

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)

21 juin 2023

Table des matières

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

Table des matières

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

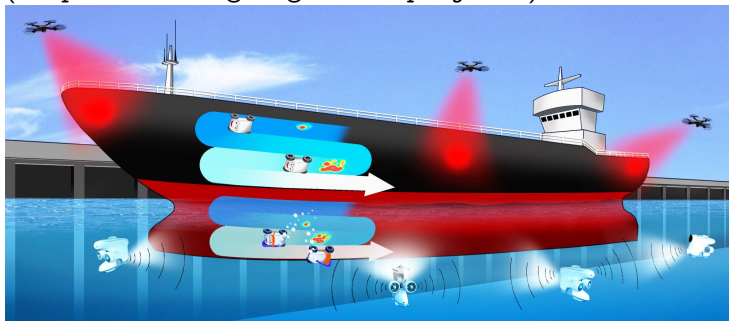
6 Bilan personnel

7 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-robot 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 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

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

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

2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)
2016

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 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} .

Structure de données

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

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Propositions scientifiques et techniques

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

Data: $P_1 \in \mathbb{R}^2$, $P_2 \in \mathbb{R}^2$, $pw \in \mathbb{R}$, $threshold \in \mathbb{R}$, $G : I \times w \rightarrow [\text{UNKNOWN}, \text{EMPTY}, \text{OCCUPIED}]$, $I \in \mathbb{N}$, $w \in \mathbb{N}$

with P_1 and P_2 the two points to connect, pw the power of the UGW, $threshold$ the threshold above which the power of the UGW is considered undistributed and G the grid to update.

Result: The updated grid.

```
1  $p_0 \leftarrow \text{from\_position\_to\_grid\_coordinate}(P_1)$ 
2  $p_1 \leftarrow \text{from\_position\_to\_grid\_coordinate}(P_2)$ 
3 if  $\text{is\_out\_of\_grid}(p_0)$  or  $\text{is\_out\_of\_grid}(p_1)$  then
4   return
5 end
6  $dx \leftarrow p_1.x - p_0.x$ 
7  $dy \leftarrow p_1.y - p_0.y$ 
8  $sx \leftarrow \text{sign}(dx)$ 
9  $sy \leftarrow \text{sign}(dy)$ 
10  $err = dx - dy$ 
11 while  $p_0 \neq p_1$  do
12   if  $pwd \leq threshold$  and  $G(p_0) = \text{UNKNOWN}$  then
13      $G(p_0) \leftarrow \text{OCCUPIED}$ 
14   end
15   else if  $pwd > threshold$  then
16      $G(p_0) \leftarrow \text{EMPTY}$ 
17   end
18    $e2 \leftarrow 2 \times err$ 
19   if  $e2 > -dy$  then
20      $err \leftarrow err - dy$ 
21      $p_0.x \leftarrow p_0.x + sx$ 
22   end
23   if  $e2 < dx$  then
24      $err \leftarrow err + dx$ 
25      $p_0.y \leftarrow p_0.y + sy$ 
26   end
27 end
```

Contents

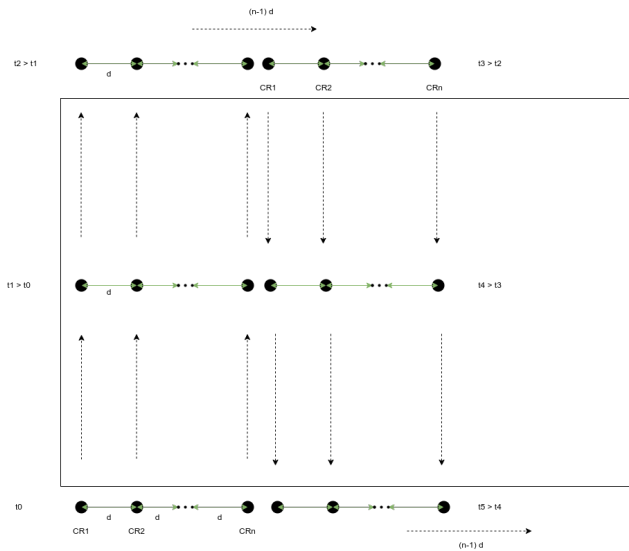
- 1 Introduction
- 2 État de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - **Stratégie de navigation *peinture au rouleau***
 - Stratégie de navigation *ski nordique*
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 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*

Avantages

- Rapide.

Inconvénients

- Approximation des enveloppes peu précises,
- Zones fantômes.

Contents

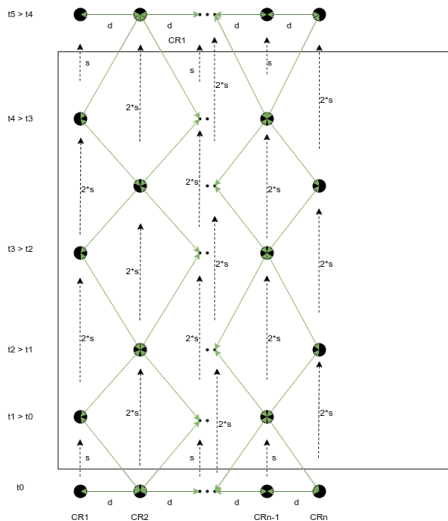
- 1 Introduction
- 2 État de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
 - Définitions préliminaires
 - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
 - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
 - **Stratégie de navigation *ski nordique***
 - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 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.

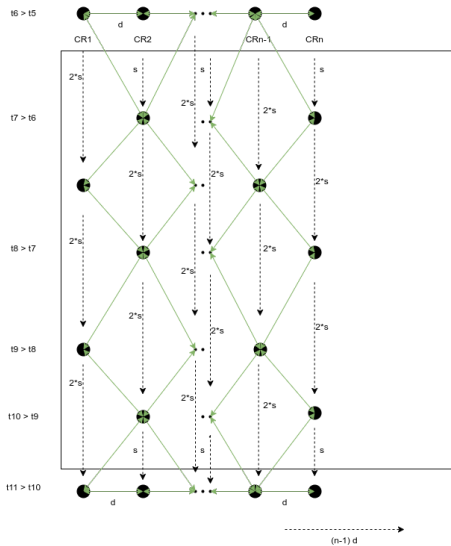
Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*



Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*

Avantages (comparés à *peinture au rouleau*)

- Approximation des enveloppes plus précises,

Inconvénients comparé à *peinture au rouleau*

- Plus lent,
- Zones fantômes.

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Propositions scientifiques et techniques

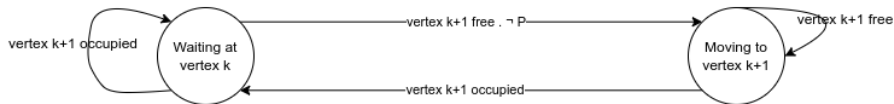
Stratégie de navigation *investigation polygonale*

Description

- $k \geq 1$ 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 définie par le périmètre du polygone P .
- L'algorithme se termine lorsque les sommets inialement occupés par les robots sont à nouveau occupés.

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*



P = 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 = False otherwise

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

- ① Extraction des zones de corrosion
- ② Détermination de l'ordre d'investigation des zones de corrosion

Extraction des zones de corrosion

- Conversion de la grille d'occupation en graphe,
- Algorithme SCC,

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

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

Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

Avantages

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

Inconvénients

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

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 **Implémentations des algorithmes**
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 **Implémentations des algorithmes**
 - **Environnement de simulation**
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Implémentations des algorithmes

Environnement de simulation

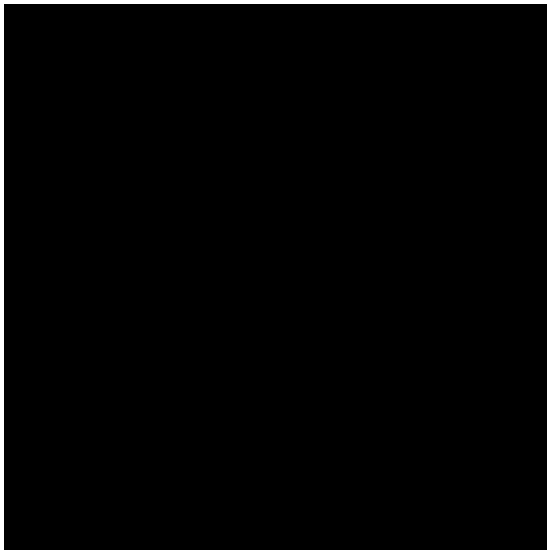
- Langage de programmation *Python*, *C++*,
- Bibliothèques *ROS*, *OpenCV*, *Gurobi*,
- Outil de simulation *Gazebo*,
- Outil de visualisation *Rviz*,
- Framework *ROS Task Manager*.

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

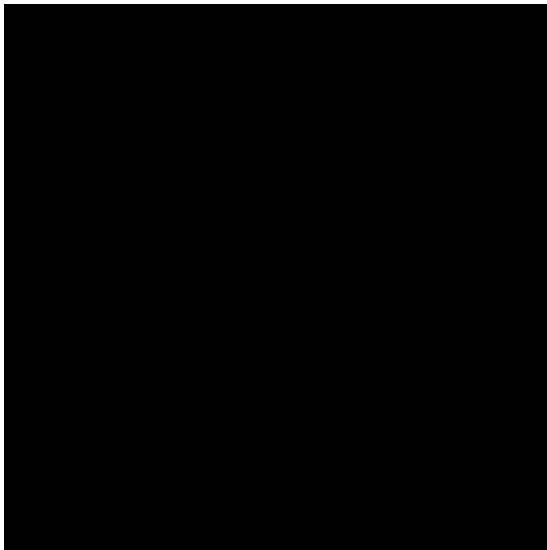
Implémentations des algorithmes de navigation

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*



Implémentations des algorithmes de navigation

Stratégie de navigation *ski nordique*



Implémentations des algorithmes de navigation

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

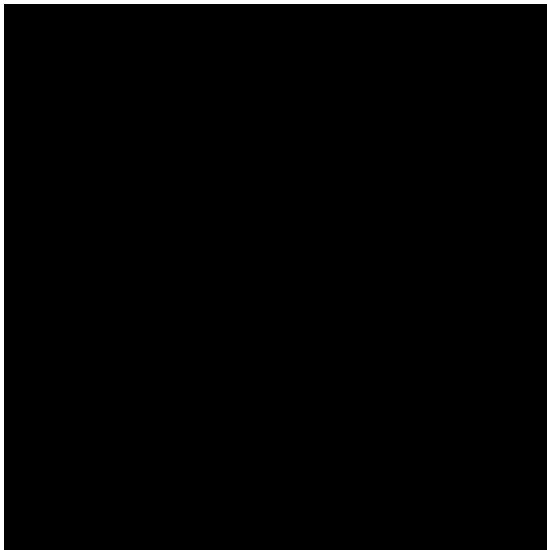


Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 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 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

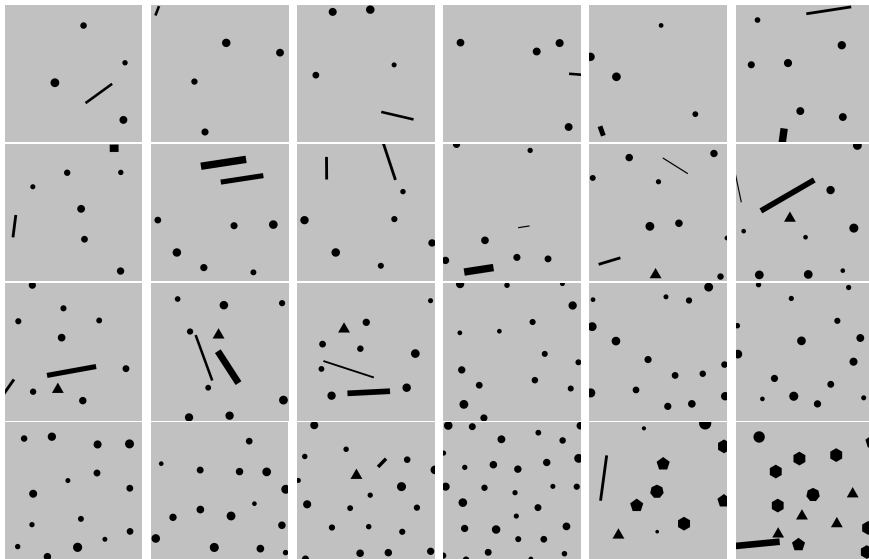
Expérimentations, validations et évaluations

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

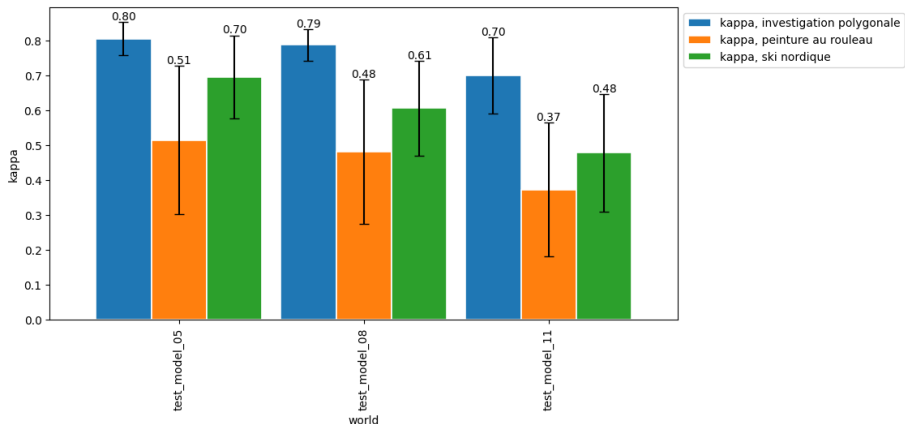


Contents

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 **Expérimentations, validations et évaluations**
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Expérimentations, validations et évaluations

Comparaison et analyse des résultats



Expérimentations, validations et évaluations

Comparaison et analyse des résultats

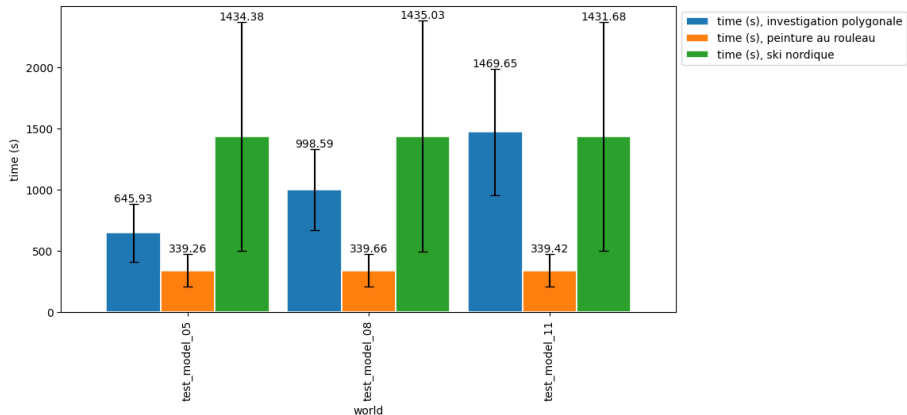


Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

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

Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
 - Environnement de simulation
 - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
 - Métrique d'évaluation
 - Expérimentations
 - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion

	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%

Conclusion et perspectives

Perspectives

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