

Masquer l'objet pour mieux le reconnaître

- Lew F.C. LEWYAN VOON
- Olivier AUBRETON
- Benaïssa BELLACH
- Bernard LAMALLE
- Patrick GORRIA

Laboratoire LE2I, IUT Le Creusot

- Guy CATHÉBRAS

Laboratoire LIRMM, Université Montpellier II

Introduction

L'évolution des technologies de pointe a repoussé les limites des domaines d'application de l'imagerie numérique de sorte que les capteurs d'images sont aujourd'hui omniprésents dans beaucoup d'applications, que ce soit des applications scientifiques ou des applications liées au divertissement et à un usage grand public. Ces capteurs fournissent en général une image qui est par la suite traitée par un ordinateur ou des circuits électroniques spécialisés. La course vers la miniaturisation et vers des systèmes autonomes compacts et légers nécessite aujourd'hui des capteurs d'images de plus en plus petits et de faible consommation. De plus, il existe des applications pour lesquelles il n'est pas indispensable d'avoir accès à l'image de la scène observée. On peut alors envisager de remplacer une partie du capteur – celle qui est destinée à conditionner et sérialiser l'image acquise pour la transmettre – par une électronique de traitement permettant de s'affranchir, partiellement ou totalement, de l'usage d'un ordinateur ou

d'un circuit de traitement spécialisé. De ce constat est né le concept de rétine électronique ou rétine artificielle qui a fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans le monde entier depuis plus de quinze ans. Il peut être défini comme un circuit intégré, une puce, qui contient à la fois un capteur d'images et des circuits électroniques de traitement des images acquises afin de fournir, soit des images prétraitées, soit des informations caractéristiques des images.

Contexte

C'est dans cet axe de recherche que travaille l'une des équipes de recherche basée sur le site du Creusot du Laboratoire Electronique, Informatique et Image (LE2I), une unité mixte de recherche du CNRS (UMR 5158) et de l'Université de Bourgogne dont les activités sont toutes tournées vers l'image depuis son acquisition jusqu'à la prise de décision en passant par le traitement. Fort d'un potentiel de plus de 60 enseignants-chercheurs, 7 agents techniques et administratifs et 35 doctorants, le

laboratoire LE2I développe, depuis plusieurs années, des activités de recherche dans le domaine de l'image en collaboration avec des laboratoires français ou étrangers, ainsi que des industries françaises, dans le cadre de co-encadrements de thèses et de transferts technologiques. Les travaux de recherche du LE2I sont régulièrement publiés dans des revues et présentés dans des conférences de renommée internationale, et donnent lieu à plusieurs soutenances de thèses chaque année.

Ce texte fait un état des travaux de recherche menés, depuis plus d'une dizaine d'années, par l'équipe travaillant sur l'étude, la conception et la réalisation de rétines électroniques. Ces travaux concernent essentiellement les rétines dédiées à des applications de reconnaissance d'objets. Il s'agit d'un domaine de recherche transdisciplinaire qui allie la théorie de la reconnaissance de formes et la conception de circuits micro-électroniques. Comme les procédés de fabrication ne permettent pas d'intégrer la puissance de calcul d'un

ordinateur conventionnel dans un imageur, il est nécessaire d'adapter les algorithmes à la technologie cible. Nos travaux nous ont conduit à la fabrication de plusieurs prototypes de circuits intégrés au cours des six dernières années. Chaque circuit a permis de tester et de valider un nouveau concept, puis de mettre en évidence des problèmes à résoudre afin d'améliorer les techniques et méthodes mises en oeuvre. Nous proposons de décrire le principe de fonctionnement des différentes rétines que nous avons réalisées en commençant par la toute première. Celle-ci validait le concept de reconnaissance d'un objet par la mise en correspondance de deux images afin de déterminer leur degré de ressemblance par la mesure du coefficient de corrélation. L'une est l'image de référence qui est gravée sur le circuit sous la forme d'un masque binaire, l'autre est l'image observée qui est projetée sur la surface photosensible du circuit. L'image gravée sur le circuit fut ensuite remplacée par un masque programmé en intégrant des éléments mémoires dans le circuit de sorte que l'image de l'objet à reconnaître, que nous appellerons par la suite image de référence, puisse être modifiée à tout instant conférant ainsi au circuit une plus grande flexibilité. Plus récemment, nous avons mis au point une méthode permettant de s'affranchir du problème de la position de l'objet dans l'image conduisant ainsi à une nouvelle et troisième version de l'architecture de notre rétine électronique. Les derniers résultats obtenus sont très prometteurs et ouvrent de nouvelles perspectives dans la reconnaissance et le suivi d'un objet dans une scène.

Rétine électronique de reconnaissance d'objet

La première rétine que nous avons réalisée, et que nous avons baptisée « Coq », a été fabriquée afin de tester le principe de la mesure du degré de ressemblance entre deux images par la mesure du coefficient de corrélation. Le

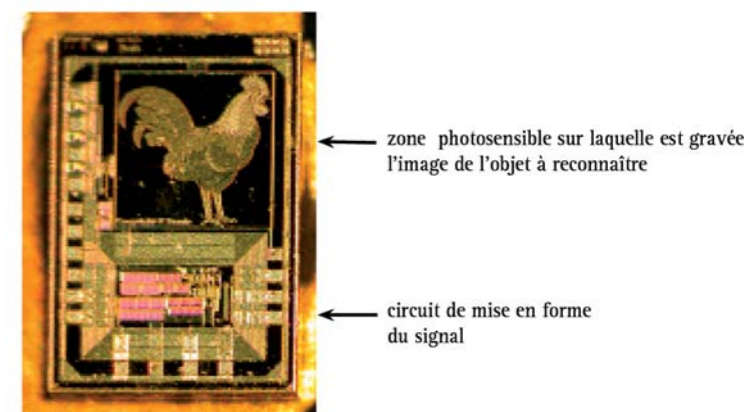


Figure 1: Rétine « Coq »

circuit est représenté sur la Figure 1. Il est constitué d'une zone sensible à la lumière sur laquelle est gravé un coq qui constitue l'objet à reconnaître. Il s'agit d'un dépôt métallique destiné à masquer partiellement la zone photosensible. On distingue également dans la partie inférieure des circuits de mise en forme du signal issu de la zone photosensible afin de le rendre disponible à la sortie du circuit. Un masque est en général binaire (transparent ou opaque), laissant passer la lumière sur certaines zones de la surface photosensible et occultant la lumière dans les zones masquées. Or l'image de l'objet que

nous souhaitons graver sur le circuit est une image en niveau de gris. Nous avons donc dû trouver une méthode pour convertir l'image à niveaux de gris en une image binaire (noir et blanc) sans que l'image résultante soit très différente de l'image initiale. La méthode qui a été retenue est une méthode couramment utilisée dans le domaine de l'impression : la génération d'images en demi-ton. Elle consiste à transformer une image en niveau de gris en une image binaire constituée de points noirs dont la densité spatiale permet de créer une sensation de niveau de gris.

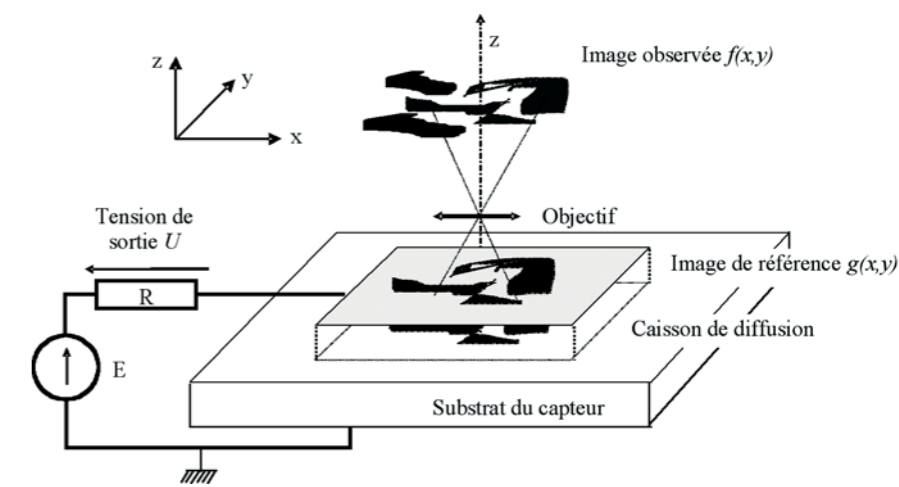


Figure 2 : Mesure expérimentale de la corrélation

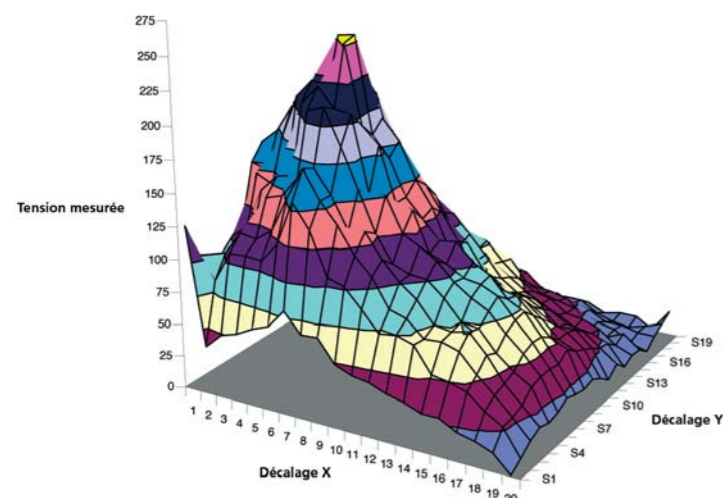


Figure 3 : Tension de sortie en fonction du décalage de l'image

Lorsque l'image d'un objet est projetée sur la partie photosensible au moyen d'un objectif, le capteur fournit, de façon instantanée, une tension traduisant le degré de ressemblance entre l'image gravée et l'image projetée. Par nature, il s'agit du principe même de la corrélation entre une fonction analogique (l'image projetée) et une fonction binaire (le masque gravé). Cette tension est maximale lorsque les deux images sont identiques et coïncident parfaitement. Ceci est mis en évidence par l'expérience que nous avons menée et qui est représentée sur la Figure 2

Nous avons projeté sur la zone photosensible du capteur une image identique à l'image dont le masque est gravé sur le circuit, c'est-à-dire l'image d'un coq, tout en s'assurant que les deux images sont de tailles identiques. Puis nous avons mesuré la valeur de la tension délivrée en sortie du circuit. Au cours de la mesure, l'image projetée balaye la totalité de la surface photosensible du capteur avec un pas constant dans les deux directions x et y. Pour chaque position de l'image projetée, la valeur de la tension est relevée et les données recueillies sont représentées sur la Figure 3. La valeur maximale de la tension est obtenue lorsque les deux images coïncident parfaitement, comme dans l'étude théorique.

Bien que, le capteur que nous venons de décrire soit, de par sa conception, limité à la reconnaissance d'un objet particulier dont le masque est gravé sur le circuit. Il nous a néanmoins permis de valider le concept de reconnaissance d'un objet à partir de masques binaires. Ce concept étant validé, nous avons cherché à pallier le manque de flexibilité de la méthode et à nous affranchir d'une gravure définitive en proposant une nouvelle architecture programmable. La nouvelle rétine est organisée sous la forme d'un damier de petites cellules photosensibles (réseau matriciel de pixels). Chacun des pixels est constitué par un élément photosensible sous la forme d'une photodiode associée à une unité logique dont le rôle est de mémoriser l'état du pixel correspon-

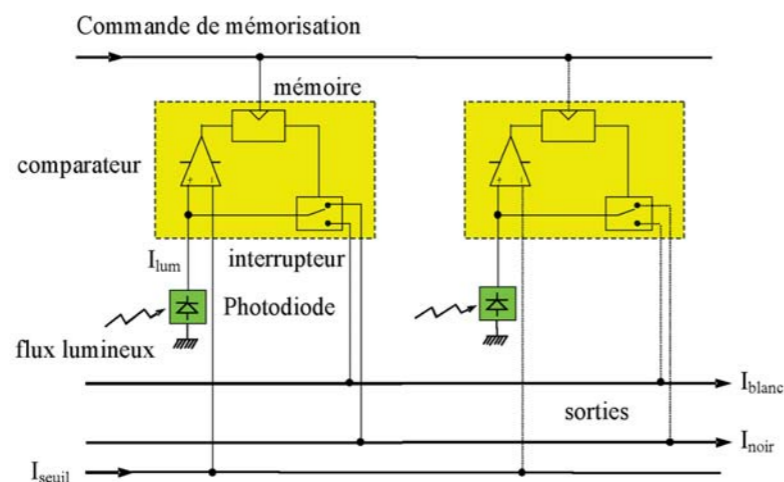


Figure 4 : Schéma fonctionnel du pixel

dant de l'image à reconnaître (transparent ou opaque) comme le ferait un masque.

Le schéma fonctionnel d'un pixel de la rétine programmable est représenté sur la Figure 4. L'opérateur électronique intégré au niveau du pixel permet de reconnaître une forme au moyen de deux phases successives. Dans une phase d'apprentissage préliminaire, l'image de référence est mémorisée sous forme binaire au niveau du pixel. La luminosité de chacun des pixels (niveau de gris ou signal I_{lum}) est comparée à la luminosité moyenne de l'image (niveau de gris moyen ou signal I_{seuil}), et le résultat de la comparaison est stocké dans un point mémoire. On réalise ainsi un masque constitué de deux zones distinctes classées selon leur luminosité dans l'image à reconnaître. Ensuite, au cours de la phase d'analyse, la rétine calcule un produit de corrélation entre l'image, en niveaux de gris, observée et une fonction binaire matérialisée par le masque. L'opération est réalisée en aiguillant tous les courants fournis par les pixels appartenant à une même zone du masque vers une des deux sorties. La sortie correspondant à la zone la plus lumineuse (zone blanche) est appelée I_{blanc} (corrélation positive), l'autre correspondant à la zone la plus sombre (zone noire) est appelée I_{noir} (corrélation négative). Le résultat de l'opération est donc disponible en sortie

sous la forme de deux signaux caractéristiques du degré de ressemblance de l'image de référence et de l'image analysée. La mise en correspondance est effectuée par un procédé purement optique, le temps de traitement de l'information est donc extrêmement court, ce qui autorise même les applications ayant des contraintes temps réel les plus strictes. Il faut souligner également que l'extrême simplicité de l'analyse des signaux fournis assure au circuit une grande autonomie car il ne nécessite aucun système informatique ou électronique externe.

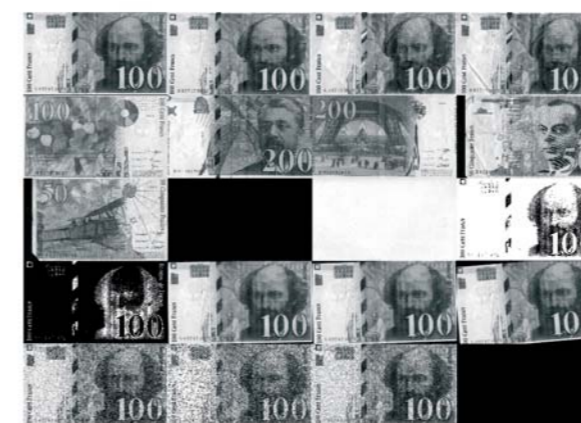
Nous avons testé le fonctionnement de cette rétine en utilisant les images de billets de banque représentées sur la Figure 5.a). Pour une image de référence (la première image, un billet de 100FF) mémorisée dans les éléments mémoires du circuit, la rétine fournit instantanément en sortie, les courants I_{blanc} et I_{noir} convertis en tension (V_{blanc} et V_{noir}) qui correspondent respectivement à la corrélation positive et à la corrélation négative entre les images observées et cette image de référence. La Figure 5.b) représente la distribution des valeurs normalisées entre 0 et 1 des tensions V_{blanc} et V_{noir} . Nous remarquerons que cette distribution est telle que tous les billets de 100 FF (représentés par X) sont isolés des autres billets (numérotés de 5 à D). A

noter que les images sont numérotées de 1 à 9 puis par les lettres de l'alphabet. Dans l'espace de représentation des tensions V_{blanc} et V_{noir} les numéros des billets de 100FF ont été remplacés par un X pour mieux les distinguer des autres billets.

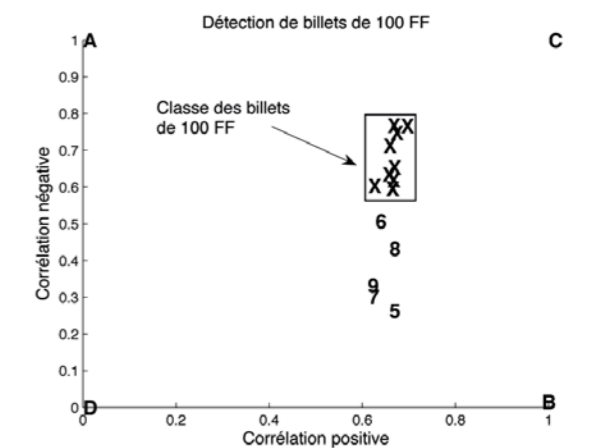
La mesure de corrélation positive (en abscisse) et négative (en ordonnée) montre qu'il est possible d'isoler tous les billets de 100 FF des autres billets, même en présence de bruit ou de déformation dans le cas de billets dégradés. Après avoir résolu le problème de la programmabilité de l'image de l'objet à reconnaître, nous nous sommes ensuite intéressés au problème de la position de l'objet dans la scène ainsi qu'à son orientation. En effet, comme la méthode de reconnaissance d'objet que nous avons intégrée au sein de la rétine électronique consiste à déterminer le degré de ressemblance de deux images en les superposant, il est évident que, si les deux images ne coïncident pas parfaitement, en raison d'un décalage ou d'une différence d'orientation, l'objet risque de ne pas être reconnu. Aussi, nous avons envisagé une solution qui consiste à déterminer dans un premier temps la position et l'orientation de l'objet analysé puis à, soit positionner la rétine, soit programmer le masque de sorte que le masque de l'objet à reconnaître et l'objet analysé coïncident

parfaitement. Comme la rétine fonctionne sur le principe de masques, il était souhaitable de pouvoir déterminer la position et l'orientation de l'objet à partir de masques.

Considérons par exemple un masque permettant de cacher toute la moitié gauche de l'image à analyser. Si l'objet que l'on cherche à localiser est situé dans la moitié gauche de l'image alors il sera masqué et par conséquent non-visible. Par contre, s'il est dans la moitié droite de l'image alors il sera visible. L'utilisation d'un masque simple tel que nous venons de le décrire nous permet donc de localiser l'objet horizontalement, soit dans la partie droite, soit dans la partie gauche, soit encore dans la partie centrale de l'image s'il n'est que partiellement visible. En appliquant le même raisonnement dans le sens vertical, nous pouvons de la même façon localiser l'objet verticalement. Par cet exemple très simple nous montrons qu'il est possible de déterminer avec plus ou moins de précision la position d'un objet dans une image. La précision de la localisation dépend du masque choisi et l'on peut remarquer que l'utilisation d'un masque à plusieurs degrés de masquage dans le sens horizontal (respectivement vertical) permet de localiser l'objet dans l'image en déterminant son degré de visibilité. Mathématiquement la



a) images utilisées pour le test



b) Distribution des valeurs de corrélation normalisées

Figure 5 : Un exemple de reconnaissance de billets de banque

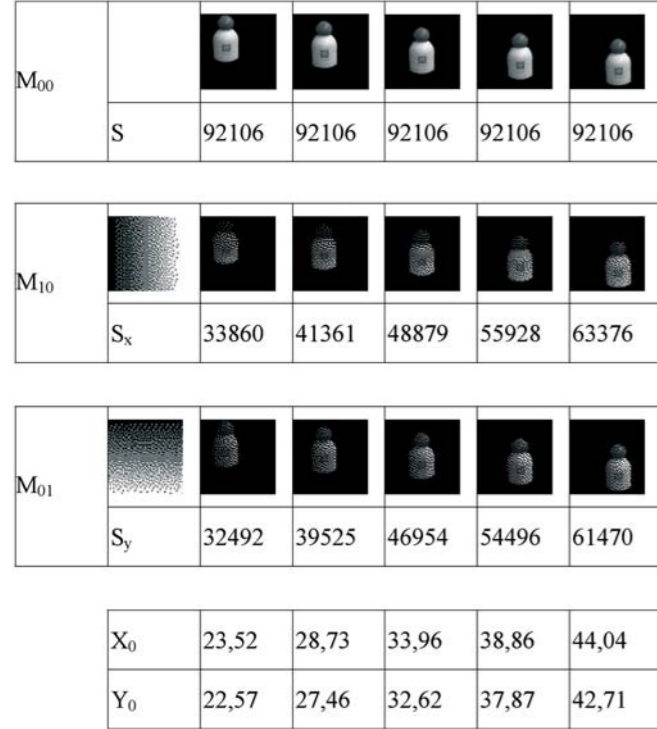


Figure 6 : Masquage de l'objet et détermination de la position

et S_y est fonction de la position de l'objet dans l'image. S_x (respectivement S_y) augmente progressivement à mesure que l'objet se déplace vers la droite (respectivement vers le bas). Sachant que le nombre de pixels de l'image en hauteur et en largeur est de 64 nous obtenons les valeurs données dans la Figure 6 pour les positions horizontale et verticale du centre de masse de l'objet dans l'image.

Le principe de localisation que nous venons de décrire ne fonctionne que si l'objet est clair sur un fond noir et uniforme. Ceci est dû au fait que si le fond n'est pas noir et uniforme, il interviendra dans le calcul du coefficient de corrélation, et par conséquent, influencera sur la précision de la localisation. Le cas idéal correspondant à un fond complètement noir est impossible à obtenir pratiquement en raison des limites technologiques des capteurs d'images et des conditions d'éclairage. Néanmoins, un étalonnage préalable du capteur permet de s'affranchir des problèmes liés au fond.

Concernant l'orientation de l'objet, elle est obtenue comme pour la position en utilisant un jeu de masques binaires issues d'images représentant des dégradés de niveau de gris par application d'un algorithme de génération d'images en demi-ton. Cinq types de dégradés de niveau de gris sont nécessaires pour la détermination de l'orientation : quatre dégradés de niveau de gris (2 horizontaux et 2 verticaux) de degrés de masquage différents et un dégradé de gris diagonal.

détermination des coordonnées x et y de l'objet dans l'image correspond aux calculs de corrélation entre l'image de objet à localiser et deux images représentant un dégradé de niveau de gris (l'un dans le sens horizontal et l'autre dans le sens vertical). Ensuite, connaissant la valeur moyenne de l'image – obtenue par un calcul de corrélation entre un masque totalement transparent et l'image à analyser – et le nombre de pixels en hauteur et en largeur de l'image, il est facile de déterminer les coordonnées du centre de l'objet dans l'image. Ces calculs de corrélation sont tout à fait compatibles avec l'architecture des rétines que nous avons conçues. Il suffit de mémoriser les images de dégradé de niveau de gris sur le circuit après les avoir transformées en des images binaires en utilisant un algorithme de génération d'image en demi-ton. Le principe de la localisation d'objet dans une image est illustré par un exemple sur la Figure 6.

pour différentes positions de l'objet. La valeur moyenne notée S de l'image est obtenue à partir d'un masque correspondant à une image totalement blanche (masque transparent). Nous remarquerons que cette valeur moyenne est indépendante de la position de l'objet dans l'image. Puis nous calculons les coefficients de corrélation de l'image de l'objet en utilisant des masques avec des degrés de masquage différents suivant les sens horizontal et vertical. Nous pouvons remarquer ici que la valeur des coefficients de corrélation S_x

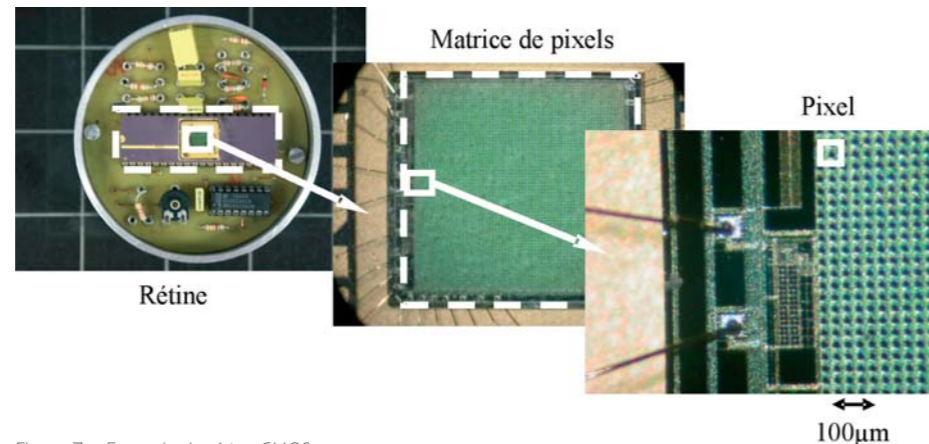
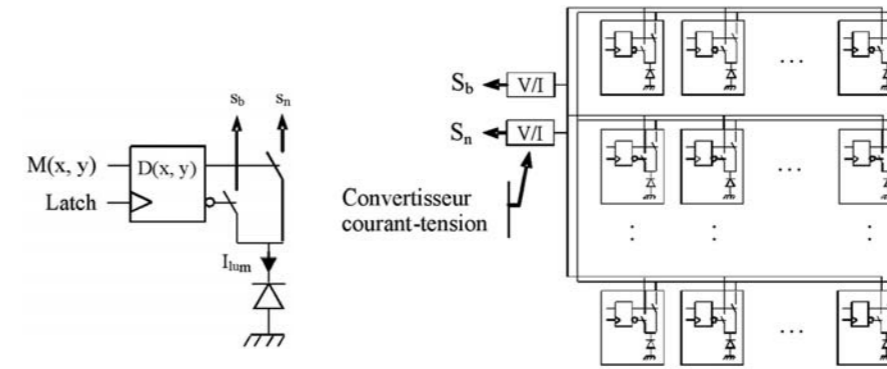


Figure 7 : Exemple de rétine CMOS

Nous avons représenté sur cette figure les masques utilisés ainsi que les valeurs du coefficient de corrélation



a) schéma du pixel

b) répartition et interconnexion des pixels

Figure 8 : Architecture électronique du pixel

Architecture électronique du circuit

Les différents prototypes de rétine que nous avons réalisés dans le cadre de cette thématique de recherche ont été conçus dans la technologie CMOS en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM).

La technologie CMOS est une technologie planaire, destinée au développement de systèmes à très haute échelle d'intégration (VLSI). Elle est aujourd'hui très répandue et trouve des applications dans de nombreux domaines grand public : micro-ordinateurs, téléphonie, audio, vidéo... Elle est particulièrement adaptée aux types de circuits que nous souhaitons réaliser car elle permet d'intégrer des éléments photosensibles et des fonctions logiques sur une même puce. La Figure 7 représente un exemple de rétine réalisée en technologie CMOS.

Le principe de reconnaissance de forme décrit dans les paragraphes précédents a conduit à la réalisation de plusieurs rétines et nous nous proposons de décrire les architectures des deux dernières rétines qui diffèrent principalement dans la façon dont les masques sont programmés. Sur la Figure 8.a) nous avons représenté un schéma très simplifié de l'architecture électronique constituant chaque pixel. Rappelons que le but est de mesurer le coefficient de corrélation entre ce que « voit » la rétine,

c'est-à-dire l'image qui y est projetée, et une famille de masques binaires.

Chaque pixel est constitué d'une photodiode. Son niveau d'éclairement est mesuré sous la forme d'un courant I_{lum} , appelé photocourant. Une bascule interne à chaque pixel permet la mémorisation d'une valeur binaire, notée $M(x, y)$ (0 ou 1), au sein du pixel de coordonnées (x, y) . La mémorisation est réalisée par l'application de la valeur $M(x, y)$ à l'entrée de l'élément mémoire (une bascule D) et par un front montant appliqué sur l'entrée « Latch ». La valeur mémorisée aiguille le photocourant I_{lum} vers une des deux sorties du pixel, ce qui peut s'exprimer par les relations suivantes :

$$S_b(x, y) = M(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

$$S_n(x, y) = \bar{M}(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

Toutes les sorties de la matrice de pixels sont connectées suivant le schéma de la Figure 8.b) de sorte que tous les courants s_b (respectivement s_n) issus de tous les pixels sont sommés.

Les sommes résultantes sont converties en tension. La rétine fournit ainsi deux signaux S_b et S_n définis par :

$$S_b = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M M(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

$$S_n = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \bar{M}(x, y) \times I_{lum}(x, y)$$

S_b (respectivement S_n) correspond donc au produit de corrélation entre le mas-

que M (respectivement \bar{M} , son complémentaire) et l'image projetée sur la rétine.

La Figure 9.a) représente le dessin des masques de fabrication d'un pixel de la première rétine que nous avons conçue. Ce capteur, d'une résolution de 100 par 100 pixels, a été réalisé en technologie CMOS 0,6 μm et occupe une surface totale de 9 mm^2 . La programmation du masque se fait de manière optique. Avant d'entamer le processus de reconnaissance d'un objet, la scène de référence, projetée sur la rétine, est seuillée : chaque pixel compare la quantité de lumière qu'il reçoit par rapport à la luminosité moyenne de l'image et stocke le résultat dans son point mémoire. Le pixel est un carré de 25 μm de côté dont 30% de la surface est consacré à la photodiode, tandis que le reste est occupé par les transistors réalisant la génération et la mémorisation du masque M ainsi que l'aiguillage du courant.

Le temps de réponse dépend de l'intensité de l'éclairage de la scène. Sa valeur est comprise entre 1 ms et quelques ms pour la puissance des éclairages que nous avons choisis. La mise en œuvre nécessite seulement des composants passifs externes, ce qui en fait un système particulièrement compact et autonome.

Un second capteur, de résolution 180 par 180 pixels, a été réalisé en technologie CMOS 0,35 μm . Le passage à une technologie plus fine a permis d'implanter plus de fonctionnalités : la rétine mémorise deux masques, ce qui lui permet de calculer quatre corrélations simultanément, et intègre une fonction d'imageur APS (Active Pixel Sensor) afin de pouvoir transmettre l'image vue par la rétine. L'architecture a été légèrement modifiée afin de permettre la mémorisation des masques via une unité externe telle qu'un FPGA (Field Programmable Gate Array) ou un microcontrôleur plutôt que de manière optique. Chaque pixel dont le dessin des masques de fabrication est représenté sur la Figure 9.b) fait 15,5 μm de côté. La surface photosensible occupe 20 % du pixel.

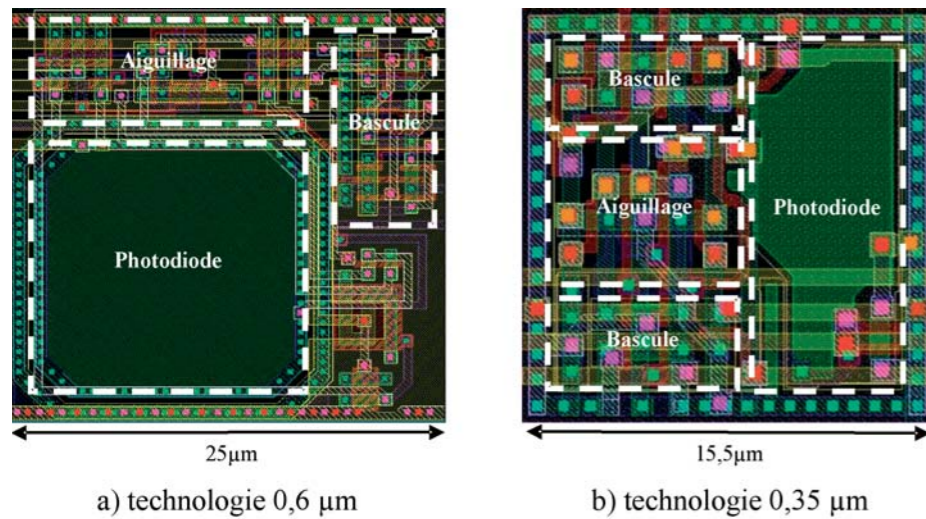


Figure 9 : Dessins des masques de fabrication des pixels des deux dernières rétines

Les Applications de la rétine

La rétine de reconnaissance d'objet que nous avons développée présente les avantages suivants : autonomie de fonctionnement, temps de réponse extrêmement court et faible encombrement. Elle est donc particulièrement adaptée à des applications industrielles et des applications embarquées où la place disponible pour loger la caméra est critique, ainsi que le temps de réponse du système.

L'utilisation de masques binaires particuliers permet de localiser la position et l'orientation d'une forme ou d'un objet. Ainsi une étude menée au cours de ces

dernières années a permis de montrer qu'il est possible de définir des masques binaires permettant de déterminer les valeurs de tangage et de roulis d'un drone à partir de l'analyse d'un horizon contrasté. Le masque M partage verticalement l'image analysée en deux (voir Figure 10.a). A partir des valeurs de S_b et S_n il est possible de déterminer les valeurs de tangage et de roulis de l'appareil avec une erreur faible (expérimentalement inférieure à 5 %). La Figure 10.b est un exemple illustratif de l'erreur de tangage représentée par l'écart entre la courbe de l'angle de tangage mesuré ($\Delta\varphi_m$) en fonction de l'angle théorique ($\Delta\varphi$) et la droite de pente unité.

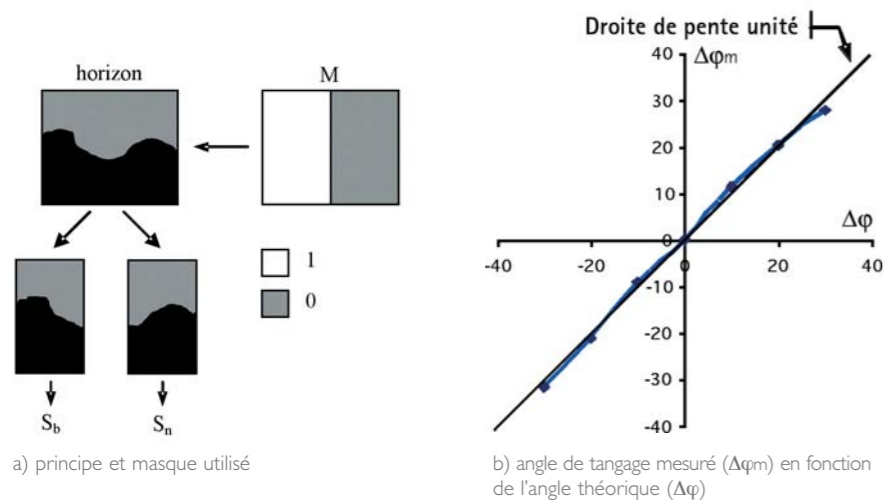
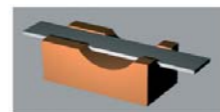
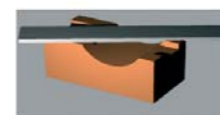


Figure 10 : Détermination des valeurs de tangage d'un drone

Le procédé de masquage est également adaptable à la résolution de contraintes industrielles. Ainsi, nous avons étudié une application de la rétine dans le cas d'un système de production de pièces métalliques par emboutissage. Les contraintes de ce procédé industriel font qu'il nécessite un système de détection de position compact et rapide (quelques millisecondes) qui correspond tout à fait aux avantages de notre rétine. Les scènes à différencier sont représentées sur la Figure 11. Il s'agit en fait de détecter si la pièce qui arrive sur la matrice d'emboutissage est correctement positionnée ou non. Dans le cas où la pièce est incorrectement positionnée, le système de détection doit envoyer immédiatement un ordre d'arrêt à la machine pour éviter une usure prématurée de la matrice d'emboutissage. Pour cette application le temps de réponse du capteur est inférieur à 1 ms avec une précision de détection inférieure au millimètre. Notre étude montre donc que notre rétine est tout à fait adaptée à ce type d'applications industrielles.



pièce correctement positionnée



pièce décalée

Figure 11 : Exemple d'application industrielle de détection de la position d'une pièce

D'autres applications sont actuellement à l'étude. Suivant les masques mémorisés (Legendre, Zernike...) ce capteur est à même de fournir très rapidement des informations vectorielles à un système de classification ou à tout autre automate ou système d'asservissement.

Conclusion

La technique que nous avons développée pour reconnaître un objet est basée sur le calcul du coefficient de corrélation entre l'image de l'objet à reconnaître et une famille de masques binaires. Aussi paradoxal que cela puisse sembler à première vue, un masque ne sert pas forcément à masquer des informations. Nous démontrons dans notre recherche que par un choix judicieux des masques, on peut faire ressortir des informations pertinentes parmi toutes les informations présentes dans une image. En fait notre technique exploite à la fois les informations issues du masquage et les informations contenues dans les masques pour reconnaître l'objet. En conclusion, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, le masquage nous a permis finalement de mieux reconnaître l'objet.

Les travaux décrits dans cet article ont fait l'objet d'un dépôt de brevet, et de plusieurs publications dans des revues et conférences internationales. D'autre part, parmi toutes les rétines que nous avons conçues et fabriquées, celle permettant de déterminer le degré de ressemblance entre l'image observée et une image de référence programmée de manière optique a été récompensée par le prix du meilleur circuit opérationnel universitaire lors de la conférence « Design Automation and Test in Europe - DATE'2002 » à Paris. Le prix été décerné par le Circuit Multi-Projets (CMP), organisation centralisant toutes les demandes de fabrications de circuits en faible nombre. ■

Remerciements

La conception et la fabrication de circuits intégrés demandent des investissements en matériels et en coût de fabrication importants. Nous tenons à remercier le Conseil Régional de Bourgogne et le Fond Européen de Développement Régional (FEDER) pour leurs participations financières qui nous ont permis de mener à bien ces travaux.

Bibliographie

- P. GORRIA, B. LAMALLE et G. CATHEBRAS, « Dispositif d'intercorrélation d'une image », Brevet No. 9900008, 04 Janvier 1999.
- L.F.C. LEW YAN VOON, G. CATHEBRAS, B. LAMALLE, P. GORRIA, B. BELLACH et O. AUBRETON, « 100-x100- Pixel CMOS Retina for Real-Time Binary Pattern Matching », *Optical Engineering Letters, SPIE, Vol. 41, No. 5 (Mai 2002) : 924-925.*
- O. AUBRETON, B. BELLACH, L.F.C. LEW YAN VOON, B. LAMALLE, P. GORRIA et G. CATHEBRAS, « Retina for Pattern Matching in Standard 0.6-µm Complementary Metal Oxide Semiconductor Technology », *SPIE Journal of Electronic Imaging, Vol. 13, No. 3 (juillet 2004) : 559-569.*
- O. AUBRETON, L.F.C. LEW YAN VOON, B. LAMALLE, T. SLIWA, M. ROY et G. CATHEBRAS, « Hardware Implementation of Geometric Moment Functions in a CMOS Retina », *2004 Optics East Conference, Proceedings of SPIE, Vol. 5603 (octobre 2004) : 225-233.*
- J.C. DEVAUX, *Segmentation par approche région des images couleur : application aux images aériennes des milieux naturels*, thèse de doctorat, Le2i, Université de Bourgogne, janvier 2000.
- J.B. VIOIX, *Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'avertices*, thèse de doctorat, Le2i-ENESAD, Université de Bourgogne, juillet 2004.
- O. AUBRETON, L.F.C. LEW YAN VOON, B. LAMALLE, G. CATHEBRAS et F. MONIOT, « A CMOS Retina for Zernike Moments Estimation », *2005 Electronic Imaging conference, Proceedings of SPIE, Vol. 5677 (mars 2005) : 119-128.*

Récompense

- L.F.C. LEW YAN VOON, G. CATHEBRAS, B. LAMALLE, P. GORRIA, B. BELLACH and O. AUBRETON, *CMP Design Contest Award – Operational Design Category, Design Automation and Test in Europe 2002 - DATE02, Paris, 04-08 March 2002.*