

# Visual-MIMO 시스템에서 영상의 휘도 신호를 이용한 수신 성능 향상

백정훈\*, 윤기방\*, 박영일\*\*, 김기두<sup>o</sup>

## Performance Improvement of Visual-MIMO System Using Image Brightness Information

Jeong-hoon Baek\*, Kee-bang Yun\*, Youngil Park\*\*, Ki-doo Kim<sup>o</sup>

요약

최근 LED 어레이와 카메라간의 통신 (일명, 'Visual-MIMO') 연구가 활발히 진행되고 있으며, 차량 및 스마트폰 등으로의 응용이 극대화될 것으로 기대된다. 본 논문에서는 수신 영상의 휘도 정보를 이용하여 Visual-MIMO 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능을 개선하고자 한다. 특히 심벌간섭 (ISI: Inter-Symbol-Interference)에 의한 오류를 최소화하고자 오류정정 방법을 제안한다. 잡음과 거리의 변화에 따른 성능 분석은 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증한다.

**Key Words** : LED, Visual-MIMO, image brightness, error correction

ABSTRACT

Recently, the communication between LED array and camera, called Visual-MIMO, is under active research and we expect the maximization of application to the vehicle as well as smart-phone. In this paper, we improve the BER performance of Visual-MIMO system by using the brightness information of a received image. We also suggest the error correction method to minimize the error due to Inter-Symbol-Interference. The performance analysis according to the noise and distance variation will verify the validity of our proposed method including results through simulation and hardware experiment.

### I. 서론

LED는 조명뿐만 아니라, 통신 소자로서의 응용 가능성도 증대되고 있으며<sup>[1-3]</sup>, LED 통신은 RF 통신에 비해 몇 가지 고유한 이점을 가진다. 지향성이 강하기 때문에 매우 혼잡한 환경에서 거의 간섭을 받지 않고 송수신이 가능하며, 도청이 어려워 보안 통신 응용에

유리하다. 더구나 'Visual-MIMO (Multiple Input Multiple Output)'는 기존의 카메라와 디스플레이에 바로 적용 가능하므로 RF 통신에 비하여 원천적으로 비용 면에서 유리하다. 최근 LED 어레이와 카메라간의 통신 (일명, 'Visual-MIMO') 연구가 활발히 진행되고 있으며<sup>[4-10]</sup> 차량 및 스마트폰 등으로의 응용이 극대화될 것으로 기대된다. 몇 가지 응용 사례를 들면

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음[2014-004-051-001].

♦ First Author : Kookmin University, Department of Electronics Engineering, jhbaek@kookmin.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Kookmin University, School of Electronics Engineering, kdk@kookmin.ac.kr, 종신회원

\* Incheon National University, Department of Electronics Engineering, kbyun@incheon.ac.kr, 정회원

\*\* Kookmin University, School of Electronics Engineering, ypark@kookmin.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-11-457, Received November 10, 2014; Revised December 18, 2014; Accepted December 18, 2014

다음과 같다.

- 차량과 도로(인프라) 간 통신
- 차량 간 통신
- 스마트 폰 (휴대용 카메라)과 전자 광고판 통신
- 로봇 대 로봇 통신
- 고정 감시 카메라와 핸드-헬드 디스플레이 간 통신

본 논문에서의 관심 대상은 ‘Visual-MIMO’ 시스템이며, 송신기와 수신기로 각각 LED 어레이와 카메라를 채택한다. 다중 LED와 다중 픽셀간의 MIMO 통신은 다중화 (multiplexing)를 통한 전송 속도의 증가와 다이버시티를 통한 정보 데이터의 신뢰성 향상을 가능케 한다.

본 논문의 목적은 수신 영상의 휘도 정보를 이용하여 Visual-MIMO 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능을 개선하는 것이다. 특히 심벌간간섭 (ISI: Inter-Symbol-Interference)에 의한 오류를 최소화하고자 오류정정 방법을 제안하고, 잡음과 거리의 변화에 따른 성능 분석은 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증한다.

2장에서는 Visual-MIMO 기술 및 시스템에 대하여 기술한다. 3장에서는 영상의 휘도 정보처리를 통해 BER을 개선시키고, 특히 심벌간간섭에 의한 오류를 최소화하고자 오류정정 방법을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. Visual-MIMO 시스템

Visual-MIMO 시스템은 LED 어레이와 카메라간의 통신 시스템이며, LEA (LED Array)의 모든 LED가 송신기 역할을 담당하고, 카메라의 모든 픽셀이 수신기 역할을 하게 된다. LED 어레이에 의한 무선 광전송 데이터는 카메라의 픽셀 어레이로 수신된다. 픽셀은 본질적으로 고지향성 수신 소사이므로 채널에서 다른 광원으로부터의 간섭과 잡음을 감소시킬 수 있다. 또한 송신기로부터 전송된 신호들 중에서 강한 신호를 선택 및 결합해 수신함으로써 SNR (Signal to Noise Ratio, 신호대잡음비)을 크게 만들 수 있다. 이것은 RF-MIMO의 경우와 매우 유사해 보이지만 카메라 수신단에서 영상 처리 및 컴퓨터 비전 알고리즘을 사용함으로써 RF에 비하여 오버헤드가 작고 소프트웨어로 처리가 용이한 장점을 갖는다. 그러나 Visual-MIMO 시스템의 단점으로 수신기에서 샘플링

주파수가 제한되고 강한 가시선 (LOS) 확보가 요구된다는 점을 염두에 두어야 한다.

Visual-MIMO 통신이 갖는 고유한 특성은 RF 기반의 무선 통신에 비해 이점을 제공 할 수 있게 해준다. 먼저 강한 지향성은 실제 거의 간섭을 받지 않게 해주고 매우 혼잡한 환경에서의 전송에 유리할 수 있다. 또한, 이러한 전송은 감지 및 차단이 어려워 보안 응용에 적합하다. 더구나 Visual-MIMO는 기존의 카메라와 LED 어레이를 활용하기 때문에 RF에 비해 저가로 구현할 수 있는 대안이 된다<sup>[10]</sup>.

### 2.1 Visual-MIMO 시스템 구성

그림 1은 Visual-MIMO 시스템의 블록 구조도를 나타낸다.

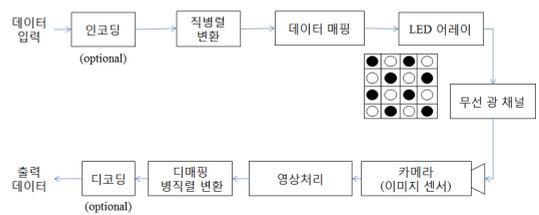


그림 1. Visual-MIMO 시스템의 블록 구조도  
Fig. 1. Block diagram of a Visual-MIMO system.

#### 2.1.1 송신단 (Transmitter)

송신단은 인코더, 직렬화, LED 어레이로 구성된다. 여기서 인코더는 필요(채널 상황)에 따라 채택이 결정되고, LED 어레이는 정방 행렬( $N \times N$ )의 형태를 갖는다고 가정한다. 각 LED는 비트 주기  $T_b$ 에 상응하는 음이 아닌 펄스 폭  $T_b$ 의 빛을 생성한다. 펄스 폭을 조절하면 빛의 세기(밝기)를 조절할 수 있다. 데이터 전송율이  $R_b (= 1/T_b)$ 이면, 각 LED는 서로 다른 데이터를 전송하므로 ‘Visual-MIMO’의 전송율은  $(N \times N)R_b$ 가 된다.  $u$ 번째 행과  $v$ 번째 열의 LED에서 방사되는 송신 신호는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{u,v}(t) = \sum_k x_{u,v,k} \cdot A \cdot g(t - (k-1)T_b) \quad (1)$$

여기서  $k = 1, 2, \dots$  는 LED 패턴의 순서를 나타내고,  $A$ 는 송신 신호의 피크 값을 나타낸다.  $x_{u,v,k}$ 는 LED의 빛의 세기를 결정하는 계수이며, 그 범위는  $0 \leq x_{u,v,k} \leq 1$  이다. OOK 변조 방법이 사용될 경우  $x_{u,v,k} = \{0, 1\}$ 이 된다. 펄스 함수  $g(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_b \\ 0, & \text{그 외} \end{cases} \quad (2)$$

2.1.2 수신단 (Receiver)

수신단은 카메라, 영상처리부, 에러정정 디코더로 구성된다. 송신 신호는 무선광 채널을 통과해 카메라 수신부로 들어온다. 수신단의 CMOS 영상 센서에서 각 픽셀은 수신된 빛의 세기에 상응하는 광전류를 내보낸다. u,v번째 LED로부터 수신한 신호는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{u,v}(t) = h_{u,v}x_{u,v}(t) + n_{u,v}(t) \quad (3)$$

여기서  $h_{u,v}$ 는 무선광 채널 이득이고,  $n_{u,v}(t)$ 는 주변 빛으로 인한 잡음을 나타낸다. 주변 빛의 세기가 클 때, 주변 빛으로 인한 산탄 잡음 (shot noise)은 백색 가우시안 잡음으로 모델링 될 수 있다. 따라서  $n_{u,v}(t)$ 를 전력 스펙트럼 밀도가  $N_0/2$ 인 백색 가우시안 잡음 프로세스로 가정한다. 수신 카메라는 송신 LED와 정확히 동기 되었다고 가정한다. 영상 샘플링 주기와 영상 빛 노출 시간을 각각  $T_b$ 와  $\tau$ 라 하자. 영상 빛 노출은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$f(t) = \sum_i g_{sh}(t - (i-1)T_b) \quad (4)$$

여기서  $i (= 1, 2, \dots)$ 는 영상 노출 주기 순서를 나타내고, 셔터 펄스  $g_{sh}(t)$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$g_{sh}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \text{그 외} \end{cases} \quad (5)$$

$i$ 번째 노출 주기에서 u, v번째 LED에 상응하는 영상 (pixel)의 샘플 출력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{u,v,i} = c \int_{(i-1)T_b}^{iT_b} y_{u,v}(t) f(t) dt \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 빛에서 전류로의 전환 효율을 나타내는 상수이다.

III. LED 어레이 비트 판정 정확도 개선

먼저 참조 LED 어레이 패턴을 제안하고, 이를 대 상 LED 어레이 검출에 적용하고 어레이 비트 판정의

정확도를 개선하는데 참조 어레이 패턴의 영상 휘도 정보를 이용한다.

3.1 참조 LED 어레이 패턴

채널환경을 고려하여 LED 어레이 사이즈( $N \times M$ )에 따라 다양한 참조 패턴을 구성하고 제안할 수 있다. 본 논문에서는 한 예로 그림 2와 같은 참조 LED 패턴을 사용한 어레이 검출 방법을 제안하며, 이러한 패턴을 선정한 배경 및 이유는 어레이 검출 목적 외에도 BER 성능 개선을 염두에 두고 선정하였으며 부가적인 선정 이유는 다음과 같다.

- LED OOK 송수신 특성상 영상처리로 ON/OFF를 판정할 경우, 발생하는 오류는 대부분 OFF를 ON으로 잘못 판정하는 경우이고 반대인 경우는 거의 발생하지 않는다.
- 참조 어레이 패턴(상대적으로 악한 조건)에서 ON/OFF 각각의 휘도 평균값을 계산하고, 이에 근거한 초기 임계값( $Th_0$ )을 결정한다. 여기서 상대적으로 악한 조건이란 OFF-LED가 주위의 ON-LED로부터 영향을 많이 받는 조건을 의미한다.
- ISI(Inter-Symbol-Interference, 심벌간간섭)를 극복(에러 정정)하는데 사용할 평균값 차이 임계값( $Th_d$ )을 결정하는데 이용할 수 있다. 여기서 ISI는 OFF-LED가 인접한 ON-LED로부터 받는 간섭 영향을 의미한다. 또한  $Th_d$ 의 결정 방법은 다음절에서 설명한다.

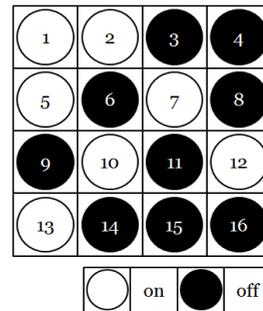


그림 2. 제안한 참조 LED 어레이 패턴 예시  
Fig. 2. Example of suggested reference LED array pattern.

3.2 LED 어레이 비트 판정 방법 및 오류 정정을 통한 성능개선

전체적으로, 초기 임계값에 의해 LED ON/OFF를 결정하는 1단계와 ISI의 영향으로 발생하는 에러를 검사하고 정정하는 2단계로 진행된다. 그림 3은  $N \times N$

사이즈의 LED 어레이 예를 보여준다. 그림에서  $L_i$ 는  $i$ 번째 LED를 나타내고,  $L_{adj}$ 는  $i$ 번째 LED와 인접한(상하좌우) LED를 나타낸다.

- 1 단계: 초기 임계값을 통한 ON/OFF 판정
  - ① 그림 2의 참조 LED 어레이로부터 LED ON에 대한 휘도 평균값( $ON_{avg}$ )과 OFF에 대한 휘도 평균값( $OFF_{avg}$ )을 구한다.
  - ② 비트(0 or 1)를 판정하기 위한 초기 임계값( $Th_0$ )을 결정한다.

$$Th_0 = \frac{ON_{avg} + OFF_{avg}}{2} \quad (7)$$

- ③ 수신 받은 LED 어레이 영상으로부터 각 LED 별로 영역을 구분한다. 각 LED 영역 구분은 해당 LED 정보의 신뢰도를 높이기 위해(또한 이웃한 LED로부터의 ISI를 줄이기 위해) 그림 3에서 보는 것처럼 해당 LED 이미지 내의 사각형 영역만을 고려한다.
- ④ 식 (7)에서 정한 임계값을 기준으로, 영상의 휘도 정보처리를 통해 각 LED의 정보 비트를 판정한다.

2 단계: ISI로 인한 오류 정정

- ⑤ 1 단계 결과로 정해진 각 LED별 정보비트를 왼쪽 상단 LED부터 순차적으로 재검사한다. LED OOK 전송 특성상 발생하는 오류는 모두 OFF를 ON으로 잘못 판정해서 발생한다. 이 특성을 이용하여 1단계 판정 결과에서 "1"(ON)으로 판정된 경우에만 재검증 한다.
- ⑥ 인접한 LED 정보 비트와의 배타적 논리합(XOR; Exclusive OR)을 계산하고  $XOR = 0$  일 경우 해당 LED( $L_i$ )와 인접한 LED( $L_{adj}$ )와의 평균값 차이를 계산해 차이 임계값( $Th_d$ )과

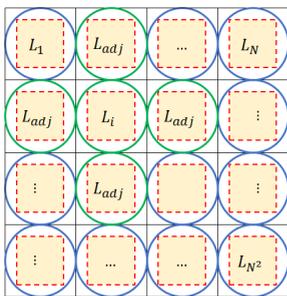


그림 3.  $N \times N$  사이즈의 LED 어레이 예  
Fig. 3. Example of a LED array of size  $N \times N$ .

비교한다. 여기서  $Th_d$ 는 실험을 통해 인접한 2개의 LED(ON) 평균값은 최대 1~2 밖에 차이가 나지 않는다는 실험결과를 토대로 충분한 여유도(margin)를 고려하여 일단 5로 설정하였다. 이 정보를 근거로 1 단계에서 판정한 결과를 검증하고 오류를 정정하여 BER 성능을 개선한다. 다시 말해, 인접한 LED 정보 비트와  $XOR = 0$  이고 해당 LED와 인접한 LED의 평균값 차이가 음이고 차이 임계값( $Th_d$ )의 음수보다 작을 경우만 오류로 판단하고 해당 비트를 반전시킨다. 식 (8)을 만족하면 오류로 판정하여 정정하고, 아니면 1 단계에서의 판정을 고수한다.

$$XOR_{adj} = 0 \text{ AND } (E_{L_i} - E_{L_{adj}}) < -Th_d \quad (8)$$

여기서  $E_{L_i}$ 는 해당 LED( $L_i$ )의 평균값,  $E_{L_{adj}}$ 는 인접한 LED( $L_{adj}$ )의 평균값,  $XOR_{adj}$ 는 인접한 LED 정보 비트와의 배타적 논리합을 나타낸다. 그림 4는 1단계~2단계의 전체적인 흐름도를 나타낸다.

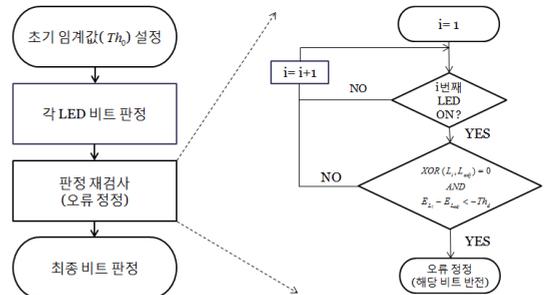


그림 4. LED 어레이 비트 판정 방법 및 오류 정정 흐름도  
Fig. 4. Flowchart of bit decision and error correction of LED array.

## IV. 실험 결과

### 4.1 실험 환경

본 논문에서는 Visual-MIMO 통신 실험을 위해 Atmega 128 모듈, 4X4 LED 어레이 (HB10p-white 고휘도 LED 16개), 이미지 센서(logitech webcam pro 9000)을 사용하였다. 그림 5는 Visual-MIMO 통신 실험 하드웨어 구성 사진을 나타내며, 구성 요소는 다음과 같다.

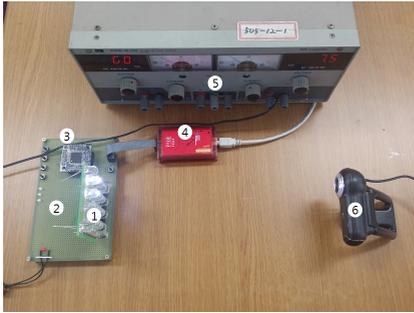


그림 5. Visual-MIMO 통신 실험 하드웨어 구성 사진  
Fig. 5. Configuration of Visual-MIMO communication experiment.

- ① 4X4 LED 어레이: HB10p-white 고휘도 LED 16개
- ② PCB 보드
- ③ Atmega 128 모듈
- ④ JTAG
- ⑤ 파워 서플라이
- ⑥ 웹캠 (logitech webcam pro 9000)

#### 4.2 실험 방법

PN 코드 생성기를 통해 만들어진 입력 데이터 비트가 LED 어레이를 통해 병렬로 웹캠으로 전송되면, Matlab을 이용하여 수신된 비트를 실시간으로 판정하여 command window 상에 보여주고 BER을 계산한다. 그림 6은 실험 방법 및 과정의 전체 흐름도 (flow chart)를 나타낸다.

본 논문에서는 그레이 레벨 히스토그램을 이용하여 심벌(비트)을 구분하였다. 히스토그램의 장점은 도수 분포의 상태를 한눈에 볼 수 있다는 점이다. 히스토그램을 이용하면 심벌을 구분(ON/OFF 판정)하기 위한

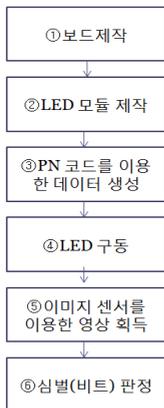


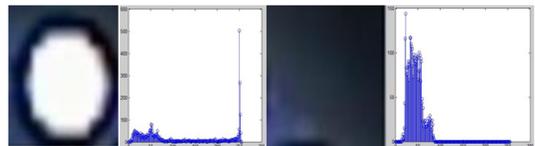
그림 6. 실험 방법 및 과정의 전체 흐름도  
Fig. 6. Flowchart of experimental procedure.

임계값을 쉽게 구할 수 있다<sup>[11]</sup>.

그림 7은 LED의 ON/OFF 상태에서의 이미지를 그레이 레벨로 변환한 후 히스토그램을 나타낸 것이다. 여기서 LED 어레이에 대응하는 이미지 사이즈는 480x480이고, LED 한 개에 해당하는 이미지 사이즈는 120x120이다.

그림 7의 히스토그램을 이용하여 웹캠 영상으로부터 획득한 LED 어레이의 정보를 분석하여 구한 심벌 정보를 Matlab의 command window 상에 표시하여 송신부에서 전송한 심벌과 일치하는 지를 확인한다.

LED 심벌 판정 (ON/OFF 판정)시 각 LED의 판정 영역을 그림 8과 같이 인접한 ON-LED의 간섭을 줄이고자 LED 이미지 내부 사각형 영역으로 설정하여 판정한다.



(a) LED ON (b) LED OFF

그림 7. LED ON/OFF에 대한 히스토그램 분포도  
Fig. 7. Histogram of LED ON/OFF image.

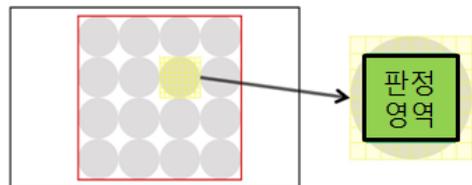


그림 8. LED 이미지 내부 사각형 영역으로 설정하여 판정  
Fig. 8. Bit decision by setting the rectangle area inside of a bit image.

#### 4.3 실험 결과

LED 어레이의 외관 및 구성 특성(환경)은 카메라에 의해 수신된 비트(또는 심벌)의 정확도에 크게 영향을 미친다. 본 실험에서는 우선적으로 LED 어레이와 카메라 사이의 거리에 따른 성능을 분석한다. LED 어레이로부터 전송된 데이터는 카메라 이미지 센서의 매 프레임마다 수신된다. PN 코드 생성기를 통해 생성된 송신 비트(심벌)와 수신 비트(심벌)을 비교하여 BER을 계산한다. 또한 인접한 LED로부터의 간섭을 최소화하고, ISI로 인한 오류를 정정하여 BER 성능을 개선한다.

4.3.1 영상처리를 이용한 심벌(비트) 구분 및 판정

• ON/OFF 판정영역 사이즈 및 분리 방법

먼저 그림 2의 어레이 사이즈 (480x480)를 16개의 균등한 크기(하나의 LED에 해당하는 (120x120))로 분할한 후, 이웃한 LED로부터의 ISI로 인한 ON/OFF 판정 오류를 줄이기 위한 해당 LED 이미지 내의 사각형 영역을 실험을 통해 (120x120의 사각형 크기를 줄여가면서) 적절한 ON/OFF 판정영역 사이즈를 정한다. 표 1은 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 판정영역 사이즈 및 거리에 따른 ON/OFF 휘도 평균값을 나타낸다.

- ON의 경우에는 평균값이 수렴하는 시점과 판정영역의 픽셀 수에 따른 확률적 신뢰도를 고려하여 실험적으로 판정영역 사이즈를 60x60으로 정한다.
- OFF의 경우에는 인접한 ON-LED로부터의 간섭 영향과 LED 소재 자체의 휘도 특성에 의한 밝기 정도를 고려하여 판정영역 사이즈를 60x60으로 정한다.
- 또한, 양호한 통신 채널 환경(예를 들어 거리 = 1m)을 가정하고, 사방에 ON-LED로 둘러싸인 OFF-LED에 대하여 판정영역(사각형 크기)을 줄여가면서  $OFF_{avg}$ 가 수렴하는(ISI가 배제되는) 시점의 크기를 적절한 ON/OFF 판정영역 크기로 설정한다.

• 인접한 LED로부터의 간섭을 배제한 비트 (ON/OFF) 구분 및 평균값

인접한 LED로부터 영향을 받지 않는 상태의 LED ON과 OFF에 대한 평균값을 실험을 통해 구하고 ON/OFF 판정을 위한 임계값 (경계값) 결정에 참조하며, 임계값의 하한 (low limit)으로 삼는다. 예를 들어

표 1. 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 판정영역 사이즈 및 거리에 따른 ON/OFF 휘도 평균값  
Table 1. Average value of ON/OFF brightness according to the decision area size and distance variation.

거리 (m) \ 판정영역 크기	0.5		1		2		3	
	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
120x120	138.2	198.5	139.6	226.5	151.7	227.5	170.7	230.5
100x100	138.7	258.4	136.1	245.1	152.3	242.9	169.3	243.1
80x80	140.9	251.8	139.6	250.9	155.7	247.7	168.7	249.8
60x60	142.4	252.0	147.4	251.6	156.4	249	167.5	251.8
50x50	146.0	252.3	151.6	251.7	156.7	251.2	165.5	251.2
40x40	149.4	252.7	154.9	251.8	156.9	251.3	162.4	251.9

1m 거리에서 판정영역 60x60의 임계 하한값은 182이다. 표 2는 거리 변화에 따른 휘도평균값을 정리한 것이다.

위 표에서 60x60(ON)의 경우, 거리 증가에 따라 평균값의 큰 변화는 없으나, 거리가 멀어질수록 값이 약간 감소하는 이유는 거리가 멀어지면 수신되는 빛의 세기가 감소하기 때문이다. 60x60의 경우 120x120의 경우보다 평균값이 큰 이유는 LED 소재 자체의 휘도 특성이 강조되기 때문이다.

표 2. 인접한 LED로부터의 간섭을 배제한 거리에 따른 ON/OFF 평균값  
Table 2. Average value of ON/OFF brightness according to the distance variation without ISI.

거리(m)		0.5	1	2	3	4
그레이 레벨 평균값 (ON)	120x120	223.7	240.9	240.7	242.3	240.5
	60x60	252.3	252.1	250.4	248.4	247.8
그레이 레벨 평균값 (OFF)	120x120	89.6	105.3	102.9	102.9	113.2
	60x60	102.5	113.8	112.5	112.5	113.8

• 참조(기준) LED 어레이 패턴을 이용한 비트 판별 및 성능 향상

참조 LED 어레이 패턴(그림 2 예시)으로부터 ON과 OFF에 대한 평균값( $ON_{avg}$ 와  $OFF_{avg}$ )을 각각 구하고, 이로부터 실제 ON/OFF 판정을 위한 초기 임계값( $Th_0$ )을 단순히 식 (7)과 같이 구한다. 표 3은 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 거리 변화에 따른 ON/OFF의 휘도 평균값과 초기 임계값을 정리한 것이다. 참조 LED패턴의 ON/OFF에 대한 평균값은 ON인 경우 표 2(인접한 LED로부터의 간섭을 배제) 결과와 유사하나, OFF인 경우에는 인접한 ON-LED로부터의 간섭과 거리가 증가함에 따라 빛의 번짐으로 인하여 평균값이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이에 따라 초기 임계값도 표 3에 보이는 바와 같이 거리에 따라 증가하게 된다.

성질 1: Visual-MIMO에서 OOK 전송시 RF 통신 특성과 달리 LED의 경우에 OFF를 ON으로 판정하는 오류만 존재하고 근본적으로 ON을 OFF로 판정하는 오류는 존재하지 않는다.

성질 2: 오류가 발생할 확률이 가장 높은 경우는 하나의 OFF된 LED를 중심으로 사방(상하좌우)에 모든 LED가 ON되어 ISI가 가장 큰 경우이다.

ON/OFF 판정은 다음 2단계로 진행된다.

1 단계: 초기 임계값을 기준으로 각 LED의 수신 이미지에 대하여 ON/OFF 판정을 한다.

표 3. 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 거리에 따른 ON/OFF 휘도 평균값

Table 3. Average value of ON/OFF brightness according to the distance variation using LED array pattern

거리(m)		0.5	1	2	2.5	3	4
그레이 레벨 평균값 (ON)	120x120	198.5	226.5	227.5	228.2	230.5	235.8
	60x60	250.7	251.6	249.0	251.2	251.8	250.3
그레이 레벨 평균값 (OFF)	120x120	138.2	139.6	151.7	164.8	170.7	195.4
	60x60	142.4	147.4	156.4	162.9	167.5	184.1
초기 임계값 ( $Th_0$ )	60x60	196.5	199.5	202.7	207.1	209.6	217.2

2 단계: 1 단계 후 성질 1에 근거하여 “1”(ON)으로 판정된 경우에만 재검사를 수행한다. 식 (8)을 사용하여 인접한 비트와 XOR = 0이고 해당 평균값이 인접 평균값보다 차이 임계값 ( $Th_d$ ) 이상 작을 경우에만 오류로 판정하고 정정한다.

• 참조 어레이 패턴을 통한 ISI 영향 분석

그림 2의 참조 어레이 패턴을 통해 ISI 영향을 파악하고 오류 발생 가능성 판별 기준에 참조한다. ISI 정도를 파악하기 위해 다음과 같이 3가지 경우에 대한 평균값을 구한다.

- (1) 하나의 OFF-LED에 대하여 인접한 2개의 LED 가 ON (예: ③번 LED)
- (2) 하나의 OFF-LED에 대하여 인접한 3개의 LED 가 ON (예: ⑪번 LED)

표 4. 인접한 ON-LED의 간섭에 의한 OFF-LED의 휘도 평균값

Table 4. Average value of OFF-LED brightness under the interference of adjacent ON-LEDs.

거리(m)		0.5	1	2	2.5	3	4
③,④번 LED 비교	③의 평균	124.8	132.5	149.6	157.3	163.8	182.1
	④의 평균	119.1	125.3	132.5	132.9	133.9	149.2
	차이값 (③-④)	5.7	7.2	17.1	24.4	29.9	32.9
⑪,⑮번 LED 비교	⑪의 평균	131.7	136.6	163.6	187.3	198.7	247.5
	⑮의 평균	120	116.2	121.3	123.1	127.3	131.2
	차이값 (⑪-⑮)	11.7	20.4	42.3	54.2	71.4	116.3
⑥번 LED	평균값	147.1	159.8	168.2	201.6	230.3	247.5

(3) 하나의 OFF-LED에 대하여 인접한 4개의 LED 가 ON (예: ⑥번 LED)

표 4에서 보는 바와 같이, 인접한 ON-LED의 개수가 증가하면 간섭(ISI)에 의하여 OFF-LED의 평균값이 증가한다. 증가된 평균값은 오류 정정시 사용될 차이 임계값( $Th_d$ ) 결정에 참조한다. 간섭이 가장 심한 ⑥번 LED를 참조하면, 2.5m의 경우에는 평균값이 초기 임계값보다 작기 때문에 오류 발생 확률이 매우 낮고, 3m의 경우에는 평균값이 초기 임계값보다 크기 때문에 오류 발생 확률이 매우 높다고 판단할 수 있다.

4.3.2 제안한 방법 (그림 4)을 통한 오류 정정 및 BER 성능 향상

오류 정정 전후의 거리에 따른 BER을 구하고 성능 개선 효과를 입증한다. 표 5는 10000개의 임의의 데이터 비트를 전송한 후, 거리에 따른 비트 오류 발생 개수를 나타내고, 그림 9는 이 결과를 도시한 것이다.

표 5와 그림 9를 통하여 오류 정정 전에는 약 2.6m 부터 BER이  $10^{-3}$  보다 커지기 시작하고, 오류정정 후에는 약 3m 부터 BER이  $10^{-3}$  보다 커지기 시작함을 알 수 있다. 다시 말해, BER =  $10^{-3}$  기준으로 오류정

표 5. 거리에 따른 BER  
Table 5. BER vs. distance.

거리(m)		0.5	1	2	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3
비트 오류 발생 개수	오류정정 전	0	0	0	3	17	24	79	163	436
	오류정정 후	0	0	0	0	0	2	3	7	38

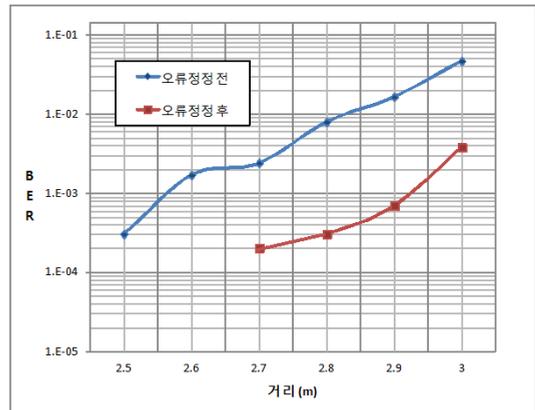


그림 9. 거리에 따른 BER 그래프 (오류정정 전/오류정정 후)  
Fig. 9. BER vs. distance (before error correction/after error correction).

정을 통해 약 0.4m의 전송거리 이득을 얻게 되었다.

### V. 결 론

본 논문에서는 휘도 정보 기반의 영상 처리를 통해 BER 성능을 개선하였다. 잡음과 거리의 변화에 따른 성능 분석은 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 또한 이웃한 LED로부터의 ISI로 인한 ON/OFF 판정 오류를 줄이기 위한 해당 LED 이미지 내의 사각형 영역 (판정 영역) 사이즈 및 분리 방법을 제시하였으며, 인접한 ON-LED로부터의 간섭 영향과 LED 소재 자체의 휘도 특성에 의한 밝기 정도를 고려하여 판정 영역 사이즈를 정하였다. 무엇보다도 참조 어레이 패턴을 통해 비트(ON/OFF)를 구분하기 위한 효율적인 휘도 임계값을 제시한 후, ISI 영향을 분석하고 ISI로 인한 오류를 정정하여 BER 성능 향상을 성취하였다.

### References

[1] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, pp. 100-107, Feb. 2004.

[2] J. Grubor, J.-O. Gaete, J. Waleski, S. Randel, and K. Langer, "High-speed wireless indoor communication via visible light," *ITG Fachbericht*, vol. 198, pp. 203-208, 2007.

[3] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas "Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 3, pp. 56-62, Sept. 2011.

[4] T. Nagura, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, "Tracking an LED array transmitter for visible light communications in the driving situation," *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 765-769, Sept. 19-22, 2010.

[5] M. Varga, A. Ashok, M. Gruteser, N. Mandayam, "Demo: Visual MIMO based LED-camera communication: applied to automobile safety," *MobiSys'11 Proceedings of the 9th international conference on Mobile*

*systems, applications, and services*, pp. 383-384, ACM New York, NY, USA, 2011

[6] A. Ashok, M. Gruteser, N. B. Mandayam, J. Silva, K. Dana, and M.Varga, "Challenge: Mobile optical networks through visual mimo," *In MobiCom'10: Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 105-112, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[7] A. Ashokz, M. Gruteserz, N. Mandayamz, and K. Dana, "Characterizing multiplexing and diversity in visual MIMO," *45th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1-6, Mar. 2011.

[8] J. Yoo and S. Jung, "Cognitive vision communication based on LED array and image sensor," *Proc. SPIE 8558, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology II*, November 2012

[9] S. Arai et al., "Feasible study of road-to-vehicle communication system using LED array and high-speed camera," *15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting*, 2008.

[10] W. Yuan, K. Dana, M.I Varga, A. Ashok, M. Gruteser, and N. Mandayam, "Computer vision methods for visual MIMO optical system," *2011 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 37-43, June 2011.

[11] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, 1992.

백 정 훈 (Jeong-hoon Back)



2012년 : 국민대학교 전자공학  
학사  
2014년 : 국민대학교 전자공학  
석사  
<관심분야> 통신공학, 영상처  
리, 가시광통신

**윤 기 방 (Kee-bang Yun)**



1976년 : 송실대학교 전자공학  
학사  
1981년 : 송실대학교 전자공학  
석사  
2001년 : 국민대학교 전자공학  
박사  
1981년~2010년 : 인천시립전문  
대학 교수

2010~현재 : 인천대학교 교수

<관심분야> 신호처리, 가시광통신

**김 기 두 (Ki-doo Kim)**



1980년 : 서강대학교 전자공학  
과 졸업  
1980년~1985년 : 국방과학연구  
소 연구원  
1988년 7월 : 미국 펜실베니아  
주립대학교 전자공학(MS)  
1990년 12월 : 미국 펜실베니아  
주립대학교 전자공학(Ph.D.)

1997년~1998년 : 미국 UCSD, Visiting Scholar

1991년~현재 : 국민대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 디지털통신, 디지털신호처리

**박 영 일 (Youngil Park)(사진교체 요망)**



1987년 : 서울대학교 전기 공학  
과 졸업  
1995년 : Texas A&M Univ.  
공학박사  
1995년~1999년 : KT 연구개발  
본부 선임연구원  
1999년~현재 : 국민대학교 전자  
공학부 교수

<관심분야> 광가입자망, 광대역 통합망, 가시광통신