H-044

撮像素子の個体特徴に基づくハイブリッド撮影カメラ個体識別法と動画像改ざん検出への応用

Hybrid Individual Camera Identification Method based on Imaging Device Characteristics and Application to Video Tampering Detection

黒沢 健至† 土屋 兼一† 秋葉 教充†
Kenji Kurosawa Ken'ichi Tsuchiya Norimitsu Akiba

1. はじめに

著者らはこれまでに，CCD の各画素に流れる暗電流のばらつきに着目した撮影ビデオカメラの個体識別法を提案した[1]．この研究では，暗電流の大きな少数の特徴画素(Hot pixel)の出現座標が個々の撮像素子で異なることを利用して，撮影カメラを個体レベルで識別するものである．犯罪に関わる映像が特定の個体のビデオカメラで撮影されたのか否か，を判別することができる[2]．ただし，本識別原理では暗い映像のみが分析可能であるという制限があった．

2005 年に Lukáš らによって，画素の光電変換効率のばらつき(PRNU: Photo Response Non Uniformity)を利用した撮影カメラの識別法が新たに提案され[3]，これを画像の改ざん検出に利用する研究[4]も行われている．これらの研究では主に静止画像を対象としているが，利用している撮像素子の画素ごとのばらつきが光電変換効率であることから，明るい画像で識別が可能である．この研究では少数の特徴画素の座標を識別に用いるのではなく，ばらつきによって生じる固定パターンの類似性の定量評価によって撮影に用いられたカメラか否かを判定する．また，暗電流のばらつきパターン(DCNU: Dark Current Non Uniformity)を同様に定量評価する方法も著者らによって提案されている[5].

上記の PRNU 又は DCNU を用いる撮影カメラの識別法には，それぞれ原理的限界が存在する．すなわち，PRNU を用いた方法では比較的明るい画像（映像）は識別可能であるものの，暗い画像に対しては識別性能が劣る．一方で，DCNU を用いた方法では，暗い画像（映像）のみが識別可能である．両者を併用した識別を行えば，画像・映像の明るさに依存しない識別が可能と考えられるが，そのような手法は未だ提案されていない．

本研究では第一に，画素の暗電流のばらつきと光学的感度のばらつきを併用した撮影カメラの個体識別法を提案する．第二に，本手法を動画像の改ざん検出に応用可能であることを示す．近年では，犯罪捜査や公判などの司法の場において，客観的証拠資料として画像や映像が利用される機会が増している．この背景には，カメラで撮影された画像情報は客観的であり，事実を正しく記録していると一般的に考えられていることがある．このような背景から，画像合成などの改ざんが行われていた場合に，これを検知できる技術が不可欠であると考えられる．静止画像に対する改ざん検出の研究と比較して，動画像の改ざんに対する検出法の研究はあまり行われていないのが現状である．

† 科学警察研究所, National Research Institute of Police Science

2. ハイブリッド撮影カメラ識別法

2.1 DCNU と PRNU

CCD や CMOS 撮像素子を構成する数十万～数千万の全ての画素を全く均一な特性で製造することは工業的に困難であり，特性のばらつきが生じうる．代表的なばらつきは，画素のリーク電流（暗電流）に起因する DCNU と，光強度から電荷への変換効率に起因する PRNU であり，いずれも固定パターン雑音(FPN)の原因となる．

2.2 実験

同一モデルの USB カメラ（BUFFALO, BSW32K02H）5 台を用いて，カメラへの入射光量を変化させながら均一画像を撮影した（図 1）．ND フィルタ 7 種類（透過率 50-0.01%）と，フィルタなし（100%），不透過（0%）の計 9 条件で行った．なお，面光源の輝度は 1200cd/m^2 であった．各カメラ，各光量条件でそれぞれ 100 フレーム録画し，式 1 による積算処理後，式 2 による高周波成分 **H** の抽出と，**H** の各行及び各列方向に対する平均値の減算を行った．

$$\hat{\mathbf{Y}}(x,y)=\sum_{i=1}^{n}\mathbf{Y}_i(x,y) \qquad \text{式 1}$$

$$\mathbf{H}(x,y)=\hat{\mathbf{Y}}(x,y)-F\left(\hat{\mathbf{Y}}(x,y)\right) \qquad \text{式 2}$$

ここで関数 F はノイズ除去フィルタであり，7x7 画素の平均値フィルタを用いた．残さ成分に DCNU 又は PRNU に関する情報が多く含まれていると考えられる．測定は 2 回行い，1 回目をリファレンス 2 回目をターゲットとして，リファレンスとターゲット間のパターンの類似性を全組み合せについて正規化相互相関係数(NCC)により評価した．

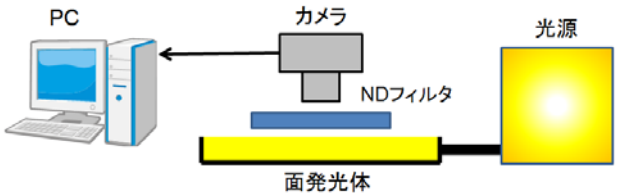


図 1　実験系

2.3 結果

結果の一部を図 2 に示す．(a)はリファレンス画像取得時のフィルタ条件が 100%，(b)は 0%の結果である．なお，横軸はターゲット画像のフィルタ条件である．図(a)のリファレンスは主として PRNU 成分が含まれ，(b)は DCNU 成分が主として含まれると考えられる．図 2 から，同個体のカメラについて，リファレンスとターゲットの撮影条件が等しい時に相関が高く，条件が外れると相関係数が低下していく．一方，別個体間では光学条件によらず相

関値が 0 近くに分布する．同個体間の分布と別個体間の分布に相違があると，撮影カメラの識別が可能と言える．

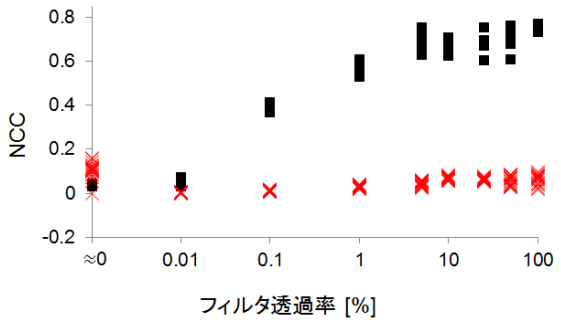
実験結果から，DCNU と PRNU は相補的であることが確認された．すなわち，暗画像から抽出される固定パターン雑音と，明画像から抽出される固定パターン雑音は相関が低く独立していた．PRNU だけでは暗画像の分析は不可能であり，逆に DCNU だけでは明画像の分析はできないという結果であった．DCNU は加法性ノイズである一方，PRNU は乗法性ノイズであると考えられることから，撮像センサの出力 $\mathbf{Y}(x, y)$について式 3 のような画像生成モデルを仮定した．

$$\mathbf{Y}(x,y) = \alpha\{\mathbf{I}(x,y)\cdot(1+\mathbf{N}_{\mathrm{PRNU}}(x,y)) + \mathbf{N}_{\mathrm{DCNU}}(x,y) + \mathbf{E}(x,y)\} \quad \text{式 3}$$

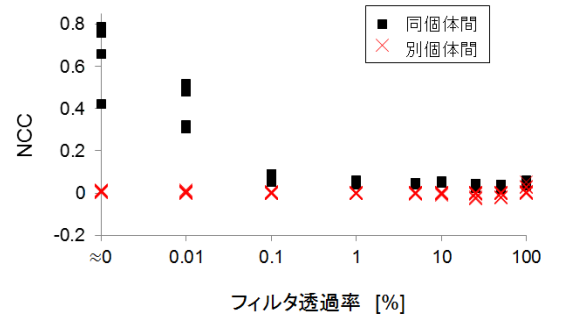
$\mathbf{I}$ は撮像センサへの入射光パターン，$\mathbf{N}_{\mathrm{PRNU}}$ と $\mathbf{N}_{\mathrm{DCNU}}$ は PRNU または DCNU ノイズパターンである．$\mathbf{E}$ はこれら以外のノイズの総体であるが，主にランダムノイズ成分である．α は，ゲイン・コントロールを表すスカラ係数である．以上の結果に基づき，次式のようなハイブリッド識別法を本研究で提案する．

$$\mathrm{NCC}_{\mathrm{hybrid}} = \max(\mathrm{corr}(\mathbf{R}_{\mathrm{DCNU}}, \mathbf{X}), \mathrm{corr}(\mathbf{R}_{\mathrm{PRNU}}, \mathbf{X})) \quad \text{式 4}$$

ここで，$\mathbf{R}_{\mathrm{DCNU}}$ 及び $\mathbf{R}_{\mathrm{PRNU}}$ は撮影カメラを用いて実験的に得られる暗画像及び明画像から抽出されるカメラのリファレンスパターンである．関数 corr(,)は正規化相互相関である．$\mathrm{NCC}_{\mathrm{hybrid}}$ の評価により，明るいシーンと暗いシーンが混在する動画像に対しても，式 4 の単一の方法によって撮影に用いられたカメラであるか否かを判定できる．本手法の有効性について，屋内及び屋外で撮影した映像シーンに対して撮影カメラの識別実験を行ったところ，提案手法では PRNU 又は DCNU を単独で用いる方法の両者の長所を兼ね備えた識別結果が得られることを確認した．



(a) リファレンスの光学条件：100%



(b) リファレンスの光学条件：0%

図 2　実験結果

3. 動画像改ざん検出への応用

3.1 改ざん検出の方法

前章の方法により，映像中から固定パターン雑音として撮影カメラに関する情報を得ることができる．この個体特徴パターンの時空間変動を調べることで，改ざんの有無と改ざんの位置を特定できる可能性が考えられる．特に，(i) 別カメラで撮影された映像シーンへの差替え又は挿入，(ii) Copy & Move 等による物体の貼付け又は消去，といった改ざんに適用できると考えられる．また，分析の前提条件として，撮影に用いられたカメラを分析者が入手可能な場合／不可能な場合が考えられ，それぞれで分析方法が異なる．

3.2 実験方法と結果

改ざんされた動画像として，以下の 3 種類を作成した．(a)撮影カメラと同機種かつ別個体のカメラで撮影された映像シーンに部分的に差し替えが行われた動画，(b)車両ナンバープレート数字の書き換えが行われた動画，(c)周囲テクスチャの貼り付けにより特定フレーム中の物体が消去された動画．動画像(a)については撮影カメラが入手可能な場合と入手不可能な場合で実験を行った．動画像(b)(c)については，今回は撮影カメラが入手可能という前提条件で実験を行った．

実験の結果，未圧縮の動画像に対しては，撮像素子の個体特徴パターンを利用することで上記の(a)～(c)の動画像に対して改ざん検出が可能な場合があることが確認できた．さらに，動画圧縮に対する影響についても実験したところ，フレーム内圧縮のみを行う DV コーデックでは識別性能がわずかに低下するのみでロバスト性があることが確認できたが，フレーム間圧縮を行う MPEG-2 や H.264 では検出性能が大きく低下し，実用性の面で大きな課題が残るという結果であった．

4. おわりに

従来研究では PRNU のみを用いて改ざん検出が行われることが多いが，暗いシーンが分析できないという欠点があった．本提案手法はシーンの明るさに依存しない分析が行えるという利点がある．ただし，さらにカメラ種類を増やして実験・検討する必要があると考えられる．

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 22700116 の助成を受けた．

参考文献

[1] K. Kurosawa *et al.*, “CCD fingerprint method – identification of a video camera from videotaped images”, Proc. IEEE ICIP ’99, 3, pp. 537–540 (1999).
[2] K. Kurosawa *et al.*, “An approach to individual video camera identification”, J Forensic Sci, 47, 1, pp. 97–102 (2002).
[3] J. Lukáš *et al.*, “Determining digital image origin using sensor imperfections”, Proc. SPIE 5685, pp. 249–60 (2005).
[4] M. Chen *et al.*, “Determining image origin and integrity using sensor noise”, IEEE Trans Inf Forensics Security, 3, 1, pp. 74–90 (2008).
[5] K. Kurosawa *et al.*, “Individual Camera Identification Using Correlation of Fixed Pattern Noise in Image Sensors”, J Forensic Sci, 54, 3, pp. 639–641 (2009).