

Chapitre 2. Robots manipulateurs

1. Introduction

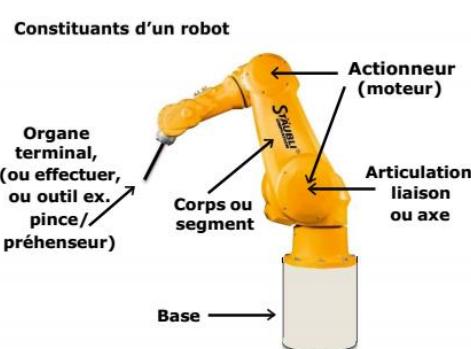
Les robots manipulateurs sont des structures mécaniques articulées (SMA) généralement fixés physiquement à leur place de travail et utilisés pour réaliser des tâches précises, répétitives et dangereuses en manipulant des objets (pièces, marchandises, etc). On fait appel aux robots manipulateurs principalement dans les industries manufacturières, les industries agro-alimentaires, pharmaceutiques, etc. Ils sont utilisés pour réaliser plusieurs tâches de manutention, le transfert de pièces dans une ligne de production, le chargement/déchargement de marchandise, le conditionnement, la palettisation, etc. l'assemblage, le soudage, la peinture, le découpage, le meulage, le polissage, le contrôle qualité, etc.

2. Classification de robots manipulateurs

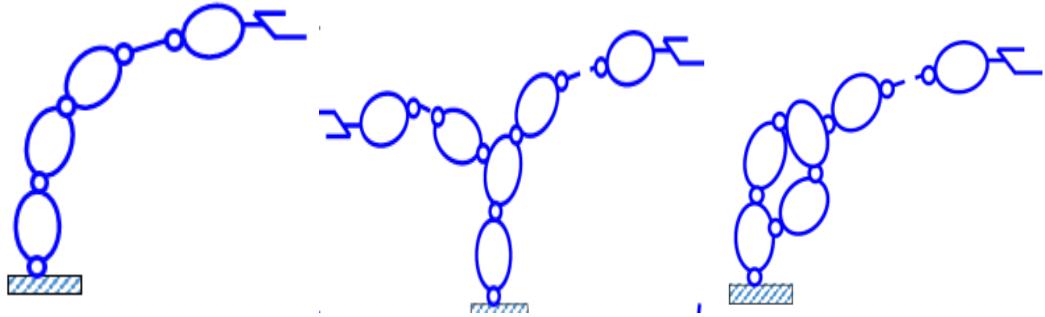
D'une façon générale, suivant leur architecture, les robots manipulateurs peuvent être classés en deux grades classes ; à savoir, les robots de type série et de type parallèle.

2.1 Robots manipulateurs de type série

Un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain (segments et articulations). Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides reliés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations à travers des mécanismes appropriés.



Structure mécanique d'un robot manipulateur de type série.



Structure ouverte. structure abroréscente. simple structure fermée. .

Schémas cinématiques des robots de type série.

2.2 Robots manipulateurs de type parallèle

Mécanisme en chaîne cinématique fermée dont l'organe terminal (outil qui agit sur l'environnement) est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes. Les mouvements de tels robots sont donc restreints (limitées par les divers bras), en contrepartie, ces robots sont caractérisés par une plus grande rigidité et une haute précision, (répartition des efforts)



Robot manipulateur de type parallèle.

Par rapport aux manipulateurs de type série, les manipulateurs de type parallèle ont les avantages suivants :

- Embarcation des charges importantes (simulateurs de vol, appareils de parcs d'attractions, etc).
- Stabilité de la structure et haute précision.
- Plus grande rigidité.

- Déplacement à très grande vitesse (les robots les plus rapides du monde sont des robots parallèles)

Leur inconvénient principal est :

- Grande complexité de conception, et par conséquent de commande en raison de leur comportement hautement non linéaire.

Les applications de ce type de robots sont très nombreuses :

- Robots manipulateurs en industrie.
- Manipulateurs en chirurgie.
- Plate-forme de mouvement pour simulateurs.
- Base d'orientation pour télescopes, etc.

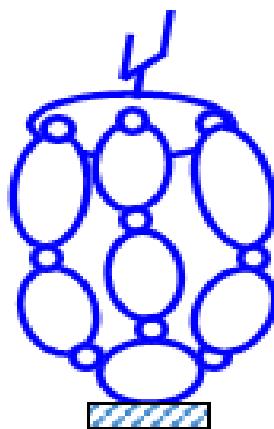
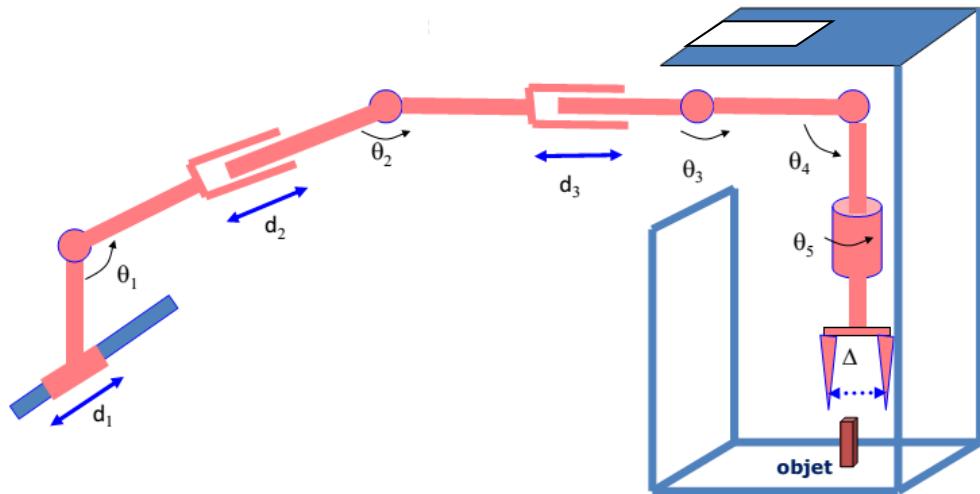


Schéma cinématique d'un robot manipulateur de type parallèle.

3. Définitions

3.1 Degré de liberté : Le degré de liberté d'un robot manipulateur est la somme des degrés de liberté de toutes ses articulations. Le degré de liberté d'une articulation est le nombre de mouvements indépendants du corps aval par rapport au corps amont.

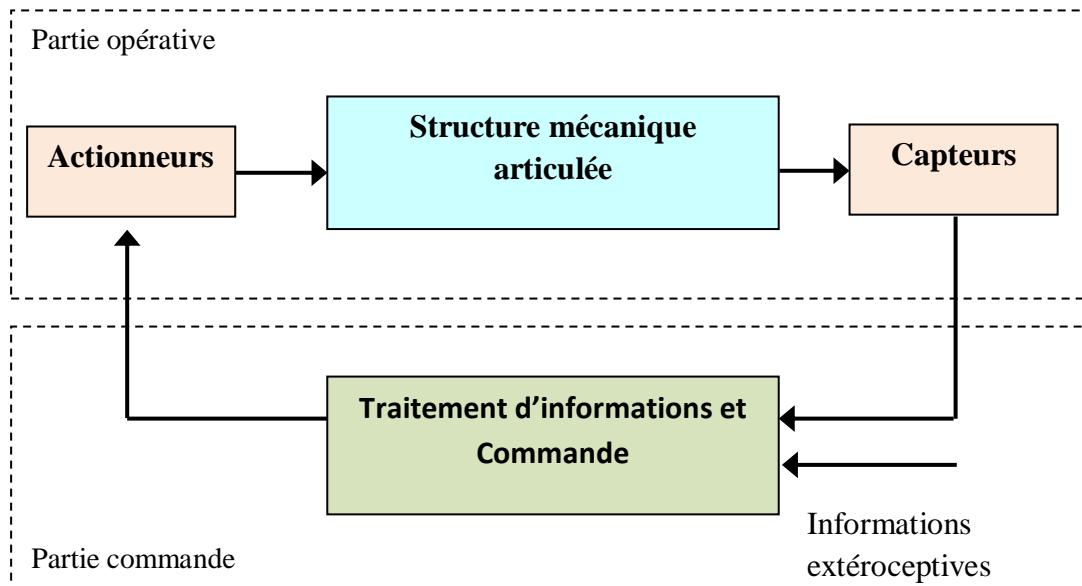
3.2 Redondance : Un robot est redondant lorsque le nombre de degrés de liberté de l'effecteur est inférieur au nombre d'articulations indépendantes (motorisées). Ce genre de robot a donc plus d'actionneurs que nécessaire.

*Robot redondant.*

4. Constituants d'un robot manipulateur

Le schéma général d'un robot manipulateur est illustré sur la figure ci-dessous, comme tout système automatisé, il comprend deux parties principales:

- **Partie opérative** : Structure mécanique articulée, actionneurs et capteurs.
- **Partie commande** : Programme et logique de commande (microprocesseur ou calculateur)

*Schéma de base d'un système robotique.*

4.1 Partie opérative

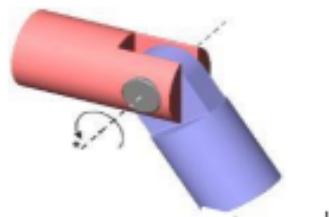
4.1.1 Structure mécanique articulée (SMA) : La structure mécanique articulée (SMA) est un mécanisme qui présente une structure similaire à celle d'un bras humain. Donc, il imite les actions du bras humain. Le mot "manipulateur" est spécifiquement utilisé pour désigner ce type de robot par opposition aux robots mobiles. Son rôle est le positionnement de l'organe terminal dans une configuration donnée, c'est-à-dire une position et une orientation données. Cela dépend en général des caractéristiques de vitesse et d'accélération requises. L'architecture d'une SMA est une séquence de corps reliés entre eux par des articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs (électriques, pneumatiques ou hydrauliques). Une SMA est constituée de la base, les liens et les articulations (axes de mouvement qui relient les liens) et l'effecteur.

a) **Base** : Support de la SMA.

b) **Liens** : (corps rigides ou segments) reliés par des articulations.

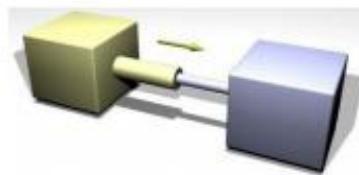
c) **Articulation** : c'est une liaison entre deux corps successifs d'un mécanisme. Il convient de noter que certaines articulations peuvent offrir plus d'un degré de liberté. Lorsque l'articulation ne permet qu'un seul degré de liberté, on parle d'articulation simple. Il existe deux types d'articulations simples : les articulations rotatives et les articulations prismatiques. Le choix des articulations permettra de déterminer les mouvements possibles et d'orienter son type d'utilisation.

- **Articulation rotatoire (pivot)** : Permet la rotation d'un lien autour d'un axe fixe réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun.



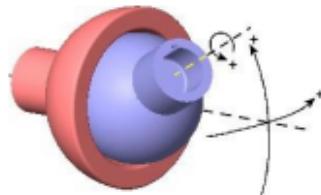
Articulation rotatoire.

- **Articulation prismatique (glissière):** Permet la translation d'un lien sur un axe fixe réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun



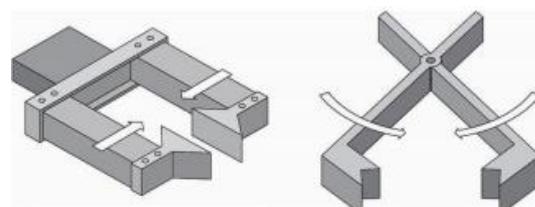
Articulation prismatique.

- **Articulation sphérique (Rotule):** C'est comme une balle et une douille, c'est une articulation passive (sans moteur).



Articulation rotule.

d) Effecteur : L'organe terminal, aussi appelé préhenseur ou effecteur, désigne le dispositif placé à l'extrémité d'un robot manipulateur. Il permet au robot d'interagir avec l'environnement de travail en manipulant des objets, il peut être de nature variée et englobe différents dispositifs selon l'application. (serrage, dépression, torches de soudage, des pistolets de peinture, etc.) En d'autres termes, il s'agit d'une interface entre le robot et l'environnement extérieur, lui permettant d'exercer des tâches précises. L'organe terminal est généralement multifonctionnel, c-à-d il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Par exemple, un organe terminal peut avoir à la fois des pinces de préhension et une ventouse pour différentes tâches.



Effecteurs.

4.1.2 Actionneurs (Servo-moteurs)

Les actionneurs sont des organes qui transforment l'énergie qui leur est fournie en actions physiques utilisables comme des mouvements. Les articulations robotisées sont entraînées par des actionneurs et permettent au robot d'effectuer réellement ses actions. Typiquement, on a un actionneur par degré de liberté.

Remarque : Le terme "servo" signifie un asservissement basé sur une comparaison entre un signal de cosigne (référence) et le signal réel.

Les actionneurs les plus utilisés en robotique sont :

- **Moteurs électriques :** sont les plus utilisés dans l'industrie, principalement par la disponibilité de l'énergie électrique et la facilité de contrôle.



Moteur pas à pas.



Moteur à courant continu.

- **Vérins hydrauliques :** Ils sont reliés par une tuyauterie à des pompes fournissant des pressions élevées et utilisés surtout lorsque des efforts importants sont nécessaires (grands robots).



Vérin hydraulique.

- **Vérins pneumatiques** : ils sont généralement utilisés dans les opérations de manipulation où il n'y a pas besoin d'une grande précision en raison de la compression de l'air.



Vérin pneumatique.

4.1.3 Capteurs

Les capteurs s'occupent de la partie sensorielle du robot. Ils permettent de mesurer ou d'acquérir des informations à propos de l'environnement du robot ou de ses composants internes. Les capteurs sont dits :

- **Proprioceptifs** lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations).
- **Extéroceptifs** lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, de contact, mesure de distance).

D'une manière générale, les capteurs peuvent être classés en trois catégories selon leur fonction et leur utilisation :

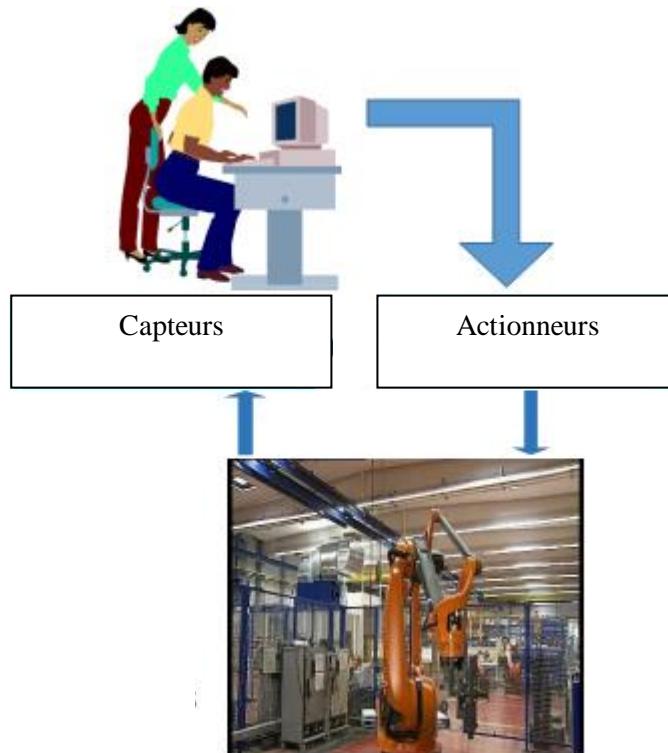
- **Capteurs thermiques (chaleur)** : Un capteur de température sert à détecter l'évolution de la température dans un espace ou une dimension spécifique.
- **Capteurs mécaniques** : Un capteur mécanique détecte les changements de mouvement mécanique, tels que le déplacement ou le changement de position, le mouvement rectiligne et circulaire, la pression, le débit, le niveau, etc.
- **Capteurs optiques (lumière)** : Un capteur optique ou de lumière détecte les variations de lumière provenant d'une source lumineuse.

4.2 Partie commande (commande séquentielle)

C'est le cerveau du robot qui analyse les données provenant des capteurs et envoie les ordres (commande) aux actionneurs. La partie commande est matérialisée

physiquement par un microcontrôleur, qui est un cerveau électronique spécialement conçu pour interagir avec des capteurs et des actionneurs. Le microcontrôleur est composé de quatre parties :

- **Microprocesseur** : Traite les informations et envoi les ordres.
- **Mémoire de données** : (RAM donc volatile) pour stocker les données temporaires nécessaires aux calculs.
- **Mémoire programmable** : (ROM donc non volatile), qui contient les instructions du programme de pilotage.
- **Ressources auxiliaires** : Ports d'entrées/sorties, convertisseurs analogique / numérique, etc.



Commande séquentielle d'un robot.

Remarque : Cas particulier des manipulateurs -les télémanipulateurs

Un télémanipulateur est un appareil de manipulation à distance (SMA, pelle mécanique, pont roulant), apparus dans les années quarante aux états unis, ils se caractérisent par :

- Les trajectoires peuvent être quelconques dans l'espace,
- Les trajectoires sont générées de manière instantanée par l'opérateur à partir d'un pupitre de commande (joystick).



Télémanipulateur.

L'utilisation des robots télémanipulateurs est répandue dans le secteur nucléaire, notamment pour la manipulation de substances radioactives, dans les domaines spatial, sous-marin, et militaire (déminage et le désamorçage de bombes, etc).

5. Caractéristiques des robots manipulateurs

Un robot est choisi selon l'application ou la fonction qu'on lui réserve. Voici quelques caractéristiques à prendre en compte lors d'un choix :

La charge maximale transportable (de kilos au tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (c'est-à-dire, en élongation maximale)

L'architecture du S.M.A: le choix se fait suivant la tâche à réaliser. Par exemple, robots à structure rigide ou robots avec segments flexibles

Le rayon d'action ou espace de travail (workspace) : défini comme l'ensemble des points atteignables par l'effecteur du robot. Il dépend de la cinématique du robot, la longueur des segments et les butées articulaires.

L'exactitude de positionnement : définie par une position et une orientation dans l'espace cartésien.

La répétabilité : caractérise la capacité que le robot à retourner vers un point donné.

La vitesse de déplacement: vitesse maximale en élongation maximale et l'accélération

La masse du robot: varie de quelques centaines de kilos à quelques tonnes.

Le coût du robot: varie selon la taille du robot et la technologie utilisée.

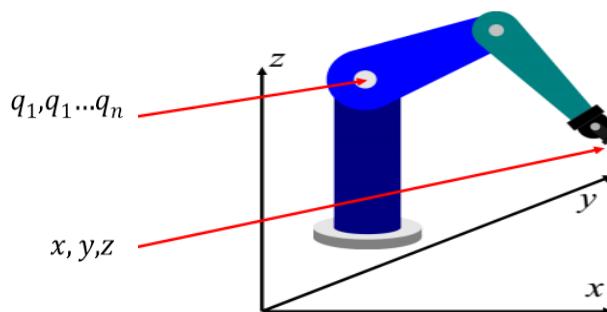
La maintenance du robot: difficile pour les robots qui travaillent dans des environnements à risque (dangereux).

6. Notes sur la modélisation des robots manipulateurs

- **L'espace articulaire** est l'espace qui a pour référence le repère lié à chaque articulation motorisée du robot. Les coordonnées associées sont appelées *coordonnées articulaires*.
- **L'espace opérationnel** est l'espace qui a pour référence le repère lié à l'organe terminal du robot. Les coordonnées associées sont appelées *coordonnées opérationnelles*.

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, on distingue :

- **Modèles géométriques** direct et inverse est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles (repère cartésien x, y, z) du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires $q_1, q_2 \dots q_n$, et vice versa.



Coordonnées opérationnelles et articulaires.

- **Modèle cinématique** directe et inverse décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ en fonction des vitesses articulaires $\dot{q}_1, \dot{q}_2 \dots \dot{q}_n$, et vice versa.
- **Modèles dynamiques** : les modèles dynamiques des robots manipulateurs comprennent un ensemble d'équations mathématiques (contenant des informations sur leur dynamique) pouvant être simulés sur un ordinateur dans le but de concevoir une commande qui répond à un cahier des charges (performances désirées). Les modèles dynamiques peuvent être obtenus en utilisant les principes de la mécanique classique de Newton et de Lagrange. Les approches d'Euler Lagrange et Newton-Euler permettent d'aboutir aux équations du mouvement des robots. Dans la modélisation dynamique on distingue deux modèles :

Modèle dynamique inverse : Le modèle dynamique inverse est représenté par la relation de la forme :

$$\tau = G(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_{ext})$$

Modèle dynamique direct : Le modèle dynamique direct est représenté par la relation de la forme :

$$q = G(q, \dot{q}, \tau, f_{ext})$$

où f_{ext} sont les forces extérieures.

La méthode la plus utilisée est celle de Lagrange-Euler.

- **Formalisme de Lagrange-Euler**

Le formalisme d'Euler-Lagrange permet de formuler les équations dynamiques du mouvement. Cette approche est utilisée pour modéliser et présenter la dynamique du à travers les équations du mouvement.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 0, \dots, n$$

avec :

τ_i : La force où le couple généralisé à la $i^{\text{ème}}$ articulation.

n : Le nombre de degré de liberté.

q_i : La coordonnée généralisée de l'articulation i .

\dot{q}_i : La dérivée de la coordonnée généralisée.

L : Le Lagrangien exprimé par l'équation suivante : $L = E_c - E_p$

où:

E_c : L'énergie cinétique.

E_p : L'énergie Potentielle.

Le modèle dynamique d'un tel mécanisme est habituellement décrit par l'équation matricielle suivante.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) + T_d$$

où

θ : Vecteur des variables articulaires généralisées.

τ : Vecteur des couples généralisés.

$M(\theta)$: Matrice d'inertie de dimension ($n \times n$) symétrique et définie positive.

$N(\theta, \dot{\theta})$: Vecteur de dimension ($n \times 1$) spécifiant l'effet de Centrifuge et de Coriolis.

$G(\theta)$: Vecteur de dimension ($n \times 1$) exprimant l'effet gravitationnel.

$H(\dot{\theta})$: Vecteur de dimension ($n \times 1$) exprimant les frottements.

T_d : Vecteur de dimension ($n \times 1$) regroupant les perturbations.

Le modèle dynamique de ce robot avec la charge (m) peut être exprimé par l'équation matricielle suivante :

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) + mJ'(\theta)[J(\theta)\ddot{\theta} + J(\theta, \dot{\theta}) + g]$$

Pour un robot manipulateur à deux degrés de liberté, on a:

$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$ Vecteur des variables articulaires généralisées.

$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}$ Vecteur des couples généralisés.

Matrice d'inertie

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 \cos\theta_2 & a_3 + \frac{a_2}{2} \cos\theta_2 \\ a_3 + \frac{a_2}{2} \cos\theta_2 & a_3 \end{pmatrix}$$

Matrice de forces de centrifuge et de Coriolis

$$\mathbf{N}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} -(\mathbf{a}_2 \sin \theta_2) + \left(\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \frac{\dot{\theta}_2^2}{2} \right) \\ (\mathbf{a}_2 \sin \theta_2) \frac{\dot{\theta}_1^2}{2} \end{pmatrix}$$

Vecteur des forces de gravité

$$\mathbf{G}(\theta) = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_4 \cos \theta_1 + \mathbf{a}_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \mathbf{a}_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

Vecteur exprimant les frottements

$$\mathbf{H}(\dot{\theta}) = \begin{pmatrix} V_1 \dot{\theta}_1 + V_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ V_3 \dot{\theta}_2 + V_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) \end{pmatrix}$$

Matrice Jacobienne

$$\mathbf{J}(\theta) = \begin{pmatrix} -\mathbf{L}_1 \sin \theta_1 - \mathbf{L}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\mathbf{L}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -\mathbf{L}_1 \cos \theta_1 - \mathbf{L}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & \mathbf{L}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ +9.81 \end{pmatrix}$$

avec :

$\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_5$: Sont des paramètres constants obtenus à partir des masses (m_1, m_2) et de longueurs ($\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$) des deux bras.

V_1, V_3 : sont les coefficients des frottements visqueux.

V_2, V_4 : sont les coefficients des frottements secs.

- **Représentation d'état à partir du modèle dynamique**

Le modèle dynamique inverse est décrit par :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \mathbf{N}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) + \mathbf{H}(\dot{\theta}) + \mathbf{T}_d$$

On garde l'exemple du robot manipulateur à deux degrés de liberté, la représentation d'état du robot est obtenue en utilisant le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} \theta = x_1 \\ \dot{\theta} = x_2 \end{cases}$$

Avec $\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ et $\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$

Alors, D'après (I.10) et (I.12) d'état est obtenue comme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = x_2 \\ \dot{\theta}_2 = \ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}[\tau - N(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - H(\dot{\theta})] \end{cases}$$

Si on rajoute le vecteur de sortie (les deux positions), la représentation d'état devient :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = x_2 \\ \dot{\theta}_2 = \ddot{\theta} = F(\theta_1, \theta_2) + Gu \\ y = x_1 \end{cases}$$

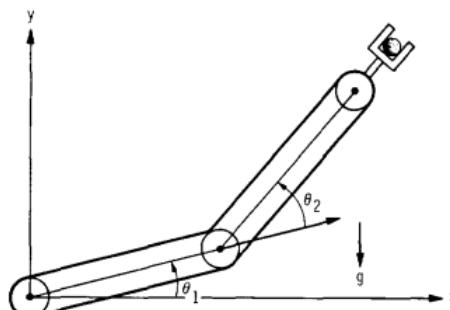
avec :

$$G = M(\theta)^{-1}$$

$$F = -M(\theta)^{-1}[N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta})]$$

$$u = \tau$$

La structure d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté est schématisée par :



Structure d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté.

Remarque : la modélisation et la commande des robots manipulateurs seront abordées en détails en deuxième année Master.

7. Génération de trajectoire de référence

Un robot manipulateur sert à positionner et mettre en mouvement dans l'espace environnant un outil ou un produit. Les tâches effectuées par un robot manipulateur nécessitent la génération du mouvement de l'organe terminal. Cette génération de

mouvement repose sur deux fonctions principales du système de contrôle: d'une part, la génération de consignes associées à une trajectoire résultant de l'interpolation entre points (planification de trajectoire), et, d'autre part, la commande des actionneurs assurant le suivi de ces consignes (commande du mouvement). Ce mouvement peut être décrit dans un espace propre à l'opération à effectuer par l'organe terminal ou dans l'espace de l'ensemble des articulations. Donc, on distingue deux espaces ; à savoir l'espaces opérationnel et l'espace articulaire, dans lesquels on peut générer la trajectoire et calculer la commande du mouvement. Ainsi, afin de réaliser sa tâche, un robot doit suivre une trajectoire de référence (chemin désiré). Un chemin est une suite de points définis :

- Dans l'espace opérationnel (espace des tâches) afin de positionner l'effecteur (l'organe terminal) ou,
- Dans l'espace articulaire du robot.

Les différentes trajectoires de référence d'un robot sont telles que :

- Trajectoire reliant deux points où le mouvement est libre entre ces deux points.
- Trajectoire reliant deux points en passant obligatoirement par un ensemble de points intermédiaires (évitement d'obstacles). Le mouvement est libre entre deux points intermédiaires.
- Trajectoire reliant deux points, Le mouvement n'est pas libre entre deux points intermédiaires.

8. Exemples application des robots manipulateurs



Robot pompiste.



Robot nettoyeur d'avions.



Robot parallèle (écriture imprimé).



Robot parallèle de tri.

9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la prestation des robots manipulateurs. Nous avons abordé les deux grandes classes des robots manipulateurs, à savoir les robots manipulateurs de type série et les robots manipulateurs de type parallèle. Nous avons ensuite évoqué les différents constituants de ce type de robots (structure mécanique articulée, actionneurs, capteurs et la partie commande). Les principales caractéristiques ainsi que les différentes modélisations de ces systèmes ont été brièvement abordés, l'accent a été mis particulièrement sur la modélisation dynamique. Enfin, nous avons terminé le chapitre par quelques illustrations montrant des robots manipulateurs effectuant des tâches dans leurs environnements de travail.