

Balises Laser

OLIVIER COCHELIN (CoCo)

7 septembre 2002

Table des matières

1	Introduction	3
2	Présentation	4
2.1	Constitution du système	4
2.1.1	La balise adverseaire	5
2.1.2	Les balises réceptrices	5
2.1.3	La balise principale	6
2.2	Théorie mathématique	6
2.2.1	Position du problème	7
2.2.2	Calcul de l'angle β	7
2.2.3	Calcul de la distance r	9
2.2.4	Calcul de la position de l'adverseaire	9
3	Implémentation matérielle et logicielle	10
3.1	La partie "PIC"	10
3.1.1	Les différentes configurations	10
3.1.2	La mesure des angles α_1 et α_2	11
3.1.3	L'envoi des données	11
3.1.4	Carte électronique	11
3.2	La balise adverseaire	14
3.2.1	Le moteur de lecteur CD et son driver	14
3.2.2	L'asservissement en vitesse	14
3.2.3	Le top infrarouge	15
3.3	La partie "DSP"	15
3.3.1	Réception des données et triangulation	16
3.3.2	Exploitation de la position de l'adverseaire	16
4	Résultats et Perspectives	17
4.1	Résultats	17
4.2	Perspectives	18
4.2.1	Améliorations possibles du système	18
4.2.2	Pistes de recherche	18

Table des figures

2.1	Constitution du système	4
2.2	Pistes du support de laser	5
2.3	Schéma du système de triangulation	7
3.1	Carte électronique de la balise principale	12
3.2	Carte électronique d'une balise réceptrice	13
3.3	Carte électronique de la balise adverse	15

Chapitre 1

Introduction

Ce document présente le système de balises laser qui a été développé en 2002 dans le cadre du Club de Robotique de l'E.S.E.O. Ce système permet à l'aide de balises fixes de localiser un robot adverse sur lequel a été déposée une balise entraînant un laser en rotation.

On documente ici le principe de fonctionnement de ce système de repérage. Pour cela, la théorie mathématique nécessaire est détaillée en précisant les conditions fondamentales de fonctionnement de ce système. Dans un second temps, l'implémentation matérielle et logicielle est évoquée. La transmission des données par voie hertzienne ne sera qu'effleurée puisque plus largement développée dans un autre document. En guise de conclusion, nous reviendrons sur les résultats obtenus à l'aide de ce dispositif, ses avantages, ses limites et ferons quelques suggestions pour améliorer celui-ci ou s'ouvrir vers d'autres pistes.

Chapitre 2

Présentation

2.1 Constitution du système

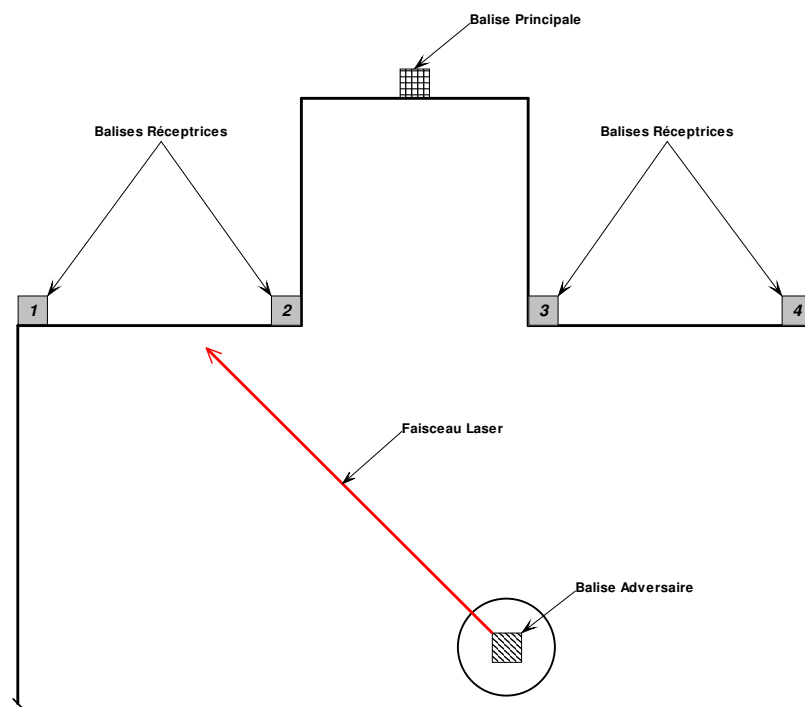


FIG. 2.1 – *Constitution du système*

Comme le montre la Figure 2.1, le système est constitué au total de 6 balises : 5 balises fixes et une balise mobile (celle qui est embarquée sur l'adversaire). Par la suite, la balise mobile sera dite balise adverse, les quatre balises fixes servant de récepteurs seront appelées balises réceptrices et la balise fixe centralisant les informations des balises réceptrices sera nommée balise principale.

Comme nous le verrons par la suite, 3 balises réceptrices sont en fait suffisantes pour localiser le robot adverse. Toutefois, compte tenu des opportunités offertes cette année par le règlement, nous avons choisi de placer 4 récepteurs. Ceci présente l'avantage de fiabiliser le système. En effet, si l'une des balises vient à être hors d'atteinte du faisceau laser, on peut se reporter sur les trois balises réceptrices restantes et ainsi connaître parfaitement la position de l'adversaire.

2.1.1 La balise adverse

Cette balise, qui se doit d'être totalement autonome puisqu'embarquée sur le robot adverse, est essentiellement constituée des éléments suivants :

Batterie : Cette batterie composée de 6 éléments de 1.2 volts assemblés de manière à minimiser l'espace occupé sert bien sûr à alimenter l'ensemble de la balise adverse. Il est important de la mentionner car l'espace qu'elle occupe est non négligeable.

Laser : Ce laser est l'élément central de l'ensemble du système, c'est son faisceau qui va permettre de localiser l'adversaire. Ce faisceau, d'une puissance inférieure à 1 mW pour être conforme aux normes est également diffracté verticalement de manière à former une ligne verticale. La longueur d'onde de ce laser rouge est de 632 nm. La diffraction verticale du faisceau est indispensable pour être certain que celui-ci viendra éclairer correctement les récepteurs même lorsque le robot adverse est en mouvement. Ce laser est fixé sur un disque en epoxy pourvu de deux pistes sur lesquelles viennent frotter deux balais permettant d'alimenter le laser lorsqu'il est en rotation sur ce plateau. Voir Figure 2.2.

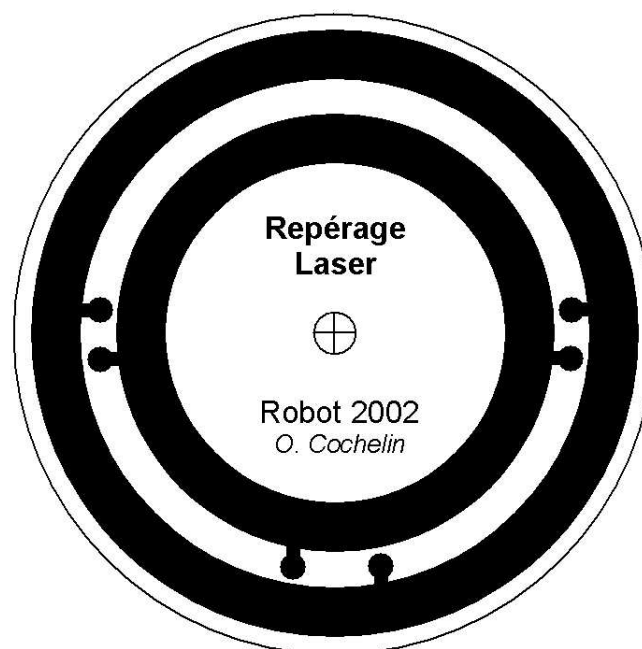


FIG. 2.2 – Pistes du support de laser

Moteur : L'entraînement de l'ensemble constitué par le laser et son plateau est assuré par un moteur de lecteur CD. Dans sa version définitive, le laser tourne à la vitesse de 25 Hz, soit 1500 tours/min. Il faut noter qu'à cette vitesse l'équilibrage du plateau et du laser (dont la masse est relativement importante) est vital pour l'ensemble du système et délicat à réaliser.

Électronique : Le système est asservi en vitesse par un dispositif électronique qui comprend l'asservissement en lui même et une carte (toujours récupérée sur le même lecteur CD) comportant le driver du moteur.

2.1.2 Les balises réceptrices

Ces balises réceptrices sont au nombre de quatre et sont reliées par un câble à la balise principale afin de lui renvoyer les informations acquises. Ces balises sont fonctionnellement extrêmement simples. Elles intègrent les éléments suivants :

2 photodiodes visible : Ces 2 photodiodes BPW21 fonctionnant dans le visible (longueur d'onde centrale

dans le vert) permettent de savoir quand le faisceau est en face de la balise. En fait, une seule des deux photodiodes est active. Alors pourquoi 2 photodiodes ? On utilise 2 photodiodes pour fiabiliser la détection en supprimant le bruit de fond. En effet, le laser est détecté quand la différence entre la photodiode active et la photodiode passive dépasse un seuil réglable.

1 photodiode IR : Cette photodiode IR BP104 n'est pas utilisée dans la version actuelle. Cependant, elle avait été prévue pour permettre de connaître l'orientation du robot adverse. En effet, la balise mobile devait à chaque tour émettre dans toutes les directions un flash infrarouge qui aurait été détecté par les balises et aurait ainsi permis de déterminer l'orientation du robot adverse. Toutefois, compte tenu du peu d'intérêt de l'information sur l'orientation et du manque de temps pour la mise en oeuvre, nous n'avons pas mis au point ce système.

Carte électronique : Celle-ci, composée d'un comparateur, d'une bascule D 74AC74 et de quelques résistances est réduite à sa plus simple expression. Elle a pour seul objectif de traiter les informations analogiques fournies par les photodiodes pour délivrer en sortie un signal logique indiquant que la balise a été frappée par le laser.

Masque : Le masque est simplement constitué d'un tube PVC dans lequel on a pratiqué une ouverture à la hauteur des photodiode à la manière des heaumes du Moyen-Âge. Bien qu'antique, cette technique demeure la plus efficace pour s'affranchir des parasites lumineux ambiants qui ne manquent pas sur un plateau de télévision. De même, une portion de ce disque a été remplacée par une partie plane qui reçoit les photodiodes et la carte électronique. Ce tube PVC a été découpé à l'aide d'un "fil à couper le beurre". Il s'agit en fait d'un fil chauffant que l'on branche sur une alimentation et qui découpe proprement la majorité des plastiques. Ce fil, qui nous avait été prêté par le club aeromodélisme, est à priori utilisé en modélisme pour découper des volumes dans du polystyrène.

2.1.3 La balise principale

La balise principale centralise les informations fournies par les 4 balises réceptrices et les traite pour renvoyer en HF un message ne contenant pas exactement la position du robot adverse mais des données permettant de la déterminer. Ce n'est pas la position qui est renvoyée car le PIC réalisant le calcul ne disposait pas de suffisamment de mémoire. De plus, il s'est révélé que cela présentait plusieurs avantages (en matière d'interprétation des informations) de réaliser ce calcul sur le DSP d'asservissement et de positionnement.

Cette balise principale est constituée de :

Batterie Il s'agit là d'une batterie standard de 7.2 volts qui alimente la balise principale et à travers elle les balises réceptrices. Là encore, la batterie occupe la moitié du volume de la balise.

Module HF C'est ce module fonctionnant à 868 MHz avec un débit de 57 600 bits/s qui émet les informations traitées par le PIC vers Snooky et la carte d'asservissement. Le fonctionnement et l'utilisation de ces modules sont détaillés dans un autre document.

Carte PIC A l'origine, la carte microcontrôleur qu'utilise la balise principale ne devait pas servir pour un système laser mais pour un système infrarouge. Toutefois, ce dernier s'étant révélé totalement inopérant, il a été abandonné au profit de ce système laser. C'est pourquoi, il a été nécessaire de réaliser une carte d'adaptation permettant à cette carte à base de PIC16F877 @ 20 MHz d'être réutilisée.

Carte d'adaptation Cette carte qui ne compte que quelques composants standards sert principalement à faire de l'adaptation pin pour pin entre la carte microcontrôleur et la connectique d'extension.

2.2 Théorie mathématique

Dans cette section, nous aborderons les aspects mathématiques qui nous permettront à partir des données mesurées par la balise principale de déterminer la position du robot adverse. Cette théorie est implémentée dans la carte de positionnement du robot.

2.2.1 Position du problème

Les seules balises qui nous intéressent dans cette partie sont les balises réceptrices et la balise adverseire. Le calcul présenté ci-dessous n'est correct que si l'ensemble des balises réceptrices sont alignées. En réalité, ce qui importe réellement, c'est l'alignement et l'espacement entre les photodiodes actives des balises fixes.

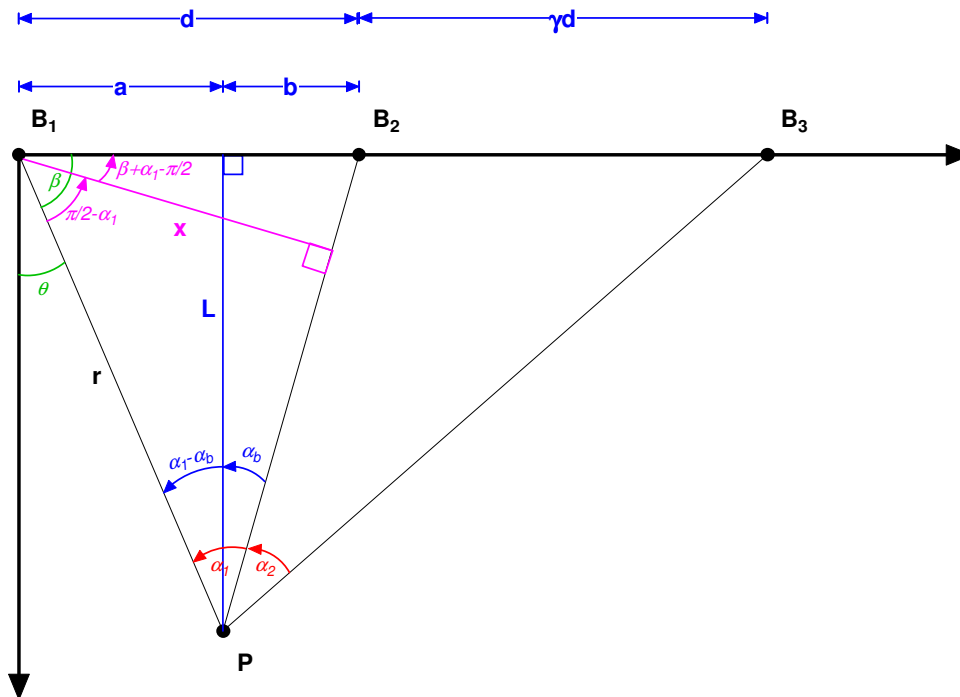


FIG. 2.3 – Schéma du système de triangulation

Pour mener à bien la triangulation, il nous faut déterminer les deux grandeurs que sont la distance r et l'angle β . Il faut noter que les seules données dont nous disposons sont :

- les angles α_1 et α_2 , mesurés à l'aide du faisceau laser;
- la distance d entre les balises B_1 et B_2 , connue par avance ;
- le rapport γ des distances $[B_1B_2]$ et $[B_2B_3]$, également prédéterminé.

2.2.2 Calcul de l'angle β

Considérons les balises B_1 , B_2 et B_3 comme présenté sur la Figure 2.3. Notons d , la distance entre les balises B_1 et B_2 et γd , la distance entre les balises B_2 et B_3 .

On a donc :

$$\tan \alpha_b = \frac{b}{L}$$

$$\tan \beta = \frac{L}{d - b}$$

D'autre part,

$$\tan(\alpha_1 - \alpha_b) = \frac{d - b}{L}$$

$$\frac{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_b}{1 + \tan \alpha_1 \alpha_b} = \frac{1}{\tan \beta}$$

d'où :

$$\tan \beta = \frac{1 + \tan \alpha_1 \alpha_b}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_b}$$

De même,

$$\begin{aligned} \tan(\alpha_b + \alpha_2) &= \frac{\gamma d + b}{L} \\ &= \frac{\gamma(d-b)}{L} + (\gamma+1)\frac{b}{L} \\ &= \frac{\gamma}{\tan \beta} + (\gamma+1)\tan \alpha_b \\ \frac{\tan \alpha_b + \tan \alpha_2}{1 - \tan \alpha_b \alpha_2} - 3 \tan \alpha_b &= \frac{\gamma}{\tan \beta} \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \tan \alpha_b + \tan \alpha_2 - (\gamma+1)\tan \alpha_b(1 - \tan \alpha_b \tan \alpha_2) &= \gamma \frac{1 - \tan \alpha_b \tan \alpha_2}{\tan \beta} \\ \tan \alpha_b + \tan \alpha_2 - (\gamma+1)\tan \alpha_b + (\gamma+1)(\tan \alpha_b)^2 \tan \alpha_2 &= \gamma \frac{1 - \tan \alpha_b \tan \alpha_2}{\tan \beta} \end{aligned}$$

Notons : $X = \tan \alpha_b$, il vient alors :

$$\begin{aligned} -\gamma X \tan \beta + \tan \beta \tan \alpha_2 + (\gamma+1)X^2 \tan \alpha_2 \tan \beta - \gamma + \gamma X \tan \alpha_2 &= 0 \\ (\gamma+1)X^2(\tan \beta \tan \alpha_2) + \gamma X(\tan \alpha_2 - \tan \beta) + (\tan \beta \tan \alpha_2 - \gamma) &= 0 \\ (\gamma+1)X^2 \left(\frac{1+X \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 - X} \tan \alpha_2 \right) + \gamma X \left(\tan \alpha_2 - \frac{1+X \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 - X} \right) + \left(\frac{1+X \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 - X} \tan \alpha_2 - \gamma \right) &= 0 \\ (\gamma+1)X^2(1 + X \tan \alpha_1) \tan \alpha_2 + \gamma X(\tan \alpha_2(\tan \alpha_1 - X) - (1 + X \tan \alpha_1)) + (1 + X \tan \alpha_1) \tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1 + \gamma X &= 0 \\ (\gamma+1)X^2 \tan \alpha_2 + (\gamma+1)X^3 \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 + \gamma X \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 - \gamma X^2 \tan \alpha_2 - \gamma X - \gamma X^2 \tan \alpha_1 + \tan \alpha_2 + X \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1 + \gamma X &= 0 \\ X^3((\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2) + X^2((\gamma+1)\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1) + X(\gamma \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 + \tan \alpha_1 \tan \alpha_2) + (\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X^3((\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2) + X((\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2) &= -X^2(\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_2) - (\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_2) \\ X(X^2 + 1)((\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2) &= -(X^2 + 1)(\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1) \end{aligned}$$

d'où :

$$\tan \alpha_b = \frac{\gamma \tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}{(\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}$$

or :

$$\begin{aligned} \tan(\pi - \beta - \alpha_1) &= \frac{b}{L} \\ \tan(\pi - (\beta + \alpha_1)) &= \frac{b}{L} \\ -\tan(\beta + \alpha_1) &= \frac{b}{L} \\ -\tan(\beta + \alpha_1) &= \frac{1}{\tan \alpha_b} \\ \tan(\beta + \alpha_1) &= \frac{(\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\gamma \tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \end{aligned}$$

Ainsi :

$$\boxed{\beta = \arctan \left(\frac{(\gamma+1)\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \gamma \tan \alpha_1} \right) - \alpha_1}$$

2.2.3 Calcul de la distance r

Il vient immédiatement :

$$\begin{aligned}\frac{x}{d} &= \cos(\beta + \alpha_1 + \frac{\pi}{2}) \\ x &= d \sin(\beta + \alpha_1)\end{aligned}$$

et,

$$\begin{aligned}\frac{x}{r} &= \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) \\ \frac{x}{r} &= \sin \alpha_1 \\ r &= \frac{x}{\sin \alpha_1}\end{aligned}$$

d'où :

$$r = \frac{\sin(\beta + \alpha_1)}{\sin \alpha_1} d$$

2.2.4 Calcul de la position de l'adversaire

A partir de la distance r et de l'angle β , il est extrêmement aisé de déterminer la position de l'adversaire en appliquant les formules suivantes :

$$\begin{aligned}x_P &= x_1 + r \cos \theta \\ y_P &= y_1 + r \sin \theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_P &= x_1 + r \sin \beta \\ y_P &= y_1 + r \cos \beta\end{aligned}$$

Chapitre 3

Implémentation matérielle et logicielle

Voyons maintenant comment cette théorie mathématique a été mise en oeuvre dans le cadre du Club de Robotique. Pour rester fidèle à l'implémentation qui a été réalisée en définitive, nous traiterons d'abord du rôle tenu par les balises fixes et s'articulant autour du PIC de la balise principale. Par la suite, nous détaillerons le fonctionnement de la balise adverse. Et finalement, nous présenterons la triangulation et l'utilisation qui en est faite sur le DSP de la carte de positionnement.

3.1 La partie "PIC"

Dans toute cette partie, nous tiendrons pour acquis le fait que la balise adverse est muni d'un laser qui tourne à une vitesse quasiment fixe, dont l'ordre de grandeur est connu et dont les variations sont négligeables sur un tour. Nous verrons comment ces conditions sont satisfaites dans la section suivante.

3.1.1 Les différentes configurations

Comme vu dans la Section 2.1, notre système dispose de 4 balises réceptrices et d'après la théorie de la Section 2.2 trois d'entre-elles suffisent pour déterminer la position de l'adversaire par triangulation. On sera donc amenés à rencontrer trois configurations de balises ayant été frappées par le laser :

Cas 123 Dans cette configuration, seules les balises B_1 , B_2 et B_3 ont été atteintes par le laser. Les données à utiliser sont la distance $d = [B_1B_2]$ et le rapport $\gamma = \frac{[B_2B_3]}{[B_1B_2]}$. Les informations mesurées par les balises fixes sont les angles $\alpha_1 = \widehat{B_1PB_2}$ et $\alpha_2 = \widehat{B_2PB_3}$. La balise servant d'origine au repère de triangulation est la balise B_1 .

Cas 124 Dans cette configuration, seules les balises B_1 , B_2 et B_4 ont été atteintes par le laser. Les données à utiliser sont la distance $d = [B_1B_2]$ et le rapport $\gamma = \frac{[B_2B_4]}{[B_1B_2]}$. Les informations mesurées par les balises fixes sont les angles $\alpha_1 = \widehat{B_1PB_2}$ et $\alpha_2 = \widehat{B_2PB_4}$. La balise servant d'origine au repère de triangulation est la balise B_1 .

Cas 134 Dans cette configuration, seules les balises B_1 , B_3 et B_4 ont été atteintes par le laser. Les données à utiliser sont la distance $d = [B_1B_3]$ et le rapport $\gamma = \frac{[B_3B_4]}{[B_1B_3]}$. Les informations mesurées par les balises fixes sont les angles $\alpha_1 = \widehat{B_1PB_3}$ et $\alpha_2 = \widehat{B_3PB_4}$. La balise servant d'origine au repère de triangulation est la balise B_1 .

Cas 234 Dans cette configuration, seules les balises B_2 , B_3 et B_4 ont été atteintes par le laser. Les données à utiliser sont la distance $d = [B_2B_3]$ et le rapport $\gamma = \frac{[B_3B_4]}{[B_2B_3]}$. Les informations mesurées par les balises fixes sont les angles $\alpha_1 = \widehat{B_2PB_3}$ et $\alpha_2 = \widehat{B_3PB_4}$. La balise servant d'origine au repère de triangulation est la balise B_2 .

Le cas dans lequel les quatre balises sont atteintes par le laser est sans doute le plus fréquent mais pour le calcul, nous le ramenons à un cas 124 en négligeant les informations de la balise 3. En effet, le programme est conçu de telle manière que l'on utilise au maximum les deux balises d'extrémité afin d'améliorer la précision. La priorité des configurations est donc la suivante : 124, 134, 123 puis 234.

3.1.2 La mesure des angles α_1 et α_2

La mesure des angles α_1 et α_2 se fait par la mesure du temps mis par le faisceau laser pour passer d'une balise à l'autre. On peut remarquer que compte tenu du sens de rotation du laser, c'est toujours la Balise 1 qui doit être atteinte en premier par le laser si elle n'est pas masquée.

Mesure des instants de passage du laser : Le PIC de la balise principale dispose d'un compteur qui s'incrémente continuellement pour mesurer le temps. Si on se place dans le cas 123, dès que la balise réceptrice B_1 sera frappée par le laser, elle enverra un signal à la balise principale qui stockera l'instant t_1 auquel la balise B_1 a été frappée. De même, elle enregistrera les instants t_2 , t_3 (et éventuellement t_4) auxquels les balises B_2 , B_3 (et éventuellement B_4) ont été frappées.

Au tour suivant, c'est à dire dès qu'une des balises sera de nouveau frappée, on va lancer le calcul de triangulation. Maintenant, si un nombre insuffisant de balises avaient été frappées, dès qu'une balise précédemment frappée aurait été atteinte de nouveau, l'ensemble de l'opération aurait été avorté, faute d'informations.

Cette étape de capture et de vérification des instants auxquels sont frappées les balises réceptrices est réalisée par le Module Capture intégré au Timer du PIC 16F877. Les routines correspondantes sont disponibles dans le fichier `CAPTURE.C`.

Mesure de la période T de rotation du laser : Une fois connus les instants auxquelles ont été frappées les balises, il faut encore connaître la période de rotation du laser pour déterminer les angles α_1 et α_2 . En effet, comme la période de rotation du laser est susceptible de varier légèrement, il est préférable pour améliorer la précision du système de la mesurer lors de l'acquisition des instants de passage. Ceci est relativement facile à réaliser puisqu'il suffit de mesurer le temps qui s'est écoulé entre deux passages du laser devant une même balise. Là encore pour accroître la précision et la fiabilité du système on calcule la période en faisant une moyenne sur l'ensemble des balises qui ont été frappées lors du dernier tour. Cette routine de calcul de la période se trouve dans le fichier `BALISE_FIXE.C`.

3.1.3 L'envoi des données

Les données qui sont envoyées par la balise principale ne sont pas exactement les angles α_1 et α_2 . Il s'agit en fait des rapports du temps écoulé entre deux balises sur la période. Ce résultat est ensuite multiplié par 65536 pour avoir une dynamique correcte sur 16 bits.

Ainsi, dans une configuration 123, les données envoyée par HF à la carte de positionnement du robot sont les suivantes :

- Une constante `RAW_TRIANG_DATA` indiquant la nature des données envoyées (8 bits).
- La différence 1, proportionnelle à l'angle α_1 et telle que $diff_1 = 65536 \times (t_2 - t_1)/T$ (16 bits).
- La différence 2, proportionnelle à l'angle α_2 et telle que $diff_2 = 65536 \times (t_3 - t_2)/T$ (16 bits).
- Un chiffre indiquant la configuration des balises (8 bits).

3.1.4 Carte électronique

Les Figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement l'électronique de la balise principale avec sa carte d'extension et des balises réceptrices. Il faut remarquer que les balises sont chaînées, c'est à dire que le câble va de la balise 1 à la balise 2 puis de la balise 2 à la balise principale et de même pour les balises 3 et 4.

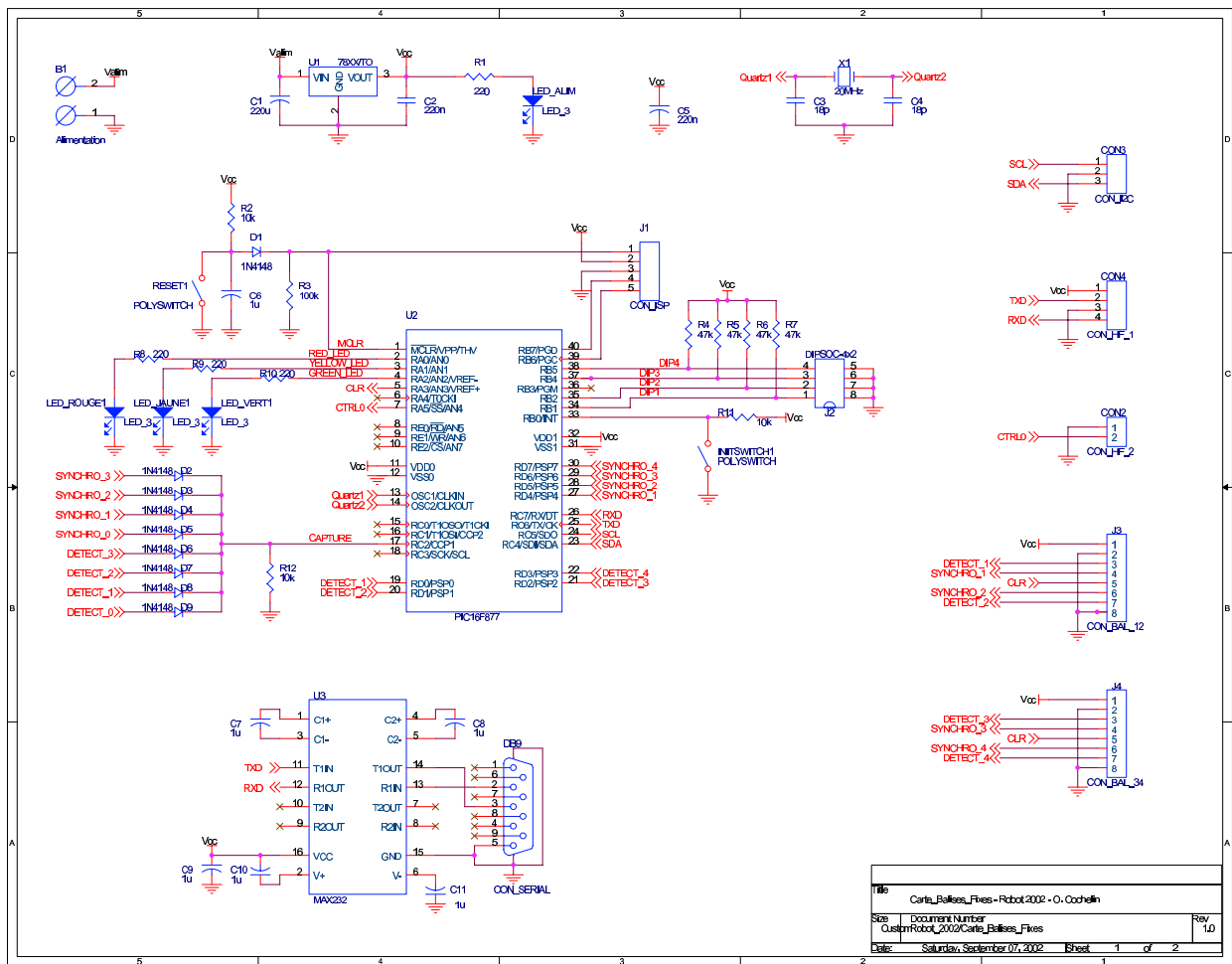


FIG. 3.1 – Carte électronique de la balise principale

Ces deux cartes ne font appel qu'à des bases d'électronique et n'appellent pas de commentaires particuliers. Il faut cependant noter que ce système de balises était avant tout expérimental et l'est resté. C'est pourquoi, il a subi de nombreux changements qui pour la plupart ont été répercutés sur les schématiques néanmoins, la documentation n'est certainement pas complète, exhaustive et parfaitement juste. En cas de doute, le plus sûr est de se référer aux balises elles-mêmes.

Partie PIC : On peut également remarquer que les signaux provenant des balises réceptrices sont connectés sur le port D du PIC ce qui permet en un seul cycle de récupérer l'ensemble de ces signaux. De plus, un OU logique de l'ensemble de ces signaux est réalisé à l'aide de diodes et rentre en interruption sur la pin CCP1 déclenchant ainsi la Capture du Timer 1.

Les connecteurs *CON_HF_1* et *CON_HF_2* permettent d'une part d'envoyer et de recevoir des données du module HF et d'autre part de contrôler le module (Émission / Réception).

Partie Réception : Du côté des balises réceptrices, on peut remarquer qu'à chaque fois que le laser est détecté, ce signal est mémorisé par une bascule D 74AC74. Cette bascule est remise à zéro par le PIC une fois qu'il a lu le port D. Ce système permet d'être certain de ne pas manquer d'impulsions.

Pour chaque balise réceptrice, les deux photodiodes visible (active et passive) sont polarisées par une résistance de 47 kΩ. Les signaux issus de ces deux photodiodes servent d'entrées au comparateur. Pour avoir

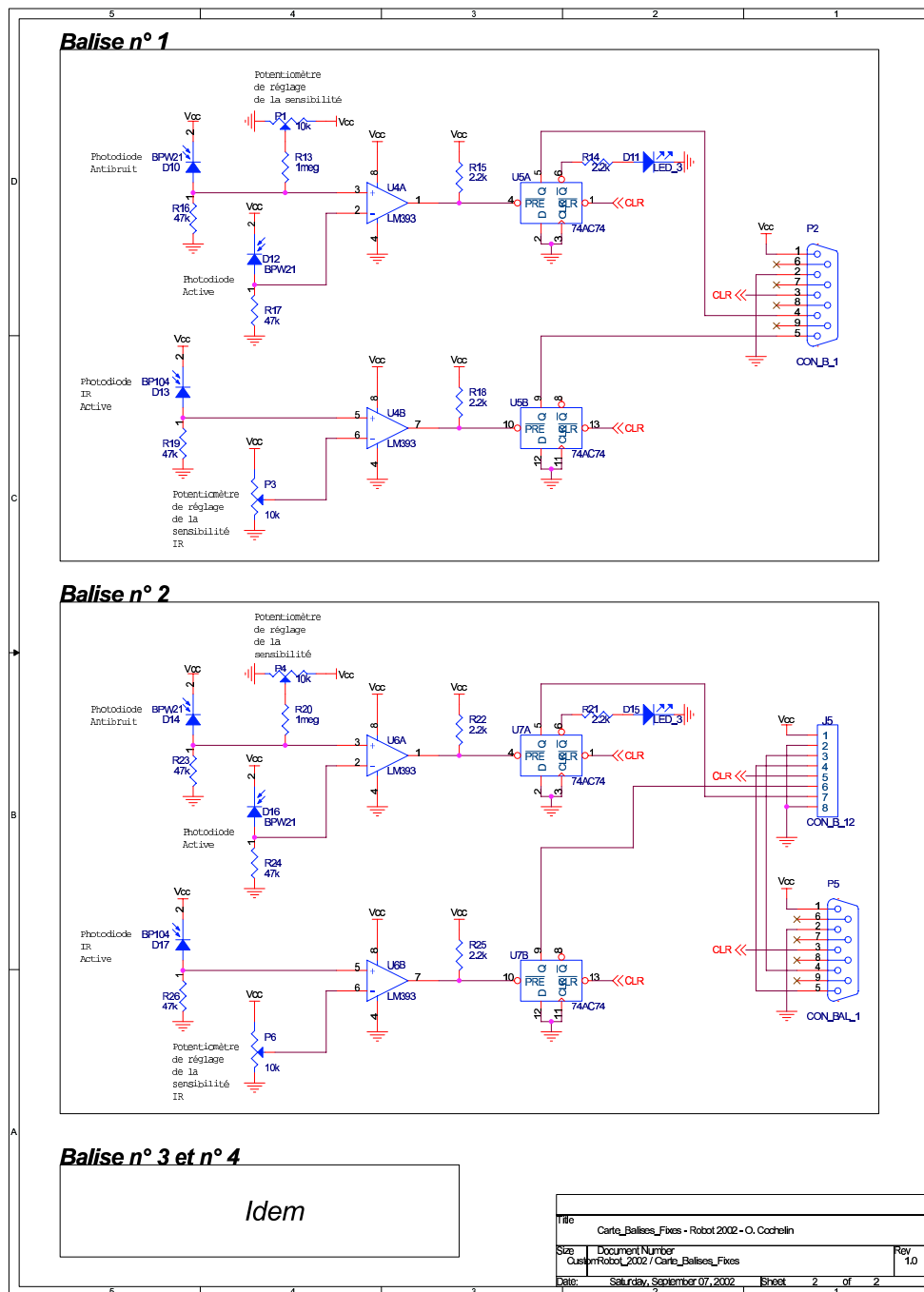


FIG. 3.2 – Carte électronique d'une balise réceptrice

une commutation franche et une certaine immunité au bruit, on ajoute un seuil au signal provenant de la photodiode passive. Ainsi, le comparateur ne commutera que lorsque la tension fournie par la photodiode active est supérieure à celle de la photodiode passive augmentée du seuil réglé par le potentiomètre de 10kΩ. le seuil est réglé de telle sorte que le comparateur ne commute pas intempestivement à cause du bruit, de l'ordre de 10 à 20 mV.

3.2 La balise adverse

Le seul rôle de la balise adverse est de faire tourner le laser à vitesse constante et connue.

3.2.1 Le moteur de lecteur CD et son driver

Pour cela, elle est équipée d'un moteur de lecteur CD piloté par son driver BA6849. Ce driver dispose de 3 capteurs à effet Hall (Entrées H_1^+ , H_1^- , H_2^+ , H_2^- , H_3^+ et H_3^-) qui lui permettent de connaître la position du moteur. A partir de ces informations, il élabore la commande des 3 pôles du moteur (Sorties A_1 , A_2 et A_3). Le moteur est alimenté en 7.2 V via les pins V_{M1} et V_{M2} et le driver est alimenté en 5 V par la pin V_{CC} .

Le moteur et son driver proviennent d'un lecteur CD 40x de marque BTC. L'intérêt d'un moteur de lecteur CD - par rapport à un moteur courant continu conventionnel - est son très faible encombrement. En revanche, ils ne sont pas forcément évidents à trouver. Celui-ci avait pour autre avantage d'avoir son moteur connecté par une nappe à une petite carte d'interface qui elle-même était indépendante du reste de l'électronique du lecteur CD. Cette carte de dimensions réduites mais encore trop importantes supportait le driver du moteur et la sortie audio du lecteur CD. La partie concernant la sortie audio a subi une ablation à la scie. De plus, il a été possible de trouver la datasheet du driver (ce qui est assez extraordinaire) et en plus en anglais (il n'est pas rare qu'on ne les trouve qu'en taïwanais pour ce type de matériel).

Vu de l'extérieur, cet ensemble moteur + driver se commande de la manière suivante :

- L'entrée Short Break SB permet d'arrêter rapidement le moteur lorsqu'il est lancé. Cette pin n'est pas utilisée dans notre cas et est tirée à la masse.
- L'entrée Power Save PS doit être tiré à V_{CC} pour que le circuit soit actif.
- La commande de la vitesse de rotation s'effectue par l'intermédiaire des 2 pins E_C et E_{CR} . Sur la pin E_{CR} , une tension de référence fixe doit être appliquée : 2.5 V dans notre cas. Ensuite, si $E_C < E_{CR}$ le moteur tourne dans un sens et dans l'autre si $E_C > E_{CR}$. Plus l'écart entre E_C et E_{CR} grandit et plus le moteur tourne vite.

3.2.2 L'asservissement en vitesse

Pour que la vitesse de rotation du laser soit la plus stable possible et conforme à la consigne, nous avons dû réaliser un asservissement en vitesse du moteur. Cet asservissement est purement analogique et est présenté dans la FIGURE 3.3.

Cet asservissement est basé sur un régulateur PI constitué par le montage centré autour de l'AO $U4A$. Ce montage, reçoit en entrée l'erreur de vitesse et fournit en sortie une tension proportionnelle à l'erreur via $R21$ et à l'intégrale de l'erreur via $C9$. Cette tension est ensuite envoyée sur la carte supportant le driver via le connecteur $J3$.

Le montage centré autour de $U4B$ fournit quant à lui une tension proportionnelle à l'erreur de vitesse. Le potentiomètre $P1$ permet de régler la vitesse de rotation que l'on compare à la vitesse réelle du moteur.

Pour mesurer la vitesse du moteur, on récupère les informations provenant des capteurs à effet Hall grâce au connecteur $J4$. Ces tensions rentrent sur des comparateurs à collecteur ouvert LM393 qui fournissent chacun un signal carré ayant une fréquence 3 fois plus élevée que la vitesse de rotation du moteur. Ces trois sorties sont multiplexées pour délivrer en sortie de $U3B$ un signal carré de fréquence égale à neuf fois la vitesse de rotation du moteur. On aurait pu se contenter de n'utiliser qu'un seul capteur à effet Hall mais dans ce cas la fréquence n'aurait pas été triplée et les oscillations auraient été plus importantes.

La sortie de $U3B$ rentre sur un monostable 74HC123. A chaque front montant présenté sur l'entrée \overline{CLR} , le monostable délivre une impulsion de durée fixe et inférieure à la période du signal en entrée. Ce signal dont la durée à l'état haut est constante et dont le rapport cyclique augmente avec la vitesse de rotation du moteur est filtré passe-bas par le couple ($R18, C8$). Ce filtrage passe-bas permet d'obtenir une tension analogique proportionnelle au rapport cyclique du signal en entrée et donc proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Le produit $R18.C8$ doit être suffisamment important pour limiter les oscillations en sortie et pas trop

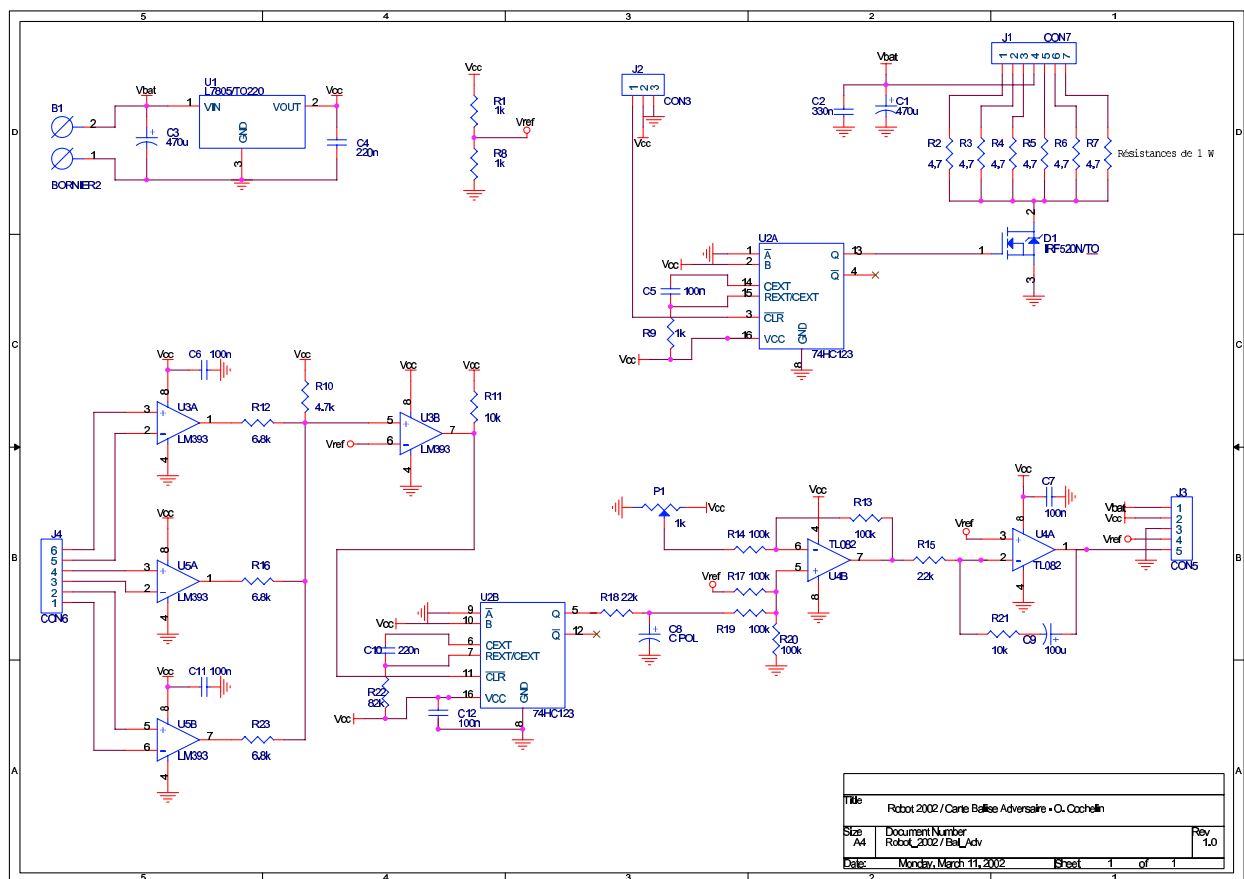


FIG. 3.3 – Carte électronique de la balise adversaire

élevé non plus pour que le système soit assez rapide. Cette tension analogique permet donc ensuite d'attaquer le régulateur PI.

3.2.3 Le top infrarouge

Le système d'éclairage infrarouge a été développé mais n'a jamais été mis en oeuvre. Celui-ci doit à chaque tour délivrer une impulsion de $100 \mu s$. Pour détecter que le laser a fait un tour, nous avons placé sur le disque supportant le laser un aimant. A chaque tour, cet aimant passe devant un capteur à effet Hall - récupéré sur un lecteur de disquette celui-ci - branché sur le connecteur J2.

Là-encore ce capteur déclenche un monostable qui délivre une impulsion de durée proportionnelle au produit $R9.C5$ et d'environ $100 \mu s$. Cette impulsion rend passant le transistor de puissance D1 et alimente ainsi les LEDs infrarouge à travers des résistances de 4.7Ω et le connecteur J1.

Ce système est calibré pour que les LEDs infrarouge LD242 réparties tout autour de la balise fournisse le maximum de leur puissance ($\approx 1 A$) pendant un temps très bref.

3.3 La partie "DSP"

A l'origine, la balise principale devait calculer la position du robot adverse (x,y) et ensuite la transmettre vers notre robot où elle serait directement utilisable par la carte principale. Malheureusement, il s'est avéré impossible de réaliser le calcul de triangulation - qui doit être effectué en virgule flottante - sur le PIC. En effet, les routines trigonométriques (\cos , \sin ...) et plus généralement toutes les opérations en virgule flottante

sont extrêmement gourmandes tant en RAM qu'en Flash pour s'exécuter sur un PIC. C'est pour ces raisons que nous avons choisi de ne transmettre que des données pré-traitées qui sont utilisées par le DSP de la carte d'asservissement et de positionnement pour réaliser la triangulation. Nous verrons par la suite que en dépit de sa complexité, ce système présente d'autres avantages au niveau de l'exploitation de ces informations.

3.3.1 Réception des données et triangulation

Les données émises par la balise principale sont reçues par l'UART du PIC de la carte de positionnement. Une fois ces données reçues correctement, il les transmet au DSP via le Parallèle Slave Port. Ce dispositif a été difficile à fiabiliser puisque le PIC est soumis à plusieurs flux de données qu'il ne contrôle pas (Com HF, I2C, PSP). Il a donc fallu mettre en place un mécanisme d'interblocage qui permette de ne perdre aucune donnée sans bloquer le système.

Avec les données pré-traitées, le DSP n'a plus qu'à réaliser le calcul de triangulation. Celui-ci se trouve dans le fichier **TRIANGULATION.C**. Une fois calculée, la position de l'adversaire est retransmise du DSP vers le PIC qui pourra la transmettre en I2C à la carte principale si celle-ci la demande.

3.3.2 Exploitation de la position de l'adversaire

En fait, la position de l'adversaire en elle-même n'a qu'un intérêt limité. Ce qui réellement intéressant, c'est de savoir si l'adversaire est proche de nous ou non, s'il se dirige vers nous ou non, s'il est proche d'un panier ou non ou encore s'il se dirige vers un panier ou non. Nous avons donc profité du fait que le calcul de la position de l'adversaire se fasse dans le DSP pour ajouter ces fonctionnalités.

Ainsi, en plus de la position de l'adversaire, le DSP transmet au PIC et donc à la carte principale un octet contenant des flags indiquant :

- Si l'adversaire est proche de nous (Distance < 0.6 m)
- Si l'adversaire se dirige vers nous (Distance < 1.2 m et se déplaçant dans notre direction).
- Si l'adversaire est proche d'un panier (Distance < 0.5 m).
- Si l'adversaire se dirige vers un panier (Distance < 1 m et se déplaçant vers le panier).
- Le panier qui est concerné par les 2 flags ci-dessus (Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ouest ou Nord-Ouest).

Ces flags qui donnent déjà des informations intéressantes sur l'adversaire peuvent être directement utilisés par la carte principale pour élaborer sa stratégie tout en la soulageant des calculs trigonométriques nécessaires à leur élaboration. Ils ont ainsi été utilisés pour éviter l'adversaire, pour savoir quels paniers il avait visité et par conséquent dans lesquels il pouvait avoir mis des balles que l'on pouvait piller. Bien que fonctionnelle, cette dernière technique n'a jamais été utilisée en match faute de conditions réunies.

Chapitre 4

Résultats et Perspectives

Après avoir vu comment ce système de balises laser fonctionne et comment il a été utilisé, examinons les résultats qu'il permet d'obtenir et les ouvertures qu'il procure pour l'avenir.

4.1 Résultats

Il faut bien reconnaître que ce système offre une précision de localisation de l'adversaire qui est assez extraordinaire. Lors des premiers essais, nous en avons été les premiers surpris. On pourrait penser que d'un tour du laser à l'autre la position de l'adversaire oscille. Eh bien, il n'en est rien. La position indiquée ne varie que de quelques millimètres.

La position "sautait" légèrement lorsqu'une des balises venait à être masquée. En effet, si pour connaître la position on utilise les balises B_1 , B_2 et B_4 et que brusquement la balise B_1 vient à être masquée, on va maintenant utiliser les balises B_2 , B_3 et B_4 . Lors de cette transition, la position de l'adversaire "saute" légèrement (quelques centimètres dans le pire des cas) alors que l'adversaire est lui parfaitement immobile. Ce saut est dû à l'imprécision de la mesure des distances entre les balises. C'est pourquoi nous avons réalisé un petit soft qui permet de calibrer ces distances. Celui-ci est intégré à l'interface de debug de la triangulation laser appelée **Debug_PC**. Il suffit pour cela d'indiquer au programme (dans la zone *Calibrage*) où on place le robot adverse - généralement en (0,0) - et quelles sont les positions actuelles des balises - spécifiées dans le fichier **TRIANGULATION.H** du programme de debug - puis de lancer le programme (Bouton *Start Cal*) qui moyenne les données reçues de la balise principale. A la fin de l'acquisition (Bouton *Stop Cal*), le programme calcule les nouvelles positions des balises qu'il affiche dans les boites correspondantes.

Voyons maintenant quels sont les avantages et les inconvénients de ce système.

Avantages :

1. Le système est extrêmement précis une fois calibré et assez fiable.
2. Il s'est avéré peu sensible aux éclairages puissants.
3. Il a le mérite d'exister et donc de pouvoir être réutilisé tel quel.

Inconvénients :

1. Le système n'est absolument pas codé (faisceau laser brut). L'utilisation par une autre équipe d'un système identique ou en mesure de le perturber le rendra inutilisable.
2. Du fait de sa nature optique, il est sensible à l'horizontalité du faisceau laser et à l'alignement de la frange avec les photodiodes. Ceci rend le système inutilisable sur un terrain avec du relief ou pour un robot avec lequel on ne pourrait pas placer le laser en face des photodiodes.
3. Il comporte beaucoup de balises qui doivent être reliées entre elle par un câble. Par conséquent, il faut un temps relativement long pour placer l'ensemble du système ce qui peut être un handicap en particulier lors des phases finales où le timing est très serré.

4. Il est actuellement encore relativement fragile car à l'état de prototype.

4.2 Perspectives

Après avoir étudié ce système laser, voici quelques propositions pour l'amélioration de ce système d'une part et d'autres voies à explorer en matière de balises.

4.2.1 Améliorations possibles du système

Orientation de l'adversaire Une des premières idées qui peut être développée, c'est la mise en oeuvre du top infrarouge. Il manque à priori peu de choses pour le rendre fonctionnel. Toutefois, nous avons vu que l'intérêt de l'information sur l'orientation de l'adversaire était très limité. De plus, l'orientation qui pourrait être fournie par ce système ne serait pas vraiment l'orientation d'un robot adverse mais l'orientation de la balise sur le robot adverse qui dépend de l'orientation du support réalisé par l'adversaire. Il faudrait dans ce cas prévoir un dispositif de correction de cette erreur permanente.

Nous avons en plus montré qu'il était possible à l'aide des positions successives de l'adversaire de savoir dans quelle direction il allait. Bien sûr, si le robot tourne sur place il faudra attendre qu'il se déplace pour connaître sa nouvelle orientation. Mais n'est-ce-pas suffisant ?

Simplification et fiabilisation du système Maintenant que sa fonctionnalité est démontrée, le système - ou du moins certaines parties de celui-ci - pourrait-être reconstruit en apportant les simplifications nécessaires et en corrigeant les erreurs. Une telle reconstruction permettrait également de rendre le système plus robuste mécaniquement.

4.2.2 Pistes de recherche

Il existe de nombreuses pistes de recherche concernant le positionnement de robots avec des balises mais toutes ne sont pas viables. On se propose ici d'examiner plus précisément deux techniques, l'une qui a été envisagée cette année à base d'infrarouge et l'autre basée sur des ultrasons qui ont aussi été expérimentés cette année.

La voie infrarouge :

Le système de repérage qui avait été envisagé en début d'année avant la triangulation laser était basée sur des infrarouges. On devait placer sur le robot adverse un phare infrarouge omnidirectionnel qui émettrait en permanence un code permettant de l'identifier. Ce signal infrarouge serait reçu par deux balises situées dans les coins de l'aire de jeu. Ces balises fixes avaient pour caractéristiques de s'orienter en permanence vers le phare infrarouge et ce en comparant le signal issu de 3 photodiodes ayant des orientations différentes. Si la photodiode de droite reçoit plus que celle du centre alors tourner le servomoteur vers la droite et de même pour la gauche.

Ensuite, à l'aide des angles formés par les deux servomoteurs, on pouvait déterminer la position du robot. Toutefois, le système de comparaison des signaux infrarouges s'est révélé très sensible au bruit lumineux, rendant le système totalement inexploitable. De même, les différentes orientations des photodiodes apportaient des contraintes mécaniques difficiles à satisfaire. Il me semble que cette technique est à abandonner, du moins dans cette optique.

La voie ultrasons :

L'idée de cette technique est d'avoir deux balises fixes qui émettent un signal. En mesurant le déphasage entre ces deux signaux ou le temps de vol de chaque signal, on est en mesure de déterminer la position de l'adversaire.

Toutefois, des essais ont montré que les ultrasons sont extrêmement bruité. Si un tel système est retenu, il faut absolument que le signal émis par les 2 balises fixes soit connu et retrouvé au niveau du robot adverse à l'aide de corrélations temporelles.

Dans tous les cas, les deux balises ne peuvent pas émettre simultanément, au risque de se brouiller mutuellement. Si on choisit la mesure du déphasage entre les deux signaux, il faut que les deux balises émettent avec un déphasage connu. Elles doivent alors être synchronisées entre elles par un câble ou une liaison HF, IR ou Visible. Si on choisit la mesure des temps de vol, il faut une liaison électromagnétique pour que la balise indique à quel moment elle émet.

On peut également considérer le robot comme un émetteur et les balises fixes comme des récepteurs mais si il y a plusieurs robots à localiser, il faudra synchroniser les robots entre eux. Cette technique ultrasons peut également s'envisager avec du son mais avec des risques liés au bruit ambiant encore plus importants.

Un stage I2 sur un sujet de positionnement très proche - également à base d'ultrasons - est actuellement en cours. Il sera sans doute intéressant d'en connaître les conclusions (début Octobre) pour juger de la viabilité du système et des suites à lui donner.