

**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE
BOURGOGNE FRANCHE-COMTE**

**Préparé à Institut de Chimie Moléculaire de l'Université de Bourgogne
(ICMUB)**

**Ecole doctorale n°37
Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM)**

Doctorat de Intelligence Artificielle en Santé

**Par
M. Ali TALEB**

**Réalité Augmentée Basée Sur Les Caractéristiques de l'Image Dans La
Chirurgie de l'Oreille Mini-invasive**

Thèse présentée et soutenue à Dijon, le 06/12/2024

Composition du Jury :

Pr. KARKAS Alexandre	PU-PH, CHU de Saint-Étienne, France	Président
Pr. NGUYEN Yann	PU-PH, Sorbonne Université, France	Rapporteur
Pr. MERIENNE Frédéric	PH, Universités LISPEN, France	Rapporteur
Pr. DEMONCEAUX Cedric	PH, Université de Bourgogne, France	Examineur
Pr. BOZORG GRAYELI Alexis	PU-PH, Université de Bourgogne, France	Directeur de thèse
Dr. LALANDE Alain	MCU-PH, Université de Bourgogne, France	Co-directeur de thèse

Titre : Réalité augmentée basée sur les caractéristiques de l'image dans la chirurgie de l'oreille mini-invasive

Mots clés : Réalité augmentée, oreille, intelligence artificielle, recalage d'images, reconstruction d'image, CT-scan et endoscopie, erreur de reprojection de recalage cible

Résumé : En chirurgie de l'oreille, une localisation précise des structures profondes est essentielle pour éviter les tissus sensibles. La Réalité Augmentée (RA) a le potentiel d'augmenter la précision, la sécurité et l'efficacité des interventions. Les chirurgiens utilisent la RA pour visualiser des structures anatomiques complexes en superposant une image préopératoire à une vidéo chirurgicales en direct. L'augmentation de cette scène en temps réel nécessite un recalage comme étape préliminaire. Le recalage est le processus consistant à aligner deux modalités d'images et à déformer l'une pour correspondre à l'autre. Ce projet vise à développer un système de recalage dédié à la RA en chirurgie de l'oreille. Un système de recalage 2D-vers-3D a été proposé. Initialement, le système générait une endoscopie virtuelle (EV) 2D à partir d'un scanner CT. L'EV offrait une vue claire des structures anatomiques de l'oreille moyenne. Ensuite, un algorithme recalait l'EV 2D sur une image 2D issue d'une vidéo endoscopique. Le processus commençait par la segmentation des repères

anatomiques de la membrane tympanique et du marteau dans les deux modalités. Ensuite, les images étaient alignées en utilisant l'algorithme des points les plus proches itératifs (ICP). Le système était entièrement automatisé et ne reposait sur aucun marqueur fiduciaire. De plus, dans une étude novatrice, nous avons évalué la précision de la mesure de l'erreur de reprojection de recalage cible (TRRE). Nous avons étudié son biais par rapport à plusieurs facteurs, tels que la distance de la cible par rapport au centre optique et les hypothèses du modèle de caméra utilisé. En outre, nous avons exploré l'intégration de l'Homologie Persistante (HP) pour améliorer la segmentation des tissus en l'intégrant dans la fonction de perte d'un modèle d'apprentissage profond. Ce projet a démontré la faisabilité d'un système de recalage 2D-vers-3D entièrement automatique pour la RA en chirurgie de l'oreille. Les travaux futurs se concentreront sur le perfectionnement de la segmentation basée sur l'HP afin d'améliorer davantage la précision de l'identification des repères anatomiques.

Title : Augmented Reality Based on Image Features in Minimally Invasive Ear Surgery

Keywords : Augmented Reality, ear, artificial intelligence, image registration, image reconstruction, CT-scan and endoscopy, target registration reprojection error

Abstract : In ear surgery, a precise localization of deep-seated structures is crucial for avoiding sensitive tissues. Augmented Reality (AR) has the potential of increasing accuracy, safety and efficiency during procedures. Surgeons use AR to visualize complex anatomical structures through an overlay of a preoperative image onto a live surgical video. Augmenting this live scene requires registration as a preliminary step. Registration is the process of aligning two image modalities and warping one into another. This project aims at developing a registration system dedicated to AR in ear surgery. A 2D-to-3D registration system was proposed. Initially, the system generated a 2D virtual endoscopy (VE) from a CT-scan. The VE had a clear view of the anatomical structures in the middle ear. Then, an algorithm registered the 2D VE into a 2D frame from an endoscopic surgical video. The process started with the segmentation of the anatomi-

cal landmarks of the tympanic membrane and the malleus in both modalities. Then, images were aligned using the Iterative Closest Point algorithm. The system was fully automatic and did not rely on any fiducial markers. Moreover, in a novel study, we evaluated the precision of the target reprojection registration error measurement (TRRE). We investigated its bias to several factors such as the target's distance from optical center and the assumption of camera model used. Additionally, we investigated the incorporation of Persistent Homology (PH) to enhance the segmentation of tissues through incorporating it in the loss function of a deep learning model. This project demonstrated the feasibility of a fully automatic 2D-to-3D registration system for AR in ear surgery. Future work will focus on refining the PH-based segmentation to further improve the accuracy of anatomical landmark identification.