

Rapport de projet ROB314

Grégoire Roussel

11 mars 2019

Introduction

Objectif

L'objectif du projet est de construire et valider expérimentalement un système de surveillance d'une zone impliquant plusieurs drones coordonnés. Les besoins identifiés pour le système sont :

- optimiser les rondes des différents agents pour survoler chaque endroit le plus régulièrement possible
- planifier et faire exécuter des trajectoires sans collisions
- détecter des situations de défaillance des drones actifs: batterie, réponse anormale...
- garantir la robustesse du système en remplaçant à chaud les drones défaillants
- fournir un compte rendu visuel de la situation actuelle

L'accent a été mis, non pas sur le développement d'un bloc scientifiquement innovant, mais sur la conception d'un système fonctionnel dans son ensemble, et qui me permette d'approfondir des problèmes récurrents d'un projet informatique complexe:

- paramétrage
- interfaces et communications multi-processus
- utilisation de code extérieur
- réutilisation de code mis en commun

Et des thématiques fréquentes de la programmation robotique :

- localisation
- simulation
- commande et contrôle
- coordination de plusieurs agents
- visualisations pour permettre la compréhension du système

La présentation dans le cadre de ROB314 se concentre sur la partie architecture et simulation.

Matériel et technologies

Crazyflie

Dans l'expérience, les drones de surveillances sont des Crazyflie (bitcraze, <https://www.bitcraze.io/crazyflie-2/>). Ce sont des petits quadri-coptères très légers (environ 40g) contrôlables via radio par un ordinateur central.

Outre leur disponibilité au laboratoire, le choix des Crazyflie se justifie par leur faible coût et leur grande robustesse aux chocs. Par ailleurs, la communauté ROS met à disposition des drivers et un programme de simulation aux **interfaces similaires**. Ainsi, le projet peut indépendamment contrôler des drones simulés ou réels, ou même une combinaison des deux.

Table des matières

- ↓ Introduction
 - ↓ Objectif
 - ↓ Matériel et technologies
 - ↓ Crazyflie
 - ↓ Base centrale
- ↓ Structure Générale
 - ↓ Architecture Externe
 - ↓ crazyflie_ros
 - ↓ sim_cf
 - ↓ Architecture
 - ↓ Architecture interne
 - ↓ La métaphore du bateau
 - ↓ Drones actifs et drones connectés
- ↓ Description individuelle des nodes
 - ↓ Amiral
 - ↓ Capitaine
 - ↓ Second
 - ↓ Allocation des drones
 - ↓ Contrôle et évitement des collisions
 - ↓ Visualisation
- ↓ Résultats
 - ↓ Démonstration
 - ↓ Évaluation du projet
 - ↓ Aspects positifs
 - ↓ Aspects à poursuivre

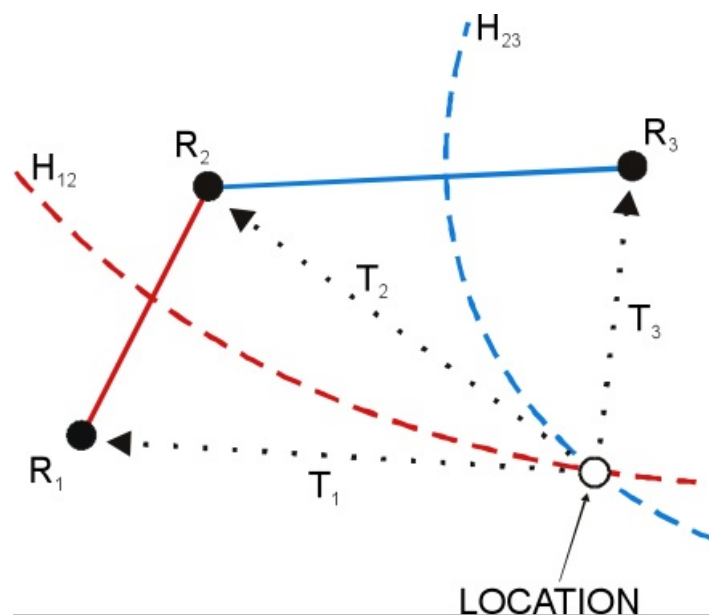


drone Crazyflie 2.0



Modèle Gazebo de simulation

La salle d'expérimentation cyber-physique du LIX contient une dizaine de drone Crazyflie, et un dispositif de localisation externe: le Loco Positioning System (LPS). Chaque Crazyflie se positionne dans l'espace en comparant les délais de transmissions avec de multiples balises radio, en quelque sorte comme un GPS d'intérieur. La précision de ce système est de l'ordre de la dizaine de centimètres, avec une incertitude principalement sur l'altitude.



Exemple de résolution de la position en 2D avec 3 balises

Base centrale

Cette base centrale exécute le méta-OS ROS: <http://www.ros.org/> . Ce méta-OS, couramment utilisée lors du prototypage de robots facilite l'interaction entre processus et la conception de blocs fonctionnels modulaires et réutilisables. Elle fournit par ailleurs des

outils de développement, de diagnostics et de visualisation qui simplifient la conception d'un système robotique. Dans ce projet, les outils **RVIZ** (outil de visualisation générique) et **Gazebo** (moteur de simulation) sont beaucoup utilisés.

Les deux configurations suivantes ont été testées:

- **PC personnel:** Ubuntu 18.04, ROS Melodic, 16Go RAM, 8CPU, 1To HDD
- **PC de la salle d'expérimentations** Ubuntu 16.04, ROS Kinetic, 64 Go RAM, 40 CPU, 2To SSD

Dans la pratique, l'empreinte mémoire du projet sp est négligeable dans le cas d'une expérience en réel. Pour les simulations, le moteur de rendu physique Gazeo constitue la limite principale.

Structure Générale

Architecture Externe

Le projet s'appuie sur deux *stacks* (ensembles de packages ROS) externes:

crazyflie_ros

[Wolfgang Hoenig - whoenig], https://github.com/whoenig/crazyflie_ros. Licence M.I.T.

driver entre ROS et le protocole de communication crazyflie (CRTP: Crazyflie Real-Time Protocol). Fournit un serveur de commande auquel on peut connecter des crazyflies (réels ou virtuels). Pour chaque crazyflie sont rendus disponibles des services pour le contrôler, et les logs sous la formes de *topics*.

Il fournit par ailleurs un modèle visuel 3D de Crazyflie pour Gazebo.

sim_cf

[Franck Djeumou - wuwushrek], https://github.com/wuwushrek/sim_cf.

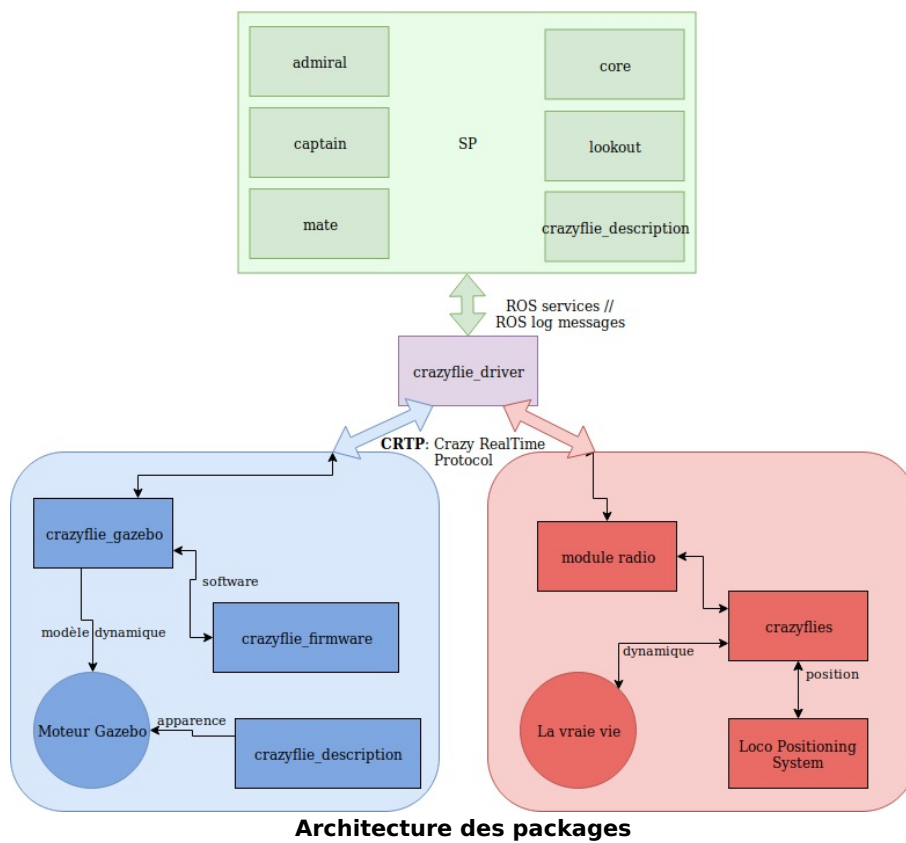
Module de simulation pour Crazyflie. Reçoit les commandes CRTP comme un drone réel, et simule la réponse logicielle, puis dynamique, par Gazebo. Le programme peut fonctionner en mode **SITL** (*Software in the Loop* : le logiciel du Crazyflie est simulé intégralement) ou **HITL** (*Hardware in the Loop*: un crazyflie réel est impliqué, mais ses réponses commandent des moteurs virtuels).

J'ai travaillé à la migration de ce package sous ROS Melodic (il y a une mise à jour majeure de l'API de Gazebo entre Kinetic et Melodic - il fallait reprendre une partie du code des plugins Gazebo). A cours de l'année, j'ai aussi amélioré quelques fonctionnalités annexes (scripts de lancement et de configuration).

Architecture

Le diagramme ci-dessous illustre les relations et échanges entre les différents outils externes impliqués et le module sp du projet:

- en **bleu** : lors d'une simulation
- en **rouge** : lors d'une expérience réelle



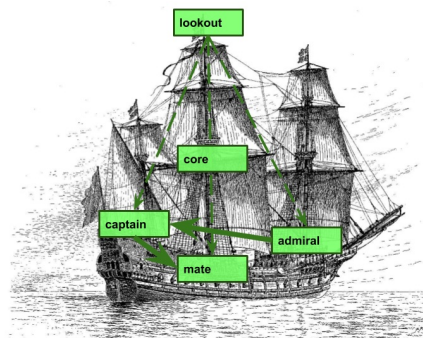
Architecture des packages

Architecture interne

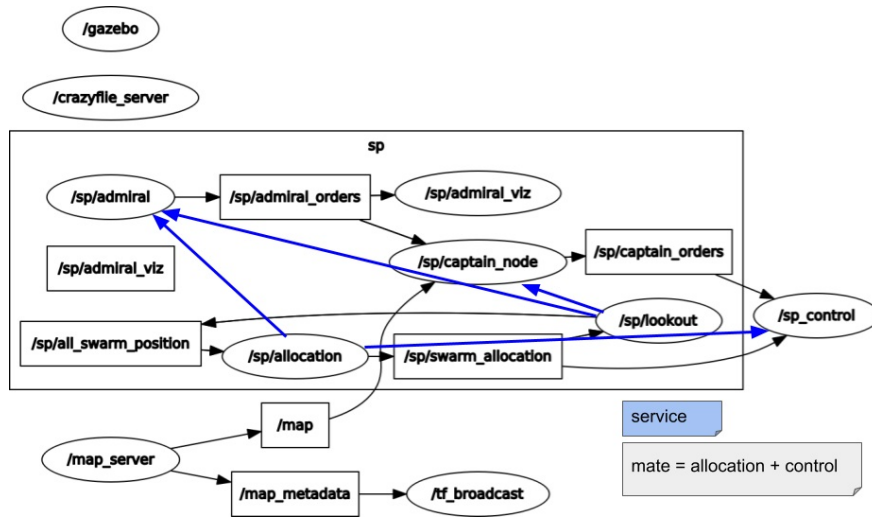
La métaphore du bateau

Une courte (et imparfaite) analogie avec le fonctionnement d'un bateau (ancien) permet d'introduire les *nodes* impliqués dans le fonctionnement de sp.

- l'**amiral** donne l'objectif à atteindre: il donne la stratégie générale sous la forme de zones à atteindre, peu importe par quel navire
- le **capitaine** est chargé de réaliser cet ordre : il assigne à chaque vaisseau/drone une position à atteindre, et un itinéraire pour y parvenir
- le **second** (mate) contrôle l'exécution des ordres donnés, et évite les éventuelles collisions entre navires.
- la **vigie** (lookout) fournit les positions des navires en manoeuvre



rôle des nodes



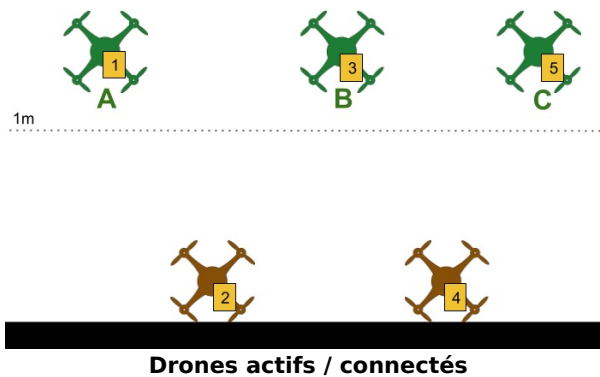
Graphes des principaux échanges de données

Dans le graphe ci-dessus, les flèches bleues représentent des dépendances de données résolues par l'appel de services ROS.

Drones actifs et drones connectés

Outre son rôle de contrôle, le second est souvent chargé du rôle d'organisation des équipes de travail. Dans notre système, ce sera lui qui sera chargé de décoller et atterrir les drones en fonction des besoins et des pannes pour maintenir la capacité opérationnelle demandée.

Pour faciliter le travail de la planification, on introduit l'abstraction d'**identifiant de drone actif**, pour désigner un drone disponible pour accomplir des missions de surveillance, sans plus de précisions sur son identité. Par opposition, chaque drone du système, réel ou simulé, possède un unique **identifiant de drone connecté** fixé.



Exemple : dans l'image ci-dessous, les identifiants connectés sont [1,2,3,4,5], et il y a trois drones actifs, identifiés par [A, B, C]. Pour l'instant, l'allocation des ressources est la suivante:

```
1 -> A
2 -> (en attente)
3 -> B
4 -> (en attente)
5 -> C
```

Dans le cas où le drone 4 rencontre une défaillance et doit atterrir, c'est le rôle du second de faire décoller un autre drone, disons #4, pour maintenir la capacité opérationnelle à trois drones actifs. In fine:

```
1 -> A
2 -> (en attente)
3 -> (défaillant)
4 -> B
5 -> C
```

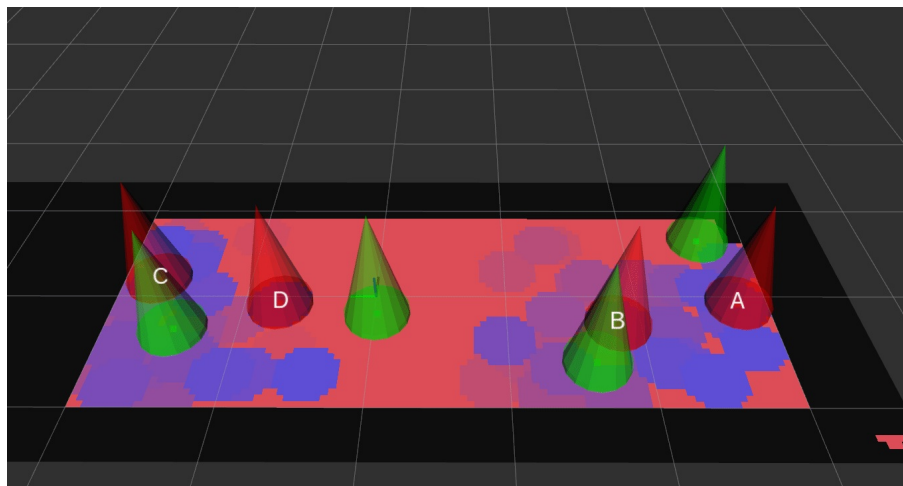
Description individuelle des nodes

Amiral

Le node `sp_admiral` gère et optimise la surveillance à long terme de la zone. Il fonctionne par "périodes d'observation" (de durée réglable, de l'ordre d'une dizaine de secondes), et donne à chaque début de période des objectifs à surveiller par les drones actifs.

Il maintient une *grid map* des zones visitées avec un score pour chaque cellule libre de la carte. Le score croît avec le temps, et est remis à zéro quand un drone le drone observe la cellule à la fin de la période. Les ordres de l'amiral sont issus d'une optimisation de l'état du système $[x_a, y_a, x_b, y_b, \dots]$ du système par une méthode de **recuit simulé**.

Pour ceci,



Ordres de l'Amiral (RVIZ)

Sur l'image ci-dessus, on peut observer:

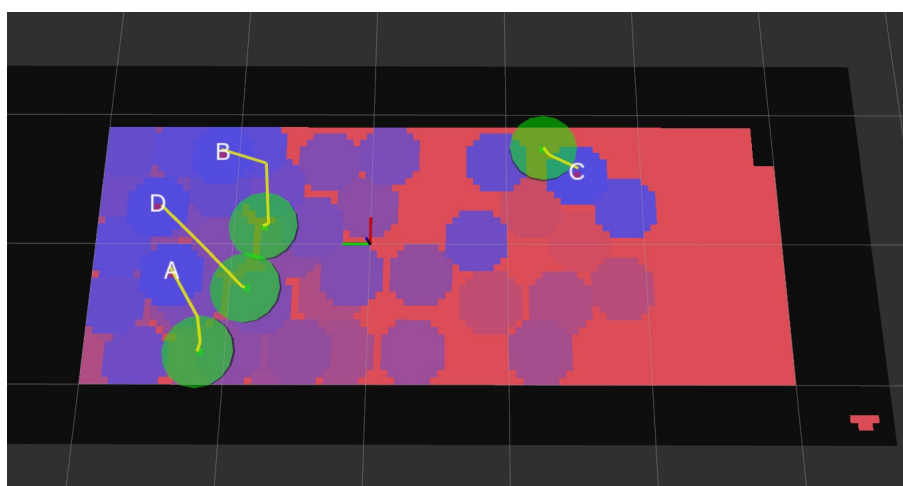
- la carte de la zone (les obstacles sont représentés par des cellules noires)
- la carte des scores:
 - bleu : score faible, zone récemment visitée
 - rouge : score élevée, zone intéressante à visiter
- cônes rouges: zones observées par les drones à la fin de la période précédente
- cônes verts: objectifs à observer pour cette période
- [A, B, C, D]: identifiants des drones actifs

Capitaine

Le capitaine élabore et complète les ordres donnés par l'amiral. À partir de la liste des positions, il calcule:

- l'assignation optimale de chaque drone actif vers un des objectifs
- une trajectoire pour y parvenir

L'algorithme utilisé est un RRT* multi-agent, avec la variante que l'association départ-arrivée n'est pas donnée. L'algorithme construit ainsi pour chaque point de départ un arbre vers chaque destination. Après un nombre déterminé d'étapes, il cherche l'assignation qui minimise le coût global du déplacement (maximum des distances à parcourir pour chaque drone).



Ordres du Capitaine (RVIZ)

Sur l'image ci-dessus, on observe:

- ronds verts: objectifs à observer pour cette période (donnés par l'Amiral)
- points rouges et [A, B, C, D]: positions actuelles des drones actifs
- ligne jaune: trajectoires calculées entre les positions actuelles et l'objectif assigné (Capitaine)

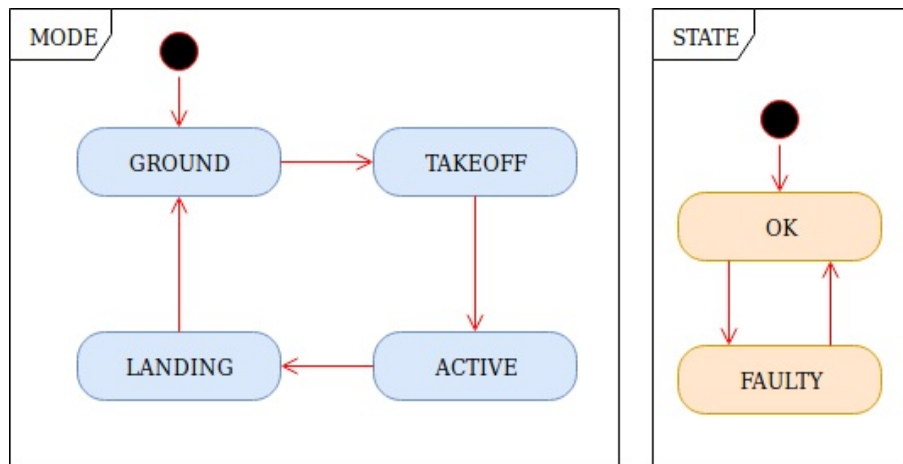
Second

Allocation des drones

L'allocation est le processus de sélection des drones actifs. Étant donné un objectif de N drones actifs, le second fait décoller ou

atterrir le nombre adapté de drones. Il surveille leur état pendant ces manoeuvres, et informe le reste du système :

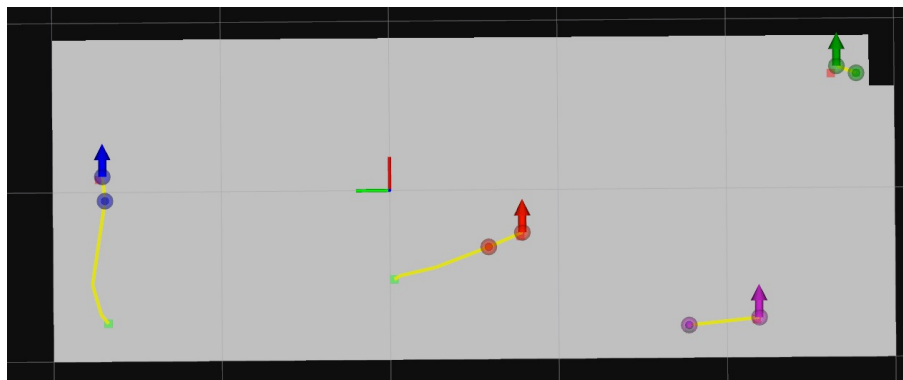
- du nombre de drones actuellement actifs (utilisé par l'amiral puis le second pour la planification)
- de la correspondance identifiant actif-connecté (utilisé par le contrôle et la vigie)
- de l'état et mode de chacun des drones connectés (utilisé pour la détection des défaillances)



États et modes des drones

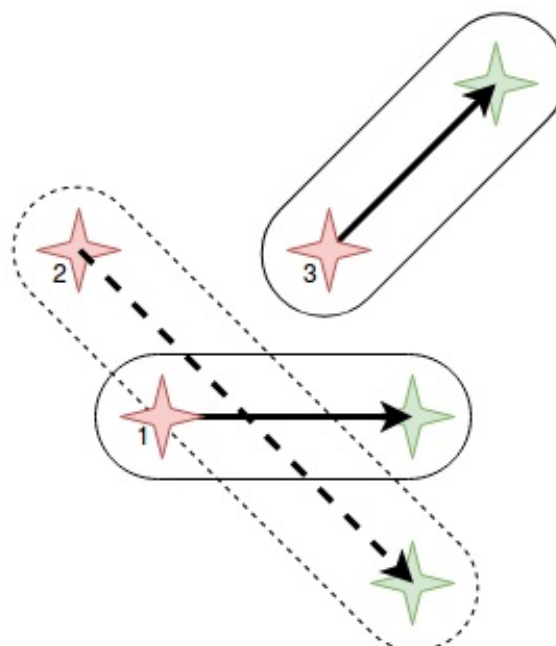
Contrôle et évitement des collisions

Le node de contrôle se charge de guider les drones actifs sur le chemin défini par le Capitaine. Il détecte aussi les menaces de collisions et interrompt les trajectoires le cas échéant.



Contrôle des drones (RVIZ)

Une première méthode naïve, consistant à arrêter deux drones s'ils s'approchaient trop près l'un de l'autre. Cela conduit cependant à une immobilisation définitive des drones. Pour résoudre ce problème, on introduit une notion de priorité entre les trajectoires : les drones moins prioritaires doivent s'arrêter pour laisser passer les autres en cas de menace de collision.



Scénario d'évitement

Explication du scénario : On suppose ici que les drones (en rouge) 1, 2, 3 sont chargés de missions de priorités décroissantes. Les flèches indiquent la trajectoire à suivre jusqu'au prochain waypoint (en vert). Les rectangles arrondis matérialisent la zone de sécurité autour de chaque trajectoire.

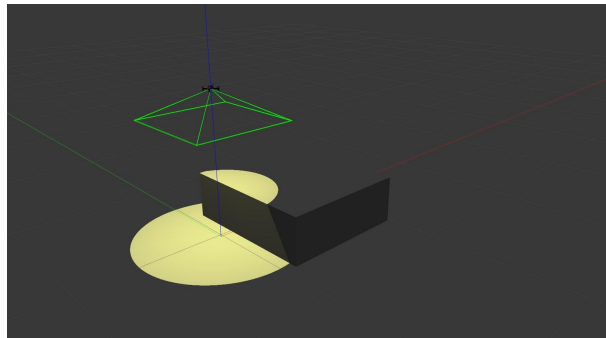
- 1 suit sa trajectoire
- 2, en revanche, menace de croiser 1. Il s'arrête à sa position, et reprendra sa course lorsque le chemin jusqu'au prochain waypoint est libre.
- 3 ne gêne aucun autre drone, et peut suivre sa trajectoire.

Visualisation

Pour améliorer l'expérience de visualisation sur Gazebo, j'ai modifié le modèle URDF du drone pour qu'il illumine la zone dans son champ de vision.

Note

Cette modification requiert une fonctionnalité arrivée dans Gazebo 9 (ROS Melodic). Sur l'ordinateur du LIX, où sont simulées les expériences, cette modification n'est pas visible.



Modèle 3D avec spot lumineux

Résultats

Démonstration

La vidéo de démonstration présentée en cours est accessible à <https://youtu.be/HivgX3iqf3A>. Elle illustre le comportement du système en deux phases:

1. **Phase statique:** la planification n'est pas active, et on demande trois drones actifs. On peut constater que lorsqu'un drone est déclaré défaillant, il atterrit, et un autre décolle pour le remplacer
2. **Phase dynamique:** Les nodes `sp_admiral`, `sp_captain` sont activées, les drones se déplacent. Une fois encore, on constate que le drone déclaré défaillant est remplacé (par le dernier, réparé entre temps).

Évaluation du projet

On peut identifier les aspects réussis, et à perfectionner:

Aspects positifs

Au terme du projet, le système a atteint un fonctionnement cohérent, et robuste aux fautes de drones en simulation. L'élaboration et le suivi des ordres sont fonctionnels, et la méthode d'évitement des collisions donne des résultats satisfaisants en terme de sécurité et d'efficacité (pas de blocages inutiles).

Sur le plan pédagogique, ce projet m'a permis d'explorer plusieurs aspects de ROS:

- l'architecture d'un système et la communication entre ses composants internes
- l'interfaçage et la communication avec des projets indépendants
- la simulation avec Gazebo : écriture d'un plugin et d'un modèle URDF
- la visualisation avec RVIZ
- l'enregistrement et l'analyse des expériences à l'aide de rosbags

Aspects à poursuivre

Il est bien entendu que chaque node bénéficierait de plus de temps pour la rendre plus efficace, ou plus robuste. S'il fallait citer trois points d'améliorations sur le système, ils seraient:

1. **L'amélioration du contrôle en position en réel.** Le LPS donne une précision trop approximative pour les opérations demandées aux drones. Il est sujet à des dérives, ou sautes de position, qui déstabilisent le positionnement des drones, et

causent fréquemment leur décrochage. Les solutions envisagées sont:

- "amollir" les constantes du PID de contrôle dans le firmware des crazyflie
 - changer de système de localisation
2. **Protection des drones durant les manoeuvres:** pour l'instant, le système de prévention de collisions ne surveille que les drones en altitude de vol et disponibles au commandes. Lorsqu'un drone décolle ou atterit, il existe un bref instant ou il est invisible pour les collisions - mais à l'altitude de travail. Une extension du processus de contrôle corrigerait cela.
 3. **Détection automatique interne de fautes:** pour ajouter à la pertinence du système, il serait intéressant que le drone embarque un module d'autodiagnostic sur sa position, sa réponse dynamique, sa batterie... Le système central pourrait alors recevoir des rapports de pannes et poser les drones en conséquence.
-