

Les Drones

Une Introduction

Pascal Morin

Sorbonne Université

Pascal.morin@sorbonne-universite.fr

Plan

1. Qu'est-ce qu'un drone? (exemples)
2. Application des drones
3. Constitution d'un drone
4. Modélisation
5. Commande
6. Estimation d'attitude

Qu'est-ce qu'un drone?

- **Drone**: un engin volant sans pilote à bord, doté d'un « certain niveau d'autonomie »
- Appellation parfois étendue à des véhicules mobiles plus généraux:
 - Drones marins
 - Drones sous-marins
 - Drones terrestres

Qu'est-ce qu'un drone?

Drones à voilure tournante de type « multi-hélices » (Multirotor UAVs)



« AR Drone » de Parrot - 4 hélices



Drone « Mavic » de DJI - 4 hélices



Drone 2x6 hélices

Qu'est-ce qu'un drone?

Drones à voilure tournante de type hélicoptère (Helicopter UAVs)



« Drone YAMAHA » de l'ONERA



Drone « Black Hornet » de FLIR (33 gr)



« VSR700 » d'Airbus (500-1000 kg)

Qu'est-ce qu'un drone?

Drones à voilure fixe (Fixed-wing UAVs)



Aile volante « eBee » de SenseFly



Drone de Delair-tech



MQ1- Predator

Qu'est-ce qu'un drone?

Drones hybrides (ou convertibles) (Hybrid UAVs)



Drone « Azimuth » de ALCORE Technologies



Drone « Mavion » de l'ISAE



Drone « Quadshot » de Transition Robotics

Qu'est-ce qu'un drone?

Voilier autonome



« SB Met » de Offshore Sensing AS: Traversée de l'atlantique autonome

Qu'est-ce qu'un drone?

Robots sous-marins



« Fi-Fish V6 » de Qysea



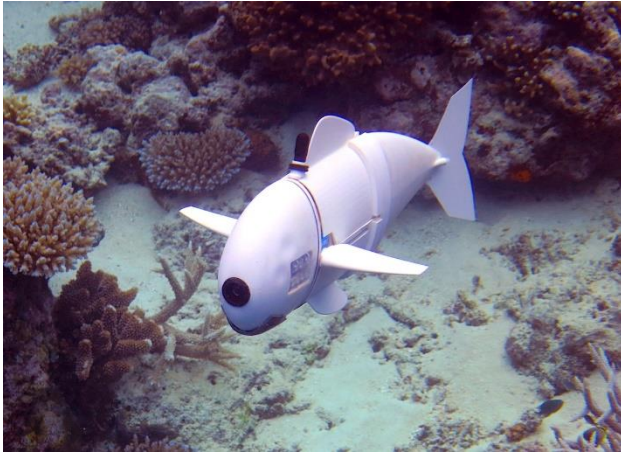
« AQUA2 » de McGill University



AUV from Hawaii University and MBARI

Qu'est-ce qu'un drone?

Robots sous-marins



« SoFi » du MIT Robotics Lab



« OCEAN ONE » from Stanford Robotics Lab



« ROV Panther » de SAAB SEAEYE

Applications des drones

Transport:

- Transport de personnes ou de marchandises



Taxi volant autonome (Boeing)



Test de livraison par drone (La Poste)

Applications des drones

Inspection & surveillance:

- Application essentielle
- Intérêts:
 - Réduction des coûts (e.g., hélicoptère sans pilote à bord versus hélicoptère avec pilote à bord)
 - Intervention dans des endroits inaccessibles à l'homme
 - Interventions dans des endroits dangereux
 - Endurance



Inspection de pylône électrique



Inspection de canalisation sous-marine



Inspection de canalisation (ECA group)

Applications des drones

Audiovisuel:

- Application très importante de la robotique aérienne



Applications des drones

Militaire:



Constitution d'un drone

- **A titre illustratif**, on se limiter au cas des **drones aériens multi-rotors**
- Mais dans les grandes lignes, ce qui suit s'applique aussi à d'autres types de drones, notamment se déplaçant en 3D:
 - Autres types de drones aériens (à voilure fixe, hybrides)
 - Drones sous-marins

Constitution d'un drone

- **Chassis:**
- **Moteurs sans balais (« brushless » en Anglais):** spécifiés par leur kV,
Qui désigne le nombre de tours/Volt/minute à vide (e.g. 400 kV)
- **Hélices (« propellers » en Anglais):** spécifiées par le diamètre x le pas,
en pouces (e.g., 15x4)



Constitution d'un drone

- **ESCs (« Electronic Speed Controllers »)**: qui vont assurer le contrôle de la vitesse de rotation des moteurs
- **Batterie**: typiquement de type « Lythium-Polymères » (LiPo). La batterie est spécifiée par:
 - Sa capacité (en mA.h)
 - Son nombre de cellules (typiquement de 2 à 6) avec une tension nominale de 3.8-3.9V/cellule
 - Son taux de décharge, qui correspond au courant max que la batterie peut délivrer, exprimé en facteur x Capacité (e.g., 60C pour une batterie de 4000 mA.h donne $I_{\text{max}} = 60 \times 4 = 240\text{A}$)



Constitution d'un drone

- **La radio-commande:** permet un pilotage manuel à distance du drone
- **Le recepteur radio:** embarqué sur le drone, reçoit les Informations de la radio-commande, et les transmet à l'auto-pilote



Constitution d'un drone

- **L'auto-pilote:**

- Reçoit les informations fournies par le récepteur radio,
- Reçoit les informations fournies par différents capteurs embarqués sur le drone,
- Effectue les calculs nécessaires pour « traduire » les asservissements demandés par le pilote (mode manuel) ou résultant d'un mode partiellement ou complètement autonome, en consignes de vitesse de rotation moteur envoyées aux ESC.



- **L'auto-pilote:**

- Intègre généralement une IMU (« Inertial Measurement Unit »)
- S'appuie généralement sur les données fournies par différents capteurs (GPS, altimètre, etc)

Constitution d'un drone

A ces éléments de base, vont souvent s'ajouter d'autres composants:

- **Station sol (« ground station » en Anglais):** ordinateur communiquant avec le drone via des antennes de télémétrie (par exemple pour envoyer un plan de vol)
- **Antenne GPS** (évoquée précédemment)
- **Altimètre** (laser ou ultrason): fournit la distance au sol
- **Autres capteurs extéroceptifs (caméras, lidar, sonars, etc):** vont fournir des informations sur l'environnement, qui pourront être utilisées dans des boucles de commande (e.g. « sense and avoid »)
- **Processeur haut-niveau (« high-level processor » en Anglais):** qui va assurer le traitement de l'information des données caméra/lidar

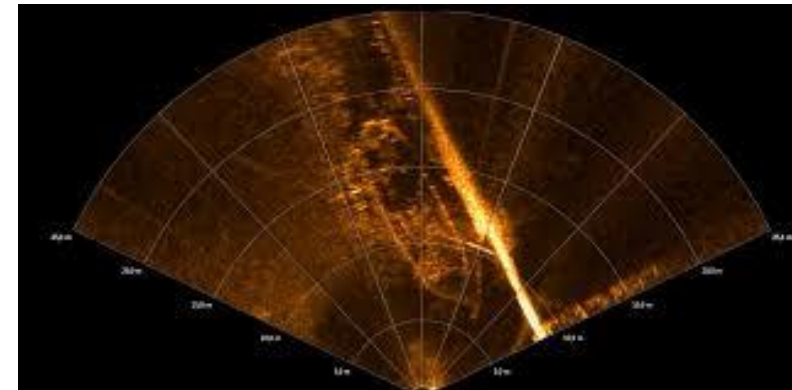
Constitution d'un drone

Capteurs extéroceptifs:

- Capteurs lasers:

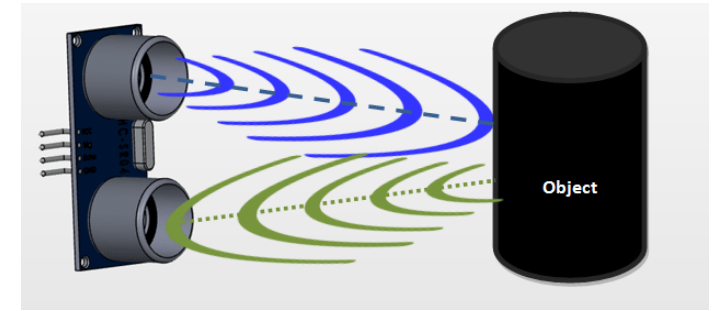


- Sonar



Constitution d'un drone

- Capteurs ultrasons:



- Caméras



Modélisation

- En aéronautique, on utilise classiquement des **repères NED (« North- East- Down »)**
- La modélisation se base sur un **« repère inertiel »** (immobile) de type NED, et un **« repère corps »** (lié au drone)



Modélisation de type **Newton-Euler** avec hypothèse de corps rigide:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p} = v \\ m\dot{v} = mg e_3 + F_a \end{array} \right. \quad \text{Newton}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{R} = RS(\omega) \\ J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \Gamma_a \end{array} \right. \quad \text{Euler}$$

avec:

- p : les coordonnées du centre de masse dans le repère inertiel
- v : les coordonnées, dans le repère inertiel, du vecteur vitesse du centre de masse/repère inertiel
- m : la masse totale du drone
- g : la constante de gravité
- $e_3 = (0,0,1)^T$

Modélisation de type Newton-Euler avec hypothèse de corps rigide:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p} = v \\ m\dot{v} = mg e_3 + F_a \\ \dot{R} = RS(\omega) \\ J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \Gamma_a \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Newton} \\ \text{Euler} \end{array}$$

avec:

- F_a : les coordonnées, dans le repère inertiel, de la somme des forces aérodynamiques
- R : la matrice de rotation du repère corps vers le repère inertiel
- ω : les coordonnées, dans le repère corps, du vecteur vitesse instantanée de rotation
- $S(\omega)$: la matrice antisymétrique associée au produit vectoriel par ω , i.e., $S(\omega)y = \omega \times y$
- J : la matrice d'inertie du drone, exprimée en repère corps
- Γ_a : les coordonnées, dans le repère corps, de la somme des moments des forces aérodynamiques

Expression de F_a et Γ_a :

- $F_a = F_p + F_e$
- $\Gamma_a = \Gamma_p + \Gamma_e$

avec:

- F_p : la « force de propulsion », i.e., force de poussée engendrée par les hélices
- Γ_p : le « couple de propulsion », i.e., couple total engendré par les hélices
- F_e : les autres forces aérodynamiques, « subies », e.g., trainée aéro sur le châssis
- Γ_e : les couples « subis », i.e., liés à F_e

La plupart du temps, F_e et Γ_e seront négligés en première approximation, ou considérés via un simple **modèle de trainée**:

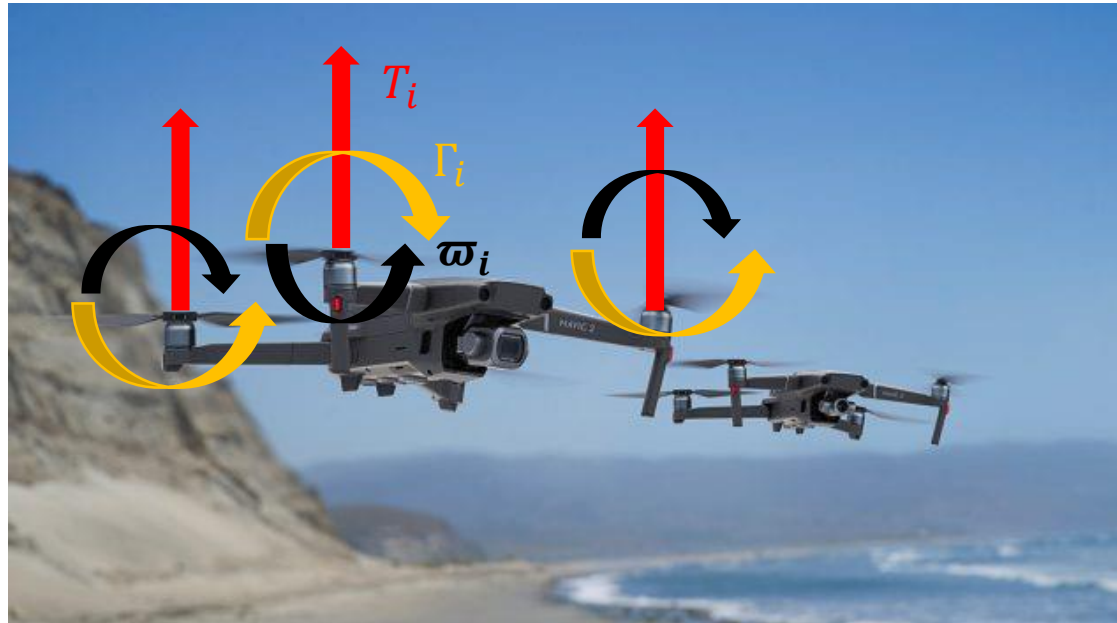
$$F_e \approx -c |v_a| v_a, \Gamma_e \approx 0 \text{ avec } v_a \approx v - v_{wind}$$

Modélisation

Expression de F_p et Γ_p :

- **Pour chaque hélice**, on utilise classiquement un modèle simple de poussée le long, et de couple autour, de l'axe de rotation de l'hélice:

$$T_i = -a \varpi_i^2 R e_3, \Gamma_i = b \varpi_i^2 e_3$$



- Puis on somme les efforts

Au final, on obtient:

$$\begin{cases} \dot{p} = v \\ m\dot{v} = mg e_3 - \mathbf{T} R e_3 + F_e \\ \dot{R} = RS(\omega) \\ J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \mathbf{\Gamma}_p + \Gamma_e \end{cases}$$

avec:

$$\begin{pmatrix} T \\ \Gamma_p \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \vdots \\ \omega_N^2 \end{pmatrix}$$

- $\mathbf{T} \in \mathbb{R}$ et $\mathbf{\Gamma}_p \in \mathbb{R}^3$ sont les 4 quantités disponibles pour contrôler le drone dès lors que la matrice A est de rang 4 (d'où le fait qu'il faut au moins $N = 4$ hélices, avec des hélices de sens de rotation alternés)

Commande

Deux classes de modes de commande principales:

1. Mode téléopéré: (pilotage via la télécommande)

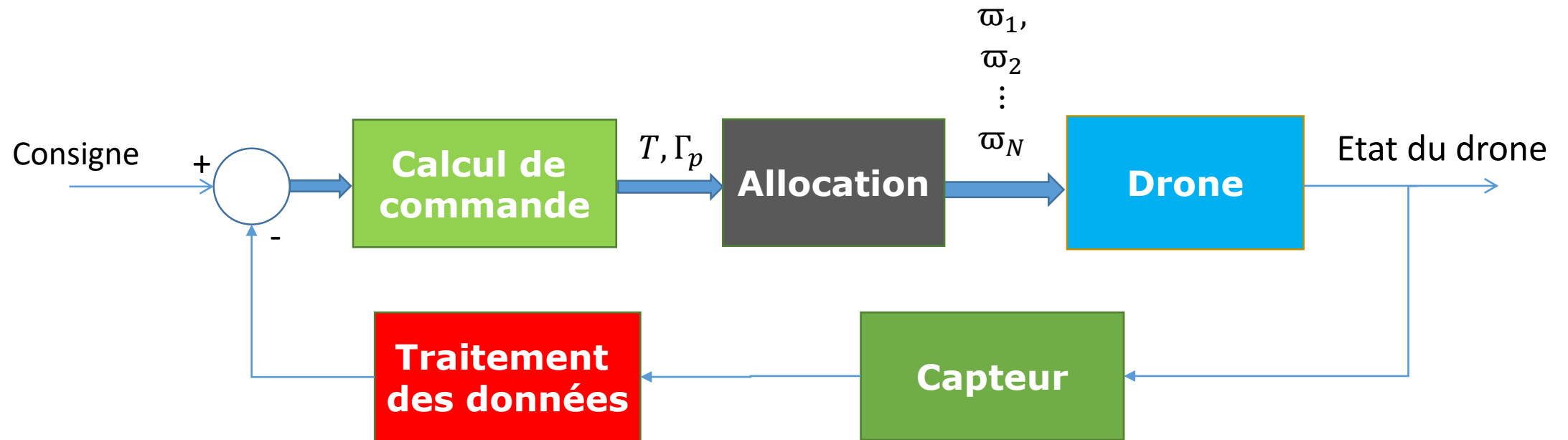
- Consignes d'intensité de poussée (T) et de roulis/tangage/lacet
- Consignes de vitesse linéaire et de lacet
- Etc...

2. Mode complètement autonome:

- Consigne de suivi de trajectoire par « points de passage » (« waypoints » en Anglais) définies en coordonnées GPS
- Consigne de suivi de chemin (e.g., suivre une route à une certaine altitude et avec une certaine vitesse)
- Etc

Commande

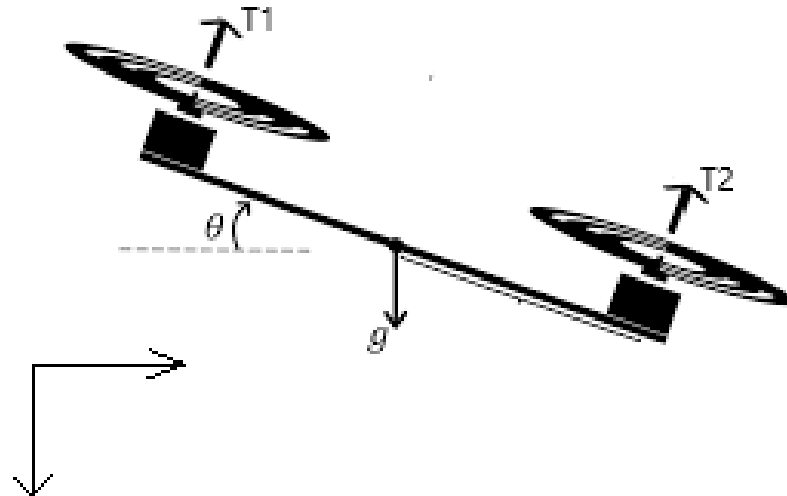
Principe de l'asservissement: Repose sur le **principe fondamental de la rétroaction** (« feedback en Anglais)



Commande

Exemple: Asservissement en vitesse d'un drone

- Le pilote envoie une vitesse linéaire de consigne v_c
- Le GPS nous fournit une mesure de vitesse linéaire v
- On souhaite calculer T, Γ_p de façon à ce que $v(t) \rightarrow v_c(t)$
- Pour simplifier on va se limiter à un mouvement purement planaire



Exemple: Asservissement en vitesse d'un drone

- L'équation de la dynamique se simplifie:

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = T \sin \theta + F_{e,x} \\ m\dot{v}_z = -T \cos \theta + mg + F_{e,z} \\ \dot{\theta} = \omega \\ J\dot{\omega} = \Gamma_p + \Gamma_e \end{cases}$$

Pour des conditions de vol classiques (pas trop agressives), $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$ et donc

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = T \theta + F_{e,x} \\ m\dot{v}_z = -T + mg + F_{e,z} \\ \dot{\theta} = \omega \\ J\dot{\omega} = \Gamma_p + \Gamma_e \end{cases}$$

Commande

Exemple: Asservissement en vitesse d'un drone

- On décompose la dynamique en **deux sous-systèmes**:
 - Un système du **premier ordre** (dynamique verticale)

$$\begin{cases} m\dot{v}_z = -T + mg + F_{e,z} \end{cases}$$

- Qui peut être asservi avec un retour d'état linéaire proportionnel:

$$T = mg + F_{e,z} + mk(v_z - v_{c,z}) \quad (k > 0)$$

- Ce qui donne :

$$\dot{v}_z = -k(v_z - v_{c,z})$$

- Et donc

$$\boxed{v_z(t) = v_{c,z}(t)} + \boxed{e^{-kt}(v_z(0) - v_{c,z}(0))} \quad \leftarrow \text{Converge exp. vers 0}$$

Commande

Exemple: Asservissement en vitesse d'un drone

- On décompose la dynamique en **deux sous-systèmes**:
 - Un système du **troisième ordre** (dynamique horizontale)

$$\begin{cases} m\dot{v}_x \approx mg \theta + F_{e,x} \\ \dot{\theta} = \omega \\ J\dot{\omega} = \Gamma_p + \Gamma_e \end{cases}$$

- Les termes en rouge correspondent à un troisième ordre:

$$\ddot{v}_x = \frac{g}{J} \Gamma_p$$

- Supposons, pour simplifier, que $F_{e,x} = \Gamma_p = 0$. On pose alors

$$\Gamma_p = \frac{J}{g} (-k_1(v_x - v_{c,x}) - k_2\dot{v}_x - k_3\ddot{v}_x) \quad (k_1, k_2, k_3 > 0, k_1 < k_2k_3)$$

- Solution similaire à un **PID**

Commande

Exemple: Asservissement en vitesse d'un drone

$$\ddot{v}_x = \frac{g}{J} \Gamma_p$$

$$\Gamma_p = \frac{J}{g} (-k_1(v_x - v_{c,x}) - k_2\dot{v}_x - k_3\ddot{v}_x) \quad (k_1, k_2, k_3 > 0, k_1 < k_2 k_3)$$

- Cela donne

$$\ddot{v}_x = -k_1(v_x - v_{c,x}) - k_2\dot{v}_x - k_3\ddot{v}_x$$

- Et l'on peut montrer que $v_x(t) \rightarrow v_{c,x}(t)$ si $v_{c,x}(t)$ est constant
- Notons que

$$\Gamma_p = \frac{J}{g} (-k_1(v_x - v_{c,x}) - k_2 g \theta - k_3 g \omega)$$

- v_x est fourni par le GPS. **Comment obtenir θ et ω ???**

Estimation d'attitude

Les centrales inertielles sur les drones (IMU pour « Inertial Measurement Unit »)

- Composées à minima d'un gyromètre 3 axes et accéléromètre 3 axes
- Et aussi la plupart du temps d'un magnétomètre 3 axes, voir d'un baromètre
- On parle alors de « centrale à 10 degrés de libertés »
- Peuvent permettre d'estimer le déplacement 3D par intégration
- Technologie MEMS



MEMS IMU



Gyroscope de Sperry Inc (1914)

Estimation d'attitude

Les centrales inertielles sur les drones:

- **Gyromètres:**
 - Mesurent les coordonnées ω , **en repère corps**, du vecteur **vitesse instantanée de rotation**, i.e., ω tel que $\dot{R} = R S(\omega)$.
 - Peuvent permettre par intégration d'estimer le déplacement angulaire.
 - Cette estimation va dériver en raison des biais de mesure, bruits de mesure, et défauts de calibration.
- **Accéléromètres:**
 - Mesurent « **l'accélération spécifique** », i.e., les coordonnées a_s , **en repère corps**, du vecteur $\vec{a} - \vec{g}$, avec \vec{a} le vecteur accélération, et \vec{g} le vecteur « champ de gravité ».
 - Peuvent permettre par intégration, et fusion avec gyromètres et magnétomètres, d'estimer le déplacement 3D.
 - Cette estimation va dériver en raison des biais de mesure, bruits de mesure, et défauts de calibration.

Estimation d'attitude

Les centrales inertielle sur les drones

- Centrales inertielle:
 - Magnétomètres:
 - Mesurent les coordonnées, **en repère corps**, du champ magnétique local.
 - On suppose la plupart du temps que ce champ magnétique local est le champ magnétique terrestre.
 - Va permettre dans ce cas de donner une information sur le « cap ».
 - Baromètres:
 - Mesurent la pression atmosphérique locale.
 - Va permettre de donner une information d'altitude.
 - Attention, l'altitude n'est pas la même chose que la hauteur...

Estimation d'attitude

Comment estimer θ ?

- Solution 1:
 - Intégrer l'équation $\dot{\theta} = \omega$ avec ω fourni par le gyromètre
 - Problème: dérive numérique de l'intégration (car mesures imparfaites)
- Solution 2:
 - Corriger la dérive numérique évoquée ci-dessus avec une mesure d'angle
 - **L'accéléromètre, sous hypothèse d'accélération négligeable, est un inclinomètre**
 - Il fournit donc une mesure (certes imparfaite) de θ
 - La fusion avec le gyromètre reste nécessaire (l'accélération n'est pas toujours négligeable...)

$$\dot{\hat{\theta}} = \omega - k(\hat{\theta} - \theta_a)$$

où θ_a est la mesure d'angle fournie par l'accéléromètre.

- L'intégration numérique de cette équation fournit l'estimée $\hat{\theta}$ de θ .