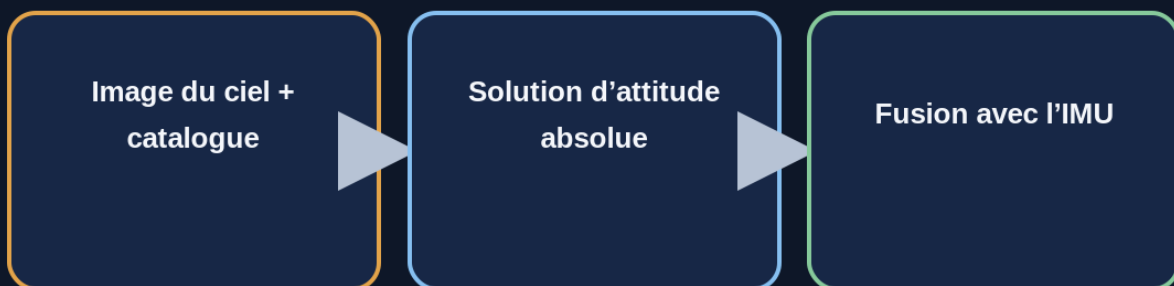


AM-08.05 — Star tracker et fusion de capteurs : retrouver l'orientation dans les étoiles

Comment une caméra qui regarde les étoiles peut-elle dire à un vaisseau dans quelle direction il est orienté ?

AM-08.05 · SPACE ACADEMY

Prédire avec l'IMU, corriger avec les étoiles



Delta-Sierra · Space Academy

Le star tracker fournit une référence absolue ; l'IMU assure la continuité entre les solutions.

1 - Comprendre la scène

Un vaisseau coupe ses moteurs et dérive dans l'espace. Son IMU sait qu'il a tourné depuis quelques secondes, mais une petite dérive s'accumule. Une caméra spécialisée photographie alors plusieurs étoiles. Le logiciel compare leurs motifs à un catalogue embarqué et retrouve l'orientation absolue du capteur : c'est le rôle du star tracker.

Le système le plus robuste ne choisit pas entre IMU et étoiles. Il combine les deux : l'IMU prédit rapidement l'orientation entre deux images ; le star tracker corrige périodiquement la dérive. Cette idée de prédiction puis correction est le cœur de nombreux estimateurs de navigation.

2 - Vocabulaire essentiel

Star tracker - Caméra et calculateur spécialisés qui identifient des étoiles et fournissent une orientation tridimensionnelle.

Catalogue d'étoiles - Base embarquée donnant les directions connues d'étoiles de référence.

Attitude - Orientation du véhicule dans l'espace, à ne pas confondre avec sa position.

Champ de vision - Portion du ciel vue par le capteur.

Fusion de capteurs - Combinaison cohérente de plusieurs mesures qui n'ont pas les mêmes qualités ni les mêmes défauts.

Filtre de Kalman - Famille de méthodes qui prédit un état, compare la prédiction à une mesure, puis corrige l'estimation selon les incertitudes.

3 - Mécanisme pas à pas

Photographier un motif, pas lire un nom

Le star tracker détecte des points lumineux, mesure leurs positions relatives dans l'image et cherche une configuration compatible avec son catalogue. Une fois plusieurs étoiles identifiées, la géométrie donne l'orientation du capteur.

Perdu dans l'espace

Un bon capteur doit parfois retrouver son orientation sans estimation initiale fiable. Cette acquisition dite « lost in space » demande assez d'étoiles visibles et un traitement capable de reconnaître le motif.

Prédire puis corriger

Entre deux solutions stellaires, l'IMU propage l'attitude. Quand une nouvelle image stellaire arrive, l'estimateur mesure l'écart entre prédiction et observation, puis réajuste l'état et parfois les biais des gyroscopes.

4 - Formules et lecture

$$\text{innovation} = \text{mesure} - \text{prédiction}$$

« innovation égale mesure moins prédiction ». Le mot innovation désigne ici le résidu entre ce que le capteur observe et ce que le modèle attendait.

La différence indique à l'estimateur dans quel sens l'état prédit doit être corrigé. La correction réelle tient aussi compte des incertitudes.

$$\text{état corrigé} = \text{état prédit} + K \times \text{innovation}$$

« état corrigé égale état prédit plus K multiplié par innovation ». K représente ici un gain de correction calculé par l'estimateur.

Si la mesure est très fiable, K lui donne davantage de poids ; si elle est très incertaine, le modèle en conserve davantage.

5 - Unités et vérification

L'attitude peut être exprimée par des angles, matrices ou quaternions. La précision des star trackers se discute souvent en secondes d'arc : une seconde d'arc vaut 1/3600 de degré. Le cours retient surtout l'idée d'échelle : quelques secondes d'arc représentent une très petite erreur angulaire.

Une excellente précision angulaire n'aide que si le capteur est correctement aligné avec le véhicule. L'étalonnage du montage mécanique fait donc partie du problème.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Une seconde d'arc

Convertissons 18 secondes d'arc en degré.

$$18 \div 3600 = 0,005^\circ$$

Conclusion: L'angle est minuscule ; cela donne une intuition de la finesse recherchée par certains star trackers.

Exemple 2 — Correction de dérive

L'IMU prédit un angle de 20,4° ; la mesure stellaire indique 20,0°. Pour une correction pédagogique de poids K = 0,75 :

$$\begin{aligned} \text{innovation} &= 20.0 - 20.4 = -0.4^\circ \\ \text{correction} &= 0.75 \times (-0.4) = -0.3^\circ \end{aligned}$$

état corrigé = $20.4 - 0.3 = 20.1^\circ$

Conclusion: L'estimateur se rapproche de la mesure sans forcément la copier exactement.

Exemple 3 — Perte temporaire

Le star tracker est ébloui pendant 8 s, mais l'IMU continue à fournir des taux de rotation.

star tracker : solution indisponible

IMU : propagation de l'attitude

retour des étoiles : recalage

Conclusion: La redondance fonctionnelle évite de perdre instantanément toute connaissance d'attitude.

7 - Approfondissement

Lumière parasite et Soleil

Un star tracker peut être perturbé par le Soleil, une planète brillante, des reflets ou des panaches. La géométrie d'installation et les zones d'exclusion sont donc étudiées avant le vol.

La cadence n'est pas infinie

La caméra expose, lit son image et calcule une solution. L'IMU fournit des données beaucoup plus fréquentes, d'où leur complémentarité.

Un filtre ne crée pas d'information

La fusion de capteurs ne transforme pas de mauvaises mesures en vérité. Elle exige un modèle, des incertitudes réalistes et la détection des mesures aberrantes.

Redondance et désaccord

Deux star trackers peuvent augmenter la disponibilité. Mais s'ils ne sont pas alignés ou s'ils voient des environnements optiques différents, le système doit savoir diagnostiquer leur désaccord.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Le pointage d'une grande antenne, l'orientation d'un panneau solaire, une correction de trajectoire ou une observation scientifique peuvent exiger une connaissance d'attitude bien plus précise qu'une simple estimation visuelle.

Les missions martiennes autonomes doivent continuer à connaître leur orientation lorsque la Terre ne peut pas corriger en temps réel. La combinaison inertiel + étoiles est donc un exemple central de résilience de navigation.

9 - Pièges fréquents

- Croire qu'un star tracker donne la position du vaisseau.
- Confondre précision du capteur et précision réelle du véhicule entier.
- Oublier les effets d'éblouissement et de champ de vision.
- Présenter le filtre de Kalman comme une « moyenne magique ».
- Ignorer le temps et l'alignement entre mesures de plusieurs capteurs.

10 - Exercices guidés

Question: Une erreur vaut 36 secondes d'arc. Combien de degrés ?

Réponse: $36 \div 3600 = 0,01^\circ$.

Question: Pourquoi l'IMU reste-t-elle utile si le star tracker est plus précis en attitude absolue ?

Réponse: Parce qu'elle mesure très rapidement et continue à fonctionner entre deux solutions stellaires ou pendant une perte temporaire.

Question: Que signifie une innovation proche de zéro ?

Réponse: La mesure et la prédiction sont proches pour la grandeur comparée ; cela ne garantit pas à lui seul que tout le système est correct.

11 - À savoir expliquer

- Expliquer comment un star tracker reconnaît un motif d'étoiles.
- Distinguer attitude et position.
- Expliquer le principe prédiction-correction de la fusion de capteurs.
- Convertir secondes d'arc et degrés.
- Citer les principales causes de perte ou dégradation d'une solution stellaire.

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.