



Vakbijlage

Herkomst beelden

Inhoudsopgave

1. De vakbijlage algemeen
2. Inleiding
3. Het onderzoek: metadata
4. Het onderzoek: pixelartefacten
5. Het onderzoek: PRNU
6. Conclusie
7. Verklarende lijst van termen en afkortingen
8. Bronvermelding en literatuur
9. Contactgegevens

1. De vakbijlage algemeen

Het Nederlands Forensisch Instituut (NFI) kent een groot aantal typen onderzoeken. Onderzoeksrapporten van het NFI gaan vaak vergezeld van een vakbijlage. Dit document dient als toelichting op het onderzoek en heeft een zuiver informatief karakter. De informatie die van toepassing is op een specifieke zaak staat altijd in het onderzoeksrapport vermeld. De vakbijlage geeft weer volgens welke methoden het onderzoek is uitgevoerd. Ook staat erin met welke technieken en hulpmiddelen een dergelijk onderzoek over het algemeen plaatsvindt. Aan het eind van de vakbijlage zijn een verklarende woordenlijst en een literatuur- en bronvermelding opgenomen.

2. Inleiding

In forensisch onderzoek komt soms de vraag naar voren of bepaalde digitale beelden, zowel foto's als video's, zijn gemaakt met een bepaalde digitale camera. Ook de vraag of twee series beelden afkomstig zijn uit eenzelfde camera kan relevant zijn. Om die vragen te kunnen beantwoorden doet het NFI onderzoek aan digitale beelden.

Een digitaal beeld is opgebouwd uit een matrix van beeldelementen: pixels. Voor het maken van een digitaal beeld wordt gebruik gemaakt van een chip in een camera, de beeldsensor. Dat kan een Charge Coupled Device (CCD) zijn of een Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS). Beeldsensoren zijn complexe elementen die optische informatie omzetten in elektrische signalen. De beeldsensor van een digitale camera bestaat uit een matrix met grote aantallen lichtgevoelige elementen. Bepaalde lichtgevoelige elementen reageren systematisch net iets anders op een bepaalde lichtintensiteit dan nabijgelegen elementen. Wanneer zij allemaal met dezelfde lichtintensiteit worden belicht, betekent dit dat deze beeldelementen een hogere of lagere waarde rapporteren dan die omliggende beeldelementen. Zo ontstaat een patroon waarin elk beeldelement een geringe afwijking heeft ten opzichte van het gemiddelde.

Een grote afwijking heet een pixelartefact. Bij pixelartefacten onderscheiden we twee typen. 'Dode' pixels zijn beeldelementen die een veel lagere waarde rapporteren dan naburige elementen bij dezelfde belichting. Daarnaast bestaan er 'hete' pixels: beeldelementen die een veel hogere waarde rapporteren dan naburige elementen bij dezelfde belichting. Mogelijke oorzaken voor deze verschillen in gevoeligheid liggen voornamelijk in het productieproces. Pixelartefacten kunnen ontstaan door onzuiverheden in het grondstofmateriaal of door de introductie van stof tijdens de fabricage, waardoor de werking van sommige beeldelementen wordt gehinderd. De locaties van de defecten vormen een karakteristiek patroon op de sensor. Een marginale afwijking heet een non-uniformiteit. De locaties van non-uniformiteiten vormen net als pixelartefacten een patroon op de sensor. Het patroon van non-uniformiteiten heet ook wel het Photo Response

Non-Uniformity (PRNU) patroon. De aanwezigheid van zo'n PRNU-patroon is te danken aan kleine variaties in materiaaleigenschappen, variaties in eigenschappen van de elektronische componenten, vervuiling tijdens de fabricage en onregelmatigheden in de grootte van het oppervlak van de lichtgevoelige elementen.

Deze oorzaken suggereren dat deze afwijkingen voor iedere camera anders zijn. Ze zijn, voor zover bekend, ook stabiel in de tijd. Bovendien zijn ze tot op zekere hoogte aanwezig in elk beeld dat de sensor produceert. Deze eigenschappen maken PRNU-patronen en pixelartefacten tot bruikbare verschijnselen om de herkomst van digitale beelden te karakteriseren.

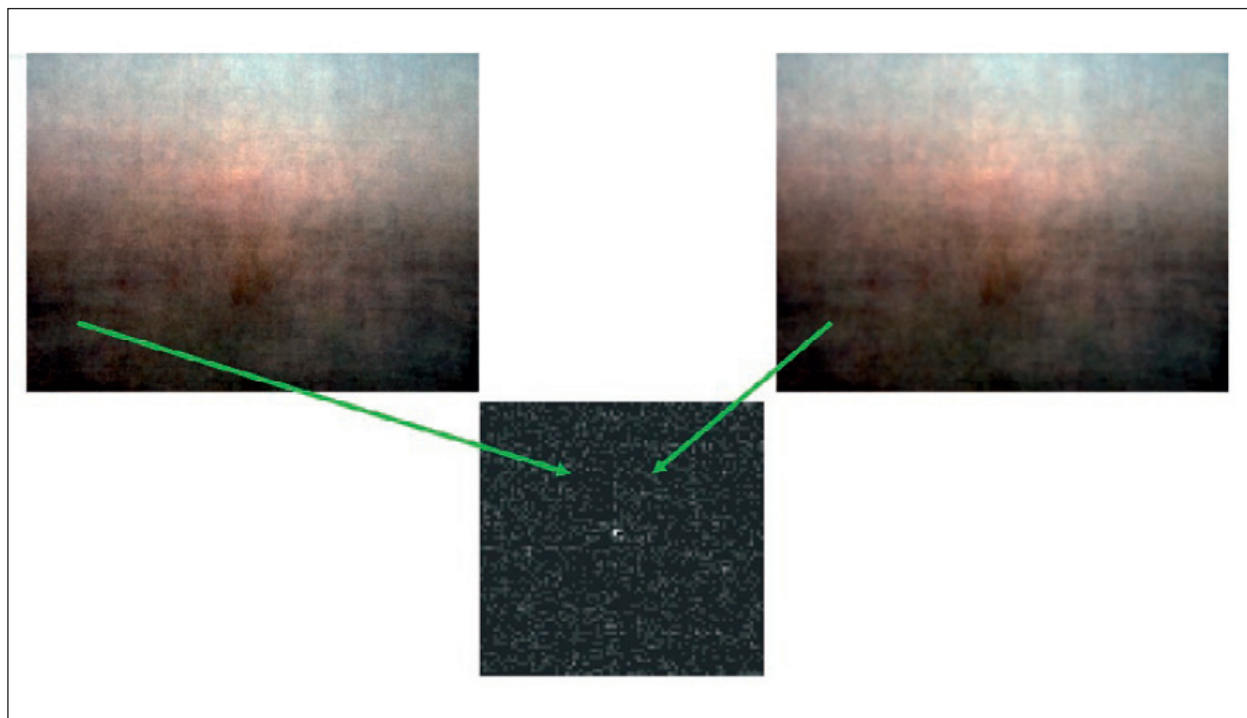
3. Het onderzoek: metadata

Digitale camera's hebben vaak de mogelijkheid om tijdens het maken van opnames metadata toe te voegen aan foto's of video's. De term 'metadata' duidt op toegevoegde informatie die al dan niet nodig is voor een correcte weergave van de beeldinhoud. Bij digitale beelden kan het gaan om informatie die merk en type van de camera aangeeft. Ook camera-instellingen, serienummer en tijd en datum van de opname behoren tot de mogelijke metadata. Deze informatie is vaak snel te achterhalen en kan een waardevolle aanwijzing zijn dat een bepaald bestand met een bepaalde camera gemaakt is. Helaas is deze methode niet feilloos. Allereerst kan het zijn dat de metadata ontbreekt als gevolg van bedoelde

of onbedoelde verwijdering. Ook kan het voorkomen dat de metadata slechts informatie over een bepaald merk of type camera bevat. Dan is het niet mogelijk om de specifieke, individuele camera te identificeren. Tenslotte bestaat de mogelijkheid dat de metadata al dan niet bewust is gemanipuleerd. Daarom doet het NFI ook onderzoek naar pixel-artefacten en non-uniformiteiten.

4. Het onderzoek: Pixelartefacten

Het aantal defecte pixels op een beeldsensor ligt niet vast in de tijd. Toename van het aantal defecte pixels is mogelijk, bijvoorbeeld als gevolg van kosmische straling of veranderende materiaaleigenschappen. Bovendien kan het aantal pixelartefacten toenemen bij een hogere temperatuur. Anderzijds is het mogelijk dat een aantal pixelartefacten na verloop van tijd verdwijnt, doordat verbindingen in het sensormateriaal zich herstellen of worden gecorrigeerd door een bewerking in de camera. Een laatste mogelijkheid is de aanwezigheid van 'knipperende pixels', die zich verschillend gedragen in verschillende foto's en daarnaast temperatuurafhankelijk zijn. Op de ene foto lijkt het een pixel defect, maar op de volgende foto gedraagt dezelfde pixel zich normaal. Zo kan tijdens het maken van een foto een knipperende pixel aanwezig zijn, terwijl dit later niet is te constateren in de broncamera. Afbeelding 1 toont een uitvergroott pixelartefact van twee camera-opnamen.



Afbeelding 1 - Uitvergroott pixelartefact op dezelfde locatie in het beeld van twee beelden uit dezelfde camera

Onderzoeksopdracht: vergelijking

In forensisch onderzoek kan er behoefte zijn om een bepaald beeld of een serie beelden te koppelen aan een specifieke digitale camera. Bij voorkeur is deze ook beschikbaar voor onderzoek. Het middelen van de betwiste beelden kan pixelartefacten zichtbaar maken, afhankelijk van de beeldinhoud en het aantal beelden. Defecte pixels vallen op naar aanleiding van hun afwijking van het gemiddelde. Het vinden van defecte pixels is moeilijker wanneer er zich veel details in het beeld bevinden of wanneer de intensiteit van de defecte pixels gelijk is aan de omliggende pixels. Als het onderzoek tot de vondst van defecte pixels leidt, volgt herhaling van het onderzoek met zowel de betwiste camera als met enkele ongerelateerde referentiecamera's. Daarvoor gebruiken de onderzoekers geen normale foto's, maar onbelichte beelden waarop de pixelartefacten makkelijker te vinden zijn.

Wanneer de locaties van de defecte pixels uit de betwiste beelden overeenkomen met de locaties uit de betwiste camera, is dit een aanwijzing dat de betwiste beelden afkomstig zijn uit de betwiste camera. Vanwege de mogelijke aanwezigheid van knipperende pixels hoeft niet elke defecte pixel uit de betwiste beelden aanwezig te zijn op de foto's uit de broncamera.

Dankzij steeds betere productieprocessen bevat niet elke beeldsensor defecten. Ook is het mogelijk om met beeldbewerkingssoftware artefacten te verwijderen of zorgt de camera zelf automatisch voor compensatie van artefacten. In die gevallen zijn beelden hierdoor niet meer te identificeren. Het PRNU-patroon is daarentegen minder eenvoudig te verwijderen. Daarom vindt ook daaraan onderzoek plaats.

5. Het onderzoek: PRNU

Een digitale camera bevat veel elektronische componenten. Nadat het beeld is vastgelegd op de beeldsensor, gaat de beeldinformatie langs al deze componenten voordat deze in het uiteindelijke bestand geschreven wordt. Elke stap kan willekeurige ruis toevoegen. Daarnaast bestaat er een betrekkelijk geringe, *systematische* afwijking van het signaal in de sensor welke het PRNU patroon tot gevolg heeft. Het gaat hierbij om een kenmerkende afwijking die vaak terug te vinden is op afbeeldingen of video's uit de camera waarin zich de beeldsensor bevindt. Het verschil met pixelartefacten is de veel kleinere afwijking. Een ander verschil is dat de zichtbaarheid van de beeldafwijking afhangt van de lichtintensiteit; zij is signaalafhankelijk. Praktisch betekent dit dat

goed belichte beelden leiden tot een meer betrouwbare extractie van het PRNU-patroon dan slecht belichte beelden. De extractie van het patroon geschiedt door de ruis zo goed mogelijk van de beeldinhoud te scheiden met behulp van complexe filters.

Omdat de afwijking in het beeld als gevolg van PRNU zo gering is, gaat het bij het vaststellen van zo'n patroon altijd om een schatting. Factoren als beeldcompressie beïnvloeden die schatting. Bij zwaardere compressie gaat meer beeldinhoud verloren. In dat geval is dan ook slechts een ruwere schatting van het PRNU-patroon mogelijk.

Wanneer het in het vervolg gaat over zo'n patroon, is daarmee de schatting van het PRNU-patroon uit de beeldbestanden bedoeld. Voor het maken van vergelijkingen om een broncamera te detecteren gebruikt het NFI het zelf ontwikkelde programma PRNUCompare (zie Literatuur).

Schatting

Doordat door compressie beeldinformatie verloren gaat, is er in veel gevallen slechts een schatting mogelijk. Ook door de toevoeging van willekeurige ruis aan het signaal is het slechts mogelijk het patroon te schatten. Om deze redenen gaat het slechts om een benadering van het karakteristieke patroon. Daarbij kan het voorkomen dat klasse-specifieke camerakenmerken invloed uitoefenen op de schatting van het PRNU-patroon. Naast de kenmerken van het PRNU-patroon kunnen zich ook afwijkende kenmerken voordoen die niet uniek zijn voor het onderzochte beeldbestand, maar die aanwezig zijn in een bepaalde *klasse* van camera's, bijvoorbeeld van een bepaald merk en type.

Dat maakt analyse en vaststelling van de invloed van deze klasse-specifieke toevoegingen zeer belangrijk. Deze validatie gebeurt door meerdere camera's van hetzelfde model te testen. Op deze manier is het mogelijk aannemelijk te maken dat de overeenkomsten tussen twee patronen niet louter op deze klasse-specifieke kenmerken berusten.

Onderzoeksopdracht: vergelijking

Om een bepaald beeld of een serie beelden te kunnen koppelen aan een specifieke digitale camera die beschikbaar is voor onderzoek, maakt de onderzoeker tijdens een onderzoeksopdracht eerst een aantal opnamen met deze camera. Onderwerp van deze opnamen is een egaal grijs oppervlak. De reden daarvoor is dat alle beeldelementen daarop nagenoeg gelijk belicht worden. Uit deze beelden wordt vervolgens het PRNU-patroon geëxtraheerd met behulp van een filter. Dit is het referentiepatroon ten

opzichte van de betwiste beelden. De onderzoeker vergelijkt het gevonden patroon met het patroon wat geëxtraheerd is met dezelfde filters uit één of meerdere betwiste beelden. Het patroon wordt benaderd door een schatting te maken van de foto in het geval van een perfecte sensor (dat wil zeggen: zonder de aanwezigheid van het PRNU patroon). Door het verschil te bekijken tussen het aanwezige beeld en de schatting van het perfecte beeld, verkrijgen we het PRNU patroon. Het schatten van het perfecte beeld wordt gedaan door filters. Op deze wijze is het extraheren van het PRNU patroon uit egale oppervlakten makkelijker en betrouwbaarder dan bij gedetailleerde texturen. Omdat het aantal pixels in een foto vaak erg groot is, kunnen in veel gevallen ook gedetailleerde gebieden opgevat worden als kleine egale oppervlakten. In dit geval neemt de onzekerheid van de schatting wel toe, en de bewijswaarde neemt af. Door een groot aantal foto's met verschillende beeldinhoud te maken, brengt de onderzoeker deze onzekerheden in kaart. Dit komt tot uitdrukking in het oordeel van de bewijswaarde van de onderzoeker. Wanneer er meerdere beelden aanwezig zijn, kan ervoor gekozen worden om de patronen te middelen, of om de individuele patronen te beschouwen.

Wanneer het referentiepatroon en het patroon uit de onderzochte foto een gelijke herkomst hebben, zal de gelijkenis tussen deze patronen in de meeste gevallen groter zijn dan wanneer de patronen een verschillende herkomst hebben. Afbeelding 2 geeft dit weer. Het kan zijn dat PRNU-patronen uit verschillende camera's overeenkomstige kenmerken vertonen.

Dit kan voortkomen uit de genoemde classespecifieke kenmerken. Door meerdere camera's van hetzelfde merk en type te gebruiken als referentie valt de invloed van deze factor te kwantificeren.

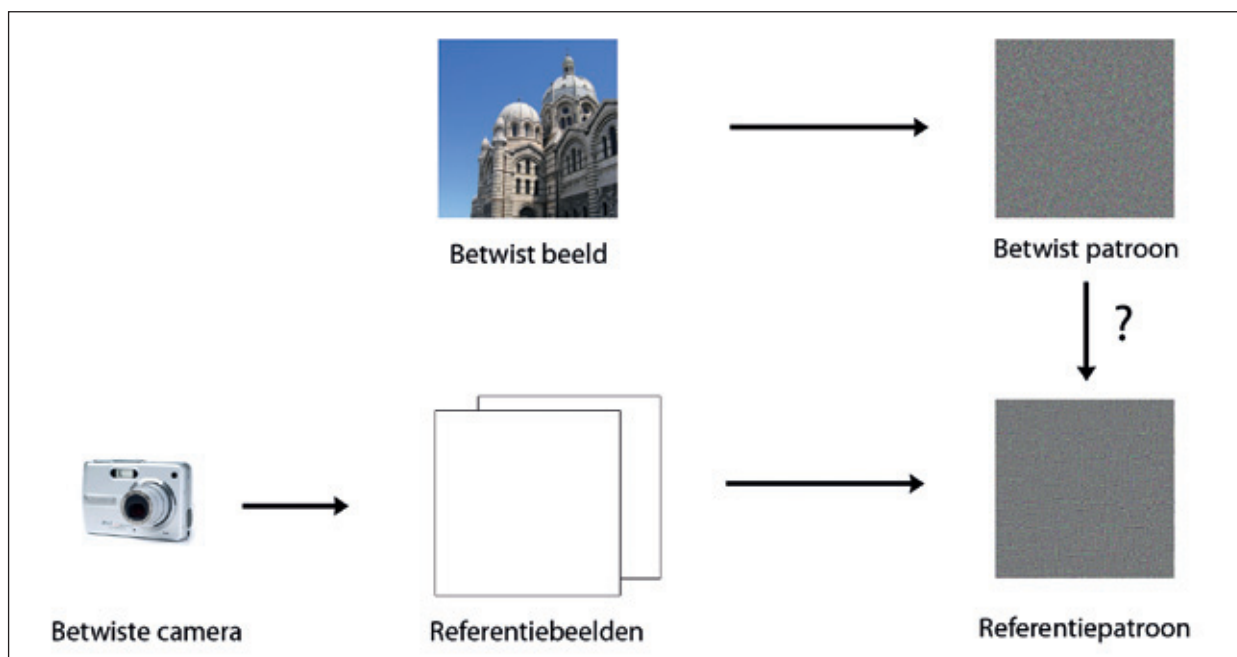
Film

Aangezien een film is opgebouwd uit een aaneenschakeling van losse beelden, is een vergelijking onder bepaalde omstandigheden ook te maken voor filmopnamen. Wel zijn filmopnamen over het algemeen zwaarder gecomprimeerd. Daarom is het aantal beelden in het filmbestand van belang. Ook het type compressie en de beeldinhoud hebben invloed op de mogelijkheid om een verband tussen camera en bepaalde opnamen te leggen.

Het achterhalen van de broncamera is onder bepaalde omstandigheden ook mogelijk wanneer de video's bijvoorbeeld op YouTube zijn gezet (zie Literatuur). Maar door de grote verscheidenheid aan parameters, zoals de mate van compressie, de lengte van de opname en de beeldinhoud, levert dit in sommige gevallen slechts een beperkte bewijswaarde op. Net als bij het PRNU onderzoek bij normale foto's, is het belangrijk de resultaten te valideren met een aantal referentie camera's.

Onderzoek zonder camera

Niet altijd is de camera beschikbaar voor het onderzoek. Als de camera ontbreekt, behoort onderlinge vergelijking van reeksen beelden tot de mogelijkheden om aannemelijk te maken of foto's of video's met eenzelfde camera verkregen zijn.



Afbeelding 2 - Schematisch overzicht van de benodigde stappen om de herkomst van beelden vast te stellen

Dit kan ook bij vergelijking van verschillende videobeelden van internet. Van de beschikbare sets beelden geldt één set als het betwiste beeld en wordt een andere set als referentie aangewezen. Wanneer voldoende beelden voorhanden zijn, is het mogelijk om een referentiepatroon te vinden door meerdere PRNU patronen uit een reeks beelden te middelen. Op deze manier verdwijnt de invloed van de veranderingen van beeld tot beeld en is het mogelijk het referentiebeeld te bepalen. Wanneer het patroon uit de betwiste beelden sterk lijkt op het patroon uit de referentiebeelden van de camera, is dit een aanwijzing dat beide sets afkomstig zijn van dezelfde camera. Het bewust aanpassen van het PRNU-patroon in het beeldbestand is minder eenvoudig dan het aanpassen van de metadata van een beeldbestand. Toch is het ook bij dit type onderzoek niet uit te sluiten dat het patroon al dan niet opzettelijk gewijzigd is. Met beeldbewerkingsoftware is het mogelijk om kunstmatig pixelartefacten of PRNU-patronen aan te brengen of te verwijderen. Maar in hun conclusies doen de onderzoekers de expliciete aanname dat dit niet gebeurd is.

6. Conclusies

Het NFI rapporteert conclusies uit de resultaten van het onderzoek naar het PRNU-patroon uit een beeld op een vaste manier. Dit is: de waarschijnlijkheid van de bevindingen onder de hypothese dat een beeld wel gemaakt is met een bepaalde camera, ten opzichte van de hypothese dat een beeld niet gemaakt is met een bepaalde camera. Een algemene toelichting over de conclusies staat in de vakbijlage 'Reeks waarschijnlijkheidstermen'. Het is niet mogelijk kwantitatieve conclusies te formuleren. Doordat er ontzettend veel verschillende camera's in omloop zijn, is het namelijk vrijwel onmogelijk om een representatieve steekproef van deze populatie te verkrijgen. Hierdoor is er onvoldoende statistische informatie beschikbaar om vast te stellen hoe specifiek een PRNU-patroon daadwerkelijk is. De stochastische processen die het ontstaan van het ruispatroon veroorzaken spelen hierin een belangrijke rol.

7. Verklarende woordenlijst

CCD

Charge Coupled Device. Een matrix van lichtgevoelige elementen die per rij worden uitgelezen.

CMOS

Complementary Metal Oxide Semiconductor. In een CMOS-beeldsensor wordt bij elke pixel apart de lading omgezet in een spanning.

Pixel

Het woord pixel is een samentrekking van de twee eerste lettergrepen van het Engelse picture element. Wanneer het een digitale camera betreft, gaat het om een individueel lichtgevoelig element op de beeldsensor.

PRNU

Photo Response Non-Uniformity. Deze term geeft aan dat de gevoeligheid van de beeldelementen in de sensor niet overal gelijk is: zij is niet uniform. Dit betekent dat verschillende pixels ietwat verschillend reageren op een bepaalde lichtintensiteit. Op deze manier wordt een uniek patroon gevormd dat bruikbaar is bij het vinden van de herkomst van een digitaal beeld (Afbeelding 2).

8. Literatuur

1. A.E. Gamal, B. Fowler, H. Min and X. Liu, 'Modeling and Estimation of FPN Components in CMOS Image Sensors'. *Proc. SPIE Vol. 3301, Solid State Sensor Arrays: Development and Applications II* 1992, pp. 168-177.
2. K. Kurosawa, K. Kuroki and N. Saitoh, 'CCD Fingerprint Method - Identification of Video Camera from Videotapes Images'. *International Conference on Image Processing* 1999; Kobe: IEEE Computer Society, vol. III, 537-540.
3. Z. Geradts, J. Bijhold, M. Kieft, K. Kurosawa, K. Kuroki and N. Saitoh, 'Methods for Identification of Images Acquired With Digital Cameras'. *Enabling Technologies for Law Enforcement and Security* 2001; Boston: SPIE, 4232 505-512.
4. K. Kurosawa, K. Kuroki and N. Saitoh, 'An Approach to Individual Video Camera Identification'. *Journal of Forensic Sciences* 2002; 47(1): 97-102.
5. N. Saitoh, K. Kurosawa, K. Kuroki, N. Akiba, Z. Geradts and J. Bijhold, 'CCD fingerprint method for digital still cameras'. *Investigative Image Processing II* 2002; Orlando: Z. J. G. L. I. Rudin, SPIE vol. 4709 37-48.
6. Z. J. Geradts, J. Bijhold, M. Kieft, K. Kurosawa, K. Kuroki and N. Saitoh, 'Digital Camera Identification'. *Journal of Forensic Identification* 2002; 52(2): 621-632.
7. V. Heerich, Urkundenlabor, 'Identification of a digital image by means of CCD Noise', *Presentation at the 3rd ENFSI Digital Imaging Workshop Meeting (DIWG) in Zurich*, 23-25 October 2002.

8. L. Lanzi, M. Jurgen, Universiteit van Lausanne, Presentation 'Can we individualize the device used to acquire a digital image?' *Presentation at the ENFSI DIWG meeting in Prague, May 2004.*
9. J. Lukáš, J. Fridrich, and M. Goljan, 'Digital Camera Identification from Sensor Pattern Noise'. *Transactions on Information Security and Forensics* 2006; vol. 1(2): 205-214
- 10 M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan and J. Lukáš, 'Source Digital Camcorder Identification Using Sensor Photo-Response Non-Uniformity'. *Proc. Of SPIE Electronic Imaging*, Photonics West, 2007: 1G-1H.
11. A.J.P. Theuwissen, 'Influence of Terrestrial Cosmic Rays on the Reliability of CCD Image Sensors – Part 1: Experiments at Room Temperature. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 54, No. 12, 2007: 3260-3266
12. M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan and J. Lukáš, 'Determining Image Origin and Integrity Using Sensor Noise'. *IEEE Transactions on Information Security and Forensics* 2008, vol. 3(1): 74-90.
13. Wiger van Houten and Zeno Geradts, 'Source Video Camera Identification for Multiply Compressed Videos Originating from YouTube'. *Digital Investigation* 2009, doi:10.1016/j.diin.2009.05.003
14. Maarten van der Mark, Wiger van Houten en Zeno Geradts, *NFI PRNUCompare* – programma voor het vinden van de broncamera, verkrijgbaar via <http://prnucompare.sourceforge.net>

9. Contactgegevens

Nederlands Forensisch Instituut
 Postbus 24044
 2490 AA Den Haag

Laan van Ypenburg 6
 2497 GB Den Haag
www.forensischinstituut.nl

Voor inhoudelijke vragen kunt u contact opnemen met het onderzoeksgebied Beeldonderzoek en Biometrie van de afdeling Digitale Technologie & Biometrie, telefoon 070 - 8886413.