

## 편지

## 오픈 액세스

# 고대비 및 고해상도 이미징을 위해 생물학적으로 영감을 받은 초박형 배열 카메라

김기수 1,2, 장경원 1,2, 류재관3, 정기훈1,2

## 곤충에서 발

견된 겹눈은 소형 이미징 시스템에 대한 흥미로운 생물학적 영감의 원천을 제공합니다. 여기에서는 고대비 및 초해상도 이미징을 위해 곤충 눈 구조에서 영감을 얻은 초박형 배열 카메라를 보고합니다. 초박형 카메라는 마이크로 광학 요소(MOE), 즉 역마이크로렌즈, 다층 핀홀 어레이, 이미지 센서의 갭 스페이서를 특징으로 합니다. MOE는 반복적인 포토리소그래피와 열적 리플로우를 사용하여 제작되었습니다. 완전히 패키징된 카메라는 740 $\mu\text{m}$ 의 총 트랙 길이와 73°의 시야(FOV)를 보여줍니다. 실험 결과는 MOE의 다층 핀홀이 마이크로렌즈 간의 광학적 누화를 제거하여 고대비 이미징을 가능하게 함을 보여줍니다. 배열 이미지로부터 재구성된 통합 이미지는 초박형 카메라의 단일 채널 이미지에 비해 MTF(변조 전달 함수)를 ~1.57배 확실히 증가시킵니다. 이 초박형 배열 카메라는 다양한 모바일, 감시 또는 의료 애플리케이션에 대한 새롭고 실용적인 방향을 제시합니다.

## 소개

생물학적 비전 시스템의 독특한 구조는 초소형 카메라 응용 분야에 흥미로운 영감을 제공합니다<sup>1-3</sup>. 자연 곤충은 작은 면렌즈의 작은 시각 기관으로 충분한 시각 정보를 얻습니다<sup>4,5</sup> 또한 겹눈은 넓은 심도(DOF), 넓은 시야(FOV) 등 우수한 시각 기능을 가지고 있습니다. 높은 동작 감도 및 낮은 수차<sup>6,7</sup>. 특히 개별 구멍에 수백 개의 광수용체를 나타내는 성인 *Xenos peckii*의 눈 구조는 다른 겹눈보다 시력이 높기 때문에 초박형 카메라 또는 이미징 응용 분야에 공학적 영감을 제공합니다<sup>8-10</sup>. 예를 들어, *Xenos peckii*의 눈에서 영감을 받은 카메라는 절지동물의 눈, 즉 개안이 있는 겹눈보다 최대 50배 더 높은 공간 해상도를 제공합니다<sup>1,10,11</sup>. 또한 *Xenos peckii* 눈의 효과적인 이미지 해상도는 다음과 같습니다.

또한 인접한 구멍 사이의 이미지 중첩으로 인해 더욱 개선됩니다<sup>8,10</sup>.

기존 카메라 렌즈와 달리 곤충면 렌즈와 유사한 마이크로렌즈는 상대적으로 작은 초점 거리와 낮은 수차를 가지므로 전체 트랙 길이, 즉 이미지 센서에서 렌즈 상단까지의 거리를 크게 줄일 수 있습니다. , [카메라의 14-16](#). 또한 이러한 렌즈는 작은 초점 거리와 작은 조리개 직경으로 인해 큰 DOF를 제공할 수 있어 거의 무한대에 가까운 이미징이 가능합니다. 최근에는 열 리플로우, 잉크젯 인쇄 또는 3D 직접 레이저 쓰기과 같은 마이크로렌즈 어레이의 다양한 미세 가공 방법이 생물학적으로 영감을 받은 카메라와 적극적으로 통합되었습니다. 그러나 이러한 방법은 고대비 이미징을 위한 마이크로 렌즈 간의 광학적 혼선을 방지하기 위해 여전히 개발 중입니다.

자연적인 겹눈에는 패시 렌즈 사이의 주변 광학 잡음을 차단하거나 외부 조명 환경에 대해 들어오는 빛의 양을 조절하기 위한 색소 세포가 있는 경우가 많습니다. 특히 *Xenos peckii*의 눈에는 각 구멍을 둘러싸고 있는 색소 컵이 포함되어 있어 축외로 들어오는 빛을 차단합니다<sup>8</sup>. 색소 세포와 같은 광 흡수체는 밝기를 줄여 고대비 및 고해상도 카메라에 중요한 광학 요소 역할을 합니다.

대응: 정기훈 ([k.jeong@kaist.ac.kr](mailto:k.jeong@kaist.ac.kr))

<sup>1</sup> 한국과학기술원 바이오및뇌공학과

(34141) 대전광역시 유성구 대학로 291 과학기술원(KAIST)

대한민국

<sup>2</sup> KAIST 보건과학원, KAIST, Daejeon 34141, 대한민국 저자 정보의 전체 목록은 기사 끝부분에서 확인할 수 있습니다.

© 저자 2020



오픈 액세스 이 기사는 Creative Commons Attribution 4.0 국제 라이선스에 따라 라이선스가 부여됩니다. 이 라이선스는 원저자와 출처를 적절하게 명시하는 한 모든 매체나 형식으로서의 사용, 공유, 개작, 배포 및 복제를 허용합니다. Creative Commons 라이선스에 대한 링크를 제공하고 변경 사항이 있는지 표시하십시오. 이 기사에 포함된 이미지나 기타 제3자 자료는 자료에 대한 크레딧 라인에 달리 명시되지 않는 한 기사의 크리에이티브 커먼즈 라이선스에 포함되어 있습니다. 자료가 기사의 크리에이티브 커먼즈 라이선스에 포함되어 있지 않고 귀하의 의도된 사용이 법적 규정에 의해 허용되지 않거나 허용된 사용을 초과하는 경우 저작권 보유자로부터 직접 허가를 받아야 합니다. 이 라이선스의 사본을 보려면 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>을 방문하십시오.

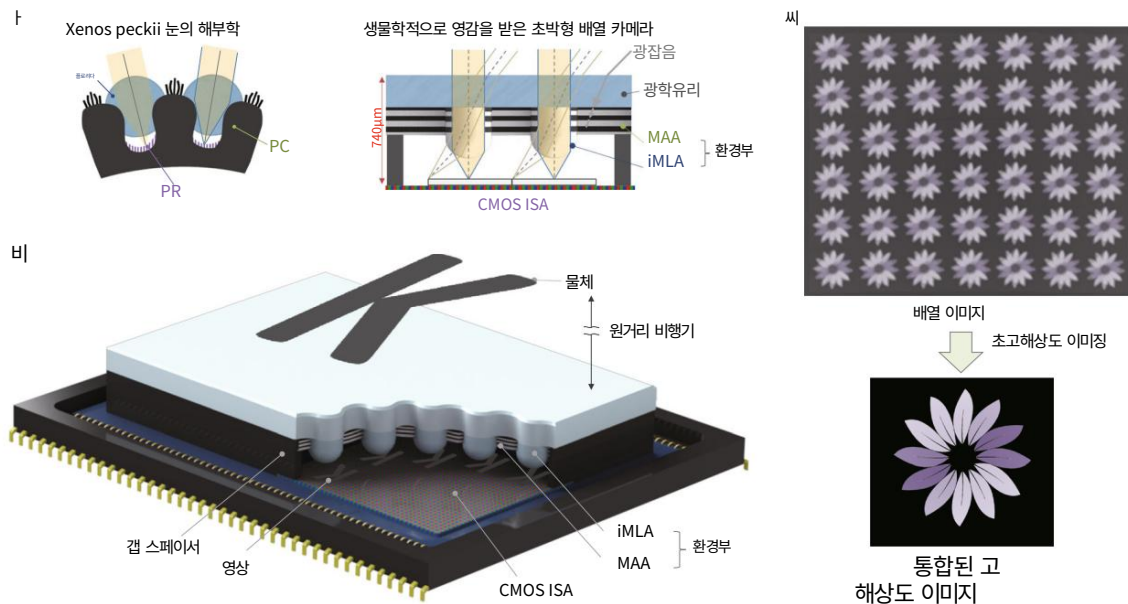


그림 1 생물학적으로 영감을 받은 초박형 배열 카메라와 이미지 재구성 방법의 개략도. 생물학적 영감: Xenos peckii의 눈과 초박형 카메라. 면렌즈(FL), 색소컵(PC), 광수용체(PR)로 구성된 자연 눈처럼 생물학적으로 영감을 받은 초박형 카메라는 iMLA(역마이크로렌즈 배열), MAA(다중 조리개 배열), 간격 스페이서 및 CMOS 이미지 센서를 갖추고 있습니다. 어레이(CMOS ISA). 안료 컵과 MAA는 모두 렌즈 사이의 광학적 혼선을 효율적으로 줄여 이미지 대비를 높입니다. b 초박형 배열 카메라의 이미지 개념. 원거리장 평면에 위치한 객체는 각 채널의 작은 시각적 차이로 인해 각 채널에서 유사하게 이미지화됩니다. c 배열 이미지로부터 고대비 및 고해상도 이미지를 획득하기 위한 초고해상도 이미징

마이크로렌즈 사이의 광학 누화. 그러나 유리 적층형 다이아프램 어레이 또는 가공된 배열 어레이와 같은 기존의 광 흡수 장치는 여전히 카메라의 총 트랙 길이(TTL)를 줄이는 데 몇 가지 기술적 한계가 있습니다. 최근에는 검은색 실리콘이나 실리콘 나노와이어의 복제 성형도 마이크로렌즈 간의 광학적 분리를 제공합니다. 그러나 마이크로렌즈를 통해 들어오는 빛의 양을 제어하는 데에는 몇 가지 구조적 제한이 있습니다. 또한 광학 요소의 복잡한 통합에는 여전히 광축 정렬 또는 이미지 해상도 향상에 대한 몇 가지 제한 사항이 있습니다.

여기에서는 Xenos peckii의 비전 시스템에서 영감을 받아 고대비 및 고해상도 이미징을 위한 초박형 배열 카메라를 보고합니다(그림 1a). 초박형 카메라는 평면 CMOS 이미지 센서의 MAA(다중 조리개 배열), iMLA(역마이크로렌즈 배열) 및 갭 스페이서로 구성됩니다. UV 패턴의 검정색 폴리머 원형 패턴을 적층한 MAA는 원통형 핀홀 어레이 역할을 하며, 이는 전체 가시 스펙트럼에 걸쳐 효율적인 광 흡수를 제공하여 마이크로 렌즈 간의 광학 혼선을 크게 줄입니다. iMLA는 전면 유리창에서 굴절된 빛이 추가 각도를 통해 개별 마이크로렌즈로 들어가기 때문에 상향 MLA보다 상대적으로 더 높은 FOV를 제공합니다. 초박형 카메라의 단일 채널 FOV는 카메라의 직경과 두께에 따라 결정됩니다.

MAA 및 마이크로렌즈의 초점 거리(보충 그림 S1). 예를 들어, 70° FOV에 대한 MAA의 설계된 두께와 조리개 직경은 각각 60μm와 35μm입니다. 인접한 채널 간의 이미지 중첩도 마이크로렌즈의 주기에 따라 정밀하게 제어될 수 있습니다. 다중 채널의 배열 이미지는 균일하지만 객체 대상이 원거리 평면에 있는 경우 약간 다릅니다(그림 1b). 다중 프레임 초해상도 알고리즘을 사용하여 배열 이미지로부터 단일 고해상도 이미지를 재구성할 수 있습니다(그림 1c).

## 결과 및 토론

초박형 배열 카메라에는 미세 광학 요소(MOE)의 미세 가공과 카메라 패키징이 포함됩니다(그림 2a). MOE의 경우 5μm 두께의 흑색 포토레지스트 수지(GMC 1040, Gersteltec, Switzerland)를 4인치 봉소규산염 유리 웨이퍼에 포토라소그래피 방식으로 정의했습니다. 흑색층 위에 25μm 두께의 투명 포토레지스트 수지(SU-8 2025, MicroChem Corp.)를 스피코팅하였다. 여러 레이어를 구성하기 위해 두 단계를 반복했습니다. SU-8 패턴링 후 흑색 수지와 SU-8의 접착력을 높이기 위해 산소 플라즈마를 이용한 친수화 처리를 실시하였다.

iMLA는 포토라소그래피 패턴링(AZ9260, MicroChem)을 사용하여 여러 층에 추가로 형성되었습니다.

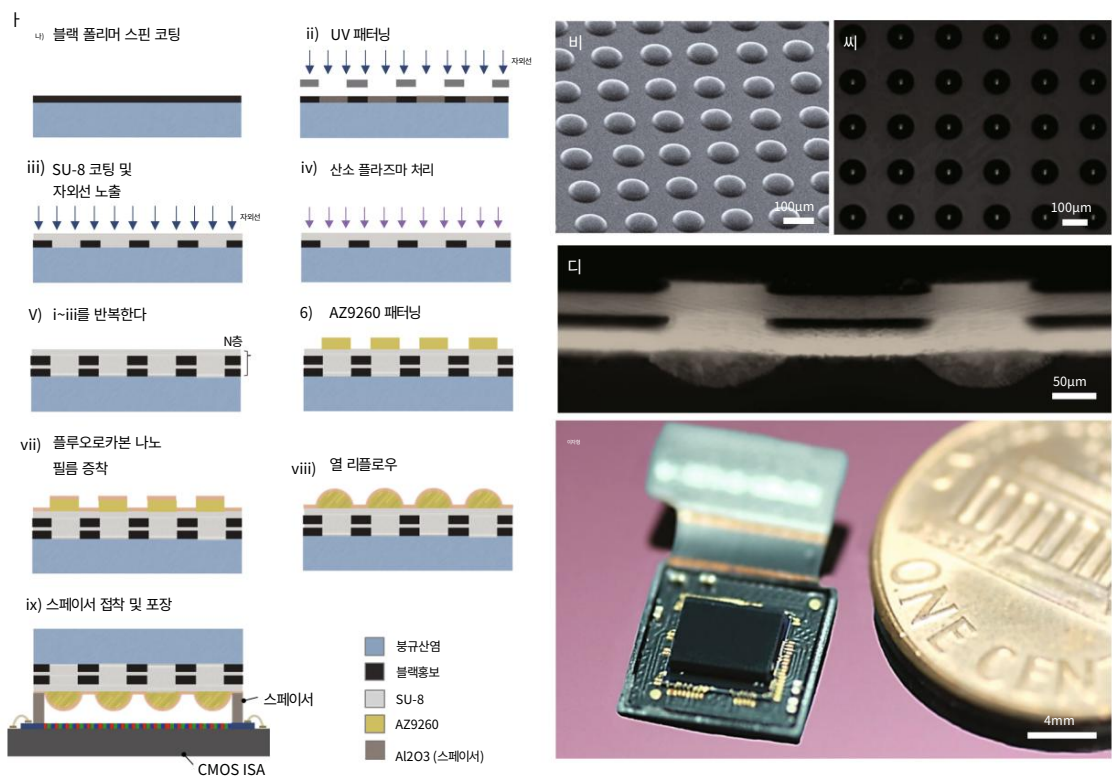


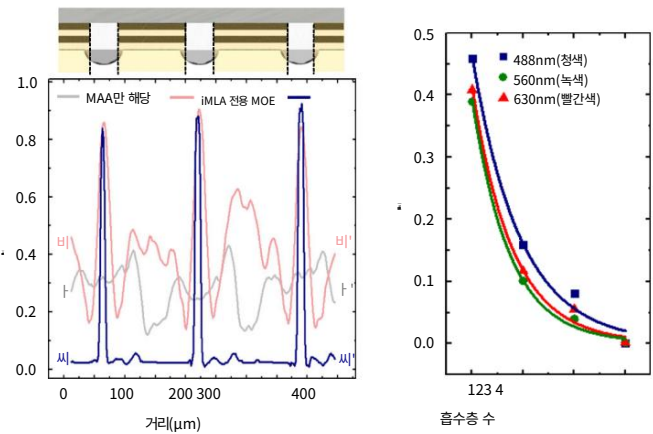
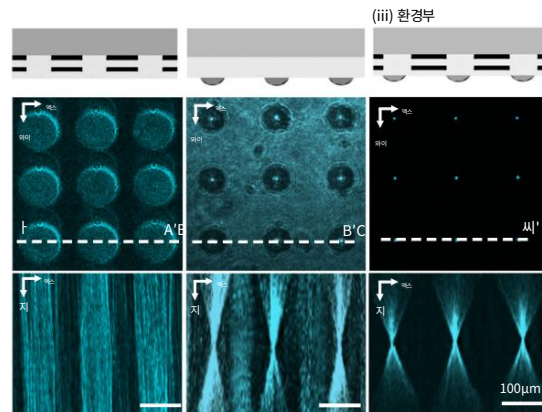
그림 2 MOE, 즉 MAA 및 iMLA와 초박형 카메라의 미세 가공 단계 및 캡처된 이미지. 반복적인 포토리소그래피와 열 리플로우를 사용하여 형성된 MOE의 미세 가공 방법. MOE는 플립칩 본더를 사용하여 갭 스페이서가 있는 CMOS 이미지 센서에 추가로 통합되었습니다. b 마이크로 렌즈 어레이의 주사 전자 현미경 및 c 광학 현미경 이미지. 캡처된 광학 이미지의 흰색 점은 iMLA를 통해 초점이 맞춰진 빔을 표시합니다. d MOE의 단면 광학 이미지. e 완전히 포장된 초박형 배열 카메라를 촬영한 사진

Corp.), C4F8 기반의 소수성 코팅 및 열 리플로우를 제공합니다. MOE는 광학 블랙 영역을 포함하여 전체 이미지 센서 칩을 덮기 위해 5.1mm x 5mm로 절단되었습니다. 150µm 두께의 4개의 알루미늄 스페이서를 CMOS 이미지 센서 어레이(CMOS ISA, Sony IMX 219, 8M 픽셀, 단위 픽셀: 1.12µm × 1.12µm, 프레임 속도: 30fps) 위에 정확하고 영구적으로 배치하여 에폭시 접착제. 그런 다음 MOE는 플립칩 마운터를 사용하여 스페이서와 함께 CMOS ISA에 패키징되었습니다. 완벽하게 포장된 카메라는 마침내 Raspberry Pi 보드와 조립되었습니다. 주사 전자 현미경(SEM)과 광학 현미경 이미지는 미세 가공된 iMLA를 보여줍니다(그림 2b, c). MOE에서 캡처한 단면 이미지는 MAA가 반복적인 포토리소그래피를 사용하여 성공적으로 제작되었음을 명확하게 보여줍니다(그림 2d). 그림 2e는 또한 마이크로 렌즈의 f 값이 1.7이고 FOV가 73°이며 창 유리를 포함한 TTL이 740 µm 인 MOE가 포함 된 완전히 패키징 된 초박형 배열 카메라를 보여줍니다 (보조 그림 S2).

MOE가 포함된 초박형 배열 카메라를 사용하여 고대비 이미지를 성공적으로 달성했습니다 (그림 3).

공초점 레이저 스캐닝 현미경(CLSM)은 시준된 532 레이저 빔을 통해 MOE를 통해 광학적으로 단면화된 이미지를 제공합니다(그림 3a). iMLA와는 달리 실험 결과는 마이크로렌즈 간의 광학적 혼선 없이 MOE를 통해 레이저 빔의 초점이 맞춰지는 것을 명확하게 보여줍니다. MOE의 강도 프로파일은 또한 광학적 혼선이나 잡음 없이 날카로운 피크 신호를 보여줍니다 (그림 3b). 또한 정규화된 투과율을 측정하여 MAA의 흡수층 수에 따른 가시광선 영역의 광 흡수도를 평가합니다. 각 층은 5µm 두께의 검정색 수지와 25µm 두께의 투명 수지로 구성됩니다(그림 3c). 측정된 투과율은 단일 흡수층에 대해 ~0.4이며, 이는 층 수가 증가함에 따라 기하급수적으로 감소합니다. 4개의 층에 의해 가시광선이 모두 완전히 차단되고, 2개의 층에 의해 빛의 90%도 감소됩니다. 또한 체커보드 타겟의 캡처된 이미지는 MOE가 iMLA보다 더 높은 대비를 제공한다는 것을 명확하게 나타냅니다(그림 3d). 단일 이미지의 계산된 Michelson 대비는 3.21만큼 증가합니다. 즉, MOE의 경우 0.77, iMLA의 경우에만 0.24입니다. 측정된 변조

a bc (i) MAA만 (ii) iMLA만



d

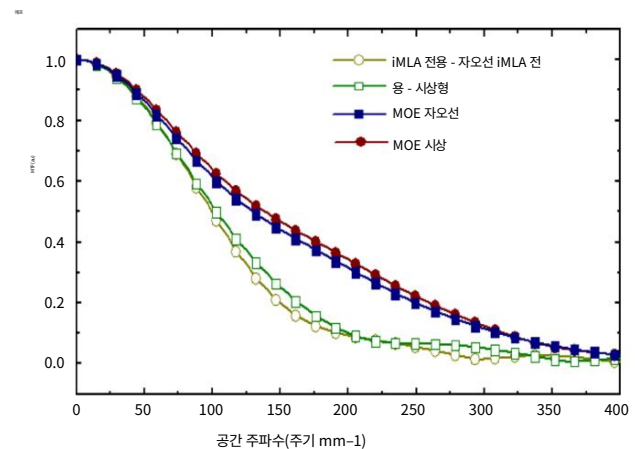
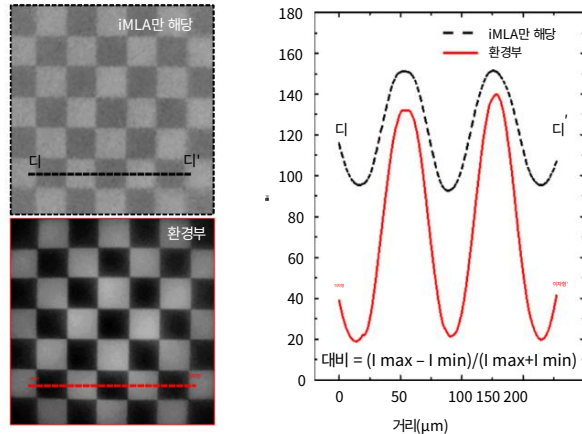


그림 3 MOE를 통한 고대비 이미징. (i) MAA만, (ii) iMLA만, (iii) 공초점 레이저 스캐닝 현미경으로 측정된 MOE를 통과하는 532nm 레이저 빔의 단면 이미지. b 분할된 광학 이미지의 AA', BB', CC' 선을 따른 해당 정규화된 강도 프로파일은 빔 포커싱 및 광 차단을 명확하게 보여줍니다. c 세 가지 다른 파장에서 검정색 고분자 층의 수에 따라 표준화된 투과율. 5μm 두께의 검정색과 25μm 두께의 투명 고분자 수지의 각 흡수층을 반복적으로 적층하였다. d iMLA만(위) 또는 MOE(아래)를 통해 캡처한 카메라 이미지입니다. e 해당 강도 프로파일은 각각 DD' 및 EE' 선을 따릅니다. MAA가 있는 초박형 배열 카메라의 이미지 대비는 MAA가 없는 카메라의 이미지 대비에 비해 상당한 향상을 나타냅니다. f 캡처된 이미지의 자오선 및 사상 방향을 따라 계산된 MTF 곡선. MOE를 적용한 초박형 카메라의 MTF50은 iMLA만 적용하지 않은 카메라의 MTF50보다 1.37 배 높습니다.

전달 함수(MTF) 곡선은 또한 사상면과 자오면 모두를 따라 이미지 선명도를 비교합니다(그림 3f). iMLA의 MTF50, 즉 절반 최대 공간 주파수는 사상면을 따라 102주기 mm<sup>-1</sup>에 불과한 반면, MOE의 공간 주파수는 140주기 mm<sup>-1</sup>입니다. 결과적으로 MTF50은 30 이상으로 확실히 증가합니다. 두 비행기 모두에 대한 %입니다. MAA의 핀홀 직경은 또한 iMLA로 들어오는 빛의 양을 효과적으로 제어합니다(보조 그림 S3). 조도에 따라 렌즈와 핀홀의 직경 비율을 조절하여 글레어 현상이 없는 고대비 영상을 획득하였습니다.

카메라에서 10cm 떨어진 LED 패널에 표시됩니다(그림 4a). 실험 결과는 또한 재구성된 이미지의 MTF가 병합된 채널 이미지의 수에 따라 대수적으로 증가한다는 것을 보여줍니다(그림 4b, c). 즉, 초박형 카메라의 단일 채널 이미지에 대한 MTF50은 초기에 129 사이클 mm<sup>-1</sup>입니다. 그러나 15채널 영상에서 병합된 재구성 영상의 MTF50은 1.57배, 즉 202사이클 mm<sup>-1</sup> 만큼 증가하여 에지 선명도가 뚜렷하게 증가함을 알 수 있습니다.

초고해상도 이미징 중에는 계산 효율성과 병합된 영상 품질의 로그 증가 관계로 인해 병합된 채널 이미지의 수에 따라 영상 품질의 증가가 감소합니다. 재구성된 이미지는 또한 대상 객체의 유사한 색상 재현을 나타냅니다(그림 4e, f).

다중 프레임 초해상도 알고리즘을 사용하여 최종적으로 고해상도 이미지를 재구성했습니다(그림 4).

초박형 카메라는 단일 주사위의 배열 이미지를 제공합니다.



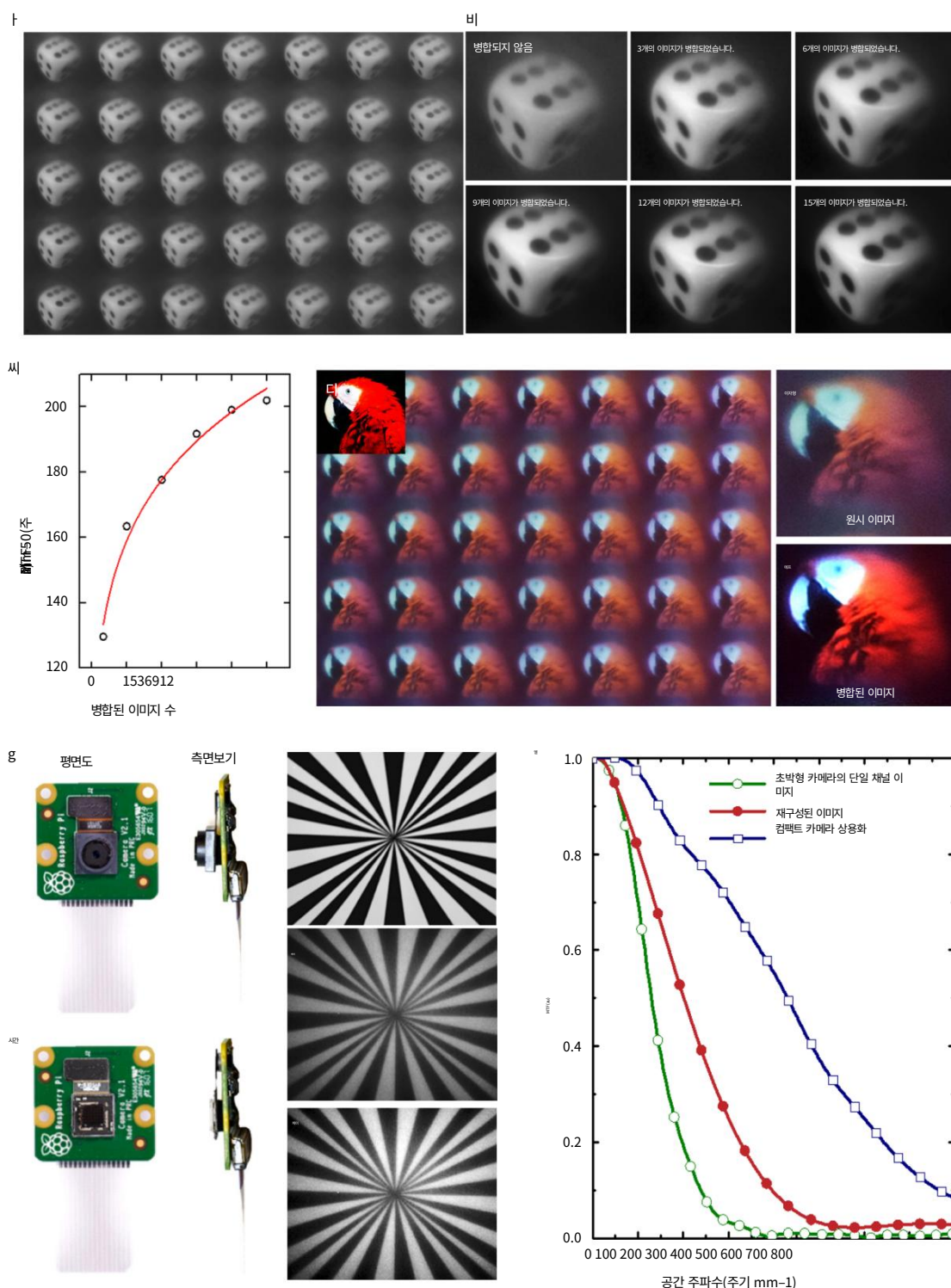


그림 4 배열 이미지를 통한 초고해상도 이미징. 초박형 배열 카메라로 촬영한 "주사위" 배열 이미지. 각 채널에서 동일한 수치를 관찰하기 위해 "주사위" 테스트 이미지를 원거리 평면의 LED 패널에 표시했습니다. b 초고해상도 이미징에 의한 아레이 이미지 수에 따른 이미지 재구성. c 병합된 이미지 수에 대한 MTF50 그래프. 계산된 결과는 배열 이미지의 조합이 이미지 해상도를 향상시키는 것을 보여줍니다. d 대상 물체와 획득된 이미지 간의 색상 차이를 측정하기 위해 캡처된 빨간 앵무새의 배열 이미지입니다. e 이미지 재구성 전 초박형 카메라의 단일 채널로 캡처한 이미지. f 초고해상도 이미징으로 재구성된 이미지.

ga가 상용화된 콤팩트 카메라(라즈베리파이 카메라 V2)와 초박형 아레이 카메라의 사진. 상용화된 카메라와 초박형 배열 카메라의 단일 채널로 얻은 방사형 별 이미지. k 여러 채널에서 재구성된 이미지. l 상용화된 콤팩트 카메라 영상과 초박형 배열 카메라의 단일 채널 영상. 재구성된 영상으로 측정된 MTF 곡선의 비교

대상 이미지와 캡처된 이미지 간의 색상 차이는 유클리드 거리를 사용하여 계산되었으며, 이는 단일 채널 이미지의 경우 0.31, 재구성된 이미지의 경우 0.08의 정규화된 색상 차이를 나타냅니다. 초박형 배열 카메라에서 재구성된 이미지는 유사한 f-번호 렌즈를 사용하여 상용화된 콤팩트 카메라(Raspberry pi 카메라 V2, 8 MP)의 이미지와 추가로 비교되었습니다(그림 4g-1, 보충 표 S1). 재구성된 영상의 MTF50은 상용화된 카메라의 47%, 즉 430 사이클 mm<sup>-1</sup>이다. 상용화된 카메라의 상대조도는 영상 중심에서 모서리까지 97%이고 재구성된 영상의 상대조도는 83%이다. % (보조 그림 S4). 상용화된 렌즈와 일치하는 CRA(Chief Ray Angle) 보정 CMOS ISA를 사용하면 재구성된 이미지의 해상도가 감소하거나 초박형 배열 카메라의 색상 차이가 향상됩니다. 이 문제는 초해상도 이미징 중 MTF 감소에 영향을 미치며 iMLA용으로 재설계된 CRA CMOS ISA를 사용하여 문제를 해결할 수 있습니다. 예를 들어, 일정한 시간 간격으로 초박형 카메라의 동일한 단일 채널에서 획득된 15개의 재구성된 프레임 이미지에 대한 MTF50은 CRA 문제 없이 2.01배, 즉 252사이클 mm<sup>-1</sup> 만큼 증가합니다(보조 그림 S5). 재구성된 영상과 상용화된 카메라의 정규화된 유클리드 거리의 차이는 0.03으로, 그 결과 거의 자각적으로 균일한 공간을 의미한다. 핀홀 직경은 표적 검출을 위한 최소 조명 강도에 영향을 미칩니다(보조 그림 S6). 상용화된 카메라의 물체 인식을 위한 최소 조도는 0.05lux이고, 초박형 배열 카메라는 핀홀 직경이 작아 0.1lux이다. 하지만 초박형 카메라는 상용 카메라에 비해 TTL은 5.41배, FOV는 1.5배나 크게 향상됐다.

이미지 해상도, FOV, TTL 및 비용 효율성을 포함한 탁월한 성능 지수. 이 새로운 초박형 카메라 모듈은 다양한 모바일, 감시 또는 의료 애플리케이션에 새로운 기회를 제공합니다.

재료 및 방법  
실험 설정 및 성능 평가

완전히 포장된 초박형 어레이 카메라는 레일과 통합된 광학 마운트에 고정되었으며, LED 디스플레이 패널이 포함된 이동식 마운트는 레일에 설치되었습니다. FOV는 그리드 타겟까지의 거리 H와 타겟 이미지의 너비 W로 측정되었습니다 (보조 그림 S2). FOV = 2할갈색(W/H). 이미지 센서 설정은 ISO 400, 셔터 속도 1/60초, 프레임 속도 30fps로 고정되었습니다. 카메라로 촬영한 이미지 데이터를 싱글보드 프로세서(Raspberry pi 3 Model B+, raspberry pi)로 전송하고, 내장된 소프트웨어에 의해 이미지가 자동으로 구성되었습니다. 캡처된 이미지의 MTF를 평가하기 위해 경사 가장자리 방법이 사용되었습니다. 이 방법은 표준 ISO 12233에 설명되어 있으며 Quick MTF 소프트웨어를 사용하여 정량적 값을 얻었습니다.

본 연구에서는, 재구성된 영상과 상용화된 카메라의 정규화된 유클리드 거리의 차이를 평가하기 위해 경사 가장자리 방법을 사용했습니다. 이 방법은 표준 ISO 12233에 설명되어 있으며 Quick MTF 소프트웨어를 사용하여 정량적 값을 얻었습니다.

본 연구에서는, 재구성된 영상과 상용화된 카메라의 정규화된 유클리드 거리의 차이를 평가하기 위해 경사 가장자리 방법을 사용했습니다. 이 방법은 표준 ISO 12233에 설명되어 있으며 Quick MTF 소프트웨어를 사용하여 정량적 값을 얻었습니다.

또한 초고해상도 알고리즘의 이미지 재구성은 색상 유사성, 대비 및 가장자리 선명도를 크게 향상시킵니다.

요약하자면, 우리는 고대비 및 고해상도 이미징을 위해 생물학적으로 영감을 받은 초박형 배열 카메라를 성공적으로 시연했습니다. MOE는 iMLA와 MAA로 구성되며, 이는 흑색 및 투명 고분자 수지의 반복적인 포토리소그래픽 패턴링을 사용하여 웨이퍼 수준에서 제작되었습니다. 이 독특한 구성을 통해 마이크로렌즈 간의 광학 누화를 효과적으로 제거할 수 있으며 카메라 두께를 TTL 740μm까지 크게 줄일 수 있습니다. 초박형 배열 카메라는 다중 프레임 초해상도 이미징 방법을 기반으로 채널 이미지를 병합하여 고대비 및 고해상도 이미징을 성공적으로 시연했습니다. 상업용 콤팩트 또는 모바일 카메라와 비교하여 초박형 배열 카메라는

$$\underline{X}b^{\frac{1}{4}N} = \sum_{k=1}^N \frac{F_k X}{k^{\frac{1}{4}1}} \quad \text{여기서 } p = 2 \text{이고, } F_k \text{ 는 고해상도 이미지 } X \text{와 } k\text{번째 저해상도 배열 이미지 } Y_k \text{ 사이의 기하학적 움직임의 연산자이고, } \lambda \text{는 정규화 인자입니다.}$$

여기서 p = 2이고, Fk 는 고해상도 이미지 X와 k번째 저해상도 배열 이미지 Yk 사이의 기하학적 움직임의 연산자이고, λ는 정규화 인자입니다. 이미지의 전체 변화는 양측 TVL1 γ δ p X의 정규화 도구를 사용하여 계산되었습니다.

$$\gamma \delta p^{\frac{1}{4}4} X X = \sum_{l=0}^{l/40} \sum_{m=0}^{m/40} X \alpha m^l X S l \times S m \quad \text{여기서 } \alpha \text{는 척도 매개변수이고 } S \text{는 } x \text{ 또는 } y \text{ 방향의 이동 연산자입니다.}$$

감사의 글 이 연구는 한국 연구재단(NRF)(No. 2019023700), 대한민국 보건복지부(No. HI16C1111)의 보조금으로 재정적 지원을 받았습니다.

작성자 세부정보  
1 (34141) 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원(KAIST) 바이오 및 뇌공학과.

2 KAIST 보건과학기술원, KAIST,

대한민국 대전 34141. <sup>8</sup> 무인/로봇시스템 연구실, LIG넥스원  
주식회사 성남 13488

저자 기여  
KK, KWJ, KHJ가 아이디어를 구상했고, KK, JKR, KHJ가 원고를 썼습니다. KK와 KWJ가 실험을 수행했  
습니다. KK와 KHJ가 데이터를 분석했습니다. KHJ가 연구를 감독했다.

이해 상충 저자는 이해 상충  
이 없음을 선언합니다.

이 문서에 대한 추가 정보는 <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0261-8> 에서 확인할 수 있습니다 .

접수일: 2019년 9월 27일 수정일: 2020년 2월 10일 승인일: 13  
2020년 2월  
Published online: 27 February 2020

참고자료

1. Floreano, D. 외. 마니아처 곡선 인공 겹눈. 진행 Natl Acad.  
과학. 미국 110, 9267-9272, (2013).  
2. 정(Chung), T. 외. 고급 이미징 및 조명을 위해 곤충 초미세 구조의 스마트함을 채굴합니다. 고급 기능  
교배. 28, 1705912, (2018).  
3. Raut, HK 외. 화생충 매개 나노임프린팅에 의한 광대역 및 전방향 반사 방지 및 김서림 방지 특성을 갖  
춘 다중 규모 ommatidial 아레이. ACS 나노 9, 1305-1314, (2015).  
4. Völkel, R., Eisner, M. & Weible, KJ 소형 이미징 시스템. 미세전자.  
영어 67-68, 461-472, (2003).  
5. Duparré, JW & Wippermann, FC 미세 광학 인공 겹눈.  
바이오인스파이어. 비오임. 1, R1-R16, (2006).  
6. Stavenga, DG & Hardie, 비전의 RC 측면(스프링거, 베를린, 하이델베르크,  
1989).  
7. 영장, EJ & Nilsson, DE 무척추동물 비전. (캠브리지 대학 출판부,  
케임브리지, 2006).  
8. Buschbeck, E., Ehmer, B. & Hoy, R. 청크 대 점 샘플링: 작은 곤충의 시각적 이미징. 과학 286,  
1178-1180(1999).  
9. Maksimovic, S., Layne, JE & Buschbeck, EK 꼬인 날개 곤충(Strepsiptera)의 구멍 내 해상도  
에 대한 행동 증거. J. 특급. Biol. 210, 2819-2828, (2007).  
10. Keum, D. et al. Xenos peckii 비전은 초박형 디지털 카메라에 영감을 줍니다. 가벼운 과학.  
신청 7, 80, (2018).

11. 송, YM 외. 절지동물의 눈에서 영감을 받은 디자인의 디지털 카메라입니다.  
자연 497, 95-99, (2013).  
12. Nussbaum, P. 외. 센서 및 마이크로시스템용 마이크로렌즈 아레이의 설계, 제조 및 테스트. 순수 응용  
프로그램. 고르다. J. Eur. 고르다. Soc. A 6, 617-636, (1997).  
13. Jeong, KH, Kim, J. & Lee, LP 생물학적으로 영감을 받은 인공 겹눈.  
과학 312, 557-561, (2006).  
14. Brückner, A. et al. 인공 신경 중첩 눈. 고르다. 익스프레스 15, 11922-11933, (2007).  
15. Gissibl, T. 외. 초소형 다중 렌즈 대물렌즈의 2광자 직접 레이저 기록. Nat. 포토닉스 10, 554-560,  
(2016).  
16. Thiele, S. et al. 3D 프린팅된 독수리 눈: 포비티드용 복합 마이크로렌즈 시스템  
이미징. 과학. 고급 3, e1602655, (2017).  
17. Ng, R. et al. 휴대용 Plenoptic 카메라를 사용한 라이트 필드 사진.  
스탠포드 대학 컴퓨터 과학 기술 보고서 02(2005).  
18. Mu, QC et al. 액체 방울 배열 전사 인쇄를 통한 유기 재료의 다중 미세 패턴화. 신청 물리. 레드 사람.  
114, 183702, (2019).  
19. Wang, M. et al. 초고초점수를 갖는 마이크로렌즈 제조를 위한 새로운 열 리플로우 방법. RSC 고급 5,  
35311-35316, (2015).  
20. Autrum, H. 무척추동물의 비교 생리학과 시각의 진화(Springer, Berlin, Heidelberg, 1979).  
21. Keum, D., Jung, H. & Jeong, KH 자연 겹눈의 평면 에뮬레이션.  
작은 8, 2169-2173, (2012).  
22. Stavenga, D. 곤충의 눈 색깔. J. Comp. 물리. 188, 337-348,  
(2002).  
23. Stollberg, K. 외. Gabor 슈퍼렌즈는 야행성 곤충의 중첩 겹눈에서 영감을 받은 대체 웨이퍼 레벨 카메  
라 접근 방식입니다. 고르다.  
익스프레스 17, 15747-15759, (2009).  
24. Brückner, A. et al. 곤충 화합물에서 영감을 얻은 얇은 웨이퍼 레벨 카메라 렌즈  
눈. 고르다. 익스프레스 18, 24379-24394, (2010).  
25. Gassner, C. et al. 존재 감지를 위한 소형 광각 배열 카메라.  
진행 SPIE 10545, MOEMS 및 소형 시스템 XVII(SPIE, 샌프란시스코, 2018).  
26. Moghimi, MJ 외. 넓은 시야 및 초점 스캐닝을 위한 유연한 기판의 마이크로 프레넬 존 플레이트 배열입  
니다. 과학. 5, 15861(2015).  
27. Zhang, H. et al. 저비용 고정밀 3층 3차원 인공복안 개발. 고르다. 익스프레스 21, 22232-22245,  
(2013).  
28. Sajjadi, MSM, Vemulapalli, R. & Brown, M. 프레임 반복 비디오 초해상도. 진행 컴퓨터 비전 및 패  
턴 인식에 관한 2018 IEEE/CVF 컨퍼런스. 피. 6626-6634(IEEE, 슐트레이크시티, 2018).  
29. Mandanici, E. et al. 다중 이미지 초해상도 알고리즘이 적용되었습니다.  
열화상. 신청 기하학. 11, 215-228, (2019).  
30. Farsiu, S. et al. 빠르고 강력한 멀티프레임 초해상도. IEEE 트랜스. 이미지 프로세스. 13, 1327-1344,  
(2004).