UNIVERSITÉ PAUL SABATIER **FSI/UPSSITECH**

EXAMEN DE COMMANDE DE ROBOTS – 2ASRI

1° session – Jeudi 5 Janvier 2023

Durée 1h30 – Tous documents de Cours, TD, TP autorisés

Tablettes et téléphones mobiles interdits

Lire attentivement le sujet.

Répondre à chaque question en totalité.

Ne pas tenter de reproduire le cours, l'objectif étant d'évaluer la compréhension du fondement des méthodes plutôt que la reproduction de leur application à tel ou tel cas ponctuel.

Une copie soignée est l'assurance d'une correction bienveillante.

I. Questions de cours/ Répondre en quelques phrases soigneusement construites, sans invoquer des formules mathématiques complexes à chacune des questions suivantes. Toutes ces questions considèrent un robot manipulateur rigide à N liaisons, doté d'actionneurs électromécaniques. Ce système est décrit au moyen d'un modèle dynamique direct permettant d'unir le vecteur de commande $u = (u_1, \dots, u_N)^T$ aux vecteurs $q = (q_1, \dots, q_N)^T, \dot{q} = (\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N)^T$ des variables de configuration du robot et de leurs dérivées temporelles.

1. Dessiner le schéma-bloc présentant le principe d'une commande en position du robot dans l'espace articulaire sans contact avec l'environnement. Celui-ci devra faire apparaître explicitement le robot, son contrôleur, ainsi que les vecteurs de consigne, d'état et de commande.
   Expliquer pourquoi la synthèse d'une commande de robot est un problème difficile.
2. On considère dans un premier temps des contrôleurs décentralisés linéaires invariants. Décrire en quelques lignes : le principe de tels contrôleurs ; leur intérêt ; le type d'approximations que leur synthèse exige de mettre en place (si possible sans équation) ; les limitations de la solution obtenue.
3. Expliquer le principe, l'intérêt et les limitations d'une commande centralisée par découplage (linéarisation par feedback).

II. Commande articulaire d'un robot PR/ On considère le robot PR à deux liaisons présenté Figure 1, dont la configuration est décrite par le vecteur $q = (q_1, q_2)^T$, avec q_1 une élongation et q_2 un angle. Le modèle dynamique direct simplifié de ce robot et de ses actionneurs s'écrit comme suit, avec $\tau = (\tau_1, \tau_2)^T$ le vecteur de commande :

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \tag{1}$$

$$\text{où } D(q) = \begin{pmatrix} M_1 + \frac{J_{m1}}{r_1^2} & p_2 \cos(q_2) \\ p_2 \cos q_2 & I_2 + \frac{J_{m2}}{r_2^2} \end{pmatrix}, \; C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 & -p_2 \sin(q_2)\dot{q}_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \; g(q) = \begin{pmatrix} 0 \\ p_2 g \sin(q_2) \end{pmatrix}. \tag{2}$$

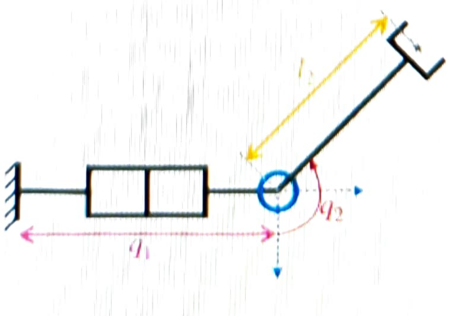

FIGURE 1 – Robot étudié

Ci-dessus, les paramètres M_1, I_2, p_2, g sont positifs (avec p_2 proportionnel à la longueur l_2 indiquée sur le schéma). Les inerties J_{m1}, J_{m2} des deux actionneurs sont également positives. Les rapports de réduction r_1, r_2 sont constants et dans l'intervalle $]0,1]$. Les composantes non nulles des matrices $D(q), C(q,\dot{q}), g(q)$ seront désignées par $d_{11}, d_{12}(q_2), d_{22}, c_{12}(q_2,\dot{q}_2), g_2(q_2)$.

4. Dans un premier temps, on se propose de mettre en place une commande décentralisée des deux axes du robot.

   (a) Réécrire les équations du modèle (1)–(2) comme suit,

$$d_{11}\ddot{q}_1(t) + w_1(t) = u_1(t), \qquad d_{22}\ddot{q}_2(t) + w_2(t) = u_2(t) \tag{3}$$

   avec $u = (u_1, u_2)^T = \tau$ et $w_1(t)$ et $w_2(t)$ des fonctions de $q_1(t), q_2(t), \dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \ddot{q}_1(t), \ddot{q}_2(t)$ qu'on explicitera.

   (b) Afin de mettre en place une commande en boucle fermée indépendante sur chacune des liaisons, on suppose ponctuellement que $w_1(t)$ et $w_2(t)$ sont des signaux de pertubations variants dans le temps indépendants de $q_1(t), q_2(t), \dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \ddot{q}_1(t), \ddot{q}_2(t)$. Justifier qu'il est pertinent de supposer que $w_1(t)$ et $w_2(t)$ convergent vers des valeurs constantes $w_1^\infty = 0$ et $w_2^\infty \neq 0$ si la commande mise en place stabilise le robot en une configuration constante q_1^∞, q_2^∞.

   (c) *[Attention, cette question est assez longue - Veiller à la traiter en totalité]*
   - Proposer, *pour chaque axe*, l'équation générique d'un contrôleur Proportionnel Dérivé indépendant (l'action dérivée étant réalisée sous forme d'une action tachymétrique) permettant de réaliser son asservissement à une consigne articulaire donnée.
   - Dessiner le schéma-bloc de l'asservissement.
   - Établir à quelles conditions sur les paramètres du contrôleur l'asservissement est stable.
   - Déterminer les erreurs de position et de vitesse (dans lesquelles interviendront éventuellement w_1^∞ pour l'axe 1 et w_2^∞ pour l'axe 2).
   - Donner les expressions analytiques d'un jeu de paramètres permettant de conférer à l'asservissement des propriétés intéressantes pour le problème considéré.

   (d) La mise en œuvre de ces contrôleurs en vue de la réalisation d'une tâche de type « mouvement point à point » à faible vitesse, semble-t-elle prometteuse ? Pourquoi ? À quel régime permanent peut-on s'attendre ?

5. On se propose de compléter les commandes articulaires indépendantes précédentes par un terme feedforward en vue d'envisager des tâches de suivi de consignes variables dans le temps.

   (a) Dessiner le schéma-bloc de l'asservissement complet.

   (b) Déterminer le contrôleur.

   (c) Quels sont les effets de l'adjonction du terme feedforward sur la stabilité de l'asservissement ?

   (d) On suppose que les consignes articulaires $q_1^\star(t), q_2^\star(t)$, bien que variables au fil du temps, convergent vers les constantes $q_1^{\star\infty}, q_2^{\star\infty}$. On suppose que l'asservissement est stable. Vers quelles valeurs q_1^∞, q_2^∞ convergent $q_1(t), q_2(t)$?