

◆ 특집 ◆ 신경모방 소자 및 감각 도우미 시스템

시각 생체 모방 기술

A Bio-mimetic Technology for the Light Sense

엄두승^{1,2}, 김상협^{1,✉}, 정명애¹, 김창일²
Doo-Seung Um^{1,2}, Sang-Hyeob Kim^{1,✉}, Myung-Ae Chung¹ and Chang-Il Kim²

1 한국전자통신연구원 융합기술연구부문 (Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI))

2 중앙대학교 전자전기공학부 (School of Electrical and Electronics Engineering, ChungAng Univ.)

✉ Corresponding author: shk1028@etri.re.kr, Tel: 042-860-1134

Key Words: Image Sensor (이미지 센서), Light Guide (광 통로), Bio-mimetic (생체 모방), Light Sense (시각), Photodetector (수광 소자), Charge Coupled Device(CCD, 전하 결합 소자), CMOS Image Sensor (CIS, 상보성 금속 산화물 반도체 시각 센서)

1. 서론

지구상에 생명체가 출현한 이후, 생명은 온갖 위험 속에서 스스로를 변화시키고, 새로운 생존 기술을 터득하며 끊임없이 진화해왔다. 오랜 시간의 진화로 생명체들 각각은 고도화된 시스템을 갖추게 되었다. 거미가 만들어내는 거미줄은 강철보다 5 배나 강하면서 탄성력도 높고, 전복의 외피는 사람이 밟아도 깨지지 않을 정도로 강하고 유연하다.^{1,2} 또한 아프리카 나미브 사막의 한 곤충은 아침 안개에서 물을 모으는 능력을 가지고 있다.^{1,2} 이와 같이 생명체들은 극한 환경 속에서도 생존하기 위해서 스스로를 발전시켜 왔다. 이렇듯 생명은 오랜 기간 진화하고 발전된 고도 과학의 집결체라고 할 수 있다.

인류는 오랜 시간 생명에서 보고 배우고, 그것들을 모방해 왔다. 인류가 도구를 사용하게 된 것도 동물과 식물을 모방하면서부터 시작되었다. 원시시대의 돌칼과 화살촉 그리고 사기그릇 등은 자연을 모방하여 만들었고, 15 세기 레오나르도 다빈치는 새의 날개를 모방하여 비행기를 설계하였으며, 조선시대의 거북선은 거북이의 형상을 모방하여 만들었다.³ 자연을 모방하며 시작했던 기술들은 발전을 거듭하여 결국 사람을 날 수 있게 하였고,

바다 속에도 들어갈 수 있게 만들었다.

최근 나노 기술의 급속한 발전으로 자연모사 기술을 인간에게 접목시키려는 나노-바이오기술이 새롭게 각광받기 시작했다.² 의료용 봉합사로 활용하기 위하여 인공 거미줄인 바이오스틸(Biosteel)이라는 소재를 만들려고 시도하고 있고, 토란잎의 초소수성과 자기세정 효과를 관찰 모방하여 페인트를 만들려고 노력하고 있다.¹ 뿐만 아니라 인간이 가지고 있는 감각기관도 모방의 대상이 되고 있다. 피부의 촉감을 모방한 촉각센서를 개발하고 있으며, 미각, 후각, 시각 등의 감각센서도 모방의 대상이 되고 있다.^{1,2}

인간은 생활에 필요한 정보의 8 할 이상을 시각에 의존한다.² 인간의 중요한 감각기관인 눈을 모방하여 카메라를 만들었다. 이 카메라는 인간이 갈 수 없는 곳을 볼 수 있게 만들었고, 이미지를 저장하기도 한다. 그러나 아직 인간의 시각과 비교하여 부족한 점이 많다. 카메라의 시야 각은 인간의 시야 각에 비교하여 형편없이 부족할 뿐 아니라 어두운 곳에서의 반응도 확연히 떨어진다.^{5,6} 인간과 유사한 로봇이나 인간의 시각을 대체하기 위한 인공 시각의 기술로 발전하기 위해서 이러한 문제점들을 해결해야만 한다.

나노 기술의 발달과 함께 생체 모방기술의 수

준은 점점 높아지고 있다. 오래 전 꿈꾸어 오던 인간이 날 수 있는 세상이 실현된 것처럼 그 언젠가는 시각 장애인에게 새로운 빛을 선사해줄 날이 올 것이다. 그리고 그러한 세상을 만들기 위해서는 계속적으로 시각과 관련된 기술들을 개발하고 연구하여야 한다.

2. 시각 센서 기술

2.1 Image Sensor

그림 1 은 디지털 카메라의 시스템을 보여준다. 인간의 안구 중 수정체에 해당하는 렌즈는 빛의 굴절을 담당하고 초점이 이미지 센서 부분에 선명히 맺힐 수 있도록 한다. 이미지 센서는 인간의 망막 부분으로 마이크로 렌즈와 컬러 필터 그리고 수광 센서들로 구성된다. 이미지 센서에 맺힌 상은 센서의 각 픽셀(Pixel) 단위로 화상을 감지하고 ADC(analog to digital converter)를 거쳐서 저장한 다음, 각 픽셀들을 합하여 원래의 이미지로 만들어 내는 메커니즘을 가지고 있다.

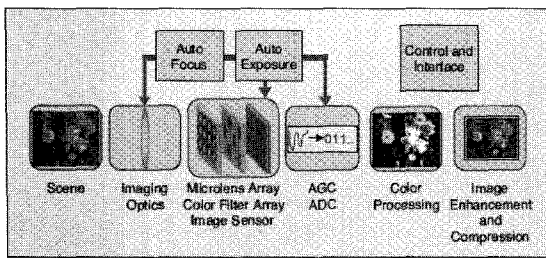


Fig. 1 The imaging system pipeline⁷

Table 1 Summary of the main advantages of CCD and CMOS image sensors⁸

CCD	CMOS
Low noise	Low power consumption
Smaller pixel size	Single power supply
Lower dark current	High Integration capability
100% Fill factor	Lower cost
Higher sensitivity	Single master clock
Electronic shutter	Random access

이미지 센서에는 구조에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 빛을 받은 각 화소에서 축적한 신호전자를 전달하는 방식인 CCD(Charged Coupled

Device) 방식과 신호전자를 전압으로 변환하는 방식인 CIS(CMOS Image Sensor) 방식이 그것이다. 이 센서들은 구조와 방식에 차이가 있을 뿐 아니라 성능과 가격, 직접도 면에서도 차이가 있다.⁸⁻¹⁰

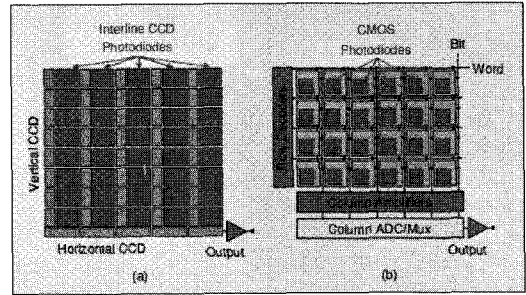


Fig. 2 (a) CCD Image Sensor (b) CMOS Image Sensor⁷

2.1.1 Charged Coupled Device (CCD)

CCD 는 1970 년 벨 연구소의 보일(Willard Boyle)과 스미스(George E. Smith)에 의해서 발명되었다. 그 후 interline 방식, overflow drain 구조를 거치면서 화질이 월등히 향상되었다. CCD 형의 가장 큰 특징은 빛에 의해 발생한 전자들이 출력부까지 이동되어, 출력부에서 전압으로 변환되기 때문에 각 픽셀에서 발생한 전자의 수가 빛에 관한 정보가 되는 것이다. 각각의 CCD 형 이미지 센서는 그림 3 과 같은 구조를 가지고, 여러 개의 CCD 센서들이 그림 2(a)와 같은 형식으로 배열되어 이미지를 구현한다. 그림 3 의 가장 윗부분의 마이크로 렌즈는 입사된 빛을 PD(n-type photodiode)로 모아 준다.¹¹ 빛이 모이는 과정에서 마이크로 렌즈와 PD 사이의 컬러 필터는 색을 분리하여 특정 파장대(일반적으로 빛의 삼원색인 빨강, 초록, 파랑)의 빛만 통과 시킨다. 즉, 컬러 이미지를 구현하기 위해 삽입된 층이다.¹² 집광된 빛 에너지는 PD 에서 광전 변화에 의해 신호전자로 바뀐다.^{12,13} PD 에서 발생된 신호전자는 Transfer gate 의 신호에 따라

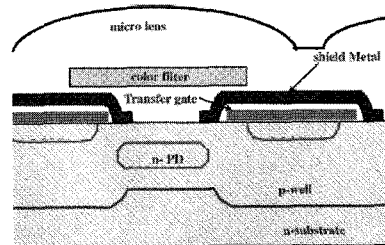


Fig. 3 Cross-section of a CCD image sensor¹¹

vertical CCD channel(그림 2(a))로 이동된다. Vertical CCD channel 에 모인 신호전자들은 순차적으로 horizontal CCD channel 로 이동하여 출력부(Output) 로 이동되고, 출력부에서 신호전자를 전압으로 변환하여 출력한다.

출력된 각각의 신호를 모아 이미지를 합성하면 원하는 화면을 구성할 수 있다. 이와 같이 CCD 형 이미지 센서는 출력부까지 신호전자를 이동시키는 방식이기 때문에 전압의 형태로 발생한 잡음이 출력신호에 거의 영향을 미치지 않고, 하나의 출력단을 가지기 때문에 소자의 불균형에 의한 고정패턴잡음(Fixed Pattern Noise)도 발생하지 않는다.^{14,15} 따라서 화질이 좋다는 장점을 가지고 있다. 반면, 여러 가지 구동전압이 필요하여 전력소모가 높고, CMOS 공정이 아닌 CCD 전용 공정을 사용하므로 주변회로를 한 칩에 내장하기 어렵다는 단점을 가진다.¹⁶

2.1.2 CMOS Image Sensor (CIS)

1967 년 RCA 의 P. K. Weimer 와 Fairchild 의 Weckler, Allen Clark Research Center 의 Petter J. W. Noble 등에 의해서 개발되었지만 여러 가지 잡음에 의해 화질이 불안정했고, 안정된 화질의 CCD 형 이미지 센서의 등장으로 오랜 시간 각광 받지 못하였다.¹⁷⁻¹⁹ 그러나 능동화소 기술(Active Pixel Sensor)과 CDS(Correlated Double Sampling) 방식을 응용하여 잡음을 줄이면서 휴대기기에 응용되기 시작했다.^{5,10,12,19} CMOS 이미지 센서(Image Sensor)는 CMOS 공정을 기반으로 PD 와 MOS transistor(목적에 따라 5 개까지도 사용)를 사용하기 때문에 하나의 칩에 필요한 주변 기능들을 접목시킬 수 있고, 단일의 낮은 구동전압을 사용하여 소비전력도 절감시킬 수 있다.

CMOS 이미지 센서의 각 픽셀은 그림 4 와 같이 하나의 PD 와 transistor 들로 구성되고, 이 센서

들이 그림 2(b)와 같이 배열된다. 빛을 집광하여 PD 에 입사 시키는 과정은 CCD 와 유사나, PD 에 집광된 빛은 픽셀 내에서 전압으로 변환되고 switch 동작에 의해서 신호 처리부로 보내진다.²⁵

각각의 픽셀에서 보내진 신호를 조합하여 원래의 이미지를 구현하는 것이다. 그림 2(b)에와 같이 CMOS 이미지 센서는 RAM(Random Access Memory)의 구조와 비슷하게 수직, 수평방향으로 각각의 선택선이 있다. 즉, CMOS 이미지 센서도 random access 가 가능하다. 따라서 각각의 픽셀들 중 원하는 신호만 출력할 수 있다는 장점을 가진다.^{7,9} 또한 CMOS 이미지 센서는 고속촬영의 장점도 가진다. 앞서 언급했듯이 CMOS 이미지 센서는 주변기능과 함께 칩으로 제작할 수 있고, 저전력으로 구동할 수 있을 뿐만 아니라 소형화와 경제성, 고속화의 장점들을 지니고 있다.^{5,12-14,16,20,21} CMOS 공정의 발전은 기존에 가지고 있던 한계점들을 극복하게 하였다.

2.2 수광 소자 (Photodiode)

이미지 센서에서 PD 는 안구의 망막부분의 시세포이라고 할 수 있다. 렌즈를 통해 들어온 빛이 PD 로 입사되고, PD 에서 이 빛을 감지해낸다. 빛은 광자(phonon)와 파장(wavelength)의 성질을 띠고 있는데, 광자의 양에 의해서 빛의 밝기를 판단하고 파장에 의해서 빛의 색을 구별한다. PD 에 입사된 광자가 전하로 변환되는 효율을 양자효율(quantum efficiency)라고 하고, 한 화소에서 PD 가 차지하는 비율을 개구율(fill factor)이라고 한다.¹² 즉, 같은 양자효율을 나타내는 PD 에서 한 픽셀의 개구율이 높을수록 PD 의 면적이 넓기 때문에 많은 양의 빛을 흡수할 수 있다. 그러나 CMOS 이미지 센서의 경우, 픽셀 내에 PD 와 transistor 가 같이 있기 때문에 CCD 형 이미지 센서보다 개구율이 작다. 따라서 CMOS 이미지 센서는 픽셀 내의 transistor 의 크기를 줄이는 공정이 중요한 요소가 된다.

수광 소자는 pn 접합 diode, pinned PD(pinned photodiode), BJT 형 수광 소자, MOS 형 수광 소자 등 여러 방식의 수광 소자들이 있다. 이중 pinned PD 는 pn 접합이 p 형 속에 매몰되어 있는 구조로, 높은 전압과 미세한 조정이 필요하지만, pn 접합이 표면에 드러나 있지 않아 표면에서 발생하는 잡음이 거의 없다.^{7,21,22} 이 때문에 CMOS 이미지 센서는 주로 pinned PD 를 사용하여 왔다.

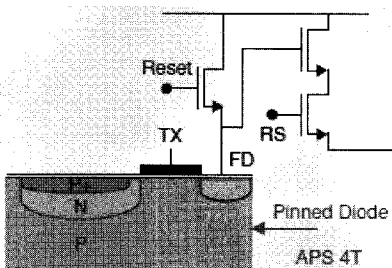


Fig. 4 A schematic of 4T active pixel sensor⁷

2.3 광통로

이미지 센서의 픽셀의 크기가 줄어들고, 적층형 금속배선과 미세공정으로 전환 되면서 혼색 현상(Cross-talk)의 문제점이 대두되기 시작했다.²³ 혼색 현상이란 그림 5의 beam-1에서와 같이 금속배선 사이로 빛이 반사되어, 원하지 않는 빛이 PD에 입사되거나, beam-2와 같이 PD의 격리영역(isolation region)에 입사되어 격리영역으로부터 전자의 확산 현상에 의한 간섭을 받는 것이다.⁶ 이 현상은 색상이 섞이는 문제점과 픽셀의 감도가 떨어지는 문제점들을 유발한다. 비스듬히 입사되는 빛에 의해 생기는 혼색 현상을 줄이기 위해 곤충의 결눈을 모방하여(Fig. 6), 광통로를 금속층간 절연층(IMD)에 적용하려는 연구가 진행되었다.^{24,25}

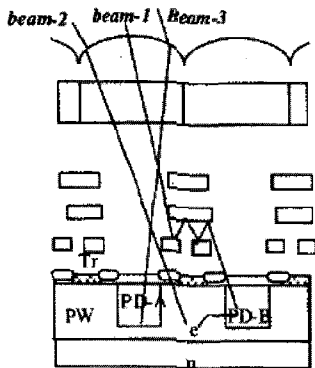


Fig. 5 Optical cross-talk induced by direct beam-1 and electron diffusion from beam-2⁶

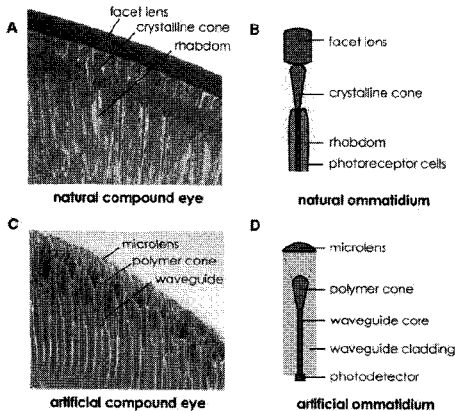


Fig. 6 Anatomical comparisons between a natural compound eye and artificial compound eye described from the cross sections²⁴

광통로는 각 물질의 굴절률(RI, refraction index) 차이에 의한 반사특성을 이용한다.⁷ 스넬의 법칙에 의해 임계각 이하의 빛은 전반사를 하기 때문에 이론적으로 혼색 현상을 줄일 수 있고, 픽셀의 감도도 높일 수 있다. 이미지 센서에 광통로를 적용하기 위하여 여러 가지 방식의 광통로 연구가 보고되고 있다.^{23,26-28}

그림 7은 FSG-Oxide 금속간 절연층에 PE-Oxide 광통로를 형성한 것이다. FSG-Oxide의 굴절률은 1.435이고, PE-Oxide의 굴절률은 1.46이다. 같은 Oxide 계열이지만, 굴절률에서 차이가 있음을 응용한 것이다.

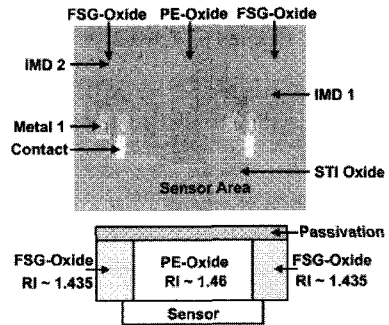


Fig. 7 (Top) Cross-sectional scanning electron microscope (SEM) photograph, and (bottom) the scheme diagram of the light guide²⁶

두 산화막의 굴절률 차이는 그림 8과 같이 임계각 이하의 빛은 원하는 픽셀로 빛을 전반사 시키고, 임계각보다 큰 각의 빛은 굴절시켜 원하지 않는 픽셀로의 진입을 줄인다. 그림 9와 그림 10은

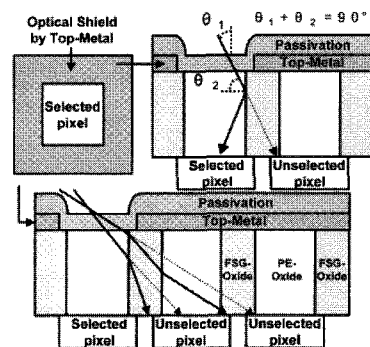


Fig. 8 The illustration of refraction (Top) for incident light under small incident angle and (bottom) for large incident angle²⁶

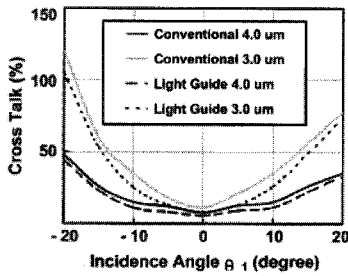


Fig. 9 Crosstalk versus the angle of collimated incident light for 3.0 and 4.0 μm pixel size with conventional and light guide structures²⁶

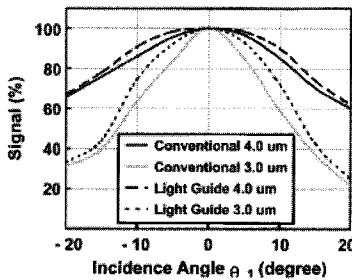


Fig. 10 Signal degradation versus the angle of collimated incident light for 3.0 and 4.0 μm pixel size with conventional and light guide structures²⁶

PE-Oxide 광통로를 형성하기 전과 후의 혼색 현상과 광량을 비교한 것이다. 입사각이 커지면서 그 차이는 줄어들지만, 입사각이 10° 이하에서 혼색 현상이 줄고, 광량의 개선이 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 공기를 이용한 광통로를 보여준다. 그림 8의 FSG-Oxide와 PE-Oxide를 적용한 광통로는 임계각(θ_2)이 79.38°인데 비하여 Air Gap을 적용한 광통로의 임계각은 38.68-45.58°이다. 즉, 금속층간 절연층 사이에 공기에 의한 틈을 형성하여 임계각을 크게 높이고, 임계각 이하에서는 두 번 굴절시켜 혼색 현상을 크게 줄였다.

그림 12는 기존의 방식과 Air Gap 광통로를 적용한 방식의 빛 각도에 따른 신호의 비율을 보여준다. Air Gap 광통로를 적용한 경우 기존의 방식과 비교하였을 때, 20°와 40°로 입사한 빛에 의한 혼색 현상이 현저히 줄어들었음을 보여준다.²⁸ 더욱이 Air Gap 광통로를 적용한 것은 PE-Oxide 광통로를 적용한 것보다 픽셀에서 받아들이는 신호의 비율이 더욱 개선되었다.

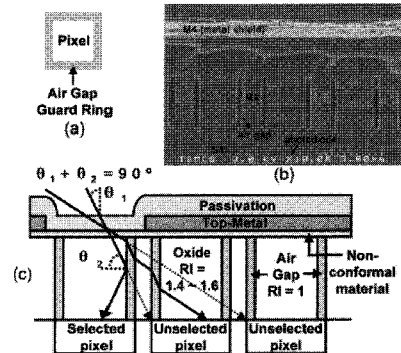


Fig. 11 (a) Layout of the air gap guard ring; (b) cross-sectional SEM photographs of pixel; and (c) the illustration of refraction for incident light under small and large incidence angle²⁷

그림 13은 마이크로 렌즈 삽입형 Air Gap 방식을 보여준다. 그림 13(d)에서와 같이 빛은 마이크로 렌즈 부분부터 굴절이 발생하기 때문에 혼색 현상은 더욱 줄어들고, 흡광 비율은 높아진다.²⁸ 그림 14는 기존의 방식과 Air Gap 방식 그리고 마이크로 렌즈 삽입형 Air Gap의 혼색 현상 비율을 보여준다. 마이크로 렌즈 삽입형 Air Gap의 혼색 현상은 월등히 낮아 졌음을 알 수 있다. 그러나 공기를 이용한 Air Gap 공정은 복잡하고 어려울 뿐

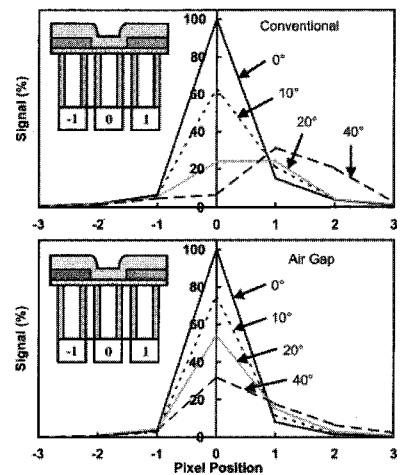


Fig. 12 Normalized signal around selected pixel with different light incidence angles for conventional and air gap structure. Pixel position "0" is the selected pixel and others are the unselected pixel nearby the selected one²⁷

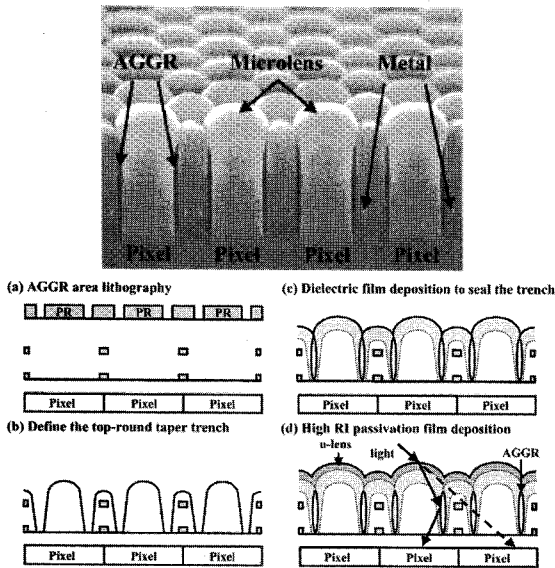


Fig. 13 (Top) Tilted cross-sectional SEM photograph of the pixel with AGML. (Down) Schematic process sequence of the AGML²⁸

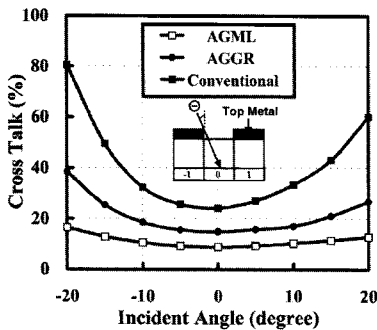


Fig. 14 Cross-talk versus the incident angle of collimated light for conventional, AGGR, and AGML structures with 2.8 μm square pixels²⁸

아니라 공기 층에 의한 부식, 광통로의 약한 경도 등 소자의 신뢰성에도 문제점을 안고 있다.

이미지 센서의 구동 방식, 수광 소자의 재료 및 물리적 구조 등은 이미지 센서의 신뢰성을 좌우한다. 이미 인간의 눈을 모방하여 이미지 센서를 개발했지만, 인간의 눈과 비교하여 많은 문제점들을 가지고 있다.

3. 구형 시각 카메라

카메라는 인간의 눈을 모방하였지만, 현재까지

이미지 센서는 평면으로 만들어져 왔다. 평면 이미지 센서는 구형 이미지 센서와 비교하여 시야각이 좁고, 낮은 수차(aberration)를 보인다.²⁹ 따라서 넓은 시야 각과 높은 수차를 구형하기 위해서는 인간의 눈과 유사한 구형 이미지 센서가 요구된다.

그림 15 는 인간의 눈의 구조와 흡사한 구형 이미지 센서 시스템을 보여준다. 각각의 픽셀을 구부러지는 전선으로 연결하고, 픽셀 배열들을 탄성력 있는 투명 막에 이식하여 만들어진다.

그림 16 은 구형 이미지 센서와 평면 이미지 센서에 의한 이미지를 비교한 것이다. 그림 16(a-b)는 빛의 입사각에 따른 초점의 위치를 나타낸 것이다. 그림 16(b)의 가장 왼쪽 선은 실제 이미지의 초점들을 나타낸 것이고, 중간 선은 구형 센서의 픽셀 위치들, 그리고 가장 오른쪽의 평면한 선은 평면 이미지 센서의 픽셀 위치들을 나타

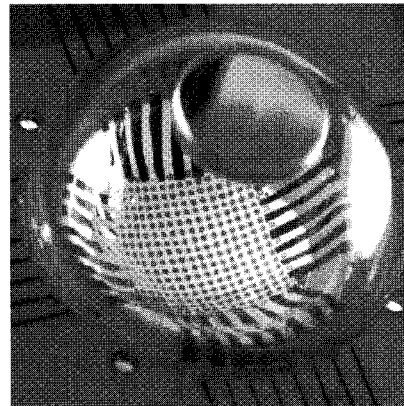


Fig. 15 Photographs of a hemispherical electronic eye camera²⁹

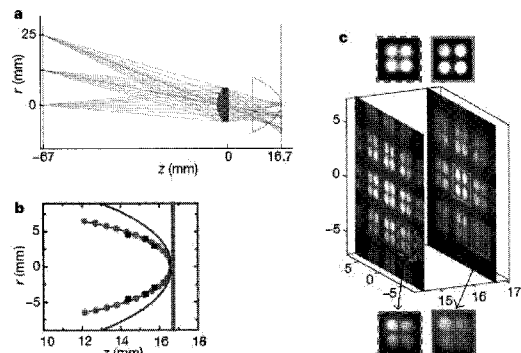


Fig. 16 Enhanced imaging in hemispherical cameras in comparison with planar cameras²⁹

낸다. 그림 16(c)는 평면 이미지와 구형 이미지의 화질의 차이를 보여준다. 그림 16(c)의 오른쪽 평면은 평면 이미지 센서에 의한 화질들을 나타내고, 그림 16(c)의 오른쪽 평면의 중간 이미지와 왼쪽 평면의 외각 이미지는 구형 이미지 센서의 화질로 설명할 수 있다.

그림 16(c)에서 확인 할 수 있듯이 이미지 센서의 중간부분에서의 화질의 차이는 없으나, 이미지 센서의 외각부분의 화질은 그림 16(c)의 아래 두 이미지로 비교할 수 있다. 아래 두 이미지 중 왼쪽은 구형 이미지 센서에 의한 것이고, 오른쪽은 평면 이미지 센서에 의한 것으로 화질의 차이를 확인할 수 있다. 이처럼 구형 이미지 센서는 평면 이미지 센서와 비교하여 시야의 외각 부분에서 평면 이미지 센서보다 더 좋은 화질을 나타냄을 알 수 있다.

인간의 눈을 모방하여 인간이 감지하는 이미지에 최적화 하려는 노력이 다양하게 연구되고 있다. 이런 이미지 센서는 우주항공 및 군장비, 의료 장비 등 다양한 산업에 적용될 수 있어 다양한 방식으로 다양한 적용 범위에서 활용될 것이다.

4. 결론

인간의 생활에서 가장 많이 정보를 받아들이는 기관 중 하나는 눈이다. 1970 년대 이후 시각 센서는 다양한 방식으로 발전을 해왔다. 90 년대 후반 공정기술의 도약으로 저전력, 고화소의 CMOS 이미지 센서의 장이 열렸다. 그리고 시각 센서는 21 세기 초소형, 광시야를 가지는 이미지 센서로 발전하고 있다.

인간의 눈을 모방하면서 시작했던 이미지 센서 기술은 어느덧 인간 눈의 구조와 유사한 단계에 이르렀으며, 이제는 인간의 시각과 유사한 이미지를 구현하려고 한다.

본 연구팀은 시각 장애인들을 위한 시각 도우미(eye-helper)를 연구/개발하고자 한다. 본문에서 언급했던 광시야, 저전력 시각 센서(CMOS 이미지 센서 기반)를 기반으로 청각과 촉각 센서를 활용한 복합 시각 기술을 연구/개발 중에 있다.

가까운 미래에 헬렌 켈러의 소망이 실현되기를 기대하며, 본 연구진은 최선을 다해 연구에 몰두할 것이다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부 신기술융합형 성장동력사업 중 “시각 생체 모방 소자 및 인지 시스템 기술 개발”의 지원으로 진행 중이다

참고문헌

1. Kim, W. D., “The nature inspired technology and the fusion technology,” *Biophysical Society Newsletter*, Vol. 13, No. 1, pp. 9-16, 2008.
2. Bhushan, B., “Biomimetics: lessons from nature-an overview,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 367, No. 1893, pp. 1445-1486, 2009.
3. Chang, Y. S. and Kim, K. H., “Bio-kinesiology inspired technology in fluids,” *Journal of KSME*, Vol. 46, No. 4, pp. 38-44, 2006.
4. Oh, Y. H., You, B. J. and Oh, S. R., “Development of Bio-mimetic Intelligent Agent System,” *Journal of Korea Information Science Society*, Vol. 21, No. 11, pp. 20-27, 2003.
5. Han, G. H., “CMOS Image Sensor technology and trends,” *Journal of the Institute of Electronics of Korea*, Vol. 36, No. 2, pp. 200-207, 2009.
6. Abe, H., “Device technologies for high quality and smaller pixel in CCD and CMOS image sensors,” *International Electron Devices Meeting*, pp. 989-992, 2004.
7. Gamal, A. E. and Eltoukly, H., “CMOS image sensors,” *IEEE Circuits and Devices Magazine*, Vol. 21, No. 3, pp. 6-20, 2005.
8. Bigas, M., Cabruja, E., Forest, J. and Salvi, J., “Review of CMOS image sensors,” *Microelectronics Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 433-451, 2006.
9. Magnan, P., “Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 504, No. 1, pp. 199-212, 2003.
10. Fossum, E. R., “Active pixel sensors: Are CCD’s dinosaurs?,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 1900, pp. 2-14, 2005.
11. Park, S., Uh, H. S. and Park, S., “CCD image sensor with compensated reset operation,” *Solid State Electronics*, Vol. 50, No. 11-12, pp. 1828-1834, 2006.
12. Fossum, E. R., “Digital camera system on a chip,” *IEEE Micro*, Vol. 18, No. 3, pp. 8-15, 1998.
13. Yotter, R. A. and Wilson, D. M., “A review of

- photodetectors for sensing light-emitting reporters in biological systems," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 288-303, 2003.
14. Cheong, C. K., Yang, S. H. and Cho K. R., "CMOS-type image sensor and applications," *Journal of the Korea Society of Broadcast Engineers*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-71, 2000.
 15. Blanksby, A. J. and Loinaz, M. J., "Performance analysis of a color CMOS photogate image sensor," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 47, No. 1, pp. 55-64, 2000.
 16. Trepanier, J. L., Sawan, M., Audet, Y. and Coulombe, J., "A wide dynamic range CMOS digital pixel sensor," *Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 437-440, 2002.
 17. Weimer, P. K., Pike, W. S., Sadasiv, G. and Shallcross, F. V., "Multielement self-scanned mosaic sensors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 16, No. 2, p. 240, 1969.
 18. Gamal, A. E., Yang, D. and Fowler, B., "Pixel level processing - Why, What, and How?," *Proceeding of SPIE*, Vol. 3650, No. 2, pp. 2-13, 1999.
 19. Fossum, E. R., "CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 44, No. 10, pp. 1689-1698, 1997.
 20. Gamal, A. E., "Trends in CMOS image sensor technology and design," *International Electron Devices Meeting*, pp. 805-808, 2002.
 21. Mabuchi, K., Nakamura, N., Funatsu, E., Abe, T., Umeda, T., Hoshino, T., Suzuki, R. and Sumi, H., "CMOS image sensors comprised of floating diffusion driving pixels with buried photodiode," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 39, No. 12, pp. 2408-2416, 2004.
 22. Inoue, I., Tanaka, N., Yamashita, H., Yamaguchi, T., Ishiwata, H. and Ihara, H., "Low-leakage-current and low-operating-voltage buried photodiode for a CMOS imager," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50, No. 1, pp.43-47, 2003.
 23. Kang, M. H., Ko, E. M., Lee, J. and Cho, G. S., "Enhancement of Light Guiding Efficiency in CMOS Image Sensor by Introducing an Optical Thin Film," *Hankook Kwanghak Hoeji*, Vol. 20, No.1, pp. 57-60, 2009.
 24. Jeong, K. H., Kim, J. and Lee, L. P., "Biologically inspired artificial compound eyes," *Science*, Vol. 312, No. 5773, pp. 557-561, 2006.
 25. Lee, L. P. and Szema, R., "Inspirations from biological optics for advanced photonic systems," *Science*, Vol. 310, No. 5751, pp. 1148-1150, 2005.
 26. Hsu, T. H., Fang, Y. K., Lin, C. Y., Chen, S. F., Lin, C. S., Yaung, D. N., Wu, S. G., Chien, H. C., Tseng, C. H., Lin, J. S. and Wang, C. S., "Light guide for pixel crosstalk improvement in deep submicron CMOS image sensor," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 22-24, 2004.
 27. Hsu, T. H., Fang, Y. K., Yaung, D. N., Wu, S. G., Chien, H. C., Wang, C. S., Lin, J. S., Tseng, C. H., Chen, S. F., Lin, C. S. and Lin, C. Y., "Dramatic reduction of optical crosstalk in deep-submicrometer CMOS imager with air gap guard ring," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 25, No. 6, pp. 375-377, 2004.
 28. Hsu, T. H., Fang, Y. K., Yaung, D. N., Wu, S. G., Chien, H. C., Tseng, C. H., Yao, L. L., Wang, W. D., Wang, C. S. and Chen, S. F., "A high-efficiency CMOS image sensor with air gap in situ microlens (AGML) fabricated by 0.18- μm CMOS Technology," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 26, No. 9, pp. 634-636, 2005.
 29. Ko, H. C., Stoykovich, M. P., Song, J., Malyarchuk, V., Choi, W. M., Yu, C. J., Geddes, J. B. III, Xiao, J., Wang, S., Huang, Y. and Rogers, J. A., "A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics," *Nature*, Vol. 454, No. 7205, pp. 748-753, 2008.