

롤링셔터 효과를 이용한 광학 카메라통신 알고리즘

이정호*, 김나영*, 주민철*, 박영일^o

Algorithm of Optical Camera Communications Using Rolling-Shutter Effect

Jungho Lee*, Nayeong Kim*, MinChul Ju*, Youngil Park^o

요약

광학 카메라 통신(OCC, Optical Camera Communication)은 기존의 광다이오드 기반 가시광통신(VLC)과는 다르게 카메라를 수신부로 사용하여 데이터를 수신한다. 특히, 카메라의 CMOS 이미지 센서의 셔터 동작방식인 롤링셔터의 원리를 이용하면 픽셀별로 다른 신호를 수신할 수 있으므로 데이터 속도를 개선할 수 있다. 본 연구에서는 카메라의 CMOS 이미지 센서를 사용하여 LED로부터 송신되는 고속 데이터의 이미지를 실시간으로 획득하고 이를 처리할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 실험을 통해 성능을 검증하였다.

Key Words : Optical Camera Communications, CMOS Image Sensor, Rolling-Shutter Effect

ABSTRACT

Unlike conventional visible light communications (VLC) adopting photo detectors (PD), optical camera communications (OCC) employs cameras in detecting the transmitted data. Especially, the data rate of OCC can be enhanced by using the principle of rolling-shutter, which is the operating scheme of a CMOS image sensor. In this study, we consider a novel OCC system for high-speed real time video processing to transmit high speed data from LED and to acquire image utilizing rolling-shutter effect of CMOS image sensor. Also, we demonstrate the improved performance of proposed system using a test-bed.

1. 서론

VLC(Visible Light Communication) 시스템은 IEEE 802.15.7의 표준규격과 함께 주로 실내 및 실외 환경에서 LED와 PD(Photo Detector)를 이용한 고속 데이터 송수신을 연구하였다. 그러나 이 경우 스마트폰 및 스마트 기기를 기반으로 하는 VLC 시스템 개발을 위해서는 별도의 하드웨어 제작이 필요하다. 따라서 스마트 기기의 카메라를 이용하여 송신 LED로부터의 데이터를 처리하는 광학 카메라 통신이 제안

되고 이를 위한 표준화가 IEEE 802.15.7r1에서 진행되고 있다¹⁾. 대부분의 스마트 기기는 내장된 카메라를 이용함으로써 실용성이 높고 VLC의 응용기술로 실내 내비게이션, 사물인터넷(IoT) 등에 사용될 수 있어 다양한 분야에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 CMOS 카메라 이미지 센서의 롤링셔터효과(Rolling Shutter Effect)를 이용한 고속 데이터 송수신 시스템을 제안한다. 인코딩 된 송신 데이터를 이미지처리, 수신 알고리즘을 통해 데이터를 복원하였다. 또한, 성능을 검증하기 위해 일련의 문자 전송을 실시간 처리하

※ 본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(2015059416)의 지원으로 수행되었습니다.

♦ First Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University albertboy@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : Electronics Engineering Department, Kookmin University ypark@kookmin.ac.kr, 종신회원

* Electronics Engineering Department, Kookmin University

논문번호 : KICS2016-01-014, Received January 20, 2016; Revised March 21, 2016; Accepted March 21, 2016

여 패킷오율(PER, Packet Error Rate)을 측정하였다.

II. 카메라 이미지 센서 처리 방법

카메라의 이미지 센서는 응용방식과 제조 공정에 따라 CCD(Charge-Coupled Device) 이미지 센서와 CMOS 이미지 센서로 나눌 수 있다. 그 중 CMOS 이미지 센서는 소비전력이 적고 화소 내에 신호 증폭회로나 노이즈 제거 회로가 탑재 가능하여 노이즈 특성이 좋으므로, 최근 스마트폰과 태블릿 PC 등 카메라 기능이 탑재된 모바일 기기의 확대와 더불어 사용 범위가 급격히 늘어나고 있다.

이미지 센서의 노출방식은 글로벌 셔터(Global Shutter)와 롤링셔터(Rolling Shutter)의 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. 글로벌 셔터 방식은 빛을 수신하기 위해 모든 픽셀을 동시에 빛에 노출시킴으로써 이미지를 형성한다. 반면 롤링셔터 방식은 이미지 센서의 한 행씩 순차적으로 노출시켜 이미지를 형성하며, 따라서 이 방식은 이미지 센서의 픽셀마다 다른 LED의 ON, OFF 정보를 표현할 수 있어서 많은 양의 데이터를 수신할 수 있고, 고속으로 변조되는 LED의 데이터 수신에 적합한 방식이다^[2].

그림 1은 LED 광원을 빠른 속도로 점멸할 때 CMOS 이미지 센서의 롤링셔터 방식을 통해 형성된 이미지를 나타낸 것이다. LED 광원의 한 비트 주기가 이미지 센서 한 개 행이 노출되는 시간과 동일하다고 가정할 때 그림과 같이 LED ON에서는 이미지의 한 행은 밝은 라인이 형성되고, LED OFF에서는 빛이 없는 상태를 인식하게 되어 해당 이미지 라인은 어둡게 된다. 이러한 일련의 과정을 통해 입력 데이터에 따라 다양한 형태의 라인을 확인할 수 있으며, 이 정보를 읽어들이으로써 데이터 수신이 가능하게 된다^[3].

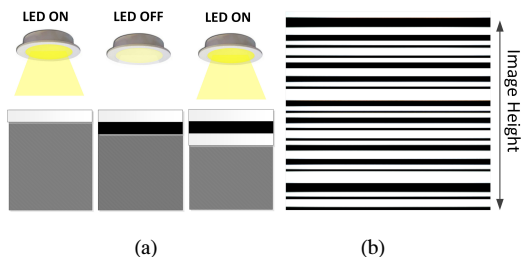


Fig. 1. Camera image by rolling-shutter effect (a) image generation by LED ON/OFF (b) generated image frame

III. 광학 카메라 기반 송수신 알고리즘

3.1 송신 패킷의 구조

전송 패킷의 구조는 카메라의 수신 특성을 고려하여 설계해야 한다. 보통 카메라의 동영상 촬영 속도는 30 FPS(Frame Per Second) 정도로 그림 2(a)와 같이 1초 동안 30개의 프레임은 가져오도록 되어 있으나, 실제의 경우 카메라 속도는 가변적이어서 그림 2(b)와 같이 불규칙적으로 동작한다. LED 전송 데이터 속도는 일정한 반면 이를 수신하는 프레임의 속도가 불규칙하게 되면 각 프레임 사이에서 데이터 손실이 발생하게 된다^[4,5]. 따라서 본 논문에서는 데이터 수신을 보상하기 위해 다음 그림 3과 같은 송신 데이터 구조를 제안하였다. 하나의 패킷은 두 개의 블록(N, N+1)으로 이루어지고, 이 때 두 블록은 동일한 데이터를 전송함으로써 불규칙한 프레임 속도에 의한 데이터 손실을 보상하였다. 블록은 다시 프리앰플(Preamble), BSN(Block Sequence Number) 및 데이터로 구성된다. 프리앰플은 블록의 시작을 나타내고, BSN은 블록의 순서에 해당하며, 데이터 전송에는 맨체스터 변조를 이용하였다^[6,7].

따라서 패킷에서 프리앰플 외에는 '1' 또는 '0'이 3번 이상 반복될 수 없기 때문에 이 특성을 이용하면

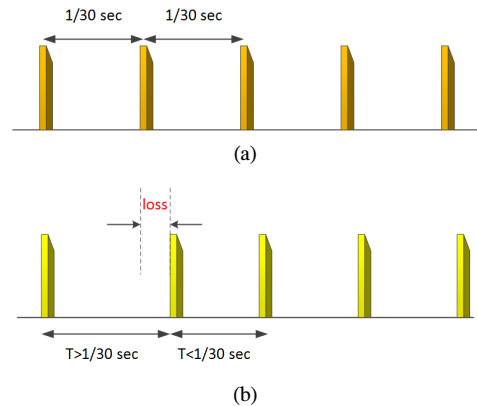


Fig. 2. Frame interval (a) ideal case (b) practical case

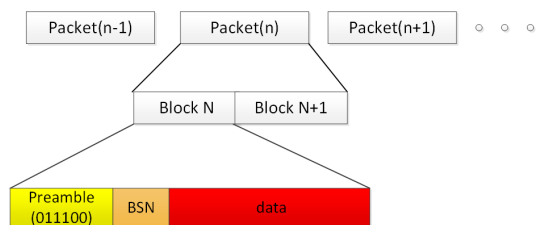


Fig. 3. Frame structure for rolling-shutter based OCC

패킷의 시작점을 알 수 있다.

3.2 수신 알고리즘

카메라 영상 이미지를 이용한 전송 데이터 복구를 위해 다음 그림 4와 같은 알고리즘을 이용하였다. 카메라 이미지센서 수신 영상은 최초에 YUV 형태로 저장되는데, 여기에서 UV는 색차(Chrominance)성분이 포함된 것이다. 그러나 본 연구에서는 백색 LED 광원을 검출하기 때문에 필요하지 않다. 따라서 본 알고리즘에서는 휘도 성분(Y)만을 추출한다.

이미지 센서의 픽셀 구조는 그림 5와 같이 주어진다. 이미지를 수신할 때 각 행별로 수신하기 때문에 본 논문의 수신 알고리즘에서는 먼저 각 행에 있는 전체 픽셀의 휘도성분을 식 (1)과 같이 합산하였다. 이때 첨자 i, j 는 각각 픽셀의 행과 열을 의미한다.

$$Y_i = \sum_{j=1}^n Y(x_i, y_j) \quad (1)$$

그런데 동일한 LED ON에 대해서도 각 행별 합산 휘도값은 이미지 센서에 잡히는 LED의 형상에 의해 각 행의 위치마다 다른 값을 나타낼 수 있다. 따라서 식 (1)에서 계산된 Y_i 값으로부터 수신 데이터를 결정하기 위해서는 적절한 기준값을 구해야 하며, 본 연구에서는 이 기준값을 다항식 회귀방식에 의해 도출하였다. 다항식 회귀란 각 행별 휘도값의 변화를 가장

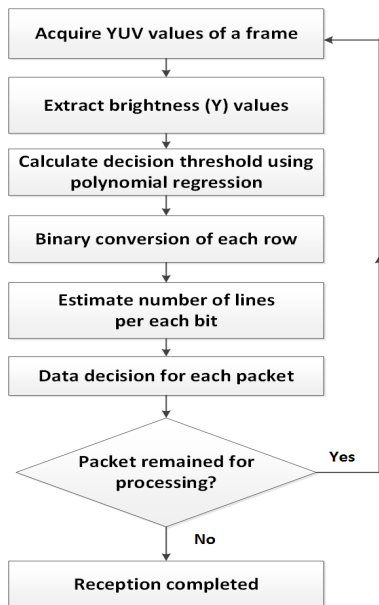


Fig. 4. Data recovery algorithm from the received image

(x_1, y_1)	(x_1, y_2)	(x_1, y_3)			(x_1, y_{n-1})	(x_1, y_n)
(x_2, y_1)	(x_2, y_2)					(x_2, y_n)
(x_3, y_1)						
(x_{m-1}, y_1)						(x_{m-1}, y_n)
(x_m, y_1)	(x_m, y_2)				(x_m, y_{n-1})	(x_m, y_n)

Fig. 5. Structure of an image sensor

잘 표현하는 다항식을 구하는 것이다. LED 램프의 형상에 의해 이미지센서 각 행의 밝기에는 차이가 있어서 만일 고정된 판단기준을 이용한다면 이는 데이터 판단에 많은 오류를 가져오게 되며, 전송 거리가 멀수록 이 현상은 더욱 심하게 된다. 그림 6은 송수신부 사이의 거리가 75 cm인 경우, 획득한 이미지와 각 행 픽셀 합 및 다항식 회귀곡선을 나타내고 있다. 이 때 다항식 회귀 계산에는 지연시간 및 오차 크기를 고려하여 2차항을 이용하였다. 그림 6(b)와 같이 회귀 곡선은 0과 1에 해당하는 각기 다른 휘도 값의 중간을 잘 나타내고 있다. 따라서 0과 1의 판단에 적절한 기준을 제공할 수 있을 것으로 보인다.

다항식 회귀를 통해 구한 다항식을 기준 값으로 적용하여 그림 7과 같이 입력 신호값을 0과 1 두 개의 레벨로 구분하였다. 그림에서 다항식으로 표현된 붉은 색 곡선과 실제 획득한 이미지에 대한 데이터의 차이가 0보다 크면(① 영역) 비트 1로 판별하고, 반대의 경우(② 영역) 비트 0으로 판별한다.

한편, 그림 7(b)의 이진화한 신호는 각 행의 값을 다항식 회귀를 통해 판단한 것이고, 여러 개의 행이 모여 한 개의 비트를 구성한다. 따라서 몇 행을 한 비트로 판단해야 하는지, 즉, 비트당 라인 개수에 관한

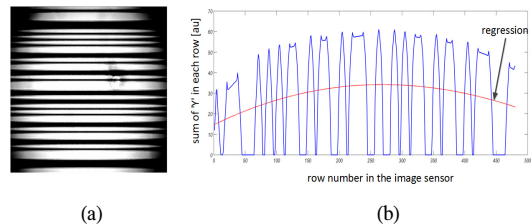


Fig. 6. Frame image and its regression (a) image pattern using rolling-shutter (b) Y_i in each row and its regression curve

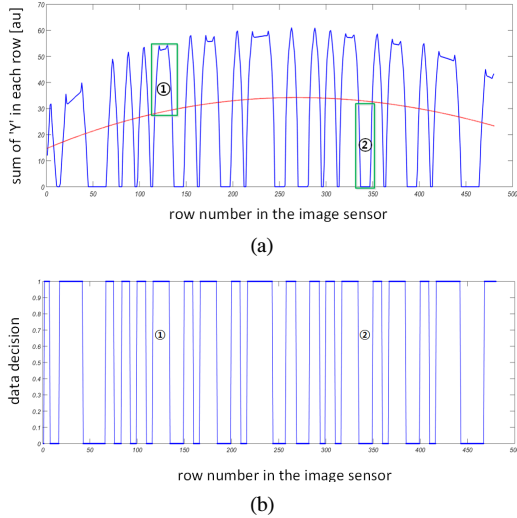


Fig. 7. Polynomial regression and binary decision of achieved image (a) brightness sum of each row (b) binary decision of each row

정보가 필요하며 이론적으로 다음과 같이 계산할 수 있다. 수식에서 R_b 는 데이터 전송속도, FPS는 단위 시간당 프레임 개수, N 은 이미지 센서의 라인 개수를 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{lines per bit} &= \frac{\text{bit period}}{\text{line period}} = \frac{1/R_b}{(1/FPS) \div N} \\ &= \frac{N \times FPS}{R_b} \end{aligned} \quad (2)$$

$N=480$, $FPS=30/\text{sec}$, $R_b=1.8 \text{ kbps}$ 인 경우 각 비트당 라인 개수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{number of lines per bit} &= \frac{480 \times 30}{1800} \\ &= 8 \text{ lines/bit} \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 위 계산은 30 fps를 일정하게 유지하는 경우에 해당하며, 실제로는 주변 밝기 등의 환경에 따라 프레임 속도와 비트당 라인 개수는 유동적이므로 본 연구에서는 실험적으로 이를 다시 추정하였다. 앞에서 제시한 패키지구조를 이용하면 한 프레임에 적어도 한 개 이상의 프리앰블이 포함되며, 이 프리앰블은 3개의 비트 '1' 신호를 가지고 있다. 따라서 매 프레임에서 레벨 1에 해당하는 가장 긴 구간을 찾아내고, 이 때의 라인을 계수하여 다시 3으로 나눔으로써 비트당 라인 개수를 유추할 수 있다. 또한 이 값을 이용하면 연속되는 비트 개수를 다음 식과 같이 계산할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \text{lines per bit} &= \frac{\max(\text{continuous light lines})}{3} \\ \text{repetition of bits} &= \left\| \frac{\text{no. continuous lines}}{\text{lines per bit}} \right\| \end{aligned} \quad (4)$$

위와 같이 수신 이미지로부터 검출한 전송 비트열을 이용하여, 다음 단계로는 실제의 정보 데이터를 복원해야 한다. 데이터 복원을 위해서 먼저 프리앰블을 검출해야 하며 그림 8은 프리앰블을 수신하는 원리를 나타내고 있다. 정상적으로 패킷이 수신되는 환경에서는 한 개의 프레임에 프리앰블은 적어도 1번 이상 포함되어 있으며, 그림 8에서와 같이 두 개 프리앰블 사이에 정보 데이터가 위치하므로 이 특성을 이용하여 정보를 획득한다.

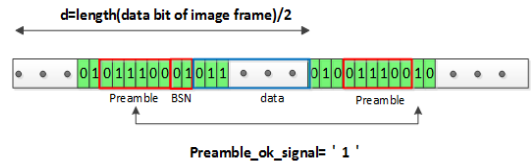


Fig. 8. Detection of preamble packet

IV. 전송시험 및 성능 분석

본 논문에서 제안하는 광학 카메라통신 시스템의 성능을 측정하기 위해 그림 9와 같은 시스템을 구성하였으며, 최종 구현된 테스트베드를 그림 10에 보이고 있다. 이미지센서로는 노트북에 연결된 웹캠을 이용하였고, 수신 알고리즘은 매트랩을 이용하여 구현하였다. 송신부 데이터 변조속도는 900 bps이며 전송거리는 0~1 m 범위에서 변화하였다. 이 때 카메라의 파라미터 및 초점 조절을 통해 가급적 선명한 이미지를 획득하도록 한다.

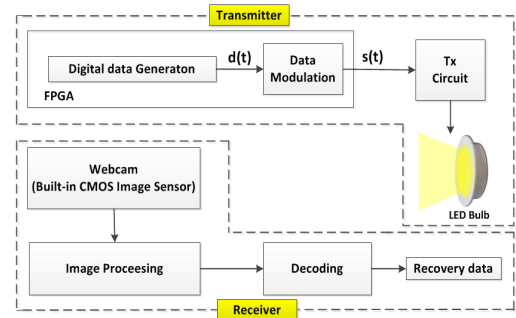


Fig. 9. Configuration of optical camera communication system



Fig. 10. Test-bed of optical camera communication

그림 11에서는 위 테스트베드를 이용한 광학카메라 통신 실험 결과를 보여주고 있다. 카메라 영상을 통해 획득한 이미지를 실시간으로 처리하여 데이터를 수신하고 이를 표시하였다. 송신 전송속도 900 bps 및 맨체스터 변조를 고려하고, 오버헤드(프리앰플, BSN)를 제외한다면 유효 데이터 속도는 약 300 bps가 된다.

위 실험 환경에서 패킷 오류를 측정하기 위해 임의의 문자를 전송하고 10만 개의 카메라 이미지 프레임을 처리하여 확인한 결과 그림 12와 같은 패킷오율을 확인할 수 있었다. 전송거리 85 cm까지는 오류가 없는 상태이지만 이후 거리가 증가함에 따라 오류가 증가하다가 95 cm 이후에서는 성능이 급격히 저하됨을 확인하였다.

그 원인으로서는 첫째, 전송 거리가 일정값 이상으로 멀어지면 카메라의 조리개는 최대 개방상태에서

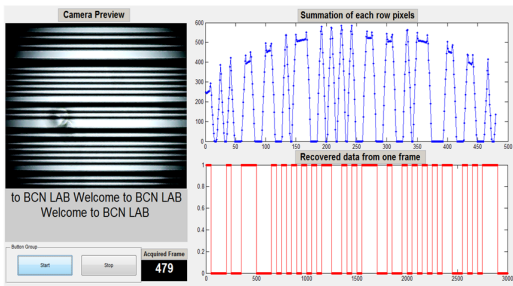


Fig. 11. Real-time data recovery using optical camera communication

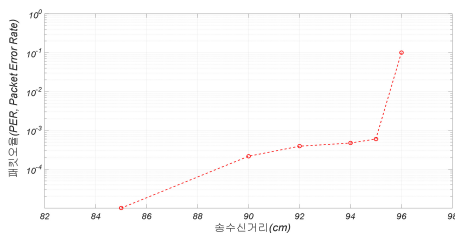


Fig. 12. Performance of OCC at various distance

주변의 잡음을 포함한 LED 광원의 빛을 수신하여 이미지가 흐려져 데이터 판별에 오류가 생길 수 있다. 그림 13은 송수신 거리 96 cm에서 획득된 이미지와 이에 대한 성분을 표현한 것으로, 그림 13(a)처럼 주변 빛과 LED 광원의 빛이 섞여 패턴 구분이 어렵게 되었다. 그림 13(b)는 이미지센서 각 행의 휘도성분 합과 다항식 회귀값을 비교한 것으로서, High/Low 구분이 어려운 지점들을 확인할 수 있다.

한편, 전송거리의 한계를 극복하기 위해 수신부에 렌즈를 추가로 이용한 테스트를 수행하였다. 즉, 실험에 이용한 웹캠보다 구경이 큰 plano-convex 렌즈를 카메라 앞에 두면 렌즈를 통해 더욱 많은 빛이 집광되어 이미지센서에 공급되므로 근거리에서 실험하는 것과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 14는 직경 1 인치의 렌즈를 이용하여 5 m 거리에서 수행한 전송 실험 결과로서 오류없는 전송이 가능하였다. 이를 통해 볼 때 수신부 광학계 설계를 통해 원거리의 통신도 가능함을 알 수 있었다.

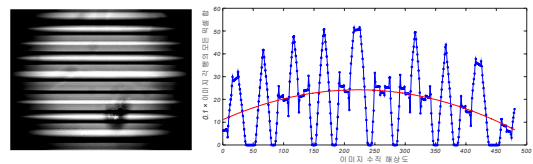


Fig. 13. Received image and data decision at 96 cm (a) received image (b) brightness of each row and regression curve

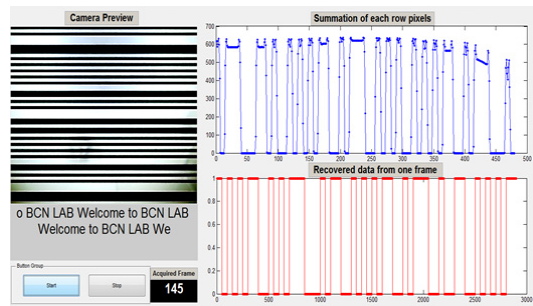


Fig. 14. Transmission results with a lens at 5 meter

V. 결론

본 논문에서는 기존 VLC 시스템의 응용기술로서 카메라를 수신부로 하여 카메라의 이미지 센서의 동작방식을 이용한 광학카메라 통신시스템을 제안하고 평가하였다. 송신부 LED로부터의 데이터를 이미지

처리를 통해 약 85 cm 거리까지는 오류 없이 수신 가능함을 보였다. 그러나 95 cm 이상의 거리에서는 카메라 영상에 잡히는 LED의 이미지가 급격히 흐려지면서 데이터 판단에 어려움이 있었다. 하지만 수신부에 렌즈를 사용하는 경우 5 m 이상의 거리에서도 선명한 이미지를 얻을 수 있어서 오류 없는 데이터 수신을 할 수 있었다.

본 논문의 연구 결과를 활용한다면 광다이오드 없이 카메라가 부착된 스마트 기기를 이용해서 LED 조명이 전송하는 신호를 수신할 수 있으며, 실내위치인식이나 비콘 등의 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] *3rd Revision of The IEEE P802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group Technical Considerations Document* [Online]. <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0492-03-007a-technical-considerations-document.docx>

[2] Hui-Yu, Hao-Min Lin, Yu-Kin Wei, Hsin-Iwu, Hsin-Mu Tsai, and Kate Ching-Ju Lin, "Rolling light: Enabling line-of-sight light to camera communication," in *Proc. Conf. Mob. Syst., Appl., and Services*, pp. 167-180, May 2015.

[3] C. Danakis, M. Afhani, G. Povey, I. Underwood, and H. Hass, "Using a CMOS camera sensor for visible light communication," *IEEE Globecom*, pp. 1244-1248, Dec. 2012.

[4] T. Nguyen, N. T. Le, and Y. M. Jang, "Asynchronous scheme for unidirectional optical camera communications(OCC)," *ICUFN 2014*, pp. 48-51, Shanghai, China, Jul. 2014.

[5] C.-W. Chow, C.-Y. Chen, and S.-H. Chen, "Visible light communications using mobile-phone camera with data rate higher than frame rate," *Optics Express*, vol. 23, pp. 26080-26085, Sept. 2015.

[6] J. Lee, S. Lee, S. Hyun, Y. Park, and M. C. Ju, "Optical camera communications using rolling shutter effect of CMOS image sensor," *Photonics Conf.*, pp. 19-20, Nov. 2014.

[7] J. Lee, Y. Lee, S. Hyun, M. C. Ju, and Y. Park, "Optical camera communications using rolling shutter effect of CMOS image sensor," in *Proc. Int. Conf. Commun.*, pp. 1469-1470, Jun. 2015.

이 정 호 (Jungho Lee)



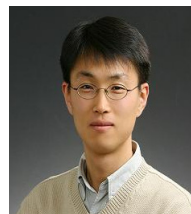
2014년 : 국민대학교 공학사
 2014년~현재 : 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 광대역 통합망, 가시광통신, 광학카메라통신

김 나 영 (Nayeong Kim)



2014년 : 국민대학교 공학사
 2014년~현재 : 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 광통신시스템, 광대역 통합망, 가시광통신

주 민 철 (MinChul Ju)



1997년 : 포항공과대학교 공학사
 1999년 : 한국과학기술원 공학 석사
 2010년 : Queen's Univ. 공학박사
 1999년~2011년 : 전자부품연구원 선임연구원
 2011년~현재 : 국민대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 협동통신, 다중안테나 시스템, 물리계층 보안

박 영 일 (Youngil Park)



1987년 : 서울대학교 공학사
1989년 : 서울대학교 공학석사
1995년 : Texas A&M Univ.
공학박사
1995년~1999년 : KT 연구개발
본부 선임연구원
1999년~현재 : 국민대학교 전자

공학부 교수

<관심분야> 광통신시스템, 광대역 통합망, 가시광통신