

© International Baccalaureate Organization 2024

All rights reserved. No part of this product may be reproduced in any form or by any electronic or mechanical means, including information storage and retrieval systems, without the prior written permission from the IB. Additionally, the license tied with this product prohibits use of any selected files or extracts from this product. Use by third parties, including but not limited to publishers, private teachers, tutoring or study services, preparatory schools, vendors operating curriculum mapping services or teacher resource digital platforms and app developers, whether fee-covered or not, is prohibited and is a criminal offense.

More information on how to request written permission in the form of a license can be obtained from <https://ibo.org/become-an-ib-school/ib-publishing/licensing/applying-for-a-license/>.

© Organisation du Baccalauréat International 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de ce produit ne peut être reproduite sous quelque forme ni par quelque moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris des systèmes de stockage et de récupération d'informations, sans l'autorisation écrite préalable de l'IB. De plus, la licence associée à ce produit interdit toute utilisation de tout fichier ou extrait sélectionné dans ce produit. L'utilisation par des tiers, y compris, sans toutefois s'y limiter, des éditeurs, des professeurs particuliers, des services de tutorat ou d'aide aux études, des établissements de préparation à l'enseignement supérieur, des fournisseurs de services de planification des programmes d'études, des gestionnaires de plateformes pédagogiques en ligne, et des développeurs d'applications, moyennant paiement ou non, est interdite et constitue une infraction pénale.

Pour plus d'informations sur la procédure à suivre pour obtenir une autorisation écrite sous la forme d'une licence, rendez-vous à l'adresse <https://ibo.org/become-an-ib-school/ib-publishing/licensing/applying-for-a-license/>.

© Organización del Bachillerato Internacional, 2024

Todos los derechos reservados. No se podrá reproducir ninguna parte de este producto de ninguna forma ni por ningún medio electrónico o mecánico, incluidos los sistemas de almacenamiento y recuperación de información, sin la previa autorización por escrito del IB. Además, la licencia vinculada a este producto prohíbe el uso de todo archivo o fragmento seleccionado de este producto. El uso por parte de terceros —lo que incluye, a título enunciativo, editoriales, profesores particulares, servicios de apoyo académico o ayuda para el estudio, colegios preparatorios, desarrolladores de aplicaciones y entidades que presten servicios de planificación curricular u ofrezcan recursos para docentes mediante plataformas digitales—, ya sea incluido en tasas o no, está prohibido y constituye un delito.

En este enlace encontrará más información sobre cómo solicitar una autorización por escrito en forma de licencia: <https://ibo.org/become-an-ib-school/ib-publishing/licensing/applying-for-a-license/>.

Informatique

Étude de cas : Les robots de sauvetage

A utiliser en mai et novembre 2024

Instructions destinées aux candidats

- Ce livret d'étude de cas est indispensable pour l'épreuve 3 du niveau supérieur.

Scénario

BotPro est une entreprise fabriquant des robots destinés à diverses applications industrielles qui s'est concentrée ces dix dernières années sur la production de robots de sauvetage. Un tel robot facilite les missions de recherche et de sauvetage de personnes à la suite de catastrophes
5 comme un tremblement de terre ou un tsunami. Il peut seconder les équipes de sauvetage en cartographiant des zones affectées et en y effectuant des recherches, en évaluant les dégâts, en enlevant les débris, en assurant le ravitaillement et en évacuant les victimes.

L'année dernière, *BotPro* a envoyé un de ses robots de sauvetage dans une grande usine qui avait subi un incendie. À une autre reprise, le robot a été dispatché dans une usine ravagée par
10 un tremblement de terre. À ces deux occasions, *BotPro* a constaté que le robot de sauvetage avait été moins performant que prévu. Il avait eu en effet des problèmes à s'orienter dans les usines et à trouver l'emplacement exact des survivants.

Le président-directeur général (PDG) de *BotPro* a cherché à établir les raisons de cette mauvaise performance. Il savait que le même robot avait participé au sauvetage de personnes dans un stade
15 qui avait subi des dommages structurels et que cette opération avait été un succès. Alors pourquoi une telle différence ?

Après avoir mené une enquête, il s'est avéré que la différence principale résidait dans l'exactitude et l'intensité du *signal de système de géolocalisation* (en anglais *GPS*, acronyme de *global positioning system*) au sein des usines. L'intensité du signal satellite était insuffisante et
20 occasionnait des erreurs dans le calcul de l'emplacement du robot. De plus, le robot ne connaissait pas l'environnement des usines et les dégâts subis avaient modifié les lieux de telle sorte qu'ils ne correspondaient plus aux plans d'étage existants.

Problèmes à résoudre

Le PDG de *BotPro* a ordonné une refonte du robot de sauvetage afin qu'il puisse explorer,
25 cartographier et inspecter l'intérieur de bâtiments inconnus et endommagés. Il est important que le nouveau robot soit rentable et que sa conception soit axée sur l'élaboration d'algorithmes efficaces qui améliorent les performances du robot et non ses pièces mécaniques.

L'équipe de conception a dressé la liste des problèmes à résoudre :

- 30 **1. Exactitude de la cartographie.** Le robot de sauvetage doit s'orienter dans les bâtiments et fonctionner de manière fiable dans un *environnement GPS dégradé* ou un *environnement privé d'accès GPS*, ainsi qu'en l'absence de cartes précises.
- 2. Orientation dans un environnement inconnu ou évolutif.** Le robot de sauvetage doit pouvoir se déplacer dans un environnement inconnu où les structures auraient été éventuellement endommagées ou modifiées à la suite d'une catastrophe.
- 35 **3. Recherche de survivants.** Le robot de sauvetage doit pouvoir détecter les débris et les personnes dans diverses conditions lumineuses, y compris l'obscurité, surmonter le problème de l'occultation par d'autres objets et reconnaître les objets malgré des déformations.
- 4. Communication.** Le robot de sauvetage doit pouvoir communiquer avec l'équipe de sauvetage située à l'extérieur. Il est possible qu'il doive accéder à de grosses bases de
40 données et qu'il ait la capacité de traitement d'ordinateurs centraux.

Technologies

Le robot de sauvetage doit être capable de se déplacer dans l’environnement. Pour le faire correctement, il a besoin de cartes. La plupart du temps, on utilise les signaux GPS pour l’orientation à découvert, car ils sont précis. Ce n’est pas le cas à l’intérieur.

- 45 L’équipe de conception de *BotPro* a par conséquent besoin de créer une perception visuelle de situation. Elle étudie présentement les techniques de *vision par ordinateur* qui permettrait au robot de sauvetage de cartographier son environnement et de reconnaître des objets nouveaux. Au niveau le plus élémentaire, le robot de sauvetage doit être équipé d’un *capteur odométrique* et d’une caméra.

50 Vision par ordinateur

La vision par ordinateur fait référence aux technologies qui permettent à un appareil de « voir », c’est-à-dire de percevoir l’environnement dans lequel il évolue, notamment les objets statiques et dynamiques.

- 55 Les deux sous-domaines des technologies de vision par ordinateur à l’étude par l’équipe de conception de *BotPro* pour le nouveau robot de sauvetage sont la méthode de *localisation et cartographie visuelles simultanées* (en anglais *vSLAM*, acronyme de *visual simultaneous localization and mapping*) et l’estimation de pose.

Méthode de localisation et cartographie visuelles simultanées (vSLAM)

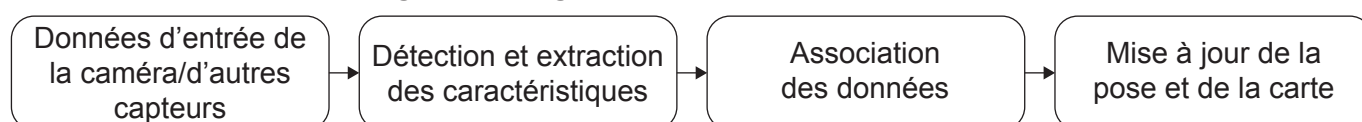
- 60 La méthode de *localisation et cartographie simultanées* (en anglais *SLAM*, acronyme de *simultaneous localization and mapping*) sert à estimer le mouvement capté et à reconstruire la structure d’un environnement inconnu. Il est possible d’effectuer le SLAM au moyen de divers types de capteurs, par exemple avec des caméras pour la collecte de données visuelles et avec un radar, un sonar ou une détection et estimation de la distance par la lumière (en anglais *LIDAR*, acronyme de *light detection and ranging*) pour celle de données non visuelles, tandis que les
- 65 données fondamentales de position sont recueillies à l’aide d’une *centrale inertielle* (en anglais *IMU*, acronyme de *inertial measurement unit*). Une centrale inertielle est composée de plusieurs capteurs, par exemple un accéléromètre, un gyroscope et un magnétomètre, qui collectent les données associées à l’emplacement d’un appareil dans un espace tridimensionnel (3D). Si elle était installée sur le robot de sauvetage, elle en mesurerait les mouvements de translation et
- 70 de rotation.

Les techniques SLAM qui utilisent une caméra comme périphérique de base sont connues sous le nom de *vSLAM* ou SLAM visuel.

- 75 Les algorithmes *vSLAM* vont permettre au robot de sauvetage de concevoir une cartographie de manière dynamique tout en enregistrant son emplacement et orientation à mesure qu’il se déplace dans un environnement nouveau. Le but est d’utiliser les *données de navigation à l’estime* fournies par le capteur odométrique et les images de la caméra comme paramètres en entrée pour effectuer la localisation et pour établir la cartographie.

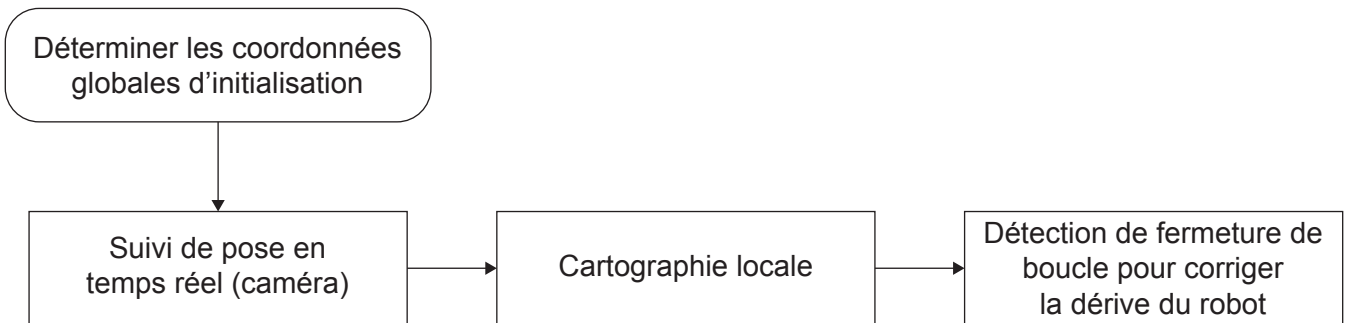
Le *vSLAM* fonctionne dans les espaces intérieurs. Son avantage par rapport au GPS est qu’il offre une plus grande précision. Le diagramme de processus du *vSLAM* est illustré à la **figure 1**.

Figure 1 : diagramme de processus du vSLAM



80 L'algorithme vSLAM se compose de plusieurs modules, dont les trois principaux sont le *suivi*, la *cartographie locale*, et la *fermeture de boucle*. Ils sont illustrés à la **figure 2**.

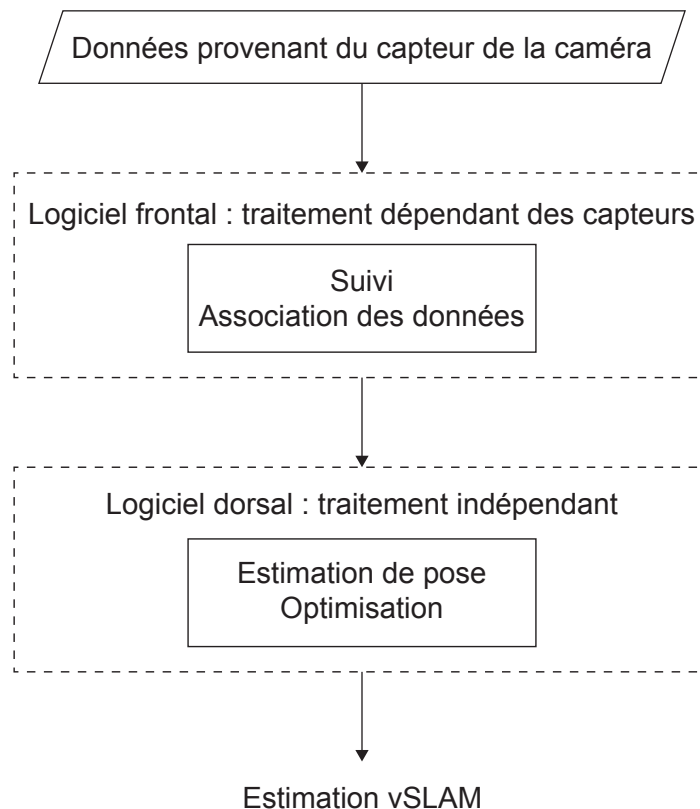
Figure 2 : les trois modules principaux de l'algorithme vSLAM



Le robot de sauvetage utilise les trois modules principaux de l'algorithme vSLAM pour initialiser sa position en fonction des données disponibles, effectuer le suivi de sa progression tout en analysant les nouvelles données recueillies par les capteurs, et cartographier son environnement.

85 Au fur et à mesure du traitement des caractéristiques de la structure endommagée, comme les portes, les coins de mur, et l'emplacement/la pose des personnes, la représentation de l'environnement sera optimisée, ce qui demandera des capacités de calcul informatique importantes (voir **figure 3**). Ainsi, il est nécessaire de trouver un équilibre entre l'efficacité des algorithmes d'optimisation et l'exactitude de la cartographie. Les deux techniques utilisées pour
90 l'*optimisation* sont l'*ajustement de faisceaux* et la *sélection d'images-clés*.

Figure 3 : organigramme d'un processus vSLAM type



Lorsque le suivi échoue, le vSLAM exécute le module de *relocalisation* car le robot de sauvetage doit se resituer. En se déplaçant, il est possible que le robot dérive et se perde. Dans ce cas, l'*optimisation de la carte globale*, qui emploie une technique de fermeture de boucle, est exécutée.

95 L'équipe de conception de *BotPro* a constaté que le vSLAM est un algorithme fiable et peu coûteux, capable de gérer un environnement en évolution. Toutefois, il est important de connaître les performances, les avantages et les imperfections d'un algorithme vSLAM.

L'équipe de conception étudie également la possibilité d'incorporer plusieurs caméras dans le nouveau robot. Si elle met en œuvre cette solution, il est possible qu'un autre schéma d'acquisition d'image soit employé pour mieux utiliser les informations visuelles.

100 Estimation de pose

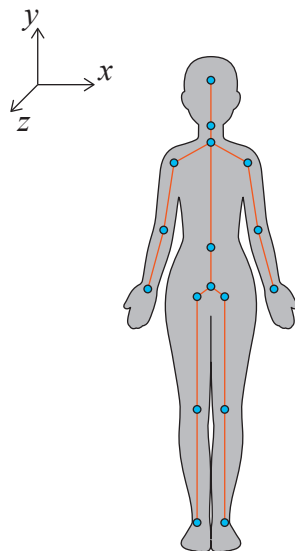
Le nouveau robot de sauvetage de *BotPro* doit connaître la pose d'une personne afin d'effectuer les bonnes opérations de sauvetage. Par conséquent, il doit pouvoir faire une estimation de la configuration des parties du corps humain.

105 L'estimation de pose est une technique de vision par ordinateur qui estime la position et l'orientation d'un objet ou d'une personne par rapport à la caméra dans un espace réel. Généralement, elle identifie et localise les *points d'intérêt* d'un objet ou d'une personne, et effectue le suivi de ces points dans un environnement interactif. Les points d'intérêt sont des emplacements spatiaux ou des points qui définissent ce qui est caractéristique dans une image prise par la caméra.

110 Les objets inanimés étant immobiles, leurs points d'intérêt sont généralement des coins, des arêtes ou d'autres caractéristiques importantes. Les modèles utilisés pour identifier les points d'intérêt des objets inanimés sont appelés *estimation de pose d'instances d'objet rigide* (en anglais, *RPE*, acronyme de *rigid pose estimation*).

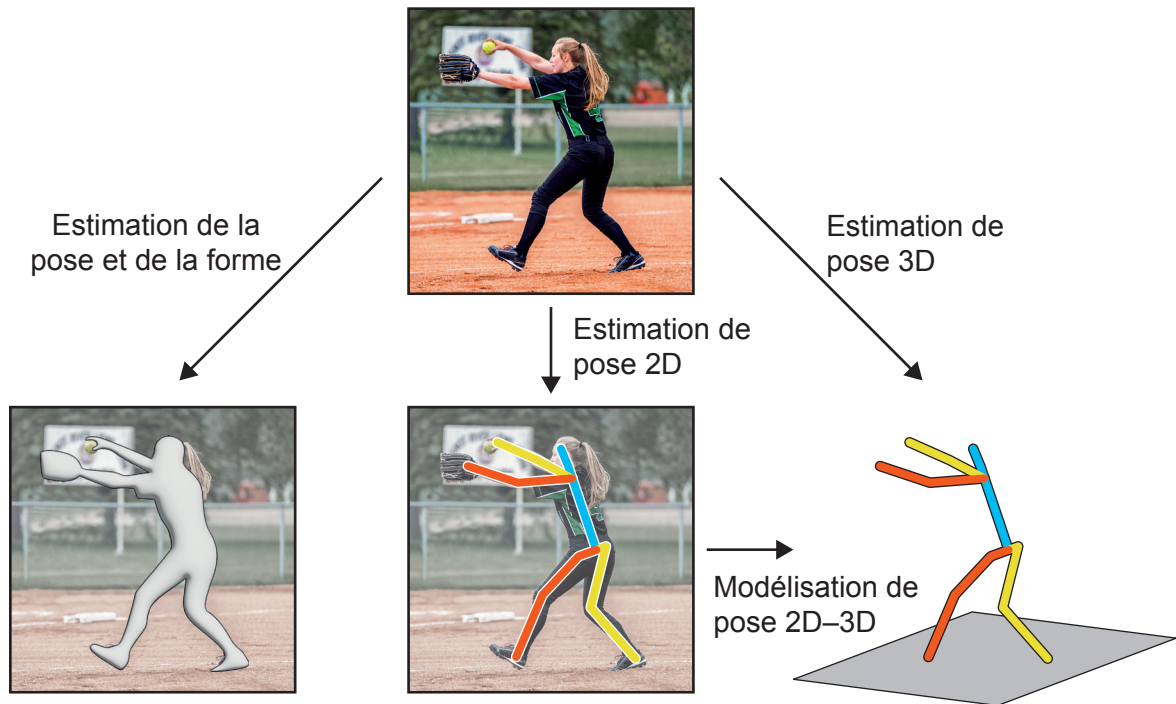
115 Les êtres humains étant mobiles, leurs points d'intérêts sont la tête et les articulations principales comme le cou, les épaules, coudes, poignets et genoux. Les modèles utilisés pour identifier les points d'intérêt de personnes sont appelés *estimation de pose humaine* (en anglais, *HPE*, acronyme de *human pose estimation*) (voir **figure 4**).

Figure 4 : représentation cinématique d'un corps humain



120 Il est possible d'utiliser les points d'intérêt pour décrire la pose d'une personne en deux dimensions. Un lien valide entre deux points s'appelle une paire. L'image bidimensionnelle (2D) des points d'intérêt et des paires est alors transformée en un modèle de pose 3D qui permet de prédire la position exacte d'une personne (voir **figure 5**). Le HPE ne reconnaît pas la personne, uniquement les parties du corps.

Figure 5 : estimation de pose humaine 3D



Les méthodes HPE sont de deux types : bottom-up et top-down.

Les méthodes HPE sont également différentes en fonction du nombre de personnes suivies. L'estimation de pose d'une seule personne est plus simple que celle de plusieurs.

125 La question qui se pose à l'équipe de conception de *BotPro* est : le robot de sauvetage a-t-il besoin d'une image exacte des personnes qu'il recherche et secoure ? Une précision plus élevée impliquerait plus de complexité de calcul, ce qui entrainerait une augmentation du temps d'inférence des opérations de sauvetage en temps réel.

130 Les algorithmes de suivi de la pose rencontrent plusieurs défis, notamment le traitement de l'arrière-plan, l'auto-occultation des parties du corps, le suivi dans diverses conditions de luminosité, ainsi que l'*occultation d'objets* multiples.

Les robots de sauvetage doivent effectuer l'estimation de pose en temps réel, avec ou sans accès à Internet. L'équipe de conception de *BotPro* pourrait donc envisager d'utiliser sur le nouveau robot des appareils périphériques connectés légers qui mettent en œuvre l'*informatique de périphérie*.

135 Le défi serait alors de permettre aux robots de sauvetage de fonctionner avec des appareils à faible puissance.

140 Le nouveau robot doit également pouvoir communiquer de manière bidirectionnelle avec l'équipe de sauvetage humaine. L'équipe de conception de *BotPro* est consciente du fait que l'accès aux données et images du robot de sauvetage doit être restreint aux personnes autorisées dans un souci de sécurité et de confidentialité des données.

Enjeux sociaux et éthiques

L'utilisation de robots de sauvetage présente plusieurs avantages. Par exemple, il est possible de les envoyer dans des endroits trop dangereux pour le personnel de sauvetage. Le but du robot est d'assister l'équipe de sauvetage en leur évitant par conséquent épuisement et traumatismes.

145 De plus, on peut se servir des robots pour recueillir des informations lors de simulations afin de former le personnel de sauvetage en matière de sécurité et d'efficacité au sein des équipes de gestion des catastrophes.

Cependant, la fabrication et l'entretien des robots de sauvetage requièrent beaucoup de ressources, alors même que leurs capacités sont quelquefois réduites. Ainsi, seuls les pays les plus économiquement développés sont capables de consacrer le temps et l'argent nécessaire à leur production et leur utilisation.

Un certain nombre de questions demeurent concernant les aspects sociaux et éthiques de l'utilisation des robots de sauvetage :

- 155 • Doit-on utiliser les robots de sauvetage pour effectuer les tâches trop dangereuses pour le personnel de sauvetage lors d'une catastrophe ou dans un environnement comparablement instable ?
- Les robots sont-ils sans danger ? Qui est responsable si un robot de sauvetage blesse la personne à secourir parce que sa pose a été mal calculée ?
- 160 • Les personnes survivantes laisseront-elles un robot leur porter secours, plutôt qu'un autre être humain bienveillant ?

Approfondissement des recherches

BotPro axerait ses recherches plus approfondies sur les *modèles de fusion de capteurs* afin d'améliorer l'exactitude et la fiabilité des robots.

165 L'entreprise souhaite également fabriquer plusieurs robots de sauvetage qui travailleraient de manière collaborative. Elle devra pour cela identifier les algorithmes qui permettraient la collaboration, non seulement entre les robots, mais également avec leurs opérateurs humains.

Des technologies pouvant être améliorées de manière dynamique et étendues par des nœuds de périphérie, par exemple une infrastructure de réseau intelligente, pourraient servir de dorsale. La possibilité d'être connecté partout et à tout moment donnerait le niveau d'autonomie nécessaire et permettrait également l'échange collectif d'information entre les robots, les êtres humains, l'infrastructure et les applications associées. Toutefois, il est possible que ces technologies requièrent une informatique de périphérie plus avancée ainsi qu'un apprentissage automatique distribué.

175 Un autre aspect identifié par l'équipe de conception de *BotPro* qui améliorerait l'efficacité du sauvetage est la création d'une interface utilisateur graphique (en anglais GUI, acronyme de *graphical user interface*) qui serait capable de cartographier une zone sinistrée en temps réel dans le but de préparer le personnel de sauvetage qui souhaiterait y envoyer une équipe.

Défis rencontrés

- 180 L'équipe de conception de *BotPro* rencontre plusieurs défis dans le développement du nouveau robot de sauvetage. Ils sont de :
- comprendre comment le vSLAM s'oriente dans un environnement contenant des obstacles et des contours inconnus ;
 - minimiser le temps qu'un robot de sauvetage passe à numériser et à apprendre un environnement ;
- 185
- estimer la pose des personnes malgré les variations de luminosité et d'environnement, et l'occultation de parties du corps ou d'objets multiples ;
 - mettre à jour les cartes dans un environnement en constante évolution, (par exemple décombres encore mouvants lors d'un tremblement de terre) ;
 - mieux comprendre les considérations éthiques associées à l'utilisation de robots autonomes
- 190 lorsqu'il est question de vie ou de mort.

Terminologie supplémentaire

Ajustement de faisceaux (*bundle adjustment*)
 Capteur odométrique (*odometry sensor*)
 Centrale inertielle (*IMU, inertial measurement unit*)
 Dérive du robot (*robot drift*)
 Détection et estimation de la distance par la lumière (*LIDAR, light detection and ranging*)
 Données de navigation à l'estime (*dead reckoning data*)
 Environnement GPS dégradé (*GPS-degraded environment*)
 Environnement privé d'accès GPS (*GPS-refused environment*)
 Estimation de pose d'instances d'objet rigide (*RPE, rigid pose estimation*)
 Estimation de pose humaine (*HPE, human pose estimation*)
 Informatique de périphérie (*edge computing*)
 Localisation et cartographie simultanées (*SLAM, simultaneous localization and mapping*)
 Modèle de fusion de capteurs (*sensor fusion model*)
 Modules de localisation et cartographie visuelles simultanées (*vSLAM, visual simultaneous localization and mapping*) :
 Cartographie locale (*local mapping*)
 Fermeture de boucle (*loop closure*)
 Initialisation (*initialization*)
 Relocalisation (*relocalization*)
 Suivi (*tracking*)
 Occultation d'objet (*object occlusion*)
 Optimisation (*optimization*)
 Optimisation de la carte globale (*global map optimization*)
 Points d'intérêt et paires (*key points/pairs*)
 Relocalisation (*relocalization*)
 Sélection d'images-clés (*keyframe selection*)
 Signal de système de géolocalisation (GPS) (*global positioning system (GPS) signal*)
 Vision par ordinateur (*computer vision*)

**Certains produits, sociétés et individus mentionnés dans cette étude de cas sont fictifs.
 Toute ressemblance avec des entités réelles ne saurait être que fortuite.**

Avertissement :

Le contenu utilisé dans les évaluations de l'IB est extrait de sources authentiques issues de tierces parties. Les avis qui y sont exprimés appartiennent à leurs auteurs et/ou éditeurs, et ne reflètent pas nécessairement ceux de l'IB.

Références :

- Figure 4** Xiaopeng JI, Qi FANG, Junting DONG, Qing SHUAI, Wen JIANG, Xiaowei ZHOU. A survey on monocular 3D human pose estimation. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2020, 2(6): 471—500 DOI: 10.1016/j.vrih.2020.04.005. Image adaptée.
 Sudowoodo, s.d. [Schéma d'un corps féminin] [En ligne]. Disponible sur Internet : <https://www.gettyimages.co.uk/detail/illustration/male-and-female-body-chart-royalty-free-illustration/1160619280?phrase=body&adppopup=true> [Référence du 18 octobre 2022]. Source adaptée.
- Figure 5** Xiaopeng JI, Qi FANG, Junting DONG, Qing SHUAI, Wen JIANG, Xiaowei ZHOU. A survey on monocular 3D human pose estimation. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2020, 2(6): 471—500 DOI: 10.1016/j.vrih.2020.04.005. Image adaptée.
 Kat72, s.d. [Adolescente lançant une balle rapide] [En ligne]. Disponible sur Internet : <https://www.gettyimages.co.uk/detail/photo/teenage-girl-pitching-fastball-royalty-free-image/700576396> [Référence du 18 octobre 2022]. Source adaptée.

Tous les autres textes, graphiques et illustrations : © Organisation du Baccalauréat International 2024