

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES
TOULOUSE, FRANCE



Département de Génie Electrique et Informatique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Développement d'un système de mesure du tour de taille sans-contact

Biomedical Signal Processing Laboratory
National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC)
Pathum Thani, THAÏLANDE



Auteur :
Vincent Maire

Tuteur industriel :
Dr. Dusadee Treeumnuk

Septembre 2018

Résumé

En tant qu'étudiant de 5^{ème} année en section Automatique-Électronique à l'INSA de Toulouse et dans le but de valider mon diplôme, j'ai pu intégrer pendant un stage de 20 semaines, le Biomedical Signal Processing Laboratory au National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), basé près de Bangkok en Thaïlande. Pendant cette intégration et découverte d'un environnement de travail professionnel, mes objectifs étaient de mettre en applications les compétences techniques et relationnelles que j'ai pu développer tout au long de mon cursus.

Ce court rapport est un résumé de mon rapport de stage écrit en anglais et que vous pourrez trouver à l'adresse suivante : www.github.com/Vincema/report_internship_nectec_VM. Il décrira de façon rapide le contexte de mon stage, le travail que j'ai réalisé, présentera les résultats et explicitera mes retours personnels sur cette expérience.

Sommaire

Introduction	4
1 Projets et objectifs	5
1.1 Système de mesure automatique du tour de taille	5
1.1.1 Contexte	5
1.1.2 Cahier des charges	5
1.1.3 Architecture du système	5
1.1.4 Travail à réaliser	6
1.2 Système de mesure d'orientation d'une centrale à inertie	6
1.2.1 Contexte	6
1.2.2 Cahier des charges	7
1.2.3 Objectifs de travail	7
2 Réalisations et résultats du système de mesure automatique du tour de taille	8
2.1 Implémentation des composants physiques	8
2.2 Détection du nombril du patient	8
2.3 Scan de la taille de l'utilisateur	9
2.4 Conversion des mesures brutes en nuage de points	9
2.5 Détection des points aberrants	9
2.6 Reconstruction de contour	10
2.6.1 Régression locale	10
2.6.2 Méthode d'assemblage séquentielle	11
2.6.3 Utilisation de B-splines par "minimisation des distances au carré"	11
2.7 Validation du projet	11
2.8 Conclusion sur le projet	12
3 Réalisations et résultats du système de mesure de l'orientation par centrale à inertie	13
3.1 Architecture du système	13
3.2 Calibration du magnétomètre	13
3.3 Traitement des mesures brutes	13
3.4 Interface utilisateur	14
3.5 Conclusions sur le projet	15
4 Conclusion	16

Introduction

Pour un stage d'une durée de 20 semaines, j'ai intégré le Biomedical Signal Processing Laboratory (BSPL) au National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), qui est une institution gouvernementale Thaïlandaise et qui a pour buts de "promouvoir, participer et réaliser des recherches en électronique et informatique".

Mon tuteur industriel, Dr. Dusadee Treeumnuk, ainsi que plusieurs autres chercheurs du BSPL, ont proposé un sujet de recherche concernant un système de bilan de santé automatique. J'ai donc eu l'opportunité de travailler de façon autonome sur ce projet innovant. Ma mission était d'étudier, de prototyper et de tester le système afin de déterminer la capacité d'une telle machine à mesurer le tour de taille d'un individu de façon automatique. Les résultats de cette étude devront ensuite faire l'objet d'une publication dans une revue internationale.

En parallèle de ce projet, le Dr. Decho Surangsirat m'a proposé un sujet de travail tierce de moindre importance qui consistait à traiter les données d'une centrale inertielle, puis d'afficher ces données via une interface utilisateur. Ce projet a pour but d'être utilisé en tant qu'assistant au chirurgien pour des tâches spécifiques.

Dans ce rapport, je décrirai de manière plus détaillée, les projets sur lesquels j'ai travaillé ainsi que mes objectifs sur chacun d'eux. Puis je citerai les différentes approches utilisées et donnerai les résultats. Enfin je conclurai ce rapport par un retour sur mon travail ainsi que son apport pour mon projet professionnel.

Chapitre 1

Projets et objectifs

Ce premier chapitre décrit le contexte, la structure des projets et situe mes objectifs dans ceux-ci.

1.1 Système de mesure automatique du tour de taille

1.1.1 Contexte

Les maladies non-communicables tuent plus de 38 millions de personnes par an dans le monde et l'Organisation Mondiale pour la Santé a placé ces maladies sur sa liste noire. Pour lutter contre certaines d'entre elles, le Ministère de la Santé Thaïlandais a lancé une campagne de prévention de l'obésité par l'utilisation massive de pèse-personnes. Cependant, même si ces machines sont très utiles pour mesurer l'Index de Masse Corporelle, ils ne sont que très peu précis car ils sont incapables de prendre une mesure du tour de taille. L'OMS recommande pourtant fortement de prendre en compte cette mesure anthropométrique car elle est un très bon indicateur de l'état de santé d'un individu.

Dans ce contexte, le Dr. Dusadee Treeumnuk, entre autres, a choisit de lancer un projet de recherche visant à développer un système capable de mesurer le tour de taille d'un individu avec précision. Cela permettrait de lancer une production à grande échelle à travers le pays afin de prévenir des maladies de manière efficace. De tels machines ont déjà été développées mais elles sont dans leur majorité très chères, trop encombrantes, peu hygiéniques ou peu pratiques.

1.1.2 Cahier des charges

Le système développé doit répondre à plusieurs critères :

- Sa complexité et son coût doivent rester abordables
- Il doit être simple d'utilisation, robuste, et hygiénique

1.1.3 Architecture du système

Le design et l'architecture du système imaginés et retenus prend la forme de 3 mâts, répartis sur un cercle, sur lesquels des LIDARs (outils de mesure de distances via influx lumineux) sont montés. Chacun de ces LIDARs permet de prendre des mesures de distance à 360 degrés sur leur plan horizontal. L'utilisateur se placerait alors au centre de ce cercle imaginaire formé par les LIDARs et se laisserait scanner son tour de taille, comme le montre la figure 1.1. De plus, les LIDARs sont montés sur un servomoteur chacun, afin de pouvoir changer leur orientation dans les cas où les utilisateurs seraient trop grands ou trop petits.

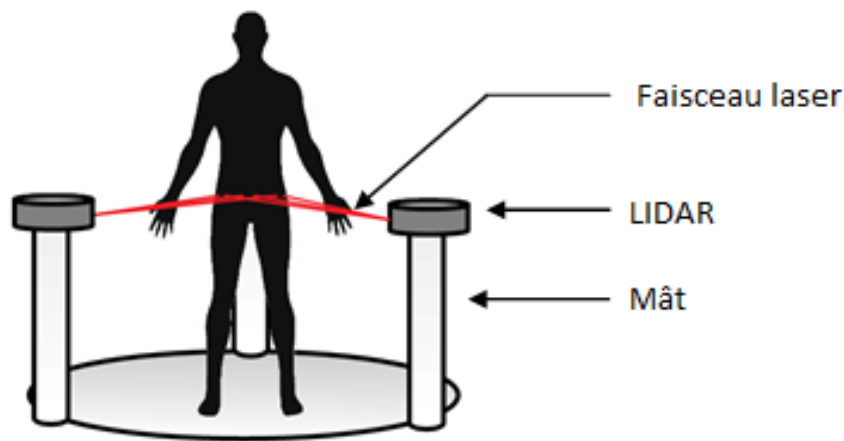


Figure 1.1: Principe général du système

1.1.4 Travail à réaliser

Étant seul à opérer sur ce système, le travail à réaliser après la fabrication de la machine, que je vais décrire dans cette section, reflète mes objectifs de travail.

Voici les différentes étapes techniques du projet :

- Commander les capteurs et actionneurs
- Scanner le contour de la taille du patient et récupérer les données sous forme de nuage de points
- Étudier les algorithmes capables de reconstruire la forme de la taille du patient, l'implémenter, puis calculer son tour de taille
- Transférer les résultats par une communication série vers un autre appareil
- Facultatif : détecter la position du nombril
- Rédiger un rapport technique

1.2 Système de mesure d'orientation d'une centrale à inertie

1.2.1 Contexte

Certaines opérations chirurgicales nécessitent d'implanter des vis dans les os d'un patient. Pour ce faire, les chirurgiens effectuent premièrement des radios de la zone d'intervention, puis mesurent les angles selon deux axes et par rapport à une référence quelconque, auxquels ils doivent effectivement implanter les vis. Cette méthode peut être améliorée avec l'utilisation d'une centrale inertielle (IMU), qui mesurerait l'orientation de la visseuse afin de confirmer la bonne orientation de la vis avant l'implantation. Cette méthode a été testée par une équipe de chercheur dirigée par G. F. Jost et Dr. Surangsirat, chercheur au BSPL, souhaitait reproduire un tel système afin de pouvoir l'améliorer en collaboration avec un chirurgien.

1.2.2 Cahier des charges

Le but de ce projet consiste en l'utilisation d'une centrale inertielle, de la récupération et du traitement de ses mesures, afin d'être capable d'assister le chirurgien en lui affichant des informations précises et utiles d'orientation de son outil d'implantation. Des centrales inertielles très précises et robustes sont disponibles sur le marché mais leur coût est très élevé.

1.2.3 Objectifs de travail

Il m'a été demandé de réaliser les tâches suivantes pour ce projet :

- Récupérer et transférer les données brutes de la centrale inertielle vers un PC
- Traiter, filtrer et compenser les mesures afin d'obtenir l'orientation précise du capteur
- Développer une interface utilisateur qui permet de visualiser les données et de paramétrer le système

Chapitre 2

Réalisations et résultats du système de mesure automatique du tour de taille

Le projet de système de mesure automatique du tour de taille est divisé en différentes parties indépendantes. Ce chapitre décrira les objectifs de chaque sous-parties, avec les méthodes utilisées pour y parvenir. Je présenterai également les résultats et les limites des solutions proposées.

2.1 Implémentation des composants physiques

Le système est relativement simple car il n'utilise que 3 servomoteurs et 3 LIDARs montés sur un mât chacun. De plus un Raspberry Pi est utilisé afin de communiquer avec les différents composants et d'héberger les algorithmes de reconstruction de contour.

Le programme est écrit en Python 3.6 et de nombreuses bibliothèques sont disponibles. J'ai donc utilisé des bibliothèques open source pour la commande des capteurs et actionneurs. De plus, un travail de conception électronique a dû être réalisé car les servomoteurs n'utilisent qu'un signal bi-directionnel pour la communication série. J'ai donc intégré un adaptateur de tension ainsi qu'un tampon 3 états pour configurer le sens de la communication et dé-multiplexer les signaux RX-TX.

2.2 Détection du nombril du patient

L'OMS précise que le tour de taille doit-être mesuré au niveau du nombril, il est donc nécessaire de connaître sa position. Pour ce faire, deux approches sont possibles : effectuer un scan entier du patient et détecter le nombril sur les données récupérées, ou estimer sa position en tenant compte de différentes données sur le patient.

J'ai pu démontrer que la détection du nombril par scan, en plus d'être complexe à mettre en oeuvre, pouvait ne pas fonctionner avec la plupart des patients en utilisant les capteurs actuels. Avec l'analyse statistique de 2 bases de données ouvertes qui fournissent la hauteur du nombril de milliers de cobayes, ainsi que leur taille, âge et poids, j'ai mis en évidence une corrélation forte entre la taille et la hauteur du nombril des patients. Avec une simple régression linéaire, il est donc possible d'estimer la position du nombril en connaissant la taille de l'utilisateur. Le tableau 2.1 montre que pour 95% des utilisateurs, l'erreur sur la hauteur estimée de leur nombril sera inférieure à 2,40% de leur taille totale, soit moins de 4cm d'erreur pour une personne de 165cm.

	Moyenne	Médiane	95-centile
Pourcentage de la taille du patient	0,94%	0,83%	2,40%

Tableau 2.1: Erreur moyenne, médiane et 95-centile de l'estimation de la hauteur du nombril par rapport à sa vraie hauteur

2.3 Scan de la taille de l'utilisateur

Le scan devant se faire à hauteur du nombril, les servomoteurs doivent orienter les LIDARs de haut en bas. Une méthode de scan particulière devait être mise en place afin de mesurer la totalité de la zone choisie. J'ai donc formalisé un algorithme fournissant aux servomoteurs, une série d'inclinaisons auxquelles les LIDARs doivent effectuer des scans. Cette méthode permet de couvrir toute la zone dans laquelle la taille du patient est supposée être.

2.4 Conversion des mesures brutes en nuage de points

Chaque mesure est un vecteur de données comprenant le numéro d'identification du LIDAR, la distance mesurée, l'orientation du LIDAR lors de cette mesure ainsi que l'inclinaison du servomoteur. Il a donc fallu combiner l'ensemble de ces données pour chacun des LIDARs, afin d'obtenir un nuage 3D de points. Ensuite, seuls les points mesurés dans la zone au dessus de la base (horizontalement) et autour de la hauteur du nombril (verticalement) sont conservés et aplatis. Finalement, seule une coupe 2D horizontale du patient est conservée. Cette coupe est supposée représenter le tour de taille du patient. La figure 2.1 montre un exemple de nuage de points récupéré et reconstruit à l'issue d'un scan.

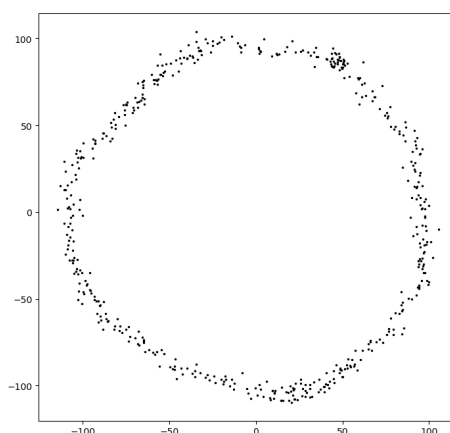


Figure 2.1: Exemple de nuage 2D de points représentant le tour de taille du patient

2.5 Détection des points aberrants

Détecter les points aberrants dûs à des interférences de mesures ou autres est important avant de reconstruire le contour du tour de taille. J'ai donc implémenté deux méthodes différentes pour cela : une méthode basée sur la génération d'un arbre couvrant minimal sur le graphe défini par les points, puis une autre méthode basée à la fois sur la génération d'un arbre couvrant minimal puis d'un graphe de Gabriel.

Dans la grande majorité des cas, ces méthodes fonctionnaient, comme le montre par exemple la figure 2.2 où l'on remarque que les 3 points aberrants en haut à droite sont correctement

déTECTÉS.

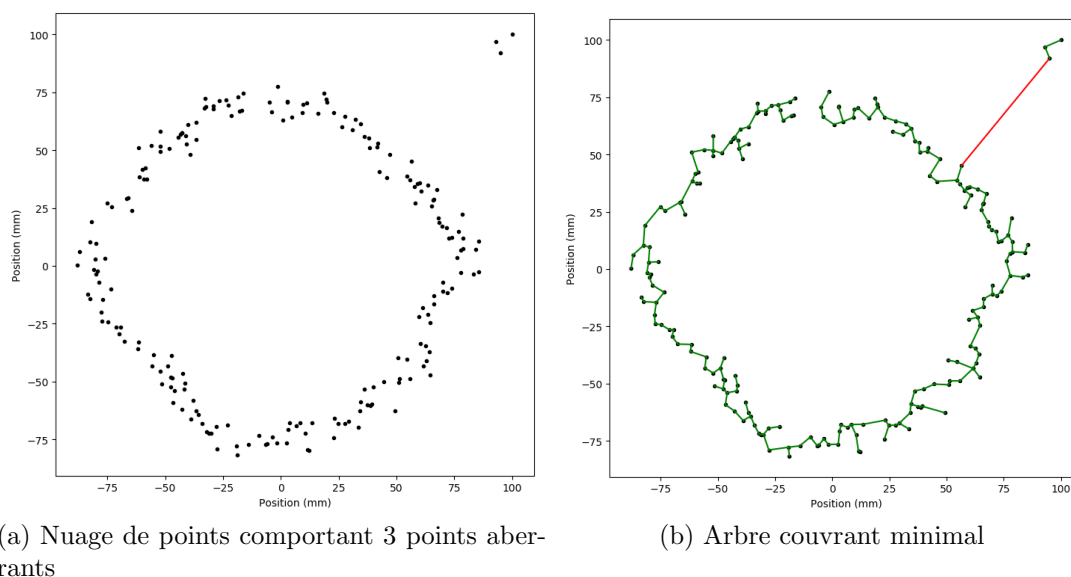


Figure 2.2: Exemple de détection des points aberrants par arbre couvrant minimal
En **vert**, les arcs considérés assez courts et en **rouge** les arcs trop longs par rapport aux autres et qui seront supprimés.

Cependant, des tests dans certaines conditions, comme par exemple quand le nuage comporte des trous, montre que ces méthodes produisent des faux positifs qui amènent à une perte importante d'information. De ce fait, une autre méthode a été utilisée durant la reconstruction du contour et sera décrite plus loin dans ce rapport.

2.6 Reconstruction de contour

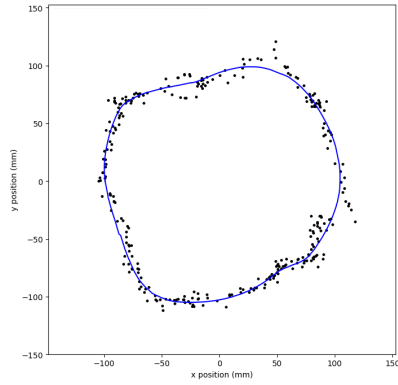
La reconstruction du tour de taille du patient est la partie la plus importante en terme de complexité et de charge de travail dans ce stage. Après une étude bibliographique, trois méthodes ont été retenues afin de générer une courbe qui serait le reflet du contour réel du tour de taille de l'utilisateur.

2.6.1 Régression locale

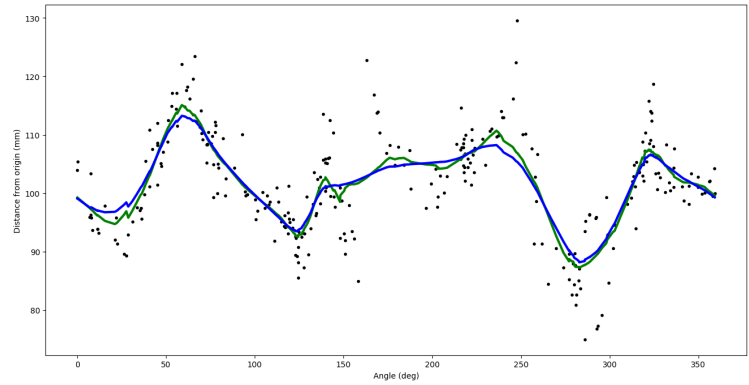
La première méthode a été proposée par Dr. Dusadee Teeumnuk. Elle consiste à utiliser une régression de type LOESS, qui consiste à effectuer une série de régression paramétriques à différents points et de combiner ces différentes courbes de régression. Cela permet donc d'obtenir une unique courbe de régression non paramétrique.

Un inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite des points ordonnés, or, notre nuage de point ne l'est pas. J'ai donc implémenté l'ajustement d'un cercle dans le nuage de point. Cela permet d'ordonner les points par leur distance par rapport au centre du cercle en fonction de leur angle sur le cercle. Une fois les points ordonnés, j'ai implémenté l'algorithme ainsi qu'une méthode de sélection du coefficient de lissage (smooth factor). J'ai obtenu des résultats corrects comme le montre la figure 2.3. En effet la courbe montre un bon lissage des points tout en ayant une forme fidèle au nuage de points.

A nouveau, en testant cette méthode avec des données moins denses, j'ai remarqué que la forme obtenue perd en fidélité.



(a) Courbe obtenue par régression locale sur le nuage de point



(b) Courbes obtenues par régression locale sur les points ordonnés (la courbe **bleue** est courbe finale)

Figure 2.3: Résultats de la reconstruction de contour par régression locale

2.6.2 Méthode d'assemblage séquentielle

Une autre approche tirée de la littérature scientifique consiste à ordonner les données par une méthode d'assemblage basée sur l'utilisation d'une grille et de sous-grilles. Tout comme la méthode de régression locale, cette méthode a montré de bon résultats jusqu'à être confrontée à un nuage de points moins "parfait". Dans ce cas, cette procédure ne peut plus être utilisée du tout.

2.6.3 Utilisation de B-splines par "minimisation des distances au carré"

La troisième méthode implémentée est basée sur la minimisation d'une fonction spécifique qui permet d'ajuster une courbe B-spline à un nuage de points non ordonnés. Une B-spline est un ensemble de fonctions polynomiales paramétriques.

Premièrement, une courbe initiale est calculée par ajustement d'un cercle sur le nuage de points. Puis, à chaque itération de cette méthode, un terme de régularisation ainsi qu'un vecteur de données sur chaque point et des splines sur lesquels il agit, sont calculés. Les points aberrants sont également retirés si leur distance à la courbe est supérieur à 6 fois l'écart-type des distances à la courbe des autres points. Une fonction quadratique définie positive est ensuite minimisée. On obtient alors une B-spline ajustée au nuage de points. Finalement, l'erreur d'ajustement est calculée afin de déterminer si la procédure doit s'arrêter ou itérer.

Cette méthode a montré les meilleurs résultats comme le montrent les figures 2.4 et 2.5. En effet, pour un nuage de points plus disparate et contenant moins de points, la présente méthode semble se rapprocher de la réalité, contrairement à la régression locale qui produit une forme moins lisse. De plus, cette méthode a de bonnes capacités d'amélioration car elle est complétée par d'autres travaux de recherches.

2.7 Validation du projet

Malheureusement, il était très difficile d'estimer les performances de ce système car il aurait nécessité de nombreux cobayes, aux propriétés anthropométriques différentes, afin de le tester et de mener une étude statistique sur sa fidélité et précision.

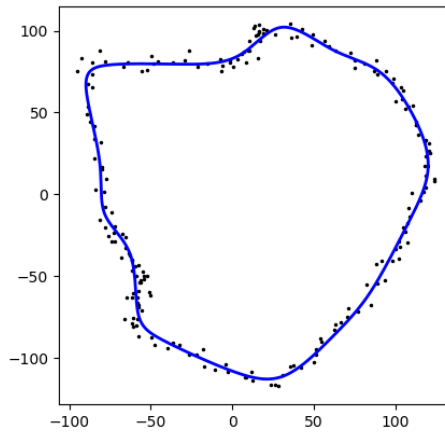
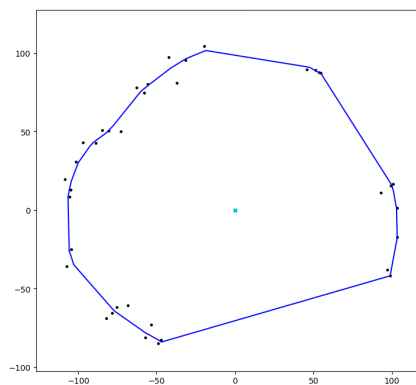
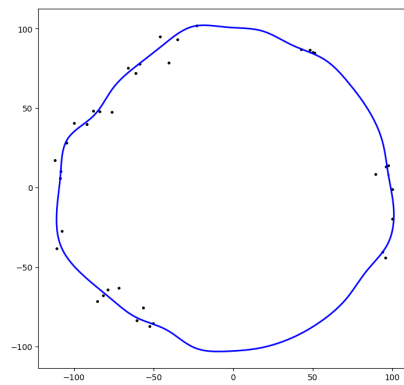


Figure 2.4: Exemple de reconstruction de contour obtenue par la méthode avec B-spline



(a) Courbe obtenue par régression locale



(b) Courbe obtenue par "minimisation des distances au carré"

Figure 2.5: Comparaison des résultats obtenus par régression locale et B-spline pour un nuage de points faiblement dense

2.8 Conclusion sur le projet

En se basant sur les objectifs qui m'ont été confiés, ce projet a été abouti. De plus, le but principal de mon travail était de montrer la capacité d'un tel système de mesurer et d'estimer le tour de taille d'un patient. Ce projet servira de base à l'élaboration d'un produit plus finit et robuste.

De nombreuses améliorations peuvent être apportés, notamment concernant l'optimisation des algorithmes, mais aussi au niveau de la robustesse du système (points aberrants, bogues...). La précision du système devra également être déterminée, afin de pouvoir publier les résultats de ce projet de recherche.

Chapitre 3

Réalisations et résultats du système de mesure de l'orientation par centrale à inertie

Le second projet, de moindre importance, sur lequel j'ai travaillé est le système de mesure de l'orientation par centrale à inertie.

3.1 Architecture du système

Les composants nécessaires à cette réalisation se limitent à une centrale à inertie MPU9250, un arduino Nano ainsi qu'une interface utilisateur sur un PC. Les données du MPU9250 sont récupérées par l'Arduino via communication I2C, qui les transmet immédiatement via liaison série au PC.

3.2 Calibration du magnétomètre

La centrale inertielle est composée d'un accéléromètre 3 axes, d'un gyroscope 3 axes et d'un magnétomètre 3 axes. Il est aisé de calibrer l'accéléromètre en prenant comme référence la gravité. Le gyroscope quant à lui, ne fournit que des informations relatives et ne nécessite pas d'être calibré. Cependant, le magnétomètre a besoin d'une calibration très précise car le champ magnétique terrestre n'est pas constant en tout point de l'espace et du temps. De plus, il est biaisé par différentes imperfections du capteur.

Un algorithme simple a été utilisé pour calibrer le magnétomètre tout au long de son utilisation. Toutefois, ce système est supposé fournir un haut degré de précision et sera utilisé dans un hôpital qui est un environnement riche en interférences du champ magnétique terrestre dues aux machines utilisées (scanners...). Cette calibration devra nécessairement être améliorée pour la version finale de ce système, grâce aux nombreuses méthodes présentées dans la littérature scientifique.

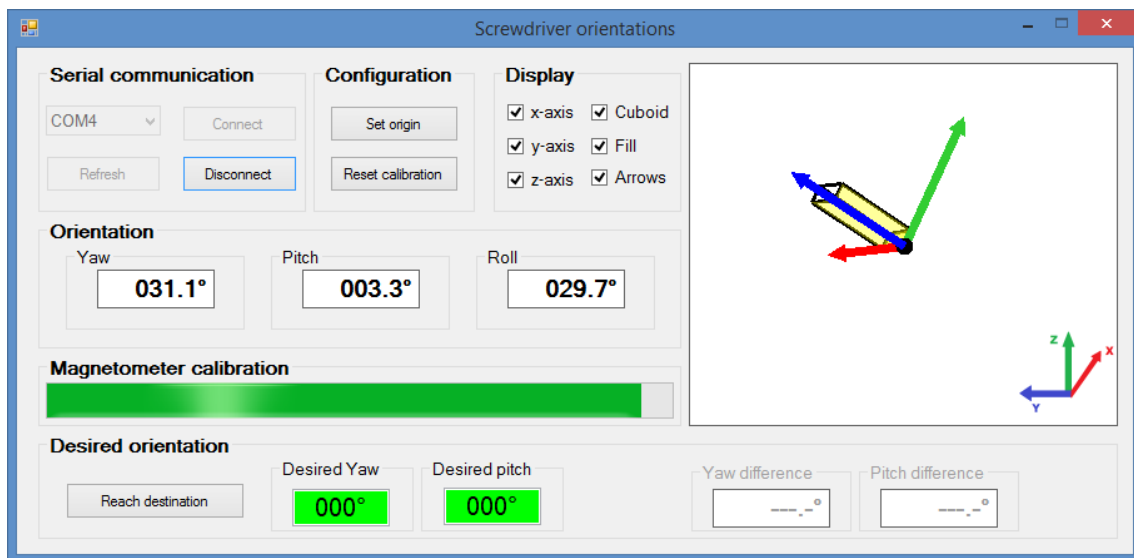
3.3 Traitement des mesures brutes

Un algorithme de fusion est nécessaire pour obtenir l'orientation du système à partir de 3 capteurs de nature différente. J'ai utilisé un filtre de Mahony, un algorithme de fusion qui renvoi des quaternions en sortie. Les quaternions sont une extension mathématiques des nombres

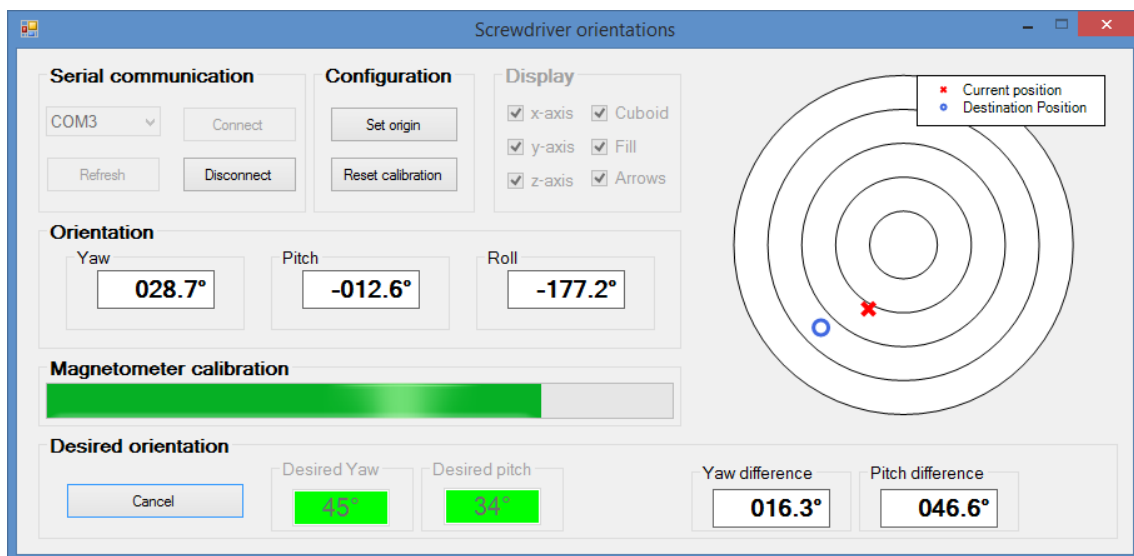
complexes. Entre autres, l'avantage du système de quaternions est de rendre le système, contrairement aux angles d'Euler, insensible au "gimbal lock", phénomène apparaissant quand 2 axes d'un gyroscope sont parallèles et amenant à la perte d'un degré de liberté. Cependant, les quaternions sont difficilement compréhensibles pour un humain et un chirurgien ne pourra donc pas lire l'orientation en quaternions.

3.4 Interface utilisateur

L'interface utilisateur a été codée en C#.NET et deux exemples de captures d'écrans sont montrés en figure 3.1. Différentes actions pour la configuration de la communication sont possibles. L'utilisateur peut également visualiser la qualité de la calibration, les angles d'Euler ainsi que l'orientation en 3D du système comme montré en figure 3.1a. De plus, après avoir rentré les angles à laquelle le chirurgien souhaite percer, il peut fixer son orientation courante comme référence et visualiser sur un graphe polaire la précision de son perçage (cf. figure 3.1b).



(a) Capture d'écran avec vue 3D de la centrale inertielle



(b) Capture d'écran avec aide à l'implantation de vis

Figure 3.1: Deux captures d'écrans de l'interface utilisateur

3.5 Conclusions sur le projet

Pour conclure ce projet, les objectifs ont été considérés comme atteints car le système a pu être reproduit comme présenté dans l'étude de G. F. Jost. Cependant, une revue avec un chirurgien doit-être réalisée et amènera probablement à son issue, de nombreuse demande de modifications et d'améliorations. De plus, la calibration du magnétomètre devra être améliorée et différentes fonctions comme la compensation de température seront sûrement nécessaires pour rendre ce système plus robuste. Il doit également être testé au niveau de sa précision et fidélité.

Chapitre 4

Conclusion

En conclusion, les objectifs en terme de réalisation des tâches ont été atteints pour les deux projets sur lesquels j'ai pu travailler. N'étant qu'à l'état de prototypes, ces système présentent de nombreuses améliorations à apporter et n'ayant pas pu valider rigoureusement ces projets par moi même, une personne tierce devra donc réaliser ces validations avec des tests plus poussés et précis.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a permis d'évoluer, notamment dans mes méthodes de travail, de recherche d'information, et d'organisation. J'ai notamment appris à étudier la littérature scientifique de manière plus efficace et rigoureuse. De plus, j'ai compris l'importance de la planification des tâches afin de ne pas passer un temps potentiellement infini sur chacune d'entre elle, qui pouvaient constamment être améliorées. J'ai également pu mettre à l'épreuve ma maîtrise de l'anglais et ma capacité d'adaptation à une culture étrangère à travers les échanges avec les différents acteurs de mon stage et collègues.