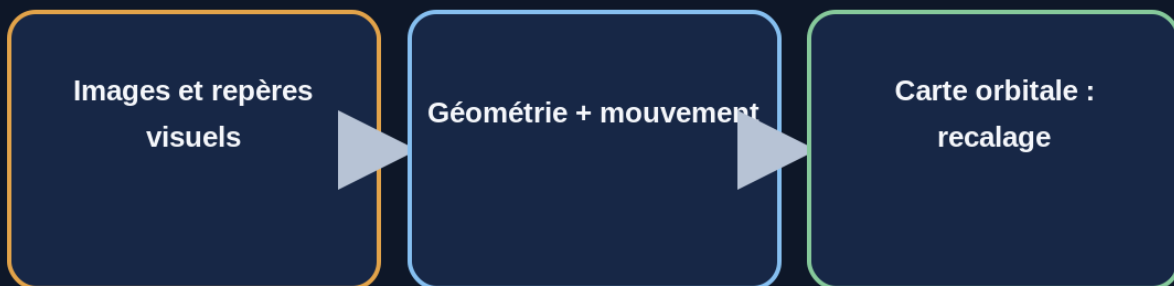


AM-08.06 — Navigation optique : se repérer avec des images, des planètes et le terrain

Comment une caméra peut-elle devenir un instrument de navigation plutôt qu'un simple appareil photo ?

AM-08.06 · SPACE ACADEMY

Transformer des pixels en position



Delta-Sierra · Space Academy

La vision mesure d'abord des directions et des mouvements apparents ; la navigation les rattache à une géométrie.

1 - Comprendre la scène

Sur Mars, il n'existe pas aujourd'hui de constellation GPS donnant en permanence la position d'un rover. Pourtant une caméra peut reconnaître le monde qui l'entoure. Si le logiciel mesure comment les rochers se déplacent dans l'image pendant que le rover roule, ou compare une vue panoramique à une carte orbitale, l'image devient une mesure de navigation.

La navigation optique peut servir en croisière interplanétaire, à proximité d'un astre, pendant un atterrissage ou sur le sol. Le principe commun est de transformer des pixels en géométrie : angles, directions, mouvements relatifs ou correspondances de terrain.

2 - Vocabulaire essentiel

Navigation optique - Estimation de position, vitesse ou attitude à partir d'images et de cibles visuelles.

Pixel - Plus petit élément d'une image numérique. Sa position dans l'image correspond à une direction via l'étalonnage de la caméra.

Visual odometry - Estimation du mouvement en suivant des caractéristiques visuelles entre plusieurs images.

Carte orbitale - Image ou modèle construit depuis un orbiteur et utilisé comme référence globale.

Orthomosaïque - Assemblage d'images corrigées géométriquement afin de représenter le terrain comme vu du dessus.

Recalage - Opération qui aligne une observation avec une référence connue.

3 - Mécanisme pas à pas

D'un pixel à une direction

Une caméra est étalonnée : sa focale, son centre optique et ses distorsions sont connus. La position d'un objet dans l'image peut alors être transformée en ligne de visée depuis le capteur.

Suivre le terrain

En comparant plusieurs images successives, le logiciel suit des points caractéristiques. Leur déplacement apparent, combiné au modèle de caméra, permet d'estimer le mouvement du véhicule. Les erreurs s'accumulent toutefois progressivement.

Revenir à une carte absolue

Une méthode de localisation globale compare une vue locale à une carte de référence plus vaste. En février 2026, JPL a annoncé l'utilisation par Perseverance de Mars Global Localization, qui associe des panoramas Navcam à l'imagerie orbitale afin de recalibrer sa position sans intervention humaine.

4 - Formules et lecture

$$\text{angle} \approx \arctan(x / f)$$

« angle est approximativement égal à arc tangente de x divisé par f ». x est ici le décalage sur le capteur et f la distance focale, dans un modèle simple.

La géométrie d'une caméra transforme une distance mesurée dans le plan image en direction angulaire. Les systèmes réels corrigent les distorsions et utilisent deux dimensions.

$$\text{distance} \approx \text{base} / \tan(\text{angle})$$

« distance est approximativement égale à la base divisée par la tangente de l'angle », dans une géométrie de triangulation simplifiée.

Avec une base connue entre deux observations ou deux caméras, un angle peut fournir une information de profondeur. La géométrie exacte dépend du montage.

5 - Unités et vérification

Les images se décrivent en pixels, mais la navigation finit par produire des angles en radians/degrés et des distances en mètres/kilomètres. Le passage pixel → angle dépend de l'étalonnage. Une précision d'un pixel n'a donc pas de signification universelle sans connaître le champ de vision et la résolution.

Une caméra n'est pas une règle. Sans calibration et sans modèle géométrique, un pixel ne donne ni un angle exact ni une distance.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Déplacement apparent

Un rocher passe de la colonne 600 à la colonne 640 entre deux images.

déplacement image = 640 – 600
déplacement image = 40 pixels

Conclusion: Le nombre de pixels décrit d'abord un changement dans l'image ; il faut le modèle de caméra pour en déduire un angle ou un mouvement réel.

Exemple 2 — Triangulation pédagogique

Deux positions d'observation sont séparées par une base de 10 m et un angle géométrique simplifié vaut 5°.

$\tan(5^\circ) \approx 0.0875$
distance $\approx 10 \div 0.0875$
distance ≈ 114 m

Conclusion: Ce calcul donne seulement l'ordre de grandeur dans le triangle choisi ; les vraies solutions utilisent toute la géométrie des lignes de visée.

Exemple 3 — Dérive puis recalage

Un rover estime sa position par visual odometry et accumule 25 m d'incertitude. Une correspondance fiable avec une carte orbitale fournit une nouvelle référence globale.

avant : estimation locale + dérive
correspondance terrain ↔ carte
après : position globale recalée

Conclusion: La carte n'empêche pas toute erreur locale, mais elle peut empêcher la dérive de croître indéfiniment.

7 - Approfondissement

Visual odometry et glissement des roues

Sur un rover, compter la rotation des roues ne suffit pas : elles peuvent glisser. La vision observe directement le déplacement apparent du terrain et aide à corriger cette ambiguïté.

Terrain pauvre en détails

Une plaine uniforme, la poussière, les ombres ou des changements d'éclairage rendent les correspondances plus difficiles. La navigation doit alors augmenter l'incertitude ou s'appuyer davantage sur d'autres capteurs.

Navigation à l'atterrissage

Des algorithmes peuvent comparer le terrain observé pendant la descente à une carte afin d'estimer la position relative à des zones dangereuses. Cette logique appartient à la même famille que la localisation au sol, avec des contraintes de vitesse et de sécurité beaucoup plus sévères.

Autonomie et calcul embarqué

Plus une mission veut se localiser sans attendre la Terre, plus elle doit embarquer cartes, modèles de caméra, puissance de calcul et logiciels capables de rejeter de mauvaises correspondances.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

La surface martienne impose de longues distances, des obstacles et un délai radio qui interdit une conduite permanente depuis la Terre. La navigation visuelle permet au véhicule de comprendre localement son environnement.

L'annonce JPL de 2026 sur Mars Global Localization illustre une évolution importante : comparer automatiquement la vue d'un rover à l'imagerie orbitale afin de réduire la dépendance au recalage humain.

9 - Pièges fréquents

- Croire qu'une photo contient directement la distance de chaque objet.
- Confondre visual odometry, qui dérive, avec une localisation globale absolue.
- Oublier la calibration optique et la distorsion.
- Accepter une correspondance de terrain sans tester sa plausibilité.
- Supposer que la lumière, la poussière et les ombres n'affectent pas la vision.

10 - Exercices guidés

Question: Un point se déplace de 25 pixels à droite. Que savez-vous avec certitude ?

Réponse: Seulement son déplacement dans le plan image. Pour traduire en angle ou mouvement réel, il faut la calibration et la géométrie.

Question: Pourquoi la visual odometry dérive-t-elle ?

Réponse: Parce que de petites erreurs dans chaque estimation de mouvement s'additionnent au fil des images.

Question: Pourquoi une carte orbitale peut-elle servir de « recalage absolu » ?

Réponse: Parce qu'elle rattache des motifs locaux à un repère cartographique global connu.

11 - À savoir expliquer

- Définir navigation optique, pixel, visual odometry et recalage.
- Expliquer comment une caméra produit une ligne de visée après calibration.
- Distinguer déplacement dans l'image et mouvement réel.
- Expliquer pourquoi la visual odometry dérive.
- Décrire le principe de Mars Global Localization sans le confondre avec un GPS martien.

12 - Sources NASA / JPL

NASA/JPL - Perseverance autonomously pinpoints its location on Mars

<https://www.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance/perseverance-rover/nasas-perseverance-now-autonomously-pinpoints-its-location-on-mars/>

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.