

Autonomie décisionnelle adaptative en mission *search and target* par une flottille de drones marins hétérogènes

Uli Fahrenberg et Loïca Avanthey
Laboratoire de Recherche de l'EPITA (LRE EPITA)

1 Objet de la thèse

La thèse porte sur le développement d'une autonomie décisionnelle adaptative au sein d'une flottille de robots sous-marins dans le cadre d'une mission de type *search and target*. L'objectif est de déployer de manière optimale et autonome les vecteurs pour rechercher une cible sous-marine dans une zone d'intérêt puis de redéfinir dynamiquement le maillage de la flottille pour optimiser le renseignement sur la cible. On se propose de travailler sur des cas 2D et 3D (profondeur fixe ou variable) avec des profils horizontaux ou verticaux (fonds et tombants). Les résultats seront évalués lors de campagnes expérimentales en mer.

2 Descriptif de la thèse

Cette thèse s'intéresse à la problématique générale des missions de type *search and target* réalisées en autonomie dans le milieu sous-marin. Dans ce contexte, on veut trouver une cible particulière au sein d'une zone d'intérêt, puis collecter des renseignements sur cette cible et son environnement en fonction des objectifs qui ont suscité la mission. Il peut s'agir par exemple de rechercher un pipeline pour l'auditer, identifier et localiser des IED potentiels, documenter une épave, etc.

Ces missions sous-marines sont par nature caractéristiques des tâches dites « 3Ds » (« *Dull, Dirty, Dangerous* » : « ennuyeuses, sales et dangereuses ») [Sin09]. En effet, l'hostilité du milieu limite très vite les possibilités d'exploration par des plongeurs humains (temps d'immersion) en termes de profondeur et de taille de zone [SR10]. Les robots autonomes (drones) sont donc particulièrement appropriés pour les relayer avec efficacité sur ces missions et garantir le caractère systématique nécessaire à leur réussite.

L'impossibilité d'utiliser les technologies basées sur les ondes hertziennes rend la communication à distance entre objets et la localisation (relative ou absolue) très compliquées par rapport au monde aérien (pas de WiFi ou autre système à large bande passante, pas de système GNSS ou équivalent). D'autre part, la forte limitation de la visibilité impose de se rapprocher fortement de l'objet [RCP78] quand la détection, l'identification ou le besoin en renseignement précis ou discret ne peut être atteint par une imagerie sonar. Cela entraîne une diminution de la fauchée, ce qui se traduit concrètement par un temps de recueil d'information plus long et des processus d'analyse plus complexes (reconstruction nécessaire pour disposer d'une vision globale).

Dans cette thèse, pour réaliser ces missions de type *search and target*, nous proposons d'utiliser une flottille de drones hétérogènes en nous focalisant sur le développement de son autonomie décisionnelle adaptative, en temps réel et en embarqué.

L'utilisation d'une flottille permet d'optimiser le temps de recherche de la cible, d'augmenter la probabilité de sa détection ainsi que la rapidité et la qualité de son renseignement [Bou01, PBO03]. Dans ce scénario, des drones de nature différente doivent pouvoir collaborer efficacement et de manière autonome. C'est l'un des enjeux majeurs en robotique de terrain. Pour y répondre, cette thèse va s'intéresser aux possibilités de portage au monde réel des travaux théoriques en robotique distribuée [Sic08, CGP09, Mar09, FPS12, FPS19] en privilégiant les approches d'auto-organisation pour s'adapter aux différents événements de la mission.

La communication entre les drones sous-marins (UUV) est un élément clé pour la collaboration. L'approche que nous proposons pour réaliser les démonstrations et tester les réels besoins en communication est d'utiliser un couple de drones hétérogènes composé d'un UUV relié à un drone de surface

(USV). Ce couple permet de résoudre le problème de communication en milieu sous-marin dans le cadre de ces travaux, mais l'hétérogénéité pose des problèmes d'architecture logicielle et matérielle pour que le couple travaille de concert. À cette capacité de communication explicite, on souhaite appliquer la théorie ensembliste des intervalles au problème de la localisation absolue (propagation de la géolocalisation depuis la surface) ou relatif (rôle d'amer par alternance). Cela permettra d'améliorer les capacités de collaboration adaptative au sein de la flottille (redéfinition des plans de vols en cours de mission par rapport à la réalité pour s'assurer de la complétude du maillage, optimisation de la répartition des drones pour obtenir la meilleure précision de l'acquisition de données de renseignements, etc.). La détection et l'identification de la cible qui permet de basculer de la phase de recherche à la phase de renseignement se fera par une approche basée sur un réseau d'apprentissage profond embarqué.

Les travaux théoriques de cette thèse seront implémentés sur des robots à ressources embarquées limitées pour pouvoir régulièrement faire des démonstrations en situation opérationnelle en mer. Les développements issus de la thèse pourront paver le terrain pour de futurs travaux sur la réalisation collaborative de cartographies thématiques haute résolution. Pouvoir cartographier de manière autonome à très haute résolution serait d'un intérêt majeur tant pour la défense (détection de menaces, préparation d'intervention, etc.) que pour le monde civil (cartographie de l'occupation des sols à l'échelle de l'individu, suivi des espèces invasives ou d'une zone d'érosion dans le contexte de réchauffement climatique, audit d'infrastructures semi-immergées, etc.). Ces résultats pourraient aussi alimenter et robustifier la création de jumeaux numériques de zones d'étude sous-marines.

Plusieurs thématiques prioritaires sont concernées par les travaux, résultats et productions attendus de cette thèse. La demande est rattachée à la thématique Robotique de par ses liens forts avec les sous-thèmes (ST) 4 (Autonomie), ST1 (Localisation et navigation) et ST2 (Architecture). Le système proposé de communication par drones médiateurs est aussi à rattacher au ST1 (Systèmes hétérogènes communicants) de la thématique Ingénierie de l'Information (I2). Les tâches de reconnaissance et de renseignement peuvent contribuer au ST2-I2 (Traitement et exploitation de l'information), STC1 (Observation, modélisation et simulation de l'environnement) de la thématique Génie maritime et géosciences (GMG) et ST2 (traitements de données massives de capteurs hétérogènes) de la thématique IA. L'axe autonomie décisionnelle concerne également le STB2-GMG (Optimisation des actions).

3 Programme de la thèse

Dans cette partie sont présentés plus en détails les principaux verrous scientifiques abordés dans la thèse et les approches proposées pour y répondre, les moyens d'expérimentations opérationnelles en mer et la planification des travaux (recherches et expérimentations terrain).

3.1 Verrous scientifiques et approches proposées

3.1.1 Problème d'intelligence collaborative distribuée

Au cours des quinze dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour la théorie de la robotique distribuée, fortement liée avec la théorie de l'informatique distribuée, pour poser les fondements théoriques des problèmes que des essais de robots collaborateurs peuvent et ne peuvent pas résoudre [FPS12, FPS19]. Cependant, le cadre théorique qui fait consensus est difficilement exploitable directement [Gut22] car les hypothèses sont déconnectées de la réalité (les robots sont ponctuels, indifférentiables, non individualisables, etc.). Dans ces travaux, on veut faire le lien entre la théorie et la pratique pour aller jusqu'à la démonstration.

Ainsi, les stratégies distribuées et décentralisées que nous souhaitons développer s'apparentent à la catégorie de méthodes dites d'auto-organisation [QMdL12, dMQ15]. L'idée est de faire émerger de manière autonome et spontanée par l'ensemble des éléments de la flottille une décision globale d'action, qui sera alors déclinée en actions locales. Pour cela, on souhaite utiliser des mécanismes de rétroaction locale pour ajuster le comportement global de la flottille, et donc de chaque individu qui la compose, aux conditions environnementales ou à l'évolution des objectifs de la mission. La prise de décision étant collégiale, on s'attend à ce que les algorithmes développés soient particulièrement

résilients et tolérants aux pannes (notamment à la perte en action d’individus ou à une rupture de communication) et relativement stables dans les décisions prises. L’absence de chaîne hiérarchique garantit d’être immunisé à tous les problèmes liés à une perte du centre de commandement (élection d’un nouveau chef, retour d’un ancien chef, etc.) [YJC13].

Plus précisément, on souhaiterait adapter à nos contraintes des algorithmes pour résoudre des tâches simples en robotique distribuée (rassemblement, se déplacer en groupe, patrouiller, etc.) dans un modèle où les robots sont anonymes et soumis à des potentielles pannes et imprécisions [DPT19, FPS19, DPP20]. Une autre inspiration sont des algorithmes de type colonie de fourmis (stigmergiques) [Koz12] dont on pourrait contraindre les trajectoires d’exploration ou de renseignement par les résultats de la théorie des champs des potentiels.

3.1.2 Architecture communicante sous-marine distribuée et en mouvement

L’une des clés de ces travaux est la communication entre les éléments de la flottille. Mais les systèmes existants de communication directe sans fil sous-marins sont soit trop volumineux, coûteux ou énergivores pour être embarqués sur le type de robots que nous envisageons d’utiliser pour construire la flottille. Pour contourner ce problème, nous proposons de développer un système de communication explicite indirect et hybride : chaque UUV est relié à un USV par un câble : ainsi les UUV échangeront leur information en faisant un détour dans l’air par le biais de leur support de surface. Nous prévoyons d’imposer des contraintes de communication limitées pour que les travaux puissent être facilement redéployés sur des moyens de communications sous-marins plus traditionnels. Cette méthode ouvre de nouvelles problématiques de collaboration car l’USV doit se coordonner dans ses déplacements avec son compagnon sous-marin. Ce cas est plus complexe que les travaux que l’on retrouve sur la thématique des objets sous-marins connectés (UIoT – *Underwater Internet of Things*) [BZ22] car ici, tous les éléments communicants sont individuellement en mouvement.

Pour faciliter cette collaboration et avoir la possibilité de synchroniser l’ensemble des éléments de la flottille, l’équipe encadrante souhaite développer ses précédents travaux sur l’universalisation de l’architecture software et hardware des robots hétérogènes [BAV20]. Ce point critique permet d’unifier les développements avec l’idée qu’un robot n’est qu’une spécification particulière d’une classe abstraite plus générale. Cela permet de faire profiter à toutes les plateformes hétérogènes de l’ensemble des développements, d’augmenter la sûreté software dans un contexte multi-systèmes et de diminuer drastiquement les coûts de maintenance et de développement. Dans ce cadre, nous envisageons de porter systématiquement les architectures softwares des porteurs et de leurs charges utiles sous ROS2, sans exclure à ce stade la possibilité de libérer du code en *opensource* pour le reste de la communauté.

3.1.3 Minimisation de l’erreur de positionnement absolu par la propagation du signal GNSS depuis la surface

Dans le cadre de cette thèse on souhaiterait aborder le problème de réduction de l’incertitude de localisation des robots immergés en réalisant une extension de l’information GNSS disponible en surface par des algorithmes de propagation par vision de proche en proche. Pour plus de robustesse, nous envisageons de coupler cette approche avec des algorithmes de fusion de données hétérogènes et des algorithmes inspirés de la théorie ensembliste des intervalles [JKDW01].

Le principe est qu’un UUV s’approche de la surface pour être visible par un USV qui dispose de l’information GNSS, calcule sa position relative et lui transmet son géoréférencement. L’UUV redescend alors avec une incertitude en position qui va croître au fil du temps. Les autres UUVs le voyant à leur tour (communication implicite) et communiquant avec lui (communication explicite), vont pouvoir améliorer la précision de leur position car leur propre incertitude va être contrainte par l’information apportée par l’UUV qui revient de la surface. Ce système est totalement passif.

Pendant la phase de recherche, cela permettrait de couvrir la zone de manière cohérente tout en permettant l’estimation de la complétude de la couverture réalisée. La réduction régulière de l’incertitude de positionnement de chacun des éléments de la flotte permettrait de maintenir une taille de maillage adéquate au sein de la flottille. Pendant la phase de renseignement de la cible, cela permettrait de géoréférencer (positionnement global) avec une bonne précision les relevés d’information sous-marins.

3.1.4 Minimisation de l’erreur de positionnement à l’aide d’un point fixe

Dans la phase de renseignement de la cible, on a besoin d’une précision de positionnement plus importante que lors de la phase de recherche. Pour améliorer le positionnement relatif de chacun des robots de la flottille (et donc des informations qu’ils recueillent respectivement en limitant les zones aveugles), nous proposons d’utiliser l’un des UUVs comme point fixe de référence en le posant sur le fond au niveau de l’objet d’intérêt. En s’appuyant sur les mêmes types de stratégies présentées à la section 3.1.3, on souhaite développer des algorithmes adaptatifs implicites pour minimiser l’erreur de positionnement relatif de chacun des membres de la flottille et géoréférencer avec précision leurs relevés. Si la cible est étendue (pipeline, épave) alors on peut utiliser plusieurs points fixes ou découper la zone d’intérêt en tronçons et de replacer des points fixes sur chacune de ces sous-zones au fur et à mesure de l’avancement (rôle d’amers par alternance).

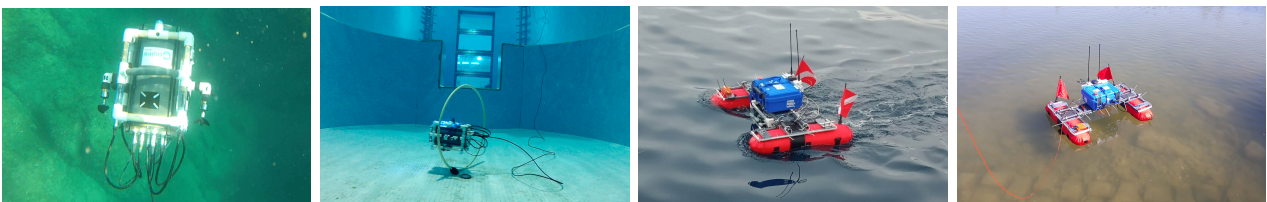
3.1.5 Reconnaissance de cible basée IA en embarqué quasi-temps réel

La contribution de cette thèse sur la reconnaissance de cibles basée IA en embarqué quasi-temps réel se place dans la continuité de nos précédents travaux, notamment ceux utilisant des réseaux d’apprentissage profond (*deep learning*) [BA20, AB20, BABV22]. Dans ce contexte, on souhaite explorer deux approches complémentaires. La première porte sur l’optimisation d’algorithmes pour la détection et l’identification robuste de cibles dont on a une connaissance *a priori* (pipeline, mines, etc.) en s’adaptant aux spécificités de la vision sous-marine. La seconde, beaucoup plus originale, porte sur l’utilisation de l’IA pour la détection d’anomalies par rapport à une normalité. La stratégie que l’on imagine repose donc sur la contextualisation des résultats de l’étape précédente. L’objectif est à terme d’aider un opérateur humain à se focaliser sur des objets détonnants dans leur environnement (anomalies) pour qu’il puisse expertiser s’il s’agit de menaces potentielles ou non.

Ces deux approches nécessitent des bases d’apprentissage dans le monde sous-marin qui sont aujourd’hui quasiment inexistantes ou très difficiles d’accès. C’est un vrai frein au développement des techniques basées IA adaptées au milieu sous-marin. Au cours de la thèse, on souhaite profiter des expérimentations en mer pour créer des bases de données, les tester de manière opérationnelle et si possible les diffuser à la communauté avec les vérités terrain associées.

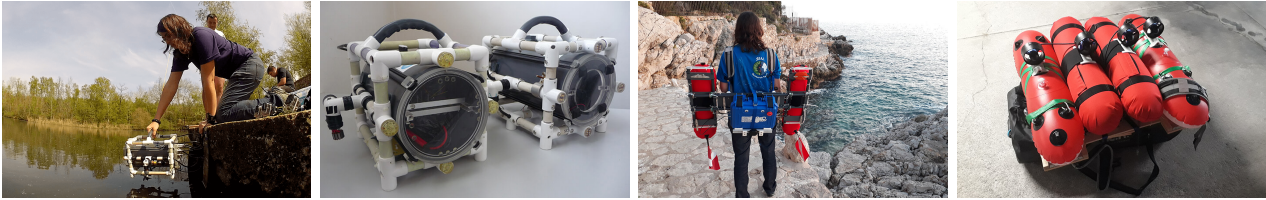
3.2 Expérimentations en conditions opérationnelles

L’équipe encadrante attache une grande importance à valider les résultats théoriques par des expérimentations opérationnelles en mer. Pour cela, les robots de recherche de l’équipe encadrante de type USV et UUV, ainsi que leurs charges utiles de cartographie basée vision seront utilisés. Ces systèmes ont été entièrement conçus et réalisés par Loïca Avanthey et son collègue Laurent Beaudoin.



Ryujin, le drone sous-marin, en mer et en fosse de plongée (à gauche) et Kraken, le drone de surface en mer et en lac (à droite).

Leur originalité est d’être très petits, très agiles, très facilement configurables et déployables sans logistique sur le terrain. Ces avantages leur permettent d’être projetables très facilement sur un lieu d’opération notamment en étant compatibles avec tous les moyens de transport. Un autre intérêt est que leur taille et les matériaux utilisés les rendent très difficilement détectables par les moyens conventionnels. Leur coût de construction et leur répliquabilité les rend tout à fait compatibles avec la constitution d’une flottille à un coût raisonné pour une petite équipe de recherche.



Les robots développés sont facilement déployables, duplicables et transportables.

3.3 Programme prévu

3.3.1 Planification des recherches

Le déroulé prévu des travaux scientifiques est le suivant :

- **Première année** : Travaux sur l'architecture communicante en robotique distribuée et sur la collaboration d'USV pour la recherche de cible en 2D. Premiers travaux sur les stratégies d'établissement d'une couverture avec un maillage adaptatif depuis la surface.
- **Deuxième année** : Extension des travaux de maillage adaptatif à la 3D (couple USV/UUV), travaux de collaboration entre un USV et un UUV en situation dynamique, travaux sur la propagation du signal GNSS d'un USV à un UUV.
- **Troisième année** : Travaux sur la minimisation d'erreur de positionnement par point fixe, travaux sur la détection et l'identification embarquées de cibles basées IA.

3.3.2 Planification des expérimentations en conditions opérationnelles

Le déroulé prévu des expérimentations en mer prenant en compte les fenêtres météorologiques (septembre-octobre / juin-juillet) est le suivant :

- **+10 mois** : expérimentation par 2 à 3 USV ; profondeur des sites <15m ; zones pressenties : cap de Nice, baie de Villefranche-sur-Mer ; objectif : tests des premiers algorithmes coopératifs contraints à un plan 2D ; application : acquisition des premiers jeux d'images de pipeline avec différents cas de prolongation par segment (dans le prolongement, avec coude, etc.).
- **+13 mois** : expérimentation par 2 à 3 USV ; profondeur des sites <15m ; zones pressenties : cap de Nice, baie de Villefranche-sur-Mer, Saint-Raphaël ; objectif : test des premiers algorithmes de recherche ; applications : ciblage sur le cas de l'épave de la barge de débarquement US 282 de Saint-Raphaël et selon le temps restant, rejeu des scénarii précédents en intégrant le RETEX de la première expérimentation.
- **+ 22 mois** : expérimentation par un couple USV / UUV ; profondeur des sites <30m ; zones pressenties : cap de Nice, baie de Villefranche-sur-Mer ; objectifs : tests des algorithmes coopératifs de navigation et localisation d'un couple de drones hétérogènes en 3D, test des algorithmes de propagation de la localisation de surface ; applications : recherche et localisation d'anomalies ou de cibles sur des fonds de 30 m, recherche et suivi de pipeline avec une composante verticale.
- **+25 mois** : expérimentation par 2 à 3 couples USV / UUV ; profondeur des sites <30m ; zones pressenties : cap de Nice, baie de Villefranche-sur-Mer ; application : localisation et suivi de pipeline, recherche et localisation d'anomalies ou de cibles sur les fonds du cap de Nice.

Entre les expérimentations en mer, des tests de préparation sont prévus dans des lacs et des fosses de plongée en Ile-de-France mais aussi sur la zone du projet Guerledan en partenariat avec l'ENSTA Bretagne (<https://guerledan.ensta-bretagne.fr/>) lors de leurs expérimentations bi-annuelles. Enfin, en marge de ces expérimentations, il est également envisagé de participer en équipe mixte chercheurs et étudiants aux *RAMI Marine Robots competitions* (<https://metricsproject.eu/inspection-maintenance/rami-competition/>) organisé au CMRE (OTAN - La Spezia) pour préparer et attirer les nouvelles générations aux défis de la robotique sous-marine.

4 Présentation de l'équipe d'accueil

Cette thèse sera encadrée par M. Uli Fahrenberg et Mme Loïca Avanthey, tous deux membres permanents du laboratoire de recherche de l'EPITA (LRE), de l'école d'ingénieur sous statut privé EPITA, spécialisée dans l'intelligence numérique.

4.1 Courtes biographies

Uli Fahrenberg : Diplômé d'un doctorat de Mathématiques de l'Université d'Aalborg au Danemark en 2005, son sujet de thèse portait sur la topologie algébrique. Il a ensuite travaillé en tant qu'enseignant-chercheur dans la même Université, puis a travaillé comme post-doc à l'Inria Rennes et comme chercheur à l'École polytechnique (l'X) de 2016 à 2021. Titulaire d'une HDR depuis mai 2022, Uli dirige l'équipe de recherche « Automates et applications » de l'EPITA. Uli s'intéresse à la robotique distribuée depuis 2018. Au sein de ses projets de recherche à l'X, il a noué des contacts avec l'ENSTA Bretagne et avec Kopadia (entreprise de services innovante dans les domaines de l'inspection industrielle sous-marines et les mesures d'impact environnemental, à l'époque une startup) avec lesquels il a travaillé sur les visions de développement à court terme de la robotique distribuée.

Loïca Avanthey : Ingénieure en informatique, électronique et automatique (2011) et Docteure en Signal & Images de Télécom ParisTech (2016) sur un financement de thèse 100% DGA (nominée parmi les meilleures thèses de l'EDITE), Loïca est enseignante-chercheuse à l'EPITA depuis 2017. Co-responsable de l'axe robotique de l'EPITA, sa thématique de recherche principale est la cartographie sous-marine haute précision assistée par des robots autonomes. Plongeuse professionnelle, elle s'occupe aussi des opérations terrain impliquant ces robots et leurs capteurs. Elle co-organise avec l'Université de Toulon les colloques d'expérimentations sous-marines (Submeeting) pour la cartographie qui ont lieu à Saint-Raphaël dans le cadre du GDR Robotique et a remporté plusieurs prix à différentes éditions de concours européens de robotique sous-marine de référence (SAUC-E, ERL Emergency Tournament) sur la base de l'OTAN de La Spezia.

4.2 Références principales de l'équipe d'accueil

- Alessandro Abate, Uli Fahrenberg, Martin Fränzle, *Special Issue on Distributed Hybrid Systems*, dans *Leibniz Transactions on Embedded Systems*, volume 8, numéro 2, 2022, <https://doi.org/10.4230/LITES.8.2.0>
- L. Beaudoin, L. Avanthey, C. Bunel, C. Villard *Automatically Guided Selection of a Set of Underwater Calibration Images*, dans *Journal of Marine Science and Engineering (MDPI)*, volume 10, numéro 6, pages 1-15, 2022, <https://doi.org/10.3390/jmse10060741>
- Uli Fahrenberg, *A Generic Approach to Quantitative Verification*, Thèse d'habilitation à diriger les recherches, Université Paris-Saclay, 2022
- Giovanni Bacci, Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim G. Larsen, Nicolas Markey, Pierre-Alain Reynier, *Optimal and robust controller synthesis using energy timed automata with uncertainty*, dans *Formal Aspects of Computing*, volume 33, numéro 1, pages 3-25, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00165-020-00521-4>
- Uli Fahrenberg, Christian Johansen, Georg Struth, Krzysztof Ziemiański, *Languages of higher-dimensional automata*, dans *Mathematical Structures in Computer Science*, volume 31, numéro 5, pages 575-613, 2021, <https://doi.org/10.1017/S0960129521000293>
- L. Beaudoin, L. Avanthey, C. Villard, *Porting Ardupilot to ESP32 : Towards a universal Open-Source Architecture for Light, Agile and Easily Replicable Multi-Domains Mapping Robots*, dans *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Archives (ISPRS)*, Nice, France, 2020, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-933-2020>
- L. Avanthey, L. Beaudoin, C. Villard, S. Mellouk, R. Treglia, *Synchronization of PiCam Cameras for Three-Dimensional Study of Dynamic Multi-Domains Natural Scenes*, dans *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annals (ISPRS)*, Nice, France, 2020, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-277-2020>

- L. Beaudoin, L. Avanthey, *Underwater field Equipment of a Network of Landmarks Optimized for Automatic Detection by AI*, dans International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Hawaii, USA, 2020, <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323589>
- Patricia Bouyer, Uli Fahrenberg, Kim Guldstrand Larsen, Nicolas Markey, Joël Ouaknine, James Worrell, *Model Checking Real-Time Systems* (chapitre), dans Handbook of Model Checking, pages 1001-1046, 2018, ISBN : 978-3-319-10574-1
- L. Avanthey, L. Beaudoin, A. Gademer, M. Roux, *Tools to Perform Local Dense 3D Reconstruction of Shallow Water Seabed*, dans Sensors, volume 16, numéro 5, pages 712-742, 2016, <https://doi.org/10.3390/s16050712>

Références

- [AB20] Loïca Avanthey and Laurent Beaudoin. Methodology for Underwater Calibration in Near Real Time : Focus on Detection Optimized by AI and Selection of Calibration Patterns. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [IEEE]*, pages 1576–1579, 2020. doi:<https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324519>.
- [BA20] Laurent Beaudoin and Loïca Avanthey. Underwater Field Equipment of a Network of Landmarks Optimized for Automatic Detection by AI. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [IEEE]*, pages 1572–1575, 2020. doi:<https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323589>.
- [BABV22] Laurent Beaudoin, Loïca Avanthey, Corentin Bunel, and Charles Villard. Automatically Guided Selection of a Set of Underwater Calibration Images. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE) [MDPI]*, 10(6) :1–15, 2022. doi:<https://doi.org/10.3390/jmse10060741>.
- [BAV20] Laurent Beaudoin, Loïca Avanthey, and Charles Villard. Porting Ardupilot to ESP32 : Towards a Universal Open-Source Architecture for Light, Agile and Easily Replicable Multi-Domains Mapping Robots. In *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Archives [ISPRS]*, volume XLIII-B2-2020, page 933–939, 2020. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-933-2020>.
- [Bou01] Patrick M. Bourgeois, Brian S. McDowell. Uuv teams for deep water operations. Defense technical information center (dtic) document, Naval Research Laboratory - Marine Geosciences Division, 2001.
- [BZ22] Oladayo Bello and Sherali Zeadally. Internet of underwater things communication : Architecture, technologies, research challenges and future opportunities. *Ad Hoc Networks*, 135 :102933, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102933>.
- [CGP09] Jurek Czyzowicz, Leszek Gasieniec, and Andrzej Pelc. Gathering few fat mobile robots in the plane. *Theoretical Computer Science*, 410(6-7) :481–499, 2009. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tcs.2008.10.005>.
- [dMQ15] Javier de Lope, Darío Maravall, and Yadira Quiñonez. Self-organizing techniques to improve the decentralized multi-task distribution in multi-robot systems. *Neurocomputing*, 163 :47–55, 2015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.08.094>.
- [DPP20] Xavier Défago, Maria Potop-Butucaru, and Philippe Raipin Parvédy. Self-stabilizing gathering of mobile robots under crash or byzantine faults. *Distributed Computing*, 33(5) :393–421, 2020. doi:[10.1007/s00446-019-00359-x](https://doi.org/10.1007/s00446-019-00359-x).
- [DPT19] Xavier Défago, Maria Potop-Butucaru, and Sébastien Tixeuil. Fault-tolerant mobile robots. In Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, and Nicola Santoro, editors, *Distributed Computing by Mobile Entities, Current Research in Moving and Computing*, volume 11340 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 234–251. Springer, 2019. doi:[10.1007/978-3-030-11072-7_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11072-7_10).
- [FPS12] Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, and Nicola Santoro. *Distributed Computing by Oblivious Mobile Robots*. Synthesis Lectures on Distributed Computing Theory. Springer Cham, 2012. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-031-02008-7>.

- [FPS19] Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, and Nicola Santoro. *Distributed Computing by Mobile Entities, Current Research in Moving and Computing*, volume 11340 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Cham, 2019. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-11072-7>.
- [Gut22] Álvaro Gutiérrez. Recent advances in swarm robotics coordination : Communication and memory challenges. *Applied Sciences*, 12(21), 2022. doi:<https://doi.org/10.3390/app122111116>.
- [JKDW01] Luc Jaulin, Michel Kieffer, Olivier Didrit, and Éric Walter. *Applied Interval Analysis*. Springer London, 2001. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0249-6>.
- [Koz12] Dmitry N. Kozlov. Gathering identical autonomous systems on a circle using stigmergy. *Distributed Computing*, 25(6) :461–472, 2012. doi:[10.1007/s00446-012-0178-4](https://doi.org/10.1007/s00446-012-0178-4).
- [Mar09] Sonia Martínez. Practical multiagent rendezvous through modified circumcenter algorithms. *Automatica*, 45(9) :2010–2017, 2009. doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.05.013>.
- [PBO03] Henry Van Dyke Parunak, Sven Brueckner, and James Odell. *Swarming Coordination of Multiple UAV's for Collaborative Sensing*. septembre 2003. doi:<https://doi.org/10.2514/6.2003-6525>.
- [QMdL12] Yadira Quiñonez, Darío Maravall, and Javier de Lope. Application of self-organizing techniques for the distribution of heterogeneous multi-tasks in multi-robot systems. In *2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, pages 66–71, 2012. doi:<https://doi.org/10.1109/CERMA.2012.19>.
- [RCP78] Claude Rives, Chenz, and Christian Pétron. *La prise de vue sous-marine*. Fillipacchi, 1978.
- [Sic08] B. Siciliano. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2008.
- [Sin09] P. W. Singer. *Wired for War : The Robotics Revolution and Conflict in the Twenty-first Century*. A Penguin Book. Technology/Military Science. Penguin Press, 2009.
- [SR10] Dimitrios Skarlatos and Margarita Rova. Photogrammetric approaches for the archaeological mapping of the mazotos shipwreck. In *International Conference on Science and Technology In Archaeology and Conservation (STIAC)*, décembre 2010.
- [YJC13] Zhi Yan, Nicolas Jouandeau, and Arab Ali Cherif. A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(12), 2013. doi:<https://doi.org/10.5772/57313>.