

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760307

研究課題名(和文) 災害時における人命救助のための携帯用照明を利用したLED可視光通信システム

研究課題名(英文) LED Visible Light Communication System Using Portable Illumination Apparatus for Lifesaving in Disaster Situation

研究代表者

荒井 伸太郎 (Arai, Shintaro)

香川高等専門学校・通信ネットワーク工学科・助教

研究者番号：10599195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、災害時に利用する携帯用照明を用いた人命救助のためのイメージセンサ型LED可視光通信システムを検討した。サブテーマ(1)では、がれき等の障害物(通信路)の影響を受けたLED光を定量的に解析した。解析結果より、LEDの実際の大きさが受信機側で1ピクセル以上の領域に投影されるか否かが、イメージセンサ型可視光通信の復調性能を左右するということを明らかにした。サブテーマ(2)では、災害時の通信路の影響によって劣化した画像から正しいデータを復調するために、劣化画像の特徴を利用した新たな復調手法を提案し、シミュレーション及び実験からその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：This research subject has considered an image-sensor-based LED visible light communication (VLC) system using a portable illumination apparatus for lifesaving in a disaster situation. The sub-theme 1 has quantitatively analyzed a transmitted LED light affected by an obstacle such as rubble (i.e., communication channel). As results, I concluded that the size of the LED on the image is necessary more than one pixel to prevent the impairment of demodulation performance in the image-sensor-based LED VLC. The sub-theme 2 has proposed a novel demodulation scheme using characteristics of a degraded image, which is affected by the communication channel in the disaster situation. As results of a simulation and an experiment, I have confirmed that the proposed method has a better performance as compared with the conventional demodulation method.

研究分野：通信工学

キーワード：可視光通信 LED 災害時通信

1. 研究開始当初の背景

発光ダイオード (LED) を用いた照明光の普及に伴い、LED を送信機とした可視光通信技術に関する研究が注目を集めている。可視光通信とは、デジタル情報を LED の点滅で表し、その点滅を受信機で検知させて通信を行う技術であり、特に、受信機に高速度カメラ等のイメージセンサを用いたシステムを「イメージセンサ型可視光通信」と呼ぶ。LED は従来の白熱灯と比較して低消費電力、視認性の良さや長寿命といった利点に加え、半導体デバイスであることから、人の目には見えないほど高速に点滅させることが可能である。これにより、照明光としての役割を果たすと同時に、通信機器としても用いることが可能となる。

可視光通信の研究における重要な課題の 1 つは、可視光通信の特徴を活かした用途を見出すことである。言い換えると、電波による無線通信ではできない、可視光通信ならではの利用方法を考える必要がある。可視光通信の特徴を活かした利用方法として、本研究では、自然災害 (天災) や人為的な原因による事故 (人災) 等の災害時での利用を目的とした、イメージセンサ型可視光通信の人命救助への応用を検討する。2011 年の東日本大震災において、震災直後、携帯電話などの通信機器の障害が過去最大規模で発生し、被災者は自身の状況を電波による無線通信機器で伝えることが困難となった。ここで、懐中電灯等の携帯用照明器具を可視光通信送信機として用いる事を考える。この場合、被災者は自身の位置を遠方にいる救助者に懐中電灯の光で知らせるだけでなく、同時に、電波を用いることなく可視光通信によって状況を実際に伝えることが可能となる。しかしながら、災害時にはがれき等の障害物によって、送信信号である可視光が四方八方に散乱及び光の減衰が生じる可能性が高く、この場合、受信機であるイメージセンサに十分な光量を届けることが困難となり、被災者の発見の遅れにつながると考えられる。ゆえに、障害物による可視光通信の問題を克服することが、人命救助を行うための可視光通信の実現に必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、受信機に高速度カメラを用いたイメージセンサ型可視光通信システムを想定し、上述した災害時の通信路の影響によって送信信号である可視光が減衰してしまう問題に対して、「(1) 通信路の影響を受けた LED 光の解析」、及び、「(2) 通信路の影響を受けて減衰した光からの信号復調手法の開発」を行う。以下、それぞれについて説明する。

(1) 通信路の影響を受けた LED 光の解析

可視光通信の特徴の 1 つは、「人間が識別

可能な光の点滅を利用」している点であり、言い換えると、受信機であるイメージセンサでその光の点滅が確認できなければ通信ができない事を意味する。つまり、可視光通信では見通し線 (Line of Sight: LOS) が重要な要素となる。災害時には障害物による LOS の確立が困難であり、障害物の影響によって、受信機側からは送信機を直接見通せない、もしくは光が減衰する状況が起こり得る。障害物が無かったとしても、送信機の LED の輝度が十分強くなければ、受信機まで光が届かず、やはり LOS は確立されない。LOS が確立されたとしても、送信光以外の雑音光が、受信機での信号復調に影響を及ぼすことも知られている。このように、災害時に可視光通信を利用する場合、通信路の様々な要因によって通信が困難となる場面が多々想定される。そこで、本研究のサブテーマ(1)として、通信路の影響を受けた LED 光を定量的に解析し、イメージセンサ型可視光通信における通信性能の限界を明確にする。

(2) 通信路の影響を受けて減衰した光からの信号復調手法の開発

イメージセンサを用いた可視光通信システムが、一般的な電波を用いた通信システムと大きく異なるところは、受信機での画像処理部分が情報復号の際に非常に重要になるという点である。今、可視光通信送信機に複数の LED が配置されており、それらを個別に変調する場合を想定する。高速度カメラは個々の LED の点滅を受信機で認識する必要があるが、隣接する LED との間隔が十分離れている場合、受信機は容易に個々の LED の輝度を取得できる。しかしながら、LED が密接に配置されている場合、画像の解像度によっては個々の LED の認識が困難になる。特に、災害時の可視光通信では、被災者 (送信機側) と救援者 (受信機側) 間の距離が離れる場面が生じるため、通信路の環境に依存して撮影画像のピクセル数の減少やピントのズレなどが起こる。この時、隣接する LED 同士が結合して見えるといった画像の劣化、いわゆるボケ画像が撮影されてしまう。これが起こると、撮影画像から個々の LED の輝度値を正しく認識することが困難になってしまい、信号復調で誤りが増加してしまう。そこで、本研究のサブテーマ(2)として、災害時の通信路の影響によって劣化した画像、つまりボケ画像から正しいデータを復調するための新たな手法を提案する。

3. 研究の方法

2. で述べた各サブテーマの研究の方法について以下に述べる。

(1) 通信路の影響を受けた LED 光の解析

通信路の 1 つのパラメータとして通信距離に注視し、LED 送信機とイメージセンサ間の

通信距離に対する受信信号エネルギー(LEDの画像上での明るさ)の変化を実験により調査した. 図1にその実験システムを示す. 送信機は信号発生器と単一のLEDで構成されたシンプルな装置を用いた. 信号発生器は矩形波を出力し,その矩形波に応じてLEDは点灯・消灯を繰り返す. これは本研究でのデータ変調に On-Off-Keying (OOK)を用いることを想定しているためであり,データ'1'をON(点灯), '0'をOFF(消灯)とする動作を模擬している. 受信機には高速度カメラを用いてLEDの点滅を撮影し,撮影画像からLEDの平均輝度値を求めた. ここで平均輝度値とは,画像に写ったLEDの最高輝度の半分の値を求め,その値以上の複数のピクセルを用いて算出された値である. 本実験の諸元を表1にまとめる. 本実験は静止環境で行い,通信距離を変化させながら平均輝度値を求めた.

(2) 通信路の影響を受けて減衰した光からの信号復調手法の開発

本サブテーマで提案する信号復調手法のコンセプトを説明する. 今,隣接した2つのLEDが点灯しており,それをイメージセンサで撮影したとする. この時,ピントずれ等が生じて画像がボケてしまい,互いのLED光が干渉しあうと仮定すると,各LEDの像が結像される領域の画素値は自身のLED輝度値と隣接するLED輝度値の畳み込みで表すことができる. これは隣接するLEDの数が増えたとしても同様である. ここで,各LEDの状態(点灯/消灯)を未知の変数で置くと,各LED画素値は畳み込みの式で記述できる. この時,各LEDの像が結像される領域の画素値の中から任意の1画素に対する畳み込みの式をLEDの数だけたてられれば,その連立方程式を解くことで,各LEDの状態を導くことができる. つまり,ボケによる画像の劣化が起こったとしても,データの復号を行えると考えた.

図2に上述した信号復調手法の性能を評価するための可視光通信システムモデルを示す. 本システムでは, $M \times N$ 個のLEDを正方形行列上に配置させたLEDアレー送信機を想定し,送受信機の動作を全て画像処理で行う. データの変調にはサブテーマ(1)と同様, On-Off-Keying (OOK)を用いる. また,二次元ガウス分布に基づく 5×5 ガウシアンフィルタ処理を施しボケ画像を再現する. 今, 2×2 LEDアレーを点滅させ,各LED光が受信機側の画像の1ピクセルで捉えられる理想的な状態を図3(a)に示す. 実際には,撮像面に写る各LED光は図3(b)のように拡散し,周囲のLEDに影響を及ぼす. この時,先に述べた任意のLEDの画像上での明るさは,自身の光とその周辺LEDから拡散された光の畳み込みで表すことができる. $M \times N$ 個のLEDがある場合,その個数と同数の畳み込みの式を立てることができるため,それらを連立方程式として解くことで,データの復号が可能となる.

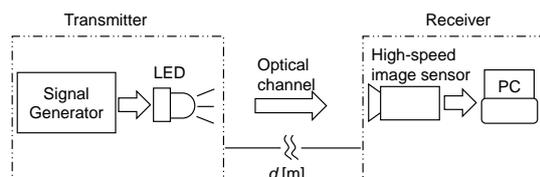


図1: サブテーマ(1)のシステムモデル.

表1: サブテーマ(1)の実験諸元.

LEDの種類	砲丸型LED
LEDの直径	5mm
矩形波の周波数	500Hz
高速度カメラ(イメージセンサ)	Photoron IDP-Express R2000
撮影速度	1,000fps
撮影画像	8ビットグレースケール
撮影画像の解像度	512×512ピクセル
センササイズ(λ)	10 μ m
レンズの焦点距離(f)	35mm
レンズのピント	無限遠
レンズのしぼり	16
通信距離	2m~50m

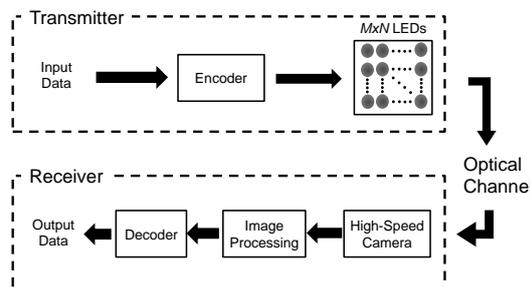


図2: サブテーマ(2)のシステムモデル.

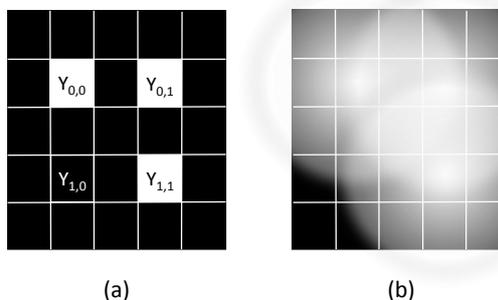


図3: 受信機に写るLED: (a) 理想的な受信画像の例, (b) 劣化した受信画像の例.

4. 研究成果

研究成果をサブテーマごとに以下にまとめる。

(1) 通信路の影響を受けた LED 光の解析

実験結果を図 4 に示す。この図において、平均輝度値の推移に注目すると、輝度値は距離 16m まではほぼ一定の値を示しているが、その距離以降は急激に減衰していくことが確認できる。これは通信距離が長くなったことに伴い、受信機のイメージセンサ上での LED のサイズが小さくなってしまったことが原因だと考えた。これを裏付けるために、LED の実際のサイズからカメラのセンサに写るサイズ（ピクセル数： n_p ）を以下に示すピンホールカメラモデルを用いて幾何学的に計算した。

$$n_p = \frac{1}{\lambda^2} \frac{f_l^2}{d^2} S. \quad (1)$$

ここで、 λ は 1 ピクセルあたりのセンササイズ、 d は通信距離、 f_l はレンズの焦点距離、 S は LED の面積である。式(1)から分かるように、 λ と S 、 f_l が一定であるとする、LED が投影された面のピクセル数は距離の 2 乗に反比例する。この式に表 1 に示す LED 及びレンズパラメータを代入して n_p を計算し、その結果を図 4 にプロットした。ここで図中の n_p の変化に注目すると、輝度が急激に減衰しだす距離 16m でのピクセル数は約 1 となっていることが分かる。つまり、平均輝度値はピクセル数が 1 を下回る距離を越した後、ピクセル数と同様に距離の 2 乗で減衰していると言える。

以上の結果から、LED が投影されたピクセル数が 1 ピクセル以上あれば、輝度値は十分高く、受信機側での復調が容易であるといえる。しかしながら、反対にピクセル数が 1 ピクセルを下回ってしまうと、その輝度値は距離の 2 乗で減衰してしまい、受信機側に十分な LED の明るさが届かず、復調が困難となる。つまり、LED の実際の大きさが受信機側で 1 ピクセル以上の領域に投影されるかどうか、イメージセンサ型可視光通信の復調性能を左右するということが明らかとなった。以上の成果の一部は下記 5. [雑誌論文] ① で発表した。

(2) 通信路の影響を受けて減衰した光からの信号復調手法の開発

提案した信号復調手法の性能を計算機シミュレーションにより評価した。シミュレーション諸元を以下に記す。送信機の LED アレーとして、16×16 個の正方形に配置された装置を想定する。送信データとしてランダムデータを想定し、そのデータは OOK により変調される。また、LED の輝度に個体差はなく、均一なものとする。受信機では、送信機側の LED の点滅をイメージセンサで撮影し

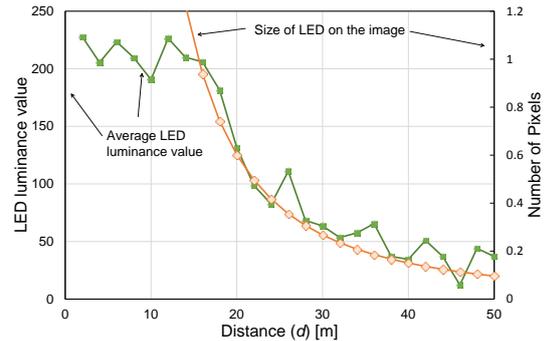


図 4: 通信距離の変化に対する LED の輝度値とピクセル数の推移（右軸：輝度値、左軸：ピクセル数）。

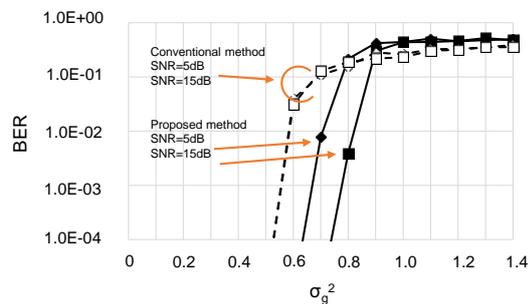


図 5: σ_g^2 対 BER 特性 (SNR 一定)。

たと仮定し、受信画像を生成する。各 LED の画素値群は、その輝度値に 5×5 ガウシアンフィルタをかけて決定されるものとし、また、各 LED の画素値群の中心画素と隣接する LED のそれとの間には画素によるギャップはないものとする。フィルタ処理後、受信機内の熱雑音によって画像の画素値に雑音が印加されると仮定し、本研究では熱雑音として加法性白色ガウス雑音(AWGN)を想定する。また、各 LED の画像上での位置は既知であるとする。本シミュレーションでは、送信された LED の輝度と熱雑音の比(SNR)を一定とし、ガウシアンフィルタの分散 σ_g^2 を変化させた時の BER を測定する。

図 5 にシミュレーション結果を示す。この図において、 σ_g^2 が大きくなるほど、ガウシアンフィルタによる画像の劣化の影響が強くなることに注意する。比較のため、従来の OOK 復号方法(画像の劣化を考慮しない、単純な閾値判定)での BER 特性も従来方法として図 5 に示す。本シミュレーションにおいて、SNR は 15dB、5dB の 2 つを用いた。図 5 から分かるように、従来方式では SNR によらず、エラーフリーを達成するのは $\sigma_g^2=0.5$ 付近までで、それ以降、急激に誤りが生じている。それに対し、提案手法では、SNR=15dB では $\sigma_g^2=0.8$ まで、5dB では $\sigma_g^2=0.65$ までエラーフリーを達成している。また、 σ_g^2 が 0.8

～1.1 付近まで、提案手法が従来方式よりも BER 特性が上回っている。これらは、提案手法の有効性を示す結果であり、画像のボケの影響を復号に利用したことによる情報復号能力の向上が確認できたと言える。しかしながら、 σ_g^2 が 0.8～1.1 を超えると、わずかではあるが、提案手法と従来方式の BER 特性が逆転していることも確認できる。これは、 σ_g^2 が大きくなったことで画像がボケすぎてしまったため、各 LED の輝度値が周囲のピクセルの輝度値と均一になってしまったことが原因である。このため、画素に印加される雑音の影響が相対的に強くなったことで、受信機が立てた連立方程式を正確に解けなくなってしまったことで誤りが増加したと考える。実際には、LED の点灯・消灯による画像の濃淡が完全に失われ、雑音の影響が強すぎる状況では、LED 送信機はおろか、画像に写る送信機以外の物や風景も判別できなくなるほどに画像が劣化してしまう。ゆえに、災害時に可視光通信を行う状況としてはあまり現実的ではない。以上を踏まえ、あまりにボケの影響と雑音が強くなり、イメージセンサに何も写らない状況で無い限り、提案手法の情報復号性能は優れていると言える。提案手法の有効性はシミュレーションだけでなく実験でも確認しており、実験結果も含めた成果を下記 5. の〔雑誌論文〕②で発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- ① T.Yamazato, M. Kinoshita, S. Arai, E. Souke, T. Yendo, T. Fujii and K. Kamakura, "Vehicle Motion and Pixel Illumination Modeling for Image Sensor Based Visible Light Communication," IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2015 年. (査読有, 掲載決定済)
DOI: 10.1109/JSAC.2015.2432511
- ② 大平祐生, 荒井伸太郎, 圓道知博, 山里敬也, 岡田 啓, 藤井俊彰, 鎌倉浩, "LED と高速度カメラを用いた可視光通信における劣化画像からの信号復号手法," 電子情報通信学会論文誌, vol.J98-B, no.7, 2015 年 7 月. 2015. (査読有, 掲載決定済)

〔学会発表〕(計 50 件)

- ① S. Arai, Y. Shiraki, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, and T. Yendo, "Multiple LED Arrays Acquisition for Image-Sensor-Based I2V-VLC Using Block Matching" 2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC'14), 2014 年 1 月 10 日-13 日, Las Vegas (USA).

- ② E. Souke, Y. Ohira, S. Arai, T. Yamazato, T. Yendo, H. Okada, T. Fujii, and K. Kamakura: "Investigation on Relationship between Communication Distance and Receiving Characteristic in Visible Light Communication Using LED and High-Speed Camera," 2014 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'14), 2014 年 12 月 12 日-13 日, 徳島大学日垂会館(徳島県・徳島市).
- ③ S. Arai, T. Yamazato, H. OKADA, T. Fujii, T. Yendo, "LED Acquisition Methods for Image-Sensor-Based Visible Light Communication," 20th Optoelectronics and Communications Conference (OECC'15), 2015 年 6 月 28 日-7 月 2 日, 上海 (中国) (発表決定済)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~arai/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

荒井 伸太郎 (ARAI, Shintaro)

香川高等専門学校・通信ネットワーク工学科・助教

研究者番号：10599195

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし