



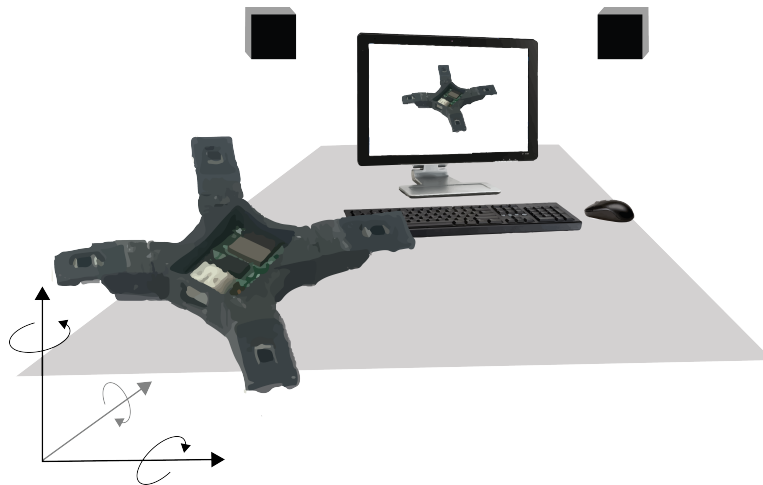
INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
CENTRE VAL DE LOIRE



**SORBONNE
UNIVERSITÉ**
CRÉATEURS DE FUTURS
DEPUIS 1257

STAGE DE 4ÈME ANNÉE

Sensor Fusion of IMU and 3d Positioning data for Virtual/Augmented/Mixed Reality



Par **Julien Mellet**

Enseignant référent :
Serge DOS SANTOS

Tuteur entreprise :
Sinan HALIYO

Année universitaire 2017/2018

Résumé

Au sein d'une équipe de travail internationale, un système de positionnement sous-millimétrique est en développement, le "HIVE Tracker". La partie électronique et le logiciel embarqué étant fonctionnels, le travail présenté ici se concentre sur l'utilisation des données produites ainsi que sur des expérimentations d'optimisations. Le tracker embarquant deux types de capteur imparfaits (optiques et inertiels), le but de ce stage était de fusionner le meilleur de chaque type de données pour améliorer le dynamisme, la précision et la stabilité du système.

Ce travail s'est déroulé de la manière suivante : Une première phase d'étude a permis une prise en main des outils du projets ainsi que la réalisation d'un simulateur. A suivi une phase d'implémentation des outils simulés, puis une phase de conception d'une structure mécanique à géométrie contrainte. Il a enfin été réalisé une phase de caractérisation des différents outils implémentés.

Après ce stage, le tracker a les outils théoriques mis en place et fonctionnels pour une précision centimétrique. La fusion de capteurs permet d'atténuer légèrement le bruit des mesures, mais un prétraitement des capteurs est tout de même nécessaire. On peut à terme espérer qu'en cas d'occlusion des photodiodes, les données de l'accéléromètre seul puissent suffire.

Les bruits des mesures étant plus importants que prévu le reste de l'équipe impliquée pourra se concentrer sur l'implémentation d'autres outils.

Mots clés : accéléromètre, Blender, centrale inertielle, fusion de capteurs, Hive Tracker, HTC Vive, Kalman, Lighthouse, Madgwick, réalité augmentée, réalité mixte, réalité virtuelle, tracker 3D, Unity

Abstract

In the context of an international collaboration, a sub-millimeter positioning system is under development, the "Hive Tracker". Both the electronics and the embedded software being functional, the work presented here focuses on the use of the produced data as well as on optimization experiments. The tracker embeds two imperfect sensor types (optical and inertial), the purpose of this internship was to merge the best of each data type to improve dynamism, accuracy and stability of the system.

This work took place in the following way : A first phase of study allowed getting used to the project tools and the realization of a simulator. The following phase was the implementation of a simulator, then a phase of design of a mechanical structure with constrained geometry. Finally, a characterization phase of the implemented tools was carried out.

After this internship, the tracker has the theoretical tools set up and functional for a centimetric accuracy. The Kalman filter slightly attenuate noise of measurements. We can eventually hope to use only the data of the accelerometer in case of occlusion of photodiodes.

The noise of the measurements being greater than expected, the rest of the team involved will be able to concentrate on the implementation of more specific tools.

Keywords : accelerometer, augmented reality, Blender, HIVE Tracker, HTC Vive, Kalman, IMU, Lighthouse, Madgwick, mixed reality, virtual reality, sensor fusion, 3d tracker, Unity

Sommaire

1	Présentation du laboratoire et du tracker	4
1.1	Le laboratoire ISIR	4
1.2	Le HIVE Tracker	4
2	Simulation du système	6
2.1	Les Lighthouses	6
2.2	Le principe du positionnement	6
2.2.1	Le principe théorique	6
2.2.2	Autre principe	7
2.3	La simulation	8
3	La fusion de capteurs	9
3.1	Les capteurs	9
3.1.1	Les photodiodes	9
3.1.2	La centrale inertielle	9
3.2	La fusion de capteurs	9
3.2.1	Le filtre de Kalman	10
3.2.2	Le filtre de Madgwick	11
4	L'implémentation	13
4.1	Le blocage de cardan	13
4.2	Conception d'une structure géométrique	13
4.2.1	Une structure de développement	13
4.2.2	Une structure optimale	14
4.3	La position des Lighthouses	14
4.3.1	Les deux repères	15
4.3.2	Le changement de repère	15
4.4	L'expérimentation	16
4.4.1	Le banc d'essai	16
4.4.2	Première série de mesures	17
4.4.3	Seconde série de mesures	18
4.4.4	Excitation alternative sur la seconde série de mesures	19
4.4.5	Les données de l'accéléromètre	21

5	Discussion	22
5.1	La caractérisation	22
5.1.1	Caractérisation du positionnement optique	22
5.1.2	La caractérisation des filtres	22
5.2	Les améliorations	22
5.2.1	La visualisation	23
5.2.2	Le positionnement	23
5.2.3	La visualisation de l'espace	23
5.2.4	La structure géométrique contrainte	23

Introduction

Les premiers films d'animation ont largement aidés à la mise en place des trackers de position. Astucieusement posés sur le corps, ces repères permettent de reconstituer virtuellement les mouvements des acteurs. L'entrée de gamme de ces appareils se compte en dizaines de milliers d'euros, donc seules les grosses productions peuvent se permettre d'investir dans ce matériel coûteux. Mais l'arrivée des systèmes de réalité virtuelle (VR) ont permis de diminuer drastiquement ces coûts. A suivi un agrandissement du panel des technologies de localisation. Celle que nous étudierons ici provient du HTC Vive. Nous verrons plus loin son fonctionnement et ses avantages.

Nous présenterons d'abord dans ce rapport le laboratoire où s'est déroulé le stage, puis nous expliquerons le principe de fonctionnement du tracker. Nous poursuivrons sur la réalisation d'une simulation qui reprend le principe de fonctionnement du tracker. Nous verrons ensuite comment réaliser une fusion avec les différents capteurs qu'embarque le système. Enfin nous ferons l'étude du HIVE Tracker qui nous permettra de discuter de ses performances et des limites de son utilisation.

Nota : Ne sont présentés ici que les concepts généraux et leurs explications. L'intégralité du code ainsi que les fichiers, sont présents sur mon dépôt GitHub à l'adresse suivante <https://github.com/JulienMellet/Kalman-Filter>

Chapitre 1

Présentation du laboratoire et du tracker

1.1 Le laboratoire ISIR

Fondé en 2007, l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) est une Unité mixte de Recherche (UMR). Celle-ci est commune à Sorbonne université (anciennement UPMC) et au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). Se trouvant au cœur de Paris sur le campus historique de Jussieu, cette université fut le lieu des travaux de Pierre et Marie Curie sur la radioactivité. Le bâtiment principal des travaux de robotique, la pyramide, rassemble chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs pour un effectif de 145 personnes. Le laboratoire est pluridisciplinaire, on y retrouve à la fois de la mécanique, de l'automatique, du traitement du signal et de l'informatique. Les domaines d'application sont extrêmement variés puisqu'on y retrouve à la fois de l'assistance chirurgicale, de la rééducation fonctionnelle, de la micro/nano-manipulation, de l'haptique, de l'intelligence artificielle ...

Quatre équipes composent le laboratoire et ont des champs d'action différents : AGATHE, AMAC, INTERCATION et SYROCO. L'équipe INTERACTION qui développe les techniques mettant en interaction les mondes physiques et virtuels, est composée de 5 groupes de travail. L'un de ceux-ci, Human-Computer Interaction (HCI) cherche à améliorer les interactions humain-machine connues avec les nouvelles technologies. Ce groupe accueille Cédric Honnet, l'ingénieur avec qui j'ai travaillé. Il est un des initiateurs du HIVE Tracker.

1.2 Le HIVE Tracker

Le HIVE Tracker est une miniaturisation du Vive Tracker de HTC Vive.



FIGURE 1.1 – Vive Tracker et HIVE Tracker

Ce tracker est développé en collaboration dans 3 laboratoires : L'UPV (Valencia), le Kampff Lab à l'UCL (Londres) et l'ISIR à la Sorbonne (Paris). Il a pour but de proposer un système de localisation 3D sous-millimétrique à prix abordable.

Chapitre 2

Simulation du système

2.1 Les Lighthouses

Les Lighthouses sont vendues avec le matériel de réalité virtuel HTC Vive. Ce sont des petits systèmes autonomes fixes, qui permettent de repérer des accessoires de VR dans l'espace. Ils se positionnent en hauteur dans une pièce et doivent être visibles pour les manettes et le casque HTC Vive.

Le principe de fonctionnement des bases est le suivant : une émission globale (ou flash) puis un balayage précis de l'espace.

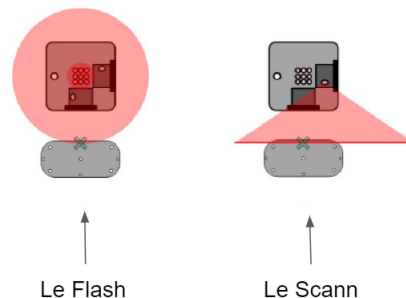


FIGURE 2.1 – Le flash et le scan d'une Lighthouse

Suivent un autre Flash puis un scan perpendiculaire au précédent. Ces étapes sont répétées ainsi de suite de manière très stable dans le temps.

2.2 Le principe du positionnement

2.2.1 Le principe théorique

Une photodiode, sensible à la lumière d'une Lighthouse peut alors mesurer le temps entre un flash et un scan. Deux mesures, proportionnelles aux angles de deux scan permettent d'obtenir un vecteur pointant la photodiode. Avec deux lighthouses, deux vecteurs peuvent être obtenus. Connaissant la position et l'orientation des lighthouses, l'intersection de ces deux vecteurs donne

une estimation de la position de notre photodiode.

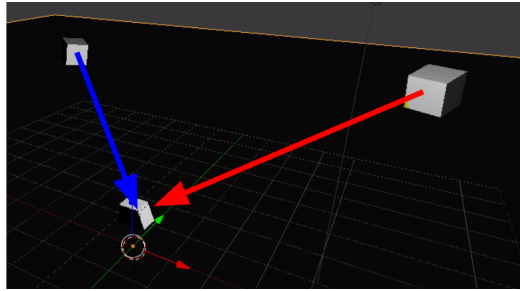


FIGURE 2.2 – Représentation de l'intersection des vecteurs provenant des Lighthouses et passant par une photodiode (extrait d'un premier essai de simulation sous Blender)

L'intersection imparfaite

Deux vecteurs non-colinéaires ne pouvant que très difficilement se croiser dans l'espace, il faut définir ce qui est considéré comme leur intersection. Nous avons ici choisi d'utiliser le milieu du segment perpendiculaire aux deux vecteurs.

2.2.2 Autre principe

Contrairement au principe énoncé précédemment, il est possible de n'utiliser qu'une seule Lighthouse si l'on se base sur l'hypothèse que les photodiodes sont sur un solide.

Nous connaissons les distances séparant les photodiodes et un vecteur directeur au centre de chaque photodiode partant de la Lighthouse. Par ailleurs nous cherchons les distances de chacune des photodiodes par rapport à la Lighthouse. Le HIVE Tracker ayant 4 photodiodes, nous pouvons écrire 6 équations inter-distanciellles des photodiodes, et avons 4 inconnues : les distances photodiode-Lighthouse.

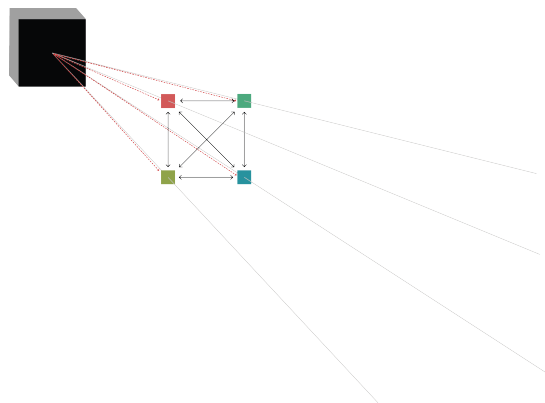


FIGURE 2.3 – Positionnement à une seule Lighthouse

Il s'agit ensuite de résoudre ce système d'équations à 4 inconnues.

2.3 La simulation

Blender étant un logiciel open source et multiplateforme nous avons fait le choix de l'utiliser pour réaliser une simulation reprenant les principes précédemment énoncés. Nous avons utilisé son moteur de jeu, le Blender Game Engine (BGE) qui est largement utilisé pour réaliser des simulations physiques ou faire des visualisations scientifiques.

Le scan dans la simulation

Le scan des plan est réalisé en imposant une rotation à un plan. Lorsque la distance signée séparant le plan de l'objet courant change de signe, nous considérerons que scan a atteint la photodiode et conservons cet angle. Avec deux angles et deux lighthouses nous avons ainsi le principe de fonctionnement du système réel.

Le principe de fonctionnement de la simulation

La version finale de la simulation est faite comme un jeu vidéo. Un petit véhicule bleu peut être déplacé à l'aide du pavé numérique dans un salon. Sa position calculée est symbolisée par une sphère verte. Pour un soucis de compréhension du principe de fonctionnement du système HTC Vive, la vitesse de rotation qui réellement est de 120Hz, est ici ralentie. De plus les plans de scan sont colorés en rouge translucide.

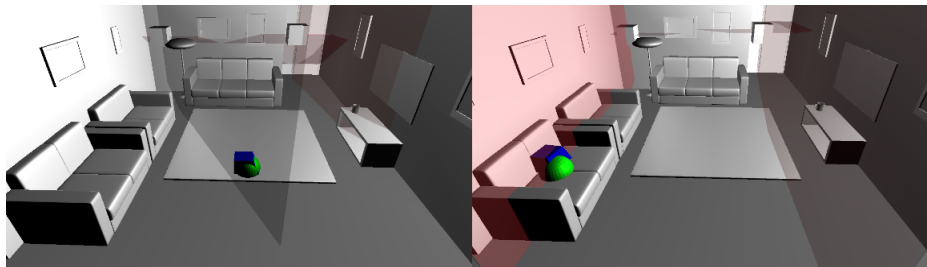


FIGURE 2.4 – Début de la simulation à gauche ; Et après un déplacement à droite

Pour mieux comprendre la simulation, le fichier *LH_Simu.blend* est accessible dans la branche "Dev" du dépôt de la fusion de capteurs :

<https://github.com/JulienMellet/Kalman-Filter/tree/Dev/Simulations>

Discussion sur la simulation

On remarque que la position de l'objet courant ne correspond pas exactement à la position de l'objet calculée. Plusieurs sources d'erreurs peuvent en être à l'origine : Imprécision due au calcul numérique, vitesse de rotation trop importante et trop faible nombre de FPS (Rafraîchissement du calcul par seconde).

Chapitre 3

La fusion de capteurs

Les capteurs de mesure ayant tous des avantages et des inconvénients, le HIVE Tracker en embarque différents types. Nous essayerons plus tard de récupérer le meilleur de chacun par une fusion intelligente. Il existe différents types de fusions, nous en étudierons deux : le filtre de Kalman (KF) et la fusion de Madgwick.

3.1 Les capteurs

3.1.1 Les photodiodes

La mesure réalisée par les photodiodes est très stable dans le temps (pas de dérive), mais est aussi bruitée et a une fréquence de rafraîchissement plutôt faible. De plus les photodiodes sont sensibles aux occlusions.

Le jitter (gigue) observé impose un prétraitement des données mesurées. L'utilisation d'un simple filtre passe bas semble être une solution. Nous en étudierons deux types.

3.1.2 La centrale inertielle

Une centrale inertielle (IMU) embarque 3 types de capteurs : gyroscope, magnétomètre et accéléromètre. Nous ne traiterons ici que l'utilisation de l'accéléromètre.

Pour obtenir une position il faut intégrer deux fois les accélérations mesurées par rapport au temps. Cependant, le bruit autour de la mesure n'étant pas centré, les intégrations successives font dériver la position. Une réinitialisation de la position doit alors avoir lieu régulièrement. Par ailleurs la fréquence de rafraîchissement de ce capteur est plus importante que celle des capteurs optiques.

3.2 La fusion de capteurs

Connaissant les qualités de chacun des capteurs nous appliquer un prétraitement aux capteurs : un passe bas pour les données optiques et une double intégration pour les mesures de l'accéléromètre.

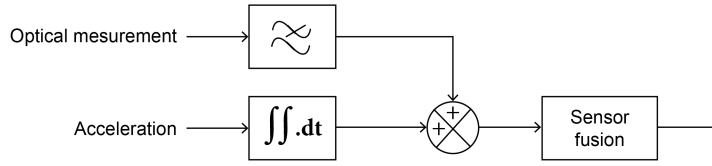


FIGURE 3.1 – Schéma bloc du traitement des données du HIVE Tracker

Nous pouvons mieux comprendre l'intérêt du prétraitement des mesures, puis de la fusion des données avec la schématisation suivante. Il s'agit d'une représentation de données types, sans échelle précise, où le tracker subit un échelon.

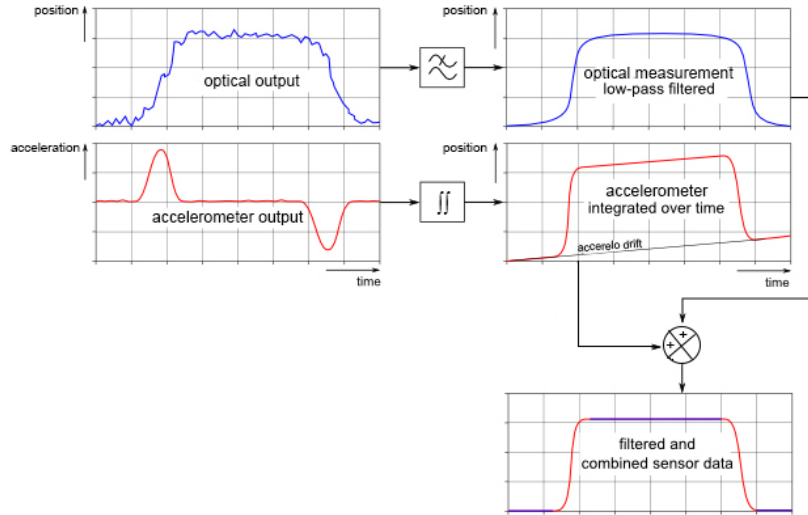


FIGURE 3.2 – Schématisation d'un échelon subi par le HIVE Tracker

3.2.1 Le filtre de Kalman

La première fusion de capteur que nous avons réalisé est la plus commune : le filtre de Kalman. Partant de l'hypothèse que chaque mesure suit une loi normale, elle est pondérée par son écart-type. Le filtre de Kalman permet d'abord estimer la position du tracker à l'aide d'un état initial, puis de la corriger en la pondérant en fonction de la qualité de chaque mesure. Le filtre de Kalman permet ainsi d'estimer la vraie position du tracker.

Voyons sur un essai en 1 dimension comment une différence d'écart-type peut influencer le résultat du filtre de Kalman. Nous avons ici deux mesures de position différentes (x_{light_house} pour

la mesure optique, et $x_accelerometer$ pour la mesure faite à partir de l'IMU) où les unités n'ont pas d'importance.

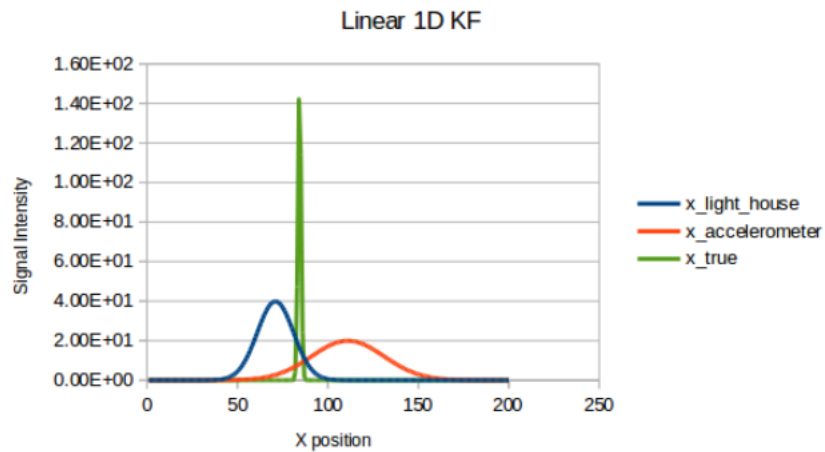


FIGURE 3.3 – Valeur (en vert) du filtre de Kalman sur une itération à partir de deux mesures (en orange et en bleu)

On retrouve les mêmes résultats que dans la littérature [1]. La valeur calculée par le filtre de Kalman est plus précise que les deux mesures séparées ; et cette valeur est plus proche de la mesure la plus précise.

Le détails de l'utilisation du filtre de Kalman est expliqué dans son implémentation. Le filtre de Kalman peut parfois requérir une importante puissance de calcul contrairement à certaines astuces trouvée par Madgwick dans son filtre.

3.2.2 Le filtre de Madgwick

Le filtre de Madgwick a principalement été conçu pour être utilisé sur les données gyroscopique. Nous essayons ici de l'adapter pour l'utiliser sur le tracker.

Deux types de fusion de capteurs sont proposés dans le white paper de Madgwick [6] : fusion des données de l'accéléromètre et du magnétomètre par descente de gradient, et fusion des données précédentes et du gyroscope par une simple moyenne pondérée.

La descente de gradient

La descente de gradient permet de trouver le minimum d'une fonction. Madgwick, dans sa publication, cherche le minimum d'une fonction définie avec le vecteur gravité (mesuré par l'accéléromètre) et les champ magnétique terrestre (mesuré par le magnétomètre). Cette fonction devant être nulle, une minimisation de son résultat permet de retrouver un vecteur gravité très stable. La descente de gradient est intéressante selon Madgwick car elle ne demande que peu de puissance de calcul.

La moyenne pondérée

Une version simplifiée de la seconde fusion faite par Madgwick peut être interprétée comme une moyenne pondérée des données optiques et de l'accéléromètre.

Chapitre 4

L'implémentation

4.1 Le blocage de cardan

L'utilisation des angles d'Euler dans une première définition des rotations du tracker nous a montré un problème : le saut du système pour des rotations où l'angle avec la vertical dépasse 90 degrés. Ce problème est connu en aviation d'où il a été rencontré, il s'appelle le blocage de cardan. Il est résolu avec l'utilisation d'un autre système de rotation : les quaternions.

Les quaternions sont la généralisation des nombres complexes dans un espace à 4 dimensions [3]. Dans notre études il s'agira simplement de récupérer la rotation envoyée par le tracker dans le système quaternion. Une conversion des angles en quaternions en angles d'Euler a lieu pour la représentation fixe le blocage de cardan initial.

4.2 Conception d'une structure géométrique

Une structure géométrique solide permet de d'affiner le positionnement et l'orientation trackés. En effet, connaissant la position de 3 points dans l'espace on peut déterminer une surface orientée. De plus, un solide dont on connaît la position relative des photodiodes, permet d'appliquer le principe de positionnement expliqué en 3.2.2.

4.2.1 Une structure de développement

Il s'agit dans un premier temps de réaliser une structure modulable. Tout les composants du tracker doivent pouvoir être insérés et retirés facilement sans les endommager. La distance séparant les photodiodes les unes des autres doit être relativement importante (un carré de 4 cm de coté) pour la structure de développement. Cette distance pourra être réduite dans un second temps, dans une optique de miniaturisation.

Le tracker et les photodiodes s'emboîtent aisément dans le boîtier, et peuvent être retirés sans endommagement. Les différents espaces de branchements sont laissés libres.

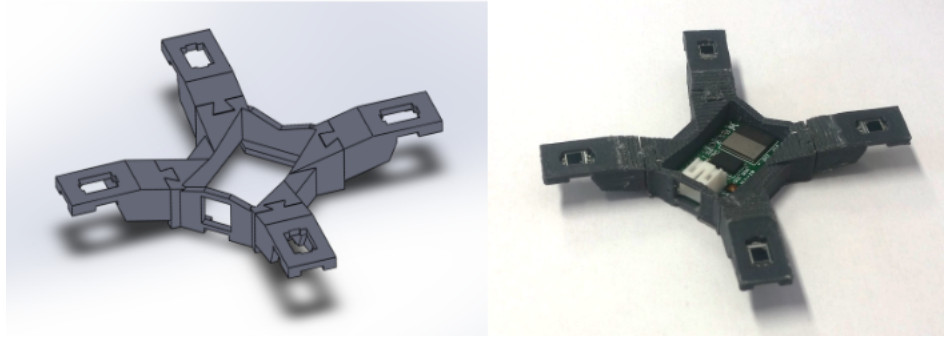


FIGURE 4.1 – Structure SolidWorks à gauche ; Structure imprimée en 3D ABS à droite

4.2.2 Une structure optimale

On cherche ici la structure ayant une exposition optimale des photodiodes. Pour optimiser leur positionnement dans l'espace, il faut assurer que quelque soit l'orientation du tracker un maximum de photodiodes soit visible. Le tétraèdre, qui maximise l'espace qu'il y a entre les photodiodes, nous assure qu'au moins une photodiode sera visible par les Lighthouses.

En reprenant la conception précédente, mais en ajustant la position des photodiodes nous obtenons la structure mécanique suivante.

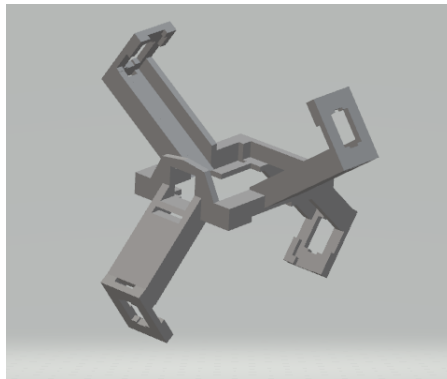


FIGURE 4.2 – Structure SolidWorks de forme tétraédrique

Cet arrangement n'a pas été expérimenté lors de cette étude.

4.3 La position des Lighthouses

Pour connaître la position des photodiodes, il faut connaître avant la position des Lighthouses et leurs orientations. Il est possible de les mesurer, mais cette technique manque de précision, comme nous le verrons dans la première expérimentation. Il est cependant plus intéressant d'utiliser une seconde option, récupérer les matrices de transformations homogènes calculées par le système HTC Vive. Nous détaillerons ici cette technique.

4.3.1 Les deux repères

Pour récupérer les matrices de transformations homogènes, nous utilisons un programme développé par G. Lopes en Bonsai. Après avoir connecté le système HTC Vive en VR et fait les initialisations, ce programme permet de récupérer les 2 matrices de transformations homogènes des Lighthouses. Ces matrices sont données dans un repère OpenGL qui est différent de celui de Blender.

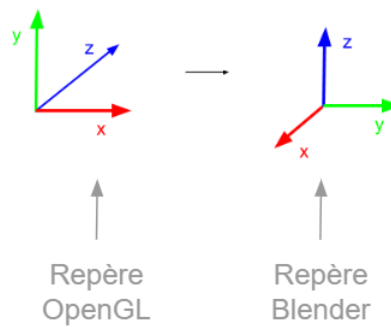


FIGURE 4.3 – Différence de repère entre OpenGL et Blender

Cette différence fut un problème assez complexe à résoudre, puisque l'application d'un simple changement de repère n'est pas la solution.

4.3.2 Le changement de repère

Pour trouver quel changement de repère appliquer nous avons réalisé une simulation Blender. Cette idée fut initiée par G. Lopes. Il s'agit d'appliquer les transformations homogènes aux vecteurs d'une base, puis de retrouver virtuellement la position que les Lighthouses ont réellement. Plusieurs essais ont été réalisés pour trouver la bonne combinaison des changements à effectuer.

En considérant la matrice de transformation homogène initiale (où le vecteur translation est sur la quatrième ligne) voici les différentes étapes à réaliser :

- Prendre la transposée de la matrice de transformation homogène ;
- Appliquer la transformation homogène au vecteur mesuré par une Lighthouse ;
- Intervertir les composantes en y et z du vecteur.

Ces changements, nous permettent de définir le repère local d'une Lighthouse qui subirait ces transformations. Ce repère est le suivant :

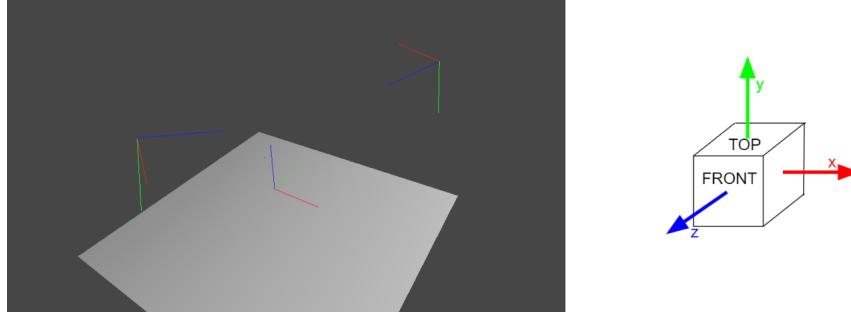


FIGURE 4.4 – À gauche : Repères des Lighthouses (sur les extrémités) après application des matrices de transformation homogène (au repère central) ; à droite : repère local d'une Lighthouse

4.4 L'expérimentation

Des essais du tracker sur des déplacements connus précisément peuvent permettre de le caractériser.

4.4.1 Le banc d'essai

Théoriquement, le HIVE Tracker peut renvoyer une position sous-millimétrique. Pour le prouver, il faut alors un système lui aussi d'une précision sous-millimétrique.

Une première phase d'étude permet de concevoir un banc qui embarque la même technologie que les imprimantes 3D : alimentation CC 12V, driver pour moteur pas à pas, Moteur pas à pas NEMA 17 et microcontrôleur Atmel. Un prix de 170 euros de matériel pour une précision estimée au quart de millimètre. La phase d'achat est interrompue lorsqu'un système similaire peut être prêté par l'institut Mines-Télécom.

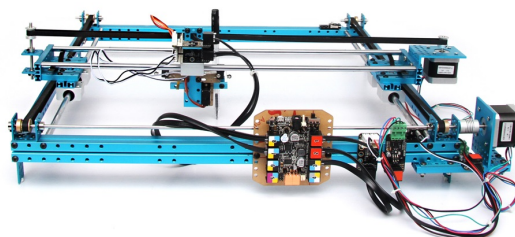


FIGURE 4.5 – Banc d'essai : Plotter XY 2.0 de MakerBot

Le système n'étant plus mis à jour depuis 2014 et n'étant pas forcément adéquat à notre utilisation, l'ingénieur C. Honnet lui apporte quelques modifications. Ainsi le choix des déplacements et de leurs vitesses lui sont ajoutés.

4.4.2 Première série de mesures

Cette première expérimentation s'inscrit dans la caractérisation du tracker.

Les hypothèses de travail

La position mesurée par l'IMU est réinitialisée à 30Hz. La position optique est filtrée par le moyennage des 4 dernières mesures.

Contrairement aux recommandations, les Lighthouses regardent du même côté. Leurs localisations et leurs orientations ont été mesurées à la main. Les prises de mesures sont récapitulées sur le schéma suivant.

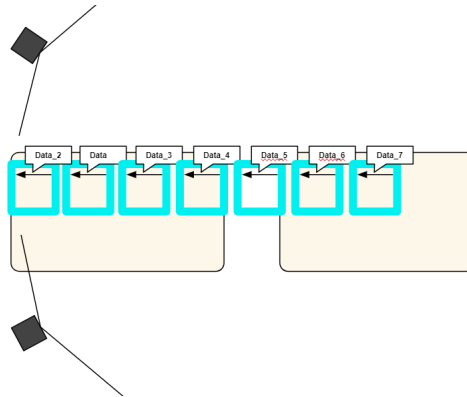


FIGURE 4.6 – Agencement de la première expérience (En noir les Lighthouses ; en beige la table ou repose le Plotter ; en bleu le Plotter ; la flèche correspond aux mesures)

À chaque centimètre, 100 mesures de position sont prises sur un trajet total de 30cm. Ces mesures seront moyennées.

Observation des premiers résultats

Par ailleurs, pour le déplacement, nous pouvons voir que le tracé virtuel d'une ligne droite n'est pas respecté. De plus la longueur d'un centimètre ne correspond pas à la mesure faite par le Tracker.

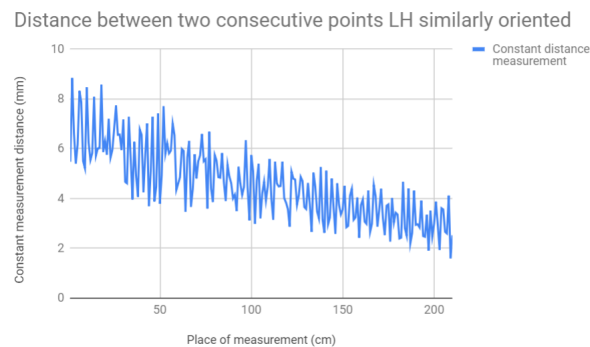


FIGURE 4.7 – Expérience 1 : Mesures dans l'espace d'un déplacement de 1cm

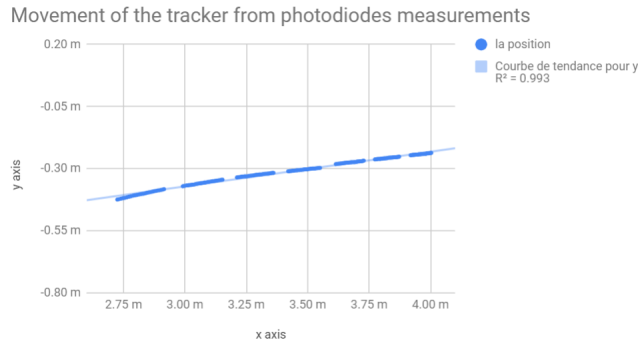


FIGURE 4.8 – Expérience 1 : Position optique du tracker

On observe que plus le tracker est loin des Lighthouses, plus la mesure est imprécise. De plus, avec la courbe de tendance, on remarque que le déplacement en ligne droite est presque respecté. On peut ainsi expliquer l'erreur de mesure comme le résultat de l'imprécision de la mesure de la position et de l'orientation des Lighthouses. Nous tâcherons désormais d'utiliser une localisation plus précise des Lighthouses.

4.4.3 Seconde série de mesures

Les nouvelles hypothèses

Les différents filtres passe-bas et de fusions de capteurs ont été comparés.

Pour améliorer la précision des mesures nous prenons ici les matrices de localisation des Lighthouses calculées par le système HTC Vive. Nous plaçons les Lighthouses de manière à ce qu'elles se fassent face.

Nous réduisons le nombre de mesures aux seuls endroits extrêmes, comme on peut le voir sur le schéma suivant.

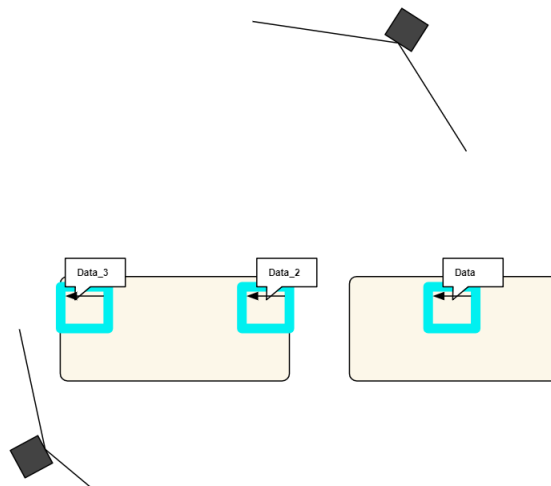


FIGURE 4.9 – Agencement de la seconde expérience (En noir les Lighthouses ; en beige la table ou repose le Plotter ; en bleu le Plotter ; la flèche correspond aux mesures)

Nous avons fait de plus des essais en dynamiques sur un mouvement alternatif en fonction

du temps.

Observation des seconds résultats

La même étude que précédemment est d'abord réalisée. Les deux différences majeurs sont la position dans l'espace des Lighthouses (qui suit les recommandations données par HTC Vive), et l'utilisation des matrices de transformations homogènes du programme Bonsai.

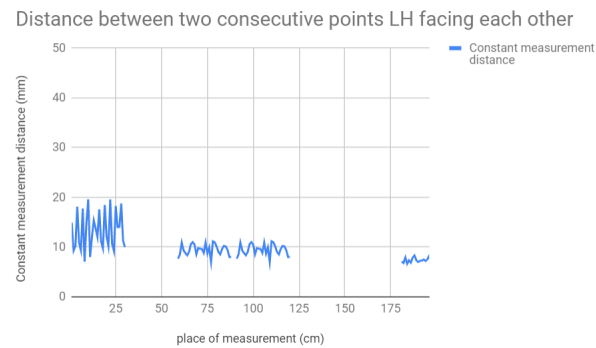


FIGURE 4.10 – Expérience 2 : Mesures dans l'espace d'un déplacement de 1cm

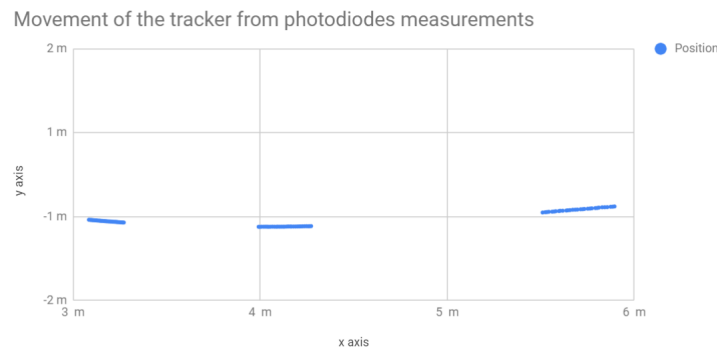


FIGURE 4.11 – Expérience 2 : Position optique du tracker

On peut voir qu'avec la nouvelle définition des localisations des Lighthouses, la distance de 1 cm est mieux respectée. Cependant, ce résultat est à nuancer pour les valeurs extrêmes où l'on peut remarquer des incohérences de mesures. Par ailleurs on peut remarquer une légère courbure de l'espace calculé. En effet, les données mesurées "data-2" montrent une légère courbure. Une idée pour comprendre ce phénomène et essayer de le résoudre sera proposée plus tard.

4.4.4 Excitation alternative sur la seconde série de mesures

La seconde série de mesure étant plus fiable que la première, nous essayerons et comparerons ici les filtres sur les mesures. L'excitation est d'amplitude 5 cm et de période temporelle 1,8 s. Nous nous plaçons au niveau de "data-3".

Filtre passe-bas sur les données optiques

Il s'agit ici de comparer les deux filtres passe-bas des données optiques : moyenne des 4 dernières mesures et certains pourcentages de la dernière mesure sur les anciennes.

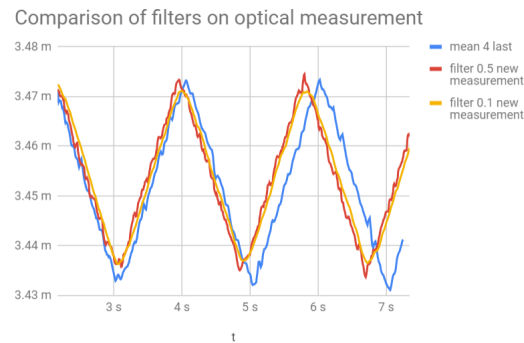


FIGURE 4.12 – Expérience 2 : Comparaison des filtres sur les données optiques (en bleu : moyenne des 4 dernières ; en rouge : la nouvelle mesure compte pour 50 pourcents sur les anciennes ; en jaune : la nouvelle mesure compte pour 10 pourcents sur les anciennes mesures)

Amplitudes mesurées :

- Moyenne des 4 dernières valeurs : 40 cm ;
- Filtre à 0,5 (somme pondérée utilisant 50 pourcents de la nouvelle valeur) : 35 cm ;
- Filtre à 0,1 (somme pondérée utilisant 10 pourcents de la nouvelle valeur) : 33 cm.

On remarque d'abord que le motif alternatif triangulaire reste constant dans le temps. Cependant l'échelle des amplitudes n'est respectée.

Le filtre de Kalman comparé à Madgwick

Nous comparons encore les mesures sur un mouvement alternatif. Mais nous regardons ici la différence faite entre l'utilisation du filtre de Kalman contre un filtre qui requiert moins de puissance de calcul, la technique de Madgwick. Les données optiques sont filtrées par l'utilisation de la moyenne des 4 dernières mesures.

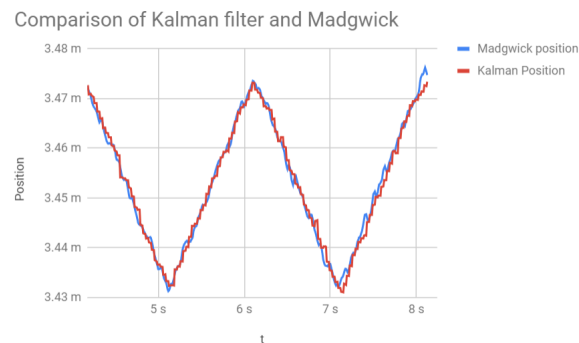


FIGURE 4.13 – Expérience 2 : Comparaison de la fusion de Kalman et de la fusion de Madgwick

On voit que les données de Kalman sont saccadées par paliers. Les données de Madgwick sont quant à elles plus lisses. Les deux mesures sont bruitées, et ont même amplitude et même périodes temporelles.

4.4.5 Les données de l'accéléromètre

Le rafraîchissement théorique des données de l'accéléromètre est 4 fois plus important que celui des données optiques. Cependant la dérive de l'accéléromètre est telle que très rapidement les données mesurées sont fausses. Observons le filtre de Kalman agir en statique pour une dérive de 0,5 secondes de l'accéléromètre.

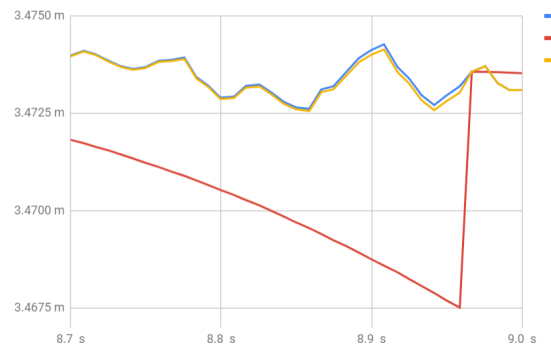


FIGURE 4.14 – Expérience 2 : mesures optiques (en bleu), mesures de l'accéléromètre (en rouge) et données filtrées (en jaune) fonction du temps en statique

On remarque que les données de l'accéléromètre tirent les données filtrées dans leur direction. On voit de plus que les valeurs optiques sont prépondérantes pour le filtre de Kalman.

Chapitre 5

Discussion

5.1 La caractérisation

5.1.1 Caractérisation du positionnement optique

La caractérisation du tracker montre que les mesures de position avec les Lighthouses dépendent de l'endroit où elles sont faites. Ainsi, pour une meilleure précision, il faut choisir une distance intermédiaire aux Lighthouses : ni trop près, ni trop loin. Cette distance est d'environ 2 mètres de chaque Lighthouse.

5.1.2 La caractérisation des filtres

Le filtre passe-bas

Le filtre à 0,1 semble être le plus adapté avec les essais réalisés. Même s'il ajoute un temps de réponse, la stabilité du tracker est largement augmentée, et des essais empiriques montrent que cette latence est légèrement compensée par la fréquence de rafraîchissement des mesures. Ce filtre est par ailleurs très simple, et ne requiert que peu de puissance de calcul.

La fusion des capteurs

Les filtres de Kalman et Madgwick ont globalement le même résultat. Cependant les données de Kalman étant saccadées, le filtre de Madgwick sera préféré. En effet, son résultat semble plus lisse pour une faible puissance de calcul requise.

Par ailleurs, au vu de la dérive des données de l'accéléromètre, une réinitialisation de sa position toutes les 4 mesures semble être suffisante pour ne pas trop impacter la position fusionnée.

5.2 Les améliorations

L'ensemble de ce stage a mis en avant quelques limites. Voici quelques points que je pense intéressants à noter.

5.2.1 La visualisation

Même si Blender à l'avantage d'être gratuit et multiplate-formes, ses inconvénients d'utilisations ne sont pas des moindres.

Il est d'abord difficile de prendre en main Blender. Ce logiciel n'étant pas intuitif, un long travail d'apprentissage est requis. Ensuite son système de coordonnées n'étant pas le même qu'OpenGL, des calculs supplémentaires sont requis à chaque étape. Enfin la communauté utilisant le moteur de jeu interne à Blender (BGE) est en fort recul. Si bien qu'il a été annoncé une fin progressive du BGE actuel.

L'ensemble de ce arguments montre que Unity est une meilleure plate-forme de développement pour développer le HIVE Tracker. En effet Unity peut tourner sur tout les OS (même sur smartphones) dans une version gratuite ; les coordonnées sont les mêmes que sur OpenGL ; la communauté est très active.

5.2.2 Le positionnement

La technique de localisation du tracker à une seule Lighthouse semble très prometteuse.

Même si les premiers essais n'ont pas été concluants, elle permettrait d'abord une localisation des Lighthouses. Il s'agirait ainsi de s'affranchir de la complexe initialisation du système HTC Vive, tout en ayant une bonne précision. Ensuite, cette localisation serait aussi un moyen de résistance aux obstructions. Car même avec une Lighthouse cachée, le tracker serait toujours visible.

Un filtre des données optiques plus intelligent pourrait être expérimenté : le filtre à 1 euro. Il s'agit d'un filtre passe-bas à seuil variable.

Pour le filtre de Kalman, un ajustement de l'écart-type des mesures pourrait être réalisé.

Pour l'accéléromètre, la dérive semblant être constante, on pourrait soustraire un coefficient pour minimiser cette erreur de mesure. Et l'utilisation de l'orientation du tracker permettrait d'affiner la mesure des accélérations dans l'espace.

5.2.3 La visualisation de l'espace

Pour comprendre le phénomène de courbure de l'espace calculé, une étude mériterait d'être menée. Il s'agirait de mesurer la position du tracker en quadrillant l'espace. Il s'agirait ainsi de trouver les zones de l'espace où il existe des incohérences pour ensuite résoudre le problème. Nous pourrions alors, soit compenser les écarts en chaque point, soit redéfinir les matrices de positionnement des Lighthouses. La première solution étant fastidieuse, la seconde serait privilégiée.

5.2.4 La structure géométrique contrainte

Deux principales améliorations sont à ajouter à la structure.

La première est dans la protection des composants de la carte. En effet, la première version cherchant à avoir un maximum de liberté a montré une faille. Une fiche de la liaison a lâché lors des nombreuses utilisations du tracker. Il s'agirait alors de renforcer les connecteurs dans ces zones légèrement sollicités.

La seconde amélioration viendrait dans l'optique de miniaturisation du tracker. Il s'agirait ainsi de réduire au maximum l'espace entre les composants, tout en conservant la praticité actuelle.

Conclusion

Ce stage me permis d'explorer un problème d'ingénierie dans le monde la recherche. Même si le problème sur lequel j'ai travaillé est théoriquement résolu, il est difficile à mettre en œuvre et trouve de nombreuses imperfections améliorables. Ce genre de problème semble être récurrent en Recherche et Développement. Certaines tâches se sont avérées plus courtes que prévues, et l'ensemble du plan d'étude aura finalement été plus long à réaliser que prévoyait le diagramme de Gantt initial.

J'ai ainsi découvert comment s'agence la recherche en interne dans un laboratoire, et comment elle fait part de ses découvertes en externe. J'ai pu voir que le temps effectif passé à travailler n'est que rarement proportionnel à la quantité rendue. Par ailleurs, au niveau technique j'ai pu me former à quelques logiciels tels que Blender et Unity. J'ai pu approfondir mes connaissances dans la gestion de versions de codes avec GitHub. J'ai pu découvrir la fusion de données, les quaternions et la descente de gradient. J'ai pu utiliser mon bagage technique. J'ai aussi du apprendre à vulgariser mes idées pour mieux le transmettre.

En ce qui concerne le tracker, sa précision est alors de quelques centimètres dans les cas les plus défavorable et millimétrique dans certains cas. Le traitement des données mesurées directement par les capteurs semble pour l'instant plus utile que la fusion des capteurs.

Ce stage a par ailleurs confirmé mon attrait pour la recherche en robotique. La pluridisciplinarité des compétences techniques en mécanique, informatique et électronique est indispensable. Et le partage d'idées nouvelles basées sur des travaux antérieurs me paraît tout aussi intéressant.

Enfin, même si le cahier des charges initial était ambitieux pour un stagiaire, sa quasi totalité a été réalisée. Cette étude a aussi mis en avant la quantité de travail qui pourrait encore être réalisé pour avoir un tracker résistant aux perturbations et simple d'utilisation. C'est dans ce contexte qu'une proposition de continuer mon travail en projet de Master m'a été faite. Il s'agirait de travailler pour NeuroGears, une spin-off de l'UCL dont la direction va être prise par G. Lopes.

Bibliographie

- [1] John W. Dower *Probabilistic robotics* 40. 2005.
- [2] Sinan Haliyo *Blender pour Simulation Physique*
- [3] Andrew J. Hansen *Visualizing Quaternions* 2005.
- [4] David Filiat <http://perso.ensta-paristech.fr/~filliat/Courses/index.html>
- [5] <https://hivetracker.github.io/>
- [6] Sebastian O.H. Madgwick *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays* 2010.