



HAL
open science

Contributions à l'imagerie polarimétrique et à ses applications en vision pour la robotique

Olivier Morel

► **To cite this version:**

Olivier Morel. Contributions à l'imagerie polarimétrique et à ses applications en vision pour la robotique. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. Université Bourgogne-Franche-Comté, 2019. tel-02408798

HAL Id: tel-02408798

<https://hal.science/tel-02408798>

Submitted on 13 Dec 2019

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.

Habilitation à Diriger des Recherches

Discipline Sciences et Techniques

Section CNU : 61

**Contributions à l'imagerie polarimétrique
et à ses applications en vision pour la
robotique**

Présentée par
Olivier Morel

Soutenue le 11 décembre 2019 devant le jury composé de :

Cédric Demonceaux	Professeur, Université de Bourgogne-Franche-Comté	Président
François Goudail	Professeur, Institut d'Optique Graduate School	Rapporteur
Simon Lacroix	Directeur de Recherche, LAAS	Rapporteur
Fabrice Mériaudeau	Professeur, Université de Bourgogne-Franche-Comté	Examineur
Pascal Vasseur	Professeur, Université de Rouen	Rapporteur

Avant-Propos

Ce mémoire présente le bilan de l'ensemble de mes travaux de recherche effectués de septembre 2006 à juin 2019 au sein de l'équipe Creusotine du laboratoire Le2i devenue équipe Vibot ERL CNRS 6000 depuis janvier 2018. Les principales activités de recherche que j'ai menées au cours de ces 10 dernières années autour de l'imagerie polarimétrique, de la vision omnidirectionnelle et de leurs applications en vision pour la robotique seront particulièrement détaillées dans ce document. Elles seront présentées selon deux grandes parties : la première concernera plutôt l'aspect mise en œuvre et calibrage des caméras et la seconde se concentrera sur les applications potentielles en vision pour la robotique.

Ces cinq dernières années, l'équipe de recherche a recentré ses activités autour des applications de l'imagerie dite non-conventionnelle (vision omnidirectionnelle, imagerie infrarouge, imagerie polarimétrique, etc.) à la robotique mobile et à l'analyse de scènes 2D/3D. Mes travaux s'inscrivent pleinement dans la thématique de l'équipe et le projet ANR VIPeR (VIsion Polarimétrique Pour la navigation de Robots) que j'ai eu l'opportunité de coordonner de 2015 à 2018 nous a permis de renforcer l'axe de recherche autour des applications de l'imagerie polarimétrique aux véhicules. L'objectif du projet était d'instrumenter une caméra polarimétrique pour démontrer le potentiel de cette modalité, à l'instar des nombreux animaux qui utilisent la perception de la polarisation de la lumière pour appréhender leur environnement et pour s'orienter dans l'espace. Comme nous le verrons dans le document, l'imagerie polarimétrique devient relativement simple à mettre en œuvre pour des applications dynamiques et embarquées depuis la récente apparition sur le marché des caméras polarimétriques.

Le premier chapitre présentera mes activités scientifiques, pédagogiques et administratives, menées depuis le début de ma carrière d'enseignant-chercheur ainsi que la liste des publications auxquelles j'ai participé.

Le second chapitre traitera de l'imagerie polarimétrique et des contributions que nous avons pu apporter dans ce domaine. Après un bref rappel des principes physiques et du formalisme employé, les différents systèmes que nous avons été amenés à développer pour la mesure des paramètres de polarisation seront décrits. Une méthode de calibrage originale de caméra polarimétrique tri-CCD sera également détaillée.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'ensemble des travaux réalisés autour de la vision omnidirectionnelle. Ils ont été initiés pour ma part lors du projet ANR CaViAR alors que nous avons proposé une méthode générique de calibrage de capteurs catadioptriques en insérant un filtre polariseur entre la caméra et le miroir. Nous avons plus tard considéré cette configuration comme étant un imageur à part entière (« polacatadioptrique ») et avons travaillé sur sa mise en œuvre complète en incluant les problématiques

de calibrage polarimétrique liées à la réflexion par le miroir des rayons lumineux.

Les premières applications de l'imagerie polarimétrique à la vision pour la robotique seront présentées dans le quatrième chapitre en mettant en avant l'intérêt de la modalité pour l'analyse de scènes. Nous décrirons également les systèmes de stéréovision développés pour obtenir simultanément les informations de polarisation et la géométrie de la scène. Les techniques d'apprentissage par réseaux de neurones profonds ayant investi le domaine de l'analyse de scène et les données polarimétriques étant peu communes, nous verrons comment augmenter les images polarimétriques pour alimenter ces réseaux.

Le cinquième chapitre montrera comment l'imagerie polarimétrique peut contribuer à l'estimation de l'attitude d'un robot. En effet, en l'absence de repères physiques ou lorsque le soleil est caché, de nombreux insectes utilisent la carte polarimétrique du ciel pour s'orienter. Dans ce contexte, l'utilisation d'une caméra polarimétrique associée à un système optique omnidirectionnel prend tout son sens car il constitue le capteur optique le plus approprié.

Enfin, le dernier chapitre présentera les conclusions des travaux menés ici et proposera des perspectives de recherche.

Table des matières

1	Curriculum Vitae	3
1.1	Présentation	3
1.1.1	État civil	3
1.1.2	Parcours universitaire et professionnel	3
1.2	Activités d'enseignement	4
1.3	Responsabilités administratives	4
1.4	Activités de recherche	5
1.4.1	Résumé des travaux	5
1.4.2	Encadrements	6
1.5	Diffusion et rayonnement	7
1.5.1	Participation à des projets de recherche	7
1.5.2	Expertise (organismes nationaux ou internationaux)	8
1.5.3	Relecteur pour des journaux et conférences internationales	8
1.5.4	Participation jurys de thèse (hors établissement)	8
1.5.5	Activités de vulgarisation scientifiques	9
1.5.6	Actions de transfert et travaux d'expertise	9
1.6	Production scientifique	9
I	Vers un capteur « omipolarimétrique »	17
2	Imagerie polarimétrique	19
2.1	Informations de polarisation	19
2.1.1	Modélisation des ondes	19
2.1.2	Formalisme de Stokes	21
2.1.3	Matrices de Mueller	23
2.2	Polarimétrie de Stokes incomplète	24
2.2.1	Principe	24
2.2.2	Images de polarisation	26
2.3	Exemples d'applications de la polarimétrie de Stokes incomplète	28
2.3.1	Imagerie polarimétrique de la peau	29
2.3.2	Classification de mélanomes	30
2.4	Autres mesures de polarisation	32
2.4.1	Polarimétrie de Stokes complète	32
2.4.2	Polarimétrie de Mueller	33
2.5	Caméras polarimétriques	34
2.5.1	DoT (Division of Time)	34

2.5.2	DoA (Division of Aperture)	34
2.5.3	DoAm (Division of Amplitude)	35
2.5.4	DoFP (Division of Focal Plane)	35
2.5.5	Conclusion	35
2.6	Calibrage d'une caméra polarimétrique tri-CCD	37
2.6.1	Modélisation polarimétrique de la caméra	37
2.6.2	Calibrage polarimétrique à l'aide d'une source lumineuse polarisée	38
2.6.3	Calibrage polarimétrique et géométrique à l'aide d'une tablette	42
2.7	Conclusion	43
3	Vision omnidirectionnelle	45
3.1	Caméras omnidirectionnelles	45
3.1.1	Caméras hypercatadioptriques	47
3.1.2	Caméras paracatadioptriques	48
3.1.3	Caméras fish-eye	48
3.1.4	Modèle sphérique unifié	49
3.2	Conception et calibrage d'un système polydioptrique particulier	51
3.2.1	Estimation des paramètres intrinsèques des caméras fish-eye	52
3.2.2	Estimation des paramètres extrinsèques du système	52
3.3	Calibrage géométrique de caméras catadioptriques par polarimétrie	54
3.3.1	Modèle générique de caméras	55
3.3.2	Shape from Polarization	56
3.3.3	Calibrage géométrique	59
3.3.4	Expérimentations	59
3.4	Système polacatadioptrique	61
3.4.1	Modélisation de la réflexion spéculaire	62
3.4.2	Calibrage polarimétrique du système	63
3.5	Conclusion	65
II	Applications en robotique	67
4	Analyse de scènes	69
4.1	Modélisation de la réflexion	69
4.1.1	Réflexion spéculaire	69
4.1.2	Réflexions issues de la réfraction	71
4.2	Systèmes stéréopolarimétriques	72
4.2.1	Description du prototype développé	73
4.2.2	Avancées en stéréopolarimétrie	75
4.3	Deep Learning et imagerie polarimétrique	77
4.3.1	Mise en œuvre	78
4.3.2	Augmentation des données	79
4.3.3	Intérêt de l'augmentation rectifiée	80
4.3.4	Comparaison des modalités	83

4.4	Conclusion	83
5	Estimation d'attitude	87
5.1	Introduction	87
5.1.1	Imageurs polarimétriques	88
5.1.2	Applications en robotique	88
5.2	Modélisation de la diffusion	89
5.2.1	Modèle de diffusion de Rayleigh	89
5.2.2	Polarisation du ciel en conditions dégradées	92
5.3	Relations avec l'attitude	94
5.3.1	Expression du champ électrique dans une base locale	94
5.3.2	Expression liant la rotation aux paramètres de polarisation	96
5.3.3	Estimation de γ	97
5.3.4	Algorithmes d'estimation d'attitude	98
5.4	Mise en œuvre	99
5.4.1	Calibrage du système	101
5.4.2	Données synthétiques	101
5.4.3	Expérimentations sur données réelles	102
5.5	Conclusion	102
6	Conclusion générale	109
6.1	Bilan	109
6.2	Perspectives	110
	Bibliographie	113

Curriculum vitae

Chapitre 1

Curriculum Vitae

CE chapitre présente l'ensemble de mes activités depuis ma nomination en 2007 en tant que Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne. Après un récapitulatif de mon parcours universitaire et professionnel, je décrirai tout d'abord mes activités d'enseignement. Les diverses responsabilités administratives que j'ai pu endosser seront ensuite énumérées. Mon activité scientifique sera enfin présentée au travers des différents encadrements auxquels j'ai pu participer et de mes contributions dans la diffusion et le rayonnement de la recherche. Le chapitre se terminera par la liste de mes publications scientifiques.

1.1 Présentation

1.1.1 État civil

Nom Morel

Prénom Olivier

Date de naissance 20/03/1977

Grade Maître de Conférences, classe Normale

Établissement Université Bourgogne Franche-Comté

Section CNU 61

Unité de recherche VIBOT ERL CNRS 6000, ImViA

1.1.2 Parcours universitaire et professionnel

2007– Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne
Département Mesures Physiques – IUT Le Creusot
Equipe de recherche : VIBOT ERL CNRS 6000 ImViA

2006–2007 Chercheur post-Doctorant
Projet ANR CaViAR (Catadioptric Vision for Aerial Robots)

2005–2006 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche
Département Mesures Physiques – IUT Le Creusot
Equipe de recherche : laboratoire Le2i UMR-CNRS 5158

- 2002–2005 Doctorat en Instrumentation et Informatique de l’Image
Université de Bourgogne. Laboratoire Le2i UMR-CNRS 5158.
Monitorat au Département Ge2I – IUT Le Creusot
- 2001–2002 Diplôme d’Études Approfondies en Instrumentation et Informatique de l’Image.
École doctorale Buffon, Université de Bourgogne
- 1998–2001 Diplôme d’Ingénieur en Automatique et Informatique Industrielle, École Supérieure d’Ingénieurs d’Annecy
- 1995–1998 Classe Préparatoire aux Grandes Écoles (PTSI, PSI), Lycée G. Eiffel à Dijon

1.2 Activités d’enseignement

Rattaché au département Mesures Physiques de l’IUT du Creusot depuis 2007, je suis en particulier responsable du module « Pilotage d’instrument » en 2ème année. Afin de respecter le Programme Pédagogique National, j’ai dû monter une nouvelle salle de Travaux Pratiques avec l’installation de maquettes dédiées au module. Il s’agit d’un ensemble de parties opératives qui sont commandées à l’aide de cartes d’acquisition et du langage de programmation graphique LabVIEW. J’en assure les CM, TD et TP.

Par ailleurs, j’interviens dans le programme des masters internationaux sur le site universitaire du Creusot depuis 2007. Ce programme regroupe les Masters Vibot (Vision & robotics – Erasmus Mundus de 2006 à 2012), le Master Computer Vision (Parcours local) et le Master Maia (Medical Imaging and Applications – Erasmus Mundus de 2017 à 2019). J’ai assuré la responsabilité du module « Sensors & Digitization » de 2010 à 2016 où j’ai enseigné l’imagerie polarimétrique. Depuis 2016, j’interviens dans le module « Discrete Signal Processing » en CM. Je suis également responsable du module « Introduction to Programming » depuis 2014 où je suis chargé de la programmation en Python pour les étudiants qui intègrent le niveau Bachelor du programme. L’intégralité des cours des programmes internationaux est dispensée en anglais.

1.3 Responsabilités administratives

- 2011–2014 Responsable élu de l’équipe - Le2i Le Creusot, (Équipe de 14 enseignants-chercheurs). Gestion administrative et financière de l’équipe
- 2010–2013 Responsable de Licence Professionnelle MCI, Mesures et Capteurs Intelligents. Licence ouverte à l’alternance
- 2009–2015 Responsable du semestre 4 du Master Erasmus Mundus Vibot. Gestion des stages, mise en place de partenariats industriels
- 2015–2019 Directeur des études de 2ème année du Master Computer Vision. Gestion des emplois du temps, des stages.

Implications dans l’établissement de rattachement

- Chargé de sécurité des systèmes d’information (CSSI) CNRS pour l’ERL depuis 2019

- Membre du Conseil d'Administration de l'IUT du Creusot depuis janvier 2015
- Membre du grand jury de l'IUT du Creusot depuis janvier 2015
- Membre de la commission de choix de l'IUT du Creusot depuis janvier 2015

1.4 Activités de recherche

J'ai été recruté en 2007 au laboratoire Le2i (Laboratoire Electronique Informatique de l'Image) UMR CNRS 5158 dans l'équipe du site Le Creusot. Suite à la restructuration du laboratoire qui est devenu en 2012 Le2i UMR CNRS 6306, j'ai intégré l'équipe projet Ant_Roid (Analyse et Numérisation Tridimensionnelle par Robots à Intelligence Distribuée) du département Vision. Enfin, je fais actuellement partie de l'équipe VIBOT ERL CNRS 6000 qui est rattaché au nouveau laboratoire ImViA (Image et vision Artificielle) depuis 2019.

1.4.1 Résumé des travaux

Mes activités de recherche ont porté principalement sur la réalisation de capteurs atypiques en vue d'applications en vision pour la robotique. Après avoir initié dans le cadre du projet ANR CaVIaR une technique de calibrage de capteurs catadioptriques par imagerie polarimétrique [RI-MSF08], nous avons proposé une extension de techniques de traitement d'image adapté à ces imageurs [CI-AMF08b ; RI-Ain+13]. Nous nous sommes dès lors intéressés au couplage de la vision catadioptrique et polarimétrique pour l'extraction d'informations 3D et polarimétriques de scènes [W-SFM09 ; RI-AMF12]. En parallèle, nous avons également travaillé sur un système stéréopolarimétrique afin d'optimiser la mise en correspondance d'images utilisant des filtres polariseurs fixes [RI-IMM11]. Au sein de l'équipe Ant_Roid, j'ai eu par ailleurs l'opportunité de participer modestement à l'un des axes de l'équipe concernant le développement de stratégies d'acquisition et d'exploration multi-robots. D'une part, nous avons proposé une structure multi-agents [RI-Nag+15a] et d'autre part nous avons mis en oeuvre des algorithmes évolutionnaires pour la couverture de caméras [CI-Str+17].

Le projet ANR JCJC VIPeR que j'ai coordonné nous a permis de mettre en avant un intérêt plus marqué de l'imagerie polarimétrique pour la navigation de robots autonomes. En effet, en s'inspirant de la faculté qu'ont certains animaux à capter l'état de polarisation de la lumière ambiante pour s'orienter ou détecter des obstacles nous avons montré qu'il est possible d'exploiter l'information polarimétrique du ciel pour s'orienter dans l'espace et de détecter plus facilement des étendues d'eau afin d'assurer l'évitement de ces dernières. Les contributions principales de ces travaux concernent la réalisation d'un démonstrateur terrestre utilisant une caméra polarimétrique que nous avons implémentée sous ROS (Robotics Operating System) [CI-Cro+18] et la dérivation des équations permettant de déduire des informations d'attitude à partir des images de polarisation [CI-Ras+18].

Enfin, j'ai également travaillé sur certaines applications de l'imagerie polarimétrique dans le domaine biomédical. Dans le cadre du projet PEPS INSIS MOSCA, nous avons

étendu les techniques de « Shape from Polarization » à la reconstruction tridimensionnelle du péritoine via laparoscopie [CI-Mar+13]. J’ai participé à l’étude des apports de la polarisation pour la détection et l’analyse de mélanomes. Après avoir analysé les différents aspects de la classification automatisée de lésions cutanées pigmentées, nous avons proposé un système de CAD (Computer Aided Diagnosis) pour la reconnaissance automatique de ces lésions [RI-Ras+15a].

1.4.2 Encadrements

Doctorants

Thèses soutenues

- 2014–2019 David Strubel, « Self-Organizing camera network in a dynamic environment ». Codirection D. Fofi. Soutenue le 9 mai 2019 (1 année de césure).
Publications : [CI-Str+16 ; CI-Str+17]
- 2012–2016 Mojdeh Rastgoo, « An approach to melanoma classification exploiting polarization information ». Thèse en cotutelle avec UDG (Universitat de Girona). Codirection F. Marzani, R. Garcia. Soutenue le 11 juin 2016.
Publications : [RI-Ras+15a ; CI-Ras+15b ; CI-Ras+16b ; CI-Ras+16a]
- 2011–2015 Vineet Nagrath, « Cloud Robotics ». Thèse en cotutelle avec UTP (Universiti Teknologi Petronas). Codirection : F. Mériaudeau, A. Malik. Soutenue le 15 janvier 2015.
Publications : [CI-Nag+12 ; CI-NMM13 ; CI-Nag+13 ; RI-Nag+15a]
- 2009–2012 Abd El Rahaman Shabayek, « Apports Combinés de la Vision Omnidirectionnelle et Polarimétrique pour la Navigation de Robots ». Codirection : D. Fofi. Soutenue le 28 novembre 2012.
Publications : [W-SFM09 ; W-SMF10 ; CI-Sha+11 ; RI-AMF12 ; RI-Abd+12]
- 2008–2011 Mohammad Iqbal, « Polarization Stereoscopic Imaging Prototype ». Codirection : F. Mériaudeau. Soutenue le 21 octobre 2011.
Publications : [CI-IMM10a ; CI-IMM10b ; RI-IMM11]

Thèses en cours

- 2018– Marc Blanchon, « Road scene analysis with a multimodal stereovision system ». Codirection D. Sidibé.
- 2014– Ahmad Zawawi Jamaluddin, « Enhanced Underwater Vision for Seabed Exploration ». Codirection : D. Fofi, R. Seulin.
Publications : [CI-Jam+16 ; CI-Jam+17 ; RI-Maz+17]

Post-Doctorants

- 2016–2018 Mojdeh Rastgoo, « Attitude estimation from polarization imaging », Financée par l’ANR VIPeR.
Publications : [CI-Ras+18]

- 2013–2014 Abd El Rahaman Shabayek, « SFM using LadyBug camera ». Co-encadrement avec C. Demonceaux et P. Vasseur. Financé par l'ANR DrAACaR
- 2007–2008 Samia Ainouz, « Traitement Adapté des Images Catadioptriques ». Co-encadrement avec D. Fofi. Financé par l'ANR CaViAR
Publications : [CI-AMF08b ; CI-AMF08a ; RI-Ain+13]

Master M2

- 2018 Marc Blanchon, « Deep into Water : Multimodal unsupervised water detection and avoidance with an autonomous ground vehicle using deep learning ». Master Computer Vision. Co-encadrement D. Sidibé.
Publication : [CI-Bla+19]
- 2016 Osama Mazhar, « Self-Organizing UAV Fleet ». Master Computer Vision. Co-encadrement D. Fofi.
Publication : [RI-Maz+17]
- 2016 Marc Nabil Bastourous, « Omni-SfM on a Mobile Robot ». Master Computer Vision. Co-encadrement D. Fofi.
Publication : [CI-Str+16]
- 2015 Panos Panagiotis, « Design and Calibration of an omnidirectional RGB-D Camera ». Master Computer Vision. Co-encadrement D. Fofi.
- 2012 Sergio Martinez Herrera, « Polarization Imaging Applied to Laparoscopy ». Master Erasmus Mundus VIBOT. Co-encadrement A. Bartoli.
Publication : [CI-Mar+13]
- 2010 Pujari Riwalidi, « Polacatadioptric Imaging System for Navigation Applications ». Master Computer Vision.
- 2008 Arun Kumar Pandian, « Robot navigation using stereo vision and polarization imaging ». Master Erasmus Mundus VIBOT. Co-encadrement S. Lacroix (LAAS)

1.5 Diffusion et rayonnement

1.5.1 Participation à des projets de recherche

- 2019–2023 ANR CLARA (Couplage Apprentissage et Vision pour Contrôle de Robots Aériens)
Rôle : participant
Partenaires : I3S Sophia Antipolis, LITIS Université de Rouen, VIBOT.
- 2018-2022 ANR ICUB (Imagerie non Conventiionelle pour une Mobilité sécurisée en Milieu Urbain)
Rôle : participant et coordinateur local depuis septembre 2019
Partenaires : LITIS Université de Rouen, Stereolabs, PSA

Chapitre 1 Curriculum Vitae

- 2016–2018 ANR VIPeR (VIsion PolarimétriquE pour la navigation de Robots)
Rôle : coordinateur (9 Hommes.Mois)
- 2012–2015 NRF-ANR DrAACaR (Driver Assistance by Asynchronous Camera Ring)
Rôle : contributeur local (3 Hommes.Mois)
Partenaires : LITIS Université de Rouen, RCVLab-KAIST Corée du Sud, Le2i Université de Bourgogne
- 2010–2011 Projet PEPS INSIS MOSCA (Mouvement et Structure en Configurations Atypiques)
Rôle : participant
Partenaire : ALCoV-ISIT UMR CNRS 6284
- 2006–2008 Projet ANR CaViAR (Catadioptric Vision for Aerial Robots)
Rôle : postdoctorant puis contributeur local
Partenaires : MIS (Université de Picardie Jules Verne, LAAS CNRS, ARO-BAS INRIA Sophia-Antipolis, PERCEPTION INRIA Rhône-Alpes, Le2i Université de Bourgogne

1.5.2 Expertise (organismes nationaux ou internationaux)

- 2015 Expertise d'un projet ANR pour l'appel à projets IHM, Contenus, Connaissances, Big Data, simulation, HPC.
- 2010 Expertise projet de recherche, City University of HongKong 2010 External assessor "Development of a catadioptric vision system for object tracking"

1.5.3 Relecteur pour des journaux et conférences internationales

Journaux

- Optics Express 2017
- IEEE RA EEE Robotics and Automation Letters 2015, 2016
- Journal of Applied Optics 2015
- Sensors 2015
- Journal of Intelligent and Robotic Systems 2013, 2014
- Pattern Recognition Letters 2010-2013
- Traitement du signal 2011

Conférences

- ICRA depuis 2009
- ICIP depuis 2008
- IROS depuis 2013

1.5.4 Participation jurys de thèse (hors établissement)

- 23/01/2019 Jessica Combier, « Conception et Développement de composants Logiciels et Matériels pour un Dispositif Opthalmique », École Doctorale Systèmes

(EDYS) de Toulouse. Examineur.

16/06/2016 Fan Wang, « How polarimetry may contribute to understand reflective road scenes », INSA Rouen. Examineur

5/01/2012 Debyo Saptano « Conception d'un outil de prototypage rapide sur FPGA pour des applications de traitement d'image », Université de Gunadarma, Indonésie. Examineur.

1.5.5 Activités de vulgarisation scientifiques

2019 Projection débat : « Ma vie avec un robot » - Le tour du CNRS 80 jours.

2015-2019 Participation aux European Robotics Week

2016-2019 Challenge inter-départements MP (Mesures Physiques) avec les étudiants (2/13 en 2017)

2013 Projet concours DIMEB 2013 en partenariat avec le Lycée L. Blum du Creusot. Découverte de l'Innovation des Métiers et des Entreprises en Bourgogne – 2ème prix ex-aequo.

2007-2010 Responsable de l'Espace TechnoVision, Espace pédagogique accueillant plus de 1000 jeunes par an autour d'ateliers dédiés à l'imagerie numérique et à la numérisation 3D.

2007 Participation à la Nuit des Chercheurs, Université de Bourgogne.

1.5.6 Actions de transfert et travaux d'expertise

2014-2016 Projet CHAIF (Caractérisation de la HAIE Foliaire) Partenaires : Le2i Université de Bourgogne (R. Seulin coordinateur), Vinipôle Sud Bourgogne, Nicéphore Cité. Rôle : contributeur.

2008 Étude de système de vision pour le contrôle de soudage, société AREVA.

2007 Pré-étude, AREVA NP - Intercontrôle. Mesure de dimples sur les gaines de crayon de combustible

2007 Expertise d'une machine de vision, CEZUS.

2007 Machine d'inspection de surfaces réfléchissantes, société SARREL

1.6 Production scientifique

Revue internationale avec comité de lecture

[RI-Maz+17] O. MAZHAR, A. Z. JAMALUDDIN, C. JIANG, D. FOFI, R. SEULIN et O. MOREL. "Design and calibration of a specialized polydioptric camera rig". In : *Frontiers in ICT* 4 (2017), p. 19. ISSN : 2297-198X.

[RI-MSF16] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. "Handy method to calibrate division-of-amplitude polarimeters for the first three Stokes parameters". In : *Optics Express* 24.12 (juin 2016), p. 13634-13646.

- [RI-Nag+15a] V. NAGRATH, O. MOREL, A. MALIK, N. SAAD et F. MERIAUDEAU. “Dynamic electronic institutions in agent oriented cloud robotic systems”. In : *SpringerPlus* 4.1 (2015), p. 1-16.
- [RI-Nag+15b] V. NAGRATH, O. MOREL, A. MALIK, N. SAAD et F. MERIAUDEAU. “Peer to peer trade in HTML5 meta model for agent oriented cloud robotic systems”. English. In : *Peer-to-Peer Networking and Applications* (2015), p. 1-16. ISSN : 1936-6442.
- [RI-Ras+15a] M. RASTGOO, R. GARCIA, O. MOREL et F. MARZANI. “Automatic differentiation of melanoma from dysplastic nevi”. In : *Computerized Medical Imaging and Graphics* 43.0 (2015), p. 44-52. ISSN : 0895-6111.
- [RI-SMF15] A. E. R. SHABAYEK, O. MOREL et D. FOFI. “Polarization-based robot orientation and navigation : progress and insights”. In : *International Journal of Systems Biology and Biomedical Technologies (IJSBBT)* 3.1 (2015), p. 73-89.
- [RI-Ain+13] S. AINOUZ, O. MOREL, S. MOSADDEGH, D. FOFI et A. BENSRAIR. “Adaptive processing of catadioptric images using polarization imaging : toward a polacatadioptric model”. In : *Optical Engineering* 52.3 (2013), p. 037001-037001.
- [RI-Abd+12] S. ABD EL RAHMAN, O. MOREL, C. DEMONCEAUX et D. FOFI. “Vision based UAV attitude estimation : progress and insights”. In : *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 65 (2012), p. 295-308.
- [RI-AMF12] S. ABD EL RAHMAN, O. MOREL et D. FOFI. “Visual behavior based bio-inspired polarization techniques in computer vision and robotics”. In : *Developing and Applying Biologically-Inspired Vision Systems : Interdisciplinary Concepts* (2012). Sous la dir. de M. POMPLUN et J. SUZUKI.
- [RI-IMM11] M. IQBAL, F. MERIAUDEAU et O. MOREL. “Polarization stereoscopic imaging prototype”. In : *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (IJISP)* 4.3 (sept. 2011), p. 35-50.
- [RI-MSF08] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Measurement of three-dimensional mirror parameters by polarization imaging applied to catadioptric camera calibration”. In : *Journal of Electronic Imaging* 17.3 (août 2008). ACL C 08- 47, p. 0311051-8.
- [RI-MSG06] O. MOREL, C. STOLZ et P. GORRIA. “Polarization imaging for 3D inspection of highly reflective metallic objects”. In : *Optics and Spectroscopy* 101.1 (juil. 2006). ACL C 06- 7, p. 15-21.
- [RI-Mor+06b] O. MOREL, C. STOLZ, F. MERIAUDEAU et P. GORRIA. “Active lighting applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging”. In : *Applied Optics* 45.17 (juin 2006). ACL C 06- 6, p. 4062-4068.

- [RI-Mor+05c] O. MOREL, C. STOLZ, F. MERIAUDEAU et P. GORRIA. “Three-dimensional inspection of highly-reflective metallic objects by polarization imaging”. In : *Electronic Imaging Newsletter* 15.2 (2005), p. 4.

Conférences internationales avec comité de lecture

- [CI-Bla+19] M. BLANCHON, O. MOREL, Y. ZHANG, R. SEULIN, N. CROMBEZ et D. SIDIBÉ. “Outdoor scenes pixel-wise semantic segmentation using polarimetry and fully convolutional network”. In : *VISAPP - International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 2019.
- [CI-Zha+19] Y. ZHANG, O. MOREL, M. BLANCHON, R. SEULIN, N. CROMBEZ et D. SIDIBÉ. “Exploration of deep learning-based multimodal fusion for semantic road scene segmentation”. In : *VISAPP - International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 2019.
- [CI-Cro+18] N. CROMBEZ, R. SEULIN, O. MOREL, D. FOFI et C. DEMONCEAUX. “Multimodal 2D image to 3D model registration via a mutual alignment of sparse and dense visual features”. In : *ICRA - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, Australia, mai 2018.
- [CI-Ras+18] M. RASTGOO, C. DEMONCEAUX, R. SEULIN et O. MOREL. “Attitude estimation from polarimetric cameras”. In : *IROS - IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Madrid, Spain, oct. 2018.
- [CI-Jam+17] A. Z. JAMALUDDIN, C. JIANG, O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “3D reconstruction from specialized wide field of view camera system using unified spherical model”. In : *ICIAP - International Conference on Image Analysis and Processing*. Springer, Cham. 2017, p. 495-506.
- [CI-Str+17] D. STRUBEL, O. MOREL, N. M. SAAD et D. FOFI. “Evolutionary algorithm for positioning cameras networks mounted on UAV”. In : *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE. 2017, p. 1758-1763.
- [CI-Jam+16] A. Z. JAMALUDDIN, O. MAZHAR, O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Design and calibration of an omni-RGB+ D camera”. In : *URAI - International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. IEEE. 2016, p. 386-387.
- [CI-Ras+16a] M. RASTGOO, G. LEMAITRE, J. MASSICH, O. MOREL, F. MARZANI, R. GARCIA et F. MERIAUDEAU. “Tackling the problem of data imbalancing for melanoma classification”. In : *Bioimaging*. 2016.
- [CI-Ras+16b] M. RASTGOO, G. LEMAITRE, O. MOREL, J. MASSICH, R. GARCIA, F. MÉRIAUDEAU, F. MARZANI et D. SIDIBÉ. “Classification of melanoma lesions using sparse coded features and random forests”. In : *SPIE Medical Imaging*. 2016.

- [CI-Str+16] D. STRUBEL, M. BASTOUROUS, O. MOREL, N. M. SAAD et D. FOFI. “Sub-optimal waypoints, UAV path planning and mosaicing application”. In : *URAI - International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*. IEEE. 2016, p. 293-294.
- [CI-Ras+15b] M. RASTGOO, O. MOREL, F. MARZANI et R. GARCIA. “Ensemble approach for differentiation of malignant melanoma”. In : *QCAV - The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. International Society for Optics et Photonics. 2015, p. 953415-953415.
- [CI-Sen+15a] L. K. SENG, M. OVINIS, T. NAGARAJAN, R. SEULIN et O. MOREL. “Autonomous patrol and surveillance system using unmanned aerial vehicles”. In : *EEEIC - IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Juin 2015, p. 1291-1297.
- [CI-Sen+15b] L. K. SENG, M. OVINIS, T. NAGARAJAN, R. SEULIN et O. MOREL. “Vision-based state estimation of an unmanned aerial vehicle”. In : *WoUCON - International Conference on World of UAV*. 2015.
- [CI-Baj+13] A. BAJARD, O. AUBRETON, D. FOFI, O. MOREL, C. STOLZ, F. TRUCHETET et F. MERIAUDEAU. “Non conventional imaging systems for 3D digitization of transparent and/or specular manufactured objects”. In : *QCAV - The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. 2013.
- [CI-Mar+13] S. MARTINEZ HERRERA, A. MALTI, O. MOREL et A. BARTOLI. “Shape from polarization in laparoscopy”. In : *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*. 2013.
- [CI-NMM13] V. NAGRATH, F. MERIAUDEAU et O. MOREL. “Introducing the concept of hyperactivity in multi agent systems”. In : *CSNT - Communication Systems and Network Technologies*. 2013.
- [CI-Nag+13] V. NAGRATH, O. MOREL, A. S. MALIK, M. N. SAAD et F. MERIAUDEAU. “HTM5-Trade model for relationship based trade modelling in multi agent systems”. In : *SAI - Science and Information Conference*. IEEE. 2013, p. 188-196.
- [CI-Fof+12] D. FOFI, S. MOSADDEGH, A. E. R. SHABAYEK et O. MOREL. “An introduction to omnidirectional vision : theory and applications”. In : *SPIE Electronic Imaging*. 2012.
- [CI-Nag+12] V. NAGRATH, F. MERIAUDEAU, A. S. MALIK et O. MOREL. “Agent Relation Charts (ARCs) for modeling cloud based transactions”. In : *CSNT - Communication Systems and Network Technologies*. T. 0. Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, 2012, p. 704-709. ISBN : 978-0-7695-4692-6.

- [CI-Sha+11] A. E. R. SHABAYEK, C. DEMONCEAUX, O. MOREL et D. FOFI. “Vision based UAV attitude estimation : progress and insights”. In : *ICUAS - International Conference on Unmanned Aircraft Systems Call for Papers*. Mai 2011.
- [CI-IMM10a] M. IQBAL, O. MOREL et F. MERIAUDEAU. “Choosing local matching score method for stereo matching based-on polarization imaging”. In : *ICCAE - IEEE International Conference on Computer and Automation Engineering*. Singapore, fév. 2010, p. 334-338.
- [CI-IMM10b] M. IQBAL, O. MOREL et F. MERIAUDEAU. “Extract information of polarization imaging from local matching stereo”. In : *ICIAS - IEEE International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. Juin 2010.
- [CI-Ain+09a] S. AINOUZ, O. MOREL, S. MOSADDEGH et D. FOFI. “Adapted processing of catadioptric images using polarization imaging”. In : *ICIP - IEEE International Conference on Image Processing*. ACTi C 09- 137. 2009, p. 217-220.
- [CI-AMF08a] S. AINOUZ, O. MOREL et D. FOFI. “Image filtering in catadioptric plane”. In : *OSAV - International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision*. ACTi C 08- 82. Saint Petersburg, mai 2008.
- [CI-AMF08b] S. AINOUZ, O. MOREL et D. FOFI. “Mirror adapted matching of catadioptric image”. In : *ICIP - IEEE International Conference on Image Processing*. San Diego, California, U.S.A., oct. 2008, p. 309-312.
- [CI-Mer+08] F. MERIAUDEAU, M. FERRATON, c. STOLZ, L. BIGUÉ et O. MOREL. “Polarization imaging for industrial inspection”. In : *SPIE Electronic Imaging - Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII*. T. 6813. ACTi C 08- 96. 2008.
- [CI-MF07b] O. MOREL et D. FOFI. “Calibration of catadioptric sensors by polarization imaging”. In : *ICRA - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ACTi C 07- 37. Roma, Italy, avr. 2007.
- [CI-MSF07a] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Catadioptric camera calibration by polarization imaging”. In : *IbPRIA - Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*. Girona, Spain, juin 2007.
- [CI-MSF07b] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Measurement of the three-dimensional mirror parameters by polarization imaging applied to catadioptric camera calibration”. In : *QCAV - The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. ACTi C 07- 39. Le Creusot, France, 2007.
- [CI-Sal+07] G. SALIS, R. SEULIN, O. MOREL et F. MERIAUDEAU. “Machine vision system for the inspection of reflective parts in the automotive industry”. In : *Electronic Imaging - Machine Vision Applications in Industrial Inspection XV*. ACTi C 07- 50. San Jose, California, USA, jan. 2007.

Chapitre 1 Curriculum Vitae

- [CI-Mor+06a] O. MOREL, M. FERRATON, C. STOLZ et P. GORRIA. “Active lighting applied to shape from polarization”. In : *ICIP - IEEE International Conference on Image Processing*. ACTi C 06- 4. Atlanta, USA, oct. 2006, p. 2181-2184.
- [CI-Mor+05a] O. MOREL, F. MERIAUDEAU, C. STOLZ et P. GORRIA. “Polarization imaging applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces”. In : *SPIE Electronic Imaging - Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII, Electronic Imaging*. T. 5679. San Jose, California, USA, jan. 2005, p. 178-186.
- [CI-MSG04c] O. MOREL, C. STOLZ et P. GORRIA. “Application of polarimetric imaging to 3D inspection of highly reflective metallic surface”. In : *SPIE Optics East - Two- and Three-Dimensionale Vision Systems for Inspection, Control, and Metrology II*. T. 5606. Oct. 2004, p. 82-89.
- [CI-MSG04d] O. MOREL, C. STOLZ et P. GORRIA. “Polarization applied to 3D reconstruction of highly reflective metallic objects”. In : *OSAV - International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision*. Saint Petersburg, Russia, oct. 2004.
- [CI-Mor+03] O. MOREL, C. STOLZ, F. TRUCHETET, B. DAVID, T. CHONÉ et E. VERRECCHIA. “Characterization of the 3-D information of Calyptogena shells”. In : *QCAV - The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. T. 5132. Gatlinburg, Tennessee, USA, mai 2003, p. 296-302.
- [CI-Seu+03] R. SEULIN, O. MOREL, G. MILLON et F. NICOLIER. “Range image binarization : applications to wooden stamps analysis”. In : *QCAV - The International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. 5132. Gatlinburg, Tennessee, USA, mai 2003, p. 252-258.

Chapitres de livres

- [L-SMF12] A. E. R. SHABAYEK, O. MOREL et D. FOFI. “Visual behaviour based bio-inspired polarization techniques in computer vision and robotics”. In : sous la dir. de M. POMPLUN et J. SUZUKI. Information Science Reference, 2012. Chap. 11, p. 247-276.
- [L-Mer+11a] F. MERIAUDEAU et al. “3D scanning of transparent objects by means of non conventional imaging techniques”. Anglais. In : *Depth Map and 3D Imaging Applications : Algorithms and Technologies*. Sous la dir. de S. M. AAMIR, S. C. TAE et N. HUMAIRA. IGI Global, oct. 2011, p. 1.
- [L-Mer+11b] F. MERIAUDEAU et al. “Depth map and 3D imaging applications : algorithms and technologies”. In : sous la dir. d’A. S. MALIK. Information Science Reference, 2011. Chap. 3D Scanning of Transparent Objects by means of Non Conventional Imaging Techniques, p. 229-244.

Revue nationale avec comité de lecture

- [RN-Fof+11] D. FOFI, H. ADEMA-LABILLE, D. ARNAUD, Y. FOUGEROLLE, A. MERIAUDEAU, O. MOREL et F. MERIAUDEAU. “Promotion et Développement d’un Master Erasmus Mundus : L’exemple du VIBOT”. In : *J3eA* 10 (2011), p. 1-8.
- [RN-Ain+09b] S. AINOZ, J. ZALLAT, O. MOREL et F. MERIAUDEAU. “Filtrage physiquement admissible des images codées en polarisation moyennant un parcours fractal de type Peano-Hilbert”. In : *Trait. Signal* 26.3 (2009). ACLn C 09- 7, p. 199-211.

Conférences nationales avec comité de lecture

- [CN-Mor+04] O. MOREL, R. SEULIN, C. STOLZ et P. GORRIA. “Eclairage structuré et vision active pour le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes”. In : *Journée TSI, Eclairage structuré pour la vision active*. Le Creusot, France, Mai 2004.
- [CN-MSG04a] O. MOREL, C. STOLZ et P. GORRIA. “Application de l’imagerie polarimétrique à l’inspection de surfaces métalliques fortement réfléchissantes”. In : *Méthodes et Techniques Optiques pour l’Industrie*. T. 1. Saint Etienne, France, nov. 2004, p. 264-270.
- [CN-Sli+03a] T. SLIWA, P. BRUNET, Y. VOISIN, O. MOREL, C. STOLZ et A. DIOU. “Détection automatique des stries de croissance des arbres par transformée en ondelettes”. In : *Graphics/Vision Interface*. Halifax, Canada, juin 2003, p. 376-381.
- [CN-Mor+02] O. MOREL, C. STOLZ, F. TRUCHETET, B. DAVID, T. CHONÉ et E. VERRECCHIA. “Digitalisation d’objets 3D, application aux sciences du vivant”. In : *Méthodes et Techniques Optiques pour l’Industrie*. Saint Aubin de Médoc, France, jan. 2002, p. 439-444.

Workshops

- [W-SMF10] A. E. R. SHABAYEK, O. MOREL et D. FOFI. “Auto-calibration and 3D reconstruction with non-central catadioptric sensors using polarization imaging”. In : *OMNIVIS 2010*. 2010.
- [W-SFM09] A. E. R. SHABAYEK, D. FOFI et O. MOREL. “A novel non-central catadioptric auto-calibration approach”. In : *9th Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS’2009) - in conjunction with ICCV’2009*. Kyoto, Japan, 2009.
- [W-Mor08] O. MOREL. “Système de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique”. In : *FuturVIEW*. Grenoble, France, déc. 2008.

Chapitre 1 Curriculum Vitae

- [W-MF07a] O. MOREL et D. FOFI. “Calibrage de capteurs catadioptriques par imagerie polarimétrique”. In : *Journée vision omnidirectionnelle*. Amiens, France, 2007.

Brevet

- [B-Mor+05b] O. MOREL, C. STOLZ, P. GORRIA et R. SEULIN. *Eclairage sectorisé pour la reconstruction tridimensionnelle par imagerie polarimétrique*. Brevet 05.11674. Université de Bourgogne, nov. 2005.

Première partie

Vers un capteur
« omnipolarimétrique »

Chapitre 2

Imagerie polarimétrique

L'imagerie polarimétrique est une technique permettant de représenter les informations de polarisation issues d'un objet ou d'une scène sous forme matricielle. Initialement dédiée à des applications d'analyse purement optique, elle s'est rapidement développée ces dix dernières années avec la mise sur le marché de caméras polarimétriques. Ces dernières permettent d'envisager des applications en robotique mobile car leur taille est devenue compacte et les informations de polarisation peuvent être exploitées en temps réel. Après une brève introduction sur la polarisation de la lumière, ce chapitre présentera les formalismes mathématiques les plus communément employés en vision par ordinateur. Ensuite, nous décrirons les différentes techniques permettant d'extraire les images de polarisations en partant de la simple mesure de contraste de polarisation jusqu'à l'estimation des paramètres de polarisation. Nos contributions concernant l'exploitation de l'imagerie polarimétrique en imagerie médicale seront détaillées ainsi qu'une technique originale de calibrage de caméra polarimétrique.

2.1 Informations de polarisation

2.1.1 Modélisation des ondes

Dans les applications de vision par ordinateur qui nous concernent, la propagation de la lumière peut être modélisée par la théorie des ondes électromagnétiques planes. Dans ce cadre, la polarisation caractérise la nature vectorielle et transversale de ces ondes comme l'illustre la Figure 2.1. Une onde lumineuse se propage rectilignement selon une direction pointée par le vecteur \vec{s} . Les composantes \vec{E} et \vec{H} qui représentent respectivement les champs électriques et magnétiques sont orthogonales à \vec{s} et forment un trièdre orthogonal $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{s})$. Le vecteur transversal de l'onde qui va caractériser la polarisation de la lumière est donné par le vecteur champ électrique de l'onde électromagnétique et peut s'écrire sous la forme :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}, \quad (2.1)$$

où \vec{r} est le vecteur déplacement, ω la pulsation de l'onde et \vec{k} est le vecteur d'onde faisant intervenir la longueur d'onde λ selon la relation $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{s}$.

En choisissant un repère direct tel que \vec{s} soit orienté selon l'axe z , la projection du champ électrique \vec{E} sur les axes x et y donne :

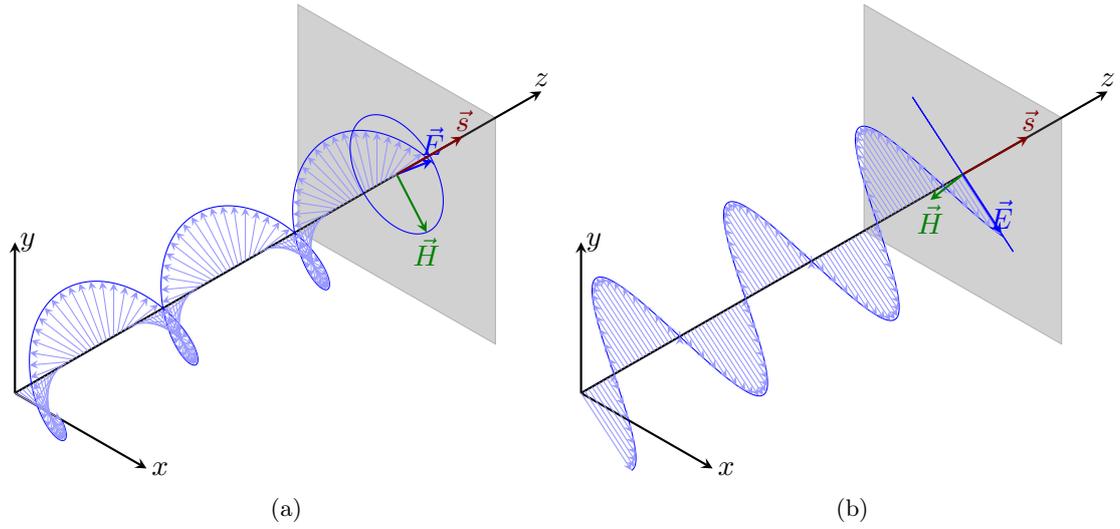


FIGURE 2.1 – Propagation d’une onde électromagnétique : cas particuliers de la polarisation linéaire (a) et de la polarisation circulaire (b).

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_x), \\ E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_y), \end{cases} \quad (2.2)$$

La phase de l’onde est définie par la différence entre les phases : $\delta = \delta_y - \delta_x$. Dans le cas d’une onde non polarisée, la phase $\delta(t)$ est aléatoire, contrairement à une onde polarisée pour laquelle la phase est constante : $\frac{d\delta}{dt} = 0$. Dans ce dernier cas, l’onde est polarisée elliptiquement car la projection du champ électrique \vec{E} projetée dans le plan orthogonal à la direction de propagation décrit une ellipse. Deux cas dégénérés peuvent apparaître en fonction de la valeur de la phase de l’onde δ provoquant une polarisation linéaire ou circulaire :

1. polarisation linéaire
 $\delta = m\pi$ avec $m \in \mathbb{Z}$.
2. polarisation circulaire
 $\begin{cases} E_{0x} = E_{0y}, \\ \delta = (2m + 1)\frac{\pi}{2} \end{cases}$ avec $m \in \mathbb{Z}$.

Dans le cas le plus général, une onde polarisée est polarisée elliptiquement et son équation (2.2) dans le plan transverse peut s’écrire également sous la forme :

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos \varphi \cos(\tau + \delta_x), \\ E_y = E_0 \sin \varphi \cos(\tau + \delta_y), \end{cases} \quad (2.3)$$

où $E_0^2 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2$ représente l’intensité lumineuse de l’onde, et φ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) est l’angle défini tel que :

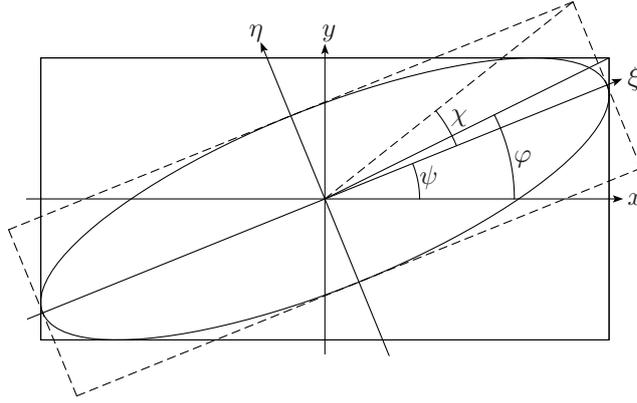


FIGURE 2.2 – Projection d'une onde plane elliptiquement polarisée dans le plan transverse.

$$\tan \varphi = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}. \quad (2.4)$$

L'angle φ et le déphasage $\delta = \delta_y - \delta_x$ permettent de décrire complètement la forme de l'ellipse comme le montre la Figure 2.2. Un autre formalisme pour décrire l'ellipse consiste à introduire les angles ψ et χ qui représentent respectivement l'orientation du grand axe de l'ellipse et l'ellipticité. Les relations permettant de passer d'un modèle à l'autre sont données par :

$$\begin{cases} \tan 2\psi = \tan 2\varphi \cos \delta, \\ \sin 2\chi = -\sin 2\varphi \sin \delta. \end{cases} \quad (2.5)$$

2.1.2 Formalisme de Stokes

Dans la pratique, les ondes lumineuses ne sont ni complètement polarisées, ni complètement non polarisées : elles sont partiellement polarisées. Le formalisme de Stokes offre l'avantage de décrire complètement les paramètres d'une onde partiellement polarisée. Ces paramètres sont au nombre de quatre et regroupés dans un vecteur :

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Le paramètre s_0 représente l'intensité totale et vérifie :

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2. \quad (2.7)$$

Les paramètres s_1 , s_2 représentent respectivement les différences d'intensité entre les composantes linéairement polarisées à 0° et 90° , et à 45° et 135° . Le paramètre s_3 est la différence d'intensité entre les composantes circulaires droite et gauche.

Onde parfaitement polarisée

Dans le cas où l'onde est parfaitement polarisée, le paramètre s_0 devient redondant, car il est lié aux autres paramètres par :

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2. \quad (2.8)$$

Onde non polarisée

Une onde non polarisée peut être définie uniquement à partir de son intensité lumineuse I : ainsi seul le premier paramètre de Stokes est non nul donnant :

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Onde partiellement polarisée

Une onde partiellement polarisée \mathbf{s} peut être décrite par la superposition d'une onde complètement polarisée $\mathbf{s}^{(1)}$ avec une onde complètement non polarisée $\mathbf{s}^{(2)}$:

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}^{(1)} + \mathbf{s}^{(2)}. \quad (2.10)$$

Les paramètres de Stokes des deux ondes deviennent :

$$\mathbf{s}^{(1)} = \begin{bmatrix} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}^{(2)} = \begin{bmatrix} s_0 - \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Le degré de polarisation de l'onde partiellement polarisée ρ est défini par :

$$\rho = \frac{I_{pol}}{I} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}. \quad (2.12)$$

I_{pol} et I représentent respectivement l'intensité polarisée et l'intensité totale. Le degré de polarisation de l'onde varie entre 0 et 1, et indique la proportion de lumière complètement polarisée. Le degré de polarisation vaut 0 pour une onde aléatoire, et 1 pour une onde parfaitement polarisée linéairement ou elliptiquement. Afin de retrouver les paramètres de l'ellipse de la composante polarisée, l'expression des paramètres du vecteur de Stokes peut s'écrire sous les différentes formes :

$$\begin{cases} s_0 = I_{tot}, \\ s_1 = I_{pol} \cos 2\varphi, \\ s_2 = I_{pol} \sin 2\varphi \cos \delta, \\ s_3 = I_{pol} \sin 2\varphi \sin \delta. \end{cases} \quad \begin{cases} s_0 = I_{tot}, \\ s_1 = I_{pol} \cos 2\chi \cos 2\psi, \\ s_2 = I_{pol} \cos 2\chi \sin 2\psi, \\ s_3 = I_{pol} \sin 2\chi. \end{cases} \quad (2.13)$$

Nous en déduisons les valeurs du déphasage δ , et de l'angle φ de la composante polarisée en fonction des paramètres de Stokes :

$$\delta = \arctan \frac{s_3}{s_2}, \quad \varphi = \frac{1}{2} \arccos \frac{s_1}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}. \quad (2.14)$$

Et de la même manière, nous pouvons déterminer l'ellipticité χ et l'angle ψ du grand axe de l'ellipse :

$$\chi = \frac{1}{2} \arcsin \frac{s_3}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}, \quad \psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{s_2}{s_1}. \quad (2.15)$$

2.1.3 Matrices de Mueller

L'étude de l'interaction d'une onde lumineuse avec des matériaux ou des particules peut être facilitée grâce à l'utilisation des matrices dites de Mueller. Ces dernières permettent de décrire les effets d'un système optique linéaire (polariseurs, lames retardatrices) ou de modéliser des phénomènes optiques (diffusion, réflexion) et de prédire l'état de polarisation d'une onde lumineuse en sortie. Les paramètres de Stokes de l'onde lumineuse résultante de l'interaction \mathbf{s}' est donné par le produit matriciel de la matrice de Mueller M du système par le vecteur de Stokes de l'onde incidente \mathbf{s} :

$$\mathbf{s}' = M \cdot \mathbf{s}, \quad (2.16)$$

soit :

$$\begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Tout vecteur de taille 4×1 ne représente pas forcément un vecteur de Stokes car l'inégalité de l'équation (2.7) doit être respectée. De la même manière, toute matrice réelle de taille 4×4 n'est pas nécessairement une matrice de Mueller et les critères suivants doivent être vérifiés :

- la matrice de Mueller doit transformer un vecteur de Stokes en un vecteur de Stokes respectant l'inégalité (2.7),
- l'inégalité $\text{tr}(MM^t) = \sum_{i,j=1}^4 m_{ij}^2 \leq 4m_{11}^2$ doit être respectée [FK81],
- pour toute matrice de Mueller physique : $|m_{ij}| \leq m_{11}$ [Bro98].

Propriétés

Une première propriété de ce formalisme concerne la modélisation d'une succession de composants optiques. En effet, la matrice de Mueller M décrivant l'interaction d'une succession de n composants optiques de 1 à n est donnée par le produit des matrices de Mueller de chaque élément selon :

$$M = M_n \cdot M_{n-1} \cdots M_2 \cdot M_1. \quad (2.18)$$

Une deuxième particularité des matrices de Mueller intervient lors du changement de repère dans le plan Oxy . La matrice de Mueller M' d'un composant optique tourné d'un angle ϕ dans ce plan peut être calculée à partir de la matrice M selon :

$$M' = R_{rota}(\phi) \cdot M \cdot R_{rota}(-\phi) \quad (2.19)$$

où R est la matrice de rotation donnée par l'expression :

$$R_{rota}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ 0 & \sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Exemple de matrice : cas du polariseur linéaire parfait

Un polariseur linéaire ou rectiligne est un composant optique qui polarise toute onde incidente selon un axe privilégié. Historiquement, les propriétés de la polarisation ont été révélées par les cristaux biréfringents. Ceux-ci possèdent deux indices de réfraction. Un rayon incident est réfracté selon deux rayons : un rayon ordinaire polarisé orthogonalement au plan plan d'incidence, et un rayon extraordinaire polarisé dans le plan d'incidence. Les cristaux sont taillés ou agencés de manière à obtenir deux rayons sortants polarisés linéairement suivant deux directions différentes. Certains cristaux peuvent être également dichroïques. Cette propriété caractérise les matériaux possédant différents coefficients d'absorption pour les rayons polarisés selon différentes orientations. Les feuilles plastiques polarisantes, comme les Polaroids, appliquent ce principe : elles sont constituées d'une suspension de très petits cristaux dichroïques dans une matière plastique transparente, orientés selon une seule direction.

La matrice de Mueller d'un polariseur linéaire parfait orientée selon un angle α est donnée par :

$$M_{pola}(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Le livre [Gol03] présente de nombreux exemples de matrices de Mueller ainsi qu'une description détaillée de l'ensemble des propriétés des matrices de Mueller.

2.2 Polarimétrie de Stokes incomplète

2.2.1 Principe

Dans la nature, la lumière qui est polarisée est généralement partiellement linéairement polarisée. La polarisation est obtenue soit par la réflexion de la lumière naturelle par une surface réfléchissante, soit par diffusion. Dans ce cas, la polarimétrie de Stokes incomplète vise à estimer les trois premiers paramètres du vecteur de Stokes en faisant

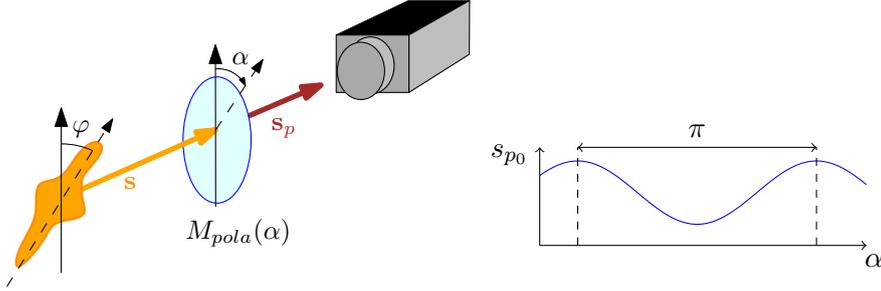


FIGURE 2.3 – Principe de l'estimation des paramètres de polarisation d'une onde partiellement polarisée à l'aide d'un filtre polariseur tournant placé devant le photodétecteur. L'intensité mesurée s_{p0} varie de manière sinusoïdale en fonction de l'angle du polariseur α .

l'hypothèse que la lumière dont on souhaite extraire les caractéristiques n'a pas de composante elliptique ($\chi = 0$). Dans ce cas, le vecteur de Stokes introduit équation (2.6) s'écrit :

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

La mesure des paramètres de polarisation peut s'obtenir en plaçant un filtre polariseur linéaire tournant devant le photorécepteur comme le montre la Figure 2.3. Pour déterminer la nature de l'onde en sortie du filtre polariseur tournant, il suffit d'exprimer le produit matriciel entre la matrice de Mueller du filtre polariseur et le vecteur de Stokes de l'onde incidente : $\mathbf{s}_p = M_{pola}(\alpha) \cdot [s_0 \ s_1 \ s_2 \ 0]^t$. Le photodétecteur n'étant sensible qu'à l'intensité lumineuse, seul le premier paramètre s_{p0} du vecteur de Stokes sortant \mathbf{s}_p est mesuré :

$$s_{p0} = \frac{1}{2} (s_0 + s_1 \cos 2\alpha + s_2 \sin 2\alpha), \quad (2.23)$$

où α est l'angle du filtre polariseur tournant. Ainsi, la polarimétrie de Stokes revient à faire varier l'angle du filtre polariseur α afin d'obtenir plusieurs équations liant l'intensité lumineuse mesurée par le photodétecteur aux paramètres de polarisation s_0 , s_1 et s_2 à estimer. Comme le montre la Figure 2.3, l'intensité mesurée varie de manière sinusoïdale en fonction de l'angle du filtre polariseur. Historiquement, les précurseurs de la polarimétrie de Stokes [WA95] utilisaient trois mesures pour des valeurs d'angles (0° , 45° , 90°). L'utilisation de deux angles orthogonaux offrait l'avantage de pouvoir créer un imageur utilisant un cube séparateur et proposer un imageur polarimétrique plus rapide [WA95; Wol+97; TD01]. La réponse sinusoïdale étant périodique de période 180° , en se limitant à trois mesures, il apparaît évident que la combinaison (0° , 60° , 120°) est plus optimale [Tyo98]. L'augmentation du nombre de mesures améliore l'estimation des paramètres de Stokes et une estimation minimisant l'erreur des moindres carrés peut être employée dans ce cas.

En effectuant n acquisitions avec une orientation à chaque fois distincte du filtre polariseur, nous pouvons écrire le système suivant :

$$\begin{bmatrix} s_{p0,1} \\ s_{p0,2} \\ \vdots \\ s_{p0,n} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha_1 & \sin 2\alpha_1 \\ 1 & \cos 2\alpha_2 & \sin 2\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & s_1 \cos 2\alpha_n & \sin 2\alpha_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

En notant $\mathbf{y} = [s_{p0,1}, s_{p0,2}, \dots, s_{p0,n}]^t$, et $\mathbf{x} = [s_0, s_1, s_2]^t$, ce système peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{y} = M \cdot \mathbf{x}, \quad (2.25)$$

avec M la matrice définie par :

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha_1 & \sin 2\alpha_1 \\ 1 & \cos 2\alpha_2 & \sin 2\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & s_1 \cos 2\alpha_n & \sin 2\alpha_n \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

La solution du système linéaire (2.25) minimisant les moindres carrés est donnée par :

$$\mathbf{x} = (M^t M)^{-1} M^t \cdot \mathbf{y}. \quad (2.27)$$

2.2.2 Images de polarisation

Les images de polarisation consistent en l'évaluation des paramètres de polarisation en tout point d'un imageur en utilisant la méthode précédemment présentée. Dans le cas de la polarimétrie incomplète, les images représentant l'intensité I , le degré ρ et l'angle φ de polarisation sont souvent préférées aux images représentant les 3 premiers paramètres du vecteur de Stokes (s_0, s_1, s_2). Le passage d'un mode de représentation à l'autre s'effectue à l'aide des formules suivantes :

$$\begin{cases} I & = s_0 \\ \rho & = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \\ \varphi & = \arctan(s_2, s_1) \end{cases}. \quad (2.28)$$

Représentation couleur

La volonté de représenter les informations de polarisation sur une seule et même image a conduit au développement de plusieurs méthodes de mise en correspondance entre l'espace des paramètres de polarisation et l'espace des couleurs [WA95 ; TEE98]. La plus commune est celle proposée par [WA95] qui propose une transformation entre le triplet

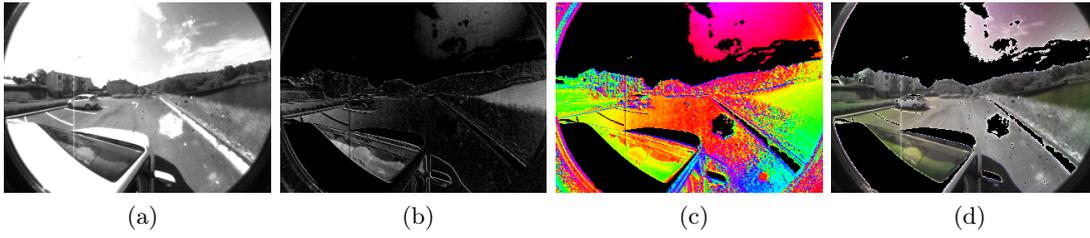


FIGURE 2.4 – Représentation des paramètres de polarisation : (a) intensité, (b) degré de polarisation, (c) angle de polarisation (palette de couleur HSL), (d) image couleur résultante.

(φ, I, ρ) et le codage (H, L, S) (Teinte, Luminance, Saturation) selon :

$$\begin{aligned} 2\varphi &\rightarrow H, \\ I &\rightarrow L, \\ \rho &\rightarrow S. \end{aligned} \quad (2.29)$$

L'angle de polarisation φ étant π -périodique, il est multiplié par deux afin d'être en cohérence avec la teinte qui est 2π -périodique. Dans ce cas, la couleur d'un pixel représente l'angle de polarisation de la lumière incidente, et la saturation du pixel représente le degré de polarisation. Un pixel peu coloré est ainsi caractéristique d'une polarisation très faible.

Sur les images présentées Figure 2.4, nous remarquons que la lumière polarisée de la scène est produite par deux phénomènes physiques différents. A partir de l'image du degré de polarisation, nous constatons dans un premier temps que la lumière réfléchiée par le lac (à gauche de l'image) et par la fenêtre du véhicule produit de la lumière polarisée par réflexion. Dans un second temps, nous pouvons remarquer que la lumière diffusée par le ciel devient également polarisée. L'image de l'angle de polarisation indique des orientations de polarisation qui sont différentes dans ce cas.

Auto-calibrage

Pour des imageurs nécessitant l'acquisition de nombreuses images d'intensité en faisant varier l'orientation d'un filtre polariseur, Y. Schechner [Sch15] propose une méthode d'auto-calibrage permettant de s'affranchir de la connaissance précise des différentes valeurs d'angle du polariseur. En supposant que l'imageur contient m pixels, l'ensemble des mesures effectuées sur chacun des pixels peut être représenté par la matrice :

$$D = \begin{bmatrix} s_{p_0,1,1} & s_{p_0,1,2} & \cdots & s_{p_0,1,m} \\ s_{p_0,2,1} & s_{p_0,2,2} & \cdots & s_{p_0,2,m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ s_{p_0,n,1} & s_{p_0,n,1} & \cdots & s_{p_0,n,m} \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Ainsi le système d'équations (2.24) peut se généraliser sous la forme :

$$D = M \cdot O, \quad (2.31)$$

avec la matrice O contenant l'ensemble des paramètres de Stokes de chaque pixel à estimer :

$$O = \begin{bmatrix} s_{0,1} & s_{0,2} & \cdots & s_{0,m} \\ s_{1,1} & s_{1,1} & \cdots & s_{1,m} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,m} \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

L'estimation conjointe des paramètres de Stokes de chaque pixel et de l'angle du polariseur ne pourra pas se faire sans ambiguïté. En effet, si chaque mesure est décalée d'un offset identique, l'équation (2.23) ne sera pas affectée par ce biais et le décalage ne pourra pas être estimé. L'estimation des paramètres peut être établie relativement par rapport à la première position du filtre polariseur et par conséquent la matrice M s'écrit dans ce cas :

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos 2\alpha_2 & \sin 2\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos 2\alpha_n & \sin 2\alpha_n \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

Avec cette nouvelle définition de M , le système (2.31) possède $n \cdot m$ mesures et $(n-1+3m)$ inconnus à estimer conduisant à imposer :

$$n \cdot m \geq n - 1 + 3m. \quad (2.34)$$

Dans la pratique cette inégalité est généralement satisfaite et l'auteur [Sch15] décrit une méthode d'optimisation applicable dans ce cas.

2.3 Exemples d'applications de la polarimétrie de Stokes incomplète

Les applications de la polarimétrie de Stokes incomplètes sont très nombreuses en vision par ordinateur. En effet, les paramètres de polarisation sont liés aux caractéristiques propres de la surface et il est possible d'en extraire des informations d'orientation ou d'en connaître la nature, diffuse ou spéculaire [Wol90]. Sur une surface spéculaire, une lumière incidente non polarisée se réfléchit partiellement linéairement polarisée et la normale à la surface peut être déduite du vecteur de Stokes incomplet. Cette dernière propriété est exploitée dans les techniques de « Shape from Polarization » [MKI04; Mor+06; AH08]. Contrairement aux surfaces spéculaires où la polarisation est orthogonale au plan d'incidence, les surfaces diffuses produisent de la lumière partiellement linéairement polarisée parallèle au plan d'incidence. Cette caractéristique est également utilisée pour améliorer la reconstruction 3D de scènes par stéréovision [Cui+17] ou dans le cas de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) monoculaire dense [Yan+18]. L'imagerie de Stokes incomplète peut être également employée dans des longueurs d'onde compatibles avec l'imagerie thermique pour de la reconnaissance faciale ou de la détection de cibles [GF12; GYV14]. L'article [Sni+14] propose un aperçu relativement complet des différentes applications de l'imagerie polarimétrique liées à la télédétection ou à l'étude des propriétés de surfaces. Les applications dédiées à la robotique mobile seront détaillées plus loin dans le manuscrit.

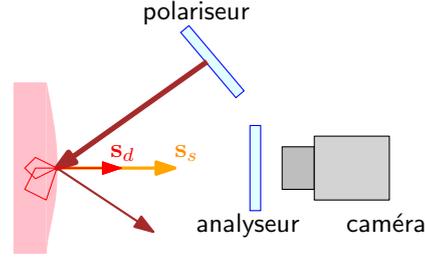


FIGURE 2.5 – Montage utilisant une source lumineuse linéairement polarisée : la lumière perçue par la caméra est composée d’une réflexion issue d’une pénétration superficielle \mathbf{s}_s qui reste linéairement polarisée et d’une réflexion non-polarisée \mathbf{s}_d issue d’une pénétration plus importante. L’analyseur placé devant la caméra est orienté parallèlement puis perpendiculairement par rapport au polariseur de l’onde incidente.

2.3.1 Imagerie polarimétrique de la peau

Dans le domaine biomédicale, Jacques et al. [JRL02] ont été parmi les premiers chercheurs à considérer l’imagerie polarimétrique pour l’imagerie de la peau pour l’étude des brûlures. Dans leurs travaux, un éclairage linéairement polarisé est utilisé et l’étude des pathologies de la peau est réalisée à l’aide d’un dermoscope muni d’un filtre polariseur appelé ici analyseur comme le montre la Figure 2.5.

La lumière pénétrant superficiellement puis réfléchi \mathbf{s}_s reste linéairement polarisée selon la même direction que le filtre polariseur de la source lumineuse alors que la lumière \mathbf{s}_d qui pénètre plus fortement dans la peau se dépolarié du fait des nombreux phénomènes de diffusion dans les tissus. Les vecteurs de Stokes caractérisant ce phénomène peuvent s’écrire :

$$\begin{cases} \mathbf{s}_s &= I_0 T_{mel} R_s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{s}_d &= I_0 T_{mel} R_d \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \end{cases} \quad (2.35)$$

où I_0 représente l’intensité lumineuse incidente, T_{mel} définit le taux d’absorption lié au taux de mélamine dans l’épiderme et R_s et R_d décrivent respectivement les proportions de lumière réfléchies suite à une pénétration superficielle et profonde. Lorsque l’analyseur est orienté parallèlement puis orthogonalement au polariseur de la source lumineuse incidente les vecteurs de Stokes correspondants sont donc donnés par :

$$\begin{cases} \mathbf{s}_{\parallel} &= M_{pola}(0^\circ) \cdot I_0 T_{mel} \begin{bmatrix} R_s + R_d & R_s & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{s}_{\perp} &= M_{pola}(90^\circ) \cdot I_0 T_{mel} \begin{bmatrix} R_s + R_d & R_s & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \end{cases} \quad (2.36)$$

Ainsi, les deux images I_{\parallel} et I_{\perp} correspondantes au premier paramètre du vecteur de Stokes s’écrivent :

$$\begin{cases} I_{\parallel} &= I_0 T_{mel} (R_s + \frac{1}{2} R_d) \\ I_{\perp} &= I_0 T_{mel} \frac{1}{2} R_d \end{cases}. \quad (2.37)$$

De ces deux images, les auteurs calculent le ratio suivant :

$$Pol = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = \frac{R_s}{R_s + R_p}. \quad (2.38)$$

Ce ratio permet de mettre en évidence la réflectance issue d'une pénétration superficielle par rapport à la réflectance totale de la lumière pénétrante tout en s'affranchissant de l'intensité initiale de la source lumineuse et du taux d'absorption T_{mel} . Par rapport au modélisme de Stokes présenté dans ce chapitre, cela revient à mesurer les deux premiers paramètres du vecteur de Stokes de $\mathbf{s}_s + \mathbf{s}_d$ et à calculer $Pol = \frac{s_1}{s_0}$.

2.3.2 Classification de mélanomes

Dans le cadre de la thèse de Mojdeh [Ras16] portant sur la classification de mélanomes à partir des images de polarisation, nous avons étendu la précédente méthode en incluant la mesure des trois premiers paramètres de Stokes. Le premier avantage du système proposé est de s'affranchir d'un alignement parfait entre le filtre polariseur de la source lumineuse et les angles de polarisation de l'analyseur. La mise en œuvre du système est ainsi facilitée et permet par ailleurs d'envisager d'autres orientations possibles pour le filtre polariseur de la source lumineuse sans avoir à recalibrer la caméra. En supposant que la différence d'angle entre le filtre polariseur de la source et l'origine de l'analyseur est θ , nous pouvons écrire le vecteur de Stokes de la lumière réfléchiée en utilisant la matrice de rotation définie en (2.20) :

$$\mathbf{s}_s + \mathbf{s}_d = I_0 T_{mel} \cdot \begin{bmatrix} R_d + R_s \\ R_s \cos 2\theta \\ -R_s \sin 2\theta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Par conséquent, le facteur exploité précédemment est directement égal au degré de polarisation de la lumière réfléchiée :

$$Pol = \rho = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}. \quad (2.40)$$

Le prototype de dermoscope polarimétrique présenté Figure 2.6 a été testé dans une unité spécialisée de l'hôpital clinique de Barcelone pendant les trois années de la thèse. Durant cette période, 197 images polarimétriques de lésions ont été acquises. Dans cet ensemble, 141 images ont été évaluées bénignes sans analyse histopathologique et 56 lésions étaient accompagnées d'une analyse histopathologique révélant, suite à une biopsie, 34 lésions classées comme mélanomes. Le système d'acquisition se devait d'être automatique car les captures des images étaient effectuées par les docteurs de l'hôpital. Ainsi, une fois l'objectif placé sur la lésion à analyser, après appui sur un bouton, le système d'éclairage est activé et l'acquisition des images est effectuée automatiquement grâce au moteur commandant le filtre polariseur pour les positions 0° , 45° et 90° .

La Figure 2.7 présente les paramètres de polarisation mesurés sur un mélanome. L'image du degré de polarisation montre comment la pénétration de la lumière en profondeur est limitée au niveau de la lésion cutanée. L'image de l'angle de polarisation

2.3 Exemples d'applications de la polarimétrie de Stokes incomplète

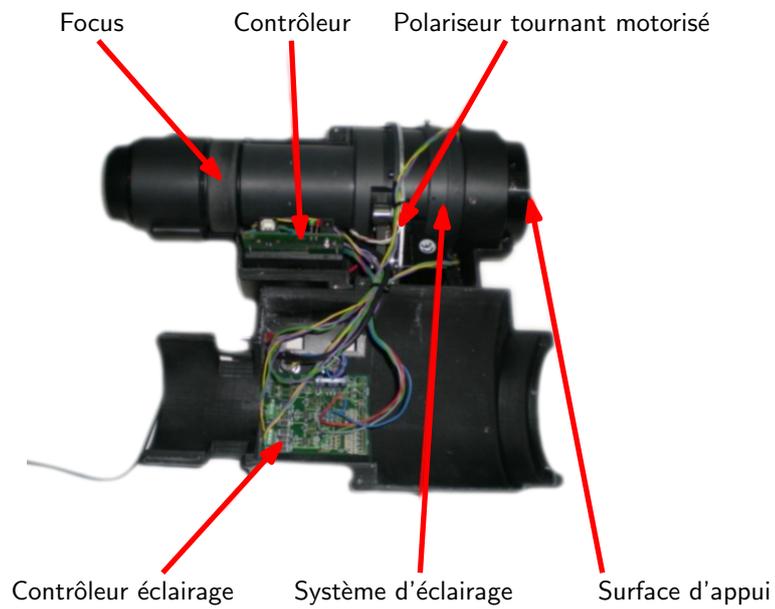


FIGURE 2.6 – Prototype de dermoscope utilisé pour l'acquisition des images polarimétriques : objectif à monter sur appareil photo numérique.

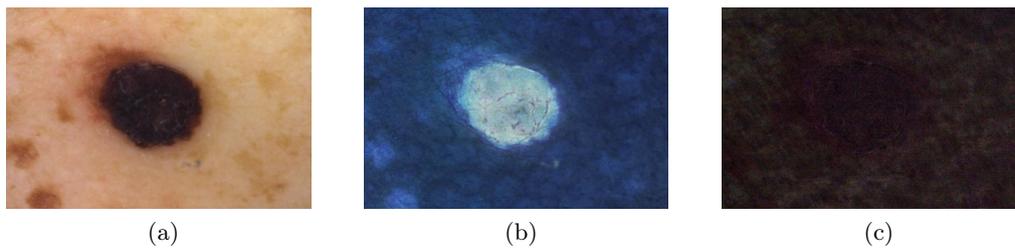


FIGURE 2.7 – Images de polarisation d'un mélanome : (a) intensité, (b) degré de polarisation, (c) angle de polarisation.

apporte peu d'information puisque après pénétration et réflexion il n'y a pas de changement d'angle de polarisation. Les images polarimétriques ne permettent évidemment pas à elles seules de discriminer une lésion bénigne d'un mélanome. Pour le pronostic clinique du mélanome à un stade précoce l'inspection visuelle s'effectue sur la base d'un ensemble de directives telle que la règle « ABCDE [Abb+04]. Le travail de thèse de Mojdeh s'inscrit dans un travail plus large avec le développement d'un classifieur automatique exploitant également les paramètres de couleur, forme et texture des images [Ras+15].

2.4 Autres mesures de polarisation

Le domaine de l'imagerie polarimétrique n'est pas limité à l'estimation des trois premiers paramètres du vecteur de Stokes même si ils suffisent à complètement caractériser une onde partiellement linéairement polarisée, ce qui sera notre cas par la suite. La polarimétrie de Stokes complète et la polarimétrie de Mueller sont néanmoins rapidement présentées ici à titre informatif.

2.4.1 Polarimétrie de Stokes complète

Pour déterminer tous les paramètres de Stokes d'une onde lumineuse, un filtre polariseur tournant devant un imageur n'est plus suffisant. Il est nécessaire d'ajouter un composant optique tel une lame retard permettant de déphaser une onde linéairement polarisée. Ce type de retardateur est généralement fabriqué à partir d'une lame mince biréfringente à faces parallèles. Dans le cas d'une lumière polarisée rectilignement, la biréfringence sépare les vibrations suivant les deux axes principaux de la lame. La différence d'indice entre les axes principaux de la lame conduit à un déphasage de l'une des composantes par rapport à l'autre.

D'une manière générale, la détermination des composantes du vecteur de Stokes de l'onde analysé s'effectue à l'aide d'un dispositif appelé PSA (Polarization States Analyzer) constitué d'une série d'éléments optiques réglables associé à un détecteur d'intensité. Les retardateurs à cristaux liquides sont souvent employés car le retard est modulable en changeant une consigne électrique. Le dernier élément optique du dispositif est généralement un polariseur linéaire fixe. En effectuant n mesures d'intensité I_1, \dots, I_n en changeant les paramètres du PSA, on obtient le système linéaire suivant :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}}_I = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

où les $[a_{i1} \ a_{i2} \ a_{i3} \ a_{i4}]$ représentent la première ligne de la matrice de Mueller du PSA pour la $i^{\text{ème}}$ configuration du système. Si le nombre de mesures n est supérieur à 4, de la même manière que pour le polarimètre de Stokes incomplet, une solution minimisant

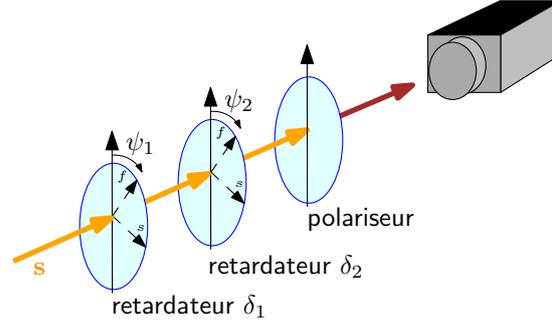


FIGURE 2.8 – Exemple de PSA (Polarization States Analyzer) constitué d’un filtre polariseur linéaire fixe et de deux retardateurs variables à cristaux liquides de retard δ_1 et δ_2 . Les orientations des retardateurs ψ_1 et ψ_2 sont fixes.

l’erreur des moindres carrées est donnée par :

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = (A^t A)^{-1} A^t I. \quad (2.42)$$

Une configuration possible de PSA constitué d’un filtre polariseur linéaire fixe et de deux retardateurs variables à cristaux liquides est illustrée Figure 2.8. Dans ce cas, les retards δ_1 et δ_2 sont variables et peuvent être choisis de manière à améliorer le conditionnement de la matrice A [Ty00].

Une autre approche pour l’estimation du vecteur de Stokes complet en tout point d’une image consiste à utiliser une caméra polarimétrique couplée à un retardateur [RBG19]. La mesure s’effectue dans ce cas à partir de deux acquisitions consécutives.

2.4.2 Polarimétrie de Mueller

La polarimétrie de Mueller a pour objectif de déterminer l’ensemble des 16 coefficients de la Matrice de Mueller d’un échantillon. Contrairement à la polarimétrie de Stokes où l’on détermine les propriétés d’une onde lumineuse réfléchie, transmise ou diffusée par un objet afin d’en déduire certaines caractéristiques, cette technique présente l’avantage d’obtenir une caractéristique optique complète de l’objet. Afin de mesurer les 16 coefficients, le polarimètre de Mueller doit être constitué d’un PSG (Polarization State Generator) afin de générer divers états de polarisation pour la source de lumière incidente. La mesure de la matrice de Mueller peut être réalisée soit en réflexion, soit en transmission en fonction de l’application visée. Les principaux domaines d’applications de la polarimétrie de Mueller concernent l’électronique avec la mesure de couches minces [Gar+13] ainsi que le biomédical avec l’aide au diagnostic [Ant+10; Dub+12; Pie+13]. La mise en œuvre de la polarimétrie de Mueller est plus délicate à mettre en œuvre puisqu’elle impose de maîtriser parfaitement l’état de polarisation de la lumière incidente et requiert un minimum de 16 mesures pour caractériser complètement l’échantillon.

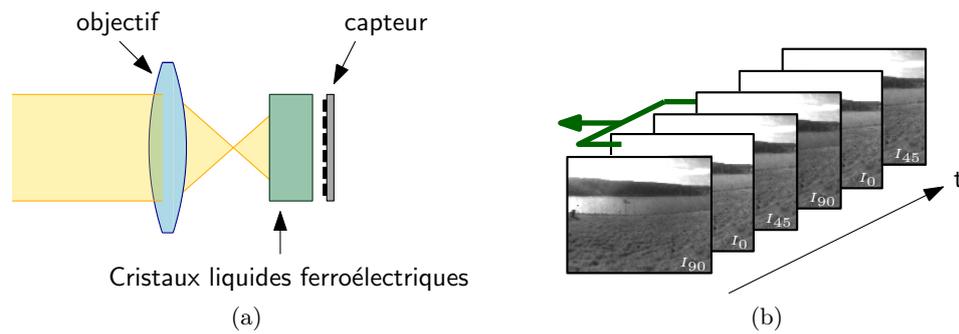


FIGURE 2.9 – Principe de fonctionnement d’une caméra DoT : (a) utilisation de cristaux liquides ferroélectriques permettant de faire varier rapidement les paramètres de l’analyseur, (b) 3 images consécutives sont exploitées pour déterminer les paramètres de polarisation.

2.5 Caméras polarimétriques

Les premières mesures d’images de polarisation nécessitaient l’utilisation de bancs optiques spécifiques faisant intervenir un filtre polariseur tournant mécaniquement ou une lame retard variable à cristaux liquides associée à un filtre polariseur fixe. Ces mesures ne permettaient pas d’acquisition en temps réel des images de polarisation. Depuis une dizaine d’année, des intégrateurs de système de vision ou des fabricants de caméras proposent sur le marché des caméras prêtes à l’emploi permettant dans la plupart des cas de fournir des images de polarisation en temps réel. D’une manière générale, les capteurs d’image de polarisation peuvent être classés selon quatre grandes catégories [Tyo+06] qui seront détaillées dans cette section.

2.5.1 DoT (Division of Time)

La catégorie DoT regroupe les méthodes de mesure classiques décrites plus haut pour lesquelles les informations de polarisation sont obtenues en faisant varier au cours du temps soit l’angle du filtre polariseur, soit le retard des cellules à cristaux liquides [Sol81 ; Wol+97 ; Mor+06 ; GFB10]. Comme illustré par la Figure 2.9, par construction, ce type de montage n’autorise pas une mesure en temps-réel. Le constructeur Bossa Nova Vision propose néanmoins un modèle de caméra utilisant des cristaux liquides ferroélectriques rapides permettant une mesure rapide des paramètres de polarisation [VBL11].

2.5.2 DoA (Division of Aperture)

Principalement employés en détection de cibles dans l’infrarouge lointain, les imageurs DoA [PC05 ; Har+08 ; Mu+15] utilisent une division d’ouverture permettant de séparer le faisceau incident en quatre éléments qui traversent indépendamment un analyseur optique différent. Les quatre faisceaux résultant sont ensuite imagés sur un seul plan focal à l’aide de lentilles parfaitement alignées (Figure 2.10). Les inconvénients de cette

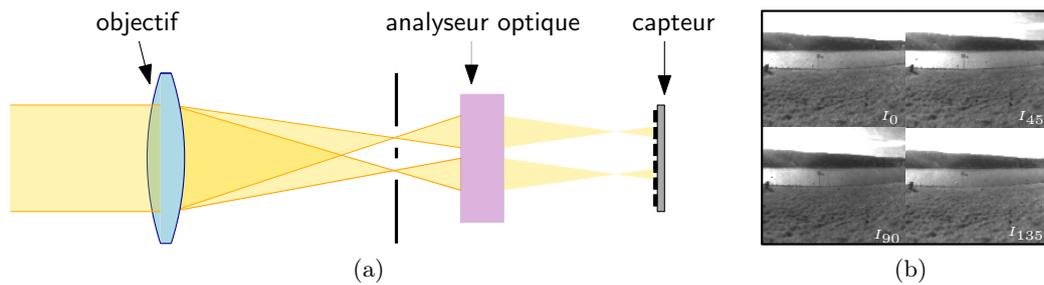


FIGURE 2.10 – Principe de fonctionnement d’une caméra DoA : (a) après la séparation des faisceaux ceux-ci sont ré-imaginés sur le même plan focal, (b) une image est constituée de 4 sous-images.

méthode concerne la division de résolution spatiale par deux ainsi que le volume et le poids des composants optiques.

2.5.3 DoAm (Division of Amplitude)

La technique de DoAm [Azz85 ; Bar+97 ; TD01] consiste en la séparation du faisceau incident sur trois ou quatre plans focaux distincts à l’aide de cubes séparateurs comme le montre la Figure 2.11. Cette méthode a été historiquement développée afin de permettre l’acquisition en temps réel des images de polarisations. L’alignement des cubes séparateurs employés exige une précision très importante afin de permettre une superposition parfaite des images de polarisation. La société Fluxdata propose une caméra utilisant ce principe.

2.5.4 DoFP (Division of Focal Plane)

Les caméras utilisant la division de plans focaux (DoFP) sont constituées d’un seul plan focal sur lequel une grille de filtres polariseurs est appliquée : sur chacun des pixels de l’imageur une orientation spécifique du filtre polariseur est déterminée. Wolff et Andreou [WA95] ont été les précurseurs du domaine en proposant un prototype constitué de 128 pixels présentant une alternance de filtres polariseurs orientés selon les directions 0° , 45° et 90° . Les grilles de micro-polariseurs présentent désormais un assemblage de filtres polariseurs orientés suivant les angles 0° , 45° , 90° et 135° [Nor+99 ; GB00]. Tout comme dans le cas des imageurs DoA, les caméras DoFP ont une perte de résolution spatiale par deux. Afin de remédier à cette perte de résolution, de nombreux algorithmes d’interpolation ont été développés [RLT09 ; GG13 ; Ahm+17 ; Li+19].

2.5.5 Conclusion

Les caractéristiques des différents imageurs polarimétriques peuvent être résumées à l’aide du tableau 2.1. Pour des applications liées à la robotique mobile, même si leur résolution est moindre les caméras DoFP sont les plus adaptées puisque elles présentent

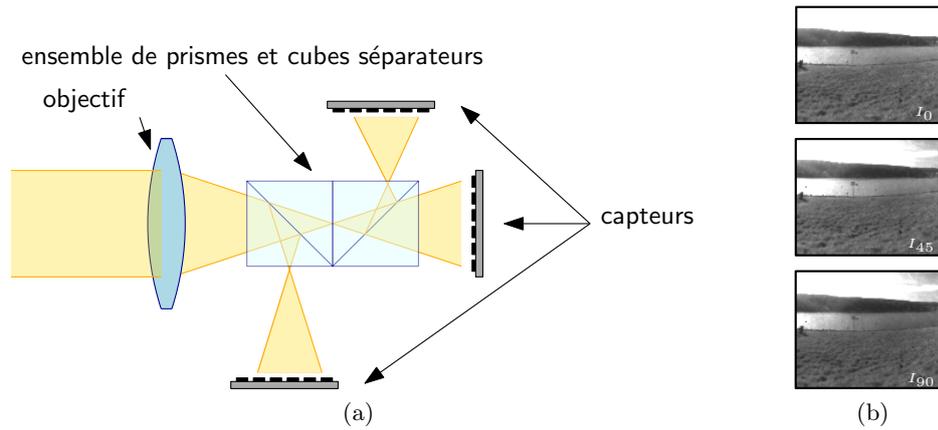


FIGURE 2.11 – Principe de fonctionnement d’une caméra DoAm : (a) utilisation de cubes séparateurs et de prisme pour séparer le faisceau selon différentes directions, (b) les trois images obtenues sur les trois capteurs sont combinées pour déterminer les paramètres de polarisation.

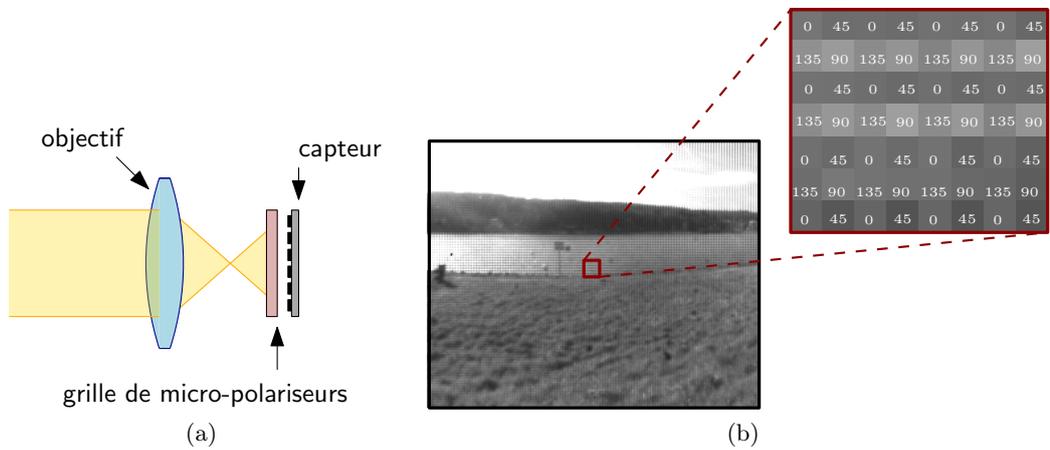


FIGURE 2.12 – Principe de fonctionnement d’une caméra DoFP : (a) un filtre constitué de micro-polariseurs est placé devant le capteur, (b) les paramètres de polarisation sont estimés en appliquant des algorithmes d’interpolation.

2.6 Calibrage d'une caméra polarimétrique tri-CCD

Type	Fabriquant	Coût	Résolution	Intégration matérielle	Fréquence	Stokes complet
DoT	Bossa Nova Tec. (Salsa)	+++	+++	Logiciel propriétaire	12 img/s^{-1}	Oui
DoA	Optical Insights	++	++	Objectif conséquent	Dépendant de l'imageur	Oui
DoAm	FluxData (FD-1665P)	+++	+++	Synchronisation de 3 imageurs	14 à 30 img/s^{-1}	Non
DoFP	4D Technology (Polarcam), Flir (Blackfly S Polarized)	+	++	Simple	70 à 170 img/s^{-1}	Non

TABLE 2.1 – Caractéristiques des différents types de caméras polarimétriques comparées à partir du modèles proposés par des constructeurs.

l'avantage d'être temps-réel et robustes. En effet, ces caméras n'ont pas recours à l'utilisation de composants optiques imposants un alignement parfait de lentilles ou de prismes et ne font pas intervenir d'éléments optiques actifs tels que les cellules à cristaux liquides. Par ailleurs, l'intégration matérielle est simplifiée puisque ce sont des imageurs classiques qui peuvent être interfacés par des systèmes d'exploitation dédiés à la robotique tels que ROS (Robot Operating System). L'obtention des paramètres de polarisation est indépendante de logiciels tiers et effectuée en implémentant une large gamme d'algorithmes d'interpolations disponibles dans la littérature.

2.6 Calibrage d'une caméra polarimétrique tri-CCD

Les caméras de type DoAm (Division of Amplitude) telles que la caméra du fabricant FluxData emploient des cubes séparateurs et des prismes afin de séparer le faisceau incident selon trois directions différentes. En raison du chemin optique différent des trois faisceaux et des propriétés inconnues des filtres polariseurs employés devant chacun des imageurs, il nous est apparu indispensable d'implémenter une méthode de calibrage d'une telle caméra pour la mesure des paramètres de polarisation. Nous avons par conséquent développé une méthode facile à mettre en œuvre permettant de calibrer à la fois polarimétriquement et géométriquement une caméra au moyen d'une tablette numérique [MSF16].

2.6.1 Modélisation polarimétrique de la caméra

Afin de corriger à la fois la non-uniformité des amplitudes des trois faisceaux incidents et les caractéristiques des trois filtres polariseurs, nous avons employé la matrice de Mueller suivante [SB98] :

$$M_{pola}(\theta) = T \begin{bmatrix} 1 + u + v & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & (1 + u - v) \cos^2 2\theta & (1 + u - v) \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & (1 + u - v) \cos 2\theta \sin 2\theta & (1 + u - v) \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.43)$$

où T est la transmittance moyenne, u et v sont, respectivement, les ratios des composantes en polarisation parallèle et croisée. Pour un polariseur idéal, $u = v = 0$, $T = 1/2$ la matrice donnée par l'équation (2.43) devient égale à celle donnée plus haut par l'équation 2.21. Le degré de polarisation du polariseur peut se définir comme étant :

$$\mathcal{P} = 1/(1 + u + v). \quad (2.44)$$

2.6.2 Calibrage polarimétrique à l'aide d'une source lumineuse polarisée

La méthode de calibrage consiste à déterminer les propriétés des filtres polariseurs utilisés pour l'analyse des paramètres de polarisation en utilisant une source lumineuse polarisée dont on connaît les caractéristiques. Nous ne cherchons pas ici à déterminer explicitement la matrice de Mueller de chacun des filtres polariseurs mais uniquement à estimer les paramètres des filtres ayant un impact sur la mesure finale. En supposant que la source lumineuse servant au calibrage des filtres polariseurs est partiellement linéairement polarisée cette dernière est donc décrite par le vecteur de Stokes suivant :

$$s = I_0 \begin{bmatrix} 1 & \rho \cos 2\alpha & \rho \sin 2\alpha & 0 \end{bmatrix}^t, \quad (2.45)$$

où I_0 , α et ρ sont respectivement l'intensité lumineuse, l'angle de polarisation et le degré de polarisation de l'analyseur.

Les trois imageurs de la caméra vont par conséquent mesurer une intensité lumineuse P_i donnée par :

$$\forall i \in [1, 3] \quad P = \frac{T_i}{\mathcal{P}_i} I_0 + T_i I_0 \rho \cos 2\theta_i \cos 2\alpha + T_i I_0 \rho \sin 2\theta_i \sin 2\alpha_i, \quad (2.46)$$

où \mathcal{P}_i , T_i et θ_i sont respectivement le degré de polarisation, la transmittance moyenne et l'orientation des filtres polariseurs de la caméra.

L'équation 2.46 peut se mettre sous la forme :

$$\forall i \in [1, 3] \quad P_i = a_i + b_i \cos 2\alpha + c_i \sin 2\alpha. \quad (2.47)$$

En prenant n orientations différentes de l'analyseur $\alpha^{(1)}, \alpha^{(2)}, \dots, \alpha^{(n)}$, un ensemble de n équations seront obtenues pour chacun des capteurs :

$$\begin{cases} P_i^{(1)} & = a_i + b_i \cos 2\alpha^{(1)} + c_i \sin 2\alpha^{(1)} \\ P_i^{(2)} & = a_i + b_i \cos 2\alpha^{(2)} + c_i \sin 2\alpha^{(2)} \\ \vdots & \vdots \\ P_i^{(n)} & = a_i + b_i \cos 2\alpha^{(n)} + c_i \sin 2\alpha^{(n)} \end{cases} \quad (2.48)$$

2.6 Calibrage d'une caméra polarimétrique tri-CCD

Pour chaque capteur, les paramètres a_i , b_i et c_i peuvent être calculés en utilisant la même méthode que celle présentée en section 2.2. Par conséquent, les angles des filtres polariseurs θ_i peuvent être directement estimés selon :

$$\theta_i = \frac{1}{2} \arctan_2(c_i, b_i). \quad (2.49)$$

Il est intéressant de constater que même si la source lumineuse utilisée en entrée n'est pas parfaitement polarisée ($\rho \neq 1$), les angles des polariseurs θ_i peuvent être correctement estimés. Dans le cas général, les grandeurs I_0 et ρ sont inconnues et par conséquent il est impossible d'estimer tous les paramètres T_i et \mathcal{P}_i pour les trois capteurs. Néanmoins, le degré de polarisation de chaque capteur peut être exprimé selon :

$$\rho \mathcal{P}_i = \frac{\sqrt{b_i^2 + c_i^2}}{a_i}. \quad (2.50)$$

Ainsi, le degré de polarisation de chacun des polariseurs est directement lié au degré de polarisation de l'analyseur de la source lumineuse employée pour le calibrage. De la même manière la transmittance moyenne ne peut pas être estimée pour chacun des trois filtres puisque nous obtenons :

$$T_i = \frac{1}{I_0} a_i \mathcal{P}_i. \quad (2.51)$$

Néanmoins, l'estimation de manière relative des paramètres T_i et \mathcal{P}_i améliore de manière significative l'estimation des paramètres de polarisation mesurée par la caméra comme nous le verrons plus loin. Pour la suite, nous avons considéré les approches suivantes :

1. Le polariseur du premier capteur est considéré parfait ($\mathcal{P}_1 = 1$, $T_1 = 0.5$) et les paramètres des autres polariseurs sont calculés relativement à celui-ci. Dans ce cas, le degré de polarisation et les valeurs de transmittance peuvent dépasser leurs valeurs maximales physiquement admissibles : 1 et 0.5 respectivement.
2. L'un des trois polariseurs de la caméra est parfait en terme du degré de polarisation ($\max \mathcal{P}_i = 1$) et l'un des trois polariseurs est parfait en terme de la transmittance ($\max T_i = \frac{1}{2}$).
3. Le degré de polarisation de l'analyseur utilisé pour le calibrage est parfait ($\rho = 1$) et l'un des trois polariseurs est parfait en terme de la transmittance ($\max T_i = \frac{1}{2}$).

Le fait de considérer la source lumineuse comme étant parfaite alors qu'elle ne l'est pas nécessairement conduira à avoir une mesure sur-estimée du degré de polarisation par la caméra. Dans la plupart des applications en vision pour la robotique, le degré de polarisation est souvent considéré comme un paramètre relatif [PHW01].

La Figure 2.13 montre le résultat du calibrage effectué. Nous pouvons constater que l'amplitude des intensités moyennes des trois capteurs est différente. Le déphasage entre chacune des sinusoïdes correspond à l'angle relatif entre les différents polariseurs placés devant les capteurs.

Une fois l'estimation des différents paramètres effectuée, nous avons ainsi défini la matrice de calibrage polarimétrique de la caméra H par :

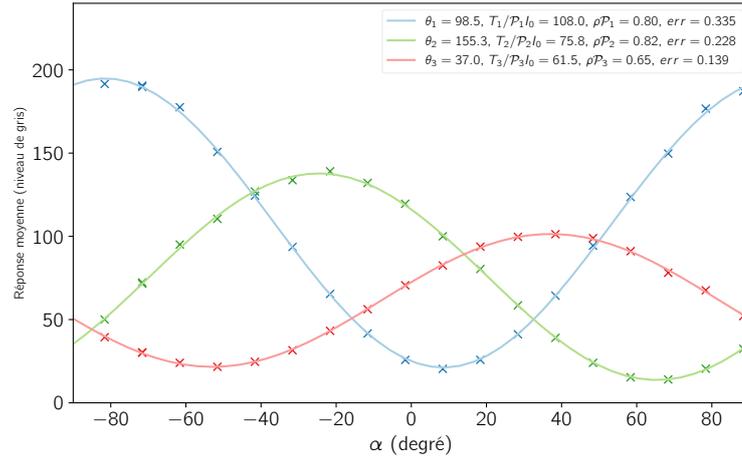


FIGURE 2.13 – Approximation des paramètres permettant le calibrage polarimétrique de la caméra.

$$H = (A^t A)^{-1} A, \quad (2.52)$$

avec :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{T_1}{P_1} & T_1 \cos 2\theta_1 & T_1 \sin 2\theta_1 \\ \frac{T_2}{P_2} & T_2 \cos 2\theta_2 & T_2 \sin 2\theta_2 \\ \frac{T_3}{P_3} & T_3 \cos 2\theta_3 & T_3 \sin 2\theta_3 \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

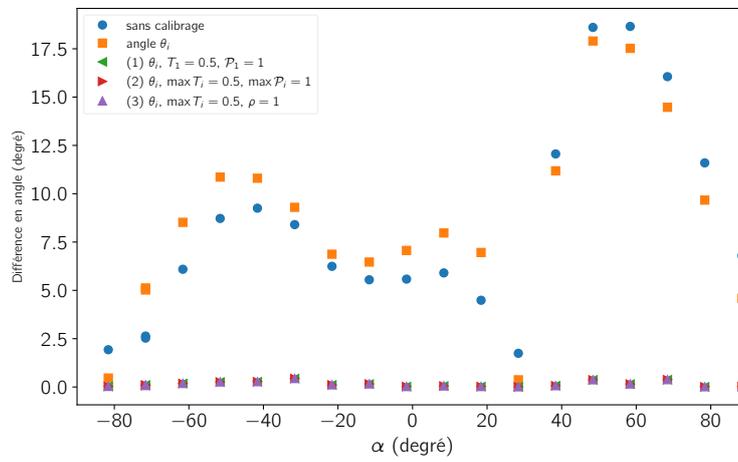
La matrice de calibrage polarimétrique peut être calculée hors-ligne et les trois premiers paramètres du vecteur de Stokes sont calculés selon :

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} Im_1 \\ Im_2 \\ Im_3 \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

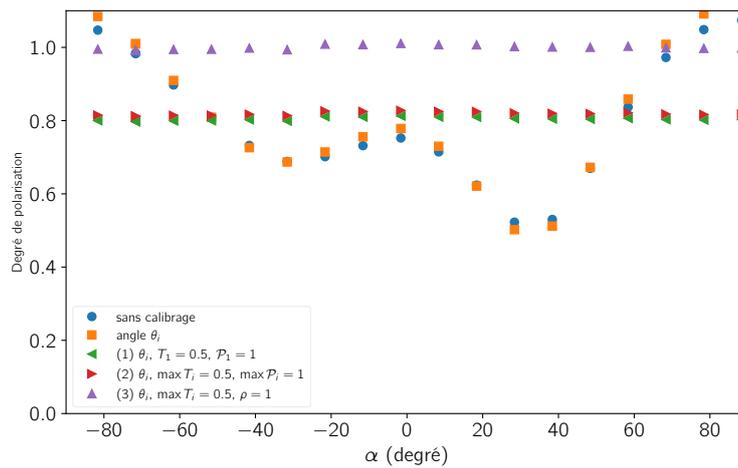
où les Im_i sont les trois images issues des trois capteurs.

Afin de tester le calibrage nous avons cherché à estimer les paramètres de polarisation d'une source lumineuse polarisée en utilisant différentes orientations de référence pour l'angle de polarisation. Les graphiques de la Figure 2.14 représentent les écarts aux valeurs de références pour l'angle et le degré de polarisation avec différentes configurations : sans calibrage, en utilisant l'information de l'angle des filtres polariseurs seulement et avec les approches 1), 2) et 3) citées plus haut. Il apparaît clairement que la connaissance seule de l'orientation des filtres polariseurs n'est pas suffisante pour correctement calibrer la caméra. L'utilisation de l'une des trois méthodes proposées conduit à une mesure de l'angle de polarisation à 0.2° près. Durant les expérimentations la puissance lumineuse de la source étant constante et le polariseur employé étant inchangé, le degré de polarisation de la caméra doit être constant et élevé. Même si nous n'avons pas de référence précise concernant le degré de polariseur du filtre polariseur employé dans l'expérience, nous pouvons apprécier sur le graphique de la Figure 2.14(b) l'intérêt de l'approche développée.

2.6 Calibrage d'une caméra polarimétrique tri-CCD



(a)



(b)

FIGURE 2.14 – Mesure des paramètres de polarisation d'une onde presque parfaitement linéairement polarisée à l'aide de la caméra suivant différentes configurations de calibrage : (a) Écart avec l'angle de polarisation, (b) Degré de polarisation.

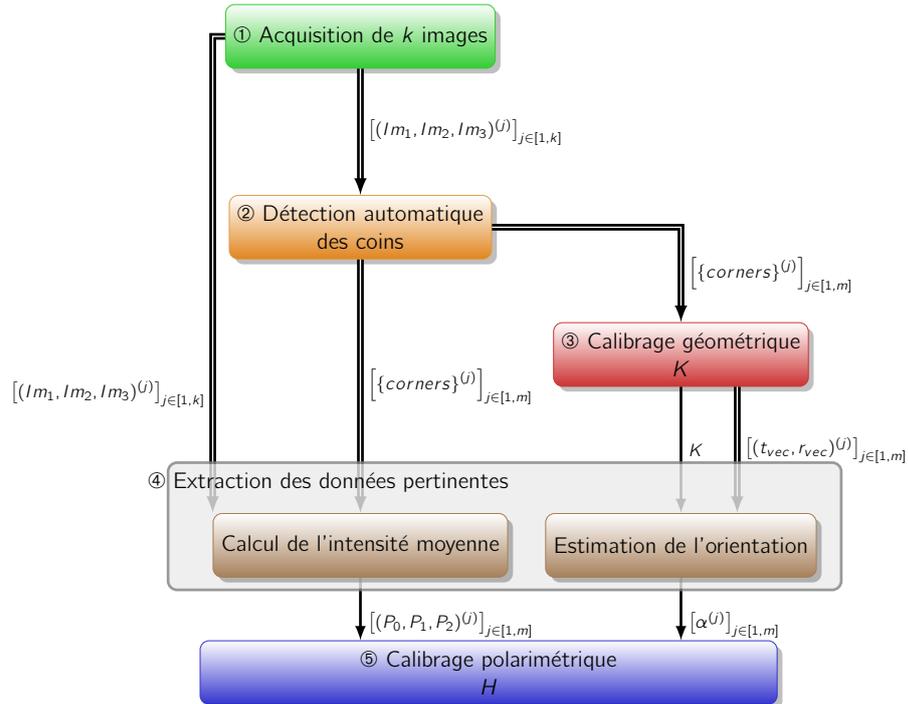


FIGURE 2.15 – Calibrage géométrique et polarimétrique d’une caméra polarimétrique tri-CCD à l’aide d’un iPad.

2.6.3 Calibrage polarimétrique et géométrique à l’aide d’une tablette

Utiliser une source lumineuse polarisée et calibrée n’est pas nécessairement accessible pour la plupart des utilisateurs dans le domaine de la vision par ordinateur. Nous avons ainsi élaboré une technique de calibrage facile à mettre en œuvre dès lors que l’on dispose d’une tablette produisant de la lumière linéairement polarisée telle un iPad 2. L’orientation relative de la tablette par rapport à la caméra doit être connue pour le calibrage polarimétrique et nous utilisons par conséquent la projection d’une grille de calibrage permettant dans un premier temps de calibrer géométriquement la caméra par rapport à la tablette. Dans un second temps, une fois les orientations successives de la tablette estimées, le processus de calibrage polarimétrique décrit plus haut peut débuter. La méthode de calibrage se décompose les 5 étapes décrites ci-dessous et présentées sur la Figure 2.15.

1. La première étape concerne l’acquisition d’un grand nombre d’images en faisant varier l’orientation de la tablette.
2. A chaque mesure, un triplet d’images est obtenu. Afin de garantir une détection automatique et performante des coins, il est impératif de générer une image minimisant l’influence des polariseurs placés devant les capteurs en utilisant par exemple : $\tilde{I}m = \max(Im_1, Im_2, Im_3)$.
3. Le calibrage géométrique est effectué en utilisant les algorithmes classiques du domaine [Zha00 ; Bra00].

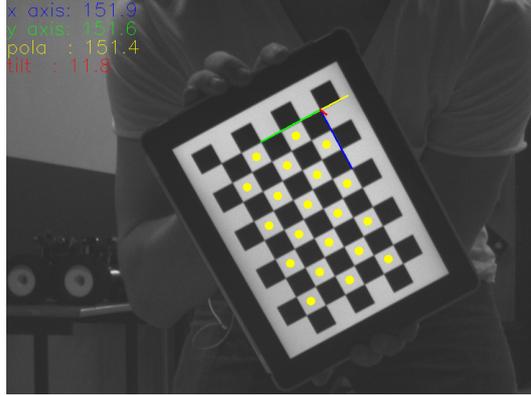


FIGURE 2.16 – Exemple de comparaison entre l’orientation de la tablette et la mesure de l’angle de polarisation obtenu après calibrage.

4. Afin de garantir un calibrage polarimétrique optimal, il est important de ne conserver que les séquences d’images pour lesquelles la tablette est orientée avec la normale proche de l’axe optique. Les paramètres extrinsèques (t_{vec}, r_{vec}) issus du calibrage géométrique seront utilisés à cet effet. De plus, à partir des coins détectés, les intensités lumineuses des cases blanches de la grille sont automatiquement détectés afin de garantir le meilleur rapport signal sur bruit pour le calibrage polarimétrique.
5. Les valeurs d’intensités moyennes et les orientations successives de la tablette sont fournies à l’algorithme décrit plus haut pour estimer la matrice de calibrage polarimétrique.

La Figure 2.16 illustre la mesure de l’orientation de la tablette par rapport à la caméra ainsi que la valeur de l’angle de polarisation mesurée par la caméra polarimétrique après calibrage.

2.7 Conclusion

Après avoir rappelé les notions d’optique et le formalisme mathématique liés à l’imagerie polarimétrique, nous avons détaillé un premier exemple d’imagerie polarimétrique autour d’une application biomédicale pour l’aide au diagnostic des lésions cancéreuses de la peau. Ces travaux menés pendant la thèse de Mojdeh Rastgoo [Ras16], en collaboration avec le laboratoire Vicorob de l’Université de Gironne, reposaient sur l’utilisation d’un système d’acquisition automatique mais pas temps-réel. Nous avons ensuite eu l’opportunité d’acquérir une caméra polarimétrique tri-CCD afin de pouvoir étendre notre expertise en imagerie polarimétrique vers de nouvelles applications. Une méthode de calibrage facile à mettre en œuvre à l’aide d’une tablette a été développée permettant d’étalonner la caméra géométriquement et polarimétriquement [MSF16]. Les premières applications de la caméra ont été conduites lors du projet PEPS INSIS MOSCA en collaboration avec le laboratoire ALCoV-ISIT, donnant lieu à une publication lors d’une

Chapitre 2 Imagerie polarimétrique

conférence [Mar+13]. Nous avons détaillé dans le chapitre les différents modèles de caméras polarimétriques pouvant être accessibles sur le marché et avons particulièrement mis en avant le potentiel des caméras de type DoFP pour les applications en vision pour la robotique. Comme nous le verrons par la suite, l'exploitation de l'information polarimétrique est grandement étendue lorsqu'elle est associée à une vision omnidirectionnelle de la scène, à l'image de la structure des systèmes de vision des nombreux animaux qui sont sensibles à la polarisation de la lumière.

Chapitre 3

Vision omnidirectionnelle

EN raison de l'étendue de leur champ de vue, les caméras omnidirectionnelles suscitent un engouement qui ne cesse de croître. Les applications sont nombreuses et couvrent de nombreux domaines allant de l'application historique en vidéosurveillance à la robotique mobile : navigation basée vision, localisation, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Après avoir présenté les différents types de systèmes omnidirectionnels et leurs principales modélisations associées dans la première section, nous présenterons dans la section suivante des travaux liés à la conception d'un système combinant les avantages liés à la vision omnidirectionnelle et à la stéréovision. Dans la troisième section, nous montrerons comment utiliser les propriétés de la polarisation de la lumière afin de calibrer les caméras catadioptriques. Nous terminerons le chapitre en décrivant nos travaux autour de la réalisation d'un système « omnipolarimétrique ».

3.1 Caméras omnidirectionnelles

L'élargissement du champ de vue pour obtenir une vue omnidirectionnelle, vue à 360° dans un plan horizontal, peut être obtenue de trois manières différentes conduisant aux dénominations suivantes :

- systèmes dioptriques (utilisation d'un objectif fish-eye) – Figure 3.1,
- systèmes catadioptriques (combinaison d'une lentille et d'un miroir) – Figure 3.2,
- systèmes polydioptriques (agencement de plusieurs caméras regardant dans des directions variées) – Figure 3.3.



FIGURE 3.1 – Exemple de système omnidirectionnel dioptrique : (a) objectif fish-eye, (b) image fish-eye.



FIGURE 3.2 – Exemple de système omnidirectionnel catadioptrique : (a) objectif, (b) image catadioptrique.



FIGURE 3.3 – Exemple de système omnidirectionnel polydioptrique : (a) caméra Ladybug, (b) image panoramique.

Une propriété importante des systèmes de vision concerne leur faculté à respecter ou non la contrainte du point de vue unique. Cette contrainte impose que l'ensemble des rayons lumineux incidents convergent en un seul et même point. Les caméras omnidirectionnelles respectant ce critère sont dites centrales et offrent par conséquent la possibilité de générer des images perspectives de la scène. Les systèmes constitués d'un agencement de plusieurs caméras ou utilisant un objectif grand angle tel un fish-eye ne sont pas centraux. Parmi les caméras catadioptriques, Baker et Nayar [BN99] ont démontré que des miroirs de type ellipsoïde concave, paraboloides convexe et hyperboloides convexe associés à certaines lentilles permettent de respecter la contrainte du point de vue unique. Les systèmes réalisables les plus répandus sont les systèmes paracatadioptriques et les systèmes hypercatadioptriques résultant respectivement des combinaisons miroir paraboloides – caméra orthographique, et miroir hyperboloides – caméra perspective. La formation des images sur les caméras hypercatadioptriques, paracatadioptriques et fish-eye est présentée dans la suite de cette section ainsi qu'une technique de modélisation unifiée au moyen d'une sphère de projection.

3.1.1 Caméras hypercatadioptriques

L'obtention du point de vue unique en combinant un miroir hyperboloides convexe et une caméra perspective est possible grâce à l'alignement de l'axe optique avec l'axe de symétrie du miroir et en imposant que le centre optique de la caméra soit confondu avec le second foyer du miroir (Figure 3.4) [BN99]. Le miroir peut être décrit par l'équation polaire suivante :

$$\rho = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (3.1)$$

où e et p son respectivement l'excentricité et le paramètre de l'hyperbole.

Un point 3D de la scène $P = [X, Y, Z]^t$ est tout d'abord projeté sur le miroir en un point noté $P_m = [X_m, Y_m, Z_m]^t$ et exprimé selon :

$$P_m = \frac{\rho}{\|P\|} P. \quad (3.2)$$

Ce dernier point P_m est ensuite projeté dans le plan image en un point $p = [x, y]^t$ à l'aide des matrices de projection suivantes :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

f étant la focale de la caméra et d la distance entre le foyer du miroir et le plan image. Le respect du point de vue unique impose que $d = \frac{2ep}{1-e^2}$ et comme $\cos \theta = Z/\|P\|$ la relation suivante permet de lier les coordonnées du point sur le plan image à partir de sa position 3D dans l'espace :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{\frac{1-e^2}{1+e^2} f}{\frac{2e}{1+e^2} \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} + Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

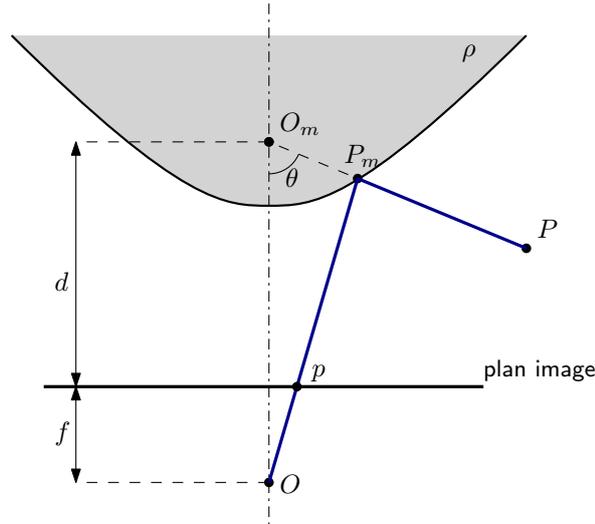


FIGURE 3.4 – Formation d’une image hypercatadioptrique.

3.1.2 Caméras paracatadioptriques

Dans le cas des miroirs paraboloides convexes, le point de vue unique est obtenu grâce à l’utilisation d’un objectif télécentrique car ce dernier admet un point central situé à l’infini : $f = \infty$ comme le montre la Figure 3.5. Par conséquent, la distance d est égale à ∞ et comme le miroir est construit à partir de l’équation d’une parabole : $e = 1$. La relation de l’équation (3.4) devient ainsi :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{p}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} + Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

3.1.3 Caméras fish-eye

Les caméras fish-eye offrent généralement un champ de vision moindre par rapport aux caméras catadioptriques mais elles ont l’avantage de ne pas avoir de zones inexploitable sur le centre de leurs images acquises comme illustré sur la Figure 3.2(b). Les distorsions radiales induites par les objectif fish-eye sont conséquentes et doivent être modélisées. Comme le montre la Figure 3.6, la première approche consiste à déterminer la relation entre l’image fish-eye $p = [x, y]^t$ d’un point 3D de l’espace $P = [X, Y, Z]^t$ et l’image perspective associée sur le modèle sténopé de ce dernier $p' = [x', y']^t$. La relation entre $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ et $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ trouve de nombreuses modélisations possibles à l’aide de transformations polynomiales, logarithmiques ou rationnelles. Un exemple de modélisation proposé par Fitzgibbon [Fit01] est donné par :

$$r' = k_1 \frac{r}{1 - k_2 r^2}. \quad (3.6)$$

La deuxième approche vise à déterminer une relation entre l’image fish-eye et l’orientation des rayons lumineux incidents. Il s’agira de déterminer une équation entre un point r et

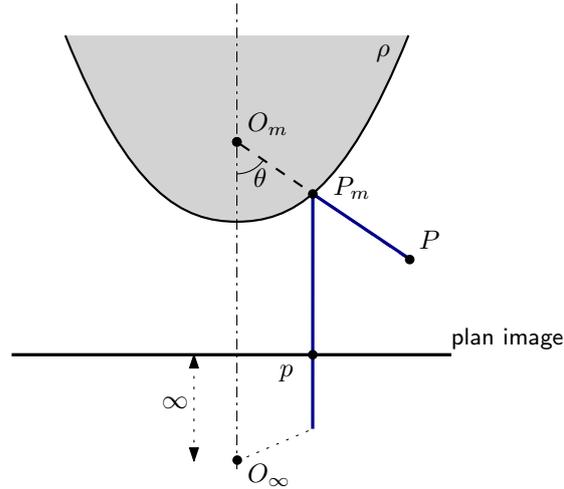


FIGURE 3.5 – Formation d’une image paracatadioptrique.

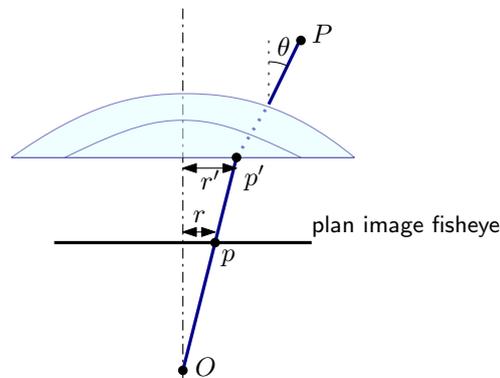


FIGURE 3.6 – Formation d’une image fish-eye.

l’angle θ du rayon incident pour le point correspondant. De la même manière, différents modèles existent et nous pouvons citer par exemple les modèles polynomiaux comme dans [KB06].

3.1.4 Modèle sphérique unifié

Les caméras fish-eye ne respectent pas la contrainte du point de vue unique mais il a été prouvé que le modèle de projection sphérique constitue une très bonne approximation pour les applications en asservissement visuel ou navigation robotique [YH04 ; CMM12]. Le point 3D P est dans un premier temps projeté sur une sphère de rayon 1 en un point $P_s = [X_s, Y_s, Z_s]^t$ (Figure 3.7) :

$$P_s = \frac{P}{\|P\|}. \quad (3.7)$$

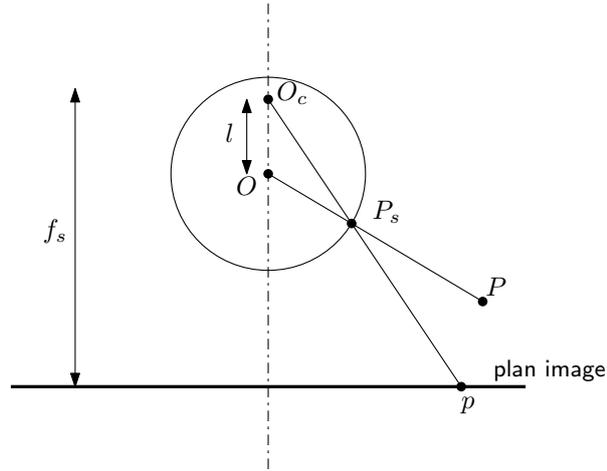


FIGURE 3.7 – Modèle sphérique unifié.

Dans un second temps, le point p du plan image est obtenu par la projection du point P_s sur le plan image en p à partir d'un point O_c distant de l du centre de la sphère en direction du pôle nord. Nous obtenons donc la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f_s}{l + Z_s} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

La projection globale résulte donc de la combinaison des équation (3.7) et (3.8) :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f_s}{l\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} + Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Nous pouvons remarquer que lorsque $l = 0$, le modèle est équivalent au modèle sténopé de focal f_s . Par ailleurs, la comparaison des équations (3.4) et (3.9) conduit à l'équivalence entre le modèle de la caméra hypercatadioptrique présentée et le modèle sphérique unifié si on pose :

$$l = \frac{2e}{1 + e^2}, \text{ et } f_s = \frac{1 - e^2}{1 + e^2} f. \quad (3.10)$$

De même, à partir des équations (3.5) et (3.9) le modèle sphérique unifié peut être appliqué aux caméras paracatadioptriques en posant :

$$l = 1, \text{ et } f_s = p. \quad (3.11)$$

Par ailleurs, [KHK10] ont montré qu'il était également possible d'utiliser le modèle sphérique unifié pour les caméras polydioptriques dans le cas où les centres optiques des différentes caméras sont proches les uns des autres comparativement à la profondeur de la scène à observer. Le formalisme du modèle unifié sphérique permet donc de généraliser la formation des images des caméras omnidirectionnelles. Un état de l'art complet sur l'ensemble des méthodes de calibrage pour les caméras omnidirectionnelles est proposé

3.2 Conception et calibrage d'un système polydioptrique particulier



FIGURE 3.8 – Vue de face du prototype proposé.

par [Pui+12] et nous retrouvons, parmi les quatre techniques les plus populaires et les plus faciles à mettre en œuvre, trois méthodes reposant sur la modélisation sphérique [BA02 ; MR07 ; Pui+11].

3.2 Conception et calibrage d'un système polydioptrique particulier

Dans le travail de thèse de Zawawi, nous avons travaillé sur la réalisation et les applications en vision pour la robotique d'un système optique combinant à la fois la vision omnidirectionnelle et la vision stéréographique classique. Ce système vise à mutualiser les apports des deux modalités en mettant à profit leurs avantages complémentaires à l'image des systèmes de vision des proies et prédateurs [Pai66]. En effet, les proies ont généralement des yeux sur les côtés latéraux de leur tête permettant d'obtenir un champ de vision le plus large possible afin de détecter facilement tout danger. Ils ne disposent généralement pas d'une excellente information de profondeur car leur système de vision a pour utilité première la détection pour fuir en cas de danger. A l'inverse, les prédateurs ont généralement une vision avec un champ de vision plus restreint mais offre une résolution conséquente avec une très bonne estimation de la distance.

Le prototype proposé (Figure 3.8) est constitué de deux caméras fish-eye avec un champ de vue d'environ 185° chacune qui sont fixées dos-à-dos afin de couvrir un champ de vue de 360° [Jam+16]. La caméra stéréographique est une caméra ZED du fabricant Stereolabs placé en face-avant fournissant des images RGB haute-résolution et des images de profondeur.

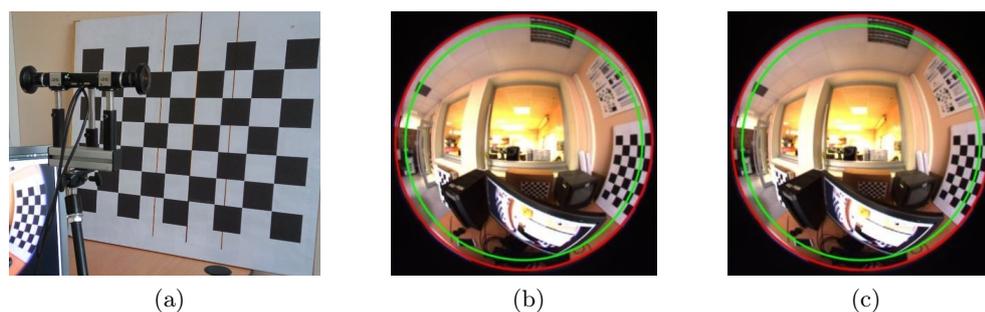


FIGURE 3.9 – Méthode de calibration pour affiner l’estimation du paramètre d’excentricité : (a) grille de calibration, (b) et (c) images issues des caméras gauche et droite.

3.2.1 Estimation des paramètres intrinsèques des caméras fish-eye

Le modèle sphérique unifié a été utilisé pour déterminer les paramètres intrinsèques des caméras fish-eye en utilisant la méthode de calibration proposée par [MR07]. La précision de l’estimation du paramètre l est primordiale lorsque l’on souhaite exploiter l’image sphérique de la scène car ce dernier paramètre caractérise directement la propension des images à envelopper la sphère unitaire. Nous avons ainsi été amené à développer une technique complémentaire afin de raffiner l’estimation de ce paramètre. Le prototype de vision est pour cela placé face à une grille de calibration sur laquelle sont tracées deux lignes parallèles et distantes d’une valeur égale à la baseline des deux caméras ainsi que la ligne médiane de ces deux premières. La grille est placée de manière à faire coïncider la ligne centrale avec le bord des images issues de chacune des deux caméras (Figure 3.9). Ainsi configuré, les premières lignes parallèles définissent le champ de vue correspondant à 180° (plan d’équation $z = 0$ dans le repère de la sphère) pour chacune des caméras et la ligne médiane définit la valeur du champ de vue maximum. Une fonction de coût permettant d’estimer le paramètre l minimisant la composante z a ainsi été développée [Maz+17].

Le résultat du raffinement du paramètre d’excentricité est illustré sur la Figure 3.10.

3.2.2 Estimation des paramètres extrinsèques du système

L’estimation de la transformation rigide entre les deux caméras fish-eye a été réalisée en exploitant le recouvrement entre les deux images sphériques. Après une sélection manuelle des points de correspondances sur les deux images fish-eye ces derniers sont projetés sur la sphère unitaire en utilisant le résultat de la précédente calibration. L’approximation de la transformation par une rotation pure entre les deux caméras nous a permis d’appliquer l’algorithme d’optimisation proposé par [Kim+07] pour estimer itérativement la matrice de rotation. Après l’estimation de la matrice de rotation, les images sphériques issues des deux caméras fish-eye sont fusionnées en une sphère de vue comme présenté sur la Figure 3.11.

3.2 Conception et calibrage d'un système polydioptrique particulier

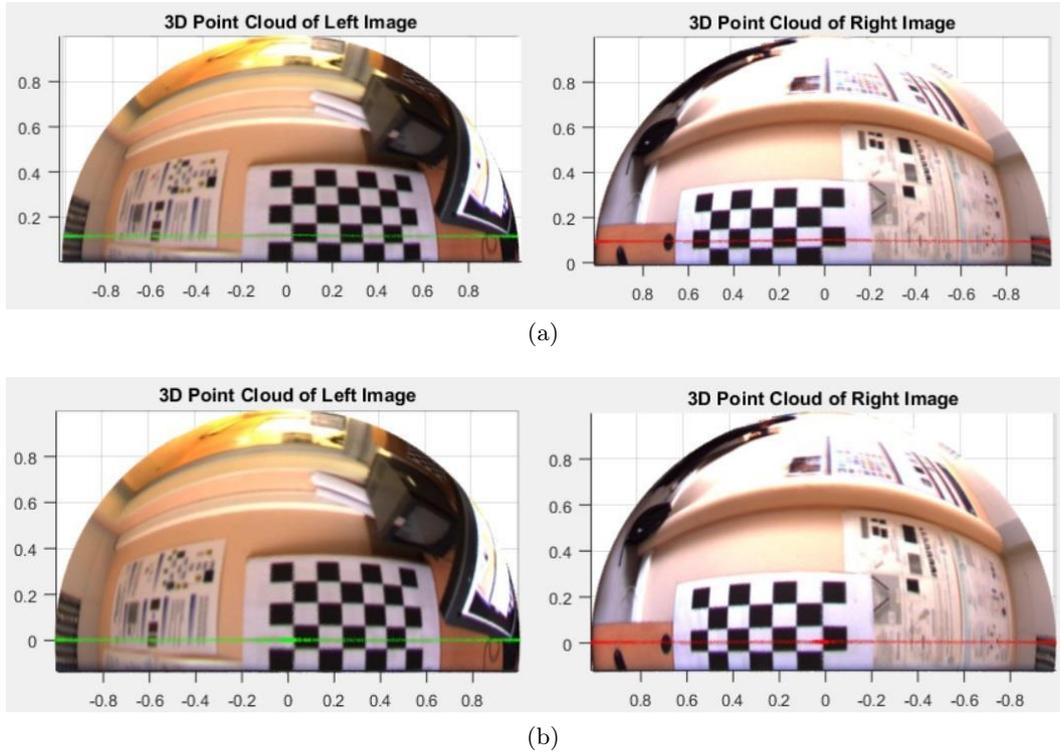


FIGURE 3.10 – Résultat de l'estimation itératif du paramètre d'excentricité : images projetées sur la sphère avant (a) et après (b) application de la méthode.

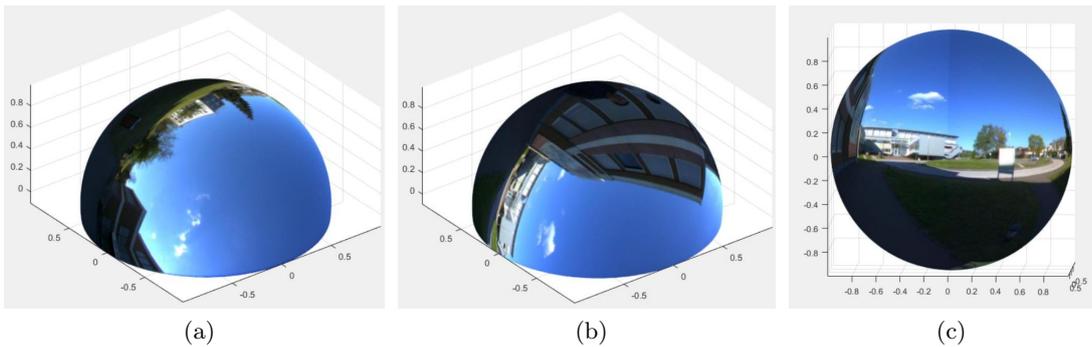


FIGURE 3.11 – Fusion des images sphériques : images sphériques issues des caméras fish-eye gauche (a) et droite (b), résultat (c).

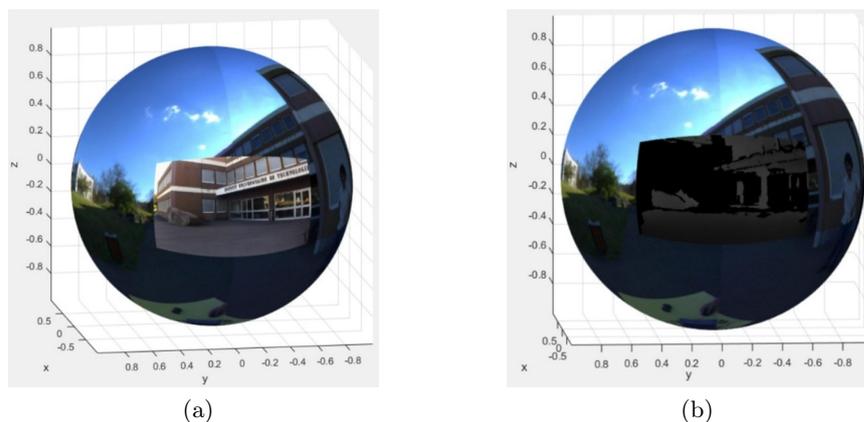


FIGURE 3.12 – Fusion sur la sphère des données de la caméra de profondeur : (a) image RGB, (b) image de profondeur.

En appliquant les mêmes approximations que précédemment, faisant l'hypothèse que la scène à reconstruire est éloignée par rapport à la distance entre les capteurs, la transformation rigide entre l'une des caméras fish-eye et la caméra de profondeur est calculée. La Figure 3.12 montre la projection sur la sphère de l'image RGB et de l'image de profondeur issues de la caméra de profondeur. Cependant, pour l'emploi de ce dispositif dans des applications de détection d'objets et de tracking, il est plus judicieux de déterminer directement la zone de recouvrement par la caméra de profondeur sur les images fish-eye. Cela est obtenu par reprojection de la région d'intérêt de la caméra de profondeur sur les images fish-eye.

3.3 Calibrage géométrique de caméras catadioptriques par polarimétrie

Nous avons précédemment vu que le formalisme introduit dans la section 3.1 présente l'avantage notable d'être générique pour l'ensemble des systèmes omnidirectionnels et en particulier pour les caméras catadioptriques sous réserve que celles-ci respectent le point de vue unique. Cette contrainte n'est pas toujours respectée notamment lorsque l'axe optique de la caméra n'est plus parfaitement aligné à l'axe de symétrie du miroir. La Figure 3.13 illustre l'erreur de reconstruction d'une scène synthétique liée à un désalignement de 2° . Une autre circonstance impliquant le non respect du point de vue unique intervient lorsque la forme du miroir est conçue afin de s'adapter à des tâches particulières en vision pour la robotique. Par exemple, Gaspar et al. [Gas+02] ont proposés trois grandes familles possédant différentes propriétés : résolution verticale constante, résolution horizontale constante et résolution angulaire constante. Dans le premier cas, les objets à une distance fixe de l'axe optique auront toujours la même taille dans l'image offrant des applications potentielles pour le suivi de cibles. La deuxième configuration peut

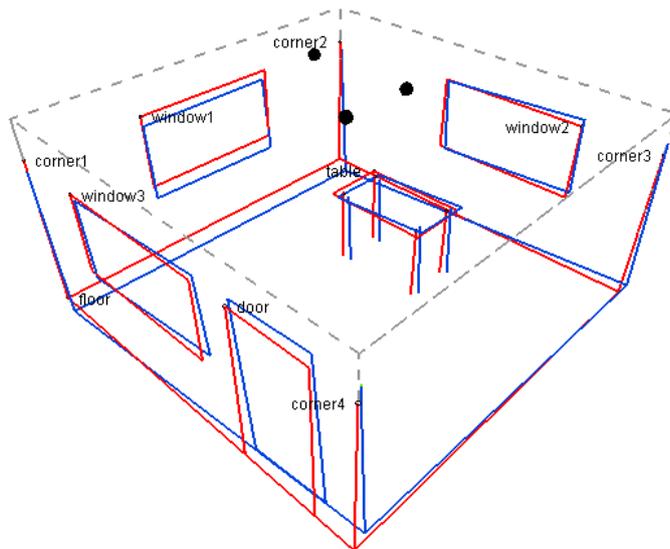


FIGURE 3.13 – Simulation de la reconstruction 3D d’une scène synthétique lorsqu’un désalignement de 2° entre l’axe optique de la caméra et l’axe de symétrie du miroir est présent : vérité terrain en bleu et reconstruction en rouge.

trouver des applications pour la navigation basée vision en fournissant une mesure facilitée des distances et des angles dans le plan du sol. La dernière assure une résolution angulaire uniforme comme si la caméra avait une géométrie sphérique [NA88]. Ces configurations ne respectent pas la contrainte du point de vue unique et requièrent une méthode de calibrage spécifique. Afin de s’affranchir de la forme du miroir ou des conditions d’alignement, nous avons développé une méthode générique et non-paramétrique reposant sur le modèle de calibration générique proposé par Sturm et Ramalingam [SR04]. Les miroirs étant généralement métalliques et parfaitement spéculaires, la technique de « Shape from Polarization » [Mor+06] peut être utilisée à bon escient, comme nous le verrons par la suite, pour le calibrage.

3.3.1 Modèle générique de caméras

Lorsque nous avons proposé cette technique de calibrage, les méthodes les plus communément employées faisaient l’hypothèse que (i) la forme du miroir était parfaitement connue, (ii) l’alignement entre l’axe optique et l’axe de symétrie du miroir était parfait et (iii) le modèle de projection était paramétré. Certaines techniques permettaient de relâcher la deuxième hypothèse mais au dépend d’un formalisme plus conséquent [IB04]. Le modèle générique proposé par Sturm et Ramalingam [SR04] permet de relâcher toutes les contraintes citées ci-dessus en cherchant à décrire une caméra par :

- les coordonnées 3D des lignes de vue,
- la correspondance entre ces lignes de vue et les pixels de l’imageur.

La technique de calibrage est par contre délicate à mettre en œuvre et l’objet de nos

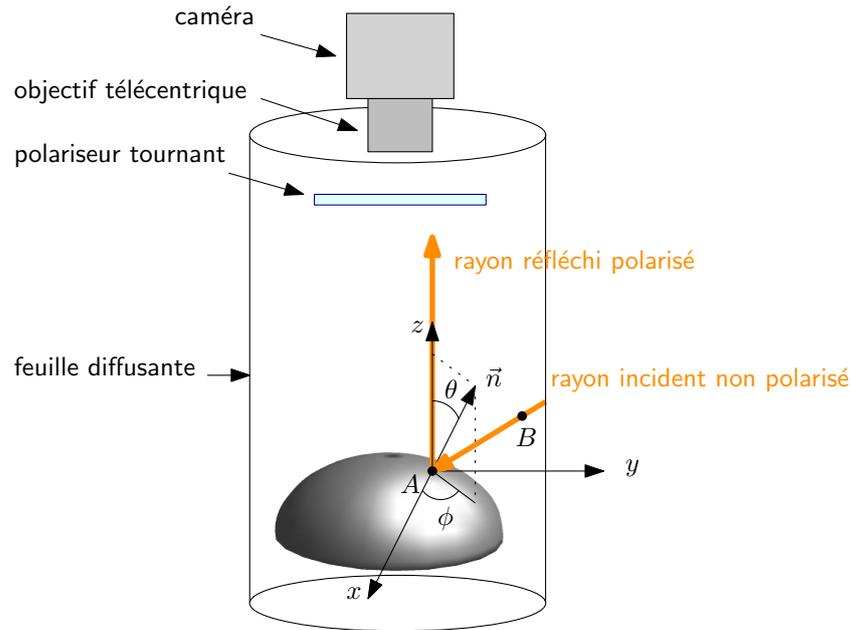


FIGURE 3.14 – Dispositif de calibration par imagerie polarimétrique.

travaux est de montrer ici comment utiliser l'imagerie polarimétrique pour parvenir à utiliser ce modèle aisément. Dans le modèle générique de caméras, il s'agit de déterminer les coordonnées 3D de l'ensemble des lignes de vue AB associé à chacun des pixels (Figure 3.14). Notre méthode impose néanmoins l'utilisation d'une lentille télécentrique permettant de projeter orthographiquement l'ensemble des points de la surface vu par le miroir sur l'imageur.

3.3.2 Shape from Polarization

Les techniques de « Shape from Polarization » permettent de calculer la forme d'un objet grâce à la mesure des paramètres de polarisation de la lumière réfléchi par celui-ci. Les principes initialement énoncés par Wolff et Boult [WB91] ont été repris pour reconstruire des surfaces diélectriques [Sai+99; MKI04; AH08] et métalliques [Mor+06]. Le principe physique employé est le suivant : après réflexion, une onde lumineuse non polarisée devient partiellement linéairement polarisée en fonction de la normale à la surface et de l'indice de réfraction du matériau. Nous retrouvons généralement les trois grandes étapes suivantes pour déterminer la forme tridimensionnelle des objets :

1. Mesure des paramètres de polarisation,
2. Calcul de l'ensemble des normales à la surface,
3. Intégration du champ de normales.

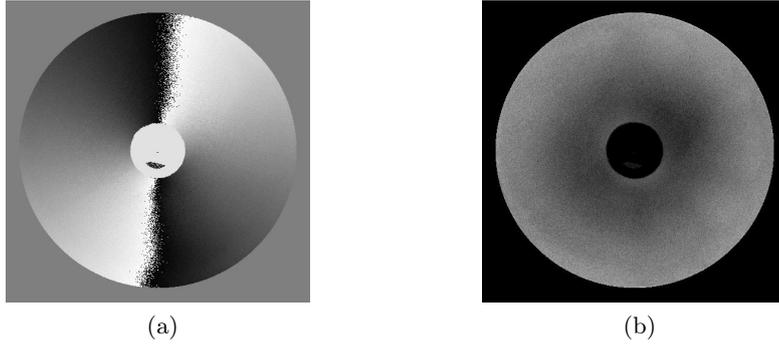


FIGURE 3.15 – Paramètres de polarisation mesurés sur le miroir : (a) angle de polarisation, (b) degré de polarisation.

Mesure des paramètres de polarisation

La Figure 3.14 illustre le principe de calibrage par imagerie polarimétrique : un filtre polariseur tournant permettant de déterminer les paramètres de polarisation de tous les rayons réfléchis par le miroir est positionné entre la caméra et le miroir. L'ensemble est placé dans une feuille diffusante afin de s'assurer que les rayons incidents soient tous dépolarisés. Les images de l'angle de polarisation et du degré de polarisation sont présentées sur la Figure 3.15.

Calcul des normales à la surface

La combinaison des formules de Fresnel et des lois de Snell-Descartes permettent de trouver la relation suivante entre l'angle zénithal θ et le degré de polarisation ρ selon :

$$\rho(\theta) = \frac{2n \tan \theta \sin \theta}{\tan^2 \theta \sin^2 \theta + |\hat{n}|^2}, \quad (3.12)$$

où $\hat{n} = n(1 + i\kappa)$ est l'indice de réfraction complexe du miroir.

Nous savons par ailleurs que l'angle de polarisation est orthogonal au plan d'incidence et nous pouvons en déduire la relation entre l'angle azimutal ϕ et l'angle de polarisation φ :

$$\phi = \varphi \pm \pi/2. \quad (3.13)$$

Pour remonter à la forme 3D des objets, les techniques de « Shape from Polarization » font l'hypothèse que la surface est continue, dérivable et pouvant être décrite par une équation cartésienne du type $z = f(x, y)$. Dans ces conditions, nous pouvons déterminer la normale à la surface selon :

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

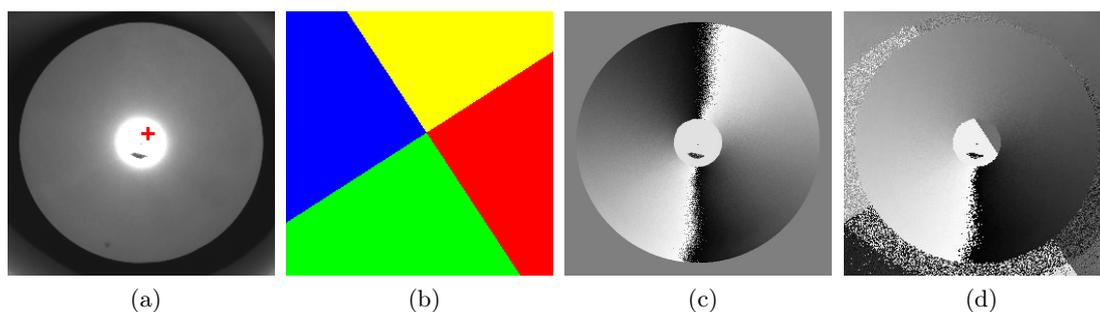


FIGURE 3.16 – Méthode pour lever l'ambiguïté de l'angle ϕ : (a) détection approximative du centre sur l'image d'intensité, (b) création du masque I_{quad} , (c) angle de polarisation φ , (d) angle azimutal ϕ .

D'après les équations (3.12) et (3.13), le calcul de la normale sera déterminé avec une ambiguïté. Comme les miroirs utilisés en vision catadioptrique sont généralement convexes avec une surface de révolution, une image masque I_{quad} peut être automatiquement calculée à partir du centre approximatif du miroir sur l'image d'intensité (Figure 3.16(a)). Cette image masque présente quatre niveaux différents associés à quatre quadrant distincts comme illustré sur la Figure 3.16(b). L'algorithme permettant de lever l'ambiguïté est décrit dans [Mor+06] et est appliqué à partir de l'image de masque I_{quad} et de l'image de l'angle de polarisation φ afin de déterminer l'angle azimutal ϕ :

1. $\phi = \varphi - \frac{\pi}{2}$,
2. $\phi = \phi + \pi$ si $((I_{quad} = 0) \text{ et } (\phi < 0))$ ou $(I_{quad} = 1)$ ou $((I_{quad} = 3) \text{ et } (\phi > 0))$.

Intégration du champ de normales

La forme tridimensionnelle est obtenue en intégrant le champ de normales avec l'algorithme proposé par Frankot-Chellappa [FC88] :

$$\forall (u, v) \neq (0, 0), \tilde{f}(u, v) = \frac{-ju\tilde{p} - jv\tilde{q}}{u^2 + v^2}, \quad (3.15)$$

où \tilde{f} , \tilde{p} et \tilde{q} représentent respectivement les transformées de Fourier de la hauteur du miroir et des gradients p et q obtenus à partir de l'équation (3.14). La transformée de Fourier inverse de l'équation (3.15) donne la hauteur en tout point de la surface à une constante d'intégration près. Celle-ci n'est pas primordiale dans ce cas en raison de l'hypothèse de la projection orthographique. Nous avons fait usiner un miroir sur mesure afin d'avoir un modèle de référence pour comparer la reconstruction 3D obtenue par notre méthode. Nous avons obtenu une erreur quadratique moyenne de 0.49° et 1.02° sur les angles θ et ϕ respectivement. La carte 3D de déviation est présentée sur la Figure 3.17.

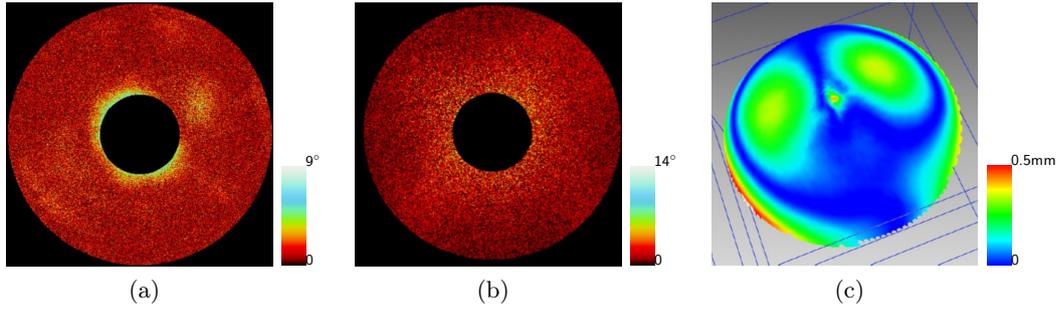


FIGURE 3.17 – Résultat de la reconstruction 3D du miroir par « Shape from Polarization » : (a) et (b) erreurs de mesure concernant les angles θ et ϕ par rapport au modèle théorique, (c) carte de déviation par rapport à la surface théorique.

3.3.3 Calibrage géométrique

Comme nous l'avons précisé plus haut, le modèle générique proposé par Sturm et Ramalingam [SR04] vise à déterminer les lignes de vue 3D pour chacun des pixels de la caméra. Une ligne de vue 3D peut donc être représentée par un couple de points appartenant à la ligne (Figure 3.9) :

$$A = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Nous pouvons prendre le point A comme étant le point situé sur le miroir. Comme la projection est orthographique, ses coordonnées x_a et y_a sont directement lié à l'échantillonnage sur l'imageur et sa hauteur z_a est donnée par l'équation (3.15) d'intégration du champ de normales. Le second point B peut être choisi selon :

$$B = A + k \begin{bmatrix} \tan 2\theta \cos \phi \\ \tan 2\theta \sin \phi \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

où k est une constante non-nulle. Par conséquent nous remarquons que les lignes de vue sont entièrement déterminées par les grandeurs z_a , θ et ϕ déduites des informations de polarisation par la technique de « Shape from Polarization ».

3.3.4 Expérimentations

Simulations

Pour étudier l'influence du bruit sur la qualité de la méthode de calibrage et donc de reconstruction 3D de scène, nous avons utilisé la scène synthétique présentée dans la Figure 3.13. A partir d'un modèle théorique de miroir, les paramètres θ , ϕ ont été

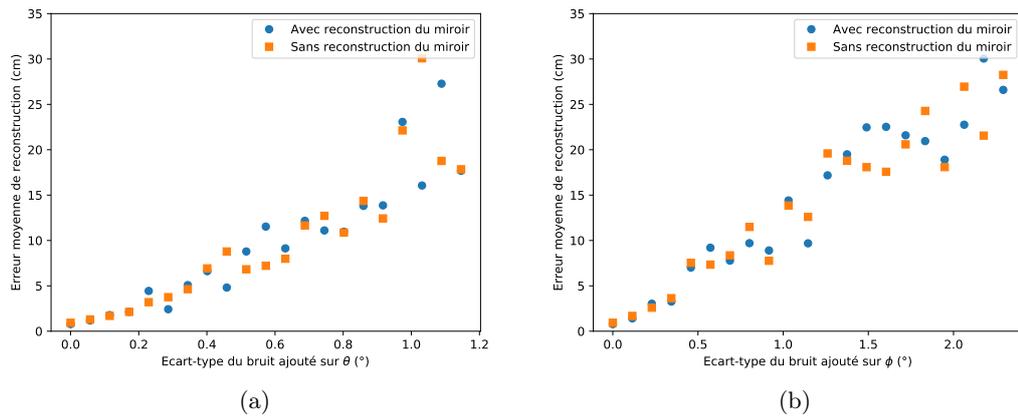


FIGURE 3.18 – Erreurs de reconstruction de la scène induites par l’ajout de bruit sur les angles θ (a) et ϕ (b).

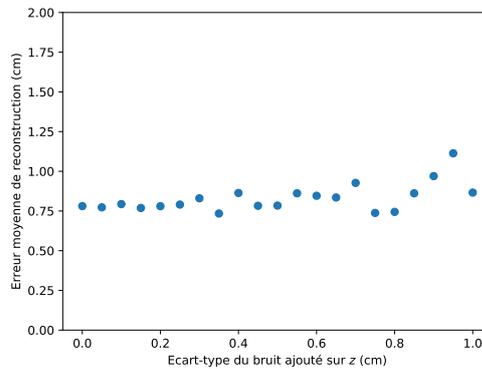


FIGURE 3.19 – Erreurs de reconstruction de la scène induites par une estimation bruitée de la forme 3D du miroir.

calculés et du bruit gaussien a été ajouté, avant de procéder à la reconstruction 3D du miroir et au calibrage selon la méthode présentée précédemment. La Figure 3.18 montre les erreurs de reconstruction suite à l’ajout de bruit sur les valeurs des angles. La scène est reconstruite avec ou sans calcul de la surface du miroir, en considérant donc que les tous les points A des différentes lignes de vue sont tous à une même hauteur. La hauteur du miroir étant faible par rapport à la dimension de la scène, nous pouvons en déduire que la reconstruction 3D du miroir n’est pas nécessaire : la qualité de reconstruction de la scène est directement liée à la précision de l’estimation des angles θ et ϕ définissant les normales à la surface. La Figure 3.19 qui représente l’erreur de reconstruction de la scène suite à de mauvaises estimations du miroir vient appuyer ce constat.

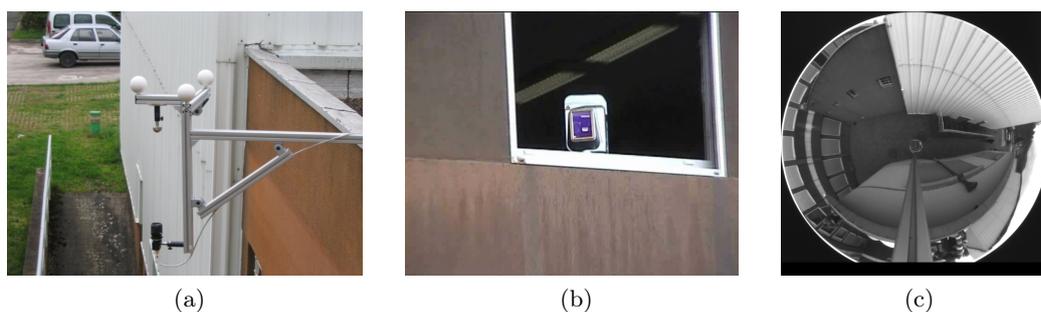


FIGURE 3.20 – Mise en œuvre de l'expérimentation en extérieur : (a) l'ensemble caméra-miroir est couplé à 3 sphères qui vont permettre l'estimation de la pose du système grâce à l'utilisation d'un scanner tridimensionnel (b), exemple d'image catadioptrique obtenue (c).

Scène réelle

Une fois le calibrage effectué, comme nous avons une mise en correspondance directe entre les pixels et les lignes de vue 3D, la reconstruction tridimensionnelle de scène est directement obtenue en calculant les intersections des lignes de vue pour différentes poses du capteur. Nous avons utilisé deux méthodes de triangulation donnant des résultats très proches, l'une basée sur l'extraction de valeurs propres (Direct Linear Transformation [HS97]) et l'autre basée sur le point milieu. Comme le montre la Figure 3.20, nous avons utilisé un laser temps-de-vol Trimble afin d'avoir la vérité terrain de la scène d'une part, et d'autre part, d'obtenir la pose du capteur grâce aux cibles sphériques solidaires du dispositif.

La Figure 3.21 montre la reconstruction tridimensionnelle dense obtenue par le scanner temps-de-vol ainsi que la reconstruction tridimensionnelle calculée suite à une mise en correspondance manuelle de points d'intérêt de la scène sur trois images catadioptriques correspondant à trois poses différentes.

3.4 Système polacatadioptrique

Suite à la démonstration de l'intérêt de l'imagerie polarimétrique pour le calibrage géométrique de systèmes catadioptriques, nous avons dans le travail de thèse de Shabayek travaillé sur les applications d'un système « polacatadioptrique », c'est-à-dire un système combinant une caméra polarimétrique et un miroir de révolution [Sha12]. Dans ce cas, l'imagerie polarimétrique n'est pas exclusivement employée pour le calibrage géométrique du système et doit contribuer à fournir les informations de polarisations sur une image omnidirectionnelle. Après avoir modélisé la réflexion de la lumière sur le miroir nous montrons dans cette section comment procéder au calibrage polarimétrique du système afin de s'affranchir du changement de polarisation de la lumière incidente dû à la nature et à la forme du miroir.

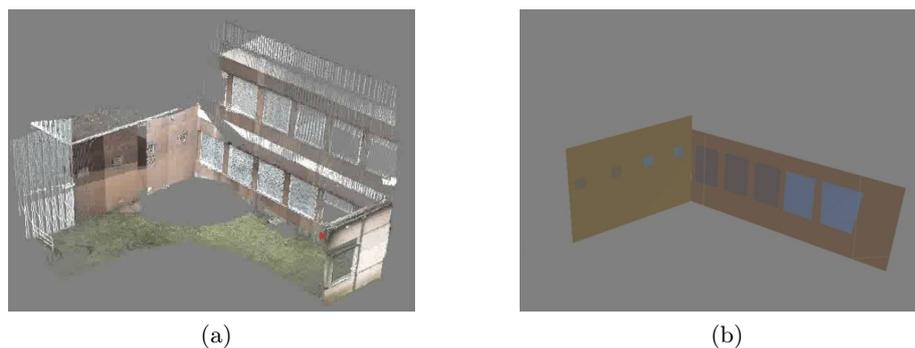


FIGURE 3.21 – Mise en œuvre de l'expérimentation en extérieur : (a) l'ensemble caméra-miroir est couplé à 3 sphères qui vont permettre l'estimation de la pose du système grâce à l'utilisation d'un scanner tridimensionnel (b), exemple d'image catadioptrique obtenue (c).

La Figure 3.22 montre l'influence de l'angle d'incidence sur l'estimation de l'angle de polarisation par un système n'ayant pas été calibré polarimétriquement. Nous constatons des dérives importantes à partir de valeurs élevées de l'angle d'incidence, à partir de 40° .

3.4.1 Modélisation de la réflexion spéculaire

Pour caractériser le changement d'état de polarisation d'une onde incidente après la réflexion sur un miroir (Figure 3.23), nous utilisons le formalisme de Mueller introduit dans le chapitre 2. Ainsi, on peut définir la matrice de Mueller d'une surface réfléchissante par le produit des matrices de Mueller d'un polariseur partiel et d'un retardateur pur [Gol03] :

$$M_{refl} = \begin{bmatrix} \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} & \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} & \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

avec les valeurs $F_{\perp} = |f_{\perp}|^2$, $F_{\parallel} = |f_{\parallel}|^2$ et $\delta = \arg(f_{\parallel} - f_{\perp})$ données par les coefficients de Fresnel [BW99] :

$$\begin{cases} f_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ f_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \end{cases}, \quad (3.19)$$

où θ_i , θ_t représentent respectivement les angles de l'onde incidente et de l'onde réfractée. L'utilisation de la formule de Snell-Descartes, $\theta_t = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \theta_i\right)$, nous permet d'établir une formulation directe entre les coefficients de Fresnel f_{\perp} , f_{\parallel} et l'angle du rayon incident

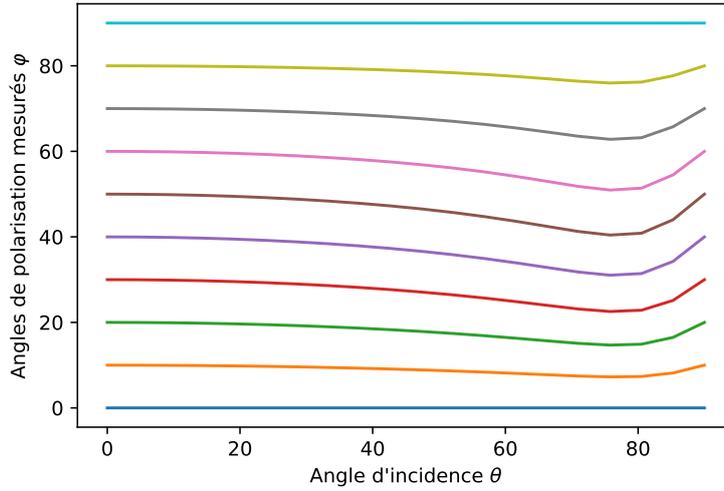


FIGURE 3.22 – Influence de l'angle d'incidence θ sur la mesure de l'angle de polarisation φ .

$\theta_i = \theta$ (égale à l'angle du rayon réfléchi) sous réserve de connaître l'indice de réfraction du miroir \hat{n} .

Ainsi, dans la formulation de la matrice de Mueller de la réflexion spéculaire, les coefficients F_{\perp} , F_{\parallel} et δ dépendent de θ et \hat{n} . Pour déterminer la matrice de Mueller en tout point du miroir et obtenir les coefficients dans le même repère, nous utilisons la matrice de rotation M_{rota} définie auparavant dans l'équation (2.20) :

$$M_{refl}(\theta, \phi, \hat{n}) = M_{rota}(\phi) \cdot \begin{bmatrix} \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} & \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} & \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} \cos \delta & \sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} \sin \delta & \sqrt{F_{\perp} F_{\parallel}} \cos \delta \end{bmatrix} \cdot M_{rota}(-\phi) \quad (3.20)$$

3.4.2 Calibrage polarimétrique du système

Les applications visées par le système proposé exploitent les paramètres de polarisation d'une lumière incidente généralement partiellement linéairement polarisée et représentée par le vecteur de Stokes $\mathbf{s}_{in} = [s_0 \ s_1 \ s_2 \ 0]^t$. Le vecteur de Stokes associé à la lumière réfléchi par le miroir $\mathbf{s}_{out} = [t_0 \ t_1 \ t_2 \ t_3]^t$ est ainsi obtenu par le produit de la matrice de Mueller définie par l'équation (3.20) par le vecteur \mathbf{s}_{in} .

En prenant le cas particulier des points du miroir appartenant au plan méridional

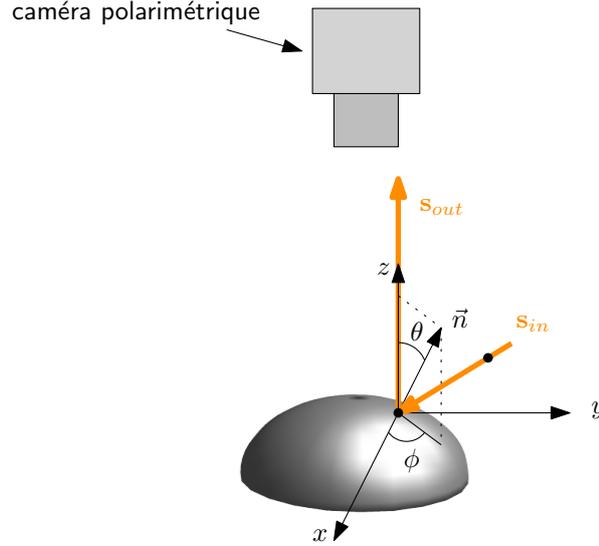


FIGURE 3.23 – Modélisation de la réflexion sur le miroir : l’onde incidente partiellement linéairement polarisée \mathbf{s}_{in} devient partiellement elliptiquement polarisée \mathbf{s}_{out} .

$\phi = 0$, nous obtenons :

$$\mathbf{s}_{out} = \begin{bmatrix} \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} s_0 + \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} s_1 \\ \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{2} s_0 + \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} s_1 \\ \sqrt{F_{\perp} + F_{\parallel}} \cos(\delta) s_2 \\ \sqrt{F_{\perp} + F_{\parallel}} \sin(\delta) s_2 \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Dans le cas des miroirs métalliques, l’indice de réfraction \hat{n} est complexe ce qui implique : $\delta \neq 0$. Par conséquent, nous retrouvons que la lumière partiellement linéairement polarisée réfléchi par le miroir métallique est généralement partiellement elliptiquement polarisée puisque le dernier coefficient de Stokes est non nul.

D’une manière générale, nous obtenons un système linéaire de quatre équations liant les paramètres de Stokes de l’onde réfléchi à celle des paramètres de Stokes de l’onde incidente :

$$\begin{cases} t_0 = a s_0 + b s_1 + c s_2 \\ t_1 = b s_0 + d s_1 + e s_2 \\ t_2 = c s_0 + e s_1 + f s_2 \\ t_3 = g s_1 + h s_2 \end{cases}, \quad (3.22)$$

où les coefficients a, b, c, d, e, f, g, h dépendent des valeurs de θ, ϕ et \hat{n} . En considérant l’utilisation d’une caméra polarimétrique mesurant les trois premiers paramètres, nous disposons des trois premières équations pour trouver les valeurs de s_0, s_1 et s_2 . Nous avons montré que ces trois premières équations étaient linéairement indépendantes et avons par conséquent proposé la méthode suivante :

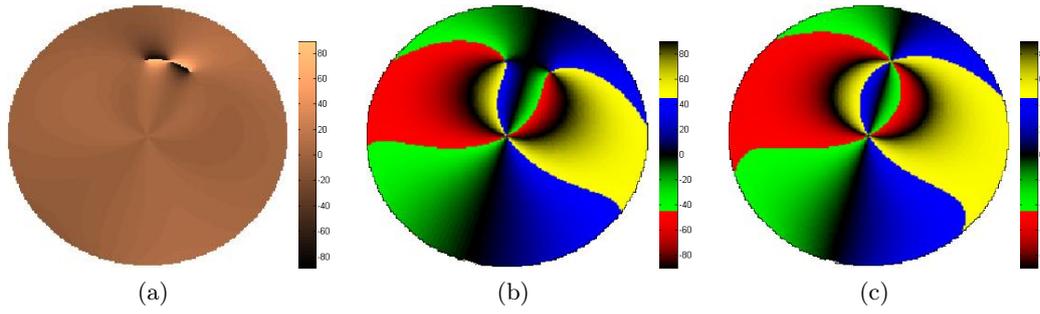


FIGURE 3.24 – Simulation de la mesure de l’angle de polarisation du ciel : (a) écart entre la mesure brute et la mesure corrigée, (b) angle de polarisation mesuré sans calibration polarimétrique, (c) angle de polarisation obtenu après calibration.

1. Calibration géométrique du système selon la méthode proposée dans la précédente section pour déterminer θ et ϕ ,
2. Connaissant l’indice de réfraction du miroir, calcul des paramètres F_{\perp} , F_{\parallel} et δ
3. Inversion du système (3.22) en chacun des points de l’image.

La Figure 3.24 montre le résultat de la mesure de l’angle de polarisation du ciel avec ou sans calibration polarimétrique et illustre l’importance de cette étape de calibration lorsqu’on souhaite exploiter l’imagerie polarimétrique conjointement avec un miroir métallique.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a tout d’abord présenté le formalisme généralement employé en vision omnidirectionnelle avec un rappel des différents moyens de mise en œuvre comme les objectifs fish-eye, les systèmes catadioptriques et polydioptriques. Lors du projet ANR CaViAR, nous avons développé une technique originale de calibration de systèmes catadioptriques par imagerie polarimétrique pour la reconstruction 3D de scènes [MF07 ; MSF08] et le calcul de voisinage pour le filtrage des images catadioptriques [AMF08 ; Ain+13]. Suite à ce projet, nous nous sommes confrontés à la première réalisation d’un système polacatadioptrique lors de la thèse de Abd El Rahaman Shabayek [Sha12] en développant toutes les méthodes nécessaires à la mise en œuvre d’un tel système pour notamment la cartographie polarimétrique du ciel. Notre intérêt pour la vision omnidirectionnelle s’est poursuivi avec la thèse de Ahmad Zawawi Jamaluddin qui devrait se soutenir cette année autour d’un système de vue sphérique associé à une caméra RGBD [Jam+16 ; Maz+17]. Dans le cadre du projet ANR CLARA qui débutera en 2019, nous travaillerons sur un système de vision stéréoscopique composé de deux caméras à 360° associé à une centrale inertielle pour la perception et la navigation d’un drone dans un environnement complexe et non structuré pour l’évitement d’obstacle et l’étude de la traversabilité.

Deuxième partie

Applications en robotique

Chapitre 4

Analyse de scènes

La présence abondante de lumière polarisée dans les milieux naturels est principalement produite par les deux phénomènes physiques suivants : la diffusion de la lumière du soleil par l'atmosphère, et la réflexion de la lumière sur des surfaces réfléchissantes comme l'eau [Weh01]. De nombreuses espèces animales comme les puces d'eau ou les papillons sont sensibles à la polarisation de la lumière et exploitent cette faculté afin par exemple de détecter des pièces d'eau [Sch95]. La modélisation de la réflexion de la lumière en milieu naturel, qui participe à la production de la lumière polarisée utilisée pour l'analyse de scène, sera tout d'abord introduite en début de chapitre. Un système stéréoscopique et polarimétrique développé avant la mise sur le marché des caméras polarimétriques sera présenté ainsi qu'un état de l'art des systèmes « stéréopolarimétriques ». Après avoir discuté des applications potentielles du couplage entre la vision stéréo et polarimétrique pour la robotique nous présenterons nos travaux de recherche autour de l'analyse de scènes naturelles par imagerie polarimétrique.

4.1 Modélisation de la réflexion

La détection d'eau en milieu naturel en robotique terrestre autonome peut s'avérer être une tâche prépondérante afin que le véhicule évite les étendues d'eau ou adapte sa vitesse sur les flaques. Les puces d'eau qui utilisent leur faculté à être sensible à la polarisation de lumière pour détecter de l'eau sont équipées de photorécepteurs qui sont principalement sensibles à la polarisation horizontale de la lumière [Sch84]. En effet, nous avons vu dans le chapitre 3 que la lumière non polarisée devenait partiellement linéairement polarisée orthogonalement au plan d'incidence. Par conséquence, le plan d'incidence étant toujours vertical (la surface de l'eau est horizontale), la lumière réfléchi est polarisée horizontalement. Rankin et al. [RM10] ont été parmi les premiers à embarquer une caméra polarimétrique dans un véhicule afin de démontrer l'intérêt de l'imagerie polarimétrique pour la détection d'étendues d'eau.

4.1.1 Réflexion spéculaire

Détecter des étendues d'eau peut ainsi revenir à détecter la lumière polarisée horizontalement en faisant l'hypothèse que la lumière incidente est non polarisée. Même si c'est le cas dans les conditions suivantes : réflexion des rayons du soleil ou réflexion de la lumière diffusée par les nuages, il convient de modéliser de manière plus approfondie

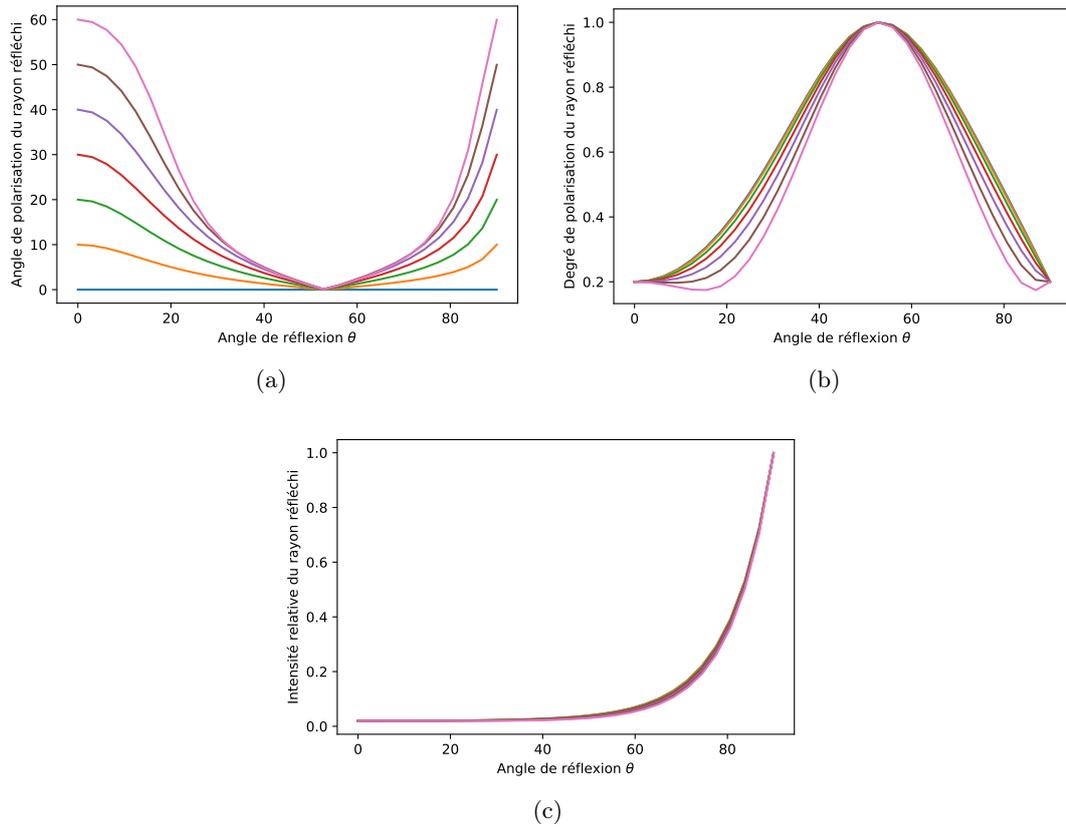


FIGURE 4.1 – Mesures des paramètres de polarisation suite à la réflexion d’un rayon partiellement linéairement polarisé dont l’angle de polarisation varie de 0 à 60° : (a) angle de polarisation, (b) degré de polarisation et (c) intensité.

la nature de la lumière réfléchi par les étendues d’eau. En effet, comme nous le verrons plus en détails dans le chapitre suivant, l’atmosphère par exemple diffuse de la lumière linéairement polarisée pouvant sous certaines conditions produire après réflexion par l’eau une lumière polarisée différente. La Figure 4.1 représente les paramètres de polarisation d’un rayon incident initialement partiellement linéairement polarisé selon différentes valeurs d’angle de polarisation puis réfléchi par de l’eau. Nous constatons clairement que la lumière réfléchi n’est plus nécessairement horizontalement polarisée sauf pour des valeurs d’angles de réflexion proches de l’angle de Brewster. Pour ces dernières valeurs le degré de polarisation est le plus élevé et nous retrouvons la composante non polarisée qui devient parfaitement polarisée. Par ailleurs, l’intensité lumineuse est nettement plus importante pour des valeurs élevées de θ soulignant l’intérêt de l’imagerie polarimétrique pour de la détection à grande distance.

Pour déterminer les paramètres de polarisation de la lumière réfléchi, il suffit de reprendre les équations précédemment introduites dans le chapitre 3 pour les surfaces métalliques et de considérer le cas diélectrique en prenant l’indice de réfraction égal à

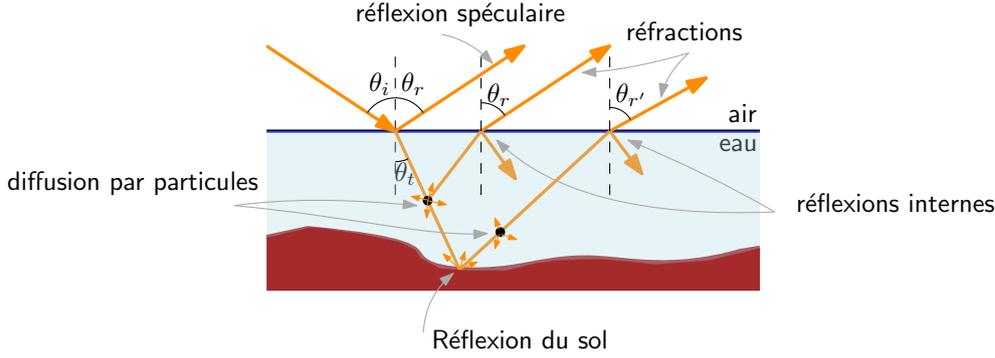


FIGURE 4.2 – Réflexion et réfraction de la lumière dans l'eau.

celui de l'eau. Nous pouvons ainsi écrire la matrice de Mueller modélisant la réflexion spéculaire selon [Gol03] :

$$M_{spec} = \frac{\tan^2 \theta_-}{2 \sin^2 \theta_+} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_- + \cos^2 \theta_+ & \cos^2 \theta_- - \cos^2 \theta_+ & 0 & 0 \\ \cos^2 \theta_- - \cos^2 \theta_+ & \cos^2 \theta_- + \cos^2 \theta_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \cos \theta_+ \cos \theta_- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \cos \theta_+ \cos \theta_- \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

avec $\theta_{\pm} = \theta_i \pm \theta_t$, où θ_i et θ_t sont respectivement les angles des rayons incidents et réfractés liés par l'indice de réfraction de l'eau n selon : $\theta_t = \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \theta_i\right)$.

4.1.2 Réflexions issues de la réfraction

La lumière réfléchi par une étendue est constituée d'une partie liée à la réflexion spéculaire présentée plus haut mais également d'une certaine proportion liée à la réfraction de la lumière dans l'eau comme le montre la Figure 4.2. La réfraction est une combinaison de la lumière diffusée par les particules dans l'eau et de la lumière réfléchi par le sol. D'une manière générale on peut écrire la réflexion totale sous la forme [NMM17] :

$$R_{totale} = R_{spéculaire} + \underbrace{R_{particules} + R_{sol}}_{\text{réfraction}}. \quad (4.2)$$

En raison des phénomènes de diffusion aléatoires dans l'eau et de la réflexion diffuse par le sol, la lumière qui sera potentiellement réfractée est considérée non polarisée. Après réfraction, cette dernière deviendra partiellement linéairement polarisée et ce résultat peut-être retrouvé avec la matrice de Mueller de la réfraction [Gol03] :

$$M_{refr} = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_r}{2 \sin^2 \theta_+ \cos^2 \theta_-} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_- + 1 & \cos^2 \theta_- - 1 & 0 & 0 \\ \cos^2 \theta_- - 1 & \cos^2 \theta_- + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \cos \theta_- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \cos \theta_- \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Comme nous pouvons le constater sur la Figure 4.3, la réfraction d'un rayon non polarisé conduit à un rayon polarisé parallèlement au plan d'incidence. Le degré de polarisation augmente avec l'angle θ mais l'intensité diminue nettement. Ainsi, d'après les

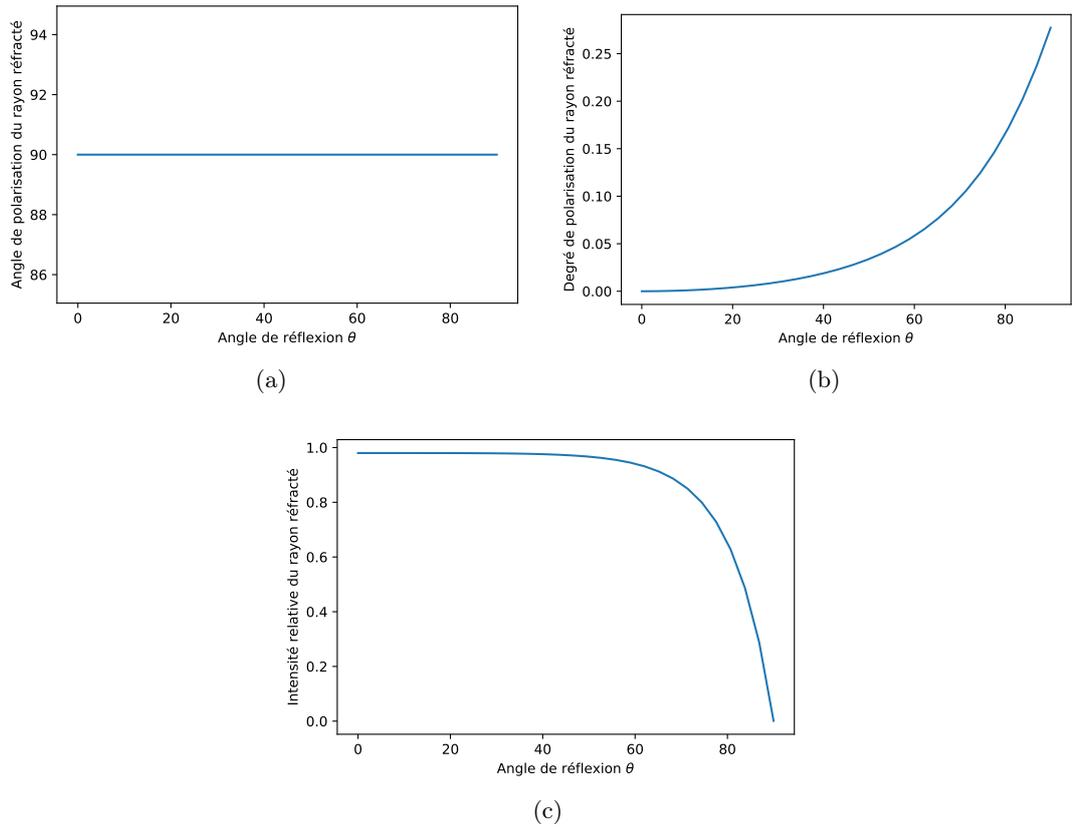


FIGURE 4.3 – Mesures de l’angle de polarisation (a) et du degré de polarisation (b) suite à la réfraction d’un rayon non polarisé.

Figures 4.1 et 4.3 nous retrouvons que l’observation d’une étendue d’eau en incidence quasi normale donne une lumière peu polarisée avec une observation aisée des fonds alors qu’une observation avec une incidence très élevée donne un état de polarisation plus prononcé avec une plus grande contribution de la lumière réfléchie.

Une modélisation complète peut ainsi être décrite par la matrice de Mueller suivante :

$$M = M_{refl}(\theta, n) + (1 - \mu_{absorption})M_{refr}(\theta, n) \cdot M_{depo} \cdot M_{refr}(\theta, n), \quad (4.4)$$

où $\mu_{absorption}$ est un coefficient d’absorption lié à l’eau et M_{depo} est la matrice de Mueller d’un dépolariseur idéal.

4.2 Systèmes stéréopolarimétriques

L’analyse de scènes en vision pour la robotique implique généralement d’obtenir l’information 3D de la scène. Lors de la thèse de Iqbal [Iqb11], les caméras polarimétriques n’étant pas encore facilement disponibles sur le marché, nous avons développé l’un des

tout premiers systèmes stéréopolarimétriques en vue de reconstruire d'une part la géométrie de la scène et d'autre part de déterminer les informations de polarisation de la lumière réfléchie.

La stéréo-vidéo-polarimétrie qui a été historiquement introduite par Mizera et al. [Miz+01] avait pour objectif principal d'enregistrer deux flux distincts d'images contenant les paramètres de polarisation d'une scène. Ce système utilisant des filtres polariseurs tournant devant chacun des objectifs n'était pas temps réel et ne permettait pas de remonter aux informations 3D de la scène. Plus tard, Sarafraz et al. [SNS09] ont démontré l'intérêt conjoint de la stéréovision et de la polarisation pour améliorer l'acquisition des images stéréo dans des milieux diffusants sous-marins. Le dispositif présenté ne permettait pas dans ce cas de remonter aux informations de polarisation, les filtres polariseurs étant fixes. A l'aide d'un éclairage actif polarisé les auteurs ont cependant étudié les configurations offrant la meilleure qualité d'image possible en supprimant les effets de rétrodiffusion. Afin de proposer un prototype exploitable en quasi temps-réel et à moindre coût nous avons opté pour un système de caméras stéréoscopiques munies de filtres polariseurs et de cellules à cristaux liquides TN (Twisted Nematic) rapides. Outre la réalisation du prototype nous nous sommes attachés à étudier l'influence des composants optiques sur l'extraction des points d'intérêt et de leur mise en correspondance.

4.2.1 Description du prototype développé

Comme le montre la Figure 4.4 le système stéréopolarimétrique est constitué de deux caméras numériques munies d'un filtre polariseur fixe et d'une cellule à cristaux liquides de type TN. Les cristaux liquides sont vrillés (à 45° et 90° pour respectivement les caméras de gauche et de droite) au repos et se redressent ou se réalignent sous l'effet d'un champ électrique. Ainsi, lorsque la tension de commande est non-nulle, les images issues des caméras sont celles mesurées au travers d'un filtre polariseur orienté à 0° . Lorsque la tension de commande est nulle, les images des caméras de gauche et de droite sont équivalentes à celles mesurées au travers d'un filtre polariseur orienté respectivement à 45° et 90° . Pour chacune des caméras les acquisitions s'effectuent à une cadence de 20Hz avec une alternance de la tension de commande des cellules à cristaux liquides.

La mise en correspondance des points 3D sur chacune des caméras est par conséquent perturbée puisque nous obtenons une succession d'images acquises avec une orientation de polarisation à 0° et 45° pour une caméra et 0° et 90° pour l'autre caméra. L'utilisation de la paire $0^\circ - 0^\circ$ conviendrait parfaitement mais uniquement dans le cas où le point 3D ne produit pas de lumière polarisée. De nombreuses expérimentations ont confirmé que la moyenne sur deux images consécutives permettaient de s'affranchir du problème et offrait un bon compromis pour la mise en correspondance [IMM11].

Par ailleurs, l'étude de la robustesse des mesures de similarité pour la mise en correspondance de points en fonction de l'angle de polarisation de la lumière incidente nous a conduit à employer la métrique « Rank » [BC01] car cette dernière donne des résultats pratiquement constants quelque soit l'angle de polarisation (Figure 4.5).

La Figure 4.6 illustre la reconstruction 3D d'une scène avec l'ajout des paramètres de polarisation en chacun des points mis en correspondance en utilisant une représentation

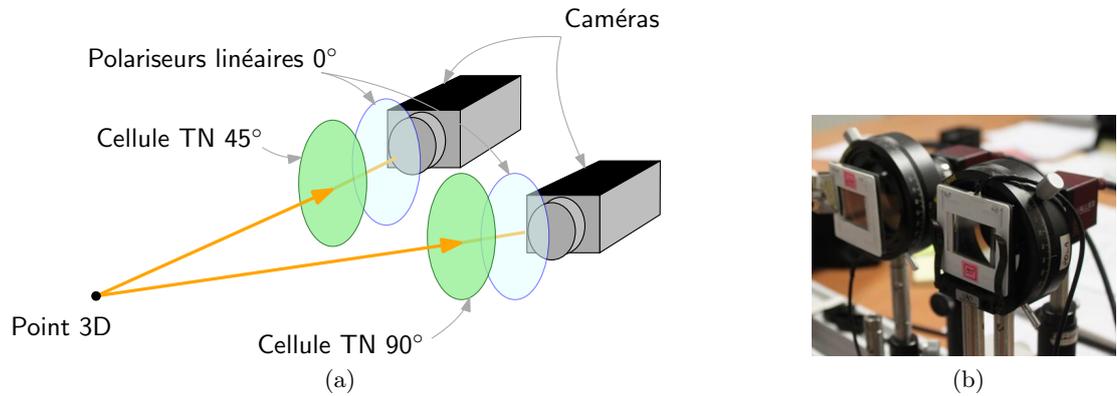


FIGURE 4.4 – Système stéréopolarimétrique : (a) montage, (b) photo du prototype développé.

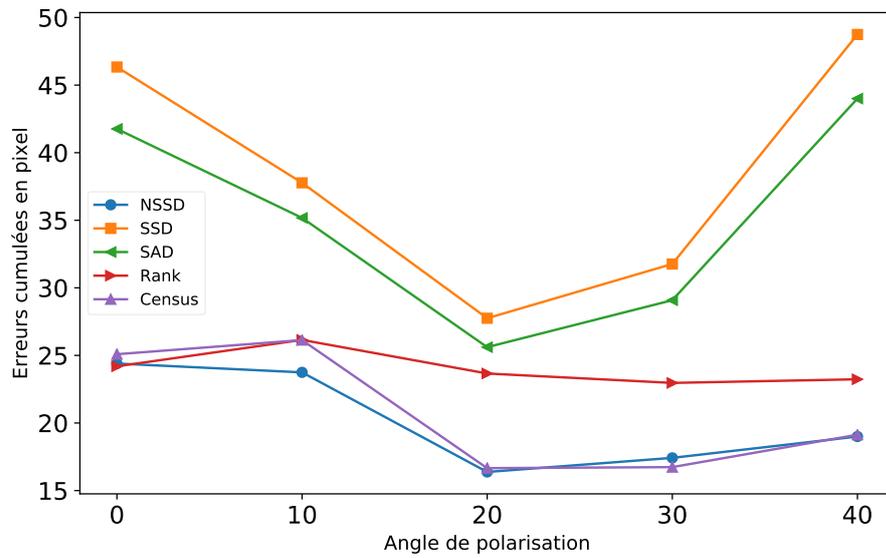


FIGURE 4.5 – Comparaisons de différentes métriques pour la mise en correspondance locale de points en fonction de l'angle de polarisation de la lumière incidente.

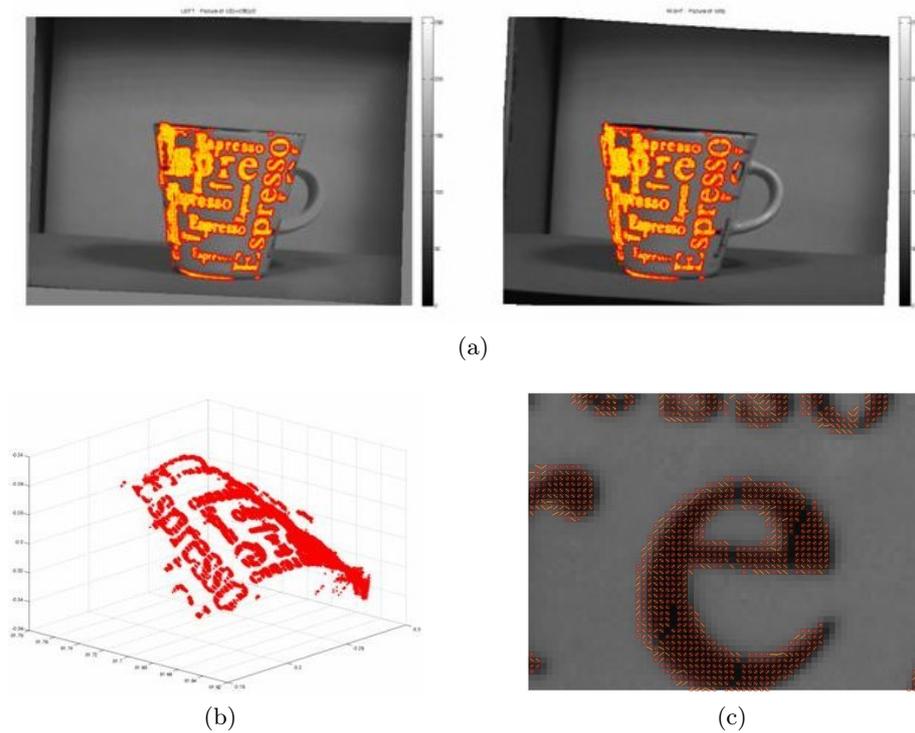


FIGURE 4.6 – Exemple de reconstruction 3D de points avec informations de polarisation : (a) détection de points d'intérêt sur les paires combinées 0° - 45° et 0° - 90° , (b) reconstruction 3D et (c) affichage des informations de polarisation par un vecteur.

vectorielle : l'orientation du vecteur est lié à l'angle de polarisation et sa norme est donnée par le degré de polarisation.

4.2.2 Avancées en stéréopolarimétrie

Dans la littérature récente traitant de la combinaison de l'imagerie polarimétrique et de la stéréovision, nous pouvons regrouper les méthodes selon deux grandes catégories décrites ci-dessous en fonction des applications visées.

Reconstruction 3D associant stéréovision et « Shape from Polarization »

Les développements proposés ici concernent davantage des applications statiques où l'enjeu est d'obtenir une modélisation 3D la plus précise possible d'un objet en combinant les deux modalités. D'une manière générale, une carte 3D approximative des parties texturées des objets est obtenue dans un premier temps en employant des algorithmes de stéréovision. Dans un second temps, la technique de « Shape from Polarization » est employée pour déterminer les normales à la surface. Ces dernières étant déterminées

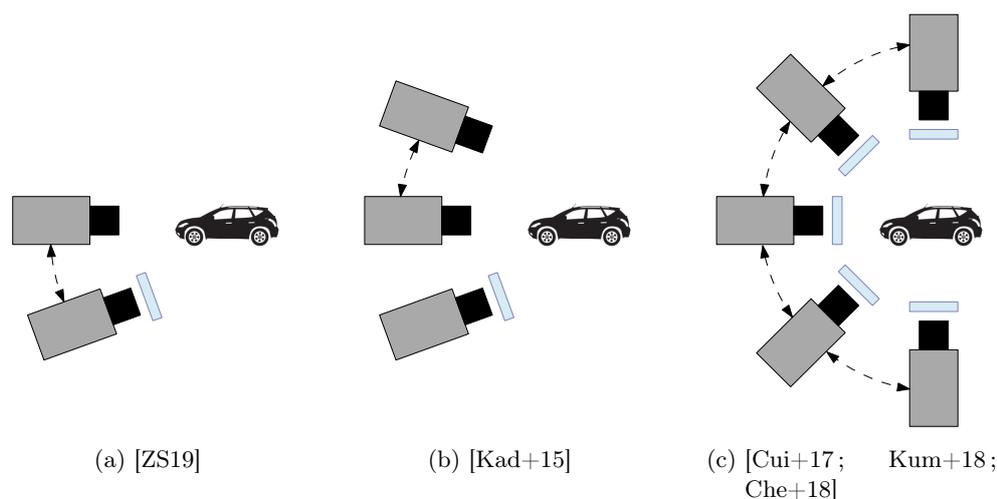


FIGURE 4.7 – Reconstruction 3D d’objets avec des approches combinant l’imagerie polarimétrique et les systèmes multi-vues. Les rectangles bleus représentent un filtre polariseur tournant permettant la mesure des paramètres de polarisation et les arcs indiquent les caméras utilisées pour la reconstruction 3D.

avec ambiguïté comme nous l’avons vu dans le chapitre 3, il s’agira de déterminer des stratégies efficaces permettant de résoudre cette contrainte en exploitant la carte 3D. Comme l’illustre la Figure 4.7, trois grandes familles de système ont été développées : (a) une paire de caméras couleurs dont l’une est munie d’un filtre polariseur tournant [ZS19], (b) un ensemble stéréo Kinect associé à une caméra polarimétrique [Kad+15] et (c) un ensemble de n vues obtenues à partir d’imageurs polarimétriques [Cui+17; Kum+18; Che+18].

Les méthodes employées ici nécessitent un environnement statique dont l’éclairage doit être pour la plupart maîtrisé rendant difficile leur extension aux applications en robotique mobile. Par ailleurs le temps de calcul pour la reconstruction 3D conduit à une implémentation qui n’est pas temps-réel. Yang et al. [Yan+18] ont été les premiers à proposer un algorithme de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) basé sur les images polarimétriques. Les algorithmes de SLAM sont indispensables en robotique mobile car ils permettent au robot de se localiser dans une carte tout en la créant. L’information polarimétrique permet aux auteurs de retrouver avec précision l’angle azimutal de la surface aux normales afin de faciliter une reconstruction dense des régions peu texturées. Une implémentation sur GPU (Graphical Processing Unit) leur permet une utilisation en temps réel.

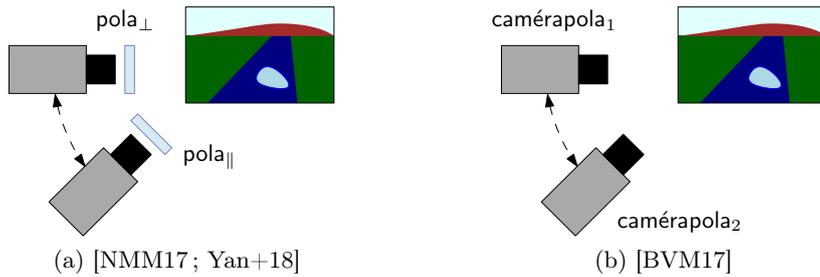


FIGURE 4.8 – Détection d'étendues d'eau et reconstruction 3D. Les filtres polarisateurs utilisés dans (a) sont fixes et (b) représente une paire de caméras polarimétriques.

Reconstruction 3D et détection de surfaces réfléchissantes

La détection et l'identification d'étendues d'eau reste un sujet préoccupant en navigation autonome afin de permettre aux véhicules de réguler leur vitesse ou de contourner ces obstacles. Nous pouvons retrouver ici principalement deux approches utilisant la stéréovision et l'imagerie polarimétrique (Figure 4.8). La première concerne l'utilisation d'une paire de caméra RGB Zed du fabricant Stéréolabs et de deux filtres polarisateurs fixes placés devant chacune des caméras. Le système ne permettant pas d'estimer les paramètres de polarisation de la scène il est ici nécessaire de connaître le vecteur gravité, les étendues d'eau étant toujours perpendiculaires à ce dernier. Dans [NMM17] et [Yan+18] les auteurs utilisent respectivement l'information de l'horizon et une centrale inertielle.

La seconde approche développée par Berger et al. [BVM17] repose sur l'utilisation d'une paire de caméras polarimétriques. Les auteurs ont incorporé les informations de polarisation dans le processus de reconstruction 3D afin d'obtenir un modèle efficace et compris sur les zones réfléchissantes. Ils ont pour cela étendu l'algorithme proposé par [Woo+09] en incluant à la fonction d'énergie à minimiser des contraintes à la normale données par la polarimétrie.

4.3 Deep Learning et imagerie polarimétrique

Les algorithmes basés sur des réseaux de neurones convolutif font désormais partie intégrante du domaine de l'analyse de scènes. Afin de démontrer l'intérêt de l'imagerie polarimétrique en robotique, nous avons étudié comment étendre les méthodes de Deep Learning aux images polarimétriques. Ces travaux initiés dans le cadre du projet ANR VIPeR (VIsion Polarimétrique Pour la navigation de Robots) se poursuivent actuellement dans le projet ANR ICUB (Imagerie non Conventiionnelle pour une mobilité sécurisée en milieu Urbain).

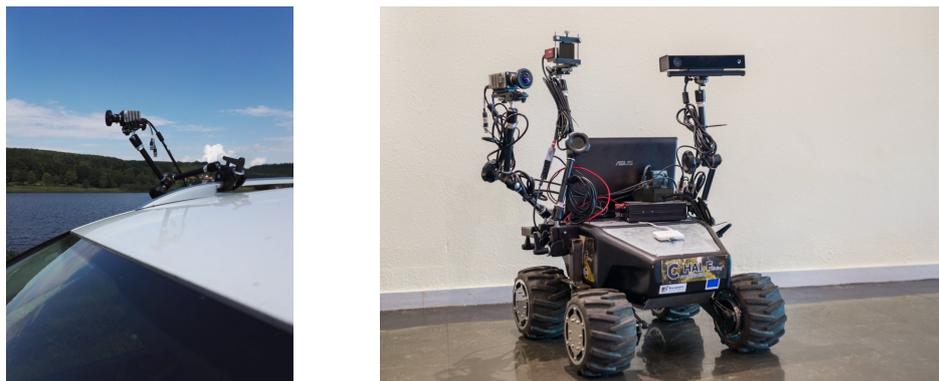


FIGURE 4.9 – Intérêts de l’instrumentation de la caméra polarimétrique sous ROS pour l’exploitation sur des véhicules : (a) acquisitions seules, (b) acquisitions multi-modales embarquées sur un robot Summit XL.

Sans catégorie	Ciel	Eau	Fenêtre	Route	Voiture	Bâtiment	Aucun
----------------	------	-----	---------	-------	---------	----------	-------

TABLE 4.1 – Convention des couleurs pour les différentes classes employées.

4.3.1 Mise en œuvre

La première étape du projet ANR VIPeR consistait à instrumenter une caméra polarimétrique sur un robot ou un véhicule afin d’inclure ce moyen de perception dans des tâches de robotique mobile. En effet, jusqu’à présent, les travaux récents incluant l’utilisation de caméras polarimétriques pour des tâches de robotique mobile ne présentaient que des concepts d’application sans tenir compte de l’aspect instrumentation. Au lancement du projet, l’offre commerciale des caméras polarimétriques était relativement restreinte et nous sommes parvenus à acheter une caméra de type DoFP chez le fournisseur 4D Technology. Comme décrit dans le chapitre 2, ce type de caméra est particulièrement bien adapté à des applications robotiques puisqu’il s’agit d’une caméra conventionnelle munie d’une grille de micro-polariseurs. Nous avons développé un package ROS (Robot Operating System) afin de pouvoir inclure facilement ce nouveau capteur dans un processus de vision pour la robotique (Figure 4.9).

Nous nous sommes concentrés ici sur l’analyse de scènes mettant en avant des objets ayant des surfaces particulièrement délicates à identifier comme les surfaces semi-réfléchissantes (fenêtres d’immeubles, vitres de voitures) ainsi que des étendues d’eau. Pour cela, des campagnes de mesure du robot équipé de la caméra polarimétrique ont été conduites afin d’obtenir la première base de données multimodale incluant des données polarimétriques POLABOT (<http://vibot.cnrs.fr/polabot.html>). La base contient 178 images de chaque modalité et annotées en utilisant les classes présentées dans le Tableau 4.1. La Figure (4.10) présente des images issues de la base et annotées.

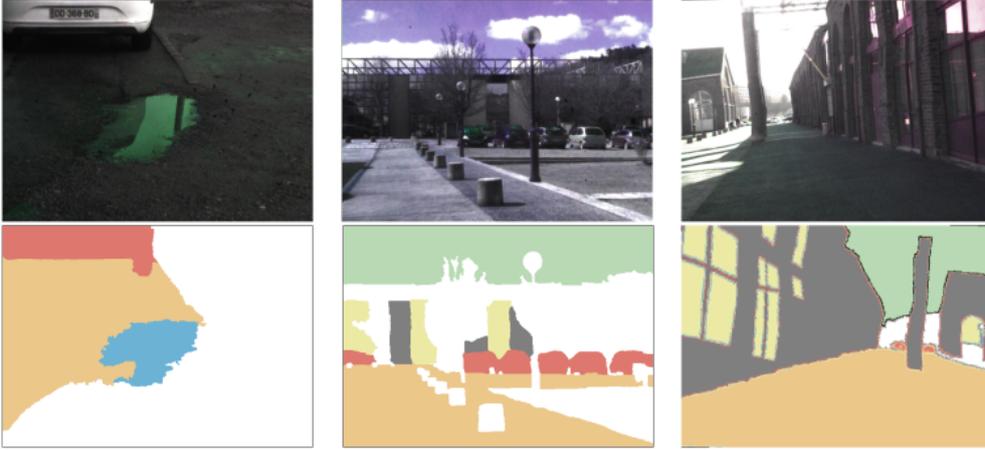


FIGURE 4.10 – Exemples d’images annotées issues de la base POLABOT : la première ligne est constituée d’images polarimétriques codées en HSL et la seconde ligne montre les images annotées associées.

4.3.2 Augmentation des données

Pour des bases de données de petite taille comme celle présentée plus haut, il est judicieux d’avoir recours à des techniques d’augmentation afin d’améliorer l’entraînement du réseau lors de la phase d’apprentissage [PW17]. Pour exploiter directement les algorithmes de Deep Learning sur les images polarimétriques, nous utilisons la correspondance entre le modèle de couleur HSL et les paramètres de polarisation donnée par l’équation (2.29) du chapitre 2. Cependant, contrairement à des images couleurs classiques les images de polarisation ont des propriétés particulières qui empêchent d’appliquer directement les techniques d’augmentation classique si l’on souhaite conserver les propriétés physiques des images. En effet, les rotations et les symétries ne peuvent pas être employées directement car l’angle de polarisation n’est pas invariant par ces transformations. Pour illustrer ce phénomène, la Figure 4.11 montre les images de polarisation d’une sphère uniformément éclairée. Nous constatons directement que pour toute rotation de la caméra, l’image du degré de polarisation reste inchangée contrairement à l’image de l’angle de polarisation.

Par conséquent, si θ désigne l’angle de rotation en degré appliquée à l’image, la teinte H de l’image résultante devra être rectifiée selon :

$$H = (H - 2\theta) [360^\circ]. \quad (4.5)$$

De la même manière, pour les symétries axiales, la teinte H de l’image sera rectifiée selon :

$$H = (-H) [360^\circ]. \quad (4.6)$$

La Figure 4.12 montre le résultat de la rectification de l’augmentation dans le cas d’une rotation à 90° . Nous pouvons par ailleurs constater que la chaussée humide polarise la

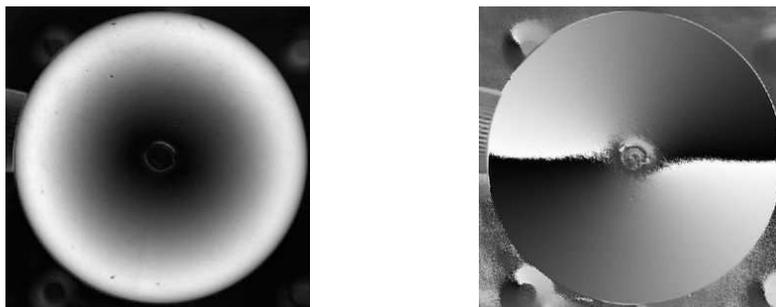


FIGURE 4.11 – Paramètres de polarisation d’une sphère uniformément éclairée : (a) degré de polarisation, (b) angle de polarisation.

Réseau	Augmentation	MIoU(%)			Recall(%)		
		Image2	Image4	Average	Image2	Image4	Average
SegNet	standard	15.20	0.35	15.44	24.67	31.55	27.29
	rectifiée	40.91	38.22	41.44	51.02	42.67	52.17
DeepLab	standard	36.84	35.15	39.00	41.42	46.45	46.16
	rectifiée	56.83	66.78	56.29	64.10	72.23	68.11

TABLE 4.2 – Influence de l’augmentation rectifiée sur la qualité des réseaux.

lumière. En effet, le degré de polarisation élevé dans ces zones conduit à une saturation élevée sur l’image couleur HSL laissant par conséquent apparaître de la couleur qui renseigne directement de la valeur de l’angle de polarisation de la lumière réfléchie.

4.3.3 Intérêt de l’augmentation rectifiée

Pour évaluer l’intérêt de réaliser une augmentation rectifiée respectant les contraintes physiques, nous avons augmenté la base de données en utilisant les rotations et symétries pour obtenir 2136 images pour l’étape d’apprentissage. Deux méthodes d’augmentation ont été utilisées : l’augmentation classique et l’augmentation rectifiée. La base de test est quand à elle constituée d’une séquence de 8049 images obtenues grâce au robot équipé de la caméra polarimétrique comme décrit plus haut. Deux réseaux ont également été testés : SegNet [BKC17] et DeepLab v3 [Che+17]. Pour les deux réseaux les paramètres choisis sont identiques avec : taux d’apprentissage $\eta = 10^{-4}$, optimiseur Adam et entropie croisée comme fonction d’erreur. Le Tableau 4.2 regroupe les comparaisons des métriques MIoU (Mean Intersection of Union) et Recall (rappel) calculées sur les deux images 2 et 4 en considérant l’ensemble des classes citées ci-dessus. Pour les deux réseaux, l’augmentation rectifiée conduit à de meilleurs résultats.

La Figure 4.13 permet de comparer visuellement les effets de l’augmentation rectifiée pour les deux classifieurs sur un ensemble de 8 images. Le réseau DeepLab v3 produit de meilleurs résultats.

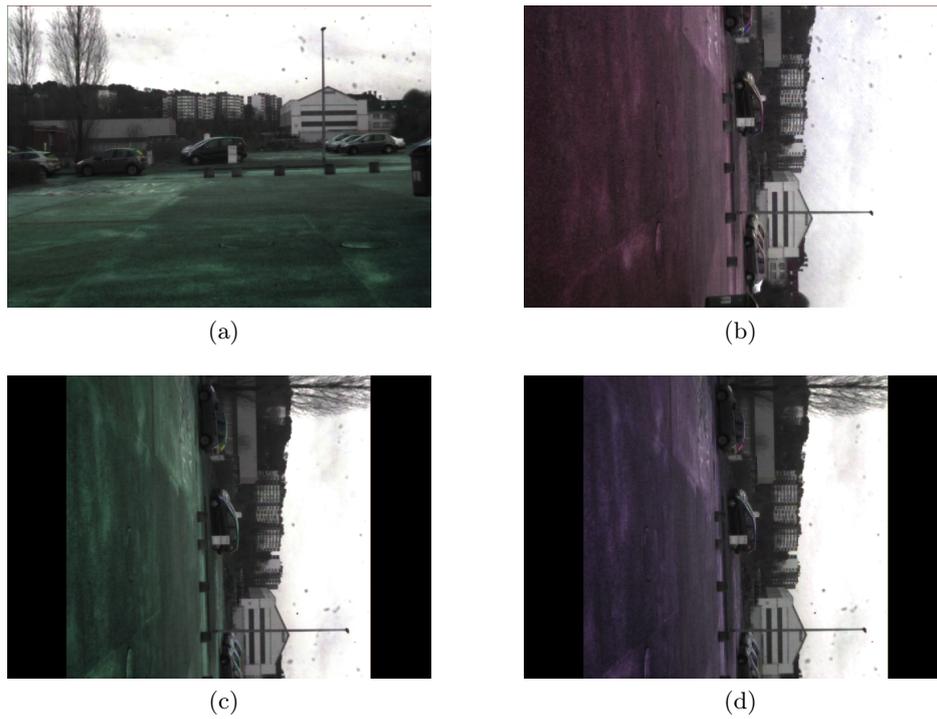


FIGURE 4.12 – Illustration de la rectification de l’augmentation pour les images polarimétriques : (a) image prise avec la caméra orientée horizontalement, (b) image prise avec la caméra orientée verticalement, (c) résultat de l’augmentation à 90° classique, (d) résultat de l’augmentation à 90° rectifiée.

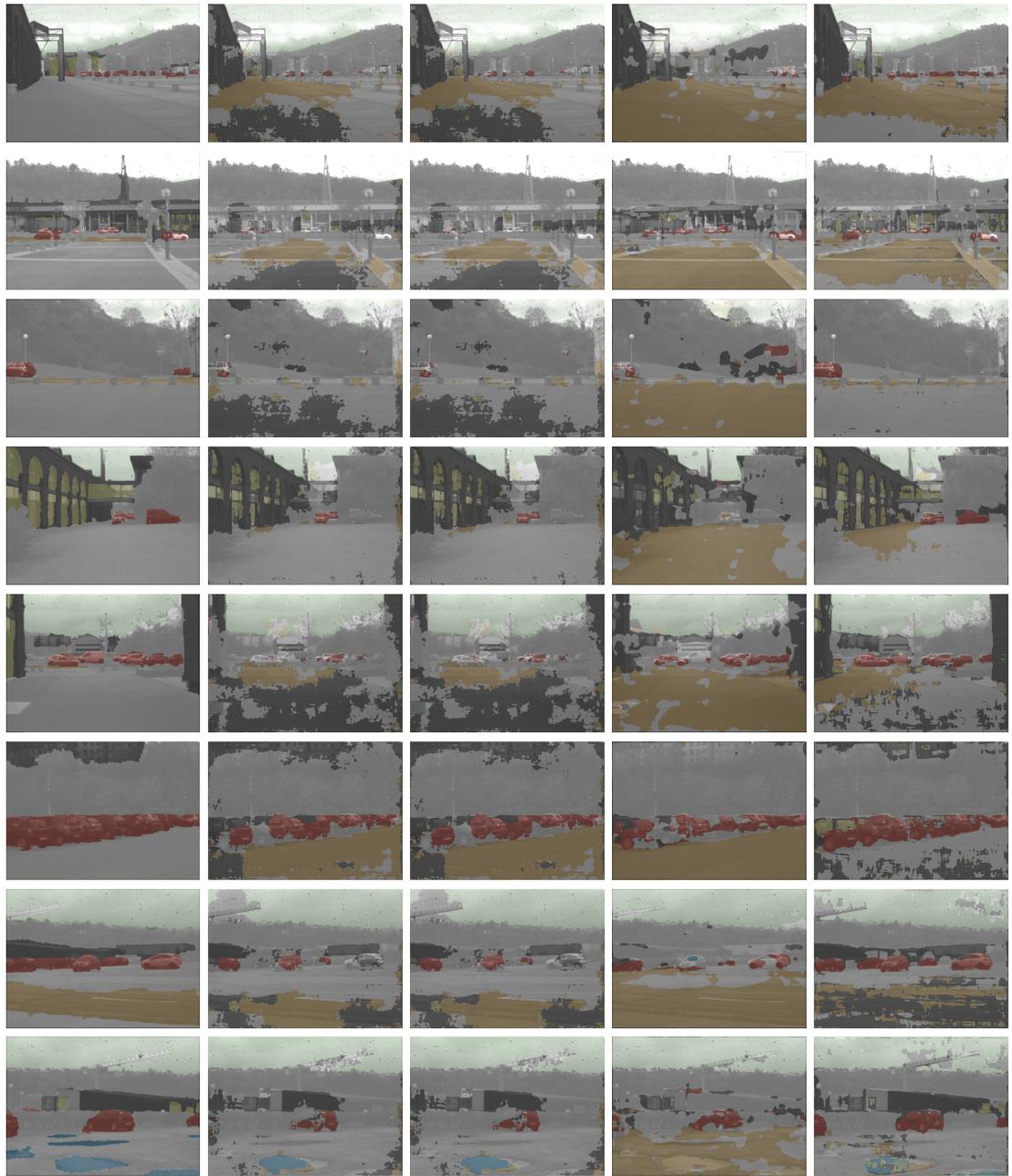


FIGURE 4.13 – Exemples de segmentation réalisée sur 8 images : la 1^{ère} colonne représente la vérité terrain, les 2^{ème} et 3^{ème} colonnes représentent le résultat obtenu pour SegNet avec respectivement augmentation standard et augmentation rectifiée, les 4^{ème} et 5^{ème} colonnes représentent le résultat obtenu pour DeepLab avec respectivement augmentation standard et augmentation rectifiée.

	Sans catégorie	Ciel	Eau	Fenêtre	Route	Voiture	Bâtiment	Aucun
Pola	92.49%	81.71%	85.91%	64.35%	83.95%	64.63%	79.89%	89.38%
RGB	80.14%	89.57%	78.61%	44.50%	78.45%	48.48%	67.84%	83.4%

TABLE 4.3 – Précision par classe de la segmentation appliquée sur les images de test.

4.3.4 Comparaison des modalités

Pour illustrer l'intérêt de l'utilisation de l'imagerie polarimétrique pour la segmentation sémantique d'images, nous avons comparé les modalités RGB et polarimétrique grâce à la base de données POLABOT [Bla+19]. Pour cette expérience, le réseau SegNet a été utilisé en appliquant les mêmes caractéristiques que celles données précédemment. La Figure 4.14 montre l'évolution des métriques lors de l'apprentissage pour les deux réseaux : le réseau utilisant les images couleurs RGB et le réseau utilisant l'imagerie polarimétrique. Les scores indiqués pour le réseau utilisant l'imagerie polarimétrique sont meilleurs mais il faut prendre en considération que les classes ont été volontairement choisies afin de surligner l'intérêt de la modalité pour les objets tels que l'eau ou les vitres.

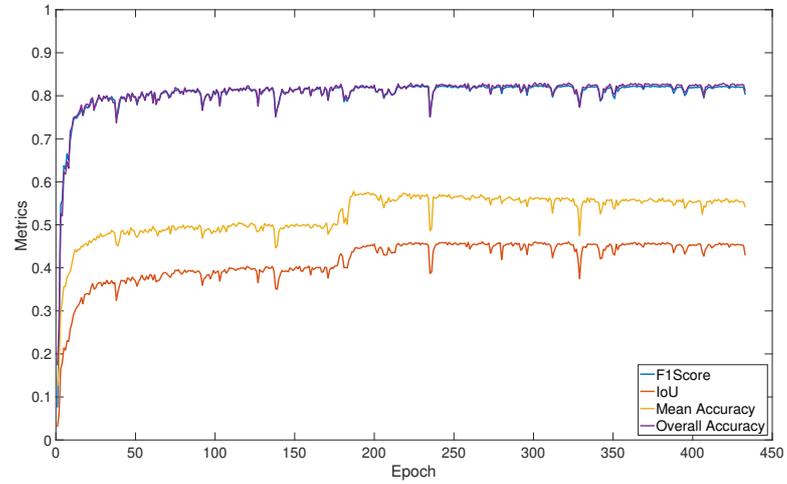
Le Tableau 4.3 montre que l'imagerie polarimétrique donne logiquement de bons résultats pour les classes polarisant la lumière à l'exception du ciel. En effet, le ciel produit de la lumière polarisée par diffusion, mais les valeurs de l'angle de polarisation ne sont pas constantes et dépendent grandement de la position du soleil dans le ciel et de la direction d'observation. Il apparaît dès lors évident que le meilleur moyen de discriminer le ciel du reste est de s'appuyer sur l'information colorimétrique : le ciel étant principalement bleu.

La Figure 4.15 montre le résultat de la segmentation en utilisant les deux réseaux pour une image présentant une flaque d'eau sur laquelle se refléchi le ciel. Dans le cas du réseau basé sur les images de polarisation, la flaque est correctement segmentée contrairement au réseau basé sur les images couleurs.

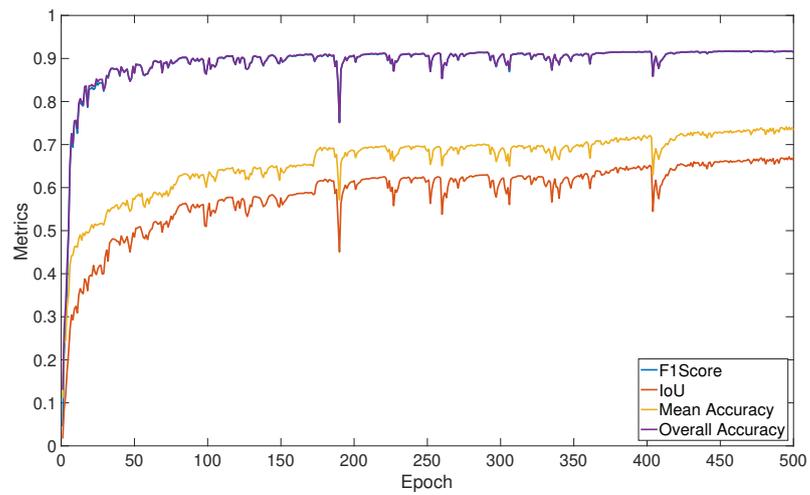
4.4 Conclusion

Comme nous venons de le voir, l'utilisation de l'imagerie polarimétrique pour l'analyse de scène s'avère être un outil prometteur dès lors évidemment que les objets de la scène produisent de la lumière polarisée. C'est le cas de l'eau en particulier et nous avons vu comment exploiter les informations de polarisation pour la détection d'étendues d'eau en robotique mobile terrestre. Pour d'autres surfaces, comme les surfaces semi-réfléchissantes, il est envisageable d'étendre l'utilisation de l'information polarimétrique aux drones afin d'éviter les collisions avec les fenêtres des immeubles. Pour l'analyse de scènes, l'information de polarisation seule est cependant beaucoup trop restrictive et nous avons mis en œuvre un système d'acquisition stéréopolarimétrique lors de la thèse de Mohammad Iqbal [Iqb11] afin d'obtenir à la fois les informations de polarisation et la géométrie de la scène.

Dès lors que l'on travaille sur l'analyse de scènes il devient désormais incontournable



(a)



(b)

FIGURE 4.14 – Évolution des métriques lors de l’entraînement des réseaux : (a) modalité RGB, (b) modalité polarimétrique.

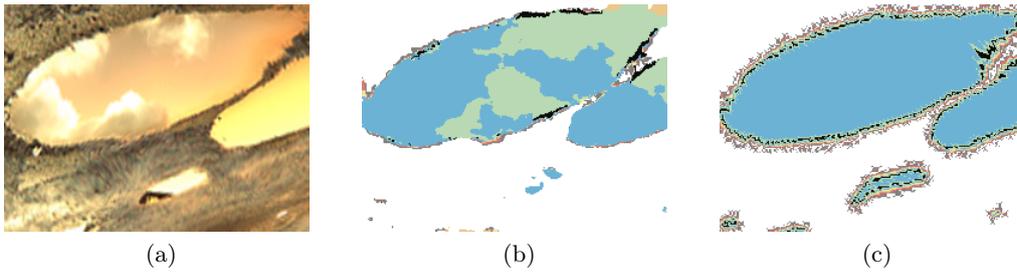


FIGURE 4.15 – Intérêt de l’imagerie polarimétrique pour s’affranchir de problèmes liés à la réflexion : (a) image polarimétrique, (b) résultat de la segmentation en utilisant le réseau RGB et (c) résultat de la segmentation en utilisant le réseau polarimétrique.

de se pencher sur les techniques de Deep Learning afin de proposer des algorithmes efficaces pour l’interprétation de scènes et l’aide à la navigation. Dans le cadre du projet ANR ICUB en collaboration avec le laboratoire LITIS de Rouen, Peugeot et Stéréolabs, nous nous intéressons à l’exploitation de l’information de polarisation stéréoscopique afin de développer un système d’aide à la navigation en conditions dégradées : brouillard, flaques d’eau sur la chaussée, etc. Après avoir développé une technique d’augmentation adaptée aux images de polarisations et utilisables dans le cadre de l’apprentissage profond [Bla+19], notre doctorant Marc Blanchon, que nous encadrons dans le projet ICUB, va poursuivre son travail sur l’utilisation d’une paire stéréo de caméras polarimétriques afin de proposer une approche similaire à celle de Godard [GMB17] mais adaptée à la modalité de polarisation.

Actuellement, les caméras polarimétriques temps-réel utilisables en robotique ne fournissent pas d’information couleur ce qui est préjudiciable pour obtenir une analyse de scène complète par vision. Nous avons par conséquent initié des travaux sur la fusion de données entre imagerie polarimétrique couleur et stéréo pour l’analyse de scènes [Cro+18 ; Zha+19]. D’ici quelques années cependant, nous pourrions certainement obtenir des imageurs complets : couleur et polarisation comme présenté dans cette étude [Mu+17] et ainsi entrevoir de nouveaux axes de recherche.

Chapitre 5

Estimation d'attitude

LA diffusion de la lumière du soleil par l'atmosphère constitue une source lumineuse polarisée très importante en milieu extérieur. Comme nous le verrons plus en détails dans l'introduction de ce chapitre, le ciel produit une carte de polarisation qui est utilisée par de nombreuses espèces animales comme les abeilles ou les papillons afin de pouvoir s'orienter dans l'espace [RW82 ; RZW04]. Les Vikings étaient capables de naviguer de la Norvège en Amérique sans instrument de navigation spécifiques en utilisant la position des étoiles et du soleil. Ce dernier n'étant pas toujours facilement visible sous les latitudes septentrionales, de nombreux travaux ont été menés afin de comprendre comment le Spath d'Islande (cristal de calcite également appelé pierre du soleil) leur permettait d'exploiter la carte polarimétrique du ciel pour s'orienter [Hor+11 ; Rop+11]. Après avoir décrit les modèles physiques permettant de représenter la polarisation par diffusion, le chapitre présentera un état des lieux des différentes méthodes utilisées pour extraire les informations d'orientation à partir de la carte polarimétrique du ciel. La méthode que nous avons développée lors du projet ANR VIPeR sera ensuite détaillée dans la dernière section.

5.1 Introduction

Les abeilles exploratrices parviennent à s'orienter grâce à la position du soleil et à l'analyse de la polarisation du ciel lorsque ce dernier est caché. De retour à la ruche, une danse est réalisée indiquant avec précision la direction des ressources alimentaires en s'appuyant sur l'analyse de la polarisation du ciel pour se repérer dans l'espace [RW82]. Leur horloge biologique interne leur permet d'ajuster la direction de leur danse en fonction du temps. D'une manière très similaire, les papillons Monarques d'Amérique du Nord utilisent une boussole solaire et leurs capteurs polarimétriques afin d'exploiter les informations de polarisation du ciel pour réaliser leur spectaculaire voyage migratoire à l'automne de l'Amérique du Nord jusqu'au Mexique [RZW04]. Un dernier exemple remarquable est celui des scarabées africains qui, lors de leurs déplacements nocturnes, exploitent la carte polarimétrique du ciel obtenue grâce à la diffusion des rayons lumineux de lune par les particules de l'atmosphère [Dac+03]. De nombreux autres exemples peuvent être retrouvés dans [KDG12] et [SMF12].

Comme nous le verrons par la suite, les applications bio-inspirées permettant d'estimer l'orientation des robots par imagerie polarimétrique restent peu répandues. La raison principale est qu'il n'est *a priori* pas nécessaire pour un robot d'être muni d'une caméra

polarimétrique puisque les systèmes GPS (Global Positioning System) associés aux centrales inertielles permettent très efficacement de localiser le robot et d'en estimer son orientation. Nous pouvons cependant envisager cette nouvelle modalité afin par exemple de recalibrer les centrales inertielles qui ont une forte tendance à dériver au cours du temps [Zhi+18]. Cochran et al. [CMW04] ont montré comment les grives migrateurs parvenaient à recalibrer leur boussole magnétique. Dans de nombreuses situations également, il est pertinent de trouver des solutions de localisation indépendante des informations du GPS. Par exemple, dans le cas de la cartographie fluviale à partir d'un drone Scherer et al. [Sch+12] ont développé des algorithmes de navigation prenant en compte le caractère intermittent des informations GPS en raison des arbres en surplomb de la rivière qui empêchent la bonne réception des signaux. Dans [Ayc+16] les auteurs évoquent également l'intérêt de l'information polarimétrique en complément des informations GPS.

5.1.1 Imageurs polarimétriques

Les premières cartographies de la polarisation du ciel étaient obtenues séquentiellement grâce à un balayage du ciel par un détecteur polarimétrique [BG82]. Pour obtenir directement une image polarimétrique de la voûte céleste, il est donc nécessaire de combiner un imageur polarimétrique et un système optique omnidirectionnel. Les premières images de cartographie de polarisation de la voûte céleste sont apparues en 1997 avec un système original arrimé au sol constitué d'un miroir sphérique placé à même le sol et d'un appareil photo situé à une hauteur de 2 mètres [ND97]. L'appareil photo employé, un Nishika N8000 stereoscopic, était un appareil muni de 4 ouvertures sur lesquelles les auteurs avaient placés des polariseurs suivant quatre orientations différentes. Après numérisation des films, les images du degré et de l'angle de polarisation étaient obtenus comme décrit dans le chapitre 2. De manière plus conventionnel, [HV97; PHW01; Miy+09] ont utilisé une caméra munie d'un objectif fish-eye et d'un filtre polariseur tournant placé devant l'objectif. Le système utilisé par [VL97] intègre le filtre polariseur entre la cellule photosensible et l'objectif ce qui permet d'avoir une meilleure estimation des paramètres de polarisation. Stürzl et Carey [SC12] ont été les premiers à réaliser un système temps-réel en utilisant quatre caméras fish-eye équipées chacune d'un filtre polariseur orienté différemment. Ces quatre principales techniques sont représentées schématiquement sur la Figure 5.1. Le deuxième volet du projet ANR VIPeR a été pour nous l'occasion de proposer un nouvel imageur temps-réel en utilisant directement une caméra polarimétrique DoFP associée à un objectif fish-eye [Ras+18] permettant ainsi de nous affranchir de l'étape de calibrage conséquente imposée par le précédent système.

5.1.2 Applications en robotique

En 2000, Lambrinos et al. [Lam+00] ont été les premiers à avoir introduit l'information de polarisation en robotique mobile comme outil pour la navigation. L'objectif était de reproduire le comportement de fourmis exploratrices qui parviennent à rentrer en ligne droite grâce à leur sensibilité à la polarisation du ciel. Le robot présenté sur la Figure 5.2(a) n'utilisait pas d'imageur polarimétrique mais un ensemble de 6 photodiodes

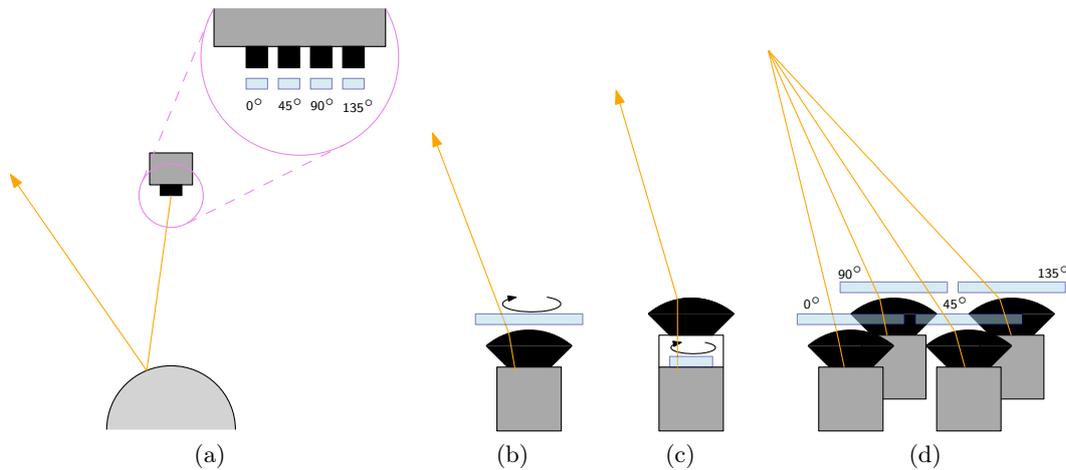


FIGURE 5.1 – Imageurs polarimétriques pour la mesure des paramètres de polarisation de la voûte céleste : (a) association d’un miroir sphérique et d’une caméra à 4 ouvertures, (b) filtre polariseur tournant placé devant l’objectif fish-eye d’une caméra, (c) filtre polariseur tournant placé entre l’objectif fish-eye et le capteur, (d) 4 caméras fish-eye équipées de polariseurs.

munies de filtres polariseurs linéaires fixes qui permettait d’extraire les informations de polarisation du ciel. La même tâche de navigation en ligne droite à partir des informations de polarisation du ciel a été reprise par Dupeyroux et al. [Dup+17] en embarquant une paire de photodiodes équipées de filtres polariseurs croisés et pilotables sur un robot marcheur hexapode (Figure 5.2(b)). Dans les deux exemples cités ci-dessus, l’information de polarisation est utilisée comme un compas pour la navigation : les robots se déplacent sur un plan horizontal et les capteurs polarimétriques sont orientés vers le zénith. Selon cette configuration, l’angle de polarisation de la lumière diffusée est orthogonal au plan méridien contenant le soleil.

Stürzl et Carey [SC12] ont été les premiers à équiper un drone d’un imageur polarimétrique en utilisant le système présenté plus haut composé des quatre caméras fish-eye associées à des filtres polariseurs fixes. Les travaux présentés par ces auteurs ne visaient pas une tâche de navigation robotique en particulier mais avaient pour objectif de déterminer une méthode permettant de localiser le soleil à partir des images de polarisation du ciel.

5.2 Modélisation de la diffusion

5.2.1 Modèle de diffusion de Rayleigh

Le modèle de diffusion de Rayleigh est le modèle le plus simple et le plus efficace permettant de décrire l’état de polarisation du ciel [Cou88]. Ce mode de diffusion se produit lorsque la taille des particules est très petite par rapport à la longueur d’onde du

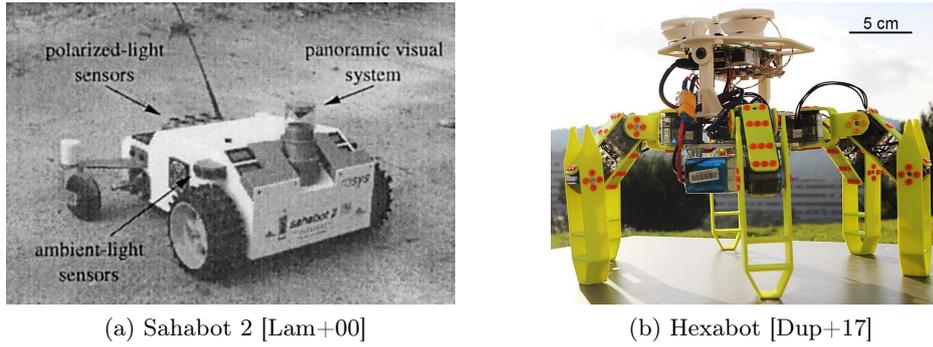


FIGURE 5.2 – Exemples de robots utilisant l'information de polarisation pour se déplacer en ligne droite.

rayon incident, ce qui est le cas avec les particules de l'atmosphère pour des longueurs d'onde dans le domaine du visible. L'intensité diffusée qui est proportionnelle à $\frac{1}{\lambda^4}$, où λ est la longueur d'onde du rayon incident, est par conséquent bien plus forte dans le bleu ($\lambda = 400nm$) que dans le rouge ($\lambda = 650nm$) conférant ainsi la couleur bleu au ciel. La lumière diffusée est partiellement linéairement polarisée orthogonalement au plan de diffusion défini par l'observateur placé en O , le point observé C et le soleil S comme indiqué sur la Figure 5.3. Le degré de polarisation s'exprime en fonction de l'angle de diffusion $\gamma = \widehat{SOC}$ selon :

$$\rho = \rho_{max} \frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma}, \quad (5.1)$$

où ρ_{max} est une constante représentant le degré de polarisation maximum pouvant être mesuré qui dépendra des conditions atmosphériques [PHW01]. En théorie, $\rho_{max} = 1$ et nous constatons que la lumière diffusée devient parfaitement linéairement polarisée lorsque l'angle de diffusion γ vaut 90° .

La Figure 5.4 représente les paramètres d'angle et de degré de polarisation calculés pour une position du soleil dont l'élévation correspond à 33° . Nous remarquons que le plan méridien solaire représente un axe de symétrie pour l'image de l'angle de polarisation : la partie droite étant l'opposée de la partie gauche. Par ailleurs, nous retrouvons logiquement que l'angle de polarisation de l'ensemble des points appartenant au plan méridien solaire est égal à 90° .

Il existe d'autres modèles de diffusion qui permettent de décrire de manière plus précise l'état de polarisation du ciel. On peut citer par exemple l'approche de Berry et al. [BDL04] qui permet de s'approcher du modèle de référence [CE54] et de représenter les singularités présentes dans la carte polarimétrique du ciel. Des observations ont en effet démontré l'existence de quatre directions non polarisées proches du soleil et de la position opposée au soleil par rapport au centre de la terre [Hor+02]. Trois de ces points singuliers portent le nom des personnes qui les ont observés pour la première fois : Arago, Babinet et Brewster.

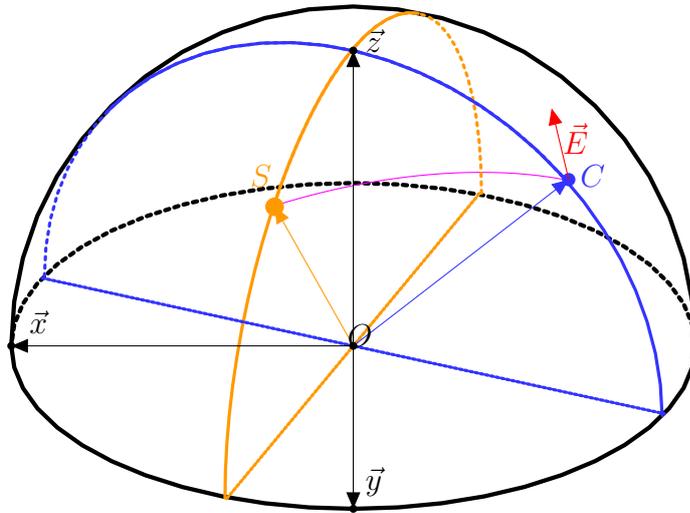


FIGURE 5.3 – Polarisation du ciel par diffusion : la lumière diffusée au point C vue par un observateur au point O est polarisée orthogonalement au plan de diffusion défini par les points S , O et C (position du soleil).

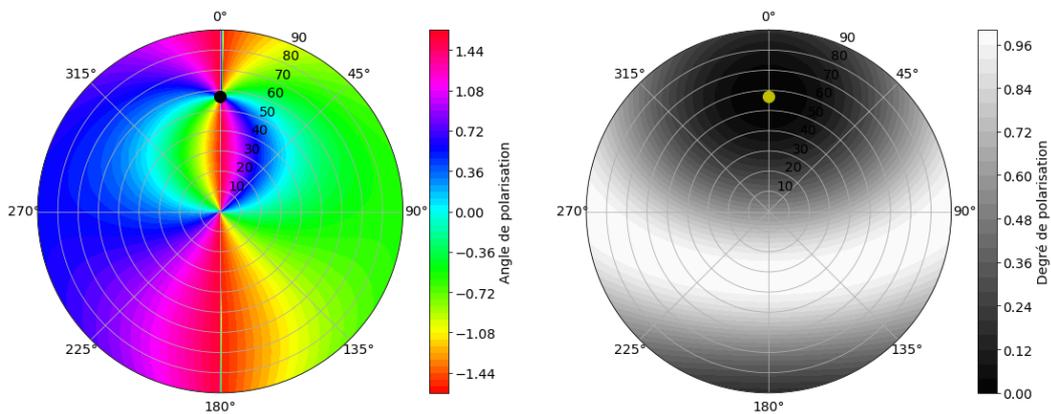


FIGURE 5.4 – Simulation des paramètres de polarisation du ciel pour une élévation du soleil de 33° (le soleil est représenté sur les graphiques par un disque) : (a) angle de polarisation, (b) degré de polarisation.

5.2.2 Polarisation du ciel en conditions dégradées

Présence de nuages

Comme nous pouvons le voir sur les images que nous avons obtenues lors du projet VIPeR sur la Figure 5.5 le modèle de diffusion de Rayleigh reste valide pour les régions où il n'y a pas de nuage ainsi que pour les régions où les nuages sont très haut dans le ciel. Pomozi et al. [PHW01] ont étudié en détails le comportement du modèle de diffusion de Rayleigh en présence de nuages. La lumière perçue en provenance des nuages peut être décomposée en deux parties comme l'illustre la Figure 5.6. La première composante n'est pas polarisée et provient directement de la diffusion de la lumière par le nuage. La seconde est issue de la diffusion de la lumière par les particules comprises entre le nuage et l'observateur. Pour des nuages denses, la première composante est prédominante donnant ainsi une lumière complètement non-polarisée et donc inexploitable pour la navigation. Lorsque les nuages sont de haute altitude ou sont relativement peu denses, la seconde composante prédomine alors et génère une lumière partiellement linéairement polarisée. Le degré de polarisation de la lumière produite est dans ce cas plus faible que dans le cas des rayons générés par un ciel parfaitement bleu en fonction des caractéristiques du nuage et de son altitude. L'angle de polarisation n'est pas perturbé et reste équivalent à sa valeur en l'absence de nuage. Pour exploiter la polarisation du ciel pour des tâches de navigation, nous nous reposerons donc sur l'image de l'angle de polarisation et conserverons l'image de degré de polarisation comme une mesure de confiance afin d'en exclure les nuages.

Pust et Shaw [PS08] ont par ailleurs montré que sous certaines configurations de nuages, la lumière pouvait être perçue polarisée parallèlement au plan de diffusion, donc à 90° de ce qui est attendu en raison de phénomènes plus complexes liés à la nature des nuages (cristaux de glace ou gouttelettes). Dans ce cas, le degré de polarisation reste cependant très faible et ces régions nuageuses peuvent ainsi être aisément exclues.

Longueur d'onde

De nombreuses espèces d'insectes sont sensibles à la perception de la polarisation de la lumière du jour dans l'ultraviolet (UV), ce qui peut paraître paradoxal puisque le degré de polarisation est considérablement plus faible dans cette longueur d'onde que dans le bleu ou le vert [BH04]. Barta et Horváth sont parvenus à démontrer l'intérêt de l'exploitation de la polarisation dans l'ultraviolet. Ils ont montré que si la couche d'air entre un nuage et un observateur au sol est partiellement éclairée par le soleil, le degré de polarisation linéaire de la lumière provenant de la région nuageuse est plus élevé dans l'ultraviolet que dans le bleu, car dans cette bande spectrale, la lumière du ciel non polarisée et pauvre en UV atténue moins l'effet de la diffusion de la lumière pour les particules situées sous le nuage.

De la même manière, les auteurs ont montré que les insectes pouvaient utiliser la polarisation liée à la diffusion de la lumière par des particules situées sous le feuillage si ces dernières étaient éclairées par le soleil. La lumière verte non polarisée issue de la canopée est pauvre en ultraviolet et par conséquent atténue moins l'effet de polarisation

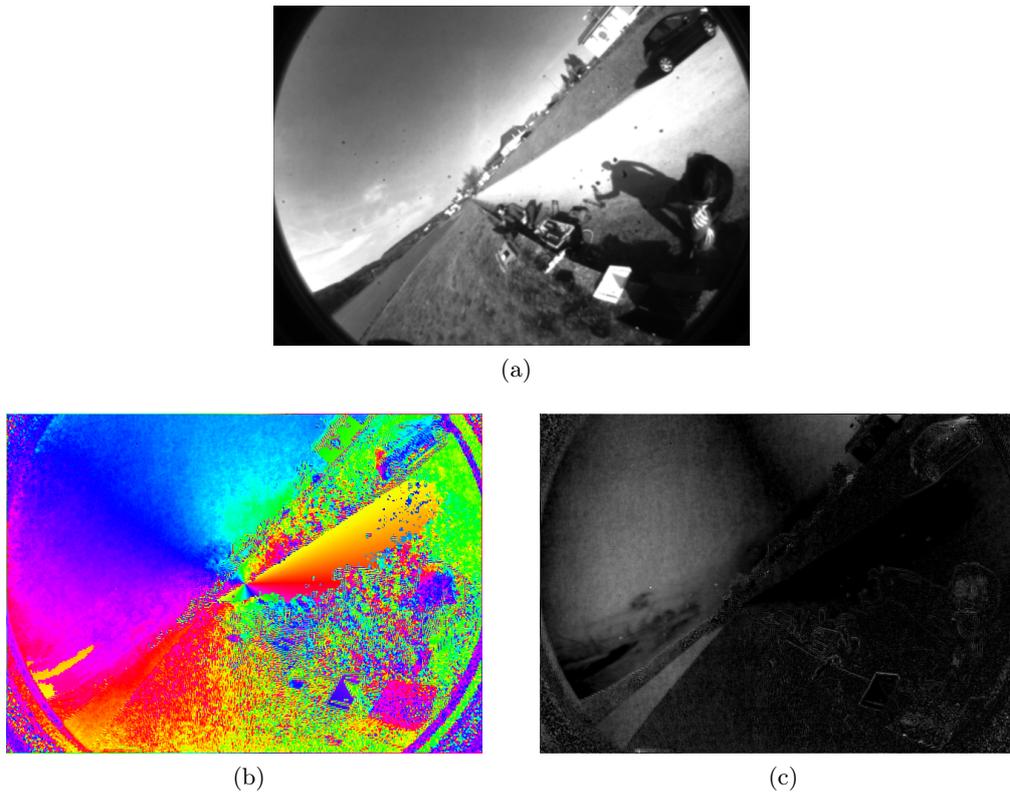


FIGURE 5.5 – Paramètres de polarisation d’une scène présentant le ciel sur partie supérieure des images : (a) intensité, (b) angle de polarisation et (c) degré de polarisation. Comme décrit par [PHW01], l’angle de polarisation reste valide sur la zone où sont présents des nuages de hautes altitudes. Le degré de polarisation est quant à lui largement diminué.

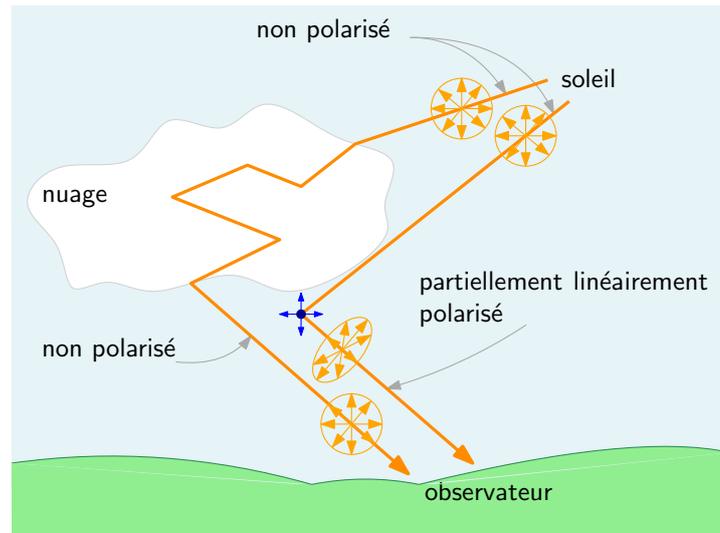


FIGURE 5.6 – Représentation schématique des deux composantes de la lumière provenant de la direction d'un nuage d'après [PHW01].

par diffusion pour les particules situées sous le feuillage et directement éclairée par le soleil.

5.3 Relations avec l'attitude

Les méthodes citées plus haut pour l'estimation de la position du soleil imposaient un déplacement parfaitement horizontal du robot en utilisant l'information de polarisation du ciel comme une boussole. Afin de pouvoir inclure l'information de polarisation dans un processus de navigation plus générique nous avons explicité les relations entre l'angle de polarisation et l'attitude pour n'importe quelle configuration et avons proposé une méthode d'estimation des angles de pose[Ras+18].

5.3.1 Expression du champ électrique dans une base locale

En s'appuyant sur le modèle de diffusion de Rayleigh, nous savons que la composante électrique E de l'onde électromagnétique est orthogonale au plan de diffusion défini par les vecteurs s et c pointant respectivement vers le soleil et le point du ciel observé. Ainsi le vecteur du champ électrique normé est donné par :

$$E = \frac{s \wedge c}{\|s \wedge c\|}. \quad (5.2)$$

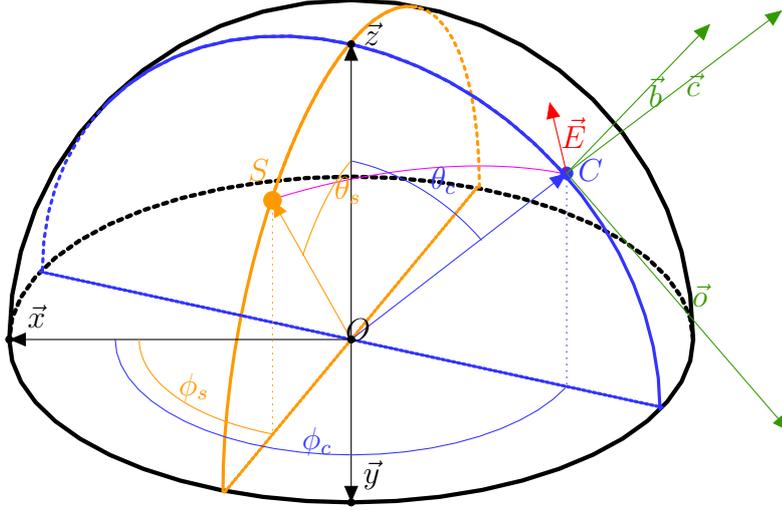


FIGURE 5.7 – Modélisation de la diffusion de Rayleigh dans un repère \mathcal{P} attaché à un pixel de la caméra dont le rayon associé pointe vers un point C . (o, b, c) constitue une base orthonormée associée à ce repère.

Définissons un repère \mathcal{P} attaché à un pixel de la caméra et associé à une base orthonormée (o, b, c) exprimée dans le repère de la caméra \mathcal{C} selon (Figure 5.7) :

$$c = \begin{bmatrix} \sin \theta_c \cos \phi_c \\ \sin \theta_c \sin \phi_c \\ \cos \theta_c \end{bmatrix}, \quad o = \begin{bmatrix} \cos \theta_c \cos \phi_c \\ \cos \theta_c \sin \phi_c \\ -\sin \theta_c \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -\sin \phi_c \\ \cos \phi_c \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Durant les acquisitions, l'angle de polarisation α correspondant à l'orientation du champ électrique E est mesuré en chacun des pixels dans leur repère \mathcal{P} :

$$E_{obc} = \begin{bmatrix} E_o \\ E_b \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

D'après les équations (5.2) et (5.4) nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \frac{s \wedge c}{\|s \wedge c\|} \cdot o = E_o = \cos \alpha \\ \frac{s \wedge c}{\|s \wedge c\|} \cdot b = E_b = \sin \alpha \end{cases}, \quad (5.5)$$

conduisant à :

$$\begin{cases} (s \wedge c) \cdot o = \|s \wedge c\| \cos \alpha \\ (s \wedge c) \cdot b = \|s \wedge c\| \sin \alpha \end{cases}. \quad (5.6)$$

Puisque $\|s \wedge c\| = \|s\| * \|c\| * \sin \gamma = \sin \gamma$ (où γ est l'angle entre la direction du soleil et la direction du point observé dans le ciel) nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} (s \wedge c) \cdot o &= \sin \gamma \cos \alpha \\ (s \wedge c) \cdot b &= \sin \gamma \sin \alpha \end{cases} \quad (5.7)$$

Le précédent système peut se réécrire en appliquant les règles suivantes :

$$\left| \begin{array}{l} (s \wedge c) \cdot o = (s \wedge (o \wedge b)) \cdot o \\ = ((s \cdot b) o - (s \cdot o) b) \cdot o \\ = s \cdot b \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} (s \wedge c) \cdot b = (s \wedge (o \wedge b)) \cdot b \\ = ((s \cdot b) o - (s \cdot o) b) \cdot b \\ = -s \cdot o \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Nous obtenons au final :

$$\begin{cases} s \cdot b &= \sin \gamma \cos \alpha \\ s \cdot o &= -\sin \gamma \sin \alpha \end{cases} \quad (5.9)$$

Ainsi le vecteur pointant vers le soleil s'exprime directement dans le repère \mathcal{P} en fonction des angles α et γ :

$$s_{obc} = \begin{bmatrix} -\sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \alpha \\ \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

D'après l'équation (5.1) liant le degré de polarisation ρ en fonction de l'angle de diffusion γ , nous pouvons finalement en déduire que l'expression du vecteur pointant dans la direction du soleil dans le repère \mathcal{P} s'exprime directement en fonction des paramètres de polarisation mesurés : l'angle de polarisation α et le degré de polarisation ρ .

5.3.2 Expression liant la rotation aux paramètres de polarisation

Nous pouvons définir la matrice de rotation R_{cp} permettant de passer du repère de la caméra \mathcal{C} au repère d'un pixel \mathcal{P} comme illustré sur la Figure (5.8). L'utilisation d'un système omnidirectionnel nous permet d'écrire R_{cp} comme la combinaison de deux rotations :

$$R_{cp} = R_{z_c}(\phi_c) \cdot R_{y_c}(\theta_c), \quad (5.11)$$

où les valeurs de ϕ_c et θ_c en chacun des pixels de la caméra sont obtenus suite à la calibration géométrique de la caméra. En définissant R la matrice de rotation de la caméra dans le repère monde nous avons donc la relation suivante entre la position du soleil s et les paramètres de polarisation :

$$R^t \cdot s = R_{cp} \begin{bmatrix} -\sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \alpha \\ \cos \gamma \end{bmatrix} = v. \quad (5.12)$$

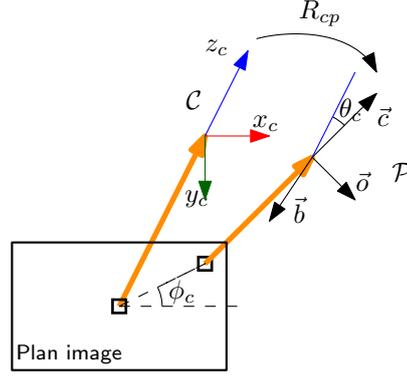


FIGURE 5.8 – Rotation entre le repère de la caméra \mathcal{C} et celui d'un pixel \mathcal{P} . Les rayons associés aux pixels sont représentés en orange. Le pixel central de la caméra a par construction le même repère que celui de la caméra.

5.3.3 Estimation de γ

Pour inclure les informations de polarisation dans l'estimation d'attitude, il est nécessaire d'estimer complètement le vecteur v défini par l'équation (5.12). Le degré de polarisation qui est directement lié à l'angle de diffusion γ est trop bruité et dépendant des conditions atmosphériques. Par conséquent, la première étape de notre méthode consiste en l'estimation de γ par des méthodes algébriques. Pour cela, nous considérons deux pixels différents de l'image mesurant chacun un angle de polarisation α_1 et α_2 pour respectivement deux orientations différentes c_1 et c_2 . Nous obtenons ainsi le système d'équation :

$$\begin{cases} R^t \cdot s = R_{cp_1} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \gamma_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \gamma_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \gamma_1 \end{bmatrix} \\ R^t \cdot s = R_{cp_2} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \gamma_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \gamma_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \gamma_2 \end{bmatrix} \end{cases} . \quad (5.13)$$

Nous en déduisons l'égalité :

$$R^t \cdot s = R_{cp_1} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \gamma_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \gamma_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \gamma_1 \end{bmatrix} = R_{cp_2} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \gamma_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \gamma_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

La précédente équation (5.14) peut être réécrite selon :

$$\underbrace{R_{cp_1} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{M_1} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \gamma_1 \\ \cos \gamma_1 \end{bmatrix} = \underbrace{R_{cp_2} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{M_2} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \gamma_2 \\ \cos \gamma_2 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Puisque les angles de polarisation α_1, α_2 pour deux points M_1 et M_2 sont connus, les angles γ_1, γ_2 peuvent être trouvés en résolvant le précédent système donné par l'équation (5.15). En définissant la matrice M telle que $M = M_2^t \cdot M_1$, nous obtenons :

$$\begin{cases} \gamma_1 = -\arctan \frac{M_{02}}{M_{01}} \\ \gamma_2 = -\arctan \frac{M_{20}}{M_{10}} \end{cases} \quad (5.16)$$

Les angles de polarisations et les angles de diffusion étant définis modulo π nous obtenons deux solutions pour exprimer le vecteur v : (α_1, γ_1) et $(\alpha_1 + \pi, -\gamma_1)$.

5.3.4 Algorithmes d'estimation d'attitude

Pour déterminer la rotation de la caméra, il est nécessaire de connaître l'information de la gravité. Celle-ci peut être donnée par un capteur externe ou déterminée en utilisant les propriétés des capteurs omnidirectionnels en exploitant l'horizon par exemple [Baz+12]. De manière plus anecdotique, il est possible d'exploiter la polarisation des étendues d'eau dans le cas d'une navigation maritime. Comme décrit dans le précédent chapitre, l'idéal est d'avoir des rayons lumineux proches de l'angle de réflexion de Brewster afin de garantir que la lumière réfléchie par l'eau est polarisée orthogonalement au plan d'incidence. Cette information est obtenue lorsque le degré de polarisation est particulièrement élevé. Dans ce cas, le champ électrique E est orthogonal au plan d'incidence défini par les vecteurs c (direction d'observation) et $z = [0, 0, 1]$. Le champ électrique normalisé est donc égal à :

$$E = \frac{z \wedge c}{\|z \wedge c\|}. \quad (5.17)$$

En appliquant le même raisonnement que dans la précédente section nous obtenons le même type de relation :

$$R^t \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = R_{cp} \cdot \begin{bmatrix} -\sin 2\theta \sin \alpha \\ \sin 2\theta \cos \alpha \\ \cos 2\theta \end{bmatrix} = w, \quad (5.18)$$

où θ est l'angle d'incidence ou de réflexion de la lumière sur l'eau. En prenant deux mesures pour deux rayons distincts réfléchis par l'eau nous pouvons comme décrit précédemment déterminer l'angle θ et par conséquent donner l'expression du vecteur z dans le repère d'un pixel. Pour la suite, nous considérons que la gravité est connue ou estimée par polarisation.

Rotation absolue

Pour cette méthode nous faisons l'hypothèse que la position du soleil dans le ciel est connu ou déterminée à partir de la localisation du robot et de l'heure. Ainsi, à partir de la mesure de l'angle de polarisation de deux points du ciel et à partir de la gravité nous avons le système suivant :

$$[s, z, s \wedge z] = R(t) \cdot [v(t), w(t), v(t) \wedge w(t)], \quad (5.19)$$

où l'opérateur \wedge désigne le produit vectoriel. La résolution de l'équation (5.19) permet donc d'estimer la rotation R si la position du soleil est connue.

Rotation relative

Dans ce cas, nous nous intéressons à l'estimation de la rotation entre deux poses successives. Nous pouvons appliquer la formule de l'équation (5.19) pour deux instants différents : t_1 et t_2 :

$$\begin{cases} [s, z, s \wedge z] = R_1 \cdot [v_1, w_1, v_1 \wedge w_1] \\ [s, z, s \wedge z] = R_2 \cdot [v_2, w_2, v_2 \wedge w_2] \end{cases},$$

où les indices $()_1$ et $()_2$ désignent les mesures pour les deux instants. Nous obtenons finalement la rotation relative entre les deux instants $R_{12} = R_1^T \cdot R_2$ par :

$$R_{12} = [v_1, w_1, v_1 \wedge w_1] \cdot [v_2, w_2, v_2 \wedge w_2]^{-1}. \quad (5.20)$$

5.4 Mise en œuvre

Pour évaluer les algorithmes proposés, nous avons utilisé une centrale inertielle (Inertial Measurement Unit - IMU) fixée solidairement sur la caméra afin d'obtenir une vérité terrain. Afin d'établir une approche la plus généraliste possible nous avons inclus différents repères comme indiqué sur le schéma de la Figure 5.9. Les transformations entre chacun de ses repères sont résumées par le Tableau 5.1. Avec les nouvelles notations, l'expression de la rotation absolue donnée par l'équation (5.19) s'écrit maintenant :

$$[s, z, s \wedge z] = R_{wv}(t) \cdot R_{vc} \cdot [v(t), w(t), v(t) \wedge w(t)]. \quad (5.21)$$

La rotation relative donnée par l'équation (5.20) devient :

$$R_{v_1v_2} = R_{vc} \cdot [v_1, w_1, v_1 \wedge w_1] \cdot [v_2, w_2, v_2 \wedge w_2]^{-1} \cdot R_{vc}^t. \quad (5.22)$$

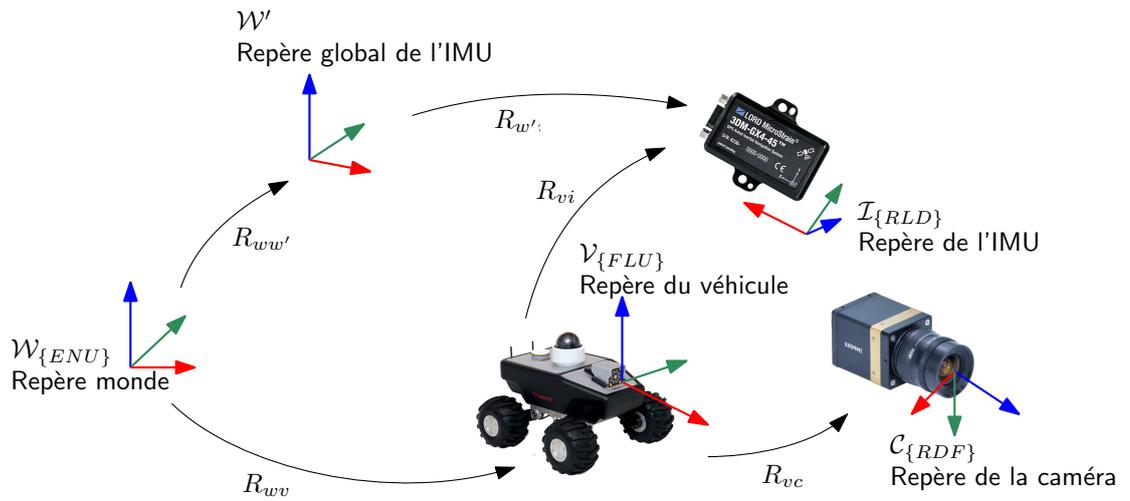


FIGURE 5.9 – Conventions utilisées pour l'ensemble des repères et des différentes transformations associées.

Nom	Description	Note
$R_{wv}(t)$	Rotation du véhicule à estimer	varie au cours du temps
$R_{ww'}$	Rotation entre le repère monde et le repère global de l'IMU	déterminé à partir des conditions initiales des acquisitions
$R_{w'i}(t)$	Vérité terrain fournie par l'IMU	varie au cours du temps
R_{vi}	Transformation entre l'IMU et le véhicule	calibré avec Toolbox Kalibr sous ROS [FRS13]
R_{vc}	Transformation entre la caméra et le véhicule	calibré avec Toolbox Kalibr sous ROS [FRS13]
R_{cp}	Rotation entre le repère de la caméra \mathcal{C} et le repère \mathcal{P} d'un pixel	calibré avec Toolbox Ocamcalib [SMS06]

TABLE 5.1 – Description des différentes rotations utilisées dans la modélisation.



FIGURE 5.10 – Système d'acquisition : la centrale inertielle est solidaire de la caméra.

5.4.1 Calibrage du système

Les expérimentations ont été menées en fixant l'IMU sur la caméra comme présenté sur la Figure (5.10). Nous avons utilisé la bibliothèque OcamCalib [SMS06] afin de calibrer géométriquement la caméra. L'avantage de cette méthode de calibrage est d'obtenir directement l'ensemble des valeurs (θ_c, ϕ_c) pour chacun des pixels de l'image et ainsi définir les matrices R_{cp} associées.

A partir des données obtenus par le calibrage géométrique, il est également possible de corriger les paramètres de polarisation mesurés en tout point en incorporant la matrice de Mueller réduite de l'objectif fish-eye [VL97]. La matrice de Mueller d'un objectif fish-eye pour un pixel donné peut s'approcher de la matrice de Mueller de la transmission de la lumière à travers un medium d'indice supérieur à celui de l'air :

$$M_{transmission} = \begin{bmatrix} \alpha + \eta & \alpha - \eta & 0 & 0 \\ \alpha - \eta & \alpha + \eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix}, \quad (5.23)$$

où α , η et γ sont des fonctions dépendant de l'angle d'incidence θ_c et de l'angle de réfraction θ_t . Les expressions de ces fonctions peuvent être retrouvées dans [KA89]. En utilisant l'indice de réfraction du verre et en appliquant la loi de Snell-Descartes, il est donc possible d'exprimer la matrice de Mueller de transmission en fonction de l'angle θ_c . Pour définir la matrice de Mueller en tout point de l'imageur, la matrice de changement de repère comme présenté équation (2.20) du chapitre 2 doit être appliquée :

$$M_{fish-eye}(\theta_c, \phi_c) = R_{rota}(\phi_c) \cdot M_{transmission}(\theta_c) \cdot R_{rota}(-\phi_c). \quad (5.24)$$

Lors de nos travaux nous avons utilisé la précédente formule en tout point de l'image en prenant l'indice de réfraction n égal à celui du verre. Il aurait été plus pertinent de développer notre propre méthode de calibrage en utilisant une source de lumière polarisée calibrée. La Figure 5.11 illustre l'erreur d'estimation de l'angle de polarisation d'une onde incidente parfaitement linéairement. Si une onde incidente est parfaitement polarisée, l'angle de polarisation mesuré diffère de l'angle de polarisation réel surtout lorsque l'angle d'incidence est très élevé.

5.4.2 Données synthétiques

Nous avons dans un premier temps testé nos algorithmes sur des données synthétiques. Les données issues de l'IMU lors des acquisitions en extérieur ont été utilisées afin d'obtenir une séquence de poses réelles de la caméra. Le modèle de diffusion de Rayleigh a été ensuite employé pour générer les paramètres de polarisation du ciel pour les différentes poses. La méthode que nous avons proposée donne évidemment de très bons résultats pour l'estimation des rotations absolues et relatives lorsqu'il n'y a pas de bruit sur les informations de polarisation comme nous pouvons le voir sur la Figure 5.12. En ajoutant du bruit aux paramètres de polarisation, notre méthode donne rapidement de très mauvais

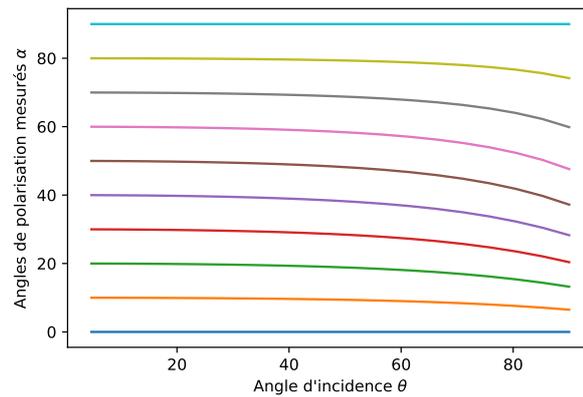


FIGURE 5.11 – Évolution de l'angle de polarisation mesuré en fonction de l'angle d'incidence.

résultats dans les deux cas. L'utilisation seule de deux points différents n'est pas suffisant pour fournir une estimation robuste de la pose. Dans la pratique, avec un objectif fish-eye nous obtenons un grand nombre de points du ciel exploitables pour l'estimation d'attitude à condition que le degré de polarisation soit suffisamment grand. Nous avons par conséquent utilisé une méthode de RANSAC (RANdom SAmple Consensus) pour les méthodes d'estimation absolue et relative en prenant aléatoirement 20 points du ciel ayant un degré de polarisation élevé. Cette méthode s'avère indispensable pour estimer correctement l'attitude de la caméra.

5.4.3 Expérimentations sur données réelles

Pour les expérimentations sur données réelles, nous avons cette fois exploité directement la mesure de l'angle de polarisation du ciel ainsi que le degré de polarisation. Les points sélectionnés pour appliquer la méthode de RANSAC ont été aléatoirement choisis parmi les points présentant un degré de polarisation élevé. La Figure 5.13 montre les paramètres de polarisation obtenus ainsi que l'angle de polarisation théorique calculé à partir du modèle de diffusion de Rayleigh pour la pose donnée par la centrale inertielle. La Figure 5.14 présente les résultats obtenus. L'estimation relative de la rotation donne de meilleurs résultats sauf pour certaines combinaisons des angles de rotations où l'erreur reste importante.

5.5 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre une méthode d'estimation d'attitude à partir des informations de polarisation de la lumière diffusée par le ciel. Comme nous l'avons vu, cette technique implique de mesurer l'angle de polarisation pour deux points différents, ce qui est généralement possible en utilisant un objectif fish-eye pour obtenir la couverture la plus large possible et lorsque le ciel présente des zones bleues. Le degré de polarisation est

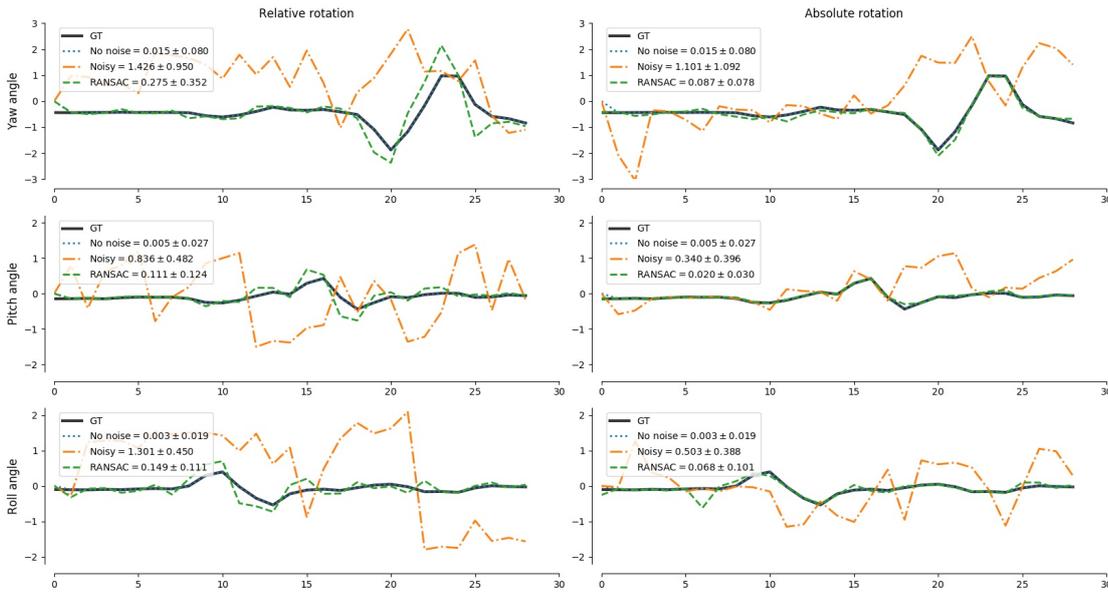


FIGURE 5.12 – Estimations de la rotation absolue et relative obtenues sur des données synthétiques : dans le cas idéal, avec du bruit et avec du bruit en utilisant une méthode de RANSAC.

dans notre cas uniquement exploité comme seuil de confiance pour les points à prendre en considération pour l'estimation d'attitude. Bien que donnant des résultats relativement bruités, une méthode d'estimation d'attitude à partir du degré de polarisation seul existe dans la littérature [Ham17] et pourrait être fusionnée avec notre technique. Lorsque le ciel est dégradé ou peu visible en raison de la canopée nous avons vu que le modèle de diffusion perdurait à condition d'adapter la longueur d'onde du système d'acquisition vers le proche UV. Les travaux présentés ici ont été en partie menés lors du projet ANR VIPeR et ont pu être présentés lors d'une conférence internationale [Ras+18].

Une première perspective des travaux menés ici consisterait à développer une technique basée sur la vision polarimétrique et géométrique en exploitant la détection de lignes horizontales ou verticales (en milieu urbain), ou bien en utilisant la ligne d'horizon afin de proposer un système d'estimation d'attitude complet basé uniquement sur la vision. Une seconde perspective que nous envisageons de développer concerne l'utilisation des réseaux de neurones pour l'apprentissage de l'attitude à partir des images polarimétriques en adaptant par exemple les travaux de [KGC15]. Ce travail sera mené dès la rentrée grâce au recrutement d'un postdoctorant, financé par une bourse BQR (Bonus Qualité Recherche) de l'Université de Bourgogne.

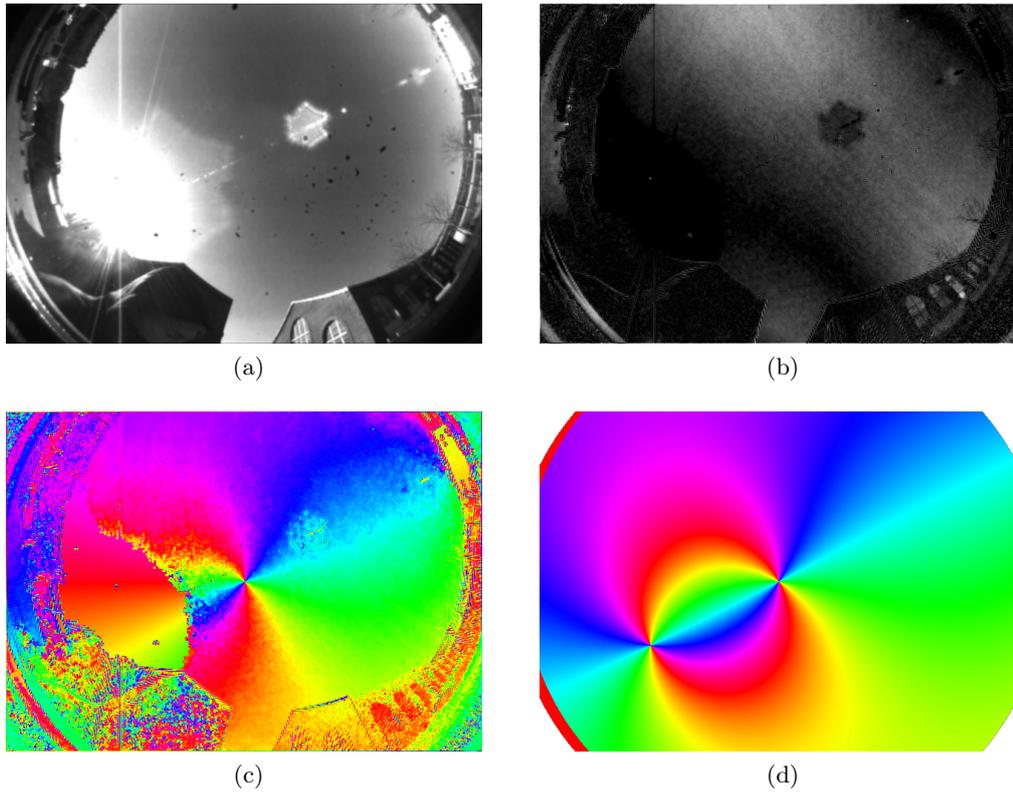


FIGURE 5.13 – Paramètres de polarisation obtenus sur une image d'une séquence d'acquisitions : (a) intensité, (b) degré de polarisation, (c) angle de polarisation et (d) angle de polarisation théorique à partir des données de l'IMU et de la connaissance de la position du soleil.

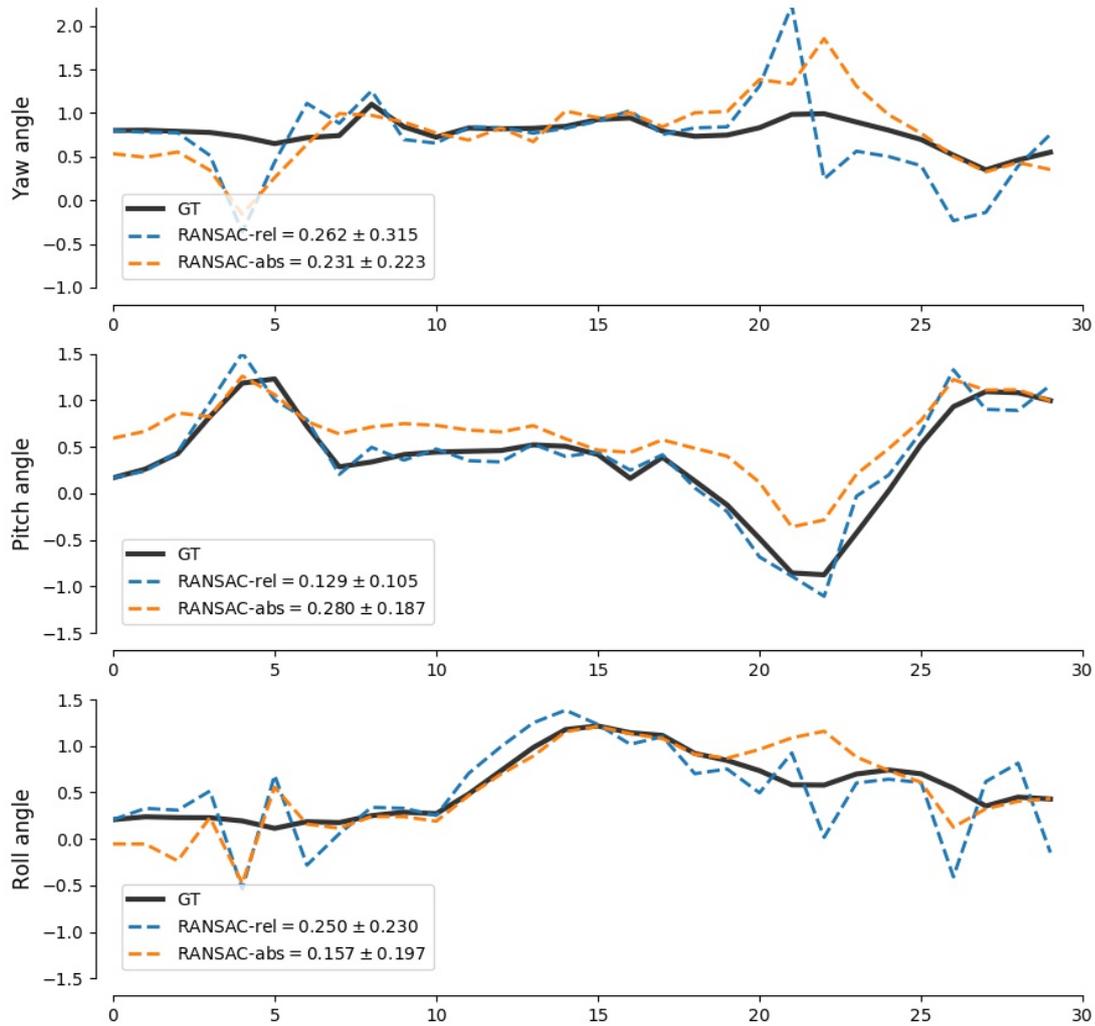


FIGURE 5.14 – Estimations de la rotation absolue et relative obtenues à partir des données réelles. La courbe noire représente la vérité terrain donnée par l'IMU et les courbes orange et bleue représentent respectivement les rotations absolues et relatives.

Conclusion générale

Chapitre 6

Conclusion générale

Dans ce mémoire, j'ai pris la liberté de présenter mes principales activités de recherche concernant l'imagerie polarimétrique et ses applications en vision pour la robotique. Durant ces dix années, l'évolution rapide des caméras polarimétriques a considérablement étendu le champ des applications de cette modalité permettant à la fois des acquisitions temps-réel et une intégration de plus en plus facile sur des robots mobiles. Par ailleurs, j'ai été amené à travailler sur des problématiques liées à la vision omnidirectionnelle, car comme nous l'avons vu dans le manuscrit, l'association de l'imagerie polarimétrique à la vision omnidirectionnelle constitue un ensemble pertinent pour des applications de navigation en extérieur. Mes principales contributions dans ces domaines peuvent se classer selon deux grandes catégories : imagerie polarimétrique et approches multimodales, applications en robotique. Dans un premier temps, les contributions de chacune d'entre elles seront rappelées puis les perspectives de recherche liées à ces travaux seront détaillées.

6.1 Bilan

Imagerie polarimétrique et approches multi-modales

L'expertise que nous avons développée en imagerie polarimétrique a dans un premier temps donnée lieu à des contributions en imagerie biomédicale. En collaboration avec le laboratoire Vicorob de l'Université de Gironne, nous avons développé un système d'aide au diagnostic automatique de lésions cancéreuses de la peau pendant la thèse de Mojdeh Rastgoo [Ras+15]. Le système employé était composé d'un imageur haute résolution associé à un filtre polariseur tournant et pilotable électriquement. Lors du projet PEPS INSIS MOSCA en collaboration avec le laboratoire ALCoV-ISIT, nous avons mis en œuvre une caméra polarimétrique tri-CCD du commerce afin de reconstruire le péritoine via laparoscopie [Mar+13]. Nous avons également développé une méthode originale de calibrage géométrique et polarimétrique de ce type de caméra à l'aide d'une tablette [MSF16].

Nos apports en multi-modalités ont été initiés lors du projet ANR CaVIaR grâce au développement d'une nouvelle méthode de calibrage de capteurs catadioptriques non-centraux en insérant un filtre polariseur tournant entre la caméra et miroir et en exploitant les informations de polarisation de la lumière réfléchie [MSF08]. Cette association entre l'imagerie polarimétrique et la vision catadioptrique avait pour seul objectif le calibrage géométrique du système. Lors de la thèse de Abd El Rahaman Shabayek, nous

avons par la suite considéré un ensemble complètement solidaire « polacatadioptrique » et développé tous les outils nécessaires au calibrage du système pour notamment déterminer la cartographie polarimétrique du ciel [SMF10]. Notre intérêt pour la vision omnidirectionnelle s’est poursuivie avec la thèse de Ahmad Zawawi Jamaluddin qui devrait se soutenir cette année autour d’un système de vue sphérique constitué de deux caméras fish-eye et associé à une caméra RGBD [Jam+16 ; Maz+17].

Applications en robotique

Nous avons rapidement souhaité étendre les applications de l’imagerie polarimétrique à la vision pour la robotique. Avant que les caméras polarimétriques ne soient réellement accessibles pour ce type d’application, nous avons développé un système stéréopolarimétrique permettant à la fois d’obtenir la reconstruction 3D et les informations de polarisation d’une scène. Ces travaux ont été menés lors de la thèse de Mohammad Iqbal [IMM11]. Les informations de polarisation produites par des surfaces réfléchissantes peuvent s’avérer être très utiles en robotique mobile autonome pour par exemple éviter les étendues d’eau ou adapter la vitesse en fonction de l’état de surface des routes. Depuis ces dernières années, le développement des caméras polarimétriques dites DoFP (Division of Focal Plane) utilisant une grille de micro-polariseurs placés devant chacun des pixels a permis d’entrevoir de nouvelles applications en robotique. Le projet ANR VIPeR que j’avais coordonné avait pour ambition de montrer l’intérêt de cette modalité et de réaliser un développement expérimental prêt à l’emploi en robotique. Suite à l’instrumentation de la caméra sous un environnement ROS (Robot Operating System) nous avons illustré une première application à l’analyse de scène en implémentant des algorithmes de Deep learning pour la segmentation de scènes extérieures. Nous avons à cette occasion proposé la première base de données annotée (POLABOT) incluant les modalités RGB – polarisation et explicité une technique d’augmentation des données respectant les contraintes physiques liées à la polarisation [Bla+19].

Notre autre contribution menée également dans le cadre du projet ANR VIPeR concernait l’estimation d’attitude à partir des informations de polarisation de la lumière diffusée par le ciel. Même si nous n’avons pas pu développer une approche complète en combinant les informations de polarisation et les caractéristiques géométriques liées à la vision omnidirectionnelle, nous avons pu proposer une approche générique permettant l’utilisation de la mesure de l’angle de polarisation dans l’estimation d’attitude [Ras+18].

6.2 Perspectives

Concernant l’aspect « acquisition des images polarimétriques », le déploiement des caméras polarimétriques DoFP permet désormais une utilisation directe et ne nécessite plus de développement particulier. De nombreux algorithmes de calcul des paramètres de polarisation à partir des images brutes existent et il ne me semble pas pertinent d’en développer de nouveaux. Je pense cependant que l’aspect calibrage doit être encore amélioré afin de faciliter l’accès à ce type de caméras par des utilisateurs non initiés à la polarisation. Une méthode similaire à celle que nous avons développée pour les caméras

tri-CCD pourrait être envisagée afin d'obtenir le calibrage géométrique et polarimétrique des caméras polarimétriques fish-eye.

Pour l'analyse de scènes, l'information de polarisation seule, même si elle est performante pour discriminer les zones réfléchissantes, est insuffisante pour parfaitement décrire les scènes. La fusion avec des modalités plus conventionnelles s'avère indispensable et le travail de thèse de Yifei Zhang concernant la fusion des données couleurs, profondeur et polarimétriques a été initié en ce sens. Par ailleurs, dans le cadre du projet ANR ICUB en collaboration avec le laboratoire LITIS de Rouen, Peugeot et Stéréolabs nous allons mettre en œuvre une paire de caméras polarimétriques pour l'aide à la navigation en conditions dégradées : brouillards, pluie, chaussée humide, etc. De nouveaux algorithmes de reconstruction sont encore à développer permettant de d'inclure différentes méthodes de reconstruction selon la nature de la lumière réfléchie. Nous envisageons également, avec Marc Blanchon recruté en tant que doctorant dans le cadre du projet, d'étendre à la paire de caméras polarimétriques l'approche proposée par Godard pour l'apprentissage non supervisé de la profondeur avec une seule caméra.

Concernant l'estimation d'attitude, pour réaliser une méthode basée uniquement vision il reste à intégrer à l'imagerie polarimétrique les techniques exploitant la détection de la ligne d'horizon ou bien des lignes horizontales et verticales en milieu urbain. Par ailleurs, une extension des algorithmes d'estimation d'attitude reposant sur des réseaux de neurones aux images polarimétriques pourrait donner des résultats pertinents. En effet, il sera ainsi possible soit de s'orienter vers une méthode non-supervisée en incorporant le modèle de diffusion de Rayleigh ou soit vers une méthode supervisée avec les données issues d'une centrale inertielle. Le dernier cas nous permettrait de nous affranchir du modèle de diffusion de Rayleigh qui reste une approximation des phénomènes de polarisation par le ciel. L'estimation d'attitude par apprentissage sur des images polarimétriques sera menée dès la rentrée, grâce au recrutement d'un postdoctorant financé sur une bourse BQR (Bonus Qualité Recherche) de l'Université de Bourgogne.

De nombreuses perspectives concernant l'intégration de l'imagerie polarimétrique dans des processus de robotique demeurent. Le recalibrage des centrales inertielles pourrait en être un exemple, à l'image des grives qui parviennent à recalibrer leur compas magnétique interne grâce à l'information de polarisation du ciel. L'évolution rapide des caméras polarimétriques peut nous laisser supposer l'arrivée sur le marché de modèles polarimétriques intégrant la couleur d'ici les cinq prochaines années. La grande majorité des systèmes robotiques étant équipés de caméras couleur, il serait dès lors dommage de se priver des informations de polarisation qui sont employées par de nombreux animaux pour des tâches liées à la détection et à la navigation.

Bibliographie

- [Abb+04] N. R. ABBASI, H. M. SHAW, D. S. RIGEL, R. J. FRIEDMAN, W. H. MCCARTHY, I. OSMAN, A. W. KOPF et D. POLSKY. “Early diagnosis of cutaneous melanoma : revisiting the ABCD criteria”. In : *Jama* 292.22 (2004), p. 2771-2776.
- [AH08] G. A. ATKINSON et E. R. HANCOCK. “Two-dimensional BRDF estimation from polarisation”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 111.2 (2008), p. 126-141. ISSN : 1077-3142.
- [Ahm+17] A. AHMED, X. ZHAO, V. GRUEV, J. ZHANG et A. BERMAK. “Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors”. In : *Optics Express* 25.9 (2017), p. 10651-10662.
- [Ain+13] S. AINOUZ, O. MOREL, S. MOSADDEGH, D. FOFI et A. BENSRAIR. “Adaptive processing of catadioptric images using polarization imaging : toward a polacatadioptric model”. In : *Optical Engineering* 52.3 (2013), p. 037001-037001.
- [AMF08] S. AINOUZ, O. MOREL et D. FOFI. “Mirror adapted matching of catadioptric image”. In : *ICIP - IEEE International Conference on Image Processing*. San Diego, California, U.S.A., oct. 2008, p. 309-312.
- [Ant+10] M.-R. ANTONELLI, A. PIERANGELO, T. NOVIKOVA, P. VALIDIRE, A. BENALI, B. GAYET et A. DE MARTINO. “Mueller matrix imaging of human colon tissue for cancer diagnostics : how Monte Carlo modeling can help in the interpretation of experimental data”. In : *Optics Express* 18.10 (2010), p. 10200-10208.
- [Ayc+16] T. AYCOCK, A. LOMPADO, T. WOLZ et D. CHENAULT. “Passive optical sensing of atmospheric polarization for GPS denied operations”. In : *SPIE Defense+ Security*. International Society for Optics et Photonics. 2016, 98380Y-98380Y.
- [Azz85] R. AZZAM. “Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light”. In : *Optics Letters* 10.7 (1985), p. 309-311.
- [BA02] J. P. BARRETO et H. ARAUJO. “Geometric properties of central catadioptric line images”. In : *European Conference on Computer Vision*. Springer. 2002, p. 237-251.
- [Bar+97] J. D. BARTER, P. H. LEE, H. THOMPSON et T. SCHNEIDER. “Stokes parameter imaging of scattering surfaces”. In : *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing*. T. 3121. International Society for Optics et Photonics. 1997, p. 314-321.

Bibliographie

- [Baz+12] J.-C. BAZIN, C. DEMONCEAUX, P. VASSEUR et I. KWEON. “Rotation estimation and vanishing point extraction by omnidirectional vision in urban environment”. In : *The International Journal of Robotics Research* 31.1 (2012), p. 63-81.
- [BC01] J. BANKS et P. CORKE. “Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereo vision”. In : *The International Journal of Robotics Research* 20.7 (2001), p. 512-532.
- [BDL04] M. V. BERRY, M. R. DENNIS et R. L. LEE JR. “Polarization singularities in the clear sky”. In : *New Journal of Physics* 6.162 (2004), p. 1-14.
- [BG82] M. L. BRINES et J. L. GOULD. “Skylight polarization patterns and animal orientation”. In : *Journal of Experimental Biology* 96 (1982), p. 69-91.
- [BH04] A. BARTA et G. HORVÁTH. “Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skyliht polarization under clouds and canopies is strongest in the UV”. In : *Journal of Theoretical Biology* 226.4 (2004), p. 429-437.
- [BKC17] V. BADRINARAYANAN, A. KENDALL et R. CIPOLLA. “Segnet : A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39.12 (2017), p. 2481-2495.
- [Bla+19] M. BLANCHON, O. MOREL, Y. ZHANG, R. SEULIN, N. CROMBEZ et D. SIDIBÉ. “Outdoor scenes pixel-wise semantic segmentation using polarimetry and fully convolutional network”. In : *VISAPP - International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 2019.
- [BN99] S. BAKER et S. K. NAYAR. “A theory of single-viewpoint catadioptric image formation”. In : *International Journal of Computer Vision* 35.2 (1999), p. 175-196.
- [Bra00] G. BRADSKI. “The opencv library”. In : *Dr Dobb’s J. Software Tools* 25 (2000), p. 120-125.
- [Bro98] C. BROSSEAU. *Fundamentals of polarized light : a statistical optics approach*. Wiley-Interscience, 1998.
- [BVM17] K. BERGER, R. VOORHIES et L. H. MATTHIES. “Depth from stereo polarization in specular scenes for urban robotics”. In : IEEE. 2017, p. 1966-1973.
- [BW99] M. BORN et E. WOLF. *Principles Of Optics*. 7^e éd. Cambridge, 1999.
- [CE54] S. CHANDRASEKHAR et D. D. ELBERT. “The illumination and polarization of the sunlit sky on Rayleigh scattering”. In : *Transactions of the American Philosophical Society* 44.6 (1954), p. 643-728.

- [Che+17] L.-C. CHEN, G. PAPANDREOU, I. KOKKINOS, K. MURPHY et A. L. YUILLE. “Deeplab : Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 40.4 (2017), p. 834-848.
- [Che+18] L. CHEN, Y. ZHENG, A. SUBPA-ASA et I. SATO. “Polarimetric Three-View Geometry”. In : *European Conference on Computer Vision*. 2018, p. 20-36.
- [CMM12] J. COURBON, Y. MEZOUAR et P. MARTINET. “Evaluation of the unified model of the sphere for fisheye cameras in robotic applications”. In : *Advanced Robotics* 26.8-9 (2012), p. 947-967.
- [CMW04] W. W. COCHRAN, H. MOURITSEN et M. WIKELSKI. “Migrating Songbirds Recalibrate Their Magnetic Compass Daily from Twilight Cues”. In : *Science* (2004).
- [Cou88] K. L. COULSON. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A Deepak Pub, 1988.
- [Cro+18] N. CROMBEZ, R. SEULIN, O. MOREL, D. FOFI et C. DEMONCEAUX. “Multimodal 2D image to 3D model registration via a mutual alignment of sparse and dense visual features”. In : *ICRA - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, Australia, mai 2018.
- [Cui+17] Z. CUI, J. GU, B. SHI, P. TAN et J. KAUTZ. “Polarimetric multi-view stereo”. In : *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017.
- [Dac+03] M. DACKÉ, D.-E. NILSSON, C. H. SCHOLTZ, M. BYRNE et E. J. WARRANT. “Animal behaviour : insect orientation to polarized moonlight”. In : *Nature* 424.6944 (2003), p. 33-33.
- [Dub+12] M. DUBREUIL, P. BABILOTTE, L. MARTIN, D. SEVRAIN, S. RIVET, Y. LE GRAND, G. LE BRUN, B. TURLIN et B. LE JEUNE. “Mueller matrix polarimetry for improved liver fibrosis diagnosis”. In : *Optics Letters* 37.6 (2012), p. 1061-1063.
- [Dup+17] J. DUPEYROUX, J. DIPERI, M. BOYRON, S. VIOLLET et J. SERRES. “A novel insect-inspired optical compass sensor for a hexapod walking robot”. In : Vancouver, Canada, sept. 2017.
- [FC88] R. FRANKOT et R. CHELLAPPA. “A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10.4 (juil. 1988), p. 439-451.
- [Fit01] A. W. FITZGIBBON. “Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion”. In : *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*. T. 1. IEEE. 2001, p. I-I.
- [FK81] E. S. FRY et G. W. KATTAWAR. “Relationships between elements of the Stokes matrix”. In : *Applied Optics* 20.16 (1981), p. 2811-2814.

Bibliographie

- [FRS13] P. FURGALE, J. REHDER et R. SIEGWART. “Unified temporal and spatial calibration for multi-sensor systems”. In : 2013, p. 1280-1286.
- [Gar+13] E. GARCIA-CAUREL, A. DE MARTINO, J.-P. GASTON et L. YAN. “Application of spectroscopic ellipsometry and Mueller ellipsometry to optical characterization”. In : *Applied spectroscopy* 67.1 (2013), p. 1-21.
- [Gas+02] J. GASPAR, C. DECCÓ, J. OKAMOTO et J. SANTOS-VICTOR. “Constant resolution omnidirectional cameras”. In : *European Conference on Computer Vision*. IEEE. 2002, p. 27-34.
- [GB00] J. GUO et D. BRADY. “Fabrication of thin-film micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry”. In : *Applied Optics* 39.10 (2000), p. 1486-1492.
- [GF12] K. P. GURTON et M. FELTON. “Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging”. In : *Optics Express* 20.20 (sept. 2012), p. 22344-22359.
- [GFB10] L. GENDRE, A. FOULONNEAU et L. BIGUÉ. “Imaging linear polarimetry using a single ferroelectric liquid crystal modulator”. In : *Applied Optics* 49 (sept. 2010), p. 4687-99.
- [GG13] S. GAO et V. GRUEV. “Gradient-based interpolation method for division-of-focal-plane polarimeters”. In : *Optics Express* 21.1 (jan. 2013), p. 1137-1151.
- [GMB17] C. GODARD, O. MAC AODHA et G. J. BROSTOW. “Unsupervised monocular depth estimation with left-right consistency”. In : *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017, p. 270-279.
- [Gol03] D. H. GOLDSTEIN. *Polarized Light, revised and expanded*. CRC press, 2003.
- [GYV14] K. P. GURTON, A. J. YUFFA et G. W. VIDEEN. “Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging”. In : *Optics Letters* 39.13 (juil. 2014), p. 3857-3859.
- [Ham17] M. HAMAOU. “Polarized skylight navigation”. In : *Applied Optics* 56.3 (2017), B37-B46.
- [Har+08] J. HARCHANKO, L. PEZZANITI, D. CHENAULT et G. EADES. “Comparing a MWIR and LWIR polarimetric imager for surface swimmer detection”. In : *SPIE Optical Engineering* (mai 2008).
- [Hor+02] G. HORVÁTH, B. BERNÁTH, B. SUHAI, A. BARTA et R. WEHNER. “First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere”. In : *JOSA A* 19.10 (2002), p. 2085-2099.

- [Hor+11] G. HORVÁTH, A. BARTA, I. POMOZI, B. SUHAI, R. HEGEDÜS, S. ÅKES-
SON, B. MEYER-ROCHOW et R. WEHNER. “On the trail of Vikings with
polarized skylight : experimental study of the atmospheric optical pre-
requisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers”. In :
Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences
366.1565 (2011), p. 772-782.
- [HS97] R. HARTLEY et P. STURM. “Triangulation”. In : *Computer Vision and
Image Understanding* 68.2 (1997), p. 146-157.
- [HV97] G. HORVÁTH et D. VARJÚ. “Polarization pattern of freshwater habitats
recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges
and its relevance for water detection by aquatic insects”. In : *Journal of
Experimental Biology* 200 (1997), p. 1155-1163.
- [IB04] S.-h. IENG et R. BENOSMAN. “Geometric construction of the caustic
curves for catadioptric sensors”. In : *IEEE International Conference on
Image Processing*. T. 5. IEEE. 2004, p. 3387-3390.
- [IMM11] M. IQBAL, F. MERIAUDEAU et O. MOREL. “Polarization stereoscopic
imaging prototype”. In : *International Journal of Signal Processing,
Image Processing and Pattern Recognition (IJISP)* 4.3 (sept. 2011),
p. 35-50.
- [Iqb11] M. IQBAL. “Polarization stereoscopic imaging prototype”. Thèse de doct.
Université de Bourgogne, 2011.
- [Jam+16] A. Z. JAMALUDDIN, O. MAZHAR, O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI.
“Design and calibration of an omni-RGB+ D camera”. In : *URAI - In-
ternational Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*.
IEEE. 2016, p. 386-387.
- [JRL02] S. L. JACQUES, J. C. RAMELLA-ROMAN et K. LEE. “Imaging skin
pathology with polarized light”. In : *Journal of biomedical optics* 7.3
(2002), p. 329-341.
- [KA89] G. W. KATTAWAR et C. N. ADAMS. “Stokes vector calculations of the
submarine light field in an atmosphere-ocean with scattering according
to a Rayleigh phase matrix : Effect of interface refractive index on ra-
diance and polarization”. In : *Limnology and Oceanography* 34.8 (1989),
p. 1453-1472.
- [Kad+15] A. KADAMBI, V. TAAMAZYAN, B. SHI et R. RASKAR. “Polarized 3d :
High-quality depth sensing with polarization cues”. In : *IEEE Interna-
tional Conference on Computer Vision*. 2015, p. 3370-3378.
- [KB06] J. KANNALA et S. S. BRANDT. “A generic camera model and calibration
method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses”. In : *IEEE
Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28.8 (2006), p. 1335-
1340.

Bibliographie

- [KDG12] S. B. KARMAN, S. Z. M. DIAH et I. C. GEBESHUBER. “Bio-Inspired Polarized Skylight-Based Navigation Sensors : A Review”. In : *Sensors* 12.11 (2012), p. 14232. ISSN : 1424-8220.
- [KGC15] A. KENDALL, M. GRIMES et R. CIPOLLA. “Posenet : A convolutional network for real-time 6-dof camera relocalization”. In : *IEEE International Conference on Computer Vision*. 2015, p. 2938-2946.
- [KHK10] J.-S. KIM, M. HWANGBO et T. KANADE. “Spherical approximation for multiple cameras in motion estimation : Its applicability and advantages”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 114.10 (2010), p. 1068-1083.
- [Kim+07] S.-J. KIM, K. KOH, M. LUSTIG, S. BOYD et D. GORINEVSKY. “An Interior-Point Method for Large-Scale ℓ_1 -Regularized Least Squares”. In : *IEEE journal of selected topics in signal processing* 1.4 (2007), p. 606-617.
- [Kum+18] A. A. KUMAR, N. NARENDRA, P. BALAMURALIDHAR et M. G. CHANDRA. “Efficient Ambiguity Resolution in Polarimetric Multi-View Stereo”. In : *2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. IEEE. 2018, p. 395-399.
- [Lam+00] D. LAMBRINOS, R. MÖLLER, T. LABHART, R. PFEIFER et R. WEHNER. “A mobile robot employing insect strategies for navigation”. In : *Robotics and Autonomous systems* 30.1-2 (2000), p. 39-64.
- [Li+19] N. LI, Y. ZHAO, Q. PAN et S. G. KONG. “Demosaicking DoFP images using Newton’s polynomial interpolation and polarization difference model”. In : *Optics Express* (2019).
- [Mar+13] S. MARTINEZ HERRERA, A. MALTI, O. MOREL et A. BARTOLI. “Shape from polarization in laparoscopy”. In : *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*. 2013.
- [Maz+17] O. MAZHAR, A. Z. JAMALUDDIN, C. JIANG, D. FOFI, R. SEULIN et O. MOREL. “Design and calibration of a specialized polydioptric camera rig”. In : *Frontiers in ICT* 4 (2017), p. 19. ISSN : 2297-198X.
- [MF07] O. MOREL et D. FOFI. “Calibration of catadioptric sensors by polarization imaging”. In : *ICRA - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ACTi C 07- 37. Roma, Italy, avr. 2007.
- [Miy+09] D. MIYAZAKI, M. AMMAR, R. KAWAKAMI et K. IKEUCHI. “Estimating Sunlight Polarization Using Fish-eye Lens”. In : *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*. T. 1. 2009, p. 288-300.
- [Miz+01] F. MIZERA, B. BERNÁTH, G. KRISKA et G. HORVÁTH. “Stereo videopolarimetry : measuring and visualizing polarization patterns in three dimensions”. In : *Journal of imaging Science and Technology* 45.4 (2001), p. 393-399.

- [MKI04] D. MIYAZAKI, M. KAGESAWA et K. IKEUCHI. “Transparent Surface Modeling from a Pair of Polarization Images”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26.1 (jan. 2004), p. 73-82.
- [Mor+06] O. MOREL, C. STOLZ, F. MERIAUDEAU et P. GORRIA. “Active lighting applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging”. In : *Applied Optics* 45.17 (juin 2006). ACL C 06- 6, p. 4062-4068.
- [MR07] C. MEI et P. RIVES. “Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids”. In : IEEE. 2007, p. 3945-3950.
- [MSF08] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Measurement of three-dimensional mirror parameters by polarization imaging applied to catadioptric camera calibration”. In : *Journal of Electronic Imaging* 17.3 (août 2008). ACL C 08- 47, p. 0311051-8.
- [MSF16] O. MOREL, R. SEULIN et D. FOFI. “Handy method to calibrate division-of-amplitude polarimeters for the first three Stokes parameters”. In : *Optics Express* 24.12 (juin 2016), p. 13634-13646.
- [Mu+15] T. MU, C. ZHANG, Q. LI et R. LIANG. “Error analysis of single-snapshot full-Stokes division-of-aperture imaging polarimeters”. In : *Optics Express* 23.8 (avr. 2015), p. 10822-10835.
- [Mu+17] T. MU, S. PACHECO, Z. CHEN, C. ZHANG et R. LIANG. “Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter using division-of-focal-plane polarimetry and integral field spectroscopy”. In : *Scientific reports* 7 (2017), p. 42115.
- [NA88] R. C. NELSON et J. ALOIMONOS. “Finding motion parameters from spherical motion fields (or the advantages of having eyes in the back of your head)”. In : *Biological cybernetics* 58.4 (1988), p. 261-273.
- [ND97] J. A. NORTH et M. J. DUGGIN. “Stokes vector imaging of the polarized sky-dome”. In : *Applied Optics* 36.3 (1997), p. 723-730.
- [NMM17] C. V. NGUYEN, M. MILFORD et R. MAHONY. “3D tracking of water hazards with polarized stereo cameras”. In : IEEE. 2017, p. 5251-5257.
- [Nor+99] G. P. NORDIN, J. T. MEIER, P. C. DEGUZMAN et M. W. JONES. “Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry”. In : *Journal of the Optical Society of America A* 16.5 (1999), p. 1168-1174.
- [Pai66] R. T. PAINE. “Food web complexity and species diversity”. In : *The American Naturalist* 100.910 (1966), p. 65-75.
- [PC05] J. L. PEZZANITI et D. B. CHENAULT. “A division of aperture MWIR imaging polarimeter”. In : *Polarization Science and Remote Sensing II*. T. 5888. International Society for Optics et Photonics. 2005, p. 58880V.

Bibliographie

- [PHW01] I. POMOZI, G. HORVATH et R. WEHNER. “How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds : full-sky measurements and implications for animal orientation”. In : *Journal of Experimental Biology* 204 (2001), p. 2933-2942.
- [Pie+13] A. PIERANGELO et al. “Polarimetric imaging of uterine cervix : a case study”. In : *Optics Express* 21.12 (2013), p. 14120-14130.
- [PS08] N. J. PUST et J. A. SHAW. “Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies”. In : *Applied Optics* 47.34 (2008), H190-H198.
- [Pui+11] L. PUIG, Y. BASTANLAR, P. STURM, J. J. GUERRERO et J. BARRETO. “Calibration of central catadioptric cameras using a DLT-like approach”. In : *International Journal of Computer Vision* 93.1 (2011), p. 101-114.
- [Pui+12] L. PUIG, J. BERMÚDEZ, P. STURM et J. J. GUERRERO. “Calibration of omnidirectional cameras in practice : A comparison of methods”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 116.1 (2012), p. 120-137.
- [PW17] L. PEREZ et J. WANG. “The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning”. In : *arXiv preprint arXiv :1712.04621* (2017).
- [Ras+15] M. RASTGOO, R. GARCIA, O. MOREL et F. MARZANI. “Automatic differentiation of melanoma from dysplastic nevi”. In : *Computerized Medical Imaging and Graphics* 43.0 (2015), p. 44-52. ISSN : 0895-6111.
- [Ras+18] M. RASTGOO, C. DEMONCEAUX, R. SEULIN et O. MOREL. “Attitude estimation from polarimetric cameras”. In : *IROS - IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Madrid, Spain, oct. 2018.
- [Ras16] M. RASTGOO. “An approach to melanoma classification exploiting polarization information”. Thèse de doct. Universitat de Girona, 2016.
- [RBG19] S. ROUSSEL, M. BOFFETY et F. GOUDAIL. “On the optimal ways to perform full Stokes measurements with a linear division-of-focal-plane polarimetric imager and a retarder”. In : *Optics Letters* 44.11 (2019), p. 2927-2930.
- [RLT09] B. M. RATLIFF, C. F. LACASSE et J. S. TYO. “Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgrid polarimeter imagery”. In : *Optics Express* 17.11 (mai 2009), p. 9112-9125.
- [RM10] A. L. RANKIN et L. H. MATTHIES. “Passive sensor evaluation for unmanned ground vehicle mud detection”. In : *J. Field Robotics* (2010), p. 473-490.
- [Rop+11] G. ROPARS, G. GORRE, A. L. FLOCH, J. ENOCH et V. LAKSHMINARAYANAN. “A depolarizer as a possible precise sunstone for Viking navigation by polarized skylight”. In : *Proceedings of The Royal Society* (nov. 2011).

- [RW82] S. ROSSEL et R. WEHNER. “The bee’s map of the e-vector pattern in the sky”. In : *Proc. Nad Acad. Sci.* 79 (1982), p. 4451-4455.
- [RZW04] S. M. REPPERT, H. ZHU et R. H. WHITE. “Polarized Light Helps Monarch Butterflies Navigate”. In : *Current Biology* 2.14 (2004), p. 155-158.
- [Sai+99] M. SAITO, Y. SATO, K. IKEUCHI et H. KASHIWAGI. “Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects Using Polarization in Highlight”. In : *Journal of the Optical Society of America* 16.9 (sept. 1999), p. 2286-2293.
- [SB98] T. C. SOE-MIE F. NEE Chan Yoo et D. BURGE. “Characterization for imperfect polarizers under imperfect conditions”. In : *Applied Optics* 37.1 (jan. 1998), p. 54-64.
- [SC12] W. STÜRZL et N. CAREY. “A Fisheye Camera System for Polarisation Detection on UAVs.” In : *European Conference on Computer Vision*. Sous la dir. d’A. FUSIELLO, V. MURINO et R. CUCCHIARA. T. 7584. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2012, p. 431-440. ISBN : 978-3-642-33867-0.
- [Sch+12] S. SCHERER, J. REHDER, S. ACHAR, H. COVER, A. CHAMBERS, S. NUSKE et S. SINGH. “River mapping from a flying robot : state estimation, river detection, and obstacle mapping”. In : *Autonomous Robots* 33.1-2 (2012), p. 189-214.
- [Sch15] Y. Y. SCHECHNER. “Self-calibrating imaging polarimetry”. In : *2015 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE. 2015, p. 1-10.
- [Sch84] R. SCHWIND. “Evidence for true polarization vision based on a two-channel analyzer system in the eye of the water bug, *Notonecta glauca*”. In : *Journal of Comparative Physiology A* 154.1 (jan. 1984), p. 53-57. ISSN : 1432-1351.
- [Sch95] R. SCHWIND. “Spectral regions in which aquatic insects see reflected polarized light”. In : *Journal of Comparative Physiology A* 177.4 (1995), p. 439-448.
- [Sha12] A. E. R. SHABAYEK. “Combining Omnidirectional Vision with Polarization Vision for Robot Navigation”. Thèse de doct. Université de Bourgogne, 2012.
- [SMF10] A. E. R. SHABAYEK, O. MOREL et D. FOFL. “Auto-calibration and 3D reconstruction with non-central catadioptric sensors using polarization imaging”. In : *OMNIVIS 2010*. 2010.
- [SMF12] A. E. R. SHABAYEK, O. MOREL et D. FOFL. “Visual behaviour based bio-inspired polarization techniques in computer vision and robotics”. In : sous la dir. de M. POMPLUN et J. SUZUKI. Information Science Reference, 2012. Chap. 11, p. 247-276.

Bibliographie

- [SMS06] D. SCARAMUZZA, A. MARTINELLI et R. SIEGWART. “A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras”. In : *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2006, p. 5695-5701.
- [Sni+14] F. SNIK, J. CRAVEN-JONES, M. ESCUTI, S. FINESCHI, D. HARRINGTON, A. DE MARTINO, D. MAWET, J. RIEDI et J. S. TYO. “An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields”. In : *Polarization : Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI*. T. 9099. International Society for Optics et Photonics. 2014, 90990B.
- [SNS09] A. SARAFRAZ, S. NEGAHDARIPOUR et Y. Y. SCHECHNER. “Enhancing images in scattering media utilizing stereovision and polarization”. In : *2009 Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE. 2009, p. 1-8.
- [Sol81] J. E. SOLOMON. “Polarization imaging”. In : *Applied Optics* 20.9 (mai 1981), p. 1537-1544.
- [SR04] P. STURM et S. RAMALINGAM. “A Generic Concept for Camera Calibration”. In : *European Conference on Computer Vision*. T. 2. Prague, Czech Republic : Springer, mai 2004, p. 1-13.
- [TD01] P. TERRIER et V. DEVLAMINCK. “A Self calibrated Image Acquisition System for Polarization Estimation”. In : *International Conference on Physics in Signal and Image Processing*. Marseille, France, jan. 2001.
- [TEE98] J. TYO, J. E.N. PUGH et N. ENGHETA. “Colorimetric Representation for Use with Polarization-difference Imaging of Objects in Scattering Media”. In : *Journal of the Optical Society of America A* 15.2 (fév. 1998), p. 367-374.
- [Tyo+06] J. S. TYO, D. L. GOLDSTEIN, D. B. CHENAULT et J. A. SHAW. “Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications”. In : *Applied Optics* 45.22 (2006), p. 5453-5469.
- [Tyo00] J. TYO. “Noise equalization in Stokes parameter images obtained by use of variable-retardance polarimeters”. In : *Optics Letters* 25 (2000), p. 16.
- [Tyo98] J. TYO. “Optimum Linear Combination Strategy For an N-Channel Polarization-sensitive Imaging or Vision System”. In : *Journal of the Optical Society of America A* 15.2 (fév. 1998), p. 359-366.
- [VBL11] M. VEDEL, S. BREUGNOT et N. LECHOCINSKI. “Full Stokes polarization imaging camera”. In : *Polarization Science and Remote Sensing V*. T. 8160. International Society for Optics et Photonics. 2011, p. 81600X.
- [VL97] K. J. VOSS et Y. LIU. “Polarized radiance distribution measurements of skylight. I. System description and characterization”. In : *Applied Optics* 36.24 (1997), p. 6083-6094.

- [WA95] L. B. WOLFF et A. ANDREOU. “Polarization Camera Sensors”. In : *Image and Vision Computing* 13.6 (août 1995), p. 497-510.
- [WB91] L. B. WOLFF et T. E. BOULT. “Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13.7 (juil. 1991), p. 635-657.
- [Weh01] R. WEHNER. “Polarization vision - a uniform sensory capacity?” In : *Journal of Experimental Biology* 204 (2001), p. 2589-2596.
- [Wol+97] L. B. WOLFF, T. A. MANCINI, P. POULIQUEN et A. G. ANDREOU. “Liquid Crystal Polarization Camera”. In : *IEEE Trans. Robotics and Automation* 13.12 (avr. 1997), p. 195-203.
- [Wol90] L. B. WOLFF. “Polarization-based material classification from specular reflection”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 12.11 (nov. 1990), p. 1059-1071.
- [Woo+09] O. WOODFORD, P. TORR, I. REID et A. FITZGIBBON. “Global stereo reconstruction under second-order smoothness priors”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 31.12 (2009), p. 2115-2128.
- [Yan+18] L. YANG, F. TAN, A. LI, Z. CUI, Y. FURUKAWA et P. TAN. “Polarimetric Dense Monocular SLAM”. In : *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018, p. 3857-3866.
- [YH04] X. YING et Z. HU. “Can we consider central catadioptric cameras and fisheye cameras within a unified imaging model”. In : *European Conference on Computer Vision*. Springer. 2004, p. 442-455.
- [Zha+19] Y. ZHANG, O. MOREL, M. BLANCHON, R. SEULIN, N. CROMBEZ et D. SIDIBÉ. “Exploration of deep learning-based multimodal fusion for semantic road scene segmentation”. In : *VISAPP - International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 2019.
- [Zha00] Z. ZHANG. “A flexible new technique for camera calibration”. In : *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000).
- [Zhi+18] W. ZHI, J. CHU, J. LI et Y. WANG. “A Novel Attitude Determination System Aided by Polarization Sensor”. In : *Sensors* 18.1 (2018).
- [ZS19] D. ZHU et W. A. SMITH. “Depth from a polarisation+ RGB stereo pair”. In : *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019, p. 7586-7595.