

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT AUTOMATIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

en Automatique

Option : Automatique des systèmes continus et productique

présenté par

TRIKI Ahcène

ingénieur U.M.M.T.O

**Contribution a l'étude et réalisation d'un asservissement
comprenant une table tournante, un robot et un système de
vision artificielle**

Mémoire soutenu le 02/12/2010 devant le jury d'examen composé de :

DJENOUNE Saïd	Professeur à l'U.M.M.T.O.	Président
DIAF Moussa	Professeur à l'U.M.M.T.O.	Rapporteur
HAMMOUCHE Kamel	M.C.A. à l'U.M.M.T.O.	Examineur
MELLAH Rabah	M.C.A. à l'U.M.M.T.O.	Examineur
MAIDI Ahmed	M.C.B. à l'U.M.M.T.O.	Examineur

Avant-propos

Ce travail a été effectué au sein du «laboratoire Robotique et Vision» et du «laboratoire de commande des systèmes de production» Département Automatique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou UMMTO.

Mes vifs remerciements vont tout d'abord à Monsieur DIAF Moussa, professeur à l'UMMTO pour m'avoir proposé le thème de ce mémoire et m'avoir dirigé, aidé et conseillé tout le long de notre travail.

Nous ne manquerons pas de remercier Monsieur DJENNOUNE Saïd, Professeur à l'UMMTO de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur HAMMOUCHE Kamal Maître de Conférences classe A à l'UMMTO pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de notre mémoire.

Que Monsieur MAÏDI Ahmed, Maître de Conférences classe A à l'UMMTO trouve ici, nos sincères remerciements pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de notre mémoire.

Nous exprimons également nos vifs remerciements à Monsieur MELLAH Rabah, Maître de Conférence de classe A à l'UMMTO pour l'intérêt qu'il a témoigné à ce travail et pour sa présence parmi les membres de jury.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur l’asservissement visuel.....	4
1. Introduction.....	4
2. Classification des asservissements visuels	5
3. Applications de l’asservissement visuel	3
4. Etat de l’art sur l’asservissement visuel	9
5. Conclusion.....	12
Chapitre 2 : Etude et réalisation de la commande numérique de la table	13
1. Introduction.....	13
2. Description de la table tournante	14
3. Commande numérique de la table tournante	17
3.1. Modélisation de la table tournante	17
3.2. Calcul de la commande numérique de la table tournante	21
3.3. Implémentation pratique de la commande de la table	29
4. Conclusion.....	31
Chapitre 3 : Détection, localisation et reconnaissance d’objet.....	32
1. Introduction.....	32
2. Détection d’objets.....	33
3. Localisation des objets	35

4. Reconnaissance des objets	39
5. Tests pratiques	46
6. Conclusion	46
Chapitre 4 : Commande du bras manipulateur	47
1. Introduction	47
2. Description du robot utilisé	48
3. Modélisation géométrique du bras manipulateur	49
5. Positionnement de la table et de la caméra par rapport au robot	52
5. Algorithme de Commande du robot manipulateur	54
6. Réalisation de la commande	57
7. Test pratique de la commande du robot	58
8. Conclusion	59
Conclusion générale	60
Références bibliographiques	62

Introduction générale

L'un des plus grands rêves de l'homme est de pouvoir faire exécuter par des acteurs autres que lui-même des tâches ou activités qu'il considère comme aliénantes, dangereuses ou simplement ennuyeuses et non gratifiantes. Chose qui a commencé à se réaliser avec l'émergence de la robotique au cours des années 1960.

Depuis leur apparition, les robots industriels se sont concentrés de réaliser de tâches classiques qui peuvent toujours se ramener à des interactions précises avec leur environnement. De ce fait, une modification de ce dernier peut entraîner de graves conséquences sur le déroulement de la tâche à accomplir. C'est ce qui a poussé les chercheurs à équiper le robot de capteurs de vision extéroceptifs, afin de lui permettre d'appréhender son environnement et de réagir à d'éventuels changements de ce dernier. Ce qui a permis d'améliorer de manière significative leurs performances et d'aider à développer de nouvelles applications d'une part et l'émergence d'un nouveau domaine de recherche sous le nom d'Asservissement visuel, d'une autre part. L'asservissement visuel correspond à un asservissement d'un robot où les grandeurs asservies sont mesurées à partir d'une ou de plusieurs images fournies par un ou plusieurs capteurs de vision fixant une zone de l'environnement du robot par rapport à laquelle une tâche doit être effectuée. La réalisation d'un asservissement visuel implique la mise en œuvre d'au moins trois sous-systèmes : un capteur visuel, un dispositif d'acquisition/traitement, et le robot. Le capteur visuel est souvent une camera, mais peut également être tout type de dispositif imageur (scanner, IRM, camera linéaire, etc.). Le dispositif d'acquisition/traitement est un système capable de traiter l'information visuelle numérisée, autrement dit un ordinateur. Souvent, c'est le même système qui est chargé du traitement de l'image et de la commande. Cette commande qui résulte du retour visuel est envoyée au robot.

Le travail réalisé dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine d'asservissement visuel. L'objectif consiste à utiliser la configuration caméra déportée et la technique Look and Move statique pour réaliser un asservissement visuel 2D d'un système robotique. En effet, le travail se limite à l'étude, sur le plan théorique et pratique, de la commande d'un système comportant une table tournante, une caméra.. Le fonctionnement de cet ensemble, piloté un robot manipulateur, et un ordinateur muni d'une carte d'acquisition et de commande, consiste à détecter, reconnaître, et localiser, en temps réel, des objets arrivant sur la table tournante. Puis de les ramener en face du robot à l'aide de la table pour que le robot réalise, par la suite, la tâche de saisi et de déplacement des objets vers des emplacements correspondants aux types d'objets reconnus. La table tournante est réalisée par un disque tournant de rayon de 20 centimètres, et le mouvement de rotation de ce dernier est assuré, à travers un mécanisme de réduction de vitesse, par un moteur à courant continu. La caméra est une webcam fixée sur un support au dessus de la table tournante de telle manière que son champ de vision, par rapport à la table, soit fixé entre le robot et l'axe de rotation de la table. Les objets à poser sur la table sont classés suivant leurs formes géométriques en trois classes:

- a. classe des objets rectangulaires,
- b. classe des objets circulaires,
- c. classe des objets trapézoïdaux.

Grâce à un mécanisme de guidage, chaque objet est acheminé automatiquement vers le champ de vision de la caméra avant qu'il soit saisi et déposé à son emplacement par le robot. Le robot manipulateur (bras manipulateur) est un robot à trois degrés de libertés muni d'une pince de serrage. Il est positionné de telle manière à saisir et déplacer les objets. L'objectif principal de cette étude est de développer un programme de commande qui permet à l'ordinateur de gérer à travers la carte d'acquisition et de commande le fonctionnement de la table tournante, du système de vision artificielle et du bras manipulateur.

Pour ce faire, en premier lieu, pour réaliser la commande de la table, trois parties ont été effectuées, dans la première nous avons calculé son modèle

sur la base des considérations mécaniques et électriques. Puis, nous avons calculé une loi de commande assurant un fonctionnement performant en vitesse de la table. La réalisation pratique d'une commande de cette dernière est abordée dans la dernière partie. En second lieu, on s'intéresse à la partie vision artificielle où nous avons réalisé le programme permettant l'acquisition, en temps réel, des images délivrées par la caméra pour détecter, en temps réel, la présence d'un objet posé sur la table, reconnaître sa forme, et localiser sa position sur la table (ses coordonnées) par rapport à un repère de référence fixe. En dernier lieu, après l'étude du bras manipulateur, nous avons déterminé les modèles géométriques du robot, puis nous avons développé le programme permettant au robot la saisie et le déplacement de chaque objet localisé vers l'emplacement correspondant à sa forme reconnue.

Le mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente des généralités sur l'asservissement visuel ainsi que la description notre travail.
- Le second chapitre est dédié à la description détaillée et à la commande de la table tournante.
- Le troisième chapitre expose la partie relative à la vision artificielle où sont réalisées la détection de présence, la localisation et la reconnaissance d'objets.
- Le quatrième et dernier chapitre est consacré à la modélisation et au développement du programme de commande du bras manipulateur.

Le mémoire se termine par une conclusion générale sous forme d'un bilan global sur l'ensemble des parties réalisées tout en présentant certaines perspectives qui peuvent être envisagées.

Chapitre 1

Généralités sur l'asservissement visuel

1. Introduction

L'asservissement visuel correspond à un asservissement d'un robot où les grandeurs asservies sont extraites d'une ou de plusieurs images fournies par un ou plusieurs capteurs de vision fixant une zone de l'environnement du robot par rapport à laquelle une tâche doit être effectuée [1]. Ce nouveau domaine permet de rendre les robots plus performants et de développer de nouvelles tâches robotiques. En effet, en absence de capteurs donnant la position par rapport aux objets environnants, le robot ne peut réaliser que des tâches préprogrammées et ceci, dans un environnement invariant. Par contre, avec l'intégration de capteurs de vision, des tâches non connues au préalable peuvent être envisagées même dans un environnement variant. Par exemple, s'il s'agit de réaliser des travaux de soudure au dixième de millimètre près et que l'objet à souder est décalé de 1 mm par rapport à la référence, tous les points de soudure seront décalés de cette même distance. Par contre, si on intègre au robot de soudure des capteurs de vision, même avec un décalage de l'objet à souder, la soudure est réalisée avec la précision voulue [2]. Parmi les capteurs de vision les plus utilisés, on peut citer les

capteurs à ultrasons et les caméras. En ce qui concerne la caméra, capteur proche de la vision humaine, l'image est acquise avec ses propres caractéristiques de forme, de couleur et de texture. Un traitement adéquat de l'image permet, par exemple, de déterminer la position de l'objet dans son environnement par rapport à cette caméra.

2. Classification des asservissements visuels

Dans les asservissements visuels, on peut distinguer trois cas de classification ; selon la configuration robot-caméra, la commande du robot ou la manière d'acquérir les informations concernant l'environnement.

- *Configuration robot-caméra*

Trois types de configuration robot-caméra peuvent être distingués. On peut, avoir la configuration caméra embarquée où la caméra est montée sur l'organe terminal, la configuration caméra déportée où la caméra est externe autrement dit, sans aucune liaison mécanique avec le robot et la configuration mixte où l'on utilise une caméra portée par l'organe terminal et une autre portée par un autre robot (fig.1) [3].

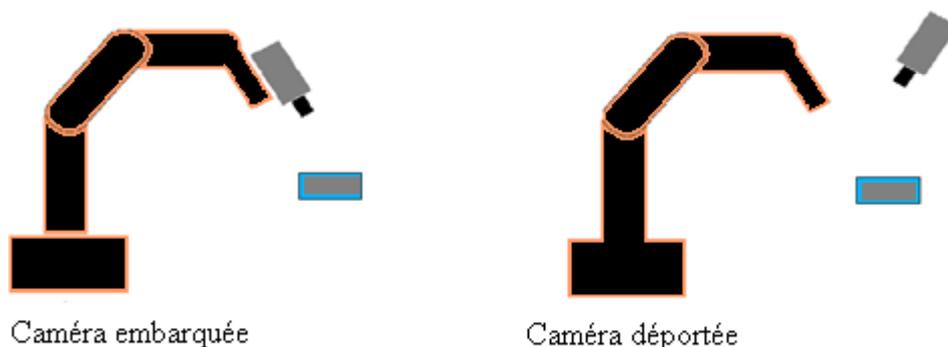


Fig.1 Configurations de la caméra : (a) embarquée, (b) déportée.

- *Type de commande*

Dans l'asservissement visuel direct, la commande du robot est réalisée par des commandes générées par le contrôleur de l'asservissement visuel, appliquées directement aux pré-actionneurs (variateurs) du robot (fig.2). Ce type de commandes est utilisé lorsque la période d'échantillonnage de

l'asservissement visuel est grande, cas où l'asservissement visuel est dit lent [4].

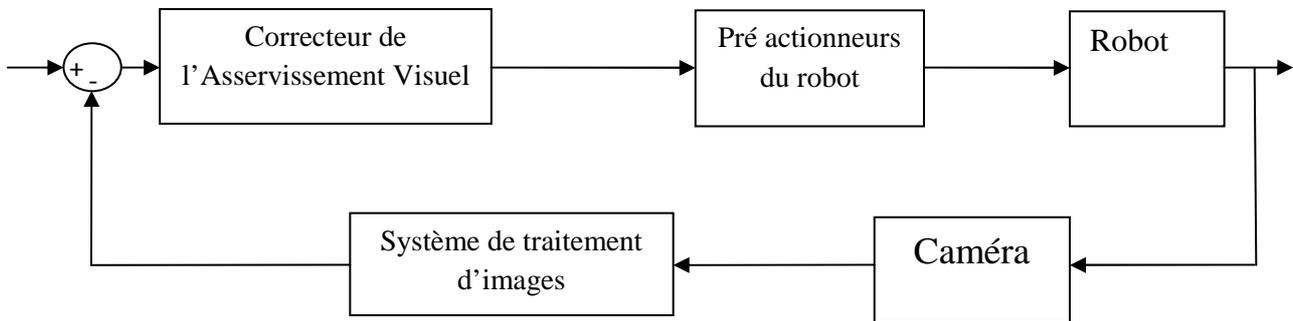


Fig.2 Boucle d'asservissement visuel direct.

Quand l'asservissement visuel est dit indirect, les commandes générées par le contrôleur de l'asservissement visuel sont appliquées à un contrôleur intermédiaire (contrôleur du robot) pour générer les commandes articulaires du robot (fig.3). Ce type de commande est utilisé pour les asservissements visuels rapides.

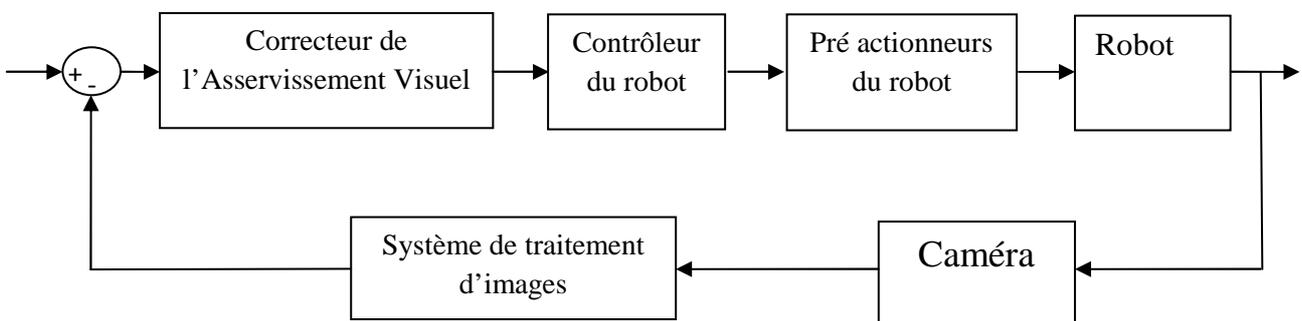


Fig.3 Boucle d'asservissement visuel indirect

- *Acquisition des informations*

Lors de l'acquisition d'une image, on extrait des informations permettant d'estimer la différence entre la position courante et la position désirée. Dans le cas de la technique Look and Move, il s'agit d'un enchaînement de deux étapes. Dans la première (Look), on réalise l'acquisition d'une image. Dans la seconde étape (Move), on calcule et on envoie les signaux de commande du robot permettant de réguler à zéro cette différence. Dans le cas où cet enchaînement est réalisé une seule fois, on parle de Look and Move Statique.

Par contre, lorsqu'il est réalisé plusieurs fois (fig.4), on parle de Look and Move dynamique [5].

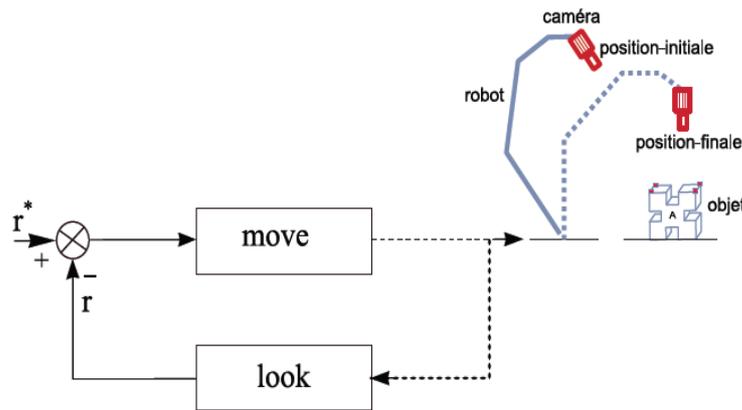


Fig.4 Schéma de principe de la technique Look and Move.

L'asservissement visuel peut être de type 3D (fig.5). Pendant longtemps, les chercheurs ont considéré que l'asservissement visuel 3D nécessitait obligatoirement une étape de reconstruction 3D de la scène pour estimer la mesure 3D. Cette opération prend beaucoup de temps calcul et est très sensible aux erreurs de calibrage. De ce fait, il a été considéré comme étant moins intéressant que le cas 2D [6]. Par la suite l'apparition des méthodes d'estimation de la pose 3D sans étape de reconstruction 3D ou de systèmes de vision distribués (2 caméras, voire plus), a apporté un deuxième souffle à l'asservissement visuel 3D. Ces méthodes sont capables d'estimer la pose 3D en utilisant une seule caméra et à des cadences élevées [7].

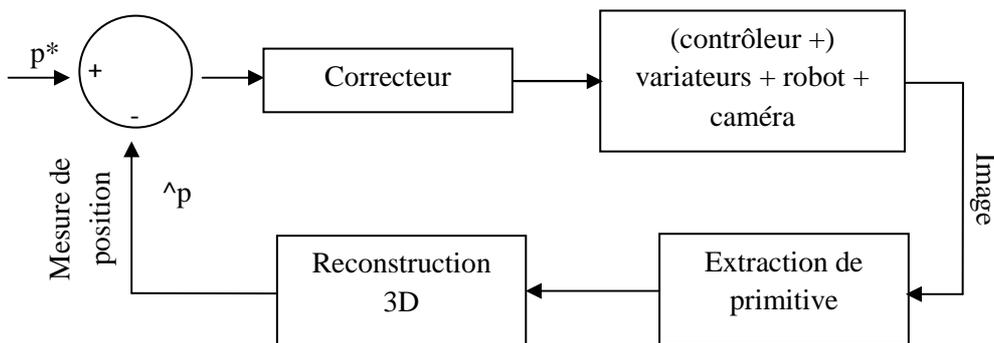


Fig.5 Schéma de l'asservissement visuel 3D.

Dans le cas de l'asservissement visuel 2D, comme son nom l'indique, la loi de commande est élaborée à partir des informations visuelles exclusivement

extraites de l'image. La consigne est alors exprimée comme la différence entre un motif courant et un motif désiré dans l'espace image. Ces primitives peuvent être des points, des segments de droites, des droites, des cercles, ou tout autre type ou combinaison d'informations géométriques extraites de l'image [8]. Le schéma de cet asservissement est donné à la figure 6.

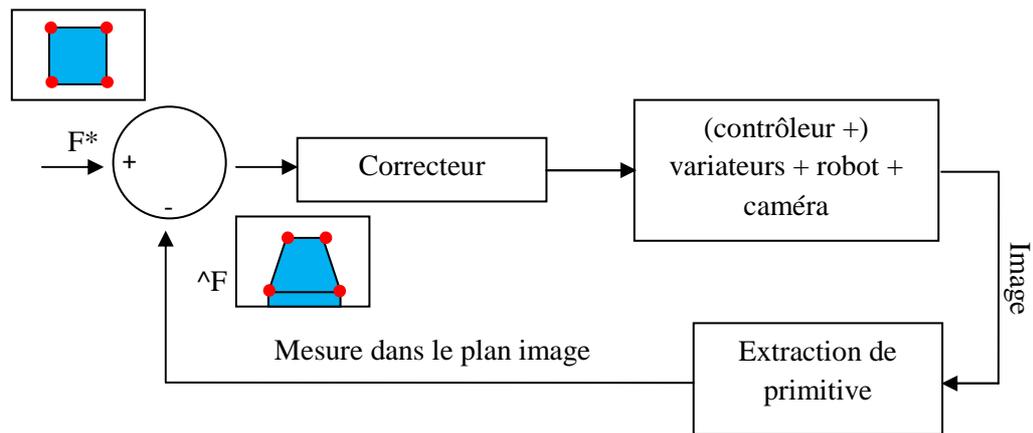


Fig.6 Schéma de l'asservissement visuel 2D.

Dans la nouvelle approche d'asservissement caractérisé de 2D1/2 développée par E. Malis dans le cadre de sa thèse [9], on utilise, à la fois, des informations directement exprimées dans l'image 2D pour l'asservissement de la position de l'organe terminal et des informations exprimées dans le repère de la caméra 3D pour asservir l'orientation de l'organe terminal. Les deux boucles d'asservissement sont découplées (fig.7).

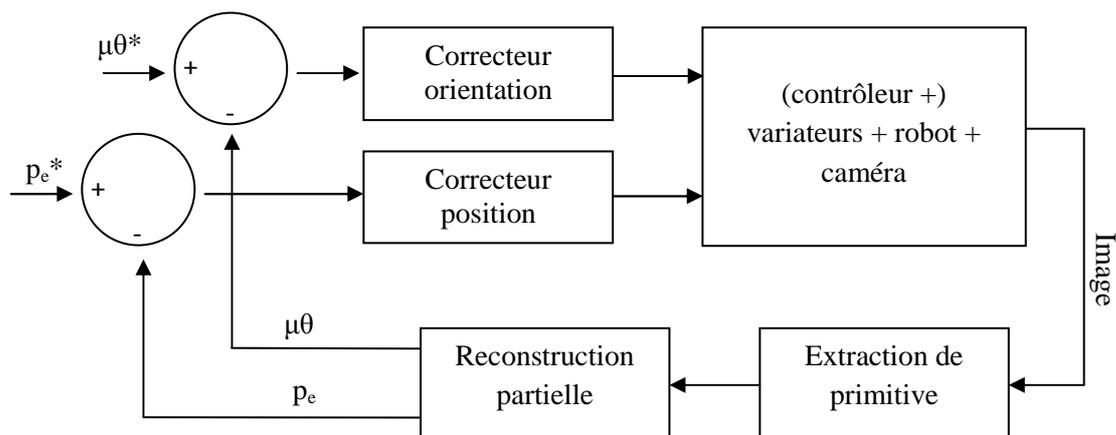


Fig.7 Schéma d'un asservissement 2D1/2

Quant à l'asservissement visuel $d2D/dt$, à l'opposé des techniques présentées précédemment, il utilise, non pas, des informations géométriques pour la régulation à zéro, entre les positions courantes et désirées, mais plutôt une vitesse relative entre la caméra et la cible exprimée dans le plan image par un champ de vitesse des points. Cette vitesse peut être mesurée par l'utilisation des techniques de flot optique [10]. Le schéma de ce type d'asservissement visuel est présenté en figure 8.

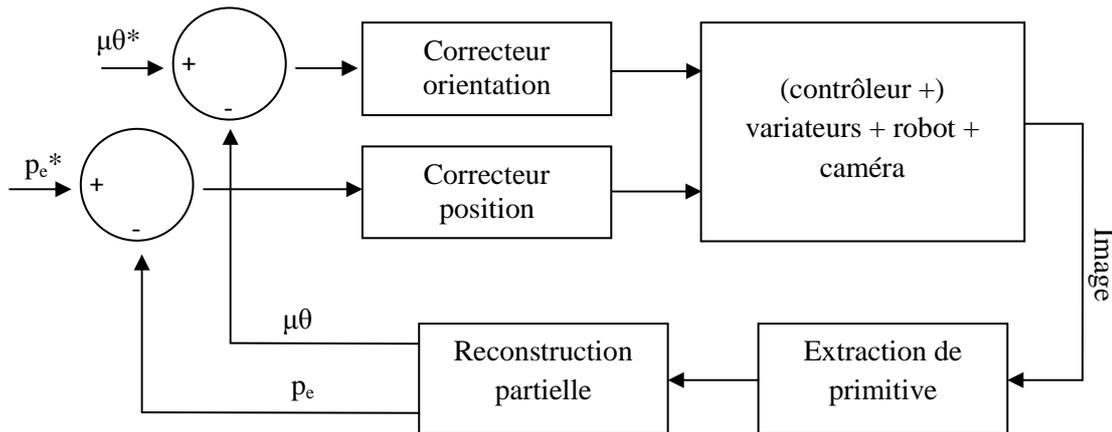


Fig. 8 Schéma d'un asservissement visuel $2D1/dt$

3. Applications de l'asservissement visuel

L'asservissement visuel est utilisé principalement pour réaliser des tâches de positionnement dont l'objectif est de ramener le robot à partir d'une position initiale à une position consigne mesurée à l'aide de la caméra [11][12]. Il peut être aussi utilisé pour le suivi d'une cible mobile, ce qui consiste à utiliser les images de la caméra pour ramener le robot à une situation d'équilibre par rapport à une cible mobile [13]. Dans le cas de la navigation et de l'évitement d'obstacles par un robot mobile qui réalise un déplacement d'un point A à un point B tout en évitant tout obstacle rencontré sur son chemin, l'asservissement visuel est amplement utilisé [14][15].

4. Etat de l'art sur l'asservissement visuel

L'asservissement visuel, appelé aussi commande référencée vision, consiste à utiliser des informations visuelles fournies par un capteur de

vision afin de contrôler les mouvements d'un robot et d'atteindre une consigne visuelle correspondant à une position désirée. L'information issue du capteur visuel représente l'image de la position. Elle fournit une mesure indirecte de la position et de l'orientation de l'organe terminal et remplace, ainsi, l'utilisation du modèle géométrique direct, ce qui permet de simplifier les modèles utilisés pour la commande des robots par l'asservissement visuel [16]. Les asservissements visuels impliquent la mise en œuvre d'un capteur visuel, d'un dispositif d'acquisition et de traitement ainsi que d'un robot. Le capteur visuel est souvent une camera. Cependant, il peut également être de tout type de dispositif imageur (scanner, IRM, etc.). La recherche en asservissements visuels est très active depuis une vingtaine d'année. Elle est constamment dopée par les nouvelles possibilités qui s'offrent en termes de puissance de calcul, de performance des imageurs ou de nouvelles applications robotiques [17]. Les caractéristiques les plus importants de cette recherche sont la stabilité, la robustesse et la commande. La stabilité en asservissement visuel est le premier problème traité. Il a été traité par *Espiau et. al.* dans [18] où ils ont utilisé le formalisme dit de fonction de tâche pour démontrer la stabilité asymptotique de la commande référencée vision. Cette preuve de stabilité a servi de point de départ à bon nombre de développements ultérieurs comme la commande 2D1/2. Le problème de robustesse est aussi un thème de recherche très important en asservissement visuel. Ce thème a été le sujet de nombreux travaux qui ont traité la robustesse par rapport aux erreurs de modélisation, robustesse par rapport aux perturbations et surtout robustesse de la vision (occlusions, variations lumineuses) [19]. Une part importante de la recherche en asservissement visuel est consacrée à la commande. On peut distinguer deux familles de lois de commandes, à savoir, les commande cinématiques et les commande dynamiques. En commande cinématique (asservissement visuel cinématique), le correcteur de la boucle de vision est un gain et toutes les dynamiques du système sont négligées. Le robot est modélisé par un intégrateur pur. L'objectif est d'assurer une trajectoire idéale dans l'image et dans l'espace ou d'atteindre une position donnée. Par contre en commandes dynamiques (asservissements visuels dynamiques), on tient compte, dans la

synthèse de la loi de commande, du modèle dynamique du système mécanique et du processus d'acquisition et traitement d'images. Dans le premier cas, l'objectif est la robustesse par rapport à une certaine tâche à accomplir (assurer une trajectoire idéale dans l'image et dans l'espace ou une position finale donnée) tandis que dans le second cas, l'objectif est la performance notamment en termes de rapidité [20]. En ce qui nous concerne, l'application que nous proposons de réaliser dans le cadre de notre mémoire, elle s'inscrit dans les domaines de la commande numérique, de la robotique et de la vision artificielle. En effet, il consiste à étudier, sur le plan théorique et pratique, la commande d'un système composé d'une table tournante, d'un bras manipulateur et d'une caméra. Le fonctionnement de cet ensemble, piloté par un ordinateur à travers une carte d'acquisition d'images et d'une carte de commande, consiste à faire tourner la table à une vitesse constante et à détecter tout objet posé sur la table. Une fois l'objet détecté, la table s'arrête, le temps que le processus de vision par caméra déportée intervient pour déterminer la position de cet objet pour, ensuite, le reconnaître. Pour terminer, le robot saisit l'objet en question et le déplace vers l'emplacement prévu pour cet objet. Le schéma de principe du système à commander est représenté en figure 9.

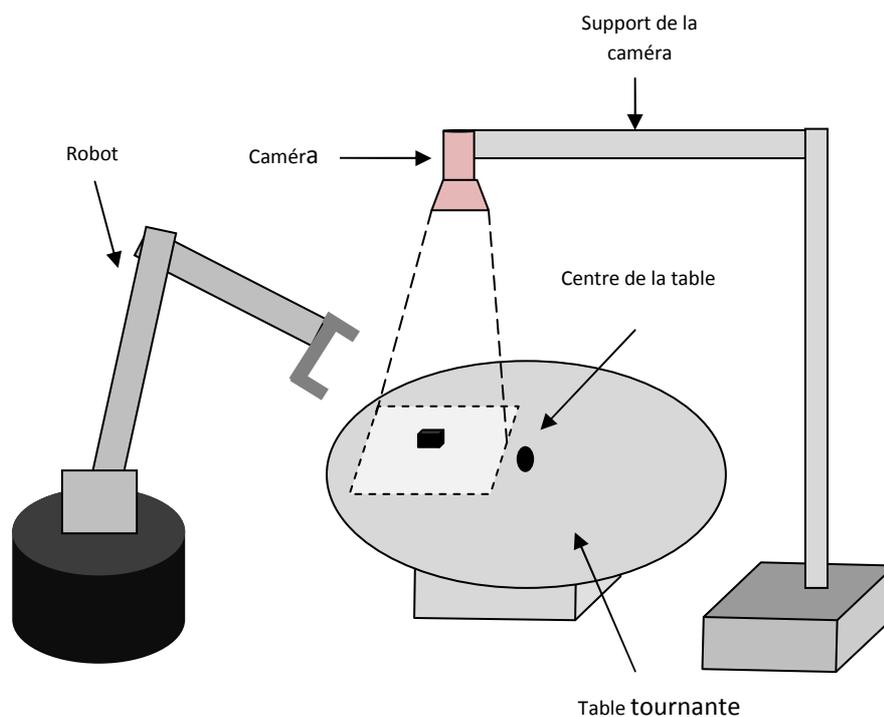


Fig.9 Schéma de principe du système à commander.

La table tournante est un disque tournant de rayon de 20 centimètres. Le mouvement de rotation de ce disque est assuré, à travers un mécanisme de réduction de vitesse, par un moteur à courant continu. La caméra est fixée sur un support au-dessus de la table tournante et positionnée de telle sorte que son champ de vision sur la table soit fixé entre le robot et l'axe de rotation de la table. Le robot utilisé est à trois degrés de libertés. Il est positionné de telle manière à pouvoir saisir et déplacer les objets vers leurs emplacements spécifiques.

5. Conclusion

Dans ce chapitre en premier lieu dédié à l'asservissement visuel, nous remarquons que cette étude est récente et inspire nombreux chercheurs. Les applications relatives à cet axe sont nombreuses et utilisent parfois des concepts très poussés en matière de vision 3D, de navigation et d'évitement d'obstacles et bien d'autres encore. Etant donné l'aspect théorique et réalisation pratique de notre travail, nous nous sommes fixé, pour but, le développement d'un système qui gère le fonctionnement d'une table tournante, d'un système de vision artificielle et d'un bras manipulateur. Pour ce faire, le travail est subdivisé en trois parties dont chacune correspond à un chapitre de ce mémoire. Ainsi, la première partie correspond aux étapes de développement d'une commande en vitesse constante de la table tournante, ce qui fait l'objet du premier chapitre. La seconde partie concerne la vision artificielle des objets sur la table qui permettra de détecter, de localiser et de reconnaître la forme de l'objet se présentant devant la caméra, objet du second chapitre. La dernière partie porte sur la commande en position du robot pour réaliser la tâche de saisie et de déplacement de l'objet.

Chapitre 2

Etude et réalisation de la commande numérique de la table

1. Introduction

Les premières implantations d'algorithmes de commande des systèmes ont été, d'abord, réalisées avec des solutions analogiques. Par la suite, les solutions numériques se sont naturellement imposées avec l'évolution des circuits numériques. Avec une approche continue, la réalisation pratique des correcteurs se fait, en analogique, avec des composants électroniques et réalisation d'un circuit. Un changement de conception passe par la construction complète d'un nouveau circuit. Par contre le numérique propose une autre approche utilisant des composants programmables (microcontrôleurs, microprocesseurs, etc.) pour réaliser le correcteur sous forme d'un programme informatique où la commande et l'erreur sont, généralement, liées par une équation de récurrence. Le changement ou la mise au point ne nécessitent plus de nouvelle réalisation technologique mais simplement d'un changement de valeurs de constantes dans le programme ou de l'équation de récurrence le cas échéant. Ceci est plus simple et moins cher que dans le cas continu qui nécessite un changement de composants et

de nouvelles soudures [21]. Dans notre application, la table doit tourner à une vitesse constante malgré les variations de la charge dues à la présence d'objets sur la table. De plus, après la détection d'un objet arrivant dans le champ de vision de la caméra, annulant, ainsi, la consigne de vitesse la table doit s'arrêter en un temps le plus bref possible, Pour réaliser la commande en rotation du moteur de la table en respectant les contraintes citées, un correcteur numérique est calculé en utilisant la méthode de Zdan [22].

2. Description de la table tournante

Le schéma de la table tournante avec ses différentes composantes est donné par la figure 1.

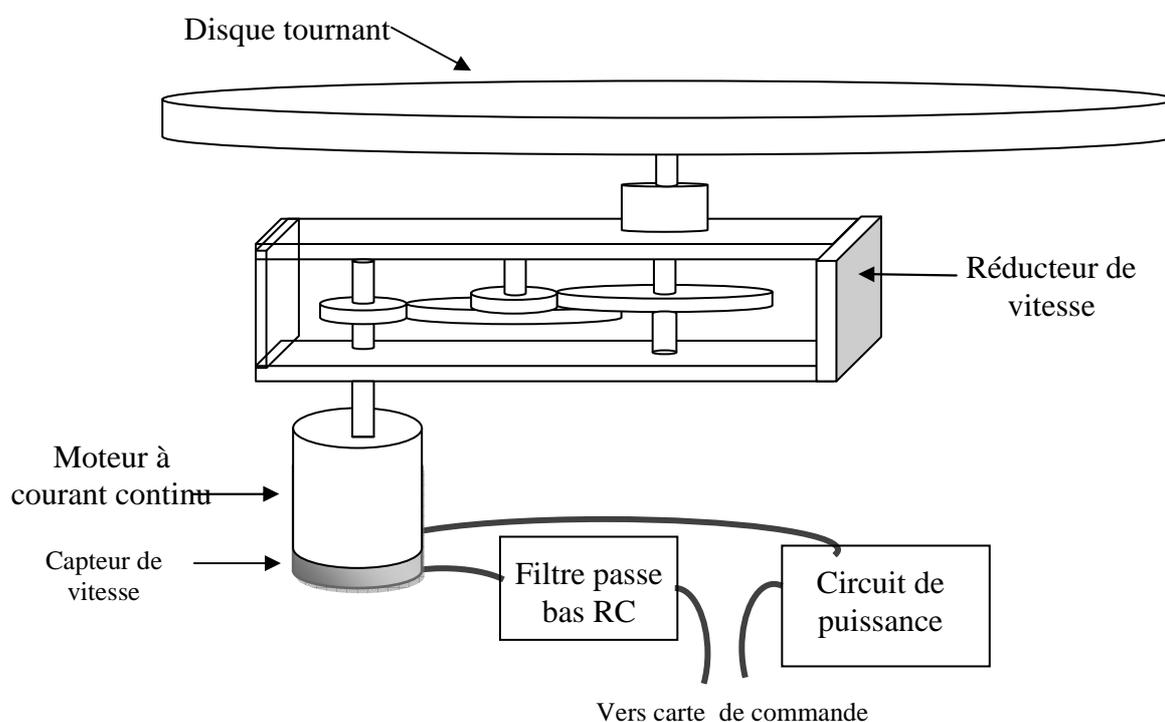


Fig.1 Schéma de la table tournante et ses composantes.

Les éléments qui composent ce système sont le moteur à courant continu, le disque tournant, le capteur de vitesse, le circuit de puissance et le réducteur de vitesse. Le moteur à courant continu est à aimant permanent dont la tension et la vitesse nominales sont respectivement de 12 volts et de 4000 tr/mn. Le disque tournant est uniforme et il est de diamètre 40 cm,

d'épaisseur 0.3 cm et il pèse 300 grs. Le capteur de vitesse est une génératrice tachymétrique [23] intégrée avec le moteur. Sa fonction est de fournir en sortie une tension continue u_T dont la valeur est proportionnelle à la vitesse du moteur Ω_m , et sa polarité indique le sens de rotation du moteur. Ainsi, nous avons la relation suivante :

$$u_T = K_T \cdot \Omega_m \quad \text{et} \quad K_T = 0.0013 \text{ Volts/ tours/minutes}$$

où K_T est appelé gain ou sensibilité de la génératrice tachymétrique.

Le comportement du capteur se rapproche du cas idéal, c'est-à-dire proportionnel et sans retard. Cependant des ondulations de hautes fréquences se superposent à la tension continue de sortie. Quant au filtre RC, il est réalisé par le circuit RC représenté en figure 2. Son rôle est d'éliminer le bruit de mesure de vitesse par un lissage de la tension de sortie du capteur de vitesse ou génératrice tachymétrique.

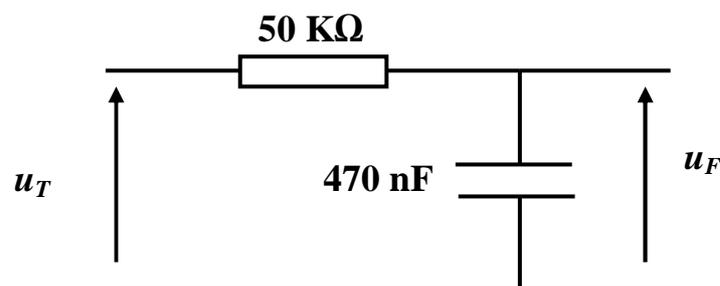


Fig.2 Schéma du circuit RC

Ce filtre atténue fortement la composante de hautes fréquences représentant le bruit de mesure et il laisse passer la composante de basses fréquences, correspondante à la vitesse du moteur, avec une atténuation et un déphasage (retard) négligeables ($u_F \approx u_T$). Pour illustrer l'action du filtre, un exemple d'une tension générée par le capteur de vitesse avant et après filtrage est représenté sur la figure 3.

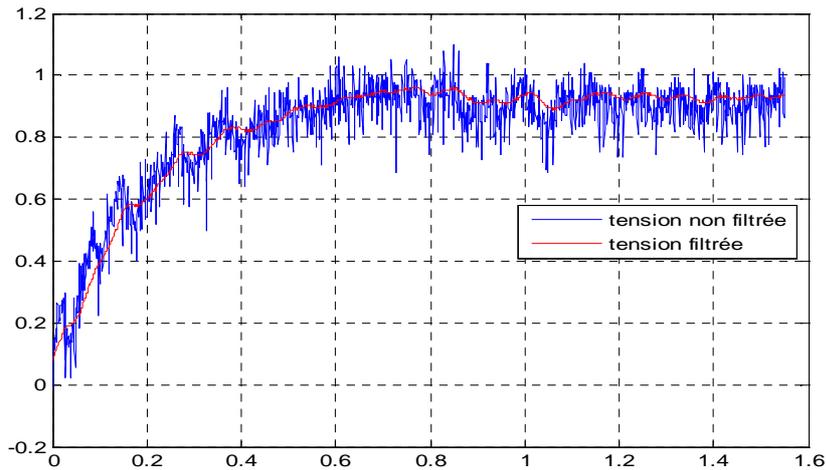


Fig.3 Tension générée par le capteur de vitesse avant et après filtrage.

Le réducteur de vitesse utilisé est réalisé avec un système roue et vis sans fin. Il est caractérisé par un rapport de réduction $K_R=1/69$ et un rendement n . Ainsi, pour tourner la table à une vitesse Ω , le moteur doit tourner à une vitesse Ω_m égale à 69 fois Ω , en générant une puissance mécanique égale à $69 n$ fois moins la puissance nécessaire pour faire tourner la table par le moteur sans réducteur. Ce réducteur permet d'éviter les mauvaises performances liées au fonctionnement du moteur en petites vitesses (ondulation en basses fréquences, refroidissement difficile, mauvais rendement etc.), d'une part, et l'augmentation de la charge nominale que peut entraîner le moteur, d'autre part [24]. Le circuit de puissance, est réalisé par le circuit intégré L293D (fig.4) [25]. Son rôle est d'alimenter le moteur par une tension de 12 volts lorsqu'il reçoit une tension de 5 volts sur son entrée de commande.

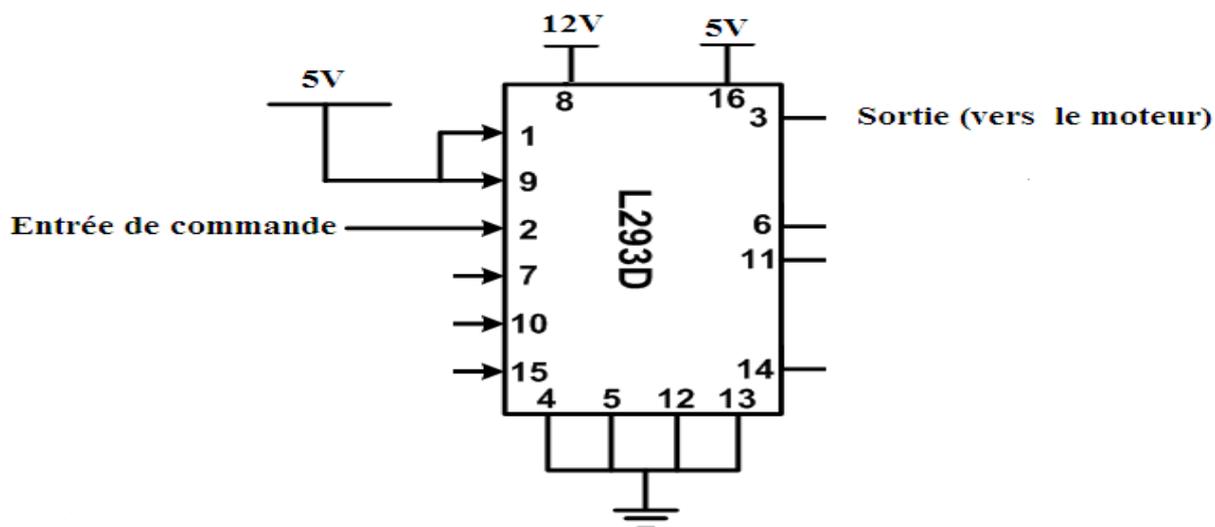


Fig.4 Circuit de puissance.

3. Commande numérique de la table tournante

Pour commander en vitesse la table tournante, quatre étapes ont été réalisées. La première est l'étape de modélisation où il est question de déterminer la fonction de transfert de la table tournante. La deuxième concerne le calcul, la simulation, et la programmation de la loi de commande $u(k)$. La dernière partie est l'étape de réalisation pratique de la commande de la table tournante.

3.1. Modélisation de la table tournante

L'objectif de cette partie est de trouver une relation mathématique, sous forme de fonction de transfert liant la tension de commande du circuit de puissance u à la vitesse de la table tournante Ω . Pour cela, la structure de la fonction de transfert est déterminée à partir des équations régissant le fonctionnement de la table. Les paramètres de cette fonction de transfert sont ensuite identifiés par un ensemble de tests pratiques.

- *Détermination de la structure de la fonction de transfert*

En tenant compte de la description de la table et des équations de base d'un moteur à courant continu à aimant permanent [26], les équations régissant le fonctionnement de l'ensemble sont:

$$u_m(t) = \dot{e} + R i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$\dot{e}(t) = k \Omega_m(t)$$

$$J \frac{d\Omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) \quad C_m(t) = k i(t)$$

$$\Omega(t) = K_R \Omega_m(t)$$

$$u_m(t) = K_P u(t)$$

$$u_F(t) = K_T \Omega_m(t)$$

où C_m est le couple électromagnétique du moteur. J , le moment d'inertie de l'ensemble des pièces tournantes ramenées à l'arbre du moteur. C_r , le couple résistant dû à toutes les charges tournantes et appliqué au moteur par l'intermédiaire du réducteur, k , la constante du moteur. I , le courant traversant l'induit du moteur, \dot{e} , la FEM du moteur, R , la résistance de l'induit du moteur et L , l'inductance de l'induit du moteur.

La transformée de Laplace appliquée aux équations précédentes donne :

$$U_m(p) = E(p) + R I(p) + L p I(p)$$

$$E(p) = k \Omega_m(p)$$

$$J p \Omega_m(p) = C_m(p) - C_r(p)$$

$$C_m(p) = k I(p)$$

$$\Omega(p) = K_R \Omega_m(p)$$

$$U_m(p) = K_P U(p)$$

$$U_F(p) = K_T \Omega_m(p)$$

Ceci nous conduit au schéma fonctionnel de la table tournante (fig.5).

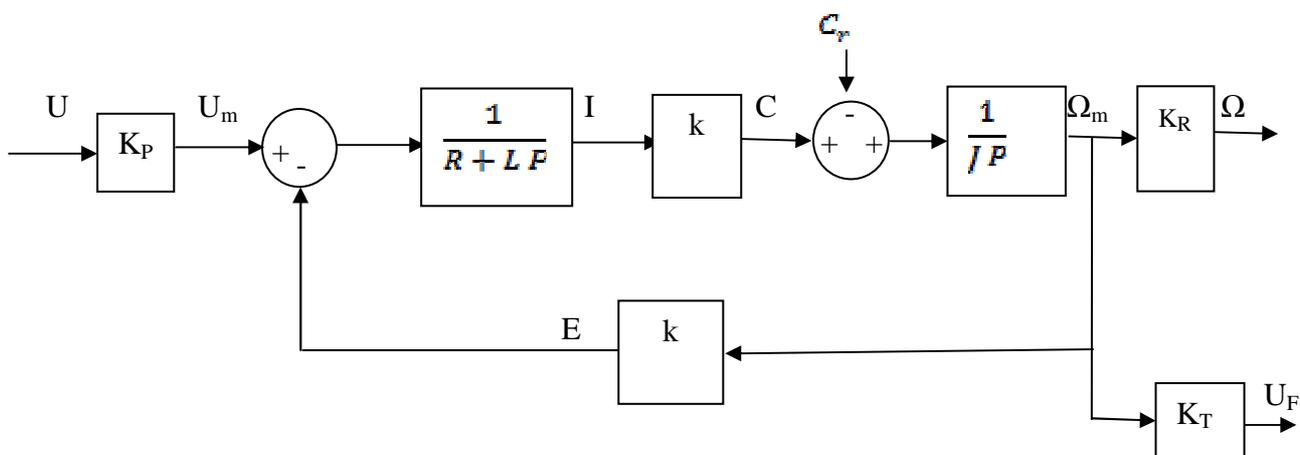


Fig.5 Schéma fonctionnel du de la table tournante.

Le couple résistant C_r est composé d'un couple, proportionnel à la vitesse, correspondant au couple de frottement dû principalement au réducteur de vitesse et d'un couple dépendant de la charge C_c [27], c'est-à-dire :

$$C_r(t) = C_c + \lambda \Omega_m(t)$$

où λ est le coefficient des frottements.

Du fait de l'importance du rapport de réduction (1/69) du réducteur de vitesse, la charge influe peu sur l'arbre du moteur et le couple de frottement est assez important. Ainsi, le couple de la charge est négligeable devant le couple de frottement. Par conséquent, on écrit :

$$C_r(t) = \lambda \Omega_m(t)$$

Ce qui donne :

$$J \frac{d\Omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - \lambda \Omega_m(t)$$

Ce qui donne :

$$Jp \Omega_m(p) = C_m(p) - \lambda \Omega_m(p)$$

En combinant ces équations, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$G(P) = \frac{\Omega(p)}{U(P)} = \frac{k K_P K_R}{k^2 + R\lambda + (RJ + L\lambda)p + LJ p^2}$$

qui peut être mise sous la forme canonique suivante:

$$G(p) = \frac{\Omega(P)}{U(P)} = \frac{G}{1 + \frac{2h}{w_n} p + \frac{1}{w_n^2} p^2}$$

avec :

$$G = \frac{k K_P K_R}{k^2 + R\lambda}, \quad \frac{2h}{w_n} = \frac{RJ + L\lambda}{k^2 + R\lambda} \quad \text{et} \quad \frac{1}{w_n^2} = \frac{LJ}{k^2 + R\lambda}$$

Ainsi, pour déterminer le modèle de la table, il suffit d'identifier les paramètres G , h et w_n en utilisant la méthode des moindres carrés [28]. Pour ce faire, en premier lieu, nous avons réalisé sur la table, sans le circuit de puissance, un essai indiciel en appliquant un échelon de 6 volts. La réponse indicelle relative à la vitesse est enregistrée (fig.6) en prenant en compte 1600 points. (kT , $\Omega_{mes}(kT)$). kT représente les instants de mesures séparés par une période T de 0.25 ms, et $\Omega_{mes}(kT)$ représente la vitesse mesurée à l'instant kT .

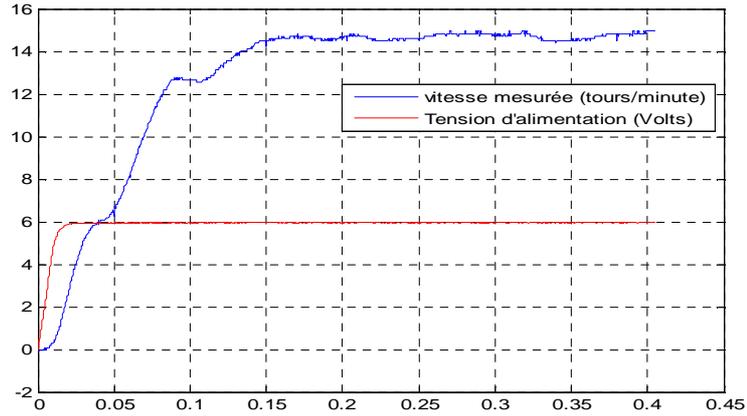


Fig.6 Tension d'alimentation et vitesse mesurée de la table.

A partir de l'allure de cette courbe, on conclut que la réponse indicielle en vitesse présente un comportement apériodique [29]. Par conséquent,

$$\Omega(t) = \Omega_{\infty} \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

avec : $\tau_1 = \frac{1}{w_n} (h + \sqrt{h^2 - 1})$

$$\tau_2 = \frac{1}{w_n} (h - \sqrt{h^2 - 1})$$

$$\Omega_{\infty} = U_0 G_m \quad \text{avec} \quad G_m = \frac{G}{k_p}$$

En second lieu, la méthode des moindres carrés a été appliquée pour déterminer les paramètres G, h et w_n par la minimisation du critère quadratique suivant :

$$J = \sum_{k=0}^N [\Omega(kT) - \Omega_{\text{mes}}(kT)]^2$$

où $\Omega_{\text{mes}}(kT)$ est la mesure de la réponse indicielle prise à l'instant kT et $\Omega(kT)$, la valeur de la réponse indicielle à estimer à l'instant kT

Les résultats de cette minimisation sont :

$$G_m = \frac{15}{6}, \quad G = 6, \quad h = 1.12 \quad \text{et} \quad w_n = 37.26$$

d'où la fonction de transfert suivante :

$$G(P) = \frac{6}{1 + 0.06p + 0.0007p^2}$$

La figure 7 représente la réponse indicielle mesurée et la réponse indicielle (estimée) pour le modèle de la table identifié et obtenu par identification. Les deux réponses indicielles sont mesurées en tr/mn

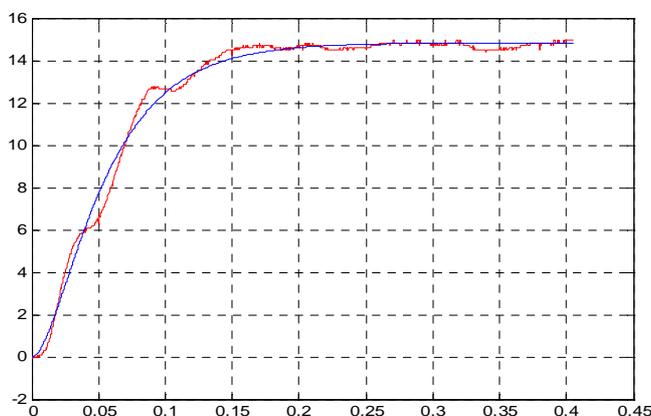


Fig.7 Réponse indicielle mesurée (en rouge) et réponse indicielle estimée (en bleu).

Nous constatons que le temps de réponse t_r de la table est de 0.15 s

3.2. Calcul de la commande numérique de la table tournante

Pour calculer la commande de la table tournante, nous avons proposé deux solutions à savoir, la commande numérique proportionnelle en boucle ouverte et la commande numérique par la méthode de Zdan.

- *Commande proportionnelle en boucle ouverte*

La première commande proposée correspond à une commande proportionnelle en boucle ouverte permettant d'avoir, en régime permanent, une vitesse de la table de 10 tours/minute à chaque fois que la tension de commande de la vitesse de la table u_c est de 5 Volts (fig.8).

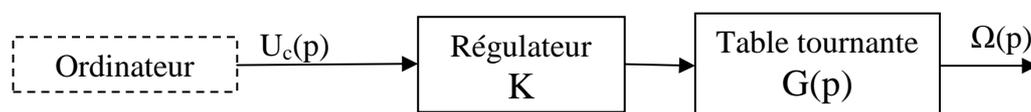


Fig.8 Schéma fonctionnel de la commande proportionnelle.

D'après le schéma fonctionnel ci-dessus et en utilisant le théorème de la valeur finale, on peut écrire :

$$\lim_{t \rightarrow 0} \Omega(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \Omega(p) \quad \text{avec} \quad \Omega(p) = U_c(p) k G(p)$$

Ceci donne:

$$\Omega(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p U_c(p) k G(p) = u_c k G$$

d'où : $k = \frac{\Omega(\infty)}{u_c G}$

Ainsi pour avoir $\Omega(\infty) = 10 \text{ tr. mn}^{-1}$ pour $u_c = 5V$, on prendra $k = \frac{1}{3}$. Notons que pour avoir $\Omega(\infty) = 10 \text{ tr. mn}^{-1}$ pour $u_c = 5V$, nous pouvons aussi modifier le gain de la table. Au lieu de $G=6$, on prend $G = 2$, ce qui donne $k=1$.

- *Commande numérique par la méthode de Zdan*

La seconde commande utilisée est une commande numérique en boucle fermée calculée par la méthode de Zdan dans le but est de rendre le fonctionnement de la table stable, précis et rapide.

Le schéma bloc de la boucle d'asservissement à réaliser est donné par la figure 9.

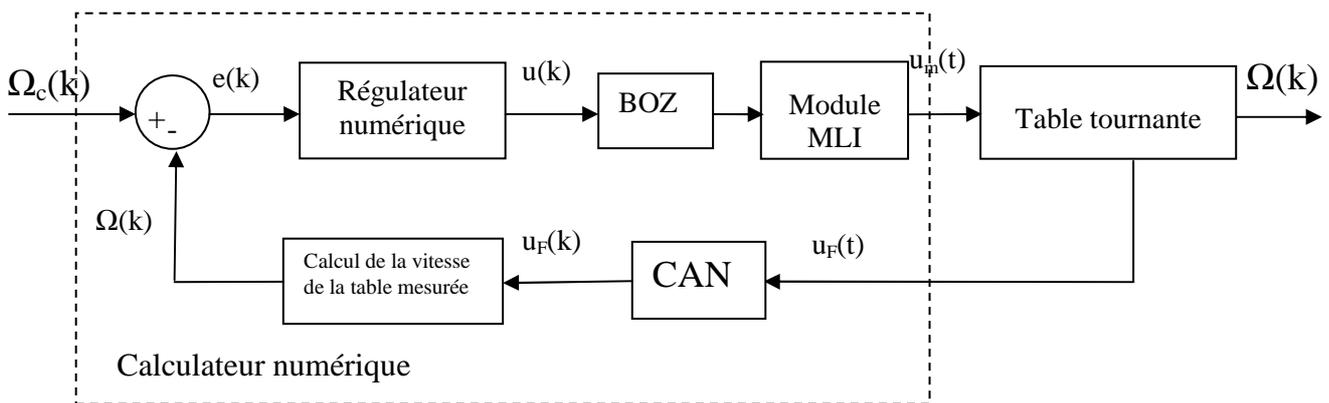


Fig.9 Schéma-bloc de l'asservissement de la table

Rappelons que dans ce schéma, le régulateur numérique permet de calculer la tension de commande $u(k)$ à chaque instant d'échantillonnage kT à partir de $e(k)$, l'écart entre la vitesse consigne $\Omega_c(k)$ et la vitesse de la table mesurée $\Omega(k)$, et les valeurs précédentes de $u(k)$ et $e(k)$ mémorisées. Le bloqueur d'ordre zéro permet de maintenir la tension de commande $u(k)$ constante entre deux instants d'échantillonnage kT et $(k+1)T$. Le bloc de calcul de la vitesse de la table mesurée détermine la vitesse de la table $\Omega(k)$ à partir de la tension générée par le tachymètre et filtrée par le filtre RC. Par conséquent, il réalise l'opération inverse de l'ensemble tachymètre et réducteur de vitesse. En effet, il utilise la tension $u_F(k)$ pour déterminer la vitesse mesurée $\Omega(k)$.

Donc, ce bloc peut être représenté par un gain constant de k_R/K_T , c'est-à-dire: $\Omega = \frac{K_R}{K_T} u_F$, ce qui donne : $\Omega = 0.0897 u_F$

Le module MLI utilise la technique de modulation de largeur d'impulsion [30] pour générer un signal de tension continue u_{mli} , carré et de fréquence $f_{mli}=1\text{Khz}$, d'amplitude de 5 volts et d'un rapport cyclique α , avec $\alpha = u(k)/5$ (fig.9). On a : la fréquence du signal MLI ($f_{mli} = \frac{1}{T_{mli}}$) est largement supérieure devant la fréquence de coupure du filtre $G(P)$ ($\frac{1}{2\pi \tau_m} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.06}$). Ainsi, la vitesse du moteur n'a pas le temps de varier pendant quelques périodes [31] et le moteur va se comporter comme s'il est alimenté par une tension continue constante de valeur égale à la valeur moyenne de la tension générée par le module MLI $\langle u_{mli} \rangle$. Donc on peut prendre $u_m = \langle u_{mli} \rangle$ pour chaque période d'échantillonnage du système.

Le calcul de $\langle u_{mli} \rangle$ donne $\langle u_{mli} \rangle = \alpha 5$ et, comme $\alpha = \frac{u(k)}{5}$ et $u_m = \langle u_{mli} \rangle$, on a alors $u_m(k) = u(k)$

Pour le bloc CAN, comme son nom l'indique, il permet de convertir la tension continue analogique $u_F(t)$ en sortie du filtre en une tension numérique de même valeur $u_F(k)$ exploitable par le calculateur numérique.

Notons que les cinq blocs précédents sont réalisés sous forme d'un programme.

En ce qui concerne le bloc table tournante, celui-ci représente le système à commander, c'est-à-dire la table tournante modélisée précédemment par la fonction de transfert suivante :

$$G(P) = \frac{6}{1 + 0.06 p + 0.0007 p^2}$$

Le schéma fonctionnel correspondant au schéma bloc précédent est donné par la figure 10:

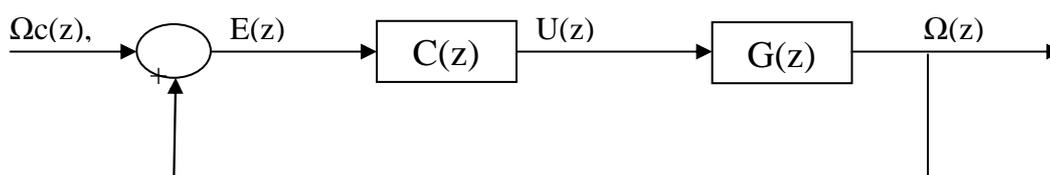


Fig.10 Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement de la table

Pour atteindre l'objectif de cette partie, nous avons choisi de calculer une loi de commande $u(k)$ permettant d'avoir, en boucle fermée, un système du second ordre avec un dépassement maximal de 5%, un temps de réponse de 0.07 s et un gain statique égal à l'unité. Le calcul de cette loi de commande est réalisé en les six étapes suivantes:

- Calcul de $H(p)$, fonction de transfert désirée en boucle fermée,
- Choix de la période d'échantillonnage T ,
- Calcul de $G(z)$ de la table munie du BOZ,
- Calcul de $H(z)$, fonction de transfert à atteindre en boucle fermée,
- Calcul du correcteur numérique $C(z)$,
- Calcul de la commande $u(k)$,

Le modèle en boucle fermée correspondant à un système du second ordre caractérisé par un temps de réponse $t_r=0.07s$, un dépassement maximal $D\%=5\%$ et un gain statique égal à l'unité. De l'abaque donnant la relation entre le dépassement ($D\%$) et le coefficient d'amortissement h d'un système du second ordre [32], nous avons déduit $h=0.7$ et de l'abaque donnant la valeur $\omega_n t_r$ en fonction de h , on a $\omega_n t_r = 3$ pour $h = 0.7$. d'où

$$\omega_n = \frac{3}{t_r} \quad \text{ce qui donne} \quad \omega_n = \frac{3}{0.07} = 42.857 \text{ rad/s}$$

Le gain statique égal à l'unité $H(0) = 1$ signifie une erreur statique nulle.

Ainsi, la fonction de transfert analogique du système désirée en boucle fermée est :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{2h}{\omega_n} p + \frac{1}{\omega_n^2} p^2}$$

avec $h = 0.7$ et $\omega_n = \frac{3}{0.07} = 42.857 \text{ rad/s}$

Ceci conduit à :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 0.7}{42.857} p + \frac{1}{42.857^2} p^2} = \frac{1}{1 + 0.0327p + 0.0005 p^2}$$

De la figure 11 représentant la réponse indicielle $H(p)$, on mesure un temps de réponse de 0.07s, un dépassement maximal de 5% et une erreur statique nulle. Par conséquent, la fonction de transfert $H(p)$ satisfait bien les exigences imposées.

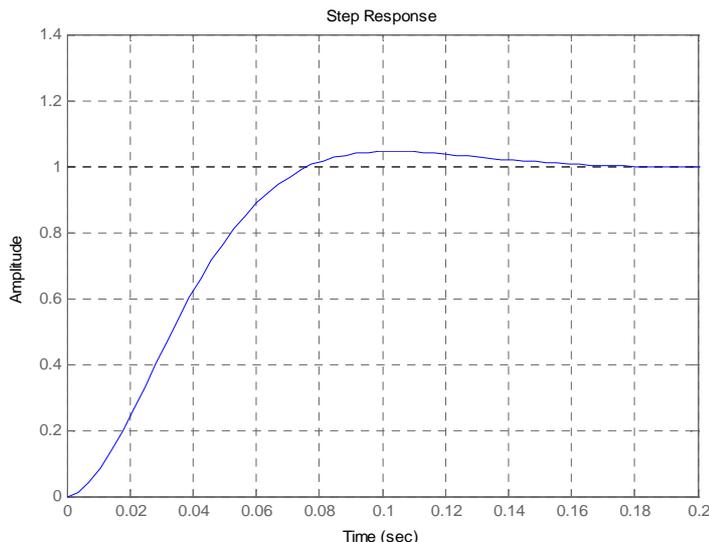


Fig.11 Réponse indicielle de H(p)

Pour le choix de la période d'échantillonnage Δ , la condition que doit satisfaire le pas d'échantillonnage Δ pour un système du second ordre [33] est

$$\frac{0.25}{\omega_n} < \Delta < \frac{1.25}{\omega_n}$$

Ce qui fait :

$$\frac{0.25}{42.857} < \Delta < \frac{1.25}{42.857} \quad \text{i.e :} \quad 0.006 < \Delta < 0.029$$

Dans notre application, nous avons fixé $\Delta=0.01\text{s}=10 \text{ ms}$.

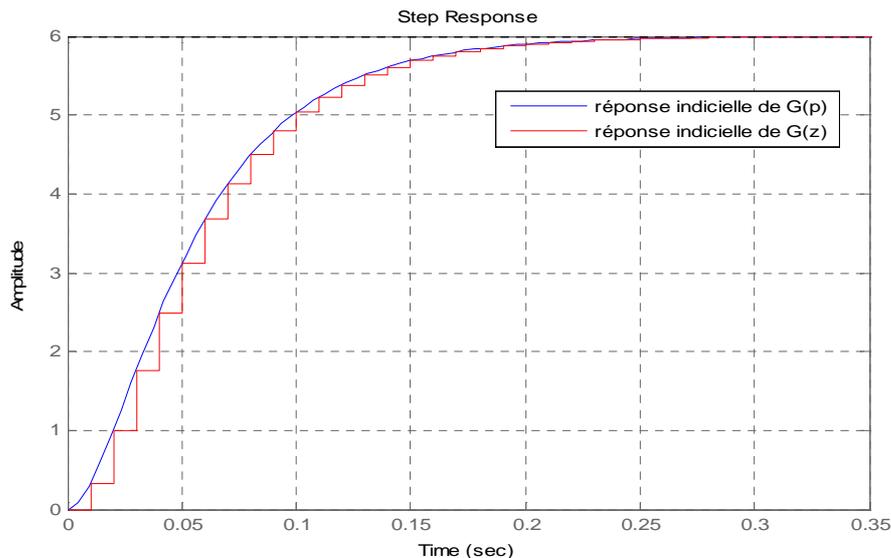
Ainsi, la fonction de transfert $G(z)$ du système muni de son BOZ est donnée par la relation suivante $G(z) = (1 - z^{-1}) \text{TZ} \left[\frac{G(p)}{p} \right]$, soit :

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \text{TZ} \left[\frac{6}{p(1 + 0.06 p + 0.0007 p^2)} \right]$$

Après tout calcul, nous obtenons :

$$G(z) = \frac{0.3248 z + 0.2441}{z^2 - 1.33 z + 0.4244}$$

La figure 12 représente les réponses indicielles de $G(p)$ et de $G(z)$.

Fig.12 : Réponses indicielles de $G(z)$ et $G(p)$.

Par ailleurs, la fonction de transfert échantillonnée désirée en boucle fermée est donnée par la relation suivante :

$$G(z) = \frac{b_1(z - z_0)}{(z - z_1)(z - z_2)}$$

avec :

$$b_1 = a_0 + \sqrt{a_0} \left[h \frac{w_n}{w_p} \sin(w_p \Delta) - \cos(w_p \Delta) \right],$$

$$b_0 = a_0 + \sqrt{a_0} \left[h \frac{w_n}{w_p} \sin(w_p \Delta) - \cos(w_p \Delta) \right]$$

$$w_p = w_n \sqrt{2 - h^2}$$

$$z_1 = z_2^* = e^{(-hw_n \Delta \pm jw_p \Delta)}, \quad z_0 = -\frac{b_0}{b_1}$$

ce qui donne :

$$H(z) = \frac{0.0748z + 0.0612}{z^2 - 1.413z + 0.5488}$$

Ainsi le correcteur numérique peut être calculé tel que :

$$C(z) = \frac{H(z)}{G(z)[1 - H(z)]}$$

Connaissant $G(z) = \frac{0.3248z + 0.2441}{z^2 - 1.33z + 0.4244}$ et $H(z) = \frac{0.0748z + 0.0612}{z^2 - 1.413z + 0.5488}$, on en déduit :

$$C(z) = \frac{0.2304z^3 - 0.1178z^2 - 0.1528z + 0.07998}{z^3 - 0.736z^2 - 0.6305z + 0.3665}$$

L'équation de récurrence liant la commande à l'erreur est déduite telle que :

$$U(z)[z^3 - 0.736z^2 - 0.6305z + 0.3665] = E(z)[0.2304z^3 - 0.1178z^2 - 0.1528z + 0.07998]$$

ou :

$$U(z)[1 - 0.736z^{-1} - 0.6305z^{-2} + 0.3665z^{-3}] = E(z)[0.2304 - 0.1178z^{-1} - 0.1528z^{-2} + 0.07998z^{-3}]$$

Dans le domaine temporel, cette équation devient :

$$u(k) = 0.2304 e(k) - 0.1178 e(k-1) - 0.1528 e(k-2) + 0.07998 e(k-3) \\ + 0.736 u(k-1) + 0.6305 u(k-2) - 0.3665 u(k-3)$$

Afin de valider la loi de commande $u(k)$, le schéma fonctionnel de la figure 13 a été réalisé en Matlab Simulink

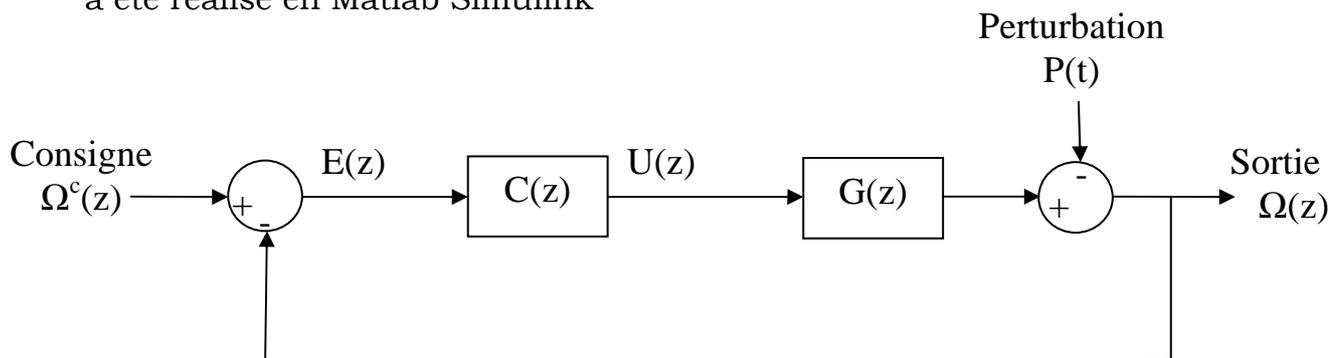


Fig.13 Schéma de simulation de la boucle d'asservissement.

Cinq cas ont été considérés :

- La consigne est un échelon d'amplitude 10 tours/minute et la perturbation est nulle.
- La perturbation est nulle et la consigne vaut 19 tours/minute
- La perturbation est un échelon d'amplitude 5 et la consigne est de 10 tours/minute
- la consigne est un échelon d'amplitude 15 tours/minute et la perturbation est un échelon d'amplitude 4.
- La consigne est de 10 tours/minute et la perturbation est
 - nulle pour t allant de 0 à 1s.
 - une rampe d'amplitude 8 pour t allant de 1s à 2.5s.
 - une rampe échelon d'amplitude 12 pour t supérieur à 2.5s.

Les résultats de simulation pour chacun des cinq cas sont représentés par la figure 14.

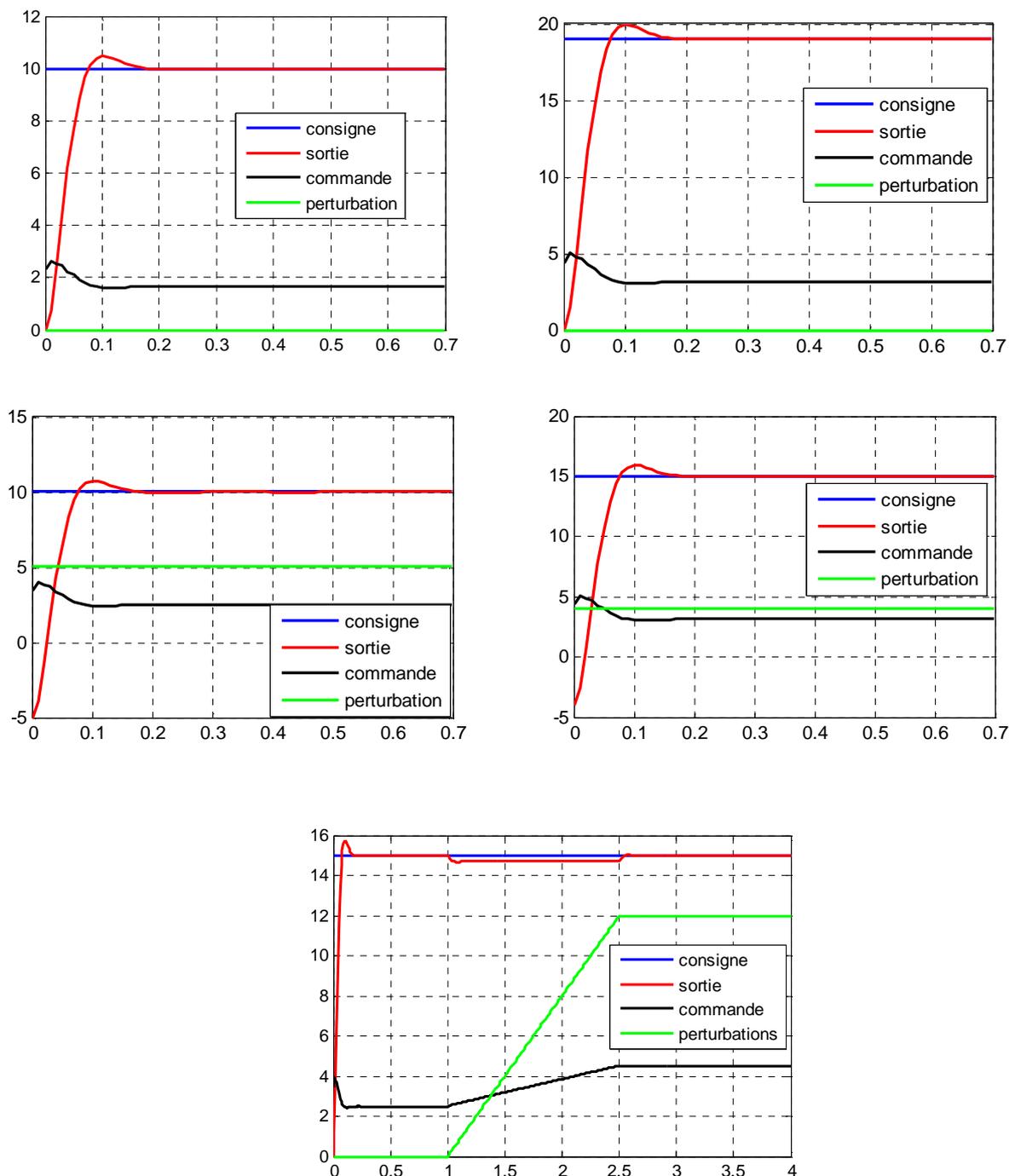


Fig.14 Résultats de simulation.

A partir des résultats obtenus, on constate que :

- Le temps de réponse est de 0.07s dans les cinq cas.
- Le dépassement est inférieur à 5%.
- L'erreur statique est nulle sauf en présence de la perturbation de type rampe, ce qui est évident puisque, lors du calcul du régulateur, l'erreur de vitesse n'est pas prise en compte.

- En l'absence de perturbation, la limite de saturation de commande (5V) est atteinte pour une consigne de 19 tours/minute.
- En présence de perturbation de type échelon d'amplitude 4, la limite de saturation de consigne est atteinte pour une valeur de consigne de 15 tours/minute.

L'algorithme du programme permettant à un ordinateur numérique de générer la tension $u(k)$ à partir de la valeur de la vitesse consigne Ω_C et de la mesure de la tension $u_F(k)$ est résumé comme suit (fig.15) :

1. initialisation à zéro de toutes les variables utilisées
 $u(k-5) = u(k-4) = u(k-3) = u(k-2) = u(k-1) = 0$
 $\Omega(k-5) = \Omega(k-4) = \Omega(k-3) = \Omega(k-2) = \Omega(k-1) = 0$
2. Lecture de la valeur de la vitesse consigne $\Omega_C(k)$
3. Acquisition et conversion numérique de la tension analogique $u_F(k)$
4. Calcul de la vitesse de la table mesurée $\Omega_m(k)$ à partir de la valeur de tension $u_F(k)$ par la relation : $\Omega_m(k) = u_F(k)/K_T$.
5. Calcul de $e(k)$ l'écart entre la vitesse consigne et la vitesse de la table par la relation : $e(k) = \Omega_C(k) - \Omega_m(k)$
6. Calcul de la commande $u(k)$
7. Calcul du rapport cyclique du module MLI α par la relation : $\alpha = u(k)/5$
8. Générer la tension MLI $u_m(k)$ de rapport cyclique α et de période $T_{mli} =$
9. Décaler les valeurs $u(k-5) = u(k-4)$, $u(k-4) = u(k-3)$, $u(k-3) = u(k-2)$, $u(k-2) = u(k-1)$,
 $u(k-1) = u(k)$,
10. Attendre une période d'échantillonnage
11. Revenir à l'étape 2

Fig.15. Etapes de calcul de l'équation de récurrence

3.3. Implémentation pratique de la commande de la table

Pour réaliser pratiquement la commande de la table, nous avons choisi de réaliser une commande proportionnelle en boucle ouverte avec un gain $k=1$ et de modifier le gain de la table tournante de 6 à 2. Pour effectuer cette modification, nous avons agi sur la tension d'alimentation V_{cc} du circuit de puissance de la table pour rendre $k_p = \frac{4}{5}$ (car $k = k_p G_m$ et $G_m = \frac{15}{6}$).

Le schéma de la commande de la table réalisée est donné par la figure 16.

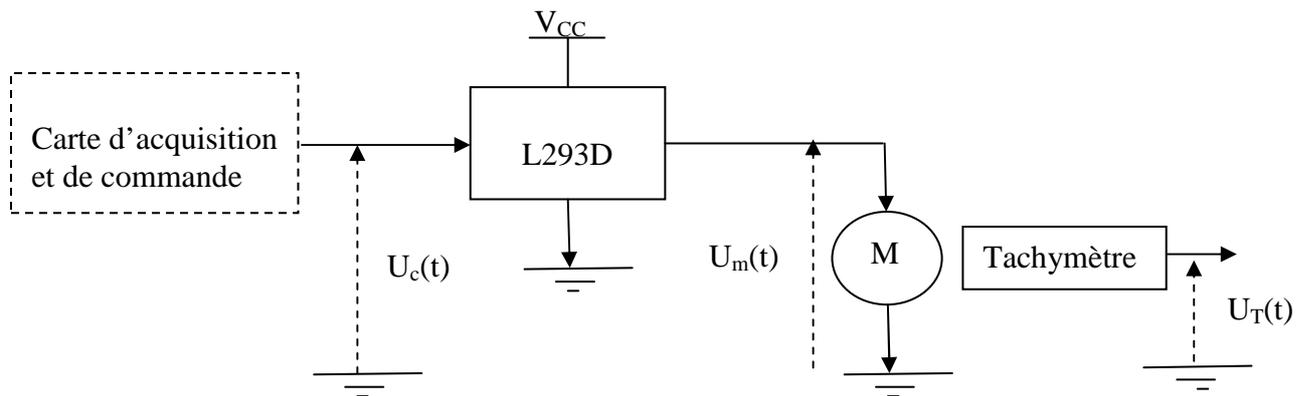


Fig.16 Schéma de la commande de la table réalisée.

Après l'implémentation de la commande de la table, nous avons enregistré les allures des tensions $u_c(t)$, $u_T(t)$, $u_m(t)$ représentées sur les figures 17 et 18.

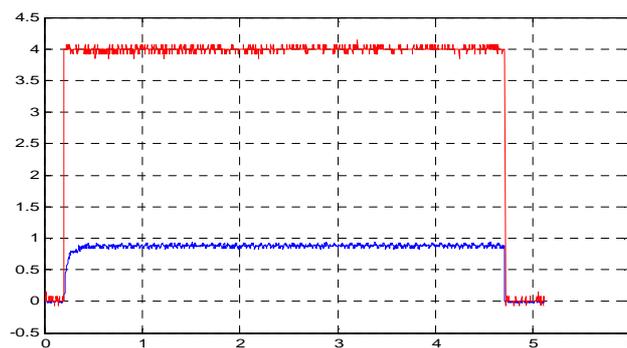


Fig.17 Relevé des tensions $u_m(t)$ et $u_T(t)$

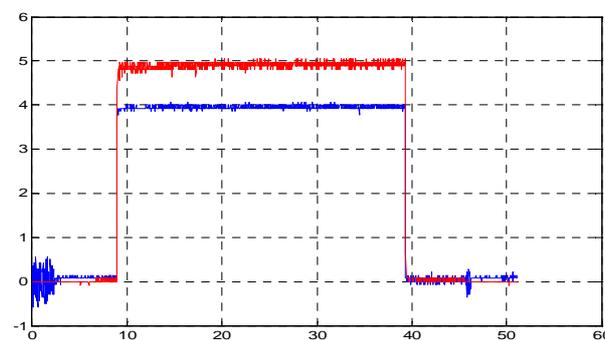


Fig.18 Relevé des tensions $u_c(t)$ et $u_m(t)$.

A partir de cette figure, nous remarquons bien que:

1. $k_p = \frac{u_m(t)}{u_c(t)} = \frac{4}{5}$
2. pour $u_c(t) = 0$ on a: $u_T(\infty) = 0V$
et pour $u_c(t) = 5$ on a: $u_T(\infty) = 0.88V$

et comme : $u_T(t) = 0.0897 \Omega(t)$ donc $\Omega(t) = 11.15 u_T(t)$ alors

pour $u_c = 0V$ on a $\Omega(\infty) = 0 \text{tr.mn}^{-1}$

et pour $u_c = 5V$ on a $\Omega(\infty) = 9.81 \text{tr.mn}^{-1} \cong 10 \text{tr.mn}^{-1}$

Ainsi, pour faire tourner la table à une vitesse de 10tr.mn^{-1} , il suffit de programmer à 5 volts (1 logique) la sortie de la carte d'acquisition à laquelle est connectée u_c .

4. Conclusion

Après une description des constituants de la table tournante et de ses différentes composantes, les étapes permettant la commande à savoir l'étape de modélisation, l'étape de calcul de la loi de commande, l'étape de simulation et validation et l'étape de réalisation pratique de la commande sont réalisées. Dans la première étape, un modèle est calculé sous forme d'une fonction de transfert du second ordre à partir des équations physiques régissant le fonctionnement du système. Ceci est effectué en utilisant la méthode des moindres carrés. En seconde partie, deux lois de commandes ont été calculées. La première correspond à une commande proportionnelle en boucle ouverte et la seconde à une commande numérique calculée par la méthode de Zdan. Ensuite, après validation de la commande numérique par simulation, un algorithme permettant son implémentation dans un circuit programmable est effectué. En dernière partie, sont présentés les résultats pratiques enregistrés après l'implémentation de la commande à l'aide d'un régulateur proportionnelle en boucle ouverte.

Chapitre 3

Détection, localisation et reconnaissance d'objet

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier et réaliser la seconde partie du mémoire relative à la détection, localisation et reconnaissance d'objets en vue de permettre à un robot de réaliser sa tâche de saisie et de déplacement d'un objet arrivant sur la table tournante. La détection d'un objet sur la table tournante conduit à l'arrêt immédiat de cette table. Cette détection est effective dès que l'objet entre dans le champ de vision de la caméra. La localisation permet de déterminer la position de l'objet par rapport à un repère fixe lié au robot. La reconnaissance permet d'identifier le type de l'objet à manipuler. L'ensemble de ces opérations est piloté par un système de vision artificielle dans lequel interviennent plusieurs techniques de traitement d'images et de reconnaissance de formes. Il n'est pas question pour nous de rentrer dans les détails de la reconnaissance de formes ni de celles du traitement d'images. Dans ce mémoire, notre objectif est de montrer la faisabilité de l'ensemble du système composé du robot, table tournante et vision artificielle. A cet effet, les objets à reconnaître sont

réduits à de simples objets facilement identifiables par leurs couleurs et leurs formes géométriques les plus classiques.

2. Détection d'objets

Indépendamment du rayon de la table en mouvement de rotation continu et tenant compte de la caméra utilisée, tout objet posé à n'importe quel endroit de cette table est ramené par un système de guidage sous le champ de vision de la caméra (fig.1). Ainsi, la détection de la présence de l'objet sur la table est liée à la présence d'objets dans les images de la caméra.

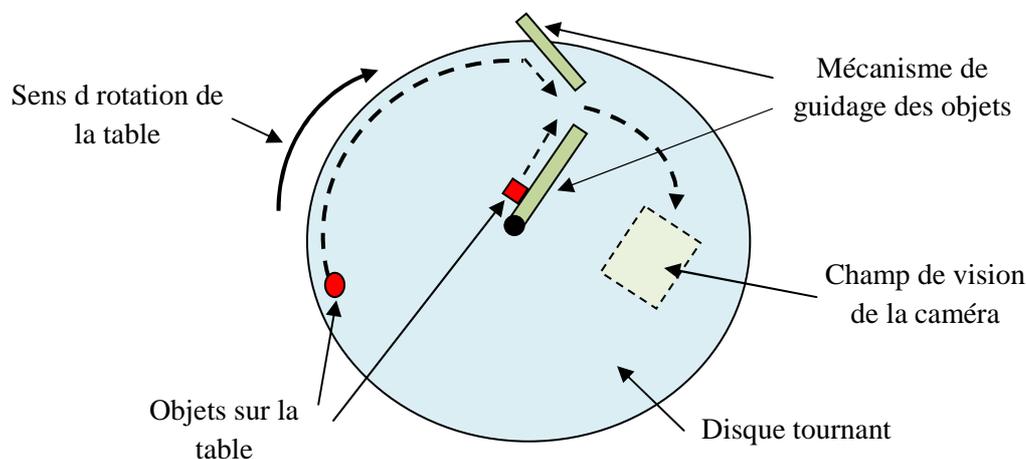


Fig.1 Guidage des objets sur la table

Pour réaliser cette détection, une image d'une couleur unie est tout d'abord acquise par la caméra. Puis l'opération de binarisation qui fait apparaître éventuellement l'objet en noir et le fond de l'objet en blanc, est réalisée. Si la somme S des intensités des pixels de la surface blanche de l'image est inférieure au seuil S_p indiquant la présence d'objet sur la table, on conclut qu'il y a présence d'objet sur la table (fig.2). Si la binarisation d'images est une opération parfois fastidieuse qui nécessite des algorithmes sophistiqués tels que ceux de Kapur [34] ou de Otsu [35], dans notre cas, pour réaliser pratiquement cette opération, l'image couleur, M_c , acquise initialement est

transformée tout d'abord en une image de niveau de gris M_g en utilisant l'expression suivante :

$$Mg(i,j) = \frac{Mc(i,j,1) + Mc(i,j,2) + Mc(i,j,3)}{3}$$

où $Mc(i,j,1)$, $Mc(i,j,2)$, $Mc(i,j,3)$ sont, respectivement, les intensités des pixels de l'image M_c correspondant aux composantes RVB. Ensuite, à partir de l'image M_g , une image binaire M_b est définie en utilisant:

$$Mb(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{si } Mg(i,j) \geq s \\ 0 & \text{si } Mg(i,j) < s \end{cases}$$

où s représente une frontière entre les valeurs des niveaux de gris des pixels de l'objet et les valeurs des niveaux de gris des pixels du fond de la table. Sa valeur dépendant, essentiellement, de l'éclairage de la scène fixée pratiquement.

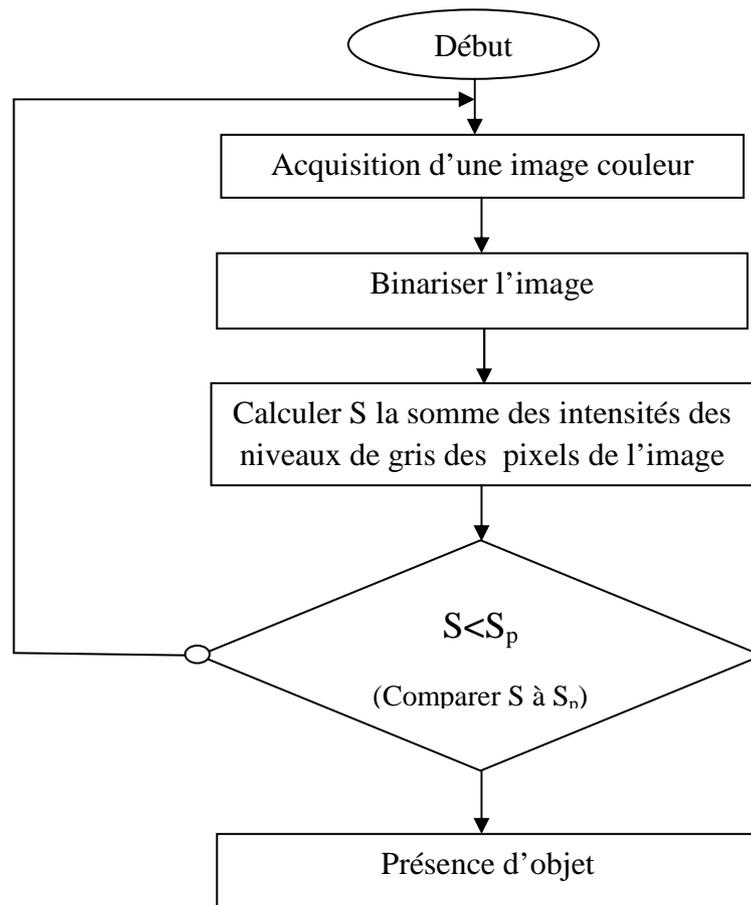


Fig.2 Organigramme de détection de présence d'objet

3. Localisation des objets

L'objet de cette partie est d'utiliser les images de la caméra pour déterminer la position de chaque objet détecté sur la table. Le repère de référence (O, \vec{i}, \vec{j}) est un repère fixe lié au robot et à la table. Comme illustré sur la figure 3, le centre O correspond au centre de la base du robot et l'axe du vecteur \vec{i} passe par le centre de rotation de la table. La position d'un objet est définie par les coordonnées (x_G, y_G) de son centre de gravité.

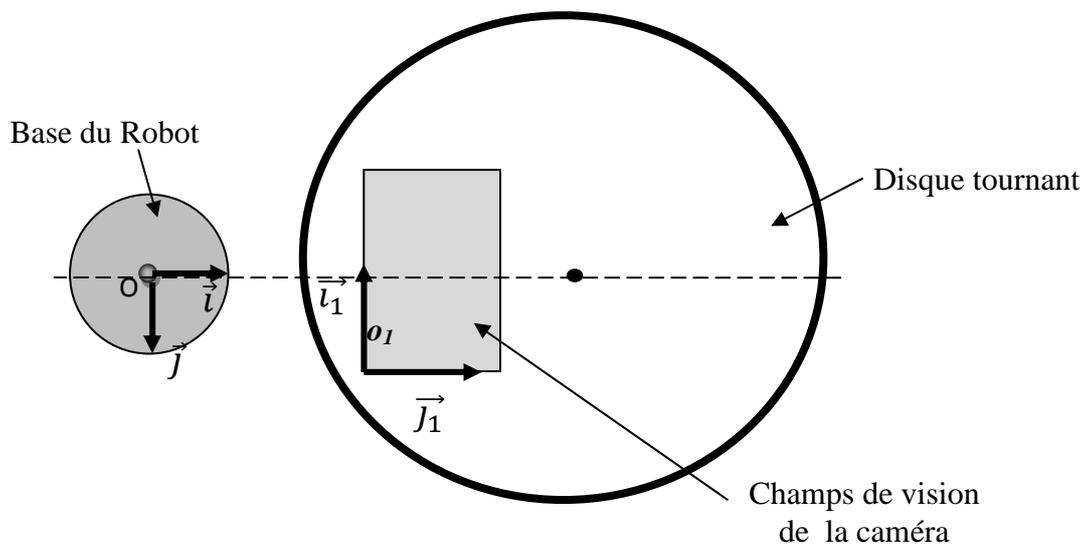


Fig.3 Position du repère (O, \vec{i}, \vec{j})

Avant de présenter la méthode permettant le calcul, dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , des coordonnées (x_G, y_G) du centre de gravité d'un objet présent dans une image de la caméra nous définissons d'abord:

- le repère $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$ lié au plan de l'image de telle manière que les coordonnées (x_2, y_2) d'un point (pixel) de l'image correspondent respectivement à la ligne et colonne de ce pixel dans l'image.
- le repère $(O_1, \vec{i}_1, \vec{j}_1)$ lié à la surface de la table du champ de vision de la caméra de telle manière que $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$ représente l'image de $(O_1, \vec{i}_1, \vec{j}_1)$ comme illustré en figure 3.4.
- (x_{01}, y_{01}) les coordonnées de O_1 centre du repère $(O_1, \vec{i}_1, \vec{j}_1)$ dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .

- (x_{1G}, y_{1G}) les coordonnées du centre de gravité G de l'objet dans le repère $(O_1, \vec{i}_1, \vec{j}_1)$.
- (x_{2G}, y_{2G}) les coordonnées de G' l'image du centre gravité de l'objet G dans le repère $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$.
- $x_{1m}, y_{1m}, x_{2m}, y_{2m}$ sont respectivement les valeurs maximale de x_1, y_1, x_2, y_2 respectivement.
- C le centre de la caméra.
- A_1, B_1 les points de la table de coordonnées $(x_1, 0), (x_1, y_{1m})$.
- A_2, B_2 les points du plan de l'image de coordonnées $(x_2, 0), (x_2, y_{2m})$.
- (x_i, y_i) les coordonnées du vecteur \vec{i}_1 dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .
- (x_j, y_j) les coordonnées du vecteur \vec{j}_1 dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .

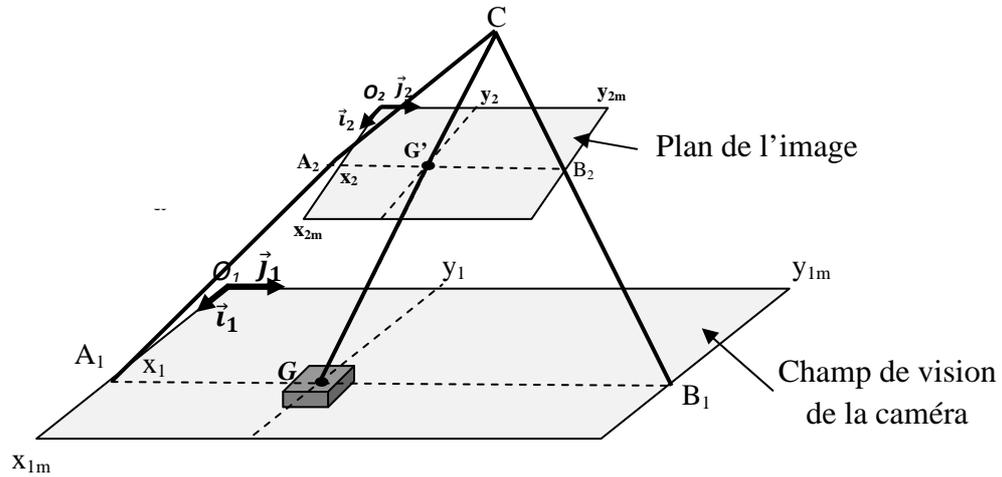


Fig.4 Représentation des repères $(O_1, \vec{i}_1, \vec{j}_1)$ et $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$

Pour calculer (x_G, y_G) dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , en premier lieu, nous calculons (x_{2G}, y_{2G}) à partir de l'image de l'objet puis (x_{1G}, y_{1G}) à partir de (x_{2G}, y_{2G}) et (x_G, y_G) à partir de (x_{1G}, y_{1G}) .

- *Calcul de (x_{2G}, y_{2G}) à partir de l'image de l'objet*

Les coordonnées du centre de gravité de l'objet dans l'image sont définies par les deux relations suivantes [36]:

$$x_{2G} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{x_2(k)}{n} \quad \text{et} \quad y_{2G} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{y_2(k)}{n}$$

où $(x_2(k), y_2(k))$ désignent les coordonnées des points du contour de l'objet dans l'image et n le nombre des points de contour de l'objet dans l'image.

Ainsi pour calculer (x_{2G}, y_{2G}) On détermine d'abord les coordonnées des points de contour de l'objet dans l'image par l'utilisation du filtre de Canny [37].

- Calcul de (x_{1G}, y_{1G}) à partir de (x_{2G}, y_{2G})

Du schéma de la figure 4, le schéma de la figure 5 suivante peut être déduit.

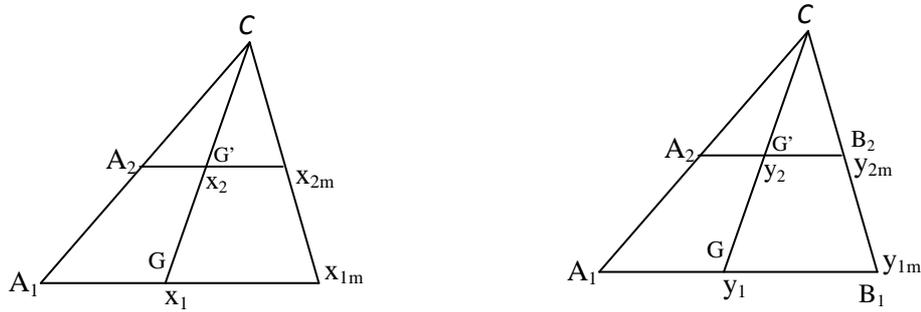


Fig.5 représentation des grandeurs x_{1m} , x_{2m} , y_{1m} , y_{2m}

L'application du théorème de Thalès à ces deux schémas donne :

$$\frac{x_{1G}}{x_{1m}} = \frac{x_{2G}}{x_{2m}} \text{ et } \frac{y_{1G}}{y_{1m}} = \frac{y_{2G}}{y_{2m}}, \text{ soit, } x_{1G} = \frac{x_{1m}}{x_{2m}} x_{2G} \text{ et } y_{1G} = \frac{y_{1m}}{y_{2m}} y_{2G}$$

- Calcul de (x_G, y_G) à partir de (x_{1G}, y_{1G})

La relation de Chasle entre les points O, O₁ et G donne :

$$\overrightarrow{OG} = \overrightarrow{OO_1} + \overrightarrow{O_1G}$$

soit,
$$\overrightarrow{OG} = x_{O_1} \vec{i} + y_{O_1} \vec{j} + x_{1G} \vec{i}_1 + y_{1G} \vec{j}_1$$

$$x_G \vec{i} + y_G \vec{j} = x_{O_1} \vec{i} + y_{O_1} \vec{j} + x_{1G} (x_i \vec{i} + y_i \vec{j}) + y_{1G} (x_j \vec{i} + y_j \vec{j})$$

$$\begin{cases} x_G = x_{O_1} + x_{1G} x_i + y_{1G} x_j \\ y_G = y_{O_1} + x_{1G} y_i + y_{1G} y_j \end{cases}$$

En remplaçant x_{1G} et y_{1G} par leurs expressions précédentes, on a :

$$\begin{cases} x_G = x_{O_1} + \frac{x_{1m}}{x_{2m}} x_i x_{2G} + \frac{y_{1m}}{y_{2m}} x_j y_{2G} \\ y_G = y_{O_1} + \frac{x_{1m}}{x_{2m}} y_i x_{2G} + \frac{y_{1m}}{y_{2m}} y_j y_{2G} \end{cases}$$

Si on pose $\frac{x_{1m}}{x_{2m}} x_i = x_{im}$, $\frac{y_{1m}}{y_{2m}} x_j = x_{jm}$, $\frac{x_{1m}}{x_{2m}} y_i = y_{im}$, $\frac{y_{1m}}{y_{2m}} y_j = y_{jm}$, nous obtenons :

$$\begin{cases} x_G = x_{01} + x_{im} x_{2G} + x_{jm} y_{2G} \\ y_G = y_{01} + y_{im} x_{2G} + y_{jm} y_{2G} \end{cases}$$

Sous forme matricielle, on a:

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{im} & x_{jm} \\ y_{01} & y_{im} & y_{jm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{2G} \\ y_{2G} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ainsi pour calculer (x_G, y_G) à partir de la connaissance de (x_{2G}, y_{2G}) , on doit déterminer les paramètres $x_{01}, y_{01}, x_m, y_m, x_i, y_i, x_j$ et y_j qui dépendent de la caméra et de sa position. Pour ce faire, nous proposons deux solutions la première consiste à réaliser la mesure directe des valeurs $x_{01}, y_{01}, x_{1m}, y_{1m}, x_i, y_i, x_j$ et y_j et prendre (x_{2m}, y_{2m}) comme étant la taille des images utilisées. La seconde consiste à calculer ces six paramètres à partir de trois points de la table dont on connaît les coordonnées dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , et les coordonnées de leurs images dans le repère $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$.

- *Calcul des valeurs de $x_{01}, y_{01}, x_m, y_m, x_i, y_i, x_j$ et y_j . Soient:*
 - a, b et c trois points de la table.
 - (x_a, y_a) , (x_b, y_b) et (x_c, y_c) les coordonnées de a, b et c respectivement dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .
 - (x_{2a}, y_{2a}) , (x_{2b}, y_{2b}) et (x_{2c}, y_{2c}) les coordonnées des images de a, b et c dans le repère $(O_2, \vec{i}_2, \vec{j}_2)$.

A partir du système (1) on peut écrire :

$$\begin{cases} x_a = x_{01} + x_{im} x_{2a} + x_{jm} y_{2a} \\ y_a = y_{01} + y_{im} x_{2a} + y_{jm} y_{2a} \\ x_b = x_{01} + x_{im} x_{2b} + x_{jm} y_{2b} \\ y_b = y_{01} + y_{im} x_{2b} + y_{jm} y_{2b} \\ x_c = x_{01} + x_{im} x_{2c} + x_{jm} y_{2c} \\ y_c = y_{01} + y_{im} x_{2c} + y_{jm} y_{2c} \end{cases}$$

L'écriture de ce système sous forme matricielle donne :

$$\begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \\ y_a & y_b & y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{im} & x_{jm} \\ y_{01} & y_{im} & y_{jm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix}$$

et si $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix}^{-1}$ existe, on aura :

$$\begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \\ y_a & y_b & y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{im} & x_{jm} \\ y_{01} & y_{im} & y_{jm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix}^{-1}$$

ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} x_{01} & x_{im} & x_{jm} \\ y_{01} & y_{im} & y_{jm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \\ y_a & y_b & y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{2a} & x_{2b} & x_{2c} \\ y_{2a} & y_{2b} & y_{2c} \end{bmatrix}^{-1}$$

Ainsi, pour localiser un objet présent dans une image trois étapes sont nécessaires à savoir,

- Déterminer les coordonnées de son centre de gravité dans l'image,
- Déterminer les valeurs des paramètres par mesure ou par calcul,
- Calculer des coordonnées du centre de gravité de l'objet

4. Reconnaissance des objets

Cette étape permet de reconnaître la forme de trois types d'objets : rectangulaires, circulaires et trapézoïdaux. Comme toute opération de reconnaissance de formes, cette partie est réalisée en plusieurs étapes et suivant le schéma synoptique classique d'un processus de reconnaissance de formes, représenté en figure 6 [38].

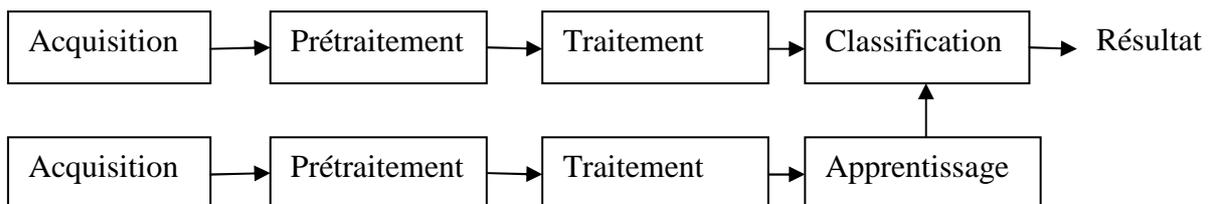


Fig.6 Schéma d'un processus de reconnaissance de formes

- *Acquisition*

Dans notre application, l'acquisition des images est réalisée par l'utilisation d'une caméra de type webcam. Les images sont acquises en couleur à des dimensions 480X640X3 tel que chaque élément $M(i, j, 1)$ représente le niveau de gris du pixel (i, j) relatif à la couleur rouge, $M(i, j, 2)$, le niveau de gris du pixel (i, j) relatif à la couleur verte, et $M(i, j, 3)$, le niveau de gris du pixel (i, j) relatif à la couleur bleu.

- *Prétraitement*

En prétraitement nous réalisons sur les images couleurs acquises un ensemble d'opérations permettant d'améliorer la perception des contours des objets présents dans les images acquises. Ces opérations sont :

- *Transformation de l'image couleur en niveaux de gris* suivant la méthode décrite précédemment.

- *Filtrage de l'image en niveau de gris par le filtre médian*

Ce filtre non linéaire est capable de réduire particulièrement les bruits qui affectent seulement un petit nombre de pixels sans dégrader les contours [39]. Son principe consiste à attribuer à tout pixel de l'image, la valeur médiane des intensités dans son voisinage.

- *Binarisation de l'image*

Cette opération consiste donc à réaliser une opération qui transforme l'image numérique acquise et filtrée en une image binaire dont la surface représentant l'objet est noire et le reste de la surface de la table est blanche. Pour ce faire, nous calculons un seuil de niveaux de gris s qui représente la frontière entre les niveaux de gris de l'objet et ceux du fond de l'objet. Puis nous réalisons, pour chaque pixel (i, j) de niveaux de gris $I(i, j)$ de l'image filtrée, la transformation :

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } I(i, j) > s \\ 0 & \text{si } I(i, j) \leq s \end{cases}$$

Le calcul de s se fait par l'utilisation de la méthode d'Otsu [40] dont l'algorithme peut être présenté comme suit :

1. Calculer h l'histogramme de l'image en niveau de gris et les probabilités de chaque niveau de gris de l'image $h(i)$.
2. On balais toutes les valeurs possibles du seuil et pour chaque seuil s possible on calcule
 - les moyennes $\mu_1 = \frac{1}{s} \sum_{i=0}^{s-1} h(i)$ et $\mu_2 = \frac{1}{h_m-s} \sum_{i=s}^{h_m-1} h(i)$ où h_m-1 est la valeur maximale de $h(i)$,
 - les poids $P_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{s-1} h(i)$ et $P_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=s}^{h_m-1} h(i)$ où N est le nombre de pixels de l'image et la variance inter-classe $\sigma_b^2 : \sigma_b^2 = P_1 P_2 [\mu_1 - \mu_2]^2$
3. Prendre comme seuil optimal la valeur de s qui maximise σ_b^2

- *Opérations morphologiques*

Ces opérations permettent d'améliorer l'image binaire, pour, particulièrement, rendre blancs les pixels noirs isolés et en noirs, les pixels blancs isolés. L'opération morphologique réalisée est l'opération de fermeture qui correspond à une dilatation suivie d'une érosion [41]. L'élément morphologique utilisé est un carré de 3x3 pixels. A ce propos, notons que la dilatation d'une image consiste à réaliser pour chaque pixel P de l'image binaire le OU logique de tous ses voisins définis par l'élément structurant utilisé. Si le résultat donne 1, la valeur du niveau de gris du pixel P est mis à 1, sinon sa valeur antérieure est conservée. Cette opération permet de réaliser un épaissement de l'image, en particulier il élimine les points noirs isolés L'érosion, quant à elle, consiste à réaliser, pour chaque pixel P de l'image, le ET logique de tous ses voisins définis par l'élément structurant utilisé. Si le résultat donne 0, la valeur du niveau de gris du pixel P est mis à 0, sinon sa valeur antérieure est conservée. Ce traitement permet de réaliser un épaissement de l'image, en particulier il élimine les points noirs isolés La figure 7 donne des exemples d'éléments structurants définissant le voisinage du pixel P .

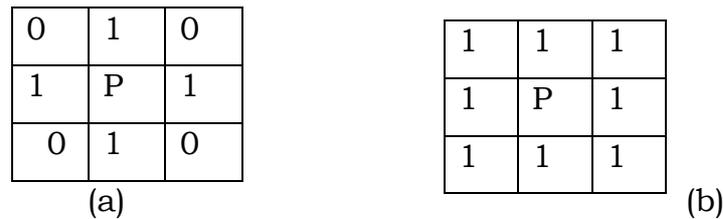


Fig.7 Élément structurant à (a):3-connexité (b) carré 3X3

- *Détection de contours par le filtre de Canny*

Comme son nom l'indique dans cette étape nous avons utilisé le filtre de Canny pour détecter les contours des objets dans les images binaires. La figure 8 suivante illustre l'effet des opérations de la partie prétraitement réalisée sur trois images couleurs acquises

- *Traitement*

Dans cette étape nous calculons une caractéristique discriminante de chacune des trois classes d'objets. Cette caractéristique est la signature polaire [42] de l'objet présent dans l'image en question (fig.9). Elle correspond à la courbe des distances entre le centre gravité et les pixels du contour pris en parcourant le contour à partir du pixel du contour le plus loin du centre de gravité. La figure 10 montre bien que la signature polaire permet bien de distinguer chacune des trois formes en question.

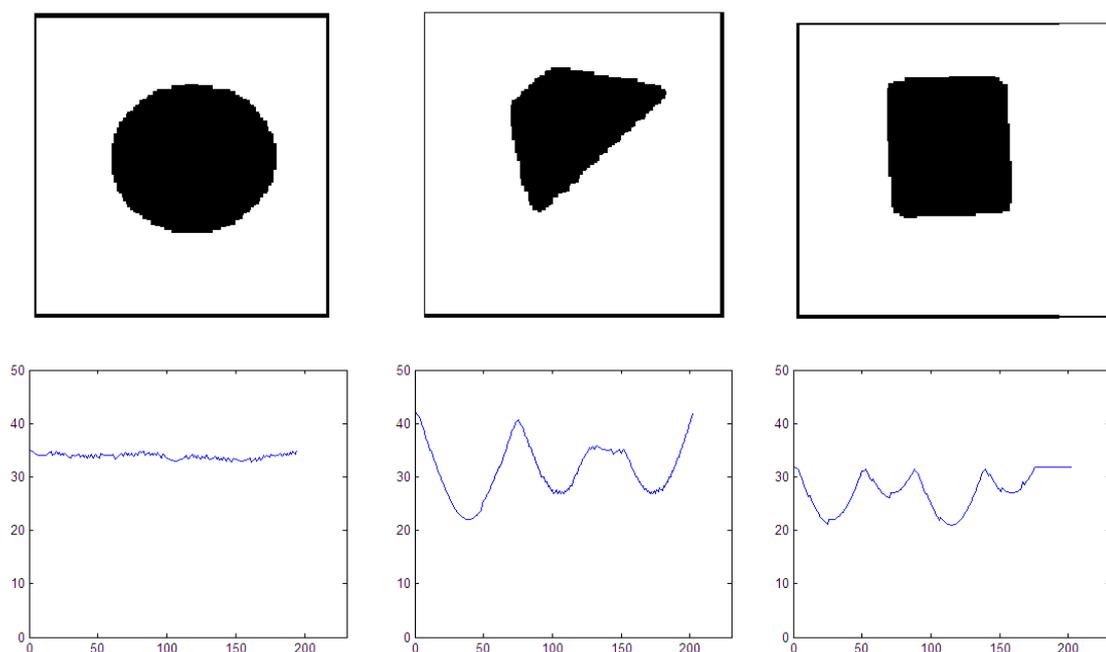
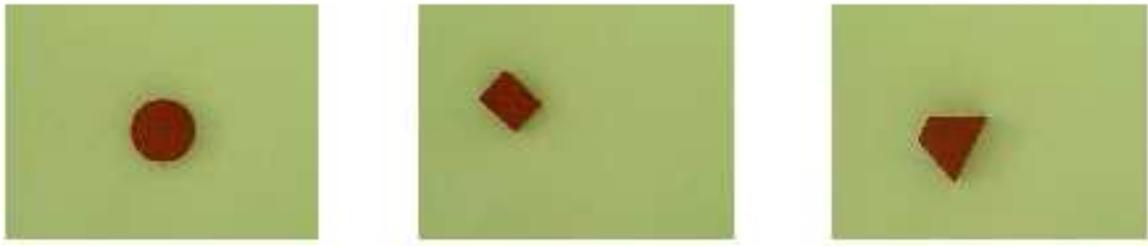
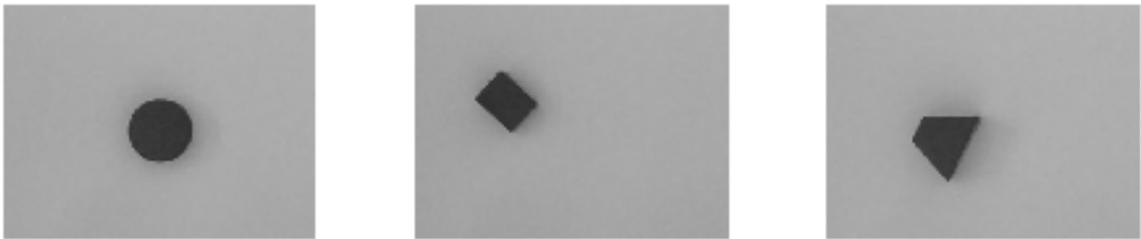


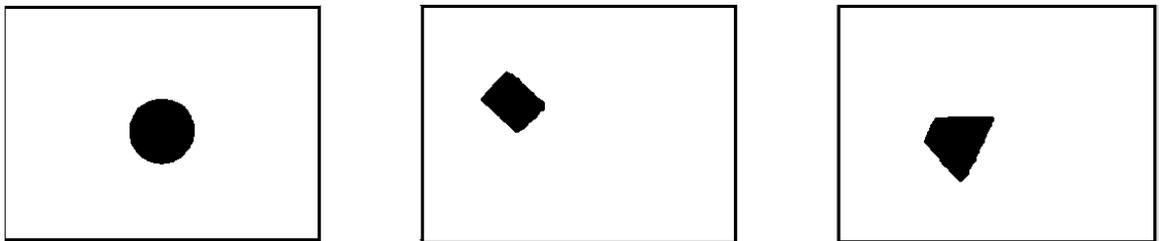
Fig.9 Signature polaires d'objets circulaires, trapézoïdale et rectangulaire.



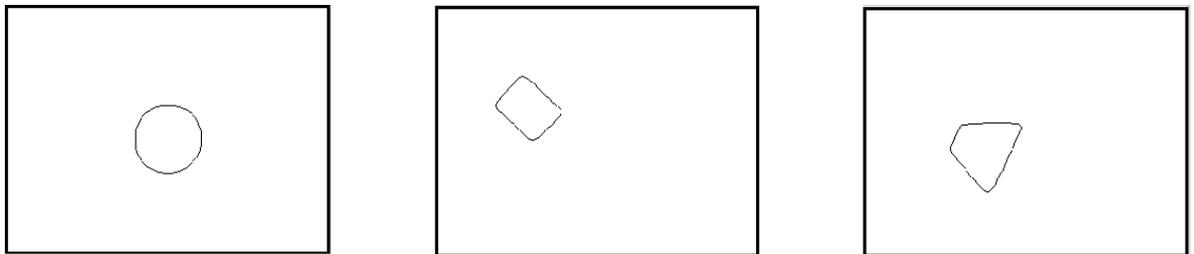
Images couleurs acquises



Images en niveau de gris filtrées par le filtre médian



Images binaires après les opérations morphologiques



Images de contours

Fig.8 Prétraitement des images

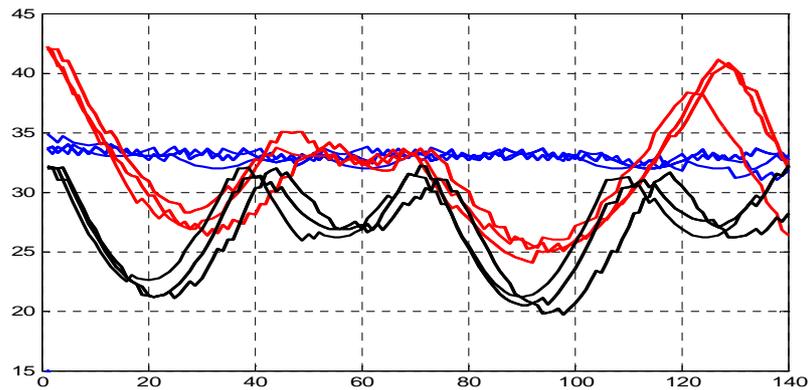


Fig.10 signatures polaires des trois objets circulaires (140 premiers points) (bleu), trois objets rectangulaires (noire) et trois objets trapézoïdaux (rouge).

- *Apprentissage*

En apprentissage, nous avons calculé une matrice d'apprentissage de dimension $[15 \times 180]$. Chaque ligne est formée par les 180 premiers points de la signature polaire d'un objet utilisé pour l'apprentissage. Comme le montre la figure 11, les cinq premières lignes correspondent aux objets rectangulaires (classe *rectangle*), les cinq lignes suivantes correspondent aux objets circulaires (classe *cercle*) et les dernières lignes correspondant aux objets trapézoïdales (classe *trapèze*).

$d_{1,1}$	$d_{1,2}$	$d_{1,179}$	$d_{1,180}$	}	Signatures polaires des objets rectangulaires
...		
...		
$d_{4,1}$	$d_{4,1}$	.....	$d_{4,179}$	$d_{4,180}$	
$d_{5,1}$	$d_{5,1}$	.....	$d_{5,179}$	$d_{5,180}$	
...	}	Signatures polaires des objets circulaires
...		
$d_{9,1}$	$d_{9,2}$	.....	$d_{9,179}$	$d_{9,180}$	
$d_{10,1}$	$d_{10,2}$	$d_{10,179}$	$d_{10,180}$	}	Signatures polaires des objets trapézoïdaux
...		
...		
$d_{15,1}$	$d_{15,2}$	.....	$d_{15,179}$	$d_{15,180}$	
					

Fig.11 Matrice d'apprentissage.

- *Classification*

Dans cette étape nous utilisons la signature polaire de cet objet, calculée dans l'étape de traitement et de la matrice d'apprentissage déterminée dans l'étape d'apprentissage pour attribuer à chaque image la classe de l'objet quelle représente. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de classification du plus proche voisin (PPV) [43]. Son principe consiste à assigner à l'image à classer, la classe de l'objet de la ligne de la matrice d'apprentissage correspondant à la signature polaire la plus proche (dans le sens de la distance euclidienne) de la signature polaire de l'objet à classer. Ainsi, comme le montre la figure 12, pour réaliser la classification premièrement nous calculons le vecteur des distances V_d où chaque élément k est défini par $V_d(k) = (V_o - M_p(k, :))^2$ et V_o est le vecteur des points de la signature polaire. Puis nous déterminons k_m tel que $V_d(k_m)$ est l'élément minimal de V_d . L'objet est ainsi affecté à la classe rectangle si k_m est compris entre 1 et 5, à la classe cercle si k_m est compris entre 6 et 10 et à la classe trapèze si k_m est compris entre 11 et 15.

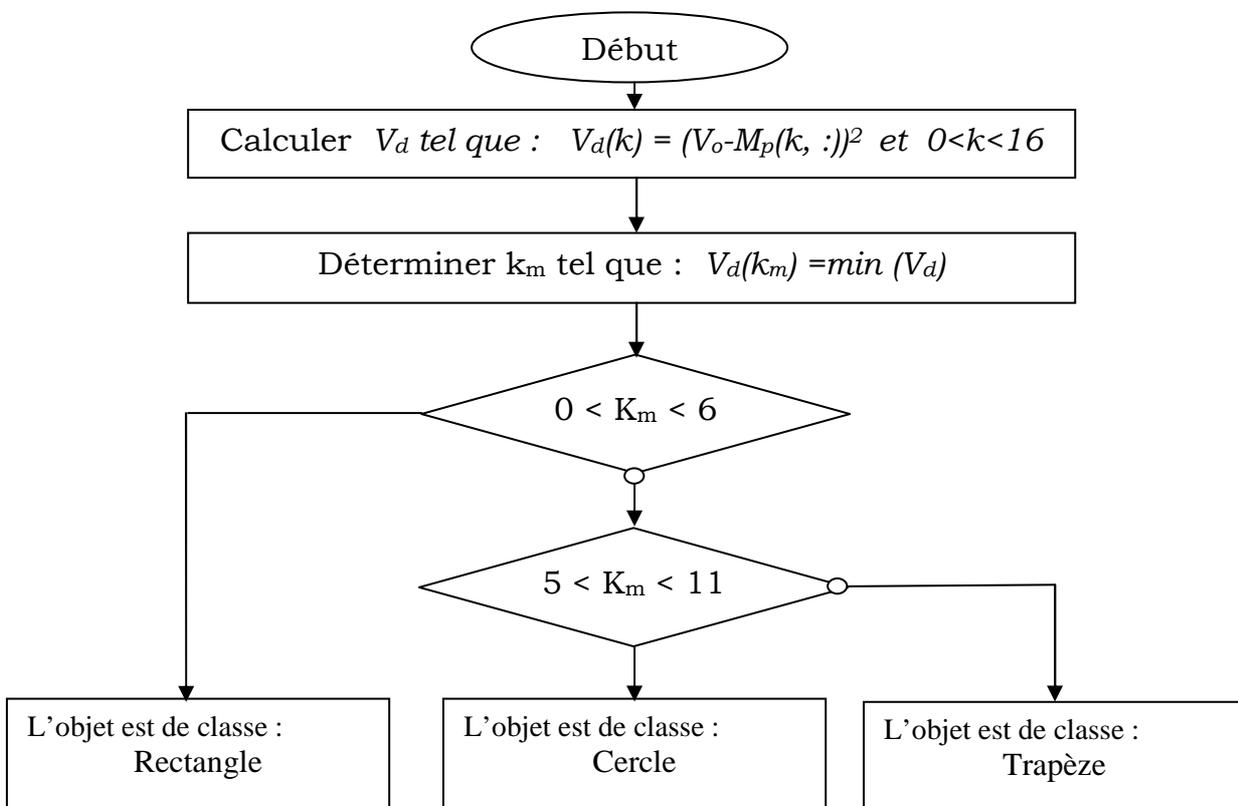


Fig.12 Organigramme de l'étape de classification

5. Tests pratiques

Après l'écriture du programme de détection, localisation et de reconnaissance d'objets conformément aux procédures présentées précédemment, nous avons réalisé 20 tests pratiques. Après ces tests, nous avons les résultats suivants :

- Le nombre d'objets détectés est 19 sur 20.
- Le nombre d'objets reconnus est 17 sur 19.
- L'erreur maximale de localisation suivant l'axe des x est de 0.35 cm
- L'erreur maximale de localisation suivant l'axe des y est de 0.4 cm ;

6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la partie vision artificielle dont l'objet est de réaliser la détection, localisation et reconnaissance des objets . en effet En première partie, afin de détecter les objet présent dans une image de la caméra, nous avons déterminé la surface, en pixel, représentant l'objet dans l'image. Puis nous avons comparé la valeur de cette surface à une valeur seuil de présence d'objets. En seconde partie nous avons montré comment calculer la position d'un objet sur la table à partir du calcul du modèle de la caméra et du calcul de la position de l'objet en dans l'image. Ensuite, nous avons présenté la partie permettant de reconnaître la forme des objets. La méthode utilisée est basée sur le calcul de la signature polaire de l'objet et sur l'utilisation de la méthode de classification du plus proche voisin. En dernier lieu après l'écriture du programme informatique correspondant à cette partie vision des tests pratiques qui ont aboutis à des résultats très acceptables ont été réalisés.

Chapitre 4

Commande du bras manipulateur

1. Introduction

Les robots sont actuellement présents dans pratiquement toutes les entreprises industrielles et particulièrement, en construction automobile. Les robots sont utilisés pour effectuer rapidement des tâches répétitives comme dans les chaînes de fabrication et de montage. Ils sont aussi présents dans des environnements difficilement supportables par l'homme là où les conditions de température ou de pression sont trop élevées, en milieu radioactif, etc. Initialement conçus aveugles, les mouvements des robots étaient calculés et parfois avec beaucoup de précision selon la tâche à exécuter. Ensuite, pour approcher l'homme dans sa perception, d'autres capteurs sont venus compléter l'aspect sensoriel des robots afin de les rendre plus souples dans leur fonctionnement et leur déplacement. Dans la dernière partie de ce mémoire, notre objectif est de mettre en œuvre la commande d'un robot lui permettant de réaliser sa tâche de saisie, de déplacement de tout objet détecté, localisé et reconnu sur une table tournante par un système de vision artificielle. Pour ce faire, une carte de

commande est conçue à cet effet et un logiciel gérant l'ensemble des actions a été mis en œuvre.

2. Description du robot utilisé [44]

Le robot utilisé dans notre application est un bras manipulateur à trois degrés de liberté (fig.1). Il est composé d'une base, d'un avant bras et d'un bras montés de bout à bout et de longueurs, respectivement, égales à 10, 19 et 19 cm. L'organe de préhension est une pince à serrage parallèle. Chaque partie du bras manipulateur est connectée aux autres par une articulation. La rotation de chaque articulation du bras manipulateur est assurée par un motoréducteur et d'une vis sans fin. Un encodeur incrémental pour la mesure de l'angle de rotation est placé sur l'arbre du motoréducteur de chacune des articulations. Ce dispositif correspond à un générateur d'impulsion réalisé par une photocellule traversée par un disque perforé porté par la vis sans fin. Ces dispositifs génèrent une impulsion pour un angle de 0.59° dans le cas de l'articulation de la base, de 0.171 dans le cas de l'articulation de l'épaule et de 0.174° dans le cas de l'articulation du coude. Deux butés de contact et deux fins de courses sont disponibles au niveau de la pince et de chaque articulation pour définir les positions limites du mouvement dans les deux sens par la mise à zéro des fins de courses. Ces positions limites sont données pour chaque fin de course par le tableau 1.

Tableau.1 Position limites où sont mis à zéro les fins de courses.

Articulation	Fins de courses	Position limites
Pince	Fcp1	Pince complètement ouverte (4 cm)
	Fcp2	Pince fermée
Le coude	Fcd1	Le bras fait un angle de 105° avec à l'avant bras.
	Fcd2	Le bras fait un angle de 50° avec à l'avant bras .
L'épaule	Fcl1	L'avant bras fait un angle de 100° avec à l'horizontale.
	Fcl2	L'avant bras fait un angle de 50° avec l'horizontale.
La base	Fcb1	Les deux butées sont placées de telle manière à permettre à la base une course de 260° entre les deux butées.
	Fcb2	

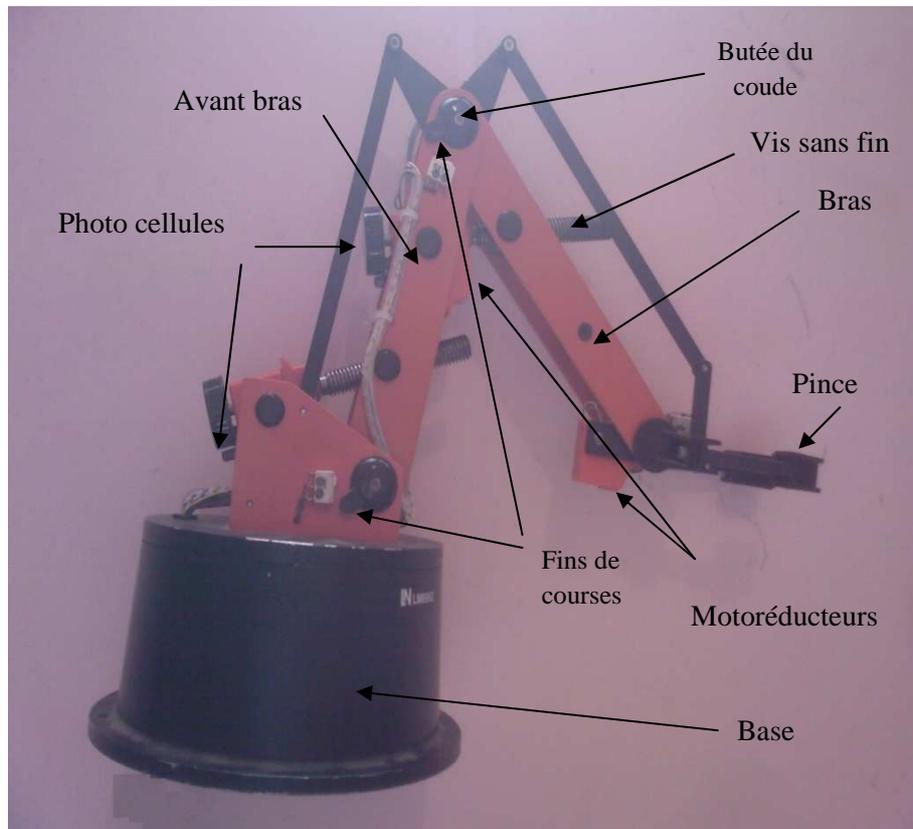


Fig.1 Schéma du bras manipulateur

3. Modélisation géométrique du bras manipulateur

C'est à partir de la géométrie du robot et des relations trigonométriques que nous allons déterminer le modèle géométrique du robot, autrement dit, les coordonnées opérationnelles (x,y,z) en fonction des coordonnées articulaires $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ [45]. Pour ce faire nous considérons le schéma de la figure 2 où $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est un repère fixe lié à la base, O, O_1, O_2 , des points confondus avec les axes des articulations base, épaule et coude respectivement, C , un point du centre de la pince dont les coordonnées, (x,y,z) , représentent les coordonnées opérationnelles du robot, C' , la projection du point C sur le plan (O, \vec{i}, \vec{j}) , et où $O_1'O_1=L_1, O_1O_2=L_2, O_2C=L_3, OO_1'=L_4$ et $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ sont les coordonnées articulaires du robot tel que α_1 est l'angle (XOC') , α_2 , l'angle $(O_2O_1P_1)$ et α_3 , l'angle (CO_2P_2) .

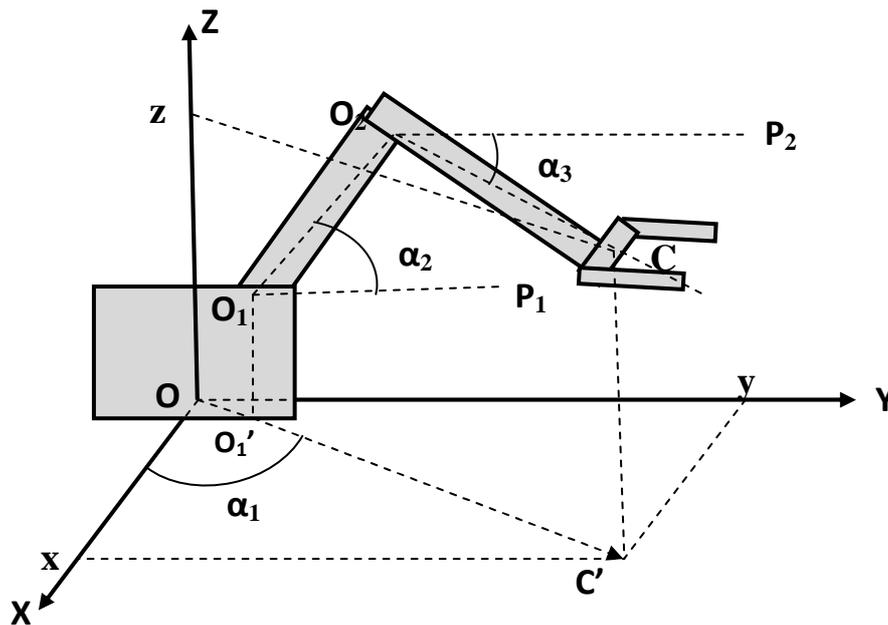


Fig. 2 Position du robot dans le repère (O,X,Y,Z)

A partir de ce schéma, on peut écrire les expressions suivantes:

$$x = r \cos\alpha_1$$

$$y = r \sin\alpha_1$$

$$z = L_1 + L_2 \sin\alpha_2 + L_3 \sin\alpha_3$$

$$r = L_4 + L_2 \cos\alpha_2 + L_3 \cos\alpha_3$$

ou :

$$x = \cos\alpha_1(L_2 \cos\alpha_2 + L_3 \cos\alpha_3 + L_4) \tag{1}$$

$$y = \sin\alpha_1(L_2 \cos\alpha_2 + L_3 \cos\alpha_3 + L_4) \tag{2}$$

$$z = L_1 + L_2 \sin\alpha_2 + L_3 \sin\alpha_3 \tag{3}$$

Les relations (1), (2) et (3) expriment le Modèle Géométrique Direct (MGD).

En inversant ce dernier, on obtient le Modèle Géométrique Inverse (MGI).

► Calcul de α_1

Les expressions (1) et (2) donnent $\frac{y}{x} = \frac{\sin\alpha_1}{\cos\alpha_1} = \operatorname{tg}\alpha_1$ soit, $\alpha_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$

► Calcul de α_2 et α_3

De l'équation (3), on tire $z - L_1 = L_2 \sin\alpha_2 + L_3 \sin\alpha_3$ et si $z_1 = z - L_1$, on obtient :

$$z_1 = L_2 (\sin\alpha_2 + \sin\alpha_3) \tag{4}$$

A partir de (1) et (2), on peut écrire : $x^2 + y^2 = [L_2 (\cos\alpha_2 + \cos\alpha_3) + L_4]^2$

Si on pose $d = \sqrt{x^2 + y^2} - L_4$, on aura :

$$d = L_2 (\cos\alpha_2 + \cos\alpha_3) \quad (5)$$

De (4) et (5) on tire $\frac{z_1}{d} = \frac{(\sin\alpha_2 + \sin\alpha_3)}{(\cos\alpha_2 + \cos\alpha_3)}$

Or :

$$\begin{aligned} \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3 &= 2 \cos\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right) \\ \sin\alpha_2 + \sin\alpha_3 &= 2 \sin\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right) \end{aligned}$$

Soit, $\frac{z_1}{d} = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}\right)$, ce qui donne :

$$\alpha_2 + \alpha_3 = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{z_1}{d}\right) \quad (6)$$

De (4) et (5), on tire $z_1^2 + d^2 = L_2^2 (2 + 2 \sin\alpha_2 \cdot \sin\alpha_3 + 2 \cos\alpha_2 \cdot \cos\alpha_3)$.

D'où : $z_1^2 + d^2 = 2 L_2^2 [1 + \cos(\alpha_2 - \alpha_3)]$

$$z_1^2 + d^2 = 2 L_2^2 \left[2 \cos^2\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right)\right]$$

puisque $\cos(2\alpha) = 2 \cos^2(\alpha) - 1$ et $\cos(\alpha) = 2 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1$, soit :

$$\frac{z_1^2 + d^2}{4 L_2^2} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right) + 1} \quad \text{car} \quad \cos^2(\alpha) = \frac{1}{\operatorname{tg}^2(\alpha) + 1}$$

donc :

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right) = \frac{4 L_2^2}{z_1^2 + d^2} - 1$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2}\right) = \sqrt{\frac{4 L_2^2}{z_1^2 + d^2} - 1}$$

$$\text{donc } \alpha_2 - \alpha_3 = 2 \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{4 L_2^2}{z_1^2 + d^2} - 1}\right) \quad (7)$$

Ainsi, la somme de (6) et (7) donne :

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{z_1}{d}\right) + \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{4 L_2^2}{(z_1^2 + d^2)} - 1}$$

(6) et (7) donnent:

$$\alpha_3 = \operatorname{arctg}\left(\frac{z_1}{d}\right) - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{4 L_2^2}{(z_1^2 + d^2)} - 1}$$

En conclusion le MGI s'exprime par :

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{z_1}{d}\right) + \arctg\sqrt{\frac{4L_2^2}{(z_1^2 + d^2)} - 1}$$

$$\alpha_3 = \arctg\left(\frac{z_1}{d}\right) - \arctg\sqrt{\frac{4L_2^2}{(z_1^2 + d^2)} - 1}$$

où $d = \sqrt{x^2 + y^2} - L_4$ et $z_1 = z - L_1$

5. Positionnement de la table et de la caméra par rapport au robot

La position de la table doit être fixée de telle manière que l'espace de travail du robot sur la table occupe une surface suffisante sur la table.

La position de la caméra doit être fixée de telle manière à ce que son champ de vision sur la table appartient à l'espace de travail du robot.

Compte tenu des valeurs possibles des coordonnées articulaire ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) le modèle géométrique direct du robot nous permet de représenter l'espace de travail du robot [46] à la hauteur de la table ($z = 12.5$ cm) comme sur la figure 3.

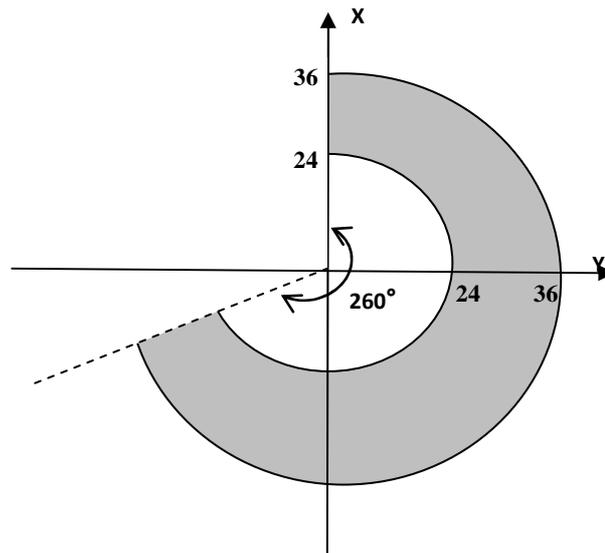


Fig.3 : Espace de travail du robot pour $z = 12.5$ cm

Ainsi, nous avons choisi la position de la table, de la caméra, et des emplacements des objets comme sur les figures 4 et 5.

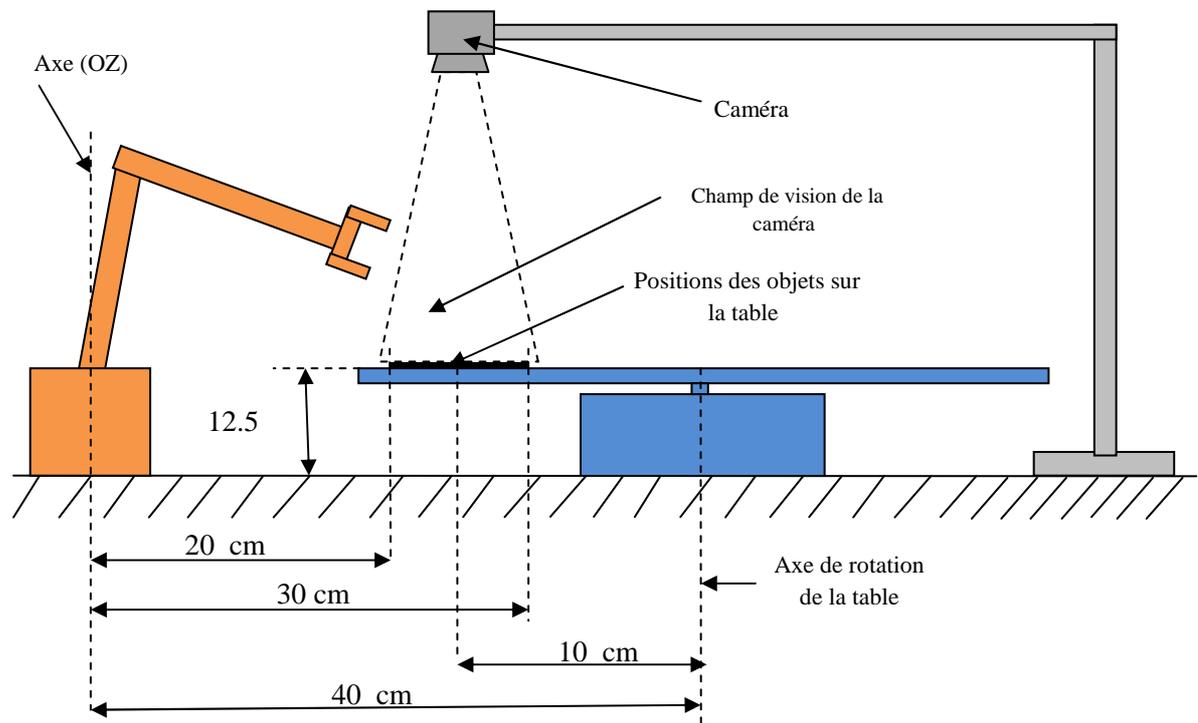


Fig.4 Positionnement table et caméra par rapport au robot.

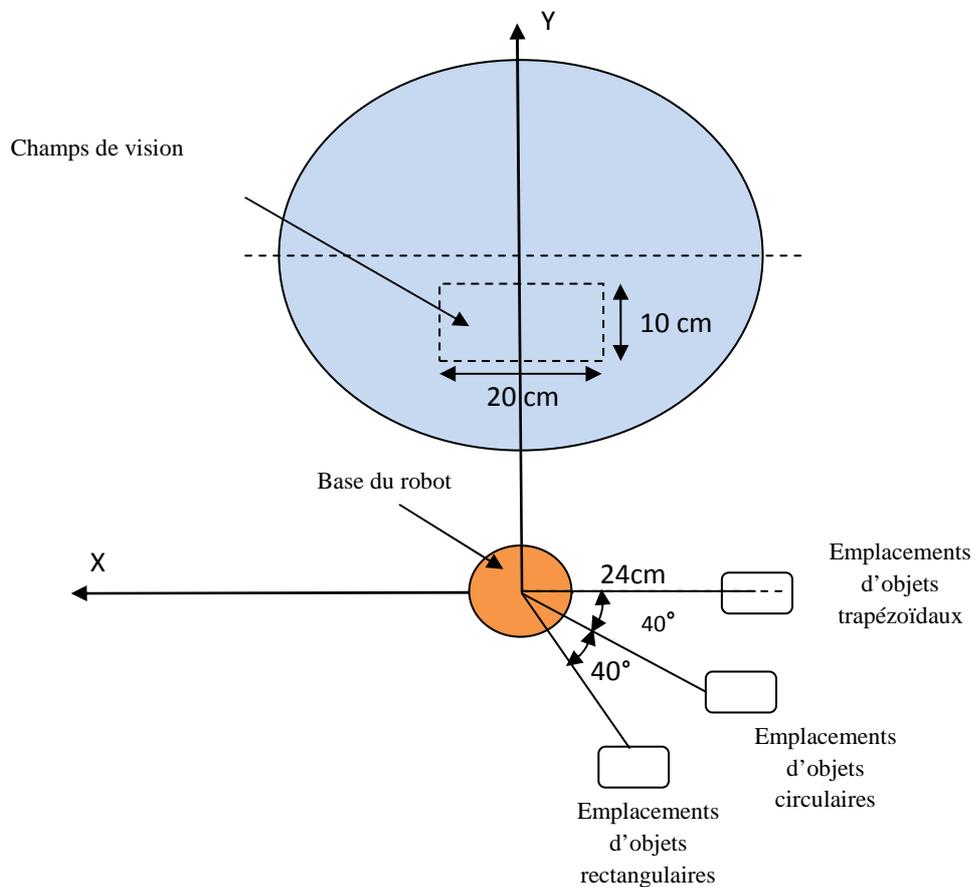


Fig.5 Position des emplacements des objets et du champ de vision de la caméra par rapport au robot.

5. Algorithme de Commande du robot manipulateur

La commande du robot consiste à générer les signaux de commande des moteurs du robot pour permettre à ce dernier de réaliser sa tâche. Comme le montre l'organigramme de la figure 6, cette tâche est réalisée en cinq étapes :

1. le robot doit se déplacer de la position initiale définie par les coordonnées articulaires $(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \alpha_{30})$ vers la position de saisie de l'objet définie par les coordonnées généralisées (x, y, z) .
2. le robot doit saisir l'objet en fermant la pince jusqu'à serrage de l'objet.
3. le robot doit se déplacer pour ramener l'objet à son emplacement défini par $(\alpha_{1e}, \alpha_{2e}, \alpha_{3e})$.
4. il doit déposer l'objet à son emplacement par l'ouverture de la pince.
5. le robot revient à sa position initiale $(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \alpha_{30})$.

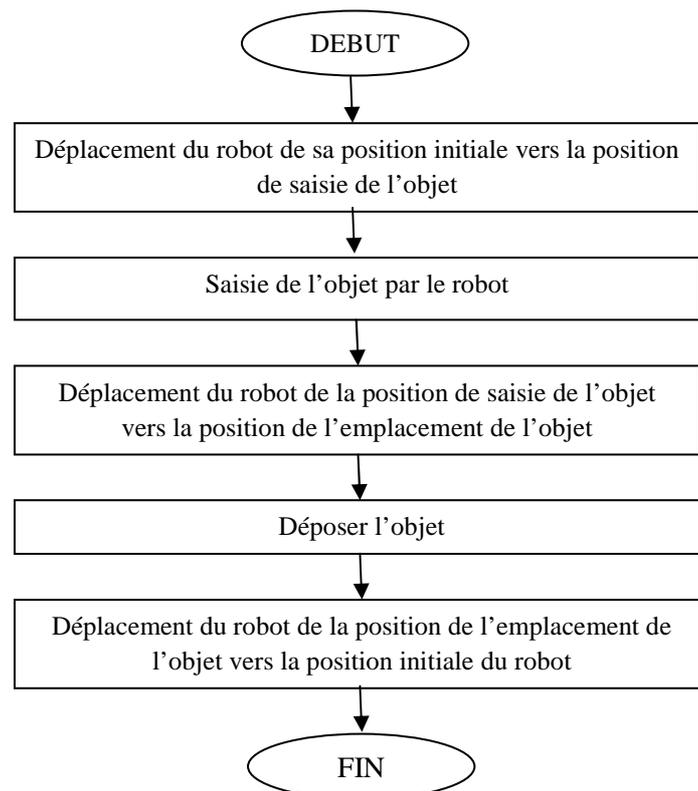


Fig.6 Organigramme de la tâche du robot

Le tableau 4.2 définit La position initiale et les positions des emplacements des objets en fonction de la situation des fins de courses et de la coordonnée articulaire α_1 .

Tableau.2 Situations du robot en position initiale et en position des emplacements des objets.

Position du robot	Situation du robot
Position initiale	Fcb1=Fcl1=Fcd1=0
Position de l'emplacement d'un objet rectangulaire	$\alpha_1 = 180^\circ$ Et Fcl2=Fcd2=0
Position de l'emplacement d'un objet circulaire	$\alpha_1 = 220^\circ$ Et Fcl2=Fcd2=0
Position de l'emplacement d'un objet trapézoïdale	$\alpha_1 = 260^\circ$ Et Fcl2=Fcd2=0

• *Déplacement du robot de sa position initiale à la position de saisie de l'objet*

Pour réaliser le déplacement du robot de la position initiale définie par $(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \alpha_{30})$ vers la position de l'objet définie par les coordonnées de son centre de gravité généralisées (x_G, y_G, z_G) , on doit suivre les étapes suivantes :

- ▶ Calculer les coordonnées généralisées du robot (x, y, z) à partir de (x_G, y_G, z_G) en utilisant les relations suivantes :

$$x = x_G - L_p \cos \alpha_1, \quad y = y_G - L_p \sin \alpha_1, \quad z = z_G \quad \text{avec } L_p = 8.$$

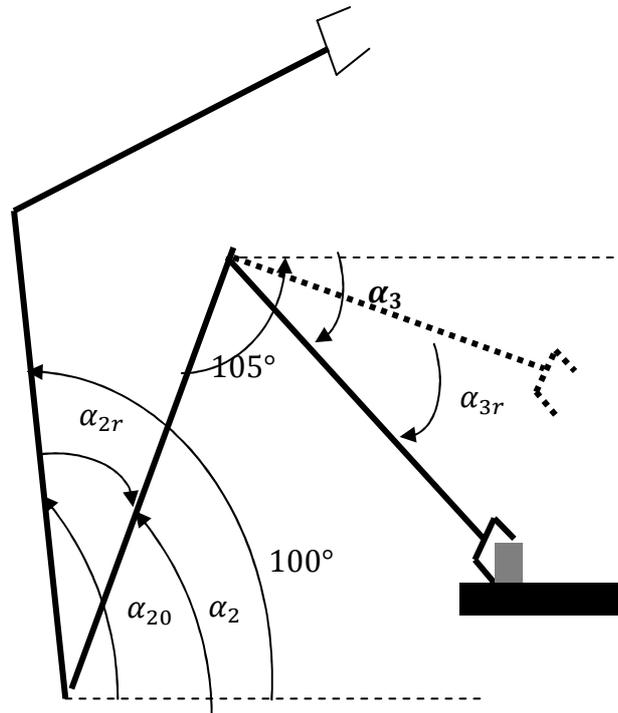
- ▶ Calculer à partir du modèle géométrique inverse les coordonnées articulaires $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ équivalentes aux coordonnées opérationnelles (x, y, z) .
- ▶ Calculer les angles $(\alpha_{1r}, \alpha_{2r}, \alpha_{3r})$, angles de rotation de la base, épaule et du coude permettant d'atteindre la position de l'objet. Ces angles représentés en figure 7, sont définis par :

$$\alpha_{1r} = \alpha_1, \quad \alpha_{2r} = 100 - \alpha_2 \quad \text{et} \quad \alpha_{3r} = \alpha_2 - \alpha_3 - 75$$

- ▶ Calculer les nombres d'impulsions que doit générer les encodeurs de la base, de l'épaule et du coude : k_b, k_l, k_d lors du passage de la position initiale à la position de l'objet par l'utilisation des relations :

$$k_b = \frac{\alpha_{1r}}{0.59}, \quad k_l = \frac{\alpha_{2r}}{0.174} \quad \text{et} \quad k_d = \frac{\alpha_{3r}}{0.171}$$

- ▶ Alimenter le moteur de la base jusqu'à génération de k_b impulsions par l'encodeur de la base.
- ▶ Alimenter le moteur de l'épaule jusqu'à génération de k_l impulsions par l'encodeur de l'épaule.
- ▶ Alimenter le moteur du coude jusqu'à génération de k_d impulsions par l'encodeur du coude.

Fig.7 Représentation des angles α_{2r} , α_{3r}

- *Saisie de l'objet par le robot*

En absence de capteur de saisi de l'objet pour réaliser la saisie des objets nous alimentons le moteur de la pince dans le sens de fermeture pendant 8 secondes.

- *Déplacement du robot de la position de saisie de l'objet vers la position de l'emplacement de l'objet :*

Pour réaliser ce déplacement il faut réaliser les étapes suivantes

1. Déterminer à partir de la forme de l'objet, reconnu dans l'étape de reconnaissance de formes, la coordonnée articulaire de la base α_{e1} (tableau.2).
2. Calculer l'angle de rotation α_{er1} que doit faire la base pour atteindre l'emplacement de l'objet à partir de la position de saisie de l'objet. Cet angle est défini par $\alpha_{er1} = \alpha_{e1} - \alpha_1$
3. Calculer le k_{be} nombre d'impulsions que doit générer l'encodeur de la base lors du passage de la position de l'objet à la position de son emplacement.

4. Alimenter le moteur de la base jusqu'à génération de k_{be} impulsions par l'encodeur de la base.
5. Alimenter le moteur de l'épaule jusqu'à avoir $F_{cl2}=0$.
6. Alimenter le moteur du coude jusqu'à avoir $F_{cd2}=0$.

- *Dépôt de l'objet à son emplacement*

Pour déposer l'objet, il suffit d'alimenter le moteur de la pince dans le sens d'ouverture pendant 2 secondes.

- *Déplacement du robot de l'emplacement de l'objet vers la position initiale*

Pour ramener le robot à la position initiale, nous alimentons le moteur de la base jusqu'à avoir $F_{cb1}=0$, le moteur de l'épaule jusqu'à avoir $F_{cl1}=0$, le moteur du coude jusqu'à $F_{d1}=0$ et le moteur de la pince jusqu'à avoir $F_{cp1}=0$.

6. Réalisation de la commande

La réalisation de la commande du robot comporte deux parties. En première partie (réalisation logicielle), nous avons traduit l'algorithme de commande du robot précédent en un programme informatique écrit sous l'environnement Matlab pour permettre à l'ordinateur de générer à travers la carte d'acquisition et de la commande, les signaux de commande des moteurs du robot en fonction des signaux qu'il reçoit des capteurs du robot (encodeurs incrémentaux et fins de courses du robot). En seconde partie (réalisation matérielle), nous avons réalisé une carte électronique d'interface robot-ordinateur. Le schéma synoptique de cette carte est présenté en figure 9[47]. Elle comporte deux blocs principaux: le bloc d'entrées et le bloc de sorties. Le bloc d'entrée est constitué d'un filtre RC passe bas de bande passante de 100HZ ($R=10\text{ K}\Omega$ et $C=100\text{ nf}$) pour filtrer (éliminer les signaux parasites) les signaux venants des encodeurs incrémentaux et d'un circuit intégré HCF40106 comportant des trigger de schmitt [48] pour la mise en forme des signaux des encodeurs après filtrage

Le bloc de sortie réalisé par deux circuits intégrés L293D pour l'alimentation des moteurs du robot conformément aux signaux de commande qu'ils reçoivent de la carte d'acquisition.

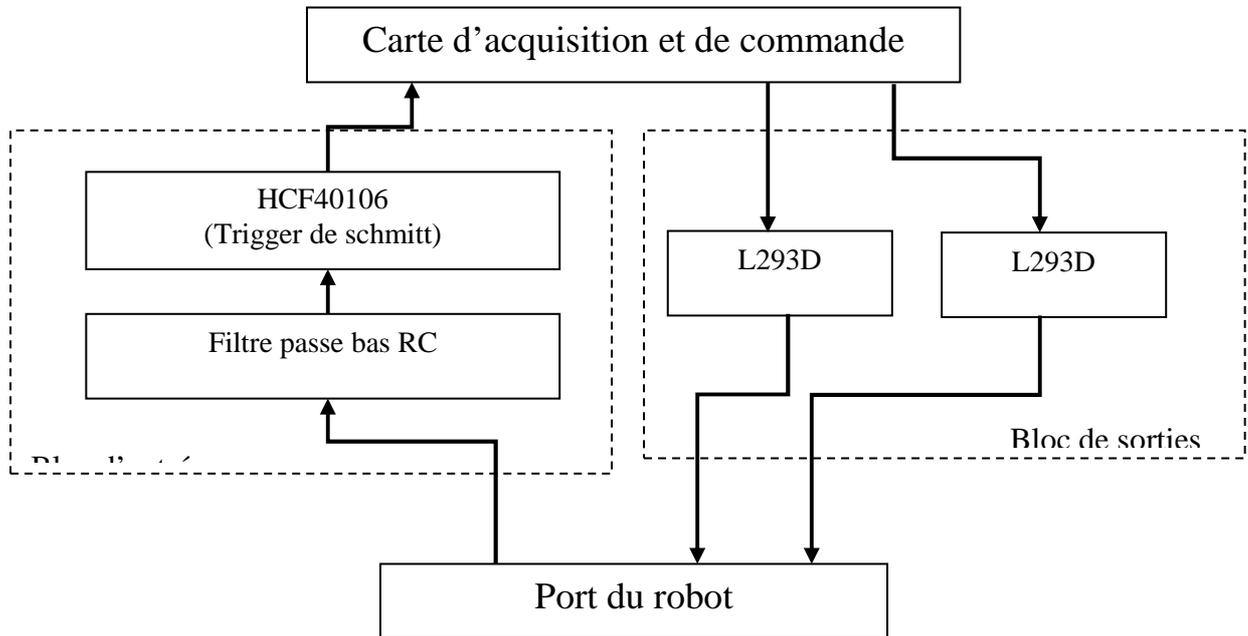


Fig.9 : Schéma synoptique de la carte interface

7. Test pratique de la commande du robot

Après l'écriture du programme correspondant à l'algorithme de commande du robot ci-dessus, nous avons réalisé dix tests pratiques de ce programme : quatre tests en utilisant des objets rectangulaires, trois tests en utilisant des objets circulaires et trois tests en utilisant des objets trapézoïdaux. Nous avons effectué chaque test de saisie et de déplacement d'un objet de sa position initiale définie par les coordonnées de son centre de gravité (x_G, y_G, z_G) , vers son emplacement défini par les coordonnées (x_e, y_e, z_e) que devrait avoir le centre de la pince lors du dépôt de l'objet à son emplacement.

Au début, nous introduisons dans le programme :

- ▶ la forme de l'objet à laquelle correspond, dans le programme, des valeurs pour les coordonnées (x_e, y_e, z_e) .
- ▶ les coordonnées (x_G, y_G, z_G) .

Puis nous lançons le programme et nous mesurons :

- ▶ les coordonnées du centre de la pince lors de saisie de l'objet (x_m, y_m, z_m) .

- ▶ les coordonnées du centre de la pince lors du dépôt de l'objet (x_{em}, y_{em}, z_{em}).

Après réalisation de ces tests nous avons constaté que :

- ▶ l'erreur maximale de positionnement lors de la saisie de l'objet est:
 - a. de 5mm suivant l'axe des x.
 - b. de 6mm suivant l'axe des y.
 - c. de 3mm suivant l'axe des z.
- ▶ l'erreur maximale de positionnement lors du dépôt de l'objet à son emplacement est:
 - d. de 5mm suivant l'axe des x.
 - e. de 4mm suivant l'axe des y.
 - f. de 3mm suivant l'axe des z.

8. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la commande du robot manipulateur permettant à ce dernier de réaliser sa tâche qui consiste à aller saisir un objet sur la table pour le déposer par la suite à l'emplacement correspondant. Après une description du robot manipulateur nous avons déterminé les modèles géométriques directe et inverse du robot. Puis, après calcul de l'espace de travail du robot nous avons fixé le positionnement de la table et de la caméra par rapport au robot. Ensuite l'algorithme de commande du robot est élaboré à partir des résultats des parties précédentes. En dernier lieu nous avons réalisé et testé pratiquement la commande du robot manipulateur.

Conclusion générale

Notre travail consistait à étudier, sur le plan théorique et pratique, la commande d'un système composé d'une table tournante, d'un bras manipulateur et d'une caméra. Le fonctionnement de cet ensemble piloté par un microcalculateur consiste à reconnaître, en temps réel, des objets arrivant sur la table tournante pour, ensuite, les saisir et les déplacer à l'aide du bras manipulateur.

Pour atteindre cet objectif constitué d'une étude théorique et d'une réalisation pratique, nous avons subdivisé notre travail en trois étapes. La première est consacrée à la réalisation d'une boucle de commande numérique en vitesse du moteur à courant continu assurant le mouvement de rotation de la table. La détection, la localisation et la reconnaissance des objets à fait l'objet de la seconde partie relative à la vision. En dernière partie, il à été question de réaliser la commande du robot permettant la saisie et le déplacement de l'objet vers l'emplacement correspondant.

Pour la mise en ouvre de la commande numérique de la table tournante en premier lieu, nous avons étudié les constituants de la table tournante puis nous avons réalisé les étapes permettant la commande de la table à savoir l'étape de modélisation, l'étape de calcul de la loi de commande, l'étape de simulation et validation, et l'étape de réalisation de la loi de commande calculée. L'étape de modélisation comprend deux parties. Dans la première, à partir des équations physiques régissant le fonctionnement de la table nous avons déterminé la structure du modèle sous forme de fonction de transfert du second ordre. Et dans la seconde nous avons relevé pratiquement la réponse indicielle de la table puis nous avons utilisé le principe des moindres carrés pour déterminer les paramètres optimaux impliquant la réponse indicielle la plus proche possible de celle relevé pratiquement. La loi de commande est obtenue à partir du calcul d'un régulateur numérique permettant de rendre le fonctionnement de la table performant c'est-à-dire un temps de réponse réduit et une compensation de

l'effet des perturbations. Après simulation et validation de cette loi de commande, nous avons donné l'algorithme permettant de réaliser cette loi de commande par un régulateur numérique.

Dans la partie vision des objets, pour détecter les objets la stratégie utilisée est simple, elle consiste à binariser l'image puis de comparer la somme des niveaux de gris à un seuil de présence d'objets sur la table. La localisation d'objet passe par la détermination du modèle de la caméra à partir duquel les coordonnées du centre de gravité d'un objet peuvent être déterminées par la connaissance des ses coordonnées dans l'image. Enfin, la partie reconnaissance de forme des objets est réalisée suivant le schéma classique d'un processus de reconnaissance de formes après l'acquisition les images ont subi une étape de prétraitement puis une étape de traitement où la signature polaire est extraite. Dans la partie classification la méthode du plus proche voisin est utilisée pour déterminer la classe de l'objet à partir de cette signature polaire et d'une base d'apprentissage composée de signature polaires d'objets connus.

En dernière partie de notre travail (consacrée à la commande du robot manipulateur) après l'études des caractéristiques et des constituants du robot nous avons déterminé les modèles géométriques direct et inverses qui ont été utilisé dans l'élaboration du programme de commande du robot.

En perspective, il serait intéressant d'inclure un matériel professionnel contenant une caméra CCD haute définition reliée à une carte d'acquisition fonctionnant sous l'environnement Windows qui permet l'acquisition des images en temps réel, une table tournant pilotée par un moteur à courant continue et un robot industriel. L'essai se fera avec différents types d'objet où interviennent la forme, la couleur et la texture.

Références bibliographiques

- [1] N.Zaidi, H.Taidirt. *Asservissement Visuel d'un Bras de Robot*, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en automatique. Ecole Nationale Polytechniques, 2006.
- [2] P. Fisette, H. Buyse, J.C. Samin. *MECA 2732 : Introduction à la robotique*. Université Catholique de Lovaine, Belgique, 2004.
- [3] J. Gangloff. *Cours de commande par vision*. Université de Louis Pasteur de Strasbourg, France, 2004.
- [4] J. Gangloff. *Asservissement visuel, notes de cours*. Université de Louis Pasteur de Strasbourg, France, 2004
- [5] R.Bouchakri, K.Behloul, K.Mohamed, O.Noureddine. *Saisie d'objet par une commande référencée vision Asservissement visuel 2D d'un robot manipulateur*. Ecole Nationale Supérieure d'Informatique d'Alger.
- [6] B.Tamadazte : *Vision 3D et Commande par asservissements visuels pour la micromanipulation et le micro-assemblage de MEMS, Application à l'automatisation d'une station de micro-assemblage*. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, France, 2009.
- [8] S.Benhimane, E.Malis. *Une approche directe pour l'asservissement visuel 2D*. INRIA Sophia Antipolis, France, 2000.
- [9] E. Malis. *Contributions à la modélisation et à la commande en asservissement visuel*. Thèse de doctorat, Université de Rennes1, France, 1998.
- [10] E. Malis, F. Chaumette. *2D1/2 visual servoing with respect to unknown objects through a new estimation scheme of camera displacement*. International Journal of Computer Vision, 2000.
- [11] N. OUADAH, M. HAMERLAIN et M.S. Djouadi. *Positionnement d'Un Bras Manipulateur par une Commande Référencée Vision*. Laboratoire Robotique, CDTA, Alger, Laboratoire Robotique et productique, EMP, Alger.
- [12] F. Beggas et L. Laoubi. *Positionnement d'un bras manipulateur par rapport à un motif par asservissement visuel*. Mémoire de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrique, Ecole Militaire Polytechnique, 2004.

- [13] J. Gangloff. *Asservissements visuels rapides d'un robot manipulateur à six degrés de liberté, suivie de cible et de profilé*. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur de Strasbourg, France, 1999.
- [14] O. Bourquardez, F. Chaumette. *Asservissement visuel et localisation d'un hélicoptère miniature*. Université de Louis Pasteur de Strasbourg, France, 2004.
- [15] N.Mansard, F.Chaumette. *Enchaînement de tâches en asservissement visuel : application à l'évitement des butées articulaires*. Université de Clermont-Ferrand, France 2005.
- [16] P. Renaud. *Apport de la vision pour l'identification géométrique de mécanismes parallèles*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, France, 2003.
- [17] F. Chaumette : *Avancées récentes en asservissement visuel*. Université de Rennes, France, 2003.
- [18] B. Espiau, F. Chaumette, et P. Rives. *A new approach to visual servoing in robotics*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992.
- [19] D.Folio. *Stratégie de commande Référencée multi-capteurs et gestion de la perte du signal visuel pour la navigation d'un robot mobile*. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier de Toulouse III. France, 2007.
- [20] R.Ginhoux. *Compensation des mouvements physiologiques en chirurgie robotisée par commande prédictive*. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur de Strasbourg I, France, 2003.
- [21] P.Siarry. *Automatique De Bse – Systèmes Asservis Linéaires Continus, Systèmes Asservis Echantillonnés*. Edition ellipses 1989.
- [22] P.Clerc. *Automatique continu et échantillonnée*. Edition MASSON, 1996
- [23] G.Lacroux. *Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements*. Edition LAVOISIER, 1994.
- [24] J.Thurin. *Systèmes asservis*. Edition Eyrolles, 1971.

- [25] A.TRIKI. *Commande d'un robot mobile a base du PIC 16F84*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2004.
- [26] M.Bellier, A.Galichon. *Machines électriques*. Edition delagrave, 1984.
- [27] P.Mayé. *Moteurs électriques pour la robotique*. Edition DUNOD, 2000.
- [28] I.D. Landau, A. Besançon-Voda. *Identification des systèmes*. Edition germs, 2001.
- [29] E.Boukas. *Systèmes Asservis*. Edition de l'école polytechnique de montréal, 2001.
- [30] D. Jacob. *REGULATION, Régulation PID en génie électrique. Etude de cas*. Edition ellipses, 2000.
- [31] M. Pinard. *Commande électronique des moteurs électriques*. Edition DUNOD, 2004
- [32] M. Rivoire et J.L. Ferrier. *Cours d'Automatique, Tome 2, Commande analogique*. Edition EYROLLES, 1996.
- [33] M. Rivoire et J.L. Ferrier. *Cours d'Automatique, Tome 3, Commande par Calculateur Identification*. Edition EYROLLES, 1997.
- [35] O. ADJEMOUT. *Reconnaissance Automatique de Formes à partir des paramètres morphologiques, de couleur et de texture : Application au tri des graines de semences*. Mémoire de magister en Automatique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2005.
- [36] A.Bijaoui. *Image et information : introduction au traitement numérique des images*. Edition MASSON, 1984.
- [37] *Algorithme de Canny*, tiré du site : <http://fr.wikipedia.org> , en date du 15/6/2010.
- [38] A.Belaid, Y.Belaid. *Reconnaissance de formes Méthodes et applications*. Inter Edition, 1992.
- [39] G.Burel. *Introduction au traitement d'images, simulation sous Matlab*. Edition Lavoisier, 2001.

- [40] *Méthode d'Otsu*, tiré du site : <http://fr.wikipedia.org> , en date du 5/5/2010.
- [41] J.P. COCQUEREZ et S. Philipp. *Analyse d'image : filtrage et segmentation*. Edition MASSON
- [42] M.Kunt. *Reconnaissance des formes et analyse de scènes*. Edition PRESSE POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRE ROMANDES
- [43] *Le plus proche voisin*, tiré du site : <http://www.cerfacs.fr> en date du 01/09/2010.
- [44] A.Triki, M.Diaf. *Contribution à l'étude et réalisation d'un asservissement comprenant une table tournante, un robot et un système de vision artificielle*. Journées scientifiques du laboratoire L2CSP de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [45] W. Khalil, *Modélisation identification et commande des robots*, Edition germes.
- [46] E.Dombre. *Analyse et modélisation des robots manipulateurs*. Lavoisier 2001.
- [47] H.Hasnaoui. *Commande adaptative d'un bras manipulateur avec un neurocompensateur*. Mémoire de magister en Automatique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2000.
- [48] T.L. Floyd. *Electronique composants et systèmes d'application*. Edition REYNALD GOULET, 2004