

Invitation à la soutenance de thèse

MESURES ET MODÉLISATIONS DE BRDF HYPERSPECTRALES: APPLICATION POUR LA PRÉDICTION DE SIGNATURES DE VÉHICULES ET SATELLITES

MEASUREMENTS AND MODELING OF HYPERSPECTRAL BDRFs: APPLICATION TO THE VEHICLE AND SATELLITE SIGNATURES

François MARGALL

Le mardi 21 janvier 2025 à 09h
ONERA- Auditorium Caroline AIGLE
2, avenue Marc Pégégrin, 31400 Toulouse

Devant le jury composé de :

M. Mathieu HEBERT	Institut d'Optique-Laboratoire Hubert Curien-Université Jean MONNET	Président
M. Mathias PAULIN	IRIT	Rapporteur
M. Lionel SIMONOT	Institut P'-Université de Poitiers	Rapporteur
Mme Myriam ZERRAD	Institut Fresnel-Aix-Marseille Université	Examinatrice
M. Romain PACANOWSKI	INRIA	Encadrant
M. Sébastien MAVROMATIS	Aix-Marseille Université	Directeur de thèse
M. Romain CEOLATO	ONERA	Codirecteur de thèse
M. Eric COIRO	ONERA	Encadrant

Résumé

Depuis plusieurs décennies, le nombre d'objets en orbite terrestre ne cesse de croître, témoignant de la nécessité d'outils adaptés à la veille spatiale. Ces outils, essentiels pour la détection et le suivi de satellites et autres engins en orbite, permettent également de caractériser leur état, leur utilisation et leur composition. Parmi ces vecteurs d'informations, la signature optique des matériaux constitue une source précieuse, à condition d'être correctement interprétée. Les avancées en algorithmes de synthèse d'image, combinant optique et informatique, ont ouvert de nouvelles perspectives pour simuler ces signatures avec un haut degré de réalisme. Ces techniques reposent sur une modélisation fine de la géométrie des objets, de leurs matériaux, des sources lumineuses, ainsi que de leur environnement. Cependant, les données ou modèles existants de réflectivité des matériaux sont souvent insuffisants, notamment lorsqu'il s'agit de capturer les variations angulaires et spectrales.

Le littérature scientifique demeure confrontée à d'importantes lacunes dans la disponibilité de modèles bidirectionnels hyperspectraux physiquement réalistes.

Dans ce contexte, les travaux présentés dans ce manuscrit se sont focalisés sur le développement d'approches innovantes pour mesurer et modéliser la réflectivité bidirectionnelle hyperspectrale de matériaux. Une première étape a consisté à utiliser un spectro-goniométre et développer une chaîne de traitement pour réaliser des mesures précises des propriétés de réflexion de matériaux dans des domaines angulaire et spectral étendus. La chaîne de traitement proposée comporte des propositions spécifiques à ce type de banc telles qu'un échantillonnage adaptatif des directions d'observation ou une méthode de correction des erreurs d'alignement. A la suite de ces mesures expérimentales, nous avons introduit de nouveaux outils d'analyse critique. Des critères de validation, comme la vérification de la réciprocity de Helmholtz, ont été proposés, tout comme des approches pour séparer les contributions spectrales et angulaires des réflectivités bidirectionnelles spectrales mesurées.

Dans un second temps, ces travaux ont porté sur la modélisation des réflectivités bidirectionnelles spectrales mesurées. Deux approches complémentaires ont été explorées. La première, analytique, a conduit à la proposition d'un modèle paramétrique basé sur des gaussiennes sphériques, conçu pour respecter les contraintes physiques et capable de représenter fidèlement les matériaux mesurés. La seconde approche repose sur l'interpolation des données expérimentales grâce à des fonctions à base radiale. Une méthodologie robuste a été développée, intégrant les contraintes de réciprocity et exploitant une paramétrisation adaptée au domaine de définition des fonctions de réflectivité bidirectionnelle. Cette technique offre une solution pratique pour reconstruire des données éparées et les intégrer dans des moteurs de rendu pour des simulations réalistes.

For several decades, the number of objects in Earth's orbit has been steadily increasing, highlighting the need for tools tailored to space surveillance. These tools, essential for detecting and tracking satellites and other orbiting devices, also enable the characterization of their state, use, and composition. Among these sources of information, the optical signature of materials represents a valuable resource, provided it is correctly interpreted. Advances in image synthesis algorithms, combining optics and computer science, have opened new opportunities to simulate these signatures with a high degree of realism. These techniques rely on detailed modeling of object geometry, materials, light sources, and their environment. However, existing data or models of material reflectivity are often insufficient, especially when it comes to capturing angular and spectral variations. The scientific literature continues to face significant gaps in the availability of physically realistic hyperspectral bidirectional models.

In this context, the work presented in this manuscript focuses on developing innovative approaches for measuring and modeling the hyperspectral bidirectional reflectivity of materials. The first step involved using a spectro-goniometer and developing a processing pipeline to perform precise measurements of material reflection properties across extensive angular and spectral domains. The proposed processing chain includes specific contributions for this type of setup, such as adaptive sampling of observation directions and a method for correcting alignment errors. Following these experimental measurements, new tools for critical analysis were introduced. Validation criteria, such as verifying Helmholtz reciprocity, were proposed, along with approaches to separate the spectral and angular contributions of the measured bidirectional spectral reflectivities.

In the second phase, this work focused on modeling the measured bidirectional spectral reflectivities. Two complementary approaches were explored. The first, analytical, led to the proposal of a parametric model based on spherical Gaussians, designed to comply with physical constraints and faithfully represent the measured materials. The second approach involves interpolating experimental data using radial basis functions. A robust methodology was developed, integrating reciprocity constraints and leveraging a parameterization suited to the definition domain of bidirectional reflectivity functions. This technique provides a practical solution for reconstructing sparse data and integrating them into rendering engines for realistic simulations.

Mots clés

BRDF / hyperspectral / spectro-gonioréfectomètre / modélisation / interpolation