 언급한 일반적인 Bayer 구조의 RGB 센서가 아닌 RGB-NIR 배열 구조를 갖는 CFA의 주파수 영역

에서의 필터링을 통한 demosaicking을 구현한다.

RGB-NIR 이미지는 원격이미지 센싱 등의 분야에서 오랫동안 활용되어왔고 최근에는 이미지 품질개선[1],[5] 등을 포함한 여러 분야에서 활발하게 이용되고 있다. 특히 반도체 기술의 발전에 따라 동일한 센서 칩 내에서 RGB와 NIR 이미지를 동시에 검출할 수 있게 됨에 따라 효율적인 demosaicking 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다[7-8].

본 연구에서는 기존의 공간적인 인터폴레이션에 의한 demosaicking방법과 달리 주파수 도메인에서 적절한 필터링을 통해 aliasing을 최소화하는 효율적인 demosaicking 방법을 RGB-NIR 구조의 CFA에 적용함으로써 Bayer CFA 기반의 RGB-NIR 센서 뿐 아니라 향후, 일반적 구조의 CFA-NIR 센서의 구조 최적화를 위한 성능해석에 적용하기 위한 기본 도구로 활용하고자 한다.

RGB 이미지와 NIR 이미지를 카메라를 통해 동시에 촬영하는 것은 NIR의 파장 성분이 다른 칼라 채널에 영향을 주는 상호간섭 현상이 발생하여 렌즈의 파장에 따른 굴절률의 차이에 따른 이미지 품질의 저하가 발생한다. 이를 해석하고 보완하는 방법이 [12]에서 제안되었으며 본 연구에서는 이 문제에 대한 논의를 제외한다.

본문의 구성은 II절에서는 RGB-NIR 센서의 주파수 도메인에서의 해석을 다루고 III절에서는 demosaicking 방법에 대한 설명, IV절에서는 그 결과를 다른 방식과 비교한다.

II. Frequency Domain Analysis of RGB-NIR CFA Image Signal

I절에서 설명한 바와 같이 주파수 도메인에서 RGB CFA의 demosaicking 방법은 Alleysson[10]에 의해 제안되었고 Dubois[9]은 주파수 대역에서 aliasing을 억제하기 위한 필터를 이용한 demosaicking 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 Dubois의 Bayer CFA demosaicking 방법을 활용하여 RGB-NIR CFA의 demosaicking을 구현한다.

Fig. 1.의 RGB-NIR CFA에서 검출하는 각각의 R, G, B, NIR 신호는 Sub-sampling 구조를 갖는다. CFA내의 좌표 $[n_1, n_2]$ 의 위치에서 CFA의 출력신호를 $f_{CFA}[n_1, n_2]$ 라고 할 때 $f_{CFA}[n_1, n_2]$ 의 출력은 각 위치에서 단일 색상 정보를 가지므로 각 센서의 필터에 의한 모자이크 신호이다. demosaicking은 각 $[n_1, n_2]$ 의 위치에서 R, G, B, NIR 등의 모든 채널의 신호크기를 추정하는 demosaicking에 의해 칼라 신호의 크기를 추정하고자 하는 임의의 위치에서 R, G, B 각 색상의 정보를 각각 $f_R[n_1, n_2]$, $f_G[n_1, n_2]$, $f_B[n_1, n_2]$, $f_N[n_1, n_2]$ 라고 한다. 실제 출력되는 샘플링된 신호 $f_{CFA}[n_1, n_2]$ 는 $f_i[n_1, n_2]$ 신호와 다음과 같은 subsampling

신호 $m_i[n_1, n_2]$ 의 곱으로 나타나며 이를 다음 식(1) ~ 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 즉, 모달레이션 신호 $m_i[n_1, n_2]$ 는 아래 식(1) ~ 식(4)로 표현된다.

$$m_G[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(1 + (-1)^{n_1}) \cdot (1 + (-1)^{n_2}) \quad (1)$$

$$m_R[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(1 - (-1)^{n_1}) \cdot (1 + (-1)^{n_2}) \quad (2)$$

$$m_B[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(1 + (-1)^{n_1}) \cdot (1 - (-1)^{n_2}) \quad (3)$$

$$m_N[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(1 - (-1)^{n_1}) \cdot (1 - (-1)^{n_2}) \quad (4)$$

따라서 샘플링된 신호 $f_{CFA}[n_1, n_2]$ 는 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{CFA}[n_1, n_2] &= \frac{1}{4} \sum_{i=R,G,B,N} f_i[n_1, n_2] \cdot m_i[n_1, n_2] \\ &= \frac{1}{4} [f_G[n_1, n_2](1 + (-1)^{n_1}) \cdot (1 + (-1)^{n_2}) \\ &\quad + f_R[n_1, n_2](1 - (-1)^{n_1}) \cdot (1 + (-1)^{n_2}) \\ &\quad + f_B[n_1, n_2](1 + (-1)^{n_1}) \cdot (1 - (-1)^{n_2}) \\ &\quad + f_N[n_1, n_2](1 - (-1)^{n_1}) \cdot (1 - (-1)^{n_2})] \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 식(5)를 다시 정리하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{CFA}[n_1, n_2] &= \frac{1}{4} [(f_G[n_1, n_2] + f_R[n_1, n_2] + f_B[n_1, n_2] \\ &\quad + f_N[n_1, n_2]) + (f_G[n_1, n_2] - f_R[n_1, n_2] \\ &\quad - f_B[n_1, n_2] + f_N[n_1, n_2]) \cdot (-1)^{n_1+n_2} \\ &\quad + (f_G[n_1, n_2] - f_R[n_1, n_2] + f_B[n_1, n_2] \\ &\quad - f_N[n_1, n_2]) \cdot (-1)^{n_1} \\ &\quad + (f_G[n_1, n_2] + f_R[n_1, n_2] - f_B[n_1, n_2] \\ &\quad - f_N[n_1, n_2]) \cdot (-1)^{n_2}] \\ &\equiv f_L[n_1, n_2] + f_{c1}[n_1, n_2] \cdot (-1)^{n_1+n_2} \\ &\quad + f_{c2}[n_1, n_2] \cdot (-1)^n \end{aligned}$$

식(6)에서, $f_L, f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}$ 는 각각 식(7) ~ 식(10)으로 정의한다.

$$f_L[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(f_G[n_1, n_2] + f_R[n_1, n_2] + f_B[n_1, n_2] + f_N[n_1, n_2]) \quad (7)$$

$$f_{c1}[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(f_G[n_1, n_2] - f_R[n_1, n_2] - f_B[n_1, n_2] + f_N[n_1, n_2]) \quad (8)$$

$$f_{c2}[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(f_G[n_1, n_2] - f_R[n_1, n_2] + f_B[n_1, n_2] - f_N[n_1, n_2]) \quad (9)$$

$$f_{c3}[n_1, n_2] = \frac{1}{4}(f_G[n_1, n_2] + f_R[n_1, n_2] - f_B[n_1, n_2] - f_N[n_1, n_2]) \quad (10)$$

이 때 f_L 은 조도(luminance)를 나타내고 f_{c1}, f_{c2}, f_{c3} 등은 칼라 신호 간의 색차(chrominance) 신호이다. 그런데, $-1 = \exp(j\pi)$ 이므로 식(6)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{CFA}[n_1, n_2] &= f_L[n_1, n_2] + f_{c1}[n_1, n_2] \\ &\quad \cdot \exp(j(n_1 + n_2)\pi) \\ &\quad + f_{c2}[n_1, n_2] \cdot \exp(jn_1\pi) \\ &\quad + f_{c3}[n_1, n_2] \cdot \exp(jn_2\pi) \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 식(6)에서 보는바와 같이 조도 신호 $f_L[n_1, n_2]$ 는 중심주파수가 $[0, 0]$ 베이스밴드의 신호이고 색차 신호 $f_{c1}[n_1, n_2], f_{c2}[n_1, n_2], f_{c3}[n_1, n_2]$ 는 공간주파수영역에서 각각 $(0.5, 0.5), (0.5, 0), (0, 0.5)$ 의 위치에 변조가 되어 위치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.에는 이들 신호의 주파수 영역에서의 위치를 간략화하여 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 demosaicking 과정에서 발생하는 왜곡은 subsampling에 의해 발생하는 조도 신호와 색차 신호 간의 주파수 영역에서의 aliasing에 의한 것임을 알 수 있다. 특히 베이스밴드 신호인 \tilde{f}_L 과 다른 색차 신호 간의 간섭을 최소화하기 위한 적절한 로우패스 필터링을 통해 이러한 왜곡을 최소화 할 수 있다.

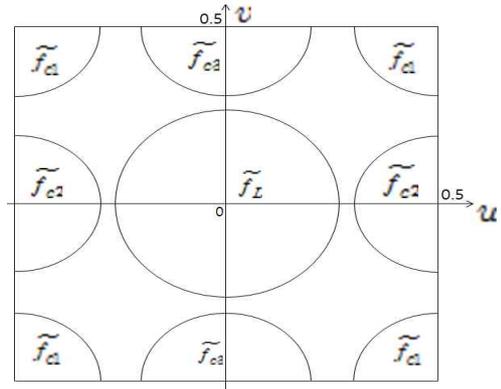


Fig. 3. The Position in the spatial frequency domain of $f_L, f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}$

Fig. 3.에서 조도 신호의 주파수 영역에서의 신호인 \tilde{f}_L 은 \tilde{f}_{c1} 보다 $\tilde{f}_{c2}, \tilde{f}_{c3}$ 의 색차 신호에 의한 aliasing의 영향을 받기 쉽다는 것을 알 수 있다. 또한 그림에서 \tilde{f}_{c2} 에 의한 aliasing은 수직 축 u 방향의 주파수에 의한 영향이 수평 축 v 방향의 영향

보다 상대적으로 크며 \tilde{f}_{c3} 의 경우에는 v 주파수 방향의 aliasing의 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 또 \tilde{f}_{c1} 의 경우에는 상대적으로 베이스밴드의 조도 신호와의 간섭이 적게 발생함을 알 수 있다. 따라서, 이들의 영향을 고려한 적절한 필터의 설계가 필요하다.

III. Demosaicking in the Frequency Domain

앞 절에서 설명한 조도 신호와 색차 신호들 간의 간섭을 최소화하기 위해서 각 신호들의 공간주파수 영역에서의 중심주파수의 위치를 고려하여 적절한 로우패스 및 대역필터를 적용하여 demosaicking을 구현 할 수 있다. RGB-NIR CFA의 경우 Bayer CFA와 유사한 주파수 분포를 가지므로 Dubois[9]가 제안한 구조의 필터를 그대로 사용할 수 있다. 이때 색차 신호 f_{c2}, f_{c3} 를 추출하기 위한 대역필터는 Fig. 4와 같이 비대칭적인 구조를 갖는데 이는 Fig. 3.에서 보는바와 같이 \tilde{f}_{c2} 의 경우 수평 주파수에 대해 간섭이 일어나기 쉽고 \tilde{f}_{c3} 의 경우에는 수직 주파수에 대해 간섭이 일어날 가능성이 크기 때문에 이를 반영하여 각각 h_{c2}, h_{c3} 형태의 필터를 사용한다. \tilde{f}_{c1} 의 경우에는 h_{c1} 필터를 적용한다.

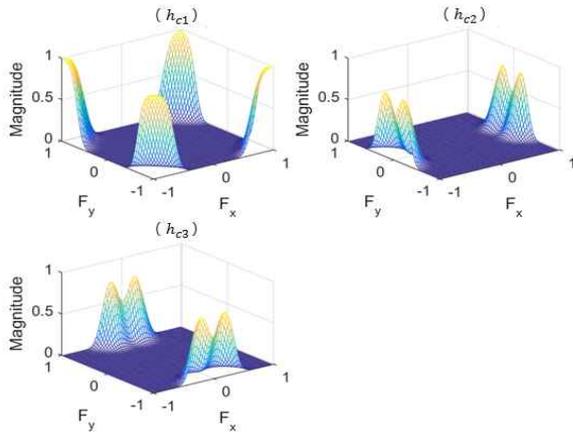


Fig. 4. Frequency response characteristics of each filter

f_{c1} 의 공간 주파수 $(0.5, 0.5)$ 에 위치하는 h_{c1} 필터에 의해 필터링된 결과를 \hat{f}_{c1m} 이라고 표시하면 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}_{c1m}[n_1, n_2] = f_{CFA}[n_1, n_2] * h_{c1} \quad (12)$$

따라서 베이스밴드에서 \hat{f}_{c1} 은 식(13)과 같이 된다.

$$\hat{f}_{c1}[n_1, n_2] = \hat{f}_{c1m}[n_1, n_2] \cdot (-1)^{n_1+n_2} \quad (13)$$

마찬가지로 $\hat{f}_{c2m}, \hat{f}_{c2}, \hat{f}_{c3m}, \hat{f}_{c3}$ 는 아래 식(14) ~ 식(17)과 같이 표현된다.

$$\hat{f}_{c2m}[n_1, n_2] = f_{CFA}[n_1, n_2] * h_{c2}[n_1, n_2] \quad (14)$$

$$\hat{f}_{c2}[n_1, n_2] = \hat{f}_{c2m} \cdot (-1)^{n_1} \quad (15)$$

$$\hat{f}_{c3m}[n_1, n_2] = f_{CFA}[n_1, n_2] * h_{c3}[n_1, n_2] \quad (16)$$

$$\hat{f}_{c3}[n_1, n_2] = \hat{f}_{c3m}[n_1, n_2] \cdot (-1)^{n_2} \quad (17)$$

위의 식(12)에서 식(17)로부터 \hat{f}_L 은 식(18)로 표현할 수 있다.

$$\hat{f}_L[n_1, n_2] = f_{CFA}[n_1, n_2] - \hat{f}_{c1}[n_1, n_2] - \hat{f}_{c2}[n_1, n_2] - \hat{f}_{c3}[n_1, n_2] \quad (18)$$

II절의 식(7) ~ 식(10)은 다음 식(19)와 같은 matrix형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_L \\ \hat{f}_{c1} \\ \hat{f}_{c2} \\ \hat{f}_{c3} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{f}_G \\ \hat{f}_R \\ \hat{f}_B \\ \hat{f}_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

또한, 식(19)는 아래 식(20)이 된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_G \\ \hat{f}_R \\ \hat{f}_B \\ \hat{f}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{f}_L \\ \hat{f}_{c1} \\ \hat{f}_{c2} \\ \hat{f}_{c3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

식(14) ~ 식(18)으로부터 계산된 $\hat{f}_L, \hat{f}_{c1}, \hat{f}_{c2}, \hat{f}_{c3}$ 의 결과를 식(20)에 대입하면 demosaick된 결과 $\hat{f}_G[n_1, n_2], \hat{f}_R[n_1, n_2], \hat{f}_B[n_1, n_2], \hat{f}_N[n_1, n_2]$ 를 구할 수 있다.

IV. Simulation and Results

이상에서 설명한 demosaicking 알고리즘을 적용하기 위해 [13]의 RGB, IR 이미지를 사용하였다. 이 이미지들은 동일한 카메라를 사용하여 IR 차단필터를 통한 이미지와 IR 필터를 제거한 IR 이미지이다. 이들을 다시 다운샘플링을 하여 최대한 매칭을 시킨 이미지이다. Fig. 5.(a)의 RGB와 IR 이미지를 Fig. 1.(a)의 RGB-NIR CFA 구조가 되도록 샘플링하여 센서 이미지 f_{CFA} 를 만들고 이를 demosaicking한 결과를 Fig. 6.에 도시하였다. Fig. 6.의 결과를 다시 기존의 여러 가지 demosaicking 방식으로 동일한 f_{CFA} 이미지에 적용한 결과물과 비교하였다.

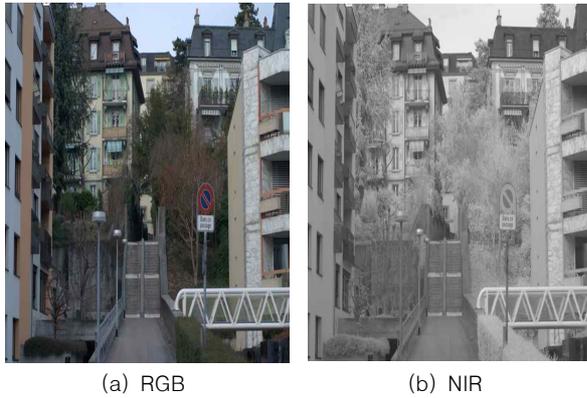


Fig. 5. Original Image of RGB and NIR

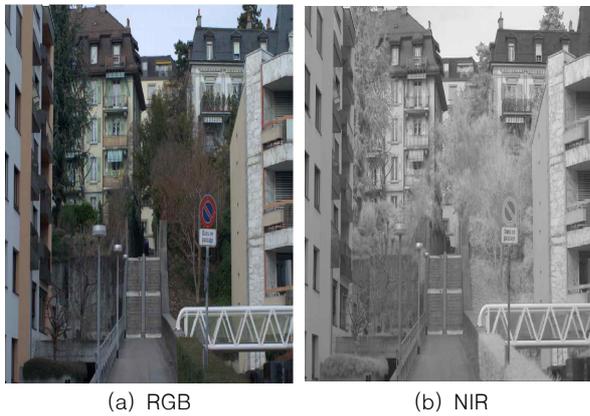


Fig. 6. Demosaicking Results

위의 그림에서 보는바와 같이 주파수 도메인에서의 demosaicking 방법의 결과물은 원본이미지와 대비하여 좋은 품질의 이미지 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7.에는 다른 demosaicking 방법에 의한 RGB 이미지 결과를 도시하였다.



(a) bilinear method (b) alternating projections[11]



Fig. 7. Comparison with other methods- RGB

Fig. 8.에는 Bi-cubic method에 의한 NIR 이미지의 demosaicking 결과와 제안 알고리즘의 결과를 비교하였다.



(a) Bi-cubic method (b) Proposed method

Fig. 8. Comparison with other methods- NIR

Gunturk[11]는 Bayer RGB CFA의 demosaicking 알고리즘의 결과를 비교하고 alternating projection 방식의 결과가 가장 우수함을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 [13]의 이미지로부터 RGB-NIR CFA 형태의 이미지를 만들고 이를 이용하여 각종 방식의 알고리즘을 비교하였다.

표. 1.에는 원본이미지와 결과물과의 mean-square-error (MSE) 계산 결과를 표시하였다.

Table 1. MSE results

Algorithm	R	G	B	Average
Bilinear	4.189	4.242	4.283	4.238
alternating-projection	3.622	3.481	3.699	3.601
Freq-domain[10]	4.119	4.163	5.469	4.584
Proposed Algorithm	3.583	3.57	3.891	3.681

표. 1.의 결과에서 제안 알고리즘은 alternating-projection method와 유사한 MSE 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

V. Conclusions

본 연구에서는 Bayer 센서 구조를 갖는 RGB-NIR CFA의 주파수 도메인에서의 demosaicking 방법에 대하여 고찰하였고 color와 NIR 이미지를 사용한 simulation에 의해 기존의 방법들과 결과를 비교하였다. 제안된 demosaicking 방법의 결과물은 현재까지 가장 좋은 결과를 나타내는 demosaicking 방법 중의 하나로 간주되는 alternating projection method[9]의 품질에 준하는 결과물을 얻을 수 있었다. 그러므로 반복적인 계산을 요하는 기존의 alternating projection method에 대비하여 단일 프로세싱에 의해 효율적인 계산 과정으로 근접한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구의 제안방법은 간편한 방법으로 RGB-NIR CFA의 demosaicking을 구현 하므로서 RGB-NIR 데이터를 동시에 활용하는 night-vision 등의 분야에서 활용이 가능하며, Bayer 구조가 아닌 일반적인 배열 구조의 CFA에서 최적의 color 배열을 구하는 연구 분야에 활용이 기대된다.

REFERENCES

- [1] X. Zhang, T. Sim, and X. Miao, "Enhancing photographs with nearintra-red images," Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 1-8, 2008.
- [2] Ho-Young Kwak, Jisoon Huh, "Extract and Analysis System for CT/MRI Images," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 1, pp. 131-140, 2014.
- [3] Chun-Ho Song, "Applying tilt mechanism for high-resolution image acquisition," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 12, pp. 31-37, 2014.
- [4] T. Shibata, M. Tanaka, and M. Okutomi, "Visible and near-infrared image fusion based on visually salient area selection," Proc. of SPIE, Vol. 9404, pp. 94040G-1-6, 2015.
- [5] C. Fredembach, D. Rufenache and S. Süsstrunk, "Automatic and accurate shadow detection using near-infrared information," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 36, No. 8, pp. 1672-1678, August. 2014.
- [6] Manual Martinello, Andrew Wajs, et al., "Dual Aperture Photography: Image and Depth from a Mobile Camera," Proc. of IEEE Int. Conf. on Computational Photography (ICCP), April, 2015.
- [7] H. Teranaka, Y. Monno, M. Tanaka and M. Okutomi, "Single-Sensor RGB and NIR Image Acquisition: Toward Optimal Performance by Taking Account of CFA Pattern, Demosaicking and Color Correction," Int. Symposium on Electronic Imaging, Digital Photography and Mobile Imaging Xii, pp. 1-6, 2016.
- [8] Y. Monno, M. Tanaka, and M. Okutomi, "N-to-sRGB Mapping for Single-Sensor Multispectral Imaging," Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV) Workshop, pp. 33-40, 2015.
- [9] E. Dubois, "Frequency-domain methods for demosaicking of bayer-sampled color images," IEEE Signal Processing Letters 12, pp. 847-850, Dec. 2005.
- [10] D. Alleysson, S. Süsstrunk, and J. Hérault, "Linear demosaicking inspired by the human visual system," IEEE Trans. Image Process, Vol. 14, No. 4, pp. 439-449, Apr. 2005.
- [11] B. K. Gunturk, Y. Altunbasak, and R. M. Mersereau, "Color plane interpolation using alternating projections," IEEE Trans. Image Process. Vol. 11, No. 9, pp. 997-1013, Sep. 2002.
- [12] Huixuan Tang, Xiaopeng Zhang, Shaojie Zhuo, Feng Chen, Kiriakos N. Kutulakos, Liang Shen, "High Resolution Photography with an RGB-Infrared Camera," IEEE International Conference on Computational Photography(ICCP), 2015.
- [13] Correlation-based Joint Acquisition and Demosaicing of Visible and Near-infrared Images, http://ivrlwww.epfl.ch/supplementary_material/SLS_I_CIP2011/index.html

Authors



Kil-Hyun Jeong received the B.S. degree in Electronic Engineering from Hanyang University in 1983, the M.S. degree in Mathematics with a specialization in Computer Engineering from Ewha Womans University in 1986, and the Ph.D degree in

Computer Science and Engineering from Hanyang University in 2001. Dr. Jeong joined the faculty of the Department of Computer Science at Jangan University, Gyeonggi-do, Korea, in 1990. She is currently a Professor in the Department of Internet Communication at Jangan University. She is interested in information communication, mobile computing, and network protocol.