

令和 4 年 4 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21781

研究課題名（和文）変調照明光と単一画像を用いることにより高耐攻撃性を実現する違法撮影判定手法

研究課題名（英文）Illegal Photography Detection with High-attack Resistance Using Modulated Illumination and Single Image

研究代表者

杉本 雅則（SUGIMOTO, MASANORI）

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：90280560

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主な成果は以下の通りである。(1) 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、OFDM(直交周波数分割多重方式)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。(2) 撮影画像の位相情報が被写体により変化する現象のモデルを導出し、シミュレーションによってモデルの妥当性を確認した。(3) 大規模画像データベースを構築するとともに、分類器を用いた提案手法の評価を行った。その結果、99.0%以上のf1-scoreを達成できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマートフォンの普及により、写真、動画のインターネット上での共有が容易になった。一方、それらには撮影が制限されるはずの映画館、美術館、コンサート会場等のコンテンツも含まれ、知的財産権保護の観点から喫緊の対策が求められる。

本申請で提案、構築された違法撮影判定手法は、上記の社会的要請に応じた研究であるとともに、1枚の画像のみで実現可能である点、露光時間の周波数フィルタ機能に着目する点など、学術的にも新規性の高い点が意義として挙げられる。

研究成果の概要（英文）：The outcomes of the project are summarize as follows: (1) we find that a exposure time of a rolling-shutter camera works as a frequency filter and propose an illegal photography detection method that analyzes frequency spectra of captured images illuminated by OFDM optical signals. (2) we propose a model to explain how phases of captured images are affected by photographed objects and confirmed the model through computer simulations. (3) we conduct evaluations of the proposed method using a large-scale image database and multiple classifier algorithms, and confirm that the method can achieve the f1-score higher than 99.0%.

研究分野：情報科学

キーワード：違法撮影判定

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット PC 等のカメラ付き携帯端末の普及により、違法撮影およびそのコンテンツのアップロードは後を絶たない。映画館等の現場では来館者への注意喚起が行われているが、有効な防止手法は未確立である。違法撮影動画からのカメラ同定や撮影環境推定手法は、主に **information forensics** 分野で研究されている。しかし、画像 1 枚からの違法撮影判定は、動画とは異なり瞬時のデータ取得を基に行うため、その痕跡の頑健な検出は困難である。申請者が導出した周波数選択性技術[1][2]を用いれば、単一 LED 光源下で撮影された 1 枚の画像に対し、カメラおよび撮影環境の特徴を確実に抽出できる。申請者の知る限り、「フィルタとしてのカメラ」の理論式を展開した新しい原理に基づき、スペクトルと位相回転の同時利用による頑健な違法性判定手法の提案は、既存研究では見当たらない。

### 2. 研究の目的

本申請では、写真および動画の違法性を判定する新しい手法を提案する。近年のスマートフォンカメラでは、フレームレート、感度などのカメラパラメータの値をソフトウェアにより変更できる点に注目し、「光信号に対する周波数フィルタとしてのカメラ」という申請者独自の研究成果[1][2]を発展的に拡張する。撮影許可されたカメラを認可 (**authorized**) カメラ、それ以外を無認可 (**unauthorized**) カメラとし、それらで撮影された 1 枚の写真あるいは動画から抽出された 1 枚の画像だけから違法性を正確かつ頑健に判定する。

従来研究[3,4]として、動画再生表示用デバイス（プロジェクタ、液晶ディスプレイなど）から生じるフリッカ（ちらつき）や撮影環境に起因する撮像素子の雑音（電源周波数ノイズなど）を基に、違法撮影を判定する手法が挙げられる。ただし、これらの手法では 1 枚の画像だけからの判定はできない。[5]では、RGB 信号強度を制御可能な LED 照明を用い、視認可能なストライプパターンを雑音として重畳させて画質を低下させる。しかし、このパターンを編集により抑圧、除去すれば証拠隠滅が可能となる。提案手法は既存手法と同様に照明光を用いるが、視認不可能で違法撮影者による除去や偽造が困難な特徴量の重畳かつ検出により、従来手法よりも正確かつ頑健な判定手法を実現する。

### 3. 研究の方法

図 1 に提案手法の概要を示す。ローリングシャッター方式カメラでは撮影の際、1 行ずつ順に露光を開始する。この行を走査線と呼ぶ。カメラのフレームレートを  $f_p$  とする。  $T_p$  はカメラ周期 ( $T_p = 1/f_p$ ) を表し、  $T_e$  は走査線の最初と最後の露光開始の時間差を表す。提案手法では異なる走査線から得られる輝度値に対しフーリエ変換を行う。

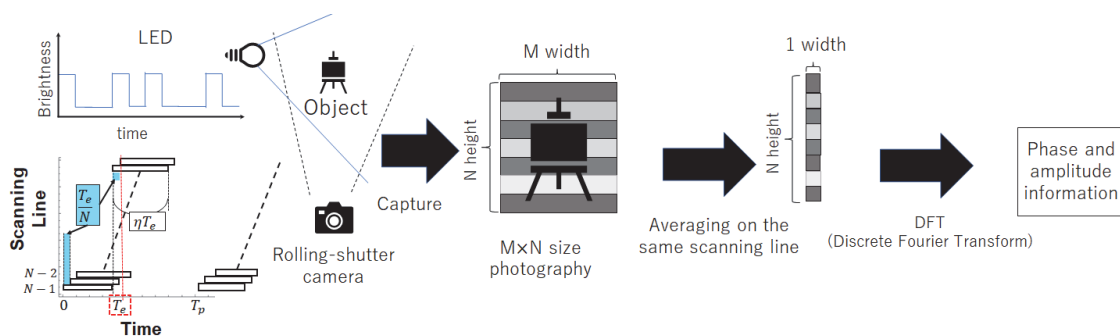


図 1： 提案手法の概要図。  $T_e$  は走査線の最初と最後の露光開始の時間差。  
  $T_p$  はカメラのフレーム周期。

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のスペクトル変化について、簡潔に説明する（数理モデルに関する詳細は[1][2]を参照）。カメラ周期  $T_p$  に占めるシャッター開放の割合をシャッター開度  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ )、  $n$  番目の走査線のピクセルが得る画素値を  $I_n$ 、走査線の総本数を  $N$  で表す。撮影して得た 1 フレームの画像  $\mathbf{I} = (I_0, I_1, \dots, I_{N-1})$  をフーリエ級数に変換する。このとき画像  $\mathbf{I}$  の  $k$  次の係数  $B_k$  は次のように書ける。

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

式(1)を計算することで以下の式が得られる。

$$B_k = \eta e^{j\pi k\eta} \beta_k \text{sinc}(\pi k\eta) \tag{2}$$

ここで  $\beta_k$  は以下の送信信号  $b(t)$  の  $k$  次高調波の振幅を表す。また、 $\text{sinc}(x) = \sin x/x$  である。

$$b(t) = \sum_{k=-K}^K \beta_k e^{j2\pi kt/T_e}$$

係数  $\eta e^{j\pi k\eta} \text{sinc}(\pi k\eta)$  は、シャッター開放の積分動作により発生する値である。特に  $\text{sinc}(\pi k\eta)$  は  $k\eta = p$  ( $p$  は整数) を満たすとき 0 になることから、シャッター開度  $\eta$  を操作することで周波数のフィルタとなる。さらに、 $e^{j\pi k\eta}$  によりシャッター開度を変更することで受信した信号の位相が変化する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験設定

提案手法の性能評価のため多数の実験を行った。本項では、機械学習アルゴリズムを用いた実験結果についてのみ示す。

実験環境の概要を図2に示す。LED 照明光は W-LITE 社の DL-FL-001 を、信号発生器は NF 回路設計ブロック社 WF1948 を用いた。その際、36 V の直流電流を 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 を用いた。カメラのシャッタータイミングは信号発生器から送信される矩形波によって制御しており、カメラが 60 fps で動作するよう設定する。信号発生器側で LED 照明光に送信される信号とカメラに送信される信号の時刻同期を取る。今回使用するカメラの走査線の最初と最後の露光開始の時間差は 7.629 ms であり、従って LED 側の送信信号の基本周波数を 131.07 Hz に設定した。画像は全て 400×1000 で撮影を行っているが、使用したカメラは隣接する走査線が 2 本同時に動作する。そのため、走査線は 1000 本で撮影を行っているが実際に計算で使えるのはその半分の 500 となる。撮影は全て暗室環境で行った。照明光源からの送信信号を含む実験設定を表1に示す。使用した被写体の例を図3に示す通り、全て平面物体である。

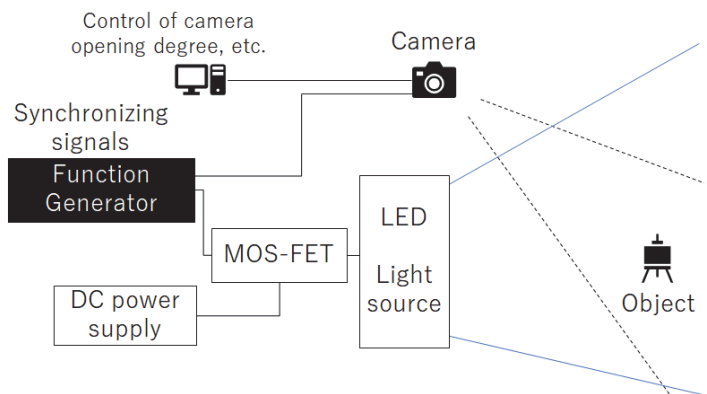


図2. 実験環境の概要

信号	85, 98, 123, 140, 170 次
シャッター開度( $\eta$ )	0.10027, 0.12032, 0.14037, 0.16043, 0.18048, 0.19949, 0.21955, 0.23960, 0.25965, 0.27970
被写体の種類	16
撮影枚数	16,000 (100×16×10)

表1 実験設定

合法のシャッター開度を 0.19949 とする。合法のシャッター開度で撮影した際は式(2)より 85, 140, 170 次の振幅の絶対値が 0 に近い値を取る。また 98, 123 次については振幅の絶対値が、位相情報を取るのに十分な大きさになると考え、振幅情報だけでなく位相情報も特徴量とする。123 次の信号について、シャッター開度  $\eta$  とそれに対する  $|\text{sinc}(123\pi\eta)|$  の変化を図4に示す。

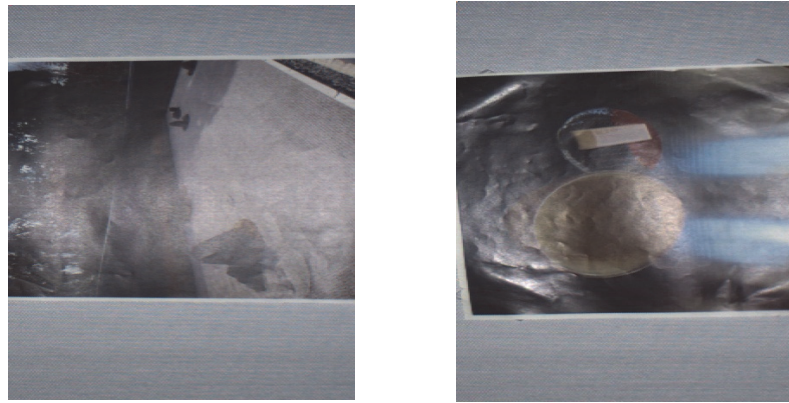


図3 分類に使用した画像例

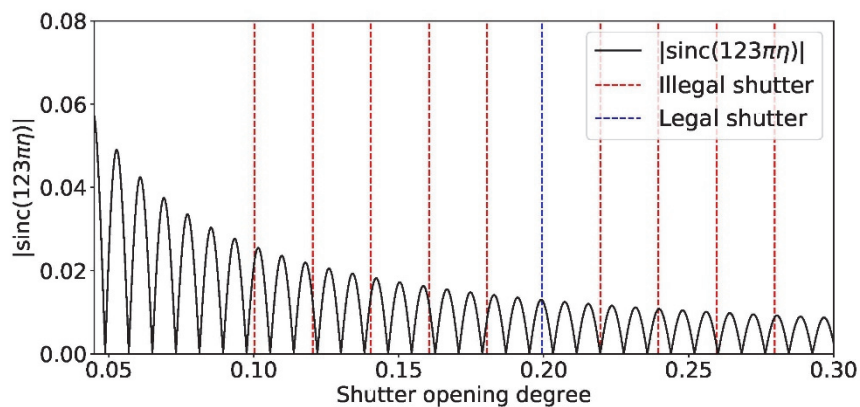


図4  $|\text{sinc}(123\pi\eta)|$  とシャッター開度  $\eta$  との関係

特徴量の計算では、連続する2つの走査線の値で差分を取り、フーリエ変換を行う。これにより差分を取らずに計算を行った際よりも、高次の振幅が強調される[6]。また、振幅の絶対値をそのまま特徴量とするのではなく、送信した周波数内で正規化を行い特徴量とする。これは異なる被写体を撮影した際に振幅の絶対値は変化するが、各周波数の振幅の絶対値の大小関係は、シャッター開度による影響が大きいため、被写体によって大きく変化しないと考えるためである。位相情報については差分を取らずに計算し、その値を特徴量とする。

違法撮影を行うカメラは、照明光源との時刻同期を取れないと想定できる。そこで、合法のシャッター開度での撮影の際はカメラと信号の時刻同期を取り、違法のシャッター開度で撮影する際は時刻同期を取らずに撮影を行う。合法画像は1600枚、違法画像は14400枚となる。また画像は全てPNG形式で保存する。

違法撮影判定を複数の機械学習アルゴリズムを用いて行う。具体的には、Pythonの機械学習ライブラリ scikit-learn (version 0.22.1) に実装されているサポートベクトルマシン (support vector machine: SVM)、ランダムフォレスト (random forest: RF)、 $k$ 近傍法 ( $k$ -Nearest Neighbor Algorithm:  $k$ -NN) を用いる。合法、違法画像を合わせた16000枚の画像データを被写体ごとに分割し計16組のデータにし、16分割交差検証法を行う。

## (2) 実験結果

f値 (f1-score)、再現率 (recall) および適合率 (precision) を図5に示す。なお、Ampとは、分類を行う際の特徴量として振幅のみを用いて分類した結果である。

図5のf値に注目すると、位相情報を用いた場合と用いなかった場合では用いた場合のほうが結果が良く、特にSVMと $k$ 近傍法はその差が大きいことが確認できる。また、位相情報を用いた場合、SVMのf値は0.996となっていることから高い精度で分類を行えていることが分かる。分類についてのROC曲線 (receiver operating characteristic curve) を図6に示す。ROC曲線の結果からも、位相情報を用いた場合のSVMが他の分類器より優れていることが分かる。

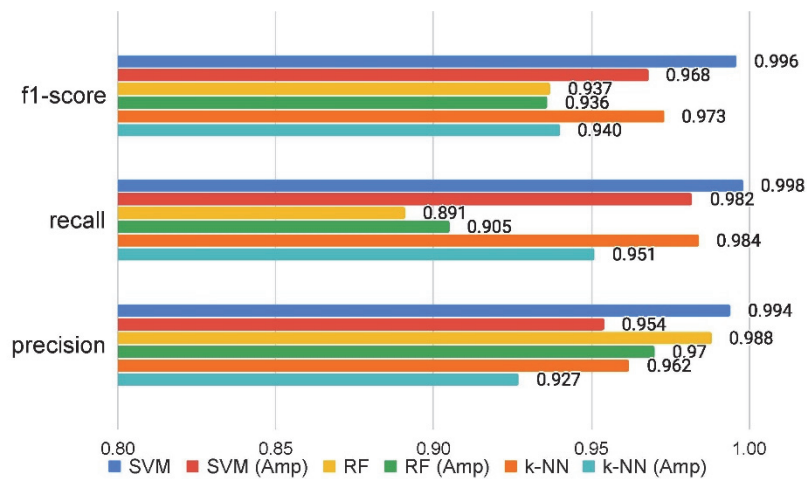


図5 f 値, 再現率および適合率

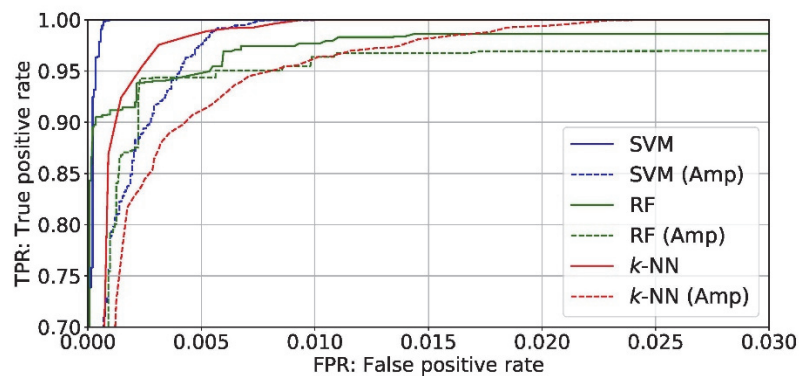


図6 各分類器のROC 曲線

本研究では, 変調光と単一の画像から違法撮影判定を行う新しい手法を提案した. 評価実験では, 振幅情報のみでの分類 f-score 96.8 %, 位相情報の導入により f1-score 99.6 %を達成した. 今後は, 提案手法の更なる性能向上を目指すとともに, 博物館やコンサートホール等の実世界で展開を視野に入れて研究を進めていく予定である.

#### 参考文献

- [1] Sugimoto, M., Kumaki, H., Akiyama, T., Hashizume, H.: Optimally Modulated Illumination for Rapid and Accurate Time Synchronization, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.65(2), 505-516, 2017.
- [2] 橋爪, 杉本: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)
- [3] Hajj-Ahmad, A. et al.: Flicker Forensics for Camcorder Piracy, *IEEE Trans. Information Forensics and Security*, 12(1), 89-100, 2017.
- [4] Farid, H.: Image Forgery Detection, *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(2), 16-25, 2009.
- [5] Yang, L. et al. : Rainbow: Preventing Mobile-Camera-based Piracy in the Physical World, *Proc. of IEEE Infocom 2018*, Honolulu HI, 1061-1069, 2018.
- [6] 宇野, 平野, 嶋田, 渡邊, 橋爪, 杉本: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.61, No.3, pp. 628-637 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中道, 渡邊, 橋爪, 杉本
2. 発表標題 変調光照明の位相を用いた違法撮影判定手法に関する基礎検討
3. 学会等名 情報処理北海道シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------