

프레넬 존 개구를 사용한 렌즈리스 라이트 필드 이미징

글 히타치제작소 일렉트로닉스 이노베이션센터 광응용시스템연구부 / 오시자와 타쿠부장, 나카무라 유우스케 주임연구원, 타지마 카즈유키 연구원
사노 마유 기획원, 시마노 타케시 주관연구원
번역 유정훈 부장 / (주)그린광학 해외마케팅부

1. 처음

스마트폰으로 대표되는 모바일기기와 디자인성이 요구되는 로봇과 자동차에 탑재되는 카메라에는 탑재장소의 제한을 받는 것이 없는 박형경량화와, 고성능화의 양립이 요구된다. 그것들의 요구에 대응한 카메라기술로서 라이트 필드 카메라¹⁾(LFC: Light Field Camera)와 렌즈리스 카메라²⁾(LLC: Lensless Camera)로 대표되는 취득화상에 대한 화상처리를 전제로 특수한 광학계를 사용해서 종래에 없는 기능을 실현하는 컴퓨터이셔널 포토그래피(computational photography)라는 기술로의 기대가 높아지고 있다. 이 기술은 이후 여러 것이 인터넷에 연결되는 IoT(Internet of Things)시대의 이미징 디바이스를 견인한다고 기대된다.

그러나 LFC는 광선의 위치와 방향을 동시에 기록해서 촬영후의 핀트 조절을 가능으로 하지만, 특수한 렌즈를 요구하기 때문에 카메라가 크고 두껍게 된다는 과제가 있다. 한편 LLC는 렌즈를 없애는 것에서 박형경량화를 실현하지만, 촬영에서의 화상처리에 많은 계산이 필요해서 프레임 레이트 등의 성능이 과제로 된다.

그래서 우리들은 화상처리에서의 계산량을 종래의 300분의 1까지 경감하고, 동영상촬영에 대응, 동시에 LFC와 같은 촬영후의 핀트 조정(리포커스)도 용이한 새로운 LLC를 제안했다.

2. 렌즈레스 카메라 촬영원리

그림1에 제안하는 LLC의 촬영원리를 나타냈다.

화상센서의 앞면에 수 mm의 간격을 두고, 가시광을 투과율 변조하는 동심원환상의 격자패턴인 프레넬 존 개구(앞면FZA)를 둔다. 앞면FZA는 가시광의 투과율을 제어할 수 있으면 좋기 때문에 얇은 투명한 필름과 흑백 인쇄로 작성할 수 있고, 그 변조법칙은 식1에서 정의된다(그림2(a)).

$$I(r) = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta r^2) \quad (1)$$

단, γ 은 FZA중심에서의 거리, β 는 FZA의 변조주기를 정의하는 계수이다.

여기에서 우선 이해를 쉽게 하기 위해 피사체가 충분히 원방에 있는 단일의 점광원인 경우에 대해서 생각한다. 점광원은 화상 센서상에 식2의 앞면FZA를 투영한다(그림2(b)).

$$I(x + \delta, y) = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta((x + \delta)^2 + y^2)) \quad (2)$$

단, δ 는 점광원의 입사각에 의존하는 그림자의 편차량이다.

이 그림자에 화상처리에서 앞면FZA와 같은 방식으로 식1에서 정의되는 가상적인 프레넬 존 개구(가상후면FZA)를 곱하면, 식3의 강도분포를 얻는다(그림2(c)).

$$I(r)I(x + \delta, y) = \frac{1}{8} \left[2 + 4 \cos \beta (r^2 + \delta x) \cos \delta \beta x + \cos 2\beta (r^2 + \delta x) + \cos 2\delta \beta x \right] \quad (3)$$

이 $\cos 2\delta \beta x$ 는 점광원 위치를 반영한 피치와 방향이 똑 바른 모 아래호이고, 이것을 식4가 나타내는 경량한 연산에서 얻어지는 2차원 고속 푸리에 변환(FFT)하면, 점상의 촬영화상을 얻을 수 있다(그림2(d)).

$$F[\cos 2\delta \beta x] = \delta \left(u + \frac{\delta \beta}{\pi} \right) + \delta \left(u - \frac{\delta \beta}{\pi} \right) \quad (4)$$

단, v 는 주파수이다.

이상의 논의는 단일의 점광원이지만, 일반적인 피사체의 경우에는 점광원의 집합이라고 생각하면 된다. 피사체의 k 개 점광원에서의 그림자와 가상후면FZA의 곱은 식5의 강도분포를 생기게 된다.

$$\sum_k I(x + \delta_k, y) I(x, y) \quad (5)$$

이와 같이 식3의 가산에서 표현할 수 있기 때문에 선형변환인 푸리에 변환에 의해 점상의 합성으로서 피사체의 촬영화상을 얻을 수 있다.

이어서 LFC로서의 기능에 대해서 설명하겠다. 이상의 설명에서는 충분히 원방에 있는 피사체에 대해서 생각했지만, 피사체 거

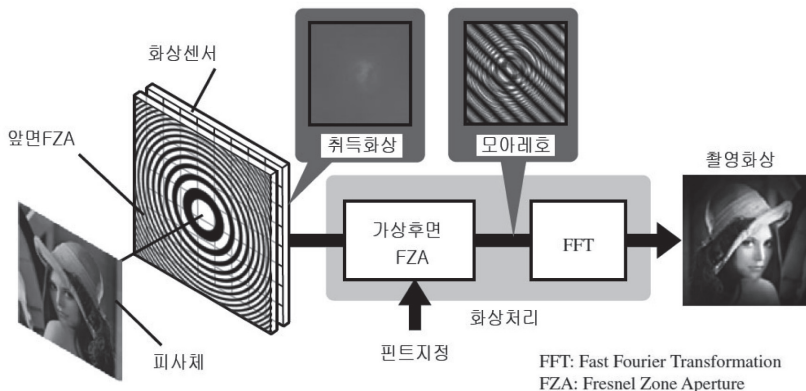


그림1 렌즈레스 카메라 촬영원리

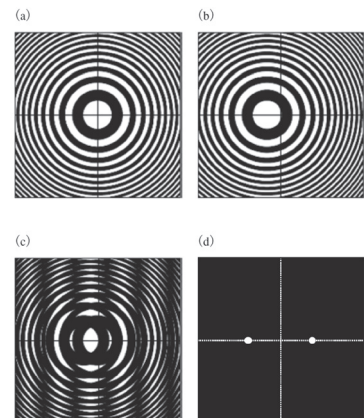


그림2 렌즈레스 카메라 화상처리원리

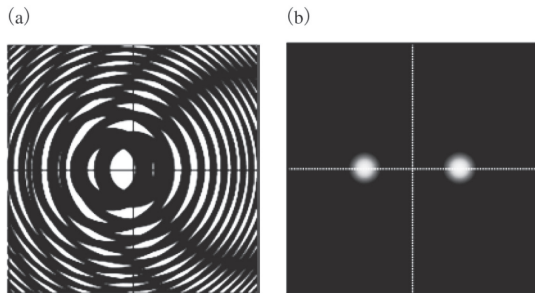


그림3 렌즈리스 카메라 화상처리원리(유한거리)



그림4 시작카메라에 의한 실시간 촬영표시데모

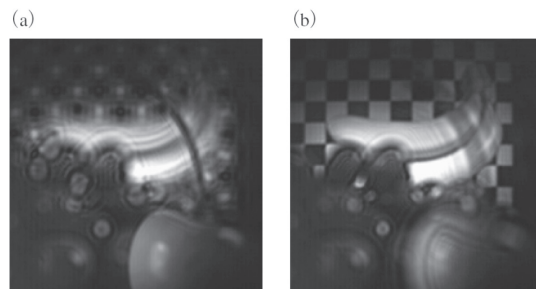


그림5 시작카메라에 의한 리포커스

리가 가깝게 되면 화상센서에 비치는 그림자는 크게 된다. 그 결과, 모아레호가 휘어 버리고(그림3(a)), 푸리에 변환후의 점상이 흐려져 핀트가 벗어나버린다(그림3(b)). 그래서 그림자 크기에 맞는 β 를 선택하고, 가상후면FZA를 확대하는 것 만에서 모아레호를 보정할 수 있어 다시 핀트를 맞출 수 있다.

3. 실험과 결과

그림4에 시작카메라와 그 취득화상에 대해서 화상처리를 실시간으로 행하고 있는 데모 모습을 나타냈다. $11 \times 11 \text{mm}^2$ 의 2048화소인 CMOS센서를 사용해서 2 mm 간격을 둔 앞면FZA의 그림자를 촬영하고, 노트북상에서 동영상으로 표준적으로 사용되는 30 fps의 프레임 레이트로 피사체의 촬영화상을 거의 실시간으로 표시할 수 있는 것을 확인했다.

또 LFC의 리포커스 기능을 실제 기기에서 확인하기 위해 다른 거리에 배치한 과일(체리: 30 mm, 포도: 70 mm, 바나나: 180 mm, 체커보드: 300 mm)을 한번만 촬영하고, 가상후면FZA의 배율을 바꿔 화상처리를 행했다. 결과를 그림5에 나타냈다. 그림 5(a)에서는 30 mm의 체리에, 그림5(b)에서는 300 mm의 체커보드에 핀트가 맞추고 있고, 제안하는 LLC에서 LFC와 같은 리포커스와 핀트를 바꾼 복수동영상의 동시재생을 실현할 수 있는 것을 확인했다.

4. 결론

앞으로 모바일기기와 자동차, 로봇을 비롯한 여러 분야에서의 실용화를 향해, 화질과 해상도의 개선을 도모하겠다. 또 그것과 동시에 LLC의 특징인 박형, 경량, 저렴한 비용, 높은 강인과 광각 촬영, 근접촬영대응, 또 LFC의 특징인 리포커스, 거리측정기능과 3차원촬영, 전(全) 초점촬영대응을 살려, IoT시대를 향한 새로운 어플리케이션을 검토하겠다.

참고문헌

- 1) R. Ng., M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan, Stanford Tech, Rep., CTSR 2005-02, (2005).
- 2) M. Salman Asif, et. al., "FlatCam: Thin, Bare-Sensor Cameras using Coded Aperture and Computation", arXiv: 1509.00116v2, (2016).