

Approche Intégrée de Cartographie et de Freinage Adaptatif pour la Robotique de Secours Autonome

Bianca-Gabriela Dobre

Département d'Ingénierie en Langues
Étrangères, Faculté d'Ingénierie en
Langues Étrangères
Université Nationale de Science et
Technologie POLITEHNICA Bucarest
Bucarest, Roumanie
bianca.dobre2407@upb.ro

Maria-Iuliana Dascălu

Département d'Ingénierie en Langues
Étrangères, Faculté d'Ingénierie en
Langues Étrangères
Université Nationale de Science et
Technologie POLITEHNICA Bucarest
Bucarest, Roumanie
maria.dascalu@upb.ro

Beatrice-Iuliana Uța

Département d'Ingénierie en Langues
Étrangères, Faculté d'Ingénierie en
Langues Étrangères
Université Nationale de Science et
Technologie POLITEHNICA Bucarest
Bucarest, Roumanie
beatrice.uta@upb.ro

Constantin-Viorel Marian

Département d'Ingénierie en
Langues Étrangères, Faculté
d'Ingénierie en Langues Étrangères
Université Nationale de Science et
Technologie POLITEHNICA Bucarest
Bucarest, Roumanie
constantin.marian@upb.ro

Résumé— Dans le présent article, nous allons aborder la conception et la mise en œuvre d'un système robotique innovant. Ce système a été spécifiquement développé pour répondre à deux objectifs majeurs: d'une part, il est destiné à la cartographie en temps réel, et d'autre part, il a été conçu pour assurer une navigation sécurisée dans des zones sinistrées. La solution proposée s'appuie sur l'intégration de capteurs LiDAR et de modules de proximité, associés à des algorithmes de localisation et de cartographie simultanées (SLAM), permettant de générer des représentations précises de l'environnement en conditions instables. Outre la cartographie, le système intègre un dispositif de freinage adaptatif, basé sur la fusion de multiples capteurs et l'analyse du risque, qui modère l'efficacité de la réaction en fonction de la nature et de la dynamique des obstacles. Dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité des interventions des équipes de secours, l'objectif de cette étude est de fournir des cartes actualisées ainsi qu'un système de navigation améliorée. Ces outils permettent de réduire les risques potentiels et d'optimiser les procédures d'intervention. Les résultats de l'étude mettent en évidence la capacité du système à assurer une localisation fiable, à identifier différents types d'obstacles et à appliquer des décisions de freinage proportionnées dans des environnements dynamiques.

Mots-clés—robotique, SLAM, LiDAR, freinage, obstacles, réponse aux catastrophes, navigation autonome

I. INTRODUCTION

Les catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre, les incendies ou les inondations chaotiques résultent généralement en des endroits remplis de débris, une faible visibilité et des structures brisées. Souvent, leur évaluation manuelle mène à des méthodes de reconnaissance classiques très lourdes et dangereuses. L'intégration de mécanismes de perception avancée, tels que la détection d'objets, constitue une étape essentielle pour renforcer l'efficacité et la sécurité des opérations de secours robotisées [1]. Les robots équipés de cartographie avancée, en revanche, peuvent accomplir la mission de manière sûre et rapide [2].

Deux problèmes concurrents se posent. Tout d'abord, le robot doit se déplacer tout en créant simultanément une carte fiable en temps réel. En même temps, le robot doit maintenir une distance confortable avec des obstacles imprévisibles. L'utilisation de lidar et de la localisation et cartographie

simultanées, ainsi que la construction d'un cadre adaptatif, produisent les résultats requis. Le lidar mesure en millimètres avec une lumière ininterrompue, ce qui est utile dans de nombreuses situations [3]. Avec ces capteurs, un robot est capable de réaliser une couverture complète d'une zone désignée.

Dans ce travail, on propose un système robotique basé sur l'intégration du LiDAR, du SLAM et d'un mécanisme de freinage adaptatif, contrôlé par une carte Raspberry Pi. L'objectif est d'offrir aux équipes de secours un outil capable de cartographier rapidement des zones sinistrées, tout en réduisant les risques de collision grâce à une gestion intelligente des obstacles.

II. ÉTAT DE L'ART

La navigation autonome en robotique mobile repose sur l'interaction entre perception, localisation et planification. Alors que les premières approches s'appuyaient sur des cartes statiques préprogrammées, les systèmes modernes construisent et mettent à jour en continu des représentations probabilistes de l'environnement en temps réel, grâce aux avancées en robotique probabiliste, en traitement du signal et en intelligence artificielle [4][5].

A. Fondements du SLAM

Le SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) constitue un élément central de la navigation autonome. Il permet au robot d'estimer simultanément sa position et de générer une carte exploitable de l'environnement, même à partir de données capteurs incertains [5]. Ces estimations reposent sur des approches probabilistes, telles que les filtres bayésiens ou les méthodes d'optimisation [6][7].

La problématique du SLAM peut être résumée par trois questions fondamentales [8] : déterminer la position du robot, comprendre l'environnement à partir des capteurs, et planifier un déplacement sûr vers un objectif. Ces aspects se traduisent par trois fonctions clés : la cartographie, la localisation et la planification [5], illustrant le rôle du SLAM comme approche intégrée de la perception et de la prise de décision.

B. Représentation de l'environnement

On distingue principalement deux paradigmes pour modéliser l'espace [9]. La première repose sur les cartes métriques, telles que les grilles d'occupation probabilistes, où chaque cellule est associée à une probabilité d'être libre ou occupée. Le second est celui des cartes topologiques, qui représentent l'environnement sous forme de graphes reliant différents lieux entre eux. À ces approches classiques s'ajoutent des méthodes plus récentes [6]. Parmi celles-ci figurent les cartes multirésolutions, qui ajustent le niveau de précision en fonction des zones d'intérêt afin de réduire la charge de calcul, ou encore les cartes sémantiques. Ces dernières enrichissent la représentation en attribuant une catégorie à chaque élément détecté (par exemple mur, obstacle ou victime), ce qui rend la carte utile pour la navigation autonome et pour la prise de décision humaine.

C. Apports récents du SLAM

Le SLAM est aujourd'hui appliqué à de nombreux domaines, notamment les véhicules autonomes, les drones, la réalité augmentée et l'agriculture de précision [10]. Les tendances actuelles incluent le SLAM multi-robots et distribué [11], le SLAM visuo-lidar combinant caméras et LiDAR [12], ainsi que les approches intégrant l'apprentissage profond [8]. Les systèmes basés sur le LiDAR et le SLAM sont largement étudiés. Des méthodes telles que LOAM [13] et LeGO-LOAM [14] ont démontré une grande précision pour la cartographie et la localisation en temps réel, tandis que les travaux de synthèse, notamment celui de Cadena et al. [15], mettent en évidence l'évolution vers des systèmes multi-capteurs plus robustes.

Dans le contexte de la robotique de secours, Murphy [16] souligne toutefois que la fiabilité de la cartographie doit être complétée par des mécanismes de sécurité capables de gérer des environnements dynamiques et imprévisibles. Or, la majorité des travaux se concentre sur la qualité de la carte et de la localisation, sans intégrer explicitement la prise de décision liée à la navigation sécurisée.

L'approche proposée se distingue par l'intégration d'un mécanisme de freinage adaptatif, directement couplé à la cartographie SLAM et à une typologie des obstacles issue de la fusion de capteurs, afin de renforcer la sécurité et la fluidité de la navigation autonome en contexte de secours.

III. MÉTHODES ET IMPLÉMENTATION

Le système proposé repose sur une plateforme robotique terrestre contrôlée par un Raspberry Pi 4B et intégrant plusieurs capteurs complémentaires. Il combine la cartographie temps réel par SLAM avec un mécanisme de freinage adaptatif capable d'ajuster la réaction selon la nature et la distance des obstacles. Pour la perception, le robot utilise un LiDAR RPLIDAR A1M8 pour la vision globale, des capteurs ultrasoniques HC-SR04 et des modules ToF VL53L0X pour la détection de proximité, ainsi qu'un MPU6050 fournissant des données dynamiques. L'ensemble est intégré sur un châssis mobile à quatre roues motorisé et contrôlé par un module L298N, sous ROS Noetic (Ubuntu 20.04). Sur le plan logiciel, la méthodologie repose sur une série de nœuds ROS interconnectés. Les données capteurs sont synchronisées, filtrées puis fusionnées afin de générer une représentation cohérente de l'environnement.

La Fig. 1 illustre la logique globale du système : les capteurs recueillent l'information sur l'environnement, qui est

ensuite fusionnée et exploitée par le SLAM pour construire une carte et localiser le robot. À partir de cette base, le système analyse les obstacles, évalue le risque de collision et transforme cette analyse en décisions concrètes, comme le freinage adaptatif et la planification de trajectoire, afin d'assurer une navigation sûre et efficace.

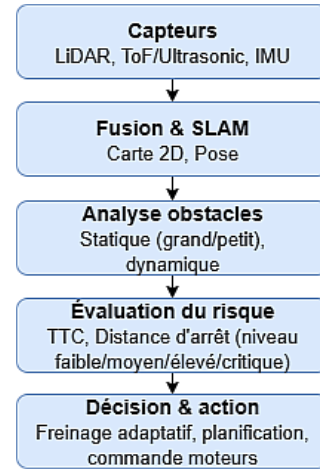


Fig. 1. Architecture fonctionnelle du système

A. Cartographie et localisation

La cartographie et la localisation en temps réel constituent la première fonction clé du système, rendues possibles par l'utilisation du LiDAR RPLIDAR A1M8 et de l'algorithme Hector SLAM sous ROS Noetic. Le RPLIDAR A1M8 repose sur un principe de triangulation laser : il émet un faisceau infrarouge réfléchi par les surfaces environnantes, permettant de mesurer en temps réel la distance et l'angle des points détectés. Grâce à son mécanisme de rotation, il assure une couverture à 360° et fournit plus de 2 000 mesures par seconde. Les données ainsi acquises sont publiées sur le topic /scan via le nœud rplidar_ros, générant un nuage de points représentant l'environnement immédiat du robot (Fig. 2).

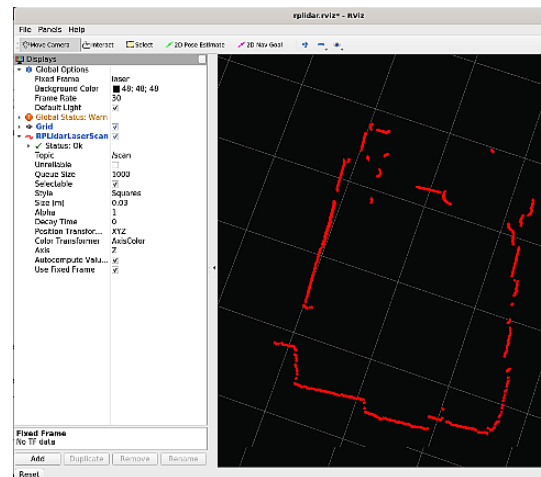


Fig. 2. Cartographie de l'environnement.

Ces informations alimentent l'algorithme Hector SLAM, qui construit en continu une carte 2D tout en estimant simultanément la position du robot. Chaque nouveau scan est comparé aux précédents afin d'ajuster la localisation et de corriger dynamiquement la carte, garantissant ainsi une adaptation constante dans des environnements instables, tels que les zones sinistrées.

Afin d'assurer la fiabilité de la cartographie, une phase préalable de configuration et de calibration du LiDAR est

réalisée. Celle-ci comprend la vérification de la connectivité du capteur, l'installation des pilotes nécessaires, le réglage des paramètres de balayage (fréquence, angle et résolution) ainsi que des opérations de filtrage visant à réduire le bruit lié aux réflexions parasites. Ces étapes permettent d'optimiser la densité du nuage de points et la précision des données exploitées par Hector SLAM.

L'implémentation logicielle suit une séquence standard sous ROS : initialisation de l'environnement avec roscore, activation du LiDAR via rplidar_ros, puis lancement de Hector SLAM, qui publie la carte sur le topic /map et permet sa visualisation dans RViz. Comme illustré à la Fig. 3, la carte générée affiche les zones libres, les obstacles et la trajectoire du robot, offrant un retour visuel essentiel pour la validation de la cohérence de la cartographie et la supervision des déplacements.

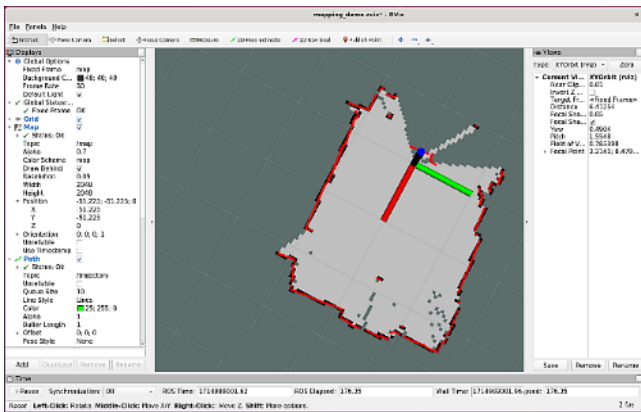


Fig. 3. La carte SLAM.

En complément du LiDAR, le capteur MPU6050 fournit des mesures d'accélération et de vitesse angulaire. Ces données, fusionnées avec les scans laser, permettent de stabiliser l'estimation de la pose du robot et de limiter les dérives lors de pertes temporaires de signal ou en présence de surfaces difficiles à mesurer.

B. Typologie des obstacles

La cartographie offre une vision d'ensemble de l'environnement, mais elle ne permet pas à elle seule d'assurer une navigation sûre, car elle ne distingue pas entre une paroi massive, un petit objet au sol ou un obstacle mobile. Or, ces situations exigent des réactions très différentes. Pour répondre à ce défi, une étape de typologie des obstacles a été intégrée, fondée sur l'analyse conjointe des données du LiDAR et des capteurs de proximité (ToF et ultrasoniques). L'objectif est d'éviter un traitement uniforme de toutes les détections et d'adapter la réponse du robot selon la nature de l'objet rencontré.

Trois catégories principales sont ainsi distinguées :

- 1) Obstacles statiques de grande taille – Ils apparaissent comme des surfaces continues et denses dans le nuage de points LiDAR, confirmées par des mesures ToF homogènes. Le robot les reconnaît comme des barrières solides (murs, amas de débris) qu'il doit contourner ou qui imposent un arrêt.
- 2) Obstacles statiques de petite taille – Leur empreinte réduite dans le nuage LiDAR peut être confondue avec du bruit, mais les capteurs ToF et ultrasoniques, sensibles aux variations locales, permettent de confirmer leur présence et d'éviter leur négligence par le SLAM classique.
- 3) Obstacles dynamiques – Leur mobilité est révélée par la translation de clusters dans les balayages LiDAR successifs,

complétée par des variations progressives de distance mesurées par les capteurs ToF. Cette observation temporelle identifie leur déplacement et permet d'estimer leur vitesse relative, comme lorsqu'une personne traverse la trajectoire du robot.

C. Évaluation du risque et freinage adaptatif

Après avoir identifié la nature de l'obstacle, le système doit estimer le degré de danger qu'il représente. Cette analyse est essentielle, car la présence d'un mur à plusieurs mètres n'implique pas la même réaction que celle d'un petit objet à proximité immédiate ou d'un élément en mouvement rapide. Leur calcul repose sur des relations classiques de la cinématique, qui permettent d'estimer à la fois le délai restant avant un impact et la distance minimale nécessaire pour immobiliser le robot.

Le premier indicateur, le temps avant collision, traduit la dimension temporelle : un délai long correspond à une situation confortable, alors qu'un délai court signale une urgence nécessitant une réaction rapide. Le second, la distance d'arrêt, exprime la dimension spatiale : si la distance disponible est supérieure à la distance nécessaire pour freiner, un arrêt contrôlé reste possible ; dans le cas contraire, il faut engager un freinage d'urgence. L'évaluation du risque combine donc ces deux paramètres : le TTC décrit la dimension temporelle, tandis que la distance d'arrêt exprime la dimension spatiale. Ensemble, ils fournissent une vision complète de la situation.

Pour traduire cette analyse en comportements concrets, le système définit quatre niveaux de risque, chacun associé à une réponse de freinage spécifique, modulée par la force de freinage appliquée :

- 1) Un risque faible correspond à un contexte où l'obstacle est encore éloigné, avec un TTC élevé et une distance largement supérieure à la distance d'arrêt. Dans ce cas, aucune action brutale n'est nécessaire (la force appliquée est nulle) ; le robot conserve sa vitesse de croisière et n'effectue que de petites corrections de trajectoire pour optimiser son déplacement.
- 2) Lorsque le robot entre dans une zone où la marge de sécurité commence à se réduire, la situation est classée en risque moyen. Le TTC diminue, mais reste encore confortable. Pour éviter que la situation n'évolue vers un danger, le système déclenche une décélération progressive, réduisant la vitesse de manière fluide, correspondant à une force de freinage faible, afin d'augmenter la distance disponible pour réagir.
- 3) Un risque élevé survient lorsque le TTC devient court et que la distance restante se rapproche de la distance d'arrêt. À ce stade, la probabilité d'une collision est forte si le robot ne réagit pas rapidement. Le système applique alors un freinage puissant et rapide, représentant une force élevée, dont la priorité est d'arrêter le robot dans un délai réduit tout en maintenant un certain contrôle directionnel.
- 4) Un risque critique correspond à une situation d'urgence où la distance disponible est inférieure à la distance d'arrêt ou où le TTC atteint un seuil minimal. Le système déclenche immédiatement un arrêt d'urgence, mobilisant 100 % de la force de freinage et coupant toute propulsion. Ce mécanisme agit comme un filet de sécurité, garantissant que le robot ne s'engage pas dans une collision inévitable.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le système développé a démontré sa capacité à combiner efficacement la cartographie en temps réel et la gestion

intelligente des obstacles. L'utilisation du LiDAR, associée à l'algorithme Hector SLAM, permet de générer des cartes 2D précises et régulièrement mises à jour, reflétant fidèlement la structure de l'environnement exploré. Ces cartes conservent une cohérence satisfaisante même dans des conditions instables. Sur des parcours courts à moyens, l'erreur de localisation observée reste inférieure à une dizaine de centimètres, confirmant la fiabilité du processus de localisation dans le cadre des scénarios testés. La visualisation dans RViz met clairement en évidence les zones libres, les obstacles fixes ainsi que la trajectoire du robot, facilitant la supervision et la validation du comportement global du système.

Au-delà de la cartographie, le système se distingue par l'intégration d'une typologie des obstacles. L'analyse conjointe des données issues du LiDAR, des capteurs ultrasoniques et des modules ToF permet de différencier les obstacles statiques de grande taille, les obstacles statiques de petite taille et les obstacles dynamiques. Les premiers apparaissent comme des surfaces continues et stables dans le nuage de points, les seconds comme des objets ponctuels confirmés par les mesures de proximité, tandis que les obstacles dynamiques sont identifiés à partir de la variation temporelle des distances mesurées. Cette distinction fournit une information qualitative que le SLAM seul ne permet pas d'obtenir et constitue une étape essentielle pour la prise de décision.

L'évaluation du risque, fondée sur le calcul du temps avant collision et de la distance d'arrêt, transforme ces informations perceptives en actions concrètes. Les quatre niveaux de risque définis (faible, moyen, élevé et critique) se traduisent par une modulation progressive de la force de freinage, allant de l'absence d'action à l'arrêt d'urgence. En pratique, la distance d'arrêt mesurée varie d'environ 25 cm lors d'un freinage d'urgence à 50–60 cm pour une décélération progressive, en fonction du niveau de risque estimé et de la vitesse du robot. Cette gradation permet de limiter les arrêts brusques inutiles, de préserver la fluidité de la navigation et de renforcer la sécurité face aux situations critiques.

V. CONCLUSIONS

Le travail présenté a permis de concevoir et de décrire un système robotique intégrant simultanément la cartographie en temps réel et un mécanisme de freinage adaptatif. L'utilisation du LiDAR couplé à l'algorithme Hector SLAM fournit une base robuste pour la localisation et la génération de cartes 2D précises, démontrant la fiabilité de cette approche dans des environnements instables. L'intégration de capteurs complémentaires, tels que les modules ToF et les capteurs ultrasoniques, enrichit la perception du robot en renforçant la détection de proximité et en permettant de distinguer différents types d'obstacles. Cette typologie, associée au calcul du temps avant collision et de la distance d'arrêt, permet une évaluation du risque utilisée pour moduler progressivement la force de freinage.

Les résultats obtenus confirment la pertinence de cette approche pour accroître la sécurité et la fluidité de la navigation dans des environnements complexes, en particulier dans un contexte de catastrophe où les risques pour les équipes humaines sont élevés. Le robot ne se limite plus à la simple

cartographie de l'espace, mais intègre également une capacité de prise de décision fondée sur une analyse combinée de la perception et du risque, renforçant ainsi sa robustesse face aux situations imprévues.

Cependant, certaines limites subsistent. La précision des mesures fournies par les capteurs ToF peut être affectée par des surfaces fortement réfléchissantes ou par certaines conditions environnementales, et l'efficacité globale du système dépend en partie de la calibration fine des seuils de risque utilisés pour le freinage adaptatif. De plus, l'approche actuelle repose sur une représentation bidimensionnelle de l'environnement. Bien que suffisante pour de nombreux scénarios testés, elle pourrait être enrichie par l'intégration d'une perception tridimensionnelle et de techniques de vision par ordinateur, afin d'identifier plus finement la nature des objets et d'améliorer la prise de décision dans des environnements encore plus complexes.

RÉFÉRENCES

- [1] I. L. Pletea, B. G. Dobre, and C. V. Marian, "Object Recognition and Detection System for Robot-Assisted Intervention Teams," presented at the SmartBlock4Health Conf., University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, June 2025, presented in press.
- [2] R. R. Murphy, *Disaster Robotics*. Cambridge, MA: MIT Press, 2014.
- [3] J. Zhang and S. Singh, "LOAM: Lidar odometry and mapping in real time," in *Proc. Robot.: Sci. Syst. Conf. (RSS)*, Berkeley, CA, USA, July 2014.
- [4] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic Robotics*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
- [5] M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. F. Durrant-Whyte, M. Csorba, "A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 17, no. 3, pp. 229–241, June 2001.
- [6] C. Cadena, et al., "Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 32, no. 6, pp. 1309–1332, Dec. 2016.
- [7] G. Grisetti, C. Stachniss, W. Burgard, "Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, no. 1, pp. 34–46, Feb. 2007.
- [8] J. Engel, V. Koltun, and D. Cremers, "Direct Sparse Odometry," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2018.
- [9] B. G. Dobre, I. L. Pletea, and C. V. Marian, "Real Time Mapping System for Emergency Rescue Teams: Reduce Risks and Improve Response Time," presented at the SmartBlock4Health Conf., University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, June 2025, presented in press.
- [10] T. Shan, B. Englot, "LeGO-LOAM: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, Madrid, Spain, Oct. 2018, pp. 4758–4765.
- [11] A. Cunningham, et al., "DDF-SAM: Fully distributed SLAM using constrained factor graphs," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, May 2013, pp. 2994–3001.
- [12] R. C. Robu, A. P. Cioponea, and C. V. Marian, "Enhancing Navigation for the Visually Impaired Persons Using 3D Scanning with Stereo Cameras," presented at the SmartBlock4Health Conf., University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, June 2025, presented in press.
- [13] J. Zhang and S. Singh, "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time," *Robotics: Science and Systems*, 2014.
- [14] T. Shan and B. Englot, "LeGO-LOAM: Lightweight and Ground-Optimized Lidar Odometry and Mapping," *IEEE/RSJ IROS*, 2018.
- [15] C. Cadena et al., "Past, Present, and Future of SLAM," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, 2016.
- [16] R. R. Murphy, *Disaster Robotics*, MIT Press, 2014.