

Sujet de Thèse:

Prise de décision distribuée en robotique en essaim à l'aide d'équations de réaction-diffusion

Encadrement:

- Nicolas Bredeche (Professeur, ISIR, Sorbonne Univ., Paris, France) : directeur et encadrant (50%)
- Nathanaël Aubert-Kato (Lecturer HDR (マル合), Ochanomizu Univ., Tokyo, Japan) : encadrant (50%)

Dans un essaim de robots, chaque unité ne peut communiquer qu'avec ses voisins immédiats. Cela pose un défi unique pour l'estimation d'information concernant l'ensemble de l'essaim, comme l'estimation collective du nombre de robots présents, la séparation en plusieurs groupes de tailles égales, la détermination du centre de l'essaim, etc. Le problème est d'obtenir à l'échelle microscopique du robot des informations qui caractérisent l'essaim à l'échelle macroscopique (forme, structure, etc.).

Pour cela nous proposons d'exploiter les outils de la physique des systèmes complexes, dont nous souhaitons étudier l'implémentation dans un graphe discret dynamique (le voisinage de chaque robot change au cours du temps). Par exemple, l'équation de diffusion permet de récupérer une information globale depuis les interactions locales entre robots en considérant la propagation d'une information ("concentration"). Jusqu'à présent les travaux explorant l'intersection entre physique et robotique en essaim sont prometteurs mais rares (simulation du processus morphogénèse avec résistance aux perturbations ponctuelles [1]) car ils nécessitent une compétence à la fois en physique et en robotique - ce que notre co-encadrement permet.

En effet, ces approches sont très sensibles aux erreurs de communication présentes dans les systèmes robotiques distribués. Ces erreurs peuvent être corrigées par l'utilisation d'équations de réaction-diffusion ou de procédés de séparation de phase tels que l'équation de Cahn-Hilliard, plus robustes à la perte de "matière" entraînés par ces problèmes de communication. L'objectif de cette thèse est d'étudier les opérateurs de diffusion, puis de concevoir et d'implémenter ces opérateurs sur robots réels. Il s'agit donc d'implémenter un processus initialement continu dans un substrat discret (la population de robots), qui soit robuste aux limites en terme de communication (distance limitée, perturbations, etc.) et à la nature dynamique d'un groupe d'agents mobiles (voisinage dynamique au cours du temps).

La thèse impliquera à la fois des aspects pratiques et théoriques, avec des expérimentations réelles sur un essaim de Pogobots et une analyse numérique des propriétés des algorithmes proposés. La partie expérimentale du travail sera validée sur un essaim de Pogobots, de petits robots (6 cm de diamètre) conçus par l'ISIR et capables de communiquer les uns avec les autres dans un rayon d'environ 8 cm. L'ISIR dispose de 100+ pogobots fonctionnels utilisables pour la thèse. L'Aubert-Kato Lab dispose de 5 pogobots prêtés par l'ISIR permettant de tester des modèles en situation réelles. Les études théoriques seront menées avec un modèle numérique simulant le degré de fluidité du graphe de communication pour étudier l'impact du rapport entre vitesse de diffusion des messages et nombre de changements de voisins.

La thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration informelle de longue date entre l'ISIR à Sorbonne Université et l'Aubert-Kato Lab à Ochanomizu University autour des questions de programmation moléculaire pour la robotique en essaim. En particulier, les encadrants ont précédemment obtenu des résultats concernant le contrôle de la formation de structure pour des essaims à l'échelle moléculaire en exploitant la réaction-diffusion pour transmettre un signal à travers l'environnement [2]. Plus récemment, cette collaboration s'est concentrée sur l'approche inverse, en proposant une méthode pour simuler l'équation de la chaleur dans un essaim de robots afin de déterminer automatiquement la forme de l'arène dans laquelle ils se trouve (carré, ronde, en forme d'anneau, etc.) [3]. L'ISIR intervient principalement sur les compétences robotique et optimisation et l'Aubert-Kato lab sur les questions de programmation moléculaire et de calcul non-conventionnel. Les visites fréquentes entre les deux laboratoires ainsi que les réunions en visio que nous faisons régulièrement permettront de garantir un co-encadrement efficace tout au long de la thèse.

Le plan prospectif de thèse est le suivant:

- 1ère année en France: prise en main de la plateforme expérimentale, implémentation d'équations de diffusion simple pour l'estimation distribuée robuste du nombre de robots dans un essaim dynamique. Etude du modèle Cahn-Hilliard pour calcul robuste avec perte de paquets et communication asymétrique.
- 2ème année au Japon: étude numérique et théorique des processus de réaction-diffusion sur un graphe dynamique (ie. au delà de la loi de Fick's et Cahn-Hilliard). Développement d'une approche basée sur l'optimisation de réseaux de réaction implémentés sur chaque robot. L'objectif est de découvrir automatiquement des opérateurs de réaction-diffusion permettant d'accomplir des tâches collectives.
- 3ème année en France: implémentation sur essaim de cent robots des opérateurs précédemment conçus (de manière *ad hoc* ou à travers un processus d'optimisation) et validation expérimentale en conditions réelles (essaim de 100+ robots). Rédaction.

Pour compléter le financement éventuel de la thèse, nous déposerons plusieurs demandes de financement, y compris PHC Sakura (séjours courts) et bourse JSPS (séjour de max. 12 mois) pour soutenir la mobilité du / de la doctorant/e.

Le/la doctorant/e devra avoir une solide expérience en informatique et en robotique, avec un intérêt pour les algorithmes distribués, la robotique en essaim, et les systèmes dynamiques. Une formation en physique des systèmes complexes (en particulier sur les équations de diffusion et de réaction-diffusion) est souhaitée. Une compétence en Python et C est indispensable.

Références

- [1] Morphogenesis in robot swarms. I Slavkov, D Carrillo-Zapata, N Carranza, X Diego, F Jansson, J Kaandorp, S Hauert, and J Sharpe. Science Robotics, 2018
- [2] Exploring self-assembling behaviors in a swarm of bio-micro-robots using surrogate-assisted map-elites. L Cazenille, N Bredeche, N Aubert-Kato (2019, December). Proc. of the 2019 IEEE SSCI
- [3] Hearing the shape of an arena with spectral swarm robotics. L Cazenille, N Lobato-Dauzier, A Loi, M Ito, O Marchal, N Aubert-Kato, N Bredeche and AJ Genot. arXiv preprint. 2024.