La vision comme source d'inspiration

Guillaume DRUART, Florence DE LA BARRIÈRE, Nicolas GUÉRINEAU, Isabelle RIBET
ONERA the French Aerospace Lab.
Guillaume.Druart@onera.fr

« *Le monde est rempli d'yeux* » [1]. La vision, sens complexe, donne à son propriétaire un avantage considérable pour appréhender le monde : connaître la période de la journée, détecter un danger, se déplacer et s'orienter, reconnaître sa nourriture ou ses congénères. La vision est ainsi apparue très tôt sur Terre pour connaître un développement spectaculaire il y a 600 millions d'années. Les scientifiques estiment que l'œil a été créé et recréé au moins une quarantaine de fois au cours de l'évolution et ils ont répertorié des douzaines de types d'yeux aux architectures différentes. Il y en a donc pour tout type d'animaux, du plus simple captant le clair et l'obscur ou le mouvement aux plus élaborés restituant un grand nombre de teintes et de détails dans la scène. Avec l'essor des caméraphones, de la domotique, des objets connectés, des drones ou de la voiture autonome, la vision des animaux devient une source d'inspiration captivante pour trouver de nouvelles approches d'imagerie et pour profiter de plusieurs millions d'années d'optimisations et de compromis.

Depuis l'avènement du numérique et des capteurs digitaux, les caméras ont connu un essor fabuleux. Aujourd'hui, 80 % des lentilles produites sont destinées aux caméraphones [2], ces caméras ultra-compactes intégrées dans les boîtiers des téléphones portables. Un nombre d'individus de plus en plus important a donc dans sa poche un œil technologique permettant de capter le moment présent. L'imagerie médicale avec par exemple ses micro-endoscopes, l'avènement des drones qui rêvent de voler comme des oiseaux, ou bien la domotique dédiée à l'extraction d'informations simples de

leur environnement seront également des domaines riches pour développer de nouvelles modalités d'imagerie.

Devant l'âge d'or de la vision artificielle, le prolongement de cette discipline transversale vers la biologie et plus particulièrement la vision animale permettrait de proposer à la fois des caméras originales, compactes et peu gourmandes en énergie [3]. Coïncidence ou pas, de nombreuses architectures de caméras actuellement à l'étude semblent inspirées de la nature. Nous proposons donc dans cet article de balayer plusieurs architectures du vivant, de la plus simple à la

plus complexe, en mettant en perspective les potentielles caméras qui pourraient en découler.

De l'œil plat à l'œil sténopé

La vision est apparue grâce au développement de pigments organiques sensibles à la lumière chez certains organismes monocellulaires. Ces organismes furent ainsi dotés d'une impression visuelle très simple qui leur permettait de détecter les variations de luminosité et donc de distinguer le clair de l'obscur.

Wikimedia Commons, work of Gagea

Wikimedia Commons

Wikimedia Commons

Figure 1. (a) Principe de l'œil sténopé. (b) Le Nautilus. (c) Principe de la camera obscura.

DÉCOUVREZ
Plus de
700 ouvrages
EN SCIENCES
ET TECHNIQUES

laboutique.edpsciences.org

Puis avec l'apparition d'organismes multicellulaires, il y a environ 600 millions d'années, certaines de ces cellules se spécialisèrent pour détecter la lumière et se regroupèrent pour former un œil plat. Cette structure très simple existe encore chez certains animaux comme les vers, les méduses et les étoiles de mer et elle permet à ces organismes de sentir la lumière, c'est-à-dire d'appréhender, bien que de manière imprécise, l'origine de la source de lumière. Cet œil ne leur permet pas, par contre, d'identifier leur nourriture ou d'éventuelles proies. Au cours de l'évolution de certains animaux, les cellules constituant les yeux plats ont migré vers l'intérieur des tissus. La fragilité de ces cellules et leur besoin de se protéger des agressions extérieures expliquent sûrement cette évolution. Mais la courbure de la zone sensible, créant ainsi un œil puits, a permis d'améliorer considérablement la vision. Par effet d'ombrage, à la manière des stores vénitiens, les cellules reçoivent uniquement la lumière sous une incidence bien précise qui est différente de la cellule voisine. Cette petite dépression permet de savoir d'où vient la lumière et donne ainsi une vision floue de l'environnement. Ces yeux puits ont continué à se développer : à mesure que les cellules sensibles migraient vers l'intérieur sur une surface de plus en plus sphérique, l'ouverture de l'œil diminuait jusqu'à former un minuscule orifice appelé sténopé, limitant alors le nombre de cellules sensibles à une orientation particulière de la lumière. Ces yeux sténopé ont ainsi confiné la rétine dans une véritable chambre obscure et ont permis une vision relativement nette mais encore sombre. Le nautilite utilise toujours ce type de vision.

Intéressons-nous maintenant aux premières architectures de caméras fabriquées par l'homme. Le hasard a peut-être voulu que l'ancêtre des appareils photos soit la camera obscura, chambre obscure ouverte par un petit trou dans sa forme la plus simple et fonctionnant sur le principe de l'œil sténopé ! On attribue son invention à Ibn-Haytham (965-1039), scientifique arabe et père de l'optique moderne, mais elle a été surtout utilisée à partir du XVI^e siècle par les peintres pour pouvoir suivre les contours de l'image projetée sur une feuille de papier. L'ajout d'une lentille à l'arrière du sténopé a permis d'améliorer la radiométrie et la résolution de l'appareil et est à l'origine des premiers objectifs de caméras. La camera obscura améliorée a été utilisée dans certains appareils photos jetables et reste une architecture acceptable pour de petits modules d'imagerie.

L'œil à lentille

La cavité oculaire a poursuivi sa transformation au fur et à mesure de l'évolution des organismes. Pour mieux se protéger, une membrane rigide et translucide s'est formée au niveau de l'orifice, isolant alors l'œil de son environnement extérieur. Une bulle de gélatine transparente a pu remplir la cavité oculaire, donnant alors la naissance à un œil bulle. Cette bulle à gradient d'indice contribue à mieux focaliser la lumière sur la rétine, améliorant considérablement la quantité de lumière arrivant sur les cellules ainsi que la résolution angulaire de l'œil. L'évolution de cet œil en un œil à lentille a abouti à la vision la plus sophistiquée dans le monde animal en termes de qualité d'image et de sensibilité. La bulle en gélatine a évolué vers

le cristallin dont la flexibilité lui permet d'être plus ou moins bombé pour adapter la mise au point de l'œil. Il est doté d'un iris qui joue le rôle de diaphragme pouvant faire varier le niveau de flux arrivant sur la rétine. L'œil est enfin protégé de l'extérieur par la cornée qui possède également une puissance optique. Un changement de forme de cette dernière permet de corriger un œil myope ou hypermétrope. Cet œil est très répandu dans le monde animal : il est privilégié par les poissons, les pieuvres et les mammifères dont fait partie l'Homme. L'analyse anatomique de ces yeux révèle cependant des différences qui suggèrent que cet œil a été inventé à plusieurs reprises. Différentes branches d'yeux ont donc convergé vers des caractéristiques anatomiques proches. Une différence entre l'œil de la pieuvre et celui de l'homme est la position des nerfs optiques par rapport aux cellules visuelles, les nerfs optiques étant placés avant les cellules visuelles dans le cas de l'œil de l'Homme. Il y a donc une différence de connectique !

Cette architecture monovoie, caractérisée par une série d'optiques et un détecteur alignés suivant un même axe optique, est naturellement l'architecture privilégiée de nos caméras. Les images produites par ces dernières correspondent à notre impression visuelle du monde. Notons que certaines technologies tentent d'imiter des particularités de l'œil à lentille : par exemple, les lentilles liquides cherchent à déformer un liquide transparent confiné entre un substrat et une membrane (cette technologie est notamment commercialisée par les sociétés françaises Varioptic et Wavelens). Des industriels et des centres de recherche comme le CEA Leti cherchent à courber les détecteurs planaires pour imiter la rétine [4]. L'étude

Wikimedia Commons

Wikimedia Commons, Latir Keiлов

Wikimedia Commons, André Karwath

Figure 2. (a) Principe de l'œil à lentille. (b) L'œil humain. (c) Photo d'un objectif.

Wikimedia Commons

E. K. Buschbeck, B. Ehmer, R. R. Hoy, J. Comp. Physiol. A, 189, pp. 617-630 (2003).

panono

Figure 3. Les grappes d'yeux : (a) l'araignée sauteuse ; (b) le *Xenos Peckii* ; (c) la caméra boule de Panono.

de la vision animale met en lumière le fait que la résolution varie dans le champ de vue de l'œil. Ce principe de vision fovéale, très étudié, est une piste pour trouver des compromis alliant compacité, simplicité, grand champ de vue et haute performance. Nous finissons par l'œil de l'aigle qui grâce à une fonction optique divergente au niveau de sa rétine lui permet d'augmenter sa résolution tout en maintenant un faible encombrement à la manière des téléobjectifs (objectifs à longue focale).

Les grappes d'yeux

Pour des besoins de vision panoramique ou en raison d'un manque de place, certains animaux ont développé une

multitude d'yeux à lentille miniaturisés formant des « grappes d'yeux ». Ces yeux sont répartis sur une surface courbée qui leur permet d'observer la scène sous des points de vue différents. Par exemple, les araignées ont développé des yeux à lentille différents de ceux des poissons et des mammifères : leur lentille est rigide et ne peut servir à faire la mise au point. En général, elles disposent de deux yeux centraux de champ de vue réduit mais de plus haute résolution que les yeux en périphérie qui ont un champ de vue plus grand mais avec une plus faible résolution. Les yeux centraux servent à voir les détails et les yeux périphériques servent à détecter des dangers. Un œil unique qui réaliserait ces deux tâches aurait un volume au moins dix fois plus grand. L'araignée sauteuse (*jumping spider*) a ainsi pour ses yeux centraux

une résolution seulement 5 fois inférieure à celle de la vision humaine. Cette forte résolution s'obtient en contrepartie d'un faible champ de vue qui est compensé par une rétine complexe pouvant se déplacer verticalement, horizontalement et en rotation pour réaliser un balayage de la scène. De plus, la rétine est disposée en quatre couches empilées de sensibilité spectrale différente qui permettent de compenser le chromatisme de la lentille fixe et l'absence de mise au point : il y aura toujours une des couches qui verra nette une partie de la scène ! De son côté, la coquille Saint Jacques a développé une multitude d'yeux catadioptriques répartis le long de sa coquille, qui lui donnent une fonction visuelle panoramique simple spécialisée dans la détection de dangers par variation de luminosité. Dans le monde

Sous la lumière, les hommes

Par Riad Haidar et préfacé par Pierre Chavel

edp sciences

On imagine mal aujourd'hui le parcours de ces savants, grands esprits audacieux, caractères courageux et trempés, fins politologues, qui ont construit la science que nous pratiquons et imaginé le monde tel que nous le connaissons aujourd'hui. Ce livre reprend, à travers une sélection de biographies, comme autant de trajectoires symboliques, les grandes lignes de cette aventure millénaire.

laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-1082-6
19 € TTC

Festival mondial sous-marin / Houswirth Robert Performance

Wikimedia Commons

F. Expert et F. Ruffier

Figure 4. Les yeux à facettes : (a) la mante des mers ; (b) la mouche ; (c) l'œil artificiel CurvACE (diamètre 12,8 mm et poids 1,75 g malgré une importante électronique embarquée).

de l'étrangeté, nous pouvons également citer la vision du mâle de l'espèce *Xenos Peckii*, un parasite de la guêpe. Son œil est véritablement constitué d'une multitude d'yeux identiques miniaturisés regardant dans des directions différentes. Cette vision très coûteuse en énergie doit lui permettre de maintenir une bonne résolution angulaire malgré sa très faible taille. Bien que cette architecture ait été cataloguée dans la catégorie anormale et soit considérée comme étant une impasse évolutive par les biologistes, elle reste très intéressante pour le concepteur en optique.

La fabrication de masse des caméraphones a permis de réduire considérablement leur coût. Il est donc tentant de s'inspirer du concept de grappe d'yeux pour proposer des architectures panoramiques composées d'une multitude de ces caméras. Ce créneau est actuellement exploré par de jeunes sociétés (Scallop Imaging, Panono, Giroptic ou Pelican Imaging). L'aspect tout intégré sans fonction d'autofocalisation des yeux de l'araignée sauteuse, du *Xenos Peckii* et de la coquille Saint Jacques permettent d'envisager des caméras sur puce (Omnivision). Enfin, l'utilisation du chromatisme pour augmenter la profondeur de champ d'un système de vision, comme la rétine de l'araignée sauteuse, a été reprise, par exemple, par la société DXO qui met alors à profit le résiduel de chromatisme des caméraphones pour s'affranchir de systèmes d'autofocus encombrants [5].

Les yeux à facettes

L'étude de la vision des invertébrés montre que ces derniers se sont détachés

d'une vision monovoie pour développer une vision multivoies, soit en se dotant d'une grappe d'yeux comme nous l'avons vu précédemment, soit en développant une architecture plus complexe à base d'yeux à facettes. Ces yeux ont suivi une évolution proche de ceux des yeux à lentille mais, au lieu de se regrouper dans une même cavité, les cellules visuelles se sont confinées dans des cavités distinctes et ont fini par former une multitude de petits récepteurs sensibles à la lumière appelés ommatidies. C'est le mode de vision privilégié des insectes et des crustacés. Les ommatidies, dans le cas des yeux à facettes apposées, sont constituées d'une lentille fixe suivie d'un guide d'onde puis de quelques cellules visuelles. Cette architecture permet à l'insecte d'avoir une grande profondeur de champ. Chaque voie permet d'imager un point de la scène et l'apposition de tous ces points rend possible la reconstitution de la scène en entier. La libellule possède plus de 10 000 ommatidies et fait ainsi partie des insectes ayant la meilleure résolution angulaire. Pour un même volume, cette architecture a cependant une moins bonne résolution que les yeux à lentille. Néanmoins, les yeux à facettes peuvent couvrir une surface convexe jusqu'à 90 %, donnant à son hôte une capacité de vision panoramique indispensable pour les manœuvres aériennes. La variation locale de la densité des ommatidies obtenue en changeant leur diamètre et la courbure de la surface convexe, permet aux insectes d'adapter la résolution angulaire en fonction du champ de vue. Comme les yeux à lentille, les yeux à facettes ont alors une capacité de vision fovéale.

Conclusion

L'étude de l'évolution de la vision dans le monde animal nous donne l'occasion de revisiter l'histoire de l'imagerie et d'anticiper ses évolutions futures et les prochains défis technologiques. L'imagerie digitale est une révolution majeure, apparue avec le remplacement des pellicules argentiques par les détecteurs, qui transforment un flux lumineux en un flux électrique. Par ailleurs, grâce aux progrès fulgurants de l'informatique, les yeux technologiques disposent de la puissance de calcul nécessaire pour préparer, assimiler, et analyser les informations visuelles à la manière du cerveau humain. Bien plus que de restituer exactement le monde qui nous entoure, ces yeux numériques devront combiner astucieusement l'optique et le traitement d'image pour donner, le plus vite et le plus efficacement possible, une impression visuelle de l'environnement et en extraire les informations les plus pertinentes. Nous aurons alors réussi à rivaliser avec la vision animale.

Références

- [1] C. Schwägerl, R. Harf et H. Engeln, *Geo savoir Hors-série* n°7 (2014).
- [2] J.-P. Lusinchi, présentation à SEMICON Europa 2014.
- [3] M.F. Land et D-E Nilsson, *Animal Eyes*, Oxford Animal Biology Series.
- [4] D. Dumas, *Rétines courbes : une approche bio-inspirée de simplification et miniaturisation des systèmes infrarouge*, thèse soutenue en 2011.
- [5] F. Guichard *et al.*, *Extended depth-of-field using sharpness transport across color channel*, SPIE 2009.