



machines à vision totale

la technologie derrière les systèmes de vision industrielle d'aujourd'hui

Stuart Cording (Elektor)

Avec l'avènement des capteurs d'images CMOS, il est désormais facile de produire en masse des caméras de faible consommation grâce à un processus économique de fabrication de semi-conducteurs. Aujourd'hui, nous avons tous au moins deux appareils de ce type dans nos smartphones. Grâce à des microcontrôleurs toujours plus puissants, la capture d'images et le traitement d'objets sont à la portée de tous, et ils prennent même en charge les mesures 3D dans les capteurs industriels.

De nos jours, on n'est jamais loin d'une caméra. Si vous n'en avez pas dans votre poche, il y a de fortes chances que votre voisin dans le train en ait une. Et, si ce n'est pas le cas, il y en a probablement une dans le wagon, à la gare ou dans le système de sécurité du café devant lequel vous êtes passé en arrivant. Les caméras sont devenues aussi omniprésentes grâce aux capteurs d'images CMOS, une technologie qui a considérablement réduit leur coût, leur consommation d'énergie et leur taille par rapport à l'ancienne technologie des dispositifs à transfert de charge (CCD) qu'ils ont remplacée. Avec les progrès dans la capture d'images et de vidéos, la croissance rapide de la puissance des ordinateurs au cours de la dernière décennie a permis de traiter les images en temps réel. Cela permet d'automatiser l'inspection dans diverses applications industrielles, comme la détection de composants mal positionnés sur des circuits imprimés, la localisation de pièces sur des

bandes transporteuses et même l'évaluation de la qualité d'un joint soudé.

CCD – Technologie d'imagerie du passé

Les capteurs d'images utilisent un réseau de photodiodes pour convertir les photons en un courant électrique. Dans les CCD, les photodiodes d'une ligne sont reliées par des interrupteurs. Une fois le capteur illuminé, les charges formées dans chaque pixel sont transférées au pixel voisin par des impulsions de commande successives sur les interrupteurs, jusqu'à arriver au bord du capteur (**figure 1**). Là, les charges sont converties une par une en tension, puis en valeur numérique par un convertisseur analogique-numérique (CA/N). Les capteurs CCD sont fabriqués selon un procédé métal-oxyde-semiconducteur (MOS), qui diffère de la technologie MOS complémentaire (CMOS) utilisée pour la plupart des dispositifs en silicium.

La longévité du CCD en tant que technologie de capteur est liée à son rendement quantique élevé (son taux de conversion des photons en électrons), qui peut atteindre 95 %. Au-delà des applications commerciales et grand public, les CCD ont été utilisés dans des appareils scientifiques, tels que des spectro-mètres et même le télescope Hubble [1]. Cependant, l'exploitation des images qu'ils fournissent nécessitait des circuits externes.

Les capteurs d'images CMOS sont devenus une technologie viable dans les années 1990. Au départ, la qualité de l'image était médiocre, avec une faible résolution, des images bruitées et une mauvaise définition des couleurs. En raison d'inévitables différences dans la conception, les photodiodes de ces capteurs étaient beaucoup plus petites que celles d'un capteur CCD ayant un nombre équivalent de pixels. Plutôt que de mettre en œuvre un circuit de transfert de charge, chaque pixel nécessitait son propre amplificateur, ce qui réduisait la surface disponible pour chaque pixel (**figure 2**). Cependant, grâce à un gros effort de recherche et de développement pour satisfaire les besoins du marché, la différence de qualité d'image entre les deux technologies est aujourd'hui minime. La facilité de production due au processus de fabrication CMOS a également fait baisser les prix, avec l'intégration dans la puce du capteur d'une partie croissante du traitement de l'image. En outre, la consommation d'énergie n'est que le centième de celle d'un capteur CCD équivalent, ce qui

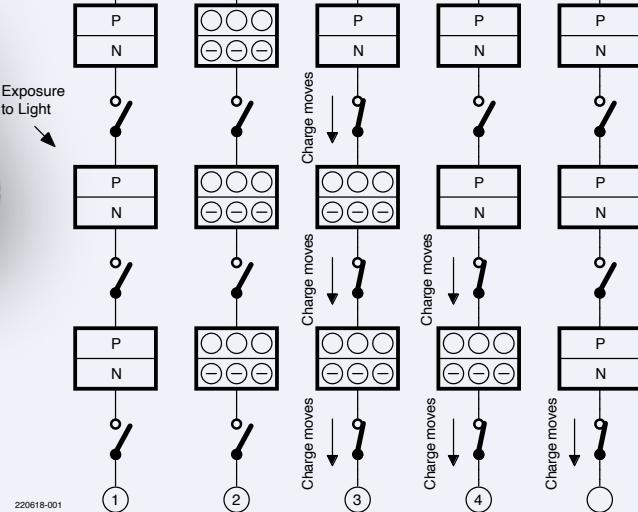


Figure 1. Les capteurs d'images CCD utilisent le transfert de charges entre pixels pour lire leurs valeurs. (Source : Canon Inc.)

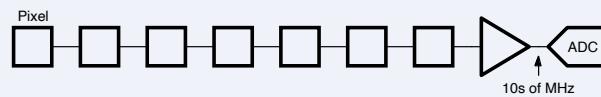


Figure 2. Les capteurs d'images CMOS utilisent un CA/N pour convertir la valeur de chaque pixel. (Source : Canon Inc.)

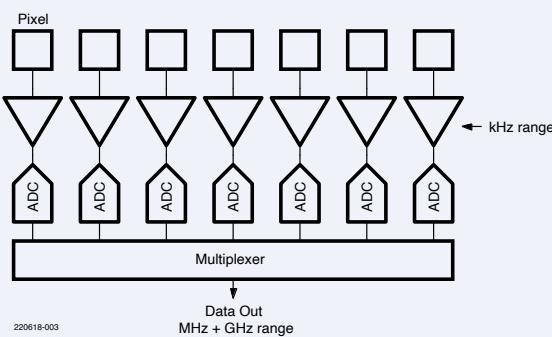


Figure 3. Les capteurs d'images CMOS étant massivement parallèles, le frontal analogique n'a pas besoin d'être aussi rapide que celui utilisé dans les capteurs CCD. (Source : Teledyne Digital Imaging Inc.)

est essentiel pour les appareils portables actuels fonctionnant sur batterie.

La réduction du bruit dans les pixels et l'augmentation de la fréquence d'images sont obtenues par une conversion de données massivement parallèle, de multiples CA/N convertissant simultanément les charges dans une ligne de pixels. Par rapport aux CCD, cela permet d'utiliser des amplificateurs et des CA/N à bande passante plus faible (**figure 3**). La conception des pixels varie mais consiste généralement en un amplificateur à haute impédance connecté à la jonction de la photodiode et en des interrupteurs pour la sélection des lignes et des colonnes. Enfin, un interrupteur est prévu pour réinitialiser le pixel (**figure 4**).

Ajouter de la couleur

Si l'utilisation du populaire procédé de production CMOS a pu réduire le coût des capteurs d'images, ceux-ci sont tout sauf normaux en matière de fabrication. Les photodiodes sont sensibles à toute la lumière visible, de sorte qu'on n'obtiendrait que des niveaux de gris. Pour produire des images en couleur, un réseau de filtres est nécessaire. On utilise généralement un filtre de Bayer, du nom de son inventeur, Bryce Bayer, d'Eastman Kodak. Il utilise des filtres rouges, bleus et deux filtres verts disposés de manière à ce que tout carré de quatre pixels soit composé d'une moitié de vert, d'un quart de rouge et d'un quart de bleu. La part plus élevée du vert est due à la physiologie de l'œil, plus sensible au vert [2].

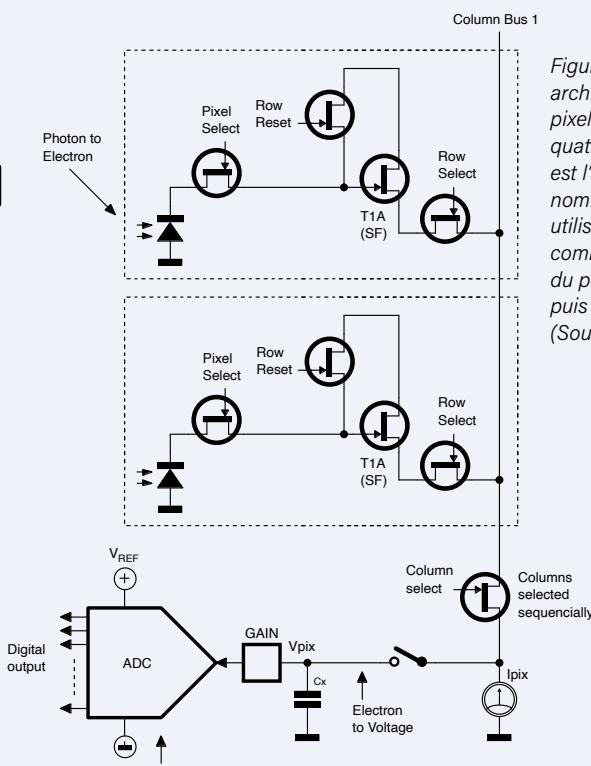


Figure 4. Cette architecture de pixel CMOS à quatre transistors est l'une des nombreuses utilisées et montre comment la charge du pixel est évaluée puis réinitialisée. (Source : OnSemi)

L'image brute résultante n'est pas adaptée à la consommation humaine immédiate sans prétraitement. Ce traitement est effectué au moyen d'un processus appelé démosaïquage. Dans sa forme la plus simple, chaque pixel est converti en une valeur RVB (rouge/vert/bleu) sur la base des valeurs de pixels spécifiques qui l'entourent. Cependant, certaines approches de démosaïquage, telles que l'interpolation linéaire, peuvent provoquer des artefacts dans l'image finale, notamment autour des bords des objets. Pour lutter contre ce problème, il existe une sélection d'algorithmes qui tentent de minimiser les artefacts tout en fournissant une image finale rapide [3].

Une autre différence par rapport à la fabrication typique d'une puce est la nécessité

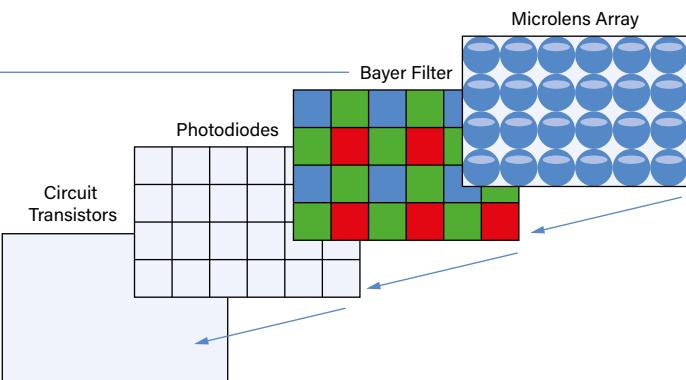


Figure 5. Contrairement aux semi-conducteurs classiques, les capteurs d'images nécessitent un filtre de couleur et un réseau de microlentilles dans leur construction.

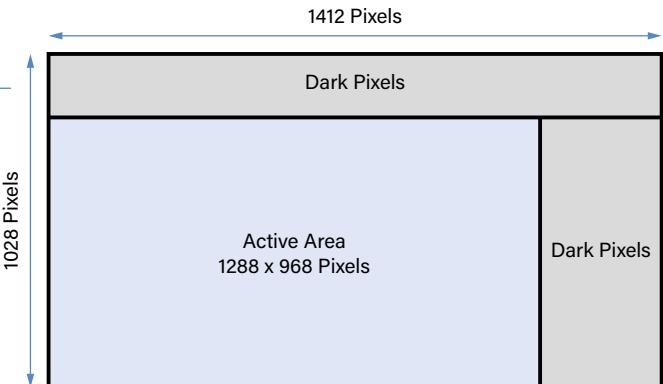


Figure 6. Des pixels supplémentaires peuvent être mis en œuvre dans un capteur d'image CMOS pour assurer la compensation du niveau de noir. (Source : OnSemi)

d'une couche de microlentilles. La surface photosensible de chaque pixel étant très petite, la lentille permet de concentrer la lumière entrante sur le pixel, ce qui augmente l'efficacité quantique (**figure 5**).

Comprendre les obturateurs électroniques

Le fonctionnement de l'obturateur du capteur d'images peut également être difficile à comprendre pour les non-initiés. Un obturateur électronique est utilisé pour exposer les pixels à la lumière pendant la durée correcte. En général, deux options principales sont disponibles, l'obturateur global et l'obturateur roulant, et certains capteurs d'images prennent en charge les deux. Avec un obturateur global, tous les pixels du capteur d'images sont contrôlés électriquement pour être exposés en même temps. Ensuite, chaque ligne de pixels est convertie en valeurs numériques et transmise au processeur hôte qui gère le traitement de l'image. Avec un obturateur roulant, les rangées de pixels sont exposées à la lumière l'une après l'autre, la conversion s'effectuant immédiatement pour chaque ligne.

La différence dans l'image qui en résulte est partiellement impactée par le type d'obturateur utilisé. Un obturateur global capture l'image instantanément. Par contre, l'obturateur roulant capture chaque ligne avec un léger retard par rapport à la ligne précédente. Lorsque l'objet cible est en mouvement, des artefacts peuvent apparaître dans l'image résultante. Par exemple, si l'on photographie une locomotive se déplaçant de gauche à droite, l'image finale présentera des traînées de gauche à droite en partant du haut de l'image.

Si le choix d'un obturateur global semble s'imposer, il y a, comme toujours, d'autres détails à prendre en compte. La technique de l'obturateur roulant nécessite moins

de transistors autour de chaque pixel, ce qui laisse plus de surface pour sa partie photosensible, d'où une meilleure qualité d'image. Cette conception simplifiée permet également de réduire le bruit dans le pixel. Enfin, l'obturateur roulant permet d'atteindre des fréquences d'images plus élevées que l'obturateur global, car les rangées supérieures de l'image suivante peuvent commencer à être exposées pendant que les dernières rangées sont converties.

La décision quant à la meilleure solution dépend de l'application, et les problèmes causés par l'obturateur roulant peuvent être résolus en utilisant un flash synchronisé avec l'obturateur. Certains instruments scientifiques nécessitent une approche globale de l'obturateur, tandis qu'une caméra d'inspection visuelle se contentera d'un obturateur roulant et d'une source de lumière flash synchronisée. Une ressource utile pour comprendre ces questions plus en détail est fournie par PCO AG [4].

Une autre curiosité potentielle avec les capteurs d'images est la différence entre le nombre de pixels sur le capteur et le nombre disponible pour l'application utilisatrice. Par exemple, le OnSemi AR0130CS [5] est un capteur d'image numérique CMOS de $\frac{1}{3}$ de pouce et de 1,2 mégapixels avec un obturateur roulant. Sa fiche technique déclare 1280 x 960 pixels actifs alors que le nombre réel est de 1412 x 1028 pixels avec une zone active de 1288 x 968. Certaines des lignes supérieures et un bloc des colonnes du côté droit sont optiquement noirs. Ils sont utilisés en interne pour contrôler et corriger le niveau de noir (**figure 6**).

Un autre défi pour l'acquisition d'une image de bonne qualité réside dans l'alimentation électrique. Le taux de réjection d'alimentation (PSRR) des régulateurs à faible chute

(LDO) utilisés doit empêcher tout bruit de se propager dans les broches d'alimentation du capteur d'image CMOS. Dans le cas contraire, le risque de bruit des pixels est accru. Selon une note d'application d'OnSemi [6], lorsque les capteurs d'images dépassent 50 mégapixels, un PSRR supérieur à 90 dB jusqu'à 10 kHz et supérieur à 45 dB entre 1 et 3 MHz est recommandé. La charge dynamique peut également être assez considérable, avec quelques centaines de milliampères de variation de charge pendant les transitions de ligne. Dans ce cas, des gros condensateurs sont essentiels pour obtenir des performances optimales. Enfin, il faut tenir compte du bruit de sortie du LDO (nV/\sqrt{Hz}), car tout ce qui se situe dans la plage de 10 Hz à 1 MHz peut entraîner un bruit supplémentaire dans les pixels, réduisant ainsi leur plage dynamique.

Vision industrielle avec les microcontrôleurs

Avec leurs processeurs 32 bits et un mégaoc-tet de SRAM ou plus, les grands microcontrôleurs d'aujourd'hui sont bien adaptés aux applications de vision simples et peuvent même intégrer certains algorithmes d'apprentissage machine (AM) utiles pour la détection d'objets. Un projet à prendre en considération est OpenMV [7], une combinaison de matériel et d'environnement de développement logiciel ciblant spécifiquement la vision industrielle. Utilisant la famille de microcontrôleurs STM32, leur matériel donne accès à des capteurs d'images allant jusqu'à 5 mégapixels, remplaçables selon les besoins.

Le développement du logiciel est pris en charge par l'environnement de développement intégré (EDI) OpenMV, qui est adapté aux besoins de la vision industrielle (**figure 7**). Sur le côté gauche se trouve un éditeur pour écrire du code en MicroPython, et un terminal série, affichant la sortie texte du code

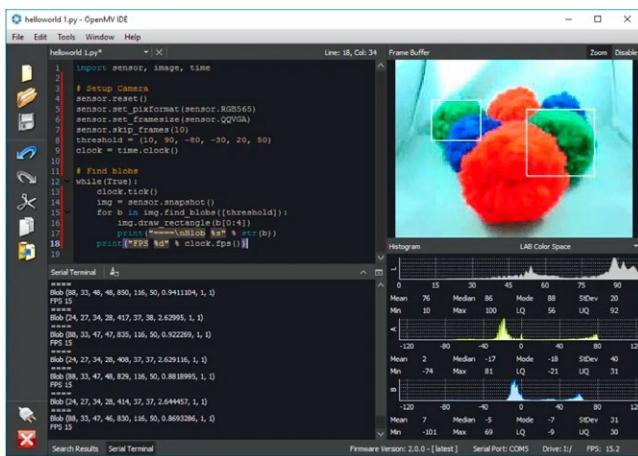


Figure 7. L'environnement de développement OpenMV fournit un éditeur pour le codage et affiche l'image capturée par le capteur associé. (Source : OpenMV)

de l'application. Sur le côté droit se trouve la sortie de la caméra. En haut se trouve le tampon d'image montrant l'image de la caméra combinée à toute sortie injectée dans le flux vidéo par l'application. Il peut s'agir de messages textuels ou de cadres de limitation mettant en évidence les objets détectés en utilisant l'AM. En bas, des histogrammes sont affichés, comme les niveaux de rouge, de bleu et de vert de l'image. Tout comme dans l'environnement Arduino, des exemples de projets sont disponibles. Ils comprennent également des modèles d'AM pour des applications telles que la détection de visages et de personnes.

Imagerie 3D par triangulation laser

Les caméras équipées de capteurs d'images CMOS peuvent être utilisées pour une multitude d'applications de vision, mais qui relèvent généralement de l'imagerie 2D. Cependant, beaucoup d'applications exigent des mesures de surface précises qui requièrent une capacité d'imagerie 3D. Dans le domaine industriel, la triangulation laser est une solution courante utilisée pour mesurer la surface des produits finis tels que les soudures, les cordons de colle et la position des composants sur les circuits imprimés.

Le principe de ces capteurs consiste à projeter un point ou une ligne laser sur l'objet à mesurer. La lumière réfléchie par la surface est reçue par un capteur CMOS qui détermine la distance de l'objet par triangulation (**figure 8**). Le positionnement du laser et du capteur détermine la complexité des calculs nécessaires pour déterminer la distance, la résolution et la probabilité d'erreurs de mesure. Par exemple, le laser peut être perpendiculaire à l'objet (géométrie standard) et la caméra inclinée, ce qui en fait un bon capteur polyvalent. Cependant, pour mesurer des surfaces très réfléchissantes comme le verre et le métal

poli, il est préférable d'opter pour une géométrie de type « look-away », avec le capteur d'image et le laser inclinés par rapport à l'objet.

Les fabricants de capteurs tels que SmartRay proposent une large gamme de capteurs 3D basés sur cette technologie. Leurs capteurs ECCO 95.015G [8] sont spécialement conçus pour le verre plat et les surfaces spéculaires et hautement réfléchissantes. Montés à une distance de 23,5 mm de l'objet à mesurer, ils offrent une résolution verticale de 0,42 à 0,54 µm. L'unité fournit ses mesures sous la forme d'une série de points sur une sortie gigabit Ethernet à laquelle peut être connecté un système d'imagerie industrielle standard pour évaluer les données.

Capteurs d'images CMOS pour tous

Grâce à leur faible coût et à leur faible consommation, les capteurs d'images CMOS sont devenus omniprésents dans la société actuelle. Dans les applications de détection, jusqu'ici domaine des capteurs à ultrasons

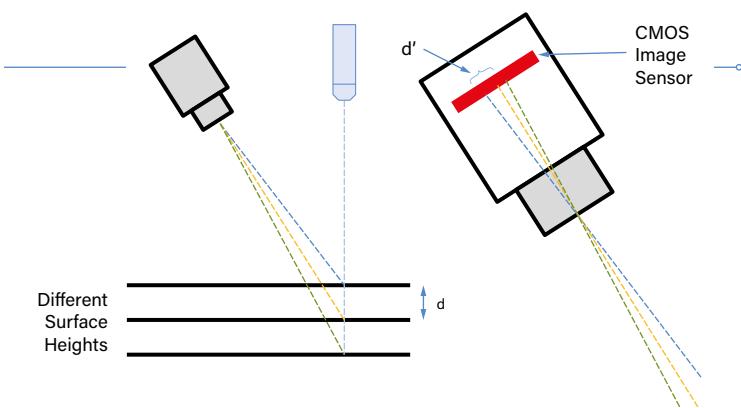


Figure 8. La triangulation laser utilise un capteur d'image CMOS pour détecter la réflexion d'un laser sur une surface afin d'en déterminer la hauteur. (Source : MoviMED)

ou à infrarouge, il est aujourd'hui parfaitement concevable de les remplacer par des capteurs d'images CMOS. Cependant, avec leurs millions de pixels et un usage ardu à maîtriser, ils peuvent être difficiles à interfaçer avec des microcontrôleurs. Heureusement, avec leur puissance de calcul et leur capacité de mémoire, les microcontrôleurs d'aujourd'hui sont capables de gérer une fonction relativement complexe de détection d'objets par apprentissage machine utilisant des capteurs d'images de taille modeste. Ces dispositifs ne sont pas limités aux images 2D. Les capteurs industriels CMOS utilisant la triangulation laser fournissent des mesures en trois dimensions de précision micrométrique, permettant d'automatiser le contrôle visuel de qualité des pièces. ↗

(220618-04) — VF : Helmut Müller

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (stuart.cording@elektor.com) ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr)

LIENS

- [1] « Les instruments de Hubble : WFC2 Wide Field Planetary Camera 2 », Agence spatiale européenne : <https://bit.ly/3WBhN1Z>
- [2] « The Human Eye's Response to Light », Université d'État de l'Iowa : <https://bit.ly/3UsmVDU>
- [3] A. Rajwade, « Color Image Demosaicing », Indian Institute of Technology Bombay : <https://bit.ly/3UnoCg>
- [4] « Pourquoi toutes ces discussions sur l'obturateur global et l'obturateur roulant ? », PCO AG : <https://bit.ly/3h90h4R>
- [5] Page du produit : AR0130CS Capteur d'image CMOS : <https://bit.ly/3hgWq63>
- [6] M. Dadafshar, « Understanding Challenges in Powering High Resolution, High Frame Rate CMOS Image Sensors », OnSemi, juillet 2022 : <https://bit.ly/3Dz7EtS>
- [7] Site web : OpenMV : <https://openmv.io/>
- [8] Page produit : ECCO 95.015G : <https://bit.ly/3E7HakZ>