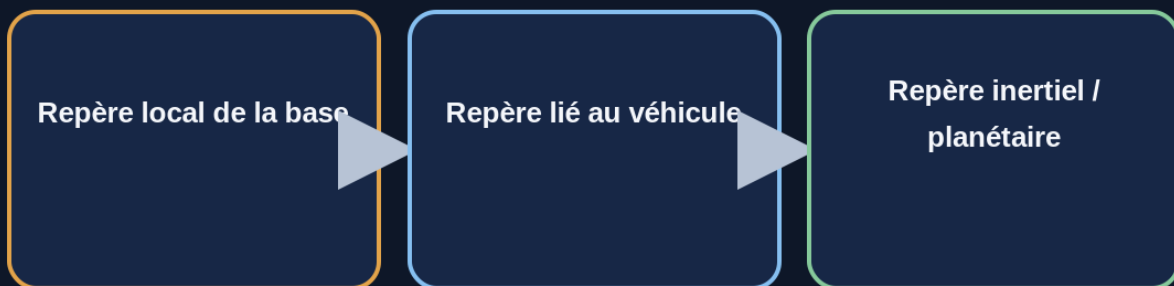


AM-08.03 — Repères et temps : dire où et quand avant de calculer une trajectoire

Pourquoi une position ou une vitesse n'a-t-elle aucun sens si l'on ne précise pas le repère et l'instant auxquels elle se rapporte ?

AM-08.03 · SPACE ACADEMY

Même réalité, plusieurs repères



Delta-Sierra · Space Academy

Une position n'est jamais « juste trois nombres » : elle appartient à un repère et à un instant.

1 - Comprendre la scène

Imaginez un atterrisseur martien dont l'ordinateur reçoit la phrase « vitesse = 300 m/s ». Ce nombre paraît précis, mais il manque l'essentiel : 300 m/s par rapport à quoi ? Au sol martien ? Au centre de Mars ? Au Soleil ? Et à quel instant ? Selon le repère choisi, les composantes numériques changent alors que le véhicule physique reste le même.

La navigation est donc une discipline de contexte. Avant une addition de vecteurs, un logiciel doit savoir quelle origine, quels axes, quelle orientation et quelle date accompagnent chaque donnée. Une erreur de repère peut être plus dangereuse qu'une erreur d'arithmétique, car le calcul peut être parfaitement exécuté sur des données incompatibles.

2 - Vocabulaire essentiel

Repère - Un système qui définit une origine et des axes pour donner des coordonnées.

Origine - Le point auquel on attribue les coordonnées zéro.

Axe - Une direction de référence orientée, par exemple x, y ou z.

Référentiel inertiel - Un repère choisi pour que les lois du mouvement soient aussi simples que possible sur l'échelle étudiée ; il n'est pas attaché à un véhicule en rotation.

Repère corps - Repère fixé au véhicule : ses axes tournent avec lui.

Époque / instant de référence - La date et l'heure auxquelles une position, une vitesse ou une orientation sont valables.

Temps-lumière - Durée mise par un signal électromagnétique pour parcourir une distance.

3 - Mécanisme pas à pas

Un même point, plusieurs nombres

Une antenne posée sur Mars peut avoir des coordonnées locales par rapport à une base, des coordonnées planétaires par rapport au centre de Mars, puis une position héliocentrique par rapport au Soleil. Il ne s'agit pas de trois antennes : ce sont trois descriptions du même objet.

Le temps accompagne la géométrie

Les planètes, les orbiteurs et les véhicules bougent. Une position correcte à 12 h 00 peut être fausse quelques minutes plus tard. Les données de navigation portent donc un instant, parfois appelé époque. Cette date n'est pas une décoration : elle fait partie de la donnée.

Transformer n'est pas inventer

Changer de repère consiste à effectuer une transformation mathématique connue : translation de l'origine, rotation des axes, parfois prise en compte du mouvement du repère. Le but n'est pas de modifier la réalité, mais d'exprimer la même réalité dans un langage compatible.

4 - Formules et lecture

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{R}_{\{BA\}} \cdot \mathbf{r}_A + \mathbf{t}_{\{BA\}}$$

« $\mathbf{r}$ dans B égale la matrice de rotation de A vers B multipliée par $\mathbf{r}$ dans A, plus la translation de A vers B ». Cette écriture générale dit seulement : tourner les axes, puis déplacer l'origine.

Cette formule sert à exprimer le même point dans un autre repère. Le cours ne demande pas encore de calculer une matrice complète : il faut d'abord comprendre ce qu'elle représente.

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

« delta t égale t deux moins t un ». Δ , la lettre grecque delta, signifie ici une différence.

On soustrait l'instant de départ à l'instant d'arrivée pour obtenir une durée. Une date absolue et une durée ne sont pas la même grandeur.

5 - Unités et vérification

Les coordonnées de position peuvent être en mètres ou kilomètres ; les vitesses en mètres par seconde ou kilomètres par seconde ; les angles en degrés ou radians ; les temps en secondes, minutes ou dates codées. Le danger vient moins du choix d'une unité que du mélange silencieux d'unités ou d'échelles de temps incompatibles.

Réflexe : à côté de chaque vecteur, notez mentalement « repère + unité + instant ». Si un des trois manque, la donnée n'est pas encore prête à être combinée.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Carte locale

Un rover est 120 m à l'est et 50 m au nord de l'habitat. Dans le repère local, l'habitat est l'origine.

$x = +120 \text{ m}$
 $y = +50 \text{ m}$
 $\text{distance} = \sqrt{(120^2 + 50^2)} = 130 \text{ m}$

Conclusion: Le couple (120, 50) n'a de sens que parce que l'origine et les axes ont été définis.

Exemple 2 — Changement d'origine

Une antenne est à $x = 500 \text{ m}$ dans un repère dont l'origine est le site A. Le site B se trouve à $x = 300 \text{ m}$ dans ce même repère.

$x_{\text{antenne/B}} = 500 - 300$
 $x_{\text{antenne/B}} = 200 \text{ m}$

Conclusion: En choisissant B comme nouvelle origine, le nombre change mais l'antenne ne bouge pas.

Exemple 3 — Données datées

Une estimation de position a été calculée à 12:00:00 et le véhicule se déplace à 20 m/s pendant 5 s dans un exemple rectiligne.

$$\Delta t = 5 \text{ s}$$

$$\Delta x \approx v \times \Delta t$$

$$\Delta x \approx 20 \times 5 = 100 \text{ m}$$

Conclusion: Réutiliser l'ancienne position sans tenir compte des cinq secondes crée déjà environ 100 m d'écart dans ce modèle simplifié.

7 - Approfondissement

Repère planétaire ou repère local ?

Un repère planétaire est utile pour la cartographie globale ; un repère local est plus intuitif pour conduire un rover ou construire une base. Les systèmes réels passent constamment de l'un à l'autre.

Pourquoi les ingénieurs parlent d'époque

Une trajectoire est une fonction du temps. Donner six nombres de position et vitesse sans date revient à remettre une photographie sans dire quand elle a été prise.

Rotation d'une planète

Un point fixe au sol martien tourne avec Mars. Dans un repère attaché au sol il est immobile ; dans un repère inertiel centré sur Mars, il décrit un mouvement de rotation. Les deux descriptions sont correctes dans leur contexte.

Le temps-lumière complique le mot « maintenant »

Quand une station terrestre reçoit une mesure, elle décrit souvent l'état du véhicule au moment où le signal a été émis, pas à l'instant de réception. La navigation reconstruit donc des événements datés dans le passé.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Une mission martienne relie des repères solaires, planétaires, orbitaux, liés au véhicule, liés aux instruments et locaux au site d'atterrissage. La compatibilité de ces repères est une condition de sécurité.

L'autonomie future sur Mars demandera des cartes locales précises, des repères communs aux rovers et habitats, et des horloges suffisamment cohérentes pour fusionner des mesures prises par différents systèmes.

9 - Pièges fréquents

- Confondre altitude et distance au centre de la planète.
- Additionner deux vecteurs écrits dans des repères différents.
- Oublier que le repère lié au véhicule tourne avec le véhicule.
- Utiliser une position ancienne comme si elle décrivait l'état présent.
- Confondre date absolue, durée et temps de propagation du signal.

10 - Exercices guidés

Question: Pourquoi « $x = 10 \text{ km}$ » est-il incomplet ?

Réponse: Parce qu'il faut au minimum connaître l'origine et la direction de l'axe x ; pour une donnée dynamique, il faut aussi l'instant.

Question: Une position passe de 200 m à 260 m entre 10 s et 13 s dans le même axe. Quelle variation moyenne ?

Réponse: $\Delta x = 60$ m et $\Delta t = 3$ s ; vitesse moyenne sur cet intervalle = $60 \div 3 = 20$ m/s.

Question: Pourquoi une caméra et une IMU doivent-elles partager un temps cohérent ?

Réponse: Pour que leurs mesures décrivent le véhicule au même instant ; sinon la fusion associe une image à une orientation ou une accélération qui appartient à un autre moment.

11 - À savoir expliquer

- Définir origine, axe, repère, repère corps et repère inertiel.
- Expliquer pourquoi une position doit être accompagnée d'un repère et d'un instant.
- Distinguer changement réel de position et changement de coordonnées dû au repère.
- Calculer une durée Δt et une translation simple.
- Expliquer pourquoi le temps-lumière oblige à dater précisément les mesures.

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/>

NASA - Deep Space Atomic Clock
<https://www.nasa.gov/mission/deep-space-atomic-clock-dsac/>

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.