Avis de Soutenance

Madame Imane FERRADJ

Robotique et automatique (AM)

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés
Modélisation, commande et optimisation d'actionneurs électroactifs pour la robotique continuum : application au développement d'un robot continuum miniature pour la télé-cystoscopie

Travaux dirigés par Monsieur Nazih MECHBAL

Soutenance prévue le ***jeudi 26 novembre 2026*** à 10h00
Lieu : 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France
Salle : Amphi Esquillan

Composition du jury proposé

Mme Ingrid GRAZ	Professeur associé	Johannes Kepler Universität Linz	Rapporteure
M. Faïz BEN AMAR	Professeur des universités	Sorbonne Université – ISIR	Rapporteur
M. Micky RAKOTONDRABE	Professeur	Laboratoire Génie de Production University of Technology Tarbes Occitanie Pyrénées (UTTOP)	Examinateur
M. Nazih MECHBAL	Professeur des universités	Arts et Métiers	Directeur de thèse
M. Eric MONTEIRO	Maître de conférences	Arts et Métiers	Co-encadrant de thèse
M. Sébastien ROLAND	Maître de conférences	Arts et Métiers	Co-encadrant de thèse

Mots-clés : Robotique continue, Polymère électroactif, P(VDF–TrFE–CTFE), Télé-cystoscopie, Compensation d'hystérésis, Poutre de Cosserat

Résumé :

La cystoscopie flexible est indispensable au suivi du cancer de la vessie, mais la dextérité distale limitée des instruments conventionnels peut laisser certaines zones de la paroi vésicale insuffisamment inspectées. Cette thèse développe une démarche multi-échelle pour un télé-cystoscope continuum miniature actionné par le polymère ferroélectrique relaxeur P(VDF–TrFE–CTFE). À l'échelle du matériau, une loi constitutive cohérente en signe sépare les contributions piézoélectrique résiduelle, électrostrictive et de Maxwell, et établit une relation matériau–courbure transférable. À l'échelle de l'actionneur, la théorie classique des stratifiés est couplée à une poutre de Cosserat géométriquement exacte afin de conserver la morphologie initiale courbe mesurée, la courbure variable et la raideur, tandis que l'effort de blocage est prédit sous charge. Une validation expérimentale sur des éprouvettes fabriquées indépendamment confirme la capacité du modèle à reproduire la réponse de l'actionneur lors de sollicitations à basse fréquence. Un modèle de Prandtl–Ishlinskii généralisé, informé par la physique, relie les paramètres de l'enveloppe empirique aux grandeurs électriques tout en restant analytiquement inversible. Deux voies de compensation sont étudiées : une inversion de l'état électrique suivie d'une commande PID ou prédictive, et une inversion directe de l'hystérésis quadratique associée à un retour de courbure sans mesure de courant. Les essais matériel-dans-la-boucle sur le modèle compact identifié montrent une amélioration substantielle du suivi de courbure grâce à la stratégie de compensation inverse, tandis que des essais physiques sans compensation quantifient la référence à corriger. Une étude multicouche sous contraintes de fabrication fournit ensuite les architectures transférées à l'échelle du robot. Enfin, le modèle spatial de Cosserat est étendu à un robot tubulaire multi-section, conique et à routage hélicoïdal, intégrant des canaux fonctionnels. Une optimisation hiérarchique évalue l'espace de travail, la couverture de la vessie et l'orientation de la caméra, tandis que des formulations prédictives centralisée et distribuée fournissent un cadre extensible pour la coordination des différentes sections. L'ensemble constitue une chaîne traçable allant du comportement du matériau à la compensation de l'actionneur et à la conception du robot orientée vers la tâche. La fabrication du prototype tubulaire complet, la validation avec contact et la commande distribuée expérimentale constituent les principales perspectives de transfert clinique.

Summary:

Flexible cystoscopy remains essential for bladder-cancer surveillance, yet conventional instruments provide limited distal dexterity and can leave portions of the bladder wall insufficiently inspected. This thesis develops a multiscale framework for a miniature continuum telecystoscope actuated by relaxor ferroelectric P(VDF–TrFE–CTFE). At the material scale, a sign-consistent constitutive law separates residual piezoelectric, electrostrictive, and Maxwell contributions and establishes a transferable material-to-curvature description. At the actuator scale, Classical Laminate Theory is coupled to a geometrically exact Cosserat rod so that the measured precurved morphology, variable curvature, and stiffness are retained, while blocking force is predicted under loaded conditions. Experimental validation on independently fabricated specimens confirms the ability of the model to reproduce the actuator response over low-frequency cycles. A physics-informed generalized Prandtl–Ishlinskii model maps empirical envelope parameters to electrical quantities while remaining analytically invertible. Two compensation routes are studied: an electrical-state inverse followed by PID or model-predictive control, and a current-free squared-hysteresis inverse combined with curvature feedback. Hardware-in-the-loop tests on the identified compact plant show a substantial improvement in curvature tracking with the inverse compensation strategy, while physical uncompensated tests quantify the baseline that the compensation must correct. A fabrication-constrained multilayer study then transfers actuator candidates to the robot scale. Finally, the spatial Cosserat formulation is extended to a tapered, helically routed, multisection tubular robot with functional lumens. A hierarchical optimization evaluates workspace, bladder coverage, and camera orientation, while centralized and distributed predictive-control formulations provide a scalable framework for multisection coordination. The result links material behavior, actuator compensation, and task-oriented robot design; fabrication of the complete tubular prototype, contact-aware validation, and experimental distributed control remain the principal steps toward clinical translation.