

ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET TRAITEMENT D'IMAGES POUR UN SYSTÈME DE NAVIGATION BASÉ SUR LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE SOLAIRE.

GUILLAUME COURTIER^{1,2}, EMMANUEL PECHEUR¹, RONAN ADAM¹, PIERRE-JEAN LAPRAY², SÉBASTIEN CHANGEY¹, JEAN-PHILIPPE LAUFFENBURGER²

¹ Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL)
5 Rue du Général Cassagnou, 68300 Saint-Louis, France

² Université de Haute-Alsace, IRIMAS UR 7499
12 Rue des Frères Lumière, 68093 Mulhouse Cedex, France

¹Guillaume.Courtier@isl.eu, Emmanuel.Pecheur@isl.eu, Ronan.Adam@isl.eu, Sebastien.Changey@isl.eu,

²Pierre-Jean.Lapray@uha.fr, Jean-Philippe.Lauffenburger@uha.fr

Résumé - Avec les progrès des véhicules autonomes, la navigation basée sur des caméras est de plus en plus utilisée. Une nouvelle méthode de navigation utilisant des caméras polarisées est présentée. Pour cela, un système d'acquisition et un algorithme de traitement d'images ont été développés afin d'estimer le cap d'un véhicule grâce à la polarisation de la lumière du ciel. La précision de la méthode est quantifiée à l'aide d'un banc tournant à partir duquel le cap estimé par les caméras est comparé au feedback donné par la platine rotative.

Abstract - With advances in unmanned vehicles, camera-based navigation is increasingly used. A new low-cost navigation method based on polarized cameras is presented. For this, an acquisition system and an image processing algorithm have been developed in order to find the relative heading of a vehicle thanks to the skylight polarization. The accuracy of the method is quantified using a rotary bench from which the heading estimated by the cameras is compared to the feedback given by the rotary stage.

1 Introduction

Il est probable que les Vikings utilisaient déjà la polarisation pour naviguer à travers les océans avec ce qu'ils appelaient la "sólársteinn" [1], qui agissait comme un polariseur linéaire. De nombreux animaux, comme par exemple les fourmis du désert [2], sont aussi capables de percevoir le motif de la polarisation céleste afin de se repérer dans leur environnement [3]. En outre, l'imagerie spectrale et l'imagerie de polarisation ont longtemps été étudiées indépendamment. La navigation par caméra est désormais largement utilisée, notamment dans les drones terrestres (UGV). Les solutions de navigation existantes sont principalement basées sur des caméras monochromes conventionnelles [4]. Une extension possible consiste à utiliser l'imagerie de polarisation [3].

Avec les progrès technologiques et les nouveaux types de capteurs d'imagerie [5], il est désormais plus facile d'acquérir rapidement l'information de polarisation grâce aux capteurs à matrices de filtres polarisants (PFA), comme le SONY IMX250 MZR ou encore le SONY IMX250 MYR [5]. Ils présentent l'avantage de capturer les informations de polarisation et les informations spectrales sur un unique capteur et de manière instantanée. Il est donc possible de collecter des données spectro-polarimétriques avec cette technique [6], ce qui peut bénéficier à de nombreuses applications de vision par ordinateur.

La diffusion de la lumière par l'atmosphère du ciel génère un motif de polarisation du ciel qui peut être décrit mathématiquement via le modèle de diffusion de Rayleigh [7]. À partir de ce modèle, il est alors possible d'estimer la position du soleil.

L'objectif de cette étude est de proposer une nouvelle solution de navigation basée sur des caméras polarisées. Dans ce but, nous avons développé un système d'acquisition et un algorithme de traitement d'images pour trouver le cap d'un drone terrestre (UGV). Nous avons évalué la méthode en quantifiant les erreurs d'orientation grâce à une plateforme de démonstration. Dans la Section 2, nous décrivons l'architecture matérielle nécessaire pour capturer des images du ciel en utilisant des caméras PFA. Ensuite, le modèle de Rayleigh et l'algorithme de navigation sont présentés dans la Section 3. Enfin, la validation expérimentale est montrée dans la Section 4, puis la conclusion dans la Section 5.

2 Architectures matérielles

2.1 Capteurs & Optiques

L'acquisition d'images du ciel sous de fortes dynamiques et dans un système embarqué nécessite un dispositif compact et permettant une capture instantanée, comme le permettent les caméras PFA. Ainsi, notre système d'acquisition d'images est basé sur un polarimètre à division du plan focal (DoFP), ce qui permet de capturer différents états de polarisation linéaire et d'éviter le réalignement des images dû à une configuration avec de multiples caméras [8]. Les avantages d'un tel dispositif sont le coût, la compacité et la rapidité d'acquisition. D'autres techniques d'imagerie polarimétrique nécessitent souvent un polariseur rotatif [9], ou une configuration optique encombrante [10]. Le polarimètre DoFP utilise un réseau de filtres de polarisation disposé au-dessus du plan focal, consistant

en quatre filtres de polarisation orientés à 0° , 45° , 90° et 135° (voir Figure 1). Ce type de polarimètre peut également être couplé à un réseau de filtres de couleurs (comme par exemple une matrice de Bayer) pour capturer différents états de polarisation à différentes plages de longueur d'onde. C'est le cas du SONY IMX250 MYR, qui est un capteur couleur à matrice de filtres de polarisation (CPFA), dont la disposition spatiale est illustrée à la Figure 1. Le principal problème d'un tel capteur est sa résolution spatiale limitée, où un seul pixel ne détecte qu'un état de polarisation particulier à une gamme de longueur d'onde spécifique. Il est donc nécessaire d'utiliser un traitement d'images adapté (dématriçage) pour reconstruire la résolution spatiale complète de l'image [11].

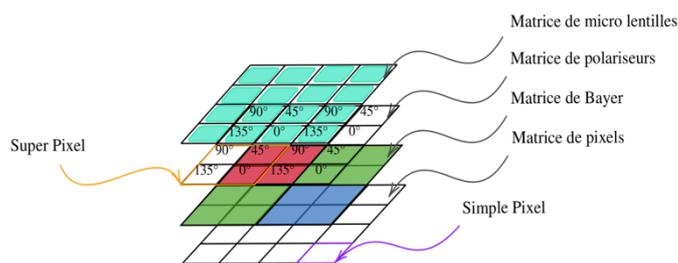


Figure 1 : Architecture d'un polarimètre DoFP. Ici, l'arrangement spécifique au capteur Sony IMX250 MYR.

Deux caméras PFA différentes ont été utilisées afin de capter l'information soit en large bande, soit dans le spectre rouge, vert ou bleu :

1. **Large bande** : la Flir Blackfly S (BFS-U3-51S5P-C) avec le capteur PFA Sony IMX250 MZR.
2. **RGB** : la caméra Lucid Phoenix (PHX050S-QC) avec le capteur CPFA Sony IMX250 MYR.

Nous avons équipé nos caméras d'un objectif Kowa (LM8JC5MC, $f=8\text{mm}/F2.8$), qui offre un compromis relativement bon entre champ de vision, quantité de lumière et déformations dues à l'objectif. L'impact des paramètres de l'objectif n'est pas considéré dans ce travail.

2.2 Conception matérielle

Différents systèmes électroniques ont été développés, chacun ayant une fonction spécifique :

1. **Un ordinateur embarqué** (Avnet Ultra96-V2) composé d'un système sur puce (SoC) avec un processeur ARM et un FPGA (Field-Programmable Gate Array) Xilinx Ultrascale (voir Figure 2a). La carte Avnet exécute une distribution Ubuntu 20.04 Server et permet un accès à distance via un hub Wi-Fi. La fonction de ce système est de configurer les caméras et de stocker les images du ciel au format RAW dans la partie processeur (PS). Le format RAW permet d'avoir une image en format brute sans traitements et donc d'être sûr que les données ne soient pas modifiées.

2. **Une carte fille** de synchronisation personnalisée composée d'une carte mère Trenz TE0706 avec un module SoC TE0715 pourvu d'un Xilinx Zynq-7000 (voir Figure 2b). Cette carte électronique a pour but de générer les tensions appropriées pour les capteurs (caméras et IMU). Elle génère également un signal de déclenchement basé sur le signal PPS du GNSS grâce à un module u-blox, à l'aide d'un logiciel basé sur la partie FPGA afin de synchroniser les équipements et donc les acquisitions. Un module Digi XBee assure une connectivité sans fil pour configurer la fréquence du signal à distance.

3. **Une carte de protection** afin de protéger la batterie Lithium Polymère (LiPo) contre les sous-tensions et les surtensions (voir Figure 2c).

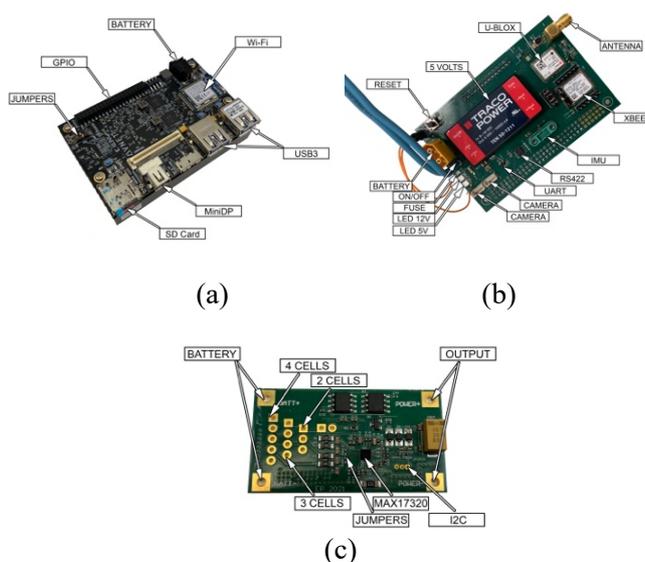


Figure 2 : (a) SoC embarqué, (b) Carte de synchronisation, (c) Carte de protection.

Les systèmes sont interfacés selon le schéma fonctionnel suivant :

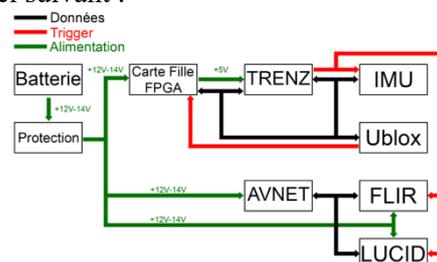


Figure 3 : Schéma fonctionnel de l'architecture matérielle.

L'interfaçage des différentes cartes et capteurs se fait par l'intermédiaire de 3 bus (cf. Figure 3) :

1. **Le bus d'alimentation**, en vert, qui a pour fonction de distribuer l'alimentation aux différents systèmes et à la bonne tension.
2. **Le bus de données**, en noir, qui permet de faire transiter les différentes données entre les cartes et d'acquies les différentes sorties des capteurs.
3. **Le bus de synchronisation**, en rouge, qui a pour but de répartir les différents signaux de

déclenchement afin de synchroniser tous les systèmes et donc les acquisitions.

Comme décrit précédemment, la carte Avnet s'occupe de l'interfaçage des caméras et de l'acquisition de leurs données. La carte Trenz et sa carte fille gèrent l'interfaçage et l'acquisition des capteurs additionnels, comme l'IMU, et la génération des signaux de déclenchements à partir du GNSS. De plus, elle permet l'enregistrement des données GNSS afin d'avoir une redondance supplémentaire.

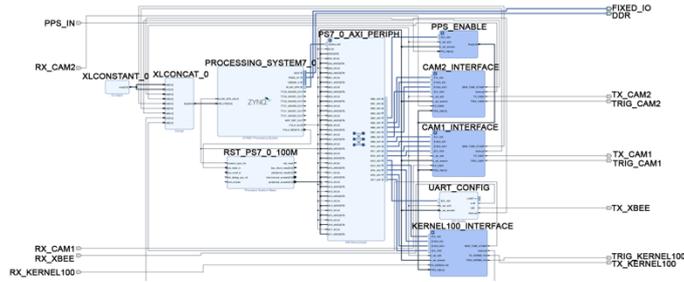


Figure 4 : Schéma-bloc global de la partie FPGA de la carte Trenz.

Le schéma-bloc de l'interfaçage et de l'acquisition des capteurs additionnels dans la partie PL du FPGA de la carte Trenz est donné sur la Figure 4.

Il est composé comme suit :

1. **Entrées** : RX_Kernel100, PPS_IN. Entrées depuis les différents systèmes ainsi que l'entrée du signal de synchronisation généré par le module GNSS.
2. **Gestion des capteurs** : KERNEL100_INTERFACE, CAM1_INTERFACE, CAM2_INTERFACE. Pour la gestion des différents capteurs. Ils sont basés sur le design qui est présenté sur la Figure 5.
3. **Sorties** : TX_Kernel100, TRIG_CAM1, TRIG_CAM2, TRIG_Kernel100. Correspondent aux sorties vers les différents capteurs ainsi qu'à la génération du signal de déclenchement pour les différents systèmes.

Les autres entrées/sorties seront utilisées dans un futur travail afin de fusionner les systèmes 1 (Avnet) et 2 (Trenz) dans le même SoC pour plus de compacité. En effet, la partie PL de la carte Avnet étant actuellement libre, elle pourrait accueillir la génération des signaux de déclenchement et l'interfaçage des capteurs additionnels et des caméras. Cela permettrait de les embarquer, par exemple, dans un drone aérien (UAV). Les autres blocs servent au bon fonctionnement du FPGA et à la génération en interne d'une horloge afin de générer les signaux de synchronisation.

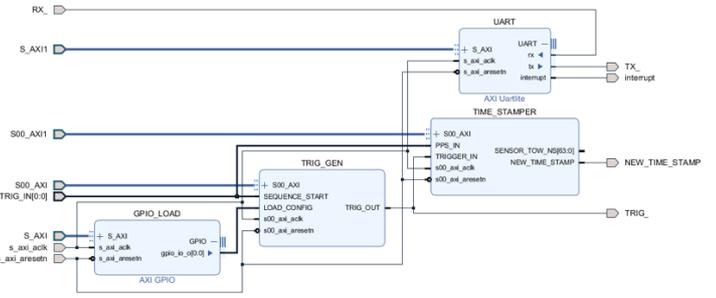


Figure 5 : Architecture du bloc des caméras et de l'IMU.

Toutes ces cartes électroniques sont prévues pour fonctionner indépendamment sur secteur ou sur batterie et sont entièrement contrôlables à distance à l'aide d'un module Xbee ou du Wi-Fi.

3 Traitement d'images

3.1 Modèle de Rayleigh

L'algorithme de navigation est basé sur le modèle de Rayleigh qui décrit le motif de polarisation du ciel généré par la diffusion de la lumière du soleil par les petites particules qui composent l'atmosphère terrestre [7]. La polarisation de la lumière du ciel dépend de la position du soleil S et de la direction de l'observation O .

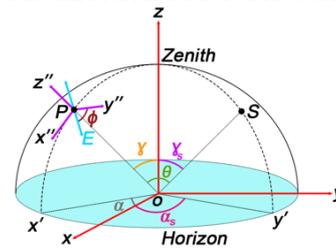


Figure 6 : Polarisation du ciel : direction du champ électrique E dans le repère local avec γ : angle zénithal, α : angle azimutal, ϕ : angle de polarisation et θ : angle de diffusion. S signifie Soleil.

La Figure 6 montre les paramètres géométriques permettant de définir les équations correspondantes au Degré de Polarisation Linéaire (DoLP) et à l'Angle de Polarisation Linéaire (AoLP), donnés par le modèle de Rayleigh [12] :

$$\rho = \frac{1 - \cos^2(\theta)}{1 + \cos^2(\theta)}, \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\sin(\alpha - \alpha_s)\sin(\gamma_s)}{\cos(\gamma_s)\sin(\gamma) - \sin(\gamma_s)\cos(\gamma)\cos(\alpha - \alpha_s)}\right). \quad (2)$$

3.2 Algorithme de navigation

L'algorithme de navigation s'appuie partiellement sur l'article de Lu *et al.* [13]. Une méthode d'extraction par seuil est utilisée pour identifier les points dont les valeurs sont autour de la frontière $\phi = 0^\circ/180^\circ$ dans l'AoLP qui caractérise la direction du soleil (cf. Figure 6). Nous avons proposé d'utiliser une estimation par maximum de vraisemblance afin de réduire le temps de calcul.

La Figure 7 montre le pipeline de traitement : capture d'une image du ciel, calcul des vecteurs de Stokes (S_0 , S_1 , S_2) [14], du DoLP et de l'AoLP correspondants, extraction des points d'intérêt, construction d'une image binaire, calcul du maximum de vraisemblance.

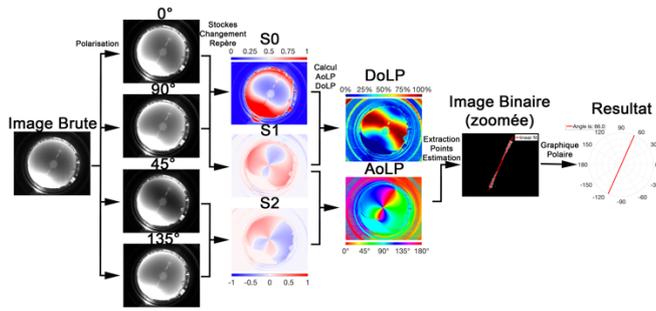


Figure 7 : Étapes d'estimation de la direction du soleil. Les images ont été prises avec un objectif fisheye.

4 Validations expérimentales

4.1 Plateforme de démonstration

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur le fait d'évaluer de manière robuste les performances de l'algorithme de navigation avant de l'embarquer dans un UGV. Pour ce faire, une plateforme de démonstration a été construite sur la base d'un banc tournant pour pouvoir tester l'algorithme dans des scènes statiques et dynamiques (voir Figure 8). La plateforme de démonstration est constituée d'une platine Aerotech ADRS 200. Elle est équipée des caméras PFA et d'une IMU. La platine fournit également un feedback pour avoir des données de référence à comparer aux autres capteurs et a une précision de 29,1 μ rad.



Figure 8 : Plateforme de démonstration.

4.2 Résultats

Une série d'acquisitions a été effectuée dans les conditions suivantes : rotation de 0° à 90° avec une vitesse de rotation de $-9^\circ / s$. Un signal à 10 Hz, généré par le système embarqué, permet de synchroniser précisément l'orientation de l'ADRS et la capture des images. La Figure 9 montre les résultats d'estimation du cap calculés grâce aux images des caméras Flir et Lucid, et l'orientation du banc tournant qui sert de référence.

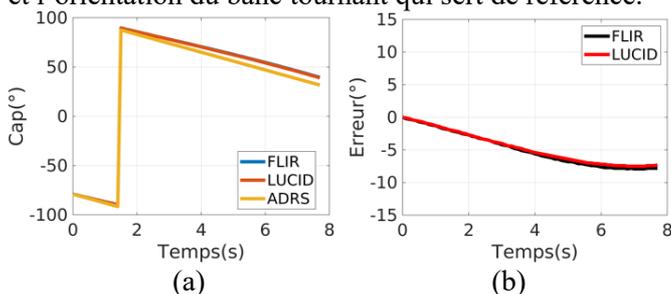


Figure 9 : (a) Comparaison entre le cap calculé à partir des données des caméras Flir et Lucid et celui donné par le feedback

du banc tournant. (b) Calcul de l'erreur de cap entre les caméras et le feedback du banc tournant qui sert de référence.

La campagne d'acquisition a eu lieu le 10/06/2021 à 7h56. La fréquence de données du banc tournant est de 1 kHz, celle des caméras est de 10 Hz.

Nous pouvons voir que les courbes ont la même tendance, mais ne sont pas exactement superposées. L'erreur maximale entre les courbes est de $7,9^\circ$ (Figure 9b). Cela peut être dû en partie au bruit de l'image, aux conditions atmosphériques, à l'assiette du banc tournant, ou aux déformations optiques de la lentille. Nous pouvons aussi remarquer qu'il y a un saut autour de 1,4 s, ceci est dû à l'indétermination de 180° sur la position du soleil qui pourrait être corrigée en utilisant le DoLP.

5 Conclusion

Nous avons développé un algorithme de traitement d'image pour l'estimation de cap en utilisant la polarisation de la lumière solaire. Une solution matérielle embarquable utilisant des caméras PFA a été construite. Une erreur de quelques degrés a été quantifiée entre le cap estimé et le cap de référence. Comme travaux futurs, la méthode devra être évaluée vis-à-vis des travaux existants de l'état de l'art. De plus, ces résultats étant obtenus pour une condition météorologique spécifique, le rôle de la dégradation du signal serait à étudier. Enfin, il serait intéressant d'envisager la modification de la chaîne de traitement (ajout de prétraitements, sélection d'une bande spectrale spécifique ou changement du modèle de diffusion) en vue d'optimiser l'estimation de cap.

Références

- [1] J Marchant. Did vikings navigate by polarized light? 2011.
- [2] G Horváth and R Wehner. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry. *Journal of Comparative Physiology A*, 184(1) :1–7, 1999.
- [3] J Dupeyroux, J Diperi, M Boyron, S Viollet, and J Serres. A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3439–3445. IEEE, 2017.
- [4] M Rebert, D Monnin, S Bazeille, and C Cudel. Parallax beam : a vision-based motion estimation method robust to nearly planar scenes. *Journal of Electronic Imaging*, 28(2) :023030, 2019.
- [5] Sony. Polarization image sensor. Report, Polarsens, 2018.
- [6] G Courtier, P-J Lapray, J-B Thomas, and I Farup. Correlations in joint spectral and polarization imaging. *Sensors*, 21(1) :6, 2021.
- [7] JW Strutt. Investigation of the disturbance produced by a spherical obstacle on the waves of sound. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1(1) :253–283, 1871.
- [8] Y Wang, X Hu, L Zhang, J Lian, and X He. Polarized light compass-aided visual-inertial navigation under foliage environment. *IEEE Sensors Journal*, 17(17) :5646–5653, 2017.
- [9] J Dupeyroux, S Viollet, and J Serres. Polarized skylight-based heading measurements : a bioinspired approach. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(150) :20180878, 2019.
- [10] J. S Tyo, D L. Goldstein, D B. Chenault, and J A. Shaw. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. *Appl. Opt.*, 45(22) :5453–5469, 2006.
- [11] A Spote, P-J Lapray, J-B Thomas, and I Farup. Joint demosaicing of colour and polarisation from filter arrays. *Color and Imaging Conference*, 2021(29) :288–293, 2021.
- [12] Y Wang, X Hu, J Lian, L Zhang, Z Xian, and T Ma. Design of a device for sky light polarization measurements. *Sensors*, 14(8) :14916–14931, 2014.
- [13] H Lu, K Zhao, Z You, and K Huang. Angle algorithm based on hough transform for imaging polarization navigation sensor. *Optics express*, 23(6) :7248–7262, 2015.
- [14] G G. Stokes, "On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 9, 399 (1851).