ROB-104 — Leçon 6

Navigation multicapteurs et fusion de données

Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec — Faculté d’informatique, Département de robotique, intelligence artificielle et systèmes autonomes.

Objectif : concevoir et valider une chaîne de navigation combinant IMU, encodeurs, LiDAR, caméra et GNSS avec estimation d’état et surveillance de l’incertitude.

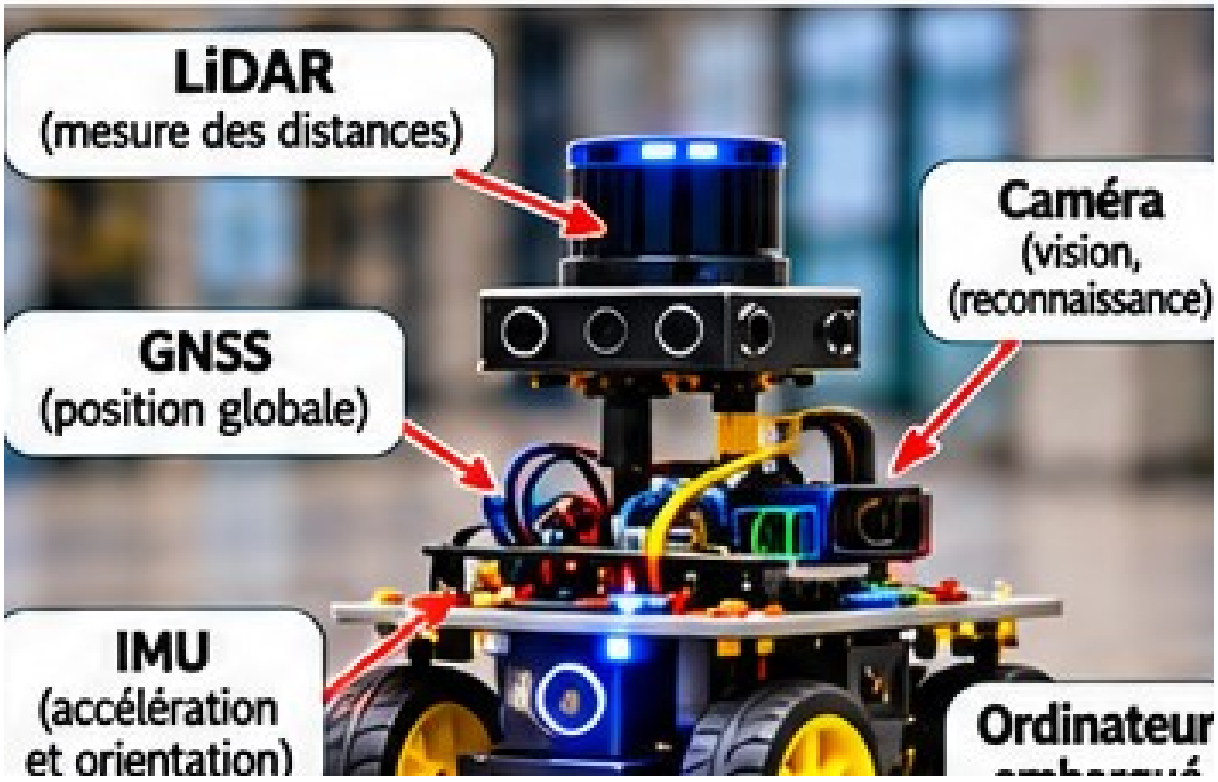


Illustration pédagogique : analyse de la perception d’un robot mobile en laboratoire.

Compétences visées

- Identifier les grandeurs, repères et unités de chaque capteur.
- Synchroniser les observations de fréquences différentes.
- Expliquer prédiction, innovation et correction dans un EKF.
- Configurer et diagnostiquer la fusion sous ROS 2.
- Mesurer dérive, précision, latence et robustesse.

1. Les capteurs et leur complémentarité



Robot mobile multicapteur : identifier visuellement les dispositifs avant de lire leurs données.

Encodeurs

Mesurent les rotations de roues et alimentent une odométrie continue, sensible au glissement et aux erreurs de géométrie.

IMU

Mesure accélérations et vitesses angulaires; rapide, mais biais et bruit provoquent une dérive lors de l'intégration.

LiDAR

Produit des distances et une géométrie locale; utile à la cartographie et à la correction de localisation.

Caméra

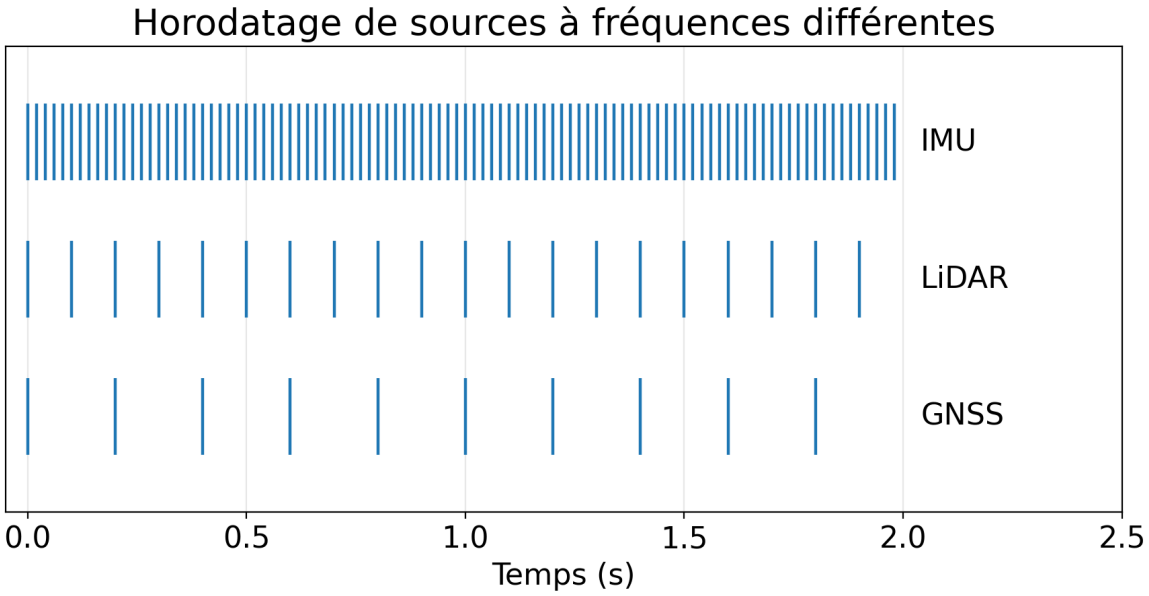
Fournit des images et parfois une profondeur; la qualité dépend notamment de l'éclairage, des textures et de la calibration.

GNSS

Donne une référence globale extérieure, avec une disponibilité et une précision variables selon l'environnement.

2. Repères, transformations et timestamps

Chaque mesure doit être associée à un timestamp et à un repère. Le système transforme les observations vers base_link, odom ou map selon leur usage. Une donnée correcte dans un mauvais repère produit une estimation fausse. Les observations doivent être alignées par leur temps de mesure, non simplement par leur ordre d'arrivée.



Exemple synthétique de fréquences différentes : l'alignement temporel est une condition de fusion cohérente.

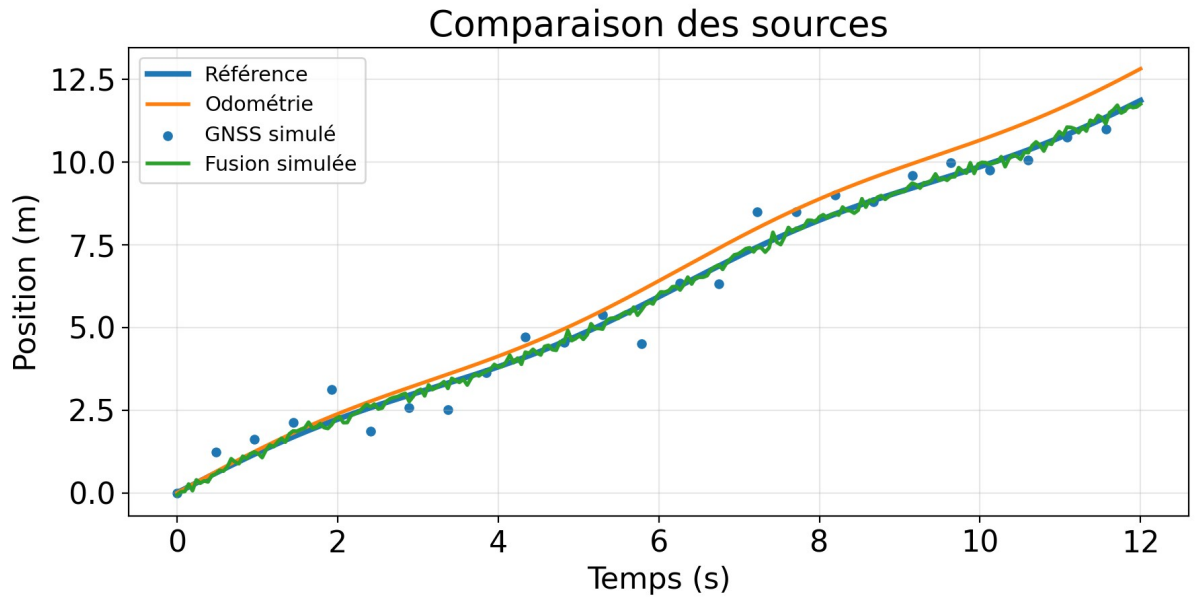
3. Modèle d’état et filtre de Kalman étendu

Pour un robot plan, on peut prendre $x=[p_x,p_y,\theta,v,b_g]^T$, où b_g représente le biais du gyroscope. Une dynamique simplifiée est $p_{x,k+1}=p_{x,k}+v_k \cos\theta_k \Delta t$; $p_{y,k+1}=p_{y,k}+v_k \sin\theta_k \Delta t$; $\theta_{k+1}=\theta_k+(\omega_{mes}-b_g)\Delta t$.

Prédiction de covariance : $P^- = F P F^T + Q$. Innovation : $y = z - h(x^-)$. Covariance d’innovation : $S = H P^- H^T + R$. Gain : $K = P^- H^T S^{-1}$. Correction : $x^+ = x^- + Ky$. Les jacobiennes F et H dépendent des modèles retenus.

Exemple résolu

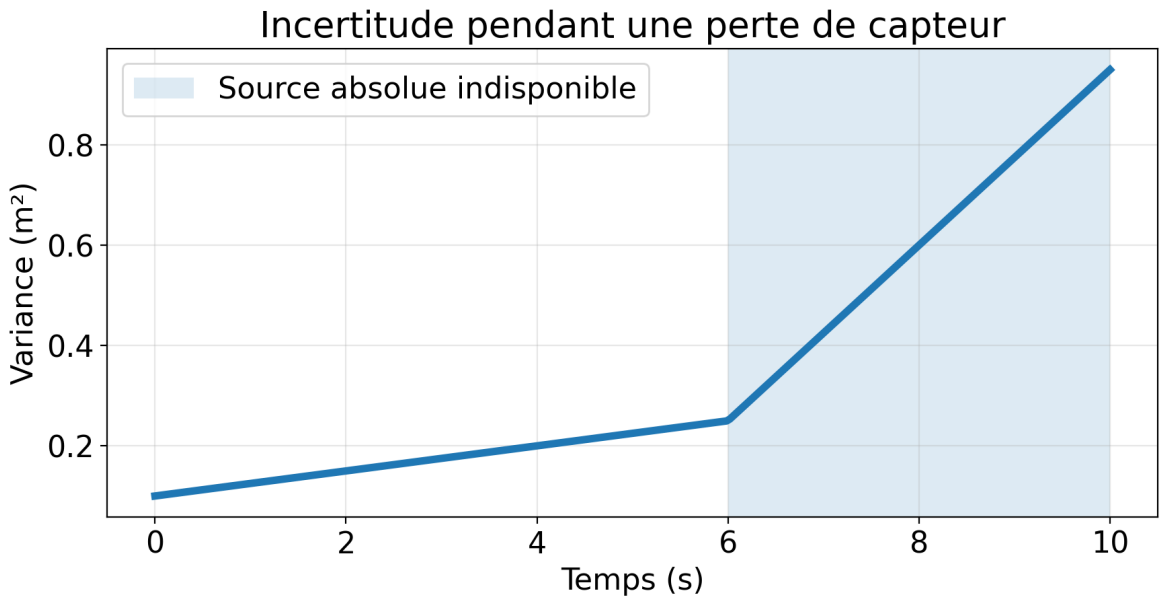
État prédit 10,0 m (variance 4,0 m²); mesure GNSS 12,0 m (variance 1,0 m²). $K = 4/(4+1) = 0{,}8$. L’estimation corrigée est 11,6 m et sa variance 0,8 m². Ce calcul suppose des erreurs correctement modélisées et des mesures indépendantes.



Données synthétiques : référence, odométrie, GNSS bruité et estimation fusionnée.

4. Incertitude, innovations et qualité

Une estimation n’est pas seulement une position : elle doit comporter une incertitude. Lorsqu’une correction absolue disparaît, la covariance tend à augmenter selon le modèle et les sources restantes. Une innovation anormalement élevée peut révéler une valeur aberrante, une erreur de calibration ou une mauvaise transformation.



Données synthétiques : croissance de la variance en l'absence de correction absolue.

5. Mise en œuvre ROS 2

Le paquet robot_localization fournit notamment des filtres EKF et UKF. La configuration dépend des topics, des transformations TF, de la version ROS 2 et des caractéristiques réelles des capteurs. Les commandes suivantes servent au diagnostic.

```
ros2 node list

ros2 topic list

ros2 topic echo /imu/data --once

ros2 topic echo /odometry/filtered --once

ros2 topic hz /imu/data

ros2 run tf2_ros tf2_echo odom base_link
```

Extrait YAML pédagogique

```
ekf_filter_node:

  ros__parameters:

    frequency: 30.0

    two_d_mode: true

    odom_frame: odom

    base_link_frame: base_link

    world_frame: odom

    odom0: /wheel/odometry

    imu0: /imu/data
```

Cet extrait est partiel et n’est pas une configuration prête à exécuter : les variables à fusionner, les covariances, les délais, la gravité et les transformations doivent être définis et validés.

6. GNSS et navigation extérieure

Les coordonnées latitude et longitude ne sont pas des mètres dans le repère map. Une transformation géodésique appropriée est nécessaire. En intérieur, le GNSS est souvent

indisponible; le robot dépend alors davantage de l’odométrie, de l’IMU et de la localisation géométrique.

7. Laboratoire à distance — cinq séances

Séance 1 — Inspection

Simuler les encodeurs, l'IMU et le LiDAR; identifier topics, unités, repères, fréquences et latences.

Séance 2 — Calibration

Injecter un biais gyroscopique de 0,5°/s et une erreur de rayon de roue de 1 %, puis tracer la dérive.

Séance 3 — Fusion EKF

Fusionner odométrie et IMU; comparer la trajectoire à la référence et observer la covariance.

Séance 4 — Correction absolue

Ajouter une pose LiDAR ou GNSS simulée; mesurer l'effet de la covariance R sur le résultat.

Séance 5 — Défaillances

Couper une source, ajouter une valeur aberrante et 300 ms de latence; vérifier détection et comportement sûr.

8. Évaluation et livrables

- Schéma de l'architecture et repères TF.
- Fichier de paramètres commenté et journal des topics.
- Graphiques de trajectoire, erreurs et covariance.
- Tableau de trois défaillances injectées et réactions.
- Rapport technique de 3 à 5 pages et vidéo de démonstration.

9. Exercices corrigés

Question : Pourquoi l'IMU seule dérive-t-elle ?

Corrigé : Ses biais et son bruit s'accumulent lors de l'intégration.

Question : Pourquoi faut-il synchroniser les sources ?

Corrigé : Des observations prises à des instants différents ne décrivent pas exactement le même état.

Question : Que représente R ?

Corrigé : La covariance du bruit de mesure.

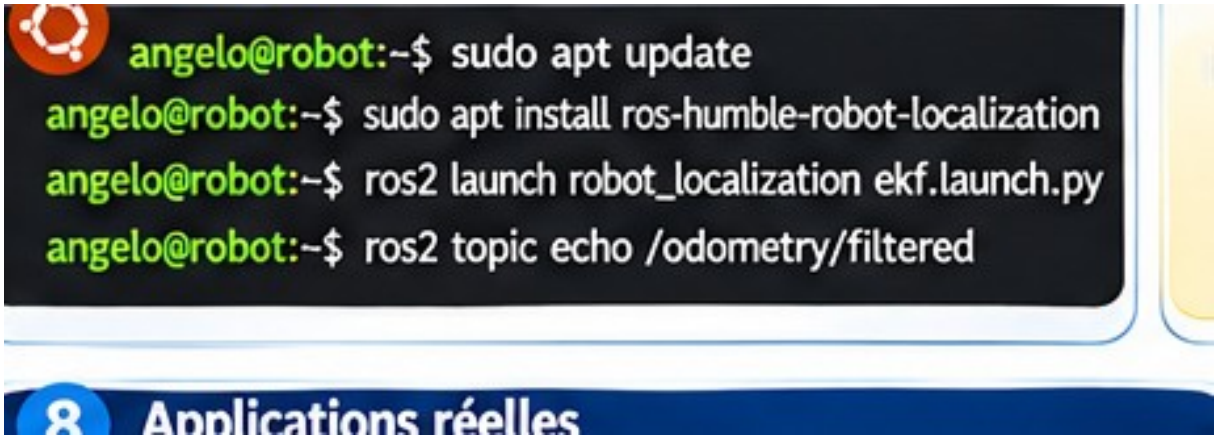
Question : Que devient l’incertitude en cas de perte de correction absolue ?

Corrigé : Elle tend à croître selon le modèle et les sources restantes.

Question : Pourquoi les repères TF sont-ils indispensables ?

Corrigé : Ils permettent de comparer et fusionner les mesures dans une géométrie cohérente.

10. Étude de cas : robot de service



Applications illustratives : logistique, agriculture, inspection et services.

Un robot se déplace dans un établissement. Il fusionne encodeurs, IMU et LiDAR dans les couloirs. Près d'une surface réfléchissante, les mesures LiDAR deviennent incohérentes; le système réduit leur poids. Si la localisation devient insuffisante, il ralentit ou s'arrête suivant les critères définis, puis reprend après vérification.

11. Storyboard du film pédagogique

Scène 1 : le professeur présente les capteurs. Scène 2 : une étudiante observe la dérive dans RViz. Scène 3 : un étudiant configure les sources EKF. Scène 4 : la trajectoire fusionnée est comparée à la référence. Scène 5 : une panne GNSS simulée entraîne une hausse de covariance. Scène 6 : les étudiants expliquent la réaction du robot et remettent leur rapport.

Conclusion : une navigation robuste exige une estimation accompagnée de sa qualité, de son instant de validité et de son état de santé.