



HAL
open science

Mesurer l'invisible dans le ciel pour naviguer : une approche inspirée du vivant

Stéphane Viollet, Julien Serres

► To cite this version:

Stéphane Viollet, Julien Serres. Mesurer l'invisible dans le ciel pour naviguer : une approche inspirée du vivant. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2025, 3, pp.100-106. <hal-05357612>

HAL Id: hal-05357612

<https://hal.science/hal-05357612v1>

Submitted on 10 Nov 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Mesurer l'invisible dans le ciel pour naviguer : une approche inspirée du vivant

Stéphane Viollet (Directeur de Recherche, CNRS)

Julien R. Serres (Professeur, Aix Marseille Université)

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.

We are often fascinated by the blue color of the sky without knowing that this color results from a diffusion phenomenon described by Lord Rayleigh in 1871, a phenomenon accompanied by linear polarization of light to which the human eye is not very sensitive, but which provides essential navigation information to various animals (bees, ants, monarch butterflies, birds, etc.) and, why not, future autonomous robots.

Introduction

La navigation dans des environnements dépourvus de systèmes de navigation par satellites risque 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 »),
- des systèmes de navigation inertielle (INS pour « Inertial Navigation System »),
- des 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
- et 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]. Lorsque la lumière interagit avec des particules de plus grandes tailles (aérosol, poussières, nuages...), c'est la diffusion de Mie qui dégrade la polarisation linéaire de la lumière directe.

La couleur bleue du ciel, vue par l'être humain, est le résultat de trois facteurs :

- le spectre du corps noir de la lumière solaire entrant dans l'atmosphère terrestre,
- la diffusion de Rayleigh de cette lumière par les molécules d'oxygène et d'azote,
- la réponse du système visuel humain.

D'autres êtres vivants ayant une sensibilité spectrale plus large que l'œil de l'homme perçoivent la lumière du ciel de manière très différente.

La forte dépendance à la longueur d'onde de la diffusion de Rayleigh (proportionnel à $1/\lambda^4$, avec λ la longueur d'onde considérée) signifie que les longueurs d'onde plus courtes (bleues) sont diffusées plus fortement que les longueurs d'onde plus longues (rouges). Il en résulte une lumière bleue et violette indirecte provenant de toutes les régions du ciel, contrairement à la lumière jaune, verte, orange, et rouge qui colore le ciel uniquement autour du soleil. L'œil humain réagit à cette combinaison de longueurs d'onde comme s'il s'agissait d'une combinaison de lumière bleue et blanche (voir figure 1).



Figure 1. La photo de gauche montre la lumière bleue diffusée et polarisée par l'atmosphère. La photo de droite a été prise à travers un filtre polarisant : le polariseur transmet la lumière polarisée linéairement dans une direction spécifique rendant ainsi le ciel beaucoup plus contrasté et moins saturé. (Crédit : [<http://en.wikipedia.org>]).

Dans cet article, nous nous focaliserons ici uniquement sur la diffusion de Rayleigh qui est le phénomène qui permet de comprendre comment la lumière du ciel polarisée linéairement peut être utilisée à des fins de navigation.

La diffusion de Rayleigh

Pour comprendre comment mesurer l'état de polarisation du ciel résultant de la diffusion de Rayleigh [9], il est essentiel de définir les deux paramètres que sont l'angle de polarisation (noté très souvent AoP_l) et le degré de polarisation linéaire (noté très souvent DoLP) tels que décrits dans la figure 2.

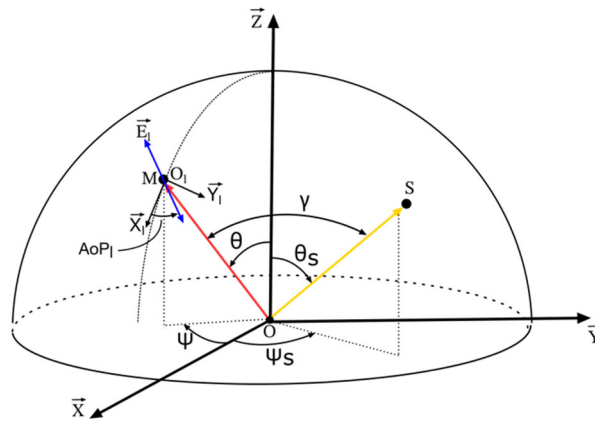


Figure 2. Description des principaux paramètres du modèle de diffusion de Rayleigh caractérisant la lumière du ciel polarisée linéairement. Le soleil est repéré par le vecteur \vec{OS} tandis que le vecteur mesure dans le ciel associé à une zone ponctuelle du ciel est noté \vec{OM} . Le vecteur de polarisation dans le repère $(O_l, \vec{x}_l, \vec{y}_l, \vec{z}_l)$ associé au point M est noté \vec{E}_l .

Le degré de polarisation DoLP est donné par l'équation suivante :

$$DoLP = \frac{\sin^2(\gamma)}{(1 + \cos^2(\gamma))}, \text{ avec } \gamma \text{ l'angle de diffusion tel que défini dans la figure 2.}$$

D'après la figure 2, on peut voir que l'angle de polarisation (AoP_l) correspond à la direction du vecteur de polarisation \vec{E}_l dans le repère $(O_l, \vec{x}_l, \vec{y}_l, \vec{z}_l)$, 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 $R_{ot}(\psi, \theta)$, avec ψ et θ 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 :

$$\vec{E}_l = R_{ot}(\psi, \theta) \vec{E} \quad (2)$$

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

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

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

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

$$\tan(\text{AoP}_l) = \frac{E_{ly}}{E_{lx}} = \frac{\sin(\theta_s) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\psi - \psi_s) - \cos(\theta_s) \cdot \sin(\theta)}{\sin(\psi - \psi_s) \cdot \sin(\theta_s)}$$

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

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

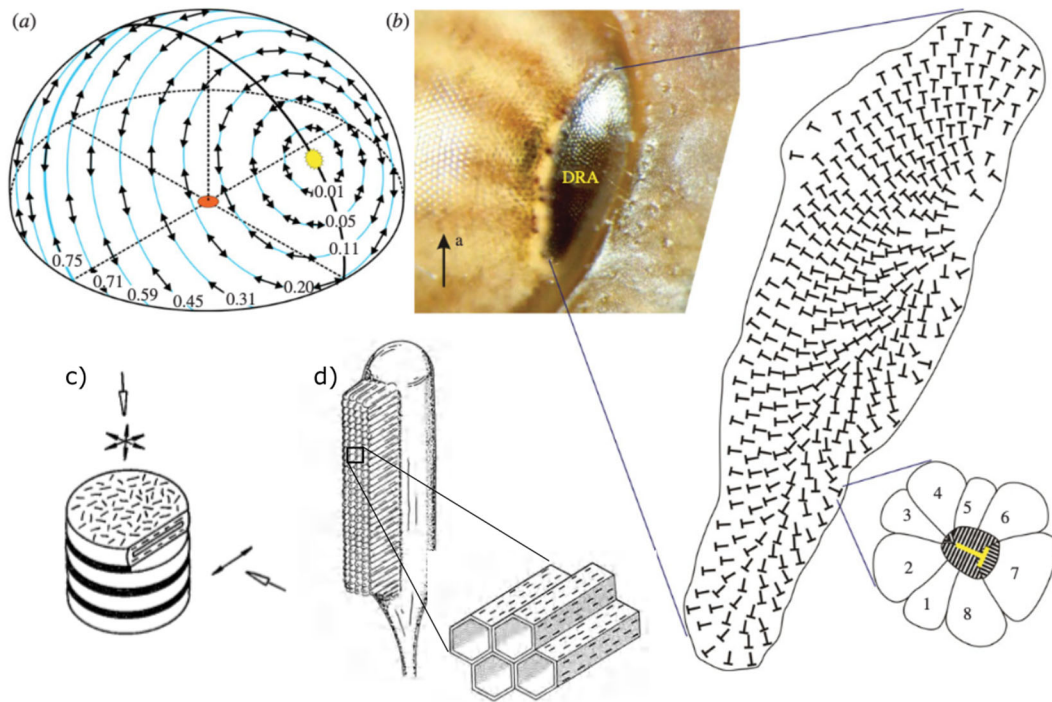


Figure 3. Vision polarisée chez le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria*. (a) Motif de lumière polarisée du ciel. Les vecteurs de champ électrique (e-vecteurs, flèches doubles) sont disposés le long de cercles concentriques autour du Soleil (jaune). La lumière solaire directe n'est pas polarisée. (b) Zone dorsale marginale (DRA pour « Dorsal Rim Area ») sensible à la polarisation dans l'œil composé gauche d'un criquet 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].

L'examen optique des membranes discales 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 criquet (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.

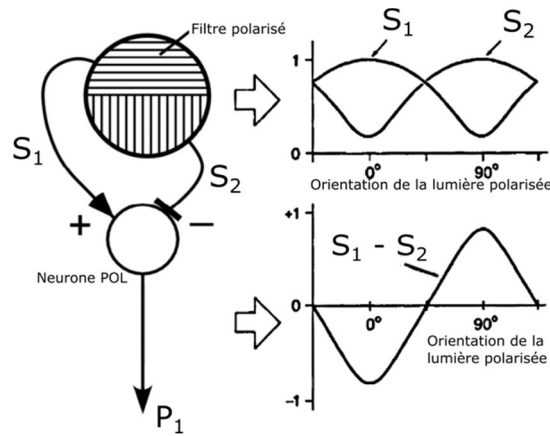


Figure 4. Modèle d'un neurone POL qui tient compte de la réponse du vecteur de polarisation des photorécepteurs dotés de leur filtre polarisé orthogonal (notés ici 1 et 2). Le neurone POL calcule le rapport logarithmique des signaux de sortie des deux photorécepteurs (S_1 et S_2). Le logarithme permet 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].

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 :

$$S_i = K \cdot I \cdot [1 + d \cdot \cos(2AoP_i - 2\varphi_i)] \quad (4)$$

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.

Comme suggéré par T. Labhart dans son modèle inspiré des unités de traitement polarimétrique (neurone POL) chez le criquet [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 $\varphi_2 = 90^\circ$) :

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

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 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 photorécepteurs 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 photorécepteur 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 de sel 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 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 parcourue 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).

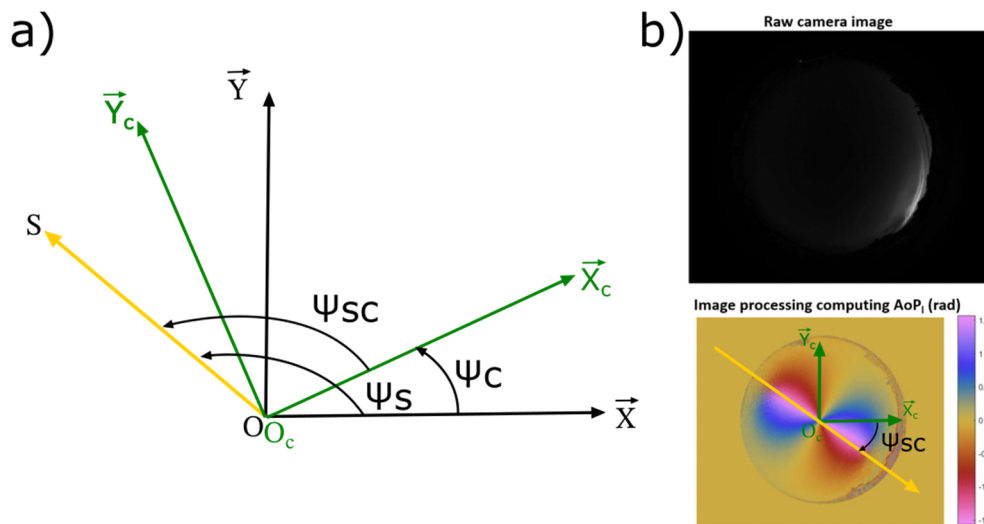


Figure 5. Estimation de l'azimut solaire. a) Définition des angles et des repères pour passer de l'estimation de l'azimut solaire dans le repère caméra à l'orientation de la caméra ψ_c dans le repère terrestre. b) Exemple d'image polarimétrique mesurée par une caméra en condition réelle et angle de polarisation 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].

Il existe de nombreuses solutions technologiques permettant d'analyser l'état de la lumière polarisée. Cependant, une technologie très 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 microfiltres (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° .

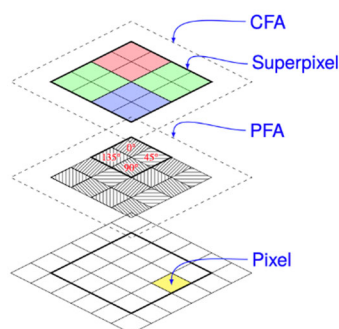


Figure 6. Matrices de filtres de polarisation (PFA pour « Polarizer Filter Array ») et de couleur (CFA pour pour « Color Filter Array »), telle que celles mises en œuvre dans les capteurs commerciaux Sony IMX250MYR et IMX253MYR. Une procédure de démosaïquage efficace est nécessaire. D'après [19].

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%, même équipé de GNSS ([20], [22]) (est ce que ces robots son équipés de GPS ou non ?)

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.

Bibliographie

- [1] G.-Z. Yang *et al.*, « The grand challenges of science robotics », *Sci. Robot.*, vol. 3, n° 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, n° 27, p. eaau0307, 2019.
- [8] A. T. Young, « Rayleigh scattering », *Phys Today*, vol. 35, n° 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, n° 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, n° 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, n° 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.*, n° 73, p. 128-141, 2020.
- [19] J. R. Serres *et al.*, « Passive Polarized Vision for Autonomous Vehicles: A Review », *Sensors*, vol. 24, n° 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, n° 9, p. 14-37, 2023.

Biographies

Stéphane Viollet est directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et 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 a obtenu son master en ingénierie de contrôle à l'université de Bordeaux 1 et son doctorat à l'Institut national polytechnique de Grenoble, en France, en 2001. 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. 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).

Julien R. Serres est né à Aix-en-Provence en France, en 1978. Il a obtenu une agrégation de physique appliquée à l'École normale supérieure de Cachan, en France, en 2002. Il a obtenu un master en imagerie médicale à l'université Paris-Sud (aujourd'hui université Paris-Saclay) ainsi qu'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 en 2003. Puis, il a rejoint le laboratoire de biorobotique de l'Institut du mouvement et de la perception du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille à Marseille, en France, en tant que doctorant sous la direction du Dr Nicolas Franceschini. Il a obtenu son doctorat à l'université de Montpellier II en juillet 2008. 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, dont des articles parus dans 35 revues indexées et évaluées par des pairs. Il a également reçu plusieurs prix et distinctions pour ses meilleurs articles (conférence IEEE), ECMR en 2017, conférence Living Machines en 2018, etc.), trophée national de l'industrie et des services IoT en 2019, 7ème prix international de la bionique en 2020, 5ème prix départemental de la recherche en Provence en 2021. Il est membre senior de l'Institut universitaire de France (IUF) de 2022 à 2027. Ses recherches portent notamment sur la robotique bio-inspirée et les techniques de localisation visuelle bio-inspirées.