

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique

Mémoire de Master

Filière: Électronique
Spécialité: Instrumentation

Réalisé par:

BOUTAIBA Ayoub
Et
BENOMAR Ibrahim

Thème:

Contribution à la mise en œuvre d'un robot de service: vers une application de santé

Encadré par :

Mme. BOURAINE Sarah
Et
Mr. KAZED Boualem

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de la division microélectronique et nanotechnologies (DMN) du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) à Alger.

Nous remercions **Dieu** tout puissant de nous avoir accordé la force et le courage afin de pouvoir accomplir ce travail.

Nous remercions chaleureusement notre encadreur **Madame BOURAINE Sarah** pour sa sympathie, ses conseils, son soutien, ses idées et sa disponibilité.

De même, nous adressons notre gratitude à notre promoteur **Monsieur KAZED Boualem** pour son confiance, son soutien et tous ses conseils précieux.

Nous sommes également très honorés par les membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions et conseils.

Nous remercions nos familles, nos amis et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

J'exprime mes sentiments les plus profonds et je dédie ce modeste travail

*A mon père, ma mère, pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide de **DIEU** d'arriver là où je suis.*

A Mes belles sœurs et mes chères frères

A toute ma famille.

A tous mes amis et tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.

AYOUB

Dédicaces

Au DIEU Tout-puissant, qui m'aime toujours...

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement

A mes Chères sœurs et Chères frères

A toute ma famille.

A tous mes amis et tous ceux m'aiment et qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.

IBRAHIM

ملخص

ناقشنا في هذه المذكرة حل لمشكلة يعاني منها ذوي الإحتياجات الخاصة و كبار السن، حيث قمنا بإنجاز بداسة نظريات من أجل انجاز روبوت متحرك قادر على حمل الاغراض و تتبع الأشخاص المعنيين، فأولا قمنا بدراسة شاملة لأنواع الروبوتات المتحركة و كذا تطرقنا لسبل تحديد المواقع، و اخترنا الانسب لنا من بينهم بعدها قمنا بعرض مختلف أجزاء الروبوت و بينا طريقة إنجازه، و لضمان العمل الجيد لهذا الأخير و ثباته أدخلنا منظم من نوع PID و كذا نهجا للتتبع.

كلمات المفاتيح: روبوت متحرك، تحكم خطي- PID (التناسب و التكامل و التفاضل)

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons discuté une solution aux problèmes rencontrés par les personnes à besoins spécifiques et les personnes âgées, notre théorie est de réaliser un robot mobile capable de transporter les affaires ou les objets des personnes concernées et les suivre. Tout d'abord, nous avons étudié les différents types de robots mobiles et des méthodes de positionnement, et parmi eux nous avons choisi le plus adapté pour nous. Ensuite, nous avons présenté les différentes parties du robot et comment y parvenir à le fabriquer. Enfin, pour assurer le bon fonctionnement et la stabilité des robots, nous avons introduit un régulateur PID et l'approche de trace.

Mots clés: robot mobile, contrôle linéaire, (PID : proportionnel, intégral et dérivé)

Abstract

In this thesis, we have discussed a solution to the problems faced by people with special needs and the elderly, our theory is to make a mobile robot capable of transporting the belongings and stuff of the people concerned and following them. First, we have studied the different types of mobile robots and positioning methods, and among them we have chosen the most suitable for us. Next, we presented the different parts of the robot and how to build it. Finally, to ensure the good functioning and stability of the robot, we have introduced a PID regulator and the tracking approach.

Keywords: mobile robot, linear control, (PID: proportional, integral and derivative)

Listes des acronymes et abréviations

AC	courant alternatif.
CCD	Charge-coupled device
CNC	machine à commande numérique.
d	la distance entre l'émetteur et le récepteur.
DC	courant continu.
GPS	Système mondial de positionnement.
Hz	hertz.
LED	Light Emitting Diode.
mA	milli Ampère.
PWM	Pulse Width Modulation.
PID	Proportional Integral and Derivative.
R.U.R	Rossum's Universal Robots.
S	second.
T	Tag.
TLE	temps parcouru entre l'émetteur et le récepteur.
UWB	Ultra Wide Band.
V	volt.
v	la vitesse du son.
WIFI	contraction de l'anglais « Wireless Fidelity ».

Table des matières

Résumé	i
Listes des acronymes et abréviations	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	1

Chapitre I: Introduction à la robotique et ses récentes applications

I.1 Introduction	3
I.2 La robotique	3
I.3 Le robot	4
I.4 Le robot mobile	4
I.5 Les domaines d'application de robot mobile	4
I.5.1 L'industrie	4
I.5.2 Le domaine militaire	5
I.5.3 La santé	5
I.5.4 Utilisation civile	6
I.5.5 L'usage domestique	6
I.6 Les robots de transport (porteur de charge)	7
I.6.1 Les robots de transport extérieur	7
I.6.2.1 Les drones de livraison	7
I.6.2.2 Les robots de livraison par route	7
I.6.2 Les robots de transport (robots porteurs de charge) en milieu intérieur	8
I.7 Conclusion	8

Chapitre II: Gestion de l'énergie dans les nœuds de capteurs

II.1 Introduction	9
II.2 Problématique	9
II.3 La localisation dans le domaine de la robotique mobile	9
II.3.1 La localisation relative	9
II.3.2 La localisation absolue	10
II.3.1.1 Les balise passive	10
II.3.1.2 Les balises actives	11

II.3.2 Méthode de calcul de position	15
II.3.2.1 Trilatération	16
II.3.2.1 Triangulation	19
II.4 Synthèse	21
II.5 Conclusion	22

Chapitre III: La récupération d'énergie solaire pour un nœud de capteur

III.1 Introduction	23
III.2 Partie électronique	23
III.2.1 La partie commande	24
III.2.1.1 Arduino Pro Mini	24
III.2.1.2 Arduino Due	25
III.2.2 La partie opérative	26
III.2.2.1 La partie actionneur	26
III.2.2.2 La partie Capteur	29
III.2.3 La source d'énergie (batterie lithium)	33
III.2.4 Le câblage du module DWM1000	34
III.2.4 Le câblage globale	35
III.3 La partie mécanique	36
III.3.1 Le châssis	36
III.3.2 La coque	38
III.4 Conclusion	39

Chapitre IV: Conception et réalisation

IV.1 Introduction	40
IV.2 Définitions et généralités sur la régulation	40
IV.2.1 Le signal de contrôle PWM	42
IV.2.2 Le régulateur PID	43
IV.2.3 Description des actions du PID	44
IV.2.3.1 Action proportionnel P	44
IV.2.3.2 Action intégrale I	44
IV.2.3.3 Action dérivé D	45
IV.3 Implémentation sue le robot	46
IV.3.1 Déplacement du robot	49
IV.3.2 L'application de régulateur sue le robot	52
IV.4 Conclusion	54

Conclusion générale	55
----------------------------------	----

Bibliographie	I
----------------------------	---

Annexe	III
---------------------	-----

Liste des figures

Figure I.1 Le robot MIR200, pour l'automatisation de la logistique et le transport en milieu industriel	4
Figure I.2 Un "Quade" autonome tout terrain	5
Figure I.3 Robear, le robot infirmier	5
Figure I.4 Robot de désinfection dans les lieux public	6
Figure I.5 Robot aspirateur	6
Figure I.6 Drone de transport	7
Figure I.7 Robot de transport dans un milieu d'extérieur	7
Figure I.8 de transport l'intérieur de l'hôpital	8
Figure II.1 Exemple d'une localisation relative d'un robot par odométrie	10
Figure II.2 Estimation de la position d'un système mobile en utilisant un repère artificiel ...	11
Figure II.3 Schéma de principe d'un système de localisation par balise active d'un robot mobile	12
Figure II.4 Les différents spectres électromagnétiques	12
Figure II.5 Localisation par satellites (GPS)	13
Figure II.6 Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque	14
Figure II.7 Un exemple de système de suivi par Wi-Fi : le drone garde une distance fixe entre lui et l'appareil porté par l'utilisateur, tout en capturant une vidéo	15
Figure II.8 Un system radio fréquence avec un émetteur et récepteur	16
Figure II.9 Localisation par mesure des distances de trois balises (trilatération)	17
Figure II.10 Localisation par mesure de distances de trois balises	18
Figure II.11 Représentation de cercles	18
Figure II.12 Localisation du point B par triangulation	20
Figure III.1 Le schéma synoptique de système de la partie électronique	23
Figure III.2 Le schéma synoptique de la partie électronique	24
Figure III.3 La carte Arduino Pro Mini	24
Figure III.4 La carte Arduino Due	25
Figure III.5 La composition de moteur Brushless	27
Figure III.6 Principe de fonctionnement d'un moteur Brushless étape par étape	27
Figure III.7 Les Phases de rotation du moteur Brushless	28
Figure III.8 Le roulement séquentiel Entre le moteur et le contrôleur à chaque phrase	29
Figure III.9 Le module à ultrasons HC-SR04 et son principe de fonctionnement	30
Figure III.10 Le module DWM1000	30
Figure III.11 Codeur à effet Hall	32
Figure III.12 Un codeur optique rotatif avec les trains d'impulsions déphasés créés.....	33
Figure III.13 Les composants d'une batterie lithium	34
Figure III.14 Câblage du capteur dwm1000	34
Figure III.15 15 La carte du câblage final avec Arduino Due	35
Figure III.16 Le châssis fabriqué en aluminium	36
Figure III.17 La conception de châssis sous "SolidWorks"	36
Figure III.18 Le châssis avec les moteurs	37

Figure III.19 La roue folle	37
Figure III.20 Encodeur placée sur le support	37
Figure III.21 Le placement finale de l'encodeur sur le châssis	38
Figure III.22 La fixation finale de l'encodeur sur le châssis	38
Figure III.23 La conception de coque sous "SolidWorks"	39
Figure VI.1 Fonctionnement en boucle ouverte	41
Figure VI.2 Fonctionnement en boucle fermée	42
Figure VI.3 Signal PWM asymétrique	42
Figure VI.4 Signal PWM symétrique	43
Figure VI.5 Schéma fonctionnel d'un système de régulation	43
Figure VI.6 Schéma fonctionnel du régulateur	44
Figure VI.7 Réponse indicielle du régulateur I	45
Figure VI.8 La réponse indicielle du régulateur I	45
Figure VI.9 La réponse indicielle du régulateur I	46
Figure VI.10 Schéma synoptique de contrôle du robot	46
Figure VI.11 Repérage de l'objet mobile (tag) par rapport au robot	47
Figure VI.12 Représentation des cercles	48
Figure VI.13 Déplacement du robot vers l'objet	50
Figure VI.14 La courbe de la vitesse et de la distance en fonction du temps	52
Figure VI.15 Schéma synoptique du contrôle du robot	52

Liste des tableaux

Tableau II.1 Les avantages et les inconvénients de chaque technologie de système radiofréquence	21
Tableau III.1 Spécifications techniques de la carte Arduino Pro Mini	25
Tableau III.2 Les caractéristiques techniques de la carte Arduino Due	26
Tableau IV.1 Les paramètres de contrôle PID appliqués à la distance, l'angle et la vitesse du moteur	53

Introduction générale

La robotique est un domaine en plein essor depuis quelques années. Les évolutions technologiques, dépassant sans cesse nos espérances, permettent maintenant de réaliser des solutions technologiques s'adaptant au moindre problème. Par conséquent, la robotique est utilisée dans des domaines extrêmement rigoureux et exigeants, tel que l'Industrie, le domaine militaire, utilisation civile ou domestique, ainsi qu'au domaine qui est le principal de notre sujet, le domaine médical.

Le domaine médical qui doit être le premier bénéficiaire de cet avancement, car il possède plusieurs aspects, dont l'aide des personnes âgées ou handicapés qui ont du mal à se déplacer librement dans la société. Il peut être source d'une meilleure efficacité des soins, d'un meilleur accompagnement postopératoire, ainsi qu'une aide aux soignants dans certaines tâches laborieuses.

Notre étude consiste à élaborer un robot autonome capable de suivre et porter des charges, pour aider les gens dans le besoin de transporter leurs affaires, quelques soient leurs états de santé ou le degré de leur handicap, paralysie partielle, handicap musculaire ou osseux, ainsi qu'aux personnes âgées affaiblies.

Pour réussir à développer un tel robot avec un aussi grand impact, on devait faire une étude approfondie pour avoir le meilleur résultat possible. Couvrir et éradiquer tous ses problèmes n'est pas une tâche facile, mais le but était de savoir où fouiner pour trouver les composants les plus fiables qui nous permettront de réaliser des méthodes et techniques de calcul et Pour commencer notre travail, fallait passer par plusieurs étapes cités chapitres dans ce mémoire.

Le premier chapitre expose l'idée de la robotique en générale, et mentionne les différents types de robots qui existent ainsi qu'aux divers domaines affectés par ces derniers.

Dans le deuxième chapitre, On a fait une étude de différents méthodes de localisation Vers l'application de suivi d'une personne Repérer, On a choisi le meilleur parmi eux pour arriver à faire le suivi avec une haute précision et stabilisation.

Le troisième chapitre comporte la réalisation et conception de notre robot mobile. Toutes les étapes de construction sont énumérées en détails en citant les matériaux utilisés.

Dans le dernier chapitre, on a fait une implémentation sur notre robot pour tous les théories qu'on a vu précédemment, et introduit un régulateur pour assurer la stabilité et le bon fonctionnement de robot.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale comportant quelques perspectives de développements futurs.

I.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, la robotique n'a cessé d'évoluer. Plusieurs secteurs d'application ont été explorés comme l'industrie, le secteur médical, le secteur militaire, l'exploration spatiale, le transport, etc. Actuellement, un domaine d'application qui nécessite de plus en plus l'inclusion des récentes avancées technologiques en robotique est la santé. Dans ce domaine, le soin, la précision et l'intervention rapide tout en préservant la sécurité des patients et des médecins sont des priorités. Afin de minimiser les erreurs médicales et augmenter l'efficacité des actions entreprises par le staff, les roboticiens ont développés plusieurs systèmes qui sont déjà déployés dans le secteur médical. Prenons l'exemple du robot Da Vinci [1] utilisé en chirurgie pour améliorer la précision des interventions. D'autres systèmes comme le robot UVD [2] est utilisé en stérilisation hospitalière dans le cadre du cycle de nettoyage régulier et vise à prévenir et à réduire la propagation des maladies infectieuses, de virus, de bactéries et d'autres types de micro-organismes organiques nocifs dans l'environnement en décomposant leur structure d'ADN. Le robot est sûr, fiable et minimise les erreurs humaines et évite de transmettre l'infection. Les robots porteurs de charge sont également utilisés dans ce secteur pour livrer les médicaments, les repas et d'autres produits pour les malades. En effet, nous nous intéressons à ce genre de robot qui fait l'objet d'étude dans ce travail. Ils peuvent s'avérer très utiles pour assister les infirmiers et les médecins, notamment dans les services de maladies infectieuses où dans le cas de propagation de virus.

I.2 La Robotique

Dans les années 1970, quand les chercheurs ont commencé à réfléchir sur la conception de robots, le terme « robotique » désignait la science des robots et/ou l'art de concevoir et fabriquer des robots.

Aujourd'hui, la robotique est l'art d'automatiser des systèmes plus ou moins complexes mais en s'appuyant sur le savoir-faire acquis par les études sur la conception de robots, savoir-faire issu des développements d'une branche de l'automatique générale [3].

I.3 Le Robot

Un robot est un dispositif mécatronique (alliant mécanique, électronique et informatique) possédant des capteurs, un système logique et des actionneurs. Il exécute une ou plusieurs tâches de manière autonome conformément à un programme préétablie et modifiable.

Le terme « robot » est apparu pour la première fois vers 1920 dans une pièce de théâtre de science-fiction : R.U.R. (Rossum's Universal Robots) du tchèque K.Tschapek. Il désignait de petits êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maître ("robota" signifie travail ou corvée en tchèque) [4].

Nous pouvons distinguer deux types de robots, les robots fixes tels que les bras manipulateurs, machine à commande numérique (CNC), etc. et les robots mobiles, dont l'objet de notre travail.

I.4 Le Robot Mobile

Le terme « robot mobile » désigne le plus souvent des robots à roues avec une liberté de mouvements qui leurs confèrent une autonomie, Doté de moyens de perception et de raisonnement, l'objectif principal d'un robot mobile consiste à réaliser un mouvement à partir d'un point vers un point destination tout en évitant les obstacles obstruant son mouvement.

I.5 Les domaines d'application des robots mobiles

I.5.1 L'industrie

La robotique industrielle permet l'automatisation de certaines tâches dans la chaîne de production, apporte flexibilité et gain de productivité (Figure I.1).



Figure I.1 Le robot MIR200, pour l'automatisation de la logistique et le transport en milieu industriel.

I.5.2 Le domaine militaire

Actuellement, plusieurs types de robots sont utilisés dans le domaine militaire. Ils peuvent agir dans des missions aussi diverses que le renseignement, les opérations armées, la reconnaissance, le déminage ou encore le transport de matériel. Un exemple de robot de reconnaissance est illustré dans la figure (I.2).



Figure I.2 Un "Quade" autonome tout terrain.

I.5.3 La santé

Les applications des robots dans le domaine de la santé sont innombrables, chirurgie de pointe, rééducation, prise en charge du handicap, soutien aux personnes dépendantes, etc. Des gestes simple et une intervention rapide tout en préservant la sécurité des patients et des médecins sont des priorités. Pour ce faire, les roboticiens ont développés plusieurs systèmes, notamment dans le domaine de la robotique mobile, qui sont déjà déployés dans le secteur médical tel que les robots infirmier (Figure I.3).



Figure I.3 Robear, le robot infirmier.

I.5.4 Utilisation civile

De plus en plus de tâches sont confiées aux robots dans le civile. Ils servent à remplacer les personnes qui sont chargées de tâches civiles (Nettoyer la ville, aider la population, s'occuper des lieux publics, etc.), comme l'exemple présenté dans la figure (I.4).



Figure I.4 Robot de désinfection dans les lieux publics.

I.5.5 L'usage domestique

Les robots domestiques permettent d'améliorer le quotidien, tels que le robot aspirateur, qui permet le nettoyage autonome de la maison, ou la tondeuse à gazon automatique. Ces robots domestiques ouvrent la voie à de nombreuses autres applications qui permettent de faciliter d'avantage la vie de l'être humain. Nous pouvons voir dans la figure (I.5) un robot domestique de type robot aspirateur.



Figure I.5 Robot aspirateur.

I.6 Les robots de transport (porteur de charge)

C'est un robot conçu pour le transport des palettes et décharges lourdes, ou encombrantes.

I.6.1 Les robots de transport en milieu extérieur

Nous pouvons distinguer principalement deux types de robot.

I.6.1.1 Les drones de livraison

Le drone est un aéronef sans passager ni pilote qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol. Un exemple de ces systèmes est présenté dans la figure (I.6). La livraison par drone permet de gagner du temps et de réaliser des opérations à haut risque plus rapidement. En effet, la livraison par l'air est plus rapide que par la route.



Figure I.6 Drone de transport.

I.6.1.2 Les robots de livraison par route

Ce sont des robots mobiles qui peuvent parcourir des longs trajets. Ils font leurs déplacements par un contrôle en distance ou autocontrôle, spécifiquement conçu pour la livraison à domicile, comme illustré dans la figure (I.7).



Figure I.7 Robot de transport dans un milieu d'extérieur.

I.6.2 Les robots de transport (robots porteurs de charge) en milieu intérieur

Ce sont des robots mobiles capables de porter des charges et souvent menés à les transporter vers un endroit bien défini. L'exemple de la figure (I.8) montre un tel robot dans un milieu hospitalier. Dans ce genre d'application, les robots peuvent accomplir sa tâche de manière autonome ou téléguidée. Pour le cas autonome, le déplacement du robot est indépendant, ne nécessitant aucune intervention humaine. Pour ce faire, il suffit de définir la destination à atteindre. Pour le cas téléguidé, le robot a besoin d'une personne pour le guider. Le guidage peut être fait de plusieurs façons telles que la commande par joystick, par télé opération ou un système de reconnaissance pour suivre les personnes.



Figure I.8 Robot de transport l'intérieur de l'hôpital.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une idée générale sur la robotique, l'historique des robots et leurs domaines d'application, en se focalisant sur les robots mobiles. Parmi les applications présentées, le domaine visé dans ce travail est la santé, et plus particulièrement, les robots de transport (robots porteurs de charge) dans des milieux hospitaliers.

Chapitre II Étude des différentes méthodes de localisation: vers une application de suivi

II.1 Introduction :

Le nombre croissant d'applications dans le domaine de la robotique mobile et des systèmes intelligents a accru la demande des systèmes de positionnement et de suivi. Pour effectuer une mission, un robot mobile doit être capable de naviguer dans son environnement, et se déplacer d'une position de départ qui représente sa position actuelle, à un point d'arrivée spécifié par l'utilisateur. Dans notre cas, le robot doit suivre un objet en mouvement, une personne en l'occurrence. Pour effectuer cette mission, le robot mobile doit être équipé d'un système de localisation précis dont la précision doit être respectée.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différentes méthodes de localisation et de suivi, les différents systèmes proposés actuellement et faire une comparaison pour choisir la meilleure solution à adopter.

II.2 Problématique

La problématique de ce travail est de choisir une technique adéquate qui permettra au robot mobile de localiser une cible (l'objet) en mouvement qu'il doit suivre à une distance que nous avons choisie précédemment, et cela avec précision.

II.3 La localisation dans le domaine de la robotique mobile

La localisation est la détermination de la position et l'orientation d'un système mobile par rapport à un repère de référence. La localisation est absolue si le repère lié à son environnement est fixe. Elle est relative lorsque le repère est lié à une position précédente du système mobile [5].

II.3.1 La localisation relative

Elle consiste à déterminer la position, l'orientation, et éventuellement la vitesse du système mobile par intégration des informations fournies par divers capteurs proprioceptifs depuis un point de départ. Ces données peuvent être des informations de déplacement (odométrie), de vitesse (vélocimétrie) ou d'accélération (capteurs inertiels).

Ce type de localisation présente l'immense avantage d'être indépendant de l'environnement. Les seules erreurs qu'il peut générer sont celles dues à son mode de fonctionnement interne. Par contre, l'inconvénient majeur est l'accumulation d'erreurs due aux différentes intégrations (figure II.1) [5].

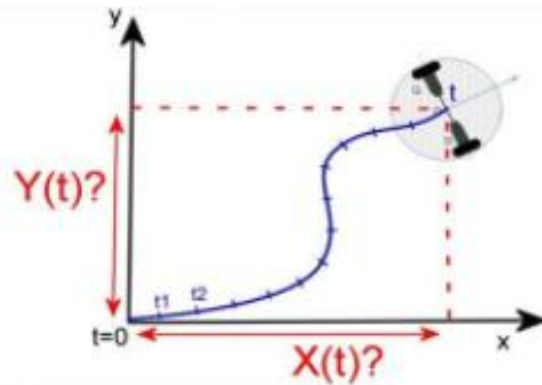


Figure II.1 Exemple d'une localisation relative d'un robot par odométrie

II.3.2 La localisation absolue

La localisation absolue est une technique qui permet à un système mobile de se repérer directement dans son milieu d'évolution, que ce soit en environnement extérieur (mer, espace, terre), ou en environnement intérieur (ateliers, immeubles, centrales nucléaires, etc.). Elle est basée sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs et nécessite toujours une représentation de l'environnement. Le système mobile possède donc une banque de données regroupant les éléments caractéristiques de son milieu d'évolution (balises par exemple). Pour sa localisation absolue, il doit déduire de la perception de ces éléments caractéristiques, sa position dans son environnement [6].

II.3.2.1 Les balises passives

On appelle balises passives, des repères artificiels n'échangeant pas de signaux avec le système de perception. Ce type de méthode est basé sur le repérage de balises artificielles placées à des positions connues dans le milieu d'évolution du système mobile. L'identification de la balise doit être faite par le système de perception. Ainsi le problème de la mise en correspondance est généralement facilité par un codage au niveau du marquage de la balise. Il est donc nécessaire de « voir » au moins trois balises pour permettre l'estimation de la position.

Cependant, en utilisant un capteur de vision à base de camera, une seule image peut représenter plusieurs repères, il est alors possible d'en extraire la position et l'orientation du système mobile.

Ces systèmes de balises ont l'avantage d'être moins lourds à installer. Par ce principe, un panneau dont la position est connue et sur lequel sont dessinées des bandes verticales blanches et noires peut être utilisé comme repère. Une caméra CCD vise le panneau et l'algorithme proposé détermine la position du système mobile en analysant les déformations des bandes vues dans l'image (Figure II.2).

Une autre application, destinée à l'atterrissage automatique d'hélicoptère, utilise comme balise un cercle blanc peint sur le sol. L'image du cercle donnée par la caméra embarquée sur l'hélicoptère est une ellipse. Comme dans le cas précédent, la déformation de la balise dans l'image est utilisée. La méthode s'appuie sur la résolution du système d'équations définissant l'ellipse pour déterminer la position relative de l'hélicoptère par rapport au cercle.

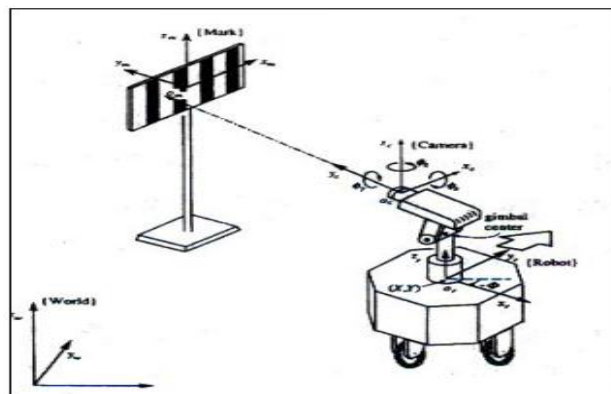


Figure II.2 Estimation de la position d'un système mobile en utilisant un repère artificiel [5].

II.3.2.2 Les balises actives

Les balises actives (ou repères) artificielles sont ajoutées au milieu d'évolution du système mobile et dont les positions sont connues [6]. Elles sont généralement interactives avec le système de perception du système mobile puisque ce sont elles qui émettent l'onde captée par l'équipement de mesure. Cette technique est basée sur l'émission et la réception entre la balise de référence qui a des coordonnées connues et le robot mobile dont la position est à déterminer (figure II.3). La technologie radiofréquence est la plus répandue pour cette technique. Il y a plusieurs systèmes qui sont à base de cette technologie comme : GPS, WIFI, UWB, etc.

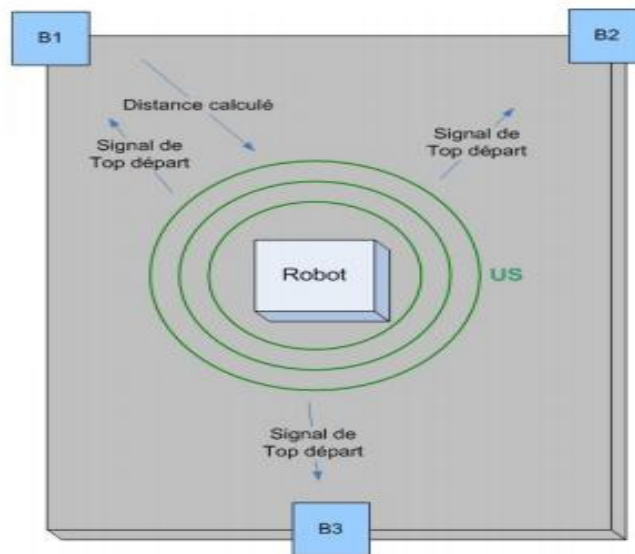


Figure II.3 Schéma de principe d'un système de localisation par balise active d'un robot mobile

- **Définition d'ondes radiofréquence**

Les ondes radiofréquences font partie des ondes électromagnétiques (figure II.4) qui sont la résultante d'un champ électrique et d'un champ magnétique dont les amplitudes varient de façon sinusoïdale au cours du temps. L'amplitude d'une onde électromagnétique varie donc de façon sinusoïdale au cours de sa propagation. Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie, mais pas de matière. Les ondes radiofréquences sont différentes par rapport à d'autres ondes électromagnétiques par leur spectre qui s'étend de 8,3 kHz à 3000 GHz, mais la plupart des applications courantes concernent des fréquences comprises entre 100 kHz et 6 GHz.

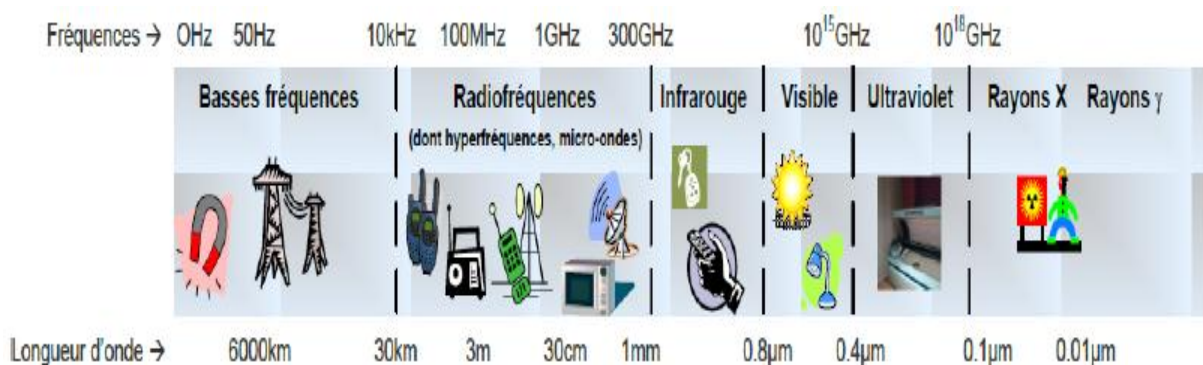


Figure II.4 Les différents spectres électromagnétiques. [7]

- **Les systèmes de technologie radiofréquence**

- **GPS :**

Le GPS (Global Positioning System) est le système de positionnement le plus répandu basé sur le positionnement par satellites [8]. Développé par l'armée américaine, ce système est mis à disposition des civils. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe. Le principe de fonctionnement du GPS repose sur la mesure de la distance d'un récepteur par rapport à plusieurs satellites (les satellites sont répartis de telle manière que 4 à 8 d'entre eux soient toujours visibles). Chaque satellite émet un signal, capté sur terre par le récepteur, permettant ainsi de mesurer précisément la distance séparant l'émetteur du récepteur grâce au temps parcouru. Avec la réception des signaux de quatre satellites (trois pour obtenir le point d'intersection des trois sphères et un quatrième pour la synchronisation du temps), le récepteur mobile est capable de calculer sa position géographique par triangulation. Ce type de système est beaucoup plus utilisé dans des applications pour le positionnement extérieur, comme pour les automobiles et les bateaux (figure II.5). Pour les environnements d'intérieurs, il n'est pas fiable. Cela est dû à plusieurs raisons, d'une part, la précision du GPS standard est de l'ordre de 3 à 15 mètres, ce qui est inacceptable dans ce type d'environnement. D'autre part, il y a une forte atténuation du signal à l'intérieur des bâtiments, ce qui rend ce système inapproprié pour la plupart des cas.

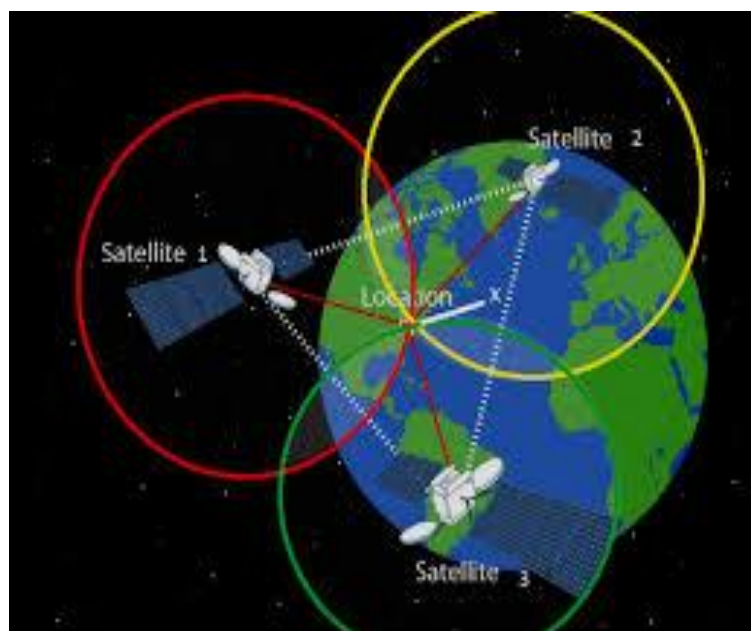


Figure II.5 Localisation par satellites (GPS).

- WIFI

Le terme « Wi-Fi » (contraction de l'anglais « Wireless Fidelity ») désigne un protocole de communication sans fil dont le standard technique a été normalisé par le groupe IEEE 802.11. Il est aujourd'hui très utilisé dans les solutions de localisation pour son implémentation simple et pas cher.

Le principe de positionnement ici à l'œuvre repose sur la force du signal reçu. Les points d'accès Wi-Fi offrent généralement de grandes portées (jusqu'à plusieurs centaines de mètres selon le modèle, sur la plage de fréquences des 2.4 GHz). L'inconvénient, des systèmes de positionnement par Wi-Fi est que leur précisions varie entre 2 à 5 mètres en milieu dense, avec une faible consommation énergétique [8]. Un exemple de système de suivi par Wi-Fi est présenté dans la Figure (II.6)



Figure II.6 Un exemple de système de suivi par Wi-Fi : le drone garde une distance fixe entre lui et l'appareil porté par l'utilisateur, tout en capturant une vidéo [9].

- UWB :

Ultra Large Bande (UWB : Ultra Wide Band) est l'une des technologies de communication sans fil les plus compétitives pour la localisation intérieure, notamment pour ses caractéristiques très intéressantes en ce qui concerne la complexité de l'utilisation, le coût de la réalisation, la couverture et la précision. Cette technologie permet la transmission de données numériques sur une largeur de bande de 500 MHz ou plus avec une faible puissance. La technologie UWB émet simultanément des signaux sur plusieurs bandes de fréquences qui s'étalent de 3.1 à 10.6 GHz. Une façon d'obtenir un tel contenu spectral large est de générer des impulsions de très courte durée, inférieure à la nanoseconde.

Cette forte résolution temporelle permet d'effectuer des mesures de temps de propagation d'un signal relativement précises entre un émetteur et un récepteur. Elle peut également être utilisée à proximité d'autres signaux RF sans provoquer d'interférences en raison des différences dans les types de signaux et du spectre utilisés. De plus, le système UWB est moins sensible aux phénomènes de réflexion, réfraction ou diffraction d'onde dans un environnement multi-trajet, contrairement aux systèmes à bande étroite, ce qui réduit les erreurs lors des calculs des temps de propagation. Les caractéristiques techniques du système UWB semblent bien adaptées pour des applications de localisation. Le positionnement d'un nœud mobile avec cette technologie repose principalement sur les informations provenant des signaux radio circulant entre l'émetteur (celui qui veut se localiser) et un certain nombre de points de référence (voir la figure II.7) [10].

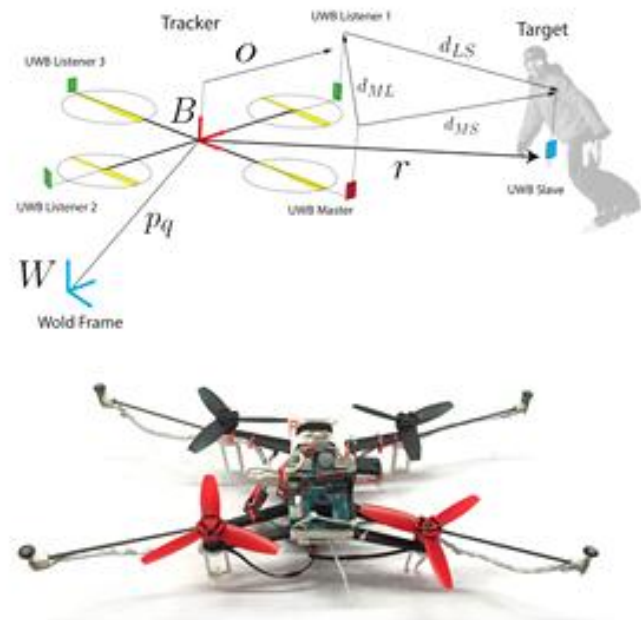


Figure II.7 Un robot mobile est équipé de plusieurs unités ultra-larges bande (UWB) et suit un sujet avec une seule balise UWB [11].

II.3.3 Méthode de calcul de position

Quand un robot mobile a suffisamment d'information de distances/angles, il peut calculer sa position. Pour cela, plusieurs méthodes sont utilisées. Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les performances finales du système de localisation.

Parmi les algorithmes utilisés pour effectuer ce calcul, nous citons la méthode de trilatération [5] et la méthode de triangulation [5].

II.3.3.1 Trilatération

La trilatération consiste à utiliser uniquement les distances pour localiser l'objet cherché, et non pas les angles [5]. Ce principe utilise le plus souvent le système de signal radio. Il se base sur la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde: les points autour de l'objet à localiser émettent une onde. A partir de ce moment, un chronomètre se déclenche. Lorsque l'objet inconnu reçoit l'onde, il la renvoi vers son émetteur. Quand ce dernier la capte, il stoppe le chronomètre (figure II.8). Le calcul devient alors simple (en théorie) :

$$d = v \times t \quad (II.1)$$

Avec

- t : le temps parcouru entre l'émetteur et le récepteur.
- v : la vitesse du son.
- d : la distance entre l'émetteur et le récepteur.

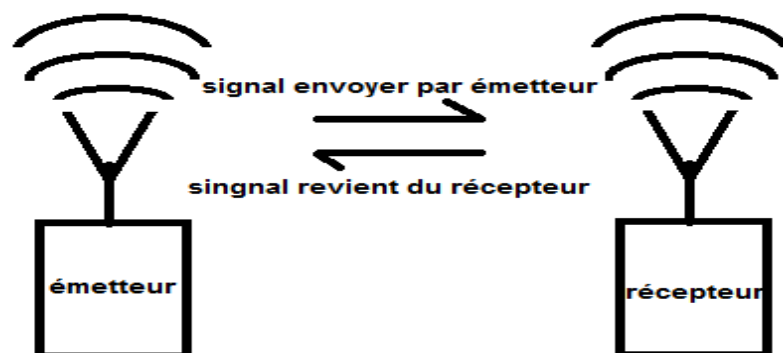


Figure II.8 Un system radio fréquence avec un émetteur et récepteur.

Or c'est un aller-retour que l'onde fait, il suffit donc de multiplier ce temps devisé sur deux, avec la vitesse et nous obtenons la distance entre le point inconnu et l'émetteur.

Une fois les distances connues, il suffit de tracer des cercles dont les centres correspondent aux points connus et dont les rayons sont égaux à la distance entre chaque point et l'objet inconnu. Le point d'intersection de ces cercles indique l'endroit où se situe le point recherché (voir figure II.9).

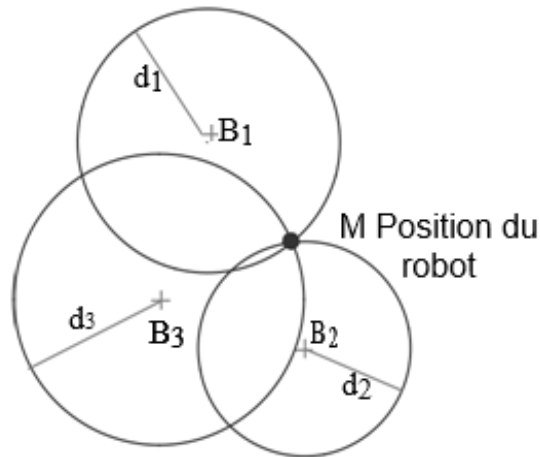


Figure II.9 Localisation par mesure des distances de trois balises (trilatération) [5].

-La démonstration des équations de cercles

Soit A un point Appartiennent au repère (O, \vec{i}, \vec{j}) avec des coordonnées (a, b) , M (x, y) appartenant au cercle de centre A et de rayon \overline{AM} et R le rayon de ce cercle, ce qui revient à dire:

$$R = AM \quad (\text{II.2})$$

Le vecteur \overline{AM} a pour coordonnées: $\overline{AM}(x - a; y - b)$

Donc:

$$\overline{AM} = (x - a)\vec{i} + (y - b)\vec{j} \quad (\text{II.3})$$

Puisque les vecteurs \vec{i} et \vec{j} sont de norme 1, et sont orthogonaux, nous appliquons le théorème de Pythagore pour obtenir la longueur AM, ce qui nous amène à l'équation :

$$AM^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 \quad (\text{II.4})$$

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (\text{II.5})$$

Nous prenons l'exemple de trois balises de coordonnées connues: $B_1(-3,-3)$, $B_2(4,1)$, $B_3(-3,3)$ et T un point de coordonnées (x_t, y_t) inconnues (figure II.10).

Nous cherchons à déterminer les coordonnées du point T en connaissant les longueurs de ce point par rapport à B_1, B_2 et B_3 :

$$B_1T = 5.83 \quad (\text{II.6})$$

$$B_2T = 4.12 \quad (\text{II.7})$$

$$B_3T = 3.16 \quad (\text{II.8})$$



Figure II.10 Localisation par mesure de distances de trois balises.

Nous traçons ensuite trois cercles de centre B_1, B_2, B_3 et de rayon égale à la distance respective de chaque point par rapport à T (figure II.11).

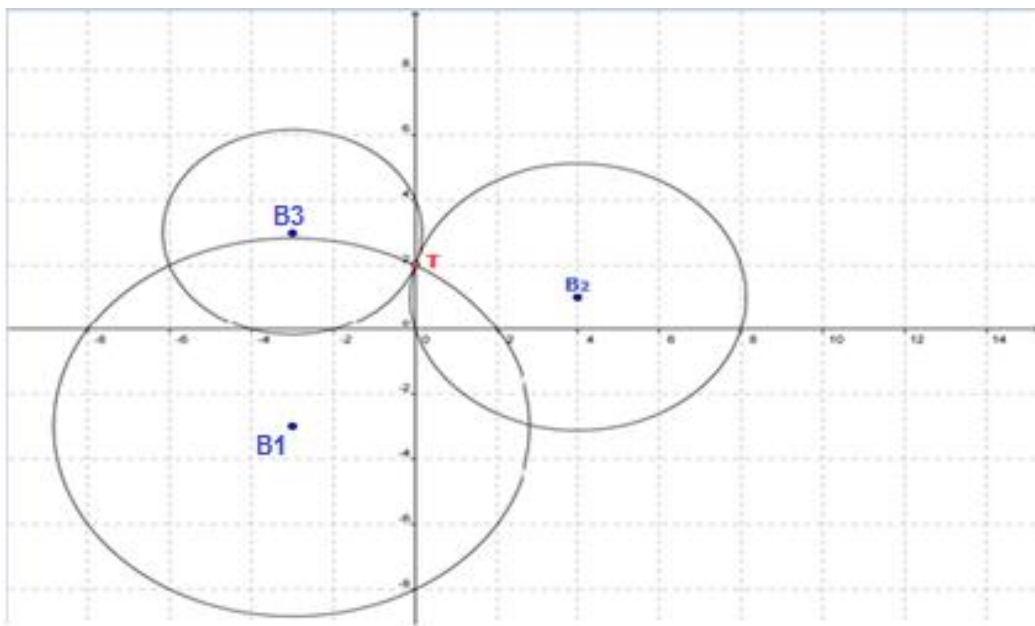


Figure II.11 Représentation de cercles.

Nous appelons le cercle de centre B_1 : b_1 , celui de centre B_2 : b_2 enfin celui de centre B_3 : b_3 .

Ces cercles ont pour équations:

$$b_1 : (x_t + 3)^2 + (y_t - 3)^2 = 34 \quad (\text{II.9})$$

$$b_2 : (x_t - 4)^2 + (y_t - 1)^2 = 17 \quad (\text{II.10})$$

$$b_3 : \quad (x_t + 3)^2 + (y_t - 3)^2 = 10 \quad (\text{II.11})$$

$$(x_t + 3)^2 + (y_t - 3)^2 - 34 = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$(x_t - 4)^2 + (y_t - 1)^2 - 17 = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$(x_t + 3)^2 + (y_t - 3)^2 - 10 = 0 \quad (\text{II.14})$$

Il s'agit maintenant de trouver l'équation de deux des droites au moins passant par les points d'intersections des cercles.

Nous avons l'équation (II.12) égale à l'équation (II.13) donc:

$$(x_t + 3)^2 + (y_t + 3)^2 - 34 = (x_t - 4)^2 + (y_t - 1)^2 - 17 \quad (\text{II.15})$$

$$x_t^2 + 6x_t + 9 + y_t^2 + 6y_t + 9 - 34 = x_t^2 - 8x_t + 16 + y_t^2 - 2y_t + 1 - 17 \quad (\text{II.16})$$

$$8y_t = -14x_t + 19 \quad (\text{II.17})$$

$$y_t = \frac{-14}{8}x_t + 12 \quad (\text{II.18})$$

Et l'équation (II.12) égale à l'équation (II.14) alors:

$$(x_t + 3)^2 + (y_t + 3)^2 - 34 = (x_t + 3)^2 + (y_t - 3)^2 - 10 \quad (\text{II.19})$$

$$x_t^2 + 6x_t + 9 + y_t^2 + 6y_t + 9 - 34 = x_t^2 + 6x_t + 9 + y_t^2 - 6y_t + 9 - 10 \quad (\text{II.20})$$

$$12y_t = 24 \quad (\text{II.21})$$

$$y_t = 2 \quad (\text{II.22})$$

Pour obtenir les coordonnées du point T, nous avons déjà son ordonnée $y_t=2$, il suffit de trouver la valeur de x_t en remplaçant l'équation (II.22) dans l'équation (II.18).

$$-\frac{14}{8}x_t + 2 = 2 \quad (\text{II.23})$$

$$-\frac{14}{8}x_t = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$x_t = 0 \quad (\text{II.25})$$

Donc le point T a pour coordonnées (0,2).

II.3.3.2 Triangulation

La triangulation permet d'évaluer la distance d'un point inconnu par rapport à deux autres points dont la distance les séparant est connue. Ce point est considéré comme un des sommets du triangle dans la figure II.12. Pour illustrer cette technique, basons-nous sur un exemple concret, ce sera plus aisé [12].

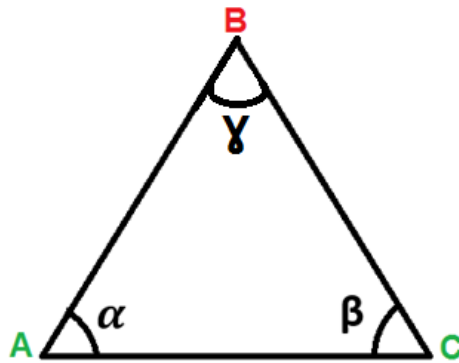


Figure II.12 Localisation du point B par triangulation.

Soit un triangle ABC, le point que nous cherchons est le point B. Nous connaissons les distances AB et BC ainsi que les angles α et β .

Il est simple de calculer l'angle γ , sachant que la somme des sommets d'un triangle est égale à 180° , donc: $\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$

Ensuite, c'est la loi des sinus que nous utilisons :

$$\frac{AC}{\sin \gamma} = \frac{AB}{\sin \beta} = \frac{BC}{\sin \alpha}$$

Ainsi, grâce à deux produits en croix, nous connaissons les distances AB et BC.

Pour connaître la distance entre le point B et AC.

$$AB = \frac{AC^2 + BC^2 - 2AC \times BC \times \cos(\beta)}{2AC \times \sin \beta} \quad (\text{II.26})$$

$$BC = \frac{AC^2 + AB^2 - 2AC \times AB \times \cos(\alpha)}{2AC \times \sin \alpha} \quad (\text{II.27})$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{AC^2 + BC^2 - AB^2}{2AC \times BC} \right) \quad (\text{II.28})$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{AC^2 + AB^2 - BC^2}{2AC \times AB} \right) \quad (\text{II.29})$$

Et nous savons que:

$$\gamma = 180 - (\alpha + \beta) \quad (\text{II.30})$$

$$\gamma = 180 - \left(\cos^{-1} \left(\frac{AC^2 + AB^2 - BC^2}{2AC \times AB} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{AC^2 + BC^2 - AB^2}{2AC \times BC} \right) \right) \quad (\text{II.31})$$

Cette technique est utilisée surtout en télémétrie optique, notamment dans le domaine militaire en l'absence de radar à l'aide de télémétrie.

Elle permet d'évaluer des distances importantes mais nécessite pour cela une distance importante entre eux pour obtenir des valeurs plus précises de mesure des angles.

II.4 Synthèse

Les technologies précédemment décrites admettent des avantages et des inconvénients justifiant leur emploi selon le contexte. Ces caractéristiques sont résumées dans le Tableau II.1 pour définir la meilleure technologie.

Technologie	Avantage	Inconvénient
Vision	<ul style="list-style-type: none"> -La rapidité d'acquisition. - La robustesse. - La miniaturisation qui facilite leur intégration. -Elle est très performante en termes de portée, précision, et quantité d'informations exploitables. 	<ul style="list-style-type: none"> -Courte portée du champ de vision. -L'inconvénient majeur de tels capteurs se situe au niveau de la gestion du flux important de données exploitables (traiter une image demeure une opération délicate et surtout coûteuse en temps de calcul). -Sensibilité aux conditions d'éclairage. -Possibilité de trouver plusieurs objets qui partagent les mêmes caractéristiques visuelles, il est donc capable de perdre sa cible.
GPS	<ul style="list-style-type: none"> -grande portée, où il couvre toute la surface de la terre. -infrastructure déjà existante. 	<ul style="list-style-type: none"> - La précision du GPS standard est de l'ordre de 3 à 15 mètres, ce qui n'est pas tolérable en milieu intérieur. -Y a une forte atténuation du signal à l'intérieur des bâtiments.
WIFI	<ul style="list-style-type: none"> - Grande portée - Infrastructure déjà existante - Chips Wi-Fi très répandus 	<ul style="list-style-type: none"> -Fluctuation de la puissance des signaux - Faible précision (de 2 à 5 mètres usuellement) - Phase de cartographie plutôt fastidieuse
UWB	<ul style="list-style-type: none"> - Excellente précision (dizaine de centimètres). - Bonne pénétration à travers les matériaux. -Très faible consommation énergétique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Portée limitée (<15m selon la norme)

II.5 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre une grande variété de méthodes de localisation qui diffèrent selon les capteurs utilisés. Le choix de la technique de localisation dépend de l'objectif de notre projet. La technique la plus adéquate qui permettra au robot mobile de localiser la cible (l'objet) en mouvement qu'il doit suivre à une distance que nous avons choisi précédemment, avec précision est le système de balise active car ses résultats sont plus fiables. La synthèse nous a permis de déduire que la technologie la plus adaptée travail est l'UWB.

Chapitre III Étude, conception et réalisation de robot ASKI

III.1 Introduction :

Rappelons l'objectif de notre travail qui a pour finalité de réaliser un robot mobile de transport pour des applications de la santé. Pour ce faire, nous présentons dans ce chapitre les différentes étapes de conception et réalisation du robot mobile ASKI que nous avons développé. Ce dernier comprend principalement deux parties: la partie électronique et la partie mécanique.

III.2 Partie électronique

Elle se compose à son tour de deux parties distinguées mais liées : une partie commande qui concerne le microcontrôleur et une partie opérative qui est constituée d'actionneurs et de capteurs [13].

La circulation des informations de la partie commande vers la partie opérative s'appelle la chaîne d'action. La circulation des informations de la partie opérative vers la partie commande s'appelle la chaîne d'acquisition. (Voir Figure III.1)

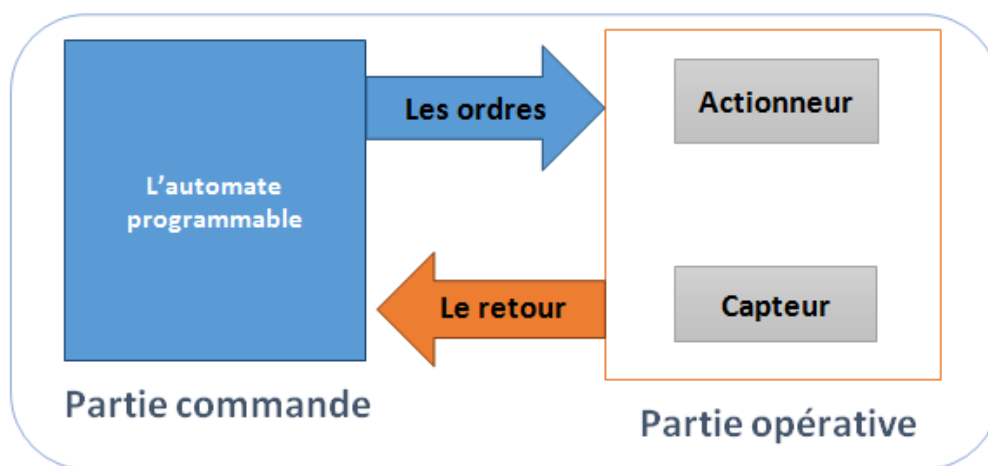


Figure III.1 Le schéma synoptique de système de la partie électronique.

La partie électronique que nous avons développée est structurée autour de l'architecture représentée dans la figure (III.2). Chaque partie de cette architecture possède une fonction précise que nous allons définir ci-dessous.

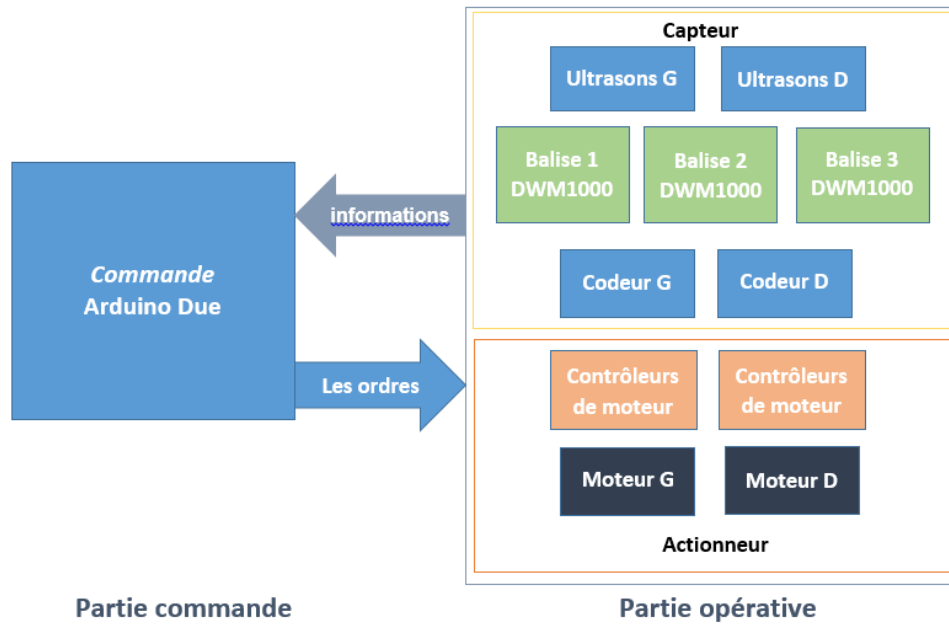


Figure III.2 Le schéma synoptique de la partie électronique.

III.2.1 La partie commande

Pour la commande de système, notre choix s'est porté sur des cartes Arduino [14] et cela pour leurs disponibilités et compatibilité avec les capteurs.

Il existe plusieurs modèles de cartes Arduino, nous avons exploité les modèles Arduino Mini et Arduino DUE où chacune gère des tâches bien spécifiques.

III.2.1.1 Arduino Pro Mini

La carte Arduino mini (voir Figure III.3) est une petite carte électronique (17 x33 mm) équipée d'un microcontrôleur ATmega328, avec une tension opérationnelle de 3.3v qui nous permet de fabriquer le tag sans avoir des convertisseurs de tension parce que le capteur "DWM1000" travail sur la tension de 3.3v. Nous allons utiliser la carte Arduino mini pour commander les tags.

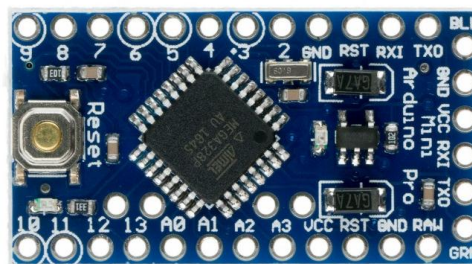


Figure III.3 La carte Arduino Pro Mini.

- **Spécifications techniques de la Arduino Pro Mini**

Le tableau (III.1) illustre tout les spécifications techniques de la carte Arduino Pro Mini.

Microcontrôleur	ATMega328
Tension opérationnelle	3.3 V
Tension d'entrée	7-9 V (prenez garde de ne jamais dépasser 9 V sous peine d'endommager gravement votre carte.)
Broches digitales	14 (dont 6 sorties PWM)
Broches d'entrée analogiques	8 (dont 4 broches connectées)
Courant continu par broche I/O	40 mA
Mémoire flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Fréquence d'horloge	8 MHz

Tableau III.1 Spécifications techniques de la carte Arduino Pro Mini.

III.2.1.2 Arduino Due

La carte Arduino Due (Figure III.4) est une carte très puissant basée sur une architecture ARM 32bit, comparée aux autres gammes d'Arduino qui sont basées sur ATmega, la carte Arduino Due accueille un microcontrôleur Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Elle possède 54 entrées/sorties numériques dont 12 peuvent être utilisées comme sorties PWM, 12 entrées analogiques, 4 ports série UART, une horloge à 84 MHz, une connexion compatible USB OTG, 2 DAC (digital to analog), 2 TWI, une prise jack, un header SPI, un header JTAG et enfin un bouton de reset et un bouton d'effacement. On va utiliser la Due pour faire gérer tout le robot.



Figure III.4 La carte Arduino Due.

▪ Caractéristiques techniques de la carte Arduino Due

Les principales caractéristiques de la carte Arduino Due sont présentées dans le tableau (III.2).

Microcontrôleur	AT91SAM3X8E
Tension de fonctionnement	3,3 V
Tension d'alimentation	7- 12 V
Tension d'alimentation (limites)	6 - 20V
Nombre d'entrées/sorties	54 (dont 12 pouvant générer un signal PWM)
Nombre de ports "Analogique/Numérique"	12
Nombre de ports "Analogique"	2 (DAC)
Courant maximal par E/S	130 mA
Courant pour broches 3.3 V	800 mA
Courant pour broches 5 V	800 mA
Mémoire Flash	512 KB
SRAM	96 KB (2 banques 64 KB et 32 KB)
Vitesse d'horloge :	84 MHz

Tableau III.2 Les caractéristiques technique de la carte Arduino Due.

III.2.2 La partie opérative

Cette partie regroupe à son tour deux parties: la partie capteurs et la partie actionneurs, comme illustrée dans le schéma synoptique de la figure (III.1).

III.2.2.1 La partie actionneur

Les actionneurs transforment l'énergie de puissance fournie au système en énergie physique nécessaire à la réalisation des tâches. Dans ce travail, c'est la motricité du robot qui nécessite les actionneurs, à savoir les moteurs Brushless.

- **Moteur Brushless**

Ce sont des moteurs synchrones alimentés en courant continu (DC) via un onduleur ou une alimentation à découpage qui produit de l'électricité sous forme de courant alternatif (AC) pour entraîner chaque phase du moteur via un contrôleur en boucle fermée. Le contrôleur fournit des impulsions de courant aux enroulements du moteur qui contrôlent la vitesse et le couple du moteur [15].

-Principe de fonctionnement

Dans ces moteurs, le rotor et le stator sont inversés par rapport à les moteur à courant continu, alors le stator est fabriqué avec des bobines et le rotor est fabriqué avec des aimant ça qui nous permet d'enlever les balais (Figure III.5), qui se trouve dans les moteur à courant continu. Son alimentation fait avec trois phases ou on trouve un capteur de position qui travaille avec les effets Hall, Le moteur est besoin de son contrôleur pour faire tourner, par rapport au courant continu qui a deux pôles. Il faut alimenter seulement pour faire travailler.

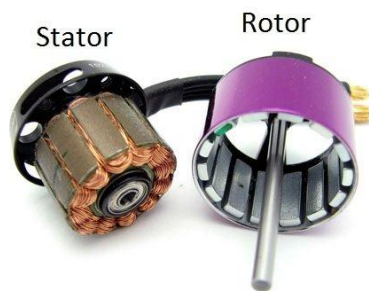


Figure III.5 La composition de moteur Brushless.

Le fonctionnement du moteur est basé sur l'attraction ou la répulsion entre les pôles magnétiques, dont le principe est illustré dans la figure (III.6). Le processus démarre lorsque le courant traverse l'un des trois enroulements du stator et génère un pôle magnétique qui attire l'aimant permanent le plus proche du pôle opposé. Le rotor se déplacera si le courant passe à un enroulement adjacent. La charge séquentielle de chaque enroulement fait suivre le rotor dans un champ tournant. Le couple dans cet exemple dépend de l'amplitude du courant, le nombre de tours sur les enroulements du stator, la force et la taille des aimants permanents, l'entrefer entre le rotor et les enroulements et la longueur du bras rotatif.

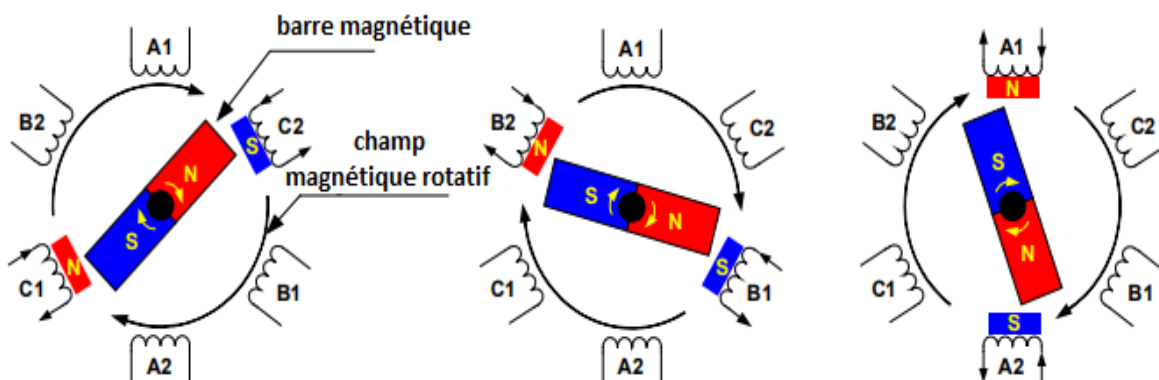


Figure III.6 Principe de fonctionnement d'un moteur Brushless étape par étape.

-Contrôleurs Brushless

Un moteur Brushless dispose de capteurs à effet Hall (trois en générale) pour détecter la position du rotor. En fonction de la position physique des capteurs à effet Hall, il existe deux types de sortie : un déphasage de 60 ° et un déphasage de 120 °. La combinaison de ces trois signaux de capteur à effet Hall peut déterminer la séquence de communication exacte.

La figure (III.7) montre la séquence de commutation d'un circuit de commande de moteur Brushless pour une rotation dans le sens antihoraire. Trois capteurs à effet Hall a, b et c sont montés sur le stator à des intervalles de 120 °, tandis que les enroulements triphasés sont en étoile. Pour chaque rotation de 60 °, l'un des capteurs à effet Hall change d'état, il faut six étapes pour terminer un cycle électrique complet. En mode synchrone, la commutation du courant de phase se met à jour tous les 60 °. Pour chaque étape, il y a une borne de moteurs entraîné en haut, une autre borne de moteur entraîné en bas, la troisième étant laissée flottante. Les commandes d'entraînement individuelles pour les conducteurs haut et bas permettent une commande haute, basse et flottante à chaque borne du moteur.

Cependant, un cycle de signal peut ne pas correspondre à une révolution mécanique complète. Le nombre de cycles de signal pour effectuer une rotation mécanique est déterminé par le nombre de paires de pôles du rotor. Chaque paire de pôles de rotor nécessite un cycle de signal dans une rotation mécanique. Ainsi, le nombre de cycles de signal est égal aux paires de pôles du rotor.

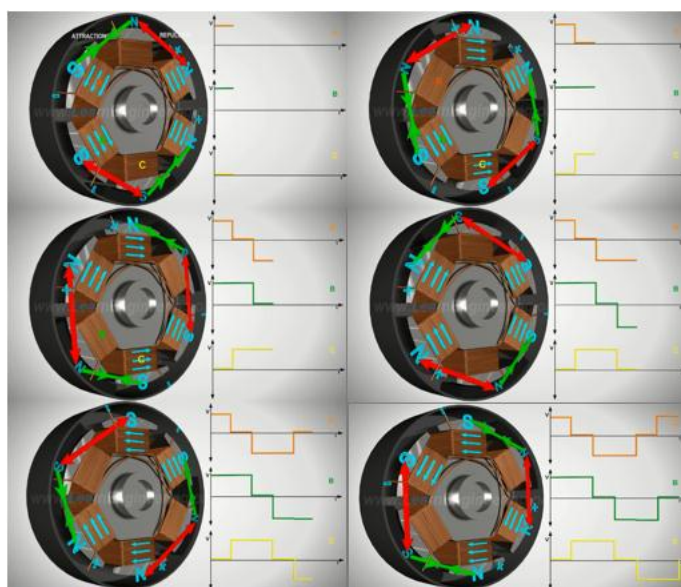


Figure III.7 Les Phases de rotation du moteur Brushless.

La figure (III.8) montre les chronogrammes où les enroulements de phase U, V et W sont soit excités soit flottés sur la base des signaux du capteur Hall a, b et c. Ceci est un exemple de signal de capteurs Hall ayant un déphasage de 120° l'un par rapport à l'autre, où le moteur tourne dans le sens antihoraire. La production d'un signal Hall avec un déphasage de 60° où la rotation du moteur dans le sens des aiguilles d'une montre nécessite une séquence de synchronisation différente. Pour faire varier la vitesse de rotation, des signaux de modulation de largeur d'impulsion PWM sont utilisés sur les commutateurs à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence de rotation du moteur. Généralement, la fréquence PWM doit être au moins 10 fois supérieure à la fréquence de rotation maximale du moteur.

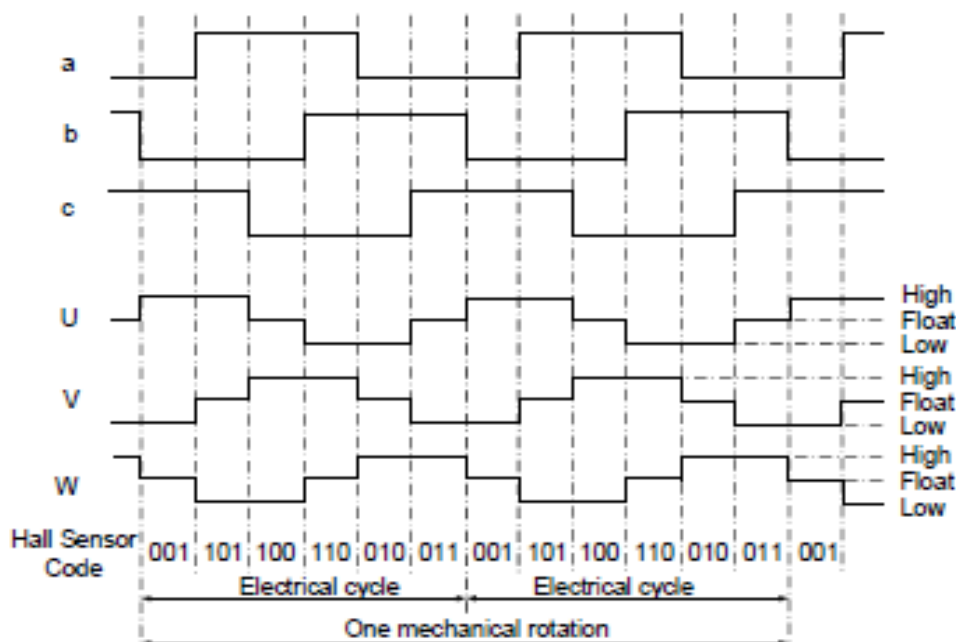


Figure 3.8 Le roulement séquentiel Entre le moteur et le contrôleur à chaque phrase [15].

III.2.2.2 La partie capteurs

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique à une grandeur électrique (tension). En effet, nous allons présenter dans cette section les différents capteurs utilisés dans ce projet pour des fonctions variées. Cette partie concerne les capteurs de distance, capable de détecter les obstacles présents dans l'environnement d'évolution du le robot. Pour cela on a trouvé la méthode d'ultrasons, après ça le choix de capteur qui est confident pour fais le travail de suivi (chapitre II).

- **Le capteur à ultrasons**

Pour éviter les obstacles, nous choisis ce capteur qui va calculer la distance entre le robot et les objets, le capteur à ultrasons HC-SR04 est utilisé, il est capable de mesurer la distance des objets situés de 2cm à 400cm du capteur avec une précision de 3mm. Le capteur est composé d'un émetteur d'ultrasons, d'un récepteur et du circuit de commande.

Le principe de fonctionnement du capteur HC-SR04 est comme suit (Figure III.9) [16] :

- Envoyer un signal numérique à l'état haut sur l'émetteur pendant 10 μ s.
- Le capteur envoie automatiquement 8 impulsions d'ultrasons à 40 kHz et détecte les signaux qui reviennent.
- Si le signal revient, la durée de l'état haut du signal reçu correspond au temps entre l'émission des ultrasons et leur réception. La distance est calculée par l'équation suivante : $Distance = (temps \text{ à l'état haut signal reçu} * vitesse \text{ du son})/2$.

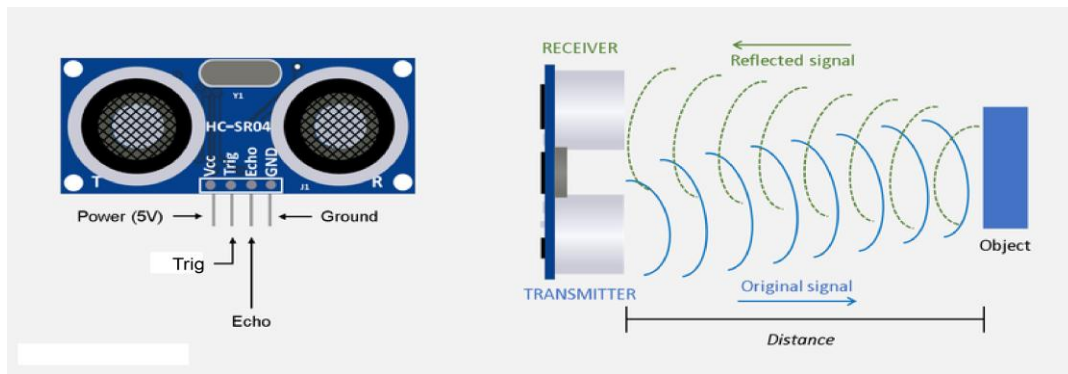


Figure III.9 Le module à ultrasons HC-SR04 et son principe de fonctionnement.

- **Le capteur DWM1000**

Le module DWM1000 représenté dans la figure (III.10) est basé sur le DW1000 Ultra de Decawave IC émetteur-récepteur large bande (UWB) (voir le datasheet en annexe A). Il intègre l'antenne, les RF circuits, gestion de l'alimentation et circuits d'horloge dans un seul module. Il peut être utilisé dans des systèmes de télémétrie bidirectionnels pour la localisation avec une précision de 10 cm et prend en charge des débits de données jusqu'à 6.8 Mbps.



Figure III.10 Le module DWM1000

Le principe de fonctionnement du DW1000 à bord du DWM1000 est un circuit intégré émetteur-récepteur CMOS RF à puce unique et faible consommation entièrement intégré conforme à la norme IEEE 802.15.4-2011 UWB. Le module DWM1000 ne nécessite aucune conception RF car l'antenne et les composants analogiques et RF associés se trouvent sur le module. Le module contient un cristal de référence embarqué de 38,4 MHz. Le cristal a été taillé en production pour réduire l'erreur de fréquence initiale à environ 2 ppm, à l'aide du réglage interne des cristaux sur puce du DW1000 IC circuit. La mémoire Always - On (AON) peut être utilisée pour conserver les données de configuration du DWM1000 pendant la plus faible puissance opérationnelle indiquée lorsque les régulateurs de tension sur puce sont désactivés. Ces données sont téléchargées automatiquement. L'utilisation de la mémoire DWM1000 AON est configurable. Les moniteurs de tension et de température sur puce permettent à l'hôte de lire la tension sur la broche VDDAON et l'information de température interne de la matrice du DW1000.

- **Les codeurs**

Les codeurs permettent de fournir des informations sur la position, la vitesse et le positionnement du robot.

Selon la technologie, il existe plusieurs types de codeurs, parmi eux : le codeur à effet hall et le plus commun le codeur optique (incrémental et absolu) [17].

- **Le codeur effet hall**

Ce type de codeurs magnétiques détectent des angles jusqu'à 360° sur une base à effet Hall et sont donc appelés codeurs moniteur [18]. Les valeurs mesurées sont enregistrées sans contact. Cela signifie que c'est sans aucun contact mécanique ou électrique entre l'arbre et l'électronique d'évaluation. La technologie des capteurs fonctionne donc sans usure, a une durée de vie presque infinie, qui n'est limitée que par la mécanique (Figure III.11). Le capteur fournit des résultats de mesure constants et offre de nombreux avantages. Les codeurs dotés de puces Hall modernes sont largement sensibles aux champs magnétiques externes ou aux changements de température. Le large choix d'interfaces électroniques ouvre de nombreux domaines d'application et certains types permettent même un paramétrage direct par le client sur site.

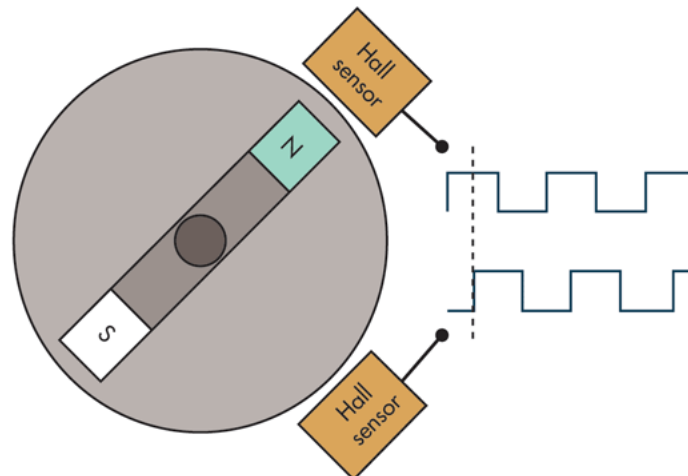


Figure III.11 Codeur à effet Hall.

- Le codeur optique

Le codeur est un dispositif électromécanique délivrant, sous forme numérique, un signal de mesure de déplacement linéaire ou angulaire. Il existe deux types de codeurs rotatifs :

- Le codeur absolu : qui intègre son propre compteur. Ce genre de capteur est généralement calibré et initialisé une seule fois, et il conserve pour certain sa valeur lors de l'arrêt de l'appareil. C'est le cas des compteurs kilométriques des automobiles à la différence du "compteur journalier" qui peut être remis à zéro par l'utilisateur.
- Le codeur incrémental (ou générateurs d'impulsions) : qui ajoute ou soustrait (selon le sens de rotation) Chaque codeur il est caractérisé avec un nombre d'impression dans Une tour. Le compteur est généralement remis à zéro lorsque l'appareil est allumé. C'est le cas de la souris d'ordinateur à boule.

Dans notre situation nous avons utilisé le codeur incrémental, par ce que nous n'avons pas besoin d'enregistrer les positions, à chaque fois nouvelle données sont requises lors de la mise sous tension du robot. Le codeur optique incrémental est probablement le dispositif de feedback de position le plus populaire dans les systèmes servo modernes (Des moteurs à asservissement interne). Les codeurs optiques apposent un masque opaque sur le rotor, au fur et à mesure que le rotor change de position, le motif de la lumière traversant le masque change. Le codeur produit des impulsions électroniques lorsque l'intensité lumineuse varie de haut en bas à un certain point de consigne. Le masque optique est conçu pour produire un motif cyclique de variation qui se répète des centaines ou des milliers de fois pour chaque révolution du moteur.

Le résultat est que le codeur incrémental produit généralement entre 250 et 5000 comptes d'informations de position pour chaque tour de moteur. Ces impulsions sont produites proportionnellement à la distance parcourue par le codeur. Les impulsions sont comptées dans le système de contrôle pour déterminer la distance parcourue par le rotor du codeur [17].

Un codeur incrémental crée deux trains d'impulsions A et B. Lorsque l'arbre du codeur fait tourner une roue codée, ces trains d'impulsions peuvent être créés par des capteurs de lumière (LED et phototransistors ou photodiodes) comme illustré dans la figure (III.12). La roue codée pourrait être un matériau opaque avec des fentes ou un matériau transparent (verre ou plastique) avec des lignes opaques.

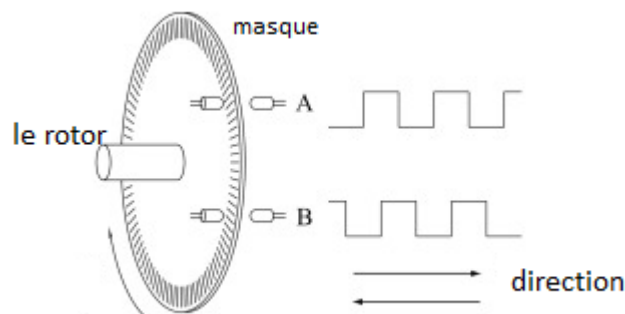


Figure III.12 Un codeur optique rotatif avec les trains d'impulsions déphasés créés.

III.2.3 La source d'énergie (batterie lithium)

La source d'énergie utilisée pour alimenter le robot est une batterie lithium apparue en 1991, ce type de batterie a ont une grande capacité de stockage dans un faible volume avec un faible poids.

Il existe différentes variantes : le LCO (Lithium cobalt), a apparu ensuite le LMO (lithium manganèse) et le NMC (nickel manganèse cobalt) [19].

Les batteries lithiums été très rapidement utilise pour toutes les applications nomades (téléphone portable, ordinateur portable, etc.) fortement appréciées sa grande capacité massique. Son point faible est sa dangerosité, où elle n'accepte pas de surcharge sous peine d'exploser. C'est pourquoi une gestion électronique est nécessaire pour éviter ce phénomène. Elles ne supportent pas non plus de chocs trop violents ou un percement qui entraine immédiatement un enflamment de la batterie.

Cette technologie est très performante mais peut s'avérer très dangereuse. Son point fort est son prix et sa grande densité énergétique. Une batterie lithium est composée de plusieurs piles individuelles connectées les unes aux autres. À son tour, chaque pile comprend trois éléments principaux : une électrode positive (une cathode), une électrode négative (une anode) et un électrolyte liquide comme illustrée dans la Figure (III.13).

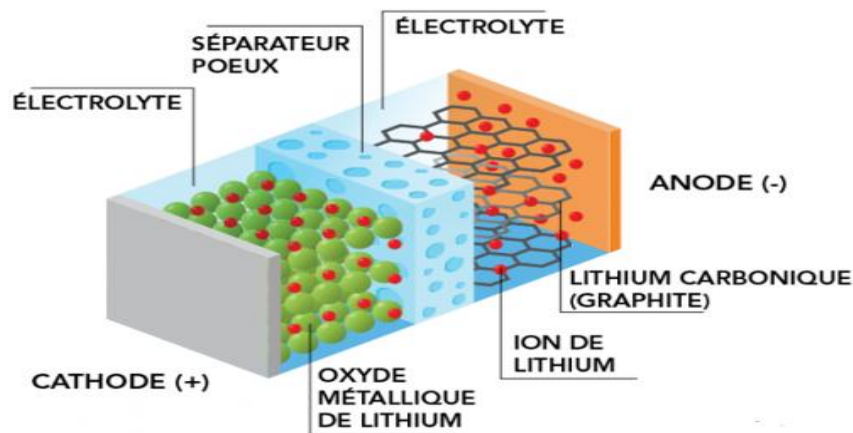


Figure III.13 Les composants d'une batterie lithium [18].

III.2.4 Le câblage du module DWM1000

Concernent le tag (le module à placer sur l'objet à suivre) et les balises (Qui est situé à l'intérieur de robot), le capteur DWM1000 est câblé avec la carte Arduino Mini et une petite batterie de 3.3 volt (Figure III.14).

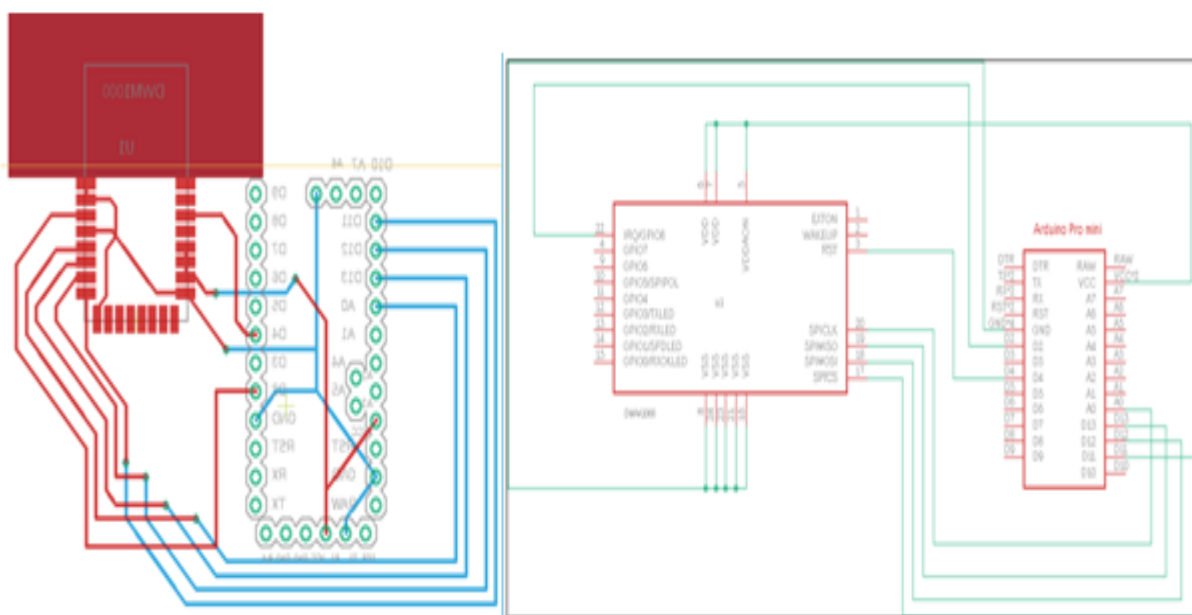


Figure III.14 Câblage du capteur dwm1000.

III.2.5 Le câblage globale

Dans le montage global, nous avons utilisé une carte de liaison monte sur la carte Arduino qui est la carte de commande. Cette carte me permet de relie la partie opérative avec la partie commande par l'utilisation des pins pour raccorder chaque composant.

Nous allons commencer par le capteur ultrason qui besoin pour la communication des portes analogiques. Après nous allons passer à l'encodeur qui est connecté avec les pins d'entrées interruptions et pour les balises nous avons utilisé 2 pin de communication entre Arduino mini l'Arduino Die (tx ,rx), et on termine avec le raccordement des contrôleurs moteur ou nous allons avoir 2 pins: la première PIN pour la vitesse et la deuxième pour le sens lui-même il va rattacher avec le moteur (Figure III.15).

Tous les composants mentionnés précédemment besoin d'une alimentation de 5V.

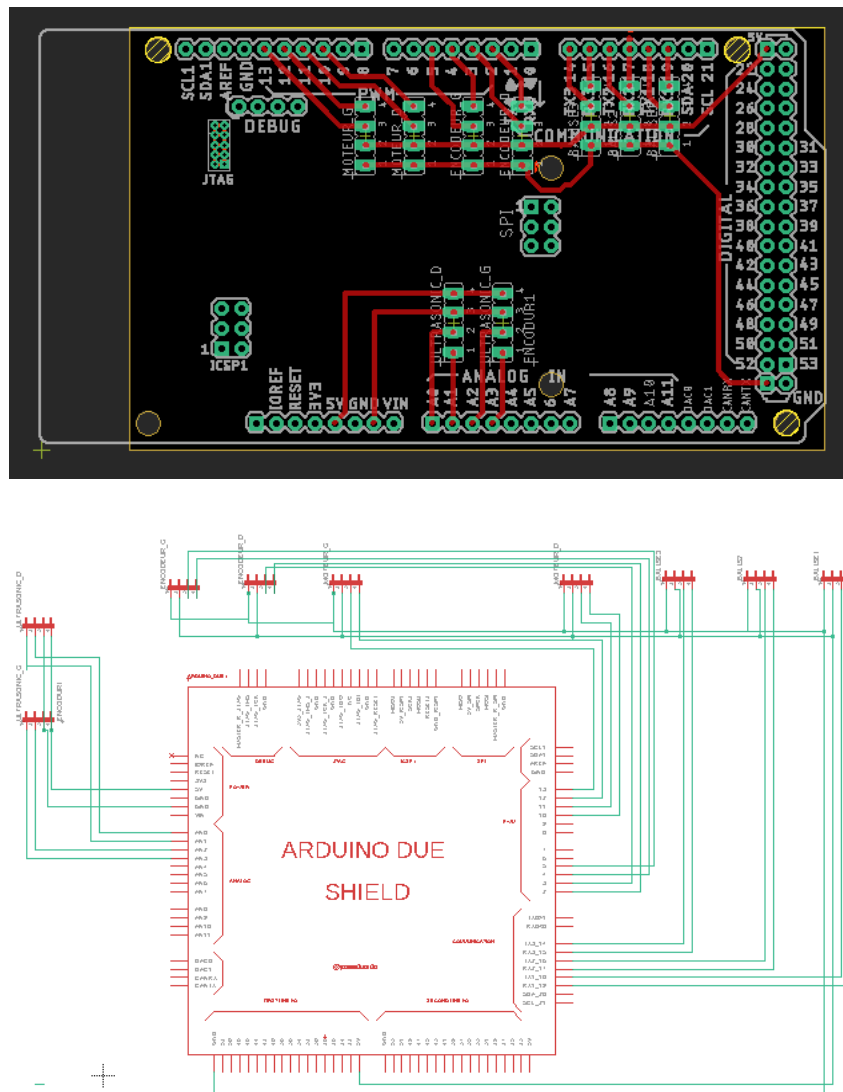


Figure III.15 La carte du câblage final avec Arduino Due.

III.3 Partie mécanique

III.3.1 Le châssis

Afin d'atteindre les objectifs visés dans ce travail, il est nécessaire de développer une plateforme mobile qui peut d'une part se mouvoir facilement dans des milieux hospitaliers (présence de couloirs étroits, petites salles, etc.) et d'autre part supporter des grandes charges. Pour ce faire, le châssis du robot a été développé de manière à respecter ces deux contraintes. Il a été réalisé à partir d'une plaque en aluminium de 0,4 mm coupée avec une découpeuse laser, comme illustré dans la figure (III.16). Sa conception a été effectuée en utilisant de logiciel "SolidWorks" telle que présentée dans la figure (III.17). Il a une forme circulaire pour faciliter sa motricité dans les endroits étroits. Les dimensions du châssis sont comme suit :

- Longueur est 600mm
- La largeur entre la première la deuxième roue est 500mm

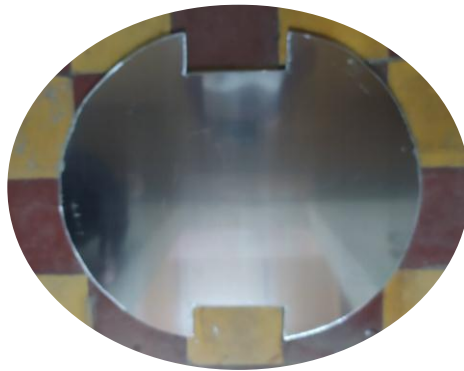


Figure III.16 Le châssis fabriqué en aluminium.

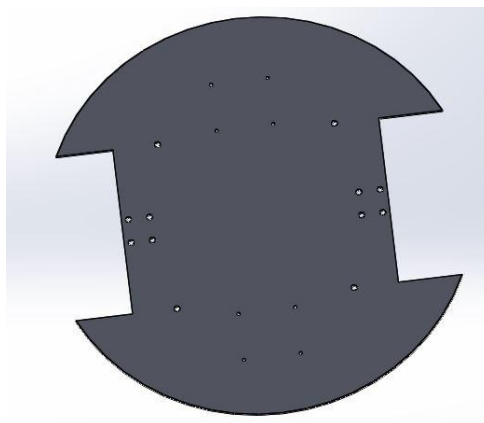


Figure III.17 La conception de châssis sous "SolidWorks".

Concernant la contrainte liée à la charge, il est primordial d'équiper le châssis de moteurs adaptés. Ainsi, notre choix s'est porté sur des moteurs de types Brushless. De plus, ces moteurs sont intégrés aux roues, ce qui permet de gagner en espace. Cette configuration vérifie les caractéristiques suivantes :

- La charge admissible est 100kg.
- La puissance est 350W.
- La vitesse maximale est 15 km/h.

Les roues sont fixées sur le châssis selon le modèle différentiel [10] (Figure III.18), en plus de deux roues folles pour assurer la stabilité (Figure III.19).



Figure III.18 Le châssis avec les moteurs.



Figure III.19 La roue folle.

Une fois les roues motorisées fixées, les encodeurs sont reliés à ces dernières via un engrenage conique à denture droite pour arbres concourants perpendiculaires (figure III.20).



Figure III.20 Encodeur placée sur le support.

Le placement finale de l'encodeur dans sur le châssis est montrée dans la figure (III.21).



Figure III.21 Le placement finale de l'encodeur sur le châssis.

À la fin Le châssis est prêt pour le montage final de la partie électrique sur ASKI, nous allons rassembler la carte de commande Arduino Due, la carte de liaison, les ultrasons même la batterie lithium (tension de 36V et sa Capacité de 144WH) et les contrôleurs de le moteur Brushless (figure III.22).

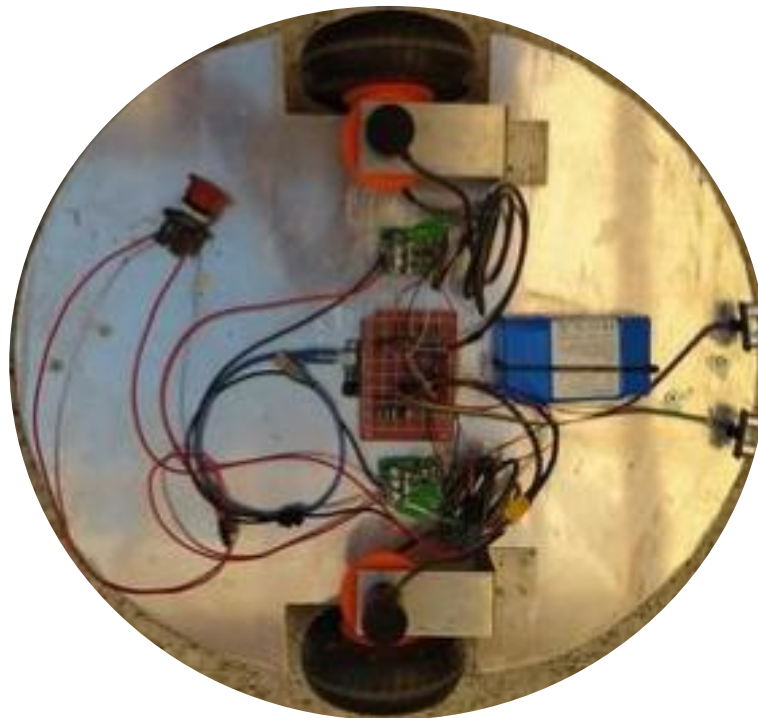


Figure III.22 La fixation finale de l'encodeur sur le châssis.

III.3.2 La coque

Pour couvrir la plateforme développée, nous avons confectionné une coque dont la conception sous "SolidWorks" est présentée dans la figure (III.23). Pour la fabrication de cette coque, nous avons utilisé la fibre de verre pour sa solidité et sa facilité à manipuler.

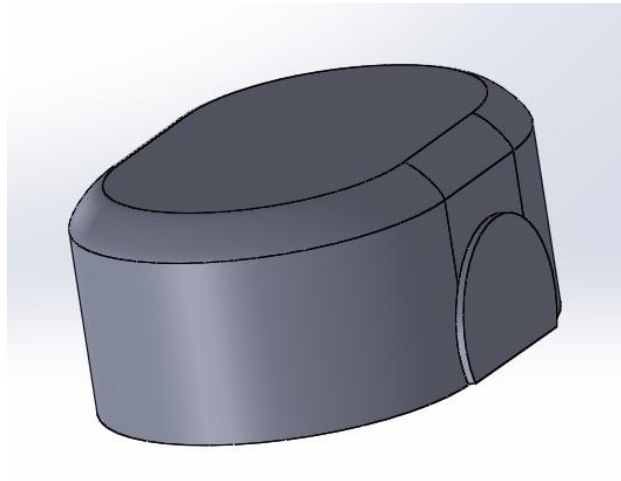


Figure III.23 La conception de coque sous "SolidWorks".

III.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception et réalisation du robot mobile ASKI. Il été principalement structuré en deux parties la première partie concernait l'architecture électronique du robot. La seconde partie quant à elle concernait sa structure mécanique. Une fois le robot réalisé, il devient possible de mettre en œuvre l'application de suivi qui fait l'objet de ce travail et qui sera détaillée dans le chapitre IV.

Chapitre IV Implémentation de l'approche de suivi

IV.1 Introduction

Tout système à régler possède un régulateur, qu'il soit analogique ou numérique. Ce régulateur a pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

Dans ce chapitre nous allons étudier la régulation et la commande du système.

IV.2 Définitions et généralités sur la régulation

La régulation est une action qui regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique (ex. température, vitesse, pression, etc.) appelée grandeur réglée à sa valeur de consigne, en tenant compte des perturbations et en agissant sur une autre grandeur physique, appelée grandeur réglant. Il existe quatre grandeurs qui jouent un rôle essentiel dans la régulation :

- **La grandeur réglée** : C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Le terme régulation est dérivé de son nom. Par exemple : régulation de vitesse.
- **La consigne** : C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** : ce sont les grandeurs physiques susceptibles d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée. Par exemple : l'influence de la température extérieure sur le système de chauffage interne.
- **La grandeur réglant** : c'est la grandeur de commande qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Par exemple le débit d'eau dans le système de chauffage.

De plus, la régulation est basée sur quatre paramètres essentiels. Le bon contrôle de ces quatre paramètres explique la bonne marche d'un système. Ces paramètres sont :

- Le temps de réponse noté t_d : c'est le temps nécessaire pour atteindre la valeur finale (désirée).
- La stabilité du système : un système est dit stable s'il converge vers une valeur finie.
- Le dépassement : un système ne peut jamais suivre la consigne à 100%. Il existe un dépassement de la valeur de la consigne appelé (dépassement) qui s'exprime en pourcentage. Le système est dit bien réglé si le dépassement ne dépasse pas 16% [20].

- La précision : c'est l'écart de positionnement à l'infinie.

Pour réguler un système physique, il faut :

- Mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- Réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- Agir sur la grandeur réglant par l'intermédiaire d'un organe de réglage [21].

-Fonctionnement en boucle ouverte

On parlera de fonctionnement en boucle ouverte quand la mesure de la grandeur réglée n'est pas utilisée. Ceci n'est pas une régulation. (Lier le texte à la figure (IV.1) qu'il faut citer aussi dans le texte).

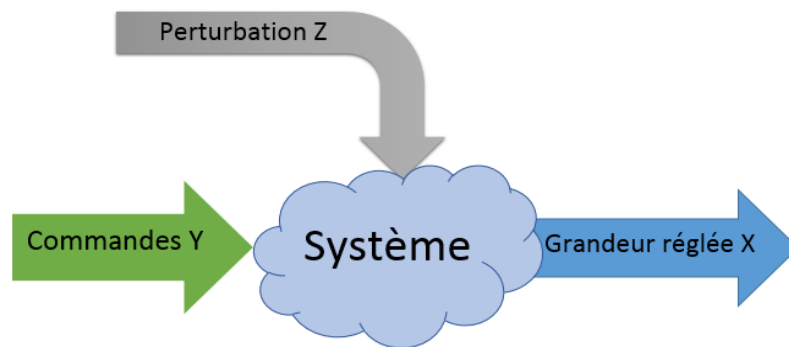


Figure IV.1. Fonctionnement en boucle ouverte.

-Fonctionnement en boucle fermée

La commande en boucle fermée est une forme de contrôle d'un système qui intègre la réaction de ce système.

- **Objectifs** : c'est de rendre le système bouclé robuste aux variations du système et rejeter les perturbations.
- **Principe** est mesurer la sortie pour ajuster la commande par un régulateur (voir Figure IV.2).

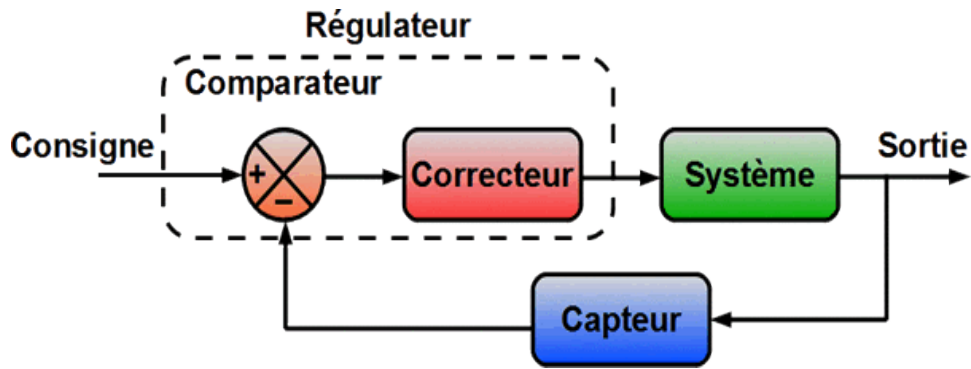


Figure IV.2 Fonctionnement en boucle fermée.

IV.2.1 Le signal de contrôle PWM

La technique de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation (PWM)) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. Le signal généré peut servir à commander un circuit de puissance.

Il existe deux types de PWM :

- **PWM asymétrique :**

La figure 4.3 montre le fonctionnement de la PWM asymétrique. Une porteuse triangulaire possède une seule pente et elle est comparée à un signal de consigne, par exemple un échelon. Le signal de consigne doit avoir une fréquence bien plus petite que la porteuse. Le signal de sortie est au niveau haut (5V) lorsque la consigne est supérieure à la porteuse, bien qu'il soit au niveau bas (0V) lorsque la consigne est inférieure à la porteuse.

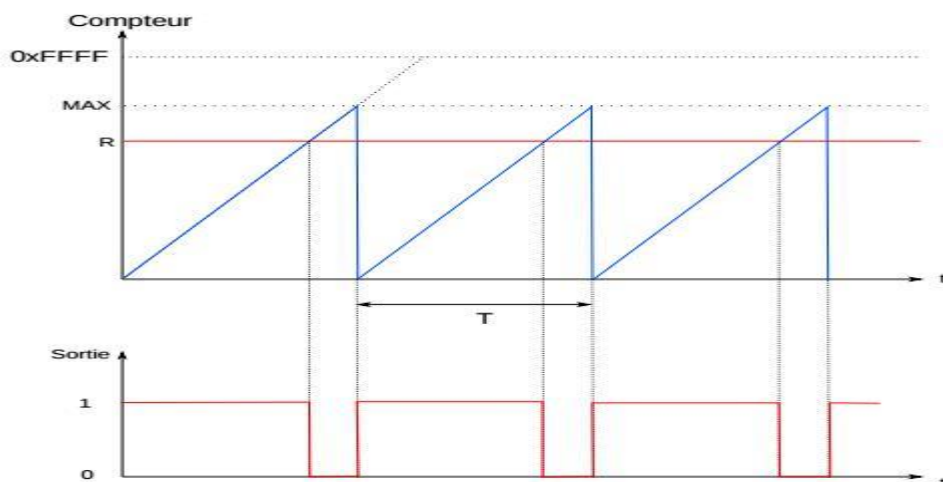


Figure IV.3 Signal PWM asymétrique [21].

Une porteuse triangulaire possède deux pentes. Le signal de sortie est au niveau haut lorsque la consigne est supérieure à la porteuse, ou le signal de sortie est au niveau bas lorsque la porteuse est supérieure à la consigne (voir Figure IV.4). Appelons consigne le signal d'entrée et porteuse le signal de référence.

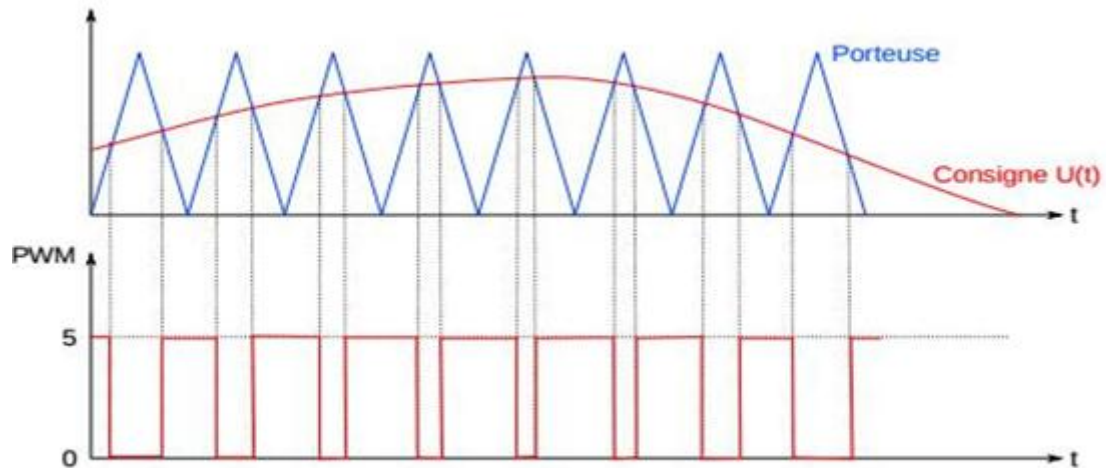


Figure IV.4. Signal PWM symétrique [21].

IV.2.2 Le régulateur PID

Cette partie concerne l'étude des actions du module PID composé par les trois actions de base. Nous mettrons en évidence l'effet de chaque action dans une boucle de régulation, ses avantages ainsi que ses limitations. Le régulateur dont la fonction de transfert est désigné par $C(p)$ est situé avant le système à régler $G(p)$.

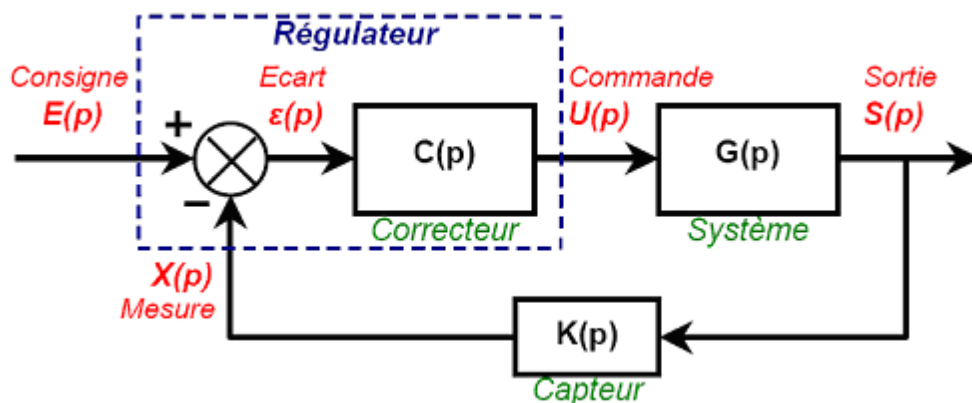


Figure IV.5 Schéma fonctionnel d'un système de régulation.

Le régulateur a pour charge de maintenir le signal d'écart $\varepsilon(p)$ aussi proche de zéro que possible, dans le but de fournir au système à régler la commande $U(p)$ telle que l'image $S(p)$ de la grandeur réglée obtenue par mesure tend à correspondre à la consigne $E(p)$. La commande $U(p)$ est construite sur la base des signaux de consigne $E(p)$ et de mesure $S(p)$ de la grandeur réglée selon la loi de commande : $U(p) = U(E(p), S(p))$.

IV.2.3 Description des actions du PID

IV.2.3.1 Action proportionnel P

Le régulateur à action proportionnelle ou régulateur P a une action simple, puisqu'il construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $e(t)$. Le rapport erreur/commande désigne le gain du système asservi K_p . L'augmentation du gain K_p influe sur le système, il peut accélérer la réponse du système mais, il peut aussi dégrader la stabilité (risque d'instabilité).

–Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = K_p \times e(t) \quad (\text{IV.1})$$

– Fonction de transfert du régulateur P :

$$G_s(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \quad (\text{IV.2})$$

–La représentation d'un régulateur P par son schéma fonctionnel est représentée dans la figure (IV.6).

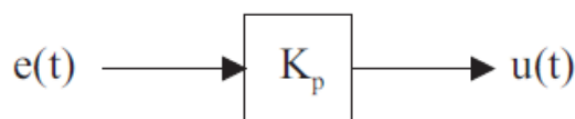


Figure IV.6 Schéma fonctionnel du régulateur.

Il est clair que le régulateur P assure une transmission instantanée du signal d'erreur. Dans ce sens, son action est relativement dynamique : sa commande ne dépend pas du passé d'une tendance, mais simplement de ce qui se passe à l'instant actuel.

IV.2.3.2 Action intégrale I

L'anomalie d'entrée et sortie du système, même contre-réactions par un régulateur P, pouvait présenter une erreur permanente en régime permanent.

L'intervention de cette erreur lorsque les signaux d'entrée sont constants est désignée par erreur statique. Pour remédier au problème du statisme la solution consiste à intégrer l'erreur [22].

L'action intégrale permet d'annuler l'erreur de position, mais elle peut provoquer des oscillations et des dépassements en régime permanent et même diminuer la stabilité du système [20].

Loi de commande du régulateur I :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{IV.3})$$

Fonction de transfert du régulateur I :

$$G_c = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{1}{T_i p} \quad (\text{IV.4})$$

La représentation d'un régulateur I par son schéma fonctionnel est illustrée dans la figure (IV.7).

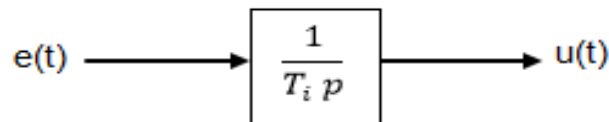


Figure IV.7 Réponse indicielle du régulateur I.

La réponse indicielle du régulateur I :

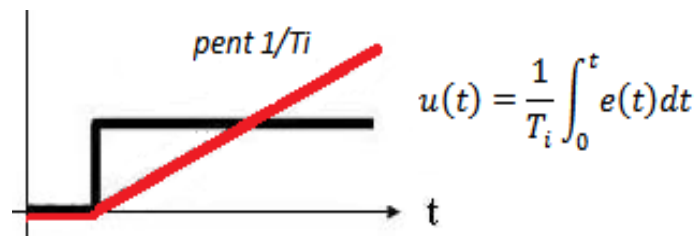


Figure IV.8 La réponse indicielle du régulateur I.

IV.2.3.3 Action dérivé D

L'action du régulateur D n'intervient que sur la dérivée de l'erreur, c'est-à-dire qu'elle est sensible à la variation de l'erreur et non à l'erreur elle-même. Lorsque celle-ci est constante (régime statique), le dérivateur n'a aucun effet [22]. L'avantage de ce type de correcteur est d'améliorer la stabilité du système [20].

Loi de commande du régulateur D :

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{IV.5})$$

Fonction de transfert du régulateur D :

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = T_d p \quad (\text{IV.6})$$

La représentation d'un régulateur D par son schéma fonctionnel est illustrée dans la figure (IV.9).

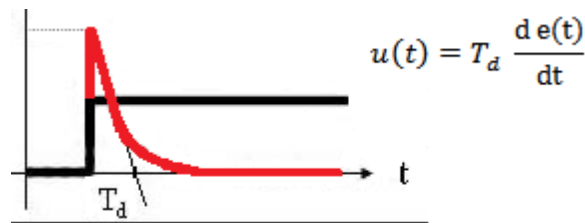


Figure IV.9 La réponse indicielle du régulateur I.

IV.3 Implémentation sur le robot

Le rôle du robot que nous avons réalisé est de suivre un objet en mouvement en gardant une distance fixe qui le sépare de lui. Pour ce faire, nous avons introduit le régulateur PID qui a la possibilité de corriger l'erreur de différence entre la consigne et la valeur mesurée (Figure IV.10). Cette dernière est obtenue grâce aux trois capteurs dw1000 embarqués sur le robot (voir chapitre III). Chaque capteur fournit une distance entre lui et l'objet à suivre (le tag). En effet, la méthode de Trilatération présentée dans le chapitre II est utilisée pour calculer les coordonnées du tag (Figure IV.11).

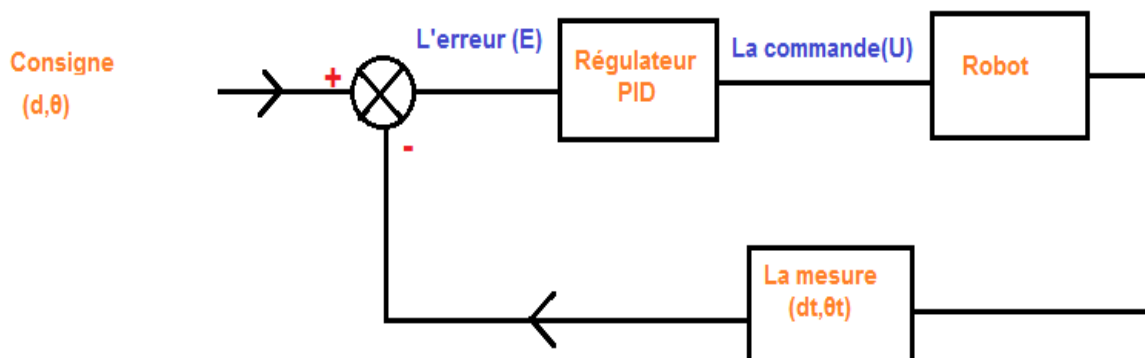


Figure IV.10 Schéma synoptique de contrôle du robot.

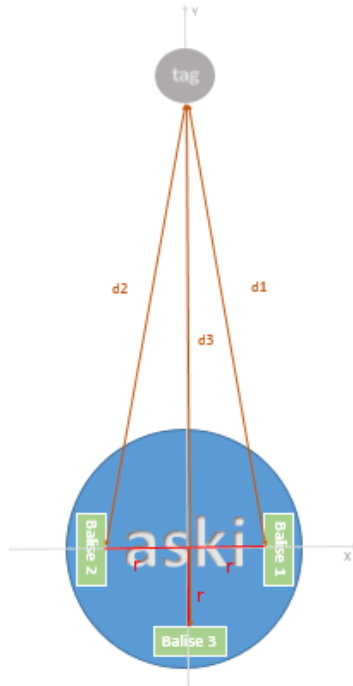


Figure IV.11 Repérage de l'objet mobile (tag) par rapport au robot.

Les différents paramètres présentés dans schéma de la (Figure IV.10) sont les suivants :

- d : la distance que le robot doit garder par rapport au tag.
- θ : l'angle que le robot doit garder par rapport au tag.
- E : l'erreur calculée entre la consigne et la mesure.
- U : Le signal de contrôle après traitement et correction du PID.
- dt : la distance calculée grâce aux trois capteurs dw1000.
- θt : l'angle calculé grâce aux trois capteurs dw1000.

Calcul de dt et θt :

$$dt = \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \quad (IV.7)$$

$$\theta t = \tan^{-1} \frac{y_t}{x_t} \quad (IV.8)$$

Avec x_t et y_t les coordonnées de l'objet par rapport au robot, à calculer avec la méthode de Trilatération (Figure IV.11).

Soit "balise 1", "balise 2" et "balise 3" les balises embarquées sur le robot. Leurs-coordonnées sont exprimées comme suit:

- **Balise1:** $b1 (r, 0)$
- **Balise2:** $b2 (-r, 0)$
- **Balise3:** $b3 (0, -r)$

Avec:

- r : le rayon du robot (le robot circulaire).
- d_1 : la distance mesurée par la balise 1 (capteur dw1000).
- d_2 : la distance mesurée par la balise 2 (capteur dw1000).
- d_3 : la distance mesurée par la balise 3 (capteur dw1000).

Nous traçons ensuite trois cercles de centre **Balise1**, **Balise2**, **Balise3** et de rayon égale à la distance respective de chaque point par rapport à T (Figure IV.12).

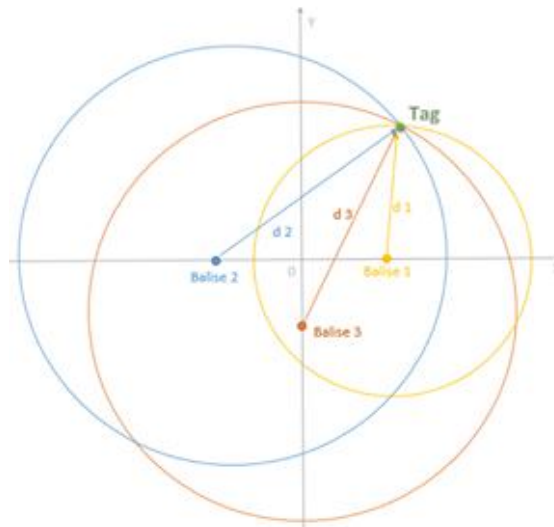


Figure IV.12 Représentation des cercles.

Ces cercles ont pour équations :

$$\text{Balise 1:} \quad d_1^2 = (x_t - r)^2 + (y_t - 0)^2 \quad (\text{IV.9})$$

$$\text{Balise 2:} \quad d_2^2 = (x_t + r)^2 + (y_t - 0)^2 \quad (\text{IV.10})$$

$$\text{Balise 3:} \quad d_3^2 = (x_t - 0)^2 + (y_t + r)^2 \quad (\text{IV.11})$$

$$d_1^2 = x_t^2 + r^2 - 2x_tr + y_t^2 \quad (\text{IV.12})$$

$$d_2^2 = x_t^2 + r^2 + 2x_tr + y_t^2 \quad (\text{IV.13})$$

$$d_3^2 = x_t^2 + y_t^2 + r^2 + 2y_tr \quad (\text{IV.14})$$

$$d_1^2 - x_t^2 - r^2 + 2x_tr - y_t^2 = 0 \quad (\text{IV.15})$$

$$d_2^2 - x_t^2 - r^2 - 2x_tr - y_t^2 = 0 \quad (\text{IV.16})$$

$$d_3^2 - x_t^2 - y_t^2 - r^2 - 2y_t r = 0 \quad (\text{IV.17})$$

Mettons l'équation (IV.15) égal à l'équation (IV.16)

$$d_1^2 - x_t^2 - r^2 + 2x_t r - y_t^2 = d_2^2 - x_t^2 - r^2 - 2x_t r - y_t^2 \quad (\text{IV.18})$$

$$d_1^2 - d_2^2 + 4x_t r = 0 \quad (\text{IV.19})$$

Donc:

$$x_t = -\frac{(d_1^2 - d_2^2)}{4r} \quad (\text{IV.20})$$

Et pour y_t l'équation (IV.16) égal à l'équation (IV.17)

$$d_2^2 - x_t^2 - r^2 - 2x_t r - y_t^2 = d_3^2 - x_t^2 - y_t^2 - r^2 - 2y_t r \quad (\text{IV.21})$$

$$d_2^2 - d_3^2 - 2x_t r = -2y_t r \quad (\text{IV.22})$$

$$d_2^2 - d_3^2 + \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{2} = -2y_t r \quad (\text{IV.23})$$

$$y_t = \frac{-1}{2r} \left(d_2^2 - d_3^2 + \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{2} \right) \quad (\text{IV.24})$$

Résultats :

Les coordonnées de l'objet (x_t, y_t) par rapport au robot sont :

$$x_t = -\frac{(d_1^2 - d_2^2)}{4r} \quad (\text{IV.25})$$

$$y_t = \frac{-1}{2r} \left(d_2^2 - d_3^2 + \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{2} \right) \quad (\text{IV.26})$$

Nous pouvons donc calculer la distance d_t et l'angle θ_t .

IV.3.1 Déplacement du robot

Le déplacement du robot se fait par deux moteurs comme illustré dans le chapitre 3. Le robot doit garder une distance et un angle fixe de la cible (tag), il a alors besoin de se déplacer tout en respectant ses contraintes cinématiques. Pour ce faire, la vitesse angulaire du moteur droit et du moteur gauche doivent être calculées en conséquence, en utilisant le modèle cinématique du robot (Figure IV.13). Notons que le modèle cinématique du robot ASKI correspond au modèle différentiel.

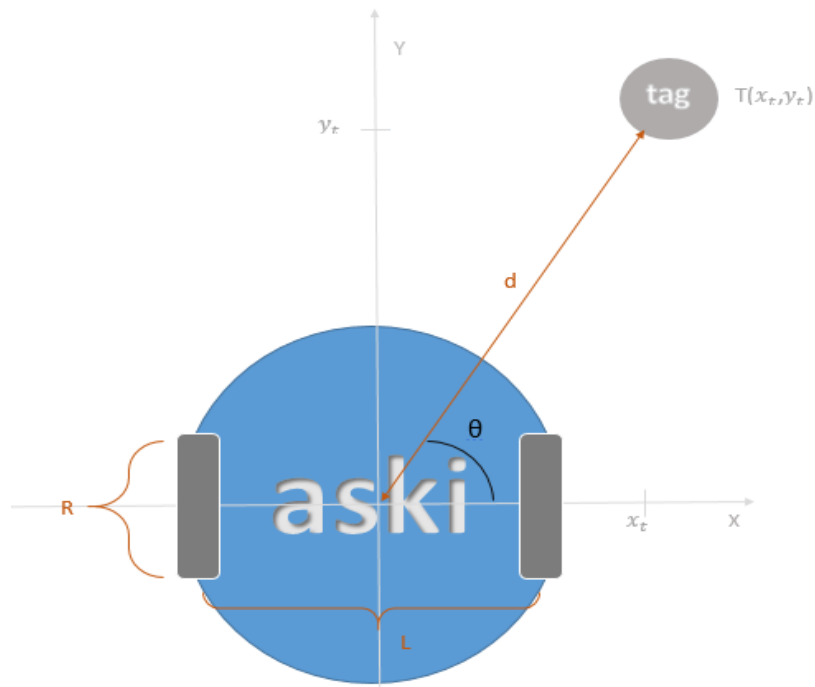


Figure IV.13 Déplacement du robot vers l'objet.

- Calcul des vitesses angulaire v_g et v_d [23]:

Nous avons:

$$x = d \times \cos \theta \quad (IV.27)$$

$$y = d \times \sin \theta \quad (IV.28)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (IV.29)$$

Avec :

- d : la distance entre le robot et l'objet.
- θ : l'angle entre le robot et l'objet.

En appliquant la dérivée, nous obtenons:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d(d \times \cos \theta)}{dt} \quad (IV.30)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{d(d \times \sin \theta)}{dt} \quad (IV.31)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w \quad (IV.32)$$

On trouve

$$x' = v \times \cos \theta \quad (IV.33)$$

$$y' = v \times \sin \theta \quad (IV.34)$$

$$\theta' = w \quad (IV.35)$$

Avec

- v : *La vitesse linéaire du robot exprimée par :*

$$v = \frac{R}{2}(v_d + v_g) \quad (\text{IV.36})$$

- w : *La vitesse angulaire exprimée par :*

$$w = \frac{R}{L}(v_d - v_g) \quad (\text{IV.37})$$

Avec

- R : *le rayon de roue.*
- L : *la distance entre les roues.*

Donc à partir des équations (IV.36) et (IV.37), nous obtenons:

$$\frac{2v}{R} = v_d + v_g \quad (\text{IV.38})$$

$$\frac{wL}{R} = v_d - v_g \quad (\text{IV.39})$$

Par l'addition de l'équation (IV.38) et l'équation (IV.39), nous obtenons

$$v_d = \frac{2v+wL}{2R} \quad (4.40)$$

Et par soustraction de l'équation (IV.38) par l'équation (IV.39), nous avons:

$$v_g = \frac{2v-wL}{2R} \quad (\text{IV.41})$$

Résultats

D'après les calculs établis ci-dessus, nous pouvons déduire la vitesse angulaire à envoyer vers les moteurs:

$$v_d = \frac{2v+wL}{2R} \quad (\text{IV.42})$$

$$v_g = \frac{2v-wL}{2R} \quad (\text{IV.43})$$

Avec

- v : *La vitesse envoyée d'après la régulation de distance.*
- w : *La vitesse envoyée d'après la régulation de l'angle.*

Notons que si la distance mesurée est égale à la distance de consigne, la vitesse sera égale à 0 et si la distance mesurée est différente de la consigne, la vitesse sera différente de 0 (voir la figure IV.14).

La figure (IV.14) illustre Les courbes de vitesses et de distances en fonction du temps qui montrent la variation de la vitesse par rapport à la distance. Nous voyant que lorsque la distance mesurée est égale à la distance de consigne, la vitesse est égale à 0 [24].

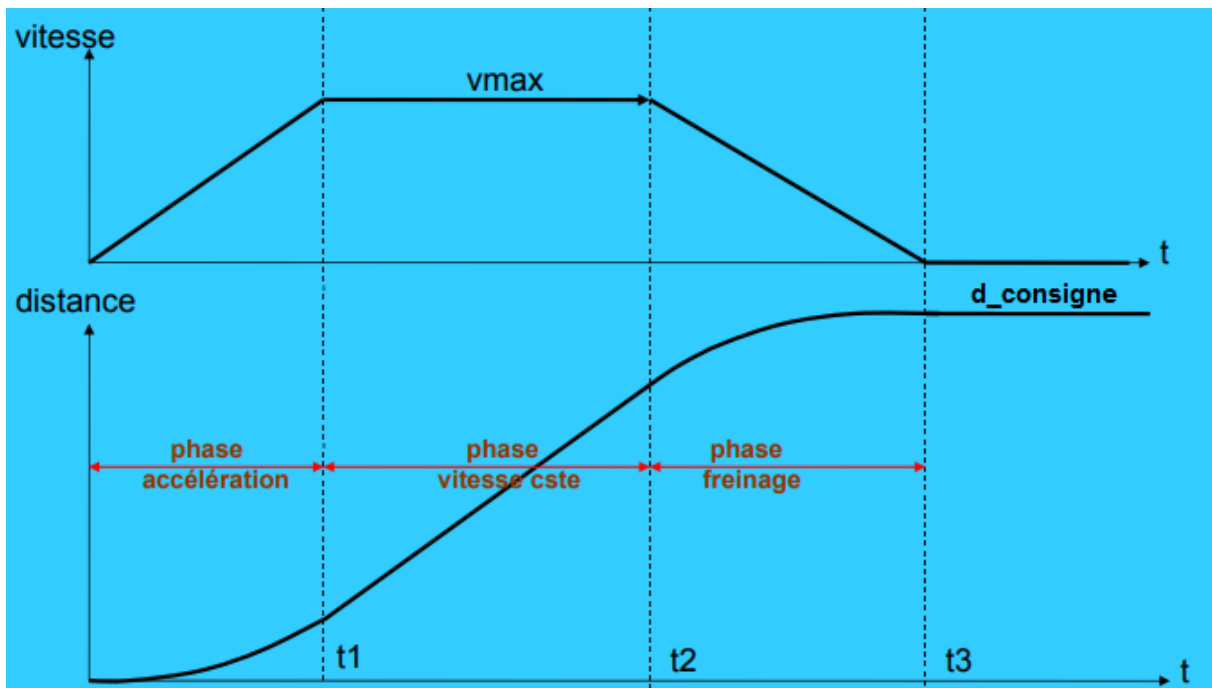


Figure IV.14 La courbe de la vitesse et de la distance en fonction du temps [24].

IV.3.2 L'application du régulateur sur le robot

Nous appliquons le régulateur PID pour la distance, l'angle et la vitesse. La réalisation du PID parfait se fait après plusieurs tentatives et modification des paramètres de contrôle (proportionnel, intégrateur, dérivateur). Le contrôle se fait par l'observation des courbes que nous obtenons à partir du déplacement du capteur grâce à la fonction contenue dans le programme Arduino IDE.

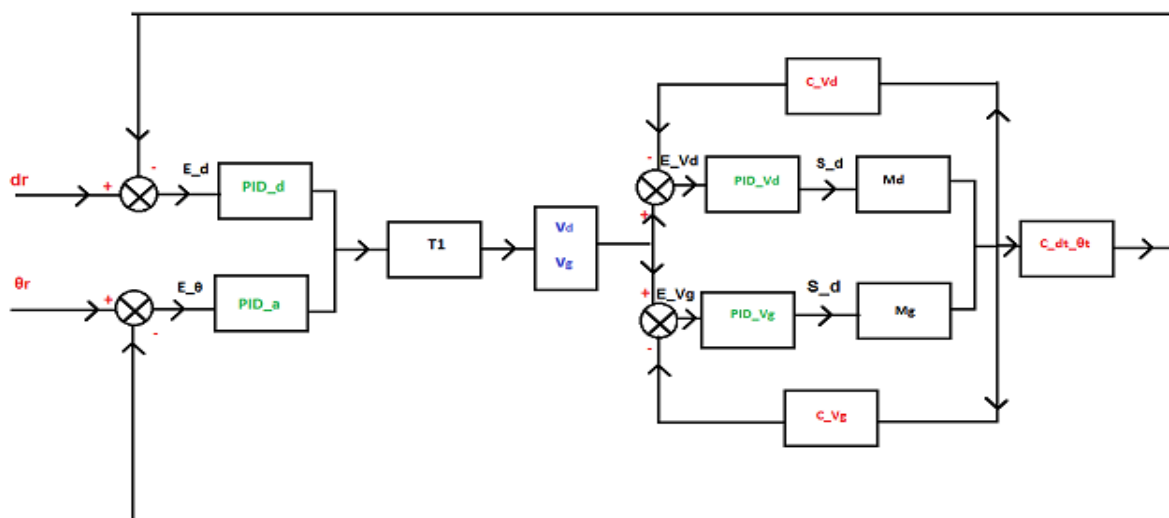


Figure IV.15 Schéma synoptique du contrôle du robot.

Les différents paramètres présentés dans le schéma de la figure (IV.15) sont définies comme suit :

- d_r : la distance de référence que nous voulons que le robot garde entre lui est la cible.
- θ_r : l'angle de référence que nous voulons que le robot garde entre lui est la cible.
- E_d : l'erreur de distance.
- E_θ : l'erreur de l'angle.
- PID_d : Correcteur PID appliqué sur la distance.
- PID_a : Correcteur PID appliqué sur l'angle
- $T1$: Conversion de la valeur régulée exprimée en distance et angle vers les vitesses v_d et v_g .
- V_d : la vitesse du moteur droit qui doit suivre.
- V_g : la vitesse du moteur gauche qui doit suivre.
- E_{V_d} : l'erreur de vitesse du moteur droit.
- E_{V_g} : l'erreur de vitesse du moteur gauche.
- PID_{V_d} : Correcteur PID appliqué à la vitesse du moteur droit.
- PID_{V_g} : Correcteur PID appliqué à la vitesse du moteur gauche.
- S_d : Le signal contrôlé après traitement et correction du PID à droite.
- S_g : Le signal contrôlé après traitement et correction du PID à gauche.
- M_d : moteur droit à contrôler.
- M_g : moteur gauche à contrôler.
- C_{V_d} : capteur de vitesse du moteur droite.
- C_{V_g} : capteur de vitesse du moteur gauche.
- C_{dt_θ} : capteur de distance et d'angle de la cible.

Les résultats réels du contrôle sur le robot

-Les constantes finales du PID qui sont appliquées sur le robot sont exprimées dans le tableau (IV.1).

-	K_p	K_i	K_d
Distance	1	0	0
Angle	1	0	0
Vitesse droite	0.01	0.075	0
Vitesse gauche	0.01	0.05	0

Tableau IV.1 Les paramètres de contrôle PID appliqués à la distance, l'angle et la vitesse du moteur.

IV.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons implémenté l'approche de suivi et cela nous a permis de mettre le robot en marche avec la meilleure façon et de garantir leur stabilité par l'intégration d'un régulateur PID.

Conclusion générale

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de l'équipe TDCSD division Robotique du CDTA. Il consiste à réaliser un robot de service vers une application de santé. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce domaine pour résoudre le problème de transport les besoins des gens.

Notre projet consiste à fabriquer un robot mobile qui peut suivre un homme dans toutes les circonstances, que ce soit sur une chaise roulante ou debout marchant avec sa canne, ce robot mobile est conçu spécialement pour aider les vieux et les hommes handicapé sa se déplacer et transporter leurs affaires. *ASKI* (nom commercial) est la solution pour venir à bout de la galère que cette catégorie de gens subisse quotidiennement.

Tout d'abord, nous avons étudié des recherches sur le domaine de robotique, pour pouvoir ainsi comprendre les différents types de produits qui peuvent s'adapter à notre concept, un robot mobile et intelligent capable d'être à la hauteur de nos attentes.

Une fois, le choix du robot achevé, reste à faire une recherche sur les différentes méthodes de localisation et de calcul de positionnement, plusieurs technologies existent dans ce milieu, cependant, on a réussi à sortir, la bonne méthode afin d'éviter les erreurs et augmenter la précision.

Arrivé à ce stade, toutes les composants et les théories sont réunies, manquer plus qu'à entamer les deux parties principales de notre robot qui sont la partie mécanique et la partie électronique, plus de détails avec le matériel utilisé sont mentionnés dans le chapitre III, tout cela nous a permis d'élaborer la conception finale de notre projet.

Enfin, nous avons détaillé la commande de notre système ainsi qu'à son implémentation, ceci consiste à calculer la position de la personne par rapport au robot en utilisant la méthode de trilatération, qui a pour but de calculer la vitesse qu'on doit envoyer au moteur, en appliquant la méthode de la cinématique on arrive à réguler le robot et avoir les meilleures valeurs des constants du PID qui nous permettront d'avoir un système plus stable et précis.

Par rapport à l'étude qu'on a faite, on est arrivé à réaliser 50% de l'intégralité du projet à cause de la situation sanitaire mondiale (COVID-19). La disponibilité des pièces robotique a été le seul inconvénient. En contrepartie, nous avons réussi à fabriquer la plateforme du robot, cela nous a permis de donner du mouvement à **ASKI** en asservissant les moteurs, et intégrer des capteurs de proximité pour éviter les obstacles. Les balises de localisation ont été le maillon faible, sans eux, on ne pourrait pas suivre le propriétaire du robot.

Les utilisations d'**ASKI** sont divers dans le domaine médical, par exemple, dans les hôpitaux où il peut transporter les repas aux lits des malades, suivre le médecin et déplacer ses affaires, muni d'une caméra connectée, il peut également contrôler les couloirs et les chambres d'hôpitaux.

Notre projet peut être également utilisé dans d'autres domaines, comme dans l'industrie, l'agriculture, militaire ... etc.

Comme perspective, il est intéressant de réaliser ce projet car il est très bénéficiaire à l'être humain et permet donc de gagner du temps, de l'argent et le plus important, la santé.

Bibliographie

- [1] Bull. Acad. Natle Méd., 2017, 201, nos 7-8-9, 1045-1057, séance du 19 septembre 2017
- [2] Site officiel de uvd(www.uvd-robots.com) (02/2020)
- [3] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/robots/1-robotique/> (02/2020)
- [4] KAREL CAPEK, R. U. R. (Rossum's Universal Robots)
- [5] A.Oualid Djekoune“ Localisation Et Guidage Du Robot Mobile Atrv2 Dans Un Environnement Naturel“, Thèse présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT en ELECTRONIQUE, UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMÉDIÈNE, 15 décembre 2010
- [6] B.Sara“ Contribution à la localisation dynamique du robot mobile d'intérieur B21r en utilisant la plateforme multi sensorielle“, MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA, Novembre 2007.
- [7] B. Tippetts, D. J. Lee, K. Lillywhite, et J. Archibald, “Review of stereo vision algorithms and their suitability for resource-limited systems”, Journal of Real-Time Image Processing,vol. 11, no. 1, pp. 5–25, 2016.
- [8] R.GENET,N.RUAUX “Radiofréquences et santé Comprendre où en est la recherché“,MAI 2017
- [9] P. D. Groves, Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, 2e éd. Artech House, 2013.
- [10] D. Vasisht, S. Kumar, et D. Katabi, “Sub-nanosecond time of flight on commercial wifi cards”, Massachusetts Institute of Technology, Rapp. tech., May 2015, available at <http://arxiv.org/pdf/1505.03446.pdf>. (02/2020)
- [11] W.RAFRAFI“INTÉGRATION D'UN SYSTÈME RADIO À BANDE ULTRA-LARGE POUR LA NAVIGATION DE ROBOTS MOBILES“,UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, JUIN 2016
- [12] E.Maria, B.NOGUEIRA“ Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fil“,THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE,Spécialité Optique et radiofréquences, 7 août 2006.

- [13] O.BELAIDI,L.BELHACENE ,“Automatique industriel “28/06/2018
- [14] www.arduino.cc (02/2020)
- [15] J.Zhao, “Brushless DC Motor Fundamentals Application Note“,juillet, 2011.
- [16] www.robot-maker.com/shop/capteurs/13- telemetre-a-ultrasons-hc-sr04.html
- [17] J. Pollefliet, “Power Electronics “,2018
- [18] www.electronicdesign.com (02/2020)
- [19] parlonssciences.ca (02/2020)
- [20] K.KARA, cours commande numérique des systèmes, Université SAAD DAHLEB Blida Faculté de Technologie, Septembre 2015.
- [21] B.KAZED, Acquisition et affichage de l’humidité à travers le bus I2C ,2004.
- [22] Michel ETIQUE, Régulation automatique : Chapitre 4: Régulateur PID, Haute Ecole d’Ingénieurs et de Gestion du canton de Vaud (HEIG- ´ Vd).
- [23]** M.Egerstedt,” Control of Mobile Robots“,livre ?, Georgia Institute of Technology.
- [24]** J.Coulon, “ Réflexions sur un robot Eurobot“, Robot Concept Ville d'Avray, Août 2007<https://www.rcva.fr/10-ans-dexperience/9/>

Annexe

Annexe A:

Product Overview

The DWM1000 module is based on Decawave's DW1000 Ultra Wideband (UWB) transceiver IC. It integrates antenna, all RF circuitry, power management and clock circuitry in one module. It can be used in 2-way ranging or TDOA location systems to locate assets to a



Key Features

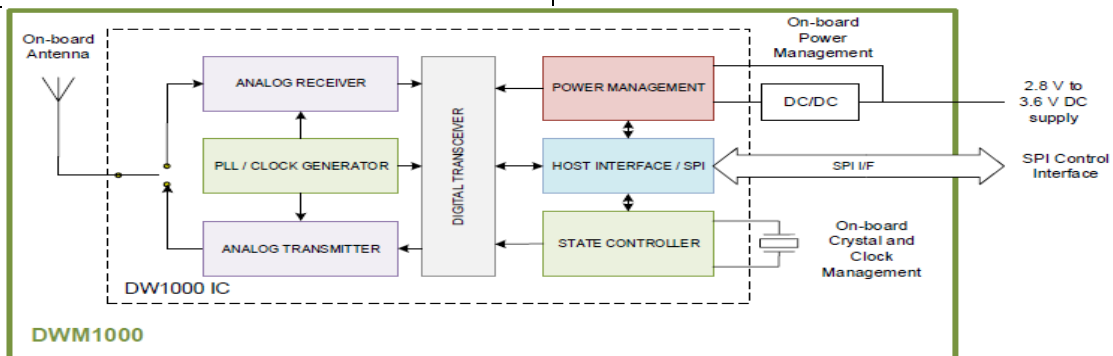
IEEE 802.15.4-2011 UWB compliant
Supports 4 RF bands from 3.5 GHz to 6.5 GHz
Programmable transmitter output power
Fully coherent receiver for maximum range and accuracy
Designed to comply with FCC & ETSI UWB spectral masks
Supply voltage 2.8 V to 3.6 V
Low power consumption
Data rates of 110 kbps, 850 kbps, 6.8 Mbps
Maximum packet length of 1023 bytes for high data throughput applications
Integrated MAC support features
Supports 2-way ranging and TDOA
SPI interface to host processor
23 mm x 13 mm x 2.9 mm 24-pin side castellation package

Key Benefits

- Simplifies integration, no RF design required
 - Very precise location of tagged objects delivers enterprise efficiency gains and cost reductions
- Extended communications range minimises required infrastructure in RTLS
High multipath fading immunity
Supports very high tag densities in RTLS
Low cost allows cost-effective implementation of solutions
Low power consumption reduces the need to replace batteries and lowers system lifetime costs

Applications

Precision real time location systems (RTLS) using two-way ranging or TDOA schemes in a variety of markets.
Location aware wireless sensor networks (WSNs)



High Level Block Diagram

OVERVIEW

The DWM1000 module is an IEEE 802.15.4-2011 UWB implementation. RF components, Decawave DW1000 UWB transceiver, and other components reside on-module. DWM1000 enables cost effective and reduced complexity integration of UWB communications and ranging features, greatly accelerating design implementation.

DWM1000 Functional Description

The DW1000 on board the DWM1000 is a fully integrated low-power, single chip CMOS RF transceiver IC compliant with the IEEE 802.15.4-2011 [1] UWB standard. The DWM1000 module requires no RF design as the antenna and associated analog and RF components are on the module.

The module contains an on-board 38.4 MHz reference crystal. The crystal has been trimmed in production to reduce the initial frequency error to approximately 2 ppm, using the DW1000 IC's internal on-chip crystal trimming circuit, see section 2.1.1.

Always-On (AON) memory can be used to retain DWM1000 configuration data during the lowest power operational states when the on-chip voltage regulators are disabled. This data is uploaded and downloaded automatically. Use of DWM1000 AON memory is configurable.

The on-chip voltage and temperature monitors allow the host to read the voltage on the VDDAON pin and the internal die temperature information from the DW1000.

See the DW1000 Datasheet [2] for more detailed information on device functionality, electrical specifications and typical performance.

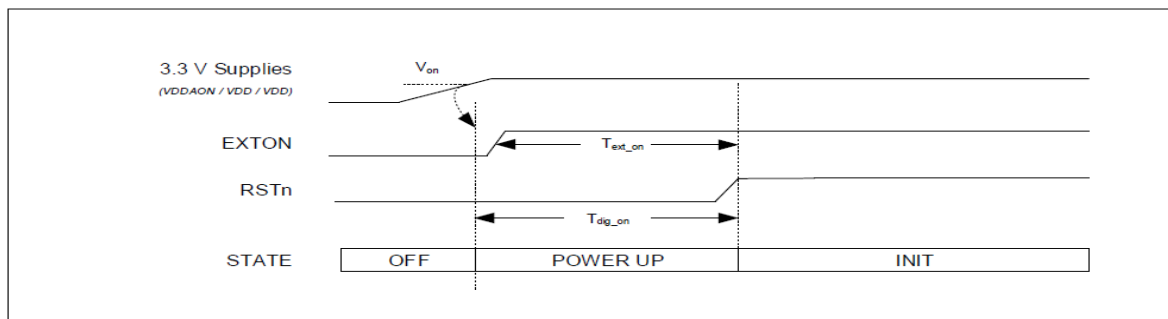


Figure 1: DWM1000 Power-up Sequence

When power is applied to the DWM1000, RSTn is driven low by internal circuitry as part of its power up sequence. See Figure 1 above. RSTn remains low until the on-module crystal oscillator has powered up and its output is suitable for use by the rest of the device, at which time RSTn is deasserted high.

Table 1: DW1000 Power-up Timings

Parameter	Description	Nominal Value	Units
V _{ON}	Voltage threshold to enable power up	2.0	V
T _{EXT_ON}	Time at which EXTON goes high before RSTn is released	3	ms
T _{DIG_ON}	RSTn held low by internal reset circuit / driven low by external reset circuit	3	ms

RSTn may be used as an output to reset external circuitry as part of system bring-up as power is applied. An external circuit can reset the DWM1000 by asserting RSTn for a minimum of 10 ns. RSTn is an asynchronous input. DW1000 initialization will proceed when the pin is released to high impedance. RSTn should never be driven high by an external source. Please see DW1000 Datasheet [2] for more details of DW1000 power up.

DWM1000 Datasheet

SPI Host Interface

The DW1000 host communications interface is a slave-only SPI. Both clock polarities (SPIPOL=0/1) and phases (SPIPHA=0/1) are supported. The data transfer protocol supports single and multiple byte read/writes accesses. All bytes are transferred MSB first and LSB last. A transfer is initiated by asserting SPICSn low and terminated when SPICSn is deasserted high. See the DW1000 Datasheet [2] for full details of the SPI interface operation and mode configuration for clock phase and polarity.

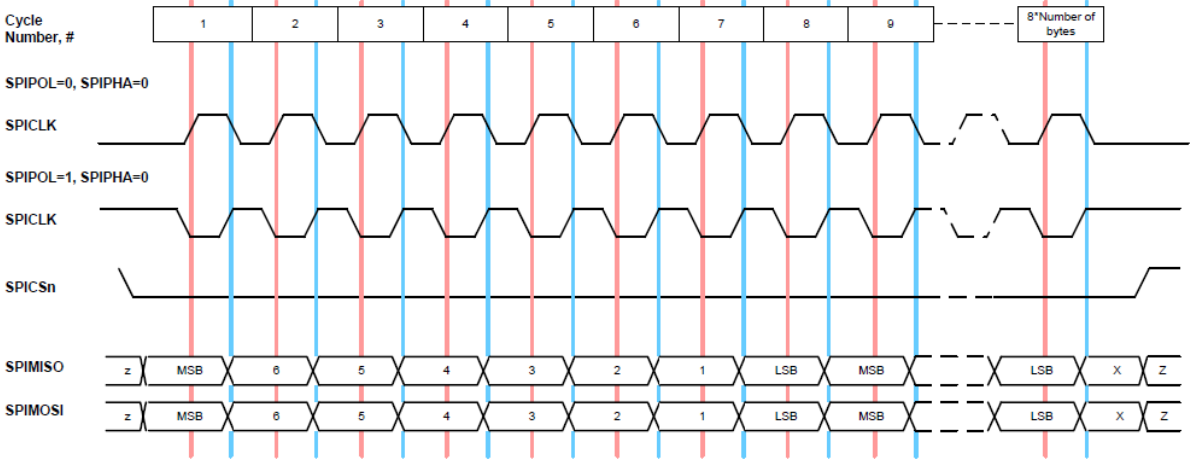


Figure 2: DW1000 SPIPHA=0 Transfer Protocol

1.3.1 SPI Signal Timing

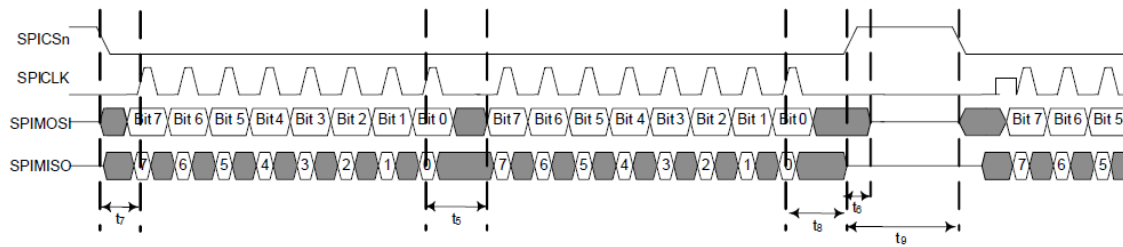


Figure 3: DWM1000 SPI Timing Diagram

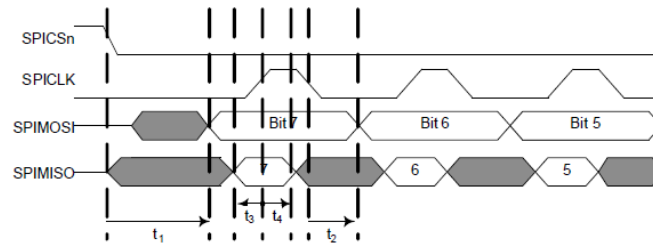


Figure 4: DWM1000 SPI Detailed Timing Diagram

Table 2: DWM1000 SPI Timing Parameters

Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Description
SPICLK Period	50			ns	The maximum SPI frequency is 20 MHz when the CLKPLL is locked, otherwise the maximum SPI frequency is 3 MHz.
t_1			38	ns	SPICSn select asserted low to valid slave output data
t_2	12			ns	SPICLK low to valid slave output data
t_3	10			ns	Master data setup time
t_4	10			ns	Master data hold time
t_5	32			ns	LSB last byte to MSB next byte

General Purpose Input Output (GPIO)

The DWM1000 provides 8 configurable pins. On reset, all GPIO pins default to input. GPIO inputs, when appropriately configured, are capable of generating interrupts to the host processor via the IRQ signal. GPIO0, 1, 2, & 3, as one of their optional functions, can drive LEDs to indicate the status of various chip operations. Any GPIO line being used to drive an LED in this way should be connected as shown. GPIO5 & 6 are used to configure the operating mode of the SPI as described in the DW1000 Datasheet [2]. See DW1000 Datasheet [2] and DW1000 User Manual [3] provide full details of the configuration and use of the GPIO lines.

Always-On (AON) Memory

Configuration retention in lowest power states is enabled in DWM1000 by provision of an Always-On (AON) memory array with a separate power supply, VDDAON. The DWM1000 may be configured to upload its configuration to AON before entering a low-power state and to download the configuration when waking up from the low –power state.

One-Time Programmable (OTP) Memory

The DWM1000 contains a 56x32 -bit user programmable OTP memory on the DW1000 device that is used to store per chip calibration information.

Interrupts and Device Status

DWM1000 has a number of interrupt events that can be configured to drive the IRQ output pin. The default IRQ pin polarity is active high. A number of status registers are provided in the system to monitor and report data of interest. See DW1000 User Manual [3] for a full description of system interrupts and their configuration and of status registers.

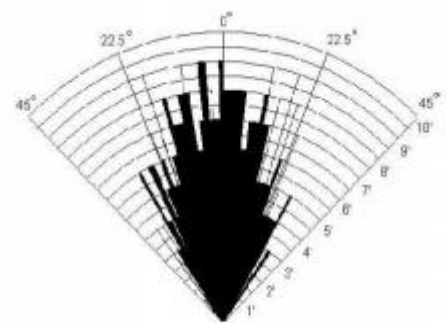
MAC

A number of MAC features are implemented including CRC generation, CRC checking and receive frame filtering. See the DW1000 Datasheet [2] and DW1000 User Manual [3] for full details.

Annexe B

HC-SR04 - Module de détection aux ultrasons - Utilisation avec Pic axe

Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres, bien que des matériaux comme les vêtements puissent être difficiles à détecter.



*Practical test of performance,
Best in 30 degree angle*

Caractéristiques

- Dimensions : 45 mm x 20 mm x 15 mm
- Plage de mesure : 2 cm à 400 cm
- Résolution de la mesure : 0.3 cm
- Angle de mesure efficace : 15 °
- Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement : 10 µs (Trigger Input Pulse width) Broches de connexion.
- Vcc = Alimentation +5 V DC
- Trig = Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input)
- Echo = Sortie de mesure donnée en écho (Echo output)
- GND = Masse de l'alimentation

Spécifications et limites

Paramètre	Min	Type	Max	Unité
Tension d'alimentation	4.5	5.0	5.5	V
Courant de repos	1.5	2.0	2.5	mA
Courant de fonctionnement	10	15	20	mA
Fréquence des ultrasons	-	40	-	kHz

Attention : la borne GND doit être connectée en premier, avant l'alimentation sur Vcc.

Branchement

Le branchement du capteur HC-SR04 sur un microcontrôleur PICAXE est des plus simples (le schéma ci-contre illustre l'utilisation d'un circuit 08 M 2). Si les deux éléments sont alimentés en 5 V (ou 4.5 V), il suffit de relier les bornes d'alimentations +/- entre elles. L'entrée "Trig" du capteur doit être reliée à une sortie du PICAXE. Quant à la sortie "Echo" du capteur, il faut la relier à une entrée du PICAXE qui peut aussi être programmée en sortie si on désire mettre en œuvre l'exemple 2 de programme.

