

Méthodes distribuées pour l'auto-organisation de systèmes d'agents

Louis Duvivier

24 octobre 2025

Le stage porte sur l'auto-organisation d'un groupe d'agents par des méthodes distribuées. Le contexte est un ensemble de capteurs / actionneurs robotiques (drone aérien, terrestre, ou naval) communiquant par le biais d'un réseau sans fil dont la structure est dynamique.

1 Contexte et état de l'art

Le développement de robots autonomes type drones pose le problème de leur capacité à opérer en groupe de manière indépendante. De nombreuses applications existent pour les réseaux de capteurs sans fil : dans la manutention, dans la surveillance et le secours dans des environnements difficiles d'accès ou dangereux, dans la production agricole ou industrielle [5]. Dans le cas de robots, en plus d'être dotés de capteurs, ils peuvent agir sur leur environnement, ce qui démultiplie les cas d'usage [6, 1]

Néanmoins, le fonctionnement autonome du groupe nécessite d'être capable de gérer non seulement chaque agent individuellement, mais leur collaboration en réseau. Il faut donc pouvoir déployer et maintenir le réseau de communication entre les agents de manière dynamique, en s'assurant que la structure du réseau est bien adaptée aux tâches à réaliser, et en respectant les contraintes comme la portée de communication [4]. Les réseaux de capteurs / actionneurs sont le plus souvent reliés par un réseau dont la structure est contrainte soit au niveau physique (communication filaire), soit au niveau logique (par exemple en imposant des rôles de leader / follower à chaque agent). Nous nous intéressons au contraire au cas de structures non-contraintes, de manière à ce qu'elles soient capables de s'adapter aux tâches à réaliser. Les agents peuvent être amenés à jouer des rôles différents dans le système du fait de leur positionnement, mais ces rôles ne sont pas fixés a priori.

Un autre défi est que cette adaptation de la structure doit se faire de manière distribuée. C'est une contrainte importante à la fois pour des raisons de passage à l'échelle et de robustesse du système. La gestion centralisée d'un système comportant un grand nombre d'agents implique une trop grande quantité de communications. Elle fragilise aussi le système en introduisant des points sensibles dont la panne est critique pour l'ensemble du groupe. Des algorithmes ont été proposés pour diminuer le nombre de connexions moyen par noeud dans un graphe de manière distribué sans rompre la connectivité en utilisant des méthodes spectrales [3, 2]. Un algorithme a également été récemment présenté permettant d'identifier les arêtes critiques (*i.e.* celles dont la suppression entraînerait la déconnexion du réseau) de manière distribué [7].

2 Objectifs du stage

Un premier objectif du stage serait de développer un algorithme permettant de choisir au sein d'un groupe d'agents reliés en réseau une communication à abandonner, non pas pour diminuer le nombre de connexions moyen par noeud, mais pour permettre aux noeuds de modifier leur configuration spatiale. En effet, maintenir une communication entre deux agents implique qu'ils restent à portée l'un de l'autre, c'est donc une contrainte sur leurs possibilités de déplacement. L'algorithme d'identification des arêtes critiques permet de tester si une arête doit être nécessairement conservée, pour assurer la connectivité du réseau. Mais même dans le cas où une arête n'est pas critique, sa suppression nécessite tout de même de la coordination, car si plusieurs noeuds décident indépendamment les uns des autres de supprimer des communications, il est possible que le réseau soit déconnecté, alors même qu'aucune des arêtes abandonnées n'était critique.

Un deuxième objectif, complémentaire du premier, est de développer un algorithme permettant d'établir de nouvelles communications. Cela peut être pour doubler des arêtes identifiées comme critiques, et donc renforcer la robustesse du réseau, ou bien pour permettre de supprimer une arête critique. Mais l'établissement de nouvelles communications nécessite que les noeuds soient à portée, et peut donc impliquer des déplacements : il faut donc coupler les décisions relatives aux communications entre agents et à leurs déplacements.

3 Réalisations et perspectives

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un environnement numérique permettant de visualiser le déploiement des agents mobiles et l'évolution de leur organisation. Le travail réalisé au cours du stage pourra donc naturellement s'intégrer à cet environnement, permettant ainsi de simuler différentes situations et de tester les méthodes proposées.

À court terme, cet environnement nous permet de disposer d'un outil interactif, facile à comprendre et à manipuler, qui peut servir de support pour exposer les résultats de notre travail à la fois dans un contexte académique et à l'occasion de présentation à un public non-scientifique, à la fête de la science ou lors de visite du laboratoire par des étudiants ou des lycéens.

À plus long terme, notre perspective est d'utiliser ces méthodes pour améliorer la résilience du groupe de robots autonomes (qu'ils soient terrestres, aériens ou nautiques) et leur capacité à effectuer des tâches d'observation ou d'intervention, par exemple dans la surveillance de milieux dangereux (feu de forêt, zone polluée), le secours dans des zones difficilement accessibles ou le rétablissement de réseaux de communications après des catastrophes naturelles.

4 Candidat recherché

Ce stage s'adresse à des étudiants en informatique de niveau M2, intéressés par la recherche. La possibilité de poursuivre ce travail par une thèse pourra être envisagée, si le candidat est intéressé.

5 Financement

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une réponse commune LISTIC/LCIS à l'appel à chaire MIAI 2025-2026 portant sur l'apprentissage distribué au sein d'un groupe d'agents mobiles, ainsi qu'à l'émergence et à l'apprentissage (adaptation) d'organisations au sein de telles sociétés d'agents mobiles.

Références

- [1] Kurt Ahmet, Uluagac A. Selcuk, Kemal Akkaya, and Nico Saputro. Distributed Connectivity Maintenance in Swarm of Drones During Post-Disaster Transportation Applications, 2021.
- [2] Made Widhi Surya Atman and Azwirman Gusrialdi. Distributed Algorithms for Verifying and Ensuring Strong Connectivity of Directed Networks. In *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 4798–4803, Austin, TX, USA, December 2021. IEEE.
- [3] Azwirman Gusrialdi. Connectivity-preserving distributed algorithms for removing links in directed networks. *Network Science*, 10(3) :215–233, September 2022.
- [4] Sunan Huang, Wenbing Cui, Jiawei Cao, and Rodney Swee Huat Teo. Self-organizing Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles. In *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, pages 5287–5291, October 2019. ISSN : 2577-1647.
- [5] Dionisis Kandris, Christos Nakas, Dimitrios Vomvas, and Grigorios Koulouras. Applications of Wireless Sensor Networks : An Up-to-Date Survey. *Applied System Innovation*, 3(1) :14, March 2020. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [6] Ban-Sok Shin, Dhruv Patel, Luis Wientgens, Dmitriy Shutin, and Armin Dekorsy. Multi-Agent 3D Seismic Exploration Using Adapt-then-Combine Full Waveform Inversion in a hardware-in-the-loop System. In *ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 12911–12915, April 2024. ISSN : 2379-190X.
- [7] Deepalakshmi Babu Venkateswaran, Zhihua Qu, and Azwirman Gusrialdi. A Distributed Method for Detecting Critical Edges and Increasing Edge Connectivity in Undirected Networks. In *2024 IEEE 63rd Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6951–6956, Milan, Italy, December 2024. IEEE.