

# 変調光照明を用いた違法写真撮影判定手法の提案とその評価

宇野 耕平<sup>1,a)</sup> 平野 新<sup>1,b)</sup> 嶋田 祥太<sup>1,c)</sup> 渡邊 拓貴<sup>1,d)</sup> 橋爪 宏達<sup>2,e)</sup> 杉本 雅則<sup>1,f)</sup>

受付日 2019年6月15日, 採録日 2019年11月29日

**概要:** スマートフォンの普及により, 多くの人々が容易に写真を撮影できるようになった. それにともない盗撮等の違法撮影行為や, それらをインターネット上にアップロードすることによる著作権侵害等の増加が深刻な社会問題となっている. 本稿では, OFDM 変調された LED 照明光で環境を照らし, その周波数スペクトル分布により撮影画像の違法性を判定する手法を提案する. 分類器を用いた評価実験の結果, JPEG 圧縮画像を含む 5184 枚の画像に対して違法画像受け入れ率 1.92%, 合法画像拒否率 0.50% で判定できることを確認した.

**キーワード:** 変調光照明, 違法写真撮影, ローリングシャッターカメラ

## Illegal Photography Judgement Using Modulated Illumination and Its Evaluation

KOHEI UNO<sup>1,a)</sup> ARATA HIRANO<sup>1,b)</sup> SHOTA SHIMADA<sup>1,c)</sup> HIROKI WATANABE<sup>1,d)</sup>  
HIROMICHI HASHIZUME<sup>2,e)</sup> MASANORI SUGIMOTO<sup>1,f)</sup>

Received: June 15, 2019, Accepted: November 29, 2019

**Abstract:** Almost everyone has a smartphone and can easily take pictures. Consequently, illegal acts such as photographing or video-recording copyrighted works and uploading them to the internet are reported as a growing serious problem in our society. In this paper, we propose a method for detecting illegal photography under an LED light emitting orthogonal frequency division multiplexing multicarrier signals. Evaluation experiments using classifiers with 5184 photographed images including JPEG compressed images confirmed that the proposed method achieved 1.92% false acceptance rates and 0.50% false rejection rates.

**Keywords:** modulated illumination, illegal photography, rolling shutter camera

### 1. 序論

スマートフォンの普及により, 誰もがいつでもどこでも容易に写真を撮影できるようになった. Facebook や Insta-

gram 等の写真投稿型 SNS (social networking service) の利用者増大により, 1日に4億もの写真がインターネット上にアップロードされており [1], 写真撮影は日常的な活動になった. その一方, 違法撮影行為が深刻な社会問題として取り上げられている. 具体的には, 美術館, 博物館等の撮影禁止場所および, アーティストのライブ・コンサートにおける無許可撮影 [2], [3], 書店等での未購入書物の撮影によるデジタル万引き [4], 他者のプライバシーを侵害する盗撮行為 [5] 等があげられる.

これらの行為に対する主な対策は, 警備員等による口頭注意, ポスター等の掲示物による文面での周知等, 撮影者の協力を依存せざるをえないのが現状である. よって, 違

<sup>1</sup> 北海道大学  
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0814, Japan  
<sup>2</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics, Chiyoda, Tokyo 101-8430, Japan  
a) kouhei@ist.hokudai.ac.jp  
b) hirano@ist.hokudai.ac.jp  
c) shimadas@eis.hokudai.ac.jp  
d) hiroki.watanabe@ist.hokudai.ac.jp  
e) has@nii.ac.jp  
f) sugi@ist.hokudai.ac.jp

法撮影行為対策の効果には限界がある。撮影者の協力のみに限らず、撮影画像から違法性を判定する手法によりその行為を抑止する必要がある。

本稿では LED 照明から送信される OFDM (直交周波数分割多重方式, orthogonal frequency-division multiplexing) 変調信号を用い、撮影写真画像から抽出される照明光の周波数スペクトル分布により違法撮影を判定する手法を提案する [6]。提案手法により、たとえばアーティストのライブにおける無断・無許可撮影等の違法撮影の抑止効果が期待される。提案手法の特徴は、ローリングシャッター方式カメラのシャッター開度を周波数フィルタとして利用する点である。この周波数フィルタにより、特定の周波数スペクトル分布を得るためには、それに対応するシャッター開度での撮影が必要になる。すなわち、周波数スペクトル分布を利用した違法撮影の判定は、シャッター開度を鍵とすることで実現されている。鍵となるシャッター開度を知っているユーザは合法的な画像を撮影できるが、そうでなければ違法な画像しか撮影できなくなる。シャッター開度の周波数フィルタとしての機能は著者らにより理論的に導出され [7]、可視光通信等に 응용されている [8], [9], [10]。スマートフォンの多くのモデルにはローリングシャッター方式カメラが搭載され、シャッター開度やフレームレート等のカメラパラメータをソフトウェアにより異なる値に設定できる。よって、提案手法は現在普及している多くのデジタルカメラに実装可能である。

本稿では、指定されたカメラパラメータの値に設定されたカメラを合法カメラ、それ以外の値に設定されたカメラを違法カメラ、それらのカメラで写真撮影された画像をそれぞれ合法画像、違法画像とよぶ。実験では、異なる被写体に対し異なるカメラパラメータの設定で撮影を行い、撮影画像の違法性を分類器を用いて判定する。JPEG 圧縮された撮影画像に対して、判定能力がどのように変化するかを明らかにすることで、提案手法の評価を行った。

本稿の貢献は以下のとおりである。

- ローリングシャッター方式カメラにおいてシャッター開度の値が周波数フィルタとして機能することを利用して、OFDM 送信信号の周波数スペクトル分布を基に撮影画像の違法性判定を行う方法を提案した。これは、著者らが知る限り世界で初めての提案である。
- 分類器を用いた提案手法の評価実験を行った。その結果、ファイルサイズを  $\frac{1}{50}$  までに圧縮した JPEG 画像を含む 5184 枚の画像に対し、違法画像受け入れ率 (false acceptance rate: FAR) 1.92%, 合法画像拒否率 (false rejection rate: FRR) 0.50% を達成できることを確認した。

本稿は以下のように構成される。2 章では、提案手法に関連する先行研究を述べる。3 章では提案手法の概要について述べ、その実装にあたっての検討事項について議論す

る。4 章では、提案手法を用いた実験とその結果を示す。5 章では実験をふまえた提案手法の評価、限界、および今後の展開について議論する。6 章では本稿の結論について述べる。

## 2. 関連研究

カメラの同定により、撮影画像の違法性を判定する研究がこれまでに行われている。各々のデジタルカメラの撮像素子は異なる感度不均一性 (photo response non-uniformity: PRNU) を持ち、それが撮影画像に反映されるためカメラの fingerprint として利用できる [11], [12]。一方、PRNU は経年変化が小さく複数の撮影画像から推定が可能であること等から、敵対者 (adversarial) による偽造攻撃 (forgery attack) の危険性が指摘されている。これは、たとえばスマートフォン決済時の撮影画像による認証の際に問題となる。その対策として、SNS 等で公開され PRNU 推定に用いられたと考えられる画像と偽造画像との類似度の高さを利用する方法 [13]、偽造画像とオリジナルの RAW 画像との高周波成分での類似度の低さを利用する方法 [14]、スマートフォンカメラの burst mode で撮影された連続画像のノイズパターンの類似度に着目する方法 [15] 等が提案されている。PRNU はほぼ不変の fingerprint となるのに対し、提案方法ではシャッター開度の設定により撮影画像に現れる周波数スペクトル分布をそのカメラの fingerprint と考えることができる。照明から OFDM 送信信号の構成は可変であり、それに応じて上記のカメラパラメータを変更することで、提案手法では fingerprint も可変にして攻撃に対応できる点で異なる。

LiShield [16] では、on-off-keying により点滅させた LED 照明を用い、合法カメラ以外で撮影された写真にストライプパターンを埋め込む。Rainbow [17] は既存の照明設備を用い、違法撮影画像に色歪を発生させる。これらはローリングシャッター方式のカメラと LED 照明を用いる点が本研究と共通する。しかし、撮影画像の周波数スペクトル分布に影響を与えるシャッター開度の制御により、カメラの違法性を判定する手法ではない。

プロジェクトからの変調光を用いた実物体に対する情報埋め込み手法として、文献 [18] および [19] があげられる。文献 [18] は、ピクセルレベルで振幅変調された R および G チャネル光源の位相差を撮影画像により計算する。1 枚の画像から情報の復元が可能であるが、通常の照明によるピクセルレベルでの空間変調の実現は困難である。文献 [19] は、ビデオ撮影により得られる輝度値の変動から埋め込まれたテキスト情報を抽出する。ただし、複数画像を必要とする点で提案手法とは異なる。文献 [20] では、RGB の 3 色から構成される LED 照明の R, G, B のそれぞれの LED について上記と同様の微小な輝度変調によりビット列として符号化する。この手法も、復号には複数の撮影画像が必

要となる。

海賊版動画から電源周波数 (electrical network frequency: ENF) を検出する手法 [21] や、液晶ディスプレイ等の輝度フリッカからビデオカメラの特性を推定する手法 [22] が提案されている。これらはいずれも、オリジナルの動画を表示するディスプレイデバイスの特性を利用して違法撮影を判定する。

### 3. 提案手法

#### 3.1 数理モデルに基づく周波数フィルタ機能の導出

本節では、数理モデルから導出されるローリングシャッター方式カメラ (図 1) の周波数フィルタ機能について簡潔に示す (詳細は文献 [7] を参照)。カメラのフレーム周期  $T_p$  (フレームレートの逆数) に占めるシャッター開放の割合をシャッター開度  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ ) で表す。このとき、カメラの露光時間は  $\eta T_p$  となる。LED 照明からの送信信号を  $b(t)$ 、その基本周波数  $1/T_p$  とすると、 $b(t)$  は複素フーリエ級数に展開できる。ここで、 $k$  次のフーリエ係数  $\tilde{b}_k$  は式 (1) で表される。

$$\tilde{b}_k = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} b(t) e^{-j2\pi \frac{kt}{T_p}} dt \quad (1)$$

送信信号  $b(t)$  をローリングシャッター方式カメラのすべての受光素子を用いて撮影する。カメラの  $N$  本のラインセンサがすべて等感度であるとする、上から  $n$  番目のラインセンサの輝度値  $I_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) の値は式 (2) で表される。

$$I_n = \frac{A}{T_p} \int_{\frac{nT_p}{N}}^{\frac{nT_p}{N} + \eta T_p} b(t) dt \quad (2)$$

$A$  はラインセンサの感度によって定まる係数であり、便宜的に  $A = 1$  とする。撮影で得られた 1 フレーム分の画像を  $I = (I_0, I_1, I_2, \dots, I_{N-1})^T$  と表す。空間フーリエ級数に変換することで、画像  $I$  の  $k$  次のフーリエ係数  $\tilde{B}_k$  は式 (3) で表される。

$$\tilde{B}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{-j2\pi kn} \quad \left( -\frac{N}{2} \leq k \leq \frac{N}{2} \right) \quad (3)$$

式 (3) の  $I_n$  に式 (2) を代入して整理すると、式 (4) が得られる。

$$\tilde{B}_k = \eta e^{j\pi k \eta} \text{sinc}(\pi k \eta) \tilde{b}_k \quad (4)$$

式 (4) の  $\tilde{b}_k$  にかかる係数  $\eta e^{j\pi k \eta} \text{sinc}(\pi k \eta)$  は、シャッター開放時の積分動作に起因する値である。 $\eta$  と  $e^{j\pi k \eta}$  は 0 にならず、 $\text{sinc}(\pi k \eta)$  は  $k\eta = p$  ( $p$  は自然数) を満たす  $k$  と  $\eta$  のときに 0 となる。つまり  $\eta$  を操作することにより、周波数  $k/T_p$  の送信信号に対するフィルタとして機能することが分かる。なお、式 (4) の導出を容易にするために式 (1)

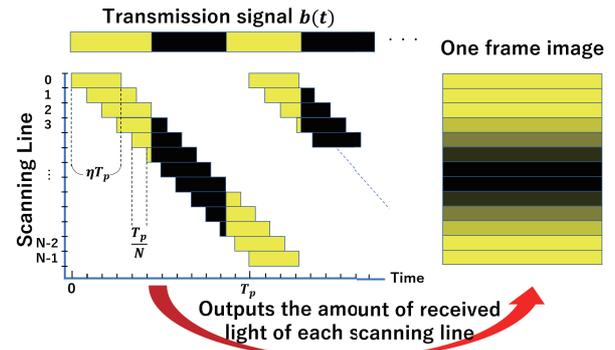


図 1 ローリングシャッター方式のカメラの撮像素子の動作図  
Fig. 1 Line-by-line scan implemented in a rolling shutter camera.

ではカメラのフレーム周期に合わせて送信信号の基本周波数を  $1/T_p$  としたが、異なるフレーム周期のカメラの場合、式 (4) で示される周波数フィルタの性質も異なる。これに関しては、3.4 節で述べる。

#### 3.2 送信信号の設計

LED 照明からの OFDM 送信信号は、複数の正弦波で構成される。本稿の評価実験では 4 つの正弦波を用いるが、サンプリング定理に従えば理論的には基本周波数に対する最大  $N/2$  次までの正弦波を用いて構成可能である。以下にその設計手順を示す。

**手順 1**  $f_B$  を照明光の基本周波数 (理想的にはフレームレート  $\frac{1}{T_p}$  に等しいが、詳細は 4.1 節を参照)、 $f_C$  を臨界融合周波数、 $f_S$  をローリングシャッターカメラの撮影画像に発生するストライプパターンが視認できなくなる照明光の最低周波数とする。 $f_C$  と  $f_S$  は被験者実験により決めるため、4.1 節で議論する。正弦波の基本周波数に対する次数を  $k_m \in \mathcal{Z}$  ( $m = 1, 2, \dots$ ) ( $\mathcal{Z}$  は自然数) とすると、 $k_1$  は  $k_1 > \frac{f_C}{f_B}$  を満たす最小の整数である。

**手順 2**  $\frac{f_S}{f_B} > k_m$  を満たす  $k_m$  について、 $|\text{sinc}(\pi k_m \eta)| < S_L$  を満たす  $\eta = \eta_i$  とそれに対応する  $k_m$  の集合  $K_i^L$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) を求める。閾値  $S_L$  は、 $0 \leq S_L \ll 1$  を満たす 0 または十分小さい実数に設定する。

**手順 3**  $\frac{f_S}{f_B} \leq k_m$  を満たす  $k_m$  について  $|\text{sinc}(\pi k_m \eta_i)| > S_H$  となる  $k_m$  の集合  $K_i^H$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) を求める。閾値  $S_H$  は、 $0 < S_H < 1$  を満たす  $S_L$  より十分に大きな実数に設定する。

**手順 4** 次数  $k_m \in K_i^L \cup K_i^H$  の正弦波 (周波数:  $k_m \times f_B$ ) により、式 (5) の OFDM 送信信号を構成する ( $A_m$  は定数)。

$$b(t) = \sum_{k_m \in K_i^L \cup K_i^H} A_m \sin(2\pi k_m f_B t) \quad (5)$$

上記の手順 1 により、式 (5) の OFDM 送信信号で点減

する LED 照明のちらつき（フリッカ）を抑止する．手順 3 により，合法的なカメラで撮影された画像の画質劣化を防ぐ．式 (5) の OFDM 送信信号をシャッタ開度  $\eta_i$  で撮影すると，次数  $k_m \in K_i^H$  の正弦波の周波数スペクトルのみ検出でき，他のシャッタ開度で撮影した場合にはそれ以外の次数の周波数成分も検出される．よって，周波数スペクトル分布を基に違法性判定が可能となる．なお，シャッタ開度  $\eta_i$  を解析的に求めることはできないため，閾値  $S_L, S_H$  を変えつつ解を探索する．その際，敵対者による発見を困難にするため，区間 (0.0, 1.0) での存在ができる限り少数になるように  $\eta_i$  を求める．

### 3.3 スペクトル抽出

撮影画像からのスペクトル抽出にはフーリエ変換を用いるが，図 2（左）のように被写体に起因する低周波スペクトルが非常に大きく検出される．そのため，LED 照明光の周波数スペクトルが相対的に小さくなり，検出が困難になる可能性がある．そこで，提案手法では撮影画像に対しあらかじめ以下に示す前処理を行うことで，LED 照明光の周波数スペクトルを確実に検出できるようにする．

撮影画像を RGB-YUV 変換により輝度画像に変換し，得られた画像  $I = (I_0, I_1, I_2, \dots, I_{N-1})^T$  に対し，以下の式 (6) を用いて新たに得られる画像を  $\hat{I}$  と表す．

$$\hat{I} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times I$$

$$= (-I_0 + I_1, -I_1 + I_2, \dots, -I_{N-2} + I_{N-1}, 0)^T \quad (6)$$

式 (6) は，撮影画像  $I$  の隣接ラインセンサ間の差分演算を行い，差分演算ができない  $I_{N-1}$  を 0 とする．図 1 に示すとおり，ラインセンサは一定の時間間隔（理想的には  $T_p/N$ ）でシャッタを開放するので，この演算は時間微分と見なせる．式 (5) の OFDM 送信信号は，時間微分により次数  $k_m$  の正弦波が  $2\pi k_m f_B$  倍され，高周波成分が強調される．図 2(a) の周波数スペクトルを持つ画像に式 (6) を適用し，抽出された周波数スペクトル分布を図 2(b) に示す．被写体に起因する空間周波数成分が大きく減衰し，LED 照明光の周波数スペクトルを検出できることが分かる．

### 3.4 カメラパラメータの検討

シャッタ開度以外のパラメータとしてカメラのフレーム周期の利用を検討する．図 2 と同じ OFDM 送信信号およびカメラのシャッタ開度に設定し，フレームレートを変化させながら白壁を撮影した場合の周波数スペクトル分布を図 3 に示す．この図から，フレーム周期を変化させるこ

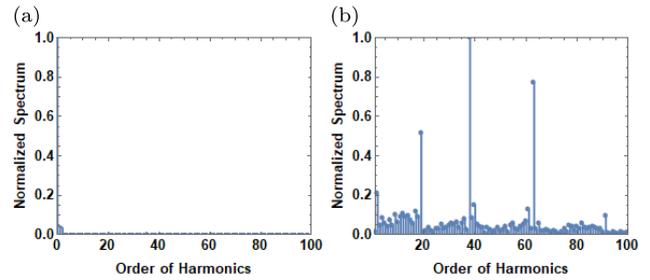


図 2 基本周波数 131.07 Hz の 19 次，38 次，63 次および 91 次正弦波からなる OFDM 信号による照明下での撮影画像のスペクトル分布（シャッタ開度  $\eta$  を 0.200 に設定）．(a) 前処理なし，(b) 前処理あり

Fig. 2 Frequency spectrum distributions of photographed images under illumination with OFDM signals consisting of 19th, 38th, 63rd and 91st sine waves with a fundamental frequency of 131.07 Hz ( $\eta$  set to 0.200). (a) Without preprocessing, (b) With preprocessing.

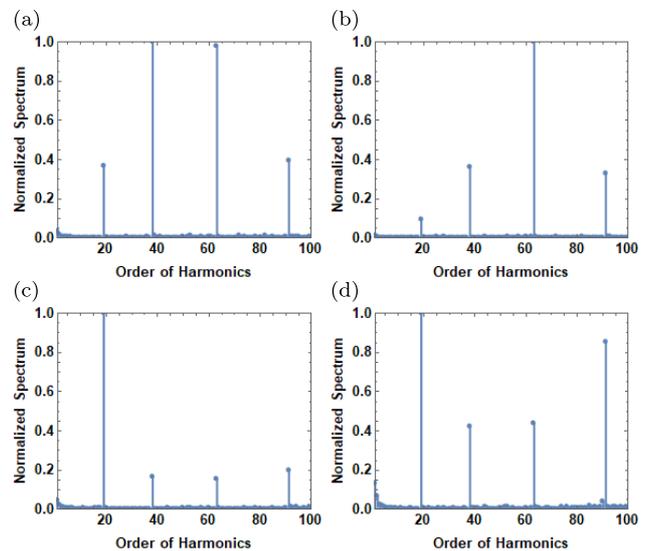


図 3 異なるフレーム周期で撮影した白壁画像のスペクトル分布（シャッタ開度  $\eta$  を 0.200 に設定）．(a) 60 fps で撮影，(b) 120 fps で撮影，(c) 50 fps で撮影，(d) 30 fps で撮影

Fig. 3 Frequency spectrum distributions of white wall images taken at different frame periods ( $\eta$  set to 0.200). (a) 60 fps, (b) 120 fps, (c) 50 fps, (d) 30 fps.

とにより周波数スペクトル分布が変化することが分かる．よって，撮影画像の違法性判定にフレーム周期をパラメータとして含めることも可能と考える．

## 4. 評価実験

前章では，違法性判定のカメラパラメータとしてフレーム周期の利用について検討した．フレーム周期を利用すれば推定すべきパラメータが増えるため，照明光の OFDM 信号やカメラパラメータを推定することによる攻撃がより困難になると考えられる．しかし，本稿では撮影画像の周波数スペクトルからの違法性判定に関しての性能評価に目

的を絞り、シャッタ開度のみを対象とした実験を行う。カメラパラメータの追加による性能評価や偽造等の攻撃への耐性については、別稿で扱う。

4.1 節では提案手法の実験条件について述べる。4.2 節では予備実験として、シャッタ開度変更による撮影画像の周波数スペクトル変化について 3.1 節および 3.3 節の議論との比較検証を行う。4.3 節では分類器を用いた撮影画像の違法性判定の実験とその結果について示す。

#### 4.1 実験設定

図 4 に実験環境の概要を示す。LED 照明は W-LITE 社の DL-FL-001 を用い、信号発生器である NF 回路設計ブロック社 WF1948 により送信信号を生成した。この際、36 V の直流電源を MOS-FET によってスイッチングし照明光を出力している。カメラは Point Gray 社の FL3-U3-13S2C を使用し、フレームレート 60 fps に設定して被写体の撮影を行った。なお、ローリングシャッタ方式カメラでは、撮像素子が受光しないデッドタイムが存在する。その時間を計測した結果、9.04 ms となった。デッドタイムを除いた 1 フレーム周期は 7.63 ms となるため、送信信号の基本周波数を 131.07 Hz に設定した。撮影画像のサイズは  $1,280 \times 1,000$  ピクセルとし、撮影対象として写真や文書、壁等の平面物を 8 種類、ぬいぐるみや家具等の立体物を 10 種類用意した。被写体の大きさに応じて、LED 照明と被写体の距離を 0.3 m ~ 2 m とした。評価実験開始前に被験者 3 名を対象とした実験を行い、3.2 節で議論した  $f_c$  および  $f_s$  を確定した。その結果、3.2 節の手順 2 および 3 を満たす次数  $k_m$  は、それぞれ 10, 65 となった。また、確実に高周波スペクトルを抽出するために次数の上限を 100 に設定した。よって、基本周波数 131.07 Hz の 10 次から 100 次までの正弦波を LED 照明からの OFDM 変調送信信号の候補とした。次に、3.2 節の手順 2, 3, 4 に基づき、19 次 (2,490.3 Hz), 38 次 (4,980.7 Hz), 63 次 (8,257.4 Hz) および 91 次 (11,927.4 Hz) の正弦波で OFDM 送信信号を構成し、式 (5) の振幅  $A_m$  をすべて同じ値に設定した。よって、合法画像では OFDM 送信信号の 91 次の周波数スペクトルのみが検出され、違法画像ではそれ以外の周波数スペクトルも検出されることになる。18 種類の被写体、12 の異なるシャッタ開度値 ( $\eta = 0.121, 0.127, 0.132, 0.143, 0.158, 0.185, 0.200, 0.208, 0.211, 0.237, 0.263, 0.396$ ) でそれぞれ 3 フレームずつ撮影し、RAW 画像 648 枚を得た。合法カメラのシャッタ開度の値は 1 つだけ ( $\eta = 0.158$ ) であるため、合法カメラによる撮影画像が 54 枚、違法カメラによる撮影画像が 594 枚となった。

#### 4.2 予備実験

図 5 (a) は、シャッタ開度  $\eta = 0.158$  (露光時間  $\eta T_p = 1.201$  ms) で撮影された 2 枚の画像、図 5 (b) はそれらの

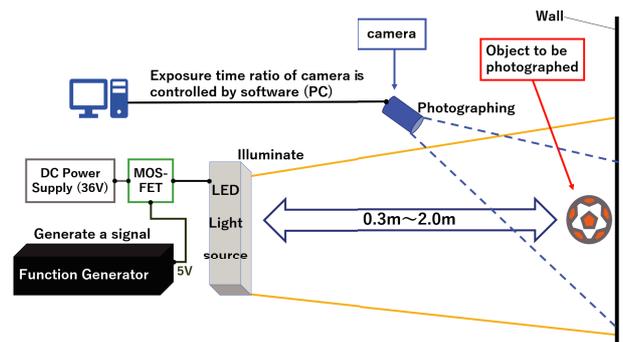


図 4 実験環境の概要図

Fig. 4 Overview of experimental environment.

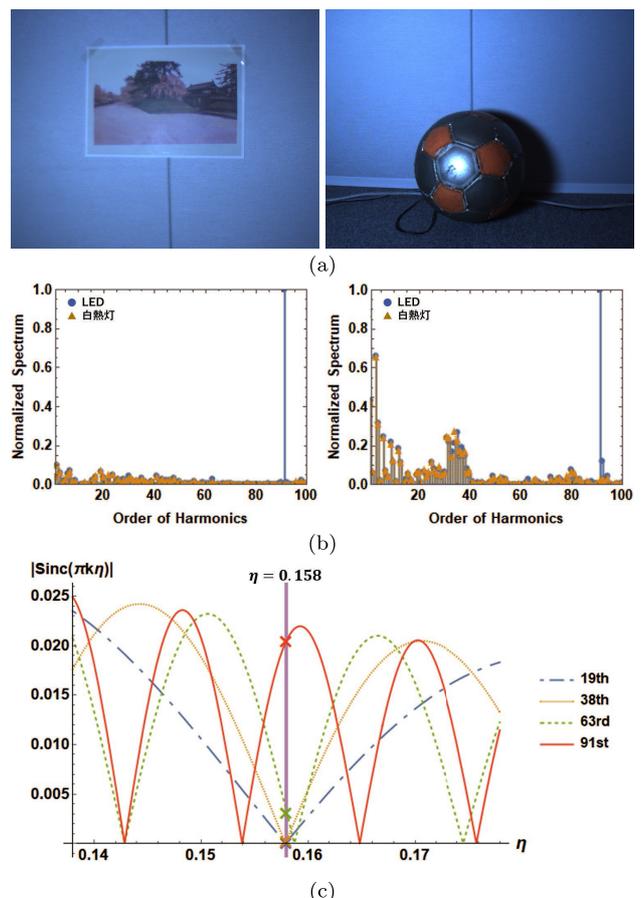


図 5 シャッタ開度  $\eta = 0.158$  での撮影。(a) 取得画像。(b) 微分演算による周波数スペクトル分布。LED 照明下および白熱灯照明下での撮影。(c)  $\text{sinc}(\pi k \eta)$  で得られる  $\eta = 0.158$  の各次数スペクトルの理論値

Fig. 5 Photographed with  $\eta = 0.158$ . (a) Photographed images. (b) Frequency spectrum distributions by differential operation. Photographing under LED and incandescent lighting. (c) Theoretical value of each order spectrum obtained by  $\text{sinc}(\pi k \eta)$  at  $\eta = 0.158$ .

周波数スペクトル分布を、白熱灯照明下で撮影された同画像の空間周波数スペクトル分布と重ねて表示したグラフである。同様に、図 6 (a) はシャッタ開度  $\eta = 0.2$  (露光時間  $\eta T_p = 1.522$  ms) で撮影された 2 枚の画像、図 6 (b)

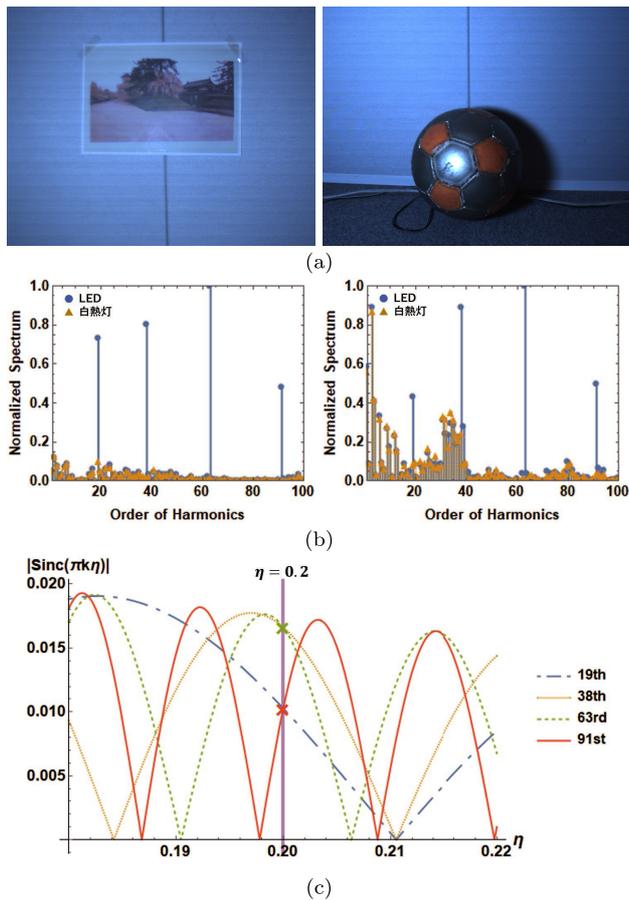


図 6 シャッタ開度  $\eta = 0.200$  での撮影。(a) 取得画像。(b) 微分演算による周波数スペクトル分布。LED 照明下および白熱灯照明下での撮影。(c)  $\text{sinc}(\pi k \eta)$  で得られる  $\eta = 0.2$  の各次数スペクトルの理論値

Fig. 6 Photographed with  $\eta = 0.2$ . (a) Photographed images. (b) Frequency spectrum distributions by differential operation. Photographing under LED and incandescent lighting. (c) Theoretical value of each order spectrum obtained by  $\text{sinc}(\pi k \eta)$  at  $\eta = 0.2$ .

はそれらの周波数スペクトル分布を、白熱灯照明下で撮影された同画像の空間周波数スペクトル分布と重ねて表示したグラフである。図 5(c), 図 6(c) はシャッタ開度に対する OFDM 送信信号の周波数スペクトルを、式 (4) 中の  $|\text{sinc}(\pi k \eta)|$  の値で示しており、それぞれのシャッタ開度値に対応する周波数スペクトル値を読みとることができる。

合法カメラによる図 5(a) の撮影画像から 91 次の周波数スペクトルのみが検出できることが、図 5(b) で確認できる。一方、違法カメラによる図 6(a) の撮影画像から他の周波数スペクトルも検出されることが、図 6(b) で確認できる。図 5(b) では 91 次以外の比較的大きな周波数スペクトルが観測されているものの、シャッタ開度が周波数フィルタとしておおむね理論どおりに機能することを本予備実験により示せた。図 5(b), 図 6(b) において、OFDM 送信信号の周波数に該当しない部分に若干の差異が見受けられる。これは被写体の空間周波数成分の違いによってもた

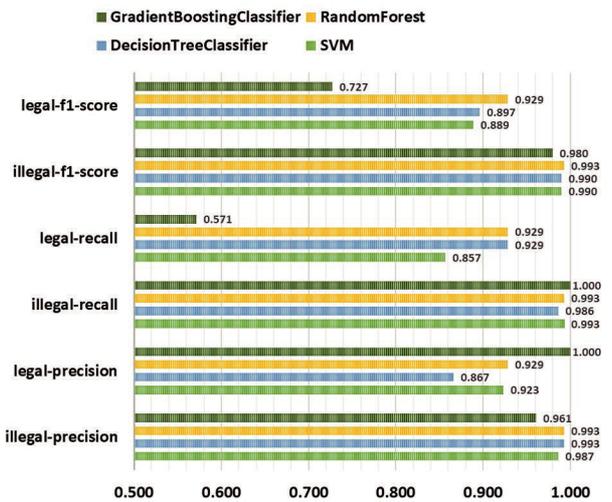


図 7 RAW 画像 648 枚に対する各分類器での F 値、再現率および適合率

Fig. 7 F-measure, recall and precision of each classifier for 648 RAW images.

らされる変化であり、被写体ごとに固有の分布として表れるものである。本提案手法においては、被写体の空間周波数成分に対して光源の周波数スペクトルを十分大きくとれるため、違法性判定への影響は十分に小さいと考える。

### 4.3 分類器による違法性判定

#### 4.3.1 RAW 画像に対する違法性判定実験

648 枚の RAW 画像をランダムに 3 : 1 に分割し、前者をトレーニングデータ、後者をテストデータとした。Python の機械学習ライブラリ scikit-learn (verion 0.20.3) に実装されているサポートベクトルマシン (support vector machine: SVM), 決定木 (decision tree classifier: DTC), ランダムフォレスト (random forest: RF) および勾配ブースティング回帰木 (gradient boosting classifier: GBC) を分類器として用いた。各分類器に関して、合法画像の F 値 (legal-f1-score), 再現率 (legal-recall), 適合率 (legal-precision) および違法画像の F 値 (illegal-f1-score), 再現率 (illegal-recall), 適合率 (illegal-precision) をそれぞれ図 7 に示す。GBC の F 値 (72.7%) および再現率 (57.1%) が他の分類器と比べて低いことが、この図から分かる。また、FAR および FRR はそれぞれ  $\text{FAR} = 1 - (\text{legal-precision})$ ,  $\text{FRR} = 1 - (\text{illegal-precision})$  で計算できるが、DTC 以外は FAR 7.7% 以下, GBC 以外は FRR 3.9% 以下で判定できることが分かる。

#### 4.3.2 JPEG 圧縮画像に対する違法性判定実験

SNS への投稿や大量画像の保存時に行われる画像圧縮を想定し、本稿では JPEG 画像に対する提案システムの評価を行った。Windows 10 上で XnConvert [23] を用い、RAW 画像 648 枚に対して異なる 7 つの圧縮率 (1/2, 1/8, 1/12, 1/15, 1/20, 1/30, 1/50) で JPEG 圧縮画像を生成した。

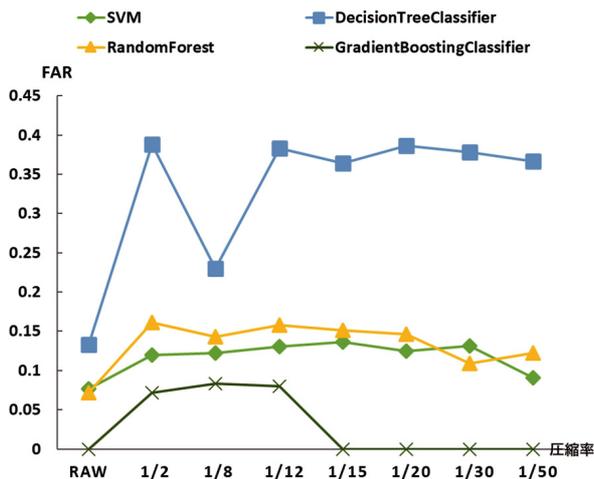


図 8 各分類器による FAR の圧縮率による変化

Fig. 8 FAR of each classifier for different compression ratios.

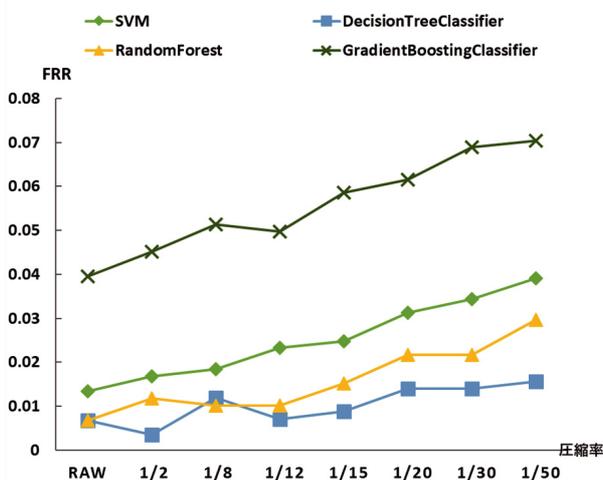


図 9 各分類器による FRR の圧縮率による変化

Fig. 9 FRR of each classifier for different compression ratios.

実験では、RAW 画像と JPEG 圧縮画像からなる 5184 枚の画像について、各分類器による違法性判定を行った。

RAW 画像のみで学習した 4.3.1 項の各分類器に対し、JPEG 圧縮画像に対する違法性判定を行った結果を示す。DTC と GBC に関してはやや変動があるものの、FAR と圧縮率との相関は比較的小さいことが図 8 から分かる。一方、FRR については 4 つの分類器のいずれに関しても圧縮率が高いほど性能が悪化する傾向があり、FRR と圧縮率の相関が高いことが図 9 で確認できる。図 10 は、OFDM 送信信号の各次数のスペクトルを RAW 画像のスペクトル値で正規化して示している。高次かつ高圧縮率ほどスペクトルの減衰が大きくなっており、これが FRR の悪化の一因と考えられる。一方、圧縮率 1/2 のスペクトル値にはほぼ減衰が見られないにもかかわらず FAR が悪化する原因については、より詳細な調査が必要である。

次に、4.3.1 項と同様にすべての画像 5184 枚をランダムに 3 : 1 に分割し、前者をトレーニングデータ、後者をテ

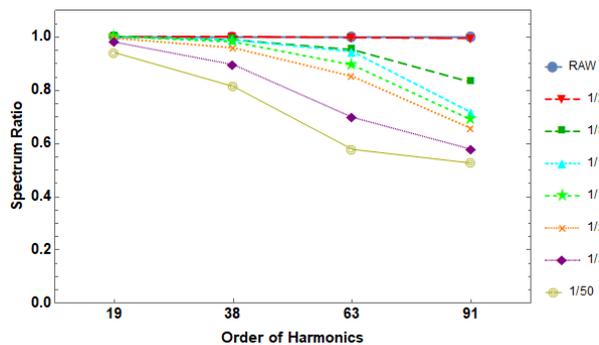


図 10 圧縮率別の光源周波数スペクトル値の比較

Fig. 10 Frequency spectra of light source for different compression ratios.

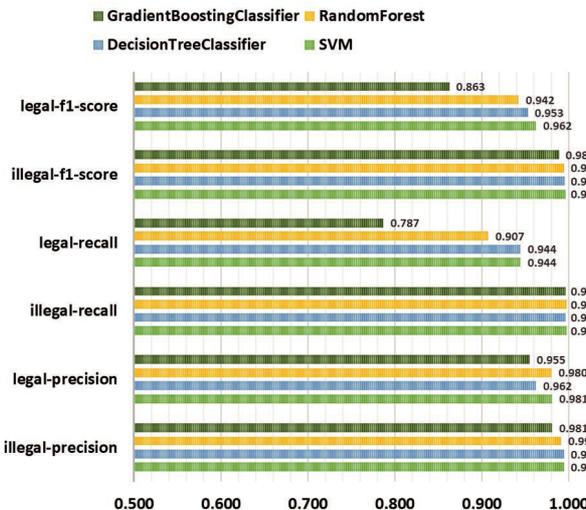


図 11 RAW 画像および JPEG 圧縮画像 5,184 枚に対する各分類器での F 値・再現率・適合率

Fig. 11 F-measure, recall and precision of each classifier for 5,184 RAW and JPEG compressed images.

ストデータとして各分類器の学習を行った。それらを用いて行った違法性判定の結果を図 11 に示す。圧縮画像を含むトレーニングデータを用いた学習により、違法性判定の性能向上が確認できる。4 つの分類器の中では、いずれの指標でも SVM が最も良い性能を示すことが分かる。SVM と提案手法を組み合わせることにより、FAR 1.92%、FRR 0.50% を達成できることを確認した。SVM が他の分類器よりもなぜ優れた性能を示すのかについては、今後の研究で調査を進めたい。

## 5. 考察

### 5.1 提案手法の課題

提案手法を FAR、FRR の指標で評価し、高い判定性能を示すことを前章で確認した。この結果は、先行研究 [11], [12], [13], [14], [15] の違法性判定の精度には若干劣る。しかし、これらの先行研究は 1 枚の画像の違法性判定に複数の画像の情報を用いる必要がある。その一方、本稿

の提案手法は、1枚の画像の違法性判定にその1枚の画像の情報のみを用いることで実現が可能であるという点で優位性がある。一般にFARとFRRはトレードオフの関係にあり、実用場面では利用者の要求に応じてその性能を調整することになる。一方、1枚の画像に対する違法性判定が可能ではあるものの、OFDM変調可能な照明設備、ならびに合法、違法カメラによる異なる圧縮率でのJPEG画像をトレーニングデータとして準備する必要があり、博物館や美術館等での利用にあたって一定の負担となる可能性がある。

実験では、被写体の特徴が提案手法の性能に影響を与えることが確認された。たとえば、黒色で照明光の反射率が小さい、形状やカメラとの位置関係により照明光の照射が難しい、ローリングシャッタの稼働方向(図1の垂直方向)に高い空間周波数を持つ等の特徴を持つ被写体の場合、照明光の周波数スペクトルが検出できない可能性がある。このような場合、たとえば撮影画像中の被写体以外のピクセルから照明光の周波数スペクトル抽出を試みる等の方法が考えられる。どの程度の性能改善が見られるかについて、今後調査する必要がある。

## 5.2 攻撃への対応

提案手法は、変調光照明下での被写体に含まれる周波数スペクトルから撮影画像の違法性を判定する。よって、同一の撮影環境で合法画像を得るためには、合法カメラのシャッタ開度を知る必要がある。その値が不変の場合、敵対者がシャッタ開度を変えながら撮影することにより合法画像を取得する可能性が高くなる。これを抑止する手法として、フレーム周期の導入(3.4節参照)によりパラメータの探索をより困難にする以外に、たとえばOFDM送信信号を構成する正弦波の組合せをランダムに変更し、撮影時のタイムスタンプと合法画像の周波数スペクトル分布とを対応付けて判定する方法が考えられる。送信信号の変更タイミングおよびシャッタ開度の情報を合法カメラが事前に取得できる手段を実装すれば、その実現は可能である。正しいタイミングでのシャッタ開度更新のためにカメラと照明装置間で時刻同期が必要となる場合、たとえば著者らによる手法[24],[25]等も利用できる。

図2で示したとおり、撮影画像中の高周波スペクトルは低周波スペクトルに比べて十分に小さい。よって、3.3節で示した微分操作を秘匿できれば、違法性判定に周波数スペクトルを用いていることを敵対者が推定するのは難しくなる。また、評価実験では4つの正弦波によりOFDM送信信号を構成したが、たとえば10~100次の正弦波を利用する場合、その組合せは最大で $\sum_{i=10}^{100} 100C_i = 1.268 \times 10^{31}$ 通りある。したがって、どの組合せを特徴量としてどのように用いているかを特定することは非常に困難である。さらに、式(4)に含まれる $e^{j\pi k\eta}$ により、フーリエ係数 $\tilde{B}_k$ は

$\pi k\eta$ だけ位相が回転する。よって、各次数の位相情報(位相差)を判定に利用できれば、推定はより困難になると考えられる。

一方、敵対者が提案手法についての知識を持っており、合法画像に対する微分操作により周波数スペクトル分布を特定できると想定する。その場合、合法画像と同等の周波数スペクトルを違法画像に重畳させて偽造攻撃を行えるため、提案手法による違法性判定は困難になる可能性が高くなる。この問題に対しては、たとえばホワイトノイズを重畳することで画像改ざんを検知する[26]等の既存手法との併用も検討することになると考える。

## 6. 結論

本稿では、LED照明下での違法写真撮影判定手法を提案した。提案手法は、ローリングシャッタ方式カメラのシャッタ開度がOFDM送信信号に対する周波数フィルタの機能を持つことを利用した点に特徴がある。評価実験により、FAR 1.92%、FRR 0.50%を達成できることを確認した。今後は、提案手法の動画への拡張やスマートフォンでの実装についても検討を進める予定である。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP17K19952, JP19H04222の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Brandwatch: Social Media Statistics 2019, available from (<https://www.brandwatch.com/blog/amazing-social-media-statistics-and-facts/>).
- [2] NEVER まとめ、「どうして?」この場所が『写真撮影禁止』な理由まとめ, 入手先 (<https://matome.naver.jp/odai/2142812586011103301>) (参照 2019-05-20).
- [3] excite. ニュース, 日本における「ライブの写真撮影」解禁のメリットと問題点とは, 入手先 (<https://www.excite.co.jp/news/article/E1528855763561/>) (参照 2019-10-02).
- [4] livedoorNEWS, 盗撮? デジタル万引き? スマホのカメラ撮影と犯罪の関係, 入手先 (<http://news.livedoor.com/article/detail/7947167/>) (参照 2019-05-20).
- [5] 弁護士ドットコム, 「フォトハラ」勝手に写真を撮られ、SNSにアップされた…どんな法的問題がある?, 入手先 ([https://www.bengo4.com/c\\_18/n\\_6640/](https://www.bengo4.com/c_18/n_6640/)) (参照 2019-05-20).
- [6] Uno, K., Hirano, A., Hashizume, H. and Sugimoto, M.: Illegal Photograph Detection under Modulated LED Illumination, *Proc. IEEE PerCom 2019* (WiP Poster), Kyoto, Japan, pp.395–398 (2019).
- [7] 橋爪宏達, 杉本雅則: 汎用ビデオカメラを用いた可視光通信, *電子情報通信学会誌*, Vol.101, No.1, pp.44–51 (2018).
- [8] 杉本雅則, 熊木逸人, 秋山尚之, 橋爪宏達: TOPVLC: 時間遅延推定のための最適変調信号を用いることによる高速可視光通信手法, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J101-B, No.5, pp.405–416 (2018).
- [9] Hirano, A., Shimada, S., Hashizume, H. and Sugimoto, M.: Selective Visible Light Communication for Multiple Video Cameras using a Single Light Source, *Proc. ACM SenSys 2018*, Shenzhen, China, pp.335–336 (2018).
- [10] 嶋田祥太, 橋爪宏達, 杉本雅則: CMOS イメージセンサ

- を用いた OFDM 高速可視光通信, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J102-B, No.8, pp.605–613 (2019).
- [11] Lukáš, J., Fridrich, J. and Goljan, M.: Digital Camera Identification from Sensor Pattern Noise, *IEEE Trans. Information Forensics and Security*, Vol.1, No.2, pp.205–214 (2006).
- [12] Chen, M., Fridrich, J., Goljan, M. and Lukáš, J.: Determining Image Origin and Integrity Using Sensor Noise, *IEEE Trans. Information Forensics and Security*, Vol.3, No.1, pp.74–90 (2008).
- [13] Goljan, M., Fridrich, J. and Chen, M.: Defending against Fingerprintcopy Attack in Sensor-based Camera Identification, *IEEE Trans. Information Forensics and Security*, Vol.6, No.1, pp.227–236 (2011).
- [14] Quiring, E. and Kirchner, M.: Fragile Sensor Fingerprint Camera Identification, *Proc. IEEE WIFS 2015*, Rome, Italy, pp.1–6 (2015).
- [15] Ba, Z., Qin, Z., Fu, X. and Ren, K.: CIM: Camera in Motion for Smartphone Authentication, *IEEE Trans. Information Forensics and Security* (2019).
- [16] Zhu, S., Zhang, C. and Zhang, X.: Automating Visual Privacy Protection Using a Smart LED, *Proc. ACM MobiCom 2017*, Salt Lake City, UT, pp.329–342 (2017).
- [17] Yang, L., Wang, W., Wang, Z. and Zhang, Q.: Rainbow: Preventing Mobile-Camera-based Piracy in the Physical World, *Proc. IEEE INFOCOM 2018*, Honolulu, HI, pp.1061–1069 (2018).
- [18] Komori, M. and Uehira, K.: Optical Watermarking Technology for Protecting Portrait Rights of Three-dimensional Shaped Real Objects using One-dimensional High-frequency Patterns, *Journal of Electronic Imaging*, Vol.22, No.3, 033004 (2013).
- [19] Unno, H. and Uehira, K.: Display Technique for Embedding Information in Real Object Images using Temporally and Spatially Luminance-modulated Light, *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.53, No.6, pp.5966–5971 (2017).
- [20] Kuraki, K., Kato, K. and Tanaka, R.: ID-embedded LED Lighting Technology for Providing Object-related Information, *Fujitsu Science Technology Journal*, Vol.52, No.1, pp.86–90 (2016).
- [21] Hajj-Ahmad, A., Berkovich, A. and Wu, M.: Exploiting Power Signatures for Camera Forensics, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.23, No.5, pp.713–717 (2016).
- [22] Hajj-Ahmad, A., Baudry, S., Chupeau, B., Doërr, G. and Wu, M.: Flicker Forensics for Camcorder Piracy, *IEEE Trans. Information Forensics Security*, Vol.12, No.1, pp.89–100 (2017).
- [23] XnConvert Version 1.77, Libformat version 7.20, available from <http://www.xnconvert.com>.
- [24] Sugimoto, M., Kumaki, H., Akiyama, T. and Hashizume, H.: Optimally Modulated Illumination for Rapid and Accurate Time Synchronization, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.65, No.2, pp.505–516 (2017).
- [25] Akiyama, T., Sugimoto, M. and Hashizume, H.: Time-of-arrival-based Indoor Smartphone Localization Using Light-synchronized Acoustic Waves, *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol.E100-A, No.9, pp.2001–2012 (2017).
- [26] Ba, Z., Piao, S., Qin, Z., Fu, X., Koutsounikolas, D., Mohaisen, A. and Ren, K.: ABC: Enabling Smartphone Authentication with Built-in Camera, *Proc. NDSS 2018*, San Diego, CA, p.14 (2018).



宇野 耕平 (学生会員)

2018年弘前大学理工学部数理科学科卒業。現在、北海道大学大学院情報科学研究科修士課程在学中。電子透かしに関する研究に従事。



平野 新

2018年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科修士課程在学中。可視光通信に関する研究に従事。



嶋田 祥太

2016年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科博士課程在学中。可視光通信、屋内位置認識に関する研究に従事。



渡邊 拓貴 (正会員)

2012年神戸大学電気電子工学科卒業。2017年同大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年北海道大学助教となり、現在に至る。



橋爪 宏達 (正会員)

1984年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年東京大学助手(文献情報センター)。1986年学術情報センター助教授。1989年から1990年までペンシルバニア大学客員助教授。1990年文部省学術調査官(併任)。1998年学術情報センター教授。2000年国立情報学研究所教授。2002年総合研究大学院大学教授を併任。



杉本 雅則 (正会員)

1990年東京大学工学部航空学科卒業。  
1995年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年学術情報センター(現, 国立情報学研究所)助手。1999年東京大学助教授。2012年北海道大学教授となり, 現在に至る。