

**Sujet de thèse / PhD position**

**CONCEPTION D' UN SIMULATEUR HAPTICQUE POUR LA PONCTION VENTRICULAIRE
/ DESIGN OF A HAPTIC SIMULATOR TO TRAIN ON VENTRICULAR PUNCTION**

English version on page 5

Établissement d'inscription : INSA Lyon
École doctorale : ED 160 EEA de Lyon
Intitulé du doctorat : Automatique
Unité de recherche : Ampère (UMR CNRS 5005) Au sein du Groupe de travail Robotique du laboratoire Ampère (département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes AIS) à l' INSA de Lyon
Directeur de thèse : M. LELEVÉ Arnaud (arnaud.leleve@insa-lyon.fr)
Co-encadrants : M. CHALARD Rémi (remi.chalard@insa-lyon.fr)
Rémunération: 1990€ brut soit 1600€ nets
Période : Septembre 2021 – Septembre 2024

Mots-clefs : Robotique médicale, simulateur haptique, réalité augmentée, ponction ventriculaire

Profil du candidat recherché (prérequis) :

- Profil Robotique, automatique, mécanique
- Avec compétences en programmation Matlab / C / C++ et 3D

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels :

CHU Lyon, service de Neurochirurgie pédiatrique dirigé par le Professeur Federico Di Rocco.

Domaine et contexte scientifiques :

Ce sujet relève du domaine de la robotique médicale, plus précisément de simulation haptique pour l'apprentissage de gestes médicaux, et répond directement à l'attente de la Haute Autorité de Santé: "Jamais le première fois sur un patient".

La ponction ventriculaire est couramment réalisée dans les services de neurochirurgie ou aux urgences. Elle consiste à insérer un cathéter dans le cerveau, à l'aide d'une aiguille, jusqu'à atteindre la corne frontale pour drainer du liquide céphalo-rachidien à but thérapeutique ou de diagnostic [1] (voir figure 1). La routine clinique consiste à insérer cette aiguille à l'aveugle avec comme seul indice de réussite la perte de résistance soudaine lorsque le ventricule est atteint [2]. A l'heure actuelle, il est fondamental qu'un neurochirurgien soit capable de réaliser ce geste "à la main", les systèmes d'assistance (ex : robot ROSA [7]) étant rares et chers. Pourtant l'apprentissage

de ce geste est uniquement réalisé par compagnonnage: il n'existe aucun simulateur efficace pour la formation et l'entraînement à ce type de chirurgie (ni les mannequins anatomiques [3] ni les simulateurs actuels en Réalité Virtuelle [4-6]). Or, les risques d'engendrer de graves séquelles pour le patient sont élevés.

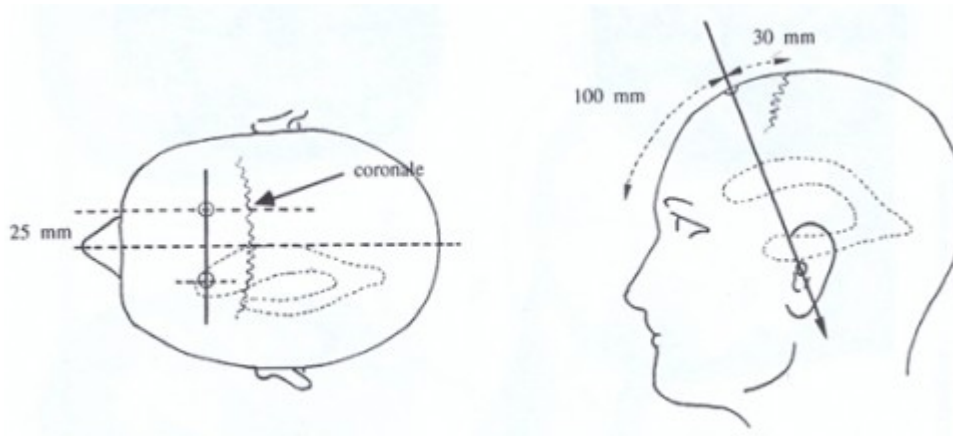


Figure 1: axe de ponction ventriculaire

Objectifs de la thèse :

L'objectif principal consiste à concevoir et prototyper un simulateur haptique [8] permettant la formation, l'entraînement au geste lié à la ponction ventriculaire réalisé dans le cadre d'opérations neurochirurgicales. L'interface haptique manipulée par l'apprenant sera spécifique à ce geste afin de reproduire des conditions proches de la réalité.

Les gestes réalisés pendant les opérations réelles seront analysés et traités afin de proposer un outil d'évaluation objective rapide des gestes pendant les simulations.

Le simulateur devra pouvoir personnaliser les entraînements à partir de données propres à chaque patient (images IRM préopératoires) pour amoindrir les risques d'erreurs durant l'acte chirurgical.

Verrous scientifiques :

- Analyser et modéliser les interactions entre le chirurgien et le patient afin de pouvoir les retranscrire sur un simulateur haptique [9].
- Déterminer la synergie homme /robot permettant la reproduction la plus fidèle de la réalité en se basant sur le principe de comanipulation [10].
- Reproduire virtuellement l'anatomie du patient à partir d'images IRM et y intégrer des informations de trajectoires d'instruments basées sur les capteurs du robot en temps réel [11].

Contributions originales attendues :

- Il n'existe pas à l'heure actuelle de tel simulateur.
- Réaliser ce simulateur en intégrant simultanément : 1/ interface robotique spécifique, 2/ simulation d'images IRM temps réel et 3/ réalité augmentée, est inédit dans ce contexte.
- Intégrer des exercices patient-spécifiques ajoute une contrainte forte sur les modèles utilisés

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

Lors de la ponction, le chirurgien se servant de la forme du crâne et notamment de la position du nez et des oreilles du patient comme repères anatomiques, la première partie du projet portera sur la conception d'un ensemble crâne / oreille / nez réaliste. En effet, lors de chaque ponction ventriculaire, la position du trou par lequel le chirurgien va insérer l'aiguille joue un rôle prépondérant dans la réussite du geste. En pratique, le chirurgien se base sur le positionnement des oreilles et du nez pour choisir l'emplacement du forage crânien. Ces organes lui servent également de repère lors de l'insertion de l'aiguille. Enfin, il utilise le crâne du patient comme point d'appui lors du geste. Pour toutes ces raisons, il apparaît nécessaire de concevoir des reproductions crâniennes physiques permettant au simulateur de gagner en réalisme. Différentes tailles de boîtes crâniennes pourront être développées dans le cadre de la chirurgie pédiatrique. Il faudra également veiller à utiliser des outils similaires à ceux utilisés en salle d'opération afin d'accentuer l'immersion du simulateur. Un substitut d'aiguille devra être monté sur le robot et permettre les mêmes mouvements que l'aiguille réelle.

Il conviendra de développer des lois de commandes sur un robot Haption afin de reproduire de manière réaliste la sensation de pénétration d'une aiguille [12] à travers le cerveau et le ventricule. On pourra se référer aux travaux de Ma. de los Angeles ALAMILLA-DANIEL sur la ponction articulaire [13] réalisés au sein du laboratoire et aux divers tests déjà réalisés sur la plateforme d'essais du laboratoire¹. Cette étape nécessitera, entre autres, l'étude bibliographique des propriétés mécaniques du cerveau afin de pouvoir les reproduire avec des lois commande adaptées et innovantes toujours dans un but de pousser le réalisme du simulateur haptique à son paroxysme.

Le troisième thème portera sur la formation et le retour d'expérience. Il conviendra de travailler sur la création d'un univers augmenté permettant de naviguer dans le cerveau et de voir le ventricule à partir des images IRM des patients dans lequel il faudra pouvoir localiser la trajectoire de l'aiguille [14]. Cette étape est cruciale pour la réponse aux enjeux de formation des nouveaux chirurgiens sur cet acte chirurgical. En effet, la création d'un environnement augmenté permettant d'observer le cerveau suivant différentes coupes IRM et faisant apparaître la trajectoire de l'aiguille lors de l'entraînement à la ponction ventriculaire facilitera le retour d'expérience du chirurgien expert accompagnant le novice. Cela permettra également à l'apprenant de contextualiser et visualiser ses erreurs ou réussite dans un processus d'apprentissage.

Enfin, il conviendra de travailler sur le retour d'informations donné à l'apprenant suite à ses entraînements. Pour cela, il faudra classifier les opérations des novices et des experts pour mieux cerner les difficultés du geste et personnaliser les entraînements de chaque novice. Cette thématique pourra se baser sur certains travaux du laboratoire qui ont déjà abordé ce sujet. En effet, dans le cadre des travaux du doctorat de M. SENAC [15], différentes méthodes de *machine learning* ont été implémentées pour analyser les gestes de novices et d'experts. L'objectif était de déterminer les caractéristiques du geste réalisé afin de mettre en valeur les différences entre les experts et les novices et ainsi proposer aux novices une formation personnalisée avec des exercices dédiées. Ainsi des méthodes supervisées et non supervisées ont été implémentées et comparées afin de trouver les méthodes les plus appropriées dans notre cas. Ces travaux faisaient déjà suite aux travaux réalisés au sein du laboratoire dans le cadre du doctorat de Mme CIFUENTES [16] qui

¹Cf. <http://www.ampere-lab.fr/spip.php?article1082>

s'intéressaient à la détermination des critères objectifs d'analyses de gestes médicaux. En se basant sur les travaux précédents, cette approche permettra ainsi d'optimiser les courbes d'apprentissage des apprenants avec un retour d'expérience personnalisé et ciblé.

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Soumission de travaux aux principales conférences internationales dans le domaine (IROS, ICRA, EMBC) et aux revues internationales traitant de robotique médicale (IEEE Trans on Robotics, , ...) et de robotique médicale (IEEE Transactions on Medical Robotics, ...).

Compte tenu de la forte composante applicative du sujet, les activités de transfert vers la communauté industrielle pour le médical seront également ciblées, via le développement et la distribution de solutions mécatroniques. Le partenariat avec le CHU de Lyon motive l'intérêt de ce simulateur pour la formation de son personnel et plus généralement des neurochirurgiens.

La réalisation et la validation d'un prototype testé sur le terrain (niveau TRL 5) ouvrira la voie à une valorisation industrielle.

Aucune démarche de recherche n'a encore été réalisée. Cependant la parfaite connaissance des fournisseurs de simulateurs par les chirurgiens partenaires favorisera la publicité du dispositif.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Robotique, haptique, co-manipulation, rendu image 3D temps réel synchronisé,

Méthodes de travail liées à tout travail de recherche (recherche bibliographique, simulation, expérimentation, rédaction d'articles scientifiques, ...).

Perspectives professionnelles après le doctorat :

Carrière:

- dans le domaine académique (post-doc puis poste de chercheur ou enseignant-chercheur)
ou
- dans le secteur industriel dans un service de R&D

**PhD position****École doctorale EEA de Lyon****DESIGN OF A HAPTIC SIMULATOR TO TRAIN ON VENTRICULAR PUNCTURE**

Enrollment Institution : INSA Lyon, Université de Lyon, France
Doctoral School: ED 160 EEA de Lyon
PhD Department: Automatic Control
Research unit: Ampère (UMR CNRS 5005) Within the Robotics Working Group of the Ampère laboratory (Automation Systems Engineering Department AIS) at INSA Lyon , France
Thesis adviser: M. LELEVÉ Arnaud (arnaud.leleve@insa-lyon.fr)
Co-supervisor: M. CHALARD Rémi (remi.chalard@insa-lyon.fr)
Compensation: 1600€
Expected starting date: Sept 2021 – Sept 2024

Key words: medical robotics, haptic simulator, augmented reality, external ventricular drainage

Expected Profile (prerequisite) :

- Robotic, automatic, mechanic
- With programming skills: Matlab / C / C++ et 3D

Possible external collaboration(s)/partnership(s):

CHU Lyon, Department of Pediatric Neurosurgery headed by Professor Federico Di Rocco.

Scientific field and context:

This subject is in the field of medical robotics, more precisely haptic simulation for learning medical gestures, and responds directly to the expectation of the High Authority of Health: "Never the first time on a patient".

Ventricular drainage is commonly performed in neurosurgery departments or in the emergency room. It consists of inserting a catheter into the brain, using a needle, until it reaches the frontal horn to drain cerebrospinal fluid for therapeutic or diagnostic purposes [1] (see figure 1). The clinical routine is to insert this needle blindly. The only indication of success is the sudden loss of resistance when the ventricle is reached [2].

Currently, it is fundamental that a neurosurgeon be able to perform this gesture "by hand". Indeed, the assistance systems (e.g. ROSA robot [7]) are unusual and expensive. However, the learning of this gesture is only performed by companionship: there is no effective simulator for training in this type of surgery (neither anatomical mannequins [3] nor current Virtual Reality simulators [4-6]). However, the risks of causing serious after-effects for the patient are high.

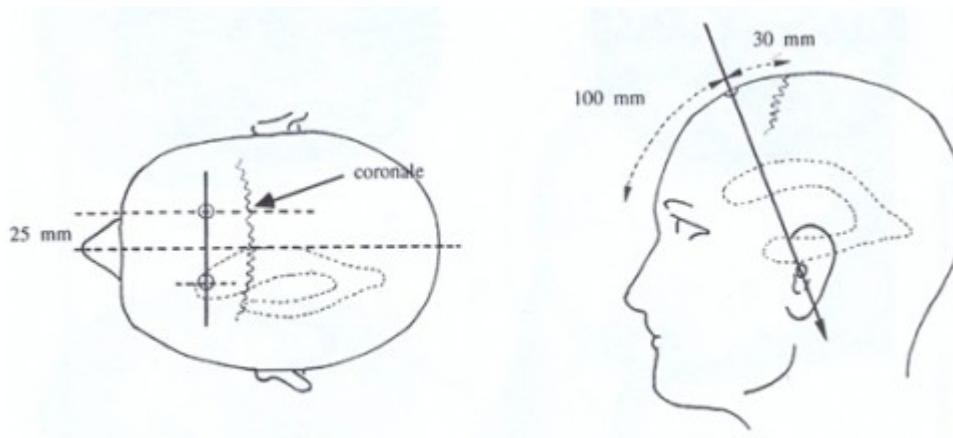


Figure 1: ventricular drainage axis

Objectives of the thesis:

The main objective consists in designing and prototyping a haptic simulator [8] for the training of the ventricular drainage gesture in neurosurgical operations. The haptic interface manipulated by the learner will be specific to this gesture in order to reproduce conditions close to reality.

The gestures performed during real operations will be analyzed and processed in order to propose a tool for a fast and objective evaluation of gestures during simulations.

The simulator will have to be able to customize the training sessions based on data specific to each patient (preoperative MRI images) to reduce the risk of errors during the surgical procedure.

Scientific problems:

- Analyze and model the interactions between the surgeon and the patient in order to be able to transcribe them on a haptic simulator [9].
- Determine the man/robot synergy allowing the most faithful reproduction of reality based on the principle of comanipulation [10].
- Virtual reproduction of the patient's anatomy from MRI images and integration of instrument trajectory information based on real-time robot sensors [11].

Expected contributions:

- There is currently no such simulator.
- Realize this simulator by simultaneously integrating: 1/ specific robotic interface, 2/ real time MRI image simulation and 3/ augmented reality, is unprecedented in this context.
- Integrate patient-specific exercises adds a strong constraint on the models used.

Research program and proposed scientific approach:

During the drainage, the surgeon will use the shape of the skull and in particular the position of the patient's nose and ears as anatomical landmarks. The first part of the project will focus on the

design of a realistic skull/ear/nose combination. Indeed, during each ventricular puncture, the position of the hole through which the surgeon will insert the needle plays a major role in the success of the procedure. In practice, the surgeon relies on the positioning of the ears and nose to choose the location of the cranial drilling. These organs also serve as a reference point when the needle is inserted. Finally, he uses the patient's skull as a support point during the procedure. For all these reasons, it seems necessary to design physical cranial reproductions allowing the simulator to gain in realism. Different sizes of skulls can be developed for pediatric surgery. It will also be necessary to use tools similar to those used in the operating room in order to accentuate the immersion of the simulator. A needle substitute will have to be mounted on the robot and allow the same movements as the real needle.

It will be necessary to develop control laws on a Haption robot in order to realistically reproduce the sensation of needle penetration [12] through the brain and the ventricle. One can refer to the work of Ma. de los Angeles ALAMILLA-DANIEL on joint puncture [13] and to the various tests already carried out on the laboratory's test platform. This stage will require, among other things, a bibliographical study of the mechanical properties of the brain in order to be able to reproduce them with adapted and innovative control laws, always with the aim of pushing the realism of the haptic simulator to its paroxysm.

The third theme will deal with training and feedback. It will be necessary to work on the creation of an augmented universe allowing to navigate in the brain and to see the ventricle from the MRI images of the patients in which it will be necessary to be able to locate the trajectory of the needle [14]. This step is crucial in addressing the challenges of training new surgeons in this surgical procedure. Indeed, the creation of an augmented environment allowing the observation of the brain following different MRI slices and showing the needle trajectory during ventricular puncture training will facilitate the feedback of the expert surgeon accompanying the novice. It will also allow the learner to contextualize and visualize his mistakes or success in a learning process.

Finally, it will be necessary to work on the feedback given to the learner following his training. To do this, it will be necessary to classify the operations of novices and experts in order to better identify the difficulties of the gesture and personalize the training of each novice. This theme could be based on some of the laboratory work that has already addressed this subject. Indeed, in the context of the PhD work of M. SENAC [15], different machine learning methods have been implemented to analyze the gestures of novices and experts. The objective was to determine the characteristics of the gestures performed in order to highlight the differences between experts and novices and thus offer novices personalized training with dedicated exercises. Thus supervised and unsupervised methods were implemented and compared in order to find the most appropriate methods in our case. This work already followed on from the work carried out in the laboratory as part of Mrs CIFUENTES' doctoral thesis [16], which focused on the determination of objective criteria for the analysis of medical procedures. Based on previous work, this approach will allow us to optimize the learning curves of learners with personalized and targeted feedback.

Funding of the thesis: Doctoral contract from the institution of registration

Objectives for the valorization of research work:

Submission of papers to major international conferences in the field (IROS, ICRA, EMBC) and to international journals dealing with medical robotics (IEEE Trans on Robotics, ...) and medical robotics (IEEE Transactions on Medical Robotics, ...).

Given the strong applicative component of the subject, transfer activities to the industrial community for the medical sector will also be targeted, via the development and distribution of mechatronic solutions. The partnership with the University Hospital of Lyon motivates the interest of this simulator for the training of its staff and more generally of neurosurgeons..

The conception and validation of a field-tested prototype (TRL level 5) will pave the way for industrial valorization.

No research has yet been carried out. However the perfect knowledge of the simulator suppliers by the partner surgeons will foster the advertising of the device.

Competencies that will be developed during the PhD:

Robotic, haptic, co-manipulation, synchronized real-time 3D image.

Work methods related to any research work (bibliographical research, simulation, experimentation, writing scientific articles, ...).

Post-Doctoral Career Perspectives:

Career:

- in the academic field (post-doc followed by a position as a researcher)
- or
- in the industrial sector (e.g. R&D department)

References:

- [1] Toma AK, Camp S, Watkins LD, Grieve J, Kitchen ND. External ventricular drain insertion accuracy: is there a need for change in practice? *Neurosurgery* 2009;65(6):1197–200.
10.1227/01.NEU.0000356973.39913.0B
- [2] Banerjee, P. Pat, et al. "Accuracy of ventriculostomy catheter placement using a head-and hand-tracked high-resolution virtual reality simulator with haptic feedback." *Journal of neurosurgery* 107.3 (2007) : 515- 521
- [3] Zhuang Jianghui, He Bingwei, et al. "Development and Application of a Simulated Puncture Model for Lateral Ventricle". *China Medical Equipment* (2018), 33 (5), 32-35
- [4] Manchester, Nigel John, and Nigel W. John. "A vrml simulator for ventricular catheterization.", *Eurographics UK*, 1999.
- [5] Luciano, Cristian, et al. "Second generation haptic ventriculostomy simulator using the ImmersiveTouch™ system." *Studies in health technology and informatics* 119 (2005): 343.
- [6] Zhongyi Chen, Yuqing Liu, et al. "Application of mixed reality-based lateral ventricle puncture training system in medical education training" *Electronic Journal of Trauma and Emergency* (2019).
- [7] Lefranc M, Capel C, Pruvot-Occean AS, Fichten A, Desenclos C, Toussaint P, Le Gars D, Peltier J. Frameless robotic stereotactic biopsies: a consecutive series of 100 cases. *J Neurosurg.* 2015 Feb;122(2):342-52. doi:10.3171/2014.9. JNS14107. Epub 2014 Nov 7. PMID: 25380111.
- [8] Gonenc, B. and Gurocak, H. (2012b). Virtual needle insertion with haptic feedback using a hybrid actuator with DC servomotor and MR-brake with Hall-effect sensor. *Mechatronics*, 22(8):1161–1176.
- [9] A. Okamura, C. Simone, and M. O’Leary. "Force Modeling for Needle Insertion into Soft Tissue." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 10, pp. 1707–1716, Oct. 2004.
- [10] Morel, G. and Szewczyk, J. and Vitrani, M.A. (2012). *Comanipulation. Robotique Medicale*, Hermes, publisher. Pages 343-392.
- [11] Alex Tsui, Devin Fenton, Phong Vuong, Joel Hass, Patrice Koehl, Nina Amenta, David Coeurjolly, Charles Decarli & Owen Carmichael (2013). « Globally Optimal Cortical Surface Matching With Exact Landmark Correspondence ». *Information Processing in Medical Imaging*, 28 juin 2013, Asilomar, California (États-Unis), pp. 487-498. HAL : hal-00974838
- [12] Thibault Senac, Arnaud Lelevé, Richard Moreau, Laurent Krähenbühl, Florent Sigwalt, et al.. *Designing an accurate and customizable epidural anesthesia haptic simulator*. 2019 IEEE

International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, May 2019, Montreal, Canada. ?10.1109/ICRA.2019.8794199?. ?hal-02170879?

[13] Ma de los Angeles Alamilla Daniel, Richard Moreau, Redarce Tanneguy. Development of haptic simulator for practicing the intraarticular needle injection under echography *. EMBC, Jul 2020, Montreal, Canada. pp.4713-4716, ?10.1109/EMBC44109.2020.9175728?. ?hal-02947141?

[14] Raabe, C., Fichtner, J., Beck, J., Gralla, J., & Raabe, A. (2018). Revisiting the rules for freehand ventriculostomy: a virtual reality analysis, *Journal of Neurosurgery JNS*, 128(4), 1250-1257. Retrieved Dec 9, 2020, from <https://thejns.org/view/journals/j-neurosurg/128/4/article-p1250.xml>

[15] T. Sénac, A. Lelevé, R. Moreau, L. Krähenbühl, F. Sigwalt and C. Bauer, "Skill assessment of an epidural anesthesia using the PeriSIM simulator," in *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, doi:10.1109/TMRB.2020.3048247.

[16] Jenny Cifuentes-Quintero, Minh Tu Pham, Pierre Boulanger, Richard Moreau, Flavio Prieto. Towards a classification of surgical skills using affine velocity. *IET Science Measurement and Technology*, Institution of Engineering and Technology, 2018, 12 (4), pp.548 - 553. ?10.1049/iet-smt.2017.0373?.