

Sujet de thèse - campagne 2021

Laboratoire : ISIR Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

Etablissement de rattachement : Sorbonne Université

Titre de la thèse : Conception et commande d'un robot manipulateur souple pour la cueillette

Directeur de thèse : Faïz Ben Amar (PU),

Mail de contact : amar@isir.upmc.fr,

Nombre de doctorants encadrés : 1 à 100% et 3 à 50%

Codirection éventuelle : Jérôme Szewczyk (PU), sz@isir.upmc.fr

Collaborations dans le cadre de la thèse : Muséum National d'Histoire Naturelle

Le sujet peut-il être publié sur le site web de l'ED SMAER : oui

Résumé du sujet :

La thèse a pour but le développement d'un manipulateur souple type trompe pour la saisie d'objet fragile tel qu'un fruit. Cet objet robotique permettrait d'affronter trois problématiques de recherche, de conception, de modélisation-commande, et enfin d'apprentissage machine, qui dans un monde idéal, doivent être abordées d'une façon conjointe et intégrée, appelée en anglais « hardware-software co-design ». La conception s'appuiera a priori sur une structure déformable sans articulation et avec une transmission par câbles. On étudiera en particulier le routage des câbles, tels que les routages hélicoïdal et/ou interne et leurs influences notamment sur l'espace de travail du manipulateur et la répétabilité. La modélisation-commande cherchera à trouver un bon compromis entre fidélité du modèle et efficacité en temps calcul. Pour cela l'utilisation de modèle réduit de corps déformable (modèle de poutre de Cosserat ou réduction d'un modèle éléments-finis), alliée à la commande prédictive basée modèle MPC, est une solution pertinente capable de prendre en compte le sous-actionnement, la redondance cinématique et les contraintes physiques tels que les limitations des actionneurs. Enfin l'apprentissage à partir de données réelles et/ou simulées est une voie qu'on cherchera également à explorer car elle est plus robuste pour les systèmes qui sont difficiles à modéliser et qui présente un nombre important de variables, tel qu'un objet déformable redondant en interaction multiple avec l'environnement.

Sujet développé

Contexte

Dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique et de convergence technologique inédit (géolocalisation, intelligence artificielle, énergie...), l'agriculture se réinvente pour produire mieux, dans le respect de l'environnement et de la santé humaine. La robotique agricole est l'un des leviers de cette transformation. Elle constitue une solution prometteuse pour répondre aux enjeux environnementaux et sanitaires, qui sont posés actuellement en France et ailleurs dans tous les pays développés. L'urgence climatique imposera une réduction de plus en plus forte de l'utilisation des intrants (produits phytosanitaires, eau, ...) et des énergies fossiles utilisées pour le fonctionnement des machines et des équipements agricoles. Par ailleurs, la filière agricole souffre d'un manque d'attractivité et d'une image négative chez beaucoup de jeunes (ruralité, tâche répétitive, épuisement, pauvreté, isolement, ...). La numérisation et la robotisation permettra la valorisation de ce métier par l'ajout d'une plus grande valeur ajoutée apportée par l'agriculteur, et le déchargera des tâches répétitives et fatigantes telles que le désherbage, le portage, la cueillette et l'entretien régulier des cultures. Les filières agricoles qui sont les plus ouvertes aujourd'hui à une robotisation de leur production, sont le maraîchage (sous serre ou pas), la viticulture et l'élevage. On commence depuis peu à voir apparaître des grandes machines robotisées utilisées dans les filières « grandes cultures » et notamment céréalières, qui anticipent les futures évolutions restrictives de la réglementation sur l'utilisation des produits phytosanitaires.

La principale difficulté scientifique posée par les applications de robotique agricole réside dans le fait que le robot évolue dans un milieu ouvert et non-structuré. Construire un modèle de l'environnement (géométrie, physique du sol, obstacle, luminosité, saisonnalité, croissance et variabilité des plantes, ...) pourrait être un objectif quasi-impossible à atteindre. C'est pourquoi on se limitera dans ce projet à des cultures en rang disposées sur des sols plats, horizontaux ou en pente, tels que rencontrés en maraîchage ou en viticulture. Ces deux types de cultures plus ou moins structurés peuvent être alors modélisés.

Le manipulateur souple

L'application sur laquelle nous souhaitons nous focaliser est la cueillette de fruits/légumes par le biais d'un manipulateur souple, de la forme d'une trompe flexible et sans articulation. Celle-ci servira à la fois de positionneur et de préhenseur. La robotique souple constitue aujourd'hui un paradigme en rupture avec la robotique classique et industrielle, elle ouvre la porte à une robotique compliant et interactive avec l'humain, mais surtout elle permettrait de garantir dans notre application particulière, la sécurité des humains éventuellement présents dans l'espace de travail du robot, mais aussi l'intégrité de l'objet saisi, particulièrement fragile. Celle-ci est assurée par une prise répartie sur une surface de contact importante et grâce à un contrôle de l'interaction manipulateur/objet. On se concentrera dans un premier temps sur des objets axisymétriques tels que des courgettes ou des poivrons.

Le manipulateur recherché sera embarqué par la suite sur une base mobile tout terrain auto-guidée pour suivre des rangs de cultures. Les problématiques de guidage et de commande de robots mobiles tout terrain ont été abordées ces dernières années dans plusieurs travaux de thèse réalisés à l'ISIR [1]. L'ISIR a également un savoir-faire dans la conception mécatronique des robots compliant et adaptatifs, tel que les robots à roues et à pattes, le Hylos ou le Complios à actionneurs série-élastiques [2], ou encore les structures intelligentes à actionnement réparti pour l'endoscopie ou le cathétérisme [3][4]. Ces recherches ouvriront également des échanges

intéressants avec les biologistes du Muséum National d'Histoire Naturelle qui étudient la manipulation d'objets chez les éléphants par leur trompe et qui comparent les stratégies de saisie entre les différentes espèces. La trompe d'éléphant est un effecteur extraordinaire capable de saisir de la nourriture, la manipuler, l'arracher, saisir un tronc d'arbre tout comme ramasser un petit objet de la taille d'une cacahuète.

La thèse comporte trois axes de développement scientifique :

- 1) Conception d'un manipulateur souple
- 2) Commande basée modèle du manipulateur souple
- 3) Commande par apprentissage de tâche de saisie

Conception d'un manipulateur souple

Afin de garantir l'intégrité des plantes et des fruits lors de leur saisie, l'utilisation d'un manipulateur souple et compliant s'impose. Beaucoup de robots souples existants utilisent soit des matériaux électro-actifs, soit l'énergie pneumatique, et sont plutôt adaptées à des échelles centimétriques ou sub-centimétriques et sont contrôlables en tout ou rien. Le défi posé par ce projet est la conception d'un robot souple, d'environ un mètre et capable d'atteindre plusieurs configurations stables d'une façon continue. On cherchera à concevoir un manipulateur continu qui a l'apparence d'une trompe. Il sera constitué d'un matériau souple (si possible imprimé), a priori sans articulation, et actionnée par des câbles. On cherchera à augmenter l'espace de travail du manipulateur tout en minimisant les déformations locales en jouant sur le routage des câbles, tels que le routage hélicoïdal [5][6] et/ou le routage interne [7]. Ce dernier est particulièrement intéressant car il découple les déformations des différentes sections du manipulateur et réduit drastiquement la course des câbles des sections distales.

Dans un premier temps, une solution à 3 segments et 6 câbles peut suffire pour la saisie d'objet en environnement peu contraint. Dans un second temps, augmenter le nombre de segment et de câbles accroîtra la redondance cinématique de la trompe, ce qui permettra d'optimiser la prise et/ou d'éviter d'éventuels obstacles dans l'environnement.

Commande basée modèle de robot souple

La commande de ce type de robot peut être résolue par des approches classiques de commandes optimales sous contraintes. La difficulté scientifique sera d'incorporer un modèle de déformation non linéaire en grand déplacement avec une gestion des contacts unilatéraux (robot-objet et auto-collision robot-robot). Le modèle de poutres de Cosserat [8] [9] ou la réduction de modèle éléments-finis [7] sont deux voies plausibles pour pouvoir répondre aux contraintes de calcul temps-réel du processus de commande. L'inconvénient de ce type de méthodes est la nécessité d'une bonne connaissance des modèles du robot, de l'objet à saisir et des propriétés du contact entre ces deux-là. Elle reste néanmoins formelle, générique et transposable à des situations plus ou moins similaires. Cette commande nécessiterait tout de même de développer des modules d'estimation : 1) estimation de l'état du robot, 2) perception de l'environnement, identification et localisation de l'objet, et 3) localisation des contacts robot-objet.

Commande par apprentissage de tâche de saisie

La seconde approche, qui permettrait de s'affranchir de toutes ces difficultés de modélisation, de calibration et d'identification paramétrique qui vont avec, tenterait d'explorer des méthodes d'apprentissage, supervisé ou par renforcement [10]. L'approche visera tout d'abord à générer

des comportements de saisie par une approche mixte entre exploration en simulation et test en réalité. Chaque saisie d'un objet à une position particulière nécessitera donc un apprentissage dédié. La répétition de tels apprentissages permettra de générer une base d'exemples suffisante pour entraîner un système d'apprentissage profond qui associera un comportement adapté à la perception visuelle du robot. La diversité des solutions ainsi trouvées permet d'identifier les comportements possibles et de disposer de nombreuses alternatives pour atteindre un même but. Cet apprentissage étant réalisé en simulation, la disponibilité des différentes alternatives augmente les chances de trouver des solutions transférables et efficaces sur le système réel [11]. Plusieurs approches seront comparées, de la conception experte en s'appuyant sur des modèles mécaniques de la saisie à l'apprentissage de ces descripteurs.

Collaborations :

- Muséum Nationale d'Histoire Naturelle
- INRAE et partenaires de l'association ROBAGRI

Références

- [1] M Fnadi, W Du, F Plumet, F Benamar, Constrained Model Predictive Control for dynamic path tracking of a bi-steerable rover on slippery grounds, *Control Engineering Practice* 107, 104693.
- [2] A Bouton, C Grand, F Benamar, Design and Control of a Compliant Wheel-on-Leg Rover which Conforms to Uneven Terrain, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25 (5), 2354-2363, 2020.
- [3] J. Szewczyk, E. Marchandise, P. Flaud, L. Royon and R. Blanc, Active Catheters for Neuroradiology, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol 23(1), pp 105-115, 2011.
- [4] J. Szewczyk, Process for Manufacturing a Flexible Elongate Structure Having an Orientable End. No WO/2011/116961, 2011.
- [5] S. Kanti Mahapatra, K.P. Ashwin and A. Ghosal, 3D printed cable-driven continuum robots with generally routed cables : modeling and experiments, arXiv:2003.04593v1, 2020
- [6] J. Starke, E. Amanov, M. T. Chikhaoui, and J. Burgner-Kahrs, On the Merits of Helical Tendon Routing in Continuum Robots, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 24–28, 2017, Vancouver, BC, Canada
- [7] T. Morales Bieze, A. Kruszewski, B. Carrez and Ch. Duriez, Design, implementation and control of a deformable manipulator robot based on a compliant spine, *The International Journal of Robotics Research*, SAGE Publications, 2020, 10.1177
- [8] D. Caleb Rucker and R. J. Webster, Statics and Dynamics of Continuum Robots With General Tendon Routing and External Loading, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 27, NO. 6, December 2011
- [9] B. A. Jones, R. L. Gray, and K. Turlapati, Three Dimensional Statics for Continuum Robotics, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15, 2009 St. Louis, USA
- [10] A. Rajeswaran, V. Kumar, A. Gupta, G. Vezzani, J. Schulman, E. Todorov, S. Levine, Learning Complex Dexterous Manipulation with Deep Reinforcement Learning and Demonstrations, arXiv:1709.10087v2 [cs.LG] 26 Jun 2018
- [11] S. Kim, A. Coninx, A., and S. Doncieux (2021). From exploration to control: learning object manipulation skills through novelty search and local adaptation. *Robotics and Autonomous Systems*, 136, 103710.