

Guidage, navigation et contrôle: savoir où l'on est et agir

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Guidage, navigation et contrôle: savoir où l'on est et agir: comment « L'unité inertielle mesure des variations, pas une position absolue » agit-il sur « Estimer un état consiste à combiner modèle et mesures », et quel repère issu de « Le contrôle ferme la boucle » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une IMU associe gyromètres et accéléromètres. En intégrant les mesures on propage attitude, vitesse et position, mais les biais s'accumulent.

1

L'unité inertielle mesure des variations, pas une position absolue

Une IMU associe gyromètres et accéléromètres.

2

Estimer un état consiste à combiner modèle et mesures

Un filtre d'estimation ne « choisit » pas arbitrairement un capteur.

3

Le contrôle ferme la boucle

Dans une boucle simple, une erreur $e = r - y$ compare la référence r à la sortie mesurée y .

Repère concret. En intégrant les mesures on propage attitude, vitesse et position, mais les biais s'accumulent.

- L'unité inertielle mesure des variations, pas une position absolue — Une IMU associe gyromètres et accéléromètres.
- Estimer un état consiste à combiner modèle et mesures — Un filtre d'estimation ne « choisit » pas arbitrairement un capteur.
- Le contrôle ferme la boucle — Dans une boucle simple, une erreur $e = r - y$ compare la référence r à la sortie mesurée y .

COMMUNICATIONS ET NAVIGATION SUR MARS

Rester connectés. S'orienter. Décider. Malgré la distance, avancer ensemble.

1

RÉSEAU LOCAL MARTIEN

Une toile numérique au cœur de la colonie.

- Réseau maillé sans fil entre habitats, véhicules et équipements.
- Priorité aux données vitales et à la voix.
- Fonctionne de façon autonome, même sans lien avec la Terre.

2

RELAIS ORBITAUX

Des satellites en orbite pour voir plus loin.

- Satellites de communication en orbite martienne assurent une couverture continue.
- Passerelles entre la surface et la Terre.
- Multiples orbites pour éviter les zones d'ombre et les pertes de signal.

3

LIAISON TERRE-MARS

Le lien interplanétaire.

- Communications via le Deep Space Network et stations partenaires.
- Débit adapté : données essentielles d'abord.
- Messages asynchrones et planification des échanges pour optimiser chaque contact.

4

NAVIGATION, SYNCHRONISATION ET DÉLAIS

S'orienter et agir avec précision.

- Navigation autonome avec constellations de satellites, capteurs de surface et cartes haute précision.
- Horloges atomiques pour une synchronisation fiable.
- Décisions locales éclairées : on planifie aujourd'hui pour réussir demain.

5

CONTINUITÉ, REDONDANCE ET SÉCURITÉ

La résilience est notre meilleure connexion.

- Systèmes et chemins de communication redondants.
- Surveillance continue et basculement automatique.
- Protection des données, authentification et plans de secours pour chaque scénario.

NOTRE PRINCIPE

Autonomie locale, coopération orbitale, lien terrestre.

UNE SEULE MISSION. PLUSIEURS LIENS.

À RETENIR

- ✓ Nous communiquons intelligemment.
- ✓ Nous naviguons avec précision.
- ✓ Nous restons connectés, même quand la distance nous sépare.

LE CHIFFRE CLÉ

55 à 400 Mb/s

Débit typique Terre-Mars selon la distance et l'alignement

SUR MARS, CHAQUE SIGNAL COMPTE. | **CHAQUE DÉCISION NOUS RAPPROCHE DE DEMAIN.**

FIABLE

Des systèmes robustes pour un lien permanent.

PRÉCIS

Navigation et temps synchronisés.

COLLABORATIF

Échanges optimisés, équipe connectée.

SÉCURISÉ

Données protégées, missions assurées.

COMMUNICATIONS ET NAVIGATION SUR MARS

Rester connectés. S'orienter. Décider. Malgré la distance, avancer ensemble.

1

RÉSEAU LOCAL MARTIEN

Une toile numérique au cœur de la colonie.

- Réseau maillé sans fil entre habitats, véhicules et équipements.
- Priorité aux données vitales et à la voix.
- Fonctionne de façon autonome, même sans lien avec la Terre.

2

RELAIS ORBITAUX

Des satellites en orbite pour voir plus loin.

- Satellites de communication en orbite martienne assurent une couverture continue.
- Passerelles entre la surface et la Terre.
- Multiples orbites pour éviter les zones d'ombre et les pertes de signal.

3

LIAISON TERRE-MARS

Le lien interplanétaire.

- Communications via le Deep Space Network et stations partenaires.
- Débit adapté : données essentielles d'abord.
- Messages asynchrones et planification des échanges pour optimiser chaque contact.

4

NAVIGATION, SYNCHRONISATION ET DÉLAIS

S'orienter et agir avec précision.

- Navigation autonome avec constellations de satellites, capteurs de surface et cartes haute précision.
- Horloges atomiques pour une synchronisation fiable.
- Décisions locales éclairées : on planifie aujourd'hui pour réussir demain.

5

CONTINUITÉ, REDONDANCE ET SÉCURITÉ

La résilience est notre meilleure connexion.

- Systèmes et chemins de communication redondants.
- Surveillance continue et basculement automatique.
- Protection des données, authentification et plans de secours pour chaque scénario.

NOTRE PRINCIPE

Autonomie locale, coopération orbitale, lien terrestre.

UNE SEULE MISSION. PLUSIEURS LIENS.

À RETENIR

- ✓ Nous communiquons intelligemment.
- ✓ Nous naviguons avec précision.
- ✓ Nous restons connectés, même quand la distance nous sépare.

LE CHIFFRE CLÉ

55 à 400 Mb/s

Débit typique Terre-Mars selon la distance et l'alignement

SUR MARS, CHAQUE SIGNAL COMPTE. | **CHAQUE DÉCISION NOUS RAPPROCHE DE DEMAIN.**

FIABLE

Des systèmes robustes pour un lien permanent.

PRÉCIS

Navigation et temps synchronisés.

COLLABORATIF

Échanges optimisés, équipe connectée.

SÉCURISÉ

Données protégées, missions assurées.

Guidage et navigation ne sont pas isolés: ils dépendent d'un réseau local robuste, de relais, du temps et d'une autonomie adaptée au délai Terre–Mars.



Visualisation conceptuelle d'une mesure externe utilisable pour recalibrer une navigation. Le principe pédagogique est de combiner des capteurs aux erreurs différentes afin que l'estimation d'état reste observable même lorsqu'une source devient momentanément mauvaise.

Le **GNC** — guidage, navigation et contrôle — répond à trois questions différentes. La navigation estime l'état du véhicule; le guidage décide quel état il faut atteindre; le contrôle commande les actionneurs pour réduire l'écart. Les confondre rend les pannes difficiles à diagnostiquer. Ce module construit la boucle pas à pas, des capteurs jusqu'au **mode dégradé**.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 08

Comprendre avant de calculer

Un véhicule reçoit des mesures de gyroscopes, étoiles et radio. Il doit savoir où il est, où il doit aller, puis commander ses actionneurs sans créer d'instabilité.

Progression du module — guidage; navigation; contrôle; boucle de rétroaction.

guidage

Définition. Le guidage décide la trajectoire ou l'objectif de mouvement à suivre à partir de la mission et de l'état estimé.

Exemple. Lors d'une correction interplanétaire, le guidage détermine le changement d'état souhaité et la cible de manœuvre.

Piège. Le guidage ne mesure pas directement la position; il dépend de la navigation.

Contrôle mental. Le **guidage** fournit une consigne ou une trajectoire cible: vérifiez qu'il répond à « où voulons-nous aller? » plutôt qu'à « où sommes-nous? », qui relève de la navigation.

Exercice guidé — guidage

Situation à reconnaître. Le guidage décide la trajectoire ou l'objectif de mouvement à suivre à partir de la mission et de l'état estimé.

Vérification demandée. Le guidage fournit une consigne ou une trajectoire cible: vérifiez qu'il répond à « où voulons-nous aller? » plutôt qu'à « où sommes-nous? », qui relève de la navigation.

Erreur à écarter. Le guidage ne mesure pas directement la position; il dépend de la navigation.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le guidage décide la trajectoire ou l'objectif de mouvement à suivre à partir de la mission et de l'état estimé.

Test du cas

Le guidage fournit une consigne ou une trajectoire cible: vérifiez qu'il répond à « où voulons-nous aller? » plutôt qu'à « où sommes-nous? », qui relève de la navigation.

Piège exclu

Le guidage ne mesure pas directement la position; il dépend de la navigation.

Conséquence opérationnelle

Dans le cas ce point, l'équipe doit retenir le point suivant: Le guidage ne mesure pas directement la position; il dépend de la navigation.. Toute violation de cette limite impose de requalifier l'état du système avant de poursuivre.

Quantification

guidage: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

guidage: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

navigation

Définition. La navigation estime position, [vitesse](#), attitude et parfois d'autres états à partir de mesures et de modèles.

Exemple. Une centrale inertielle propage un état tandis que des mesures externes corrigent la dérive.

Piège. Une navigation précise peut être incohérente si le [repère](#), l'époque ou les biais de capteurs sont mal définis.

Contrôle mental. La [navigation](#) estime l'état présent à partir de mesures: si aucune observation ne peut corriger la dérive du modèle, l'incertitude doit croître avec le temps.

Exercice guidé — navigation

Situation à reconnaître. La navigation estime position, vitesse, attitude et parfois d'autres états à partir de mesures et de modèles.

Vérification demandée. La navigation estime l'état présent à partir de mesures: si aucune observation ne peut corriger la dérive du modèle, l'incertitude doit croître avec le temps.

Erreur à écarter. Une navigation précise peut être incohérente si le repère, l'époque ou les biais de capteurs sont mal définis.

Corrigé raisonné

Sens précis

La navigation estime position, vitesse, attitude et parfois d'autres états à partir de mesures et de modèles.

Test du cas

La navigation estime l'état présent à partir de mesures: si aucune observation ne peut corriger la dérive du modèle, l'incertitude doit croître avec le temps.

Piège exclu

Une navigation précise peut être incohérente si le repère, l'époque ou les biais de capteurs sont mal définis.

Conséquence opérationnelle

Ce principe devient opérationnel seulement si la mesure et le modèle racontent la même chose. Dans ce module, La navigation estime l'état présent à partir de mesures: si aucune observation ne peut corriger la dérive du modèle, l'incertitude doit croître avec le temps.; sinon la marge ou le mode retenu doit être réévalué.

Quantification

navigation: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

navigation: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

contrôle

Définition. Le contrôle transforme un objectif de guidage en commandes physiques et corrige les écarts grâce à une boucle de rétroaction.

Exemple. Un contrôleur d'attitude commande roues de réaction ou propulseurs pour réduire une erreur d'orientation.

Piège. Un gain trop agressif peut provoquer oscillations ou saturation des actionneurs.

Contrôle mental. Le contrôle transforme un écart entre consigne et état en action: un signe inversé dans la commande amplifie l'erreur au lieu de la réduire.

Exercice guidé — contrôle

Situation à reconnaître. Le contrôle transforme un objectif de guidage en commandes physiques et corrige les écarts grâce à une boucle de rétroaction.

Vérification demandée. Le contrôle transforme un écart entre consigne et état en action: un signe inversé dans la commande amplifie l'erreur au lieu de la réduire.

Erreur à écarter. Un gain trop agressif peut provoquer oscillations ou saturation des actionneurs.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le contrôle transforme un objectif de guidage en commandes physiques et corrige les écarts grâce à une boucle de rétroaction.

Test du cas

Le contrôle transforme un écart entre consigne et état en action: un signe inversé dans la commande amplifie l'erreur au lieu de la réduire.

Piège exclu

Un gain trop agressif peut provoquer oscillations ou saturation des actionneurs.

Conséquence opérationnelle

Un contrôleur d'attitude commande roues de réaction ou propulseurs pour réduire une erreur d'orientation.

Quantification

contrôle: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

contrôle: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

boucle de rétroaction

Définition. Une boucle de rétroaction mesure un écart, calcule une correction, agit puis mesure à nouveau le résultat.

Exemple. Un thermostat est un exemple quotidien simple; un contrôle d'attitude applique la même logique avec une dynamique plus complexe.

Piège. Un capteur retardé ou bruité peut dégrader une boucle qui serait stable avec une mesure idéale.

Contrôle mental. Perturbez mentalement la sortie: une rétroaction stabilisante doit produire une action qui s'oppose à l'écart, pas qui le renforce.

Exercice guidé — boucle de rétroaction

Situation à reconnaître. Une boucle de rétroaction mesure un écart, calcule une correction, agit puis mesure à nouveau le résultat.

Vérification demandée. Perturbez mentalement la sortie: une rétroaction stabilisante doit produire une action qui s'oppose à l'écart, pas qui le renforce.

Erreur à écarter. Un capteur retardé ou bruité peut dégrader une boucle qui serait stable avec une mesure idéale.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une boucle de rétroaction mesure un écart, calcule une correction, agit puis mesure à nouveau le résultat.

Test du cas

Perturbez mentalement la sortie: une rétroaction stabilisante doit produire une action qui s'oppose à l'écart, pas qui le renforce.

Piège exclu

Un capteur retardé ou bruité peut dégrader une boucle qui serait stable avec une mesure idéale.

Conséquence opérationnelle

La conséquence pratique de ce point est de relier le calcul à un critère observable. Ici, Perturbez mentalement la sortie: une rétroaction stabilisante doit produire une action qui s'oppose à l'écart, pas qui le renforce.; un écart à cette relation déclenche une vérification des données et hypothèses.

Guidage, navigation et contrôle : mini-leçons canoniques

Ces mini-leçons constituent la référence quantitative canonique du module. Les exemples numériques sont pédagogiques et doivent rester distingués des données de mission.

Erreur de suivi

$$e = r - y$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $e = r - y$ » dans le contexte de «Erreur de suivi» ?

2 — Intuition sans symboles

Le contrôleur compare la consigne à l'état estimé ou mesuré ; leur différence est l'erreur qu'il doit réduire.

3 — Grandeurs

e : erreur ; r : référence ou consigne ; y : mesure ou estimation.

4 — Formule

$$e = r - y$$

5 — Lecture

Lire la relation « $e = r - y$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

e : erreur ; r : référence ou consigne ; y : mesure ou estimation.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Même unité pour e , r et y , par exemple degrés.

9 — Convention

Conservé le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Soustraire l'état observé à la consigne donne le décalage signé à corriger.

11 — Hypothèses

Même repère, même signe et même instant pour r et y .

12 — Contrôle d'unités

Même unité pour e , r et y , par exemple degrés. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $r = 10^\circ$ et $y = 8^\circ$, $e = 10 - 8 = +2^\circ$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Soustraire l'état observé à la consigne donne le décalage signé à corriger.

15 — Contrôle algébrique

$y + e$ doit redonner r .

16 — Estimation mentale

10 moins 8 donne immédiatement 2° .

17 — Interprétation

Le signe indique de quel côté de la consigne se trouve l'état estimé.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Une mesure plus proche de la consigne réduit $|e|$; une erreur de mesure peut au contraire déplacer artificiellement e .

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $r = 15^\circ$ et $y = 11^\circ$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$e = 15 - 11 = +4^\circ.$$

Exercice autonome. $r = 5^\circ$ et $y = 7^\circ$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$e = 5 - 7 = -2^\circ$; le signe s'inverse car l'estimation dépasse la consigne.

21 — Décision mission

Vérifier la convention de signe avant de fermer une boucle de contrôle.

Commande proportionnelle

$$u = K \times e$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $u = K \times e$ » dans le contexte de «Commande proportionnelle» ?

2 — Intuition sans symboles

Une commande proportionnelle réagit à l'erreur en lui appliquant un gain : grande erreur, grande correction.

3 — Grandeurs

u : commande ; K : gain proportionnel ; e : erreur.

4 — Formule

$$u = K \times e$$

5 — Lecture

Lire la relation « $u = K \times e$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

u : commande ; K : gain proportionnel ; e : erreur.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Unité de u = unité de $K \times$ unité de e .

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication traduit le choix de sensibilité de la commande à l'erreur.

11 — Hypothèses

Régime où une loi proportionnelle locale est pertinente et sans saturation.

12 — Contrôle d'unités

Unité de u = unité de $K \times$ unité de e . Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $e = 2^\circ$ et $K = 0,5 \text{ unité}/^\circ$, $u = 0,5 \times 2 = 1,0$ unité de commande.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication traduit le choix de sensibilité de la commande à l'erreur.

15 — Contrôle algébrique

u/K doit redonner $e = 2^\circ$.

16 — Estimation mentale

Un gain d'un demi appliqué à deux unités d'erreur donne une unité de commande.

17 — Interprétation

K trop faible corrige lentement ; K trop élevé peut favoriser oscillation ou saturation.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À e fixe, u varie linéairement avec K jusqu'aux limites du système.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $K = 0,8 \text{ unité}/^\circ$ et $e = 1,5^\circ$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$u = 0,8 \times 1,5 = 1,20$ unité.

Exercice autonome. $K = 0,3 \text{ unité}/^\circ$ et $e = -4^\circ$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$u = 0,3 \times (-4) = -1,2$ unité ; le signe suit celui de l'erreur.

21 — Décision mission

Choisir K avec stabilité, saturation et dynamique réelles, pas sur ce calcul seul.

Accumulation d'un biais d'accéléromètre

$$\Delta v_{\text{biais}} \approx b_a \times t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta v_{\text{biais}} \approx b_a \times t$ » dans le contexte de «Accumulation d'un biais d'accéléromètre» ?

2 — Intuition sans symboles

Un petit biais d'accélération persistant s'intègre dans le temps et devient une erreur de vitesse mesurable.

3 — Grandeurs

Δv_{biais} : erreur de vitesse ; b_a : biais d'accélération ; t : durée.

4 — Formule

$$\Delta v_{\text{biais}} \approx b_a \times t$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\Delta v_{\text{biais}} \approx b_a \times t$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

Δv_{biais} : erreur de vitesse ; b_a : biais d'accélération ; t : durée.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Δv en m/s ; b_a en m/s^2 ; t en s .

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Une accélération constante intégrée pendant t produit un changement de vitesse égal à son produit par le temps.

11 — Hypothèses

Biais considéré constant sur l'intervalle.

12 — Contrôle d'unités

Δv en m/s ; b_a en m/s² ; t en s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $b_a = 1 \times 10^{-4}$ m/s² pendant 1 000 s, $\Delta v_{\text{biais}} = 0,10$ m/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Une accélération constante intégrée pendant t produit un changement de vitesse égal à son produit par le temps.

15 — Contrôle algébrique

$\Delta v/t$ doit retrouver 1×10^{-4} m/s².

16 — Estimation mentale

Un dix-millième de m/s² pendant mille secondes donne un dixième de m/s.

17 — Interprétation

Ce calcul montre pourquoi recalage et estimation de biais sont indispensables à la navigation autonome.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Doubler le temps double l'erreur de vitesse si le biais reste constant.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $b_a = 2 \times 10^{-4}$ m/s² pendant 600 s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta v = 2 \times 10^{-4} \times 600 = 0,12 \text{ m/s.}$$

Exercice autonome. $b_a = 5 \times 10^{-5}$ m/s² pendant 2 000 s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta v = 5 \times 10^{-5} \times 2\,000 = 0,10 \text{ m/s.}$$

21 — Décision mission

Fixer fréquence de recalage et budget d'erreur avant que le biais ne consomme la marge de navigation.

Erreur transversale de petit angle

$$x \approx R \times \theta$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $x \approx R \times \theta$ » dans le contexte de «Erreur transversale de petit angle» ?

2 — Intuition sans symboles

Une petite erreur angulaire devient une erreur latérale qui augmente avec la distance à la cible.

3 — Grandeurs

x : erreur transversale ; R : distance ; θ : erreur angulaire en radians.

4 — Formule

$$x \approx R \times \theta$$

5 — Lecture

Lire la relation « $x \approx R \times \theta$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

x : erreur transversale ; R : distance ; θ : erreur angulaire en radians.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

x et R dans la même unité de longueur ; θ en radians.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Pour un petit angle, la longueur d'arc et la tangente sont approximativement égales à $R\theta$.

11 — Hypothèses

Petit angle exprimé en radians et distance bien définie.

12 — Contrôle d'unités

x et R dans la même unité de longueur ; θ en radians. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

À $R = 8\,000$ m et $\theta = 0,15^\circ \times \pi/180 = 0,002618$ rad, $x \approx 8\,000 \times 0,002618 = 20,94$ m.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Pour un petit angle, la longueur d'arc et la tangente sont approximativement égales à $R\theta$.

15 — Contrôle algébrique

x/R doit redonner environ 0,002618 rad.

16 — Estimation mentale

À 8 km, un millième de radian vaut environ 8 m ; 2,6 milliradians donnent donc un peu plus de 20 m.

17 — Interprétation

Le même défaut de pointage devient plus pénalisant lorsque la cible est éloignée.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

x varie linéairement avec R et θ dans le domaine des petits angles.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $R = 5\,000$ m et $\theta = 0,10^\circ = 0,001745$ rad.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$x \approx 5\,000 \times 0,001745 = 8,73$ m.

Exercice autonome. $R = 12\,000$ m et $\theta = 0,05^\circ = 0,000873$ rad.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$x \approx 12\,000 \times 0,000873 = 10,47$ m.

21 — Décision mission

Transformer l'exigence de position latérale en exigence de pointage et de navigation.

Entraînement progressif

1. Expliquez sans équation quatre notions réellement utilisées dans « Guidage, navigation et contrôle: savoir où l'on est et agir », puis indiquez pour chacune l'observation qui permet de la reconnaître.
2. Refaire le calcul avec valeurs déjà converties.
3. Recevoir des données inutiles et choisir lesquelles utiliser — module 08 · Entraînement progressif.
4. Diagnostiquer un résultat volontairement faux.
5. Prendre une décision dans la scène mission en explicitant marge et limite — module 08 · Entraînement progressif.

Gate zéro prérequis

- Avant tout calcul de « Guidage, navigation et contrôle: savoir où l'on est et agir », vérifiez que vous pouvez nommer la grandeur recherchée, l'unité attendue et le phénomène qu'elle représente.
- Je sais lire la relation et les unités — « module 08 ».
- Je sais faire un [ordre de grandeur](#).
- Je sais expliquer une erreur fréquente.
- Je peux refaire un exercice sans copier le résultat — « module 08 ».

1. Décomposer G, N et C

[Navigation](#) estime position, vitesse, attitude et parfois biais de capteurs. [Guidage](#) génère une référence ou une trajectoire. **Contrôle** transforme l'erreur entre état estimé et référence en commandes vers roues à réaction, propulseurs, gouvernes ou autres actionneurs. Une panne de navigation peut faire croire au contrôle qu'il corrige une erreur qui n'existe pas.

Le guidage, la navigation et le contrôle forment une boucle mais répondent à trois questions différentes. La navigation estime l'état réel — position, vitesse, attitude et parfois biais de capteurs. Le guidage transforme l'objectif de mission en trajectoire ou attitude de référence. Le contrôle commande les actionneurs pour réduire l'écart entre état estimé et référence. Cette séparation est utile au diagnostic: si le véhicule suit parfaitement une mauvaise référence, le contrôle fonctionne peut-être alors que le guidage est faux. Si la référence est correcte mais l'estimation dérive, le problème est navigation. Une architecture explicable conserve ces frontières dans la [télémétrie](#) et dans les modes dégradés.

2. L'unité inertielle mesure des variations, pas une position absolue

Une [IMU](#) associe gyromètres et accéléromètres. En intégrant les mesures on propage attitude, vitesse et position, mais les biais s'accumulent. Une erreur constante d'[accélération](#) $\mathbf{b} = 10^{-4} \text{ m/s}^2$ crée après $\mathbf{t} = 1\,000 \text{ s}$ une erreur de vitesse approximative $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{b} \mathbf{t} = 0,1 \text{ m/s}$. L'erreur de position associée croît encore plus vite. Il faut donc recalibrer l'inertiel avec des mesures externes.

Une unité inertielle mesure des accélérations spécifiques et des vitesses angulaires. Pour obtenir vitesse, position et attitude, le calculateur intègre ces mesures au cours du temps. Tout biais s'intègre lui aussi. Un [accéléromètre](#) présentant seulement 100 micro-g d'erreur — environ $0,000981 \text{ m/s}^2$ — accumulerait dans un modèle unidimensionnel simplifié près de $0,85 \text{ m/s}$ d'erreur de vitesse après 15 minutes. La réalité ajoute rotations, gravité et filtrage, mais le principe reste: une IMU est excellente pour la continuité à court terme, pas pour fournir seule une vérité absolue pendant des jours. Elle doit être recalée par des mesures externes dont l'[incertitude](#) est elle aussi connue.

3. Le star tracker fournit une référence d'attitude

Un viseur d'étoiles compare un champ observé à un catalogue et déduit l'orientation. Il est très précis mais peut être aveuglé par le Soleil, une planète brillante ou des contraintes géométriques. Les gyromètres assurent la continuité entre deux solutions stellaires. L'architecture combine ainsi mesure absolue intermittente et propagation rapide.

Un star tracker reconnaît une configuration d'étoiles et fournit une référence d'attitude absolue très précise. Sa mesure dépend cependant de son champ de vue, de la lumière parasite, de la température, de la [vitesse angulaire](#) et de la qualité du catalogue. Une étoile occultée ou une exposition au Soleil peut rendre la solution indisponible sans panne matérielle. Le logiciel doit donc distinguer 'pas de solution' de 'capteur mort'. Pendant une interruption, l'IMU propage l'attitude avec une incertitude croissante; lorsque le star tracker revient, l'écart est testé avant réintégration. Cette transition évite qu'une première mesure aberrante provoque une commande brutale.

4. Estimer un état consiste à combiner modèle et mesures

Un filtre d'estimation ne « choisit » pas arbitrairement un capteur. Il prédit l'état avec un modèle puis corrige cette prédiction avec des mesures et leurs incertitudes. L'écart mesure-prédiction, appelé résidu ou innovation selon le contexte, aide à détecter les incohérences. Un modèle trop confiant peut rejeter une bonne mesure; un modèle trop vague peut suivre le bruit.

Exercice A — moyenne pondérée intuitive

Deux capteurs donnent 100 et 104. Le premier a une incertitude beaucoup plus faible. La meilleure estimation doit-elle être 102?

Pas nécessairement. Une fusion pondérée donne davantage de poids à la mesure la plus précise. La moyenne simple suppose implicitement des qualités équivalentes, ce qui n'est pas justifié ici.

Données du cas

Deux capteurs donnent 100 et 104; le premier est annoncé beaucoup plus précis, mais aucune valeur numérique d'incertitude n'est fournie.

Relation

Une fusion pondérée attribue davantage de poids à la mesure la plus précise; avec des variances connues, les poids sont souvent choisis inversement proportionnels aux variances.

Raisonnement

La moyenne simple 102 donnerait le même poids aux deux capteurs. Or l'énoncé précise que leurs incertitudes sont très différentes: l'estimation fusionnée doit donc être tirée vers 100, sans qu'une valeur exacte puisse être calculée tant que les incertitudes ne sont pas chiffrées.

Résultat

102 n'est pas nécessairement la meilleure estimation; la valeur pondérée doit être plus proche de 100.

Contrôle

Si les deux incertitudes devenaient égales, les poids deviendraient égaux et la fusion retomberait sur la moyenne simple 102.

Interprétation

La qualité d'une estimation dépend autant de l'incertitude associée aux mesures que de leurs valeurs brutes; ignorer cette information peut dégrader le guidage.

Un filtre d'état combine un modèle dynamique avec des mesures imparfaites. L'idée centrale n'est pas le nom du filtre mais l'équilibre entre prédiction et preuve. Une mesure assortie d'une grande incertitude doit peu déplacer l'estimation; une mesure précise et cohérente peut la corriger fortement. Le résidu, ou innovation, compare mesure attendue et mesure reçue. Si ce résidu devient statistiquement improbable, il peut signaler capteur dégradé, modèle faux ou manœuvre non modélisée. La [covariance](#) représente l'incertitude estimée et ses corrélations. Une bonne chaîne GNC transmet donc l'état et sa confiance, car la même position peut être acceptable pour pointer une antenne et insuffisante pour une descente terminale.

5. L'observabilité dit si l'on peut réellement connaître une grandeur

Un système peut avoir beaucoup de capteurs et rester incapable de distinguer certaines erreurs. Si deux hypothèses produisent exactement les mêmes mesures, la grandeur n'est pas observable avec cette [configuration](#). Changer d'attitude, attendre une géométrie différente ou utiliser une autre technologie peut rendre l'état observable. L'observabilité est donc une propriété de la combinaison dynamique + mesures, pas du nombre de capteurs.

L'observabilité demande si les mesures disponibles permettent réellement de séparer les grandeurs recherchées. Deux capteurs nombreux mais géométriquement équivalents peuvent ne pas apporter deux informations indépendantes. Par exemple, mesurer seulement une distance sans angle laisse plusieurs positions compatibles; répéter la même mesure très vite ne supprime pas cette ambiguïté. Le mouvement du véhicule ou une seconde direction de visée peut rendre l'état observable. Avant d'ajouter un capteur, l'ingénieur demande donc quelle variable nouvelle il contraint. Cette approche évite une [redondance](#) de façade où plusieurs instruments partagent le même angle mort, la même référence ou le même modèle d'erreur.

6. Le guidage transforme un objectif en référence atteignable

« Aller vers le [site](#) sûr » ne suffit pas. Le guidage tient compte de la dynamique, des limites de poussée, des corridors interdits et des réserves. Une référence impossible peut saturer le contrôle. Une bonne loi de guidage propose une trajectoire compatible avec ce que les actionneurs peuvent réellement produire.

Le guidage produit une consigne qui doit rester dans l'enveloppe physique du véhicule. Une trajectoire mathématiquement élégante peut exiger une accélération, une vitesse angulaire ou une consommation que les actionneurs ne peuvent fournir.

Le guidage doit intégrer contraintes de poussée, attitude autorisée, obstacles, réserve de [propergol](#) et marges de navigation. Dans une descente, demander un divert trop tard peut saturer les moteurs ou forcer un angle qui dégrade les capteurs. Une méthode saine calcule d'abord l'ensemble atteignable puis choisit la référence à l'intérieur. Le contrôle ne doit pas être chargé de rendre possible une consigne que la physique a déjà rendue impossible.

7. Le contrôle ferme la boucle

Dans une boucle simple, une erreur $e = r - y$ compare la référence r à la sortie mesurée y . Une commande proportionnelle peut prendre la forme $u = K e$, où K est un gain et u la commande. Augmenter K n'améliore pas indéfiniment le système: délais, saturation, bruit et dynamique non modélisée peuvent provoquer oscillations ou instabilité.

Exercice B — commande proportionnelle

Une erreur angulaire vaut 2° et un contrôleur pédagogique utilise $K = 0,5$ unité de commande par degré. Quelle commande brute produit-il?

$u = K e = 0,5 \times 2 = 1$ unité. Il faut ensuite vérifier saturation, signe, unités et dynamique réelle de l'actionneur.

Données du cas

Exercice B — commande proportionnelle — Une erreur angulaire vaut 2° et un contrôleur pédagogique utilise $K = 0,5$ unité de commande par degré. Quelle commande brute produit-il?

Relation

$u = K e = 0,5 \times 2 = 1$ unité.

Raisonnement

$u = K e = 0,5 \times 2 = 1$ unité. Il faut ensuite vérifier saturation, signe, unités et dynamique réelle de l'actionneur.

Résultat

$u = K e = 0,5 \times 2 = 1$ unité.

Contrôle

Il faut ensuite vérifier saturation, signe, unités et dynamique réelle de l'actionneur.

Le contrôle ferme la boucle en transformant une erreur en commande. Même un exemple simple proportionnel, $u = K \times e$, montre le compromis: un gain K trop faible corrige lentement; trop élevé, il peut exciter délais, flexibilité structurelle, bruit ou saturation. Un véhicule réel ajoute dérivée, intégration, filtres, limitations et dynamique des actionneurs. La stabilité n'est donc pas seulement 'l'erreur finit par zéro': il faut vérifier dépassement, temps de réponse, robustesse aux incertitudes et comportement lorsque les capteurs deviennent bruyants. Un [mode de survie](#) peut volontairement accepter une précision moindre en échange de marges de stabilité plus grandes et d'une logique plus simple.

8. Les actionneurs ont des limites et peuvent saturer

Une roue à réaction peut accumuler du [moment cinétique](#) et atteindre sa vitesse limite; un propulseur possède une impulsion minimale et consomme du propergol. Le contrôle doit connaître ces contraintes. Lorsqu'un actionneur sature, continuer à demander davantage n'ajoute plus d'autorité et peut faire diverger l'erreur.

Les actionneurs transportent leurs propres ressources et limites. Une roue à réaction stocke du moment cinétique jusqu'à saturation; un propulseur consomme du propergol et possède une impulsion minimale; un moteur de cardan a une course et une vitesse; un magnétocoupleur dépend du champ local et devient inutile loin d'un corps magnétisé. Une commande GNC doit connaître ces limites. Lorsque les roues approchent de la saturation, une désaturation transfère le moment à un autre actionneur. La planification doit choisir un moment où cette opération ne perturbe pas une observation ou une manœuvre. L'autorité de contrôle est donc une ressource à budgéter comme l'énergie.

9. FDIR GNC: ne pas laisser un capteur faux commander le véhicule

Le FDIR surveille résidus, cohérence entre capteurs, dynamique attendue et états de santé. Trois capteurs identiques ne constituent pas une protection parfaite s'ils partagent le même logiciel ou la même perturbation. L'indépendance des références — inertielle, stellaire, radio, optique, terrain — peut être plus utile que la simple duplication.

Le FDIR GNC ne consiste pas à voter aveuglément entre trois capteurs. Trois instruments identiques peuvent partager le même logiciel, la même alimentation, le même catalogue ou le même environnement lumineux et donc la même **cause commune**. Une meilleure stratégie compare des preuves de nature différente: inertiel, stellaire, solaire, radio, dynamique attendue. Elle examine aussi la cohérence temporelle. Un capteur qui saute brutalement tandis que les autres et les actionneurs restent cohérents devient suspect; une divergence progressive commune peut plutôt révéler un modèle erroné. L'isolation doit préserver suffisamment d'information pour le mode suivant, sinon le diagnostic crée lui-même une perte de contrôle.

10. Scénario: star tracker indisponible pendant une manœuvre

Le véhicule conserve l'attitude en propageant les gyromètres, mais l'incertitude croît. La procédure définit combien de temps cette propagation reste acceptable, quelles activités sont suspendues et quelle autre référence peut recalculer l'attitude. Le mode dégradé doit être lié à un domaine de validité quantifié, pas à la formule « fonctionner en inertiel ».

Pendant une manœuvre sans star tracker, l'IMU peut maintenir l'attitude pendant un temps limité, mais l'incertitude augmente. Le véhicule doit donc connaître à l'avance la précision minimale requise pour chaque phase. Une orientation solaire grossière peut tolérer plusieurs dixièmes de degré; une poussée directionnelle précise peut exiger bien mieux. Si l'incertitude franchit le seuil de la manœuvre, la bonne décision peut être d'interrompre et de retrouver une référence plutôt que de continuer 'à l'estime'. Le scénario d'entraînement doit inclure la **récupération** du capteur, le test de cohérence, la réinitialisation contrôlée du filtre et la preuve que l'actionneur n'a pas saturé pendant l'intervalle.

Étude guidée — un filtre qui devient trop confiant

Imaginez un estimateur d'attitude dont la covariance diminue progressivement parce que les mesures du star tracker sont très stables. Puis une réflexion parasite crée un biais faible mais persistant que le filtre n'a pas modélisé. Si le logiciel devient excessivement confiant, il peut rejeter une mesure inertielle correcte comme 'incohérente'. Le danger vient alors moins du bruit que d'une mauvaise représentation de l'incertitude. Le diagnostic doit comparer innovation, contexte capteur et références indépendantes avant d'isoler une voie.

Une stratégie de récupération peut augmenter temporairement l'incertitude déclarée, réduire la pondération du star tracker puis utiliser le Soleil ou une géométrie radio pour trancher. Le filtre n'est pas seulement un algorithme de précision; c'est un arbitre de confiance. Une mission robuste surveille donc aussi la cohérence statistique de ses résidus au cours du temps.

L'exercice demande de distinguer trois pannes: mesure fausse, modèle dynamique faux et covariance trop optimiste. Elles peuvent produire le même symptôme — un grand résidu — mais exigent des réponses différentes. Cette distinction protège contre le réflexe consistant à remplacer le capteur le plus visible alors que le problème peut être dans le logiciel.

11. Mini-projet: construire une chaîne de preuve GNC

1. Choisissez une grandeur à contrôler: attitude, **altitude** ou position.
2. Listez les capteurs qui l'observent directement ou indirectement.
3. Écrivez la référence du guidage.
4. Identifiez l'actionneur.
5. Ajoutez une saturation et un capteur perdu.
6. Expliquez comment le système détecte la dégradation et dans quel état sûr il passe.

Vous devez pouvoir montrer la chaîne complète de la mesure à l'effet physique.

12. Atelier mission — détecter une dérive inertielle sans fausse alarme

Un biais de gyromètre de seulement 0,01°/h paraît minuscule. Après 24 h sans recalage, l'ordre de grandeur de dérive angulaire atteint 0,24°. Cette multiplication simple, $\Delta\theta \approx \mathbf{b} \times \mathbf{t}$, utilise $\Delta\theta$ comme erreur d'angle, $\mathbf{b}$ comme biais angulaire par unité de temps et $\mathbf{t}$ comme durée. Dans une navigation réelle, le filtre estime le biais et l'attitude ensemble; le calcul montre pourquoi une référence absolue périodique reste précieuse.

Imaginez maintenant que le star tracker et l'IMU divergent lentement. Le système examine d'abord la géométrie: l'étoile de référence est-elle masquée? le viseur est-il proche d'une limite thermique? l'IMU vient-elle de subir une manœuvre? Puis il compare une troisième information indépendante, par exemple le Soleil ou une mesure radio. Déclarer immédiatement « IMU fautive » éliminerait peut-être le seul capteur encore sain.

Le diagnostic GNC doit conserver la notion de confiance. Une estimation peut rester utilisable avec une incertitude croissante pour orienter des panneaux solaires, mais ne plus être assez bonne pour une manœuvre fine. Les seuils opérationnels sont donc attachés aux activités.

13. Revue de stabilité, saturation et retour au nominal

Lorsqu'un contrôleur sature un actionneur, l'erreur peut continuer d'augmenter même si la commande calculée devient plus forte. Une stratégie anti-windup, une limitation de référence ou un changement de mode peut être nécessaire selon le type de contrôleur. Le cours ne cherche pas à synthétiser un PID complet; il faut retenir qu'un actionneur réel possède amplitude, vitesse, énergie et durée de fonctionnement limitées.

Après récupération d'un capteur, on ne le réintroduit pas nécessairement instantanément avec un poids maximal. La mesure peut être testée, comparée aux autres références puis réintégrée progressivement. Le retour au nominal est une transition contrôlée. Demandez toujours: quelle preuve autorise la réintégration, quel saut d'état est acceptable, et que fait le véhicule si les mesures divergent de nouveau?

Sources et références

- NASA — State of the Art: Guidance, Navigation and Control
- NASA/JPL — Mars 2020 Landing and Terrain-Relative Navigation
- NASA SCan — Space Communications and Navigation

Complément primaire vérifié: NASA NTRS — State-of-the-Art Small Spacecraft Technology

Studio d'ingénierie — relier erreur angulaire et sécurité

À 8 km d'une cible, une erreur angulaire de $0,15^\circ$ vaut $\theta = 0,15 \times \pi / 180 \approx 0,00262$ rad. Pour de petits angles, l'erreur transversale est approximativement $x = R\theta = 8\,000 \times 0,00262 \approx 21$ m. Ici R est la distance en mètres et θ l'angle en radians. Le calcul montre pourquoi une erreur qui paraît minuscule sur un capteur peut devenir une erreur de plusieurs dizaines de mètres au sol.

Le scénario ajoute 200 ms de **latence** de traitement et limite un actionneur à 80 % de son autorité nominale. L'élève doit dire si l'erreur reste observable et récupérable avant la prochaine barrière de décision. Il doit proposer au moins deux vérifications indépendantes — par exemple innovation du filtre et cohérence avec une mesure optique — puis définir la condition qui fait basculer le système vers une trajectoire plus conservatrice.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Erreur de suivi	Tracking error	PASS
02	Commande proportionnelle	Proportional control command	PASS
03	Accumulation d'un biais d'accéléromètre	Accelerometer-bias accumulation	PASS
04	Erreur transversale de petit angle	Small-angle lateral error	PASS

Termes de la progression. [boucle de rétroaction](#)