

AM-08.07 — Attitude : roulis, tangage, lacet et pourquoi les quaternions existent

Comment décrire l'orientation complète d'un véhicule qui peut tourner librement dans les trois dimensions ?

AM-08.07 · SPACE ACADEMY

Décrire l'orientation d'un véhicule



Delta-Sierra · Space Academy

Les angles donnent l'intuition ; matrices et quaternions permettent des calculs 3D robustes.

1 - Comprendre la scène

Un vaisseau peut se trouver exactement au même point tout en regardant dans des directions totalement différentes. Sa position n'a pas changé, mais son attitude oui. Pour pointer une antenne vers la Terre, un moteur dans la bonne direction ou une caméra vers Mars, connaître l'attitude est indispensable.

Les mots roulis, tangage et lacet donnent une première intuition proche de l'aviation. Mais les rotations en trois dimensions ne se combinent pas comme de simples additions. Les systèmes spatiaux utilisent souvent matrices ou quaternions pour éviter les ambiguïtés de certaines suites d'angles.

2 - Vocabulaire essentiel

Attitude - Orientation d'un véhicule par rapport à un repère de référence.

Roulis - Rotation autour de l'axe longitudinal du véhicule.

Tangage - Rotation qui lève ou abaisse le nez dans une convention usuelle.

Lacet - Rotation qui fait pivoter le nez vers la gauche ou la droite dans une convention usuelle.

Matrice de rotation - Tableau de nombres décrivant comment les axes d'un repère sont orientés par rapport à un autre.

Quaternion - Représentation de rotation utilisant quatre composantes et permettant de composer des orientations sans certaines singularités des angles d'Euler.

3 - Mécanisme pas à pas

Trois axes corps

On définit d'abord un repère lié au vaisseau. Les axes x, y et z suivent le véhicule. Toute rotation est ensuite décrite relativement à ces directions ou à un repère extérieur.

L'ordre des rotations compte

Tourner de 90° autour d'un axe puis de 90° autour d'un autre ne donne généralement pas le même résultat si l'on inverse l'ordre. Les rotations 3D ne commutent pas.

Pourquoi changer de représentation

Les angles d'Euler sont intuitifs, mais certaines orientations provoquent une perte de degré de liberté appelée gimbal lock dans la représentation. Les quaternions donnent une représentation compacte et robuste pour les calculs embarqués, au prix d'une intuition moins immédiate.

4 - Formules et lecture

$$\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]$$

« q est un quaternion composé de q zéro, q un, q deux et q trois ».

Ces quatre nombres codent ensemble une orientation. Ils ne doivent pas être interprétés comme quatre angles indépendants.

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

« q zéro au carré plus q un au carré plus q deux au carré plus q trois au carré égale un ».

Un quaternion de rotation est normalement normalisé. Cette contrainte maintient sa longueur mathématique égale à 1.

5 - Unités et vérification

Les angles s'expriment en degrés ou radians. Les composantes d'un quaternion de rotation sont sans unité. Une matrice de rotation est également sans unité : ses nombres décrivent des projections géométriques entre axes.

Ne mélangez pas degrés et radians dans une même fonction trigonométrique. Une calculatrice réglée dans le mauvais mode peut produire un nombre plausible mais entièrement faux.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Roulis pur

Un vaisseau maintient son nez dans la même direction mais tourne de 30° autour de son axe longitudinal.

position : inchangée
direction du nez : inchangée
roulis : +30°

Conclusion: L'attitude change même si la trajectoire instantanée peut rester identique.

Exemple 2 — Ordre des rotations

Prenez un objet et effectuez mentalement 90° de lacet puis 90° de tangage ; inversez ensuite les deux opérations.

rotation A : lacet → tangage
rotation B : tangage → lacet
orientation finale A ≠ B en général

Conclusion: Cet exercice physique explique pourquoi une suite d'angles doit préciser sa convention et son ordre.

Exemple 3 — Vérifier la norme

Un quaternion pédagogique vaut $[0,8 ; 0,6 ; 0 ; 0]$.

$$0.8^2 + 0.6^2 = 0.64 + 0.36$$
$$\text{somme} = 1$$

Conclusion: Sa norme vaut 1 : il respecte la contrainte de normalisation.

7 - Approfondissement

Angles d'Euler : utiles mais conventionnels

Les mots roulis, tangage et lacet ne suffisent pas à définir une convention mathématique complète. Il faut aussi préciser l'ordre et le repère autour duquel chaque rotation est appliquée.

Gimbal lock n'est pas une panne de gyroscope

Il s'agit d'une singularité de représentation pour certaines suites d'angles, pas nécessairement d'un blocage mécanique réel. Deux degrés de liberté deviennent mathématiquement indiscernables dans cette description.

Quaternion double couverture

Les quaternions q et $-q$ représentent la même rotation physique. Cette propriété surprend au début mais ne constitue pas deux attitudes différentes.

Attitude connaissance et attitude commande

Savoir où l'on pointe est une fonction d'estimation. Faire tourner le véhicule vers une attitude demandée est une fonction de contrôle. Les deux sont liées mais distinctes.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Une mission martienne doit pointer ses panneaux vers le Soleil, ses antennes vers la Terre ou un relais, ses capteurs vers une cible et ses moteurs selon l'axe prévu. L'attitude traverse donc presque tous les sous-systèmes.

Pendant une descente ou un atterrissage, l'orientation peut changer rapidement. Des représentations sans singularité pratique et des calculs robustes deviennent alors essentiels pour la commande automatique.

9 - Pièges fréquents

- Confondre position et attitude.
- Additionner naïvement des rotations 3D comme des nombres ordinaires.
- Parler de roulis/tangage/lacet sans préciser la convention.
- Croire qu'un quaternion contient quatre angles.
- Oublier de normaliser un quaternion numérique après certaines opérations.

10 - Exercices guidés

Question: Un véhicule tourne sur lui-même sans translation. Sa position change-t-elle ?

Réponse: Non dans l'idéal ; son attitude change, sa position peut rester identique.

Question: Pourquoi l'ordre de deux rotations doit-il être enregistré ?

Réponse: Parce que les rotations 3D ne commutent pas : inverser l'ordre peut changer l'orientation finale.

Question: Le quaternion $[0,5 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,5]$ est-il normalisé ?

Réponse: Somme des carrés = $4 \times 0,25 = 1$. Oui.

11 - À savoir expliquer

- Distinguer position et attitude.
- Définir roulis, tangage et lacet comme première intuition.
- Expliquer pourquoi l'ordre des rotations compte.
- Dire ce qu'est une matrice de rotation sans la calculer intégralement.
- Expliquer pourquoi les quaternions sont utilisés et vérifier leur norme simple.

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.