

# Rolling Shutter CMOS 센서 기반 가시광 통신 시스템의 성능 분석

트렁홉도\*, 유 명 식°

## Performance Analysis of Visible Light Communication System Using Rolling Shutter CMOS Sensor

Trong-Hop Do\*, Myungsik Yoo°

### 요 약

본 논문에서는 Rolling Shutter CMOS 센서를 이용한 가시광 통신 시스템의 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위하여 ISI (Inter-symbol Interference)가 가시광 통신에 미치는 영향을 분석하였다. 모의실험을 통하여 분석결과의 타당성을 검증하였다.

**Key Words** : visible light, rolling shutter, CMOS sensor, signal quality, inter-symbol interference

### ABSTRACT

In this paper, we analyze the performance of visible light communication system using rolling shutter CMOS sensor. For analysis, the effect of ISI (Inter-symbol Interference) on visible communication has been formulated. We validate our analysis through computer simulations.

### I. 서 론

최근 이미지센서 기술의 급격한 발전으로 인하여 중저가 스마트폰들이 고해상도의 CMOS 센서 카메라를 장착하게 되었다. 이들은 고해상도의 이미지를 초당 30 또는 60 프레임을 촬영할 수 있다.

Rolling Shutter CMOS 센서의 가시광 통신에 대한 영향 분석에 대한 개념이 [1]에 제시되었다. 또한 Rolling Shutter CMOS 센서의 차량통신 [2] 및 측위에 적용한 기술들에 대한 내용이 다루어 졌다. 하지만 Rolling Shutter CMOS 센서 동작 원리에 대한 내용은 다루어지지 않았으며, 더욱이 통신 시스템의 성능 분석에 대한 내용을 다룬 연구는 현재까지 없었다.

이에 본 논문에서는 Rolling Shutter CMOS 센서의 동작 원리를 설명하고 이를 통신시스템 분석에 적용하여 ISI가 통신시스템 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하고자 한다.

### II. Rolling Shutter CMOS 센서 Rolling

#### 2.1 Shutter 동작 원리

CMOS 센서의 이미지 획득 과정을 그림 1에 도시하였다. CMOS 센서에서는 노출 (Exposure) 및 데이터 획득 (Readout) 과정이 한 줄씩 수행된다. 연속되는 두 줄에 대한 노출과정에서의 지연은 한 줄의 데이터 획득하는 시간과 동일하다. 이러한 과정을 CMOS 센서의 Rolling Shutter라 한다. 한 프레임에 대한 획득 시간은 첫 번째 줄의 노출로 시작하여 마지막 줄의 데이터 획득까지 걸리는 총 시간이다. 이 기간 동안 LED 점등은 이미지에 밝고 어두운 줄로 표시되며, 이러한 줄들을 통하여 데이터 비트들을 전송할 수 있게 된다.

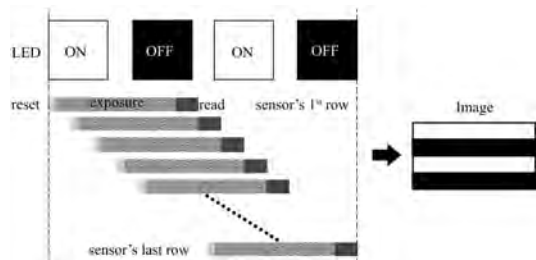


그림 1. CMOS 센서의 이미지 획득 과정  
 Fig. 1. Image acquisition in CMOS sensor

#### 2.2 이미지 센서의 표현

8비트의 RGB 칼라가 사용되었다고 가정하면, 한 픽셀에 대한 최대값은 255이다. Gamma 부호화에 의하면 픽셀 값은 다음과 같이 표현된다. 이때 gamma

\* 본 연구는 한국연구재단 지원을 받아 수행되었음 (NRF-2015R1A2A2A01006431)

• First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, dotronghop@gmail.com, myoo@ssu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, myoo@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-10-330, Received October 11, 2015; Revised October 15, 2015; Accepted October 15, 2015

값은 표준에 따라 2로 정한다.

$$PV = 118 \times 2^{ED/\gamma} \quad (5)$$

$$Pixel\ Value = 255 \times Raw\ Value^{1/\gamma} \quad (1)$$

빛 노출은 lux로 측정되지만, 상대적인 빛 노출은 stop으로 표현된다. 빛 노출을 두배 또는 반절로 변화시킬 때 하나의 stop이 증가 또는 감소된다. 이에 대한 센서의 반응은 그림 2와 같으며, 최대 노출의 18%에 해당하는 Middle Gray Point는 상대적 빛 노출 값 0에 해당된다.

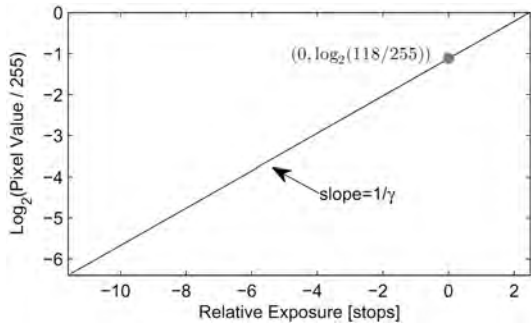


그림 2. 상대적 빛 노출 값에 의한 이미지 표현  
Fig. 2. Image representation in terms of relative exposure

### 2.3 픽셀 값 표현

Exposed Value (EV)는 카메라의 노출시간, 렌즈 조리개, ISO의 설정에 따라 다음과 같이 결정된다. 여기서 t는 노출시간, N은 조리개, S는 ISO값이다 [3].

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t} \quad (2)$$

LED에 의한 Exposed Value ( $EV_{LED}$ )는 다음과 같고, 이때  $L_v$ 는 LED Luminance, K는 Relected-light 상수값이다.

$$EV_{LED} = \log_2 \frac{L_v \times S}{K} \quad (3)$$

$EV_{set}$ 를 카메라 설정에 따른 EV 값이라 할 때, 노출 차이값 (ED: Exposure Difference)은 다음과 같다.

$$ED = EV_{LED} - EV_{set} \quad (4)$$

ED 값은 이미지의 픽셀값을 (2)에 의하여 계산할 때 사용하며, 픽셀값은 다음과 같이 계산된다.

### III. 가시광 통신 시스템 성능 분석

CMOS 기반 가시광 통신에서 신호의 품질은 비트 1과 0을 표시하는 이미지의 흑백 줄의 선명도에 의해서 결정된다. 그림 3에 도시한 바와 같이 Rolling Shutter가 각 줄의 이미지 획득을 위하여 노출시간 (Exposure Time)을 반복하게 되는데, 일부 노출시간은 LED의 ON/OFF 중간에 위치하게 되어 이미지의 선명도가 저하되게 된다.

이미지의 천이구간 (Transition Band)를 그림 4에 도시하였다. 그림 4의 천이구간이 통신 신호의 0과 1 사이에서 신호 품질을 저하시키는 ISI로 영향을 주게 된다.

그림 3에서 천이구간의 높이  $h_t$ 는 삼각형 원리에 의해 다음과 같이 계산된다. 이때  $h_c$ 는 줄 수에 의한 이미지의 높이,  $t_e$ 는 노출시간 (Exposure Time),  $t_r$ 는 프레임 데이터 획득 시간 (Frame Readout Time),  $t_{row}$ 은 줄 데이터 획득 시간 (Row Readout Time)이다.

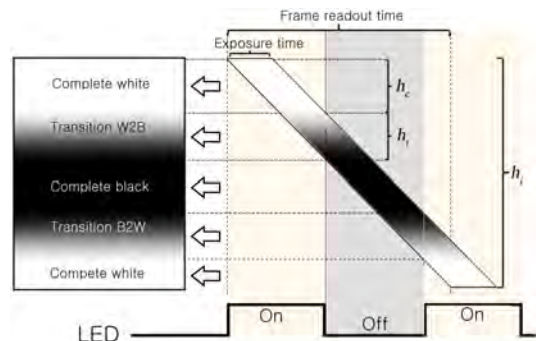


그림 3. LED ON/OFF 중간의 천이구간 (Transition Band)  
Fig. 3. Transition band between LED ON and OFF

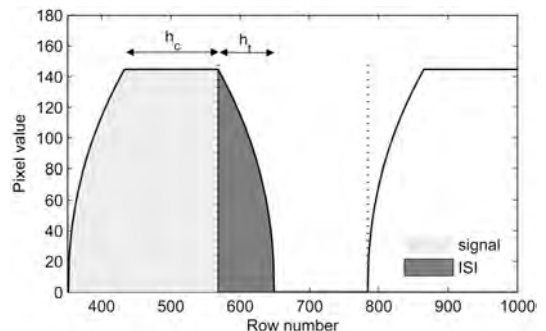


그림 4. 천이구간에 의한 ISI  
Fig. 4. ISI caused by transition band

$$h_t = t \times \frac{h_i}{t_f} = \frac{t}{t_r} \quad (6)$$

완전한 흑/백 줄의 높이  $h_c$ 는 다음과 같이 계산된다. 이때  $f_{led}$ 는 LED의 주파수(초당 ON/OFF 횟수)이다.

$$h_c = \frac{1/f_{led} - t}{t_r} = \frac{1}{f_{led} \times t_r} - h_t \quad (7)$$

#### IV. 성능평가

가시광 통신 시스템에서 ISI 영향에 대한 분석을 검증하기 위하여 성능평가를 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 2장에서 설명한 시스템에 대한 모델링을 Matlab을 통하여 구현하였다. 성능평가에 필요한 파라미터들은 표 1과 같이 설정하였다.

통신시스템 성능에 대한 노출시간의 영향을 평가하기 위하여 frame readout 시간을 10msec로, LED 주파수를 500Hz로 설정하였고, 외부잡음은 실내 환경을 가정하였다. 노출시간 1/1000sec와 1/8000sec에 대한 성능평가 결과를 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 노출시간이 감소함에 따라 천이구간이 감소하여 선명한 이미지를 획득할 수 있음을 알 수 있다.

통신시스템 성능에 대한 frame readout 시간의 영향을 평가하기 위하여 노출시간을 1/2000sec로, LED 주파수를 500Hz로 설정하였고, 실내환경을 고려하여 모의실험을 수행하였다. Frame readout 시간 5msec와 40msec에 대한 결과를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 frame readout 시간이 증가함에 따라 천이구간이 감소함을 볼 수 있다. 또한 흑

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Modulation	OOK
LED luminance	8192 [ $cd/m^2$ ]
ISO speed	100
Lens aperture	5.6
K constant	12.5
C constant	330
$\gamma$	2.2
Sensor size	1920×1080

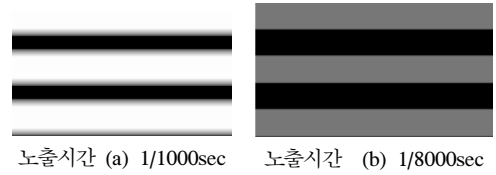


그림 5. 노출시간의 영향  
Fig. 5. Effects of exposed time

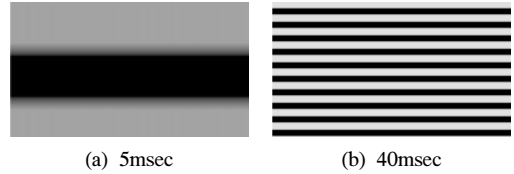


그림 6. Frame readout 시간의 영향  
Fig. 6. Effects of frame readout time

백 줄의 높이  $h_c$ 도 감소함을 볼 수 있다. 이는 이미지에서 줄 수의 증가를 의미한다.

#### V. 결론

최근 Rolling Shutter CMOS 센서에 대한 학계 및 산업계의 관심이 증대되고 있다. 본 논문에서는 Rolling shutter CMOS 센서에 대한 동작 원리와 가시광 통신시스템에 CMOS 센서가 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 모의실험을 통하여 분석의 타당성 검증을 수행하였다.

#### References

- [1] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas, "Using a CMOS camera sensor for visible light communication," *IEEE Globecom Wkshps*, pp. 1244-1248, Dec. 2012.
- [2] P. Ji, H. M. Tsai, C. Wang, and F. Liu, "Vehicular visible light communications with led taillight and rolling shutter camera," *IEEE VTC Spring*, pp. 1-6, May 2014.
- [3] Sidney F. Ray, *The Manual of Photography: Photographic and Digital Imaging*, Focal Press, 9th Ed., 2000.