

Mesurer l'invisible dans le ciel pour naviguer

Une approche inspirée du vivant

Nous sommes souvent fascinés par la couleur bleue du ciel sans savoir que cette couleur résulte d'un phénomène de diffusion décrit par Lord Rayleigh en 1871, phénomène s'accompagnant d'une polarisation linéaire de la lumière à laquelle l'œil de l'homme est très peu sensible, mais fournissant des informations essentielles de navigation à certains animaux (abeilles, fourmis, papillons monarques, oiseaux...) et pourquoi pas aussi aux futurs robots autonomes.

Stéphane Viollet

Directeur de Recherche, CNRS

Julien Serres

Professeur, Aix-Marseille Université

Introduction

La navigation dans des environnements dépourvus de systèmes de navigation par satellites est en train de devenir, au cours de la prochaine décennie, l'un des dix plus grands défis de la robotique [1].

Actuellement, les robots autonomes s'appuient sur de nombreux systèmes de localisation :

- Le système mondial de navigation par satellites (GNSS pour « *Global Navigation Satellite System* ») ;
- Les systèmes de navigation inertielle (INS pour « *Inertial Navigation System* ») ;
- Les antennes terrestres pour trianguler ou corriger les positions et obtenir une précision centimétrique (réseaux 5G ou réseaux cinématiques en temps réel (RTK pour « *Real Time Kinematic* ») ;
- La navigation astronomique, la navigation à l'aide de gyrocompas ;

• La localisation et cartographie simultanées (SLAM pour « *Simultaneous Localization And Mapping* »).

En revanche, les animaux sont capables de naviguer ou de migrer sur des distances extrêmement longues sans utiliser les techniques de localisation développées par les humains [2]. Chez les invertébrés, la manière dont les insectes utilisent la polarisation du ciel pour s'orienter est mieux comprise que chez les vertébrés (oiseaux). Par exemple, les fourmis du désert utilisent un puissant outil de navigation appelé intégration du chemin optique pour localiser leur nid. Lorsqu'elles reviennent, les fourmis du désert suivent le chemin le plus court possible, une ligne droite, même sur des terrains monotones ou inconnus. En intégrant une boussole directionnelle et des informations sur la distance provenant de leur vision, les fourmis du désert calculent un vecteur pointant en permanence en direction du nid, ce qui les ramène chez elles [3].

Depuis les expériences comportementales pionnières sur les fourmis du désert menées par Piéron (1904) [4], qui a manipulé la position des fourmis afin d'observer leur comportement, et Santschi (1911) [5], qui a manipulé la lumière perçue par les fourmis à l'aide d'un miroir, il a fallu environ un demi-siècle pour comprendre comment les fourmis du désert exploitent la lumière du soleil

à des fins de navigation. L'intégrateur de trajectoire inspiré des fourmis a récemment été mis en œuvre à bord de robots entièrement autonomes : tout d'abord, un robot à roues appelé Sahabot en 2000 [6], puis un robot à pattes appelé AntBot en 2019 [7].

La manière dont les roboticiens peuvent exploiter la lumière polarisée du ciel en est encore à ses débuts, mais elle est extrêmement pertinente car elle pourrait ouvrir la voie vers le développement d'un système optique de géolocalisation sans GNSS, pour la navigation autonome en extérieur.

Cet article de synthèse a été rédigé afin de décrire comment s'inspirer du vivant pour s'attaquer à un problème largement résolu dans le règne animal à savoir la navigation sans GNSS de jour en présence ou non du soleil dans le champ visuel.

La polarisation du ciel : un phénomène de diffusion

La lumière du soleil lorsqu'elle pénètre dans l'atmosphère terrestre va interagir avec les particules plus ou moins grosses de l'atmosphère : c'est le phénomène de diffusion de la lumière. Lorsque la lumière interagit avec des molécules (oxygène, azote) de tailles très inférieures à 420nm, la lumière du soleil sortant de l'atmosphère est polarisée linéairement : c'est la diffusion de Rayleigh [8].

- le repère $(O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$, lui-même résultant du passage du vecteur $\vec{E}$ défini dans le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ par la matrice de rotation $R_{O_i}(\psi, \theta)$, avec les angles d'azimut et d'élévation du vecteur $\vec{OM}$, respectivement (voir figure 2). On peut donc noter les équations suivantes selon le modèle de la diffusion de Rayleigh :

$$\vec{E} = \vec{OM} \times \vec{OS} \quad (1)$$

Et on a aussi :

$$\vec{E}_i = R_{O_i}(\psi, \theta) \vec{E} \quad (2)$$

Il est important de noter que le vecteur $\vec{E}_i$ est tangent à la sphère céleste et n'a donc pas de composante selon $\vec{O}_i \vec{z}_i$. Les points O_i et M sont ici confondus.

D'après les équations (1) et (2), on peut montrer que :

$$\vec{E}_i = \begin{pmatrix} -\sin(\psi - \psi_s) \cdot \sin(\theta_s) \\ \cos(\theta_s) \cdot \sin(\theta) - \sin(\theta_s) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\psi - \psi_s) \\ 0 \end{pmatrix}$$

L'angle de polarisation AoP locale (AoP_i) dans le repère $(O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$ est donc défini par l'équation suivante :

$$\tan(AoP_i) = \frac{E_{iy}}{E_{ix}} = \frac{\sin(\theta_s) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\psi - \psi_s) - \cos(\theta_s) \cdot \sin(\theta)}{\sin(\psi - \psi_s) \cdot \sin(\theta_s)}$$

Il est donc possible de caractériser l'état de la lumière polarisée linéairement en analysant la distribution du degré de polarisation et l'angle de polarisation dans le ciel. Faudrait-il encore avoir à disposition des capteurs sensibles à la lumière polarisée.

Pour cela, il faut d'abord s'intéresser aux filtres polarisants largement utilisés dans notre quotidien en photographie pour supprimer des reflets de surface ou encore au cinéma avec la venue de la projection 3D basée sur la polarisation circulaire [10].

Comment mesurer la polarisation ?

La loi de Malus [11], qui tire son nom d'Étienne-Louis Malus, stipule que lorsqu'un polariseur parfait est placé dans un faisceau lumineux polarisé, l'irradiance, I ,

de la lumière qui le traverse est donnée par l'équation suivante :

$$I(\theta_i) = I_{\max} \cdot \cos^2(\theta_i) \quad (3)$$

où $I_{\max}$ est l'intensité maximale et θ_i est l'angle entre la direction de polarisation initiale de la lumière et l'axe du polariseur.

Si deux polariseurs sont placés l'un après l'autre (le deuxième polariseur est généralement appelé analyseur), l'angle mutuel entre leurs axes de polarisation donne la valeur de θ_i dans l'équation (3). Si les deux axes sont orthogonaux, les polariseurs sont croisés et, en théorie, aucune lumière n'est transmise, bien que, dans la pratique, aucun polariseur ne soit parfait et que, de ce fait, la transmission ne soit pas exactement nulle.

Comme les polariseurs réels ne bloquent pas parfaitement la polarisation orthogonale à leur axe de polarisation, le rapport entre la transmission de la composante indésirable et celle de la composante souhaitée est appelé rapport d'extinction.

L'un des polariseurs linéaires les plus simples est le polariseur à grille métallique (WGP pour « Wire Grid Polarizer »), qui se compose de nombreux fils métalliques fins parallèles placés dans un plan (voir figure 6).

Les WGP réfléchissent principalement la polarisation non transmise et peuvent donc être utilisés comme séparateurs de faisceaux polarisants. L'absorption parasite est relativement élevée par rapport à la plupart des polariseurs diélectriques, mais beaucoup plus faible que dans les polariseurs absorbants.

Dans notre quotidien, les filtres polarisants les plus utilisés sont ceux provenant du film plastique de type polaroid [12] développé par la firme du même nom. Cette invention a révolutionné l'imagerie polarisante car il devenait possible de fabriquer à grande échelle un film plastique souple aux propriétés dichroïques : le film plastique tend à absorber la lu-

mière qui est parallèle à la direction d'alignement des cristaux filiformes constituant le plastique.

En résumé, pour mesurer l'état de polarisation de la lumière, il faut un filtre polarisant servant d'analyseur et des photorécepteurs distribués, on parlera de pixels ou de photo-capteurs pour un capteur artificiel, permettant de mesurer l'intensité de la lumière en sortie du filtre polarisant. De la même manière, on retrouve ce couple photorécepteur-filtre polarisant chez certains animaux (insectes, stomatopodes¹...) dont l'œil est sensible à la lumière polarisée.

Une nature opportuniste

Vision polarisée chez l'insecte

Comme illustré dans la figure 3a, le motif de polarisation de la lumière du ciel est constitué de E-vecteurs (cf. vecteur noté $\vec{E}_i$ dans la figure 2) qui sont distribués selon des cercles concentriques autour du soleil. Le degré de polarisation dans le ciel augmente progressivement jusqu'à un maximum d'environ 0,75 le long d'un cercle à 90° du Soleil.

Quand ce dernier n'est pas directement visible pour diverses raisons (obstruction, champ visuel réduit, nuages...), il a été clairement montré [13] qu'une abeille ou une fourmi sensible à la lumière polarisée du ciel peut estimer la position du soleil (azimut et élévation) en traitant le motif de polarisation grâce à ses photorécepteurs dotés de filtres polarisants (microvillosités) présents dans la zone dorsale marginale de son œil composé (voir figure 3).

Dans chaque ommatidie de la zone dorsale marginale (DRA pour « Dorsal Rim Area »), les microvillosités de la cellule photoréceptrice 7 sont orientées perpendiculairement aux microvillosités

¹ Stomatopoda (les crevettes-mantes, mantes de mer ou squilles[a]) sont des prédateurs caractérisés par des pattes ravisseuses très perfectionnées et dotés d'une vision exceptionnellement élaborée.

des photorécepteurs 1, 2, 5, 6 et 8. Les microvillosités des photorécepteurs des photorécepteurs 3 et 4 sont irrégulières.

L'examen optique des membranes discalées des photorécepteurs vertébrés peut montrer que les molécules de pigment visuel (chromophores) maintiennent un angle fixe par rapport à la surface membranaire, mais sont libres de tourner dans le plan tangent à la membrane (figure 3c). L'orientation aléatoire qui en résulte dans ce plan explique pourquoi les photorécepteurs des vertébrés ne présentent aucune absorption dichroïque dans des conditions normales d'éclairage et par conséquent aucune sensibilité à la lumière polarisée. Cependant, avec la structure tubulaire des microvillosités des photorécepteurs des invertébrés (figure 3d), l'absorption dichroïque se produit automatiquement, même lorsque les pigments visuels tournent librement dans le plan membranaire. En effet, les pigments localisés dans les parties latérales des microvillosités ne peuvent être activés que lorsque la lumière polarisée plane est parallèle à l'axe des microvillosités.

L'agencement orthogonal des filtres polarisés de chaque ommatidie de l'œil du cricquet (figure 3b) peut présenter de nombreux avantages si l'on considère le modèle de traitement des signaux proposé par T. Labhart en 2016 [15] décrit dans la figure 4.

D'un point de vue modélisation, on peut écrire d'après la loi de Malus (voir Eq. (3)) que la sortie d'un photorécepteur peut s'écrire :

$$S_i = K \cdot I \cdot [1 + d \cdot \cos(2\text{AoP}_i - 2\varphi_i)] \quad (4)$$

où K est le gain de pixel, I est l'intensité de la lumière incidente, AoP_i est l'angle de polarisation du vecteur polarisation incident, φ_i est l'orientation théorique du filtre polarisé du $i^{\text{ème}}$ canal et d est le rapport entre l'intensité de la lumière entièrement polarisée et l'intensité totale de la lumière.

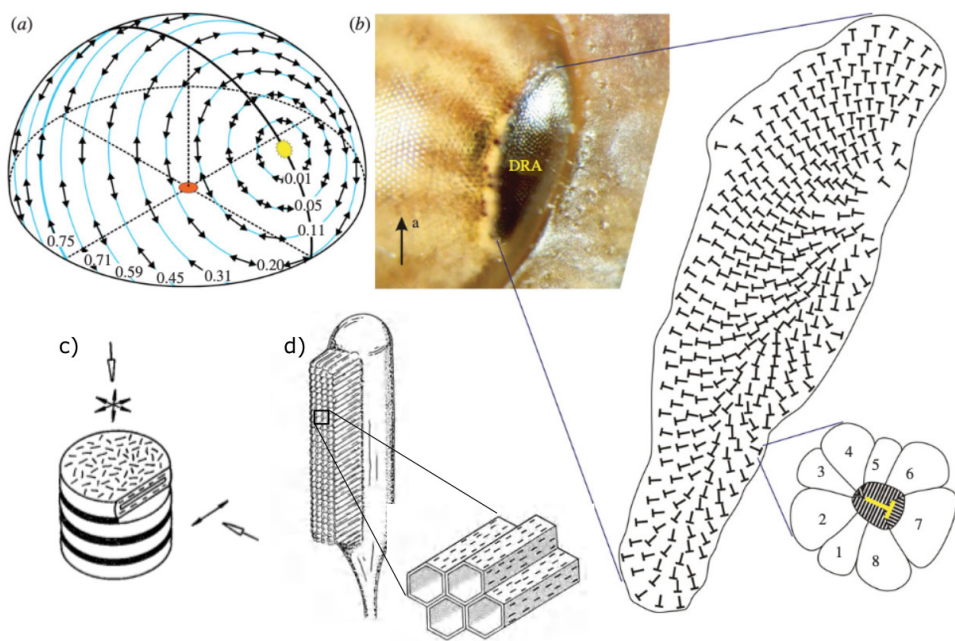


Figure 3 : Vision polarisée chez le cricquet pèlerin *Schistocerca gregaria*. (a) Motif de lumière polarisée du ciel. Les vecteurs de champ électrique (e-vecteurs, flèches doubles) sont disposés le long de cercles concentriques autour du Soleil (jaune). La lumière solaire directe n'est pas polarisée. (b) Zone dorsale marginale (DRA pour « Dorsal Rim Area ») sensible à la polarisation dans l'œil composé gauche d'un cricquet illustrant la disposition des ommatidies et la structure d'une ommatidie de la DRA. (c) Les chromophores sont distribués de manière aléatoire dans un photorécepteur tandis qu'ils sont alignés dans la partie latérale du tube d). Adapté de [14].

Comme suggéré par T. Labhart dans son modèle inspiré des unités de traitement polarimétrique (neurone POL) chez le cricquet [15], un neurone POL met en œuvre de manière avantageuse le log-ratio de deux signaux de sortie de deux photorécepteurs ayant des filtres polarisés orthogonaux (ici $\varphi_1=0^\circ$ et $\varphi_2=90^\circ$) :

$$p_1(\text{AoP}_i) = \log\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = \log\left(\frac{1+d \cdot \cos(2\text{AoP}_i)}{1-d \cdot \cos(2\text{AoP}_i)}\right) \quad (5)$$

Les caractéristiques de polarisation AoP_i et d peuvent être calculés à partir de l'équation (5) à l'aide d'un amplificateur logarithmique analogique et en orientant plusieurs neurones POL selon différentes orientations. L'amplification logarithmique

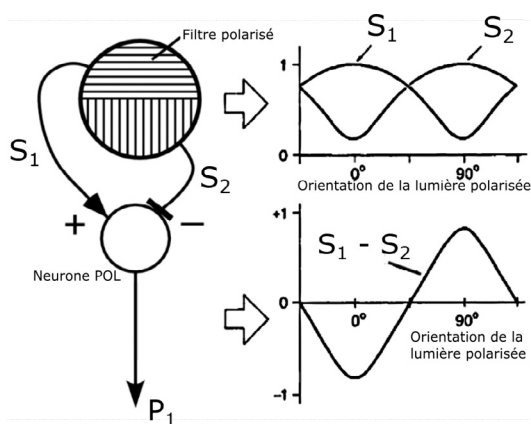


Figure 4 : Modèle d'un neurone POL qui tient compte de la réponse du vecteur de polarisation des photorécepteurs dotés de leur filtre polarisé orthogonal (notés ici 1 et 2). Le neurone POL calcule le rapport logarithmique des signaux de sortie des deux photorécepteurs (S_1 et S_2). Le logarithme permet ici de couvrir une grande gamme de luminance tout en conservant un très bon rapport signal sur bruit résultant de la mesure différentielle entre S_1 et S_2 . Adapté de [15].

- permet d'améliorer le rapport signal sur bruit par la différence des signaux (log-ratio) et de traiter une large gamme de conditions d'éclairage s'étendant sur plusieurs décades.

A noter qu'il est possible d'aborder à faible coût la loi de Malus pour la mesure de cap optique grâce à une maquette décrite dans [17] dédiée à l'enseignement supérieur. Il s'agit ici d'estimer l'orientation d'une boussole optique constituée de 4 photo-capteurs polarisés disposés selon 4 orientations différentes par rapport à une LED bleue dotée d'un filtre polarisant représentant le « ciel » polarisé.

Le robot AntBot [7] est un autre exemple d'utilisation directe de la loi de Malus en faisant tourner activement un filtre polarisant placé au-dessus d'un photo-capteur de manière à estimer le cap du robot à pattes.

Navigation fourmi-inspirée pour la robotique

Dans un environnement dépourvu de repères visuels, tel que le désert au Sahara, nous savons que la fourmi *Cataglyphis* n'a pas d'autre choix que d'utiliser la distance parcourue et son cap pour rentrer au nid en ligne droite. À partir de ces deux informations, elle peut mettre en œuvre une stratégie dite d'« intégration de chemin ».

L'intégration de parcours est une méthode utilisée par les animaux qui se rapprochent de la stratégie dite de navigation à l'estime, bien connue des pilotes et des marins capables de naviguer en utilisant uniquement le cap et la vitesse entre une position courante et une position précédente.

Depuis les premières études menées sur cette fourmi par Rüdiger Wehner et ses collègues dans les années 1960, une littérature très riche, incluant de nombreuses études expérimentales, a été produite [3]. Il est maintenant clairement établi que cet animal utilise une boussole céleste pour estimer son cap par

Les auteurs



Julien R. Serres, agrégé de physique appliquée à l'École normale supérieure de Cachan depuis 2002, il est titulaire d'un master en imagerie médicale à l'université Paris-Sud (aujourd'hui université Paris-Saclay) ainsi que d'un master en électronique, électrotechnique et ingénierie du contrôle automatique dans le cadre d'un double diplôme entre l'université Paris-Sud et l'université Paris-Saclay. Il est titulaire d'un doctorat de l'université de Montpellier II, qu'il a réalisé en 2008 au sein du laboratoire de biorobotique de l'Institut du mouvement et de la perception du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille. Ses recherches portent notamment sur la robotique bio-inspirée et les techniques de localisation visuelle bio-inspirées. Il est maître de conférences à l'université d'Aix-Marseille, membre de l'équipe des systèmes bio-inspirés de l'ISM depuis 2014 et professeur depuis 2024. Il est l'auteur de plus de 100 publications. Il a également reçu plusieurs prix et distinctions pour ses meilleurs articles (conférence IEEE, EECR en 2017, conférence Living Machines en 2018, etc.), trophée national de l'industrie et des services IoT en 2019, 7^{ème} prix international de la bionique en 2020, 5^{ème} prix départemental de la recherche en Provence en 2021. Il est membre senior de l'Institut universitaire de France (IUF).



Stéphane Viollet, Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), il co-dirige actuellement l'équipe Systèmes bio-inspirés à l'Institut des sciences du mouvement (ISM) de l'université d'Aix-Marseille/CNRS, en France. Ses recherches portent notamment sur la biorobotique, la robotique basée sur l'origami, le contrôle sensorimoteur, ainsi que le développement de capteurs visuels innovants inspirés de la biologie et de lois de contrôle pour la mise en œuvre de robots autonomes. Il est à la tête du développement de robots autonomes et de capteurs visuels innovants pour la robotique (œil artificiel composé, rétines artificielles et boussole optique) et participe à plusieurs projets nationaux et européens sur ces thèmes. Diplômé d'un master en automatique de l'université de Bordeaux 1, il est titulaire d'un doctorat de l'Institut national polytechnique de Grenoble. Il est l'auteur de plus de 100 publications, détient 10 brevets et a reçu plusieurs prix et nominations pour ses meilleurs articles (Journal La Recherche en 2005, IEEE ICAR 2003, IEEE Sensors 2011 et Living Machines conf. 2015 et 2018).

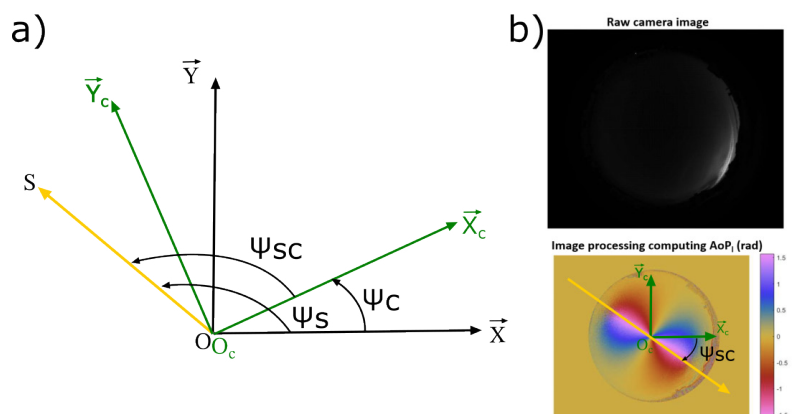
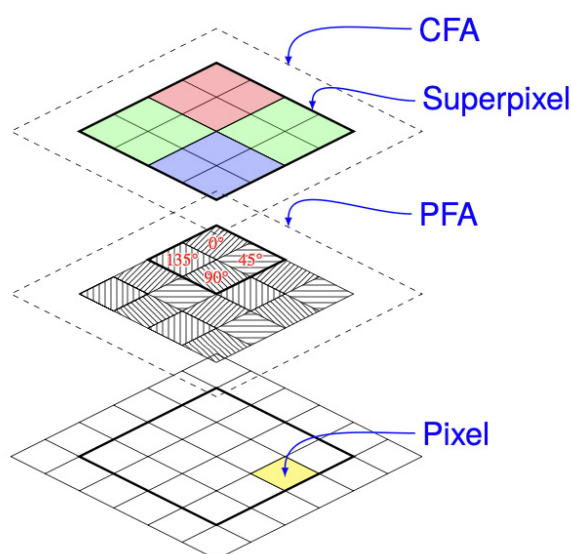


Figure 5 : Estimation de l'azimut solaire. a) Définition des angles et des repères pour passer de l'estimation de l'azimut solaire dans le repère caméra à l'orientation de la caméra ψ_c dans le repère terrestre. b) Exemple d'image polarimétrique mesurée par une caméra en condition réelle et angle de polarisation local dont l'axe de symétrie permet d'estimer directement l'azimut solaire. L'échelle de couleur correspond à des variations de l'AoP_i sur l'intervalle $\pi/2$ et $\pi/2$. Adapté de [21].



■ **Figure 6 :** Matrices de filtres de polarisation (PFA pour « Polarizer Filter Array ») et de couleur (CFA pour pour « Color Filter Array »), telle que celles mises en œuvre dans les capteurs commerciaux Sony IMX250MYR et IMX253MYR. Une procédure de démosaïquage efficace est nécessaire. D'après [19].

rapport au ciel, ce qui lui permet de pouvoir rentrer en ligne droite sur le principe de la navigation à l'estime [18].

Navigation et polarisation

Quelques robots dotés de compas célestes

Plusieurs robots ont été équipés d'un compas céleste afin de les doter d'une intégration de chemin inspirée des fourmis [19] :

- Le robot mobile Sahabot 2 avait une erreur de retour à la base de seulement 0,2 % (rapport erreur de retour à la base/distance parcourue) sur une distance parcourue de 70 m dans le désert [6] ;
- Le robot hexapode AntBot présentait une erreur de seulement 0,7 % pour une distance parcourue de 7 m sur un terrain plat [7] ;
- Le robot mobile Turtlebot2 présentait une erreur d'environ 1,1 % sur une route de 45 m [20] ;
- Zhou et al. [20] ont également testé leur compas céleste combiné à une centrale inertielle sur une distance par-

courue de 125 m comprenant 14 points de contrôle et ont atteint une erreur de positionnement le long de la trajectoire d'environ 0,5 %, ce qui représente la plus longue distance parcourue par tous les robots inspirés des fourmis, à notre connaissance.

Mesure de cap par caméras polarimétriques

Lorsqu'il s'agit de mesurer son cap en utilisant une caméra polarimétrique, une stratégie consiste à estimer l'azimut du soleil dans le repère de la caméra (ψ_{sc}) et de le soustraire à l'azimut solaire (ψ_s) dans le repère terrestre (cf. figure 5a), ce dernier étant donné par les éphémérides.

De cette manière, l'azimut de la caméra (ψ_c) dans le repère terrestre peut être déduit en faisant l'hypothèse ici que la caméra est orientée en direction du zénith (i.e., alignée avec le vecteur gravité).

Il existe de nombreuses solutions technologiques permettant d'analyser l'état de la lumière polarisée. Cependant, la technologie la plus utilisée actuellement repose sur des imageurs SONY dont la technologie est à division de plan focal.

L'idée présentée dans la figure 6 reprend celle déjà proposée par Bayer pour les caméras RVVB : les pixels ne capturent pas tous le même état de polarisation. Un réseau de micro-filtres (nanofils d'aluminium), souvent appelé réseau de filtres polarisants (PFA pour « Polarizer Filter Array »), composé d'un motif de quatre polariseurs pixellisés qui se répètent plusieurs fois sur la grille, est placé devant le capteur. Ces quatre polariseurs permettent de capturer les polarisations linéaires verticale, horizontale, à 45° et à - 45°.

Conclusion

La vision polarimétrique va à l'encontre des technologies dites classiques de navigation telles que le compas magnétique et la géolocalisation par satellites [19]. Elle offre néanmoins des possibilités très complémentaires :

- Une mesure de cap par boussole céleste ;
- Une estimation du vecteur soleil ;
- Une estimation du pôle céleste ;
- Une géolocalisation, améliorant ainsi le suivi de trajectoires des robots mobiles d'au moins 40 % tout en étant équipé d'un récepteur GNSS. ([20], [22]).

De plus, elle est insensible au brouillage électromagnétique et ne requiert aucune émission de rayonnement (technologie dite passive), ce qui la rend particulièrement attractive pour des applications furtives.

Quelques produits commerciaux proposés par des compagnies, toutes hors Europe, telles que Sony (Japon), Polaris Sensor Technologies (États-Unis) et Frenel Imaging (Israël) montrent qu'il existe un marché à fort potentiel pour la vision polarimétrique, en espérant que la France et l'Europe se positionneront prochainement en faveur de développements de technologies souveraines dans le domaine de l'imagerie polarimétrique. ■ ●●●

... Références

- [1] G.-Z. Yang et al., « The grand challenges of science robotics », *Sci. Robot.*, vol. 3, no 14, p. eaar7650, 2018.
- [2] G. Horváth, A. Lerner, et N. Shashar, *Polarized light and polarization vision in animal sciences*, vol. 2. Springer, 2014.
- [3] R. Wehner, *Desert navigator: the journey of an ant*. Harvard University Press, 2020.
- [4] H. Pieron, « Du rôle du sens musculaire dans l'orientation de quelques espèces de fourmis », *Bull Inst Gén Psychol*, vol. 4, p. 168-186, 1904.
- [5] F. Santschi, « Observations et remarques critiques sur le mécanisme de l'orientation chez les fourmis », *Rev Suisse Zool*, vol. 19, p. 303-338, 1911.
- [6] D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart, R. Pfeifer, et R. Wehner, « A mobile robot employing insect strategies for navigation », vol. 30, p. 39-64, 2000, doi: 10.1016/s0921-8890(99)00064-0.
- [7] J. Dupeyroux, J. R. Serres, et S. Viollet, « AntBot: A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments », *Sci. Robot.*, vol. 4, no 27, p. eaau0307, 2019.
- [8] A. T. Young, « Rayleigh scattering », *Phys Today*, vol. 35, no 1, p. 42-48, 1982.
- [9] T. H. Waterman, « Polarization sensitivity », *Comp. Physiol. Evol. Vis. Invertebr.*, p. 281-469, 1981.
- [10] Wikipedia contributors, « Polarized 3D system — Wikipedia, The Free Encyclopedia ». 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polarized_3D_system&oldid=1283314009
- [11] É.-L. Malus, « Sur une propriété des forces répulsives qui agissent sur la lumière », *Mém. D'Arcueil*, vol. 257, p. 413-415, 1809.
- [12] Wikipedia contributors, « Polaroid (polarizer) — Wikipedia, The Free Encyclopedia ». 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polaroid_\(polarizer\)&oldid=1248924596](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polaroid_(polarizer)&oldid=1248924596)
- [13] S. Rossel, « Polarization Sensitivity in Compound Eyes », in *Facets of Vision*, D. G. Stavenga et R. C. Hardie, Éd., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989, p. 298-316.
- [14] U. Homberg, S. Heinze, K. Pfeiffer, M. Kinoshita, et B. El Jundi, « Central neural coding of sky polarization in insects », *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 366, no 1565, p. 680-687, 2011.
- [15] T. Labhart, « Can invertebrates see the e-vector of polarization as a separate modality of light? », *J. Exp. Biol.*, vol. 219, no 24, p. 3844-3856, déc. 2016, doi: 10.1242/jeb.139899.
- [16] H. Zhao et W. Xu, « A bionic polarization navigation sensor and its calibration method », *Sensors*, vol. 16, no 8, p. 1223, 2016.
- [17] J. Serres, N. Thellier, N. Thouvenel, J. Dipéri, et S. Viollet, « Conception et étude d'une boussole céleste bio-inspirée pour la robotique », présenté à 3ème édition des Journées Nationales de l'Enseignement en Robotique (JNER), 2021.
- [18] S. Viollet, J. Dupeyroux, et J. Serres, « Le robot fourmi AntBot. Conception et réalisation d'un robot bio-inspiré », *Tech. Cult. Rev. Semest. D'anthropologie Tech.*, no 73, p. 128-141, 2020.
- [19] J. R. Serres et al., « Passive Polarized Vision for Autonomous Vehicles: A Review », *Sensors*, vol. 24, no 11, 2024, doi: 10.3390/s24113312.
- [20] W. Zhou et al., « Integrated Bionic Polarized Vision/VINS for Goal-Directed Navigation and Homing in Unmanned Ground Vehicle », *IEEE Sens.*, vol. 21, p. 11232-11241, 2021, doi: 10.1109/jsen.2021.3066844.
- [21] A. Moutenet, L. Poughon, B. Toulon, J. R. Serres, et S. Viollet, « OpenSky: a modular and open-source simulator of sky polarization measurements », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, p. 1-16, 2024.
- [22] F. Kong, Y. Guo, J. Zhang, X. Fan, et X. Guo, « Review on bio-inspired polarized skylight navigation », *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 36, no 9, p. 14-37, 2023.

Résumé

Cet article décrit comment s'inspirer du vivant pour s'attaquer à un problème largement résolu dans le règne animal à savoir la navigation sans GNSS de jour en présence ou non du soleil dans le champ visuel grâce au phénomène de diffusion de Rayleigh. Ce phénomène s'appuie sur la polarisation linéaire de la lumière à laquelle l'œil de l'homme est très peu sensible, mais fournissant des informations essentielles de navigation à certains animaux (abeilles, fourmis, papillons monarques, oiseaux...) qui disposent d'un couple photorécepteur-filtre polarisant. La vision polarimétrique offre des possibilités très complémentaires aux technologies classiques de navigation telles que le compas magnétique et la géolocalisation par satellites. Elle va devenir, au cours de la prochaine décennie, l'un des grands défis de la robotique. ■

Abstract

This article describes how to draw inspiration from living things to tackle a largely solved problem in the animal kingdom: navigation without GNSS during the day, with or without the sun in the visual field, using the Rayleigh scattering phenomenon.

This phenomenon is based on the linear polarization of light, to which the human eye is very insensitive, but which provides essential navigation information to some animals (such as bees, ants, monarch butterflies, birds, etc.) which benefit from photo receptor-polarizing filter pairs. Polarimetric vision offers highly complementary capabilities to usual navigation technologies such as magnetic compasses and satellite geolocation. It is expected to become one of the greatest challenges in robotics over the next decade. ■