

Navigation et contrôle multi-robots pour l'inspection acoustique de structures métalliques [R&D]

Projet de fin d'étude de :
Brandon Alves

Supervisé par :
Cédric Pradalier (GT Europe, CNRS), Olivier Simonin (INSA Lyon, CITI)

INSA Lyon, Laboratoire CITI, équipe CHROMA (INSA & INRIA)

23 juin 2023

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

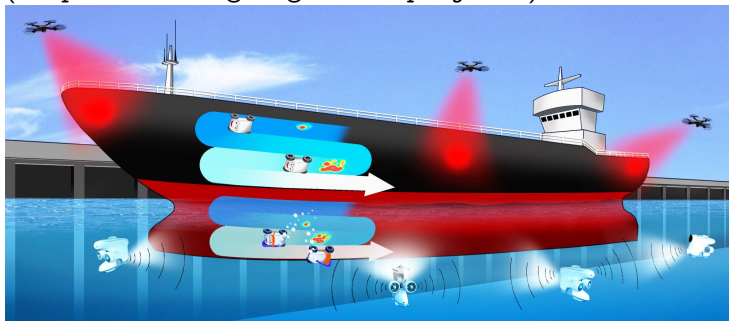
Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Introduction

Contexte

- CITI, équipe CHROMA,
- GT Europe, thèse de master,
- Projet européen BugWright2
(<https://www.bugwright2.eu/project/>).



Introduction

Définition du problème

- Inspection de structures métalliques
- Tomographie de la zone à inspecter
- Localiser des points de corrosion
- Ondes acoustiques (UGW)

Problématique

Définir des stratégies de navigation multi-robots pour optimiser l'acquisition de données permettant de réaliser la tomographie des structures métalliques.

Introduction

Aperçu des contributions

- Développement de stratégies de navigation multi-robots pour l'inspection acoustique de structures métalliques.
- Optimisation de l'acquisition de données pour la réalisation de la tomographie.
- Résolution des problèmes de coordination et de synchronisation entre les robots.
- Implémentation des méthodes de navigation dans un environnement de simulation.

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Étude bibliographique et état de l'art



Othmane-Latif Ouabi, Ayoub Ridani, Pascal Pomarede, Neil Zeghidour, Nico F. Declercq, Matthieu Geist, and Cédric Pradalier.

Combined grid and feature-based mapping of metal structures with ultrasonic guided waves.

In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5056–5062, 2022.



Peter Huthwaite and Francesco Simonetti.

High-resolution guided wave tomography.

Wave Motion, 50(5) :979–993, 2013.



Georges Chahine, Pete Schroeffer, Othmane-Latif Ouabi, and Cédric Pradalier.

A magnetic crawler system for autonomous long-range inspection and maintenance on large structures.

Sensors, 22(9), 2022.



Marcelo Couto, Cid Souza, and Pedro De Rezende.

Strategies for optimal placement of surveillance cameras in art galleries.

GraphiCon 2008 - International Conference on Computer Graphics and Vision, Proceedings, 01 2008.



Ayoub Ridani, Othmane-Latif Ouabi, Nico F. Declercq, and Cédric Pradalier.

On-plate autonomous exploration for an inspection robot using ultrasonic guided waves.

In *2021 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pages 1–6, 2021.



Muhammad Asif Arain, Erik Schaffernicht, Victor Hernandez Bennetts, and Achim J. Lilienthal.

The right direction to smell : Efficient sensor planning strategies for robot assisted gas tomography.

In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4275–4281, 2016.



Muhammad Asif Arain, Marcello Cirillo, Victor Hernandez Bennetts, Erik Schaffernicht, Marco Trincavelli, and Achim J. Lilienthal.

Efficient measurement planning for remote gas sensing with mobile robots.

In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3428–3434, 2015.

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Propositions scientifiques et techniques

Définitions préliminaires

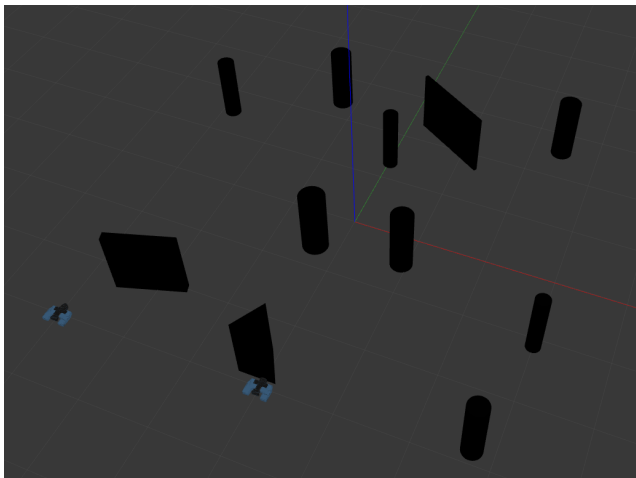
Hypothèses

- Environnement :
 - espace 2D, borné et de taille connue,
 - obstacles localisés,
 - zones de corrosion non localisées.
- Robots :
 - robots à 2 roues,
 - pose (x, y, θ) connue,
 - coût de rotation cr et coût de translation ct connus.
 - Nombre de robots ≥ 2 .
- Perception :
 - Robot est émetteur ou récepteur,
 - Émission et réception omnidirectionnelle d'ondes ultrasoniques (UGW),
 - Si puissance de signal altérée, alors détection,
 - Détection parfaite et en temps réel,
 - Distance maximale d'émission et de réception d_{max} .

Propositions scientifiques et techniques

Définitions préliminaires

Modélisation de l'environnement et des robots



Structure de données

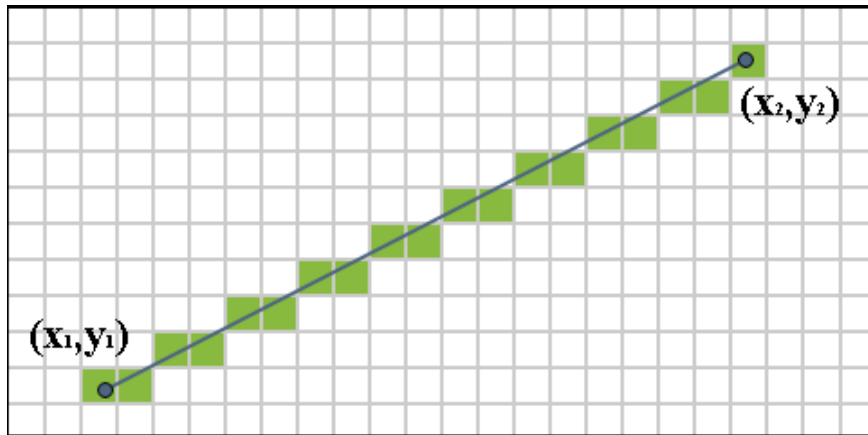
- Grille d'occupation :
 - inconnu,
 - vide,
 - occupé.

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

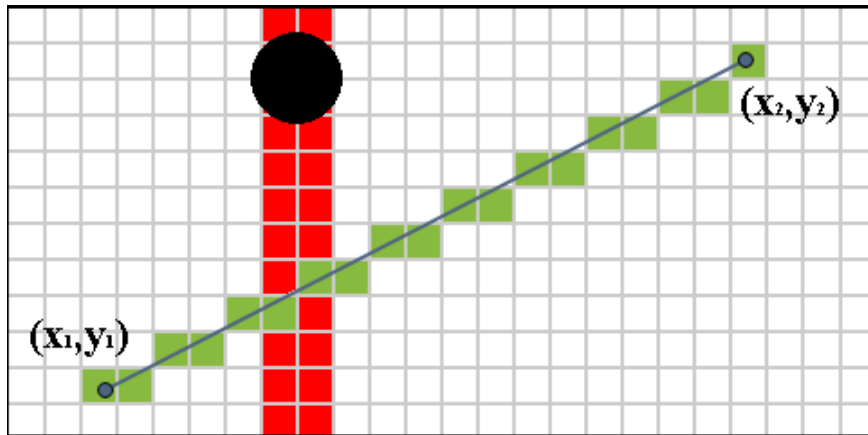
Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie



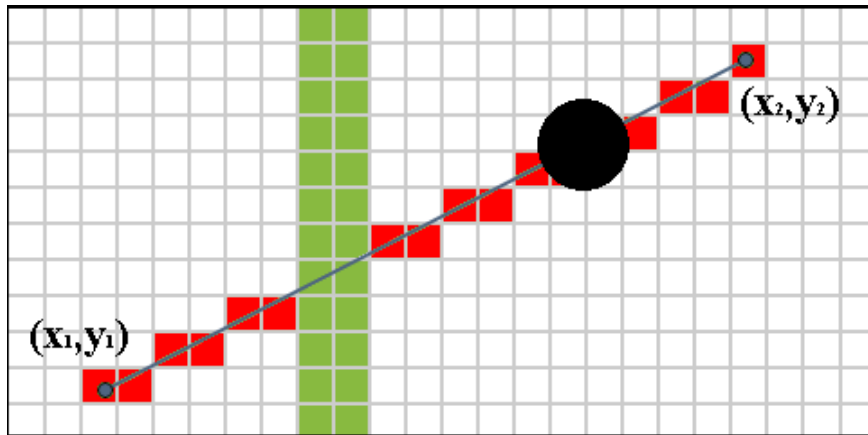
Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie



Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie



Contents

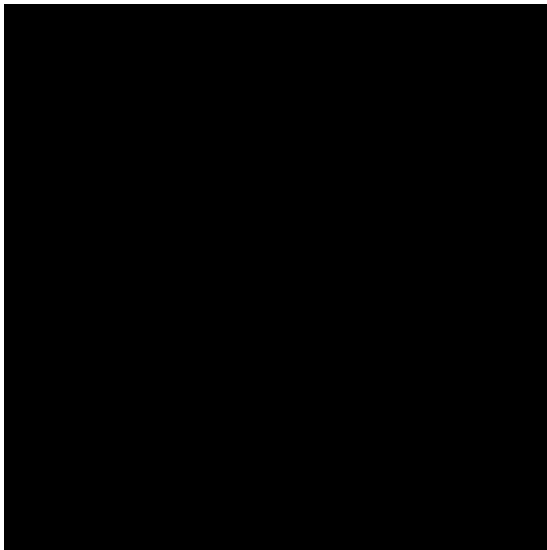
- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - **Stratégie de navigation *peinture au rouleau***
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Description

- Nombre de robots $n \geq 2$, séparés par une distance $d < d_{max}$,
- Chaque robot se déplace en ligne droite,
- Les robots suivent une trajectoire parallèle,
- Les robots se déplacent de manière **simultanée**,
- Les robots se synchronisent régulièrement.

Propositions scientifiques et techniques

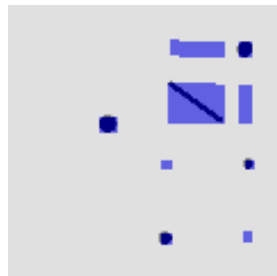
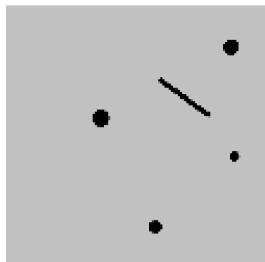
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

Cartographie résultante



score = 0.29

temps = 4 m 20 s

Propositions scientifiques et techniques

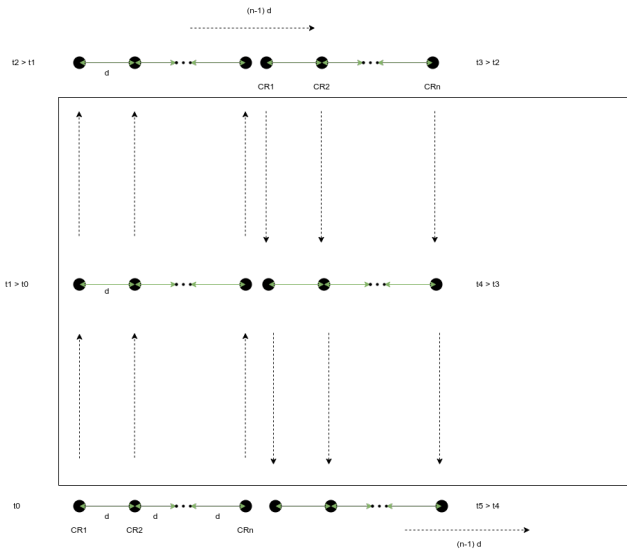
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

Implémentation

- Langage de programmation *Python, C++*,
- Bibliothèques *ROS, OpenCV*,
- Outil de simulation *Gazebo*,
- Outil de visualisation *Rviz*,
- Framework *ROS Task Manager*,
- Plugin UWB de l'équipe CHROMA.

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

Avantages

- Rapide.

Inconvénients

- Approximation des enveloppes peu précises,
- Zones fantômes.

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - **Stratégie de navigation *ski nordique***
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Description

- Nombre de robots $n \geq 2$, séparés par une distance $d < d_{max}$,
- Chaque robot se déplace en ligne droite,
- Les robots suivent une trajectoire parallèle,
- Les robots se déplacent de manière **alternée**,
- Les robots se synchronisent régulièrement.

Propositions scientifiques et techniques

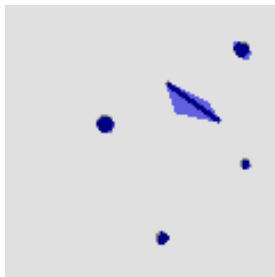
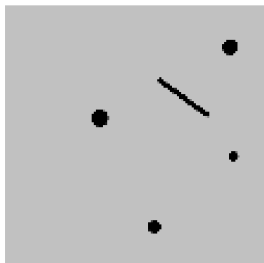
Stratégie de navigation *ski nordique*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*

Cartographie résultante

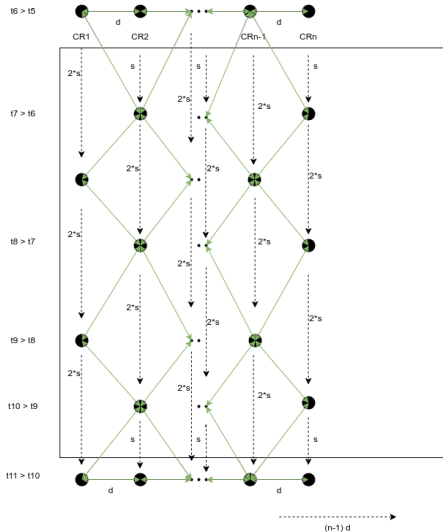
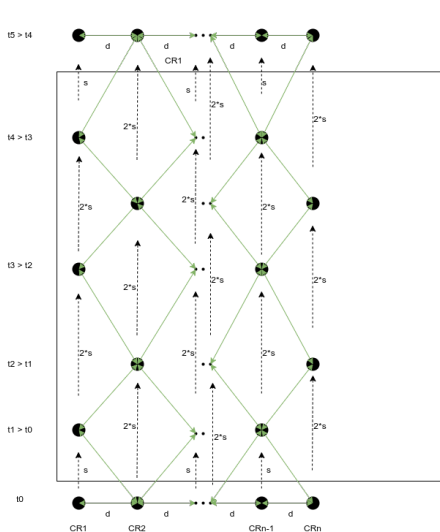


score = 0.63

temps = 16 m 31 s

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*

Avantages (comparés à *peinture au rouleau*)

- Approximation des enveloppes plus précises,

Inconvénients comparés à *peinture au rouleau*

- Plus lent,
- Zones fantômes.

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Propositions scientifiques et techniques

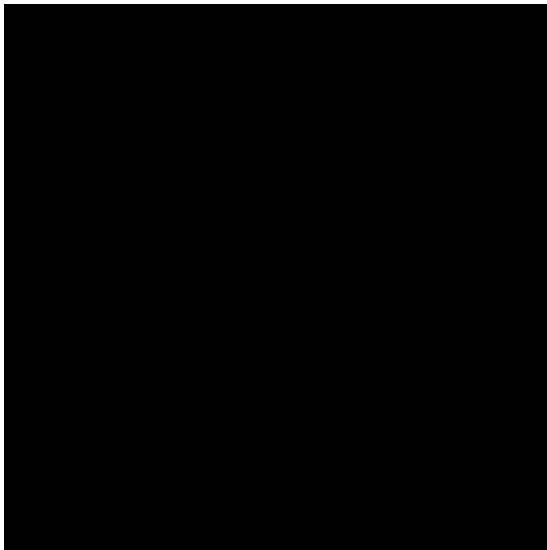
Stratégie de navigation *investigation polygonale*

Description

- Utilise la cartographie résultante d'une des deux stratégies précédentes,
- $k \geq 1$ équipes de $n \geq 2$ robots,
- Les robots d'une même équipe se placent sur des sommets consécutifs d'un polygone convexe P à p sommets,
- Les robots se déplacent, les uns après les autres, en suivant le chemin défini par le périmètre du polygone P .
- L'algorithme se termine lorsque les sommets initialement occupés par les robots sont à nouveau occupés.

Propositions scientifiques et techniques

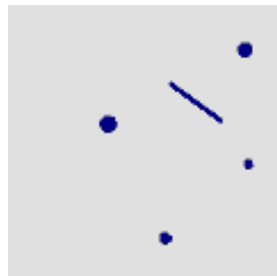
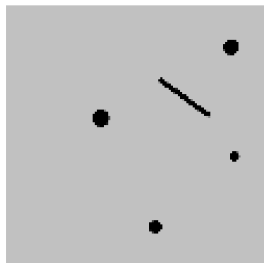
Stratégie de navigation *investigation polygonale*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

Cartographie résultante

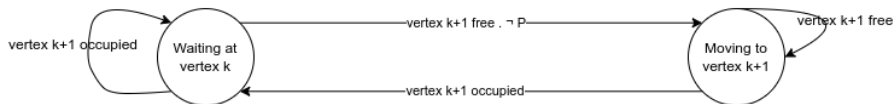


score = 0.86

temps = 9 m 31 s (13 m 51 s)

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*



$P = \text{True}$ if one robot is already moving, in other words, if $\exists k \mid k-1 \text{ free} \ \& \ k \text{ occupied} \ \& \ k+1 \text{ free}$

$P = \text{False}$ otherwise

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

- ❶ Extraction des zones de corrosion,
- ❷ Détermination de l'ordre d'investigation des zones de corrosion.

Extraction des zones de corrosion

- Conversion de la grille d'occupation en graphe,
- Algorithme d'extraction de composantes fortement connexes,

Détermination de l'ordre d'investigation des zones de corrosion

- Algorithme TSP ($k = 1$)
- Algorithme mTSP ($k > 1$)

Implémentation

- Bibliothèque *OpenCV* pour l'extraction des zones de corrosion,
- Bibliothèque *Gurobi* pour le TSP,
- MDMTSPV_GA - Multiple Depot Multiple Traveling Salesmen Problem solved by Genetic Algorithm, Elad Kivelevitch, pour le mTSP.

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

Avantages

- Approximation des enveloppes précise (proportionnellement au nombre de sommets du polygone)
- Permet de rapidement éliminer les zones fantômes.

Inconvénients

- Lent (proportionnellement au nombre de sommets du polygone, inversement proportionnel au nombre de robots, proportionnellement au nombre de zones de corrosion),

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Kappa de Cohen :

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

avec :

- p_o : précision observée,
- p_e : précision aléatoire,
- κ : mesure une classification binaire, en la comparant à une classification aléatoire.

κ	Interprétation
< 0	Désaccord
0.00 – 0.20	Accord très faible
0.21 – 0.40	Accord faible
0.41 – 0.60	Accord modéré
0.61 – 0.80	Accord fort
0.81 – 1.00	Accord presque parfait

Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

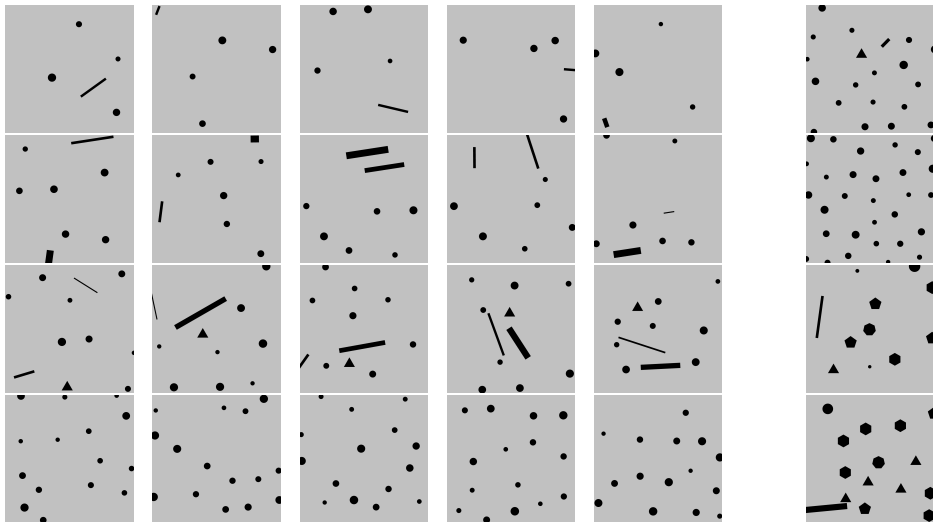
Expérimentations, validations et évaluations

Expérimentations

Stratégie	Paramètre	Valeurs
<i>peinture au rouleau</i>	n	2
	d	1, 2, 3, 6 (mètres)
<i>ski nordique</i>	n	2
	d	1, 2, 3, 6 (mètres)
	s	1, 2, 3, 6 (mètres)
<i>investigation polygonale</i>	stratégie initiale	<i>peinture au rouleau</i>
	d	1, 2, 3, 6 (mètres)
	n	2, 4
	k	1, 2
	p	4, 6

Expérimentations, validations et évaluations

Expérimentations

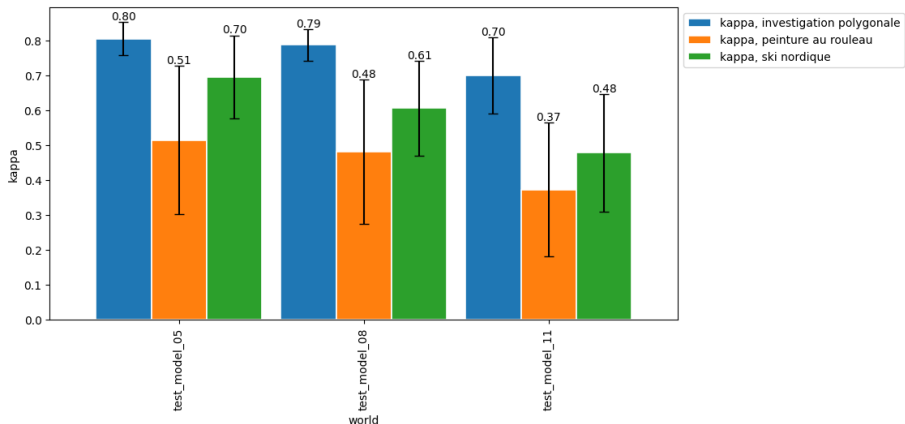


Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

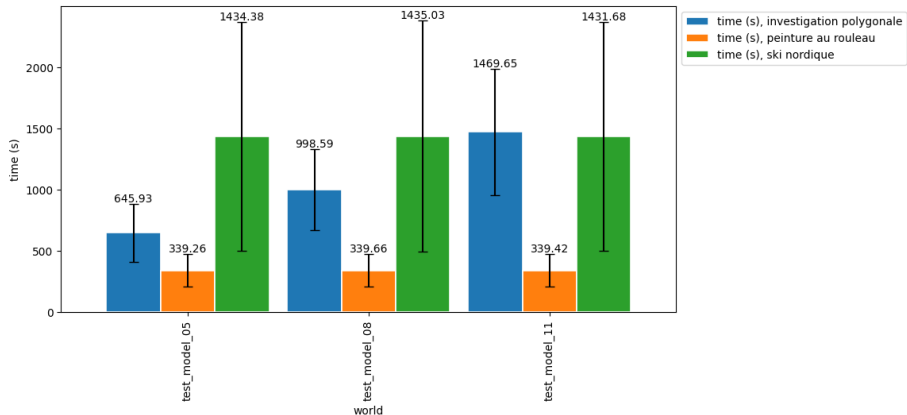
Expérimentations, validations et évaluations

Comparaison et analyse des résultats



Expérimentations, validations et évaluations

Comparaison et analyse des résultats



Expérimentations, validations et évaluations

Comparaison et analyse des résultats

	Gain en performance <i>investigation polygonale</i>	
comparé à	κ de Cohen	Temps d'exécution
<i>peinture au rouleau</i>	+ 68.39 %	+ 305.80 %
<i>ski nordique</i>	+ 27.92 %	- 3.92 %

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

- Domaine de la recherche,
- Recherches bibliographiques,
- Robotique,
- Nouveaux outils techniques,
- Rédaction du rapport PFE.

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion

- Développement et évaluation de 3 stratégies de navigation pour la tomographie,
- État de l'art pauvre dans ce domaine
- Mise en place d'un environnement de simulation
- Mise en place d'un protocole d'évaluation avec métriques d'évaluation et scénarios de test
- Collecte de données et analyses statistiques

Conclusion et perspectives

Perspectives

- Gestion des collisions
- Simulation avec $k > 1$ équipes et $n > 2$ robots
- Déploiement sur des systèmes réels