

Soutenance de thèse

Kévin WALCARIUS soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA PSI et intitulée « *Modélisation numérique et mise en œuvre expérimentale d'un prototype imageur laser 3D pour la visualisation de cibles immergées dans un milieu aquatique diffusant* »

Le 27 septembre 2024 à 14h00
Salle des thèses à l'ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de :

M. Thibault DARTIGALONGUE	ONERA	Directeur de thèse
M. Malik CHAMI	Sorbonne Université	Codirecteur de thèse
M. Alain MIFFRE	Université Lyon 1	Rapporteur
M. Paul CHECCHIN	Université Clermont Auvergne	Rapporteur
Mme Céline CORNET	Université Lille 1	Examinatrice
M. Vincent NOEL	CNRS-LAERO	Examineur

Résumé :

Dans les domaines de la défense, de l'industrie et de la prospection marine, la représentation détaillée d'une scène en trois dimensions (3D) en toutes conditions est cruciale. Un des enjeux est de pouvoir accéder à cette information 3D dans des conditions de forte teneur en matières en suspension du milieu aquatique. Dans ce contexte, les imageurs 3D à plans focaux utilisent une source laser pulsée et chaque pixel est équipé d'une horloge interne synchronisée sur l'émission laser, permettant d'accéder à l'information 3D tout en filtrant temporellement les photons parasites diffusée par les hydrosols présents dans le milieu étudié. Les caméras à comptage de photons permettent de capter des flux lumineux très faibles, ce qui permet de voir à travers de fortes épaisseurs optiques tout en minimisant la puissance laser nécessaire. Cependant, un tel régime est fortement sensible au rapport entre le signal du volume d'eau turbide et le signal de la cible. Dans l'optique d'évaluer l'apport potentiel de la technologie lidar pour l'observation de cibles 3D à courte portée (5-20 m) dans des milieux denses, un prototype d'imageur actif avec une matrice de SPAD a été précédemment développé à l'ONERA-Toulouse. L'objectif de cette thèse consiste à évaluer la capacité du prototype à retranscrire une scène 3D dans des conditions de forte turbidité, ainsi que comprendre l'impact de la diffusion par les particules du milieu sur le signal détecté par la caméra. La méthodologie utilisée est basée sur une approche théorique (modélisation) et expérimentale. L'approche théorique a consisté à développer un modèle de transfert radiatif de type Monte-Carlo pour simuler les interactions entre le rayonnement émis par une source laser, les particules du milieu traversé et la cible observée. L'approche expérimentale a consisté à déployer le prototype imageur dans une chambre climatique pour valider le modèle de Monte Carlo mis au point. Un état de l'art des propriétés optiques des milieux aquatiques a été réalisé, puis le modèle de transfert radiatif a été adapté au contexte de l'imagerie à courte portée en milieu dense en proposant une modélisation du phénomène de « flou »

optique sur le signal diffusé depuis la colonne turbide proche du détecteur. Ce modèle permet d'accélérer la vitesse de convergence du modèle d'autant plus rapidement que l'épaisseur optique traversée est importante (facteur d'accélération de 6500 pour une épaisseur optique de 4.1). Cela permet de simuler des scènes 3D pour des épaisseurs optiques importantes (>5), ce qui était auparavant impossible dans un temps de calcul raisonnable. Le modèle a été validé en diffusion simple, puis l'impact de la diffusion multiple et de l'orientation de la diffusion sur le signal 3D reçu par la caméra a été étudié. Des métriques quantitatives ont été proposées pour caractériser du signal cible. L'étude de ces métriques a entre autres montré que la perte de contraste de la restitution 3D de la cible en diffusion multiple dépend de la directionnalité de la diffusion et de la taille des champs de détection et d'illumination. La dernière étape de la thèse a consisté à valider expérimentalement le modèle numérique. Le prototype imageur a été d'abord caractérisé avec précision, puis une campagne de mesure a été conduite dans une serre climatique avec une scène 3D canonique et deux agents turbides, permettant d'adresser deux régimes de diffusion (faiblement et fortement orientée vers l'avant). Le résultat principal de cette thèse est la mise en évidence, numériquement et expérimentalement, d'une perte de l'information 3D de la scène observée quand la turbidité ou le champ de vue augmentent. La répartition transversale de la perte de contraste dépend fortement de l'agent diffusant utilisé. Ce phénomène ne peut être corrigé par aucun filtrage temporel car il a pour origine des photons faiblement déviés et faiblement retardés.

Mots-clés : Imagerie laser 3D, Diffusion multiple, Monte-Carlo, Comptage de photon, Perte de contraste, Vision sous-marine

Summary:

In the fields of defence, industry, and marine exploration, the detailed representation of a scene in three dimensions (3D) under all conditions is crucial. One of the challenges is to access this 3D information in environments with high concentrations of suspended matter in the aquatic medium. In this context, 3D focal plane imagers use a pulsed laser source, and each pixel is equipped with an internal clock synchronized with the laser emission, allowing access to 3D information while temporally filtering out stray photons scattered by hydrosols present in the studied medium. Photon-counting cameras can capture very low light fluxes, enabling visibility through high optical thicknesses while minimizing the necessary laser power. However, such a regime is highly sensitive to the ratio between the signal from the turbid water volume and the target signal. To evaluate the potential contribution of lidar technology for observing 3D targets at short range (5-20 m) in dense environments, an active imager prototype with an SPAD array was previously developed at ONERA-Toulouse. The objective of this thesis is to assess the prototype's ability to reproduce a 3D scene under high turbidity conditions and to understand the impact of particle scattering in the medium on the signal detected by the camera. The methodology used is based on a theoretical (modelling) and experimental approach. The theoretical approach involved developing a Monte Carlo-type radiative transfer model to simulate the interactions between the radiation emitted by a laser source, the particles in the traversed medium, and the observed target. The experimental approach involved deploying the imager prototype in a climate chamber to validate the developed Monte Carlo model. A state-of-the-art review of the optical properties of aquatic environments was conducted, followed by adapting the radiative transfer model to the context of short-range imaging in dense environments by proposing a modelling of the "blur" optical phenomenon on the signal scattered from the turbid column near the detector. This model

accelerates the convergence speed of the model, especially when the traversed optical thickness is significant (acceleration factor of 6500 for an optical thickness of 4.1). This allows the simulation of 3D scenes for significant optical thicknesses (>5), which was previously impossible within a reasonable computation time. The model was validated for single scattering, then the impact of multiple scattering and the orientation of scattering on the 3D signal received by the camera was studied. Quantitative metrics were proposed to characterize the target signal. The study of these metrics showed, among other things, that the loss of contrast in the 3D restitution of the target in multiple scattering depends on the directionality of the scattering and the size of the detection and illumination fields. The final stage of the thesis consisted of experimentally validating the numerical model. The imager prototype was first characterized precisely, then a measurement campaign was conducted in a climate greenhouse with a canonical 3D scene and two turbid agents, addressing two scattering regimes (weakly and strongly forward-directed). The main result of this thesis is the numerical and experimental demonstration of a loss of 3D information of the observed scene when turbidity or the field of view increases. The transverse distribution of the contrast loss is strongly dependent on the scattering agent used. This phenomenon cannot be corrected by any temporal filtering as it originates from weakly deviated and weakly delayed photons.

Keywords: 3D laser imaging, Multiple scattering, Monte-Carlo, Photon counting, Contrast loss, Underwater vision