



VAP SEM
PHY4526 : Capteurs et Communications

TP Capteur-Logiciel

Jose Manuel Rubio Hernán
Email: jose.rubio_hernan@telecom-sudparis.com

Département Électronique et Physique





Plan

- 1 Exercice
- 2 Implémentations du capteur logiciel
- 3 Nomenclature et définitions



Exercice : Centrale à inertie (1/3)

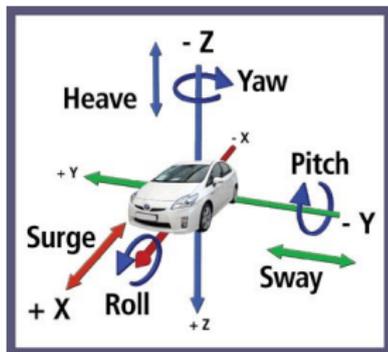
Centrale à inertie (mouvement selon l'axe X) : capteur de mesure de l'accélération et de la vitesse angulaire composé de trois accéléromètres et de trois gyroscopes.

Exercice : Centrale à inertie (1/3)

Centrale à inertie (mouvement selon l'axe X) : capteur de mesure de l'accélération et de la vitesse angulaire composé de trois accéléromètres et de trois gyroscopes.

Capteurs

- **accéléromètre** : accélérations bruitées
- **gyroscope** : vitesses angulaires bruitées et biaisées



Inertial Measurement Unit (IMU)

Problème

le gyroscope possède un biais évoluant dans le temps

on ne connaît pas la forme de la dérive.

Défi

estimer l'angle d'inclinaison ainsi que la vitesse angulaire du mobile

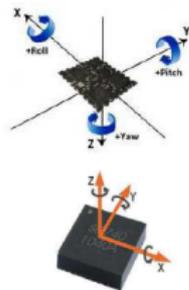


Exercice : Centrale à inertie (2/3)

Objectif : estimer l'angle du mobile doté d'une IMU, sa vitesse angulaire ainsi que le biais du gyroscope à l'aide d'un accéléromètre et d'un gyroscope

Exercice : Centrale à inertie (2/3)

Objectif : estimer l'angle du mobile doté d'une IMU, sa vitesse angulaire ainsi que le biais du gyroscope à l'aide d'un accéléromètre et d'un gyroscope



Gyro

- biased
- noisy

Accelero

- unbiased
- noisy
- sensitive to gravity

Inertial Measurement Unit (IMU)

Hypothèses avant modélisation :

- le mobile ne subit aucune accélération
- les bruits des deux capteurs sont gaussiens (bruits blanc)
- l'accéléromètre nous renvoie des valeurs d'accélérations en m/s^2
- le gyroscope nous renvoie des valeurs de vitesses angulaires en rad/s
- le biais du gyroscope est nul à l'instant initial

Exercice : Centrale à inertie (3/3)

Questions

1. Modéliser le problème en fonction des paramètres à estimer et des mesures des capteurs (temps d'échantillonnage (2.5ms)).
2. Dessiner le filtre de Kalman pour la centrale à inertie.
3. Chercher les meilleures valeurs pour le bruit du processus et le bruit de la mesure. ($Q = \text{eye}(2)$, $R = [10^{-1}, 10^6]$)

Exercice : Centrale à inertie (Note 1/2)

Note

- Mesure de l'angle d'inclinaison du mobile par l'accéléromètre (α_M)
- Mesure de la vitesse angulaire du mobile par le gyroscope (u)

Système

$$\alpha_M = \alpha + b_{acc}$$

$$u = \dot{\alpha} + B + b_{gyro}$$

α = vraie valeur de l'angle d'inclinaison

b_{acc} = bruit de l'accéléromètre

b_{gyro} = bruit du gyro

B = biais du gyro

$\dot{\alpha}$ = vraie valeur de la vitesse angulaire

On suppose

- le biais du gyro constant : $B_{k+1} = B_k$
- la vitesse angulaire du mobile fixe : $\dot{\alpha}_{k+1} = \dot{\alpha}_k$
- $\alpha_{k+1} = \alpha_k + t_e \dot{\alpha}_k$: inclinaison du mobile en fonction de la vitesse angulaire à l'instant précédent. Où t_e est la période d'échantillonnage.

Exercice : solution (1/2)

Note

- **Acc.** : angle d'orientation, $\alpha_M = -\arcsin(\text{accélration mesurée}/g)$
- **Gyro** : angle d'orientation du mobile (intégrant la vitesse angulaire par rapport au temps) (mesure pas très précise)

Systeme

$$\alpha_{M,k} = \alpha_k + b_{acc,k}$$

$$u_k = \dot{\alpha}_k + B_k + b_{gyro,k}$$

Si $\alpha_{k+1} = \alpha_k + t_e \alpha_k$. Si on ne prends pas en compte le bruit : $\alpha_{M,k} = \alpha_k$

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + t_e \dot{\alpha}_k$$

$$u_k = \dot{\alpha}_k + B_k$$

et

$$\begin{aligned}\alpha_{k+1} &= \alpha_k + t_e(u_k - B_k) \\ &= \underbrace{\alpha_k - t_e B_k}_{\text{état}} + t_e u_k\end{aligned}$$

Exercice : solution (1/2)

Système

$$\alpha_{M,k} = \alpha_k + b_{acc,k}$$
$$u_k = \dot{\alpha}_k + B_k + b_{gyro,k}$$

Alors

$$\alpha_{k+1} = \underbrace{\alpha_k - t_e B_k}_{\text{état}} + t_e u_k$$
$$B_{k+1} = B_k$$

Représentation d'état :

$$\begin{bmatrix} \alpha_{k+1} \\ B_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -t_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_k \\ B_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_e \\ 0 \end{bmatrix} u_k + w_k, \quad y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_k \\ B_k \end{bmatrix} + v_k$$

Note : $y_k = \alpha_{M,k} = \alpha_k$

Exercice : solution (2/2)

Représentation d'état :

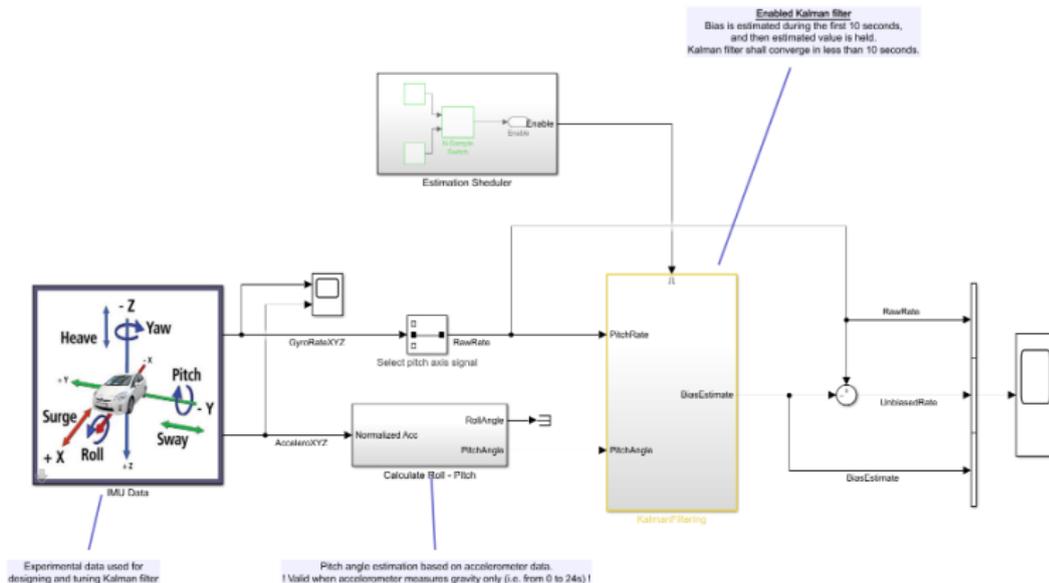
$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ B_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ B_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k + w_k, \quad y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ B_k \end{bmatrix} + v_k$$

Paramètres du modèle du filtre de Kalman

- \mathbf{x}_k : angle qui va être estimé
- \mathbf{B}_k : biais qui va être estimé
- \mathbf{w}_k : bruit du processus
- \mathbf{v}_k : bruit de la mesure
- y_k : angle mesuré (dérivé de l'accéléromètre)

dt : temps d'échantillonnage (2.5ms)

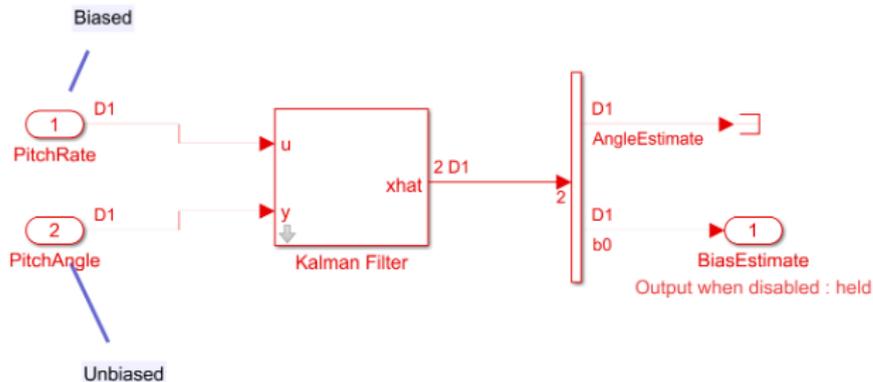
Exercice : Capteur-logiciel sur Matlab



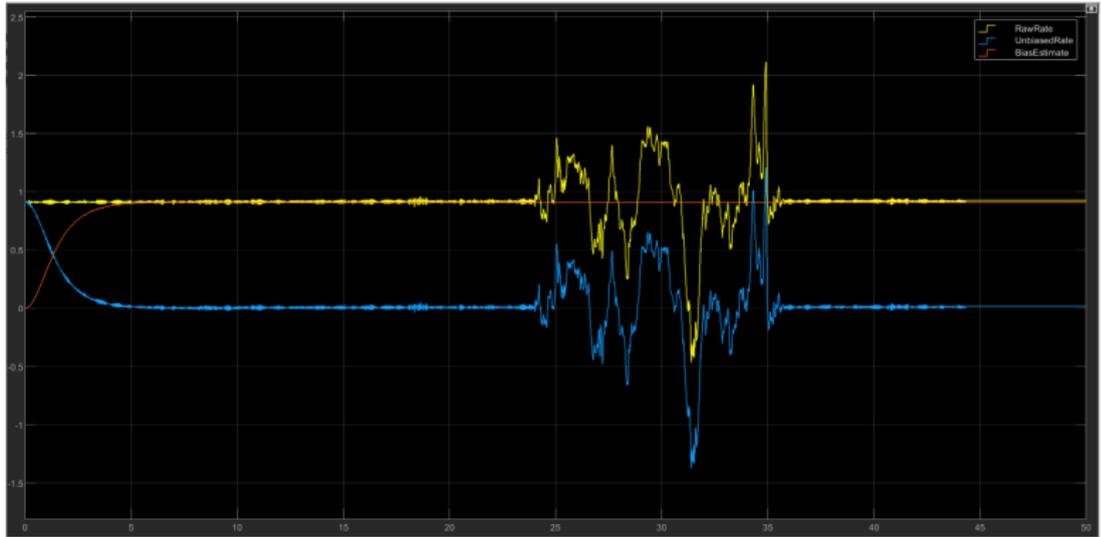
Exercice : Capteur-logiciel sur Matlab



States when enabling : held

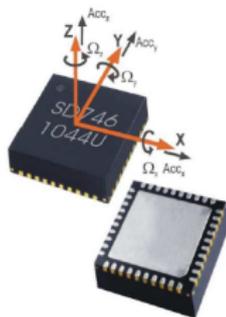


Exercice : Capteur-logiciel sur Matlab



Implémentations du capteur logiciel

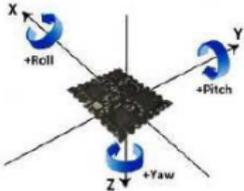
Implémentations du capteur logiciel d'une centrale à inertie en utilisant un Arduino



- | | | | |
|--|------|------|-------|
| ◆ 3-axis accelerometer (linear) | 6DOF | 9DOF | 10DOF |
| ◆ 3-axis gyroscope (rotation rate) | | | |
| ◆ 3-axis magnetometer (magnetic field) | | | |
| ◆ Barometer (altitude) | | | |

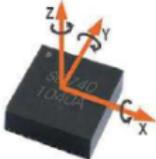
Implémentations du capteur logiciel

Implémentations du capteur logiciel d'une centrale à inertie en utilisant un Arduino



Gyro

- biased
- noisy



Accelero

- unbiased
- noisy
- sensitive to gravity

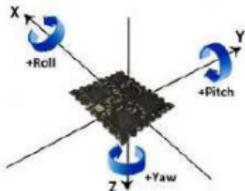
Accéléromètre

Un accéléromètre est un appareil compact conçu pour mesurer une accélération non gravitationnelle.

Note : Lorsque l'objet auquel il est intégré passe de l'immobilité à une vitesse quelconque, l'accéléromètre est conçu pour réagir aux vibrations associées à un tel mouvement.

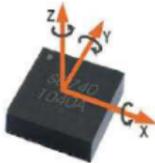
Implémentations du capteur logiciel

Implémentations du capteur logiciel d'une centrale à inertie en utilisant un Arduino



Gyro

- biased
- noisy



Accelero

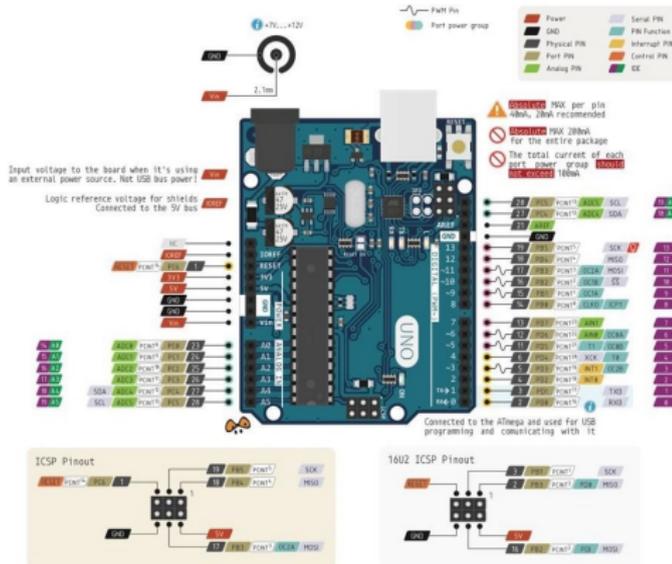
- unbiased
- noisy
- sensitive to gravity

Gyroscope

Un gyroscope est un appareil qui utilise la gravité de la Terre pour déterminer son orientation. Sa conception consiste en un disque à rotation libre appelé rotor, monté sur un axe de rotation au centre d'une roue plus grande et plus stable.

Note : Lorsque l'axe tourne, le rotor reste immobile pour indiquer l'attraction gravitationnelle centrale, et donc quelle direction est "vers le bas".

Implémentations (1/3)

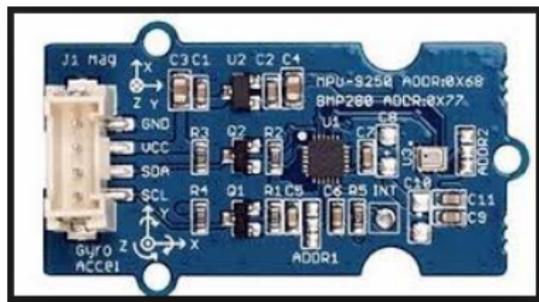


Arduino

Cartes électroniques qui contient un microcontrôleur (Atmel AVR (Arduino ONE → Atmega328p).

Cette carte permet le prototypage rapide : embarquer le traitement de signal de Matlab (PC avec beaucoup de ressources) vers un systèmes embarqué à base de micro-contrôleur (faibles ressources).

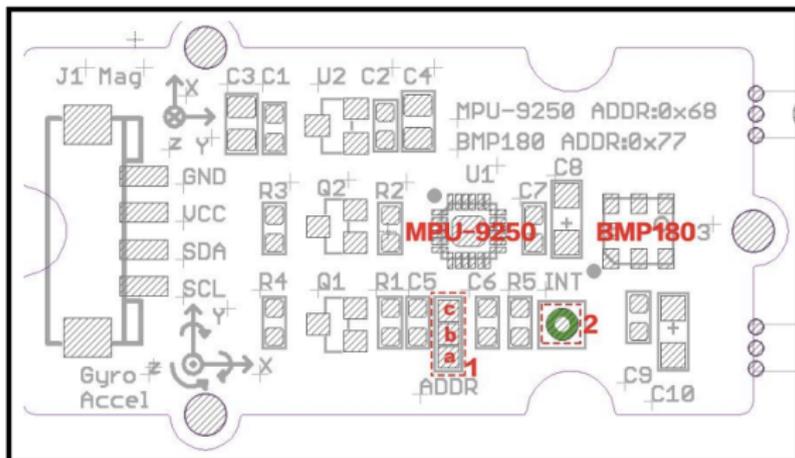
Implémentations (2/3)



Grove - IMU 10DOF

- 3-axes (x,y,z) gyroscope, capteurs de vitesse angulaire (gamme programmable : ± 250 , ± 500 , ± 1000 et $\pm 2000^\circ/s$)
- 3-axes (x,y,z) accéléromètre (gamme programmable : $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ et $\pm 16g$)
- 3-axes magnétomètre (rang, $\pm 4800\mu T$)
- baromètre (gamme, $300 \sim 1100hPa$ (+9000m \sim -500m relatif au niveau de la mer))

Implémentations (2/3)



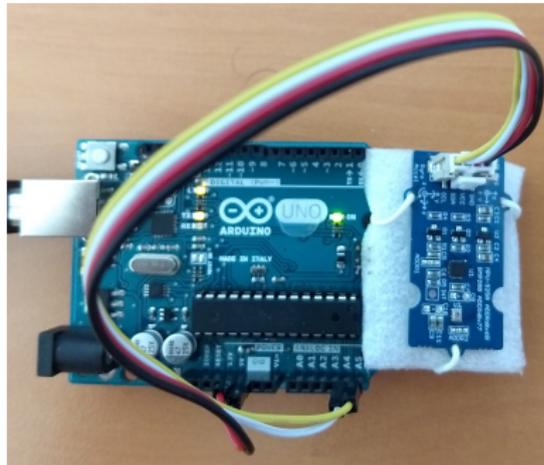
Note

1. **Pad Selecteur de l'adresse du bus I2C pour le module MPU-9250.**
(a-b → 0x68 et b-c → 0x69)
2. **Pin d'interruption du module MPU-9250.**

- **MPU-9250 :** gyroscope, accéléromètre, magnétomètre
- **BMP180 :** baromètre. Il fournit la valeur de la pression atmosphérique, et de la température. Il fournit aussi la valeur de l'altitude relative au niveau de la mer (liée à la pression atmosphérique).

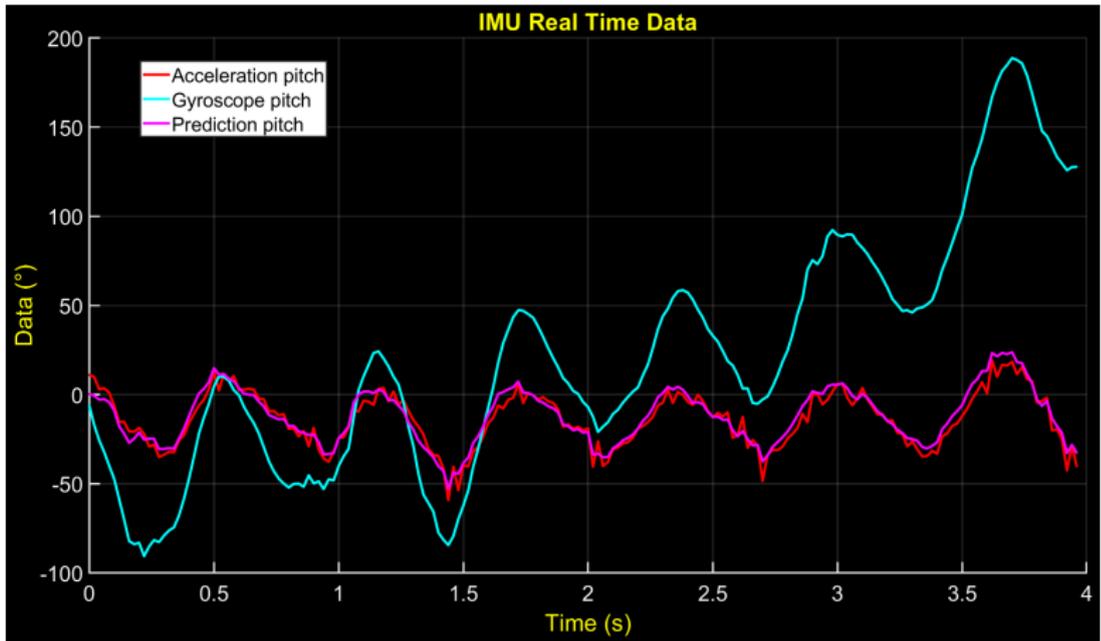
Implémentations (3/3)

Arduino + Grove IMU 10DOF sensor



Résultats

Angle d'inclination "Pitch" : Gyroscope, accéléromètre et filtre de Kalman



Filter complémentaire

Hypothèses :

1. On fait confiance au gyroscope pour les mouvements rapides
2. On fait confiance à l'accéléromètre pour les mouvements lents

Etapes à suivre :

1. Cela revient à filtrer (avec la même fréquence de coupure) :
 - Les données intégrées temporellement du **gyroscope** par un filtre passe-haut
 - Les données de l'**accéléromètre** par un filtre passe-bas
2. Additionner le résultat des 2 filtres.

_filtre complémentaire

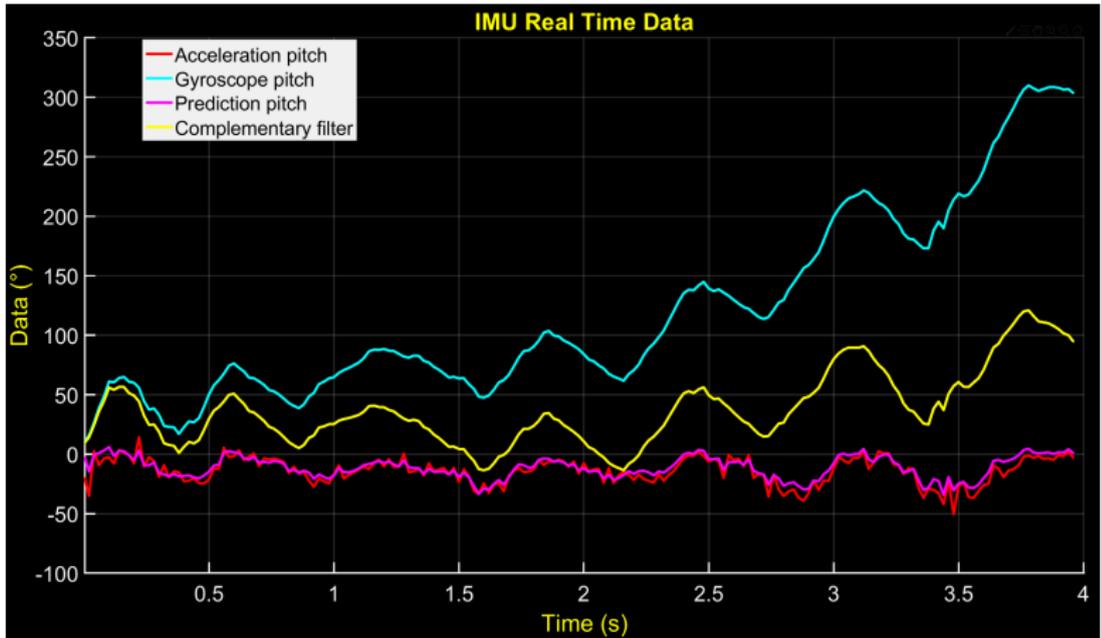
Nous avons deux mesures :

- Le gyromètre est très précis pendant les phases dynamiques du système, donc lorsque les mouvements sont rapides, mais il est peu fiable à long terme du à une dérive importante de la valeur de l'angle à estimer (causé par l'intégration).
- L'accéléromètre mesure des accélérations linéaires, il est précis sur le long terme (aucune dérive ne l'affecte) mais il est soumis à toutes les forces extérieurs (statiques et dynamique) ce qui rend les mesure extrêmement bruité (pendant les phases dynamiques du mouvement, l'accélération mesure aussi les vibrations et les perturbations).

L'utilisation d'un filtre passe bas est donc nécessaire mais implique un retard conséquent sur la mesure. La solution a donc était d'utiliser un filtre complémentaire permettant qui utilise les deux mesures afin de ne garder que les avantages de l'un et de l'autre.

Résultats

Angle d'inclination "Pitch" : Gyroscopie, accéléromètre, filtre de Kalman et filtre complémentaire



Capteur-logiciel vs Fusion de données

Capteur logiciel : Un capteur logiciel est un "software" qui à l'aide de mesures physiques, est capable de

- prédire le comportement de la grandeur physique
- détecter des défauts des capteurs physiques
- reconstruire des données manquantes
- estimer le valeur d'une grandeur
- améliorer la précision des mesurandes

Ce software utilise les capteurs physiques pour prédire/estimer une grandeur spécifique.

Fusion de données : ensemble de méthodes scientifiques qui en combinant l'information provenant de différentes sources (capteurs physiques), permettent estimer ou raffiner un grandeur spécifique.