

Dédicaces

Je dédie ce travail à

Mes très chers parents, pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseil et orientations dans ma vie.

Mes frères, mes sœurs qu'ils étaient toujours à mes côtés pour me soutenir et encourager afin de ne jamais baisser les bras.

Ma famille, qui a cru en moi et ma pousser là ou j'ai failli arrêter

Mes chers amis électroniciens en particulier « automate » sans oublier les chimistes et tous ceux qui ont partagé avec moi les haut et les bas durant les années de

l'université, les bons moments des rattrapages et des Tps

Mes enseignants, pour leur patience, leur grand cœur et leur effort pour nous bien formé.

Enfin mon très cher frère ABDELRAHMANNE celui qui ma suivi depuis l'enfance, et qui était toujours le premier à me remonté le morale.

Pour tous qui nous aime

HAYET

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

RIGHI FELLA

&

KHERBACHE HAYET

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Automatique

Thème

Commande PID appliquée à une articulation d'un Bras manipulateur de type PUMA 560

Proposé par : **Mr. KAZED BOUALEM**

Année Universitaire 2012-2013

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à :

A celle qui m'a toujours ouvert ses bras et soutenue dans tout ce que j'ai entrepris ; celle qui a su être bonne, gentille et compréhensive avec moi ; celle dont je regrette l'absence à cette étape importante de ma vie
celle qui me manque terriblement
aujourd'hui **ma très chère et adorée grand mère.**

A celle qui s'est toujours dévouée et sacrifiée pour moi ; celle qui m'a aidée du mieux qu'elle pouvait pour réussir ; celle qui m'a accompagnée
tout au long de ce parcours périlleux

Celle qui a toujours été là dans mes moments de détresse
ma très chère mère.

A celles qui m'ont toujours aidée, écoutée, soutenue et encouragée
tout au long de mon parcours ; celles qui ont toujours été présents pour
moi, **mes très chères tantes et mes chers oncles.**

A mes cousins et mes cousines .

A ma très chère sœur AICHA .

Je le dédie aussi à tous mes amis.

FELLA



Remerciements

*Nous remercions ALLAH de nous avoir donné
la volonté et le courage qui nous ont permis de
réaliser ce travail.*

*Nous aimons spécialement remercier notre
promoteur Monsieur KAZED BOUALEM,
pour sa disponibilité et pour son grande aide tout
au long de ce travail.*

Ainsi qu'au président et les membres de jury

*Nous tenons à présenter nos remerciements aussi
à toutes les personnes qui ont participées de près
ou de loin à l'élaboration du présent mémoire.*

Résumé :

Le but de ce projet consiste à concevoir une commande en position de type PID, appliquée à une articulation d'un bras manipulateur de type PUMA 560. Pour ce faire nous allons d'abord passer par une modélisation du bras se basant sur l'étude cinématique des mouvements des différentes articulations. Vu la complexité du système nous allons procéder à l'identification d'un modèle numérique discret à partir de données entrées/sorties, ceci afin d'obtenir un contrôleur capable de générer le signal de commande permettant à l'articulation concernée d'atteindre la position désirée.

Mots clés :

Bras manipulateur, moteur à cc, identification.

Abstract:

The aim of this project is to design a PID controller applied to one of the articulation of a PUMA 560 manipulator arm. In the first part of this work we will describe a mathematical model of the manipulator based on a kinematics study of the different articulations of the arm. Considering the complexity of this system we will rather use a discrete model obtained after identification, based on an input and output data acquisition procedure, this model will then be used to design a controller that will provide an adequate control signal for the articulation to reach the desired position.

Key word:

Manipulator arm, a DC motor, identification.

ملخص:

الهدف من هذا المشروع هو تصميم متحكم PID المطبق على أحد مفاصل ذراع آلي من نوع PUMA 560 أو لا سنقوم بتحديد نموذج رياضي لذراع استنادا على دراسة حركة مختلف المفاصل . نظرا للتركيب المعقد للنظام، سنقوم باستعمال نموذج منفصل و المتحصل عليه بالتطابق، المستند على طريقة استقبال معلومات الدخول و الخروج. هذا النموذج يستخدم فيما بعد لتصميم متحكم الذي يعطي إشارة التحكم المناسبة للمفصل من أجل اتخاذ الوضعية المرادة.

كلمات دالة:

الذراع الآلي، محرك ذات التيار المستمر، تطابق.

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 : Modélisation du bras manipulateur | |
| 1.1 Introduction..... | 3 |
| 1.2 Structure mécanique et géométrie des bras..... | 3 |
| 1.2.1 Structure mécanique..... | 3 |
| 1.2.2 Structure géométrique..... | 4 |
| 1.3 Modélisation géométrique..... | 6 |
| 1.3.1 Modèle géométrique direct..... | 6 |
| 1.3.2 Modèle géométrique inverse..... | 7 |
| 1.4 Modélisation cinématique..... | 7 |
| 1.4.1 Modèle cinématique direct..... | 8 |
| 1.4.1.1 La matrice jacobienne..... | 8 |
| 1.4.1.2 Calcul de la matrice jacobienne par dérivation du MGD..... | 8 |
| 1.4.2 Modèle cinématique inverse..... | 8 |
| 1.5 Modèle dynamique..... | 9 |
| 1.5.1 Modèle dynamique inverse..... | 9 |
| 1.5.1.1 Formalisme de Lagrange..... | 9 |
| 1.5.1.2 Formalisme de Newton-Euler..... | 12 |
| 1.5.2 Modèle dynamique direct..... | 16 |
| 1.6 Conclusion..... | 16 |
| Chapitre 2 : Modélisation et identification des systèmes | |
| 2.1 Introduction..... | 17 |
| 2.2 Modélisation des processus physiques..... | 17 |
| 2.3 Différents approches d'établissement d'un modèle..... | 17 |
| 2.3.1 Modèle de connaissance..... | 17 |
| 2.3.2 Modèle de représentation..... | 18 |
| 2.3.3 Modèle linéaire discrets..... | 18 |
| 2.3.3.1 Modèle auto-régressif à moyenne ajustée (ARMA)..... | 18 |
| 2.3.3.2 Modèle autorégressif(AR)..... | 19 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.3.3.3 | Modèle à moyenne ajustée (MA)..... | 19 |
| 2.4 | Méthodes d'identification classique | 19 |
| 2.5 | Algorithme d'identification performants | 20 |
| 2.5.1 | Algorithme d'identification récursifs | 20 |
| 2.6 | Les Etapes d'une bonne identification | 21 |
| 2.6.1 | Acquisition des entrées/sorties..... | 21 |
| 2.6.2 | Choix de la structure du modèle | 21 |
| 2.6.3 | Estimation des paramètres..... | 21 |
| 2.6.4 | Validation du modèle | 21 |
| 2.7 | Les Outils mathématiques et lois statistique utilisé par l'identification..... | 22 |
| 2.7.1 | L'espérance mathématique..... | 22 |
| 2.7.2 | La variance..... | 22 |
| 2.7.3 | La covariance | 22 |
| 2.7.4 | La fonction d'auto corrélation..... | 22 |
| 2.8 | Conclusion | 23 |
| Chapitre 3 : Moteur à courant continu | | |
| 3.1 | Introduction..... | 24 |
| 3.2 | Définition d'un moteur à courant continu | 24 |
| 3.3 | Principe de fonctionnement d'un MCC..... | 24 |
| 3.4 | Bilan de puissance | 25 |
| 3.5 | La Fonction de transfert du moteur | 26 |
| 3.5.1 | Fonction de transfert dans le domaine de Laplace | 26 |
| 3.6 | La carte de puissance..... | 30 |
| 3.6.1 | Réalisation du schéma..... | 31 |
| 3.7 | Conclusion | 32 |
| Chapitre 4 : Simulation et résultats pratiques | | |
| 4.1 | Introduction :..... | 33 |
| 4.2 | Etude préliminaire du système :..... | 33 |
| 4.3 | Identification :..... | 35 |
| 4.4 | Elaboration d'un contrôleur PID..... | 39 |
| 4.5 | Application de la commande PID au bras manipulateur..... | 41 |
| 4.6 | Réponse à une entrée sinusoïdale..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 4.7 Réponse à une entrée aléatoire | 46 |
| 4.8 Conclusion | 47 |
| Conclusion général..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. 1 : robot à chaine ouverte simple. | 4 |
| Figure 1. 2 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple | 5 |
| Figure 1. 3 : Représentation d'un point r_i de la chaîne cinématique | 11 |
| Figure 1. 4 : Formalisme de Newton-Euler..... | 15 |
| Figure 3. 1 : Principe de fonctionnement d'un Mcc..... | 25 |
| Figure 3. 2 : Schéma électrique moteur à courant continu | 27 |
| Figure 3. 3 : schéma interne du L6203 | 30 |
| Figure 3. 4 : circuit L6203 | 31 |
| Figure 3. 5 : schéma de câblage de L6203..... | 32 |
| Figure 4. 1 : Réponse a une entrée rampe..... | 33 |
| Figure 4. 2 : Vitesse angulaire en fonction de la tension d'alimentation | 34 |
| Figure 4. 3 : Interface d'identification Matlab | 35 |
| Figure 4. 4 : Modèle créé et prêt pour l'analyse | 36 |
| Figure 4. 5 : les signaux d'entrée/sortie..... | 37 |
| Figure 4. 6 : Réponse du modèle par rapport à la réponse mesurée | 37 |
| Figure 4. 7 : Réponse à l'échelon | 38 |
| Figure 4. 8 : Auto-corrélation et la corrélation de l'erreur..... | 38 |
| Figure 4. 9 : Simulink du PID avec le système non linéaire | 39 |
| Figure 4. 10 : les paramètres du PID | 40 |
| Figure 4. 11 : La réponse à l'échelon du système en boucle fermée..... | 40 |
| Figure 4. 12 : simulink du bras avec PID et signal d'entrée carrée | 41 |
| Figure 4. 13 : la sortie du bras avec un signal d'entrée carrée | 42 |
| Figure 4. 14 : l'erreur pour un signal d'entrée carrée..... | 42 |
| Figure 4. 15 : Sortie du contrôleur PID pour un signal d'entrée carré..... | 43 |
| Figure 4. 16 : superposition des signaux..... | 44 |
| Figure 4. 17 : Simulink du bras avec PID avec signal d'entrée sinusoïdale | 44 |
| Figure 4. 18 : la sortie du bras avec un signal d'entrée sinusoïdale | 45 |
| Figure 4. 19 : la sortie de PID et l'erreur pou un signal d'entrée sinusoïdale..... | 45 |
| Figure 4. 20 : Simulink du bras avec PID et signal d'entrée analogique (slider Gain)..... | 46 |
| Figure 4. 21 : Réponse à une commande manuelle (slider Gain) | 46 |

1.1 Introduction

Pour développer une stratégie de commande performante pour un robot, il est impératif de connaître la cinématique et la dynamique du bras manipulateur considéré. Pour cela on est souvent amené à décrire les différentes relations mathématiques qui permettent de définir les mouvements de ce dernier dans l'espace.

Dans la pratique courante de robotique, la description du mouvement d'un bras manipulateur dans l'espace est réalisée en fonction du modèle géométrique, cinématique et dynamique.

1.2 Structure mécanique et géométrique des bras

On présentera quelques définitions concernant ces modèles ainsi que la façon de leurs obtentions [1].

1.2.1 Structure mécanique

La structure mécanique du bras manipulateur peut être divisée en deux parties distinctes comme le montre la figure 1.1

- **Organe terminal** : les tâches qui sont dévolues aux bras sont très variées. Pour chaque opération ou travail spécifique, l'organe terminal prend un aspect particulier.
- **Élément porteur** : il est composé d'un ensemble de corps souples ou rigides liés par des articulations, servant à déplacer l'organe terminal d'une configuration à une autre. Avant de décrire les relations géométriques entre les différents corps du bras, on définit les notions suivantes :
 - ◆ **Degré de liberté** : nombre de paramètres utilisés pour spécifier la configuration d'un élément de la chaîne cinématique par rapport à un autre.
 - ◆ **Degré de mobilité** : toute articulation est caractérisée par son degré de mobilité m , c'est-à-dire le nombre de degrés de liberté entre deux corps successifs de la chaîne cinématique ($0 \leq m \leq 6$)
 - ◆ **Espace articulaire** : représente l'état des corps composant le bras en fonction des variables articulaires, sa dimension n est égale au nombre de degrés de liberté du bras.

- ◆ **Espace opérationnel** : décrit la position et l'orientation de l'organe terminal du bras par rapport à un repère de référence.

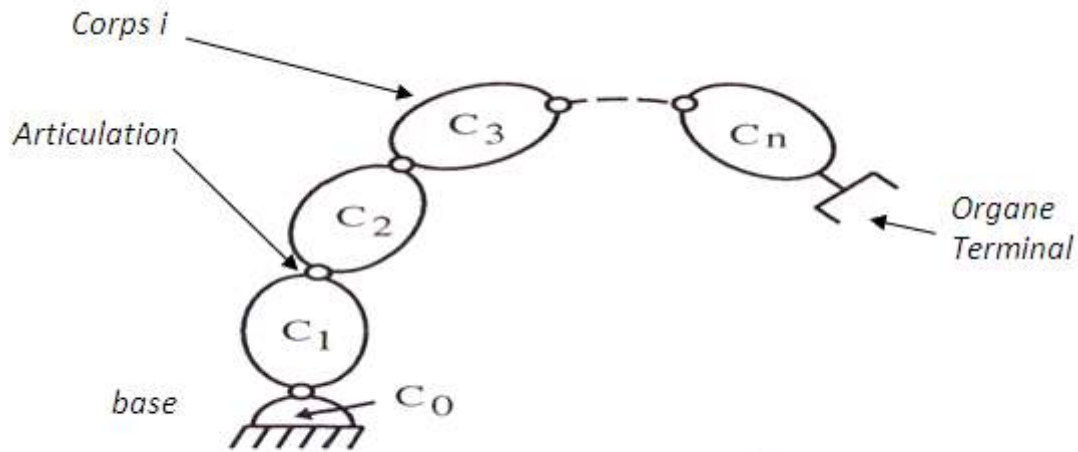


Figure1. 1 : robot à chaîne ouverte simple.

1.2.2 Structure géométrique

Parmi les diverses méthodes utilisées pour déterminer la position et l'orientation de l'organe terminal par rapport au repère de référence, la plus répandue est celle de Denavit Hartenberg.

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps notés C_0, \dots, C_n et de n articulations. Le corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_n le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation j connecte le corps C_j au corps C_{j-1} (figure 1.1).

La méthode de description est fondée sur les règles et conventions suivantes [2]:

- les corps sont supposés parfaitement rigides. Ils sont connectés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité), soit rotoïdes, soit prismatiques.
- le repère R_j est lié au corps C_j .
- la variable de l'articulation j est notée q_j .

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants (figure 1.2) :

α_j : Angle entre axes Z_{j-1} et Z_j correspondant à une rotation autour de X_{j-1} .

d_j : Distance entre Z_{j-1} et Z_j le long de X_{j-1} .

θ_j : Angle entre les axes X_{j-1} et X_j correspondant à une rotation autour de Z_j .

r_j : Distance entre X_{j-1} et X_j long de Z_j .

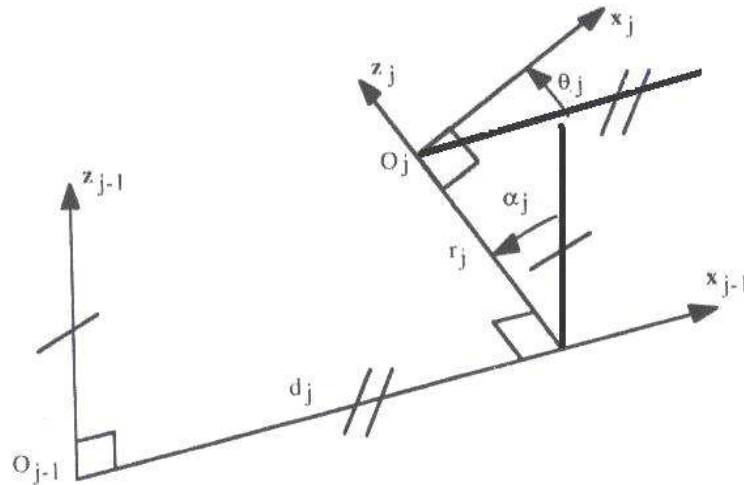


Figure1. 2 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

La matrice de transformation définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est donné par [1]:

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(x, \alpha_j) \text{Trans}(x, d_j) \text{Rot}(z, \theta_j) \text{Trans}(z, r_j)$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_j & -\sin\alpha_j & 0 \\ 0 & \sin\alpha_j & \cos\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 & 0 \\ \sin\theta_j & \cos\theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 & d_j \\ \cos\alpha_j \sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & -\sin\alpha_j & -r_j \sin\alpha_j \\ \sin\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & \cos\alpha_j & r_j \cos\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} {}^{i-1}A_i & {}^{i-1}p_i \\ 0_3 & 1 \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

Avec:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j & 0 \\ \cos\alpha_j \sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & -\sin\alpha_j \\ \sin\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & \cos\alpha_j \end{bmatrix}, \quad {}^{i-1}p_i = \begin{bmatrix} d_j \\ -r_j \sin\alpha_j \\ r_j \cos\alpha_j \end{bmatrix}$$

Donc, La matrice de transformation définissant le repère R_{i-1} dans le repère R_i est donné par :

$${}^jT_{j-1} = \text{Trans}(z, -r_j) \text{Rot}(z, -\theta_j) \text{Trans}(x, -d_j) \text{Rot}(x, -\alpha_j)$$

$${}^jT_{j-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_j & \cos\alpha_j \sin\theta_j & \sin\alpha_j \sin\theta_j & -d_j \cos\theta_j \\ -\sin\theta_j & \cos\alpha_j \cos\theta_j & \sin\alpha_j \cos\theta_j & d_j \sin\theta_j \\ 0 & -\sin\alpha_j & \cos\alpha_j & -r_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les matrices ${}^{j-1}T_j, {}^jT_{j-1}$ est dites : Les matrices de transformation Denavit-Hartenberg.

1.3 Modélisation géométrique

Dans la modélisation géométrique on s'intéresse au mouvement du bras sans tenir compte des forces qui le provoque. Elle s'intéresse à l'étude de la géométrie du bras en vu de décrire ses paramètres géométrique : position et orientation.

1.3.1 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (**MGD**) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminale, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du bras en fonction de ses coordonnées articulaire dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de passage 0T_n [1]

$${}^0T_n = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \tag{1.2}$$

Le modèle géométrique direct du bras peut aussi être représenté par la relation :

$$X = f(q) \tag{1.3}$$

Avec : $X \in \mathbb{R}^3$ les coordonnées cartésiennes, et $q \in \mathbb{R}^3$ les coordonnées articulaires.

1.3.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (**MGI**) permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles, le modèle s'écrit :

$$q = f^{-1}(X) \quad (1.4)$$

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer le modèle géométrique inverse on cite :[1]

- **Les méthodes géométriques** : permettent de déterminer le vecteur q par utilisation des transformations géométriques en prenant avantage de la structure particulière du manipulateur considéré.
- **Les méthodes algébriques** : permettent de déterminer le vecteur q en effectuant des transformations algébriques sur l'équation (1.3). Parmi les méthodes utilisées on cite la méthode de Paul qui consiste à multiplier successivement les deux membres du modèle géométrique direct par les matrices homogènes ${}^jT_{j-1}$ avec ($i=1, \dots, n-1$) permettant ainsi d'isoler et d'identifier les variables articulaires l'une après l'autre.

Lors de la résolution du problème géométrique inverse on rencontre pratiquement les situations suivantes :

- Solutions en nombre fini, lorsqu'elles peuvent être calculées sans ambiguïté.
- Aucune solution possible lorsque la position désirée ne peut être atteinte par le manipulateur.
- Plusieurs solutions possibles lorsque le manipulateur est redondant ou lorsqu'il passe par une configuration singulière.

1.4 Modélisation cinématique

Le modèle cinématique est littéralement un modèle des vitesses. Il exprime les relations entre les vitesses articulaires de chaque joint et les vitesses cartésiennes d'un point de la chaîne cinématique, généralement l'organe terminal.

1.4.1 Modèle cinématique direct

Le modèle est décrit par l'équation [3]:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \tag{1.5}$$

où $J(q) \in R_{m \times n}$ est la matrice jacobienne.

1.4.1.1 La matrice jacobienne

L'outil principalement utilisé pour traiter le problème de la cinématique des robots est la matrice jacobienne. Elle représente un opérateur permettant de lier les vitesses des corps d'un robot exprimées dans différents espaces vectoriels.

1.4.1.2 Calcul de la matrice jacobienne par dérivation du MGD

Le calcul de la matrice jacobienne peut se faire en dérivant le MGD, $X=f(q)$ à partir de la relation [1] :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \tag{1.6}$$

Où J_{ij} est l'élément (i,j) de la matrice jacobienne J

1.4.2 Modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaires \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle \dot{X} imposée.

Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique direct en résolvant un système d'équations linéaires. La mise en œuvre peut être faite de façon analytique ou numérique :

- la solution analytique a pour avantage de diminuer considérablement le nombre d'opérations, mais on doit traiter séparément tous les cas singuliers.
- les méthodes numériques sont plus générales, la plus répandue étant fondée sur la notion de pseudo inverse : les algorithmes traitent de façon unifiée les cas réguliers, singuliers et redondants. Elles nécessitent un temps de calcul relativement important.

On peut écrire le modèle cinématique inverse sous la forme :

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{X} \quad (1.7)$$

1.5 Modèle dynamique

1.5.1 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations. Les formalismes les plus utilisés pour le calcul du modèle dynamique inverse sont :

- Formalisme de Lagrange.
- Formalisme de Newton-Euler.

1.5.1.1 Formalisme de Lagrange

Les équations de Lagrange opèrent à partir de l'énergie cinétique et l'énergie potentielle d'un système. Le Lagrangien L s'écrit [1]:

$$L = E_c - E_p \quad (1.8)$$

Où :

E_c et E_p représentent respectivement les énergies cinétique et potentielle du système.

Les équations de Lagrange sont définies par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau_i \quad (1.9)$$

Pour le calcul du modèle dynamique d'une chaîne cinématique (figure 1.3), on définit

les paramètres suivants pour chaque corps i de la chaîne cinématique :

m_i : Masse du corps i de la chaîne cinématique.

${}^i r = [{}^i r_x, {}^i r_y, {}^i r_z]^T$: Vecteur du centre d'inertie du corps i exprimé dans le repère R_i .

$m^i r = [m^i r_x, m^i r_y, m^i r_z]^T$: Premier moment du corps i autour de O_i exprimé dans R_i .

${}^i I_i = \begin{bmatrix} {}^i I_{ixx} & -{}^i I_{ixy} & -{}^i I_{ixz} \\ -{}^i I_{ixy} & {}^i I_{iyy} & -{}^i I_{iyz} \\ {}^i I_{ixz} & -{}^i I_{iyz} & {}^i I_{izz} \end{bmatrix}$: Tenseur d'inertie du corps i en O_i , exprimé dans R_i .

Où :

${}^i I_{ixx} = \int ({}^i r_y^2 + {}^i r_z^2) dm_i$: Moment d'inertie.

${}^i I_{ixy} = \int {}^i r_x {}^i r_y dm_i$: Produit d'inertie.

${}^i \hat{S}_i = [{}^i \hat{S}_{ix}, {}^i \hat{S}_{iy}, {}^i \hat{S}_{iz}]^T$: position du centre de masse du corps i exprimée dans R_i .

$H_i = \int r^i r^T dm_i$: Matrice des pseudo-inerties du corps i .

$$H_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i \hat{S}_{ix} \\ I_{ixy} & \frac{I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{iyz} & m_i \hat{S}_{iy} \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz}}{2} & m_i \hat{S}_{iz} \\ m_i \hat{S}_{ix} & m_i \hat{S}_{iy} & m_i \hat{S}_{iz} & m_i \end{bmatrix}$$

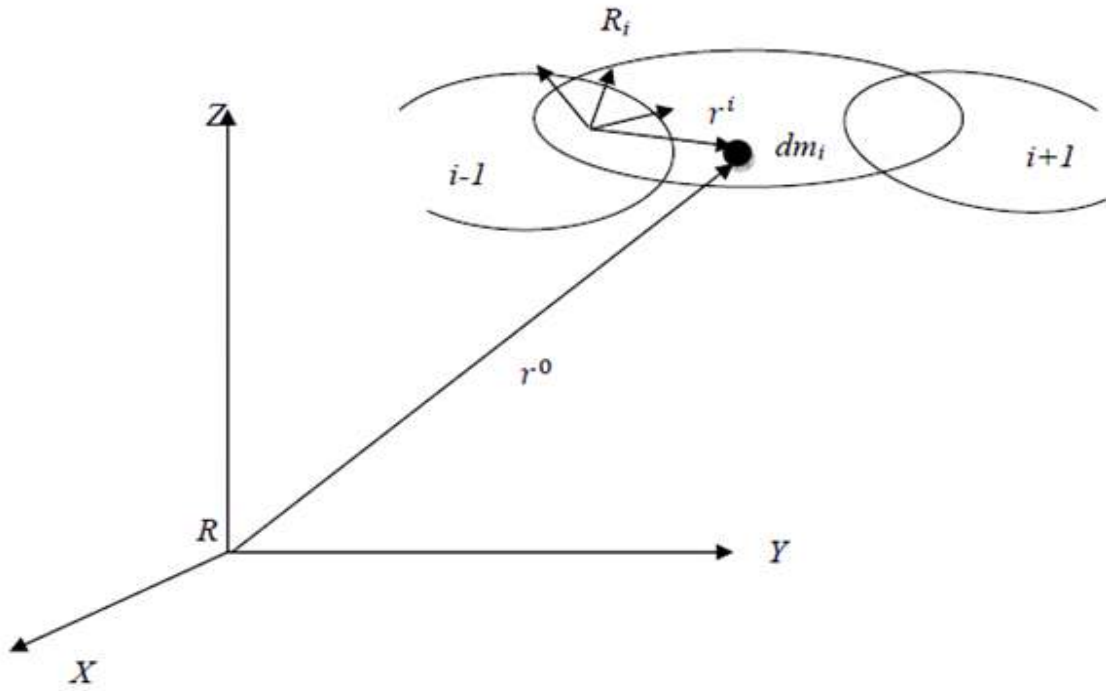


Figure 1. 3 : Représentation d'un point r^i de la chaîne cinématique

L'énergie cinétique du corps i est donnée par :

$$(E_c)_i = \int_{\text{corps } i} \frac{1}{2} {}^0\dot{r}^T {}^0\dot{r} \, dm$$

$$(E_c)_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{tr} \left(\frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_j} H_i \frac{\partial {}^0T_i^T}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k \tag{1.10}$$

tr : signifie trace de la matrice ; elle est égale à la somme des éléments de la diagonale.

L'énergie de potentiel du corps i est donnée par :

$$(E_p)_i = -m_i \tilde{g}^T {}^0T_i^j \hat{S}_i \tag{1.11}$$

$\tilde{g} = [\tilde{g}_x, \tilde{g}_y, \tilde{g}_z, 0]^T$: vecteur des accélérations de la gravité exprimé dans R_0 .

Le Lagrangien pour l'ensemble des corps du manipulateur est :

$$L = \sum_{i=1}^n ((E_c)_i - (E_p)_i) \tag{1.12}$$

Par substitution de (1.12) dans (1.9) on obtient :

$\tau =$

$$\sum_{k=i}^n \sum_{j=1}^k \text{tr} \left(\frac{\partial^0 T_k}{\partial q_j} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial q_i} \right) \ddot{q}_j + \sum_{k=i}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^k \text{tr} \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial q_j \partial q_m} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial q_i} \right) \dot{q}_j \dot{q}_m - \sum_{j=1}^n m_j \tilde{g}^T \frac{\partial^0 T_j}{\partial q_i} j \hat{S}_j \quad (1.13)$$

Le modèle obtenu peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1.14)$$

Où :

$$M_{ij} = \sum_{k=\max(i,j)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial^0 T_k}{\partial q_i} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial q_j} \right)$$

$$N(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{k=\max(i,j,m)}^k \text{tr} \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial q_i \partial q_m} H_k \frac{\partial^0 T_k^T}{\partial q_j} \right) \dot{q}_j \dot{q}_m \quad (1.15)$$

$$G(q) = \sum_{j=1}^n m_j \tilde{g}^T \frac{\partial^0 T_j}{\partial q_i} j \hat{S}_j$$

$M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: matrice d'inertie du manipulateur, symétrique et régulière.

$N(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$: vecteur des termes de Coriolis et centrifuges.

$G(q) \in \mathbb{R}^n$: vecteur des actions de la gravité.

1.5.1.2 Formalisme de Newton-Euler

Le formalisme de Newton-Euler est basé sur les théorèmes généraux de la mécanique. Il ne nécessite pas le calcul extrinsèque des coefficients dynamiques du robot. Le modèle est obtenu par double récurrence[3]:

- Récurrence de la base du robot vers l'organe terminal pour le calcul des vitesses et accélérations des corps puis du tenseur dynamique :

$${}^i\omega_i = \begin{cases} {}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\omega_{i-1} + e_z \dot{q}_i & \text{si } R_o \\ {}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{si } P_r \end{cases} \quad (1.16)$$

$${}^i\dot{\omega}_i = \begin{cases} {}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\omega_{i-1} + e_z \ddot{q}_i + ({}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\omega_{i-1}) \otimes e_z \dot{q}_i & \text{si } R_o \\ {}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} & \text{si } P_r \end{cases} \quad (1.17)$$

$$\ddot{P}_i = \begin{cases} {}^{i-1}A_i^T [{}^{i-1}\ddot{P}_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \otimes {}^{i-1}\hat{P}_i + {}^{i-1}\omega_{i-1} \otimes ({}^{i-1}\omega_{i-1} \otimes {}^{i-1}\hat{P}_i)] & \text{si } R_o \\ {}^{i-1}A_i^T [{}^{i-1}\ddot{P}_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \otimes {}^{i-1}\hat{P}_i + {}^{i-1}\omega_{i-1} \otimes ({}^{i-1}\omega_{i-1} \otimes {}^{i-1}\hat{P}_i)] & \text{si } P_r \\ + 2({}^{i-1}A_i^T {}^{i-1}\omega_{i-1}) \otimes (e_z \dot{q}_i) + e_z \ddot{q}_i & \end{cases} \quad (1.18)$$

$${}^i\ddot{S}_i = {}^i\ddot{P}_i + {}^i\dot{\omega}_i \otimes {}^i\hat{S}_i + {}^i\omega_i \otimes ({}^i\omega_i \otimes {}^i\hat{S}_i) \quad (1.19)$$

$${}^i\hat{f}_i = m_i {}^i\ddot{S}_i \quad (1.20)$$

$${}^i\hat{n}_i = {}^iI_i {}^i\omega_i + {}^i\omega_i \otimes ({}^iI_i {}^i\omega_i) \quad (1.21)$$

- Récurrence de l'organe terminal vers la base pour le calcul des couples actionneurs :

$${}^i\hat{f}_i = {}^iA_{i+1} {}^{i+1}\hat{f}_{i+1} + {}^i\hat{f}_i \quad (1.22)$$

$${}^i\hat{n}_i = {}^iA_{i+1} {}^{i+1}\hat{n}_{i+1} + {}^i\hat{n}_i + {}^i\hat{S}_i \otimes {}^i\hat{f}_i + {}^i\hat{P}_{i+1} \otimes ({}^iA_{i+1} {}^{i+1}\hat{f}_{i+1}) \quad (1.23)$$

$$\tau_i = \begin{cases} e_z^T {}^i n_i & \text{si } R_o \\ e_z^T {}^i f_i & \text{si } P_r \end{cases} \quad (1.24)$$

Avec :

$$e_z = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (1.25)$$

R_o : Rotation rotoïde.

P_r : Rotation prismatique.

${}^i \omega_i$ et ${}^i \ddot{P}_i$: Vitesse et accélération du repère R_i exprimées dans R_i .

${}^i f_i$ et ${}^i n_i$: Force et moment appliqués à l'articulation i .

${}^i \hat{f}_i$ et ${}^i \hat{n}_i$: Force et moment appliqués au centre de masse du corps i .

et

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

Si aucune force et aucun moment n'est exercé sur le manipulateur on prend comme condition terminale :

$$\begin{cases} {}^{i+1} f_{i+1} = 0 \\ {}^{i+1} n_{i+1} = 0 \end{cases} \quad (1.26)$$

et les conditions initiales : ${}^o \ddot{P}_o = [\tilde{g}_x \ \tilde{g}_y \ \tilde{g}_z]^T$ (1.27)

$$\begin{cases} {}^o \omega_o = 0 \\ {}^i \dot{\omega}_i = 0 \end{cases} \quad (1.28)$$

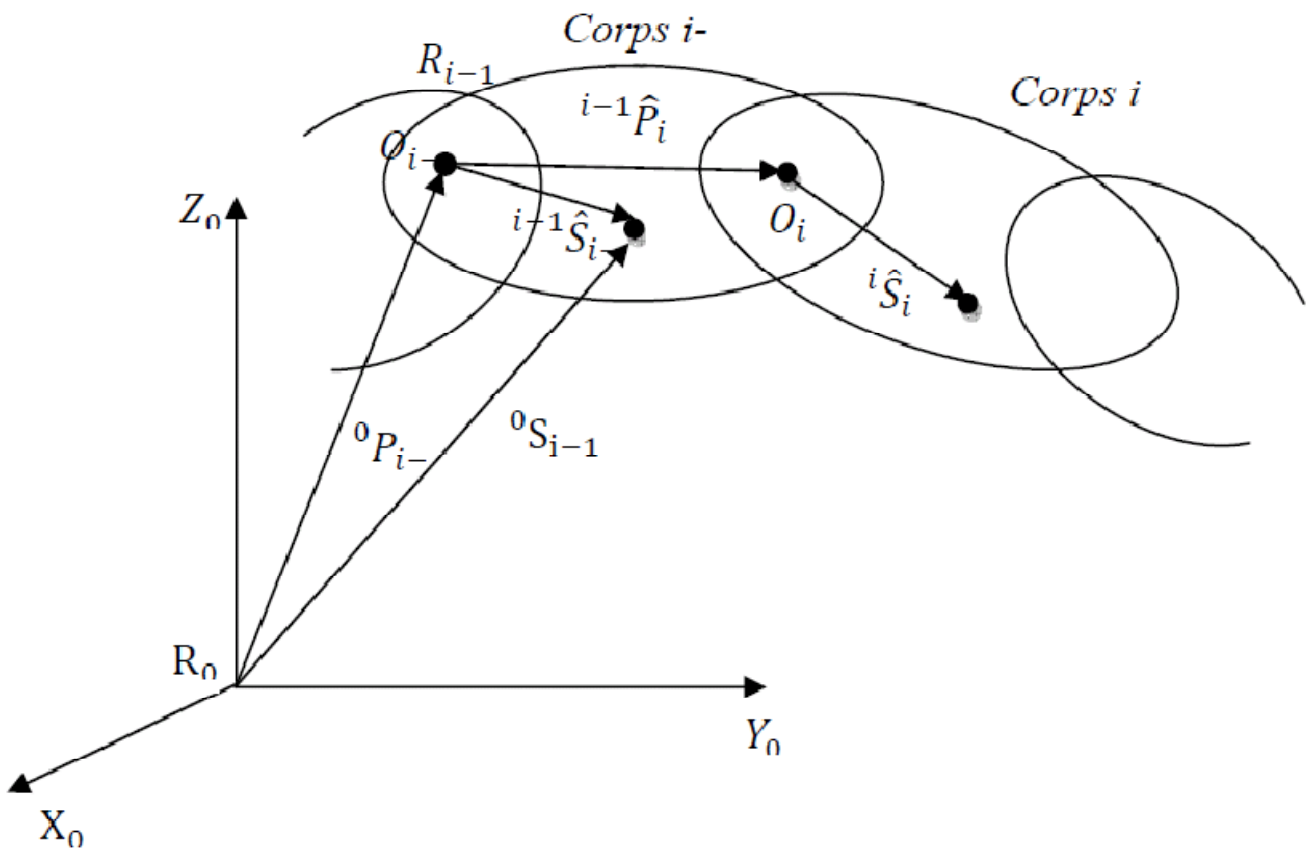


Figure 1. 4 : Formalisme de Newton-Euler

S'il est nécessaire de considérer les frottements aux niveaux des articulations on ajoute un terme τ_f aux équations (1.13) ou (1.24). On obtient alors :

$$\tau = M(q)q + \ddot{N}(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f \tag{1.29}$$

$$\tau_i = \begin{cases} e_z^T \ i n_i + \tau_{fi} & \text{si } R_o \\ e_z^T \ i f_i + \tau_{fi} & \text{si } P_o \end{cases} \tag{1.30}$$

Différents modèles mathématiques peuvent être utilisés pour exprimer τ_f . Pour une modélisation simple, on choisit :

$$\tau_{fi} = k_{fvi}\dot{q}_i + k_{fci}\text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1.31)$$

Où k_{fvi} et k_{fci} sont respectivement le coefficient de frottements visqueux et de Coulomb.

$$\text{Sgn}(\dot{q}_i) = \begin{cases} -1 & \text{si } \dot{q}_i < 0 \\ 0 & \text{si } \dot{q}_i = 0 \\ 1 & \text{si } \dot{q}_i > 0 \end{cases} \quad (1.32)$$

1.5.2 Modèle dynamique direct

Le modèle dynamique direct exprime la position, la vitesse et l'accélération des articulations en fonction du couple appliqué. Il est obtenu par inversion du modèle précédant, il s'écrit[1] :

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - N(q, \dot{q}) - G(q) - \tau_f) \quad (1.33)$$

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents modèles utilisés pour décrire les mouvements des articulations d'un bras manipulateur. Nous avons montré que :

- Le choix du modèle géométrique est fait selon le type de la tâche à réaliser ainsi que l'architecture du bras manipulateur.
- Le calcul du modèle cinématique inverse pour les bras manipulateurs redondants est réalisé en définissant un objectif secondaire en plus de l'objectif principal, afin de choisir une solution parmi plusieurs. Cet objectif consiste à optimiser une fonction de nature cinématique ou dynamique.
- Le calcul du modèle dynamique peut être effectué soit par la méthode de Newton-Euler ou par celle de Lagrange. La première nécessite moins de calcul, elle est destinée pour des applications en temps réel. Tandis que la deuxième s'avère intéressante pour la simulation.

2.1 Introduction

Pour procéder à l'analyse d'un système physique, nous devons tout d'abord modéliser le processus physique et ceci n'est possible que si nous sommes capables de prédire quel sera son comportement lorsqu'on le soumettra à une entrée connue.

Notre système sera représenté par un modèle mathématique, nous cherchons donc une relation mathématique qui lie l'entrée et la sortie du système. Cette relation mathématique prendra une certaine forme qui définit la structure du système (modèle), et fait intervenir des paramètres dont nous ignorons à priori les valeurs numériques.

L'identification est l'étape où il s'agit de déterminer les valeurs numériques de ces paramètres du modèle pour que ce dernier se comporte comme le processus physique de la meilleure façon possible.

2.2 Modélisation des processus physiques

Un système dynamique peut être représenté par un modèle mathématique qui lie les variables mesurées d'entrées et de sorties.

Il existe deux types de modèles [4]:

- * modèle non paramétrique (réponse fréquentielle, réponse à un échelon, réponse indicielle).
- * modèle paramétrique (fonction de transfert, équation différentielle ou aux différences).

2.3 Différents approches d'établissement d'un modèle

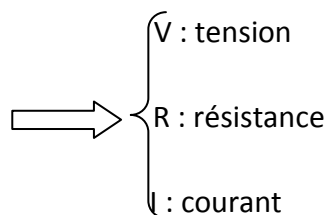
Il existe trois approches[5] :

2.3.1 Modèle de connaissance

Les paramètres du modèle de connaissance ayant un sens physique

Exemple :

La loi d'ohm $V=R*I$



2.3.2 Modèle de représentation

Les paramètres de ce modèle n'ayant pas un sens physique donc ils sont de type boîte noire, mais sont suffisant pour le traitement de signal.

2.3.3 Modèle linéaire discrets

$Y(t)$ un signal analogique représenté par des échantillons à des instants $K, K+1, \dots, K+n$ et que nous noterons :

$$Y(k), y(k+1), \dots, y(k+n)$$

Supposant que $y(t)$ est généré à partir d'une excitation $u(t)$, elle est représenté aussi par des échantillons :

$$u(k), u(k+1), \dots, u(k+p)$$

Un modèle discret du signal sera une relation linéaire entre les échantillons $\{y(k)\}$ et $\{u(k)\}$ que nous noterons :

$$a_0 y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_p u(k-p) \quad (2.1)$$

2.3.3.1 Modèle auto-régressif à moyenne ajustée (ARMA)

Un modèle auto-régressif à moyenne ajustée d'ordre (n, p) notée $(ARMA)_{(n,p)}$ est défini par l'équation aux différences suivante [6]

$$\sum_{i=0}^n a_i y(k-i) = \sum_{i=0}^p b_i u(k-i) \quad (2.2)$$

Avec a_i représente les paramètres de la partie auto_régressif AR.

b_i représente les paramètres de la partie moyenne c MA.

Le cas $a_0=0$ donnera un modèle non causal.

Soit $H(Z)$ la fonction de transfert en Z :

$$H(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{\sum_{i=0}^p b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (2.3)$$

Avec $a_0 = 1$

2.3.3.2 Modèle autorégressif(AR)

Dans le cas où les b_i sont nuls pour $1 \leq i \leq p$.

Le modèle décrit par l'équation (2.2) s'écrit donc sous la forme suivante :

$$\sum_{i=0}^n a_i y(k-i) = b_0 u(k) \quad (2.4)$$

La fonction de transfert $H(z) = \frac{b_0}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}}$ (2.5)

2.3.3.3 Modèle à moyenne ajustée (MA)

Dans le cas où les valeurs de a_i sont nulles pour $1 \leq i \leq n$.

L'équation (2.2) sera égale à $y(k) = \sum_{i=0}^p b_i u(k-i)$ (2.6)

La fonction de transfert $H(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \sum_{i=0}^p b_i z^{-i}$ (2.7)

Ce modèle est caractérisé par la position de ces zéros, ce qui lui vaut le nom de filtre tout zéro.

2.4 Méthodes d'identification classique

La méthode d'identification classique utilisée pour obtenir des modèles paramétriques à partir des modèles non paramétriques type 'réponse en échelon'. Cette méthode est utilisée initialement pour obtenir des modèles continus et a été étendue pour identifier des modèles échantillonnés.

Les inconvénients de cette méthode son multiples :

- procédure longue.
- Précision réduite.
- Influence néfaste des perturbations.
- Pas de possibilité de modélisation des perturbations
- Pas de validation du modèle.

2.5 Algorithme d'identification performants

Cette approche moderne élimine tous les défauts des méthodes classiques mentionnées antérieurement et offre aussi d'autres possibilités telles que :

- Modélisation des bruits.
- Identification des modèles de perturbation.
- Détection et mesure des fréquences de vibration.
- Analyse spectrale des signaux.
- Suivi des variations des paramètres du procédé en temps réel, permettant un réajustement des régulateurs pendant le fonctionnement.

2.5.1 Algorithme d'identification récursifs

Des algorithmes d'identification performants ayant une formulation recursive adaptée aux problèmes d'identification au temps réel et ont été développés leur mise en œuvre sur micro ordinateur. L'identification récursive offre les avantages suivants :

- possibilité de réalisation un système d'identification au temps réel.
- possibilité de poursuite des paramètres des système variables dans le temps .
- obtention une estimation au fur et à mesure que le procédé evolue .
- nécessité une mémoire et une puissance de calcul sensiblement faible .

2.6 Les Etapes d'une bonne identification

Un processus n'admet pas un modèle unique et l'automaticien devra choisir un bon modèle plus ou moins compliqué, adapté à son problème.

On peut décomposer généralement en quatre étapes la conduite d'une bonne identification.

2.6.1 Acquisition des entrées/sorties

On préfère généralement exciter le processus en boucle ouverte par un signal suffisamment énergétique et riche en composant spectrales.

En pratique, on utilise deux catégories de signaux de test (d'excitation) :

- ◆ Les signaux déterministes tels que l'échelon, la sinusoïde, ..., ces signaux sont décrits par une fonction de temps ou par leur transformée de Fourier.
- ◆ Les signaux aléatoires, complètement décrits par leurs propriétés statistiques parmi ceux-ci le bruit blanc (théorique) dont l'énergie est équirépartie sur toute la fréquence.

En pratique, on préfère la séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA).

La SBPA est une succession d'impulsion rectangulaire modulée en largeur, qui a des propriétés statistiques semblables à celle d'un bruit blanc discret et donc qui a un contenu riche en fréquences[4].

2.6.2 Choix de la structure du modèle

Ce choix est préalable, il est effectué par l'opérateur qui s'appuie sur l'ensemble de ses connaissances et sur le fonctionnement du système et leurs lois physiques [4].

2.6.3 Estimation des paramètres

Cette étape consiste à déterminer des valeurs numériques des paramètres du modèle choisi, de façon à minimiser l'écart entre la sortie réelle et la sortie prédite [4].

2.6.4 Validation du modèle

Cette étape est la plus importante lors l'identification, elle consiste à accepter ou rejeter le modèle obtenu. Le rejet d'un modèle qui ne répond pas à nos objectifs remis en cause l'ensemble des étapes déjà cités [4].

2.7 Les Outils mathématiques et lois statistique utilisé par l'identification

2.7.1 L'espérance mathématique

Soit X une variable aléatoire discrète prenant les valeurs X_k dans $R\{\text{ensemble des réels}\}$, et ayant une probabilité p_k .

Nous appelons espérance mathématique (moment d'ordre 1 ou valeur moyenne de X) le nombre :

$$\mu = E(X) = \sum X_k * p_k \text{ Avec } \sum p_i = 1$$

Dans le cas continu : $E(X) = \int X_k * p_k$ avec $\int p(X)dx = 1$

2.7.2 La variance

L'espérance mathématique d'ordre 2 est appelé variance de X .elle est définie par :

$$\sigma^2(X) = \text{VAR}(X) = E[(X - E[X])^2]$$

$$\sigma(X) = \sqrt{\text{VAR}(X)}$$

$\sigma(X)$:l'écart type

Dans le cas continu : $\sigma^2(X) = E[X^2] = \int X^2 * p(X) dx$

2.7.3 La covariance

Soient X et Y deux variables aléatoires, leur covariance est donnée par :

$$\sigma_{xy} = \text{COV}(X,Y) = E[(X - \mu_X) E(Y - \mu_Y)]$$

D'où $\sigma_{xy} = E[XY] - \mu_X \mu_Y$

2.7.4 La fonction d'auto corrélation

La fonction d'auto corrélation $R_{XX}(\tau)$ est donnée par :

$$R_{XX}(\tau) = \frac{1}{n} \sum X(t) * X(t + \tau) \text{ avec } \tau = t_2 - t_1$$

Dans le cas continu

$$R_{XX}(\tau) = \lim \int X(t) * X(t + \tau) d \tau$$

2.8 Conclusion

Quand la relation qui régit le fonctionnement d'un système donnée est partiellement ou complètement inconnue, le problème de l'identification s'impose. Dans ce chapitre, on a commencé tout d'abord par la modélisation des processus physiques, après on a présenté les différentes approches d'établissement d'un modèle. On a exposé ensuite les méthodes d'identification classique et on a terminé par les étapes de bonne identification et leur outils mathématiques utilisés pour résoudre le problème.

3.1 Introduction

Le moteur à courant continu, est très utilisé dans le domaine industriel, grâce à sa souplesse de fonctionnement, il est de plus en plus associé à des équipements électroniques qui permettent une variation et régulation de vitesse précise comme l'Arduino.

3.2 Définition d'un moteur à courant continu

Le moteur à courant continu effectue une conversion d'énergie électrique en énergie mécanique [7].

Le moteur à courant continu à aimant permanent est formé essentiellement de deux parties :

- Stator (partie fixe) : c'est un électro-aimant qui joue le rôle d'inducteur.
- Rotor (partie tournante) : qui a le rôle d'induit.

3.3 Principe de fonctionnement d'un MCC

Le rotor est constitué de fils électriques parcourus par un courant qui forment des spires, ces même fils sont dans le flux magnétique des aimants. Ces conducteurs sont donc soumis à des forces de Laplace, un couple moteur est donc créé. Pour entretenir la rotation du moteur, le collecteur inverse le sens du courant dans les spires à chaque demi-tour [8].

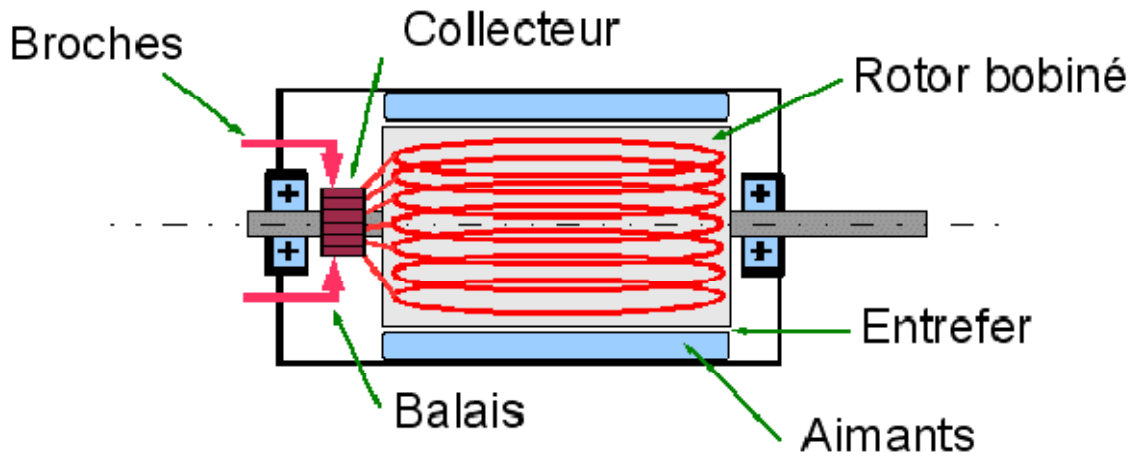
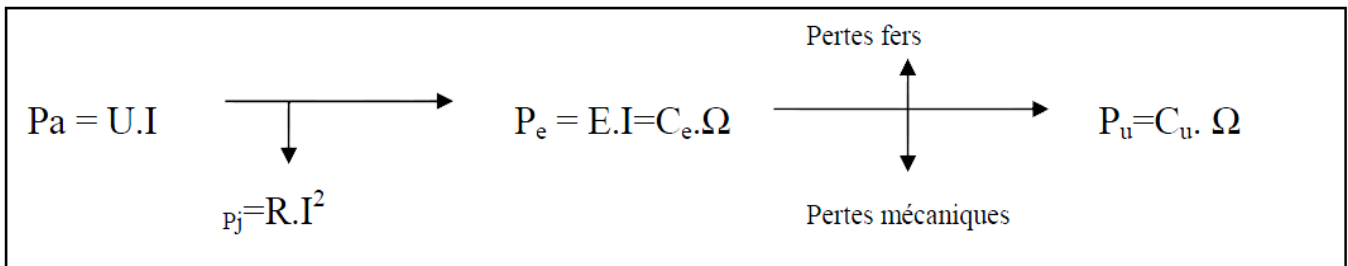


Figure 3. 1 : Principe de fonctionnement d'un Mcc

3.4 Bilan de puissance [9]



$$C_e = C_u + C_p$$

P_a : Puissance absorbée (Watt)

P_u : Puissance utile (Watt)

C_u : Couple utile (N.m)

C_e : Couple électromagnétique (N.m)

C_p : Couple de pertes (N.m)

3.5 La Fonction de transfert du moteur

3.5.1 Fonction de transfert dans le domaine de Laplace

La tension $U(t)$ aux bornes du moteur permet d'obtenir en sortie du système une vitesse de rotation angulaire $\omega(t)$ de l'arbre moteur .

Un moteur à courant continu est défini par les données suivantes :

L : inductance des enroulements du moteur (mH)

R : résistance électrique interne du moteur (ohm)

J : moment d'inertie du rotor du moteur par rapport à son axe de rotation (kg.m^2)

C_m : Couple moteur électromagnétique(N.m).

k_c : Constante de couple telle que le couple électromagnétique C_m soit proportionnelle au courant qui traverse le moteur : $C_m = k_c \cdot i(t)$.

k_e : Constante de force électromotrice telle que f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor: $e(t) = k_e \cdot \omega(t)$

C_f : Couple de frottement sur l'axe moteur(N.m).

F : le coefficient de frottement visqueux mécanique, et on a la relation $C_f = F \cdot \omega(t)$

- ◆ Modèle électrique :

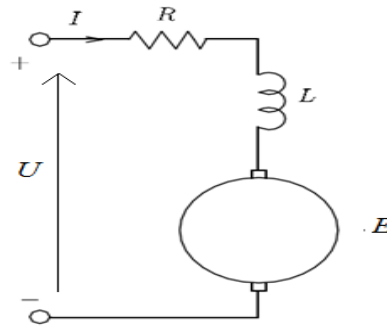


Figure 3. 2 : Schéma électrique moteur à courant continu

- Les équations du système :

- ❖ Equations électriques:

$$e(t) = k_e \cdot \omega(t) \quad (3.1)$$

$$c_m = k_c i(t) \quad (3.2)$$

$$u(t) = R i + L \cdot \frac{di}{dt} + e(t) \quad (3.3)$$

- ❖ Equation mécaniques :

$$c_m - c_f - c_r - c_n = J \frac{d\omega(t)}{dt}$$

$$c_f = F \cdot \omega(t).$$

$$c_r = r(\theta - \theta_0)$$

$$c_n = \text{perturbation}$$

r : coefficient de couple de rappelle

$$\theta_0 = 0.$$

Les images dans le domaine de Laplace :

$$L(U(t)) = U(p); L(i(t)) = I(p); L(\omega(t)) = \Omega(p)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i(t) - \frac{K_e}{L}\omega(t) + \frac{U}{L} \dots \dots \dots \text{équation électrique}$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{K_c}{J}i(t) - \frac{f}{J}\omega(t) - \frac{r}{J}\theta(t) - \frac{1}{J}c_n(t) \dots \dots \dots \text{équation mécanique}$$

Donc :

$$pI(p) = -\frac{R}{L}I(p) - \frac{K_e}{L}\Omega(p) + \frac{U(p)}{L}$$

$$p\Omega(p) = -\frac{K_c}{J}I(p) - \frac{f}{J}\Omega(p) - \frac{r}{J}\theta(p) - \frac{1}{J}c_n(p)$$

Le système est linéaire alors on peut utiliser la super position. On calcul premièrement

$G(p)$ et puis $G_n(p)$, on trouve :

$$G(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{[L]p^2 + (R) + [L]p + (K_c K_e + Rf + rL)} + rR$$

$$= \frac{N(p)}{D(p)}$$

$$G_n(p) = \frac{\Omega(p)}{c_n(p)} = \frac{-(R + Lp)}{D(p)}$$

Alors la fonction de transfert total est $\Omega(p) = G(p)U(p) + G_n(p)c_n(p)$

C'est la fonction de transfert complet qui prend en compte tout les types de facteur et force qui peuvent influencer la rotation de moteur soit en plus soit en moins dans la vie pratique [5].

Mais à notre cas il ya :

- 1) r : coefficient de couple de rappelle, est lié a l'existence d'un ressort alors $r=0$.
- 2) La perturbation ce n'est que le couple résistant au la charge supporté par le moteur.

Notre identification ce fait à vide. Alors la fonction de transfert se réduit a :

$$G(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{Lp^2 + (R) + [L]p + K_c K_e + Rf} \tag{3.4}$$

3.5.2 La fonction de transfert en Z

On met la fonction de transfert trouvé sous la forme :

$$G(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{K_c K_e + R_f} \cdot \frac{1}{\frac{L_f}{K_c K_e + R_f} p^2 + \frac{(R_f + L_f)}{K_c K_e + R_f} p + 1} \tag{3.5}$$

Soit :

$$\begin{cases} K_{mot} = \frac{K_c}{K_c K_e + R_f} \\ \frac{1}{\omega_0} = \frac{L_f}{K_c K_e + R_f} \\ \xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{(R_f + L_f)}{K_c K_e + R_f} \omega_0 \end{cases}$$

$$G(p) = K_{mot} \frac{1}{\frac{1}{\omega_0} p^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + 1}$$

Cette forme nous aide à utiliser la table de transformation pour trouver la transformée en z a l'aide de Laplace telle que :

$$G(z) = K_{mot} \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_0}$$

Avec :

$$a_0 = e^{-2\xi\omega_0\Delta}, a_1 = -2\sqrt{a_0} \cos(\omega_p\Delta)$$

$$b_0 = a_0 + \sqrt{a_0} \left[\xi \frac{\omega_0}{\omega_p} \sin(\omega_p\Delta) - \cos(\omega_p\Delta) \right]$$

$$b_1 = 1 + \sqrt{a_0} \left[\xi \frac{\omega_0}{\omega_p} \sin(\omega_p\Delta) + \cos(\omega_p\Delta) \right]$$

$$\text{Ou } \omega_p = \omega_0 \sqrt{1 + \xi^2}$$

3.6 La carte de puissance

La carte de puissance est utilisée pour actionner les moteurs. Cette carte est alimentée en 12V et reçoit des commandes MLI(PWM) issues de la carte Pic. Le rôle de la carte est d'envoyer les commandes aux moteurs pour faire avancer et tourner le moteur comme on le souhaite.

Dans cette carte, on utilise L6203 c'est pour avoir une carte plus résistante aux inversions de sens des moteurs.

Le circuit de puissance est composé d'un L6203. ce composant intègre un pont en H à transistors MOSFET, ainsi que les diodes de roue libre nécessaires à son bon fonctionnement.

Les diodes présentes sur les broches Boot1 et Boot2 sont des diodes d'aide à la commutation.

- schéma interne du L6203

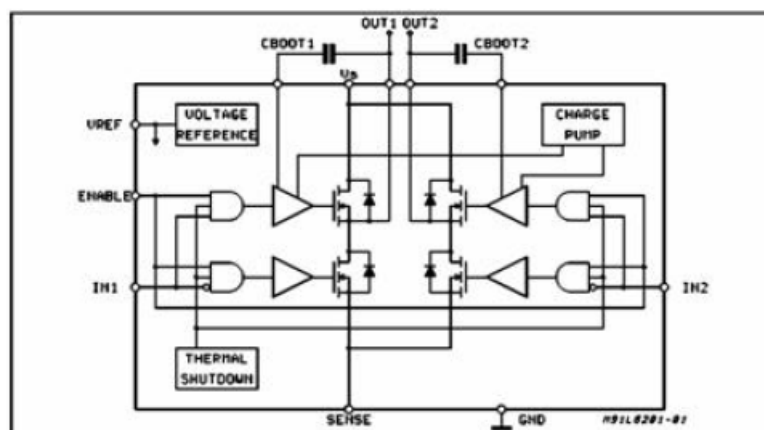


Figure 3. 3 : schéma interne du L6203

- une photo d'un L6203



Figure 3. 4 : circuit L6203

3.6.1 Réalisation du schéma

Une fois le besoin analysé et le cahier des charges validé la première grande étape dans la réalisation d'une carte électronique est la conception et la simulation des différentes fonctions de celle-ci.

Il existe de nombreux logiciels qui nous permettent de réaliser ces simulations facilement,

Comme on peut le voir ci-dessous on dessine avec le logiciel tel que ISIS 7 Professional.

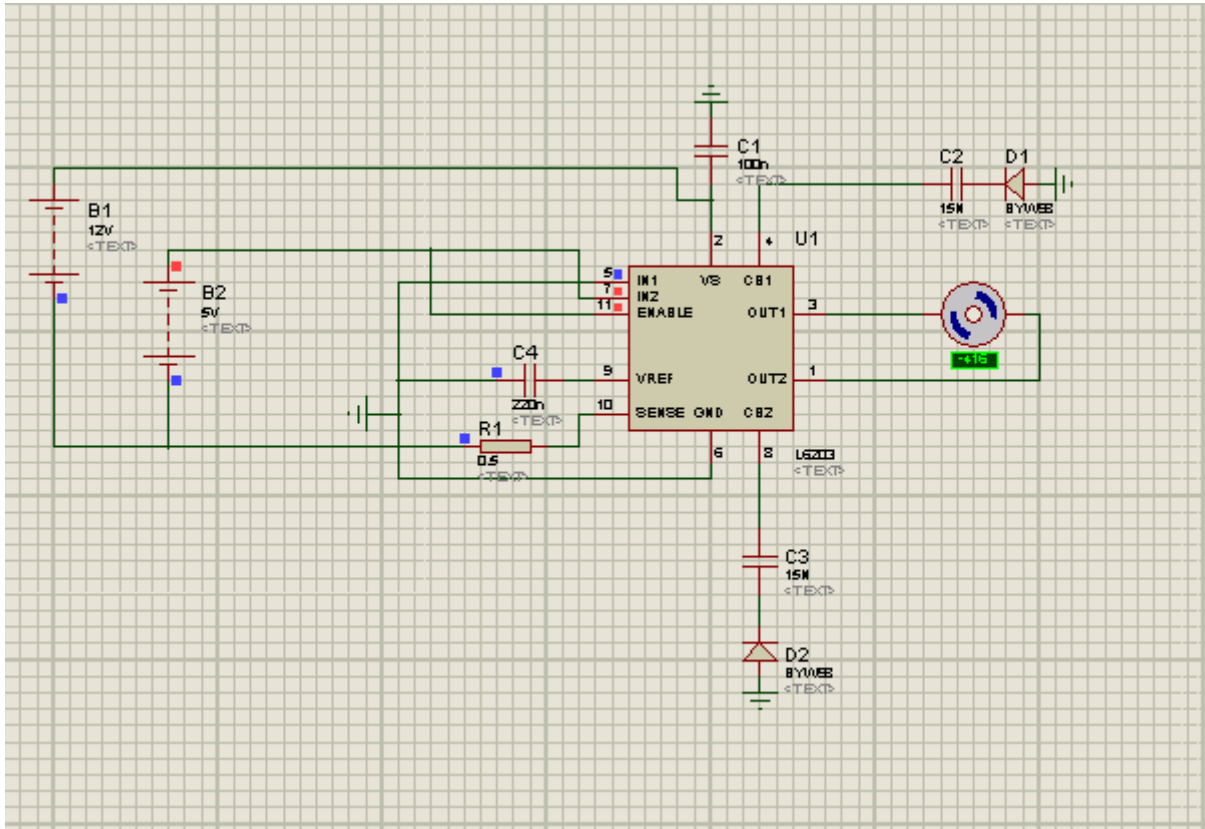


Figure 3. 5 : schéma de câblage de L6203

Vue les difficultés rencontré dans la pratique lors de l'utilisation de la carte de puissance , on a préféré la changer par une autre carte préfabriqué .

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a commencé tout d'abord par le moteur à courant continu, sa définition, son principe de fonctionnement et ses fonctions de transfère, après on a présenté la carte de puissance .par conclusion, on a établi une fonction de transfert complète qui prend en compte tout les facteurs et les forces influençant sur la rotation du moteur. Finalement, le résultat de notre travaille c'était de savoir faire une carte de puissance.

4.1 Introduction :

Après une étude des différentes composantes du système dans les chapitres précédents, nous allons consacrer ce chapitre aux tests et résultats que nous avons obtenu lors de nos expériences.

4.2 Etude préliminaire du système :

Dans la pratique, les systèmes commandés sont souvent non linéaires. D'où la nécessité d'un traitement efficace de ce problème.

Afin de tester la linéarité ou non de notre système nous avons commencé par l'exciter avec un signal sous forme de rampe allant de 0 à 255, correspondant à des tensions comprises entre -24 et +24 volts, ceci couvrant toute la gamme d'alimentation supportée par le moteur. De cette manière nous pouvons rapidement conclure de la linéarité ou non de notre système. La figure ci-dessous montre la courbe obtenue après une telle expérience.

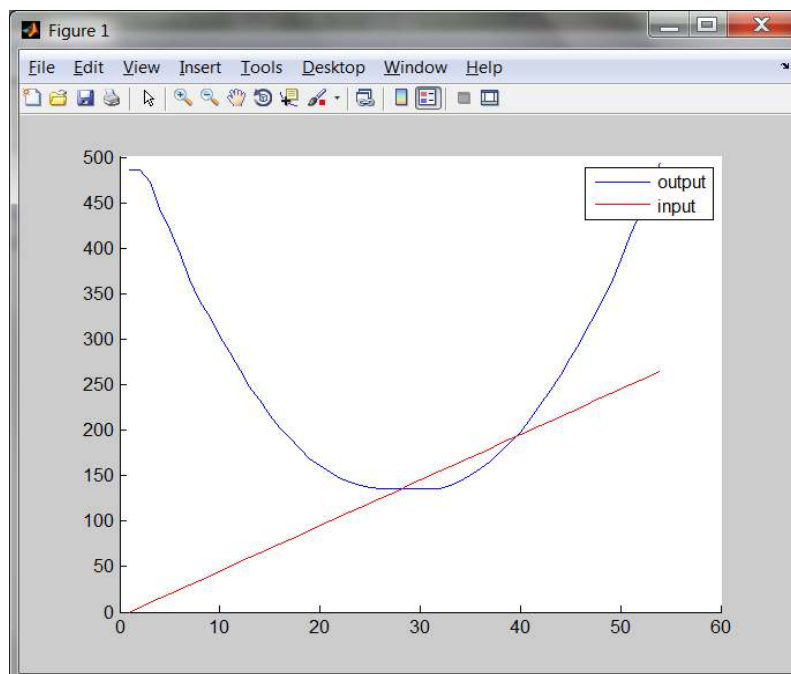


Figure 4. 1 : Réponse a une entrée rampe

D'après le graphe représentant la position du bras (output), nous constatons la présence d'une zone de non linéarité au niveau du segment compris entre 118 et 140 du signal d'entrée numérique correspondant respectivement à des tensions d'alimentation entre -1.8 volts et +2.3 volts, ceci veut dire que si le moteur est alimenté dans cette plage de valeurs il restera immobile, cela va introduire une non-linéarité qui va donc compliquer la synthèse d'une commande sur toute la gamme de fonctionnement du moteur. Cette zone morte est due aux frottements secs, présents dans le couplage mécanique du système.

Afin d'étudier le système en dehors de la zone morte nous avons dérivé le signal obtenu, le résultat illustré par la figure 4.2 ci-dessous montre qu'il y a une linéarité entre la vitesse angulaire du moteur et la tension d'alimentation, comme cela a été précisé au chapitre 3.

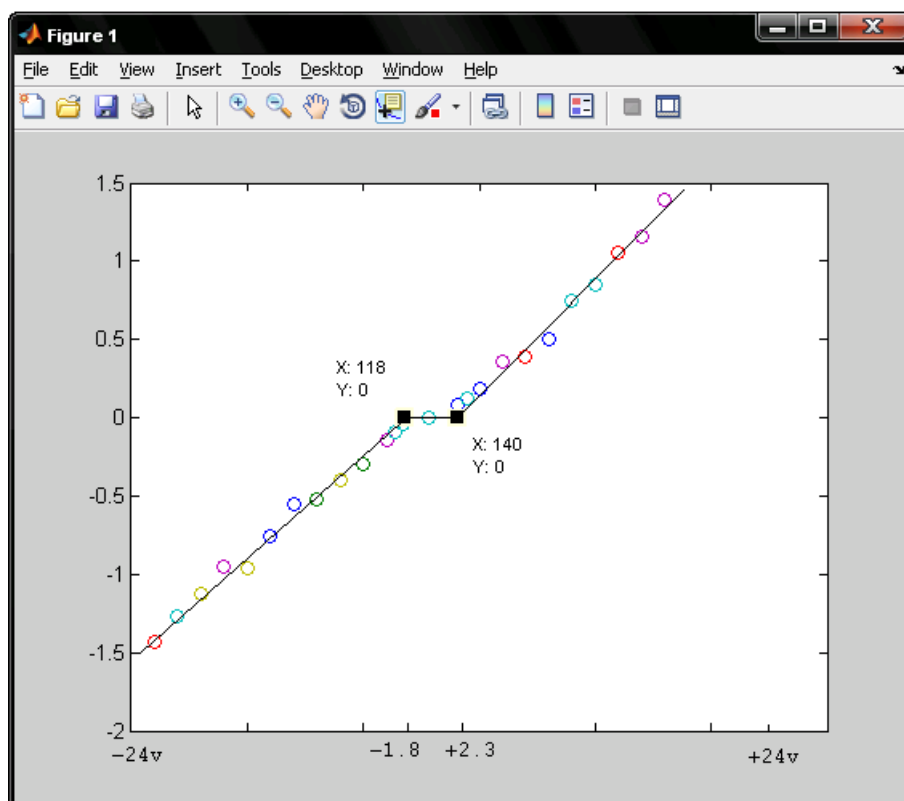


Figure 4. 2 : Vitesse angulaire en fonction de la tension d'alimentation

4.3 Identification :

Etant donné l'absence des valeurs numériques des paramètres mécaniques (moment d'inertie, constante de couple, coefficient de frottements) et électriques (résistance et inductance) nous ne pouvons pas élaborer un modèle mathématique pour concevoir un contrôleur capable de fournir le signal d'alimentation adéquat pour mettre le bras à la position angulaire désirée. A cet effet nous avons procédé à l'identification d'un modèle de représentation basé sur l'utilisation de données entrées/sorties à partir desquels il est possible d'obtenir un modèle linéaire ou non linéaire en choisissant un algorithme parmi une liste disponible avec l'outil « System Identification Toolbox » de l'environnement Matlab. Pour faire appel à cet outil il suffit de taper **ident** à la ligne de commande Matlab.

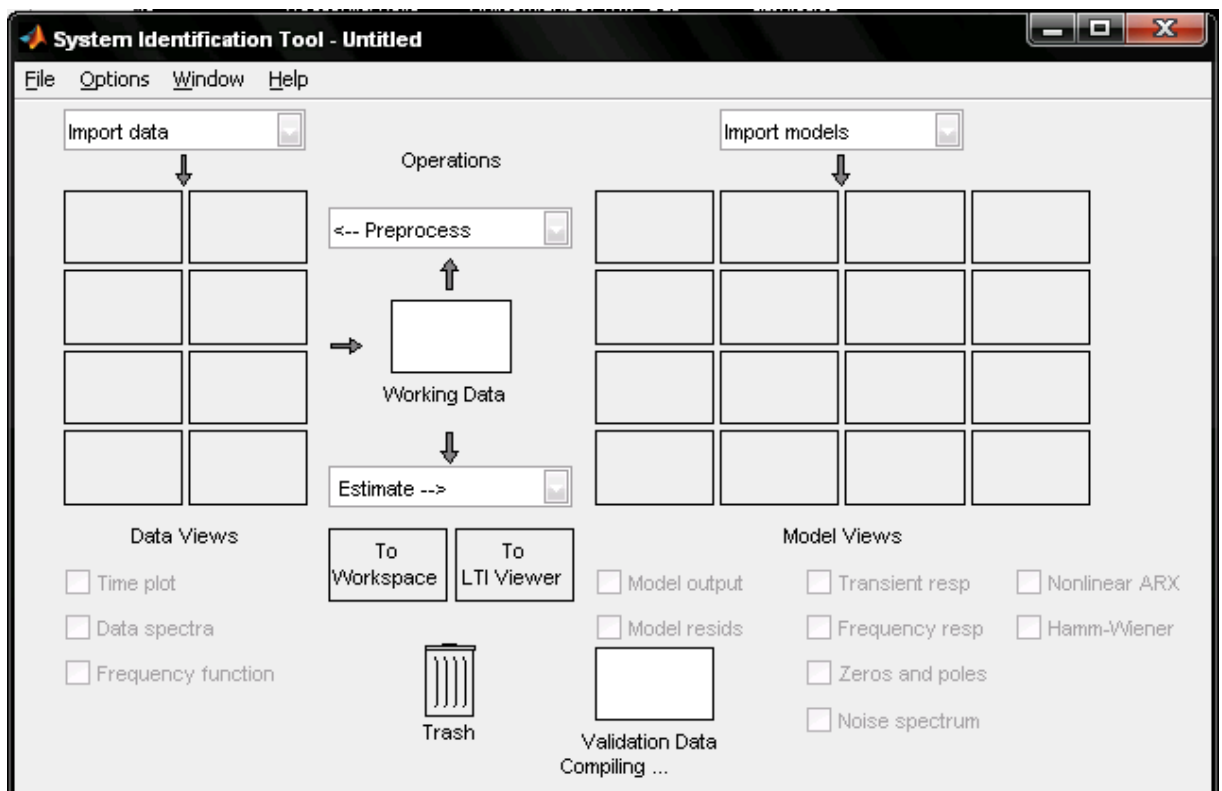


Figure 4. 3 : Interface d'identification Matlab

Pour utiliser les données préalablement acquises sélectionnez **Import data** puis **Time domain data** pour importer ces données, sans oublier de préciser la période d'échantillonnage appropriée pour notre cas nous avons pris $T_s = 10$ ms. Tel que nous l'avons montré au paragraphe précédent notre système présente une non linéarité pour les faibles tensions. Après plusieurs essais nous avons finalement opté pour un modèle de type nlarx (non linear auto regressive with exogenous input) d'ordre 2. Après le choix du type de modèle dans la liste déroulante **Estimate** la figure ci-après apparaît.

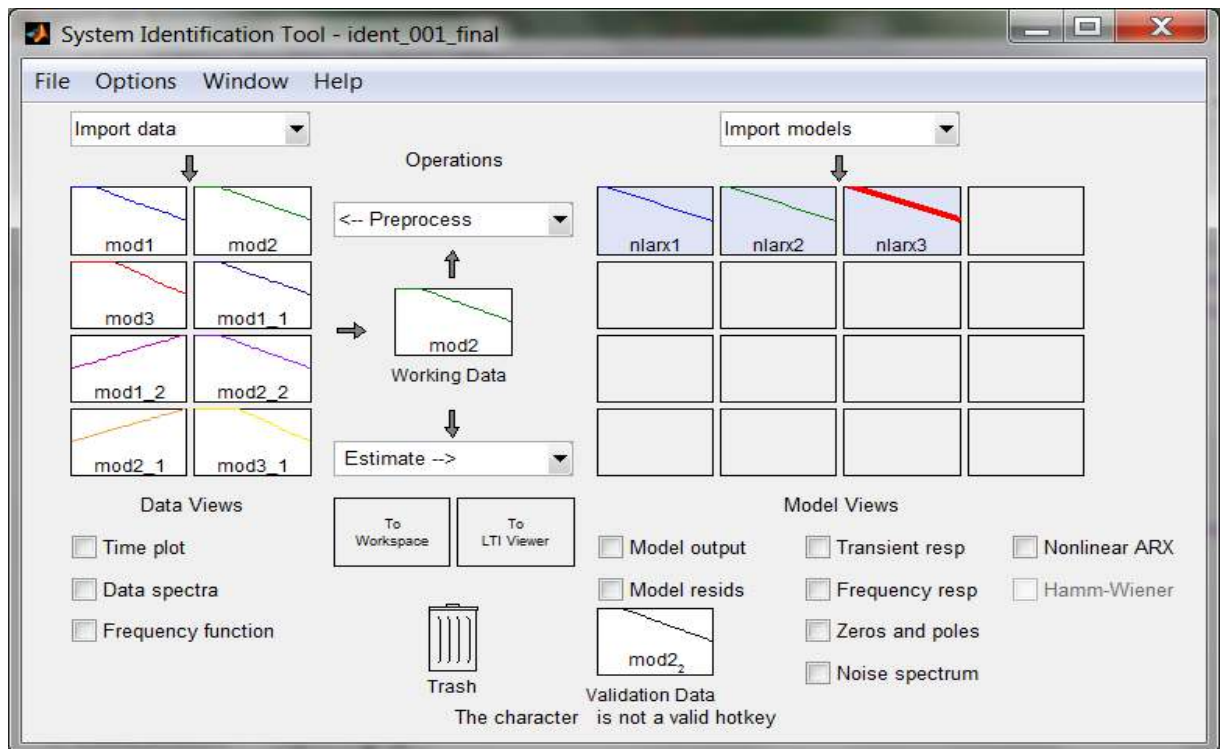


Figure 4. 4 : Modèle créé et prêt pour l'analyse

On peut vérifier la qualité de la réponse du modèle identifié par l'étape d'analyse de la réponse transitoire à l'échelon, la sortie du modèle simulée et mesurée, la réponse en fréquence etc...

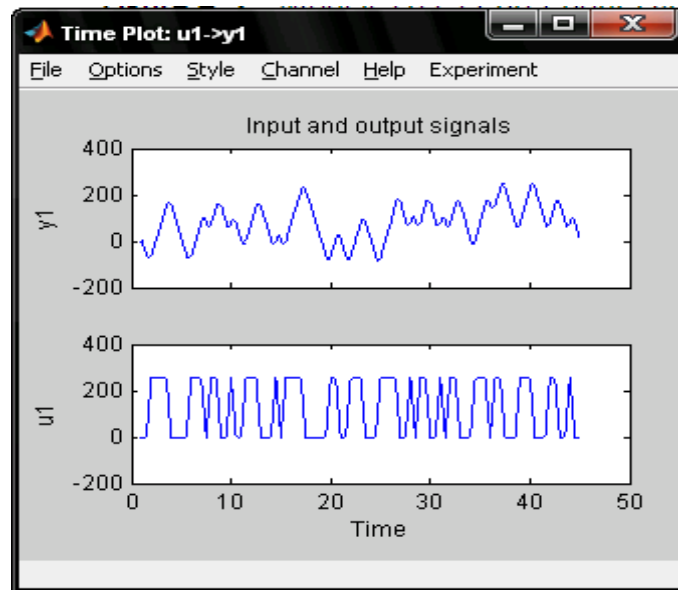


Figure 4. 5 : les signaux d'entrée/sortie

Sur la figure 4.6 nous pouvons constater que le résultat d'estimation pour ce modèle donne un taux de 95 % similarité entre la sortie mesurée et celle calculée par ce modèle, ce qui est presque idéal.

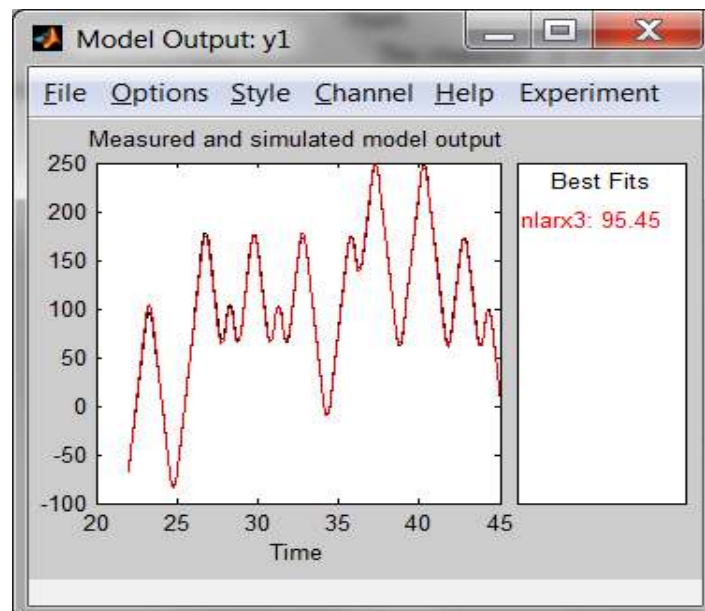


Figure 4. 6 : Réponse du modèle par rapport à la réponse mesurée

Pour plus de confirmation nous avons tracé la réponse à l'échelon du modèle obtenu, ceci pour juger de la ressemblance de la dynamique du modèle et celle du bras. Nous avons aussi représenté les signaux d'auto-corrélation de l'erreur et de l'inter-corrélation de l'erreur avec le signal d'entrée, la figure 4.8 montre clairement que pour les deux cas le résultat est très concluant puisque l'auto-corrélation est proche d'une impulsion à l'origine et que l'inter-corrélation est proche de zéro ce qui prouve que cette erreur s'apparente à un bruit additif indépendant du signal d'entrée.

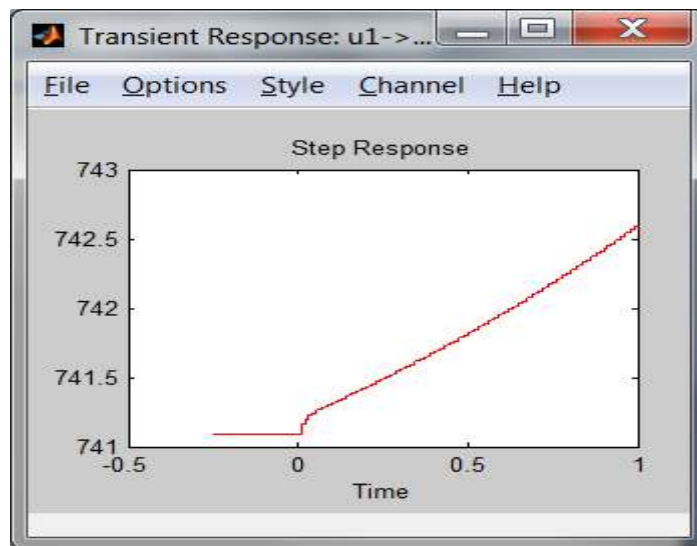


Figure 4. 7: Réponse à l'échelon

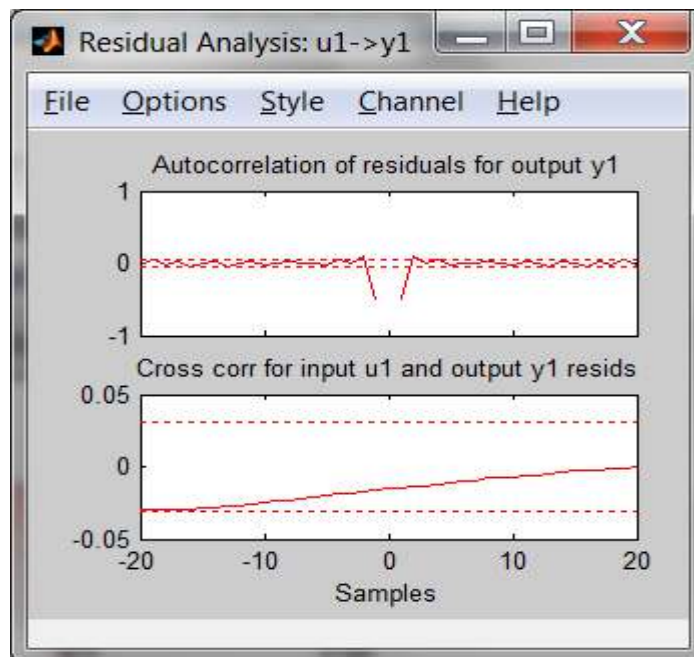


Figure 4. 8: Auto-corrélation et la corrélation de l'erreur

4.4 Elaboration d'un contrôleur PID

Un régulateur ou correcteur **PID** pour « proportionnel intégral dérivé » est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'une grandeur physique d'un système industriel ou "procédé".

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général, on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

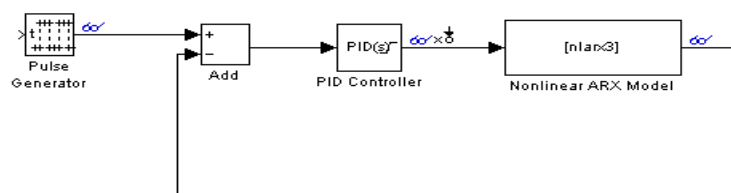


Figure 4. 9: Simulink du PID avec le système non linéaire

Après plusieurs essais nous avons trouvé les paramètres du PID suivantes (Figure 4.10)

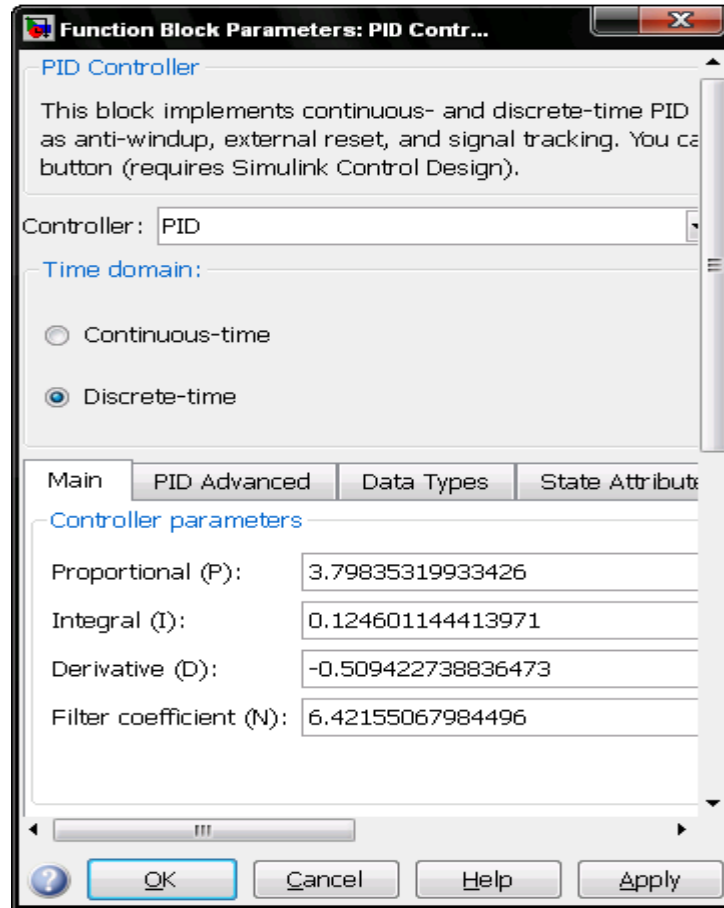


Figure 4. 10: les paramètres du PID

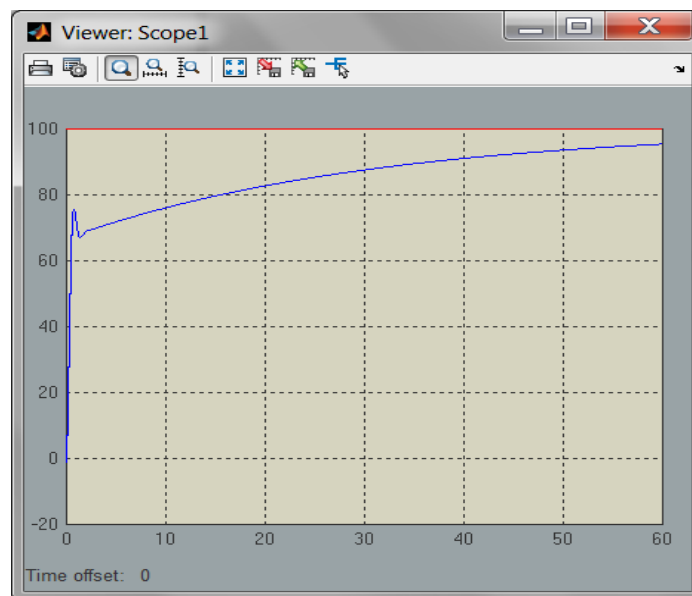


Figure 4. 11: La réponse à l'échelon du système en boucle fermée

Après avoir effectué plusieurs réglages sur les paramètres du PID nous avons opté pour les valeurs donnant la réponse à l'échelon de la figure 4.11, bien que cette réponse n'est pas parfaite il n'en demeure pas moins que cela est tout à fait acceptable vu la nature non-linéaire du système à commander.

4.5 Application de la commande PID au bras manipulateur

Dans cette étape on a appliqué le PID précédent sur notre bras manipulateur et on a obtenu les résultats suivants :

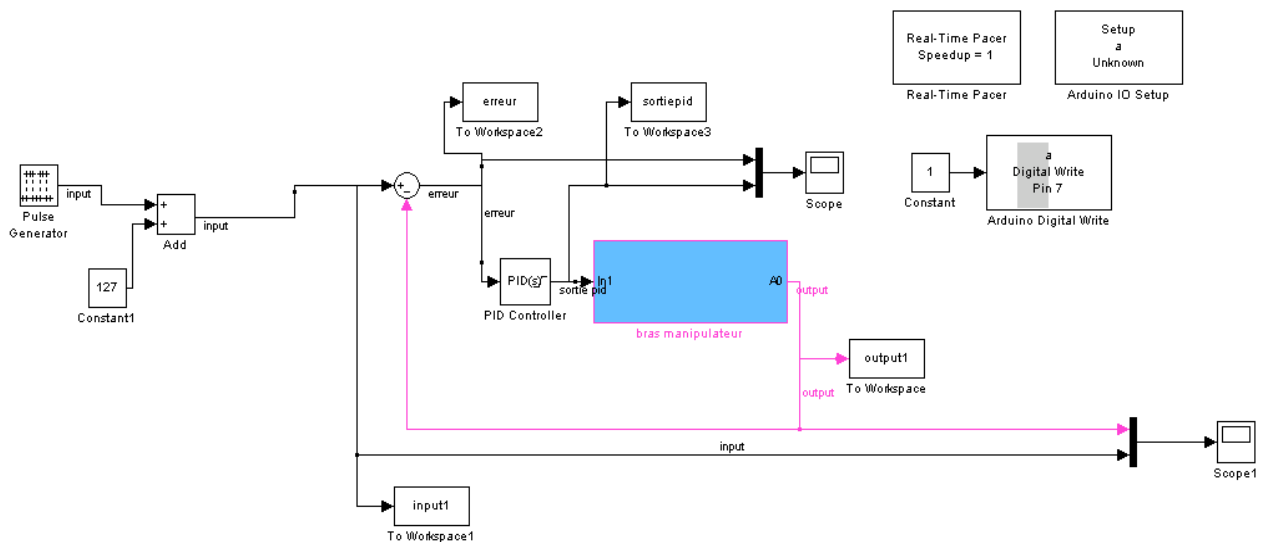


Figure 4. 12: simulink du bras avec PID et signal d'entrée carré

La figure 4.13 ci-dessous montre très bien comment la sortie du bras essaye de suivre le signal carré de l'entrée.



Figure 4. 13 : la sortie du bras avec un signal d'entrée carrée

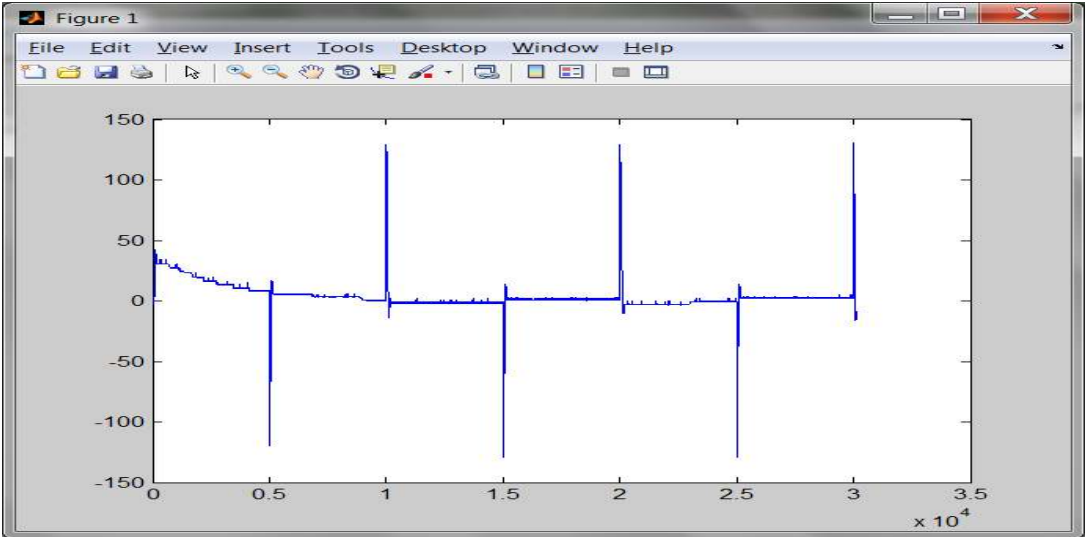


Figure 4. 14 : l'erreur pour un signal d'entrée carrée

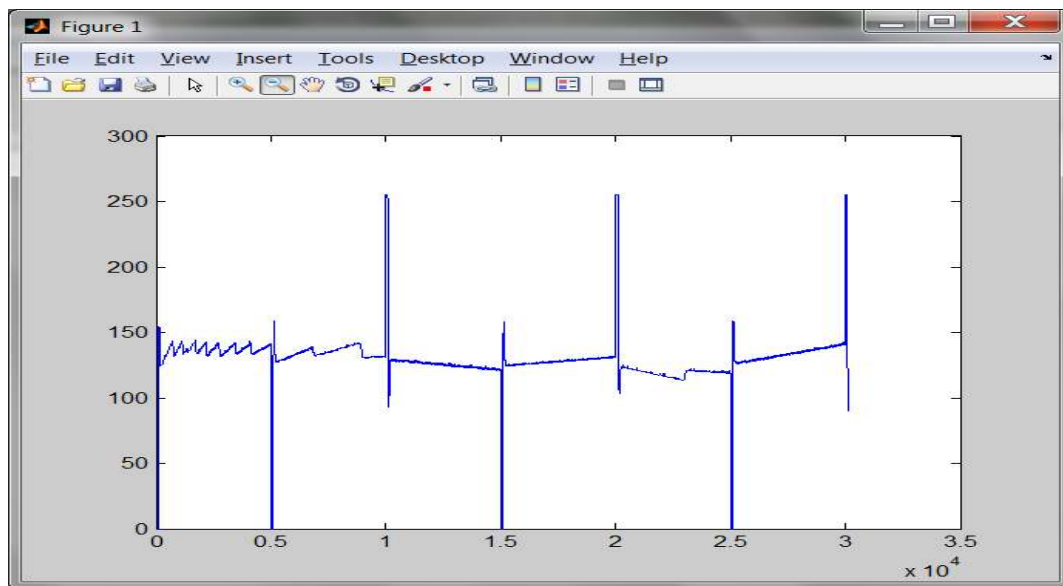


Figure 4. 15 : Sortie du contrôleur PID pour un signal d'entrée carré

Afin de confirmer le rapprochement du comportement du modèle identifié et du bras nous avons comparé leur sorties respectives à la même consigne, le résultat de la figure 4.16 montre qu'après une période transitoire les sorties mesurée et simulée deviennent très proches du signal de commande et cela illustre, non seulement le bon fonctionnement contrôleur mais aussi confirme encore une fois que le modèle identifié dans l'étape précédente est une très bonne estimation du bras manipulateur.

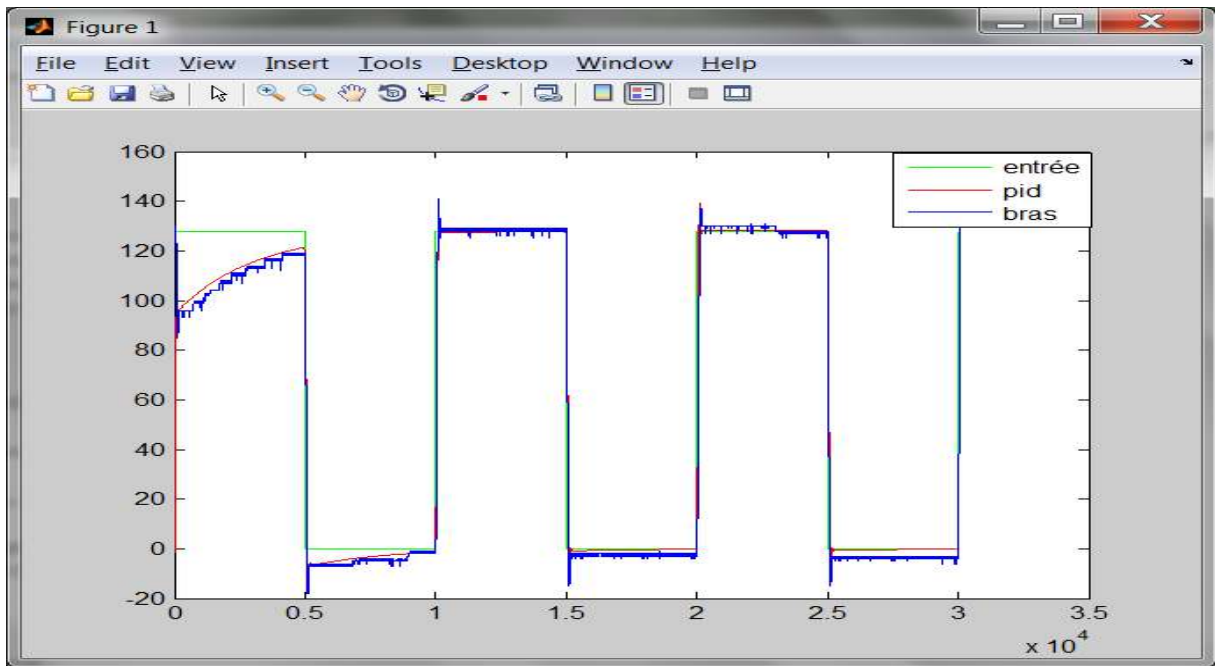


Figure 4. 16 : superposition des signaux

4.6 Réponse à une entrée sinusoïdale

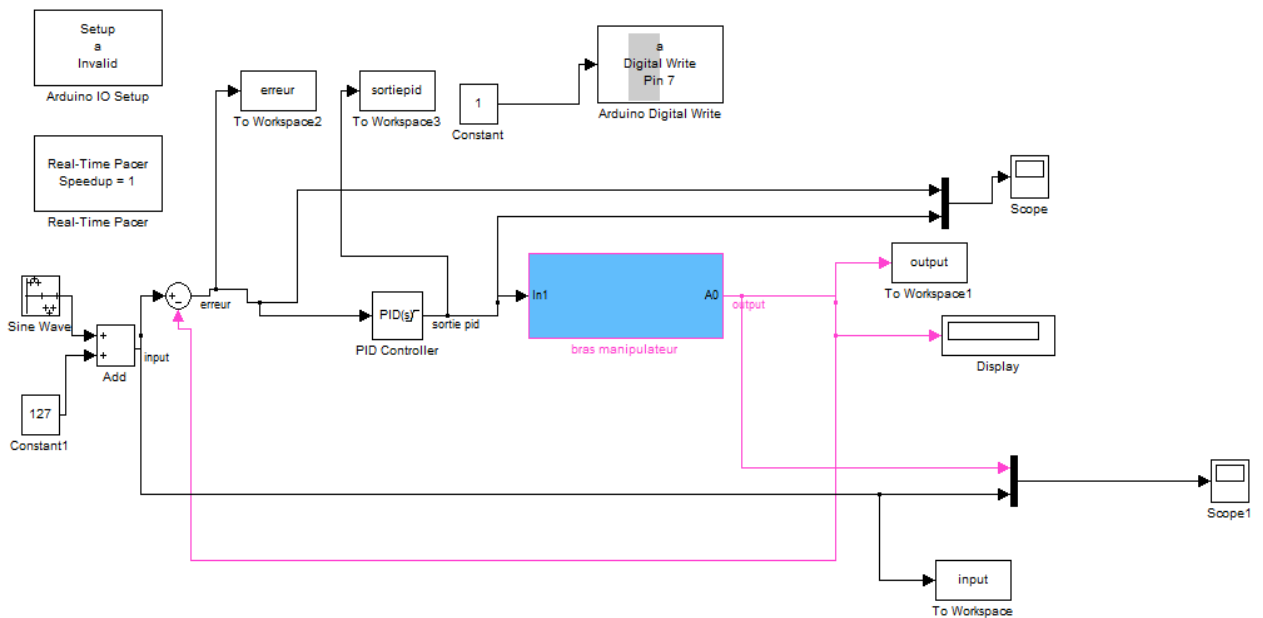


Figure 4. 17: Simulink du bras avec PID avec signal d'entrée sinusoïdale

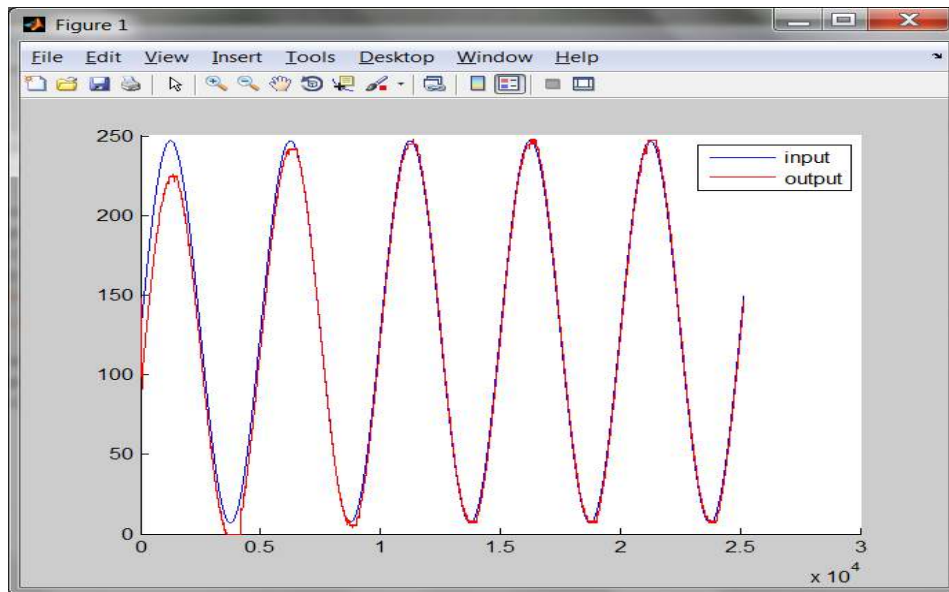


Figure 4. 18: la sortie du bras avec un signal d'entrée sinusoïdale

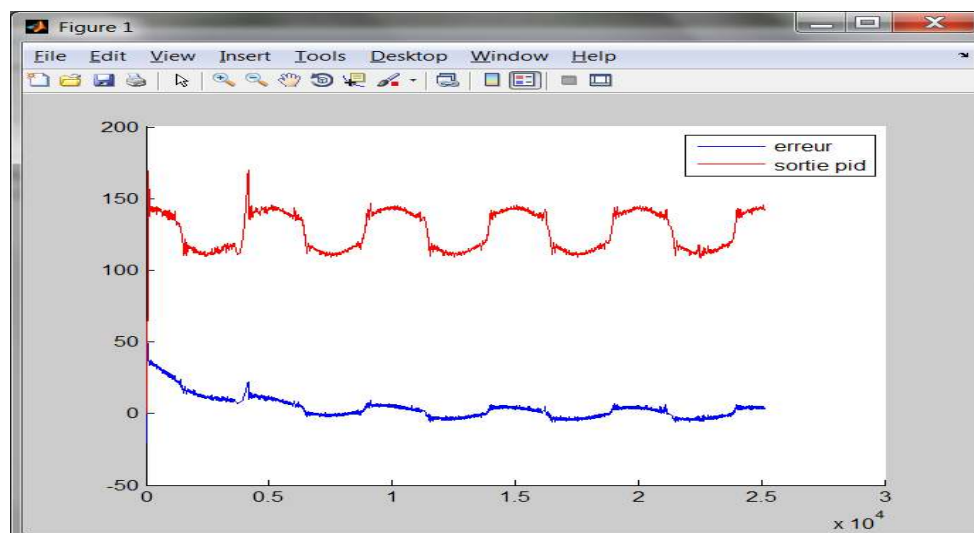


Figure 4. 19: la sortie de PID et l'erreur pou un signal d'entrée sinusoïdale

La figure 4.18 montre la réponse du bras à une consigne de type sinusoïdal, ce résultat montre encore le bon comportement du contrôleur obtenu malgré une légère déviation durant l'étape initiale.

4.7 Réponse à une entrée aléatoire

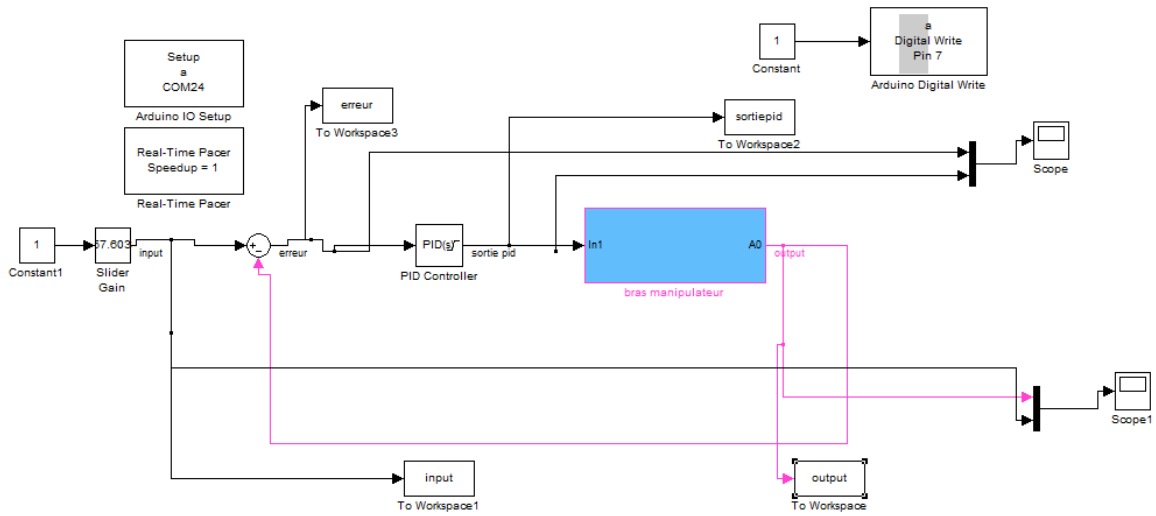


Figure 4. 20: Simulink du bras avec PID et signal d'entrée analogique (slider Gain)

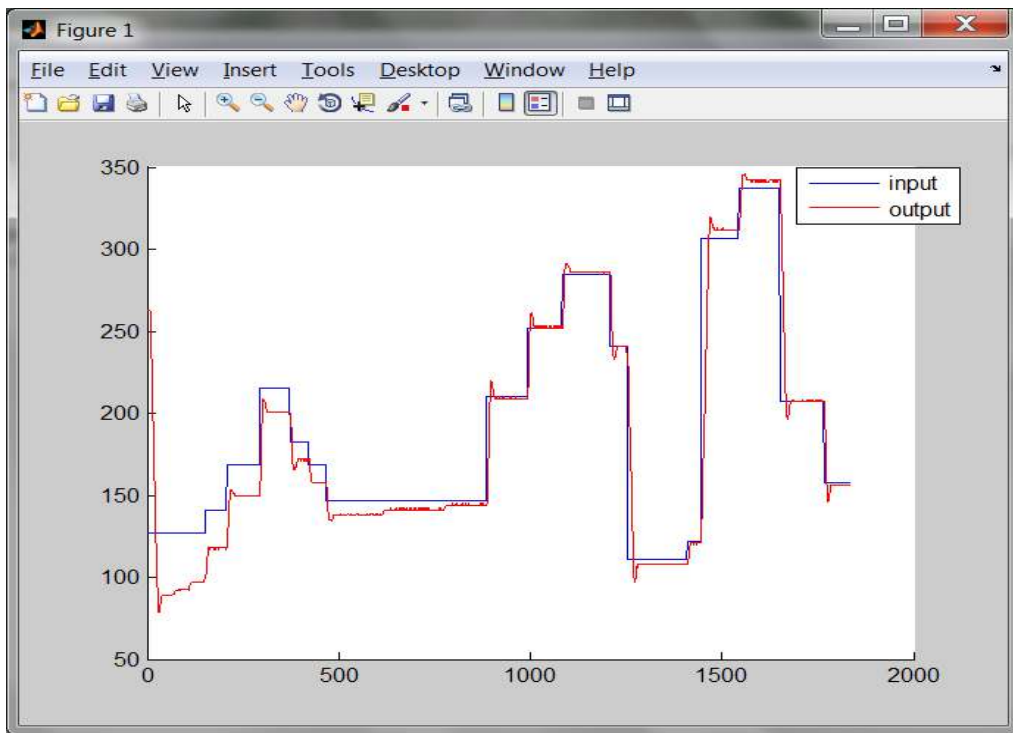


Figure 4. 21: Réponse à une commande manuelle (slider Gain)

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par étudier la linéarité de notre système, les résultats des mesures effectuées ont montré qu'il s'agit d'un système non-linéaire et qu'il fallait donc s'attendre à des complications pour trouver une commande relativement simple. Sur la base de ce résultat nous avons utilisé les outils offerts par l'environnement Matlab pour identifier les paramètres d'un modèle non-linéaire pour ensuite concevoir une commande de type PID permettant au système de suivre le signal de consigne choisi par l'utilisateur.

Notations et Symboles

| | |
|-----------------------------------|--|
| m | Degré de mobilité |
| n | Nombre d'articulation |
| C_n | Le corps n |
| R_j | Repère |
| q_j | Variable de l'articulation j |
| $\alpha_j ; d_j ; \theta_j ; r_j$ | Paramètres géométriques |
| ${}^{j-1}T_j, {}^jT_{j-1}$ | Les matrices de transformations |
| ${}^{i-1}A_i$ | Sous matrice de la matrice de transformation |
| ${}^{i-1}p_i$ | Le dernier vecteur colonne de la matrice de transformation |
| 0T_n | La matrice de passage |
| X | Les coordonnées cartésiennes |
| q | Les coordonnées articulaires |
| $J(q)$ | La matrice jacobienne |
| L | Le Lagrangien |
| E_c | L'énergie cinétique |
| E_p | L'énergie potentielle |
| m_i | Masse du corps i |
| ${}^i r$ | Vecteur du centre d'inertie du corps i |
| $m^i r$ | Premier moment du corps i autour de O_i |

| | |
|--|---|
| ${}^i\mathbf{I}_i$ | Tenseur d'inertie du corps i en O_i |
| ${}^iI_{ixx}$ | Moment d'inertie |
| ${}^iI_{ixy}$ | Produit d'inertie |
| ${}^i\hat{\mathbf{S}}_i$ | Position du centre de masse du corps i |
| \mathbf{H}_i | Matrice des pseudo-inerties du corps i |
| tr | Trace de la matrice |
| $\tilde{\mathbf{g}}$ | Vecteur des accélérations de la gravité |
| τ | Modèle dynamique |
| $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ | Matrice d'inertie du manipulateur |
| $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ | Vecteur des termes de Coriolis et centrifuges |
| $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ | Vecteur des actions de la gravité |
| \mathbf{R}_0 | Rotation rotoïde |
| \mathbf{P}_r | Rotation prismatique |
| ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$ et ${}^i\ddot{\mathbf{P}}_i$ | Vitesse et accélération du repère R_i |
| ${}^i\mathbf{f}_i$ et ${}^i\mathbf{n}_i$ | Force et moment appliqués à l'articulation i |
| ${}^i\hat{\mathbf{f}}_i$ et ${}^i\hat{\mathbf{n}}_i$ | Force et moment appliqués au centre de masse du corps i |
| \mathbf{k}_{fvi} | Le coefficient de frottements visqueux |
| \mathbf{k}_{fci} | Le coefficient de frottements de Coulomb de Coulomb |
| $\mathbf{U}(\mathbf{t}), \mathbf{Y}(\mathbf{t})$ | Signaux d'entrée /sortie analogiques |
| $\mathbf{U}(\mathbf{k}), \mathbf{y}(\mathbf{k})$ | Signaux d'entrée /sortie discrets |

| | |
|--|--------------------------------|
| $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ | Paramètres du modèles |
| $\mathbf{H}(\mathbf{Z})$ | La fonction de transfert en Z |
| \mathbf{AR} | La partie auto_regressif |
| \mathbf{MA} | La partie moyenne ajustée |
| \mathbf{X} | Variable aléatoire discrète |
| \mathbf{X}_k | Les valeurs réelles |
| \mathbf{p}_k | Probabilité |
| $\boldsymbol{\mu}, \mathbf{E}(\mathbf{X})$ | Espérance mathématique |
| $\boldsymbol{\sigma}^2(\mathbf{X})$ | Variance |
| $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X})$ | L'écart type |
| $\boldsymbol{\sigma}_{xy}$ | Covariance(X, Y) |
| $\mathbf{R}_{XX}(\boldsymbol{\tau})$ | L'auto corrélation |
| \mathbf{P}_a | Puissance absorbée (Watt) |
| \mathbf{P}_u | Puissance utile (Watt) |
| \mathbf{c}_u | Couple utile (N.m) |
| \mathbf{c}_e | Couple électromagnétique (N.m) |
| \mathbf{c}_p | Couple de pertes (N.m) |
| $\mathbf{f.é.m.}$ | Force électromotrice |
| $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{t})$ | Vitesse angulaire |
| \mathbf{L} | Inductance (mH) |

| | |
|---------------------------|---|
| R | Résistance (ohm) |
| J | Moment d'inertie (kg.m ²) |
| c_m | Couple moteur électromagnétique(N.m) |
| k_c | Constante de couple |
| k_e | Constante de force électromotrice |
| c_f | Couple de frottement (N.m) |
| F | Le coefficient de frottement visqueux mécanique |
| c_n | Perturbation |
| r : | Coefficient de couple de rappelle |
| G(p) : | Fonction de transfère dans le domaine de Laplace |
| G_n(p) : | Fonction de transfère de la perturbation dans le domaine de Laplace |
| G(z) | Fonction de transfère le domaine Z |
| MLI(PWM) | La Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse With Modulation) |
| MGD | Modèle géométrique direct |
| MGI | Modèle géométrique inverse |
| MCC | Moteur à courant continu |
| SBPA | La séquence binaire pseudo-aléatoire |
| PID | Proportionnelle intégrale dérivé |

Les systèmes réels sont dans la plupart du temps non linéaires, mal définis, ont des paramètres variables et sont soumis à des perturbations externes. La modélisation de ces systèmes relève très souvent d'une approximation des phénomènes physiques mis en jeu. Or, c'est à partir de cette représentation approximative des systèmes que l'on souhaite construire une commande pour le système réel. Cette commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations externes. Lorsque la partie commandée du processus est faiblement perturbée, les commandes classiques, par exemple à action Proportionnelle Intégrale Dérivée, peuvent s'avérer suffisantes si les exigences en précision et en performance du système ne sont pas trop sévères. Dans le cas contraire, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant une robustesse du comportement, du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer une commande destinée à contrôler la position angulaire d'une articulation d'un bras manipulateur de type PUMA 560. Etant donné qu'il s'agira aussi d'implémenter cette commande nous aurons à déterminer un modèle mathématique régissant le comportement du mouvement de cette articulation, ceci sera réalisé par une procédure d'identification nécessitant des expériences d'acquisition de données afin de permettre l'obtention d'un modèle suffisamment représentatif du système physique. Cette acquisition de données sera réalisée grâce à l'utilisation d'une carte à base d'un microcontrôleur (module Arduino) qui servira comme interface entre le PC et le bras manipulateur. Elle aura donc pour tâche de mesurer l'angle de rotation du bras et de transmettre la donnée vers le PC d'une part et de recevoir la commande du PC pour alimenter le moteur à courant continu servant à faire tourner cette partie du bras, ceci à travers une carte de puissance construite à base d'un circuit en pont en H de type L6203.

Introduction générale

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre est dédié à la modélisation du bras manipulateur et ses différents modèles.

Le deuxième chapitre est consacré à l'identification et les notions théoriques de la modélisation des systèmes.

Le troisième chapitre portera sur la modélisation du moteur à courant continu.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats pratiques de simulation et la présentation des différentes figures illustratives.

Bibliographie

- [1] **AZOUI NAWAL** , << Commande non linéaire d'un bras manipulateur >>, thèse magister en électronique ,université de Batna ,2009.
- [2] **WISAMA KHALIL, ETIENNE DOMBRE**, << Modélisation Identification et Commande des robots >>, 2^{ième} édition, Hermes Science Publications, Paris, 1999.
- [3] **JOHN J. CRAIG** ,<< Introduction to Robotics: Mechanics and Control » , 2nd ed, Addison- Wesley PUBLISHING Company, Canada, 1989.
- [4] **Ioan D. Landau , Gianluca Zito**,<< Digital Control Systems>>, E.D. Sontag · M. Thoma · A. Isidori · J.H. van Schuppen,France .
- [5] **SADLI AHMED,Gueddouar RIAD**, <<Identification paramétrique d'un moteur à courant continu >>, thèse ingénieur d'état en électronique, université de Blida,2008
- [6] **A. Maddi, A. Guessoum and D. Berkani, O. Belkine**, "Etude de la méthode des moindres carrée réursive et application au signal de parole", 3rd International Conference: Sciences of Electronic,Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2005, Sousse, Tunisia, March 17-21, 2005.
- [7] **BOUKHARI DJ. ,SMAIL M.** ,<<Identification des paramètres d'un moteur en régime transitoire >>, thèse ingénieur d'état en électronique, université de Blida,1999.
- [8] **ZEROUAL A.,BOUKABOUS M.**,<<Acquisition et commande en position d'un bras manipulateur à cinq degrés de liberté>>, thèse ingénieur d'état en électronique, université de Blida,200
- [9] <http://76.74.128.40/~sti2d568/flsi/files/article/313/MCC%20en%20asservissement.pdf>

Annexe 3

Arduino

1. Applications d'Arduino

Le système Arduino nous permet de réaliser un grand nombre de choses, qui ont une application dans tous les domaines on cite quelque exemples :

- contrôler les appareils domestiques
- fabriquer un robot
- faire un jeu de lumières
- communiquer avec l'ordinateur
- télécommander un appareil mobile (modélisme)
- etc.

2. Les bonnes raisons de choisir Arduino

Il existe pourtant dans le commerce, une multitude de plateformes qui permettent de faire la même chose. Notamment les microcontrôleurs « PIC ». Nous allons voir pourquoi choisir l'Arduino.

- Le prix : est moins chère
- La liberté : * Le logiciel : gratuit et open source.

* Le matériel : cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet.

- La compatibilité : Le logiciel, tout comme la carte, est compatible sous les plateformes les plus courantes (Windows, Linux et Mac).
- La communauté : La communauté Arduino est impressionnante et le nombre de ressources à son sujet est en constante évolution sur internet.

3. Les outils Arduino

À présent, rapprochons-nous de « l'utilisation » du système Arduino et voyons comment il se présente. Il est composé de deux choses principales, qui sont : le matériel et le logiciel. Ces deux outils réunis, il nous sera possible de faire n'importe quelle réalisation !

◆ **Le matériel :**

Il s'agit d'une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur Atmega du fabricant Atmel, dont le prix est relativement bas pour l'étendue possible des applications.

Voilà à quoi ressemble la carte que nous allons utiliser :

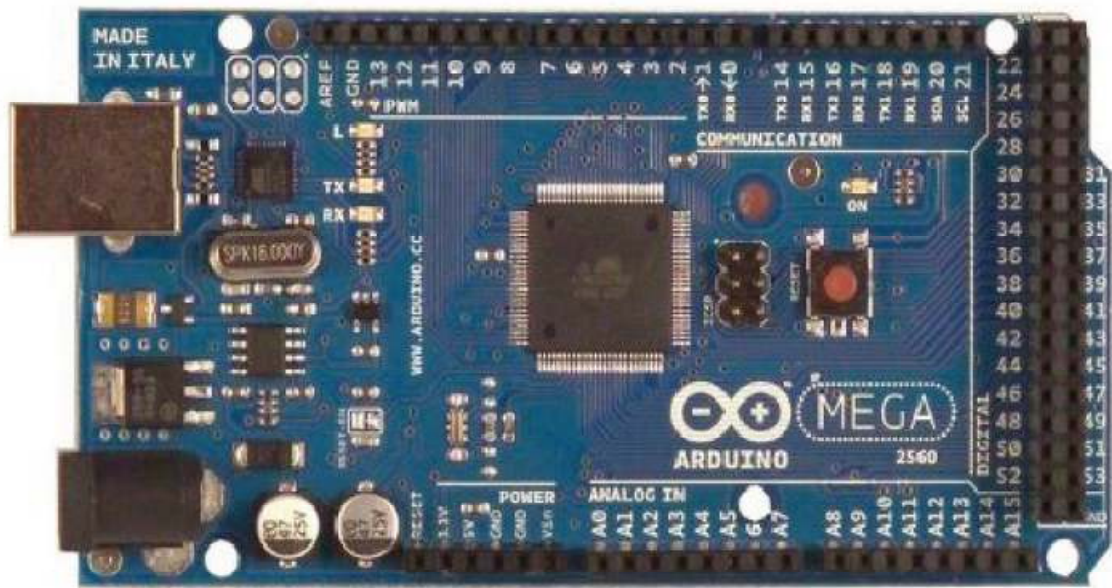


Figure 1 : carte Arduino "Mega"

◆ **Le logiciel :**

Le logiciel va nous permettre de programmer la carte Arduino. Il nous offre une multitude de fonctionnalités.

4. Les types de cartes

Il y a trois types de cartes :

- Les dites « officielles » qui sont fabriquées en Italie par le fabricant officiel : Smart Projects
- Les dites « compatibles » qui ne sont pas fabriqués par Smart Projects, mais qui sont totalement compatibles avec les Arduino officielles.
- Les « autres » fabriquées par diverse entreprise et commercialisées sous un nom différent (Freeduino, Seeduino, Fentoduino, ...).

5. Description de la carte Arduino Mega 2560

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560 Cette carte dispose :

- de 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)).
- de 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques).
- de 4 UART (port série matériel).
- d'un quartz 16Mhz.
- d'une connexion USB.
- d'un connecteur d'alimentation jack.
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit").
- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

6. Communication

La carte Arduino Mega2560 dispose de toute une série de facilités pour communiquer avec un ordinateur, une autre carte Arduino, ou avec d'autres microcontrôleurs. L'ATmega2560 dispose de quatre UARTs (Universal Asynchronous Receiver Transmitter ou émetteur-récepteur asynchrone universel) pour communication série de niveau TTL (5V) et qui est disponible sur les broches 0 (RX) et 1 (TX). Un circuit intégré ATmega8U2 sur la carte assure la connexion entre cette communication série de l'un des ports série de l'ATmega 2560 vers le port USB de l'ordinateur qui apparaît comme un port COM virtuel pour les logiciels de l'ordinateur. Le code utilisé pour programmer l'ATmega8U2 utilise le driver standard USB COM, et aucun autre driver externe n'est nécessaire

Le logiciel Arduino inclut une fenêtre terminal série (ou moniteur série) sur l'ordinateur et qui permet d'envoyer des textes simples depuis et vers la carte Arduino. Les LEDs RX et TX sur la carte clignote lorsque les données sont transmises via le circuit intégré ATmega8U2 utilisé en convertisseur USB-vers-série et la connexion USB vers l'ordinateur (mais pas pour les communications série sur les broches 0 et 1).

7. Caractéristiques Mécaniques

Les longueurs et largeurs maximales du circuit imprimé de la carte Mega2560 sont respectivement 10.16 cm et 5.33 cm, avec le connecteur USB et le connecteur d'alimentation Jack s'étendant au-delà des dimensions de la carte. Plusieurs trous de vis permettent à la carte d'être fixée sur une surface ou dans un boîtier. Noter que la distance entre les broches 7 et 8 est de 0.16 pouces, et non un multiple des 0.1 pouces séparant les autres broches.

8. Le logiciel Arduino

C'est un logiciel de programmation par code, code qui contient une cinquantaine de commandes différentes. A l'ouverture, l'interface visuelle du logiciel ressemble à ceci:

des boutons de commande en haut, une page blanche vierge, une bande noire en bas

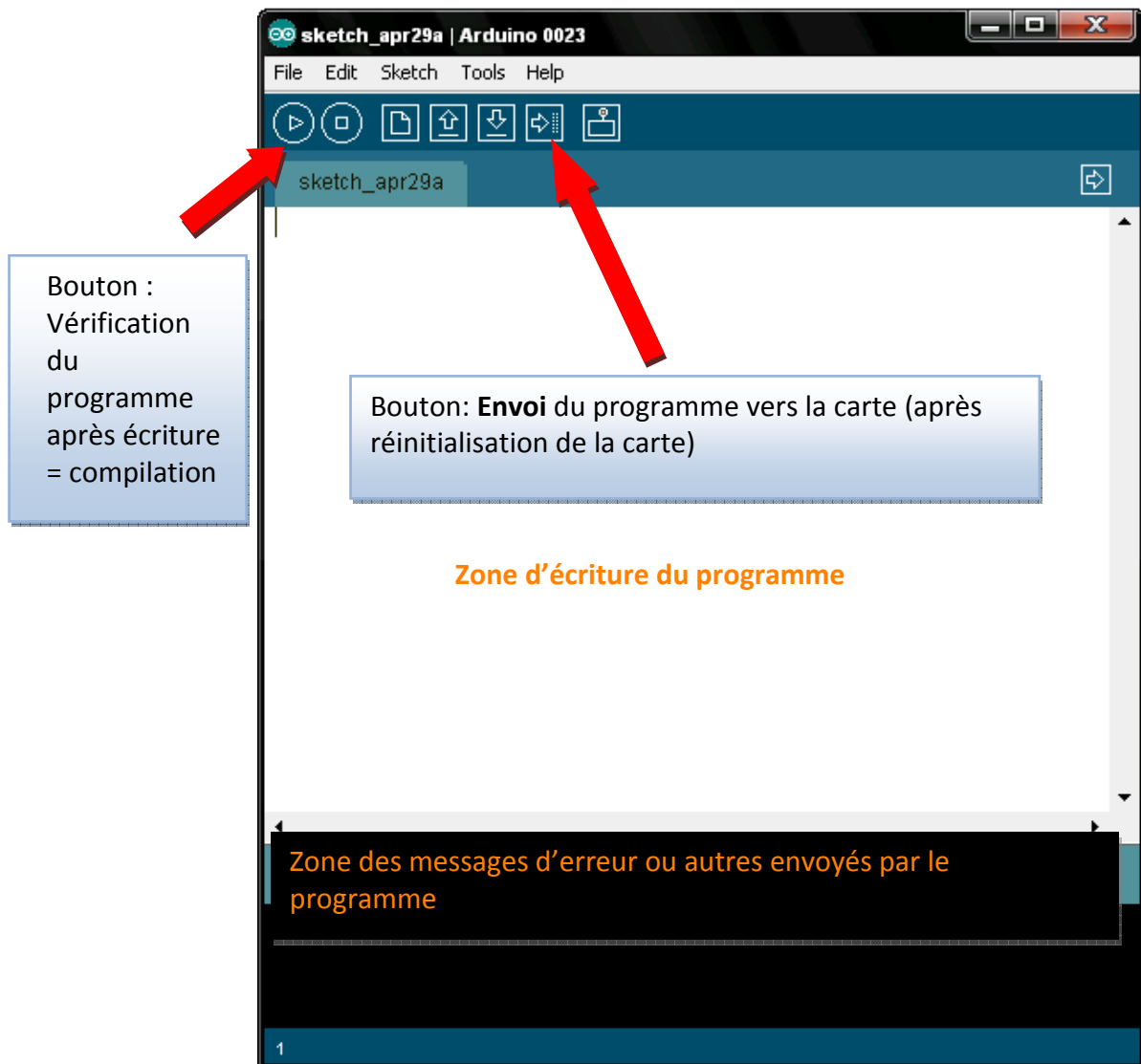


Figure 2 : Logiciel Arduino

9. Structure d'un programme

Il y a trois phases consécutives

Commentaires

Commentaires multilignes pour se souvenir du patch ==>

1/La définition des constantes et des variables
`int ledPin = 13;` // LED connectée à la broche 13

2/La configuration des entrées et sorties
`void setup()`
{
 `pinMode(ledPin, OUTPUT);` // configure ledPin comme une sortie
}

3/La programmation des interactions et comportements
`void loop()`
{
 `digitalWrite(ledPin, HIGH);` // met la sortie à l'état haut (led allumée)
 `delay(3000);` // attente de 3 secondes
 `digitalWrite(ledPin, LOW);` // met la sortie à l'état bas (led éteinte)
 `delay(1000);` // attente de 1 seconde
}

Une fois la dernière ligne exécutée, la carte revient au début de la troisième phase et recommence sa lecture et son exécution des instructions successives. Et ainsi de suite.

Cette **boucle** se déroule des milliers de fois par seconde et anime la carte.

Done compiling.

22

Figure 3 : programme clignoter une LED

Au terme de ce travail nous pouvons conclure que le but du projet, qui était d'élaborer une commande PID pour l'articulation principale d'un bras manipulateur, a été atteint d'une manière assez satisfaisante. Ceci étant donné qu'au départ, à travers l'étude théorique menée sur la modélisation d'un moteur à courant continu nous attendions à trouver un modèle linéaire donc facilement contrôlable par des méthodes classiques de synthèse pour un contrôleur PID.

Après avoir effectué plusieurs tests sur notre système nous nous sommes aperçues qu'il n'était pas possible de trouver un modèle linéaire reproduisant les mouvements du bras aux différents signaux alimentant le moteur faisant tourner l'articulation considérée. La solution était donc d'essayer de trouver un modèle non-linéaire régissant le fonctionnement de notre système. Ceci a été réalisé grâce à l'exploitation de l'outil d'identification disponible avec l'environnement Matlab, les résultats obtenus ont été très concluants au vu des différents tests comparatifs que nous avons effectués. Pour ce qui est du contrôleur PID proposé les résultats que nous avons montrés prouvent que cette commande est capable de faire suivre le bras la position désirée même s'il reste quelques améliorations notamment durant le régime transitoire. Sachant que pour obtenir ce contrôleur il fallait linéariser le système autour du point de fonctionnement de départ, et que donc les paramètres obtenus ne sont théoriquement valables qu'autour de cette zone. A cet effet et pour améliorer les performances du système de commande nous proposons comme extension de ce projet la synthèse d'un contrôleur non-linéaire adaptatif qui serait capable d'adapter ses paramètres aux changements, par exemple de l'inertie du bras au court de ses mouvements, car si nous considérons que les autres articulations du bras sont en mouvement il y aura au moins ce paramètre qui sera variable.

Introduction générale

Chapitre 1

Modélisation du bras manipulateur

Chapitre 2

Modélisation et identification des systèmes

Chapitre 3

Moteur à courant continu

Chapitre 4

Simulation et résultats pratiques

Conclusion générale

Références

Bibliographiques

Annexes