



Farklı çözünürlükteki sayısal imge ve videolar için PRNU tabanlı kaynak kamera tespiti üzerine bir çalışma

A study on PRNU-based source device identification for digital images and videos of different resolutions

Saffet Vatansever^{1,*} , Ahmet Emir Dirik² 

¹ Bursa Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

Öz

Her bir kamera sensörüne has benzersiz bir gürültü bileşeni olan PRNU (Photo Response Non-Uniformity), sayısal imge ve videoların adli analizi kapsamında ihtiyaç duyulan önemli araçlardandır. PRNU'nun en yaygın uygulama alanı olan kaynak kamera tespiti, aynı marka ve model kameraların bile PRNU karakteristiğinin birbirinden farklı oluşu ve bu örüntünün çekilen her bir resim karesi üzerine bir kamera parmak izi gibi istemsiz eklenmesi esasına dayanmaktadır. Bir test dosyasından (imge ya da video) kestirimi sağlanan PRNU sensör gürültüsü ile dosyanın kaynağı olduğu düşünülen kameraya ait referans PRNU (sabit içerikli düz duvar ya da gökyüzü görüntülerinden yüksek doğrulukta elde edilen PRNU örüntüsü) arasındaki benzerliğe göre bu kameranın test videosunun kaynağı olup olamayacağı belirlenebilir. Sayısal video çerçevelerinin imgelere göre düşük kalitede kodlanması, videolardan kestirilen PRNU sensör gürültüsünün doğruluğunu, dolayısıyla da benzerlik analizini etkilemektedir. Bu bağlamda, videolarda PRNU tabanlı kaynak kamera tespitinde, referans PRNU'nun videolardansa imgelerden elde edilmesi performans etkinliği için önemli bir hamledir. Ancak, imge ve videolar aynı kaynak kamera ile çekilmiş olsalar dahi farklı en boy oranında ve/veya çözünürlükte kaydedilmektedirler. Bu sebeple, imgelerden elde edilen PRNU izinin, sorgu videosuna ait PRNU sensör gürültüsü ile aynı foto-alıcı hücrelere karşılık gelecek forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, bu dönüşümü sağlayan ölçkleme ve kırpma parametrelerini hassas bir şekilde hesaplayabilen bir yöntem önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: PRNU, Kaynak kamera tespiti, İmge ve videoların adli analizi.

1 Giriş

Sayısal imge ve videoların kaynağının tanınmasında ya da doğrulanmasında son yıllarda geliştirilmiş en önemli yöntemlerden biri PRNU (Photo Response Non-Uniformity) tabanlı yaklaşımdır [1]–[4]. PRNU, her bir foto-alıcı hücreye has emsalsiz bir gürültü bileşenidir. Kamera sensörü (CCD/CMOS) yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin (silikon levha) homojen olmayan yapısı ile sensör üretim

Abstract

PRNU (Photo Response Non-Uniformity), a noise pattern unique to each camera sensor, is one of the critical tools exploited for the forensic analysis of digital images and videos. Source camera attribution, the most widespread application of PRNU, is based on distinctive PRNU characteristics even of the same brand and model cameras and the inherent integration of this pattern into each exposed image or video frame as a camera fingerprint. It can be discovered whether a suspected camera may be the source of a query image or video based on a similarity test between the PRNU noise estimated from the query image/video and the reference PRNU of the camera that can be obtained accurately from a set of still-scene, e.g., wall or sky, images. In contrast to the images, low-quality encoding of digital video frames affects the accuracy of the estimated PRNU noise from video and hence of the similarity analysis. In this context, it may be wise to obtain the reference PRNU from images rather than videos for performance efficiency when working with source camera attribution for videos. However, images and videos are recorded in different aspect ratios and/or resolutions even though they are shot with the same source camera. Therefore, the reference PRNU obtained through images should be converted to the form corresponding to the same photosensitive cells as the query video PRNU noise. This paper proposes a technique to precisely estimate the scaling and cropping parameters leading to this geometric conversion.

Keywords: PRNU, Source camera identification, Image, and video forensics.

sürecindeki fiziksel farklılıklar, sensöre ait her bir foto-alıcı hücrenin ışık hassasiyetinin birbirinden farklı olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak, aynı marka ve modele sahip kamera sensörlerinin bile PRNU karakteristiği birbirinden farklıdır [1–4]. PRNU izinin sayısal imge ve videoların kaynağının tespitinde kullanılabilmesi, cihaza özel ve zamanla değişmeyen bu örüntünün, çekilen her bir resim karesi üzerine istemsiz olarak eklenmesi ve bu sebeple

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: saffet.vatansever@btu.edu.tr (S. Vatansever)
Geliş / Recieved: 19.02.2023 Kabul / Accepted: 10.04.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1253242

de bir sensör parmak izi gibi değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Bir resim ya da video kaydından kestirimi sağlanan PRNU sensör gürültüsü ile bu kaydın kaynağı olabileceği düşünülen kameraya ait düz duvar ya da gökyüzü görüntülerinden hesaplanan yüksek doğrulukta referans PRNU arasındaki benzerlik analiz edilerek, sorgulanan kaydın bu kamera ile alınmış olup olamayacağı sonucuna ulaşılabilir.

Literatürde, sayısal imgelerde kaynak kamera tanıma üzerine yapılan çalışmalarda oldukça etkin sonuçlar elde edilmiştir [3], [5–12]. Videolarda ise, yüksek sıkıştırma oranları, sosyal medya uygulamalarının kullandığı kamuya açık olmayan kodlama türleri ve hareket dengeleme algoritmaları s kaynak kamera tanıma etkinliği imgelere göre daha düşüktür [2], [13–19].

Sayısal videolarda PRNU tabanlı kaynak tanımanın doğru çalışabilmesi için bir video çerçevesine ait piksellerin karşılık geldiği foto alıcı hücreler diğer çerçevelerdeki piksellerin karşılık geldiği foto alıcı hücreler ile aynı olmasını gerektirir. Diğer bir deyişle, belirli bir satır ve sütun numarasına sahip bir piksel tüm video çerçeveleri için aynı foto alıcı hücre ile eşleşmelidir. Ancak, kameralardaki donanımsal ya da yazılımsal hareket dengeleme algoritmaları, resim çerçevelerinin senkronizasyonunu bozmakta ve ardışık çerçeveler arası piksel kaymalarına neden olabilmektedir.

Bir sayısal imge ve videonun aynı kaynak kamera ile çekilmiş olup olmadıklarının tespiti, PRNU tabanlı kaynak kamera tanılamada önemli bir problemdir. Ancak aynı kamera ile çekilen bir imge ve video genelde aynı en boy oranında (aspect ratio) ve/veya çözünürlükte (resolution) kaydedilmemektedir. Bu sebeple video çerçeveleri ve imge pikselleri farklı foto-alıcı hücrelere karşılık gelmekte ve birbirleri ile doğrudan eşleşmemektedir. Dolayısıyla, imgelerden elde edilen PRNU izine belirli bir geometrik dönüşüm uygulanarak test videosuna ait PRNU sensör gürültüsü ile aynı forma getirilmesi gerekmektedir.

Goljan ve Fridrich [20], kırılmış ve/veya ölçeklenmiş imgelerin kaynağını tanılamada, dönüşüm parametrelerini (kırpma ve ölçekleme) tespit etmeye yönelik kaba kuvvet aramaya (brute-force search) dayalı bir yöntem önermiştir. Shullani ve arkadaşları [21] ile Iuliani ve arkadaşları [22], benzer bir yaklaşımla imgelerden elde edilen referans PRNU'yu, bir test videosuna ait PRNU sensör gürültüsü ile karşılaştırılabilir forma dönüştürerek (aynı foto-alıcı hücrelere karşılık gelecek şekilde) videoların kaynağını tespit etmeye çalışmışlardır. [21] ve [22]'de, imgelerden elde edilen referans PRNU izine önce merkezi bir kırpma işlemi uygulanmış, ardından da ölçekleme oranı aranmıştır. Ancak, video kaydedilirken uygulanan kırpma işlemi her kamerada merkezden olmayabilir. Dahası, önce ölçekleme, sonra kırpma işlemi uygulanıyor da olabilir. Bu sebeple, [21] ve [22]'de uygulanan yöntem, bazı durumlarda, istenen sonuçları vermeyebilir.

Bu çalışmada, [21] ve [22]'de uygulanan geometrik dönüşüm yönteminin bir uyarlaması olarak, videoları (videoların oluşturulması aşamasında) önce ölçekleme, sonra kırpma işlemi uygulandığı varsayımına dayalı hassas arama yapabilen bir dönüşüm tekniği önerilmiştir. Önerilen

yöntem ile VISION [21] veri tabanına ait 5 farklı kamera ile çekilen tüm sabit içerikli (düz duvar ve/veya gökyüzü) imge ve videolar kullanılarak ölçekleme ve kırpma parametreleri hesaplanmış ve [21]'de elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ardından, yine bu veri tabanına ait aynı kameralar ile iç ve dış ortamlarda çekilmiş değişken içerikli tüm orijinal videolar ve bu videoların YouTube sıkıştırması uygulanmış formları kaynak kamera tanılamada test edilmiştir.

2 Kuramsal temeller

2.1 Sayısal bir imgeden PRNU sensör gürültüsü kestirimi

Sayısal bir kamera tarafından oluşturulan ham imge şu şekilde ifade edilebilir [23]:

$$I_x = I_0 + (I_0 F_x + \Phi) \quad (1)$$

Burada F_x , bir X kamerasına ait PRNU izini; I_0 , herhangi bir gürültü bileşeni eklenmemiş gerçek optik görüntüyü; Φ , I_0 imgesi üzerine eklenen PRNU dışındaki diğer gürültülerin toplamını; I_x , kameradaki işlemler sonucu üzerine çeşitli gürültü bileşenleri eklenerek kaydedilen ham imgeyi sembolize eder. I_x 'e ait PRNU sensör gürültüsü N_x şu şekilde kestirilebilir:

$$N_x = I_x - \text{WDF}(I_x) \quad (2)$$

Burada WDF, dalgacık (wavelet) tabanlı gürültü giderici filtredir.

2.2 Sayısal imgelerden referans PRNU izi kestirimi

Bir X kamerasına ait PRNU izi F_x , bu kamera ile çekilmiş M adet imgeden (tercihen sabit içerikli düz duvar ya da gökyüzü resimleri) Denklem (2) yardımıyla ayrı ayrı kestirimi sağlanan M adet PRNU sensör gürültüsü kullanılarak en büyük olasılık kestirimi (maximum likelihood estimator) algoritması ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$F_x = \frac{\sum_{i=1}^M N_x^{(i)} I_x^{(i)}}{\sum_{i=1}^M (I_x^{(i)})^2} \quad (3)$$

Denklem (3)'te kestirimi yapılan F_x , tüm imgelerde mevcut olan periyodik ve yüksek benzerlikli bazı gürültü kalıntılarını (non-unique artifacts) içermektedir. Renk süzgeci dizisi (CFA - Color Filter Array) tarafından uygulanan renk enterpolasyonu (Color Interpolation), sensör ya da imge işleme devrelerindeki satır-sütun bazlı işlemler ve JPEG sıkıştırmanın yol açtığı blok izleri (blockiness artifacts), bu kalıntılarının başlıca kaynaklarıdır [3]. F_x 'teki yüksek benzerlikli bu kalıntılarının kaldırılarak farklı kameraların PRNU izleri arasındaki benzerliklerin minimuma indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, önce F_x 'teki her bir sütun için sütun ortalaması alınıp aynı sütuna ait bütün piksellerden çıkartılır (her renk kanalı için ayrı

ayrı). Benzer şekilde, her bir satır için satır ortalaması alınıp satıra ait bütün piksellerden çıkartılır. ZM ile ifade edilebilen bu satır-sütun işlemleri sonucunda doğrusal örüntü (linear pattern) kaldırılmış ve F_x 'teki her bir satır ve sütun sıfır ortalamaya sahip olmuş olur [3]. Ardından, Wiener filtre de uygulanarak renk rekonstrüksiyonu (demosaicking) kaynaklı periyodik örüntüler PRNU izinden kaldırılmış olur:

$$\begin{aligned}\tilde{F}_x &= WF(ZM(F_x)) \\ &= \mathfrak{I}^{-1} \left\{ \mathfrak{I}(ZM(F_x)) - W \left(\mathfrak{I}(ZM(F_x)) \right) \right\}\end{aligned}\quad (4)$$

Burada W ; varyansı, $ZM(F_x)$ ifadesinin Fourier dönüşümünün genliğinin örneklem varyansı olarak belirlenmiş 3×3 boyutlu Wiener filtredir.

Bir X kamerasına ait referans PRNU, bu kamera ile çekilmiş sabit içerikli bir gökyüzü ya da duvar videosuna ait resim çerçeveleri (frame) kullanılarak da aynı yöntemle elde edilebilir. Ancak düşük çerçeve kalitesinden dolayı bir videodan elde edilen referans PRNU izi imgelerden elde edilene göre daha düşük doğruluktur.

2.3 Sayısal bir videodan PRNU sensör gürültüsü kestirimi

Sayısal bir test videosuna ait PRNU sensör gürültüsü (N_v) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$N_v = \frac{\sum_{t=1}^L N_t^{(i)}}{L}\quad (5)$$

Burada N_t , test videosunun herhangi bir resim çerçevesinden **Denklem (2)** yardımıyla kestirimi yapılan tahmini sensör gürültüsü; L ise, N_v 'nin hesaplanmasında kullanılan video çerçevelerinin sayısıdır. Bu işlemin ardından, N_v 'deki yüksek benzerlikli kalıntılar **Denklem (4)**'te olduğu gibi filtrelenir:

$$\begin{aligned}\tilde{N}_v &= WF(ZM(N_v)) \\ &= \mathfrak{I}^{-1} \left\{ \mathfrak{I}(ZM(N_v)) - W \left(\mathfrak{I}(ZM(N_v)) \right) \right\}\end{aligned}\quad (6)$$

Bir test videosundan PRNU sensör gürültüsü kestirimi, videonun I, P ve B çerçevelerinin tamamı kullanılarak yapılabileceği gibi, yalnızca belirli sayıda ve tipte çerçeveler seçilerek de yapılabilir [18], [19], [24]. P çerçeveleri kendinden önce gelen I ya da P çerçevesine bağlı olarak, B çerçeveleri ise kendinden önce ve sonra gelen P çerçevelerine bağlı olarak kodlanır. I çerçeveleri ise P ve B çerçevelerinden bağımsız olarak kodlanır ve sıkıştırma oranı P ve B çerçevelerine göre düşüktür. Dolayısıyla, yalnız I çerçeveleri kullanılarak kestirimi yapılan PRNU izinin, aynı sayıda P ve B çerçevelerinden elde edilen PRNU izine göre doğruluğu daha yüksektir. Ancak I çerçeveleri videolarda genellikle saniyede 1 defa ya da 2 defa kodlandığından kısa videolarda yalnızca I çerçevelerini kullanmak referans PRNU'nun yüksek doğrulukla kestiriminde yetersiz kalabilir. Tüm çerçeveleri kullanmanın

olumsuz tarafı ise çok daha uzun süren bir işlem yükü gerektirmesidir.

2.4 Sayısal imge ve videolarda kaynak kamera tanıma

Bir test imgesinin belirli bir kamera ile çekilmiş olabilirliğinin tespiti için, imgeden kestirimi yapılan PRNU sensör gürültüsünün kameraya ait referans PRNU izi ile olan benzerliklerinin karşılaştırılması gerekmektedir. Bu bağlamda maksimum korelasyon enerjisi (PCE – Peak to Correlation Energy) karar eşik değerinin tayininde en güvenilir yöntem olarak göze çarpmaktadır [20]:

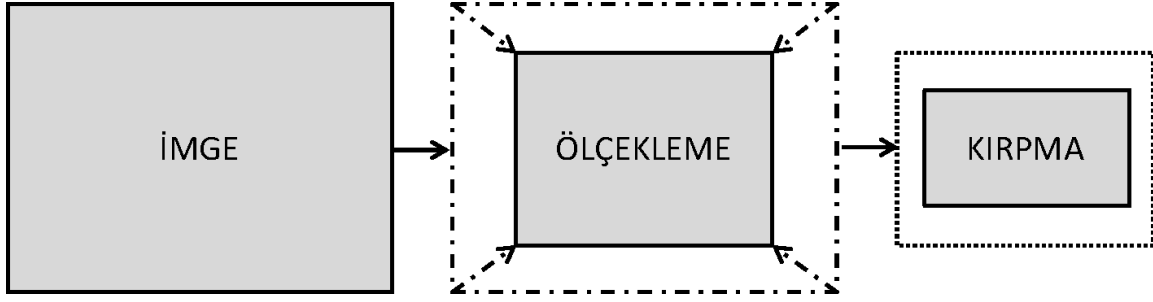
$$PCE(N_x, \tilde{F}_x) = \frac{\rho_m^2}{\frac{1}{|s| - |\varepsilon|} \sum_{s \neq \varepsilon} \rho_s^2}\quad (7)$$

Burada ρ_m , N_x 'in F_x ile normalize çapraz korelasyon işlemi sonucu elde edilen maksimum korelasyon katsayısını ifade etmektedir. ε , ρ_m 'nin her iki yanındaki küçük bir bölgeyi; s , tüm korelasyon değerleri indisini; $|s| - |\varepsilon|$ ise ε dışındaki toplam korelasyon değerleri sayısını sembolize etmektedir.

Bir test videosu için de kaynak kamera tanıma işlemi benzer şekilde yapılır. Ancak, referans PRNU izinin imgelerden elde edilmesi durumunda, referans PRNU'nun doğru şekilde ölçeklenip kırılarak videonun karşılık geldiği foto alıcı hücrelerle eşleşir hale getirilmesi gerekmektedir (aynı kamera ile çekilmiş imge ve videolar genelde farklı en boy oranında ve/veya çözünürlükte kaydedilir).

3 İmgeye ait PRNU izinin geometrik dönüşümü

Bu bölümde, videoların kaynağını tespit etmeye ya da doğrulamaya yönelik; imgelerden elde edilen yüksek doğrulukta referans PRNU izini, video sensör gürültüsü ile aynı foto alıcı hücrelere karşılık gelecek forma dönüştürmede kullanılan ölçekleme ve kırma parametrelerini hassas bir şekilde arayıp hesaplayabilen bir yöntem sunulmuştur. **Şekil 1**'de görüleceği üzere, önerilen yöntem temel olarak imgelerden elde edilen referans PRNU izinin önce ölçekleme oranının tespitine ardından da kırma bölgesinin tayinine dayanır. Yöntem detayları **Tablo 1**'de sunulmuştur. Buna göre, öncelikle bir test videosundan PRNU sensör gürültüsü (\tilde{N}_v); test videosu ile aynı kaynağa sahip olduğu bilinen (ya da düşünülen) imgelerden de referans PRNU izi (\tilde{F}_x) hesaplanır. Ardından, video ve imgeye ait satır ve sütun sayıları oranlanarak \tilde{F}_x 'e uygulanmış olabilecek maksimum ölçekleme oranı (r_m) bulunur. \tilde{F}_x ; r_m ile 1 arasında $1/1000$ artım hassasiyetiyle (i) belirlenmiş $\mathbf{S} = \{r_m : i : 1\}$ kümesine ait her bir s ölçekleme oranıyla sırayla ölçeklenir ve ölçeklenmiş her yeni \tilde{F}_x örüntüsü (\tilde{F}_x^s) ile \tilde{N}_v arasındaki tepe korelasyon katsayısı (ρ_p^s) bulunur. En yüksek ρ_p^s değerini veren ölçekleme değeri (s_m) kaydedilir. \tilde{F}_x^s ; bu kez, s_m 'nin sağından ve solundan $\pm 1/1000$ kadarlık ölçekleme aralığında $1/10000$ birimlik artımlarla (i) oluşturulan $\mathbf{S} = \{s_m - (i \times 10) : i : s_m + (i \times 10)\}$ kümesine ait her bir ölçekleme oranıyla sırayla ölçeklenir ve ölçeklenmiş her yeni \tilde{F}_x^s ile \tilde{N}_v arasındaki tepe korelasyon katsayısı (ρ_p^s) ayrı ayrı bulunur.



Şekil 1. Geometrik dönüşümde varsayılan yaklaşım: önce ölçekleme, ardından da kırpma işleminin uygulanması.

Tablo 1: İmgeye ait referans PRNU izinin dönüşüm parametrelerinin tespit edilmesi

Adım	İşlem
1	Test videosundan PRNU sensör gürültüsü \tilde{N}_v hesaplanır
2	Test videosu ile aynı kaynağa sahip olduğu bilinen (ya da düşünülen) imgelerden referans PRNU izi \tilde{F}_x hesaplanır
3	\tilde{F}_x 'in satır ve sütun sayısı sırasıyla H_i, W_i ; \tilde{N}_v 'nin satır ve sütun sayısı ise sırasıyla H_v, W_v olsun.
4	\tilde{F}_x 'e uygulanmış olabilecek maksimum ölçekleme oranı $r_m, \max(\{H_v/H_i, W_v/W_i\})$ ile bulunur ($r_m \in (0, 1)$).
5	Ölçekleme hassasiyeti (i) = 1/1000 olmak üzere; $\tilde{F}_x, \mathbf{S} = \{r_m : i : 1\}$ kümesine ait her ölçekleme oranı ile ayrı ayrı ölçeklenir.
6	$s \in \mathbf{S}$ olmak üzere her bir s değeri için ölçeklenmiş yeni referans PRNU \tilde{F}_x^s olsun.
7	Çapraz korelasyon işlemi yardımıyla \tilde{N}_v ile \tilde{F}_x^s arasındaki tepe korelasyon katsayısı (ρ_p^s) her bir s için ayrı ayrı bulunur.
8	ρ_p^s değerlerinin en büyüğünü veren ölçekleme oranı s_m kaydedilir.
9	$i=1/10000$ ise adım 11'e atlanır.
10	$i=1/10000$ olmak üzere $\tilde{F}_x, \mathbf{S} = \{s_m - (i \times 10) : i : s_m + (i \times 10)\}$ kümesine ait her oranla ölçeklenir ve işlem 6'ya dönlür.
11	s_m 'ye göre ölçeklenmiş $\tilde{F}_x^{s_m}$ ile \tilde{N}_v arasındaki maksimum korelasyon katsayısına karşılık gelen satır (j) ve sütun (k) numarası kaydedilir.
12	(j, k) noktasından başlamak üzere $\tilde{F}_x^{s_m}$ 'ten $H_v \times W_v$ piksellik bölüm kırılarak $\hat{F}_x = \tilde{F}_x^{s_m}(j:j+H_v-1, k:k+W_v-1)$ elde edilir.
13	\hat{F}_x ile \tilde{N}_v arasındaki PCE değeri hesaplanır.
14	PCE değeri, τ eşik değerinden büyükse ölçekleme oranı (s_m) ve kırpma parametrelerinin (j, k) doğru bir şekilde hesaplandığı sonucuna varılır.

Ardından, ρ_p^s değerlerinin en büyüğünü veren yeni s_m ölçekleme oranı ve bu orana göre ölçekli $\tilde{F}_x^{s_m}$ ile \tilde{N}_v arasında hesaplanmış maksimum korelasyon katsayısına karşılık gelen satır (j) ve sütun (k) numarası kaydedilir. $\tilde{F}_x^{s_m}$ 'in (j, k) noktasından başlamak üzere test videosunun çözünürlüğü kadarlık bölümü kırılarak \hat{F}_x elde edilir. Sonrasında \hat{F}_x ile \tilde{N}_v arasındaki PCE değeri hesaplanır. Hesaplanan PCE değeri, önceden belirlenmiş bir τ eşik değerinden (genelde 50) büyükse ölçekleme (s_m) ve kırpma parametrelerinin (j, k) doğru bir şekilde bulunduğu sonucuna varılır.

4 Deneysel çalışmalar ve bulgular

Bu bölümde, Shullani ve arkadaşlarının literatüre kazandırmış olduğu VISION [21] veri tabanına ait beş farklı kamera (Huawei P9 EVA-L9, Lenovo P70-A, Apple iPhone 4, Samsung Galaxy S3 GT-19300, Samsung Galaxy S3 Mini GT-8190) ile farklı iç ve dış ortamlarda çekilmiş ve herhangi bir hareket dengeleme işlemi uygulanmamış videolar kaynak kamera doğrulama kapsamında analiz edilmiştir. Referans PRNU için, yüksek doğrulukta PRNU izi kestirimine olanak vermesi sebebiyle video yerine imgelerin kullanımı tercih

edilmiştir. Ancak, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi imgeler, videolardan farklı en boy oranında ve çözünürlükte (genelde videolardan çok daha büyük çözünürlükte) kaydedildiklerinden imgelerden elde edilen referans PRNU ile videoya ait PRNU sensör gürültüsü arasında benzerlik testi doğrudan yapılamaz. Bu sebeple öncelikli olarak, Bölüm 3'te sunulan yöntemle imgeden videoya geometrik dönüşümü sağlayan ölçekleme ve kırpma parametreleri tespit edilmiştir. Bu bağlamda VISION veri tabanına ait yukarıda bahsi geçen kameralarla çekilmiş tüm sabit içerikli (duvar veya gökyüzü görüntüleri) imge ve videolar kullanılmıştır.

Tablo 2'de, her bir kamera için referans PRNU kestiriminde kullanılan imge sayısı ve çözünürlüğüne ve ayrıca geometrik dönüşüm parametrelerinin hesabında ve doğrulanmasında kullanılan video sayısı, çözünürlüğü, süresi ve video çerçeveleri örnekleme hızına ulaşılabilir. Videolardan PRNU sensör gürültüsü kestiriminde işlem süresini kısaltabilmek amacıyla P ve B çerçevelerine göre daha az sıkıştırılıp daha fazla bilgi içeren ve diğer çerçevelerden bağımsız olarak kodlanan I çerçeveler tercih edilmiştir. Bu videolarda saniyede ortalama 1 adet I çerçeve

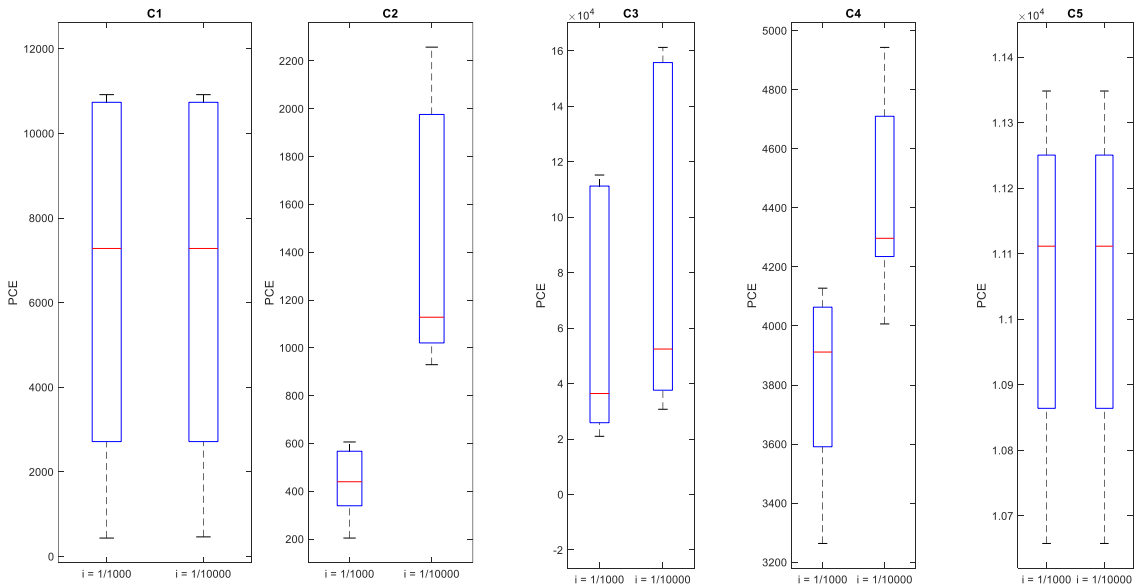
kodlanmış olup her bir videodaki I çerçeve sayısı video süresi (65-75 sn.) ile bire bir orantılı olarak 65 ile 75 adet dolaylarındadır. Her bir videoya ait PRNU gürültüsü kestiriminde videodaki I çerçevelerin tamamı kullanılmıştır. Geometrik dönüşüm parametreleri hesaplamada, kameralara göre kullanılan imge ve video sayılarındaki farklılık, VISION veri tabanının bu kameralar için sağlamış olduğu sabit içerikli imge ve videoların sayısının **Tablo 2**'de sunulduğu kadar olmasından kaynaklanmaktadır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, öncelikle, Bölüm 3'te önerilen yöntemle göre her kamera için geometrik dönüşüm parametreleri hesaplanmış ve doğrulukları analiz edilmiştir. **Şekil 2**'de, hesaplanan geometrik dönüşüm parametrelerine göre imgelerden elde edilen referans PRNU'nun ölçeklenip kırılması sonucu video ile aynı çözünürlüğe getirilmiş referans PRNU ile videolardan elde edilen her bir video PRNU sensör gürültüsü arasında hesaplanan PCE değerleri ölçekleme hassasiyetine göre kutu grafikleri (box plot) halinde verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere tüm PCE değerleri, literatürde yaygın olarak kabul görmüş eşik değeri olan 50'nin oldukça üzerindedir. Bu da dönüşüm parametrelerinin doğru hesaplandığının bir göstergesidir. Diğer bir deyişle, hesaplanan geometrik dönüşüm

parametreleri, her bir kameraya ait tüm sabit içerikli videolar için doğrulanabilmıştır. **Şekil 2**'de ayrıca ölçekleme hassasiyetini $i = 1/10000$ (**Tablo 1**, **Adım 9-10**) yapmanın etkisi görülmektedir. Buna göre, bazı kameralarda (örneğin C2) bu etki çok yüksekken, bazı kameralarda ise (örneğin C1) önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır. **Şekil 2**'deki PCE değerlerine göre doğru hesaplandığı sonucuna varılan geometrik dönüşüm parametreleri (ölçekleme ve kırpma) **Tablo 3**'te açıkça verilmiştir. **Tablo 3**'te ayrıca [21]'de uygulanan yöntemle göre elde edilen dönüşüm parametreleri sunulmuştur. Buna göre, bu çalışmada önerilen yöntem ile hesaplanmış ölçekleme parametreleri [21] ile uyumludur. Kırpma parametreleri için ise ilk bakışta paralel sonuçlar elde edilmediği düşünülebilir. Ancak, dikkat edilirse kırpma parametreleri arasındaki oran ölçekleme oranı ile uyumludur. Hatırlanacağı üzere, bu çalışmada önerilen yöntem, [21]'dekinin aksine video oluşturulurken önce ölçekleme işleminin uygulandığı varsayımına dayanır. **Tablo 3** ile ilgili vurgulanması gereken bir diğer nokta ise C5 için dönüşüm parametrelerinin [21] ile hesaplanamamış (doğrulanamamış) olmasıdır. Bu çalışmada önerilen yöntemle ise C5 için dönüşüm parametreleri hesaplanabilmıştır.

Tablo 2: Geometrik dönüşümde kullanılan imge ve video özellikleri (sabit içerikli duvar ya da gökyüzü)

Kamera No	Marka/Model	İmge Çözünürlüğü	İmge Sayısı (duvar ya da gökyüzü)	Video Çözünürlüğü	Video Sayısı (duvar ya da gökyüzü)	Video Süresi / Örneklem hızı
C1	Huawei P9 EVA-L9	2976 x 3968	118	1080 x 1920	7	65-75 sn./30 fps
C2	Lenovo P70-A	2704 x 4784	158	720 x 1280	7	65-75 sn./30 fps
C3	Apple iPhone 4	1936 x 2592	109	720 x 1280	7	65-75 sn./30 fps
C4	Samsung Galaxy S3 GT-19300	2248 x 3264	102	1080 x 1920	7	65-75 sn./30 fps
C5	Samsung Galaxy S3 Mini GT-8190	1920 x 2560	60	720 x 1280	4	65-75 sn./30 fps



Şekil 2. Ölçekleme hassasiyetine göre hesaplanan PCE değerleri için elde edilen kutu grafikleri (box plot).

Tablo 3: Kameralara göre imgelerin ölçekleme ve kırpma parametreleri

Kamera No	Ölçekleme Oranı		Kırpma Başlangıç Satırı		Kırpma Başlangıç Sütunu	
	[21]	Önerilen	[21]	Önerilen	[21]	Önerilen
C1	0.4800	0.4840	372	180	0	0
C2	0.2700	0.2676	7	2	0	0
C3	0.6100	0.6146	411	253	227	140
C4	0.5900	0.5882	307	180	0	0
C5	-	0.4999	-	114	-	0

Tablo 4: Kaynak kamera doğrulamada başarımlar oranları

Kamera No	Orijinal videolar (sabit olmayan içerikli)		YouTube videoları (sabit olmayan içerikli)	
	Video sayısı	Doğru tespit	Video sayısı	Doğru tespit
C1	12	12	12	5
C2	12	12	12	0
C3	12	12	12	6
C4	12	12	12	5
C5	12	12	12	3

Her bir kamera için imgeden videoya geometrik dönüşüm parametrelerinin bulunmasının ardından, yarısı iç mekân, diğer yarısı da dış mekânda olmak üzere her bir kameraya ait 12'şer video (sabit olmayan içeriklerde ve farklı ortamlarda çekilmiş) ve bu videoların YouTube sıkıştırması uygulanmış formları, kaynak kamera doğrulama kapsamında test edilmiştir. Her bir test videosundan kestirimi yapılan PRNU sensör gürültüsü ile aynı kameraya ait imgelerden hesaplanıp ölçeklenen ve kırılan PRNU izi arasındaki PCE değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve 50 eşik değerinden büyük olup olmadığı kontrol edilerek doğru tespit oranları belirlenmiştir. **Tablo 4**'te her bir kamera için elde edilen doğru tespit sayıları görülmektedir. Buna göre, her bir kameraya ait orijinal videoların tamamında kaynak kamera doğrulanabilmiştir. YouTube videolarında ise başarımlar genel olarak tüm kameralarda düşük olmakla birlikte C2 kamerasına ait videolarda tek bir doğrulama dahi yapılamamıştır. Ancak, **Şekil 2**'den hatırlanacağı üzere, sabit içerikli videolarda yapılan testlerde en düşük PCE değerleri C2 kamerası ile elde edilmişti. Dolayısıyla, bu kameraya ait YouTube videolarında, uygulanan sıkıştırmanın etkisiyle eşik değeri geçemeyen PCE değerleri elde edilmesi durumunun aslında doğal olduğu sonucuna varılabilir.

5 Sonuç ve değerlendirme

Bu çalışmada, videolarda kaynak kamera tespiti ya da doğrulaması kapsamında, imgeler kullanılarak elde edilen referans PRNU'yu, videoya ait PRNU sensör gürültüsü ile karşılaştırılabilir forma dönüştürebilen bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, [21], [22]'den farklı olarak önce ölçekleme, sonra kırpma parametrelerinin kestirimi üzerine kurulmuştur. Önerilen yöntem ile, VISION [21] veri tabanına ait 5 farklı kamera ile çekilmiş sabit içerikli düz duvar ve/veya gökyüzü imge ve videoları kullanılarak bu kameralara ait ölçekleme ve kırpma parametreleri tespit edilmiştir. Kameraların dördü için [21]'deki yöntemle uyumlu sonuçlar bulunmuştur. Bir kamera için ise [21]'de

tespit edilemeyen parametreler, bu çalışmada önerilen yöntemle hesaplanabilmiştir. Hesaplanan dönüşüm parametreleri kullanılarak, sabit içerikli olmayan farklı iç ve dış mekânlarda kaydedilmiş orijinal videolar ve bu videoların YouTube sıkıştırması uygulanmış formları, kaynak kamera doğrulama kapsamında test edilmiştir. Orijinal videoların tamamının kaynağı doğrulanarak %100 başarımlar elde edilmiştir. Yüksek sıkıştırma uygulanmış YouTube videolarında ise daha düşük performans elde edilmiştir.

Bu çalışmada uygulanan geometrik dönüşüm, özellikle dönüşüm parametreleri önceden belirlenmiş, ancak kaynağına erişimin mümkün olmadığı farklı çözünürlükteki imgeler ve videoların aynı kamera ile çekilmiş olabirliğinin tespiti için kritik önem taşımaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma ASELSAN işbirliğinde "Sayısal Video Dosyalarında PRNU Sensör Gürültüsü Tabanlı Kaynak Cihaz Tanıma" isimli SAYP projesi kapsamında Savunma Sanayii Müsteşarlığı (SSM) tarafından desteklenmiştir.

ASELSAN Araştırma Merkezi Eski Program Müdürü Dr. Aykut Koç' teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] J. Lukáš, J. Fridrich, and M. Goljan, Digital camera identification from sensor pattern noise. IEEE Trans. Inf. Forensics Secur., 1 (2), 205–214, 2006. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2006.873602>.
- [2] M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan, and J. Lukas, Source digital camcorder identification using sensor photo response non-uniformity. Security, steganography, and watermarking of multimedia contents IX, 6505, 517-

- 528, 2007. <https://doi.org/10.1117/12.696519>.
- [3] M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan, and J. Lukás, Determining image origin and integrity using sensor noise. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, 3 (1), 74–90, 2008. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2007.916285>.
- [4] T. Filler, J. Fridrich, and M. Goljan, Using sensor pattern noise for camera model identification. *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 1296–1299, San Diego, CA, USA, 2008.
- [5] J. Lukáš, J. Fridrich, and M. Goljan, Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise. *Proc. SPIE 6072, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII*, pp. 362–372, San Jose, California, United States, 2006. <https://doi.org/10.1117/12.640109>.
- [6] X. Kang, Y. Li, Z. Qu, and J. Huang, Enhancing source camera identification performance with a camera reference phase sensor pattern noise. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, 7 (2), 393–402, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2168214>.
- [7] A. Lawgaly, F. Khelifi, and A. Bouridane, Weighted averaging-based sensor pattern noise estimation for source camera identification. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 5357–5361, Paris, France, 2014.
- [8] A. Karaküçük, A. E. Dirik, H. T. Sencar, and N. D. Memon, Recent advances in counter PRNU based source attribution and beyond. *Media Watermarking, Security, and Forensics*, 9409, 201–211, 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2182458>.
- [9] A. Lawgaly and F. Khelifi, Sensor pattern noise estimation based on improved locally adaptive DCT filtering and weighted averaging for source camera identification and verification. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, 12 (2), 392–404, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2016.2620280>.
- [10] F. Ahmed, F. Khelifi, A. Lawgaly, and A. Bouridane, Comparative analysis of a deep convolutional neural network for source camera identification. *IEEE 12th International Conference on Global Security, Safety and Sustainability (ICGS3)*, pp. 1–6, London, UK, 2019.
- [11] A. Karaküçük and A. E. Dirik, PRNU based source camera attribution for image sets anonymized with patch-match algorithm. *Digit. Investig.*, 30, 43–51, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.diin.2019.06.001>.
- [12] Y. Akbari, S. Al-maadeed, O. Elharrouss, F. Khelifi, A. Lawgaly, and A. Bouridane, Digital forensic analysis for source video identification: A survey. *Forensic Sci. Int. Digit. Investig.*, 41, 1–13, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2022.301390>.
- [13] N. Mondaini, R. Caldelli, a. Piva, M. Barni, and V. Cappellini, Detection of malevolent changes in digital video for forensic applications. *Security, steganography, and watermarking of multimedia contents IX*, 6505, 300–311, 2007. <https://doi.org/10.1117/12.704924>.
- [14] W. H. Chuang, H. Su, and M. Wu, Exploring compression effects for improved source camera identification using strongly compressed video. *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 1953–1956, Brussels, Belgium, 2011.
- [15] T. Höglund, P. Brolund, and K. Norell, Identifying camcorders using noise patterns from video clips recorded with image stabilisation. *7th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pp. 668–671, Dubrovnik, Croatia, 2011.
- [16] D.-K. Hyun, C.-H. Choi, and H.-K. Lee, Camcorder identification for heavily compressed low resolution videos. *Comput. Sci. Conver. Lect. Notes Electr. Eng.*, 114, 695–791, 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2792-2_68.
- [17] A. Lawgaly, F. Khelifi, A. Bouridane, and S. Al-Maadeed, Sensor pattern noise estimation using non-textured video frames for efficient source smartphone identification and verification. *International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE)*, pp. 19–24, Southend, United Kingdom, 2021.
- [18] W.-C. Yang, J. Jiang, and C.-H. Chen, A fast source camera identification and verification method based on PRNU analysis for use in video forensic investigations. *Multimed. Tools Appl.*, 80 (5), 6617–6638, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09763-z>.
- [19] P. Ferrara, M. Iuliani, and A. Piva, PRNU-Based Video Source Attribution: Which Frames Are You Using?. *Journal of Imaging*, 8 (3), 1–14, 2022. <https://doi.org/10.3390/jimaging8030057>.
- [20] M. Goljan and J. Fridrich, Camera identification from cropped and scaled images. *Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X*, 6819, 154–166, 2008. <https://doi.org/10.1117/12.766732>.
- [21] D. Shullani, M. Fontani, M. Iuliani, O. Al Shaya, and A. Piva, VISION: a video and image dataset for source identification. *EURASIP Journal on Information Security*, 15, 1–16, 2017. <https://doi.org/10.1186/s13635-017-0067-2>.
- [22] M. Iuliani, M. Fontani, D. Shullani, and A. Piva, Hybrid reference-based Video Source Identification. *Sensors*, 19 (3), 1–19, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19030649>.
- [23] A. E. Dirik and A. Karaküçük, Forensic use of photo response non-uniformity of imaging sensors and a counter method. *Opt. Express*, 22 (1), 470–482, 2014. <https://doi.org/10.1364/OE.22.000470>.
- [24] P. Ferrara and L. Beslay, Robust video source recognition in presence of motion stabilization. *8th International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF)*, pp. 1–6, Porto, Portugal, 2020.

