

논문 2014-51-1-19

주파수 도메인의 변곡점을 이용한 디지털 카메라의 moire 제거 방법

(Moiré Reduction in Digital Still Camera by Using Inflection Point in Frequency Domain)

김 대 철*, 경 왕 준*, 이 철 희***, 하 영 호**

(Dae-Chul Kim, Wang-Jun Kyung, Cheol-Hee Lee, and Yeong-Ho Ha[©])

요 약

디지털 카메라에서는 일반적으로 높은 공간주파수에 의해 발생하는 주파수 간섭을 제거하기 위해 광저대역 투과 필터(optical lowpass filter)를 사용한다. 그러나 영상을 획득할 때 광저대역 투과 필터의 사용으로 고주파 성분이 제거되어 상세 성분의 손실을 가져오게 된다. 이와 반대로, 광저대역 투과 필터를 제거한 후에 영상을 획득할 경우, 높은 공간주파수를 가지는 영역에서 moiré가 발생하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 카메라의 광저대역 투과 필터를 제거 후 영상의 상세 성분을 보존하고 moiré를 제거하는 방법을 제안한다. 먼저 ISO12233 해상도 차트를 사용하여 카메라의 공간해상도(spatial frequency response)를 분석하고, 카메라의 최대 분해능에 해당하는 해상도 차트의 패턴을 모델링하여 moiré가 발생하는 영역을 검출한다. 검출된 moiré 영역을 주파수 도메인에서 분석하고 DC 성분과 최대 주파수 사이의 각 주파수별 최대 값에서 발생하는 변곡점을 검출하고 변곡점에 해당하는 값을 제거하여 moiré 성분을 제거한다. 실험 결과 제안한 방법은 상세 성분의 손실을 줄이고 moiré 제거에서 우수한 성능을 보였다.

Abstract

Digital still camera generally uses optical low-pass filter(OLPF) to enhance its image quality because it removes high spatial frequencies causing aliasing. However, the use of OLPF causes some loss of detail. On the other hand, when image are captured by using no OLPF, the moiré is generally existed in high spatial frequency region of an image. Therefore, in this paper, moiré reduction method in case of using no OLPF is suggested. To detect the moiré, spatial frequency response(SFR) of camera was firstly analyzed by using ISO 12233 resolution chart. Then, moiré region is detected by using the patterns that are related to the SFR of camera. next, this region is analysed in the frequency domain. Then, the moiré is reduced by removing its frequency component, which represents inflection point between high frequency and DC components. Through the experimental results, it is shown that the proposed method can achieve moiré reduction with preserving the detail.

Keywords : moire reduction, moire detection, optical low pass filter

* 학생회원, ** 평생회원, 경북대학교 IT대학 전자공학부
(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

*** 정회원, 안동대학교 컴퓨터 공학과
(Computer Engineering, Andong National University)

© Corresponding Author(E-mail: yha@ee.knu.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. NRF-2013R1A2A2A01016105)

접수일자: 2013년10월9일, 수정완료일: 2014년1월2일

I. 서 론

일반적으로 디지털 카메라는 빛을 외부 필터를 통해 받아들이고 CCD센서를 통하여 RGB의 형태로 영상을 획득한다. 이러한 카메라의 센서를 이용한 영상획득을 주파수 측면에서 살펴보면, 획득하고자 하는 이미지의 공간 주파수 스펙트럼이 2차원 평면의 x축과 y축에서 반복되는 형태의 공간 주파수 스펙트럼을 가진다. 따라서 표본화 정리에 따라 영상의 공간주파수가 CCD가 표현 할 수 있는 최대의 공간주파수 보다 작을 경우 정확한 영상을 획득할 수 있다. 하지만 반대의 경우 주파수 간섭에 의해 왜곡이 발생하여 물결무늬와 같은 왜곡된 이미지를 나타낸다. 따라서 일반적인 디지털 카메라는 moiré라 불리는 상의 왜곡을 없애기 위해 영상의 공간 주파수를 센서의 분해 가능 주파수 이하로 제한하는 광저대역 투과 필터(OPLF)를 외부 필터에 추가하여 사용한다^[1-3]. 하지만 최근 제조 단가의 절약을 위해 광저대역 투과 필터를 제거하고 moiré를 제거하는 연구가 시도 되었다. 이 방법은 영상의 RGB 신호를 밝기와 색도 성분으로 변환하고 각 성분에 저역 통과 필터를 적용하여 moiré를 제거한다^[4]. 하지만 이 방법은 저역 통과필터에 의해 영상의 열화가 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 카메라의 광저대역 투과 필터 제거 후 영상의 상세 성분을 보존하고 moiré를 제거하는 방법을 제안한다. 먼저 ISO12233 해상도 차트를 사용하여 카메라의 공간해상도(spatial frequency response)를 분석하고, 카메라의 최대 분해능에 해당하는 해상도 차트의 패턴을 찾는다.

다음으로 ISO12233 해상도 차트 영상의 픽셀간 밝기 성분의 차이를 이용하여 카메라의 최대 분해능을 초과하는 패턴을 모델링하고, 이를 이용하여 입력 영상에서 moiré가 발생하는 영역을 검출한다. 다음으로, 검출된 moiré 영역을 주파수 도메인에서 분석하고 각 주파수별 최대 값을 계산하여, 주파수 도메인에서의 moiré 성분에 해당하는 DC 성분과 최대 주파수 사이의 각 주파수별 최대값의 변곡점을 검출한다. 마지막으로, 이 변곡점에 해당하는 값을 주파수 도메인에서 변곡점과 이웃하는 영역을 평균한 값으로 대체하여 moiré 성분을 제거한다. 실험 결과 제안한 방법은 상세 성분의 손실을 줄이고 moiré 제거에서 우수한 성능을 보였다.

II. 제안한 moiré 제거 방법

본 논문에서는 그림 1에서 보는 것과 같이 입력 영상에서 moiré 영역을 검출하고 이를 주파수 도메인에서 분석하고, 주파수 영역에서의 moiré 성분에 해당하는 변곡점을 제거하여 보정된 영상을 획득한다.

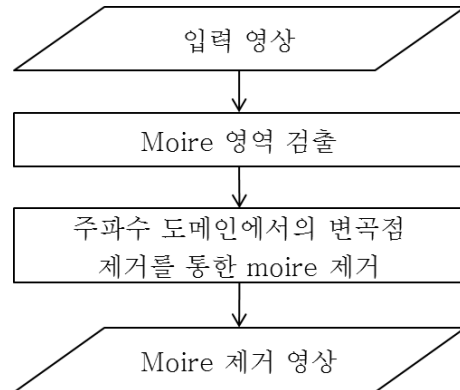


그림 1. 제안한 moiré 제거 방법의 흐름도
Fig. 1. Workflow of the proposed moiré reduction.

1. moiré 패턴 검출

Moiré 패턴을 검출하기 위하여 카메라의 분해능을 이용하여 moiré 패턴을 검출하였다. 카메라의 분해능을 분석하기 위하여 카메라의 공간해상도(spatial frequency response)를 측정한다. 카메라의 공간해상도는 입력공간 주파수와 디지털 카메라의 응답성과의 관계를 나타내는 지표로 공간 주파수의 증가에 따른 변조 전달함수(modulation transfer function)의 변화로 나타내어진다. 여기서 변조 전달함수는 컨트라스트의 재현비를 나타내며 입력 컨트라스트에 대한 출력 컨트라스트의 비로 나타내어진다.

$$MTF = \frac{R_o}{R_i} \quad (1)$$

여기서 R_o 는 출력 컨트라스트를 나타내고, R_i 는 입력 컨트라스트를 나타낸다.

다음으로, 카메라의 분해능을 분석하기 위하여 NX-100 카메라와 ISO 12233 해상도 차트를 이용하여 변조 전달함수를 구하였고, 그림 2과 같은 결과를 획득하였다. 그리고 변조 전달함수의 값이 5%가 될 때의 주파수 값인 0.7 frequency cycles/mm를 카메라의 공간 해상도로 정의하였다^[5-6]. 또한 ISO 12233 해상도 차트의 각 패

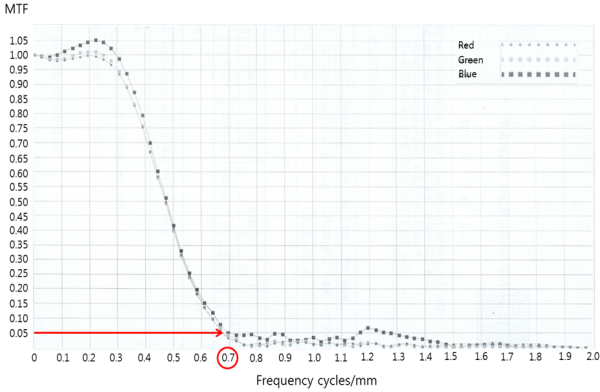


그림 2. ISO 12233 해상도 차트를 이용한 카메라의 공간해상도 측정
 Fig. 2. SFR of camera using ISO 12233 resolution chart.

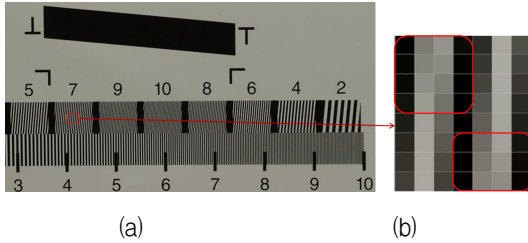


그림 3. Moiré 발생 영역의 패턴 분석; (a) ISO 12233 해상도 차트, (b) 라인 7의 확대된 영상
 Fig. 3. Analysis of the moiré region; (a) ISO 12233 resolution chart, (b) magnified in image of line 7.

턴의 공간주파수를 계산한다. 해상도 차트의 각 패턴의 공간 주파수 f_{sp} 는 차트의 높이 만큼의 영역에 일정 굵기의 선을 놓았을 때 얼마나 많이 나열할 수 있는가를 정의하는 단위이며 아래와 같이 계산되어 진다. .

$$f_{sp} = \frac{P_h}{L_w} \tag{2}$$

여기서 L_w 는 라인의 넓이를 나타내고, P_h 는 차트의 높이를 나타낸다. 그 결과 카메라의 공간해상도와 ISO12233 해상도 차트의 공간주파수를 비교한 결과 NX-100 카메라의 공간 해상도는 ISO 12233 해상도 차트의 7번 패턴과 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 카메라의 공간 해상도를 이용하여 카메라의 최대 공간주파수에 해당하는 7번 패턴을 분석하였고 그 결과 그림 3에서와 같이 두 픽셀의 차이를 보이는 패턴을 확인할 수 있다. 또한, moiré가 발생하는 패턴에 대하여 살펴 본 결과 카메라의 최대 분해능을 초과하는 패턴에서 moiré가 발생

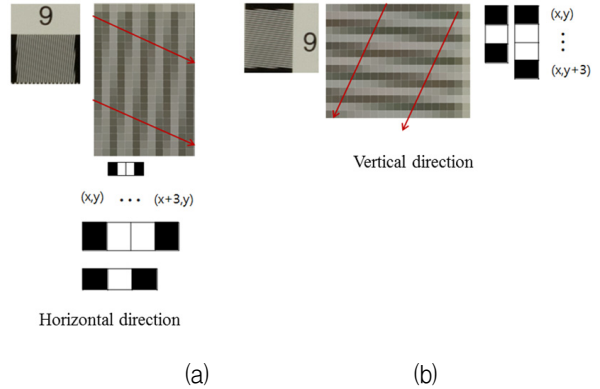


그림 4. 라인 9에서의 moiré 패턴 분석; (a) 가로 방향의 패턴, (b) 세로 방향의 패턴
 Fig. 4. Analysis of the moiré in line 9; (a) the pattern of horizontal direction, (b) the pattern of vertical direction.

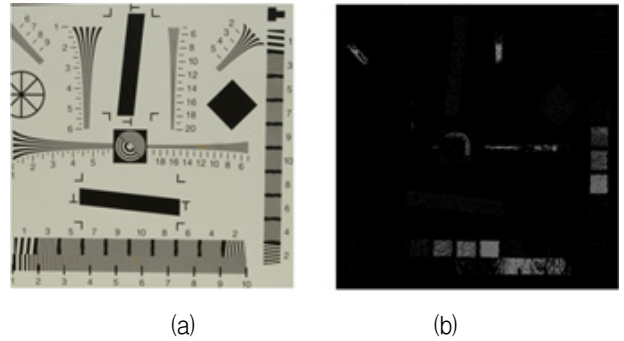


그림 5. ISO 12233 해상도 차트를 이용한 moiré 패턴 검출; (a) ISO 12233 해상도 차트, (b) 검출된 moiré 영역
 Fig. 5. Moiré detection using ISO 12233 resolution chart; (a) ISO 12233 resolution chart, (b) the result of moiré detection.

하였고 이를 기반으로 그림 4에서 보는 것과 같이 가로 세로 방향의 이웃 픽셀간의 밝기 차이를 이용하여 패턴을 검출하였다. 먼저 영상 $f(x,y)$ 의 픽셀간의 밝기 차이를 구한다. 가로 방향의 픽셀간의 밝기 차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} d_1 &= |f(x,y) - f(x+1,y)| \\ d_2 &= |f(x,y) - f(x+2,y)| \\ d_3 &= |f(x,y) - f(x+3,y)| \end{aligned} \tag{3}$$

다음으로 카메라의 공간해상도를 결정하는 기준인 5%이상의 출력의 조건을 적용하여 픽셀간의 밝기 차이가 5% 이상일 경우 패턴이 존재한다고 간주한다. 따라서 밝기 차이의 기준은 다음과 같이 나타내어진다.

$$ref = f(x,y) \times 0.05 \quad (4)$$

다음으로 카메라의 최대 분해능 이상의 패턴을 검출하기 위해서 카메라의 분해능에 해당하는 두 픽셀차이의 패턴 또는 한 픽셀 차이의 패턴에 대해 검출한다. 따라서, 다음과 같은 두 조건들 중 하나를 만족할 때 moiré 패턴이 발생할 영역 D로 정의 하였다.

$$D_1 = \begin{cases} d_1 > ref \text{ and} \\ d_2 > ref \text{ and} \\ d_3 > ref \end{cases}, D_2 = \begin{cases} d_1 > ref \text{ and} \\ d_2 < ref \end{cases} \quad (5)$$

$$D = D_1 \cup D_2 \quad (6)$$

세로 방향의 moiré 패턴이 발생할 영역은 가로 방향의 패턴 검출과 동일한 방법을 기준 픽셀에 대하여 세로 방향으로 적용하여 수행된다. 가로 세로 방향의 이웃 픽셀의 밝기 차이를 이용하여 패턴을 검출한 결과 그림 5에서 보는 것과 같이 카메라의 분해능을 초과하는 부분에 대하

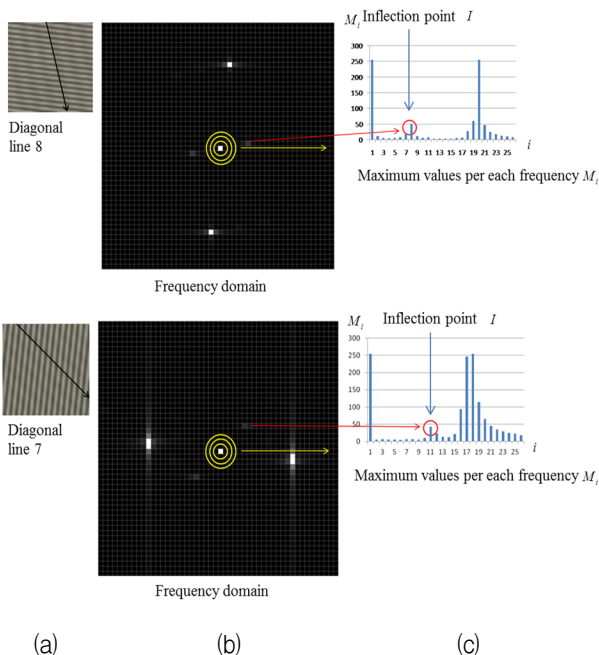


그림 6. ISO 12233 해상도 차트의 moiré 발생영역에 대한 주파수 분석; (a) 대각 패턴 7과 8, (b) 각 패턴에 대한 주파수 도메인에서의 표현, (c) 각 패턴의 각 주파수별 최대값

Fig. 6. Analysis of moiré region of ISO12233 resolution chart in frequency domain; (a) diagonal line of 7 and 8, (b) moiré components in the frequency domain, (c) maximum values per each frequency.

여 정확히 검출하였다.

또한, 이와 동일한 방법을 이용하여 다른 공간해상도를 가지는 카메라에 대하여는 각 카메라의 분해능에 해당하는 픽셀 간격을 적용하여 moiré를 검출할 수 있다. 예를 들어 카메라의 분해능이 0.7 frequency cycles/mm 이하인 카메라의 경우 3 픽셀 또는 4픽셀 등의 차이를 가지는 패턴까지 이용하여 moire 영역을 검출 할 수 있으며, 카메라 분해능이 0.7 frequency cycles/mm 이상인 카메라의 경우 1픽셀 차이의 패턴만을 이용하여 moiré 영역을 검출 할 수 있다.

2. 패턴 moire의 주파수 분석을 이용한 moire제거

Moiré의 성분을 주파수 도메인에서 분석하기 위하여 먼저 moiré 영역을 밝기 성분과 색도 성분으로 분리하고, 밝기 채널에 대하여 푸리에 변환을 적용하여 주파수 특성을 분석하였다. Moiré 영역에 대하여 주요 주파수를 찾기 위하여 DC 성분으로 정규화하여 표현하였을 때 그림 6과 같이 주 패턴에 해당하는 고주파 성분과 DC 성분 사이에 moiré에 해당하는 저주파 성분이 포함되는 것을 확인할 수 있다. 또한 각각의 moiré 발생 패턴에 대하여 각 주파수별 최대값을 조사한 결과 그림 6(c)에서와 같이 moiré 성분에 대하여 변곡점이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 주파수 영역에서 moiré 성분에 해당하는 변곡점을 찾기 위해 각 주파수

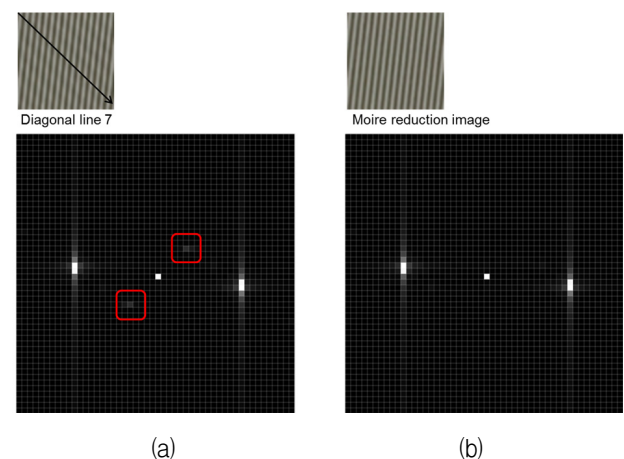


그림 7. ISO12233 해상도 차트를 이용한 moiré 제거 결과; (a) 대각 패턴 7의 moiré 영상, (b) 대각 패턴 7의 moiré 제거 영상

Fig. 7. Results of moiré reduction using ISO 12233 resolution chart; (a) moiré image of diagonal line 7, (b) moiré reduction result of diagonal line 7.

별 최대값 M_i 을 계산하고, 이들 값들에 대해 인근 주파수의 차이 값을 계산하여 그 차이가 크게 발생하는 변곡점을 검출한다. 즉, 변곡점 I 는 각 주파수별 최대값 M_i 의 이차 미분 값을 계산하고 그 값이 10 이상을 가지면서 부호가 바뀌는 지점을 변곡점으로 추출한다.

$$dM_i = \frac{\partial^2 M}{\partial i^2} = M(i+1) + M(i-1) - 2M(i) \quad (7)$$

$$I_i = \begin{cases} |dM_i| > 10 \text{ and} \\ dM_i < 0, dM_{i-1} < 0 \text{ and } dM_{i+1} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 i 는 주파수를 나타낸다. Moiré 성분의 크기에 해당하는 검출된 변곡점 I 는 주파수 도메인에서 $I(u, v)$ 로 나타나게 되고, 이 성분을 제거하여 moiré를 제거한다. 하지만 이 성분은 원 영상의 상세 성분을 포함하고 있기 때문에 원 영상의 상세 성분을 보존하기 위하여 $I(u, v)$ 의 8이웃하는 영역을 평균 $I_{avg}(u, v)$ 로 대체하여 moiré 성분을 제거한다. 변곡점의 8이웃하는 영역의 평균은 다음과 같이 계산되어 진다.

$$I_{avg}(u, v) = \frac{1}{9} \left\{ \begin{array}{l} I(u, v) + I(u, v+1) + I(u, v-1) \\ + I(u+1, v) + I(u+1, v+1) \\ + I(u+1, v-1) + I(u-1, v+1) \\ + I(u-1, v) + I(u-1, v-1) \end{array} \right\} \quad (9)$$

마지막으로 주파수 도메인에서 moiré가 제거된 영상은 푸리에 역변환 수행하고 색도 성분과 결합하여 그림 7에서와 같이 주파수 도메인에서 moiré 성분을 제거함으로써 moiré 현상이 제거된 영상을 획득한다.

III. 실험 및 결과

제안한 방법의 moiré 제거 성능을 평가하기 위하여 NX-100 카메라와 ISO 12233 해상도 차트를 사용하였다. 먼저 NX-100 카메라의 광저대역 투과 필터를 제거하고 ISO 해상도 차트를 촬영하여 영상을 획득하고, moiré 패턴을 검출하였다. 다음으로 검출된 moiré 영역에 대하여 각 패턴에 대해 주파수 도메인에서의 변곡점을 제거하여 moiré 현상을 제거하였다. 그 결과 그림 8(a)에 나타난 것과 같이 NX-100 카메라의 분해능을 초과하는 공간 주파수 영역에서 moiré 현상이 발생하였고, 그림 8(b)에서와 주파수 도메인에서의 moiré 성분을 제거함으로써 moiré 현상이 감소 하는 것을 확인 할 수

있다. 제거된 moiré 패턴은 그림 8(c)에 나타내었다. 또한, 저역 통과 필터를 사용하여 moiré 현상을 제거하는 방법과 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9(b)에 보는 것과 같이 저역통과를 사용하여 moiré를 제거하였을 때 moiré 패턴이 감소하는 것은 확인 할 수 있으나, 패턴의 상세 성분이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 9(c)에 보는 것 과 같이 제안한 방법은 상세 성분을 보존하면서 moiré 성분을 제거하는 것을 확인 할 수 있다.

그리고 moiré 제거 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 ISO 12233 해상도 차트와 Zone plate 차트를 사용하여 광저대역 투과 필터를 제거하기 전 영상을 기준으로 광저대역 투과 필터를 제거후에 획득한 영상과 제안한 방법의 결과를 PSNR과 MSSIM을 사용하여 성능을 비교하였다^[7]. 각 차트당 5개의 영상을 사용하였고, moiré 영역의 부분별 채널별 비교를 통하여 평가하였다. 그 결과는 표 1과 표 2에 총 5장의 영상에 대하여 평균 PSNR과 MSSIM을 나타내었다. ISO12233 해상도 차트에 대한 평균PSNR 과 평균MSSIM이 41.13dB 와 93.68, Zone plate 차트에 대한 평균PSNR 과 평균

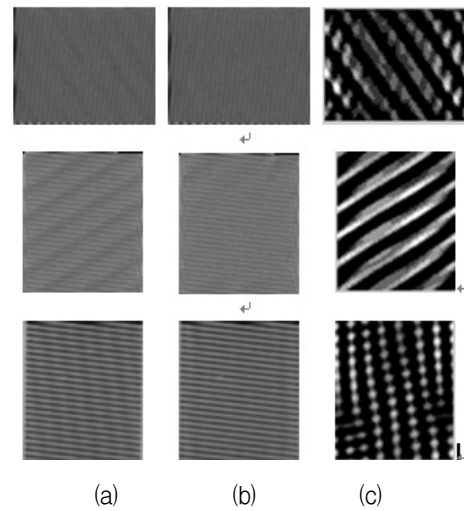


그림 8. ISO 12233 해상도 차트를 사용한 moiré 제거 결과; (a) 세로 방향의 라인 8, 가로 방향의 라인 10, 그리고 가로방향의 라인 8의 moiré 영상, (b) 각 패턴에 대한 moiré 제거 결과 영상, (c) 각 라인에서의 제거된 moiré 패턴

Fig. 8. Results of moiré reduction using ISO 12233 resolution chart, (a) moiré images of vertical line 8, horizontal line 10, and horizontal line 8, (b) their moiré reduction result, (c) their removed patterns.

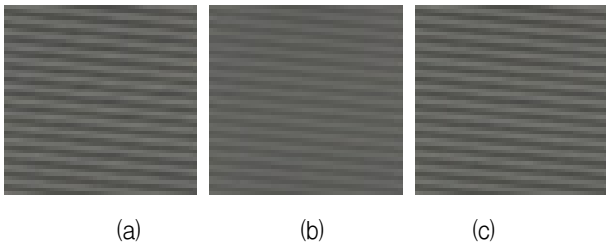


그림 9. ISO 12233 해상도 차트를 사용한 moiré 제거 결과; (a) 가로 방향의 라인 7, (b) Bilateral 필터를 사용한 moiré 제거 결과, (c) 제안한 방법에 의한 moiré 제거 결과

Fig. 9. Results of moiré reduction using ISO 12233 resolution chart, (a) moiré images of horizontal line 7, (b) moiré reduction using bilateral filter, (c) moiré reduction using the proposed method.

표 1. PSNR과 4MSSIM을 이용한 제안한 방법의 성능 평가

Table 1. Evaluation of the proposed method using PSNR and MSSIM.

평가방법	차트	OLPF제거후 획득 영상	제안한 방법
PSNR	ISO 12233	37.23dB	41.13dB
	Zone plate	29.36dB	45.21dB
MSSIM	ISO 12233	85.24	93.68
	Zone plate	49.52	98.16

MSSIM이 45.21dB와 98.16으로 우수한 성능을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문은 광저대역 투과 필터를 제거한 후 획득한 영상에서의 moiré 제거방법을 제안하였다. 먼저 카메라의 공간 해상도를 이용하여 카메라의 분해능을 초과하는 영역을 검출하여 moiré 패턴 영역을 검출하였다. 다음으로 검출된 영역을 주파수 도메인에서 분석하여 moiré 성분에 해당하는 변곡점을 제거함으로써 영상의 moiré 현상을 제거 하였다. 실험 결과 제안한 방법은 영상의 상세 성분을 보존함과 동시에 moiré 현상을 제거하는 성능을 보였다.

REFERENCES

[1] Y. Ohtake, "Television camera having an optical filter," US Patent No. 4539584, 1985.

[2] M. Sato, S. Nagahara, and K. Tajahashi, "Optical filter for color imaging device," US Patent No. 4626897, 1986.
[3] T. Asaida, "Optical low-pass filter including three crystal plates for a solid-state color TV camera," US Patent No. 4761682, 1988.
[4] Byeong-Jae Kim, "Image processing method and apparatus for bayer images," US Patent No. 0063480, 2011.
[5] ISO 12233, Photography-Electronic still-picture camera-Resolution measurements, 2000.
[6] ISO 14524, Photography-Electronic still-picture camera-Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs), 1999.
[7] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity," *IEEE transaction on Image Processing*, 31(4), 1-14 2004.

저 자 소 개

김 대 철(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제 48권 SP편 제 1호 참조

경 왕 준(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제 48권 SP편 제 1호 참조

이 철 희(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 47권 SP편 제 4호 참조

하 영 호(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 38권 SP편 제 3호 참조