

Conception électronique d'un robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis

Ing. L. WATTEYNE
Ir N. VETCOUR
GRAMME – Liège

Cet article décrit l'électronique embarquée d'un prototype de robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis. La stratégie retenue consiste en l'apprentissage et la reproduction d'un parcours stocké en mémoire. Le robot est équipé de capteurs de lignes blanches, de capteurs d'obstacles et d'un capteur odométrique.

Mots-clés : électronique, microcontrôleur, robot, balle, tennis, servomoteur, PWM, joystick, LCD, parcours.

This article describes the embedded electronics of a prototype robot aimed at picking up balls and at sweeping tennis courts. The strategy consists in learning and reproducing a route stored in memory. The robot is equipped with white lines sensors, obstacles sensors, and an odometric sensor.

Keywords : electronic, microcontroller, robot, ball, tennis, servomotor, PWM, joystick, LCD, path.

1. Introduction

Le projet concerne tous les aspects d'un robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis. Il s'est inscrit dans le cadre d'une collaboration avec les instituts HEC-ULg et ESA Saint-Luc qui ont pris en charge respectivement les aspects commerciaux ^[1] dans le cadre du concours «1, 2, 3 GO» et le design général ^[2].

Un budget de 3000 € qui a été alloué par la communauté française de Belgique a couvert l'entièreté des frais matériels liés au développement du produit : Achats de composants électroniques et mécaniques ^[3], achats de matériaux, fabrication de pièces etc.

2. Concept

Trois fonctionnalités ont été retenues pour le projet ^[4] :

- **Fetch'Ball** : un appareil manuel permet un ramassage rapide et aisé de nombreuses balles de tennis. Nous ciblerons les clubs et les professeurs de tennis.
- **Fetch'Broom** : un robot-machine qui balaye les terrains de tennis de façon automatique et régulière. Cela soulagera les joueurs de la tâche obligatoire et souvent pénible du balayage du terrain après chaque match/heure/entraînement. Les cibles sont les clubs de tennis (en particulier les clubs fortunés) et les terrains privés (personnes fortunées et secteur du tourisme).
- **Fetch'B'All** : un robot-machine qui ramasse les balles et balaye les terrains de façon automatique. Notre produit global «Fetch'B'All » se compose en fait de notre panier ramasse-balles manuel «Fetch'Ball» et de notre machine balayeuse de terrain «Fetch'Broom» (l'un se fixant sur l'autre). Nos cibles sont également les clubs de tennis et les terrains privés.

Cet article va exposer l'électronique embarquée du prototype Fetch'Broom.

¹ Brüll C., Business Plan - Fetch'Ball, Liège, 2006

² Jonathan Buret, travaux pratiques

³ MOESEN F., Conception mécanique d'un robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis, Liège, 2007

⁴ Brüll C., Business Plan - Fetch'Ball, Liège, 2006

3. Cahier des charges

La stratégie retenue se déroule en deux étapes.

- La première étape est l'apprentissage du parcours. La machine est possible d'enregistrer plusieurs parcours de la sorte (ex : un terrain entier et un demi terrain). Cette opération n'est à effectuer que la première fois que la machine est utilisée sur un terrain de tennis donné. Cela permet de l'é commandée par un joystick. Elle enregistre le parcours effectué. Il est talonner, d'adapter son parcours aux spécificités du terrain (dégagements, obstacles, etc.), de choisir son point de départ au plus pratique (local de rangement).
- La seconde étape est l'usage normal : placer la machine à son point de départ, choisir le programme adéquat, et appuyer sur «start».

La machine doit ainsi pouvoir mémoriser un trajet de 560 m, pour couvrir la surface normalisée de 35m x 16m d'un terrain de tennis. Pour effectuer son œuvre dans un délai raisonnable, nous avons retenu une vitesse de 2 m/s. Puisque la machine tire un filet, elle ne peut faire marche arrière.

Une telle machine se déplaçant à une telle vitesse sera forcément puissante et donc présentera quelques dangers : pour la sécurité, elle sera donc équipée de capteurs d'obstacles, de boutons d'arrêt d'urgence et d'un avertisseur sonore.

Sur le plan mécanique, il était initialement prévu de rendre les deux roues principales motrices, et de diriger le robot par «différentiel» (comme les véhicules à chenilles, les fauteuils roulants, etc.). Les essais effectués ont finalement conduit à utiliser une roue directrice et motrice (comme les transpalettes électriques, les autoscooters, etc.).

4. Prototypes

Un premier prototype (fig. 1) a principalement permis de valider le concept général et de fixer un cahier des charges techniques.

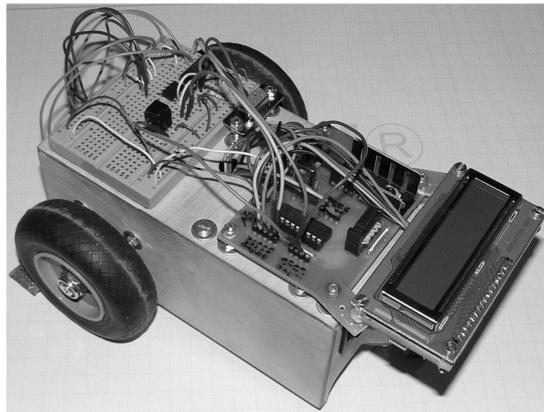


Figure 1 : Prototype initial

Etant donné que le développement de la partie électronique et celui de la partie mécanique ont eu lieu en parallèle, il n'était pas possible de disposer de la partie mécanique «finale» pour effectuer des essais. Un «pré-prototype» (fig. 2) a donc été réalisé rapidement et à peu de frais ; il a permis de développer et de tester la partie électronique.

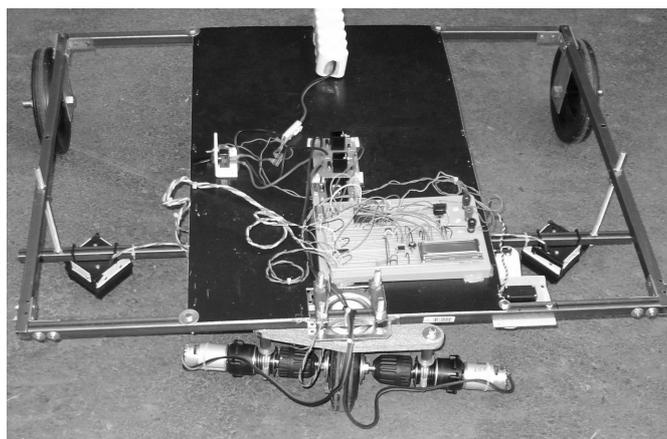


Figure 2 : Deuxième prototype

Son aboutissement mécanique a débouché sur le troisième prototype (Fetch'Broom proprement dit) ^[5] ; toutes les pièces ont été fabriquées, et l'électronique y a été transférée pour tester en «grandeur réelle» le ramasseur de balles «Fetch'Ball» ainsi que la carrosserie de «Fetch'Broom» ^[6] (fig. 3).

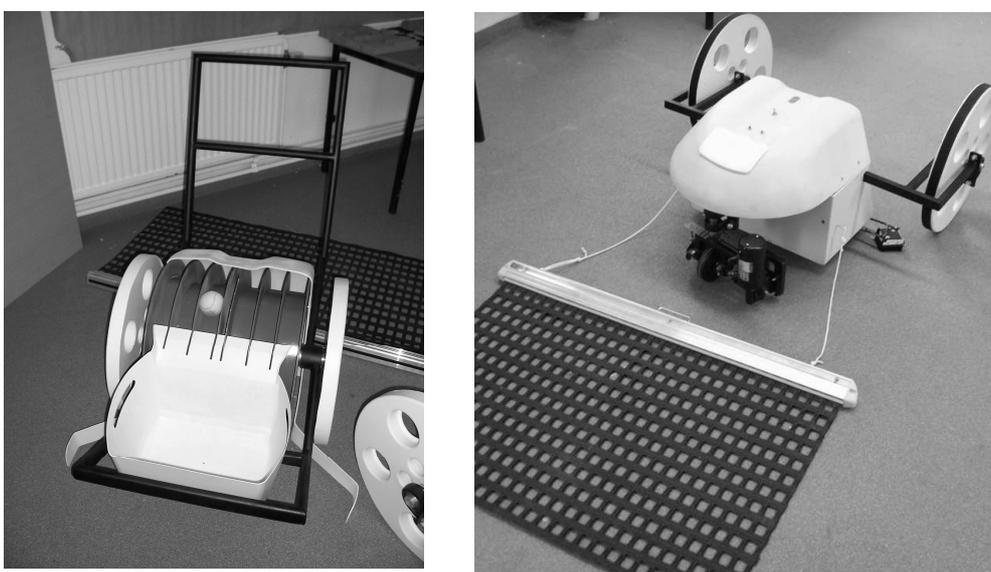


Figure 3 : Prototypes Fetch'Ball et Fetch'Broom

⁵ MOESEN F., Conception mécanique d'un robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis, Liège, 2007

⁶ Jonathan Buret, travaux pratiques

5. Electronique

5.1 Synoptique

L'électronique du robot a été subdivisée en différents éléments (fig. 4).

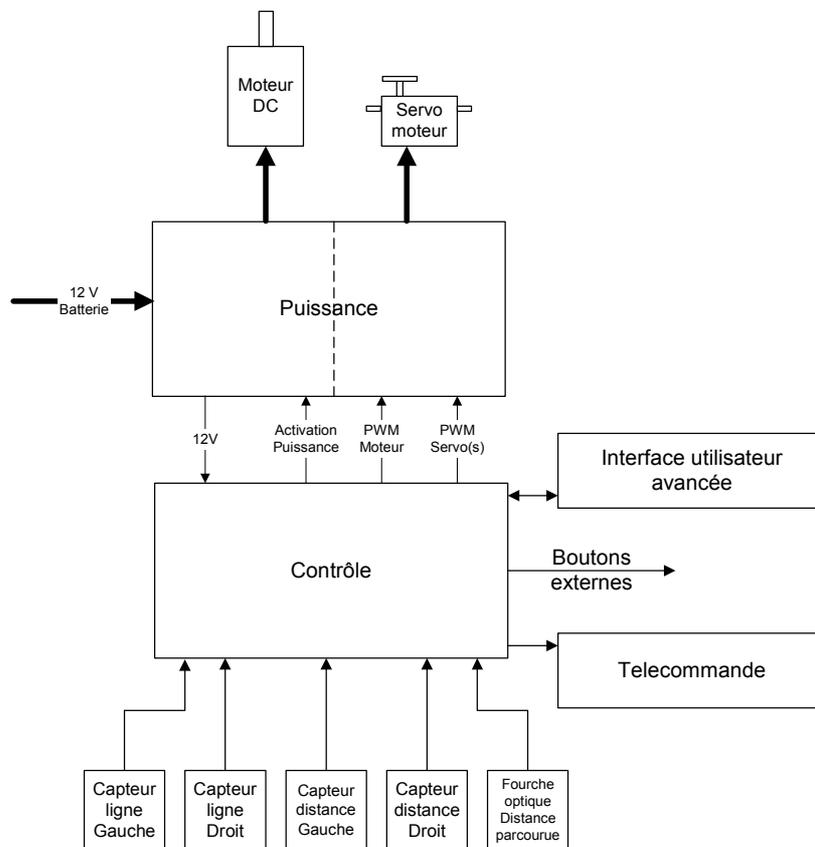


Figure 4 : Synoptique

5.2 Contrôle

Le «centre nerveux» est constitué de la carte de contrôle, qui est principalement composée d'un microcontrôleur et de ses accessoires (quartz, régulateur 5V).

Le microcontrôleur retenu est un PIC16F877A, qui fait partie de la gamme «mid-range» du fabricant Microchip. Ses trente-trois entrées-sorties sont pratiquement toutes utilisées, et sa mémoire programme de 8192 mots est occupée à 70% par le logiciel. Il possède 368 octets de mémoire RAM et 256 octets de mémoire ROM (cette dernière est utilisée pour enregistrer quelques réglages : les seuils de détection des lignes blanches, les distances de détection d'obstacles, etc.).

Il est équipé de modules internes très intéressants pour notre application : un convertisseur analogique-numérique à 8 entrées (ce qui nous sera utile pour les capteurs de lignes, de distance, pour le joystick, pour surveiller la tension de la batterie, etc.). Deux modules CCP (Compare Capture and PWM) qui peuvent chacun être configurés pour générer un signal PWM (signal dont on va moduler la largeur d'impulsion) de façon hardware et donc en utilisant peu de ressources logicielles.

Le parcours est enregistré dans une mémoire externe au microcontrôleur EEPROM I2C 24C256, du fabricant Microchip également. Elle a une capacité de 256 Kbits soit 32768 octets. Etant donné que la direction et la vitesse sont enregistrées chacune sur un octet tous les quarts de tour d'une roue de 125 mm de diamètre, cette capacité permet d'enregistrer un parcours total long de $\frac{32768}{2} \times \frac{\pi \times 0,125}{4} = 1608m$ sans recalage.

5.3 Interface utilisateur

L'«interface utilisateur avancée» est constituée d'un écran LCD de 2 lignes de 16 caractères et de 4 boutons poussoirs «up» «down» «left» «right» pour naviguer dans un menu permettant de choisir le mode de fonctionnement de la machine, de régler différents paramètres et d'effectuer quelques tests pour la maintenance. Ces éléments sont déportés sur un circuit imprimé afin de pouvoir les monter «en façade» à un endroit accessible et ergonomique du robot.

5.4 Propulsion

Les éléments de puissance ont été séparés de la carte de contrôle.

La variation de vitesse s'effectue par modulation de largeur d'impulsion (PWM). C'est le microcontrôleur, sur la carte de contrôle, qui génère le signal. Un circuit sert d'interface de puissance entre la carte de contrôle et le moteur. Il est principalement constitué d'un MOSFET de puissance et de son driver.

Il dispose également d'un système permettant de désactiver toute la partie puissance du robot par sécurité et pour éviter de consommer inutilement (lors d'un arrêt d'urgence, lors de la navigation dans le menu, lors de l'initialisation du microprocesseur ; en règle générale, la partie puissance n'est activée que lorsque la machine doit se déplacer).

5.5 Direction

Un servomoteur de type «modélisme» assure l'orientation de la roue motrice et directrice. Ce type de servomoteur est asservi en position sur une course de 180°, et commandé par modulation de largeur d'impulsion. Une impulsion de 1 ms correspond à une extrémité de la course, 1,5 ms au milieu, 2 ms à l'autre extrémité. Cette impulsion doit être répétée environ toutes les 20 ms. Ce signal est généré par le microcontrôleur.

Ces servomoteurs, qui étaient initialement destinés aux modélistes, ont rencontré un vif succès dans le monde de la petite robotique expérimentale (concours etc.). C'est la raison pour laquelle un fabricant réputé de matériel électronique pour le modélisme (Hitec) , a décidé de développer une gamme de servomoteurs particulièrement adaptés à la robotique.

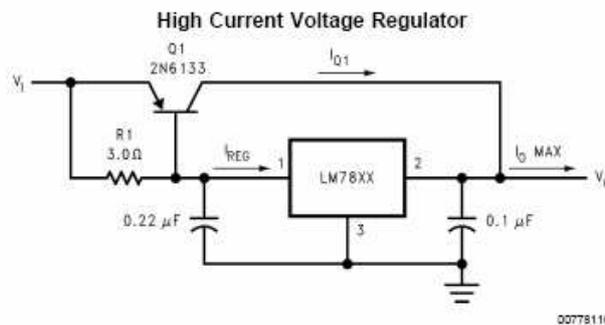
Le modèle choisi, le HSR5990TG a été développé spécialement pour les applications robotiques exigeant des couples élevés et une robustesse à toute épreuve. Il possède un couple de blocage de 30 kg.cm et un couple de maintien de 39 kg.cm. Il contient un réducteur constitué d'engrenages en matériaux composites et en titane. Les essais sur le troisième prototype permettront de déterminer si le couple est suffisant. Dans le cas contraire, il est envisagé d'en monter deux en parallèle pour doubler le couple.

La partie puissance concernant la direction consiste à pourvoir aux besoins énergétiques de un ou deux servos, à partir de la batterie au Plomb de 12V.

La notice du fabricant renseigne qu'ils doivent être alimentés par une tension comprise entre 6 V et 7,4 V, que sous 7,4 V ils consomment un courant de 10 mA au repos, de 380 mA en mouvement libre, et de 5,2 A au couple de blocage.

Pour alimenter ces servomoteurs, différentes possibilités ont été envisagées.

- Un régulateur linéaire classique (7806 ou bien LM317) assisté d'un transistor de puissance, selon un schéma (fig. 5) souvent renseigné dans les documents techniques des régulateurs. Certains schémas incluent une protection contre les courts-circuits mais pas contre la surchauffe.



$$\beta(Q1) \geq \frac{I_O \text{ Max}}{I_{REG} \text{ Max}}$$

$$R1 = \frac{0.9}{I_{REG}} - \frac{\beta(Q1) V_{BE}(Q1)}{I_{REG} \text{ Max} (\beta + 1) - I_O \text{ Max}}$$

Figure 5 : Schéma National Semiconductor

- Un régulateur linéaire de forte puissance. Ces composants ne sont pas très courants, on leur préfère souvent la solution précédente pour des courants légèrement plus élevés que ceux admissibles pour des régulateurs classiques, ou la dernière solution envisagée pour des courants moyens plus élevés. Le LM338 est protégé contre les courts-circuits et la surchauffe, et est très facile à mettre en œuvre.
- Une batterie supplémentaire (de 6 éléments de 1,2 V nominal en série). Cette possibilité serait relativement coûteuse (la batterie elle-même + un chargeur supplémentaire) et peu pratique (deux batteries à maintenir chargées). Ce n'est pas idéal sur le plan écologique non plus.

- Un régulateur à découpage. C'est le plus adapté pour les applications demandant une alimentation régulée de forte puissance, le rendement est excellent. Une étude est nécessaire pour trouver le bon modèle de régulateur et pour dimensionner correctement l'alimentation.

Comme il n'était pas possible de faire des essais et des mesures avec le châssis définitif, la méthode la plus rapide, pratique et bon marché a été préférée en gardant à l'esprit qu'une nouvelle alimentation serait peut-être à concevoir en fonction des essais.

L'alimentation a donc été conçue autour du régulateur linéaire ajustable LM338. Le LM338 peut délivrer un courant de 9 A en continu pour une différence de tension de 5 V entre l'entrée et la sortie, tant que la sécurité de limitation en température n'intervient pas.

Les essais n'ont pas révélés de problèmes avec cette alimentation.

5.6 Télécommande

La télécommande, connectée à la machine par un câble, sert à piloter cette dernière en mode manuel et en mode apprentissage. Elle comporte un joystick permettant de faire bouger la machine, un bouton de «calage» et un bouton d'arrêt d'urgence.

Le joystick est choisi pour avoir deux axes linéaires, et un encombrement raisonnable. Il s'agit d'un modèle du fabricant Oliver Control System. L'axe «vertical» sert à commander la vitesse et l'axe horizontal commande la direction.

Pour chacun des axes, le joystick fournit une tension variant autour de la moitié de la tension d'alimentation de $\pm 10\%$ de la tension d'alimentation. Avec une alimentation de 5 V cela correspond donc à une tension variant entre 2 V et 3 V. Pour tirer parti au mieux de la plage d'entrée du convertisseur analogique-numérique du PIC, nous avons décidé d'amplifier la tension de sortie à l'aide d'amplificateurs opérationnels.

Lors de l'usage «quotidien», cette télécommande est débranchée et remplacée par une «clef de sécurité» autorisant la mise en marche de la machine.

Une broche du connecteur est mise à la masse dans la télécommande, ce qui permet au microcontrôleur de la distinguer de la clef (pour empêcher l'accès à certains modes de fonctionnement si le joystick n'est pas branché).

5.7 Capteurs de lignes

Ce capteur doit sortir une tension analogique variant entre 0 V et 5 V dépendant de la luminosité du sol sous le capteur. Cette tension est destinée à une entrée du convertisseur analogique-numérique du microcontrôleur. Deux exemplaires seront réalisés afin de permettre au robot de se «caler» sur les lignes blanches du terrain de tennis.

Le principe est d'éclairer avec une LED une zone de sol protégée de la lumière ambiante et de mesurer avec une photodiode l'intensité lumineuse que le sol réfléchit.

La longueur d'onde de la lumière a été choisie dans le visible, car les lignes blanches sont conçues pour avoir un bon contraste avec l'orange de la brique pilée pour nos yeux. Il n'est pas exclu que certains matériaux utilisés pour confectionner des lignes blanches apparaîtraient «noirs» dans des longueurs d'ondes invisibles (UV ou IR).

La photodiode VTB8440B, équipée d'un filtre qui fournit une réponse typique de l'œil humain, a été retenue.

La LED a été choisie pour avoir une haute luminosité, un faible angle d'émission (15°), une longueur d'onde absorbée par la brique pilée et correspondant au maximum de la photodiode (LED verte haute luminosité Agilent HLMP-CM11-Y2000).

Le fabricant de la photodiode recommande son usage en mode photovoltaïque. Au maximum, elle peut produire une tension de 0,5 V. Pour gagner en précision, donc pour utiliser toute la plage du convertisseur analogique-numérique, il a été décidé d'amplifier cette tension jusqu'à 5 V. Cette amplification est effectuée au plus près de la photodiode afin de minimiser l'effet des perturbations électromagnétiques sur le câble.

Ces capteurs sont montés dans des petites «boîtes noires», à raz du sol sous le robot (fig. 6). Pour s'affranchir de la lumière solaire, des petites balayettes obturent l'espace entre le sol et les boîtes. Pour éviter

l'accumulation d'objets (feuilles mortes, déchets, etc.), ces boîtes sont montées en oblique sous le robot.

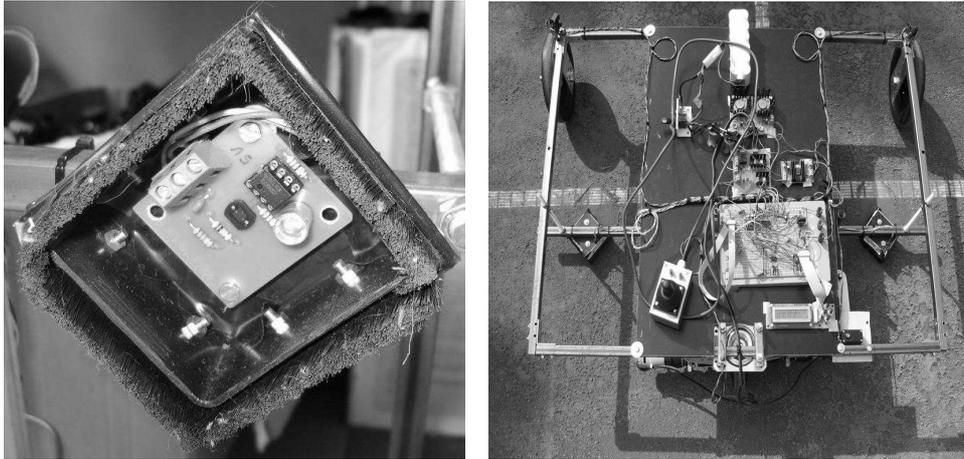


Figure 6 : Montage des capteurs de lignes

Malgré la «saleté» des lignes, les capteurs voient un bon contraste entre la terre battue et les lignes. Par exemple, lors de l'essai montré à la figure 6, sur la terre battue le capteur gauche indiquait 41 et celui de droite 63. Sur la ligne, le capteur gauche indiquait 102 et celui de droite 105 (les valeurs correspondent à la conversion analogique-digitale de la tension issue des capteurs. Il y aurait moyen de les convertir en volts ou en une quelconque unité photométrique, mais cela ne présente pas d'intérêt dans notre application).

Un problème qui s'est présenté lors de ces essais vient du fait que le manque de planéité des terrains de tennis est tel qu'il apparaît parfois un jour de quelques millimètres sous les balayettes, ce qui laisse la lumière du soleil perturber fortement la mesure. Sur le troisième prototype, les boîtes sont articulées de manière à reposer de leur propre poids sur le sol, ce qui leur permet de suivre les irrégularités du terrain.

L'idéal serait de pouvoir s'affranchir des «boîtes noires» qui, à la longue, pourraient poser quelques problèmes d'usure et d'encrassement. Une solution envisagée serait de moduler l'émission lumineuse de la LED et de filtrer le signal issu de la photodiode, ce qui permettrait de réduire

l'influence de la lumière du jour. Une optique pourrait être conçue pour améliorer la sensibilité et pour pouvoir éloigner le capteur du sol. Fourche optique

5.8 Fourche optique

Cette fourche optique sert à mesurer la distance parcourue sur le terrain de tennis lorsque le robot avance. Un disque à fente solidaire de l'arbre moteur tourne dans l'espace de la fourche, ce qui permet de générer un front montant et un front descendant tous les 10 cm environ selon le diamètre de la roue.

La fourche optique modèle HOA2001-1 du fabricant Honeywell a été choisie. Elle est constituée d'une LED infrarouge d'un côté de la fourche et d'un phototransistor de l'autre côté. Un trigger de Schmitt y est intégré pour produire un signal de sortie TTL. Par rapport à une fourche «basique» constituée uniquement d'une LED et d'un phototransistor, ceci permet sans encombrement supplémentaire de véhiculer sur le câble reliant le capteur à la carte de contrôle un signal moins sensible aux parasites.

5.9 Capteurs de distance

Le rôle de ce capteur est de prévenir les collisions avec les obstacles qui pourraient se présenter sur le terrain de tennis (personnes, chaises, bancs, murs si la machine est «perdue»). Ces collisions pourraient s'avérer dangereuses pour les personnes et pour la machine, et pourraient également lui faire perdre sa position. Il fallait donc concevoir un système permettant de détecter les obstacles à distance.

Deux possibilités ont été envisagées.

- La première est une détection par mesure du «temps de vol» d'une salve d'ultrason, soit en utilisant des modules spécialisés, soit en développant une électronique adéquate ;
- La seconde solution était d'utiliser des modules capteurs de distances par infrarouge, tels que ceux commercialisés par la firme Sharp. Pour des raisons de disponibilités, il a été décidé de commencer par tester cette dernière possibilité.

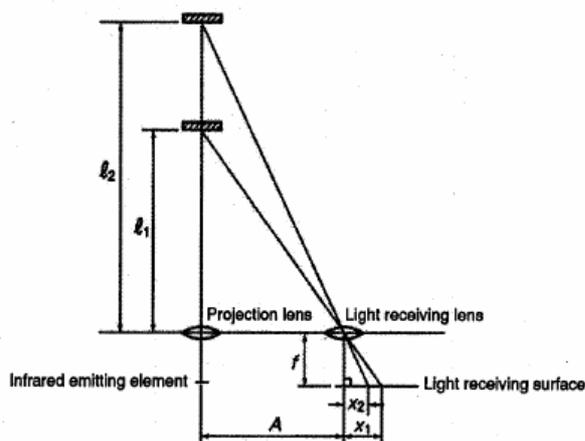


Figure 7 : Principe interne des capteurs de distance. (Source : Sharp)

Ces capteurs fonctionnent par triangulation (fig. 7), en projetant une tache infrarouge sur la cible, et en mesurant la position de l'image de la tache sur un «Position Sensitive Detector» (PSD, une application spéciale des photodiodes). Deux capteurs de ce type sont placés aux extrémités avant gauche et avant droite du robot, et leurs faisceaux sont croisés. Cela forme une sorte de «barrière optique» en forme de X devant le robot, qui permet de surveiller une zone éventuellement plus large que celui-ci.

On pourrait craindre l'usage de capteurs infrarouge en plein soleil, mais le fabricant précise que les modules présentent une bonne immunité à la lumière du jour grâce à une modulation de la lumière émise et à un filtrage de la lumière reçue.

Dans la gamme offerte par le fabricant Sharp, le modèle 2YOA02 a été retenu pour sa longue portée (1,4 m).

Ce modèle de capteur s'alimente en 5 V et sort une tension analogique dépendant de la distance par rapport à l'objet placé devant, comme indiqué à la figure 8.

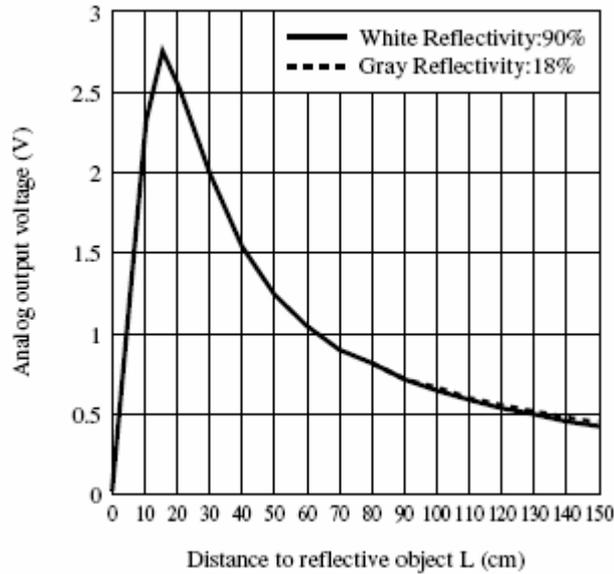


Figure 8 : Courbe de réponse du capteur de distance (Source : Sharp)

Le capteur présentant une faible impédance de sortie, le signal peut être véhiculé dans les câbles jusqu'à la carte de contrôle sans risquer de perturbation. Il est connecté à une entrée du convertisseur analogique-numérique du pic, mais le signal sera exploité par simple comparaison logicielle avec un seuil prédéfini.

Le capteur ne requiert aucun composant externe, il est donc simplement soudé au bout d'un câble trifilaire (alimentation + signal). Les deux capteurs ont été montés à l'avant du prototype.

Les essais ont montré que ces capteurs possèdent un assez long temps de réponse, trop long que pour éviter avec certitude toute collision. La documentation technique ne mentionne aucune information à ce propos. Il serait donc recommandé de choisir ou de concevoir un autre type de détecteur d'obstacle.

6. Logiciel

Le logiciel embarqué dans le microcontrôleur a été écrit en langage C, pour être compilé avec le compilateur C de la firme CCS.

Le logiciel développé permet de

- tester les fonctionnalités élémentaires de la machine (capteurs, moteurs de propulsion et de direction),
- régler certains paramètres pouvant nécessiter un ajustement in situ,
- déplacer la machine en mode manuel,
- enregistrer un parcours,
- reproduire un parcours,
- effectuer des recalages sur les lignes blanches lors de l'enregistrement et de la reproduction,
- parcourir le terrain aléatoirement, à la façon des robots tondeuses, aspirateurs etc. qui fleurissent sur le marché.

Ces fonctions sont accessibles via une interface utilisateur claire et conviviale (fig. 9).

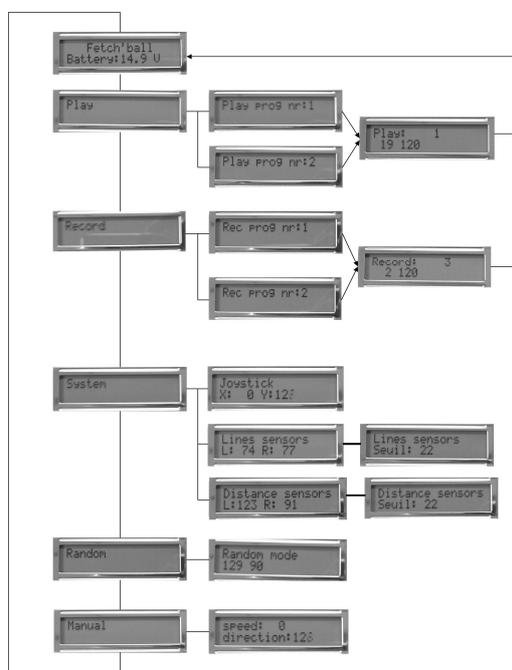


Figure 9 : Menu de l'interface utilisateur

6.1 Mode manuel

Le mode manuel est simplement constitué d'une petite boucle lisant à intervalles réguliers les entrées analogiques correspondant aux deux axes du Joystick. Après quelques «mises à l'échelle» ces valeurs sont envoyées vers les fonctions générant les signaux de contrôle du servo de direction et du moteur de propulsion.

6.2 Mode enregistrement

Dans ce mode, la commande de vitesse entrée via le joystick est envoyée directement au moteur à intervalles réguliers. Lors de la réception d'une impulsion de la fourche optique, la commande de direction lue sur le joystick est recopiée vers le contrôle du servo de direction et un enregistrement de la vitesse et de la direction est effectué dans l'EEPROM I2C.

Si le bouton de recalage est enfoncé, une «marque» est enregistrée dans l'EEPROM et une procédure de recalage est lancée.

Lorsque l'enregistrement est terminé et que l'utilisateur appuie sur le bouton «left», une marque de fin de parcours est enregistrée dans l'EEPROM, la puissance est désactivée et le programme retourne à l'écran d'accueil.

6.3 Mode lecture

Le mode lecture se déroule juste dans l'autre sens. Lors de chaque impulsion de la fourche optique, la «ligne» suivante du parcours est lue et envoyée aux moteurs de propulsion et de direction. Si la ligne est une marque de recalage, la procédure est lancée et si la ligne est une marque de fin de parcours, la puissance est coupée et le programme retourne à l'écran d'accueil.

6.4 Procédure de recalage sur une ligne blanche

Lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton de recalage de la télécommande filaire ou lorsque la mémoire indique qu'un recalage doit être effectué, l'algorithme de recalage est lancé.

Son principe est assez simple :

- avancer tout droit jusqu'à ce qu'un des capteurs détecte une ligne blanche ;
- braquer « à fond » de ce côté ;
- continuer à avancer jusqu'à ce que l'autre capteur détecte une ligne blanche.

Les deux capteurs étant sur la ligne blanche, l'enregistrement ou la reproduction peuvent se poursuivre.

En pratique, pour détecter les lignes blanches, une lecture est effectuée et mémorisée au moment où le calage est demandé. Ensuite, cette valeur est soustraite à la valeur convertie. Lorsque la différence est supérieure à un seuil (réglable via l'interface utilisateur), la ligne est considérée comme détectée.

7. Conclusion

L'objectif de cet article était d'expliquer l'électronique embarquée d'un robot mobile autonome destiné à ramasser les balles et balayer les terrains de tennis tout en assurant la symbiose avec les aspects mécaniques, esthétiques et commerciaux de la machine.

L'enjeu du projet était de poser des choix au niveau de la partie électronique qui soient compatibles avec les autres parties et d'estimer les implications, la faisabilité et le coût des idées évoquées. Il était important de ne pas être trop ambitieux ou idéaliste puisqu'il fallait pouvoir tenir ses engagements ensuite, sans tomber dans l'extrême inverse et limiter tout le projet à des fonctionnalités trop simples. C'est dans ce cadre qu'un premier prototype, modèle réduit a été réalisé et testé. Il a principalement permis de valider la stratégie et d'assurer les estimations.

Le développement de cette stratégie en vue de réaliser le prototype grandeur réelle nécessitait de concevoir, dimensionner, prototyper et tester :

- un variateur de vitesse pour moteur DC,
- une alimentation régulée de forte puissance pour les servomoteurs,
- un étage d'adaptation de la dynamique de sortie d'un joystick à la plage d'entrée d'un convertisseur analogique-numérique,

- un capteur de réflectivité pour détecter les lignes,
- un système de détection d'obstacle,
- une carte principale à microcontrôleur,
- une interface utilisateur.

Il fallait en outre concevoir le logiciel embarqué permettant de :

- tester les fonctionnalités élémentaires de la machine,
- régler certains paramètres pouvant nécessiter un ajustement in situ,
- déplacer la machine en mode manuel,
- enregistrer un parcours,
- reproduire un parcours,
- effectuer des recalages sur les lignes blanches lors de l'enregistrement et de la reproduction.

Les essais sur le prototype final ont permis de valider les différents choix retenus :

- le variateur pour moteur DC est pleinement opérationnel et sûr ;
- l'alimentation des servomoteurs semble correctement dimensionnée ;
- l'étage d'adaptation de la dynamique de sortie du joystick remplit parfaitement son rôle ;
- les capteurs de lignes sont fonctionnels. Ils ont principalement été testés sur une surface de béton gris, offrant théoriquement un moins bon contraste que la surface pour laquelle ils ont été conçus. Ils ont été testés sur un vrai terrain de tennis, où ils s'avèrent efficaces ;
- le système de détection d'obstacle choisi s'avère trop lent pour avoir une efficacité satisfaisante ; il est nécessaire de choisir une autre méthode. Néanmoins, ceci ne perturbe pas le fonctionnement normal du prototype, cela le rend simplement moins sécurisé ;
- l'interface utilisateur est opérationnelle ;
- toute l'électronique a été transférée et testée sur le prototype final.

Le logiciel, bien que pouvant être fiabilisé et «épuré», répond à tous les objectifs annoncés :

- Il permet de tester le joystick, les capteurs de lignes et de distance. En mode manuel, il permet de tester la propulsion et la direction.
- Il permet de configurer la variation de réflectivité au-delà de laquelle une ligne blanche est considérée comme détectée.
- Il permet de régler le seuil de détection des capteurs d'obstacle.
- L'enregistrement et la reproduction de parcours fonctionnent avec une bonne reproductibilité.
- L'algorithme de recalage sur une ligne blanche est opérationnel
- Un mode aléatoire (similaire aux robots tondeuses, aspirateurs etc. qui commencent à fleurir sur le marché) a été implémenté.

Pour conclure sur le plan technique, on peut préciser qu'actuellement, la robotique autonome est un domaine en plein essor. En conséquence, il y aura toujours moyen d'améliorer les robots autonomes tels qu'ils sont connus actuellement, et ce encore pour de nombreuses années. Le sujet de cet article n'échappe pas à la règle.

L'originalité du projet a permis de mettre en évidence son aspect polyvalent, qui a demandé de conjuguer les différentes disciplines de l'ingénierie et de la science. Les différents domaines abordés relèvent de la mécanique, l'électronique numérique, l'électronique analogique, l'électronique de puissance, l'optoélectronique, l'électricité, la programmation, la compatibilité électromagnétique, sans oublier les aspects financiers, économiques, sociologiques, comptables et ... humains.

8. Références bibliographiques

BRÜLL, C., *Business Plan - Fetch'Ball*, Liège, 2006.

GALLES, C., *Astuces et méthodes électroniques*, France, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, 1998.

HOROWITZ, P., HILL, W., *Traité de l'électronique analogique et numérique volume 1 : Techniques analogiques*, Angleterre / France, Elektor, 1996.

HOROWITZ, P., HILL, W., *Traité de l'électronique analogique et numérique volume 2 : Techniques numériques et analogiques*, Angleterre / France, Elektor, 1996.

MOESEN, F., *Conception mécanique d'un robot mobile ramasseur de balles et balayeur de terrains de tennis*, Liège, 2007.

VETCOUR, N., DELMOT, R.F., *Electronique (Tome 1) : Electronique analogique*, Publiétudiant, 2004.

VETCOUR, N., DELMOT, R.F., *Application de l'électronique : microprocesseur*, Publiétudiant, 2006.