

# Positionnement absolu par trigonométrie laser

Pierre – Emmanuel Gaillardon, Cyril Beguet, Vincent Sénéclauze  
 Ecole Supérieure de Chimie-Physique-Electronique (CPE Lyon)  
 43, bd du 11 novembre 1918, BP 2077, F-69616 Villeurbanne Cedex, France  
 pierre-emmanuel.gaillardon@cpe.fr

**Résumé** — Ce document présente un système de positionnement absolu basé sur la trigonométrie et usant de mesures d'angles par laser. Le système conçu est dédié aux zones d'évolution de petites dimensions (de l'ordre de quelques mètres). Outre les aspects mathématiques du positionnement, la réalisation physique du système a été menée et permet d'obtenir des positionnements avec une précision de quelques centimètres.

## I. INTRODUCTION

En robotique, qu'elle soit industrielle ou amateur (on pense tout particulièrement à la Coupe de France de Robotique), il est primordial de connaître la position des mobiles de façon absolue dans son environnement. Cela permet en effet d'effectuer des déplacements précis et de réaliser des actions aux bons moments. Il suffit de voir l'utilisation généralisée des systèmes de positionnement globaux tels que le GPS. Néanmoins, peu de systèmes permettent de réaliser des positionnements précis sur des déplacements de courte distance et en environnements hostiles (parasites US-HF, fortes lumières), conditions couramment rencontrées dans un contexte industriel [1].

Aussi, dans le cadre du concours de conception Altera-CNFM, nous nous sommes attachés à cette problématique et nous nous proposons de réaliser un système de positionnement absolu sur un terrain de 3m x 2m. Les objectifs visés sont une précision de l'ordre de 1 à 5cm, mais également une très grande endurance et une fiabilité fournie par l'utilisation d'algorithmes complexes, pour un coût raisonnable.

Ce papier commencera donc par la présentation globale de la solution choisie. S'en suivra une description de l'algorithme de triangulation et ses améliorations possibles. L'implantation physique sur FPGA du système sera alors abordée. Puis, pour finir, les performances du système seront décrites.

## II. PRINCIPE DE LA SOLUTION

### A. Description fonctionnelle

Le concept global du système repose sur la triangulation, imposant donc la mesure d'angles entre des repères fixes et connus. En effet, on dispose, en des positions connues, des balises catadioptriques entièrement passives (les positions sont représentées par des étoiles sur la Figure 3) et on effectue une mesure des angles inter-balises grâce à un faisceau laser tournant sur 360°. Le faisceau laser très directif et très cohérent permet une bonne mesure de réflexion sur les catadioptriques des balises. De plus, sa puissance lumineuse relativement importante et sa sélectivité en longueur d'onde lui confèrent une bonne immunité au bruit. La mise en rotation du faisceau

laser est faite grâce à un miroir tournant entraîné par un moteur CC. L'axe de ce moteur sera monté sur un encodeur optique, afin d'obtenir un retour sur la position courante du faisceau. La détection de la réflexion du faisceau laser nous informe de l'impact sur les balises. La différence de position du codeur entre un impact et le précédent nous donnera alors la valeur de l'angle entre les balises.

Les balises d'angle sont formées par une double balise et deux simples balises. La double balise permet de différencier une balise par rapport aux autres et de donner une référence sur la réalisation d'un tour. Ainsi, le système mesure quatre angles correspondants aux angles entre chaque balise (un angle entre les deux mats de la double balise + trois angles entre les trois balises). Après recherche de l'angle correspondant à la double balise, le calcul des angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  est effectué.

### B. Système physique d'acquisition d'angle

La Figure 1 présente le système mécanique de mesure. Le faisceau laser est réfléchi consécutivement sur deux miroirs à 45°, dans le but d'obtenir un faisceau laser horizontal. Ce système à double renvoi permet de positionner le laser horizontalement, ce qui induit un gain évident en terme d'occupation d'espace, et autorise également de placer la photodiode au plus près de l'axe optique. De plus il diminue la quantité de lumière laser mal focalisée qui peut être réfléchie sur la photodiode. La mise en rotation du second miroir permet de faire parcourir au laser un disque tout autour de la tourelle de positionnement. Les balises, recouvertes de catadioptriques, maximisent l'intensité du faisceau réfléchi. L'intensité lumineuse recueillie par la photodiode est alors optimale.

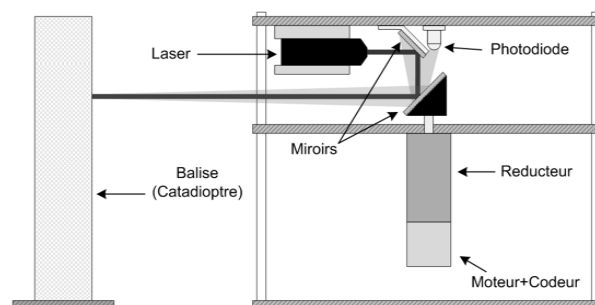


Figure 1 : Principe du système de mesure

C. Contrôle du système

Afin de piloter le système d’acquisition mécanique, un système complet de traitement a été conçu (Figure 2). Celui-ci est architecturé autour d’un FPGA Altera Cyclone II dont la fonctionnalité principale est de cadencer les opérations, mais aussi et surtout de réaliser les calculs de positionnement, gourmands en puissance. Néanmoins, il est nécessaire d’adjoindre au système numérique divers éléments d’interfaces pour les capteurs et les actionneurs. Ces modules analogiques et numériques sont interfacés au FPGA, et fournissent ainsi une transparence totale pour le contrôle des différents périphériques.

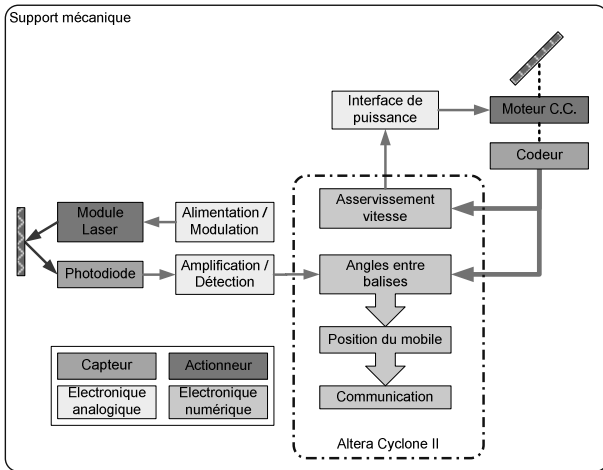


Figure 2 : Principe du système de traitement

III. ALGORITHME DE POSITIONNEMENT

Le système physique de mesure fournit les angles inter-balises, soit les angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  selon la définition des angles choisie (Figure 3). Il faut alors envisager le calcul de la position en coordonnées cartésiennes à partir de ces informations angulaires.

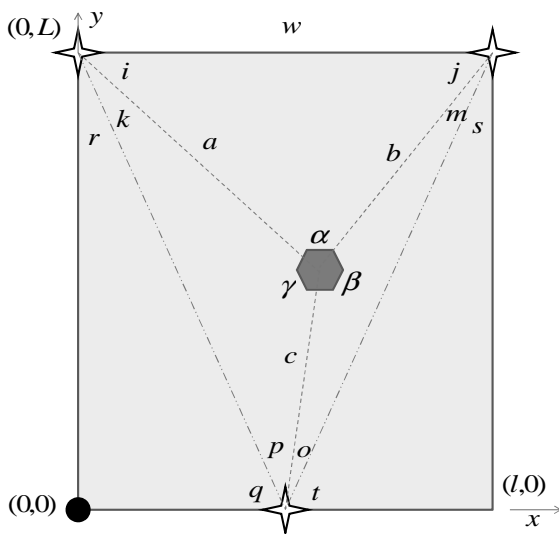


Figure 3 : Angles utilisés dans les relations de triangulation.

A. Trigonométrie inverse

La connaissance des trois angles inter-balises est bien maigre. Néanmoins, à partir de ces informations il est possible d’appliquer les relations classiques de la trigonométrie. L’utilisation du théorème des sinus, dans chacun des triangles formés par les balises et le système de mesure, permet de remonter, après manipulation des relations mathématiques aux angles  $i, j, k, p, m$  et  $o$ . A titre d’exemple, les relations (1) et (2), disponibles en fin de document, donnent  $i$  et  $j$  en fonction des données du problème. La connaissance de ces angles permet ensuite de remonter aux distances  $a, b$  et  $c$ . Dans le cas où l’on connaît l’angle  $j$ , il est possible d’obtenir la distance par la relation (3). Enfin, cette connaissance des distances entre le système de repérage et les diverses balises, permet d’aboutir à la position  $(x, y)$  du système. Les relations (4) et (5) illustrent ce propos.

B. Réalisation physique

Les lourds calculs scientifiques de positionnement sont réalisés au sein du FPGA. Ces algorithmes nécessitent à la fois des opérations simples (additions, soustractions, multiplications) et des calculs plus complexes de trigonométrie (sinus, cosinus). Or la réalisation de telles opérations en logique câblée aurait nécessité la mise en place d’unités de calculs pour chacune des opérations et la gestion des flux de données pour l’enchaînement de ces calculs. Cette complexité en termes de volume logique et de temps de développement s’étant avérée incompatible avec les délais impartis, la logique de traitement s’est architecturée autour d’un processeur NIOS II [2]. Ce dernier confère au système, à la fois sa puissance mais aussi sa souplesse de développement (programmation C, bibliothèques mathématiques, bibliothèques E/S standards, ...)

Concernant l’architecture du logiciel embarqué, une tâche de fond est chargée d’effectuer les calculs de position à partir des valeurs de position du codeur tandis qu’une partie, déclenchée par interruption, réalise l’acquisition de la position du miroir au moment du passage du rayon laser devant une balise. La Figure 4 illustre le déroulement des opérations réalisées. La routine d’interruption se contente de sauver la position du codeur et de lever un drapeau pour informer la tâche de fond de la présence d’une nouvelle donnée. Ainsi, après une phase d’initialisation, le programme principal se contente de scruter l’état de ce drapeau et déclenche le stockage de la position mesurée dans un tableau. Une fois quatre angles acquis, l’identification de l’ordre de mesure, basée sur la détection de la balise double, est démarrée. Par la suite, après conversion des angles en radians, un test de validité est réalisé, considérant que la somme des angles inter-balises doit être proche de  $2\pi$  à un seuil de tolérance près. Ainsi, si la validité est avérée, l’algorithme de trigonométrie est appelé.

#### IV. PERFORMANCES ET PERSPECTIVES DE LA SOLUTION

##### A. Performances

Le prototype du système de positionnement est actuellement réalisé et opérationnel. Les différents résultats concernant les performances sont les suivants :

- Précision angulaire :  $1^\circ$ .
- Précision sur la position : 20mm sur chaque axe du repère (x, y).
- Vitesse de rotation du miroir : 1,572 tours par seconde, soit un tour en 636ms.
- Durée d'exécution du programme d'interruption : 250 $\mu$ s.
- Durée d'exécution de l'algorithme de calcul de la position : 28ms.
- Durée totale nécessaire pour calculer une nouvelle position :  $4 * \text{interruption} + \text{calcul} = 29\text{ms}$ .

Ces performances permettent de réaliser des mesures efficaces pour un système à l'arrêt. En revanche, il n'est pas envisageable de réaliser une mesure de position en déplacement à l'heure actuelle.

##### B. Evolutions

Une augmentation de la vitesse de rotation et un réglage optimal de la convergence du faisceau laser pourront améliorer la précision et la vitesse d'acquisition, ouvrant ainsi les portes à une utilisation dynamique du système.

De même, la fiabilité pourra être améliorée par la mise en place d'un système de modulation du faisceau laser. Le prototype actuel, travaillant en bande de base, se trouve pollué dans les milieux fortement lumineux.

Enfin, l'optimisation de l'algorithme de calcul et l'utilisation de filtres avancés permettent de s'affranchir des erreurs de mesures et d'augmenter la robustesse du système. En effet, les angles étant connus avec une certaine précision dictée par la mesure physique, la trigonométrie inverse répercute l'incertitude sur la position finale. Aussi, la mise en œuvre d'un algorithme de filtrage particulière simplifiée pourra être faite afin de réduire cette incertitude finale. L'utilisation de tels algorithmes, reposant sur une étude statistique des données, est courante en robotique [3,4].

Le cœur de l'algorithme propose de générer un nombre défini de points repartis aléatoirement de manière gaussienne autour de la position supposée du mobile. De cette banque de points, correspondants aux possibilités de position du robot, un simple algorithme de trigonométrie directe, permettant de remonter aux angles inter-balises supposés, est appliqué. Il en résulte une connaissance des angles pour chacune des positions virtuelles du robot. L'étape finale est la comparaison de ces données par rapport aux angles inter-balises que le système de mesure nous fournit, permettant de mettre à jour la population de points et ainsi de converger vers une solution unique au fur et à mesure des itérations.

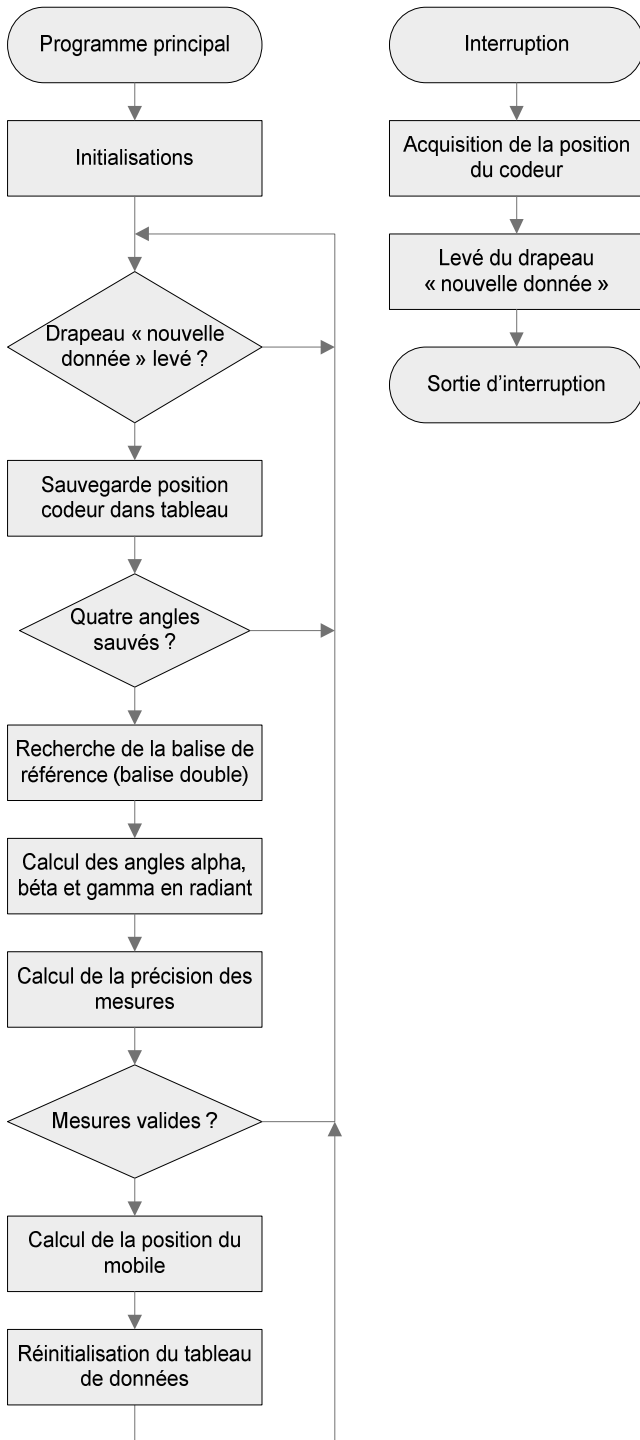


Figure 4 : Organigrammes du programme principal et de la routine d'interruption.

## V. CONCLUSION

Ce document, présentant un système de positionnement absolu pour mobile, a, dans un premier temps, détaillé le principe de la solution. Celle-ci, travaillant sur le principe de la triangulation, réalise des mesures d'angles grâce à la réflexion d'un rayon laser sur des balises catadioptriques. Il a ensuite été présenté les considérations algorithmiques permettant de réaliser l'opération de positionnement à partir de la mesure d'angles. Ces algorithmes centrés sur des calculs de trigonométrie inverse, ont été réalisés au sein d'un FPGA et ont permis de valider les concepts décrits. Les performances obtenues entrent d'ailleurs dans les objectifs fixés. Le principal résultat est une précision de positionnement de l'ordre de 20mm sur chaque axe. Néanmoins, un certain nombre d'améliorations, essentiellement algorithmiques, ont été dégagées, pour élargir le domaine d'utilisation et augmenter la

fiabilité et la précision du prototype. Tout particulièrement, la mise en place d'algorithmes de filtrage statistiques sera à envisager.

## BILIOGRAPHIE

- [1] G. Alenyà, J. Escoda, A. Martínez et C. Torras, "Using Laser and Vision to Locate a Robot in an Industrial Environment : A Practical Experience" IEEE International Conference on Robotics and Automation, Avril 2005
- [2] G. Hempel et C. Hochberger, "A resource optimized Processor Corde for FPGA based SoCs", 10<sup>th</sup> Euromicro Conference, Août 2007
- [3] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, et S. Thrun, "Monte Carlo Localization for Mobile Robots", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mai 1999
- [4] D. Kurth, "Range-Only Robot Localization and SLAM with Radio", Thèse de Master, Carnegie Mellon University, Mai 2004

$$i = \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{\left( \left( \frac{v}{\sin(\gamma)} \right) \cos \left( r - \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \cos(\alpha - \pi) \right)^2}{\left( \left( \frac{v}{\sin(\gamma)} \right) \cos \left( r - \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \cos(\alpha - \pi) \right)^2 + \left( \left( \frac{v}{\sin(\gamma)} \right) \sin \left( r - \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \sin(\alpha - \pi) \right)^2}} \right) \quad (1)$$

$$j = \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{\left( \left( \frac{u}{\sin(\beta)} \right) \cos \left( s - \beta + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \cos(\alpha - \pi) \right)^2}{\left( \left( \frac{u}{\sin(\beta)} \right) \cos \left( s - \beta + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \cos(\alpha - \pi) \right)^2 + \left( \left( \frac{u}{\sin(\beta)} \right) \sin \left( s - \beta + \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{w}{\sin(\alpha)} \right) \sin(\alpha - \pi) \right)^2}} \right) \quad (2)$$

$$a = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(j) \quad (3)$$

$$x = a * \cos(i) \quad (4)$$

$$y = L - a * \sin(i) \quad (5)$$

Relations issues de la trigonométrie inverse utilisés dans les calculs de triangulation.