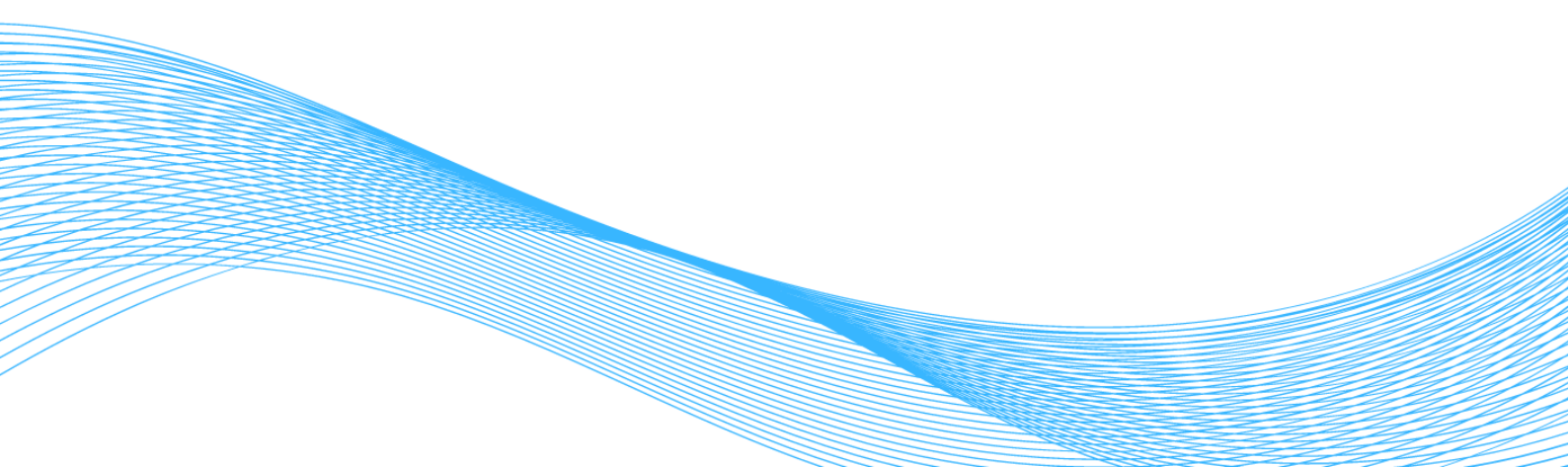

MULTI-ROBOT COORDINATION

AUTONOMOUS EXPLORATION OF GALLERY NETWORKS

Engineering Graduation Project
Seatech 3A - MOCA

Auteur :
Fabien MATHÉ

Enseignant :
M. Mehmet ERSOY

A decorative graphic at the bottom of the page consisting of many thin, overlapping blue lines that form a wavy, undulating shape across the width of the page.

Abstract

Mots-clés:

MOTS-CLÉS

Abstract

Keywords:

KEYWORDS

Remerciements

Contents

Résumé	1
Remerciements	2
Introduction	4
I State of the art	5
I.1 État de l'Art : Exploration Multi-Robot de Cavités	5
I.2 État de l'Art des Techniques de SLAM	5
I.3 État de l'Art des Méthodes de Communication Inter-Robot dans un Environnement de Cavité	5
II Partie 2	8
III Partie 3	9
III.1 Cellular Automata	9
IV Partie 4	10
V Partie 5	11
Conclusion	12
Perspectives	13
References	14
Annexes	15

Introduction

Definition d'un robot, Spécification du type étudier dans ce rapport, les défis de la planification de trajectoire, l'évitement d'obstacle (petit point sur l'optimisation de trajectoire en milieu ouvert pour de la recherche de victime par exemple) Les contraintes extérieures et celle du robot lui même.

L'un des ouvrages de référence utilisés dans ce travail est le livre de S. M. LaValle, *Planning Algorithms* [1], que je remercie particulièrement pour son engagement à rendre ses travaux accessibles au public (<https://lavalle.pl/>).

I State of the art

I.1 État de l'Art : Exploration Multi-Robot de Cavités

L'exploration des cavités est essentielle pour la cartographie souterraine, la recherche scientifique et les interventions d'urgence, tout en posant des défis uniques pour la robotique autonome.[2] Leur exploration multi-robot est un domaine de recherche en plein essor dans le domaine de la robotique, avec des applications dans des environnements variés tels que l'exploration spatiale, l'exploration de grottes, les missions de sauvetage dans des environnements urbains sinistrés, ou encore l'extraction minière.[3, 4] Ces environnements, souvent complexes et dynamiques, présentent de nombreux défis pour la planification de mission, notamment des obstacles imprévisibles, des zones inaccessibles pour les robots mobiles, et l'absence de signal GPS. De ce fait, l'exploration multi-robot permet de tirer parti de la coopération entre robots pour surmonter ces difficultés.

I.1.1 Défis dans l'exploration multi-robot de cavités

L'exploration de cavités avec plusieurs robots implique plusieurs défis techniques. En particulier, la gestion de la coopération entre robots et la gestion de l'information dans des environnements complexes sont deux aspects fondamentaux de ce type de mission. Les défis peuvent être classés en plusieurs catégories :

I.2 État de l'Art des Techniques de SLAM

Le Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) est un problème clé en robotique qui permet à un robot de localiser sa position tout en construisant une carte de son environnement. Plusieurs techniques ont été développées pour résoudre ce problème, telles que le EKF-SLAM, qui utilise un filtre de Kalman pour estimer la localisation et la carte, mais souffre de limitations en termes de scalabilité dans de grands environnements. Le FastSLAM, basé sur un filtre de particules, améliore cette scalabilité en traitant les caractéristiques du monde à l'aide de multiples hypothèses. Les approches basées sur les graphes, comme le Graph-SLAM, sont efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation à grande échelle, bien qu'elles nécessitent une gestion complexe des données. Le SLAM visuel (V-SLAM) repose sur des caméras pour estimer la localisation et construire une carte, tandis que le SLAM LiDAR utilise des capteurs laser pour des mesures de profondeur précises, particulièrement efficaces pour des environnements extérieurs. Des variantes comme le SLAM dynamique gèrent les environnements avec des objets mobiles en excluant ces derniers des mises à jour de la carte. Ces méthodes varient en fonction des environnements, des ressources du robot et des contraintes en temps réel, avec pour objectif de maintenir une localisation et une cartographie précises dans des conditions dynamiques et complexes.

I.3 État de l'Art des Méthodes de Communication Inter-Robot dans un Environnement de Cavité

La communication inter-robot (CIR) dans un environnement de cavité est un défi majeur pour les systèmes multi-robots, en raison des conditions particulières que ces environnements présentent, telles que des espaces confinés, des obstacles physiques et des perturbations qui peuvent affecter les signaux de communication. Les méthodes de CIR peuvent être classées en différentes catégories selon la technologie utilisée et la stratégie de communication adoptée. Les approches classiques reposent principalement sur des réseaux sans fil, tels que la communication par radiofréquence (RF), qui est couramment utilisée pour des applications de communication à longue portée mais qui peut souffrir de limitations dans les cavités où les signaux sont atténués par des parois solides.

Dans ce contexte, des méthodes de communication ad hoc sont souvent employées, où les robots créent un réseau dynamique de relais pour échanger des informations. Une approche courante est l'utilisation de la *communication par maillage*, dans laquelle chaque robot agit comme un relais, permettant ainsi une couverture étendue et une transmission de données entre robots même lorsque les obstacles interfèrent avec les signaux directs. La *communication acoustique* ou *ultrasonique*, qui repose sur des ondes sonores, est une alternative viable dans les environnements de cavité, où elle peut transmettre des informations de manière robuste, notamment pour des distances plus courtes ou dans des environnements très confinés. De plus, la communication optique (par exemple, la *communication par lumière visible ou infrarouge*) devient de plus en plus populaire dans des applications de haute précision dans des cavités étroites, car elle est peu sensible aux interférences électromagnétiques et permet des transmissions rapides et sécurisées. Une autre stratégie consiste à utiliser des protocoles de communication coopérative, où les robots collaborent pour optimiser le flux d'informations. Des techniques de *routage adaptatif* et de *partitionnement dynamique de réseau* sont souvent utilisées pour gérer les obstacles et les interférences dans les réseaux multi-robots. Enfin, les méthodes de *communication opportuniste*, basées sur des échanges de données ponctuels lorsque la ligne de visée est dégagée, sont particulièrement adaptées aux environnements où la connectivité est intermittente et où les robots doivent s'organiser pour minimiser les interruptions dans le flux de données. L'un des principaux défis reste de maintenir une communication fiable et efficace, notamment en optimisant les stratégies de répartition de la bande passante, d'allocation des ressources et de gestion des interférences dans des espaces très contraints. Des approches récentes cherchent à intégrer des systèmes hybrides combinant ces technologies pour assurer une meilleure résilience face aux conditions environnementales changeantes et aux mouvements des robots.

1.3.1 Planification de chemin, de trajectoire et évitement d'obstacle

La planification de chemin pour un système mécatronique constitue le fondement de tous les systèmes mobiles autonomes, qu'il s'agisse de drones ou de bras de manutention et d'assemblage. Le principe de la planification de chemin ou de trajectoire est de déterminer une solution - un chemin ou une trajectoire - reliant un point de départ à un point cible.

La distinction entre planification de chemin et planification de trajectoire réside dans le fait qu'un chemin planifié n'est pas nécessairement réalisable par un robot. En effet, la planification de chemin ne prend pas toujours en compte la faisabilité physique ou cinématique pour un robot mobile.

L'évitement d'obstacles est une contrainte essentielle dans ces deux approches. Les obstacles définissent les zones inaccessibles, et comme nous le verrons par la suite, leur nature - mobile ou immobile - détermine en grande partie la méthode à employer pour résoudre le problème de planification.

Parmi les méthodes déterministe, on trouve une large variété de méthodes principalement basées sur trois approches différentes. Les approches par graphes, celle de décomposition cellulaire et enfin les celles utilisant des champs potentiels.[5, 6]

Les méthodes des graphes consistent à construire une carte des chemins empruntable en partant des obstacles de la scène. Parmi ces méthodes utilisant des graphes, on peut distinguer quatre types différents : Les graphes de visibilité[7], les diagrammes de Voronoï [8] ou encore la méthode des Silhouettes[6].

Les méthodes associées à la décomposition cellulaire consistent à diviser l'espace libre du robot en régions simples, appelées cellules, où il est facile de générer un chemin entre deux configurations. Un graphe représentant les relations d'adjacence entre les cellules est ensuite construit et exploré.[5, 9, 10, 11]

Une autre méthode repose sur une subdivision fine de l'espace afin de repérer les zones libres. La méthode des champs potentiels s'appuie sur cette idée en définissant des potentiels qui traduisent des forces d'attraction, dirigées vers les coordonnées cibles, et de répulsion, correspondant par exemple aux obstacles. Le chemin est ensuite déterminé en suivant l'opposé du gradient du potentiel total ainsi calculé.[5, 12]

Des approches alternatives ont été développées dans les années 1990 et 2000, notamment les méthodes stochastiques de planification de chemin RPP (*Random Path Planners*) et PRM (*Probabilistic Roadmap Planners*). Ces méthodes consistent à échantillonner l'espace de manière aléatoire afin de créer un graphe de chemins possibles (*roadmap*) dans cet espace.[13, 14, 15]

L'un des principaux atouts de cette méthode de planification de chemin est qu'elle ne dépend ni de la structure de l'espace, ni du nombre d'obstacles, ni de leur disposition. Une fois la *roadmap* créée, il suffit d'utiliser une méthode de recherche de chemin dans un graphe pour trouver le chemin menant au point objectif.[16]

II Partie 2

III Partie 3

III.1 Cellular Automata

A cellular automata is a grid of cells. Each cell can have different states given pre-defined rules. the concept was developped by Stanislaw Ulam and John von Neumann in the 40's. The most famous cellular automata, the one that democratize its usage was developped by Conway with the Conway's game of life. In this example, there was a set of 4 different rules that can be found here. The beautiful thing about it is the complexity that had been created using so simple rules. **Figure below shows some example**

With the starting configuration **FIGURE ...**, we have respectively at generation 87 and 263 the two following figures **FIGURE**

Programmers, computer scientists and mathematicians then start to make a census of all species they encounter. Example of patterns.

In our case, cellular automata is a computational tool for simulating phenomenon. Application were found in various domain from physics to biology. Lattice Gas Cellular Automata (LGCA) for instance are used to simulate gas fluid flows. the precursor of the lattice Boltzman Method (LBM)[17]

IV Partie 4

V Partie 5

Conclusion

Perspectives

References

- [1] S. M. LaValle, Planning Algorithms. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006, available at <http://planning.cs.uiuc.edu/>.
- [2] N. Geographic, "Greenland's secret caves: Inside the hidden world of ice," 2025, consulté le 10 janvier 2025. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/greenland-secret-caves-exploration>
- [3] H. t. Dang, "Underwater robots for karst and marine exploration : A study of redundant auvs," Ph.D. dissertation, 2021, thèse de doctorat dirigée par Lapierre, Lionel SYAM - Systèmes Automatiques et Micro-Électroniques Montpellier 2021. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2021MONT038>
- [4] P. Kambesis, "The importance of cave exploration to scientific research," Journal of Cave and Karst Studies, vol. 69, 04 2007.
- [5] L. Jean-Claude, Robot Motion Planning. Boston, MA: Springer US, 1991. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-4022-9>
- [6] B. Aneeta, S. Ekta, and D. Bhaskar, "Robot path planning using silhouette method," in 13th National Conference on Mechanisms and Machines, January 2008, pp. 12–13.
- [7] L.-P. Tomás and W. M. A., "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles," Communications of the ACM, 1979.
- [8] G. Santiago, M. Luis, A. Mohamed, and M. Fernando, "Path planning for mobile robot navigation using voronoi diagram and fast marching," in 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 2376–2381.
- [9] Z. David and L. Jean-Claude, "New heuristic algorithms for efficient hierarchical path planning," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, pp. 9–20, 1991. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:21438079>
- [10] K. K. and S. M., "An efficient motion-planning algorithm for a convex polygonal object in two-dimensional polygonal space," Discrete and Computational Geometry, vol. 5, no. 1, pp. 43–76, 1990. [Online]. Available: <http://eudml.org/doc/131106>
- [11] A. Francis, B. Jean-Daniel, and F. Bernard, "A practical exact motion planning algorithm for polygonal objects amidst polygonal obstacles," in Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, 1988, pp. 1656–1661. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37779065>
- [12] K. Y. and B. J., "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," in Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, 1991, pp. 1398–1404.
- [13] N. M. Amato and Y. Wu, "A randomized roadmap method for path and manipulation planning," in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 1996, pp. 113–120.
- [14] D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe, and S. Rock, "Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles," The International Journal of Robotics Research, vol. 21, no. 3, pp. 233–255, 2002.
- [15] C. Nissoux, T. Siméon, and J.-P. Laumond, "Visibility based probabilistic roadmaps," Advanced Robotics, vol. 13, no. 2, pp. 223–244, 1999.
- [16] A. Gasparetto, P. Boscariol, A. Lanzutti, and R. Vidoni, "Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview," Mechanisms and Machine Science, vol. 29, pp. 3–27, 03 2015.
- [17] S. Chen and G. D. Doolen, "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 30, pp. 329–364, Jan. 1998.

Annexes