



Étude d'un robot à câbles développé pour la manipulation de charges lourdes pour le génie civil

Présentation du système

Les robots parallèles à câbles (en anglais *Cable-Driven Parallel Robots*) sont une nouvelle structure de robots apparus au début des années 2000 et encore en développement actif. Dans ce système, la plate-forme est déplacée et orientée par rapport à une référence fixe dans toutes les directions de l'espace par l'enroulement ou le déroulement de plusieurs câbles (figure 1). Cette structure permet à la plate-forme d'atteindre une grande zone de travail avec, en tenant compte de l'inévitable déformation des câbles, une très grande précision dans le positionnement comme dans l'orientation.

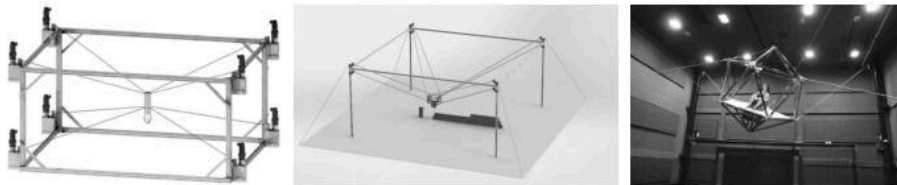


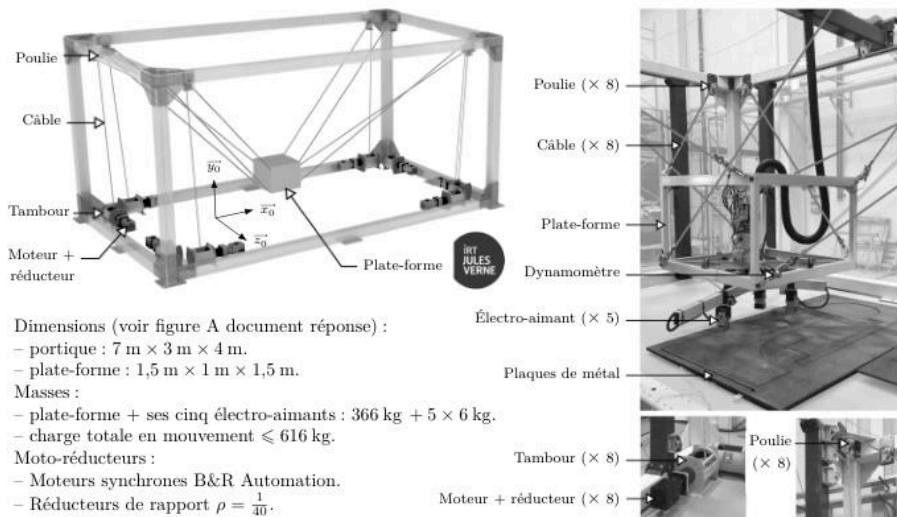
Plate-forme pilotée par huit câbles répartis – Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (Allemagne)

Plate-forme suspendue à huit câbles en zone supérieure pour le génie civil – Laboratoire de génie civil de l'Université de Duisburg (Allemagne)

Simulateur de vol à six degrés de liberté et huit câbles répartis – Max Planck Institute for Biological Cybernetics (Allemagne)

Figure 1 Quelques exemples de projets de robots à câbles

Le projet de robot à câbles CAROCA étudié dans la suite est de type « suspendu » comme le deuxième exemple de la figure 1. Il est développé dans plusieurs laboratoires à Nantes et sa structure est fournie figure 2.



Dimensions (voir figure A document réponse) :
- portique : 7 m × 3 m × 4 m.
- plate-forme : 1,5 m × 1 m × 1,5 m.
Masses :
- plate-forme + ses cinq électro-aimants : 366 kg + 5 × 6 kg.
- charge totale en mouvement ≤ 616 kg.
Moto-réducteurs :
- Moteurs synchrones B&R Automation.
- Réducteurs de rapport $\rho = \frac{1}{40}$.

Figure 2 Le robot à huit câbles à plate-forme suspendue étudié dans le sujet

III.B – Détection d'un défaut de positionnement

La valeur obtenue précédemment montre qu'il est indispensable de prendre en compte la position réelle de la plate-forme et que la seule mesure à distance, même en tenant compte des décalages, peut poser problème : il faut donc un autre système de mesure, ce qui est l'objet de la suite de l'étude.

Objectif

Détecter la défaillance d'un câble (blocage, rupture ou déformation trop importante) en comparant l'angle d'inclinaison de la plateforme à l'angle attendu en l'absence de problème.

Plusieurs options ont été explorées par les chercheurs pour détecter un éventuel défaut de positionnement et le compenser, entre autres en analysant l'image fournie par une caméra. La solution finalement adoptée s'appuie sur l'utilisation d'une centrale à inertie à base de MEMS (microsystème électromécanique) en connexion sans fil avec la carte de commande.

Cette centrale inertielle délivre les informations d'accélération et de taux de rotation selon trois axes orthogonaux, respectivement à l'aide d'accéléromètres et de gyromètres. La difficulté d'exploitation de ces informations pour déterminer avec une précision suffisante l'inclinaison de la plate-forme vient du fait que la gestion des informations est difficile. En effet,

- celle issue d'un accéléromètre est fortement bruitée ;
- et celle issue d'un gyromètre est affectée par un décalage conduisant à une dérive de la valeur de l'angle obtenu après intégration du taux de rotation.

La mise en place d'un filtre complémentaire numérique, étudié dans la suite de ce sujet, permet de remédier à ces inconvénients (figure 6). La structure du filtre complémentaire est fournie figure 7.

Dans toute la suite du sujet, les grandeurs dans le domaine temporel sont notées en minuscules et celles dans le domaine symbolique de Laplace en majuscules : ainsi, par exemple, si $f(t)$ est une fonction temporelle, $F(p)$ est sa transformée dans le domaine symbolique de Laplace.

Q 17. Déterminer, en fonction de K_f et de la variable de Laplace p , les fonctions $H_a(p)$ et $H_g(p)$ telles que

$$\dot{\Theta}(p) = H_a(p)\Theta_{acc}(p) + H_g(p)\Omega_{gyro}(p).$$

Q 18. Montrer que la structure de la figure 7 peut être mise sous la forme de la structure de la figure 8 : à cet effet, exprimer les fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$ en fonction de K_f et de la variable de Laplace p , à écrire sous forme canonique en donnant les expressions et unités des grandeurs canoniques.

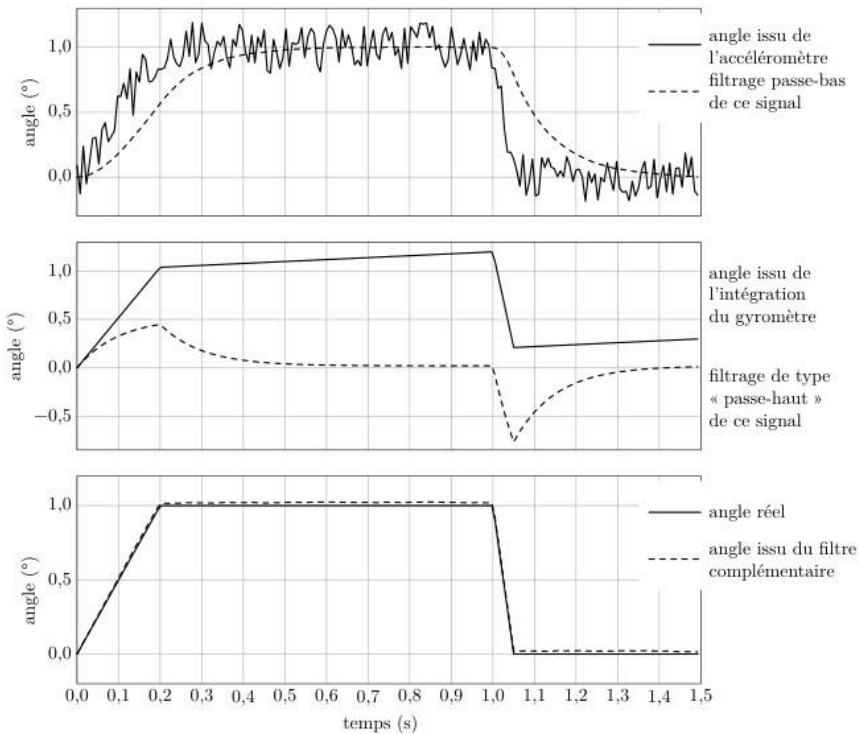


Figure 6 Influence du filtre complémentaire sur l'évolution

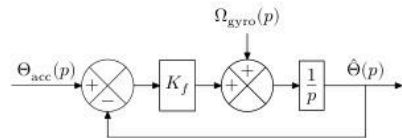


Figure 7 Schéma-bloc du filtre complémentaire

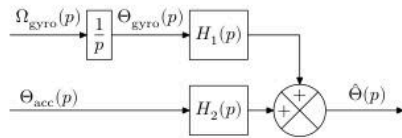


Figure 8 Évolution du schéma-bloc de la figure 7

Q 19. Tracer sur la copie la courbe asymptotique de gain et l'allure de la courbe réelle de gain du diagramme de Bode de ces deux fonctions de transfert en indiquant les grandeurs caractéristiques. Analyser alors le type de filtre associé à ces deux fonctions de transfert (« passe-bas », « passe-bande » ou « passe-haut »).

Le filtre complémentaire est réalisé sous forme numérique : les valeurs des grandeurs aux instants discrets $t = nT_e$ (avec T_e la période de calcul du filtre et $n \in \mathbb{N}$) des différentes grandeurs sont utilisées et, conformément à l'usage, elles sont notées dans la suite $\hat{\theta}(nT_e) = \hat{\theta}_n$, $\omega_{gyro}(nT_e) = \omega_{gyro_n}$ et $\theta_{acc}(nT_e) = \theta_{acc_n}$.

Q 20. En utilisant le résultat de question 17 et en approchant l'équation dans le domaine temporel par un schéma d'Euler explicite en considérant que la période T_e est très petite, exprimer $\hat{\theta}_n$ sous la forme de l'équation aux différences $\hat{\theta}_n = \mathcal{A}(\hat{\theta}_{n-1} + T_e \omega_{gyro_n}) + \mathcal{B} \theta_{acc_n}$ où les deux constantes \mathcal{A} et \mathcal{B} seront explicitées en fonction du gain K_f et de la période T_e .

L'information est traitée par un calculateur numérique sous la forme décrite par le diagramme d'état fourni figure C du document réponse.

- Dans l'état « Initialisation », toutes les grandeurs utilisées pour le traitement ultérieur sont initialisées ou définies : quand cela est fait, l'état est désactivé et l'état « Définition du filtre » est activé.
- Dans l'état « Définition du filtre » (à compléter), les grandeurs K_f (expression fournie), A et B (expressions à compléter) sont déterminées : quand cela est fait, l'état est désactivé et l'état « Acquisition » est activé.
- Dans l'état « Acquisition », les valeurs des accélérations selon les trois axes (grandeurs $AccX$, $AccY$ et $AccZ$) et les vitesses angulaires selon les trois axes (grandeurs $GyrX$, $GyrY$ et $GyrZ$) sont mesurées par la centrale inertielle, la transition vers l'état **Attente** étant effectuée dès que l'acquisition des six grandeurs a été faite : quand cela est fait, l'état est désactivé et l'état « Attente » est activé.
- L'état « Attente » dure jusqu'à l'instant nT_e suivant (événement à compléter). L'état « Traitement » (expressions à compléter) est alors activé et les angles d'orientations de la plate-forme sont déterminés : quand cela est fait, l'état est désactivé et l'état « Acquisition » est activé

Par ailleurs :

- l'instant en cours, qui évolue depuis la mise en service du calculateur, est déterminé par l'appel de la fonction `time()` (la valeur retournée est définie en μs) ;
- la variable Tn mémorise l'instant $t_n = nT_e$ où T_e est la période d'échantillonnage du calculateur (notée T_e dans l'état d'initialisation) ;
- et Dt correspond à la différence entre l'instant courant et le dernier instant d'échantillonnage.

Q 21. Répondre à cette question exclusivement sur la figure C du document réponse. Compléter les informations manquantes, indiquées par des pointillés, dans le diagramme d'état figure C du document réponse.

La partie précédente ayant permis d'analyser les incertitudes sur le positionnement de la plate-forme ainsi qu'un moyen de les estimer par une centrale inertielle, il faut ensuite vérifier les niveaux de puissance devant être délivrés aux moteurs pour déplacer la plate-forme : c'est l'objet de la partie suivante.