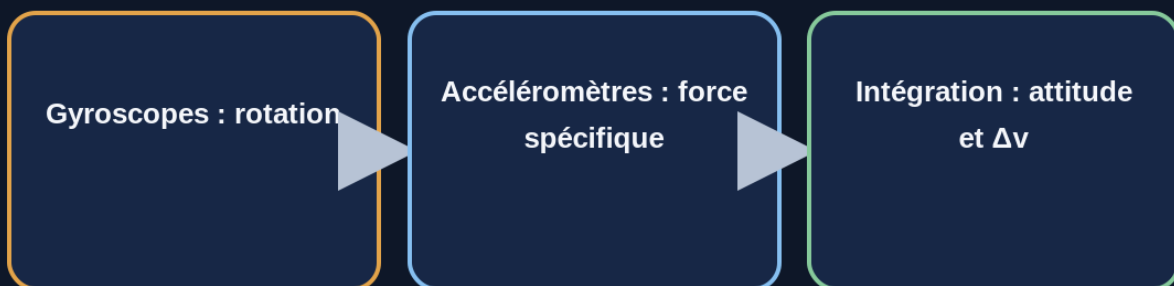


AM-08.04 — IMU, gyroscopes et accéléromètres : sentir le mouvement sans GPS

Comment un véhicule peut-il estimer ses rotations et ses changements de vitesse lorsqu'aucun GPS ne lui donne sa position ?

AM-08.04 · SPACE ACADEMY

L'IMU observe le mouvement interne



Delta-Sierra · Space Academy

Une IMU fournit des taux rapides ; d'autres capteurs sont nécessaires pour limiter la dérive.

1 - Comprendre la scène

Un véhicule spatial traverse une zone où aucune balise extérieure ne répond. Il ne devient pas aveugle pour autant : il possède des capteurs internes. Un gyroscope mesure la rotation ; un accéléromètre mesure une accélération spécifique liée aux forces non gravitationnelles. Ensemble, plusieurs de ces capteurs forment souvent une IMU.

L'avantage de l'inertiel est son autonomie et sa fréquence élevée. Son défaut est tout aussi important : une petite erreur de mesure est intégrée au fil du temps. Sans recalage extérieur, l'estimation dérive progressivement.

2 - Vocabulaire essentiel

IMU - Unité de mesure inertielle regroupant généralement gyroscopes et accéléromètres sur plusieurs axes.

Gyroscope - Capteur qui mesure une vitesse de rotation autour d'un axe.

Accéléromètre - Capteur qui mesure une accélération spécifique, c'est-à-dire l'effet des forces non gravitationnelles par unité de masse.

Biais - Petite erreur quasi constante ajoutée à la mesure.

Dérive - Écart qui augmente avec le temps lorsque les erreurs sont intégrées.

Intégration - Opération qui accumule un taux au cours du temps : accélération vers vitesse, vitesse vers position.

3 - Mécanisme pas à pas

Trois axes pour décrire l'espace

Une IMU comporte couramment trois axes de rotation et trois axes d'accélération. Les axes doivent être connus par rapport au véhicule, sinon les mesures ne peuvent pas être interprétées correctement.

Du taux de rotation à l'orientation

Un gyroscope donne par exemple 2°/s autour d'un axe. Si cette vitesse de rotation reste constante pendant 5 s, la variation d'angle est environ 10°. Le logiciel répète ce raisonnement à haute fréquence avec des mesures qui changent.

De l'accélération à la vitesse

Un accéléromètre donne un taux de changement de vitesse. En accumulant ce taux au cours du temps, on estime une variation de vitesse. Une seconde intégration peut fournir une variation de position, mais chaque intégration amplifie les effets des biais.

4 - Formules et lecture

$$\Delta\theta \approx \omega \times \Delta t$$

« delta thêta est approximativement égal à oméga multiplié par delta t ». ω , oméga, est ici la vitesse angulaire.

Sur un petit intervalle où la vitesse angulaire varie peu, multiplier le taux de rotation par la durée donne la variation d'angle.

$$\Delta v \approx a \times \Delta t$$

« delta vé est approximativement égal à a multiplié par delta t ».

Sur un petit intervalle à accélération presque constante, on multiplie l'accélération par la durée pour obtenir le changement de vitesse.

5 - Unités et vérification

Un gyroscope s'exprime souvent en degrés par seconde ou radians par seconde. Un accéléromètre s'exprime en m/s², parfois en multiples de g selon les systèmes. Une erreur de biais d'accélération paraît minuscule en m/s², mais son effet sur la position croît rapidement après deux intégrations.

Ne confondez pas « accélération mesurée par l'IMU » et « accélération gravitationnelle » : un accéléromètre en chute libre peut tendre vers zéro alors que la gravité agit bien sur le véhicule.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Rotation simple

Le gyroscope indique 3°/s pendant 4 s autour d'un axe.

$$\begin{aligned}\Delta\theta &\approx 3 \times 4 \\ \Delta\theta &\approx 12^\circ\end{aligned}$$

Conclusion: Le véhicule a tourné d'environ 12° si le taux est resté constant.

Exemple 2 — Impulsion mesurée

Un moteur produit une accélération moyenne de 0,5 m/s² pendant 20 s.

$$\begin{aligned}\Delta v &\approx 0.5 \times 20 \\ \Delta v &\approx 10 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Conclusion: L'IMU peut contribuer à détecter que la variation de vitesse visée est atteinte.

Exemple 3 — Petit biais, grande dérive

Supposons un biais constant simplifié de 0,01 m/s² pendant 100 s, sans correction extérieure.

erreur de vitesse $\approx 0.01 \times 100 = 1 \text{ m/s}$
erreur de position $\approx 1/2 \times 0.01 \times 100^2$
erreur de position $\approx 50 \text{ m}$

Conclusion: Ce modèle volontairement simple montre pourquoi l'inertiel doit être recalé par d'autres capteurs.

7 - Approfondissement

Le mot « inertiel » ne veut pas dire infallible

L'IMU n'a pas besoin d'un signal extérieur pour produire ses mesures instantanées. Cela la rend précieuse pendant une occultation ou une manœuvre rapide, mais elle ne connaît pas automatiquement sa position absolue.

Calibration avant et pendant le vol

Biais, facteur d'échelle, désalignement des axes et dépendance à la température sont caractérisés. Un logiciel peut estimer certains défauts en vol lorsque d'autres capteurs fournissent une référence.

Saturation et dynamique

Un capteur possède une plage de mesure. Une rotation ou accélération trop grande peut saturer le capteur ; une plage très large peut en contrepartie réduire la finesse utile pour de petites variations.

Pourquoi on fusionne les capteurs

L'IMU fournit une continuité rapide ; le star tracker, la radio ou la vision fournissent des références absolues plus lentes. La fusion combine leurs qualités au lieu d'exiger qu'un seul capteur sache tout faire.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Une trajectoire interplanétaire, une descente atmosphérique ou une manœuvre d'amarrage ne peut pas attendre plusieurs minutes une réponse terrestre. L'IMU fournit l'information rapide nécessaire aux boucles de contrôle.

Sur Mars, les rovers et véhicules aériens peuvent combiner inertiel, vision et cartes pour continuer à naviguer lorsque les communications avec la Terre sont lentes ou interrompues.

9 - Pièges fréquents

- Croire qu'un accéléromètre mesure directement la vitesse.
- Croire qu'une IMU fournit automatiquement une position absolue.
- Oublier le biais : une petite erreur intégrée devient grande.
- Confondre accélération spécifique et gravité.
- Intégrer des mesures sans tenir compte de leur orientation dans le bon repère.

10 - Exercices guidés

Question: Un gyroscope indique $1,5^\circ/\text{s}$ pendant 8 s. Quel angle simplifié ?

Réponse: $1,5 \times 8 = 12^\circ$. On précise que le calcul suppose un taux constant.

Question: Une accélération de $0,2 \text{ m/s}^2$ dure 15 s. Quel Δv ?

Réponse: $0,2 \times 15 = 3 \text{ m/s}$.

Question: Pourquoi une caméra peut-elle corriger la dérive d'une IMU ?

Réponse: Parce que des repères visuels observés dans l'environnement fournissent une référence extérieure qui permet de recalibrer l'estimation accumulée par l'inertiel.

11 - À savoir expliquer

- Définir IMU, gyroscope, accéléromètre, biais et dérive.
- Passer d'un taux de rotation à une variation d'angle simple.
- Passer d'une accélération à un Δv simple.
- Expliquer pourquoi l'intégration accumule les erreurs.
- Expliquer pourquoi l'IMU est combinée à des références extérieures.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology, Guidance Navigation and Control
<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/guidance-navigation-and-control/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.