

Visual-MIMO 시스템에서의 다중화-다이버시티 모드 전환 결정

김 지원*, 김 기 두^o

The Determination of Multiplexing-Diversity Transition Mode in the Visual-MIMO System

Ji-won Kim*, Ki-doo Kim^o

요 약

최근 LED 어레이와 카메라간의 통신 (일명, 'Visual-MIMO') 연구가 활발히 진행되고 있으며, 차량 및 스마트폰 등으로의 응용이 극대화될 것으로 기대된다. LED 어레이에서 ISI 정도가 심해지면 비트 판정에 오류가 발생하므로 다중화에서 다이버시티로의 전환이 필요하다. 본 논문에서는 참조 어레이 패턴의 사용 유무에 따라 각각 다이버시티로의 전환시점을 결정하기 위한 방법을 제시하고 검증한다. 참조 어레이 패턴을 사용할 경우에는 수신 영상의 휘도 정보를 이용하여 다중화에서 다이버시티 모드로의 전환 시점 결정한다. 참조 어레이 패턴을 사용하지 않을 경우에는 거리에 따른 전체 영상 대비 LED 어레이 영상의 크기를 이용한다. ISI가 심해지는 거리에서의 LED 어레이의 크기를 파악하여 다이버시티로의 전환시점 결정에 이용한다. LED간 ISI 정도 및 거리의 변화에 따라 제안한 방법의 성능을 분석하고 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증한다.

Key Words : LED Communication, Camera, LED Array, Visual-MIMO, Multiplexing, Diversity

ABSTRACT

Recently, researches about the communication between LED array and the camera (alias 'Visual-MIMO'), have been actively conducted, and the application to the vehicle and a smart phone is expected to be maximized. Since the bit error may occur if the ISI is severe in a LED array, it is necessary to switch from the multiplexing to the diversity mode. In this paper, according to the use or not of a reference array pattern, a method for determining the transition time to the diversity mode is suggested and verified. When using the reference pattern, it determines the transition time to the diversity mode from the multiplexing using the brightness information of the received image. If the reference array pattern is not used, the size of LED array compared to the entire image according to the distance is used and the size of the LED array at the distance of a severe ISI may be used for the determination of transition time to the diversity. Finally, the proposed method is verified through the simulation and hardware experiments as well as by analyzing the performance in accordance with the ISI level and the distance.

* 본 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원[No. NRF-2015R1D1A1A01061396]과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원[No. 2015R1A5A7037615]을 받아 수행하였음.

• First Author : Kookmin University School of Electronics Engineering, kjwon777@kookmin.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : KICS2015-11-372, Received November 23, 2015; Revised January 11, 2016; Accepted January 15, 2016

I. 서 론

LED는 조명이 뿐만 아니라, 통신 소자로서의 응용 가능성도 증대되고 있으며^[1-3], 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^[4-12] 차량 및 스마트폰 등으로의 응용이 극대화될 것으로 기대된다. 몇 가지 응용 사례를 들면 다음과 같다.

- 차량과 도로 통신
(Road-to-vehicle communication)
- 차량 간 통신
(Vehicle-to-vehicle communication)
- 스마트 폰 (휴대용 카메라)과 전자 광고판 통신
(Smart phone(hand-held cameras)-to-electronic billboard communication)
- 로봇 대 로봇 통신
(Robot-to-robot communication)
- 고정 감시 카메라와 핸드-헬드 디스플레이
(Hand-held displays to fixed surveillance cameras)

본 논문에서의 관심 대상은 ‘Visual-MIMO’ 시스템이며, 송신기와 수신기로 각각 LED 어레이와 카메라를 채택한다. LED 어레이에 의해 전송된 광 신호는 카메라의 PD 어레이 (다중 픽셀)로 수신된다. 카메라의 다중픽셀은 본질적으로 고지향성 수신 소자들의 어레이로 간주될 수 있다. 이러한 구조는 채널의 다른 광원으로부터의 간섭 및 잡음을 감소시켜준다. 또한 송신기로부터 전송된 신호들 중에서 강한 신호를 선택 및 결합해 수신함으로써 SNR (Signal to Noise Ratio, 신호대잡음비)을 크게 만들 수 있다. 수신기로 카메라를 사용하면 광각이 넓기 때문에 LED 어레이의 개별 LED의 위치를 쉽게 인식할 수 있다. 무엇보다도 다중 LED와 다중 픽셀간의 MIMO 통신은 다중화 (multiplexing)를 통한 전송 속도의 증가와 다이버시티를 통한 정보 데이터의 신뢰성 향상을 가능케 한다.

반면에 수신기로 카메라를 사용하면 극복해야할 단점도 존재한다. 카메라가 LED 어레이로부터 멀어지

면, 픽셀 크기가 작아지고 초점이 틀어져 수신된 이미지가 흐려지고 인접한 LED 구분이 어렵게 된다. 다시 말해 수신된 이미지에는 높은 공간 주파수 성분이 손실되고, 주로 낮은 공간 주파수 성분이 존재한다. Visual-MIMO에서 수신 신호는 본질적으로 영상이기 때문에 RF 무선 채널의 중요한 특성에 해당하는 거리 기반 감쇄 및 다중 경로 페이딩에 영향을 받기 보다는 원근에 따른 시각적 왜곡에 영향을 많이 받는다. 심각한 시각적 왜곡으로는 거리에 따른 영상 크기의 감소와 시각 각도에 따른 틀어짐과 회전, 그리고 대상 (target) 어레이의 화면 중심에서 이탈 (벗어남)을 들 수 있다. 또한 영상을 캡처하는 동안 초점이 흔들려 생긴 렌즈 블러(blur)가 영상의 화질을 심각하게 저하시킬 수 있다.

본 논문의 목적은 Visual-MIMO 시스템에서 참조 어레이 패턴 사용 유무에 따라 각각 다중화에서 다이버시티 모드로의 전환 시점 결정 방법을 제시하는 것이며, 이에 따른 데이터 전송량과 BER 성능의 개선 정도를 분석한다. 또한 잡음과 거리의 변화에 따른 성능 분석은 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증한다.

2장에서는 Visual-MIMO 기술 및 시스템에 대하여 기술한다. 3장에서는 다중화에서 다이버시티 모드로의 전환 시점 결정 방법을 제시하고, 데이터 전송량과 BER 성능의 개선 정도를 분석한다. 참조 어레이 패턴을 사용하지 않을 경우에는 ISI가 심해지는 거리에서의 LED 어레이의 크기를 파악하여 다이버시티로의 전환시점 결정에 이용한다. 4장에서는 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. Visual-MIMO 시스템

2.1 Visual-MIMO 특성

Visual-MIMO Visual-MIMO 시스템은 그림 1에서 보는 것처럼 LED 어레이와 카메라간의 통신 시스템이며, LEA (LED Array)의 모든 LED가 송신기 역할을 담당하고, 카메라의 모든 픽셀이 수신기 역할을 하게 된다^[7]. LED 어레이에 의한 무선 광전송 데이터는 카메라의 픽셀 어레이로 수신된다. 픽셀은 본질적으로 고지향성 수신 소자이므로 채널에서 다른 광원으로부터의 간섭과 잡음을 감소시킬 수 있다. 또한 송신기로부터 전송된 신호들 중에서 강한 신호를 선택 및 결합해 수신함으로써 SNR을 크게 만들 수 있다. 이것은 RF-MIMO의 경우와 매우 유사해 보이지만

카메라 수신단에서는 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^[5].

Visual-MIMO를 적용하면 전송속도의 증가와 전송거리 증대를 성취할 수 있는데 서로간의 상충관계도 고려해야 한다. "다중화"와 같은 MIMO 기술을 사용하면 광 송신 어레이의 다중 LED를 통해 비트 스트림을 독립적으로 전송하고 카메라의 픽셀 그룹에서 수신함으로써 데이터 전송률을 증가시킬 수 있다. 한편 시스템은 어레이의 모든 LED에 동일한 정보를 전송하여 다이버시티 효과로 인한 SNR 증가로 전송거리를 늘릴 수 있다. Visual-MIMO의 다중화와 다이버시티 기술은 RF-MIMO 시스템에서의 기술과 개념이 비슷해 보이지만, 매우 다른 채널 특성으로 인해 차별된 MIMO 이득을 제공한다. 다시 말해 병렬 채널을 통한 다중화와 다이버시티는 개념적으로 RF MIMO와 유사해 보이지만 채널 및 송수신 소자 특성이 RF와 매우 다르기 때문에 이를 고려한 성능 분석이 요구된다. Visual-MIMO에서는 채널에서의 원근에 따른 시각적 왜곡에 영향을 많이 받는 반면에, RF-MIMO의 경우에는 거리에 따른 감쇄 및 다중경로 페이딩에 영향을 많이 받는다.

Visual-MIMO 통신이 갖는 몇 가지 고유한 특성은 RF 기반의 무선 통신에 비해 이점을 제공할 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^[10]. 그림 2는 Visual-MIMO 시스템의 블록 구조도를 나타낸다^[11].

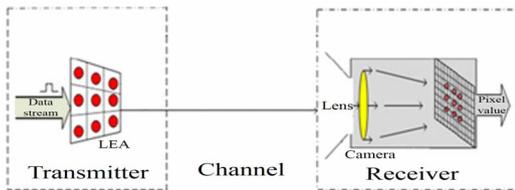


그림 1. LED 어레이와 카메라 간의 Visual-MIMO 통신 모델
Fig. 1. Visual-MIMO communication model between LED array and camera.

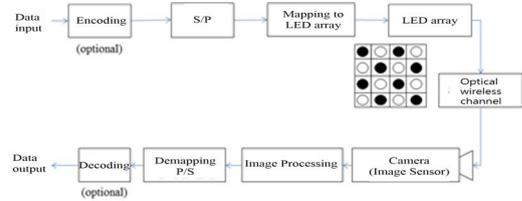


그림 2. Visual-MIMO 시스템의 블록 구조도
Fig. 2. Configuration of Visual-MIMO system.

2.2 채널 용량

Visual-MIMO에서의 다중화와 다이버시티 효과를 정량화하기 위하여 채널용량 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$C = \begin{cases} \sum_{k=1}^K W \log_2(1 + SNR_{cam,k}), & d \leq d^* \\ W \log_2(1 + \sum_{k=1}^K SNR_{cam,k}), & d > d^* \end{cases} \quad (1)$$

$$SNR_{cam,k} = \frac{\sum_{\forall I_k(i,j)=1} (h_k(i,j) x_k)^2}{\sum_{\forall I_k(i,j)=1} n_k^2(i,j)} \quad (2)$$

여기서 W 는 수신단의 샘플링율 (또는 카메라 프레임율)을 나타내며, d^* 는 다중화가 유효하게 유지되는 임계거리를 나타낸다. $SNR_{cam,k}$ 는 k번째 LED로부터 카메라 수신부까지의 채널 신호 대 잡음비를 나타낸다. $I_k(i,j)$ 는 (i, j)번째 픽셀이 k번째 LED로부터 신호를 받는지의 여부를 가리키며, 1 또는 0의 값을 갖는다. 또한 $h_k(i,j)$ 는 k번째 LED로부터 픽셀(i, j)까지의 채널 DC 계인을 나타내고, x_k 와 $n_k(i,j)$ 는 각각 입력 데이터열과 AWGN을 나타낸다^[7].

Visual-MIMO 시스템에서 빛의 확산이 존재하지 않을 경우 거리가 멀어져도 다중화를 통한 채널 용량 (데이터 전송속도)의 증가를 기대할 수 있다. 확산이 없을 경우 주변 데이터에 대한 간섭이 없어서 병렬 채널을 통해 정상적으로 데이터를 전송할 수 있기 때문이다. 하지만 확산이 심해지면 다중화 효과 (전송거리)는 감소되며, 수신 비트 오류를 줄이기 위해 다중화 모드에서 다이버시티 모드로 전환시켜야한다. 모드 전환으로 수신 데이터의 신뢰도는 향상시킬 수 있지만 전송 용량은 상대적으로 감소하게 된다.

Visual-MIMO 시스템에서는 송수신단 간의 거리 및 각도를 고려하여 다중화와 다이버시티 모드를 이

산적으로 전환시키는 것이 가능하며 데이터 전송량 증대와 신뢰도 향상 관점에서 유리해진다. 짧은 거리에서는 다중화 모드로 운용하고 거리가 멀어지면 다이버시티 모드로 운용하는 것이 일반적이다. Visual-MIMO의 채널용량은 거리에 따른 의존도가 심하다. 거리가 멀어질 경우 원근에 따른 시각적 왜곡 때문에 송수신단이 완벽히 정렬된 상태일지라도 다중화 효과를 더 이상 기대할 수 없는 시점이 생기게 된다. 이 시점부터는 다이버시티를 적용하여 SNR 증가에 따른 용량의 증대와 데이터 신뢰성 향상에 따른 BER 성능 개선을 기대할 수 있다.

III. 다중화-다이버시티 모드 전환

LED 어레이에서 ISI(Inter-Symbol-Interference, 심벌간 간섭) 정도가 심해지면 비트 판정을 통한 판정이 어려워져 다중화에서 다이버시티로의 전환이 필요하다. 여기서 ISI는 OFF-LED가 인접한 ON-LED로부터 받는 간섭 영향을 의미한다. 본 논문에서는 참조 어레이 패턴의 사용 유무에 따라 각각 다이버시티로의 전환시점을 결정하기 위한 방법을 제시하고 검증한다.

확산(Diffusion)이란 빛이 흡수되지 않고 반사되어 일정하지 않은 방향으로 흩어지는 것을 의미한다. 확산의 정도는 거리가 멀어짐에 따라 점점 심해지고 이는 LED 어레이에서의 ISI 정도를 점점 심하게 만든다. 다중화 상태에서 ISI가 심해져 더 이상 에러 정정이 불가능해지는 시점에서 데이터의 신뢰도를 높이기 위한 다이버시티로의 전환이 필요하다. Visual-MIMO 시스템에서 다이버시티로의 전환은 그림 3과 같이 이뤄진다. 다중화 모드에서는 16개의 LED를 사용하여

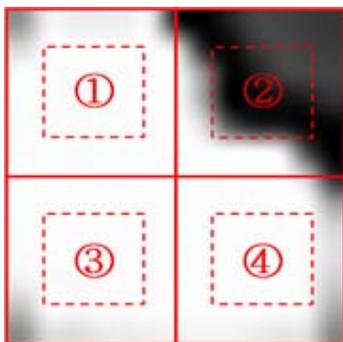


그림 3. 다이버시티가 적용된 LED 어레이의 영상과 판정영역 설정
Fig. 3. Image of LED array with diversity and setting of decision area.

각각 하나의 비트를 전송하였는데, 다이버시티 모드에서는 ISI에 의해 OFF-LED가 ON-LED로 판정되는 것을 방지하기 위한 목적으로 하나의 비트의 전송을 위해 총 4개의 LED를 사용하게 된다. 비트가 '0'일 경우 4개가 모두 동시에 꺼지고 비트가 '1'일 경우 4개 모두 켜지게 된다. 그림 3의 ①, ③, ④번에 해당하는 부분의 경우 4개의 LED가 모두 ON 된 상태이고 ②번의 경우 4개의 LED가 모두 OFF 된 것이다.

3.1 참조 LED 어레이 패턴을 사용한 다중화-다이버시티 모드 전환

그림 4와 같은 참조 어레이 패턴^[11]을 사용할 경우에는 수신 영상의 휘도 정보를 이용하여 다중화에서 다이버시티 모드로의 전환 시점을 결정한다.

표 1은 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 거리 변화에 따른 ON/OFF의 평균값(ON_{avg} , OFF_{avg})과 초기 임계값(Th_0)을 정리한 것이다^[11].

$$Th_0 = \frac{ON_{avg} + OFF_{avg}}{2} \quad (3)$$

다중화에서 다이버시티로 전환하는 시점을 휘도 신호 기반 영상처리를 통해 결정하고 실험을 통해 검증한다. 참조 패턴 어레이에서 최악의 조건(하나의 OFF-LED가 사방에 ON-LED로 접한 경우)의 휘도 평균값을 거리의 변화에 따라 정리하면 표 2와 같다. 그림 5와 6은 각각 거리가 2m와 3m에 대한 이미지와 히스토그램을 보여준다.

표 2는 다중화 모드에서 다이버시티 모드로 전환하는 시점을 판단하는 데 참조하기 위하여 정리한 것이다. 전환 시점은 표 2에서의 OFF 평균값이 표 1에서

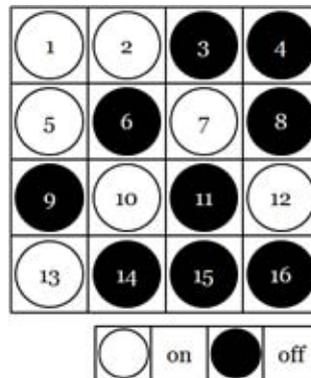


그림 4. 참조 LED 어레이 패턴 예시
Fig. 4. Example of suggested reference LED array pattern.

표 1. 참조 LED 어레이 패턴으로부터 구한 거리에 따른 ON/OFF 평균값

Table 1. Average value of ON/OFF brightness according to the distance using a reference LED pattern.

Distance(m)		0.5	1	2	2.5	3	4
Gray Level Average (ON_{avg})	120 x120	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
Gray Level Average (OFF_{avg})	120 x120	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
Initial Threshold (Th_0)	60x60	196.5	199.5	202.7	207.1	209.6	217.2

표 2. 한 개의 OFF-LED가 사방에 ON-LED로 접한 경우의 휘도 평균값

Table 2. Average brightness of a single OFF-LED surrounded on all sides by ON-LEDs.

Distance (m)	0.5	1	2	2.5	3	4
Gray Level Average (OFF_{avg})	147.1	159.8	168.2	201.6	230.3	247.5

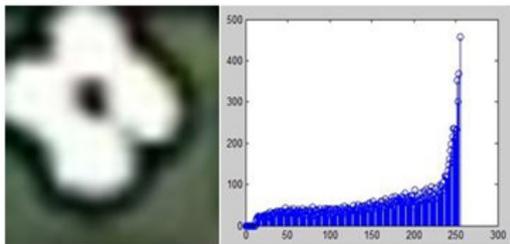


그림 5. OFF-LED가 사방에 ON-LED로 접한 경우 (거리: 2m)
Fig. 5. Case of a single OFF-LED surrounded on all sides by ON-LEDs. (distance: 2m)

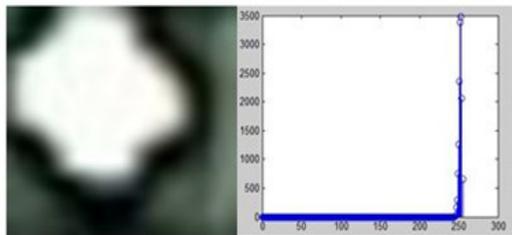


그림 6. OFF-LED가 사방에 ON-LED로 접한 경우 (거리: 3m)
Fig. 6. Case of a single OFF-LED surrounded on all sides by ON-LEDs. (distance: 3m)

의 초기 임계값 보다 크고, 오류 정정이 불가능한 시점으로 한다. 일단 제한한 참조 어레이 패턴을 기반으로 식 (4)의 조건을 만족하면 다이버시티 모드로 전환시킨다.

$$(OFF_{avg}(6th\ LED) > Th_0) \text{ AND } (-Th_d < (OFF_{avg}(6th\ LED) - ON_{avg})) \quad (4)$$

여기서 Th_d 는 ISI를 극복(에러 정정)하는데 사용되는 인접한 LED 휘도 평균값의 차이 임계값을 나타낸다. 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 5로 설정하였다^[11]. 예를 들어, 표 2로부터 3m의 경우에는 오류로 판정되나 오류 정정이 가능하고, 4m의 경우에는 위 조건을 만족하므로 (오류 정정이 불가하므로) 다이버시티 모드로 전환하여 BER 성능의 개선을 도모한다.

3.2 참조 어레이 패턴 없이 다이버시티 모드로의 전환

참조 LED 어레이 패턴을 사용하지 않고 다중화에서 다이버시티 모드로의 전환을 결정하기 위해 본 논문에서는 전체 영상 크기에서 LED 어레이가 차지하는 영상크기의 변화를 이용하고자 한다. 그림 7은 거리에 따라 LED 어레이가 차지하는 영상의 크기 및 LED 어레이의 확산 정도를 보여준다. 전체 영상과 LED 어레이 부분만을 잘라낸 후 영상을 480x480 크

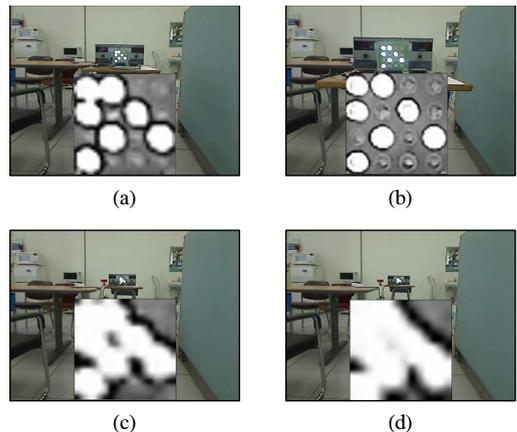


그림 7. 거리에 따라 LED 어레이가 차지하는 영상의 크기 및 LED 어레이의 확산 정도 (a) 0.5m (b) 1m (c) 2m (d) 2.5m
Fig. 7. Image size occupied by the LED array and brightness spreading with the distance (a) 0.5m (b) 1m (c) 2m (d) 2.5m

기로 확대해 그레이 레벨로 변환시킨 영상을 동시에 확인할 수 있다. 거리가 가까울 경우 전체영상에서 LED 어레이가 차지하는 부분이 크고 확산 정도가 약하다. 반면에 거리가 멀어질수록 LED 어레이가 차지하는 부분이 더 작아지고 확산 정도가 심해짐을 보인다.

본 논문에서는 이러한 관계를 실험적으로 파악하고자 한다. 거리를 변경하며 640x480의 전체영상 중 LED 어레이의 크기와 그림 8과 같이 LED 어레이 중 하나의 LED만을 켜 ISI의 정도를 동시에 파악한다. 전체 영상 중 LED 어레이 크기를 통해 ISI 정도를 파악하여 인접 OFF-LED에 간섭이 심할 때 다이버시티로 전환하기 위함이다.

ISI 정도의 측정은 다음과 같이 실행된다. 거리가 변경될 때마다 전체 영상 중 LED 어레이에 해당하는 부분만을 잘라내어 480x480의 동일한 사이즈로 확장 후 LED 어레이 영상에서의 OFF-LED의 반지름과 단일 ON-LED의 반지름의 차이, 그리고 OFF-LED 사이의 간격의 길이를 비교한다. 그림 9는 ON-LED로 인해 ISI가 발생하여 인접한 OFF-LED가 간섭을 받게 되는 그림을 나타낸다. 확산에 의한 ON-LED의 반지름과 OFF-LED의 반지름의 차이가 OFF-LED 간의 간격의 길이보다 커질 경우 다른 LED에 영향을 미쳐 간섭이 발생한다. 식 (5)는 위에 기술한 관계를 나타낸다.

$$Radius_{ON} - Radius_{OFF} > Distance_{OFF} \quad (5)$$

여기서 $Radius_{ON}$ 은 확산에 의해 커진 ON-LED의 반지름을 나타내고, $Radius_{OFF}$ 는 OFF-LED의 반지름, $Distance_{OFF}$ 는 OFF-LED간의 간격을 나타낸다. $Radius_{ON}$ 과 $Radius_{OFF}$ 의 차이가 $Distance_{OFF}$ 보다 클 경우 인접한 LED에 간섭이 발생한다. 전체 영상 중 LED 어레이 영상크기의 비율에 따른 ISI 정도를 알아내기 위해 위와 같은 과정을 사전에 수행하고, ISI의 정도를 LED 어레이의 크기를 통해 확인하여 다이버시티 모드로 전환하고자 한다.

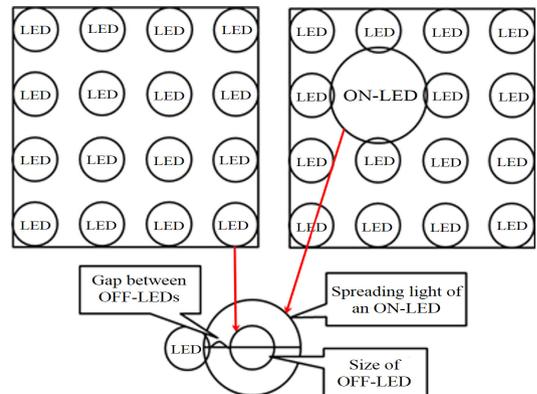


그림 9. 확산에 의해 커진 ON-LED가 인접한 OFF-LED에 간섭
Fig. 9. Interference to the adjacent OFF-LEDs by spreading light of an ON-LED.

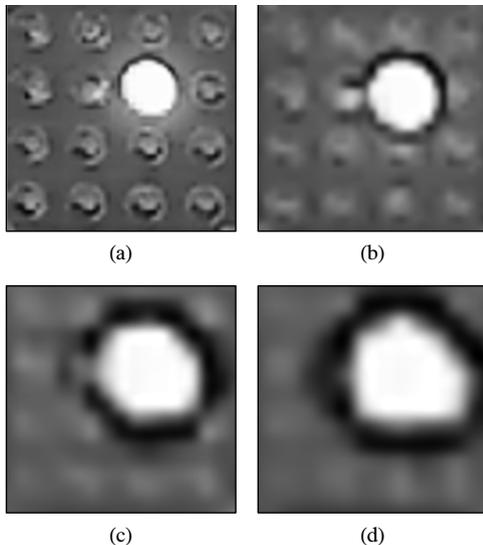


그림 8. ISI 정도를 파악하기 위해 하나의 LED만 켜(ON) 영상 (a) 0.5m (b) 1m (c) 2m (d) 2.5m
Fig. 8. Image of only one ON-LED to determine the degree of ISI. (a) 0.5m (b) 1m (c) 2m (d) 2.5m

IV. Visual-MIMO 시스템에서 다이버시티로 전환 후 성능개선

다이버시티로의 전환시점을 결정하기 위해 거리에 따른 전체 영상 크기 대비 LED 어레이의 크기를 이용한다. ON-LED가 OFF-LED에 간섭을 미치는 시점에서 다중화에서 다이버시티로의 전환이 필요하다. 다이버시티로 전환 여부의 판정은 다음과 같이 수행된다. 먼저 그림 10과 같이 480x480 사이즈의 영상을 240x240 사이즈의 4개의 영상으로 나눈 뒤에 ISI를 최소화하기 위해 정중앙의 120x120 사이즈의 영역만을 고려하여 판정한다. 정중앙의 영역을 고려할 경우 LED가 존재하지 않는 부분의 휘도 값이 판정에 영향을 끼치기 때문에 문제가 될 수 있다. 하지만 표 3에서 실제 판정영역을 통해 휘도 값을 살펴보면 정중앙의 영역을 고려한다고 해도 신뢰도가 떨어지지 않음을 알 수 있다. 표 3은 그림 10과 같이 다이버시티 적

표 3. 다이버시티 적용 후 거리에 따라 영상에 실제 LED가 존재하는 영역의 픽셀과 존재하지 않는 영역의 픽셀의 휘도

Table 3. Brightness of pixels where an actual LED is present or not present in the image with distance after applying the diversity.

Distance(m)	3	5	7
실제 ON-LED가 존재하는 픽셀의 휘도 (gray level)	252	251	253
실제 ON-LED가 존재하지 않는 픽셀의 휘도 (gray level)	252	252	251
실제 OFF-LED가 존재하는 픽셀의 휘도 (gray level)	18	20	19
실제 OFF-LED가 존재하지 않는 픽셀의 휘도 (gray level)	19	18	19

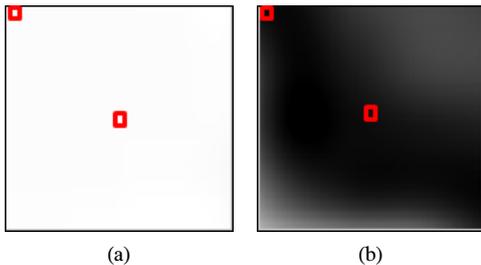


그림 10. 다이버시티 적용 후 실제 LED가 존재하는 영상과 존재하지 않는 영상의 휘도 값을 고려하기 위한 영상의 예 Fig. 10. Example for considering the brightness of an image where an actual LED is present or not present after applying the diversity.

용 후 판정영역에서 실제 LED가 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분의 휘도를 거리에 따라 정리한 결과이다. OFF 상태의 경우 LED가 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역이 거의 비슷한 혹은 같은 휘도를 가지며, ON 상태의 경우도 이미 거리가 충분히 멀어져 ISI 정도가 심해진 상태에서 다이버시티로의 적용이 이뤄져 실제 LED가 존재하지 않는 부분과 존재하는 부분의 휘도가 비슷하게 혹은 동일하게 나오는 것을 확인할 수 있다.

다이버시티로의 전환을 위해 전체 영상 대비 LED 어레이가 차지하는 비율을 이용한다. 거리에 따른 영상 크기와 ISI 정도를 실험적으로 측정하여 다이버시티로의 전환 시점을 결정한다. 표 4는 640x480의 전체 영상 중 거리에 따라 LED 어레이가 차지하는 크기, ON-LED의 반지름, 그리고 OFF-LED와 ON-LED의 반지름 차이, LED간 간격과 판정영역을 고려한 ISI 영향 범위를 나타낸다. 표 4의 데이터에 기반하여

표 4. 거리에 따른 LED 어레이 영상의 크기, ON-LED의 반지름, ON-LED와 OFF-LED의 반지름의 차이, LED간 간격과 판정영역을 고려한 ISI 영향

Table 4. ISI effect considering size of a LED array image, radius of an ON-LED, radius difference between ON-LED and OFF LED, gap between adjacent LEDs, and decision area with distance.

Distance(m)	0.5	1	2	2.5	2.7	3
전체 영상 중 LED 어레이의 크기(NxN)	64x64	28x28	15x15	14x14	12x12	9x9
ON-LED 반지름	58	68	82	92	105	117
ON-LED와 OFF-LED의 반지름의 차이	16	26	40	50	63	75
LED간 간격과 판정영역을 고려한 ISI 영향 범위	-32	-22	-8	2	15	27

거리에 따른 LED 어레이 크기와 ISI 정도의 관계를 확인할 수 있다. OFF-LED간의 간격보다 ON-LED와 OFF-LED의 반지름의 차이가 더 클 경우 인접한 OFF-LED에 간섭이 존재함을 뜻한다. 하지만 실제 판정에서 고려되는 LED의 부분은 정중앙의 부분이기 때문에 이를 고려하여 간섭 영향의 범위를 계산한다. 그림 11과 같이 120x120의 크기의 LED의 영역 중 60x60에 해당하는 정중앙의 영역만을 이용하기 때문에 이를 고려하여 LED의 간섭 영향의 범위를 판단한다. LED 어레이 영상을 480x480 사이즈로 확대 후 픽셀단위로 OFF-LED의 반지름을 측정하였을 때 실제 OFF-LED의 반지름은 '42'이고 거리에 상관없이 동일하다. OFF-LED간 간격은 '36'이고 60x60 크기의 판정영역에 의해 양측으로 무시되는 길이는 OFF-LED의 지름 '84'에서 영역크기를 뺀 나머지를

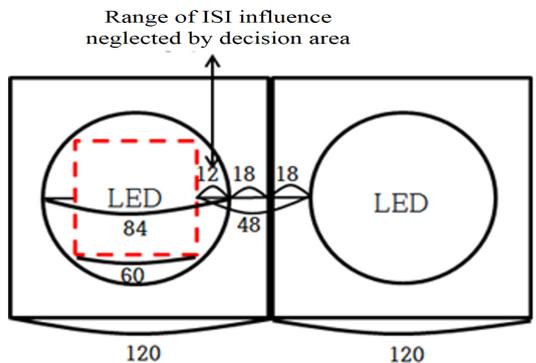


그림 11. 480x480 영상에서 OFF-LED 간의 간격과 판정영역에 의해 무시되는 ISI 영향 Fig. 11. Range of ISI influence neglected by decision area and gap between OFF LEDs in 480x480 image.

이분해 '12'가 된다. OFF-LED간 간격의 길이와 무시되는 영역의 길이의 합은 '48'로 이 값 또한 거리에 상관없이 동일하다. 표 4에서 ISI의 영향범위를 살펴보면 2까지는 음의 값을 보여 ISI가 발생하지 않다가 2.5부터 양의 값을 보여 ISI가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 640x480 크기의 전체 영상 중 ISI가 발생할 때의 LED 어레이 크기는 14x14 이므로 영상에서 거리가 멀어짐에 따라 640x480 크기의 전체 영상 중 LED 어레이 크기가 14x14일 때 다이버시티로의 전환을 고려한다.

제안한 방법을 통해 Visual-MIMO 시스템에 다이버시티를 적용한 뒤 ISI 정도를 살펴기 위해 그림 3과 같은 영상에서 OFF-LED의 거리에 따른 휘도 평균값 및 휘도편차(Brightness Deviation)를 표 5에 나타내었다. 휘도편차는 빈도수가 최대일 때의 휘도를 포함하여 전체 빈도수의 68.2%를 차지하는 인접한 휘도의 범위를 휘도편차로 정의하고, 이를 오류정정을 위한 척도 파라미터로 사용된 바 있다¹²⁾. 3에서 9까지는 평균값이 모두 '200' 이하이고 휘도편차의 경우도 임계값과 큰 차이를 보이지 때문에 모든 비트의 판정이 유효해 오류정정이 필요 없다. 12.2m부터 12.3m까지는 점점 ON-LED와 비슷한 휘도를 보여 평균값에 의한 판정은 불가하나 휘도편차를 통해 대부분 오류 정정이 가능하다. 12.4m부터는 평균값과 휘도편차 모두 ON-LED와 차이가 없는 결과를 보여 판정 및 오류 정정이 어려움을 알 수 있다.

그림 12와 표 6은 각각 다이버시티 적용 후 거리에 따른 BER과 오류개수를 나타낸다. 다중화와 다이버시티의 실험환경은 '노출'과 '개인'을 각각 '3'과 '7'로 설정하여 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. 그림 12는 다이버시티 적용전과 적용후의 BER을 비교한 그래프이고, 표 6은 상응하는 오류 개수를 정리한 것이다. 다이버시티로의 전환으로 12.2m 전까지 에러가 발생하지 않으므로 다중화에 비해 9.5m의 전송 거리 증진 이득이 발생하게 된다. 12.2m 부터는 약 10^{-3} 과 10^{-4} 사이의 BER 값이 발생하며 거리가 늘

표 5. 다이버시티 적용 후 거리에 따른 휘도 평균값 및 휘도 편차
Table 5. Brightness average and deviation with distance after applying diversity.

Distance (m)	3	5	7	9	11	12	12.2	12.3	12.4
Brightness average	102.5	128.9	151.3	181.5	215.4	235.5	243.9	247.1	249.8
Deviation	95	105	81	91	68	49	11	6	2

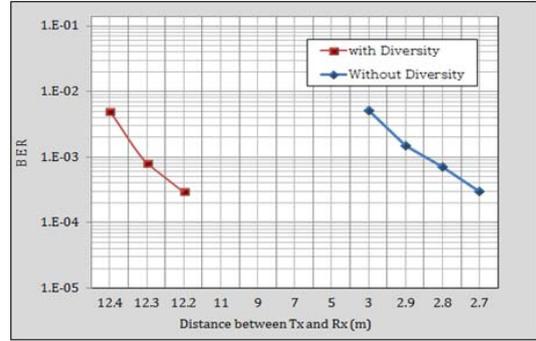


그림 12. 다이버시티 적용 후 거리에 따른 BER 그래프
Fig. 12. BER vs. distance after diversity is applied.

표 6. 다이버시티 적용 후 거리에 따른 오류개수
Table 6. Number of errors with distance after diversity is applied.

Distance (m)	3	5	7	9	11	12	12.2	12.3	12.4
Number of errors	0	0	0	0	0	0	3	14	71

어남에 따라 BER이 가파르게 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이에 따라 12.2m 이후로는 총 16개의 전체 LED를 이용하는 다이버시티로의 전환을 고려할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Visual-MIMO 시스템의 거리 증가에 따른 성능 악화를 개선하고자 다중화에서 다이버시티로의 전환 시점을 결정하는 방법을 기술하고 다이버시티로 인한 BER 성능 향상 또는 거리 증가 이득을 시뮬레이션 및 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

먼저 제안한 참조 LED 어레이 패턴에서 ISI가 심한 경우에 실험을 통해 다중화 모드에서 다이버시티 모드로 전환되는 시점을 결정하였다. ISI 정도가 심해 OFF-LED의 정정이 불가능한 시점에서 다이버시티 모드로 전환하였다. 또한 참조 LED 어레이 패턴을 사용하지 않고 다이버시티로의 적용 시점을 결정하기 위해 전체 영상 중 LED 어레이가 차지하는 비율을 이용하였다. 이 방법은 참조 LED 어레이 패턴을 사용하지 않기 때문에 ISI 정도의 파악이 어려워 사전에 실험적으로 거리 변화에 따른 전체 영상 대비 LED 어레이 비율로 ISI 정도를 측정하였다. LED 어레이가

14x14의 크기를 가질 때 ON-LED가 인접한 OFF-LED에 심각한 간섭을 주는 것을 확인하였고, 이를 근거로 640x480의 전체 영상 중 14x14의 LED 어레이 크기를 가질 때 다이버시티로의 전환을 결정하였다. 다이버시티 적용 후 BER 성능 개선(신뢰도 향상)으로 12.2m 까지 에러가 발생하지 않아 다중화에 비해(다이버시티 적용 전 보다) 9.5m의 전송거리 증진 이득을 발생함을 확인하였다.

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," *ISWCS*, pp. 765-769, York, Sept. 2010.

[5] M. Varga, A. Ashok, M. Gruteser, and N. Mandayam, "Demo: Visual MIMO based LED-Camera communication: Applied to automobile safety," in *Proc. MobiSys'11*, pp. 383-384, 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 *Proc. MobiCom'10*, pp. 105-112, NY, USA, 2010.

[7] A. Ashokz, M. Gruteserz, N. Mandayamz, and K. Dana, "Characterizing multiplexing and diversity in visual MIMO," *CISS*, pp. 1-6, Baltimore, MD, USA, Mar. 2011.

[8] J. Yoo and S. Jung, "Cognitive vision communication based on LED array and

image sensor," *MWSCAS*, pp. 1228-1231, Columbus, OH, Aug. 2013.

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

[10] W. Yuan, K. Dana, M. Varga, A. Ashok, M. Gruteser, and N. Mandayam, "Computer vision methods for visual mimo optical system," *CVPRW*, pp. 37-43, Colorado Springs, CO, Jun. 2011.

[11] J. Baek, K. Yun, Y. Park, and K. Kim, "Performance improvement of visual-mimo system using image brightness information," *J. KICS*, vol. 39A, no. 12, Dec. 2014.

[12] H. Kim, T. Kwon, Y. Park, and K. Kim, "Transmission performance improvement using brightness deviation for visual-mimo system," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, Oct. 2015.

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

김 지원 (Ji-won Kim)



2015년 2월 : 국민대학교 전자공학과 졸업
 2015년 3월~현재 : 국민대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 멀티미디어통신, 영상신호처리

김 기 두 (Ki-doo Kim)

제40권 10호 참조