



RAPPORT DE PROJET D'ÉLECTRONIQUE

Centrale inertielle

MOUGIN PAUL
RATTRAPAGE DE 4ETI 2013

Juin 2015

Table des matières

Introduction	2
1 Études préalables	3
1.1 Quid d'une centrale inertielle ?	3
1.2 Considérations théoriques	3
2 Réalisation du projet	6
2.1 Matériel mis à disposition	6
2.2 Implémentation sur la carte STM32F3	6
2.2.1 Récupération des données des capteurs	6
2.2.2 Traitements des données	7
2.3 Interface utilisateur	7
3 Améliorations possibles	8
3.1 Gestion des accéléromètres	8
3.2 Fiabilité	8
Conclusion	9

Introduction

Le but de ce projet est de créer à l'aide d'une carte électronique STM32F3 Discovery une centrale inertielle en utilisant les accéléromètres et les gyroscopes embarqués dans la carte.

Tous les calculs doivent être effectués par le microprocesseur STM32 sur la carte embarquée. Les informations de positions calculées seront alors envoyées à un terminal via une liaison série.

Études préalables

1.1 Quid d'une centrale inertielle ?

Une centrale à inertie ou centrale inertielle est un instrument utilisé en navigation, capable d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération et vitesse angulaire) pour estimer son orientation (angles de roulis, de tangage et de cap), sa vitesse linéaire et sa position. L'estimation de position est relative au point de départ ou au dernier point de recalage.¹

En effet, une centrale inertielle est un appareil de mesure permettant de connaître la position de l'objet sur lequel elle est fixée sans avoir besoin d'informations extérieures. La seule connaissance de l'accélération linéaire selon trois axes ainsi que les vitesses angulaires autour de ces trois même axes permet de calculer la position relative de l'objet par rapport à son point de départ.

Cet instrument de mesure est encore utilisé dans tous les avions de ligne pour compenser l'imprécision des systèmes satellitaires comme le GPS.

La précision d'une centrale inertielle varie en fonction de la précision des capteurs (accéléromètres et gyroscopes) utilisés mais aussi en fonction de l'algorithme de calcul utilisé pour traiter les données.

1.2 Considérations théoriques

Calcul de la position

Les capteurs nous remontent une accélération linéaire ainsi qu'une vitesse angulaire suivant les trois axes (que nous appellerons X, Y et Z) de la centrale inertielle.

Pour déterminer la position, le processeur doit déjà effectuer une intégration de l'accélération pour déterminer les vitesses linéaires par rapport au sol :

$$\vec{V} = \int \vec{\gamma} dt \quad (1.1)$$

Puis pour déterminer la position, il doit encore intégrer la vitesse en prenant en compte la position de départ x_0 :

$$x = \int \vec{V} dt + x_0 \quad (1.2)$$

Il existe plusieurs algorithmes permettant de calculer les intégrales successives ; méthodes plus ou moins complexes et plus ou moins précises qui seront explorées dans la partie *Calcul de l'intégration*.

Ces trois positions (une suivant chaque axe de la centrale) sont calculées par rapport au repère de la centrale et non le repère terrestre supposé galiléen. Or nous souhaitons connaître la position de l'objet dans un référentiel absolu.

Pour cela il nous faut faire un changement de base, mais avant tout, connaître l'orientation de la centrale inertielle dans le repère de base.

Calcul de l'orientation

Pour connaître l'orientation de la centrale il nous faut connaître les angles de roulis, de tangage et de lacet (roll, pitch et heading en anglais) représentés sur la figure suivante :

1. définition de Wikipedia

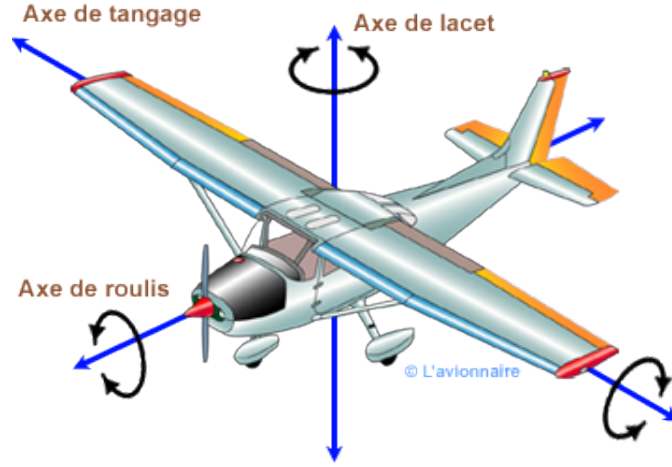


FIGURE 1.1 – Angles de roulis, tangage et lacet

L'angle de roulis et de tangage sont calculables grâce aux composantes du vecteur accélération mesurées par accéléromètre de la carte notée $G_{Acc} = (G_x, G_y, G_z)$:

$$Roll = \arctan\left(\frac{-G_x}{G_z}\right) \quad (1.3)$$

$$Pitch = \arctan\left(\frac{G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_z^2}}\right) \quad (1.4)$$

L'angle de roulis (Roll) a une amplitude de $[-180; 180]$ et l'angle de tangage (Pitch) a une amplitude de $[-90; 90]$. Il n'est pas possible d'obtenir une amplitude de 360° sur les deux angles, il a donc été décidé de limiter l'angle de tangage sur une plage de 180° .

Ces deux formules sont tirées de la théorie des angles d'Euler. La démonstration de ces formules est détaillée dans la documentation *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer* de FREESCALE SEMICONDUCTOR dont la référence se trouve en ANNEXE.

Pour calculer l'angle de lacet, il est nécessaire d'utiliser le magnétomètre de la carte car l'accéléromètre seul ne nous permet pas d'aller plus loin. Nous récupérons les données du magnétomètre dans un vecteur $M = (M_x, M_y, M_z)$ ce qui nous permet de calculer les "angles d'inclinaisons" aussi appelés *tilted angles* :

$$x_{tilted} = M_x \cos(Pitch) + M_z \sin(Pitch) \quad (1.5)$$

$$y_{tilted} = M_x \sin(Roll) \sin(Pitch) + M_y \cos(Roll) - M_z \sin(Roll) \cos(Pitch) \quad (1.6)$$

Ces *tilted angles* nous permettent ensuite de calculer l'angle de lacet (Heading) :

$$Heading = \arctan\left(\frac{y_{tilted}}{x_{tilted}}\right) \quad (1.7)$$

Calcul du changement de base

Une fois l'orientation de la centrale par rapport au sol connue, il est possible de calculer le vecteur accélération, vitesse ou position de la centrale inertielle dans le repère absolu grâce à la théorie des *angles d'Euler* :

Connaissant les angles θ, ϕ, ψ respectivement autour de x, y et z on peut calculer la matrice de rotation R :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Ce qui donne la forme général suivante :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \phi & -\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \phi \sin \theta & \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \sin \phi \cos \theta \\ \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \phi \sin \theta & -\cos \psi \sin \theta + \sin \psi \sin \phi \cos \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Ce qui permet ensuite, connaissant le vecteur position $POS \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ dans le repère de la centrale de calculer le vecteur position $POS' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$ dans le repère absolu :

$$POS' = R \cdot POS \quad (1.10)$$

Calcul de l'intégration

comme dit plus haut, il existe plusieurs méthodes de calcul des intégrales certaines plus complexes et plus précises que d'autres. Nous allons en exposer deux :

La méthode d'Euler

La méthode d'Euler est une méthode numérique élémentaire de résolution d'équation différentielles du premier ordre. Elle consiste sur un intervalle de temps le plus court possible d'approximer une courbe grâce à sa dérivée.

On sait par la théorie de la dérivation que pour n'importe quelle fonction $f(x)$ dont la primitive est $F(x)$ sur un intervalle défini on a :

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = f(x) \quad (1.11)$$

aussi par conséquent si h est très petit il est possible de calculer la Primitive de $f(x)$ par récurrence :

$$F(x+h) \approx F(x) + f(x)h \quad (1.12)$$

Cette méthode très simpliste permet d'approximer l'intégration de manière assez grossière. L'erreur de cette méthode est d'ordre 2 soit $o(h^2)$ ce qui est assez élevé. Cette erreur est d'autant plus élevée lorsque l'on pratique cette méthode deux fois à la suite comme c'est le cas pour la centrale inertielle.

Méthode de Simpson

La méthode de Simpson utilise une approximation d'ordre 2 de f grâce au polynôme quadratique P . Le polynôme représente une parabole entre a et b qui prend les mêmes valeurs que f aux points a , b et $m = \frac{(a+b)}{2}$. On connaît alors l'expression de cette parabole grâce à l'interpolation de Lagrange :

$$P(x) = f(a) \frac{(x-m)(x-b)}{(a-m)(a-b)} + f(m) \frac{(x-a)(x-b)}{(m-a)(m-b)} + f(b) \frac{(x-a)(x-m)}{(b-a)(b-m)} \quad (1.13)$$

Le polynôme étant plus facile à intégrer on peut ainsi approximer l'intégrale de f sur l'intervalle $[a, b]$:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b P(x)dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \quad (1.14)$$

Ainsi il est possible d'approximer l'intégrale de l'accélération pour en déduire la vitesse, en rendant l'intervalle $[a, b]$ le plus petit possible et en effectuant la somme successive des approximations.

Une méthode plus précise que la méthode d'Euler puisque son erreur est d'ordre 4 soit $o(h^4)$ ce qui, concaténé à elle-même laisse une erreur d'ordre 2, ce qui peut être suffisant pour notre centrale.

Réalisation du projet

2.1 Matériel mis à disposition

Pour la réalisation de cette centrale inertielle, le seul élément imposé était la carte de développement : une *STM32F3-Discovery* de chez STMicroelectronics

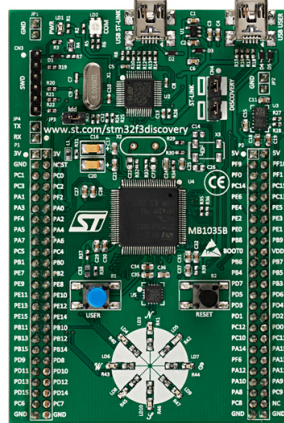


FIGURE 2.1 – Carte *STM32F3-Discovery* de STMicroelectronics

Cette carte d'évaluation est équipée d'un microprocesseur ARM Cortex-M4, 256 KB de mémoire Flash et 46 KB de mémoire RAM. La carte embarque un accéléromètre LSM303DLHC trois axes et un gyroscope L3GD20 trois axes. La carte est également équipée de LED de différentes couleurs ainsi que de deux boutons poussoirs.

Au niveau de la communication extérieure, la carte est équipée de deux ports mini-USB. L'un, le ST-LINK/V2 permet de programmer et de déboguer la carte à travers un logiciel dédié (nous utiliserons *Keil μVision5* pour cela). L'autre permet d'établir une communication avec d'autres éléments, nous l'utiliserons pour établir une liaison série entre la carte et un hyperterminal (*Termite*) ou notre interface utilisateur développée en *Qt*.

2.2 Implémentation sur la carte STM32F3

Les travaux réalisés sur la carte sont divisés en plusieurs points indépendants : la récupération des données des capteurs, leur traitement et la communication via la liaison série USB.

Le projet est à la base le projet de démonstration fourni par STMicroelectronics auquel on a retiré les exemples et fonctionnalités qui ne nous intéressaient pas et auquel ont été rajoutées des bibliothèques permettant de réaliser certaines briques du programme.

2.2.1 Récupération des données des capteurs

La première chose à faire avant de vouloir traiter une information est de la mesurer via un capteur puis de la récupérer pour l'utiliser plus tard dans les calculs.

Les fonctions utilisées pour récupérer les données des capteurs sont déjà implémentées dans les exemples par STMicroelectronics. Nous utilisons ainsi *Demo_CompassConfig(void)* pour initialiser le capteur LSM303DLHC puis les fonctions *Demo_CompassReadAcc(float* pfData)* et *Demo_CompassReadMag(float* pfData)* pour récupérer les données de l'accéléromètre et du magnétomètre.

Demo_CompassConfig(void) est la fonction qui est appelée pendant l'initialisation du programme et qui permet de configurer correctement les différents capteurs utilisés plus tard dans le programme.

Les paramètres peuvent aller du mode d'alimentation à l'échelle utilisée tout en passant par la configuration des filtres utilisés pour traiter les signaux des capteurs.

Demo_CompassReadAcc(float* pfData) & Demo_CompassReadMag (float* pfData) sont deux fonctions permettent de récupérer les informations des capteurs et de les stocker dans un pointer mis en paramètre. Ces fonctions permettent aussi la calibration des données en fonction du mode choisi à l'initialisation.

2.2.2 Traitements des données

Une fois les données récupérer depuis les capteurs ils faut les traiter afin de calculer ce que nous cherchons : l'orientation de la centrale inertielle grâce à ses angles de roulis, de tangage et de lacet ainsi que sa position relative par rapport au référentiel terrestre.

2.3 Interface utilisateur

Améliorations possibles

3.1 Gestion des accéléromètres

3.2 Fiabilité

Conclusion