

Pince Brucelle instrumentée haptique de micro-manipulation

Corrigé UPSTI

I - Présentation du contexte de la micro-manipulation et de la pince

Question 1 Compléter le tableau en cochant les cases lorsque l'action mécanique est non nulle pour chacun des quatre cas d'utilisation

	Manuelle	Collaborative	Maître	Esclave
F_u	X	X	X	
F_0	X	X		X
C_m		X	X (si bilatérale)	X

Question 2 Donner la sous-exigence du diagramme SysML partiel des exigences, essentielle pour que la pince instrumentée puisse être employée dans le cas d'utilisation manuelle.

Exigence 1.5 de réversibilité

Question 3 Préciser les éléments numérotés de 1 à 8 des chaînes de puissance et d'information pour l'actionnement de la pince instrumentée haptique.

- | | |
|---|--|
| 1 : Moteur DC brushless | 5 : Position angulaire de l'axe moteur |
| 2 : Vis-écrou à billes | 6 : Puissance électrique |
| 3 : Galet-came à rattrapage magnétique de jeu | 7 : Puissance mécanique de rotation |
| 4 : Codeur rotatif magnétique | 8 : Puissance mécanique de translation |

II - Validation des exigences géométriques de la pince

II.1 - Modèle géométrique de la pince

Question 4 Montrer par deux compositions des vitesses angulaires que $\vec{\Omega}(2/0) = \vec{0}$. En déduire la nature du mouvement de 2 par rapport à 0.

$$(i) \quad \vec{\Omega}(2/0) = \vec{\Omega}(2/3) + \vec{\Omega}(3/0) = \omega_{23} \vec{x}_0 + \omega_{30} \vec{x}_0$$

$$(ii) \quad \vec{\Omega}(2/0) = \vec{\Omega}(2/4) + \vec{\Omega}(4/1) + \vec{\Omega}(1/0) = \omega_{24} \vec{z}_0 + \omega_{y41} \vec{y}_2 + \omega_{z41} \vec{z}_0 + \omega_{10} \vec{z}_0$$

$$= (\omega_{24} + \omega_{z41} + \omega_{10}) \vec{z}_0 + \omega_{y41} \vec{y}_2$$

L'équation (i) permet d'écrire : $\vec{\Omega}(2/0) = \omega_{20} \vec{x}_0$

L'équation (ii) impose aussi : $\vec{\Omega}(2/0) \cdot \vec{x}_2 = 0$, d'où $\omega_{20} \vec{x}_0 \cdot \vec{x}_2 = 0 \Rightarrow \omega_{20} \cos(\alpha + \beta) = 0$.

En fonctionnement, $0 < \alpha + \beta < \pi/2$. La condition impose $\omega_{20} = 0$.

On obtient $\boxed{\vec{\Omega}(2/0) = \vec{0}}$, le mouvement de 2/0 est un mouvement de translation.

Question 5 Déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme constitué de la demi-pince.

Nombre cyclomatique : $\gamma = 1$.

Inconnues cinématiques : $I_c = 8$

Mobilités : $m = m_u + m_i = 1 + 1$, mobilité interne liée à la rotation du galet sur lui-même

D'où un degré d'hyperstatisme $\boxed{h = 6 - 8 + 2 = 0}$.

Question 6 Déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme complet, sans considérer l'objet saisi. Comparer au résultat déterminé question 5 et justifier les éventuels écarts.

Nombre cyclomatique : $\gamma = 2$.

Inconnues cinématiques : $I_c = 14$

Mobilités : $m = m_u + m_i = 1 + 2$, mobilités internes liées aux rotations des 2 galets sur eux-même

D'où un degré d'hyperstatisme $\boxed{h = 12 - 14 + 3 = 1}$.

Le même actionneur est utilisé pour contrôler les deux pinces. De plus, dans le premier modèle, l'orientation de l'écrou 2 est imposée par le contact cylindre-plan. Dans le deuxième modèle, il y a deux contacts cylindre-plan.

II.2 - Etude géométrique de la pince

Question 7 Déterminer l'expression de l'ouverture d en fonction de l'angle d'ouverture α et des données constantes.

$$\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB} = y_A \vec{y}_0 + x_B \vec{x}_1 + y_B \vec{y}_1. \text{ En projection sur } \vec{y}_0 : d = 2\overrightarrow{OB} \cdot \vec{y}_0 = \boxed{2(y_A + x_B \sin \alpha + y_B \cos \alpha)}.$$

Question 8 Justifier d'après le résultat obtenu en question 7 l'allure de la courbe obtenue figure 4 et donner les valeurs numériques de a en m.rad^{-1} et b en m , tels que $d = a\alpha + b$.

Si α est petit, $\cos \alpha \approx 1$ et $\sin \alpha \approx \alpha$.

Le résultat de la question précédente donne : $d \approx 2(y_A + y_B) + x_B \alpha$, soit l'équation d'une droite en α . On retrouve cette caractéristique sur la figure.

On identifie en $\alpha = 0 \text{ rad}$: $\boxed{b \approx 8,6 \times 10^{-3} \text{ m}}$

Entre $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 0,045 \text{ rad}$: $a = \frac{\Delta d}{\Delta \alpha} \approx \frac{0-8,5}{0,045-0} \approx \times 10^{-3} \approx \boxed{-0,19 \text{ m/rad}}$.

Question 9 Montrer par une fermeture géométrique que la relation entre le déplacement de l'écrou x_D et l'angle d'ouverture α peut s'écrire comme suit :

$$x_D = \frac{d_1 \sin \beta + d_2 \cos(\alpha + \beta) + d_3}{\sin(\alpha + \beta)} - d_4$$

Préciser les expressions de d_1, d_2, d_3 et de d_4 en fonction des données constantes.

Dans le polygone OAEICDO : $y_A \vec{y}_0 + x_E \vec{x}_1 + x_I \vec{x}_2 = x_D \vec{x}_0 + x_C \vec{x}_0 + y_C \vec{y}_0 + R_g \vec{y}_2$

En projection sur $\vec{y}_2$: $y_A \cos(\alpha + \beta) - x_E \sin \beta + 0 = -(x_D + x_C) \sin(\alpha + \beta) + y_C \cos(\alpha + \beta) + R_g$

On obtient : $x_D = \frac{x_E \sin \beta + (y_C - y_A) \cos(\alpha + \beta) + R_g}{\sin(\alpha + \beta)} - x_C$.

Par identification : $\boxed{d_1 = x_E}, \boxed{d_2 = y_C - y_A}, \boxed{d_3 = R_g}, \boxed{d_4 = x_C}$

Question 10 Déterminer d'après la courbe de la figure 5, le gain K_D en m.rad^{-1} tel que $x_D = K_D \alpha$.

Entre 0 et 0,04 rad : $K_D = \frac{\Delta x_D}{\Delta \alpha} \approx \frac{0,9}{0,04} \times 10^{-3} = \boxed{22,5 \times 10^{-3} \text{ m/rad}}$.

Question 11 Dédurre des questions précédentes la relation entre l'ouverture d et l'angle moteur θ_3 . Exprimer la plus petite variation $\Delta \theta_3$ mesurable par le codeur. En déduire la plus petite variation Δd d'ouverture correspondante. Seules les expressions littérales sont attendues.

On a : $d = a\alpha + b, x_D = K_D \alpha$ et $x_D = \frac{pas}{2\pi} \theta_3$, d'où : $\boxed{d = \frac{a \times pas}{K_D 2\pi} \theta_3 + b}$.

La sortie du codeur est sur 14 bits : $\boxed{\Delta \theta_3 = \frac{2\pi}{2^{14}}}$ et $\boxed{\Delta d = \frac{a \times pas}{K_D \times 2^{14}} \text{ mm/inc}}$

Remarque : l'application numérique donne $\Delta d = 0,66 \mu\text{m}$, ce qui est bien inférieur à l'exigence de précision de $1 \mu\text{m}$ sur l'ouverture de la pince.

III - Validation des exigences mécaniques de la pince

III.1 - Etude dynamique de la pince

Question 12 En exprimant la condition de roulement sans glissement au point I et en utilisant le résultat de la question 4, déterminer la vitesse de rotation $\omega_{4/0}$ d'un galet en fonction de la vitesse d'ouverture $\dot{\alpha}$. En déduire le gain K_G , tel que : $\omega_{4/0} = K_G \dot{\alpha}$.

Non-glissement si : $\vec{V}(I, 4/0) \cdot \vec{x}_2 = \vec{V}(I, 1/0) \cdot \vec{x}_2$ (i)

avec

$$\vec{V}(I, 4/0) = \vec{V}(I, 4/2) + \vec{V}(I, 2/0) = \vec{IC} \wedge \vec{\Omega}(4/2) + \dot{x}_D \vec{x}_0 \text{ car 2 en translation par rapport à 0}$$

$$\text{soit } \vec{V}(I, 4/0) = -R_g \vec{y}_2 \wedge \omega_{4/0} \vec{z}_0 + \dot{x}_D \vec{x}_0 = -R_g \omega_{4/0} \vec{x}_2 + \dot{x}_D \vec{x}_0 \text{ car } \omega_{4/0} = \omega_{4/2}$$

$$\vec{V}(I, 1/0) = \vec{IA} \wedge \vec{\Omega}(1/0) = -(x_E \vec{x}_1 + x_I \vec{x}_2) \wedge \dot{\alpha} \vec{z}_0 = \dot{\alpha} (x_E \vec{y}_1 + x_I \vec{y}_2)$$

D'où, en projetant (i) sur $\vec{x}_2$: $-R_g \omega_{4/0} + K_D \dot{\alpha} \cos(\alpha + \beta) = \dot{\alpha} x_E \sin \beta$

Avec la relation $\dot{x}_D = K_D \dot{\alpha}$, on obtient
$$\omega_{4/0} = \dot{\alpha} \frac{K_D \cos(\alpha + \beta) - x_E \sin \beta}{R_g}$$

Si α petit, négligeable devant $\beta = \pi/3$, on identifie
$$K_G = \frac{K_D - \sqrt{3} x_E}{2 R_g}$$

Question 13 Exprimer l'énergie cinétique $E_C(\Sigma/0)$ de l'ensemble $\Sigma = \{1, 1', 2, 3, 4, 4'\}$.

- 1 et 1' en rotation par rapport à 0 et $\dot{\alpha} = -\dot{\alpha}'$: $E_C(1/0) = E_C(1'/0) = \frac{1}{2} I_1 \dot{\alpha}^2$
- 2 en translation par rapport à 0 : $E_C(2/0) = \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_D^2$
- 3 en rotation par rapport à 0 : $E_C(3/0) = \frac{1}{2} I_3 \dot{\theta}_3^2$
- 4 et 4' en mouvement de rotation et translation par rapport à 0 avec $\omega_{4/0} = -\omega_{4'/0}$

$$E_C(4/0) = E_C(4'/0) = \frac{1}{2} m_4 \dot{x}_D^2 + \frac{1}{2} I_4 \omega_{4/0}^2$$

D'où :

$$E_C(\Sigma/0) = \frac{1}{2} (2I_1 \dot{\alpha}^2 + (m_2 + 2m_4) \dot{x}_D^2 + I_3 \dot{\theta}_3^2 + 2I_4 \omega_{4/0}^2)$$

Question 14 En déduire l'expression de l'inertie équivalent J_{eq} rapportée sur l'axe moteur, telle que

$$E_C(\Sigma/0) = \frac{1}{2} J_{eq} \dot{\theta}_3^2$$

Avec $\dot{x}_D = \frac{pas}{2\pi} \dot{\theta}_3$, $\dot{\alpha} = \frac{1}{K_D} \dot{x}_D = \frac{pas}{2\pi K_D} \dot{\theta}_3$ et $\omega_{4/0} = K_G \dot{\alpha}$

On obtient par identification :
$$J_{eq} = 2(I_1 + K_G^2 I_4) \frac{pas^2}{4\pi^2 K_D^2} + (m_2 + 2m_4) \frac{pas^2}{4\pi^2} + I_3$$

Question 15 Exprimer la puissance galiléenne des actions extérieures à l'ensemble Σ .

- liaisons parfaites avec le bâti : $P(0 \rightarrow i/0) = 0$
- couple moteur : $P(M0 \rightarrow 3/0) = C_m \dot{\theta}_3$ et $P(f0 \rightarrow 3/0) = -C_f \dot{\theta}_3^2$
- couples de rappel : $P(r0 \rightarrow 1/0) = -C_r \alpha \dot{\alpha}$ et $P(r0 \rightarrow 1'/0) = -C_r \alpha' \dot{\alpha}' = -C_r \alpha \dot{\alpha}$ car $\alpha = -\alpha'$
- action de l'objet sur 1 :

$$P(o \rightarrow 1/0) = F_0 \vec{y}_0 \cdot \vec{V}(B, 1/0) = F_0 \vec{y}_0 \cdot \dot{\alpha} (x_B \vec{y}_1 - y_B \vec{x}_1) = F_0 \dot{\alpha} (x_B \cos \alpha - y_B \sin \alpha)$$

$$\text{Soit, si } \alpha \text{ petit : } P(o \rightarrow 1/0) \approx F_0 \dot{\alpha} (x_B - y_B \alpha) \approx F_0 \dot{\alpha} x_B$$

- action de l'objet sur 1' : $P(o \rightarrow 1'/0) = -F_0 \vec{y}_0 \cdot \vec{V}(B', 1'/0) \approx -F_0 \dot{\alpha}' x_B = F_0 \dot{\alpha} x_B$
- action de l'utilisateur sur 1 et 1' : avec la même démarche que pour l'action de l'objet, on trouve

$$P(u \rightarrow 1/0) = P(u \rightarrow 1'/0) = -F_u \dot{\alpha} x_E$$

On obtient : $\boxed{\Sigma P(ext \rightarrow i/0) = (C_m - C_f \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_3 - 2C_r \alpha \dot{\alpha} + 2(F_0 x_B - F_u x_E) \dot{\alpha}}$

Question 16 Exprimer la puissance des actions intérieures à l'ensemble Σ .

- Liaisons intérieures parfaites : $P(i - j) = 0$

Une partie de la puissance dissipée par les frottements fluides correspond à des actions intérieures.

Question 17 Dédurre des questions précédentes C_{eq} , f_{eq} , l_u et l_o tels que :

$$J_{eq} \ddot{\theta}_3 + f_{eq} \dot{\theta}_3 + C_{eq} \theta_3 = -l_u F_u + l_o F_0 + C_m$$

Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à Σ , $\frac{dE_c(\Sigma/0)}{dt} = \Sigma P(ext \rightarrow i/0) + \Sigma P(i - j)$, donne :

$$J_{eq} \ddot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 = (C_m - C_f \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_3 - 2C_r \alpha \dot{\alpha} + 2(F_0 x_B - F_u x_E) \dot{\alpha}$$

soit : $J_{eq} \ddot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 = (C_m - C_f \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_3 - 2C_r \frac{pas^2}{4\pi^2 K_D^2} \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + 2(F_0 x_B - F_u x_E) \frac{pas}{2\pi K_D} \dot{\theta}_3$

$$J_{eq} \ddot{\theta}_3 + C_f \dot{\theta}_3 + C_r \frac{pas^2}{2\pi^2 K_D^2} \theta_3 = -x_E \frac{pas}{\pi K_D} F_u + x_B \frac{pas}{\pi K_D} F_0 + C_m$$

Par identification : $\boxed{f_{eq} = C_f}$

$$\boxed{C_{eq} = C_r \frac{pas^2}{2\pi^2 K_D^2}}$$

$$\boxed{l_u = x_E \frac{pas}{\pi K_D}}$$

$$\boxed{l_o = x_B \frac{pas}{\pi K_D}}$$

III.2 - Retour haptique

Question 18 Simplifier l'équation obtenue à la question 17 dans le cas de la pince maître et exprimer le couple moteur nécessaire dans cette situation.

Pince bloquée sans objet : θ_3 constant et $F_0 = 0$. L'équation devient $C_{eq} \theta_3 = -l_u F_u + C_m$

D'où $\boxed{C_m = C_{eq} \theta_3 + l_u F_u}$

Question 19 Simplifier l'équation obtenue à la question 17 dans le cas de la pince esclave et exprimer le couple moteur nécessaire dans cette situation.

Pince bloquée sans action de l'utilisateur : θ_3 constant et $F_u = 0$. On obtient $C_m = C_{eq}\theta_3 - l_0F_0$

Question 20 Conclure quant à la capacité du moteur à vérifier les exigences 1.4.1 et 2.1.1.1 dans ces deux cas d'utilisation.

L'exigence 2.1.1.1 indique que l'effort sur l'utilisateur ou sur l'objet pincé doit aller jusqu'à 5 N.

L'exigence 1.4.1 indique que l'intensité du courant moteur maximale est de 1,5 A correspondant à un couple $C_{max} = 1,5k_c \approx 5,25$ mNm.

Le couple nécessaire pour équilibrer 5 N provenant de l'utilisateur est de -2,75 mNm. Les exigences sont validées pour l'utilisateur.

Le couple nécessaire pour imposer 5 N sur l'objet est de 7 mNm, supérieur au couple maximal. Les exigences ne sont pas vérifiées dans cette situation.

III.3 - Modification de la raideur de la pince

Question 21 Exprimer le couple moteur C_m en fonction du couple C_{eq} et de la raideur apparente C_a , puis en fonction des raideurs naturelle C_r et apparente C_a .

Par soustraction de l'équation de la question 17 et de l'équation de l'énoncé :

$$C_m = \left(C_{eq} - 2C_a \left(\frac{pas}{2\pi K_D} \right)^2 \right) \theta_3$$

avec $C_{eq} = C_r \frac{pas^2}{2\pi^2 K_D^2}$, d'où :

$$C_m = 2(C_r - C_a) \left(\frac{pas}{2\pi K_D} \right)^2 \theta_3$$

Question 22 En déduire l'intensité du moteur i en fonction des raideurs naturelle C_r et apparente C_a . Donner la valeur de cette intensité si l'utilisateur souhaite utiliser la pince avec la raideur naturelle, c'est-à-dire pour $C_a = C_r$.

$$i = \frac{C_m}{k_c} = \frac{2}{k_c} (C_r - C_a) \left(\frac{pas}{2\pi K_D} \right)^2 \theta_3$$

$$i = 0 \text{ si } C_r = C_a.$$

IV - Etude du contrôle asservi de la pince et du retour haptique

IV.1 - Modélisation de l'asservissement de la pince

Question 23 Déterminer la fonction de transfert $H_4(p)$. Puis, en utilisant l'équation de la dynamique de la question 17, déterminer les fonctions de transfert $H_1(p)$, $H_2(p)$ et $H_3(p)$.

$$\omega_3 = \frac{d\theta_3}{dt}, H_4(p) \text{ est donc un intégrateur : } \boxed{H_4(p) = \frac{1}{p}}$$

L'équation de la dynamique donne : $J_{eq}p^2\theta_3(p) + f_{eq}p\theta_3(p) + C_{eq}\theta_3(p) = -l_u F_u(p) + l_o F_o(p) + C_m(p)$

avec $\theta_3(p) = \frac{\Omega_3(p)}{p}$ on obtient : $(J_{eq}p + f_{eq} + \frac{C_{eq}}{p})\Omega_3(p) = -l_u F_u(p) + l_o F_o(p) + C_m(p)$

$$\text{soit } \Omega_3(p) = \frac{p}{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2} (-l_u F_u(p) + l_o F_o(p) + C_m(p))$$

$$\text{Par identification : } \boxed{H_1(p) = l_u} \quad \boxed{H_2(p) = l_o} \quad \boxed{H_3(p) = \frac{p}{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2}}$$

Question 24 Exprimer l'écart $\varepsilon_p(p)$ en sortie du comparateur de la boucle de position en fonction de la consigne d'ouverture $d_c(p)$ et de l'ouverture $d(p)$ de la pince. En déduire l'expression du gain K_{conv} pour que l'asservissement de position soit correct.

$$\varepsilon(p) = K_{conv}(d_c(p) - b) - K_{jauges}\alpha(p) = K_{conv}(d_c(p) - b) - \frac{K_{jauges}}{k_6}(d(p) - b)$$

Si $d_c(p) = d(p)$, $\varepsilon(p) = (K_{conv} - \frac{K_{jauges}}{k_6})(d_c(p) - b)$ et $\varepsilon(p)$ doit être nulle pour toute valeur de $d_c(p)$.

$$\text{D'où la condition : } \boxed{K_{conv} = \frac{K_{jauges}}{k_6}}$$

IV.2 - Correction et performances de la boucle de courant

Question 25 Exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée de l'asservissement de courant et montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme suivante. Préciser les expressions des constantes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 et a_5 .

$$H_{BoI}(p) = \frac{I(p)}{U_m(p)} = \frac{1}{R} \frac{1 + a_1 p + a_2 p^2}{1 + a_3 p + a_4 p^2 + a_5 p^3}$$

$$I(p) = \frac{1}{R + Lp} (U_m(p) - K_e \Omega_3(p)) \text{ avec } \Omega_3(p) = \frac{K_c p}{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2} I(p)$$

En regroupant les termes : $I(p) \left(R + Lp + \frac{K_e K_c p}{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2} \right) = U_m(p)$, soit :

$$\begin{aligned} H_{BoI}(p) &= \frac{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2}{(R + Lp)(C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2) + K_e K_c p} \\ &= \frac{C_{eq} + f_{eq}p + J_{eq}p^2}{RC_{eq} + (Rf_{eq} + LC_{eq} + K_e K_c)p + (RJ_{eq} + Lf_{eq})p^2 + LJ_{eq}p^3} \end{aligned}$$

En factorisant C_{eq} au numérateur et RC_{eq} au dénominateur, on obtient la forme recherchée avec :

$$a_1 = \frac{f_{eq}}{C_{eq}}$$

$$a_2 = \frac{J_{eq}}{C_{eq}}$$

$$a_3 = \frac{Rf_{eq} + LC_{eq} + K_e K_c}{RC_{eq}}$$

$$a_4 = \frac{RJ_{eq} + Lf_{eq}}{RC_{eq}}$$

$$a_5 = \frac{LJ_{eq}}{RC_{eq}}$$

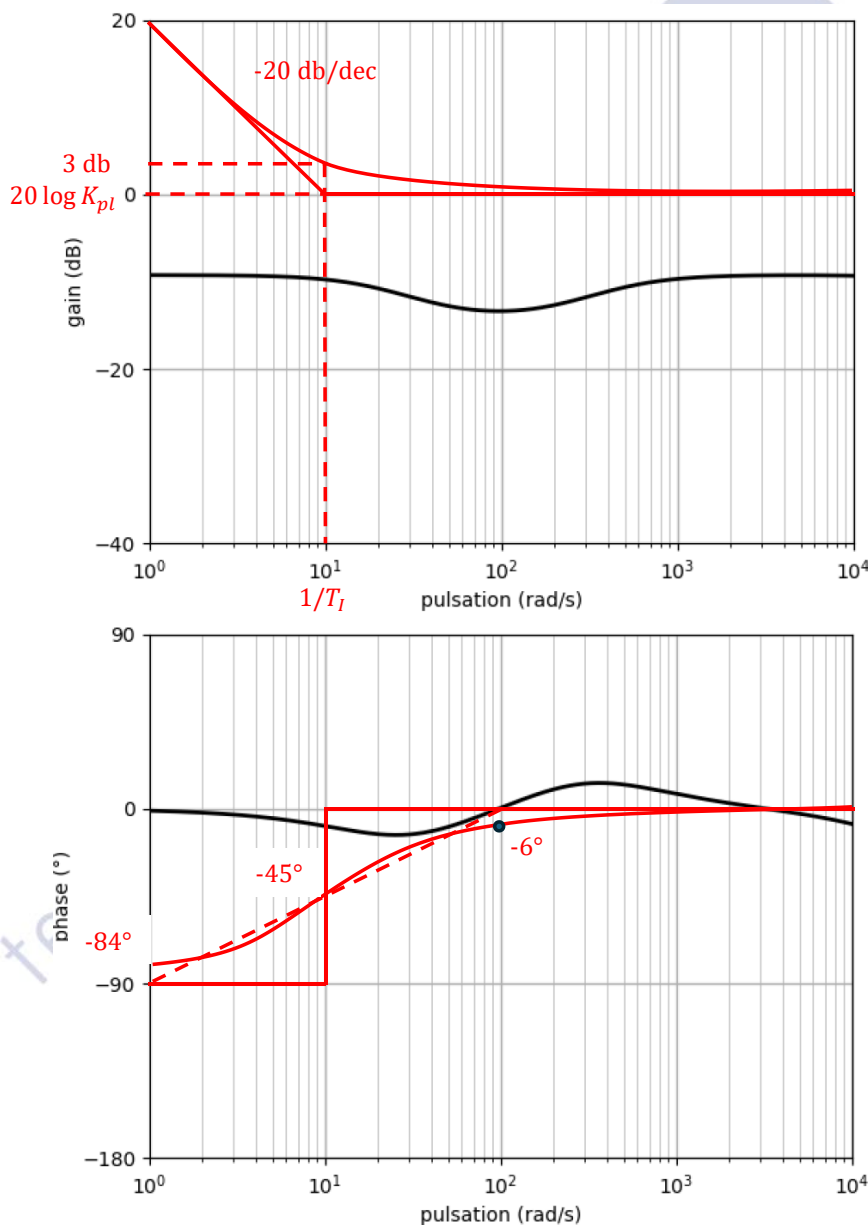
Question 26 Déterminer l'expression puis la valeur numérique du gain K_{pl} permettant de respecter l'exigence de précision de la boucle de courant.

La fonction de transfert en boucle ouverte est de classe 0. Si elle est stable, $e_{statique\%} = \frac{1}{1+K_{BO}}$ avec $K_{BO} = \frac{K_{pl}}{R}$.

L'exigence est : erreur statique inférieure à 5%.

D'où : $\frac{1}{1+K_{BO}} < 0,05 \Rightarrow K_{BO} > \frac{1}{0,05} - 1 \Rightarrow K_{pl} > 19 R$ avec $R = 2,9 \Omega$. Il faut $K_{pl} > 55,1 \Omega$

Question 27 Sur les mêmes diagrammes, superposer les diagrammes asymptotiques de Bode de ce correcteur ainsi que l'allure des diagrammes réels pour une constante de temps $T_I = 0,1$ s et un gain $K_{pl} = 1 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}$



Comportement basse fréquence :
intégrateur $\frac{K_{pl}}{T_I p}$

Comportement haute fréquence :
gain K_{pl} , soit 0 db

Pulsation de cassure : $\frac{1}{T_I} = 10 \text{ rad/s}$.

Question 28 Vérifier si les exigences de stabilité et de précision de la boucle de courant sont respectées avec ce correcteur. Expliquer en justifiant si ce résultat dépend des valeurs du gain K_{pl} .

La fonction de transfert de la boucle ouverte est de classe 1. L'erreur **statique est nulle** et l'exigence de **précision est validée**.

Les exigences de stabilité sont $M_\varphi > 45^\circ$ et $M_G > 10$ db.

La marge de phase est définie pour $\omega \approx 3,2$ rad/s. $M_\varphi > 90^\circ$.

Le comportement de $H_{BOI}(p)$ aux hautes fréquences est celui d'un intégrateur. La phase de $H_{BOI}(p)$ est supérieure à -90° . Idem pour le correcteur. La somme des phases n'atteint donc pas -180° , la marge de gain est infinie.

Les **exigences de stabilités sont validées**.

Si $K_{pl} < 1$, la courbe de gain est décalée vers le bas, la pulsation à 0 db diminue, mais les marges ne sont pas modifiées de façon importante. Les exigences sont vérifiées.

Si $K_{pl} > 1$, la courbe de gain est décalée vers le haut, la pulsation à 0 db augmente, sans valeur limite théorique. La marge de phase tend vers 0 mais reste positive. La marge de stabilité reste infinie.

L'exigence de précision ne dépend pas de K_{pl} .

IV.3 - Modification de la raideur de la pince

Question 29 Identifier dans quel cas le moteur assiste l'utilisateur et dans quel cas il s'oppose à l'action de l'utilisateur.

Pour $C_a = 1,1$ Nm/rad, le moteur assiste l'utilisateur, l'intensité du courant est positive.

Pour $C_a = 4,4$ Nm/rad, le moteur s'oppose au mouvement, l'intensité du courant est négative.

Question 30 Dédurre des courbes obtenues la valeur de la raideur naturelle C_r de la pince.

L'intensité du courant est nulle pour $C_a = 2,2$ Nm/rad, ce qui correspond à la raideur naturelle. **$C_r = 2,2$ Nm/rad**.

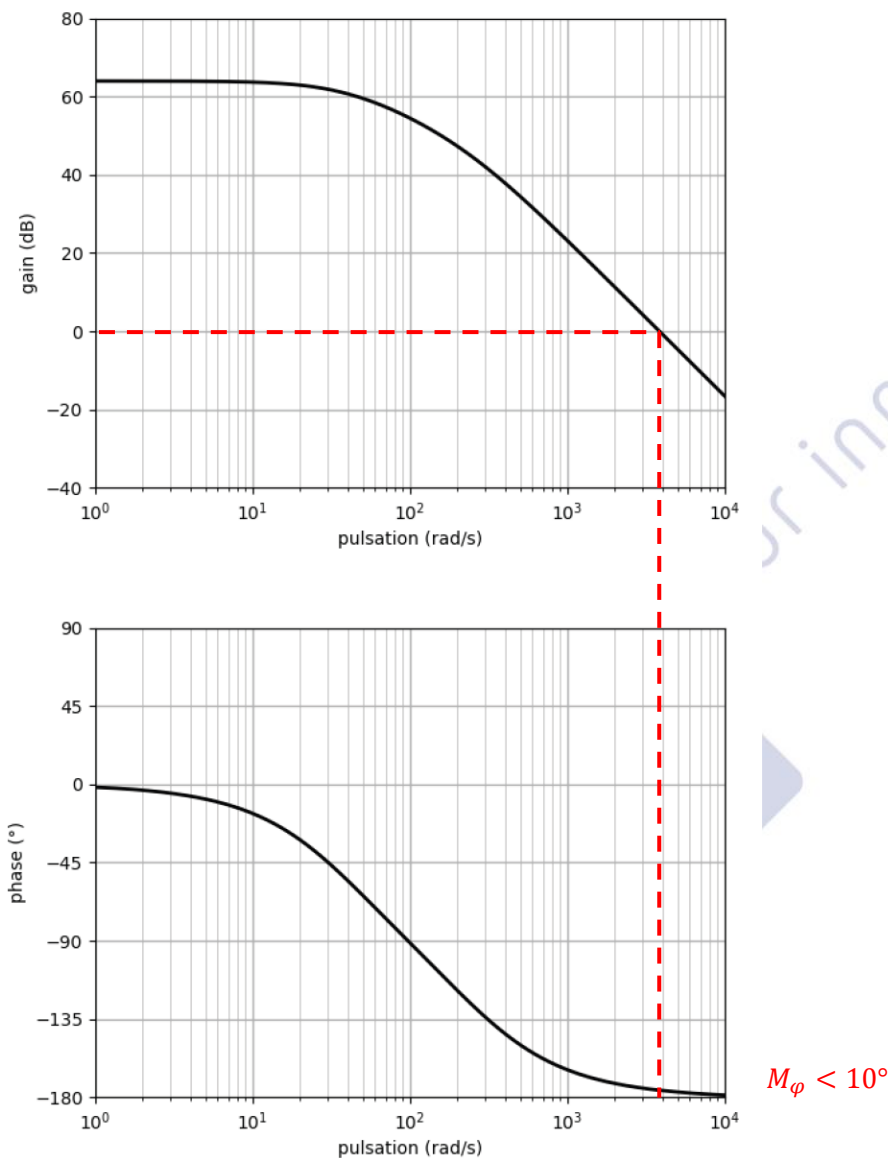
IV.4 - Correction et performances de la boucle de position

Question 31 Justifier ce choix de signe pour $C_p(p)$ en vous appuyant sur le gain K_{jauges} du système de jauges de déformation dont la valeur est donnée sur le diagramme SysML de définition des blocs, sachant que $k_5 > 0$. Expliquer en justifiant si l'exigence de précision de la boucle de position est respectée avec ce correcteur.

Un échelon de consigne positif doit conduire à une augmentation de l'angle α et donc à une commande en courant $i_c(t)$ positive. K_{jauges} et K_{conv} étant négatif, il faut que le gain du correcteur soit aussi négatif.

$\frac{I(p)}{I_c(p)}$ de classe 0, $H_3(p)$ de classe -1 et $H_4(p) = \frac{1}{p}$. La fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement en position est de classe 0. **L'erreur statique est donc non nulle ; l'exigence de précision n'est pas respectée.**

Question 32 Expliquer en justifiant si l'exigence de stabilité de la boucle de position est respectée avec ce correcteur.



L'exigence sur la marge de phase est de 60° . Elle n'est pas respectée.

Question 33 Afin de respecter les valeurs limites des exigences de rapidité et de stabilité (marge de phase) de la boucle de position à cette pulsation ω_{max} , justifier la méthode pour obtenir les valeurs numériques retenues de $a \approx 6$, $T_a \approx 4 \cdot 10^{-4}$ s et $K_{pp} \approx -3 \cdot 10^{-2}$ A/inc.

Les critères sont : bande passante à 0 db jusqu'à $\omega_{0db} = 1000$ rad/s, $M_\phi > 60^\circ$ et $M_G > 6$ db.

La marge de gain est automatiquement vérifiée ici.

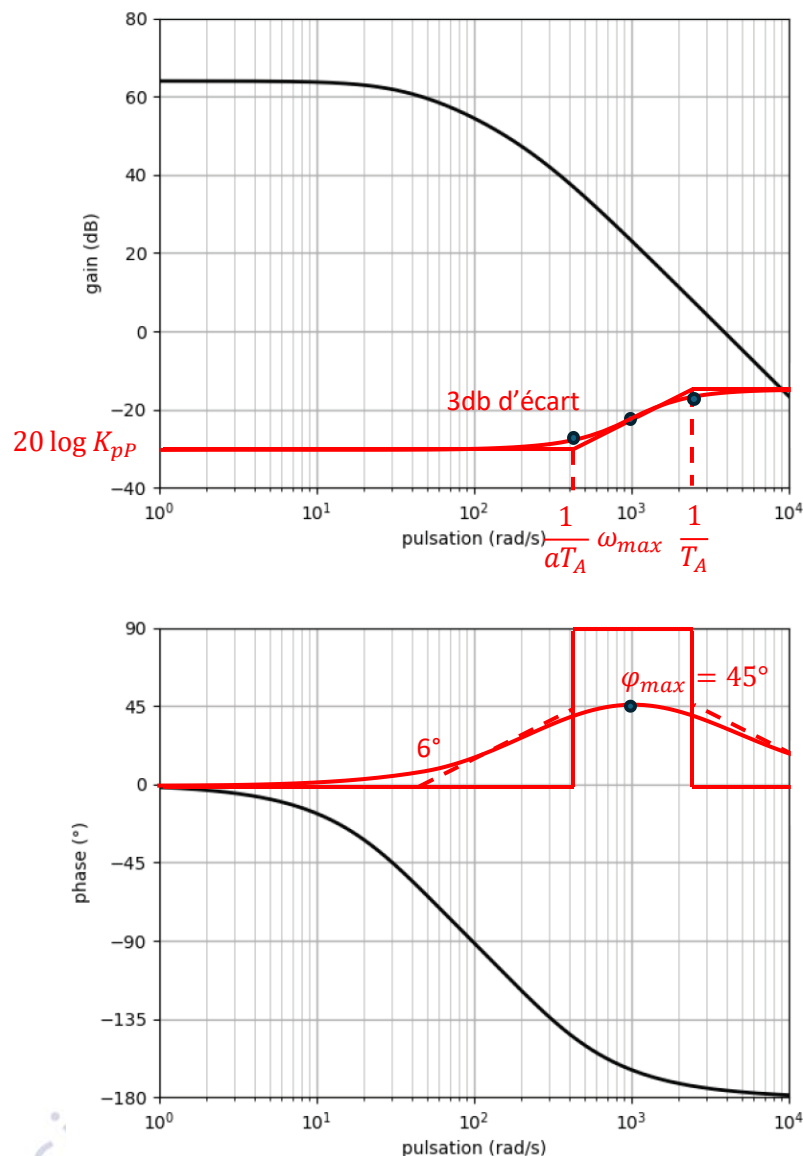
On suppose que la pulsation à 0 db est de 1000 rad/s.

A cette pulsation, il faut augmenter la phase de $60^\circ - 15^\circ \approx 45^\circ$. On en déduit la valeur de a .

La pulsation à 0 db, correspond à ω_{max} , on en déduit T_a .

Enfin, K_{pp} est défini pour que le gain à 1000 rad/s soit unitaire.

Question 34 Sur les mêmes diagrammes que ceux de la question 32, superposer les diagrammes asymptotiques de Bode de ce correcteur ainsi que l'allure des diagrammes réels en indiquant les valeurs remarquables en fonction de a , T_a et de K_{pp} .



Question 35 Expliquer comment choisir la constante de temps T_p afin de ne pas affecter le réglage précédent.

Pour que le correcteur proportionnel intégral ne modifie pas la phase à ω_{max} , il faut prendre $\frac{1}{T_p} \ll \omega_{max}$.

On pourra prendre $\frac{1}{T_p} = \frac{\omega_{max}}{30}$, soit un écart de 1,5 décade.

IV.5 - Retour haptique

Question 36 Commenter les courbes obtenues. Justifier les performances du retour haptique en vous appuyant sur les correcteurs choisis dans les parties précédentes. Comparer les valeurs de tension et de l'intensité aux valeurs du diagrammes SysML de définition des blocs.

A $t=0,1$ s, début la fermeture de la pince.

A $t = 0,2$ s, la commande simule la présence de l'objet, ce qui induit un pic de courant nécessaire pour arrêter brutalement le mouvement de la pince. C'est l'effet d'un choc.

Après $0,14$ s, s'établit un courant constant qui simule la réaction de l'objet sur les pinces. Cette réaction équilibre l'action de l'utilisateur.

De plus, pendant la phase de fermeture libre, entre $0,1$ s et $0,12$ s, on remarque une tension de commande $u_m(t)$ non nulle et positive, cohérente pour compenser la tension contreélectromotrice $e(t)$. L'intensité de consigne étant nulle, ce comportement est lié à la présence de l'intégrateur du correcteur $C_I(p)$.

Le temps de réponse à 5% de l'asservissement de courant est de $0,03$ s maximum. Les valeurs de tension $u_m(t)$ et d'intensité $i(t)$ ne sont effectivement pas stabilisées pendant cette phase.

Le début de la phase d'asservissement en position, à partir de $t=0,2$ s, comprend un léger dépassement sur l'ouverture, un pic de tension et un pic d'intensité (valeur maximale admissible non atteinte).

Si le temps de réponse ne peut être caractérisé, l'ouverture prend la valeur de consigne (erreur nulle en régime permanent) malgré la perturbation F_u et semble stabilisé en moins de $0,1$ s.

V - Etude des fonctionnements alternatifs de la pince

V.1 - Blocage de la fermeture

Question 37 Donner les expressions de r_1 et de r_2 associées au franchissement des transitions permettant de respecter le fonctionnement décrit.

r_1 : when (con=1)

r_2 : when (con=1)

V.2 - Commande en mode pince brucelles inversée

Question 38 Donner les expressions de r_3 , r_4 et de r_5 associées au franchissement des transitions permettant de respecter le fonctionnement décrit.

r_3 : when ($F_u > F_{u,max}$)[$\alpha > \alpha_{max}$]

r_4 : when ($F_u > F_{u,max}$)

r_5 : when ($\alpha < \alpha_{max}$)