

Sujet de la thèse : Capture certifiée par un groupe de robots sous-marins

1ère partie : problématique générale.

La capture d'un intrus dans une zone limitée se fait principalement par des moyens humains qui restent limités.

Cette capture peut être facilitée par l'utilisation d'un groupe de robots. La procédure de capture est souvent facile à concevoir. La difficulté qui nous préoccupe est de pouvoir démontrer que la procédure suivie permet de garantir à coup sûr que l'intrus sera capturé. Lorsque la preuve ne peut être établie, on cherchera à donner un scénario pour lequel, une faille existe et que l'intrus peut parvenir à nous échapper.

La garantie se fait relativement à des hypothèses ensemblistes où la dynamique de l'intrus (un sous-marin par exemple) est supposée bornée. Par exemple, le mouvement de l'intrus pourra être décrit par une inclusion différentielle, ce qui permet de limiter sa dynamique de façon à être cohérent avec la réalité.

Nous supposerons que les espaces considérés sont bornés (un lac par exemple), et que le nombre de robots est limité. Afin de limiter le nombre de robots, nous allons considérer que les robots sont mobiles et collaborent entre eux.

2ième partie : programme de la thèse

L'objectif de cette thèse est de développer des méthodes certifiées capables de permettre à un groupe de robots sous-marins de capturer un intrus dans une zone bornée de notre environnement. La garantie pourra être établie en combinant des méthodes formelles avec des méthodes numériques ensemblistes à base de calcul par intervalles.

La première étape sera une reformulation du problème de façon à le décrire en termes académiques et ainsi pouvoir appliquer les outils de résolution existants.

On cherchera à démontrer que le problème peut se formuler en terme d'estimation d'état ensembliste.

Pour faire ce lien, il faudra supposer une dynamique pour l'intrus, typiquement sous la forme d'une inclusion différentielle, et proposer une fonction de visibilité compatible avec l'observation du robot. En effet, dans une certaine zone dite de visibilité, exprimée dans son propre repère, le robot est supposé être capable de détecter l'intrus, s'il est présent, ou bien de garantir que cet intrus n'est pas dans sa zone de visibilité.

Le caractère distribué est également à prendre en compte car nous disposons de plusieurs robots avec des capacités de communication limitées.

L'ensemble du système contenant le groupe de robots et l'intrus peut être vu comme un système dynamique hybride sous contraintes. Les contraintes sont de trois types :

- *Les contraintes différentielles.* Les robots, de même que l'intrus, ont une dynamique relativement connue dans le sens où leur vitesse, leur rayon de courbure, leur accélération, etc. sont bornées. Ces contraintes peuvent être modélisées par des équations d'état ou des inclusions différentielles (principalement pour l'intrus car sa commande est inconnue).
- *Les contraintes d'état pour les robots.* Les robots doivent rester dans une zone prédéfinie (route pour les robots roulant, ne pas rentrer en contact avec un obstacles) et ne pas en sortir, etc. Ces contraintes doivent être vérifiées à chaque instant et pour chaque robot.
- *Les contraintes inter-robots.* Pour certains scénarios, les robots doivent être capables de communiquer avec un certain débit, pouvoir se voir (pour se suivre par exemple). Si ces contraintes ne sont pas satisfaites, le bon déroulement de la mission ne peut plus être garanti.
- *Les contraintes de non-intrusion.* Aucun intrus ne doit pouvoir rentrer dans la zone à sécuriser sans être détecté par un des éléments du groupe de robots.

Les outils théoriques utilisés pour faire les preuves de bon fonctionnement du système combineront les méthodes de Lyapunov et celles du calcul par intervalles. Ces méthodes ont en effet montré qu'elles pouvaient calculer de façon efficace des bassins de capture, des noyaux de viabilité ou des invariants de systèmes dynamiques. Nous allons également tenter d'utiliser une approche frontière et utiliser les outils de la topologie algébrique.

Comme exemple d'application plus spécifique, cette thèse s'intéressera à la constitution d'une chaîne virtuelle en mouvement dont les maillons sont des robots d'un groupe qui se suivent. Ces robots qui ne cherchent pas à se localiser de façon absolue effectuent des allers-retours entre les deux extrémités A et B de la chaîne. Pour un tel système distribué, on cherchera dans une première étape à démontrer que pour tout type d'incertitude autorisé, la chaîne ne pourra pas se casser. Ce qui signifie que chaque robot sera capable à coup sûr de revenir à son point initial, à l'aide ses propres données proprioceptives, mais aussi de la perception de ses compagnons. Dans une deuxième étape, on cherchera à démontrer que la capture se fera de façon certaine.

Le candidat recherché doit avoir des compétences en programmation, en

robotique et en automatique. Le travail pourra se décomposer comme suit.

- Faire une étude bibliographique sur les différents systèmes utilisés pour sécuriser une zone.
- Comprendre sur les méthodes par intervalles avec leur utilisation pour la capture des systèmes dynamiques.
- Lire la littérature sur la topologie algébrique dans un contexte distribué.
- Développer des méthodes par contracteurs pour garantir la capture.
- Proposer un démonstrateur sur des robots réels (sous marins et terrestres). Pour cela, il conviendra de construire un groupe de robot capables d'évoluer dans la piscine de l'ENSTA.
- Penser à un démonstrateur terrestre avec des robots à roues.

La thèse se déroulera à l'ENSTA, Brest dans l'équipe Robex.

3ème partie : références de l'équipe sur le sujet et bibliographie (5 références principales, par exemple)

Au Lab-STICC, dans l'équipe Robex, nous travaillons depuis 10 ans sur les méthodes par intervalles et leurs applications pour les systèmes dynamiques. Nous collaborons avec l'ENSTA Paris dans le cadre du projet CHRoMM.

Ci-dessous quelques exemples de publications récentes de l'équipe Robex sur ce domaine.

- [1] M. Costa Vianna, E. Goubault, L. Jaulin and S. Putot (2024). Estimating the Coverage Measure and the Area Explored by a Line-Sweep Sensor on the Plane, *International Journal of Approximate Reasoning*.
- [2] M. Louedec, L. Jaulin and C. Viel (2023). Computational tractable guaranteed numerical method to study the stability of n-dimensional time-independent nonlinear systems with bounded perturbation, *Automatica*
- [3] S. Rohou and L. Jaulin (2023). Brunovsky decomposition for dynamic interval localization, *IEEE Transactions on Automatic Control*
- [4] L. Jaulin, B. Desrochers and D. Massé (2016). Bisectable Abstract Domains for the resolution of equations involving complex numbers. *Reliable Computing*.
- [5] B. Desrochers and L. Jaulin (2016). A Minimal Contractor for the Polar Equation; Application to Robot Localization, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 55, Pages 83-92.