

On se propose dans ce TP de mettre en place une structure de correction de type contrôleur prédictif, et étudier ses avantages par rapport à une structure de boucle fermée classique.

1 Présentation du procédé

On considère un système électro-mécanique dont la fonction de transfert est un système du second ordre avec présence d'un zéro, et dont l'actionneur est un moteur modélisé par un système du premier ordre. La fonction de transfert entre l'entrée u et la sortie y est alors donnée par :

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{16p + 20}{p^3 + 7p^2 + 12.75p + 6.75} = G(p). \quad (1)$$

Ce système est soumis aux perturbations exogènes suivantes :

- (I) Une perturbation de sortie qui survient après quelques secondes.
- (II) Un bruit de mesure sur le capteur de $y(t)$.

L'objectif est d'asservir ce système en satisfaisant les objectifs suivants :

- (a) La stabilité du système en boucle fermée,
- (b) Une erreur de position nulle,
- (c) Une erreur de traînage limitée à $0.5 v_0$ (v_0 étant la pente de la rampe).
- (d) Une convergence vers la consigne en moins de 3 secondes, avec un dépassement limité à 0.5%.
- (e) Un rejet de la perturbation sur la sortie.

2 Analyse Préliminaire

1. Tracer le schéma bloc de l'asservissement en mettant en évidence les différents signaux exogènes. On prendra notamment soin de mettre en exergue les signaux exogènes de type bruit/perturbations. On notera $K(p)$ le correcteur.
2. Exprimer les erreurs de position et de traînage du système bouclé en fonction de $K(p)$ et $G(p)$.
3. Un correcteur proportionnel permettrait-il de satisfaire les contraintes fixées ?
4. *Quid* d'un correcteur proportionnel-intégral ? Justifier.

3 Synthèse d'une commande proportionnelle intégrale

On considère une loi de commande de la forme $U(p) = k \frac{1+\tau_i p}{\tau_i p} \epsilon(p)$.

1. Un tel correcteur permet-il de satisfaire la contrainte (e) ?
2. Trouver une relation entre k et τ_i permettant de satisfaire la contrainte d'erreur de position et de traînage.

3. Définir une valeur pour k et τ_i .
N.B. : Cette question, qui est une des plus importantes du sujet, doit être traitée de manière personnelle, autonome, sans aucune aide de l'enseignant, en vous basant sur les critères ou les techniques qui vous semblent les plus pertinentes. Elle doit être résolue de manière théorique (c'est-à-dire qu'elle doit reposer sur des critères précis, et non pas se contenter de faire des essais au hasard et voir le résultat. Pour autant, il n'est pas interdit d'utiliser Matlab pour faire des calculs ou des tracés (Bode, Black, pôles, etc.), l'essentiel est que ce choix soit justifié et que le choix soit fait de manière cohérente. Il est conseillé de traiter cette question en dehors des séances.
4. Tracer la réponse indicielle et la réponse à une rampe du système en boucle fermée pour confirmer la pertinence du correcteur.
5. En utilisant la librairie `librairie_tp2.mdl`, créer un schéma simulink du système en boucle fermée, en faisant apparaître :
 - Une choix du type de consigne : une consigne de type échelon et une consigne dynamique (*manual switch*)
 - Une perturbation de sortie, d'amplitude -0.1, qui survient à 4 secondes, que l'on pourra activer ou désactiver (*manual switch*).
6. Lancer la simulation avec un échelon en entrée et la perturbation de sortie, et constater les bonnes performances du correcteur défini.
7. La simulation avec entrée dynamique est-elle satisfaisante ? La contrainte d'erreur de traînage est-elle bien satisfaite ?

Afin d'améliorer les performances pour l'entrée dynamique, il va être nécessaire d'accélérer la réponse du système (ou diminuer l'erreur de traînage), c'est-à-dire dans tous les cas augmenter les gains en jeu dans le correcteur. Pour apprendre à synthétiser un autre correcteur avec l'aide de Matlab, on va utiliser le bloc "PID", utilisé en mode PI, et utiliser la fonction "Tune".

8. Régler les gains du PI pour obtenir une réponse plus rapide. La réponse à une entrée dynamique est-elle plus satisfaisante ? Si la fonction "Tune" n'est pas disponible, utiliser le correcteur fourni par l'enseignant.
9. Ajouter maintenant un bruit sur la mesure, et constater son effet sur la qualité de l'asservissement. Visualiser également la commande envoyée au procédé par le correcteur, et commenter.
10. Visualiser l'effet de ce même bruit de mesure sur le correcteur PI précédemment construit ; que constate-t-on ? Expliquer.
11. (*facultative, à faire chez soi*) Essayer de définir le meilleur correcteur PI (voire PID) possible pour l'entrée dynamique sans bruit. Quelle conséquence cela a-t-il sur les performances avec présence de bruit de mesure ? Essayer de trouver le meilleur compromis possible.

4 Construction d'un contrôleur prédictif

On souhaite à présent développer un correcteur permettant de prendre en compte la connaissance du modèle pour prédire la commande à appliquer pour suivre parfaitement la consigne h_{1c} en l'absence de perturbation : on parle de **contrôleur en boucle ouverte**, dont il a déjà été question en cours. S'ajoutera à cela un correcteur en boucle fermée dont le rôle sera de corriger les dérives dues aux perturbations etc.

On s'intéresse dans un premier temps au contrôleur en boucle ouverte.

1. Donner l'équation différentielle entrée-sortie sous-jacente au modèle (1).
2. En déduire la loi de commande en boucle ouverte permettant de garantir que $y(t) = y_c(t) \forall t$.

3. Créer dans simulink un modèle permettant de mettre en œuvre ce correcteur en boucle ouvert, pour les deux types d'entrées considérées dans la section 3. Lancer la simulation sans perturbation. Que constate-t-on ? Comment expliquer ce phénomène ?
4. Modifier le correcteur en boucle-ouverte pour replacer les dérivations par des dérivateurs filtrés, utiliser le bloc de régularisation d'entrée, puis relancer la simulation. L'objectif est-il atteint ? Conclure sur l'intérêt d'un tel correcteur.
5. Ajouter maintenant une perturbation ; que constate-t-on ? Expliquer. Un tel correcteur peut-il être utilisé seul ?

On se propose désormais d'ajouter à cette structure un correcteur en boucle fermée afin d'être capable de réagir aux perturbations.

6. Dessiner (sur papier !) le schéma-bloc du système en boucle fermée ainsi construit (qui contiendra donc le correcteur en boucle ouvert précédemment défini, et un correcteur en boucle fermée, que l'on notera pour le moment $K_{BF}(p)$).
7. Quel type de correcteur devra-t-on prévoir pour $K_{BF}(p)$? Justifier.
8. Les contraintes de dépassement, d'erreur etc. vous semblent-elles aussi cruciales avec cette structure qu'elles ne l'étaient dans la section précédente ? Pourquoi ? Chercher alors un réglage pour le correcteur $K_{BF}(p)$ un peu moins exigeant en terme de dépassement mais permettant d'avoir une plus grande réactivité aux perturbations.
9. Compléter le schéma-bloc simulink pour prendre en compte cette structure en boucle fermée, et lancer une simulation, et comparer les performances obtenues par rapport à celles de la section 3 (sans bruit).
10. Visualiser sur un même scope la commande totale envoyée au procédé, et la commande renvoyée par le correcteur $K_{BF}(p)$ uniquement ; que constate-t-on ? Interpréter ce que vous voyez.
11. Ajouter maintenant le bruit de mesure. Son effet est-il aussi important que pour le correcteur de la section 3 ? Comment l'expliquer ? On pourra notamment se baser sur la question précédente, et comparer les courbes de commande à celles obtenues avec le correcteur de la section 3.
12. Conclure sur les bénéfices de mettre en place un contrôleur prédictif en plus du contrôleur en boucle fermée.