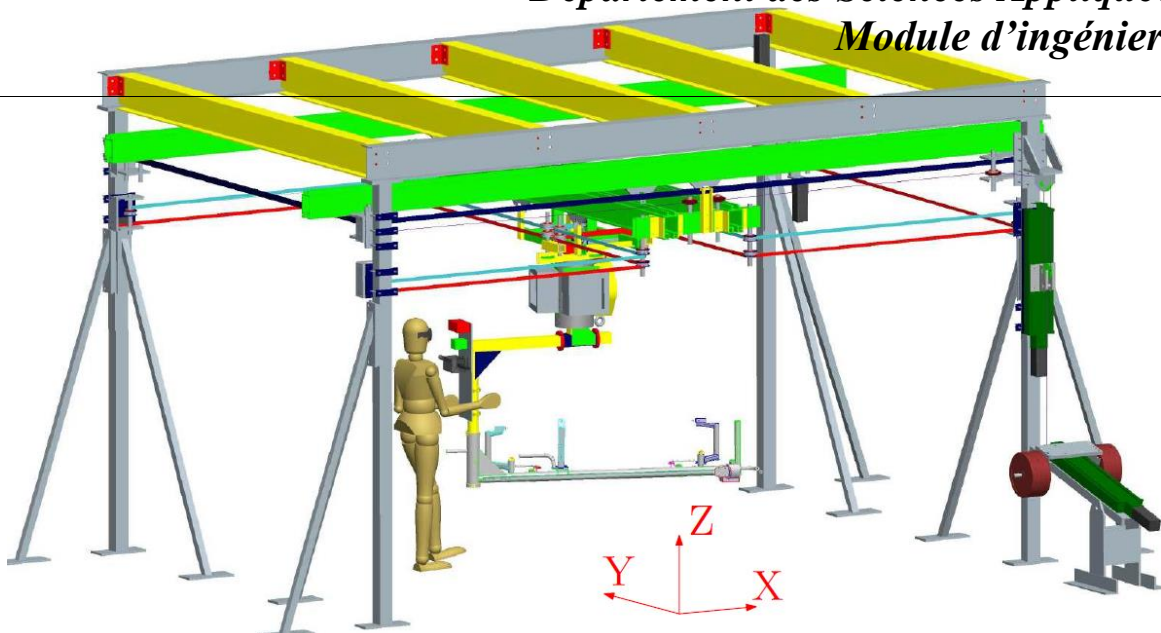


Devoir No 1
Vibrations induites lors d'une interaction physique dans une
tâche d'assemblage
Été 2021

Interactions humain-robot
6MIG841

Département des Sciences Appliquées
Module d'ingénierie



Martin J.-D. Otis, ing. Ph.D.
Professeur adjoint

Table des matières

Introduction	3
Problématique	4
Énoncé 1 : Analyse statistique temporelle sur une fenêtre glissante (semaine 1) 5 points	5
Énoncé 2 : Analyse fréquentielle sur une fenêtre glissante (semaine 2) 4 points	6
Énoncé 3 : Modèle d'identification des vibrations (semaine 3) 2 points	7
Exemple de présentation du rapport pour le devoir	7
Conception d'un PI pour une TFO(1)	9
Conclusion	12
Références	A

Liste des figures

Figure 1: Modèle du mécanisme robotique et de l'humain [2]	4
Figure 2: Commande du mécanisme robotique avec l'humain dans la boucle [3]	4
Figure 3 Partie électrique d'un moteur à c.c. Source : [1]	8
Figure 4 Partie mécanique d'une charge pouvant être reliée à l'arbre d'un moteur à c.c. Source : [1]	8
Figure 5 Lieu des racines pour les pôles du compensateur PI et G_{PRO}	10
Figure 6 Lieu des racines du système total compensé	11

Liste des tableaux

Tableau 1 Valeurs numériques du PI	11
------------------------------------	----

Introduction

Dans le cadre de ce devoir, vous devez expliquer, dans l'introduction, l'impact perceptuel des vibrations lors de la réalisation d'une tâche. Vous devez aussi introduire la notion de traitement du signal qui sera utilisé dans la solution proposée.

Ainsi, vous devez introduire les objectifs du laboratoire. Une introduction contient un sujet amené, un sujet posé et un sujet divisé. Le sujet amené se traduit par la présentation de la problématique et des objectifs du laboratoire (par exemple : *la conception d'un PID donne un résultat qui diffère selon le modèle du processus utilisé*). Le sujet posé peut être, entre autres, une présentation d'une revue de la littérature portant sur les différentes techniques utilisées pour résoudre la problématique (par exemple : *des méthodes de conception connue comme le lieu des racines, le lieu de Bode et l'ITAE sont utilisées afin de trouver les paramètres du PID*). Souvent, le sujet posé énumère les points importants et essentiel de la conclusion (par exemple : *les résultats montrent que la méthode X est plus performante de 90% par rapport à la méthode Y en utilisant un modèle simplifié du processus*). Finalement, le sujet divisé présente les étapes de résolution de la problématique afin de démontrer les points importants de la conclusion.

Lors de la rédaction de votre rapport pour ce devoir, veuillez considérer ces éléments :

1. L'expérience passée nous a démontré que les étudiants qui se donnent la peine d'écrire une introduction et une conclusion ont généralement un rapport plus concis et plus clair.
2. Si vous rédigez une introduction et une conclusion voici ce qu'elle **ne doit pas** être :
 - a. plus longue qu'une demi-page ;
 - b. faire référence au fait que ce travail est dans le cadre d'un cours;
 - c. une répétition des objectifs ou
 - d. une répétition de la description de l'énoncé ou du système à l'étude.
3. Vous devez différencier la discussion et la conclusion.
4. L'introduction et la conclusion ne doivent pas reproduire l'énoncé.

Problématique

Un capteur de force est disposé sur un mécanisme robotique à un degré de liberté. Une poignée installée sur ce capteur permet à un opérateur de saisir le mécanisme et permet de le déplacer de manière proportionnelle à la force appliquée par le bras sur la poignée. Le choix du nombre de degrés de liberté repose sur la réduction de la complexité du problème afin de compléter ce devoir dans un temps raisonnable.

Lorsque l'humain augmente la rigidité structurelle de son bras, le système génère des vibrations. Votre équipe d'ingénieurs, via une séance de remue-méninges a adopté une première solution. Cette solution calcul un indice de vibration indésirable et ajuste le gain de la boucle d'une commande de type proportionnel. Ainsi, plus l'indice de vibration augmente, plus le gain de boucle diminue favorisant une réduction des vibrations, mais une augmentation de la masse ressentie du mécanisme par l'opérateur. Enfin, cette commande contient plusieurs paramètres difficiles à ajuster. Bien entendu, hormis le désagrément du ressenti des vibrations chez l'opérateur, ces vibrations ont une conséquence importante lors de l'assemblage des pièces. Le modèle du robot qui sera utilisé dans ce devoir est présenté à la figure 1.

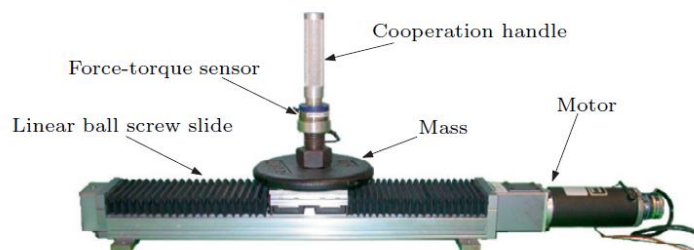


Figure 1: Modèle simplifié du mécanisme robotique dédié aux mesures [2]

Le calcul de l'indice de vibration est mis en œuvre dans un bloc nommé observateur de vibrations. Éventuellement, vous aurez à fermer la boucle en utilisant votre indice et obtenir la commande de la figure 2. Dans cette figure, le gain K_P sera à ajuster en fonction de votre indice. Cette étape supplémentaire sera réalisée dans le devoir 2.

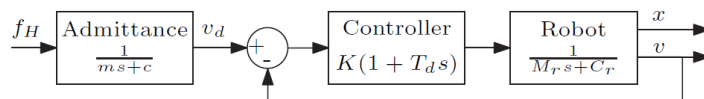


Figure 2: Commande du mécanisme robotique avec l'humain dans la boucle [2, 3]

La mesure des vibrations et le contexte de ce devoir sont présentés dans le clip vidéo suivant :

[https://www.researchgate.net/publication/301889499_Video --
A time domain vibration observer and controller](https://www.researchgate.net/publication/301889499_Video_-_A_time_domain_vibration_observer_and_controller)

Afin de concevoir votre observateur de vibrations, vous devez trouver des caractéristiques temporelles (calculs statistiques dont *xcorr*, *kurtosis*, *skewness*, *var*, *mean*, *énergie*, etc.) permettant d'identifier les vibrations avec l'aide de Simulink. Vous devez aussi développer un modèle dans les deux domaines temporel et fréquentiel afin d'utiliser la corrélation croisée. Pour y arriver, vous devez développer un

6MIG841 Interactions humain-robot Devoir 1	Martin J.-D. Otis, professeur	Été 2021	Page 4 de 13
---	-------------------------------	----------	--------------

observateur qui analyse les vibrations et qui indique la portion du signal problématique (segmentation). La segmentation permet en effet d'indiquer le début et la fin d'un événement dans un signal.

Ce laboratoire vaut 15 points dont chaque question vaut un ou deux points. Un bonus de deux points est cumulable sur le total de votre note. La présentation a aussi une grande importance pour expliquer et justifier adéquatement vos résultats. **Il y a 4 points associés à la qualité de la présentation : des figures (1 point), du français (1 point), des justifications précises dans un langage clair et concis (1 point) et le format du rapport (1 point). Ainsi, justifier toutes vos réponses, sans aucune exception.**

Énoncé 1 : Analyse statistique temporelle sur une fenêtre glissante (semaine 1) 5 points

Si cela n'est pas fait, avant de débiter ce devoir, dans MatLAB, veuillez installer le compilateur avec la commande :

mex -setup

Aux questions demandées, taper : y 1 y.

Par défaut, le compilateur de Visual Studio est installé. Si ce n'est pas le cas, veuillez utiliser ou sélectionner votre compilateur, comme par exemple gcc.

Question 1.1 Réaliser une figure avec une annotation du signal pour chaque partie (sans vibration, avec vibration, aucune entrée) sur le signal mesuré *poignee1ddl_4.mat* à l'œil. Cela vous servira de référence pour que votre algorithme puisse détecter aux endroits spécifiés les vibrations (segmentation du signal). Déterminer la dynamique (bande passante) du mécanisme et de l'humain avec l'aide d'une représentation utilisant la FFT. Lors de l'analyse du signal brute, il n'est pas requis d'utiliser la STFT. (1 point)

Question 1.2 Justifier l'utilisation d'un filtre afin d'appliquer une analyse statistique du signal. Si cela s'avère nécessaire, concevoir et présenter le filtre optimal utilisé avant d'effectuer une analyse. Vous devez utiliser les outils de MatLAB ou toute autre fonction de conception de filtre disponible dont *butter*. Cet outil permet d'exporter le filtre conçu dans Simulink si cela s'avère utile.

Indices :

- Qu'arrive-t-il si on supprime la composante à 0Hz à l'aide d'un passe-haut ? (0.5 point)
- Qu'arrive-t-il si on supprime la composante liée au mouvement de l'humain ? (0.5 point)
- Est-il possible de réduire le bruit du capteur, si oui, comment ? (0.5 point)
- Quelle est l'impact de l'ordre du filtre sur la dynamique du signal ? (0.5 point)

Question 1.3 Identifier des variables statistiques (caractéristiques temporelles) propice à l'identification des vibrations de manière à construire un indice lié aux vibrations. La fonction *process.m* montre un exemple de traitement du signal avec différentes caractéristiques statistiques sur le signal. (1 point)

Question 1.4 Démontrer la faisabilité de la segmentation de ce signal afin d'identifier des zones de vibrations. La segmentation permet de définir le début et la fin d'une portion du signal dont un phénomène doit être observé. Vous devez clairement indiquer sur une figure le résultat de l'analyse statistique. (1 point)

Indices :

- Si vous avez un modèle pour un mouvement normal et pour la vibration, quelle est l'erreur de la reconnaissance pour chaque modèle sur le signal ? Vous pouvez réaliser un tableau qui représente le résultat de la corrélation entre chaque modèle et chaque portion du signal (0.5 point).

6MIG841 Interactions humain-robot Devoir 1	Martin J.-D. Otis, professeur	Été 2021	Page 5 de 13
---	-------------------------------	----------	--------------

- Dans un second tableau, vous pouvez indiquer les paramètres statistiques qui permettent d'identifier chaque partie du signal (0.5 point).

Énoncé 2 : Analyse fréquentielle sur une fenêtre glissante (semaine 2) 4 points

Vous devez trouver des caractéristiques fréquentielles permettant d'identifier des vibrations dans le signal.

Question 2.1 Appliquer le concept de la STFT (ou ST-FFT) sur le signal afin d'évaluer les fréquences associées à une vibration et sans vibration. Vous devez utiliser une fenêtre de votre choix comme une *hamming* dans un souci d'optimisation du calcul de l'indice des vibrations. Vous devez présenter une représentation spectrale des parties du signal associé à un mouvement normal et à un mouvement anormal. (1 point)

Question 2.2 Justifier l'utilisation d'un filtre afin d'appliquer une analyse fréquentiel du signal. Si cela s'avère nécessaire, concevoir et présenter le filtre utilisé avant d'effectuer une analyse. (1 point)

Question 2.3 Discuter de la faisabilité d'utiliser une ST-FFT comme élément central de la détection des vibrations, i.e. sans l'utilisation des caractéristiques temporelles. (1 point)

Question 2.4 Proposer un calcul d'indice en fonction de la réponse donnée par la ST-FFT. Vous pouvez utiliser un calcul d'énergie dans une bande de fréquence particulière que vous devez identifier. (1 point)

Énoncé 3 : Observateur des vibrations, 2 points

Question 3.1 Proposer un calcul d'un indice utilisant les caractéristiques statistiques temporelles et fréquentielles qui pourra ajuster le gain de boucle. De plus, veuillez proposer l'équation qui permet de mettre à jour le gain K_P en temps réel. Proposez un nouveau schéma de commande permettant de visualiser l'observateur et l'ajustement du gain en améliorant la figure 2. (1 point)

Question 3.2 Proposer un calcul afin d'ajuster le gain de boucle lorsque le robot est asservi tel que proposé initialement en utilisant l'indice en 3.1. (1 point)

BONUS (+2) : Vous pouvez optimiser une somme pondérée de caractéristiques (*optimtool*) afin de déterminer un indice tel que :

$$\text{mine} = I - O$$

$$I = \sum_{i=1}^n w_i c_i$$

où, I est l'indice des vibrations dans la fenêtre d'analyse dans l'intervalle $[0, n]$, O est l'observation de la vibration (qui devrait être sous le seuil de la perception de l'opérateur), w_i sont les poids à optimiser et c_i sont les caractéristiques temporelles et fréquentielles.

Éventuellement, il sera possible d'utiliser la logique floue ou des réseaux de neurones afin de déterminer l'indice des vibrations.

Exemple de présentation du rapport pour le devoir

Vous devez utiliser le gabarit double colonne de IEEE, disponible sur le site de cours, afin de présenter vos résultats.

Indiquez votre réponse et élaborez la solution si vous le jugez nécessaire. À partir des simulations, inclure des tableaux de valeurs et des graphiques. Compresser toutes les images à la fin (dans MS-Word, clic droit sur l'image> format image>compresser 200ppi, toutes), sauf si elles sont incluent en *metafichier*. Idéalement, toutes les figures sont en noir et blanc et insérées comme *metafichier*.

Utiliser un éditeur d'équation pour produire vos formules mathématiques, comme par exemple :

$$f(t) = V_{DD}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

Lorsque nécessaire, il est possible d'inclure des commandes spécifiques qui expliquent la méthodologie. Le code complet de MatLAB doit être présenté en annexe de même que les schémas Simulink. Vous devez utiliser le format suivant lorsqu'un algorithme particulier nécessite une explication dans le texte du devis :

Inclure vos commandes ou votre programme en format COURRIER NEW 10pts lorsque requis.

6MIG841 Interactions humain-robot Devoir 1	Martin J.-D. Otis, professeur	Été 2021	Page 7 de 13
---	-------------------------------	----------	--------------

La présentation des graphiques doit suivre quelques règles :

1. tous les graphiques doivent contenir les informations suivantes, en respectant la police et la taille des caractères :
 - a. titre;
 - b. identification des axes et
 - c. graduation des axes (avec les unités).
2. les graphiques qui comportent plus d'une courbe doivent contenir les éléments suivants :
 - a. identification des courbes (couleur, étiquette, etc.) et
 - b. une légende.
3. deux figures peuvent être présentées dans un tableau de type ligne comme les deux figures suivantes (figure 3 et figure 4). Notez qu'une figure dont vous n'avez pas le droit d'auteur doit être citée correctement avec la permission des auteurs ou de l'éditeur. Dans le cas des deux figures, la source est [1]. Vous pouvez utiliser EndNote pour gérer vos références.

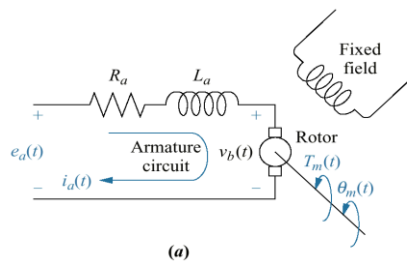


Figure 3 Partie électrique d'un moteur à c.c. Source : [1]¹

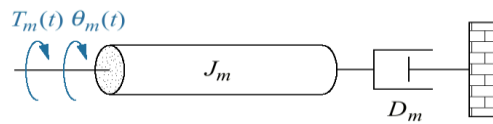


Figure 4 Partie mécanique d'une charge pouvant être reliée à l'arbre d'un moteur à c.c. Source : [1]

Pour insérer une figure de MatLAB, il suffit de la copier-coller : *Menu Edit > Copy Figure*. Pour insérer une figure générée par un *Scope* de Simulink, il faut transférer les données dans l'espace de travail (*Workspace*) de MatLAB et afficher les données dans une figure de MatLAB avec l'aide de la commande *plot*.

Une figure bien définie dans MatLAB utilise les commandes suivantes :

```
% Création de la figure.
fighdl = figure;
% Ajuste la couleur de la figure en blanc.
% Si le 'set' suivant n'est pas exécuter, le contour de la figure
% restera gris
set(fighdl,'Color',[1 1 1])
% Utilisez 'hold on' afin d'afficher plusieurs sinus
hold on
% Affichage du signal1 en noir, ligne continue
plot(temps, amplitudel, 'k-', 'Linewidth', 2);
% Affichage du signal2 en noir, ligne pointillée
plot(temps, amplitude2, 'k--', 'Linewidth', 2);
% Ajout du nom des axes
```

¹ Avec la permission de l'éditeur : le document doit être déposé dans un système avec une gestion de l'accès sécurisé par mot de passe.


```
xlabel('Temps (sec.)','FontSize',16);
ylabel('Amplitude (unité)','FontSize',16);
% Ajout de la légende
lhdl = legend('Signal 1','Signal 2');
set(lhdl,'FontSize',16);
```

Conception d'un PI pour une TFO(1)

La conception par le lieu des racines d'un compensateur PI (proportionnel-intégral) pour un système d'ordre 1 est présentée dans cette section. Les spécifications de conception sont un temps de stabilisation de l'ordre de 0.09 seconde avec un dépassement maximum de 5 %. Ces deux spécifications permettent le calcul approximatif de l'amortissement ζ (soit de 0.7) et de la pulsation naturelle ω_n (soit de 60 rad/s). Ces spécifications se traduisent par des pôles complexes désirés s^* situés à $-42 \pm 43j$.

Méthode de conception du PI

En premier lieu, la fonction de transfert d'un système d'ordre 1 (soit le processus à l'étude) est représentée par cette fonction de transfert $G_{PRO}(s)$:

$$G_{PRO} = \frac{K_{PRO}}{\tau_{PRO}s + 1} \quad (2)$$

Dans le plan s , le pôle est situé à $-1/\tau_{PRO}$. Afin de réaliser la conception du compensateur $G_C(s)$, il faut trouver la fonction de transfert en boucle ouverte $G_{BO}(s)$. Celle-ci est définie par $G_{BO}(s) = G_C G_{PRO}(s)$:

$$G_C G_{PRO} = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) \frac{K_{PRO}}{\tau_{PRO}s + 1} = K_p \left(1 + \frac{K_I}{K_p s} \right) \frac{K_{PRO}}{\tau_{PRO}s + 1}$$

$$G_{BO}(s) = K_t \left(\frac{s + K_I / K_p}{s} \right) \frac{1}{\tau_{PRO}s + 1} \quad (3)$$

En boucle ouverte, le pôle de l'intégrateur à l'origine et le pôle du processus sont inclus. Le positionnement des pôles et des zéros en boucle ouverte représente le point de départ pour réaliser le tracé du lieu des racines (lieu d'Evans). Le gain K_t sera calculé pour la détermination du gain final que le système doit avoir afin de passer par le pôle désiré s^* . La prochaine étape est donc le calcul de la position du zéro $-K_I/K_p$ afin de dévier le lieu des racines de manière à passer par s^* . D'abord, la figure 5 montre le lieu original sans le zéro du PI.

```
rlocus(Gbo)
sgrid(zeta,wn)
plot(-zeta*wn,wn*sqrt(1-zeta^2),'*')
```

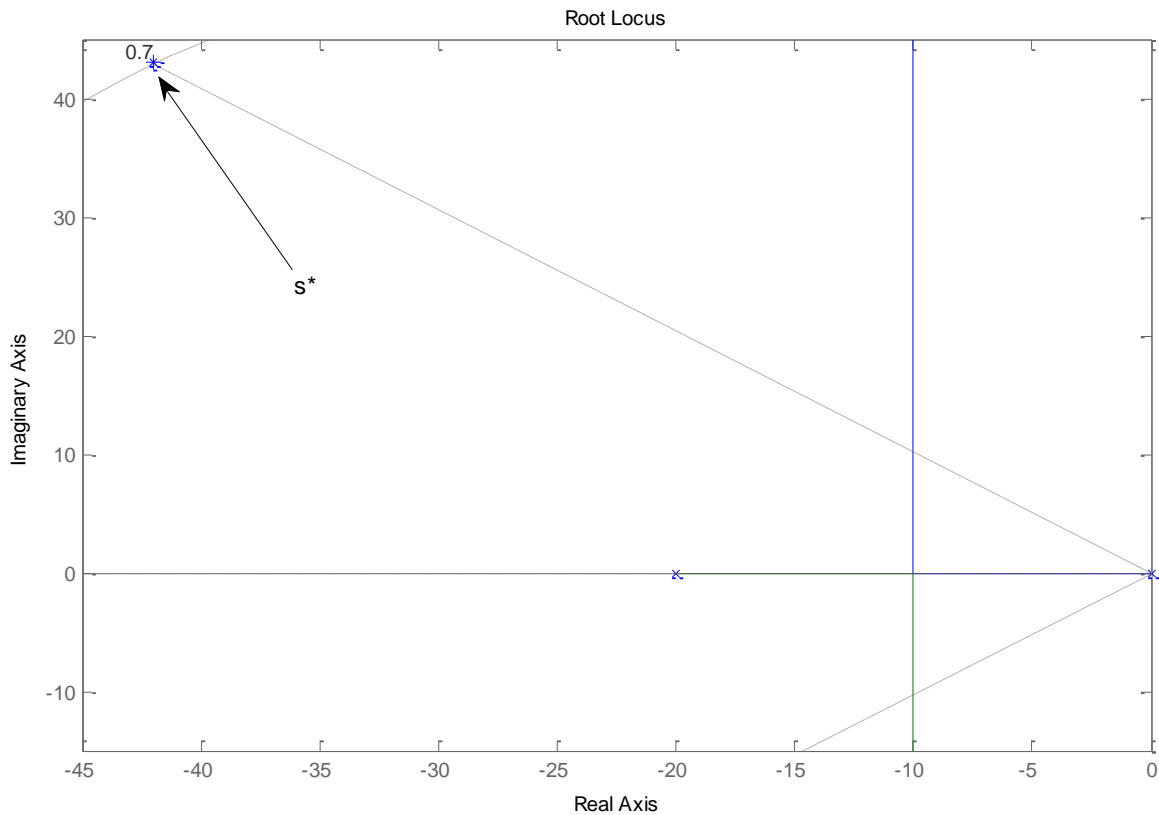


Figure 5 Lieu des racines pour les pôles du compensateur PI et G_{PRO}

La position du zéro est un calcul géométrique de la phase à ajouter au système :

Équation à trouver

La position du zéro sera donc déterminée par :

Équation à trouver

Le lieu des racines est donc représenté par la figure 6. Le gain K_t est validé avec la commande *rlocfind* qui donne une valeur de 3.15.

```
rlocus(Gbo*tf([1 56],[1]))
sgrid(zeta,wn)
plot(-zeta*wn,wn*sqrt(1-zeta^2),'*')
rlocfind(Gbo*tf([1 56],[1]))
```

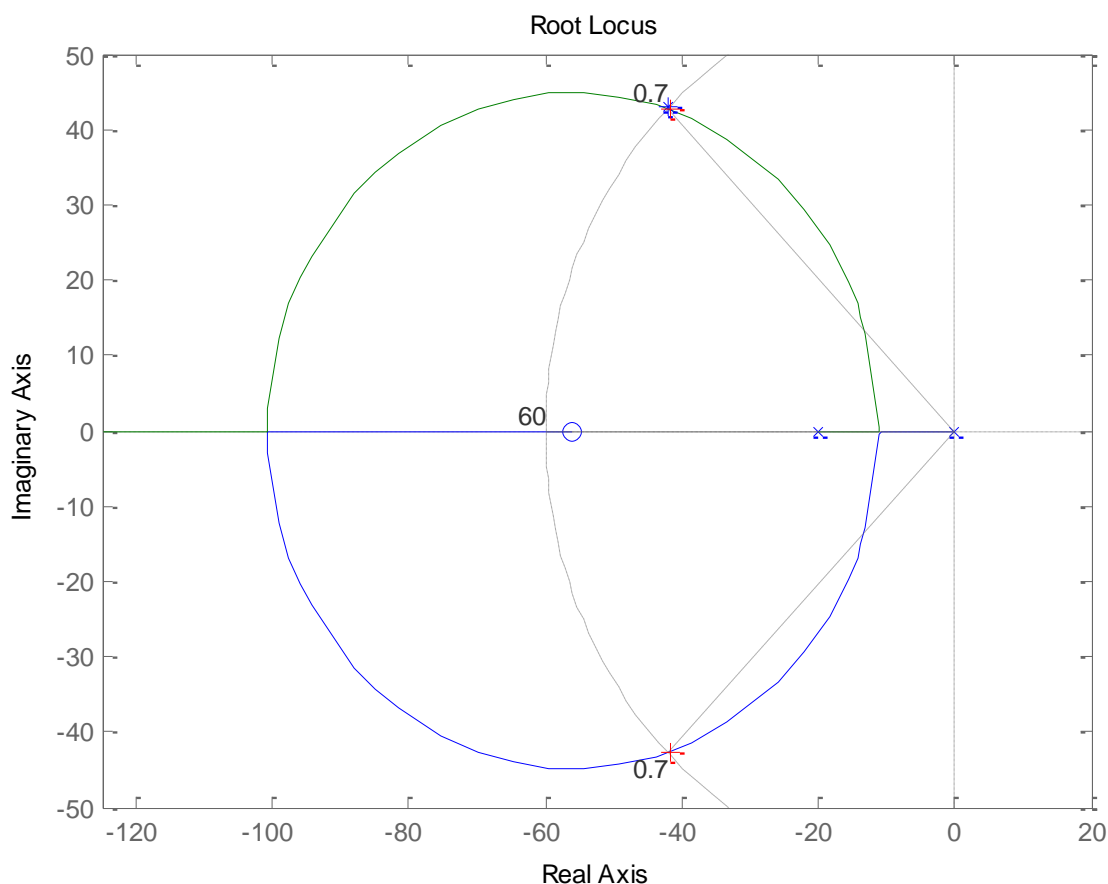


Figure 6 Lieu des racines du système total compensé

Ce lieu montre qu'il est possible d'ajuster le gain afin de passer par s^* . Vous devez présenter analytiquement la méthode qui permet de calculer à la main le gain K_t . Le gain K_t est calculé par l'équation suivante :

Équation à trouver

Ce qui donne un $K_P=0.9$ et un $K_I=?$ Les calculs précédents permettent donc de définir l'ensemble des valeurs numériques pour le compensateur de type PI. Le tableau 1 présente ces valeurs numériques.

Tableau 1 Valeurs numériques du PI

Variable	Unité	Valeurs numériques
K_P	À trouver	0.9
K_I	À trouver	À trouver
K_t	À trouver	3.15

Discussions

Vous devez inclure vos analyses sur les résultats et les comparaisons sur différentes méthodes de conception. Vous pouvez discuter des avantages et des inconvénients de chaque méthode afin de bien les comparer.

Conclusion

La conclusion décrit ce que vous avez appris par rapport aux objectifs du laboratoire (ce n'est pas une répétition de l'énumération des objectifs), mais une confirmation ou une infirmation de vos hypothèses en se référant sur vos résultats principaux et vos discussions. Par la suite, vous présentez les travaux futurs ou les étapes supplémentaires qui doivent être réalisées pour améliorer les résultats. Cela pourrait être de nouvelles idées de conception ou de nouveaux concepts qui devraient être abordées.



ANNEXE

Les scripts MATLAB ainsi que les schéma-blocs SIMULINK que vous développez au cours d'un laboratoire doivent être inclus en annexe. Vous pouvez cependant donner dans le rapport les lignes de code importantes qui justifie la démarche de conception.

Références

- [1] Norman S. Nise (2007) **Control Systems Engineering**, Fifth Edition, Wiley, 861 pages.
- [2] Alexandre Campeau-Lecours, Martin Otis, Pierre-Luc Belzile, Clément Gosselin, *A time-domain vibration observer and controller for physical human-robot interaction*, Mechatronics, Volume 36, June 2016, Pages 45-53, ISSN 0957-4158, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.04.006>
- [3] Alexandre Campeau-Lecours, Martin Otis, Clément Gosselin, *Modeling of physical human-robot interaction: Admittance controllers applied to intelligent assist devices with large payload*, International Journal of Advanced Robotic Systems, September-October 2016 vol. 13 no. 5, Pages 1-12, <http://arx.sagepub.com/content/13/5/1729881416658167>