

**[English version in the second part of the document]**

## Méthodes de commande par jumeaux numériques de systèmes robotiques rapides fonctionnant à l'intérieur d'un microscope électronique

Titre:	Méthodes de commande par jumeaux numériques de systèmes robotiques rapides fonctionnant à l'intérieur d'un microscope électronique.
Laboratoire:	Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, CNRS UMR 7222, Sorbonne Université. 
Adresse :	4 Place Jussieu, CC 173, Pyramide - T55/65, 75005 Paris.
Partenaires :	- Institut Femto-st. - Laboratoire de Simulation Interactive au CEA-List.
Durée :	3 ans.
Supervision:	Mokrane Boudaoud, Maître de conférences à Sorbonne Université Stéphane Régnier, Professeur à Sorbonne Université Email : mokrane.boudaoud@sorbonne-universite.fr stephane.regnier@sorbonne-universite.fr
Projet :	ANR DyNaBot.
Date limite de candidature	17 mai 2022.
Début de thèse:	Octobre 2022.
Mots clés	Robotique, Automatique.

### 1- Problématique de recherche

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre de la robotique de très haute précision pour l'instrumentation scientifique au sein d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Le MEB offre la possibilité de guider par vision électronique les instruments (effecteurs) d'un système robotique avec une résolution supérieure à celle des microscopes optiques. La résolution de ces derniers est limitée par la diffraction de la lumière et atteint une limite typique de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. Un MEB peut aller bien au-delà de cette limite offrant la possibilité d'effectuer des commandes référencées vision de systèmes robotiques opérants dans des régions d'intérêt à l'échelle du nanomètre [Shi et al. 2016]. Cette technologie est particulièrement prometteuse notamment pour la manipulation robotique et la caractérisation multimodale d'échantillons aux très petites échelles, e.g. nanostructures, nanomatériaux, cellules biologiques. Toutefois, les approches historiques, fondées sur une microscopie électronique caractérisée par une vision planaire et une faible fréquence d'acquisition, limitent

considérablement l'exploitation de l'environnement tridimensionnel des MEB, la vitesse d'exécution des tâches robotiques référencées vision, et les capacités d'automatisation. Par ailleurs, l'augmentation de la cadence des tâches robotiques rapides se heurte à la nécessité d'une maîtrise des forces d'interaction aux très petites échelles entre les instruments robotiques et l'environnement.

Dans ce contexte, le projet ANR DyNaBot vise à étudier en profondeur le paradigme de la génération de mouvements robotiques dans les MEB pour l'exécution de tâches rapides et sûres dans un environnement tridimensionnel. Cette approche, qui est disruptive à cette échelle, vise notamment à dépasser l'état de l'art en proposant des méthodes de commande par jumeaux numériques de systèmes robotiques dotés de capteurs de force actifs. Le sujet de thèse portera notamment sur (i) la proposition et l'étude d'un jumeau numérique pour l'observation et la visualisation tridimensionnelle (3D) de l'environnement de travail ainsi que la prédiction des états du système robotique pour aller au-delà des limites de fréquence d'acquisition des MEB lors de commandes référencées vision, (ii) l'étude de la problématique du contact entre les instruments d'un système robotique rapide et son environnement en utilisant des capteurs de force actifs à impédance variable et (iii) la proposition de commandes référencées vision électronique et exploitant le jumeau numérique pour la génération de mouvements robotiques rapides dans l'environnement tridimensionnelle d'un MEB. Le cadre applicatif portera sur l'analyse et la manipulation d'échantillons biologiques hydratés par un système robotique polyarticulé au sein d'un MEB environnemental<sup>1</sup>.

## 2- Objectifs

L'objectif de cette thèse est de développer des méthodes de génération de mouvements robotiques rapides et de commande en force au sein d'un microscope électronique en s'appuyant sur un asservissement visuel en microscopie électronique à balayage et un retour capteur (force, position, vitesse) le tout en exploitant un jumeau numérique de la plateforme robotique. Le jumeau numérique aura deux principaux apports : une observation et visualisation tridimensionnelle de l'espace de travail et une prédiction des états du robot.

## 3- Résultats attendus

- Conception d'un jumeau numérique du système robotique et de l'environnement MEB en incluant la dynamique des systèmes d'actionnement. Le modèle dynamique proposé dans [Boudaoud et al. 2018] peut être un point de départ. Il sera notamment nécessaire d'étudier des méthodes d'étalonnage et de mise à jour continues du jumeau numérique dans une boucle de commande en exploitant en temps réel de multiples sources de données expérimentales : e.g. vision électronique, données capteur, mesures des forces d'interaction. Il sera possible d'utiliser des méthodes d'intelligence artificielle pour l'étalonnage du jumeau numérique et pour la commande.

---

<sup>1</sup> Un MEB environnemental est un microscope électronique capable de visualiser des échantillons hydratés (e.g. cellules biologique) dans un état plus naturel que ceux observés dans un MEB classique. Sorbonne Université/ISIR possède un MEB environnemental.

- Conception et mise en oeuvre d'un capteur de force actif qui sera embarqué sur le système robotique pour la mesure des forces d'interaction. Un capteur actif permet de réaliser des mesures de forces par compensation grâce à une boucle de régulation automatique. Le prototype proposé dans [Cailliez et al. 2019] peut être un point de départ mais nécessitera des développements supplémentaires pour être opérationnel sous MEB et pour effectuer des mesures de force selon deux axes. La technologie active est très importante pour les mesures de force dans le cadre du projet DyNaBot. Plus d'informations à ce sujet seront données lors de l'entretien.

- Méthodes de commande par jumeaux numériques du système robotique. Il sera notamment important de mettre en avant la plus value du jumeau numérique en termes d'observation tridimensionnelle et de prédiction. Un exemple de commande référencée vision d'un système robotique sous MEB utilisant une vision planaire a été proposé dans [Liang et al. 2020]. L'idée est d'aller plus loin pour la génération de mouvements tridimensionnels rapides avec par exemple des commandes prédictives exploitant le jumeau numérique.

- Mise en oeuvre de méthodes originales de manipulation et de caractérisation mécaniques 3D d'échantillons biologiques sous MEB en exploitant le capteur de force actif 2 axes et les méthodes de commande par jumeaux numériques du systèmes robotique. Plus d'informations à ce sujet seront données lors de l'entretien.

Il est a noter ces résultats attendus ne sont qu'une prévision. La trajectoire d'une thèse peut varier en fonction des affinités et des propositions de la ou du doctorant(e) ainsi que des discussions avec les encadrants. Une thèse de doctorat est une aventure, un espace de liberté et une occasion de concrétiser des idées.

#### 4- Environnement et équipements

La ou le doctorant(e) pourra s'appuyer sur les fortes compétences de l'équipe *Interactions Multi-Échelles* de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) dans les domaines de l'automatique, de la robotique de précision et de la conception de capteurs de forces pour la mesure et l'étude des interactions dynamiques aux petites échelles [Bazaei et al. 2019] [Boudaoud et al. 2015] [Cailliez et al. 2020 a] [Cailliez et al. 2020 b] [Oubellil et al. 2019] [Xie et al. 2011]. La collaboration très étroite avec le Laboratoire de Simulation Interactive au CEA-List apportera un effet de levier important sur les aspects de la thèse liés aux jumeaux numériques. La collaboration avec l'Institut Femto-st apportera une richesse de premier plan sur la robotique opérant sous microscopie électronique [Rauch et al. 2018]. Il est à noter que la thèse s'effectuera à 100 % à l'ISIR mais des échanges réguliers seront effectués avec nos partenaires.

La ou le doctorant(e) aura à sa disposition une plateforme expérimentale exceptionnelle issue des réseaux ROBOTEX et TIRREX. A l'ISIR, la plateforme comprend notamment un microscope électronique à balayage environnemental, un système robotique de très haute précision opérant au sein du microscope, une carte de commande MicroLabBox (dSPACE) dotée d'un FPGA pour l'asservissement rapide du robot, un analyseur de spectre pour l'analyse et le traitement des signaux, un capteur laser de très haute performance et des prototype de capteurs de force actifs pouvant être intégrés sur le système robotique. La ou le doctorant(e) sera formé(e) par des experts à l'utilisation de chacun de ces instruments scientifiques. Cet

équipement d'excellence est un atout majeur pour effectuer des travaux de recherche de très haut niveau en robotique et automatique.

#### 5- Compétences acquises à l'issue de la thèse et possibles débouchés

Pendant la thèse, la ou le doctorant(e) aura notamment la possibilité de participer à des conférences internationales dans les domaines de la robotique, l'automatique, l'instrumentation, etc. et de publier ses travaux dans des journaux scientifiques internationaux à comité de lecture. Il sera également possible pendant la thèse de dispenser des enseignements à Sorbonne Université.

A l'issue de cette thèse, la ou le doctorant(e) aura la possibilité d'être un(e) expert(e) en robotique et automatique avec un savoir faire important dans l'utilisation des jumeaux numériques. Elle/il pourra poursuivre une carrière académique (e.g. chercheuse ou chercheur au CNRS, maîtresse/maître de conférences à l'Université), industrielle et bien plus.

#### 6- Profil et compétences recherchées

La candidate ou le candidat devra être titulaire d'un master ou d'un diplôme équivalent dans le domaine de la robotique ou de la mécatronique ou de l'automatique avec de bonnes compétences dans au moins un de ces domaines. Une expérience préalable dans le domaine des jumeaux numériques n'est pas indispensable. La candidate ou le candidat devra avoir un goût prononcé pour les développements méthodologiques et expérimentaux.

#### 7- Candidature

Les candidats doivent envoyer un CV détaillé, une lettre de motivation, des relevés de notes (master ou équivalent) et les coordonnées (nom, institution, adresse électronique) de deux personnes de référence. Les documents doivent être envoyés avant le 17 mai 2022, dans un format zippé à **mokrane.boudaoud@sorbonne-universite.fr**

#### Références

[Bazaei et al. 2019] A. Bazaei, M. Boudaoud, M. H. Etefagh, Z. Chen, S. Régnier. Displacement sensing by piezoelectric transducers in high-speed lateral nanopositioning. **IEEE Sensors Journal**, 2019.

[Boudaoud et al. 2015] M. Boudaoud, Y. Le Gorrec, Y. Haddab and P. Lutz. Gain scheduling control of a nonlinear electrostatic microgripper: design by an eigenstructure assignment with an observer based structure. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol 23, pp. 1255-1267, 2015.


[Boudaoud et al. 2018] M. Boudaoud, T. Lu, S. Liang, R. Oubellil and S. Régnier. A voltage/frequency modeling for a multi-DOFs serial nano-robotic system based on piezoelectric inertial actuators . **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol 23, 2814 - 2824, 2018.

[Cailliez et al. 2019] J. Cailliez, M. Boudaoud, A. Mohand-Ousaid, A. Weill-Duflos, S. Haliyo and S. Régnier. Modeling and Experimental Characterization of an Active MEMS Based Force Sensor, **Journal of Micro-Bio Robotics**, vol 15, 2019.

- [Cailliez et al. 2020 a] J. Cailliez, A. Weill--Duflos, **M. Boudaoud**, S. Régnier, D. S. Haliyo. Design and Control of a Large-Range Nil-Stiffness Electro-Magnetic Active Force Sensor. **IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, Paris, France, 2020.
- [Cailliez et al. 2020 b] J. Cailliez, M. Boudaoud, S. Liang and S. Régnier. Robust hybrid control of an atomic force microscope for the characterization of interaction forces region at the nanoscale., **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2020.
- [Liang et al. 2020] S. Liang, M. Boudaoud, P. Morin, J. Cailliez, B. Cagneau, W. Rong, S. Régnier. Model predictive control with obstacle avoidance for inertia actuated AFM probes inside a scanning electron microscope, vol. 6, no. 2, pp. 382-388, **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2020.
- [Oubellil et al. 2019] R. Oubellil, A. Voda, M. Boudaoud and S. Régnier. Mixed Stepping / Scanning Mode Control of Stick-Slip SEM-integrated Nano-robotic Systems . **Sensors and Actuators A: Physical**, 285, 258-268, 2019.
- [Rauch et al. 2018] Jean-Yves Rauch, Olivier Lehmann, Patrick Rougeot, Joel Abadie, and Joel Agnus. Smallest microhouse in the world, assembled on the facet of an optical fiber by origami and welded in the  $\mu$ Robotex nanofactory featured. **Journal of Vacuum Science & Technology A**. vol 35, issue 4, 2018.
- [Shi et al. 2016] C.Shi, D.K.Luu, Q.Yang, J.Liu, J.Chen, C.Ru, S.Xie, J.Luo, J.Ge, and Y. Sun, "Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes," **Microsystems & Nanoengineering**, vol. 2, p. 16024, 2016.
- [Xie et al. 2011] Hui Xie and Stéphane Régnier. Development of a Flexible Robotic System for Multiscale Applications of Micro/Nanoscale Manipulation and Assembly. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol 16, 266-276, 2011.

**[English version below]**

# Digital Twin-Driven Control Methods for Fast Robotic Systems Operating Inside an Electron Microscope

Title:	Digital Twin-Driven Control Methods for Fast Robotic Systems Operating Inside an Electron Microscope.
Laboratory:	Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, CNRS UMR 7222, Sorbonne University. 
Address:	4 Place Jussieu, CC 173, Pyramide - T55/65, 75005 Paris.
Partners:	- Femto-st Institute. - Laboratoire de Simulation Interactive au CEA-List.
Duration:	3 years.
Supervision:	Mokrane Boudaoud, Associate Professor at Sorbonne University Stéphane Régnier, Professor at Sorbonne University Email : mokrane.boudaoud@sorbonne-universite.fr stephane.regnier@sorbonne-universite.fr
Project:	ANR DyNaBot
Application deadline	May 17, 2022
Beginning of thesis:	October 2022
Key words	Robotics, Control.

## 1- [Research subject](#)

The thesis focuses on high precision robotics for scientific instrumentation in a scanning electron microscope (SEM). The SEM offers the possibility to guide by electronic vision the instruments (effectors) of a robotic system with a higher resolution than optical microscopes. The resolution of the latter is limited by the diffraction of light and reaches a typical limit of a few hundred nanometers. A SEM can go well beyond this limit offering the possibility to perform vision based control of robotic systems operating in nanometer scale regions of interest [Shi et al. 2016]. This technology is particularly promising for robotic manipulation and multimodal characterization of samples at very small scales e.g. nanostructures, nanomaterials, biological cells. However, historical approaches, based on electron microscopy with planar vision and low acquisition frequency, significantly limit the exploitation of the three-dimensional SEM environment, the speed of execution of vision-based robotic tasks, and automation capabilities. Moreover, the increase in the rate of fast robotic tasks comes up against the need to control the interaction forces at very small scales between the robotic instruments and the environment.

In this context, the ANR project DyNaBot aims to study in depth the paradigm of robotic motion generation in SEMs for the execution of fast and safe tasks in a 3D environment. This approach, which is disruptive at this scale, aims to go beyond the state of the art by proposing digital twin-driven control methods for fast robotic systems equipped with active force sensors and operating in SEMs. The subject of the thesis will include (i) the proposal and study of a

digital twin for the observation and the three-dimensional (3D) visualization of the working environment and the prediction of the states of the robotic system to go beyond the limits of frequency of acquisition of the SEMs when performing vision based control, (ii) the study of the problem of contact between the instruments of a fast robotic system and its environment using active force sensors with variable impedance and (iii) the proposal of electronic vision based control methods using the digital twin for the generation of fast robotic movements in the three-dimensional environment. The application framework will focus on the analysis and manipulation of hydrated biological samples by a polyarticulated robotic system within an environmental<sup>2</sup> SEM.

## 2- Objectives

The objective of this thesis is to develop methods for the generation of fast robotic movements while mastering dynamic interaction forces within an electron microscope based on visual servoing and a digital twin. The digital twin will have two main advantages: three-dimensional observation and visualization of the working space and prediction of robot states.

## 3- Expected outcomes

- Design of a digital twin of the robotic system and the SEM environment including the dynamics of the actuation systems. The dynamic model proposed in [Boudaoud et al. 2018] can be a starting point. In particular, it will be necessary to study methods for continuous calibration and updating of the digital twin in a control loop by exploiting multiple sources of experimental data in real time: e.g. electronic vision, sensor data and interaction force measurements. It will be possible to use artificial intelligence methods for the calibration of the digital twin and for the control.
- Design and implementation of an active sensor that will be embedded on the robotic system to measure interaction forces. An active sensor allows force measurements by compensation through a feedback control loop. The prototype proposed in [Cailliez et al. 2019] can be a starting point but will require further development to be operational under SEM and to perform force measurements along two axes. Active technology is very important for force measurements in the project DyNaBot. More information on this part will be given during the interview.
- Control methods by digital twins of the robotic system. It will be important to highlight the added value of the digital twin in terms of three-dimensional observation and prediction. An example of vision based control of a robotic system under SEM using planar vision has been proposed in [Liang et al. 2020]. The idea is to go further for the generation of fast three-dimensional movements, for instance with predictive control using the digital twin.
- Implementation of original methods of manipulation and 3D mechanical characterization of biological specimens under SEM by exploiting the 2-axis active force sensor and the digital twins

---

<sup>2</sup> An environmental SEM is an electron microscope capable of visualizing hydrated samples (e.g. biological cells) in a more natural state than those observed in a conventional SEM. Sorbonne University/ISIR has an environmental SEM.

control methods of the robotic system. More information on this part will be given during the interview.

It should be noted that these expected results are only a forecast. The trajectory of a thesis may vary according to the affinities and proposals of the doctoral student as well as discussions with the supervisors. A doctoral thesis is an adventure, a space of freedom and an opportunity for making ideas a reality.

#### 4- Environment and equipment

The PhD student will be able to rely on the strong skills of the team *Multi-Scale Interactions* of the « Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) » in the fields of control, precision robotics and the design of force sensors for the measurement and study of dynamic interactions at small scales [Bazaei et al. 2019] [Boudaoud et al. 2015] [Cailliez et al. 2020 a] [Cailliez et al. 2020 b] [Oubellil et al. 2019] [Xie et al. 2011]. The very close collaboration with the « Laboratoire de Simulation Interactive au CEA-List » will provide significant leverage on aspects of the thesis related to the digital twins. The collaboration with the Institute Femto-st will bring a wealth of knowledge on robotics operating under electron microscopy [Rauch et al. 2018]. The thesis will be carried out 100% at ISIR but regular exchanges will be made with our partners.

The doctoral student will have at his/her disposal an exceptional experimental platform resulting from the networks ROBOTEX and TIRREX. At ISIR, the platform includes an environmental scanning electron microscope, a high-precision robotic system operating within the microscope, a MicroLabBox (dSPACE) control board with an FPGA for fast robot control, a spectrum analyzer for signal analysis and processing, a high-performance laser sensor, and prototypes of active force sensors that can be integrated on the robotic system. The PhD student will be trained by experts in the use of each of these scientific instruments. This equipment of excellence is a major asset for conducting high-level research in precision robotics and control.

#### 5- Skills acquired at the end of the thesis and possible career opportunities

During the thesis, the PhD student will have the opportunity to participate in international conferences in the fields of robotics, control, instrumentation, etc. and to publish his/her work in international peer-reviewed scientific journals. It will also be possible during the thesis to teach at Sorbonne University.

At the end of this thesis, the PhD student will have the opportunity to be an expert in robotics and automatic control with a strong know-how in the use of digital twins. He/she will be able to pursue an academic career (e.g. researcher at the CNRS, lecturer at the University), industrial career and much more.

#### 6- Profile and required skills

The candidate should have a master's degree or equivalent in the field of robotics or mechatronics or control with good skills in at least one of these areas. Previous experience in



the field of digital twins is not essential. The candidate should have a strong interest in methodological and experimental developments.

## 7- Application

Applicants should send a detailed CV, a letter of motivation, transcripts (master's degree or equivalent) and the contact information (name, institution, e-mail address) of two references. Documents must be sent no later than May 17, 2022, in a zipped format to **mokrane.boudaoud@sorbonne-universite.fr**

## References

[Bazaei et al. 2019] A. Bazaei, M. Boudaoud, M. H. Etefagh, Z. Chen, S. Régnier. Displacement sensing by piezoelectric transducers in high-speed lateral nanopositioning. **IEEE Sensors Journal**, 2019.

[Boudaoud et al. 2015] M. Boudaoud, Y. Le Gorrec, Y. Haddab and P. Lutz. Gain scheduling control of a nonlinear electrostatic microgripper: design by an eigenstructure assignment with an observer based structure. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol 23, pp. 1255-1267, 2015.

[Boudaoud et al. 2018] M. Boudaoud, T. Lu, S. Liang, R. Oubellil and S. Régnier. A voltage/frequency modeling for a multi-DOFs serial nano-robotic system based on piezoelectric inertial actuators . **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol 23, 2814 - 2824, 2018.

[Cailliez et al. 2019] J. Cailliez, M. Boudaoud, A. Mohand-Ousaid, A. Weill-Duflos, S. Haliyo and S. Régnier. Modeling and Experimental Characterization of an Active MEMS Based Force Sensor, **Journal of Micro-Bio Robotics**, vol 15, 2019.

[Cailliez et al. 2020 a] J. Cailliez, A. Weill-Duflos, **M. Boudaoud**, S. Régnier, D. S. Haliyo. Design and Control of a Large-Range Nil-Stiffness Electro-Magnetic Active Force Sensor. **IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, Paris, France, 2020.

[Cailliez et al. 2020 b] J. Cailliez, M. Boudaoud, S. Liang and S. Régnier. Robust hybrid control of an atomic force microscope for the characterization of interaction forces region at the nanoscale., **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2020.

[Liang et al. 2020] S. Liang, M. Boudaoud, P. Morin, J. Cailliez, B. Cagneau, W. Rong, S. Régnier. Model predictive control with obstacle avoidance for inertia actuated AFM probes inside a scanning electron microscope, vol. 6, no. 2, pp. 382-388, **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2020.

[Oubellil et al. 2019] R. Oubellil, A. Voda, M. Boudaoud and S. Régnier. Mixed Stepping / Scanning Mode Control of Stick-Slip SEM-integrated Nano-robotic Systems . **Sensors and Actuators A: Physical**, 285, 258-268, 2019.

[Rauch et al. 2018] Jean-Yves Rauch, Olivier Lehmann, Patrick Rougeot, Joel Abadie, and Joel Agnus. Smallest microhouse in the world, assembled on the facet of an optical fiber by origami and welded in the  $\mu$ Robotex nanofactory featured. **Journal of Vacuum Science & Technology A**. vol 35, issue 4, 2018.

[Shi et al. 2016] C.Shi, D.K.Luu, Q.Yang, J.Liu, J.Chen, C.Ru, S.Xie, J.Luo, J.Ge, and Y. Sun, "Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes," **Microsystems & Nanoengineering**, vol. 2, p. 16024, 2016.

[Xie et al. 2011] Hui Xie and Stéphane Régnier. Development of a Flexible Robotic System for Multiscale Applications of Micro/Nanoscale Manipulation and Assembly. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol 16, 266-276, 2011.