

휴대폰용 카메라 모듈에서 파면코딩을 통한 이미지 시스템 실험구현

Experimental realization of an imaging system using wavefront coding in mobile phone camera

김종필*, 이상혁*, 박노철[†], 박영필**, 박경수**

Jong-Pil Kim, Sang-Hyuck Lee, No-Cheol Park, Young-Pil Park, and Kyoung-Su Park

(2009년 3월 13일 접수; 2009년 3월 20일 심사완료; 2009년 3월 24일 게재확정)

Abstract

We describe the experimental realization of image system using wavefront coding in 3-Mega pixel mobile phone camera. We designed aspheric lens to extend the depth of field (DOF) using wavefront coding. In addition, through the aspheric lens and lens barrel manufacturing, we obtained a raw image from a camera module. In our method, the acquired images are restored in the spatial frequency domain using the proposed filter and the spatial frequency response (SFR) is calculated. The proposed filters are composed of image denoising filter using low band pass filter in frequency domain and restoration filter for image restoration. Finally, we achieve an enhanced image by super-resolution image processing. Visual examples are given to demonstrate the performance of the proposed filter.

Key Words : wavefront coding, depth of field, denoising filter, point spread function, spatial frequency response, super-resolution

1. 서론

파면코딩(Wavefront coding)은 1995년에 Cathey 과 Dowski 의해 제안되어 이미지 시스템에서 높은 품질의 이미지를 얻는 설계방법 중의 하나로 널리 알려져 왔다. 이 기술의 핵심은 이미지 시스템에서 적절한 위상 마스크(phase masks)를 설계하는 것이다. 설계된 위상 마스크는 디포커스된 광학전달함수(optical transfer function)을 만드는데 이를 통해 피사계심도(depth of field)를 늘릴 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 이렇게 파면코딩된 이미지 시스템에서는 최적화된 점퍼짐함수(point spread functuin)의 특성으로 만들어진 필터나 디지털 이미지 프로세싱을 통해 이미지 영상복원이 가능하다. 현재 마스크의 형태에 따라 가장 잘 알려진 cubic phase mask[1], 그 밖에 logarithmic[2,3],

exponential[4], polynomial[5], high-order types[6] 등이 있으며 최근에는 cubic phase mask 를 기반으로 변형된 five times phase mask[7]과, 휴대폰용 파면코딩 이미지 시스템[8]등이 연구 되어왔다. 이러한 파면 코딩된 이미지는 현미경, 소형 카메라, 머신 비전 시스템, 적외선 이미지 시스템 그리고 망원경등 다양하게 적용되고 있다.

본 논문에서는 휴대폰용 카메라 모듈에 적용하기 위해 기존에 비대칭적 형상과는 달리 대칭구조의 형상을 가지며 위상 마스크와 같은 기능을 하도록 비구면 렌즈를 설계하였다. 그리고 이를 제작하여 시뮬레이션과 실제 실험과 비교해 보았다.

2. 설계

휴대폰용 카메라 모듈 파면코딩을 위해서 먼저 초기 렌즈를 설계하고 설계된 각각 렌즈의 파면 오차 조합으로 파면코딩을 설계한다. 초기 렌즈 설계는 일반 상용소프트웨어인 code v 를 통해 설계하였고 파면 코딩된 영역(zone)의 개수와 크기, 각 영역의 광로차(optical path difference)의 최대값을 통해 저니크 계수(Zernike coefficient)를 구할 수 있다.[7]

[†] 연세대학교 기계공학부
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123-4677

* 연세대학교 대학원 정보저장공학과
** 연세대학교 기계공학부

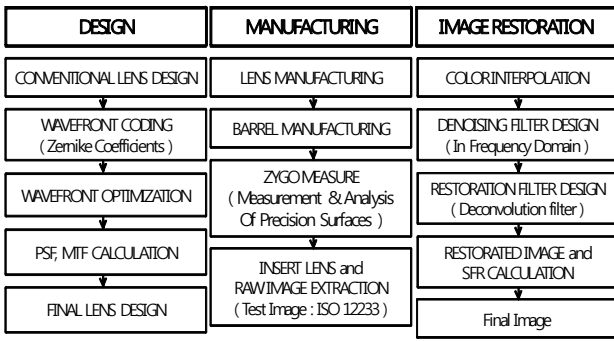


Fig. 1 Design, manufacturing and image restoration procedure

Table 1. Lens specification for 3mega pixel

Item	Value
Focal length	3.6mm
Total length	4.5mm
F-number	2.6
Field of View	64°
CMOS Sensor	3 megapixels(1/4 inch)
Pixel Size	1.75μm

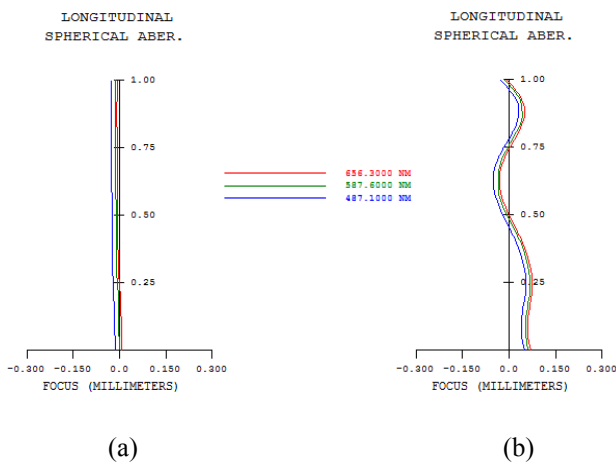
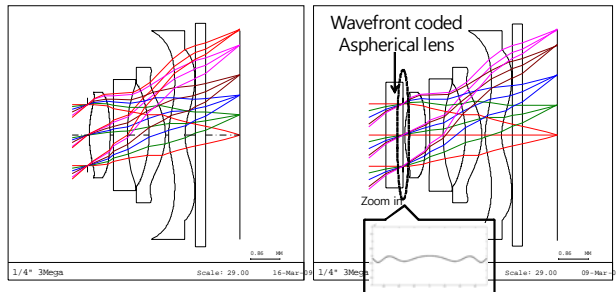


Fig. 2 Lens design and spherical aberration (code v)
(a) Conventional and (b) Wavefront coded optical system

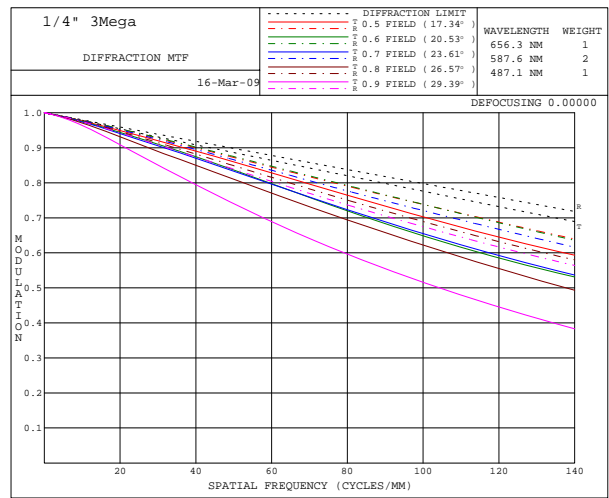


Fig. 3 Modulation Transfer Function in Conventional optical system

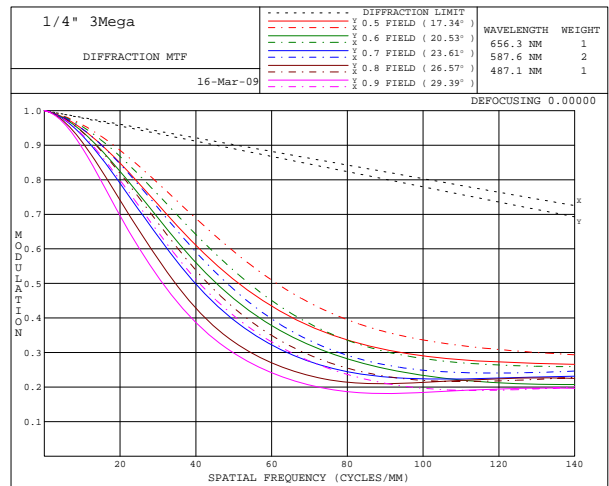


Fig. 4 Modulation Transfer Function in Wavefront coded system

본 연구에서는 휴대폰용 카메라 모듈에 삽입하기 위해 렌즈형상으로 위상 마스크를 만들고자 저니크 계수를 커브 피팅을 통해 비구면 렌즈를 설계하였다. 전체적인 설계와 실험 순서는 그림 1로 도식화하였다. 먼저 상용 렌즈설계 프로그램인 code v 를 통해 4 개의 플라스틱 재질로 3Mega Pixel 급의 렌즈를 설계하였다. 설계 시 필요한 사양은 표 1에 기술하였다. 그리고 추가 설계된 비구면 렌즈 형상의 위상 마스크는 이전에 설계된 4매 렌즈의 조리개(aperture)에 위치하여 설계하였다.

또한 기존 3 메가급 렌즈와 비교분석하기 위해 파면코딩된 비구면 렌즈에 대한 경통(barrel)도 설계하여 실험시 탈부착이 가능하도록 하였다. 최종 설계된 모습은 그림 2 와 같다.

커브 피팅을 통해 파면코딩된 비구면 렌즈형상의 두면은 각각 비구면과 평평한 면으로 구성되어 있고 그 비구면 렌즈 형상의 높이가 $0.5 \times 10^{-3} \text{mm}$ 으로 작다. 또한 이 렌즈는 두께는 0.5mm, 렌즈 직경이 2.8mm, 비구면 유효경 1.5mm 이고 평평한 면의 유효경은 1.78mm 이다. 파면코딩된 비구면 렌즈는 점퍼점함수와 변조전달함수 (Modulation Transfer Function)의 계산을 통해 성능을 분석하여 목표치와 비교하였다. 최적화 과정을 걸친 파면코딩된 최종 비구면렌즈는 포커스 지점을 기준으로 점퍼점함수가 $-30\mu\text{m}$ 에서 $+30\mu\text{m}$ 까지의 거의 일정하게 분포되어 있음을 얻었다. 그림 3 과 그림 4 는 원래 카메라 모듈에 대한 변조전달함수 와 최종 파면코딩된 변조전달함수에 대한 모습을 각각 나타내었다.

3. 실험

실험진행은 파면코딩된 비구면 렌즈와 경통을 가공 공차를 고려하여 제작하고, 제작된 렌즈를 평가 하기 위해서 대면적 고배율 비접촉 형상 측정기(Gygo)를 통해 검증했다. 또한 실험 이미지

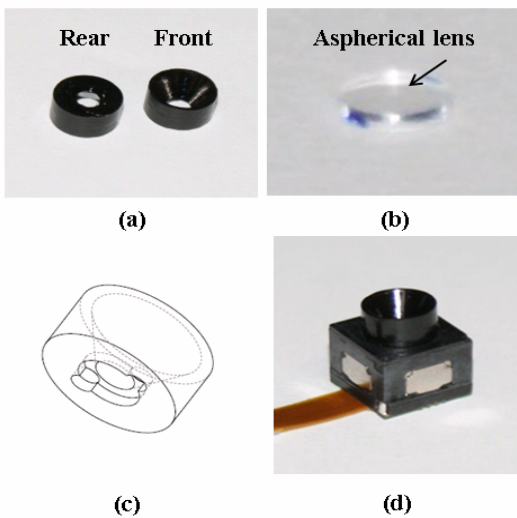


Fig. 5 Camera module and components (a) Manufactured barrel (b) Manufactured lens (c) Barrel design (d) Assembled camera module

는 ISO Resolution chart 12233 을 이용하여 거리 30cm 와 120cm 에서 로우 이미지(Raw image: 센서로부터 받은 정보를 가공하지 않은 상태로 저장한 이미지 파일 형식) 추출 실험을 진행하였고 그 밖에 무한광일 때 실외에서 로우 이미지를 추출하여 제작된 비구면 렌즈를 평가하였다. 그림 5 에서는 제작된 렌즈와 경통 그리고 3 메가 픽셀 모듈에 삽입된 모습을 나타낸 것이다. 커브 피팅으로 파면코딩 설계된 최종 렌즈 표면모습과 설계 후 제작된 비구면 렌즈를 고배율 비접촉 형상 측정기로 측정하여 검증하였다.

4. 결과

파면 코딩된 렌즈로부터 받은 이미지는 크게 세가지 이미지 프로세싱을 걸쳐서 최종 이미지를 얻게 된다. 먼저 모듈에서 얻은 로우 이미지 파일을 컬러보간 (Color interpolation)을 하고 노이즈 제거 필터와 복원 필터를 걸쳐 최종 이미지를 얻게 된다.

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (1)$$

$\hat{F}(u, v)$: Original Image
 $G(u, v)$: Degraded Image
 $H(u, v)$: Degradation Function (Point spread function)

$$H(u, v) = e^{-D^2(u, v)/2\sigma^2} \quad (2)$$

$D(u, v)$ is the distance from the origin (center of image)
 σ is a measure of spread of Gaussian curve

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

$$\hat{F}(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} G(u, v) = F(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

$G(u, v)$: Blur image
 $F(u, v)$: True image
 $H(u, v)$: Point spread function (PSF)
 $N(u, v)$: Noise
 $\hat{F}(u, v)$: Image restoration

Image Restoration (in frequency domain) :

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) * e^{-D^2(u, v)/2\sigma^2} * \frac{1}{H(u, v)}$$

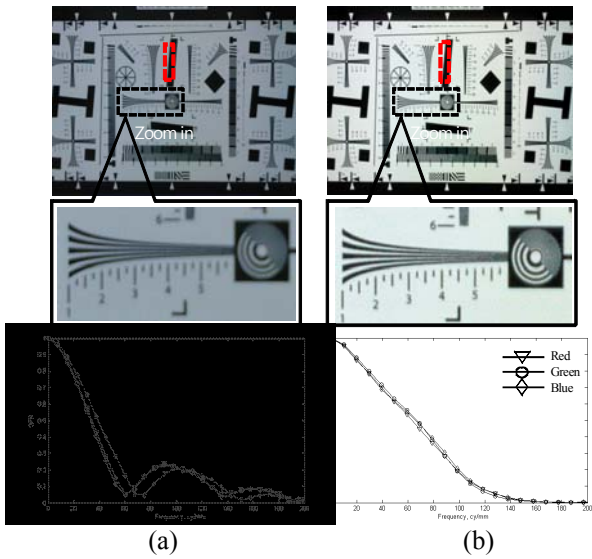


Fig. 6 ISO12233 chart image and MTF (a) Conventional optical system (b) Wavefront coded optical system (30cm)

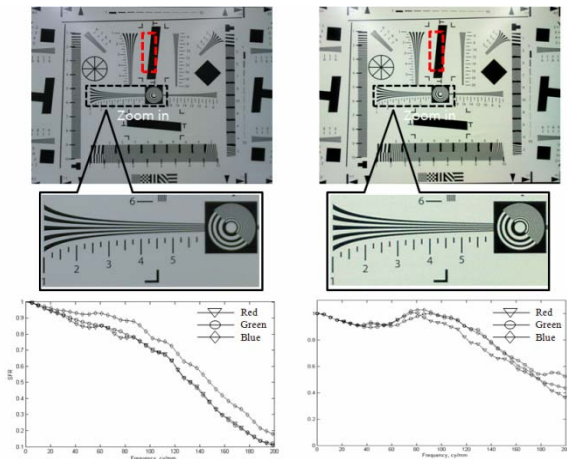


Fig. 7 ISO12233 chart image and MTF (a) Conventional optical system (b) Wavefront coded optical system (120cm)

제안된 필터는 먼저 식 1 과 같이 원래 이미지와 블러(blur)된 이미지를 푸리에 트랜스폼(Fourier Transform)을 이용하여 주파수 도메인에서 (Frequency domain) 정의하고 노이즈 제거를 위한 주파수 도메인으로 변환된 가우시안 저주파 필터 (Gaussian Lowpass Filter) 식 2 과, 이미지 복원을 위해 사용된 역 필터(Inverse Filter)식 3 을 통해 블러된 이미지를 디지털 이미지 프로세싱을 걸쳐 최종 복원된 이미지를 얻게 된다. 필터링을 통해 얻은 최종 이미지는 소개된 초 해상도 프로세스 (super-resolution processing) 통해 얻으며, 그 이미지

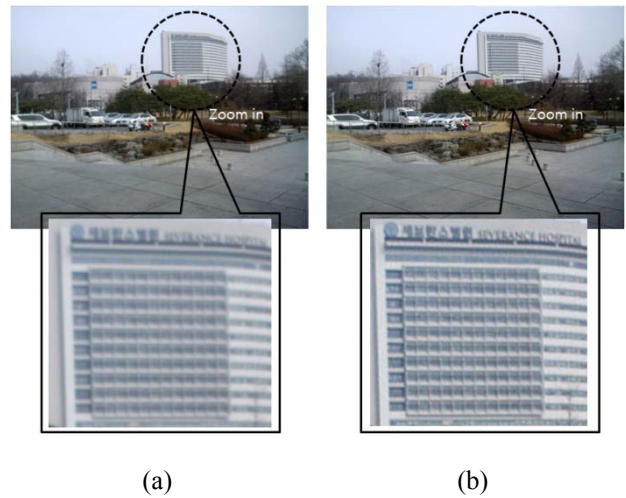


Fig. 8 Infinity image (a) Conventional optical system (b) Wavefront coded optical system

는 변조전달함수 값에서 회절 한계 축을 넘는 값을 얻음으로써 초 해상도 이미지를 증명하였다. 그림 6 에서는 실험 이미지와 모듈사이 거리를 30cm 로 하여 이미지 프로세싱을 걸친 결과물과 그 이미지에 대한 변조전달함수 값을 나타낸 것이다. 또한 원래 3 메가 픽셀에 대한 변조전달함수 값과 부분 확대한 이미지를 통해 파면 코딩렌즈로부터 얻은 이미지와 비교 분석해 보았다. 그림 7 에서는 위와 같은 방법으로 실험 이미지와 모듈사이 거리를 120cm 로만 바꿔서 실험을 한 결과이다. 그림 8 에서는 이미지와 모듈사이의 거리를 무한대로 실험하기 위해 실외에서 촬영하여 이미지를 축출 후 부분 확대이미지를 통해 원래 3 메가 픽셀 모듈에서 나오는 것과 파면 코딩된 이미지와 비교해 보았다.

5. 결론

파면 코딩에 대한 연구는 다양한 형태로 위상 마스크를 설계 및 제작하여 진행되어왔다. 본 연구는 휴대폰용 카메라 모듈을 위한 위상 마스크로서 휴대폰용 카메라 렌즈와 같은 재질이며 또한 비구면 렌즈로 설계, 제작 및 평가 하여 F 값이 작은 이미지 시스템에서도 초점심도가 늘어날 수 있음을 증명하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 노이즈 제거와 최적화된 복원 필터를 통해서 이미지를 향상 시켰다.

참고문헌

- [1] E. R. Dowski, Jr. and W. T. Cathey, 1995, "Extended depth of field through wave-front coding", Applied Optics, Vol. 34, Issue 11, pp. 1859-1866.
- [2] S. S. Sherif, E. R. Dowski, and W. Thomas Cathey . 2001, "A logarithmic phase filter to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems", Proc.SPIE, 4471 272.
- [3] S. S. Sherif, W. T. Cathey, and E. R. Dowski, 2004, "Phase Plate to Extend the Depth of Field of Incoherent Hybrid Imaging Systems", Applied Optics, Vol. 43, Issue 13, pp. 2709-2721.
- [4] Q. Yang, L. Liu, and J. Sun, 2007, "Optimized phase pupil masks for extended depth of field", optical communications, 272 56.
- [5] S. Mezouari, A. R Harvey, 2001, "Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems", Proc. SPIE, 4442 34.
- [6] A. Castro, J. Ojeda-Castañeda, 2004, " Asymmetric phase masks for extended depth of field", Applied Optics, Vol. 43, No. 17.
- [7] H. Cai, C. Fang, L. Fan, Z. Huang, Yinxin Zhang, 2004, "A new kind of phase mask and its properties using in wavefront coding systems", Proc. of SPIE Vol. 7156 71560I-1
- [8] S.-H Lee, N.-C Park, Y.-P Park, 2008, "Breaking diffraction limit of a small f-number compact camera using wavefront coding", Optics Express, Vol. 16, No. 18.