

差動色偏移変調方式を用いた長距離・フリッカ抑制型 LED-スマートフォンカメラ間通信

外園 悠貴^{1,a)} 長谷川 浩市^{1,b)} 成末 義哲^{1,c)} 森川 博之^{1,d)}

概要：無線デバイスが身の回りにあふれるほど、無線通信技術には“直感性”が求められる。ユーザが欲しい情報を発信しているデバイスを探す手間が、無線デバイスの数と共に増加することを防ぐためには、視線の先にあるデバイスから直接情報を取得できる直感的な通信手段が必要である。直感性を有する通信手段として、筆者らは目に見える光にカメラをかざす動作が通信起点となる LED-スマートフォンカメラ間通信の研究開発を進めている。本稿では、LED の色を高速に切り替えることでちらつき（フリッカ）を抑制しながら、カメラの画面に数ピクセルのみ写る遠方の LED 光からの復調を可能とする、長距離・フリッカ抑制型 LED-スマートフォンカメラ間通信方式を示す。一般的なスマートフォンのカメラで採用されているローリングシャッター方式では、画面内位置によって露出のタイミングが異なる。そのため、LED を撮像中に手ぶれが生じると、LED の撮像時間間隔は撮像フレーム周期からずれる。この条件下で、高速に色を切り替える LED を撮像すると、撮像される色は手ぶれの度合いによって変化する。本稿では、この課題を克服する機構として、LED の色を循環的に切り替えることで撮像タイミングがずれる前の LED の色を推定し、連続フレーム間で撮像される LED の色偏移に情報を付加することで撮像開始タイミングによらず復調ができる差動色偏移変調方式 (DCSK) を示す。複数機種での実機実験により、口径 10 mm の小型 LED から、60 bps の通信を 3 m を超える通信距離で実現できることを示す。

キーワード：LED-スマートフォンカメラ間通信、可視光通信、ローリングシャッター

1. はじめに

IoT (Internet of Things) の時代では、無線デバイスがユーザの周囲にあふれ、目に見えるデバイスから情報を直感的に取得することがますます困難となる。欲しい情報を発信しているデバイスを特定し、そのデバイスから情報を取得する手間は、無線デバイスの数と共に増加する。ユーザが視線の先にあるデバイスから直接情報を取得できる直感的な通信手段が、この問題を解決する鍵となる。

直感性を有する通信手段として、筆者らは目に見える光にカメラをかざす動作が通信起点となる LED-スマートフォンカメラ間通信の研究開発を進めている。遠方の LED 光から数 10 bit 程度の情報を直感的に取得できる本通信を利用することで、様々な AR (Augmented Reality) アプリケーションを実現することができる。例えば、図 1 のよう

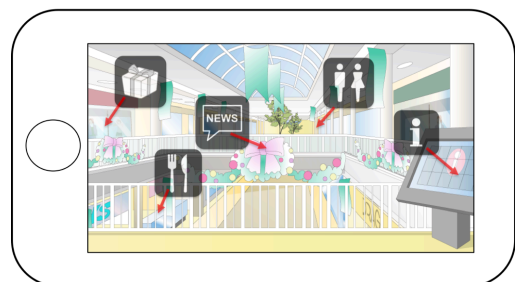


図 1: 長距離型 LED-スマートフォンカメラ間通信の利用例: 屋内 AR ブラウザ

に、電波が届きにくい屋内環境においてもカメラをかざした範囲からコンテンツを取得できる AR ブラウザを用いて、ユーザは目的地までの直感的なナビゲーションを利用したり、探索しているコンテンツを円滑に発見することができる。

本通信方式に対して、Bluetooth や Wi-Fi を用いる方式では、通信対象のデバイスを画面に表示された近隣デバイスの中から選択する必要があるため、通信の直感性を実現することが難しい。NFC を用いる方式では、通信距離に一定の限界があるため、情報の発信源に近づかない限り通信を行

¹ 東京大学大学院 工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
a) hokachan@mblab.t.u-tokyo.ac.jp
b) k.hasegawa@mblab.t.u-tokyo.ac.jp
c) narusue@mblab.t.u-tokyo.ac.jp
d) mori@mblab.t.u-tokyo.ac.jp

うことができない。

遠方の LED 光から情報を取得できる従来方式には、Picalico が挙げられる [1]。Picalico は、LED 光がカメラの画面に写る領域がわずか数ピクセルであっても通信可能である点で優れているが、LED の低速な点滅が人間の眼に知覚されるフリッカが問題となる。フリッカは利用環境の美観を損ねる要因となるため、通信を利用可能な環境に限られる。一方、フリッカを抑制するために LED を高速点滅させた方式がある [2–6]。これらの方式では、ローリングシャッター現象を利用することで通信の高速化を実現しており、最も高速なもので数 kbps を達成することができるが、ローリングシャッター現象によって撮像される LED 光の縞が画面に写る領域の大きさが、通信速度および通信の信頼性に関して支配的な影響を持つため、近接の LED からの情報取得に用途が限られている。例えば、口径 10 mm の小型 LED との通信可能距離はいずれの方式も数 cm 程度である。

本稿では、LED を高速点滅させることでフリッカを抑制しながら、カメラの画面に数ピクセルのみ写る遠方の LED 光からの復調を可能とする、長距離・フリッカ抑制型 LED–スマートフォンカメラ間通信方式を示す。本通信方式では、LED の色切り替えパターンを調節することのみで 60 bps の通信を実現するとともに、LED の口径を調節することで、通信距離を理論上数 10 m 以上に拡大することができる。数 10 bit 程度の小容量な ID の伝送に十分な通信速度と、目に見える範囲からの情報取得に十分な通信距離、およびフリッカを抑制可能な LED の点滅方式を兼ね備えることで、図 1 に示す屋内 AR ブラウザのような直感的な情報取得アプリケーションを、低コストかつあらゆる環境で実現することができる。

一般的なスマートフォンのカメラを用いて遠方の高速点滅する LED を撮像するとき、手ぶれの度合いによって撮像される LED の色が変わることが課題となる。CMOS イメージセンサでは、ローリングシャッター方式に基づき、ライン（画面の行）ごとに露出が行われるため、LED を撮像中に手ぶれが生じると、LED の撮像時間間隔は撮像フレーム周期からずれる。この条件下で、高速に色を切り替える LED を撮像すると、撮像される色は手ぶれによる撮像タイミングのずれと共に変化する。そのため、色に対し直接情報を付加する従来の CSK (Color Shift Keying) [7] では誤りが生じ、情報を正しく復調できない。

本稿では、この課題を克服する機構として、LED の色を循環的に切り替えることで、撮像時間間隔が撮像フレーム周期からずれた時間から、ずれる前における LED の色を逆算し、連続フレーム間で撮像される LED の色偏移到情報を付加することで復調を行う差動色偏移変調方式 (DCSK) を示す。具体的には、LED の色切り替えを時間間隔数 ms 程度で高速に行うシンボルを利用することでフリッカを抑

制し、シンボル内の色切り替えを循環的に行うことで、撮像された色と撮像タイミングの変動量から、元のタイミングにおける色を推定する。加えて、連続フレーム間で撮像される LED の色偏移到情報を付加することで、撮像開始タイミングによらず情報を復調することができる。複数機種での実機実験により、60 bps の通信を、口径 10 mm の小型 LED から 3 m を超える通信距離で実現できることを確認した。

本稿の構成は、以下の通りである。2 節において、長距離型 LED–スマートフォンカメラ間通信の制約および課題について述べる。続く 3 節において、この課題を克服する変調方式 DCSK の設計を示す。4 節では、設計した DCSK おける機種依存パラメータの測定について述べた後、各種エラー率や通信距離を含めた複数機種における評価を示す。5 節で関連研究を示し、最後に 6 節でまとめとする。

2. 長距離型 LED–スマートフォンカメラ間通信

本節では、LED–スマートフォンカメラ間通信における送受信機それぞれの制約について述べた後、この制約のもとで遠方の LED 光を復調する際に生じる課題について述べる。

2.1 LED の点滅周期とカメラのシャッター方式における制約

カメラの各撮像フレームに写る LED の色を識別することで情報の受信を行う LED–スマートフォンカメラ間通信では、LED の点滅周期とカメラのシャッター方式にそれぞれ制約が存在する。

● LED の点滅周期における制約

LED の点滅周期を一般的なカメラで採用されているフレーム周期 (1/30 s) と同じ長さに設定した場合、LED の色変化が人間の眼に知覚されるフリッカが問題となる。フリッカを抑制するためには、LED の点滅速度をカメラのフレーム周期と比べ非常に低速にするか、人間の眼に知覚されない程度に高速化する必要がある。

前者の場合、人間の眼に見える LED の色が時間とともに変わるため、その光源を利用できる環境に限られる。また、撮像される LED の色は連続フレーム間ではほとんど変化しないため、1 シンボルを取得するために複数のフレームを用いる必要があり、低速な通信となる。このような低速な通信では、数 10 bit の ID 交換のような小容量のデータ伝送であっても円滑に実現することができない。

後者の場合、人間の眼が輝度の変化に比べ色調の変化に鈍感であることを利用し、フリッカを抑制することができる [8]。人間が行き交う環境においても LED–スマートフォンカメラ間通信を利用可能とするため、LED の色を (数 ms 周期程度で) 高速に切り替えることを制約条件とし

て考える必要がある。

● カメラのシャッター方式における制約

スマートフォンのカメラで一般的に使用される CMOS イメージセンサでは、ローリングシャッター方式に基づきラインごとに露出が行われる [9]。LED 光が照射されていないラインの露出タイミングにおける LED の色は撮像されないことを考慮して、通信の変調方式を設計する必要がある。

図 2 に、ローリングシャッター方式で動作するカメラにおける露出の様子を示す。CMOS イメージセンサでは、ラインごとに露出時間 T_e の間入射光を集め、直後にセンサが受光した光量の読み出しを T_r の時間をかけて行う。 T_r は機種によって長さが異なり、同じ機種では一定である。各ラインの読み出しタイミングは重複できないため、露出は直前ラインの露出開始時間から T_r 後に開始する。ライン数 h のカメラでは、1 ライン目の露出開始から h ライン目の露出終了までのフレーム時間 T_F は式 (1) で表される。

$$T_F = (h - 1)T_r + T_e \quad (1)$$

一方、カメラはフレーム周期 T_{fc} を設定することができ、 $T_{fc} - T_F$ の間が撮像不能なギャップ時間 T_G として存在する。次のフレームに向けた準備を行う間、カメラは撮像不能となる [10]。

T_e はカメラの自動露出補正機能によって、環境光の輝度に応じて変動する。通常の撮像設定では、 T_e が T_r と比べ非常に長く、LED の点滅による輝度の変化が均一化されてライン間の画素値の変化は極めて小さくなる。LED-スマートフォンカメラ間通信では、各ラインにおいて LED の色を鮮明に観測するため、 T_e は可能な限り T_r よりも小さく設定する。

2.2 遠方の LED 光を復調する際の課題

ローリングシャッター方式のもとでカメラの画面に数ピクセルのみ写る遠方の LED 光を撮像した場合、多くのフレームにおいて 1 色のみが撮像される。各フレームで 1 色

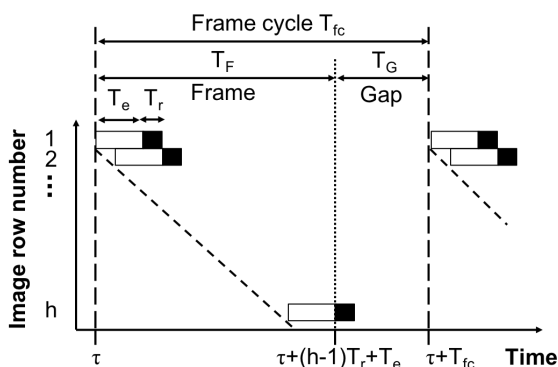


図 2: ローリングシャッター方式で動作するカメラにおける露出の様子

ずつ撮像される色から情報を復調するためには、以下の課題を克服する必要がある。

- 課題 1: 通信の非同期性による露出タイミングのずれ
カメラのフレーム周期よりも高速に色を切り替える LED を撮像すると、画面に写る 1 色はカメラを起動したタイミングに依存する。そのため、色に対し直接情報を付加する従来の CSK [7] では、情報を正しく復調できない。
- 課題 2: 通信中の手ぶれ
ローリングシャッター方式のもとでは、LED 光の画面内照射位置によって撮像タイミングが異なる。通信中の手ぶれによって LED 光の画面内照射位置が各フレームごとに変動すると、フレーム間における LED 光の撮像時間間隔はフレーム周期からずれる。そのため、フレーム周期からずれた時間を推定し、その影響を補正する機構が必要となる。

3. Differential Color Shift Keying

本節では、フレーム間における LED 光の撮像時間間隔が通信中の手ぶれによってずれた量を推定し、その影響を補正する機構として、差動色偏移変調方式 (DCSK) を示す。その後、LED 光の撮像時間間隔と共に変動する色の補正について詳細を述べる。

3.1 DCSK の設計

ローリングシャッター方式における露出の周期性に着目して、連続フレーム間の差動色偏移に情報を付加することで課題 1 を克服する。色の偏移を定量化するため、利用する色に位相を割り当て、連続フレーム間で撮像される色の位相偏移に情報を付加する。本方式で用いるシンボル構成の例を図 3 に示す。LED の色切り替えは、人間の眼に知覚されないために時間間隔数 ms 程度で高速に行う。シンボル長を一般的なカメラで採用されているフレーム周期 (1/30 s) と同じ長さで設定することで、各ラインの露出とシンボル内の時間関係が一定となる。そのため、連続フレーム間の全ラインにおいて位相偏移が一定となるシンボル設計が可能となり、課題 1 を克服できる。

また、シンボル内の色切り替えを一定間隔 T_{color} ごと循環的に行うことで課題 2 を克服する。手ぶれによって LED 光の画面内照射位置が変動した場合に、その変動量と、ラインごとの露出時間差 T_r および T_{color} を用いることで、

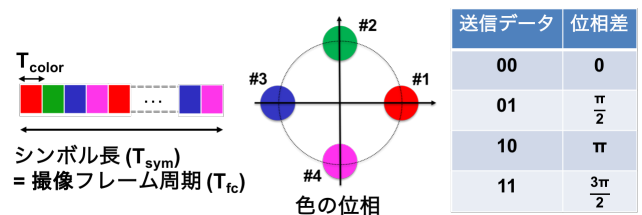


図 3: 差動色偏移変調方式におけるシンボル構成の例

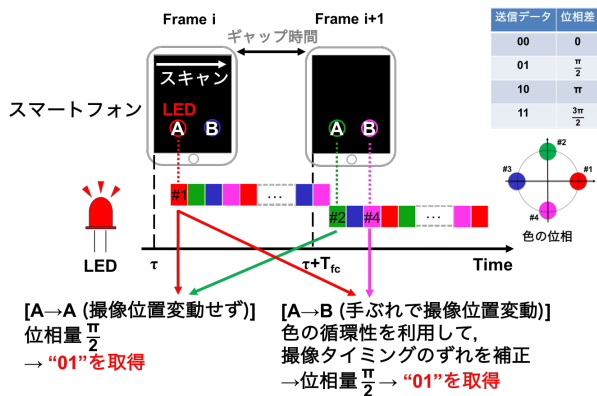


図 4: 差動色偏移変調方式の動作例

フレーム間における LED 光の撮像時間間隔がフレーム周期からずれた時間を推定し、元の時間における色を推定できる。ただし、通信中に画面内で色が切り替わる境界ラインが一度も撮像されない場合、色切り替えの正確なタイミングを把握できず、ずれた時間の正確な推定ができないことに注意されたい。この場合では、画面内境界ラインを複数通り予測し、並列計算しながら復調を行うことができる。

連続フレーム間の差動色偏移とシンボル内の循環的な色切り替えを組み合わせた DCSK の具体的な動作を図 4 に示す。例として、「赤・緑・青・紫」の順に位相を割り当てたシンボルを用いて、連続フレーム間で位相偏移が $\pi/2$ のシンボルを伝達する様子を示している。例えば、LED 光が座標 A に写る場合では、連続フレーム間にてそれぞれ赤色と緑色が撮像され、座標 B に写る場合では、それぞれ青色と紫色が撮像される。このように、LED 光の撮像位置によらず色の位相偏移が一定であるため、情報を正しく復調できる。一方、通信中に手ぶれが生じ、先行フレームでは座標 A にて赤色、後続フレームでは座標 B にて紫色が撮像された場合においても、両座標 A,B 間で色が 2 回切り替わることを計算することで、両シンボルの位相偏移が $\pi/2$ であると推定することができる。

DCSK で利用する色の数は、通信速度と SER (Symbol Error Rate) のトレードオフを考慮して決定する。 2^n ($n \in \mathbb{N}$) 色を用いてシンボルを構成し、受信機のフレームレートを F_R fps とすると、通信速度は $n \times F_R$ bps を達成する。一般的なスマートフォンのカメラでは、共通して 30 fps のフレームレートに設定できる。

3.2 LED 光の撮像時間間隔と共に変動する色の補正

通信中に手ぶれが生じ、LED 光の画面内照射位置が変動した場合に、LED 光の撮像時間間隔と共に変動した色を補正するためには、画面内でシンボルの色が切り替わる境界ラインを受信機が把握する必要がある。 $T_{sym} = T_{fc}$ に設定することから、色が切り替わる境界ラインを一度も撮像することができれば、画面内の全境界ライン \mathbf{Y} を計

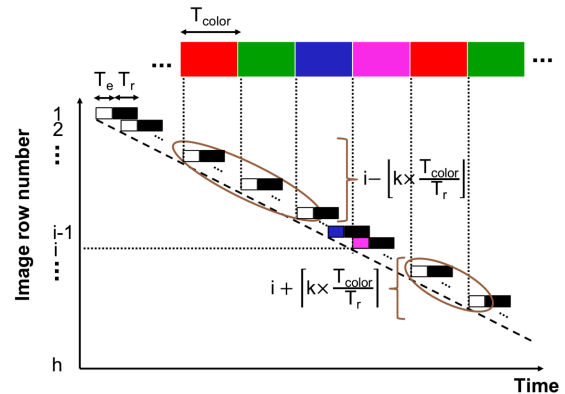


図 5: カメラの画面内でシンボルの色が切り替わる境界ラインの計算

算することができる。 \mathbf{Y} を計算することで、色切り替えの正確なタイミングを把握できるため、元の撮像タイミングにおける LED 光の色を正確に推定することが可能となる。演算処理によって、画面内境界ラインを複数通り予測しながら、復調することも可能である。

図 5 に、全部で h ライン存在する画面の $i-1$ ライン目と i ライン目において色の境界が撮像された様子を示す。この場合、 $i-1$ ライン目ではなく i ライン目を \mathbf{Y} の要素と定義する。境界ラインは整数値であるが、 T_r などの時間パラメータは整数値とは限らないため、各境界においてそれぞれ 2 ラインの境界候補が存在する。これらの候補のうちライン番号が大きいものを \mathbf{Y} の要素と定義する。これらの定義に従うと、 \mathbf{Y} の要素は変数 k_1 と k_2 (k_1 は自然数、 k_2 は非負整数) を用いて式 (2) で表される。

$$\mathbf{Y} = \begin{cases} i - \lfloor \frac{k_1 \times T_{color}}{T_r} \rfloor \geq 1 \\ i + \lceil \frac{k_2 \times T_{color}}{T_r} \rceil \leq h \end{cases} \quad (2)$$

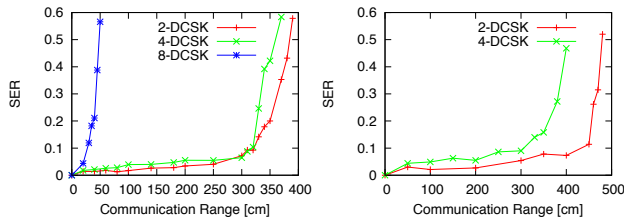
しかしながら、実際はシンボル長 T_{sym} と受信機のフレーム周期 T_{fc} には誤差 T_ϵ ($T_\epsilon = T_{sym} - T_{fc}$) が存在し、その誤差は機種ごとに異なる。そのため、各フレームごとに色境界ラインが僅かに変動する。これを考慮にいれて、 i ライン目を \mathbf{Y} の要素として採用したフレームから j フレーム後における境界 \mathbf{Y}_{actual} は式 (3) で表される。

$$\mathbf{Y}_{actual} = \begin{cases} i - \lfloor \frac{k_1 \times T_{color} - j \times T_\epsilon}{T_r} \rfloor \geq 1 \\ i + \lceil \frac{k_2 \times T_{color} + j \times T_\epsilon}{T_r} \rceil \leq h \end{cases} \quad (3)$$

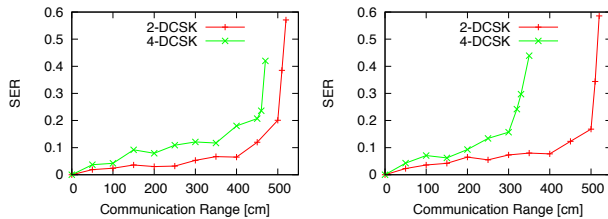
通信中に手ぶれが生じ、LED 光の画面内照射位置が変動した場合に、 \mathbf{Y}_{actual} を用いることで、LED 光の撮像時間間隔と共に変動した色を $T_e + T_r$ の時間誤差以内で補正することができる。

4. 実機実験

本節では、3 節で述べた DCSK に関して、はじめに機種依存パラメータの測定について述べた後、各種エラー率



(a) ASUS Zenfone 2 Laser ZE601KL (b) HTC Desire 626



(c) Fujitsu arrows M02 (d) HUAWEI GR5

図 6: 4 機種における通信距離と SER に関する評価

や通信距離を含めた複数機種における評価を示す。いずれの評価においても、マイコンとして Arduino UNO を、RGB-LED として EP204K-35G1R1B1-CA を利用し、口径 10 mm の拡散キャップを装着することで光の拡散を行う。環境光による外乱を抑制するため、各カメラの露出時間は、自動露出補正機能により十分短くなるタイミングで固定する。カメラの解像度は全てフル HD (1920 × 1080) に設定し、フレームレートはいずれの機種においても共通に設定可能な 30 fps に設定する。

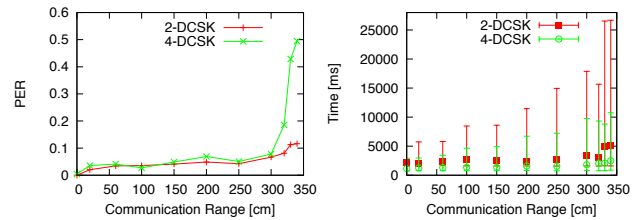
4.1 機種依存パラメータの測定

3.2 節で述べた画面内で色が切り替わる境界ラインの計算に向け、機種依存定数 T_F , T_r , T_{fc} を測定する。

機種依存定数の測定結果を表 1 に示す。 T_F は、LED を周期的に高速点滅させ、1 フレーム内に検出されたストライプ数と点滅周期をもとに算出する。 T_r は、2.1 節で述べた式 (1) を利用して算出する。式 (1) で利用する露出時間 T_e は、環境光によるノイズを防ぐために十分短く設定する必要がある、このとき T_F と比べ十分短い値となるため、 $T_e/(h-1) \approx 0$ と近似して T_r を算出する。 T_{fc} は、30 fps に設定した場合における理想的なフレーム周期 ($T_{fc} = 1/30$ [s]) から、機種ごとに誤差が生じるために測定が必要である。画面に現れる縞模様の位置が変動しないように

表 1: 機種依存パラメータの測定

Models	T_F (ms)	T_r (μ s)	T_{fc} (ms)
ASUS ZenFone 2 Laser ZE601KL	22.2	20.5	32.8
HTC Desire 626	30.1	27.9	33.0
Fujitsu arrows M02	23.4	21.7	32.8
HUAWEI GR5	24.7	22.9	33.0



(a) 通信距離と PER (b) 通信距離とパケット復号時間

図 7: ASUS Zenfone 2 Laser ZE601KL における通信距離と PER およびパケット復号時間に関する評価

LED の点滅周期を調節し、その時の点滅周期をもとに T_{fc} を算出する。

測定した T_r と T_{fc} を式 (3) に適用することで、画面内で色が切り替わる境界ラインの計算を高精度に行うことができる。これらの機種依存定数は、各機種ごとに 1 回ずつ測定すれば十分であり、本通信方式を用いたアプリケーションを実行する際には、すでに測定済みのパラメータを取得すれば良い。

4.2 シンボルエラー率 (SER) の評価

図 4 の DCSK について、利用する色の数と通信距離を変え、1000 シンボル送信中の SER の測定を行う。利用する色は、通信速度と SER のトレードオフを考慮して、合成色が白色となる組み合わせを「2 色、4 色、8 色」の 3 パターン選択する。撮像される色は、機種ごとのカラーフィルタの違いや、同じ機種同士の露出時間や ISO などのパラメータによって変化する場合がある [7]。本測定では、初期的評価として Asus Zenfone 2 Laser ZE601KL (Android5.0.2) を基準とし、ISO を最小に、露出時間を自動露出補正機能により十分短くなるタイミングで固定した時に、CIE XYZ 色空間上で測定される色のユークリッド距離が最大となる色の組み合わせを利用する。一方、各パターンにおいて、色の変化が人間の眼に知覚されないように、 T_{color} をそれぞれ「3.0 ms, 1.5 ms, 1.0 ms」に設定する。実験は照度が約 500 lux の屋内で行ない、5 人のユーザがカメラを手で持ちながら計測した。

図 6 に SER の測定結果を示す。図 6(a) において、8 色を利用した DCSK では、通信距離の増加に伴い色の識別が困難となり、SER が著しく増加することが確認できる。色の組み合わせを選択するときの基準とした Asus Zenfone 2 Laser ZE601KL であっても、8 色の利用が困難であることが確認されたため、その他の機種では「2 色、4 色」の 2 パターンのみ測定した。2 色と 4 色を利用した場合は、いずれの機種においても、通信距離が 3.0 m のとき SER は 0.1 前後であることが確認できる。通信距離の増加につれて、カメラの画面に写る LED 光の領域が小さくなり、色の識別が困難となることから、SER が増加することが確認

された。

4.3 パケットエラー率 (PER) およびパケット復号時間の評価

DCSK を用いた通信の用途として、例えば 16 bit 程度 (約 65000 通り) の ID 伝送を検討している。本節では、16 bit のデータに対し同期フラグと誤り訂正符号を加えたパケットを送信したときの、PER (Packet Error Rate) およびパケット復号時間を評価する。

パケット化では、データの先頭を受信機が把握するために、パケットの先頭にデータと重複のないフラグを用いたフラグ同期方式を適用する。“01111110”の 8 bit をフラグとして、データ部に“1”が連続で 6 回来る場合にはゼロインサージョン処理を行う。今回の測定では、この処理が不要なデータを利用した。また、高信頼な伝送のために誤り訂正符号を適用する。初期的実装として、複数の誤りを訂正可能な 2 元 BCH (Bose-Chaudhuri-Hoquinghem) 符号を採用し、16 bit のデータに対して 3 bit の誤り訂正が可能となるように、符号長を 15 bit としてパケット化を行う。

受信機は、8 bit のフラグを受信したあと、誤り訂正符号を含めた 31 bit のデータ部を受信し、再びフラグを受信したときにデータ部を復号する。復号の際に誤りを検知したとき、および 2 回目のフラグに 2 bit 以上の誤りがあったときには、復号失敗としてデータ部を破棄し、次のパケットを受信する。

PER およびパケット復号時間の測定環境について述べる。利用する色は、4.2 節で述べた SER を評価する際に利用した「2色、4色」の 2 パターンを選択し、 T_{color} の設定も同様に「3.0 ms, 1.5 ms」にそれぞれ設定する。受信機は Asus Zenfone 2 Laser ZE601KL を用いて計測する。実験は照度が約 500 lux の屋内で行ない、5 人のユーザがカメラを手で持ちながら計測した。

図 7 に PER およびパケット復号時間の評価を示す。通信距離 3.0 m までは、PER およびパケット復号時間は緩やかに上昇することが確認できる。通信距離が 3.0 m を超えた場合、4-DCSK における PER は著しく増加し、2-DCSK における復号時間も著しく増加することが確認できる。通信距離 3.0 m において、4-DCSK における PER は 0.0781、平均復号時間は 1.81 s となった。

PER およびパケット復号時間は、パケットの冗長性とトレードオフの関係にあるため、今後の設計では、アプリケーションの要件を考慮して冗長性を決定することを予定している。

5. 関連研究

LED-スマートフォンカメラ間通信は、カメラのフレームレート以下の速さで低速に点滅した LED から 1 フレーム 1 シンボル以下で情報を取得する方式と、フレームレート

以上の速さで高速に点滅した LED からローリングシャッター現象のもとで情報を取得する方式に大別される。

前者の方式 [1, 11] では、LED 光がカメラの画面に写る領域がわずかに数ピクセルであっても LED の色が認識できれば通信が可能であるが、LED の低速な点滅が人間の眼に知覚されるフリッカや低速な通信速度が問題となる。Picalico [1] では、RGB-LED の色を 100 ms 周期で切り替え、色度座標の違いに情報量を与える CSK (Color Shift Keying) によって数 10 bps の通信を実現している。しかしながら、100 ms 周期の色切り替えではフリッカが生じるため、Picalico を利用できる環境は限られる。一方、FlowSign Light [11] では、RGB-LED の各素子から発する光の強弱をそれぞれ時系列で制御し、光の色をわずかに変化させる CSK により、フリッカを抑制しながら最大 10 bps の通信を実現している。しかしながら、FlowSign Light では、LED 光をモノごとに照射し、その反射波を利用して一つのモノから情報を受信することを想定しており、複数の送信機が生成した光を遠方から同時に受信することについて検討されていない。また、16 bit の ID を伝送するために 2 秒以上かかり、通信速度の観点からアプリケーションが限定される。

後者の方式 [2-6] は、LED-スマートフォンカメラ間の通信速度を高速化する方式として注目されているものの、短い通信距離が課題となる。ローリングシャッター現象による LED 光の縞が画面に写る領域の大きさが、通信速度および通信の信頼性に関して支配的な影響を持つためである。LOS (Line-of-Sight) 環境における LED-カメラ間の通信可能距離を計測した研究 [2] によると、送信機として口径 62 mm の LED 電球を用いた場合においても、最大通信距離が 75 cm と非常に短い。また、画面に写る LED 光の領域を拡大するために、追加装置として受信機側にフィルタを使用することを提案しているが、汎用的なアプリケーションを実現するためには、スマートフォン側に追加装置が無いことが望ましい。一方、反射光を用いることで通信距離を拡大している研究 [3, 4] があるが、反射光を利用できる環境には限りがあるため本研究の目的に適していない。これらの研究で直接光を用いた場合、画面の数 100 ラインに LED 光が写らない限り通信できない。口径約 6.1 cm の光源を利用し、最大通信距離 6.5 m を実現する研究 [5] では、最大通信速度が 10 bps である上に、PRR (Packet Reception Rate) は 10 %未満と低く、ID の伝送に数秒以上の時間がかかる。CeilingTalk [6] では、一般的な蛍光灯と同程度の大きさ (120 cm×8 cm) である光源を利用した場合において、最大通信距離が 5.0 m 程度であり、この時の通信速度は 1.0 kbps と高速であるが、5.0 m 程度の通信距離では、ユーザがその光源付近にいない限り通信ができない。

以上のように、筆者らの知る限り、カメラの画面に数ピ

クセルのみ写る LED 光からの復調を可能とする長距離・フリッカ抑制型 LED-スマートフォンカメラ間通信は存在しない。

6. おわりに

本稿では、カメラの画面に数ピクセルのみ写る LED 光からの復調を可能とする長距離・フリッカ抑制型 LED-スマートフォンカメラ間通信方式を示した。各撮像フレームで画面に数ピクセルのみ写り、1色ずつ撮像される LED の色から復調を行う長距離型の通信では、撮像される LED の色が手ぶれの度合いによって変化することが課題となる。ローリングシャッター方式のもとでカメラのフレーム周期よりも高速に色を切り替える LED を撮像すると、撮像される色は画面内照射位置に依存するためである。本稿では、この課題を克服する機構として、LED の色を循環的に切り替えることで撮像タイミングがずれる前の LED の色を推定し、連続フレーム間で撮像される LED の色偏移に情報を付加することで撮像開始タイミングによらず復調ができる差動色偏移変調方式 (DCSK) を示した。複数機種での実機実験により、60 bps の通信を、口径 10 mm の小型 LED から 3 m を超える通信距離で実現できることを確認した。

本稿では特定の条件下で評価を行ったため、一般性に関する検討が今後の課題である。DCSK では、複数の機種で識別可能な色を用いる必要があるため、色の識別に利用する色空間についての検討を進めている。また、LED 光と環境光の外乱を識別するアルゴリズム、および複数の LED から同時に情報を取得するアプリケーションについて検討を進めている。

参考文献

- [1] カシオ計算機株式会社: 可視光通信システム Picalico, <http://picalico.casio.com/ja/> (available at Oct. 2018).
- [2] Park, H., Yeom, I. and Kim, Y.: Watch me if you can: exploiting the nature of light for light-to-camera communications, *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, pp. 329–334 (2017).
- [3] Julia, F. L., Daniel, C. M. and Josep, P. A.: A Reliable Asynchronous Protocol for VLC Communications Based on the Rolling Shutter Effect, *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6 (2015).
- [4] Du, H., Han, J., Jian, X., Jung, T., Bo, C., Wang, Y. and Li, X. Y.: Martian: Message Broadcast via LED Lights to Heterogeneous Smartphones, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 35, No. 5, pp. 1154–1162 (2017).
- [5] Rajagopal, N., Lazik, P. and Rowe, A.: Visual light landmarks for mobile devices, *Proceedings of the 13th international symposium on Information processing in sensor networks*, pp. 249–260 (2014).

- [6] Yang, Y., Hao, J. and Luo, J.: CeilingTalk: Lightweight Indoor Broadcast Through LED-Camera Communication, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 16, No. 12, pp. 3308–3319 (2017).
- [7] Hu, P., Pathak, P. H., Feng, X., Fu, H. and Mohapatra, P.: ColorBars: Increasing Data Rate of LED-to-Camera Communication using Color Shift Keying, *Proceedings of the 11th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, pp. 1–12 (2015).
- [8] Yang, Z., Wang, Z., Zhang, J., Huang, C. and Zhang, Q.: Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light, *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 317–330 (2015).
- [9] Liang, C. K., Chang, L. W. and Chen, H. H.: Analysis and compensation of rolling shutter effect, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 17, No. 8, pp. 1323–1330 (2008).
- [10] Do, T. H. and Yoo, M.: Performance analysis of visible light communication using CMOS sensors, *Sensors*, Vol. 16, No. 3, p. 309 (2016).
- [11] 倉木健介, 加藤圭造, 田中竜太: モノに情報を付与できる LED 照明技術, *FUJITSU*, Vol. 66, No. 5, pp. 88–93 (2015).