



Allesziende machines

de technologie achter moderne industriële visionsystemen

Stuart Cording (Elektor)

Met de komst van CMOS-beeldsensoren zijn camera's met een laag energieverbruik nu gemakkelijk in massa te produceren in een rendabel halfgeleider-productieproces. Tegenwoordig hebben we allemaal minstens twee van dergelijke onderdelen in onze smartphones. Dankzij steeds krachtigere microcontrollers zijn beeldopname en objectbewerking voor iedereen beschikbaar, en ze ondersteunen zelfs 3D-metingen in industriële sensoren.

In de huidige maatschappij zijn camera's nooit ver weg. Als jij er geen op zak hebt, is de kans groot dat de persoon die naast je in de trein zit er wel een heeft. En zo niet, dan is er waarschijnlijk een geïntegreerd in het treinstel, het station of het beveiligingssysteem in het café waar je onderweg langs liep. Camera's zijn zo alomtegenwoordig geworden dankzij CMOS-beeldsensoren, een technologie die de kosten, het stroomverbruik en de afmetingen aanzienlijk heeft verminderd in vergelijking met de oude CCD-technologie die ze vervangen hebben. Terwijl het vastleggen van beelden en video één taak is, heeft de snelle groei van de rekenkracht van computers in het afgelopen decennium het mogelijk gemaakt dat binnenkomende visuele gegevens in real-time worden geanalyseerd. Dit maakt geautomatiseerde inspectie mogelijk voor diverse industriële toepassingen, zoals het

opsporen van verkeerd geplaatste onderdelen op printplaten, het lokaliseren van onderdelen op transportbanden en zelfs het beoordelen van de kwaliteit van een lasverbinding.

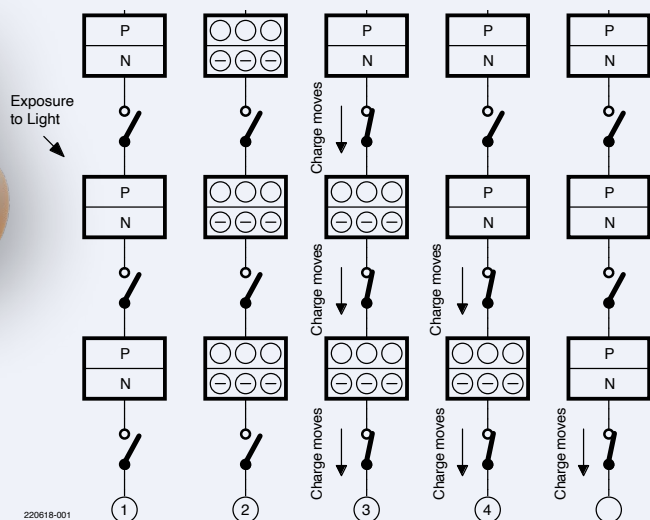
CCD's - beeldtechniek uit het verleden

Beeldsensoren gebruiken een serie fotodiodes om fotonen om te zetten in elektrische stroom. In CCD's is een reeks fotodiodes via schakelaars met elkaar verbonden. Nadat het licht op het beeldoppervlak is gevallen, worden de ladingen in elke pixel één voor één door de string geleid (lading doorgeven) naar de rand van de sensor (**figuur 1**). Hier wordt de lading omgezet in een spanning alvorens door een analoog/digitaal-converter (ADC) te worden omgezet in een digitale waarde. CCD-sensoren worden vervaardigd in een metaaloxide-halfgeleiderproces (MOS), dat

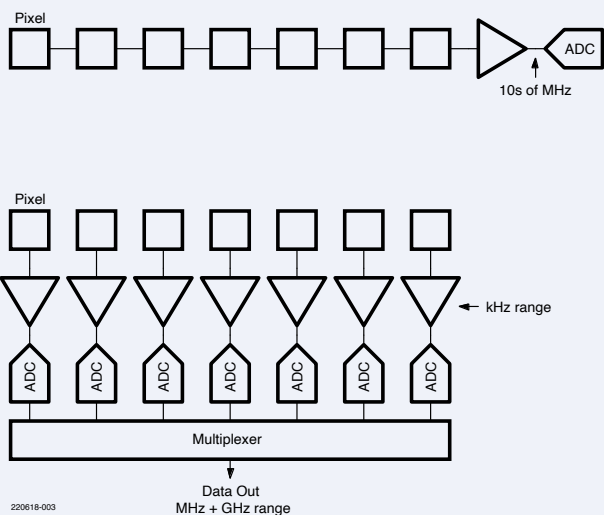
verschilt van de complementaire MOS-technologie (CMOS) die voor de meeste silicium-componenten wordt gebruikt.

De lange levensduur van CCD als sensortechnologie hangt samen met de hoge kwantum-efficiëntie, een maatstaf voor hoe goed het apparaat fotonen omzet in elektronen, die kan oplopen tot 95%. Naast commerciële en consumenten-cameratoepassingen werden CCD's gebruikt in wetenschappelijke apparatuur, zoals spectrometers en zelfs de Hubble-telescoop [1]. Voor de evaluatie van de beelden die ze vastlegden waren echter externe systemen nodig.

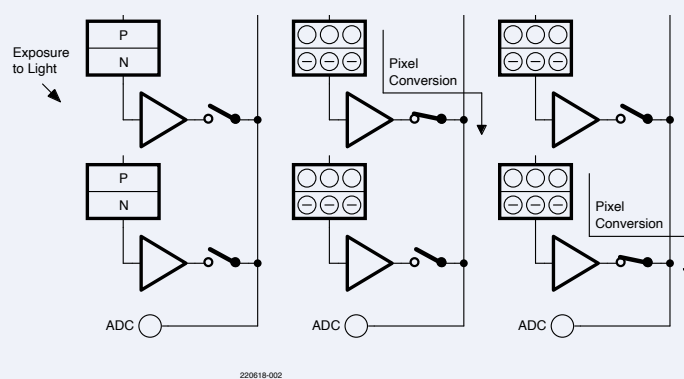
CMOS-beeldsensoren kwamen in de jaren negentig op als een levensvatbare technologie. Aanvankelijk was de beeldkwaliteit slecht, met een lage resolutie, ruis en een slechte kleurdefinitie. Door noodzakelijke verschillen in ontwerp waren de fotodiodes in deze sensoren veel kleiner dan die in een CCD-sensor met een vergelijkbaar aantal pixels. In plaats van een oplaadcircuit te implementeren, had elke pixel zijn eigen versterker nodig, waardoor het oppervlak van elke pixel kleiner werd (**figuur 2**). Maar dankzij de immense ontwikkeling en het onderzoek, gedreven door duidelijke marktbehoeften, is het kwaliteitsverschil tussen beide technologieën tegenwoordig minimaal. Het productiegemak van een CMOS-fabricageproces heeft ook de prijzen gedrukt, waardoor de integratie is verbeterd



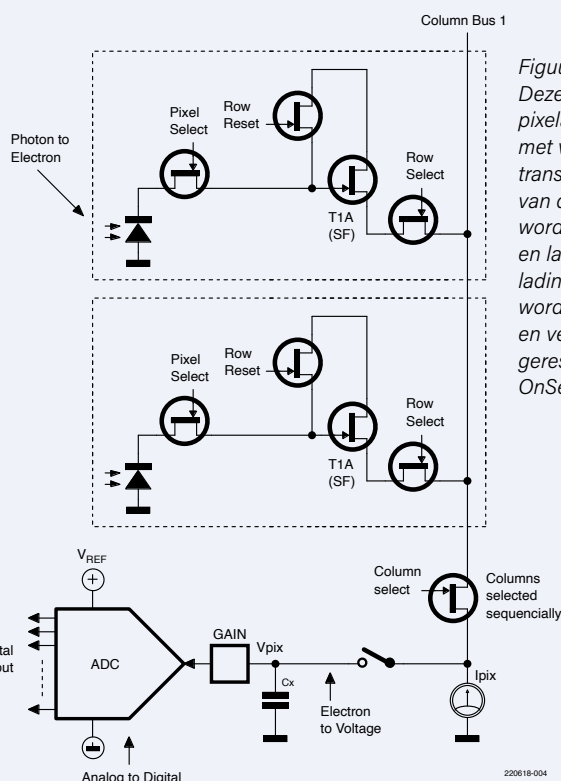
Figuur 1: CCD-beeldsensoren gebruiken een ladingsoverdracht tussen pixels om hun waarden uit te lezen. (Bron: Canon Inc.)



Figuur 3: Omdat CMOS-beeldsensoren grootschalig parallel zijn, hoeft het analoge front-end niet zo snel te zijn als bij CCD-sensoren. (Bron: Teledyne Digital Imaging Inc.)



Figuur 2: CMOS-beeldsensoren gebruiken een ADC om de waarde van elke pixel afzonderlijk om te zetten. (Bron: Canon Inc.)



Figuur 4: Deze CMOS-pixelarchitectuur met vier transistoren is een van de vele die worden gebruikt en laat zien hoe de lading van de pixel wordt geëvalueerd en vervolgens gereset. (Bron: OnSemi)

en veel van de noodzakelijke beeldverwerking op de chip van de sensor zelf zit. Bovendien is het stroomverbruik ongeveer 100 maal minder dan dat van een gelijkwaardige CCD-sensor, iets wat essentieel is voor de huidige draagbare apparaten die op batterijen werken.

Vermindering van ruis in pixels en verhoging van de beeldsnelheid wordt bereikt door een grootschalige parallelle gegevensomzetting, waarbij meerdere ADC's de ladingen in een rij pixels tegelijk omzetten. Vergeleken met CCD's kunnen daardoor versterkers en ADC's met een kleinere bandbreedte worden gebruikt (figuur 3). Pixelontwerpen variëren, maar bestaan meestal uit een versterker met hoge impedantie verbonden met de fotodiode en

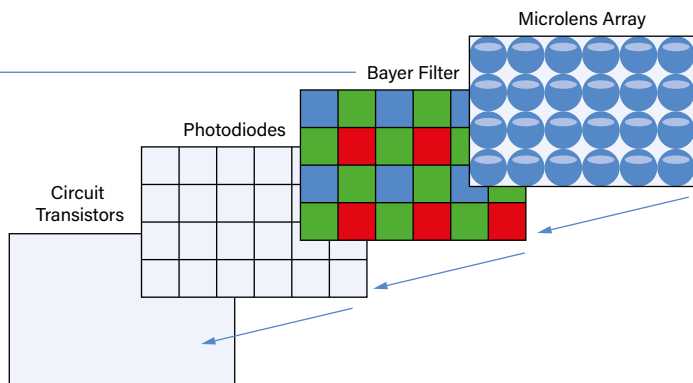
schakelaars voor rij- en kolomkeuze. Tenslotte is er een schakelaar om de lading van de pixel te wissen (figuur 4).

Kleur toevoegen

Het gebruik van het populaire CMOS-productieproces heeft de kosten van beeldsensoren weliswaar verlaagd, maar ze zijn allesbehalve normaal als het gaat om de fabricage. De fotodiodes zijn gevoelig voor al het zichtbare licht, zodat elk vastgelegd beeld alleen een grijswaardenbeeld oplevert. Om kleurenbeelden te produceren is een kleurenfilter-array (CFA) nodig. Meestal wordt een Bayer-filter gebruikt, genoemd naar Bryce Bayer van Eastman Kodak, die het uitvond. Het gebruikt rode, blauwe en twee groene kleurenfilters in

een patroon dat ervoor zorgt dat elk vierkant van vier pixels half groen, kwart rood en kwart blauw is. De hogere weging voor groen komt voort uit de fysiologie van het oog, dat groen beter waarneemt [2].

Het resulterende ruwe beeld is zonder nabewerking niet geschikt voor onmiddellijke menselijke consumptie. Dit gebeurt met een proces dat **demosaicing** heet. In het eenvoudigste geval wordt elke pixel omgezet in een RGB-waarde (rood/groen/blauw) op basis van de waarden van specifieke pixels eromheen. Sommige demosaicing-benaderingen, zoals lineaire interpolatie, kunnen echter ongewenste effecten veroorzaken in het uiteindelijke beeld, vooral rond de randen



Figuur 5: In tegenstelling tot gebruikelijke halfgeleiders hebben beeldsensoren bij hun constructie een kleurenfilter en een microlens-array nodig.

van objecten. Om dit tegen te gaan is een aantal algoritmen beschikbaar die proberen de artefacten te minimaliseren en toch een snel eindbeeld te leveren [3].

Een ander verschil met de gebruikelijke chipfabricage is de noodzaak van een microlens-laag. Omdat het lichtgevoelige oppervlak van elke pixel zo klein is, helpt de lens om het binnenkomende licht op de pixel te concentreren, wat op zijn beurt de kwantumefficiëntie verhoogt (**figuur 5**).

Elektronische sluiters begrijpen

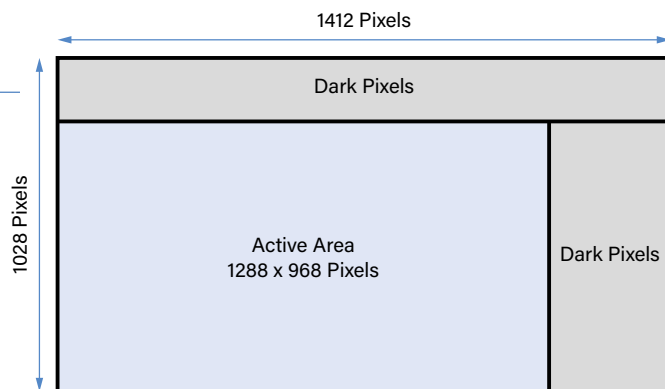
Hoe de sluiters van de beeldsensor werkt kan voor niet-ingewijden ook moeilijk te begrijpen zijn. Een elektronische sluiters wordt gebruikt om de pixels gedurende de juiste tijd bloot te stellen aan licht. Doorgaans zijn er twee mogelijkheden, globaal en rollend, en sommige beeldsensoren ondersteunen ze allebei. Bij een globale sluiters worden alle pixels van de beeldsensor elektronisch aangestuurd om tegelijkertijd belicht te worden. Daarna wordt elke rij pixels omgezet in digitale waarden en doorgegeven aan de hostprocessor die het beeld verwerkt. Bij een rollende sluiters wordt elke rij pixels één voor één aan het licht blootgesteld, waarbij de omzetting voor elke regel onmiddellijk plaatsvindt.

Het beeldverschil dat ontstaat wordt deels beïnvloed door de gebruikte sluiters-methode. Een globale sluiters legt het beeld in één moment vast. Ter vergelijking: de rollende sluiters legt elke lijn vast met een kleine vertraging ten opzichte van de vorige lijn. Wanneer het object dat door de sensor wordt vastgelegd beweegt, kunnen ongewenste effecten in het beeld ontstaan. Als je bijvoorbeeld een locomotief fotografeert die van links naar rechts beweegt, zal het uiteindelijke beeld van links naar rechts vegen vertonen vanaf de bovenkant van het beeld.

Hoewel het voor de hand liggende antwoord zou zijn om een globale sluiters te kiezen, zijn er zoals altijd, meer dingen die begrepen moeten worden. De rollende sluiters methode vereist minder transistoren rond elke pixel, waardoor er meer ruimte overblijft voor het lichtgevoelige deel, wat resulteert in een betere beeldkwaliteit. Het vereenvoudigde ontwerp leidt ook tot minder ruis in de pixel. Tenslotte maakt de rollende sluiters hogere beeldsnelheden mogelijk dan een globaal sluitersontwerp, omdat de bovenste rijen van het volgende beeld kunnen worden belicht terwijl de laatste rijen worden omgezet.

De beslissing wat beter is hangt af van de toepassing; de problemen veroorzaakt door de rollende sluiters kunnen worden opgelost door een flitsers te gebruiken die gesynchroniseerd is met de sluiters. Sommige wetenschappelijke instrumenten vereisen een globale sluiters, terwijl een camera voor visuele inspectie prima uit de voeten kan met een rollende sluiters en gesynchroniseerde flitslichtbron. Een nuttige bron om de problemen in meer detail te begrijpen is geleverd door PCO AG [4].

Een andere potentiële bron van verwarring bij beeldsensoren is het verschil tussen het aantal pixels op de sensor en het aantal dat beschikbaar is voor de toepassing van de gebruiker. De OnSemi AR0130CS [5] is een voorbeeld, een 1/3-inch CMOS digitale beeldsensor met een rollende sluiters. Deze 1,2-megapixelsensor heeft 1280 × 960 actieve pixels in de lijst met belangrijkste prestatieparameters van de datasheet. De werkelijke sensor meet echter 1412 × 1028 pixels met een actief gebied van 1288 × 968. Sommige van de bovenste rijen en een blok van de kolommen aan de rechterkant zijn optisch zwart. Deze worden intern gebruikt om het zwartniveau te controleren en zorgen voor zwartniveaucorrectie (**figuur 6**).



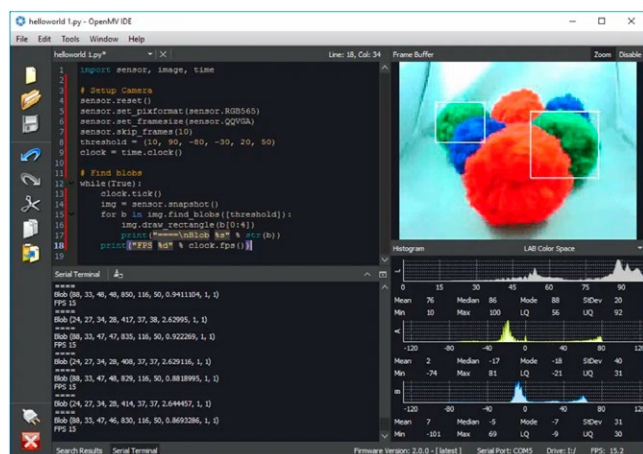
Figuur 6: In een CMOS-beeldsensor kunnen extra pixels worden aangebracht om het zwartniveau te compenseren. (Bron: OnSemi)

Een andere uitdaging bij het verkrijgen van een beeld van goede kwaliteit ligt in de voeding. De PSRR (power supply rejection ratio) van de gebruikte low dropout-regelaars (LDO) moet voorkomen dat er ruis in de voedingsaansluitingen van de CMOS beeldsensor komt. Zo niet, dan neemt het risico van pixelruis toe. Volgens een application note van OnSemi [6] wordt, naarmate de beeldsensoren verder gaan dan 50 megapixels, een PSRR van meer dan 90 dB tot 10 kHz en meer dan 45 dB tussen 1 en 3 MHz aanbevolen. De dynamische belasting kan ook vrij aanzienlijk zijn, met een paar honderd milliampère belastingverandering tijdens rij-overgangen. Hier zijn bulkcondensatoren essentieel om optimale prestaties te bereiken. Tenslotte moet rekening worden gehouden met de uitgangsruis van de LDO ($nV/\sqrt{Hz}$), want alles in het bereik van 10 Hz tot 1 MHz kan resulteren in extra ruis in de pixels, waardoor hun dynamisch bereik afneemt.

Machine vision met microcontrollers

Met hun 32-bits processoren en een megabyte SRAM of meer zijn de grotere microcontrollers van tegenwoordig zeer geschikt voor eenvoudige vision-toepassingen en kunnen ze zelfs enkele nuttige machine learning-algoritmen (ML) voor objectdetectie integreren. Een project om te overwegen is OpenMV [7], een combinatie van hardware en een software-ontwikkelomgeving speciaal gericht op machine vision. Met de STM32-familie microcontrollers biedt hun hardware toegang tot beeldsensoren tot 5 megapixels die naar behoefte uitwisselbaar zijn.

Softwareontwikkeling wordt ondersteund door de OpenMV geïntegreerde ontwikkelomgeving (IDE) die is afgestemd op de behoeften van machine vision (**figuur 7**). Aan de linkerkant is een editor voor het schrijven



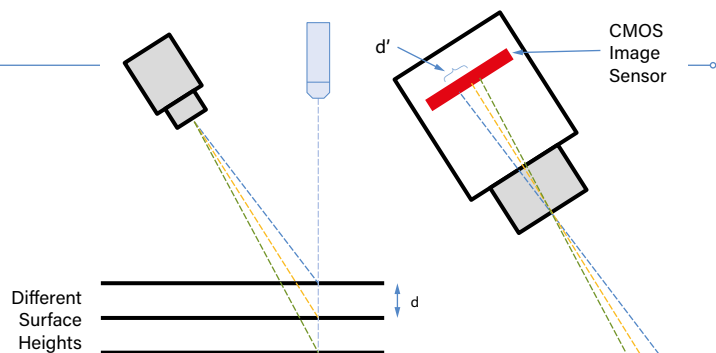
Figuur 7: De OpenMV-ontwikkelomgeving biedt een editor voor codering en toont het beeld dat door de aangesloten sensor is vastgelegd. (Bron: OpenMV)

ven van code in MicroPython en een seriële terminal, die tekstuitvoer van de applicatie-code weergeeft. Aan de rechterkant staat de uitvoer van de camera. Bovenaan staat de framebuffer die het beeld van de camera weergeeft, gecombineerd met uitvoer die door de toepassing in de videostream wordt geïnjecteerd. Dit kunnen tekstberichten zijn of grensvlakken die objecten markeren die met ML zijn gedetecteerd. Aan de onderkant worden histogrammen getoond, zoals de rood-, blauw- en groenwaarden van het beeld. Net als in de Arduino-omgeving zijn er voorbeeldprojecten beschikbaar. Deze bevatten ook ML-modellen voor toepassingen als gezichts- en persoonsdetectie.

3D-beeldvorming met behulp van laser-driehoeksmeting

Hoewel camera's met CMOS-beeldsensoren kunnen worden gebruikt voor een groot aantal vision-toepassingen, behoren die meestal tot het domein van de 2D-beeldvorming. Een groot aantal toepassingen vereist echter nauwkeurige oppervlaktemetingen die een 3D-meetcapaciteit vereisen. In de industrie is de laser-driehoeksmeting een gebruikelijke oplossing om het oppervlak van eindproducten te meten, zoals lasnaden, gelijmde delen en de positie van componenten op printplaten.

Bij deze sensoren wordt een laserpunt of -lijn op het meetobject geprojecteerd. Het door het oppervlak gereflecteerde licht valt op een geïntegreerde CMOS-sensor die met behulp van driehoeksmeting de afstand tot het object bepaalt (figuur 8). De positie van de beeldsensor en de laser bepaalt de complexiteit van de berekeningen die nodig zijn om de afstand, de resolutie en de kans op meetfouten te bepalen. De laser kan bijvoorbeeld loodrecht op het object staan (standaard-geometrie) met de camera onder een hoek, waardoor een goede sensor voor algemeen gebruik ontstaat.



Figuur 8: Laser-driehoeksmeting gebruikt een CMOS-beeldsensor om de reflectie van een laser op een oppervlak te detecteren om de hoogte ervan te bepalen. (Bron: MoviMED)

Maar bij het meten van sterk reflecterende oppervlakken zoals glas en gepolijst metaal is een look-away geometrie met zowel de beeldsensor als de laser onder een hoek ten opzichte van de meting een beter ontwerp.

Sensorfabrikanten als SmartRay bieden een breed scala aan 3D-sensoren op basis van deze technologie. Hun ECCO 95.015G-sensoren [8] zijn speciaal ontworpen om vlak glas en speculaire, sterk reflecterende oppervlakken te scannen. Gemonteerd op een afstand van 23,5 mm van het meetobject, bieden ze een verticale resolutie van 0,42...0,54 μm . Het apparaat levert zijn metingen als een reeks punten via een gigabit Ethernet-interface die kan worden gekoppeld aan typische industriële beeldvormingssoftware om de gegevens te evalueren.

CMOS-beeldsensoren voor iedereen

Met hun lage kosten en energieverbruik zijn CMOS-beeldsensoren alomtegenwoordig geworden in de huidige maatschappij. In detectietoepassingen waar ultrasone of infraroodsensoren zouden zijn ingezet,

is het heel goed denkbaar dat vandaag de dag een CMOS-beeldsensor wordt gebruikt. Maar met miljoenen pixels en een lastig te begrijpen functionaliteit kunnen ze moeilijk te koppelen zijn aan microcontrollers. Gelukkig maken de rekenkracht en geheugencapaciteit van de huidige microcontrollers relatief complexe machine-learning functies voor objectdetectie mogelijk, in combinatie met beeldsensoren van bescheiden afmetingen. En bij deze apparaten gaat het niet alleen om 2D-beelden. Industriële sensoren die lasergebaseerde driehoeksmeting gebruiken, bevatten CMOS-beeldvormers om tot op de micrometer nauwkeurige metingen in drie dimensies uit te voeren, zodat de visuele inspectie van werkstukken kan worden geautomatiseerd om de kwaliteit ervan te garanderen. ◀

220618-03

Vragen of opmerkingen?

Heb je technische vragen of opmerkingen over dit artikel? E-mail de auteur op stuart.cording@elektor.com of neem contact op met Elektor via redactie@elektor.com.

WEBLINKS

- [1] "Hubble's Instruments: WFPC2 Wide Field Planetary Camera 2," European Space Agency: <https://bit.ly/3WBhN1Z>
- [2] "The Human Eye's Response to Light," Iowa State University: <https://bit.ly/3UsMVDU>
- [3] A. Rajwade, "Color Image Demosaicing," Indian Institute of Technology Bombay: <https://bit.ly/3UneoCg>
- [4] "What are all the discussions about global vs. rolling shutter?," PCO AG: <https://bit.ly/3h90h4R>
- [5] Product Page: AR0130CS CMOS Image Sensor: <https://bit.ly/3hgWq63>
- [6] M. Dadafshar, "Understanding Challenges in Powering High Resolution, High Frame Rate CMOS Image Sensors," OnSemi, July 2022: <https://bit.ly/3Dz7EtS>
- [7] Website: OpenMV: <https://openmv.io/>
- [8] Product Page: ECCO 95.015G: <https://bit.ly/3E7HakZ>