

히스토그램 평활화를 적용한 RGB LED활용 광학 카메라 통신 성능 개선

류원재*, 신수용^o

On Performance Improvement of Optical Camera Communication Using RGB LEDs by Applying Histogram Equalization

Won Jae Ryu*, Soo Young Shin^o

요 약

본 논문은 RGB 색상과 광학 카메라의 Rolling Shutter 효과를 사용한 가시광 통신의 일종인 광학 카메라 통신에 대하여 서술한다. 일반적인 가시광 통신은 포토다이오드를 활용하여 수신단을 구현하지만, 이러한 경우 추가적인 장치를 개발하여 부착하여야 하는 단점이 있다. 본 논문에서 서술하는 가시광 통신은 스마트폰에 내장되어 있는 광학 카메라를 활용한 통신 방법이다. 이는 대부분의 사람들이 소유하고 있는 스마트폰을 활용하기에 추가적인 수신측 하드웨어 제작이 불필요하다는 장점이 있다. 스마트폰에 내장된 CMOS 카메라의 Rolling Shutter 효과는 이미지 생성 중에 시차를 발생시키는데, 이 시차를 통해 데이터의 수신이 가능하다. 또한 단색이 아닌 RGB 색상을 통해서 MIMO(Multiple Input Multiple Output)를 구현하여 송수신 용량을 확장하려 한다. 그리고 히스토그램 평활화를 적용하여 통신 성능을 향상할 수 있는 방법을 제안하였으며, 실험을 통해 성능을 검증하였다.

Key Words : Visible Light Communication, Optical Camera Communication, Histogram Equalization, Light Emitting Diodes, CMOS

ABSTRACT

In this paper, we propose Optical Camera Communication (OCC), which is one of the VLC techniques, with RGB LEDs and Rolling Shutter effect. As conventional VLC uses photo diode to implement a receiver, additional devices are required. The VLC technique we propose, in this paper, uses optical camera embedded in smart phone. As smart phones are used by most people, additional devices are not required to implement a receiver. Rolling Shutter effect from Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) cameras embedded in smart phones makes time interval between pixels during making an image, and in the mean time, we can implement data transmission. And we expand transmission capacity by implementing MIMO through RGB LEDs. we propose the way for improving communication performance by applying Histogram Equalization and verify the performance by test.

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(No. 2016H1D5A1910776)

♦ First Author : Department of IT convergence engineering, Kumoh national Institute of Technology, wj0828@kumoh.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronic engineering, Kumoh national Institute of Technology, wdragon@kumoh.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-04-123, Received April 28, 2017; Revised June 17, 2017; Accepted August 22, 2017

I. 서 론

사물인터넷 및 스마트기기의 보급의 확대 등으로 인해 무선주파수의 사용이 급증하고 있다. 하지만 기존의 무선 통신 기술은 무선 주파수 스펙트럼 부족을 충분히 극복하기엔 한계를 가지고 있다. 따라서 최근에 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 방법들이 제시되고 있으며 그 중의 하나가 가시광 통신이다. 가시광 통신은 일반적인 무선 주파수가 아닌 가시광을 활용한 통신 방법이기엔 무선주파수 부족에서 자유롭다. 일반적으로 가시광 통신은 IEEE 802.15.7 표준과 같은 LED(Light Emitting Photo Diode)와 PD(Photo Diode)를 활용한 연구들이 주를 이루어 진행되고 있다^[1]. 그러한 이유로, 가시광 통신은 무선 주파수 스펙트럼에서 자유롭기에 5세대 무선 통신에 유망한 기술로 고려되고 있다^[2].

가시광통신은 400~800 THz의 범위인 가시광을 사용한 광학 무선 통신의 일종이다. 가시광의 반짝임을 이용한 통신 방식으로, LED 보급의 증가에 따른 활용성 증대로 인해 중요한 주제로 인식되는 추세이다^[3]. 덧붙여서 LED는 긴 수명, 낮은 발열, 에너지 효율, 낮은 가격 및 좋은 가시성 등을 가지기에 보급이 더욱 확장될 것으로 보인다. 그러나 기존 방식의 가시광 통신을 사용자가 사용하려 하면 데이터를 수신하기 위한 추가적인 하드웨어 제작이 필요하다.

최근 조사에 따르면 스마트장치의 보급은 매우 빠르게 진행되고 있으며^[7,8], 이로 인해서 현재 보편적으로 사용되는 스마트폰 및 태블릿과 같은 스마트 장비를 바로 사용하는 방식이 연구 및 고려되고 있다^[9]. 스마트 장치의 광학카메라를 이용한 가시광 통신은 사물인터넷과 실내 내비게이션 등에 쉽게 적용될 수 있다. 일반적으로 스마트 기기에 내장된 카메라들은 CMOS 카메라인데, CMOS 카메라의 특징으로는 Rolling Shutter 효과가 있다. 이 Rolling Shutter 효과는 데이터 수신에 사용될 수 있다. [10]은 Rolling Shutter 효과를 적용한 가시광 통신이 어떻게 IoT에 적용될 수 있는지에 대해 서술했다. 하지만 위 연구에서의 가시광 통신은 단색만을 사용하기엔 낮은 데이터 송수신 용량을 갖는다는 단점이 있다^[9].

최근 적색, 녹색, 청색 등을 활용한 RGB가 널리 보급되고 있다. 이러한 RGB를 사용해서 통신 용량을 확장한 방법 등이 연구되고 있다^[11-15]. 기존 연구^[12]에서 RGB와 Rolling Shutter 효과를 활용한 광학카메라 통신은 기존의 Thresholding 방식인 2차 방정식을 이중 적용하는 방법으로 0,1을 판별을 하여 오차를 보정

하였으나, 수신된 이미지의 가장자리 부분과 중앙 부분의 대비가 클 경우, 가장자리 부분의 데이터가 모두 1로 처리되는 경우가 발생할 수 있기에 올바른 Threshold를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 RGB 3가지 색상을 사용한 MIMO(Multiple Input Multiple Output)를 통해 데이터 송수신 용량을 개선하였을 때 수신된 데이터의 오류율을 낮추어 통신 성능을 향상시키는 이미지 프로세싱의 한 기법인 히스토그램 평활화를 사용한 방법에 대해서 제안한다. 기존에도 수신 데이터의 오류율을 낮추기 위해 smoothing 및 thresholding 기법들이 제안되어 왔지만^[16-19], 단색 LED만을 사용하였을 경우만을 가정하였으며, Thresholding시 2차방정식 또는 3차방정식만을 사용하기엔 위에서 언급한 수신 이미지의 가장자리 부분과 중앙 부분의 대비가 큰 경우에는 올바른 Threshold를 얻을 수가 없다는 단점이 있다. 본 논문의 2장에서는 CMOS카메라의 Rolling Shutter 효과와 이를 이용한 광학카메라 데이터 송수신 방법 및 제안된 시스템, 데이터 처리과정 설명한다. 4장에서는 제시된 시스템의 성능평가 방법 및 결과, 5장에서는 결론 및 향후 연구에 대해서 설명한다.

II. 본 문

2.1 Rolling Shutter 효과

카메라가 이미지를 생성할 때 사용하는 방식에는 Global Shutter 방식과 Rolling Shutter 방식이 있다. 이 중 스마트폰에 적용된 카메라는 Rolling Shutter 방식의 CMOS 카메라이다^[20]. CMOS 카메라는 소비전력이 적고 화소 내에 신호 증폭회로나 노이즈 제거 회로가 탑재 가능하여 노이즈 특성이 좋으므로, 스마트폰과 태블릿 PC 등 카메라 기능이 탑재되어야 하는 장치에 선호되는 편이다. CMOS 이미지센서 기반의 카메라는 Rolling Shutter 효과에 의해서, 한 번에 이미지를 생성하는 것이 아니라 이미지 센서의 한 행씩 순차적으로 이미지를 형성하게 된다. 그림 1을 참조하였을 때 LED의 깜빡임이 이미지에 선을 만드는 알 수 있다. 따라서 LED의 깜빡임으로 전송되는 데이터를 수신하여 이미지 센서의 픽셀마다 각각 저장할 수 있는 장점을 가진다.

LED가 OOK(On Off Keying)을 통해 1이나 0의 메시지를 깜빡임으로 전송하면 빛의 밝기에 따라 이미지의 한 행당 밝기가 달라진다^[21]. 본 논문에서는 RGB LED가 깜빡이면서 Rolling Shutter 효과를 사용하여 각각의 데이터를 전송하게 된다.

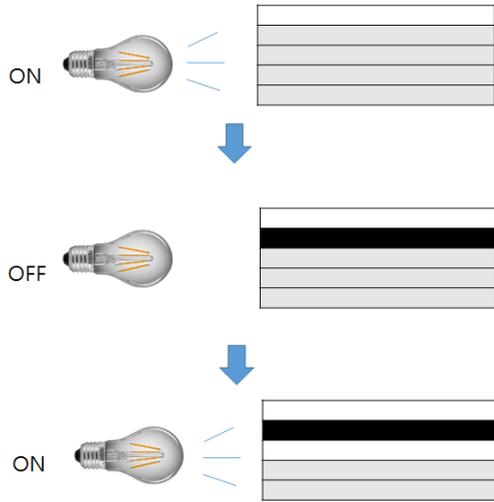


그림 1. Rolling Shutter 효과를 통한 데이터 송수신 원리
Fig. 1. A principle of transmitting and receiving data through Rolling Shutter effect

2.2 제안된 시스템

전체 시스템은 그림 2와 같이 한 개의 송신기와 수신기로 구성되어 있다. 각 RGB 색상별 LED가 Transmitter의 안테나 역할을 하고, CMOS 카메라가 수신단의 안테나 역할을 하게 된다. 이때 전송될 메시지는 각 RGB LED별로 맨체스터 코딩이 되어 보내진다. 일반 On Off Keying(OOK)를 쓰게 하게 되면 off 값이 연속되어 지는 경우가 발생해, 육안으로 확인되는 Flickering 현상이 발생할 수 있다. 맨체스터 코딩을 사용하게 되면 단위 시간당 일정한 수의 LED on/off가 발생하게 되어 Flickering 현상을 줄일 수 있다. 따라서 육안으로 LED의 반짝임이 인지되지 않아 인체에 유해한 현상을 방지 할 수 있다. Encoding 이후에는 Preamble을 payload 앞에 더하여 송신한다. Preamble은 OOK를 사용하나 연속적인 off 신호가 발

생하지 않도록 구성되어 있어서 Flickering 현상이 없다. 수신단에서의 CMOS 카메라는 각 LED별로 전송되는 메시지를 받는 안테나 역할을 한다. CMOS 카메라의 RGB 필터를 활용하여서 각 색상별 신호를 구분할 수 있다. 색상별로 구분되어진 후 히스토그램 평활화를 통해 개선되어진다. 그 후 preamble을 통해 수신 메시지를 확인하고, preamble 제거 후 Decoding을 실시하여 메시지를 복원한다.

2.3 데이터 프로토콜

본 논문에서 제시하는 광학카메라 통신의 프로토콜은 크게 두 가지 부분으로 구분된다. 표1과 같이 Preamble 부분과 Payload로 구분되어지며, Preamble은 OOK, Payload부분은 맨체스터 코딩을 사용한다. Preamble은 데이터의 시작을 알리는 부분으로써 이 부분을 통해, 송수신되는 메시지의 시작과 끝을 알 수가 있다. Preamble 구성시 연속되는 0부분이 없기에 OOK를 사용하여도 Flickering은 발생하지 않는다. 각 RGB LED 색상별 Payload는 모두 1011101의 패턴이다. Payload는 표 1과 같이 총 24bits로 구성되며 각 RGB LED당 8bits를 가진다. Payload는 맨체스터 코딩되어지기 때문에 Preamble과 달리 연속되는 111을 가질 수가 없어 payload와 preamble은 구분되어 질 수 있다.

표 1. 통신 프로토콜 구조
Table 1. Communication Protocol Structure

	Preamble	Payload
R	1011101 (On Off Keying)	8bits (Manchester Coding)
G	1011101 (On Off Keying)	8bits (Manchester Coding)
B	1011101 (On Off Keying)	8bits (Manchester Coding)

2.4 RGB Filtering

RGB LED를 활용한 광학카메라 통신에서는 색상별로 LED가 각각 다른 정보를 한 번에 보낼 수 있다. 따라서 각 색상별 LED가 전송하는 메시지들은 수신시 합쳐져서 수신되어진다. 이러한 메시지는 RGB Filtering을 통해서 쉽게 구분할 수 있다²²⁾. 그림 3과 같이 RGB filter에 의해서 색상별로 나누어진 후 특정 패턴에 맞게 각 색상별로 저장된다. 이 과정을 통하여 간단하게 각 색상별로 이미지를 얻을 수 있으며, 색상별로 얻어진 이미지에서 이미지 프로세싱 및 디코딩 과정을 통해 메시지가 복원되어질 수 있다.

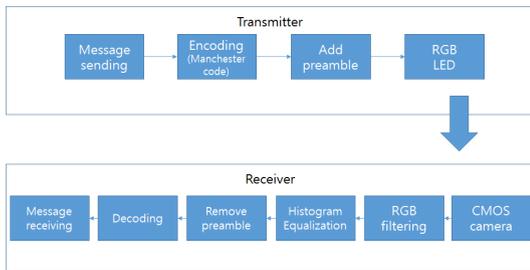


그림 2. 제안된 광학카메라 통신 시스템 개념도
Fig. 2. Block Diagram of Proposed Optical Wireless Communication System

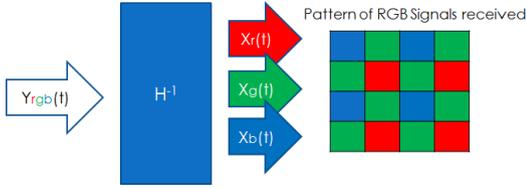


그림 3. CMOS 카메라의 RGB 필터
Fig. 3. RGB Filter of CMOS Camera

2.5 히스토그램 평활화

히스토그램 평활화는 이미지의 그레이맵을 생성한 후 이미지의 히스토그램을 바꾸고, 모든 픽셀의 값을 사람이 인지하기 좋도록 재분배하는 방법이다²³⁾. 이 방법은 이미지 강도가 낮은 경우, 이미지의 강도를 크게 바꾸게 한다. 모든 픽셀들의 대비를 넓게 퍼트려서 인지하기가 쉬워지게 한다는 뜻이다. 이러한 방법은 광학 카메라 통신에서 메시지의 오차를 낮추어 통신 성능을 향상시킬 수 있다. 이 방법은 보통 이미지의 전체 강도를 증가시키기에 유용한 픽셀 값과 주변 픽셀 값과의 대비를 크게 하여 인지하기가 쉬워진다. 이 방법을 적용함으로써, 이미지의 히스토그램을 균일하게 퍼뜨리게 된다. (1)은 히스토그램 평활화 적용을 위한 식이다.

$$s_k = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad \text{for} \quad 0 \leq k \leq L-1 \quad (1)$$

s_k 는 히스토그램 평활화가 진행된 이후의 값이다. k 는 히스토그램 평활화가 진행될 때까지의 픽셀 값의 범위를 나타내고, j 는 누적되어 더해질 픽셀 값의 순서를 나타낸다. n_j 는 j 값에 해당하는 픽셀의 개수이며, n 는 전체 픽셀의 수를 나타낸다. L 은 픽셀 값을 나타내는데 일반적으로 8bit를 나타내는 256이 쓰인다. 계산된 s_k 에 $L-1$ 값을 곱한 것이 k 에 해당하는 픽셀의 값이 된다. 즉, 픽셀 값 k 에 해당하는 모든 픽셀은 s_k 에 $L-1$ 을 곱한 값으로 바뀐다. 그림 4는 광학카

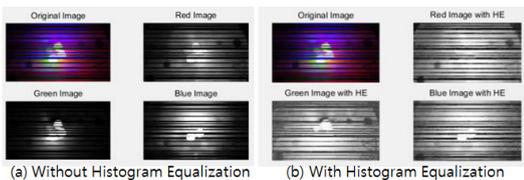


그림 4. 히스토그램 적용 및 미적용 이미지 비교
Fig. 4. Comparison between a non-histogram equalized image and a histogram equalized image

메라 통신에서 수신된 이미지의 값을 히스토그램 평활화한 비교 그림이다. 그림 4를 통해 히스토그램 평활화 전과 후를 비교하였을 때, 픽셀 값 간의 대비가 커져서 더 선명한 이미지를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 각각의 RGB 이미지를 그레이 스케일로 변화시켜서 히스토그램 평활화를 적용하여 수신 메시지를 보정하였다.

2.6 Threshold 설정

히스토그램 평활화가 진행된 후 이미지는 이진데이터로 변환되어져야 한다. 해당 이진데이터는 Rolling Shutter 효과로 인해서 얻어진 이미지상의 선들로부터 만들어진다. 이미지상의 각 행에 해당하는 픽셀 값을 다 더한 후, 이 값들을 바탕으로 Threshold를 설정하여 1,0을 구분하게 된다. 그림 5의 x 및 y 는 픽셀의 좌표를 나타내고, (2)에서의 p_{xy} 는 해당좌표의 픽셀 값을 나타내며, P_y 는 각 행에 해당하는 픽셀 값의 합을 나타낸다. P_y 값을 통해서 (3)과 같은 2차 다항식을 구하게 되는데, 이 2차 다항식이 Threshold의 역할을 하게 된다²⁴⁾. 구해진 P 값과 y 축 값들을 바탕으로 (4)와 같은 매트릭스를 만든다. 매트릭스를 (5)와 같은 형태로 바꾸었을 때, 식(6)을 적용하면 Threshold로 사용될 A값들을 구할 수가 있다. 구해진 A값들을 통해서 구해진 2차 다항식을 바탕으로 Threshold를 그릴 수가 있다. Threshold를 기준으로 (7)을 통해 각 행 값의 이진값을 구할 수 있다. Threshold보다 해당 행의 픽셀 값 합이 크면 1, 낮으면 0으로 판별한다.

$$P_y = \sum_{x=1}^n p_{xy} \quad (2)$$

$$f(y) = a_0 + a_1y + a_2y^2 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & y_1^2 \\ 1 & y_2 & y_2^2 \\ 1 & y_3 & y_3^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & y_n & y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P = YA \quad (5)$$

$$A = (Y^T Y)^{-1} Y^T P \quad (6)$$

$$P_y \geq f(y) \rightarrow 1 \quad \text{or} \quad P_y \leq f(y) \rightarrow 0 \quad (7)$$

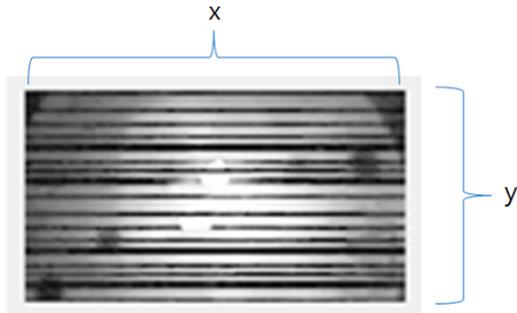


그림 5. 광학카메라 통신 수신 이미지
Fig. 5. A Received Image through Optical Wireless Communication

III. 실험

3.1 실험방법

본 논문에서 제안하는 히스토그램 평활화를 적용한 광학카메라통신 시스템의 성능을 측정하기 위해 그림 6와 같이 시스템을 구성하였다. 각각 한 개의 송신기와 한 개의 수신기로 이루어진 단방향 통신으로 진행하였다. 두 가지 경우로 나누어서 진행하였는데, 히스토그램 평활화가 적용되지 않은 경우와 히스토그램 평활화가 적용된 경우를 비교하여 실험을 진행하였다. 송신 측은 CC2540 Light kit를 사용하였고, 수신 측은 CMOS 카메라와 Matlab을 사용하였다. 본 논문에서는 비교를 위해 LED와 카메라 사이에 렌즈를 적용하지 않고, RGB LED와 카메라만을 활용하여 데이터 송수신 하였을 때 수신된 비트의 오차율을 비교하였다. 렌즈가 없기에 카메라와 LED간의 거리는 10cm 이하이며, 10cm에서 ~500 lux 정도의 값을 가진다¹²⁾. 렌즈를 사용하면 거리는 더 길어질 수 있다.

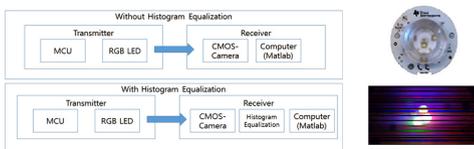


그림 6. 테스트 비교 블록 다이어그램 및 테스트에 사용된 LED 장치 CC2540과 수신 이미지
Fig. 6. Block diagrams of the comparison test, CC2540 LED device used for the test and a received image

3.2 실험결과

표 2는 예시로, 7,777,777이라는 데이터를 수신하였을 때 RGB별 수신 데이터 및 총 수신데이터를 히스토그램 평활화 미적용과 적용으로 수신 데이터 차

표 2. 히스토그램 평활화된 이미지와 원본 이미지 복원데이터 비교 예시

Table 2. Comparison with an example of recovered data between an image with Histogram Equalization and an image without Histogram Equalization

	Transmitted Data	Received Data	
		Without HE	With HE
Red	2,392,129	2,392,129	2,392,129
Green	4,203,664	4,194,434	4,203,664
Blue	1,181,984	1,181,984	1,181,984
Total	7,777,777	7,768,547	7,777,777

이를 비교한 것이다. 표 2를 통해 녹색 LED에 의해 수신된 이미지의 데이터가 상대적으로 쉽게 손상됨을 알 수 있다. 왜냐하면 빛의 파장에 따른 색상별 채널의 간섭이 일어나는데, 적색과 청색 사이에 녹색이 위치하기에 색상 채널 간 간섭을 많이 받기 때문이다¹²⁾. 그림 4를 확인했을 때 히스토그램 평활화 적용 이미지가 더 선명한 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)의 RGB 각각의 필터링된 된 이미지를 보면 어두운 부분이 많아서 선명하지 않으나, 그림 4(b)의 이미지는 히스토그램 평활화가 적용이 되어 선명한 이미지를 가진다. 히스토그램 평활화의 적용 이미지와 비적용 이미지를 비교한 그림 7을 보면 비적용시에는 Threshold 값이 이미지의 가장자리 부분에서 데이터 복원이 어려움을 알 수 있다. 일반적으로 사용하는 방식인 2차방정식 또는 3차방정식을 사용하는 방식^{12),16-19)}으로는 그림 7 히스토그램 평활화 미적용 이미지에서 x축의 0~50까지의 부분은 모두 1로 처리되기에 올바른 Threshold를 구할 수 없다. 왜냐하면 수신 이미지의 가장자리 부분과 중앙 부분의 대비가 크기 때문이다. 하지만 히스토그램 평활화 적용 이미지의 그래프는 Threshold가 이미지 전 영역에서 0과 1을 구분하기에 충분함을 볼 수 있다. 표 2을 통해 전송된 데이터는 히스토그램 평활화 비적용 이미지에서 왜곡된 값을 보여주나, 히스토그램 평활화 적용 이미지는 왜곡이 없음을 알 수

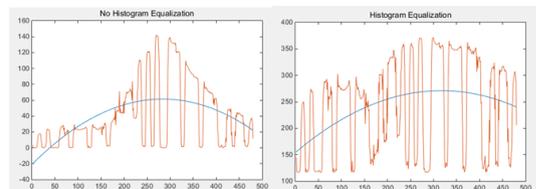


그림 7. 히스토그램 평활화 미적용 및 적용 이미지 그래프
Fig. 7. Graphs of Histogram Equalization and non-Histogram Equalization

있다. 그림8의 비트 오차율 결과를 통해 히스토그램 평활화 적용시 비트 오차율이 낮아짐을 확인할 수 있다. 그림 9는 1000lux 환경 하에서 비트 전송률에 따른 비트 오차율 측정 실험 결과이다. 비트 전송률을 변화시키기 위해서 LED의 깜빡임 간격을 변화시키며 측정하였다. 깜빡임 간격이 짧아질수록 비트 간 픽셀 간격도 좁아지게 되는데, 이에 따라 Blooming effect^[7]에 의한 비트 간 간섭이 심해지게 되어 오차율이 커지게 된다. 그림 9를 참고하였을 때 히스토그램 평활화가 적용된 방식이 모든 비트 전송률에서 오차가 적었다.

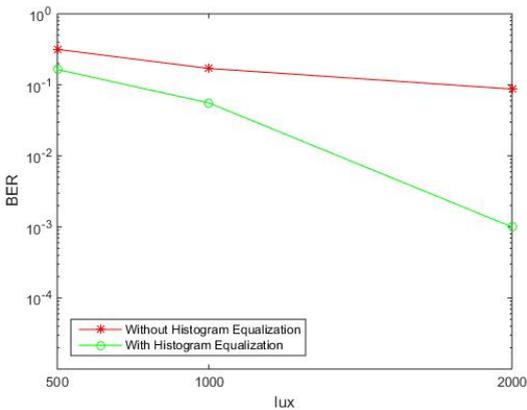


그림 8. 히스토그램 평활화 적용 방법과 비적용 방법의 비트 오차율
Fig. 8. BER of Histogram Equalization and Non-Histogram Equalization

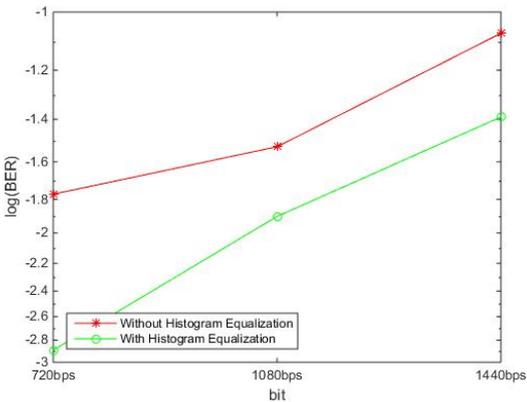


그림 9. 비트 전송률에 따른 비트 오차율
Fig. 9. BER according to Bit-rate

IV. 결 론

본 논문에서는 RGB LED와 모바일 카메라를 사용한 광학카메라 통신에 히스토그램 평활화를 적용한 방법에 대해서 서술하였다. 모바일 카메라는 일반적으로 CMOS 카메라가 쓰이며, CMOS 카메라는 Rolling Shutter 효과를 가진다. 이러한 Rolling Shutter 효과를 사용하여 무선 통신 구현이 가능하며, RGB 색상별 LED가 각각의 다른 정보 전송이 가능하다. 이 때 전송된 정보를 수신하여 이미지화 했을 때, 이미지의 가장자리 부분과 중앙 부분의 대비가 큰 경우, 가장자리 부분이 올바른 Thresholding이 되지 않는 경우가 있다. 본 논문에서는 히스토그램 평활화를 통해 그 대비를 줄인 후 2차 다항식을 통해 Thresholding하여 오류율을 낮추어 통신 성능이 향상 될 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

References

- [1] R. D. Roberts, S. Rajagopal, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 PHYsical Layer Summary," *2nd IEEE Workshop on Optical Wirel. Commun.*, pp. 772-776, USA, Dec. 2011.
- [2] S. Wu, H. Wang, and C. H. Youn, "Visible light communications for 5G wireless networking systems: From fixed to mobile communications," *IEEE Netw.*, vol. 28, no. 6, pp. 41-45, Nov. 2014.
- [3] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. Liu, and Y. F. Liu, "Digital signal processing for light emitting diode based visible light communication," *IEEE Photon. Soc. Newslett.*, vol. 26, no. 5, pp. 9-13, Oct. 2012.
- [4] H. H. Lu, et al., "A multiple-input-multiple-output visible light communication system based on VCSELs and spatial light modulators," *Opt. Exp.*, vol. 22, no. 3, pp. 3468-3474, Feb. 2014.
- [5] Z. Wang, C. Yu, W. D. Zhong, J. Chen, and W. Chen, "Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems," *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 4, pp. 4564-4573, Feb. 2012.
- [6] B. J. Al, "Going beyond 4 Gbps data rate by

- employing RGB laser diodes for visible light communication,” *Opt. Exp.*, vol. 23, no. 14, pp. 18746-18753, Jul. 2015.
- [7] C. W. Chow, C. Y. Chen, and S. H. Chen, “Enhancement of signal performance in LED visible light communications using mobile phone camera,” *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 5, Oct. 2015.
- [8] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas, “Using a CMOS camera sensor for visible light communication,” in *Proc. IEEE GCWshops*, pp. 1244-1248, Dec. 2012.
- [9] N. Saha, M. S. Ifthekhar, N. T. Le, and Y. M. Jang, “Survey on optical camera communications: challenges and opportunities,” *IET Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 172-183, Mar. 2015.
- [10] J. H. Lee, N. Kim, M. Ju, and Y. Park, “Algorithm of optical camera communications using rolling-shutter effect,” *J. KICS*, vol. 41, no. 04, pp. 456-450, Jan. 2016.
- [11] J. Y. Sung, C. W. Chow, and C. H. Yeh, “Dimming-discrete-multi-tone (DMT) for simultaneous color control and high speed visible light communication,” *Opt. Exp.*, vol. 22, no. 7, pp. 7538-7543, Apr. 2014.
- [12] K. Liang, C. W. Chow, and Y. Liu, “RGB visible light communication using mobile phone camera and multi-input multi-output,” *Opt. Exp.*, vol. 24, no. 9, Apr. 2016.
- [13] S. Rajagopal, R. Roberts, and S. K. Lim, “IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, Mar. 2012.
- [14] W. J. Ryu and S. Y. Shin, “Optical camera communication by using RGB and rolling shutter effect,” in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 331-332, Korea, Jan. 2017.
- [15] N. T. Le and Y. M. Jang, “MIMO architecture for optical camera communications,” *J. KICS*, vol. 42, no. 01, pp. 8-13, Jan. 2017.
- [16] Y. Liu, “Decoding mobile-phone image sensor rolling shutter effect for visible light communications,” *Opt. Eng.*, vol. 55, no. 1, 016103, Jan. 2016.
- [17] K. Liang, C. W. Chow, and Y. Liu, “Mobile-phone based visible light communication using region-grow light source tracking for unstable light source,” *Opt. Exp.*, vol. 24, no. 15, pp. 17505-17510, Jul. 2016.
- [18] Y. Liu, H. Y. Chen, K. Liang, C. W. Hsu, C. W. Chow, and C. H. Yeh, “Visible light communication using receivers of camera image sensor and solar cell,” *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, 7800107, Feb. 2016.
- [19] K. Liang, C. W. Chow, Y. Liu, and C. H. Yeh, “Thresholding schemes for visible light communications with CMOS camera using entropy-based algorithms,” *Opt. Exp.*, vol. 24, no. 22, pp. 25641-25646, Oct. 2016.
- [20] M. El-Desoulki, M. J. Deen, Q. Fang, L. Liu, F. Tse, and D. Armstrong, “CMOS image sensors for high speed applications,” *Sensors* vol. 9, no. 1, pp. 430-444, Jan. 2009.
- [21] K. Mishina, S. Kitagawa, and A. Maruta, “All-optical modulation format conversion from on-off-keying to multiple-level phase-shift-keying based on nonlinearity in optical fiber,” *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 13, Jun. 2007.
- [22] J. Park and J. Chong, “Color filter array interpolation method for bayerlike W-RGB pattern,” *ICEIC*, Danang, Jan. 2016.
- [23] K. Zuiderveld, *Contrast limited adaptive histogram equalization*, Academic Press, Cambridge, 1994.
- [24] S. Fumiki and S. Akihiro, “Discrete polynomial curve fitting to noisy data,” *LNCS*, pp. 75-89, 2012.

류 원 재 (Won Jae Ryu)



2012년 2월 : 금오공과대학교 전
자공학과 졸업

2014년 2월 : 금오공과대학교 IT
융복합공학과 석사

2016년 9월~현재 : 금오공과대
학교 IT융복합공학과 박사과
정

<관심분야> 사물인터넷, 무선통신, 임베디드 시스템

신 수 용 (Soo Young Shin)



1999년 2월 : 서울대학교 전기
공학부 졸업

2001년 2월 : 서울대학교 전기
공학부 석사

2006년 2월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사

2010년~현재 : 국립금오공과대
학교 전자공학부 교수

<관심분야> Network/communication protocol,
MIMO and OFDM, wireless networks, etc.