

논문 2017-54-2-11

기울기 차이 최소화를 통한 컬러 영상의 색수차 제거

(Removing Chromatic Aberration in Color Image by Gradient Difference Minimization)

권 지 용*, 강 문 기**

(Ji Yong Kwon and Moon Gi Kang[©])

요 약

렌즈의 굴절률은 빛의 파장 대역에 따라 다르다. 이로 인하여 서로 다른 파장 대역의 광선들이 다른 위치에서 초점이 맞게 되어 영상의 화질이 떨어지게 되고 에지 주변에서 색수차가 발생하게 된다. 본 논문은 컬러 영상의 색수차를 제거하기 위한 방법을 제안하였다. 컬러 채널들 기울기들의 상관관계가 높다는 이론을 기반으로 하여 컬러 채널들의 기울기 차이에 대한 비용 함수를 설계하였다. 설계된 비용 함수의 에너지를 최소화하도록 하는 해를 찾음으로써 색수차가 제거된 고화질의 컬러 영상을 추정할 수 있다. 추가적으로, 제안하는 방법은 컬러 영상뿐만 아니라 다중 분광 대역 영상에 대해서도 적용 가능하다. 실험 결과에서 제안하는 방법이 효과적으로 색수차를 제거할 수 있다는 것을 보여준다.

Abstract

Lenses have different refractive indices for different wavelengths of light. This is why different wavelengths of rays are focused at different positions in the focal plane. Images are blurred and noticeable colored edges appear around the objects, which is known as chromatic aberration (CA). In this paper, an algorithm for removing CA artifacts in color images is proposed. Based on the fact that the gradients of color channels are highly correlated, the differences of the gradients of the channels in edges are minimized. The cost function is designed by using the gradients of the channels. Experimental results show the good performance of the proposed algorithm in removing the CA artifacts.

Keywords : 기울기, 색수차, 컬러 영상, 영상 복원

I. 서 론

스마트 기기와 텔레비전, 디지털 카메라에서 사용되는 영상의 해상도가 커짐에 따라 고화질의 컬러(color) 영상을 획득하는 것이 중요한 화두가 되었다. 그러나 렌즈의 파장에 따른 다른 굴절률로 인하여 초점면(focal plane)에서 다른 파장 대역의 빛이 다르게 위치에서 초점이 맞게 된다^[1]. 또한, 더 큰 에너지의 빛을 획득하고

* 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 : December 28, 2016

Accepted : January 20, 2017

눈에 보이지 않은 정보를 활용하기 위하여 근적외선(near-infrared; NIR)을 컬러와 함께 획득할 때, 초점이 일치하지 않는 문제가 발생할 수 있다^[2]. 이처럼 아웃포커스(out of focus) 문제는 영상을 뿌옇게 만들고 색수차(chromatic aberration; CA)를 발생시킨다. 색수차는 적(red)과 녹(green), 청(blue) 채널이 다른 위치에 있을 때 발생한다. 이는 영상의 세세한 부분을 망가뜨리고 화질을 열화(degrade)시킨다. 이를 해결하기 위해 하드웨어(hardware)적인 방법으로, 여러 렌즈를 사용하거나 초점 거리가 자동으로 조정되는 시스템으로 해결할 수 있지만, 이렇게 하면 고가의 대형 카메라가 된다. 그래서 신호 처리 기반(signal processing based) 방법을 이용하여 고화질 영상을 추정 하는 것이 연구된다. 맞지 않은 에지(edge)를 동일하게 하도록 하는 알고리즘은 컴퓨터 비전(computer vision)과 컬러 영상 처리

분야에서 필수적인 부분이다.

신호 처리 방법 기반의 색수차를 제거하는 방법으로, 전역(global) 뒤틀림(warping) 이론을 기초로 컬러 채널들의 위치를 동일하게 맞춰주는 방법이 있다^[3]. 이러한 방법은 매개 변수를 추정하기 위한 전처리 과정이 필요로 한다. 그에 반하여, 밝은 영역 주변에서 컬러 채널의 특성을 이용하여 색수차를 검출 하는 국부(local) 교정(correction) 방법이 있다^[4]. 또한, 비선형(nonlinear) 편미분(partial differential) 방정식(equation)을 이용하여 적색 및 청색 채널의 기울기(gradient)을 녹색 채널의 기울기에 맞추도록 하여 에지에서의 블러(blur)와 색수차를 제거하도록 하는 방법이 있다^[5]. 에지에서의 색의 특성을 분석하여 색수차를 검출하고 제거하는 방법이 있다^[6].

같은 피사체를 촬영한 여러 장의 영상을 이용하여 디블러링(deblurring)을 수행하기 위하여 비용 함수(cost function)을 이용하여 영상과 블러 커널(blur kernel)에 대하여 번갈아가며 추정하도록 하는 다중 채널(multi channel) 블라인드(blind) 디콘볼루션(deconvolution)이 제안되었다^[7]. 컬러 영상에 대한 디콘볼루션 알고리즘으로, 정규화(regularization)을 이용한 컬러 영상의 아티팩트(artifacts)를 제거하도록 하는 알고리즘이 있다^[8]. 공간적으로 다른 정도로 색수차가 발생한 영상의 블러를 제거하기 위한 전변동(total variation) 최소화 방법이 제안되었다^[9]. 이러한 방법들이 특정 문제들을 해결하였지만, 컬러 영상들의 색수차 문제에 대하여 다양하게 적용되기는 힘들다.

베이어(Bayer) 영상으로부터 전해상도의 컬러 영상을 획득하기 위해서 컬러 보간(color interpolation) 알고리즘이 필수적이다^[10]. 하지만, 색수차가 발생할 때 기존의 컬러 보간 방법들은 정확한 컬러 값을 추정할 수 없다. 에지들이 일치하지 않아서 다른 컬러 채널을 이용하기 어렵기 때문이다. 이를 해결하기 위하여 디블러링과 에지 적응적인 컬러 보간을 동시에 수행하도록 하는 방법이 제안되었다^[11]. 영상 획득 모델(image formation model)을 설계하고 광학(optic) 수차를 분석하여 국부 영역에 따라 다른 점상 강도 분포 함수(point spread function; PSF)를 추정하고 컬러 보간과 복원을 수행하는 방법이 제안되었다^[12]. 또한, 다중 분광 필터 배열(multi-spectral filter array; MSFA)로 영상을 획득할 때 발생하는 색수차 문제를 추정된 전색(panchromatic) 영상을 이용하여 해결하는 방법이 제안되었다^[13]. 그러나 영상 획득 모델이 부정확하면 컬러 보간 과정에서

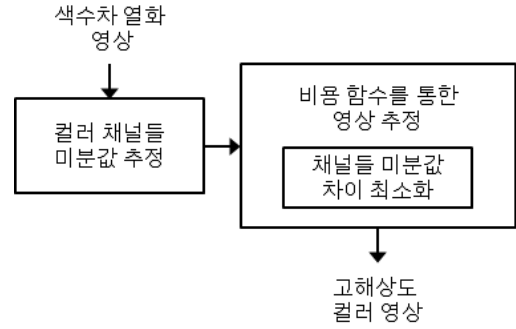


그림 1. 제안하는 알고리즘의 블록도

Fig. 1. Block diagram of proposed algorithm.

아티팩트가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 컬러 채널들의 에지에서의 기울기 차이를 최소화하여 컬러 영상의 색수차를 제거하는 알고리즘을 제안한다.

II. 제안하는 방법

제안하는 방법의 전체 블록도를 그림 1에 표현하였다. 컬러 영상의 색수차를 제거하기 위하여 컬러 채널들의 기울기를 구하고 이들의 차이를 최소화하는 해를 추정하여 고화질 영상을 획득한다.

원본 영상을 추정할 때, 사전 정보(prior knowledge)를 이용하여 원본 영상의 특성에 대한 특정 제약 요건(regularization term)에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. 에지를 보존하기 위하여 원본 영상과 저화질 영상의 기울기 일정(consistency) 관계를 이용한 방법이 제안되었다^[14]. 기울기의 프로파일(profile)을 이용하여 에지를 분석한 방법이 소개되었다^[15]. 에지의 세기와 퍼진 정도를 일반적인 가우시안 분포(generalized Gaussian distribution; GGD)를 이용하여 프로파일을 조정하도록 하는 방법이 제안되었다^[16]. 원본 영상의 사전 정보를 이용하여 그에 해당하는 윤곽으로 수렴하도록 하는 방법이 있다^[17]. 본 논문에서는, 이러한 이론을 바탕으로 하여, 다른 채널의 기울기를 영역 적응적으로 이용하여 열화된 컬러 채널의 기울기를 복원하도록 하였다(그림 2 참고).

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 전해상도 컬러 영상을 $x_R[n_1, n_2]$ 와 $x_G[n_1, n_2]$, $x_B[n_1, n_2]$ 로 표현할 때, 순서 방식(lexicographic)을 이용하여 $N \times 1$ 의 벡터로 표현하면, \mathbf{x}_R 와 \mathbf{x}_G , \mathbf{x}_B 로 나타낼 수 있다. 여기서 N 은 영상의 픽셀 수를 의미하여 $N = N_1 \times N_2$ 로 구해진다. 원본 영상의 경우, 컬러 채널들의

낸 것이다. 수평 및 수직 방향에 대해서 $t = 1, 2$ 로 나타낸다. ϵ 은 반복 단계 크기(iteration step size)를 나타낸다. 최종적으로 색수차가 제거된 컬러 영상 $\hat{\mathbf{x}}_R$ 와 $\hat{\mathbf{x}}_G$, $\hat{\mathbf{x}}_B$ 이 추정된다.

III. 실험 결과

제안하는 방법의 성능을 평가하기 위하여 두 개의 영상 세트를 이용하였다. 24장의 Kodak 영상과 다중 분광 필터 배열 센서를 이용하여 획득한 영상이 사용되었다. Kodak 영상들은 필름 카메라로 획득되고 512×768 픽셀, 그리고 픽셀당 24 비트로 디지털화 되었다. 이 원본 영상들로부터 열화된 영상을 생성하였다. 초점이 녹색 채널에 맞고 적, 청 채널에는 맞지 않았다고 가정하여 열화된 영상을 만들 수 있다^[1]. 적과 청 채널에 대해서 종(axial) 색수차를 만들기 위해 분산(variance) 1의 가우시안(Gaussian) 블러를 적용하였다. 횡(lateral) 색수차를 만들기 위해 적과 청 채널 영상의 크기를 2 픽셀 크게, 2 픽셀 작게 만들었다. 베이어 컬러 필터 배열을 따라서 부표본화 시키고 이 영상에 대해서 컬러 보간을 수행한 결과에 대해서 색수차 제거 방법들을 적용하였다.

추가적으로 색수차 문제가 발생할 수 있는 다중 분광 필터 배열 센서를 이용하여 해상도 차트와 여러 물체들에 대해서 실험실에서 형광등 광원 하에서 1920×1080 크기로 영상을 획득하였다^[21]. 적과 녹, 청, 근적외선으로 2×2 의 배열로 획득된다. 그리고 다중 분광 컬러 보간 방법^[13]으로 전해상도로 추정하고 컬러 영상에 대해서 기존의 방법과 제안하는 방법을 적용하여 색수차를 제거하였다.

제안하는 방법과 기존의 색수차 제거 방법들을 비교하였다. 컬러의 특성을 기반으로 색수차를 검출하고 제거하도록 하는 방법이 있다(방법1)^[4]. 에지 검출 시 오류가 발생할 때 대처할 수 없는 문제점이 있다. 다른 방법으로, 에지에서의 컬러 양상을 파악하여 색수차를 제거하도록 하는 알고리즘이 있다(방법2)^[6]. 하지만 이 방법은 색수차를 검출할 때 사용되는 매개변수에 따라 성능이 좌우되곤 한다. 또한 필터링을 통한 색수차 제거 방법이 있다(방법3)^[11]. 이 방법은 색수차를 제거되는 동시에 에지 주변부가 무채색으로 변할 수 있는 한계점이 있다.

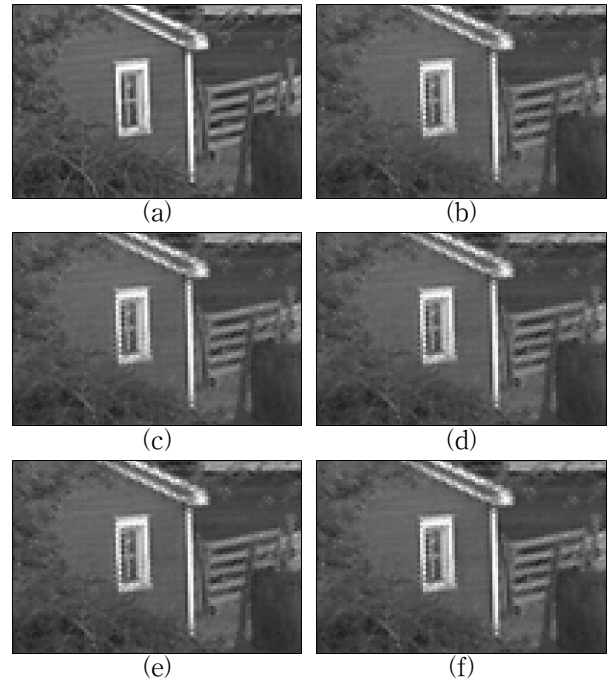


그림 3. 실험 결과 (부분 확대된 Kodak22 영상), (a) 원본 영상, (b) 열화된 영상, (c) 방법1, (d) 방법2, (e) 방법3, (f) 제안하는 방법

Fig. 3. Experimental results (zoomed-in part of the Kodak22 image), (a) original image, (b) degraded image, (c) method1, (d) method2, (e) method3, (f) proposed method.

수치 비교를 위해, 비교 알고리즘들과 제안하는 알고리즘을 적용한 결과들에 대해서 두 가지 수치를 측정하였다. 컬러 최대 신호 대 잡음비(color-peak signal-to-noise ratio; CPSNR)^[23]와 채널들의 에지의 기울기에 대한 분산을 계산하였다. 에지가 일치 정도를 측정하기 위하여 각 픽셀에서의 채널들 기울기의 분산을 구하고 영상 전체에 대한 평균값을 구하였다. 본 실험에서, (5)번 식의 k 채널에 대한 블러 \mathbf{B}_k 를 분산 0.1의 가우시안(Gaussian) 블러로 가정하고 반복 단계 크기 ϵ 는 0.1로 설정하였다.

그림 3은 원본 영상과 컬러 보간된 영상에 대해 알고리즘을 적용한 결과들을 나타낸다. 그림 3(b)는 열화된 영상으로부터 컬러 보간 방법^[22]을 이용하여 컬러 영상을 추정한 결과이다. 이 영상에 비교 알고리즘들^[4, 6, 11]을 적용하였다. 그림 3(c)-(e)에 보이듯이, 색수차 제거 알고리즘을 적용하였음에도 불구하고 색수차가 남아있는 것을 확인할 수 있다. 에지의 기울기 차이를 최소화하여 색수차를 제거하도록 하는 제안하는 방법을 적용한 결과를 그림 3(f)에 나타내었다. 기둥들에 나타나있던 색수차가 제거된 것을 확인할 수 있다.

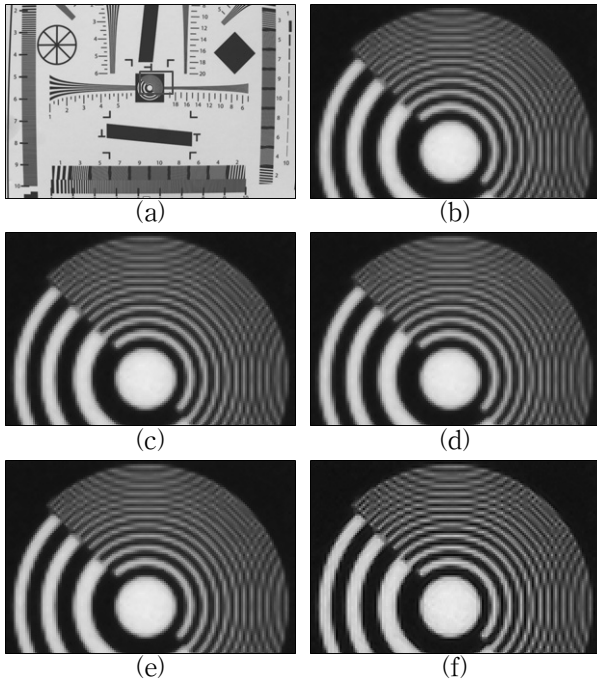


그림 4. 실험 결과 (부분 확대된 Indoor1 영상), (a) 획득 영상, (b) 확대된 획득 영상, (c) 방법1, (d) 방법2, (e) 방법3, (f) 제안하는 방법

Fig. 4. Experimental results (zoomed-in part of the Indoor1 image), (a) obtained image, (b) enlarged obtained image, (c) method1, (d) method2, (e) method3, (f) proposed method.

다중 분광 필터 배열 영상을 컬러 보간한 결과에 대해서 비교 알고리즘과 제안하는 방법을 적용한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)는 컬러 보간^[13]된 다중 분광 영상의 컬러 채널을 나타낸다. 확대하여 표현된 그림 4(b)에서 확인할 수 있듯이, 색수차가 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 영상의 위 부분에서 초록색의 색수차가 확인된다. 비교 알고리즘들을 적용한 결과를 그림 4(c)-(e)에 나타내었다. 결과에 보듯이 색수차가 충분히 제거되지 않았다. 반면에 그림 4(f)의 제안하는 방법을 적용한 결과에는 색수차가 완전히 제거된 것을 확인할 수 있다. 에지의 기울기 차이를 최소화하도록 하는 제안하는 방법을 통해서 색수차가 제거되고 화질이 향상된 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 컬러 최대 신호 대 잡음비를 이용한 수치 비교를 나타낸다. 열화된 컬러 영상을 가정하여 만들고, 이로부터 컬러 보간이 수행된 컬러 영상에 대해서 비교 알고리즘들^[4, 6, 11]과 제안하는 방법을 적용한 결과에 대해서 원본과 어느정도 유사해졌는지를 비교하였다. 제안하는 방법을 이용하여 색수차를 제거한 결과의 수치가 가장 우수한 것을 확인할 수 있다.

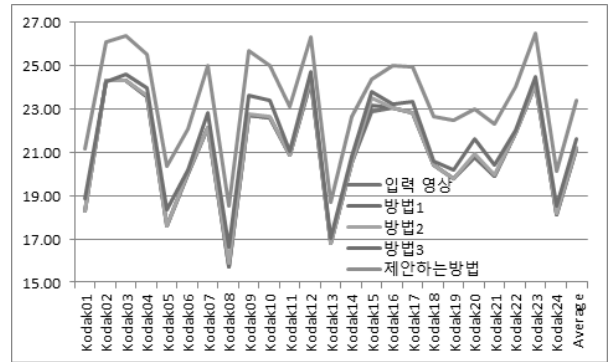


그림 5. 컬러 최대 신호 대 잡음비 비교
Fig. 5. CPSNR Comparison.

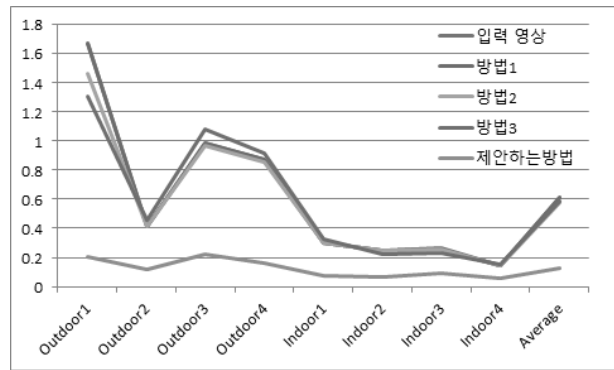


그림 6. 채널들 기울기의 분산 비교
Fig. 6. Comparison of Variance of Channel Gradients.

다중 분광 영상에 대해서 그림 6은 에지에서의 각 채널들의 기울기 차이를 측정하기 위해 분산값을 이용하여 어느정도 복원되었는지를 비교한 결과이다. 다중 분광 대역 필터 배열 영상으로 획득한 영상에 대해서 컬러 보간을 수행한 결과에 대해서 비교 알고리즘들^[4, 6, 11]과 제안하는 방법을 적용하였다. 제안하는 방법을 이용한 결과에서 분산이 제일 작게 구해졌고, 이는 색수차가 가장 많이 제거된 것으로 해석될 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 컬러 채널들의 기울기 차이를 최소화하여 색수차를 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방법은 신호 처리 방법을 기반으로, 사전에 계산되어야 하는 변수를 필요로 하지 않는 장점이 있다. 또한 컬러 영상뿐만 아니라 다중 분광 대역 영상에서 발생할 수 있는 색수차 문제도 해결할 수 있다는 점에서 다방면으로 활용 가능하다.

REFERENCES

- [1] J. Chang, H. Kang, and M. G. Kang, "Correction of axial and lateral chromatic aberration with false color filtering," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 3, pp. 1186-1198, Mar. 2013.
- [2] Z. Sadeghipoor, Y. M. Lu, and S. Süsstrunk, "Gradient-based correction of chromatic aberration in the joint acquisition of color and near-infrared images," *Proc. SPIE 9404*, 94040F-94040F-11, 2015.
- [3] T. Boult and G. Wolberg, "Correcting chromatic aberrations using image warping," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 684-687, 1992.
- [4] B.-K. Kim and R.-H. Park, "Automatic detection and correction of purple fringing using the gradient information and desaturation," in *Signal Processing Conference, 2008 16th European*, pp. 1-5, 2008.
- [5] H. Kang, S.-H. Lee, J. Chang, and M. G. Kang, "Partial differential equation based approach for removal of chromatic aberration with local characteristics," *J. Electron. Imaging*, vol. 19, no. 3, 2010.
- [6] S.-W. Chung, B.-K. Kim, and W.-J. Song, "Removing chromatic aberration by digital image processing," *Optical Engineering* 49(6), 067002-067002-10, 2010.
- [7] F. Sroubek and P. Milanfar, "Robust multichannel blind deconvolution via fast alternating minimization," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 21, no. 4, pp. 1687-1700, Apr. 2012.
- [8] S. H. Chan and T. Q. Nguyen, "Single-image, spatially variant, out-of-focus blur removal," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process.*, pp. 677-680, Sep. 2011.
- [9] D. Menon and G. Calvagno, "Regularization approaches to demosaicking," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 18, no. 10, pp. 2209-2220, Oct. 2009.
- [10] B. Bayer, "Color imaging array," US Patent 3,971,065, 1976.
- [11] Du Sic Yoo, Ki Sun Song, and Moon Gi Kang, "A Deblurring Algorithm Combined with Edge Directional Color Demosaicking for Reducing Interpolation Artifacts," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 50, NO. 7, pp. 1833-1843, July 2013.
- [12] C. Schuler, M. Hirsch, S. Harmeling, and B. Scholkopf, "Non-stationary correction of optical aberrations," *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 659-666, 2011.
- [13] 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.
- [14] J. Sun, J. Sun, Z. Xu, and H.-Y. Shum, "Gradient profile prior and its applications in image super-resolution and enhancement," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 6, pp. 1529 - 1542, Jun. 2011.
- [15] L. Wang, S. Xiang, G. Meng, H. Wu, and C. Pan, "Edge-directed single-image superresolution via adaptive gradient magnitude self-interpolation," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 23, no. 8, pp. 1289 - 1299, Aug. 2013.
- [16] Y.-W. Tai, S. Liu, M. Brown, and S. Lin, "Super resolution using edge prior and single image detail synthesis," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2400 - 2407, 2010.
- [17] Q. Yan, Y. Xu, X. Yang, and T. Nguyen, "Single image superresolution based on gradient profile sharpness," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 10, pp. 3187 - 3202, Oct. 2015.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] D. G. Luenberger and Y. Ye, *Linear, Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 1984.
- [21] Sony, "Specifications of imx222lqj," 2013.
- [22] 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.
- [23] 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 박
사 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>