

AM-04.27 · SPACE ACADEMY

La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ?

Capteur, estimation, erreur, loi de commande, actionneur et dynamique : un exemple simplifié pour comprendre une boucle automatique de pilotage.

Boussole du cours

Question directrice : Si le lanceur dévie de la consigne, qui détecte l'erreur, qui décide et qui bouge le moteur ?

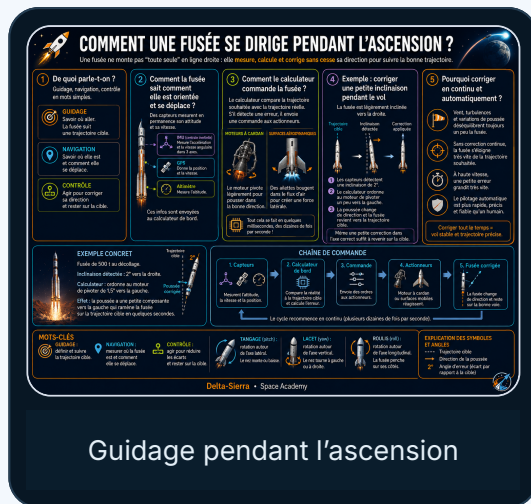
Repères :  MESURÉ ·  CONVENTION · 
CALCULÉ ·  HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE ·
 DONNÉE DE MISSION ·  DONNÉE
CONSTRUCTEUR ·  APPROXIMATION

Objectifs :

- distinguer consigne et mesure
- calculer une erreur signée
- comprendre une commande proportionnelle pédagogique
- relier capteurs, ordinateur et actionneur
- comprendre pourquoi la vraie loi est plus riche

Ressource pédagogique libre : ce contenu ne constitue ni une formation professionnelle, ni un diplôme, ni une certification, ni une habilitation. Les exemples de conception sont pédagogiques et ne remplacent pas l'ingénierie, les essais et la **qualification** INFO réglementaire d'un système spatial réel.

Réponse essentielle



La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ? La question à résoudre est la suivante : Si le lanceur dévie de la consigne, qui détecte l'erreur, qui décide et qui bouge le moteur ? Repères :  MESURÉ  CONVENTION  CALCULÉ  HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE  DONNÉE DE MISSION  DONNÉE CONSTRUCTEUR  APPROXIMATION

Objectifs : distinguer consigne et mesure
calculer une erreur signée
comprendre une commande proportionnelle
pédagogique
relier capteurs, ordinateur et actionneur
comprendre pourquoi la vraie loi est plus riche ?
Pendant les phases rapides, le calculateur de vol exécute automatiquement la boucle de guidage et de contrôle. Les capteurs inertiels mesurent rotations et accélérations ; des estimateurs reconstruisent l'état du véhicule. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

Synthèse de départ : les démonstrations, exemples, limites et sources sont développés dans le corps du cours.

Mots clés avant de commencer

poussée^{INFO} · gimbal^{INFO} · unité^{INFO} ·
ordre de grandeur^{INFO} · hypothèse^{INFO}

1 — La fusée n'est pas pilotée comme une voiture par un humain

Pendant les phases rapides, le calculateur de vol exécute automatiquement la boucle de guidage et de contrôle. Les capteurs inertiels mesurent rotations et accélérations ; des estimateurs reconstruisent l'état du véhicule.

L'humain définit mission, limites et procédures, mais ne tourne pas manuellement une manette à chaque dixième de seconde pour maintenir l'axe du lanceur.

Schéma pédagogique 1 : 1 — La fusée n'est pas pilotée comme une voiture par un humain — La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ?

1 — La fusée n'est pas pilotée comme une voiture par un humain

2 — Définir l'erreur

Supposons une consigne d'attitude de 0° sur un axe et une mesure de $+2^\circ$. Nous définissons erreur = consigne - mesure. Donc $e = 0 - 2 = -2^\circ$.

Le signe négatif ne dit pas "mauvais résultat" : il indique le sens dans lequel il faut corriger selon notre convention.

Schéma pédagogique 2 : 2 — Définir l'erreur — La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ?

2 — Définir l'erreur

3 — Un premier contrôleur proportionnel

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : commande = $K_p \times$ erreur, avec $K_p = 0,4$. Alors commande = $0,4 \times (-2^\circ) = -0,8^\circ$.

Le 0,4 n'est pas une valeur SpaceX, Ariane ou NASA. C'est une valeur choisie pour comprendre le principe. Une vraie loi utilise dynamique, vitesses angulaires, filtres, contraintes d'actionneur et souvent plusieurs boucles.

Schéma pédagogique 3 : 3 — Un premier contrôleur proportionnel — La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ?

3 — Un premier contrôleur proportionnel

4 — Pourquoi ne pas commander directement -2° de gimbal ?

Parce que le moteur agit sur une masse qui possède de l'inertie. Trop de commande peut

dépasser la cible, créer une oscillation ou exciter une flexion structurale.

Le contrôleur doit anticiper comment le véhicule va continuer à tourner pendant et après l'action. C'est pourquoi la vitesse angulaire est souvent aussi importante que l'angle.

Schéma pédagogique 4 : 4 —
Pourquoi ne pas commander
directement -2° de gimbal ? — La
fusée s'incline de 2° : comment la
boucle de contrôle réagit-elle ?

4 — Pourquoi ne pas commander
directement -2° de gimbal ?

5 — Les capteurs ne donnent pas une vérité parfaite

Gyroscopes et accéléromètres ont biais, bruit et dérive. Le logiciel fusionne plusieurs mesures et conserve une estimation avec incertitude. Une valeur aberrante doit être détectée avant d'être transformée en grosse commande.

La redondance seule ne suffit pas : trois capteurs qui partagent la même erreur systématique peuvent être d'accord et pourtant faux.

Schéma pédagogique 5 : 5 — Les
capteurs ne donnent pas une vérité
parfaite — La fusée s'incline de 2° :
comment la boucle de contrôle
réagit-elle ?

5 — Les capteurs ne donnent pas une
vérité parfaite

6 — Le vrai système est une boucle rapide



Pilotage en ascension : capteurs, erreur d'attitude, calculateur, actionneurs et correction de trajectoire.

La commande modifie le gimbal, donc la direction de poussée, donc l'accélération angulaire. Les capteurs mesurent le nouvel état quelques millisecondes plus tard ; l'ordinateur recalcule.

La stabilité de cette boucle est une science complète. Notre exemple $-0,8^\circ$ est uniquement la première marche permettant de comprendre le mécanisme.

Schéma pédagogique 6 : 6 — Le vrai système est une boucle rapide — La fusée s'incline de 2° : comment la boucle de contrôle réagit-elle ?

6 — Le vrai système est une boucle rapide

7 — Mesurer l'attitude n'est pas mesurer directement « la vérité »

Une centrale inertielle mesure notamment des rotations et des accélérations. Le logiciel combine ces informations dans le temps pour estimer l'état du véhicule. Toute mesure contient du bruit, un biais et une incertitude ; l'estimation peut donc dériver. D'autres références, lorsqu'elles sont disponibles, servent à recalculer ou à vérifier l'état estimé.

Le mot important est « estimation ». Un système automatique ne possède pas une connaissance parfaite de sa situation : il possède une meilleure estimation possible fondée sur des capteurs, des modèles et leur historique. C'est cette estimation, et non une vérité magique, qui alimente la boucle de contrôle.

8 — Pourquoi un exemple à 2° ne donne pas une recette de pilotage

Notre contrôleur proportionnel est volontairement élémentaire. Dans un véhicule réel, l'angle n'est qu'une partie du problème : la vitesse angulaire indique déjà si la fusée revient vers sa consigne ou s'en éloigne, et les modes flexibles de la structure peuvent être excités par une commande trop agressive. Les ingénieurs utilisent donc des modèles et des lois de commande adaptés au véhicule réel.

Le cas à 2° doit être lu comme une fenêtre sur le raisonnement : définir une erreur, choisir une convention de signe, appliquer une correction, observer la réponse et recommencer. Space Academy explique la logique de la boucle sans publier une loi de pilotage opérationnelle d'un lanceur réel.

8 — Trois cas : comment la commande réagit quand l'erreur change

Exemple A — erreur de 2°

Dans notre exemple pédagogique, l'erreur angulaire vaut $e = 2^\circ$ et le gain proportionnel $K_p = 0,4$. La commande simplifiée vaut $u = K_p \times e = 0,4 \times 2 = 0,8$ unité de commande. Le symbole K_p se lit « K p » : c'est ici un coefficient choisi pour illustrer comment une commande proportionnelle augmente avec l'erreur.

🎓 HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : 0,4 n'est pas un gain de vol SpaceX ou Ariane ; il est choisi pour l'apprentissage.

Exemple B — erreur divisée par deux

Si le véhicule n'est plus écarté que de 1° avec le même $K_p = 0,4$, alors $u = 0,4 \times 1 = 0,4$. L'erreur a été divisée par deux ; une loi purement proportionnelle divise donc aussi cette composante de commande par deux. Le lecteur voit immédiatement la sensibilité du résultat à la mesure d'attitude.

🧮 CALCULÉ : la relation est linéaire dans ce modèle simplifié.

Exemple C — gain deux fois plus grand

Avec $e = 2^\circ$ mais $K_p = 0,8$, $u = 0,8 \times 2 = 1,6$. Le même écart provoque une commande deux fois plus forte. Cela peut corriger plus vite, mais une commande trop agressive peut favoriser dépassement ou oscillation ; c'est pourquoi un vrai contrôleur est réglé avec le véhicule complet, ses délais, ses capteurs et ses actionneurs.

⚠️ APPROXIMATION : une fusée réelle ne se réduit pas à un seul gain proportionnel.

Signe de l'erreur — corriger dans le bon sens

Si l'erreur est $e = -2^\circ$ et $K_p = 0,4$, alors $u = -0,8$. Le signe moins ne signifie pas « mauvaise valeur » : il indique le sens opposé. Pour corriger une inclinaison à droite, la commande doit créer un moment qui ramène le véhicule vers la consigne, selon la convention de signe choisie par le système.

 CONVENTION : le choix de ce qui est positif ou négatif doit être défini une fois et appliqué partout.

Exercices et corrigés

Erreur

Consigne 1° , mesure $1,7^\circ$. $e = \text{consigne} - \text{mesure}$.

Corrigé : $e = 1 - 1,7 = -0,7^\circ$.

Commande pédagogique

$K_p = 0,5$ et $e = -0,7^\circ$.

Corrigé : $u = -0,35^\circ$ dans ce modèle fictif.

Piège

Pourquoi ne faut-il pas annoncer ce gain comme une valeur de Falcon 9 ?

Corrigé : Parce que c'est une hypothèse pédagogique ; les lois réelles sont propriétaires/complexes et dépendent du véhicule et de sa phase de vol.

Sources primaires et techniques

- [NASA Glenn — Rocket Control](#)
- [NASA NTRS — SLS core-stage thrust vector control performance](#)
- [ESA — Low Liquid Thrust Vector Actuation System for Ariane 6](#)
- [NASA NTRS — Considerations for TVC in-flight load predictions](#)