

Commande d'une micro-pince à actionnement électrostatique pour la maîtrise des forces de préhension à l'échelle micrométrique

Mokrane Boudaoud** Yassine Haddab* Yann Le Gorrec* Philippe Lutz*

* Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174 - UFC-ENSMM-UTBM; Département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M); 24, rue Alain Savary, 25000 Besançon - France

** Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Université Pierre et Marie Curie, CNRS UMR 7222, 4 Place Jussieu, F-75252 Paris Cedex, France

Résumé:

Cet article présente et détail le contenu de Travaux Pratiques (TP) mis en place dans le cadre d'une formation pluridisciplinaire en mécatronique. L'enseignement est destiné aux élèves ingénieurs en dernière année de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) et aux étudiants en master 2 mécatronique de l'Université de Franche-Comté (UFC). Le cadre applicatif est la commande de la force de préhension exercée par une micro-pince à actionnement électrostatique sur des billes en verre de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre. Le TP est réalisé en deux séances de 4 heures. Durant la première séance, les étudiants abordent la modélisation dynamique du système par une approche analytique, l'analyse des propriétés de commandabilité et d'observabilité du modèle ainsi que la caractérisation des bruits de mesure. La seconde séance est consacrée à la synthèse d'un filtre de Kalman et d'une loi de commande par retour d'état. Cette séance est clôturée par l'implémentation de la commande sur un banc d'essai expérimental comprenant un système robotique de micromanipulation et des échantillons de billes en verre devant être manipulées avec dextérité. Ce TP vise à mettre en application, sur une problématique commune, les enseignements dispensés dans différents modules de mécanique, de traitement du signal et d'automatique.

Mots clés: Modélisation dynamique, analyse des bruits, filtre de Kalman, commande LQG, force de préhension, micro-pince électrostatique.

1. INTRODUCTION

La reproduction de la dextérité de la main humaine sur des systèmes robotiques est une problématique scientifique active depuis de nombreuses années. Parmi les actions les plus complexes à reproduire subsiste la fonction de préhension qui nécessite l'utilisation de systèmes mécatroniques adaptés intégrant un ou plusieurs capteurs pour la mesure de la force de préhension.

En microrobotique [1], seul le préhenseur du robot doit posséder des dimensions comparables à celles des objets manipulés. Les préhenseurs de type micro-pinces sont une des solutions couramment utilisées en micromanipulation [2]. A ces échelles dimensionnelles ($1\mu\text{m}$ à 1mm), il est important que l'amplitude de la force de préhension exercée soit suffisamment grande pour un maintien efficace de l'objet et en même temps suffisamment faible pour ne pas détériorer ou détruire ce dernier. Asservir la force de préhension apparaît incontournable pour contrôler son amplitude et sa dynamique. Cependant, l'une des problématiques fondamentales liée à l'échelle considérée réside dans les faibles rapports signaux sur bruit des

mesures [3]. Cette particularité nécessite un filtrage adaptatif des mesures afin qu'elle puissent être utilisées dans une boucle d'asservissement. Le filtre doit permettre de restituer les signaux utiles "noyés" dans le bruit tout en préservant la dynamique du système.

L'objectif principal du TP porte sur la résolution d'un problème pluridisciplinaire en mécatronique devant être traité avec autonomie. Il traite notamment de : (1) la modélisation dynamique d'un effecteur de type micro-pince, (2) l'analyse et la caractérisation de signaux aléatoires (bruit de mesure), (3) la synthèse d'une loi de commande appropriée visant à satisfaire un cahier des charges et (4) la mise en œuvre de l'algorithme de commande sur un banc d'essai expérimental. Le fondement de ce TP est le fruit de résultats de recherche [3][4] obtenus au département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques de l'institut FEMTO-ST. Au delà du cadre applicatif du TP, les problématiques traitées peuvent être rencontrées dans divers secteurs technologiques tels que l'aéronautique, l'automobile et la robotique.

Ce document est organisé de la manière suivante: la section 2 définit le problème d'étude et l'organisation pédagogique du TP. Une brève description du système étudié et de son principe de fonctionnement sont présentés dans la section 3. Le contenu détaillé du TP, la plateforme expérimentale ainsi que le système de notation sont

* Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes.

Courriel: mokrane.boudaoud@isir.upmc.fr; yassine.haddab@femto-st.fr; legorrec@femto-st.fr; philippe.lutz@femto-st.fr.

énoncés dans les sections 5, 6 et 7 respectivement. Le document est clôturé par un bilan pédagogique et une conclusion.

2. POSITIONNEMENT DU PROBLÈME ET ORGANISATION PÉDAGOGIQUE

Le TP vise à mettre en œuvre expérimentalement une commande en force sur une micro-pince à actionnement électrostatique. La micro-pince étudiée [2] doit être capable de saisir une bille en verre de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre¹ avec une force de préhension de 10 μN en amplitude. Le bruit de mesure du capteur de force doit être filtré et doit être utilisé dans une boucle de commande. Afin d'aboutir au résultat escompté, les étudiants doivent établir un modèle dynamique simplifié de la micro-pince en phase de préhension. Des mesures expérimentales de bruits doivent être analysées et filtrées par l'algorithme de Kalman [5]. Une loi de commande de type Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) [6] doit par la suite être synthétisée en prenant en compte les critères du cahier de charges. A ce stade, tout le travail est réalisé en simulation en utilisant le logiciel Matlab et l'interface graphique Simulink. L'algorithme de filtrage et la commande sont par la suite transférés (implémentés) dans une carte de calcul de la société dSPACE. La commande implémentée en temps réel sur la plateforme de micromanipulation doit aboutir à des résultats expérimentaux mettant en avant une réelle maîtrise des forces de préhension.

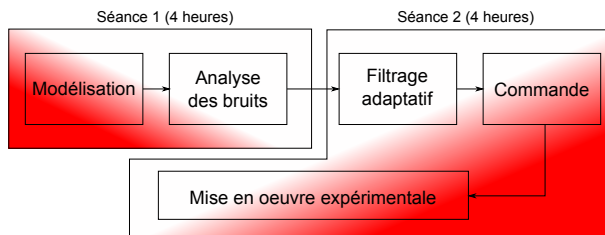


Fig. 1. Schéma pédagogique du TP.

Le TP est réalisé en deux séances de 4 heures (Fig. 1). La modélisation dynamique du système par une approche analytique, l'analyse des propriétés de commandabilité et d'observabilité du modèle ainsi que la caractérisation des bruits de mesure sont abordés durant la première séance. A la fin de cette séance, il est demandé aux étudiants de réaliser une recherche bibliographique sur le principe de fonctionnement de l'algorithme de filtrage de Kalman. Ce travail doit être effectué en dehors des séances de TP et doit être remis à l'enseignant sous forme d'un document papier au début de la deuxième séance. Durant cette séance, la synthèse d'un filtre de Kalman et d'une loi de commande par retour d'état sont abordés.

Les étudiants effectuent l'ensemble du TP en binômes. Un ordinateur est mis à disposition pour chaque binôme. La plateforme expérimentale est commune pour l'ensemble des étudiants. Chaque binôme ayant validé le programme de filtrage et de commande par simulation peut le transférer dans l'ordinateur dédié à l'expérimentation.

3. DESCRIPTION DE LA MICRO-PINCE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La micro-pince étudiée fait partie de la famille FT-G du catalogue de la société FemtoTools. La micro-pince FT-G100 [2] permet de réaliser des tâches de préhension sur

¹ Les échantillons de billes n'ont pas un diamètre étalonné. Ce dernier doit être cependant inférieur à 100 μm compte tenu de l'écartement initial des doigts de serrage.

des objets de tailles inférieures à 100 μm (diamètre d'un cheveu). Elle comprend un capteur de force ayant une résolution théorique de 50 nN à 1 kHz.

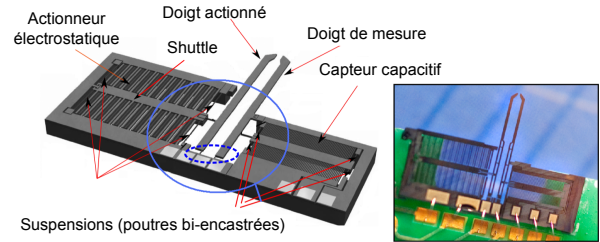


Fig. 2. Architecture de la micro-pince FT-G100.

Cette micro-pince possède deux doigts de manipulation: un doigt actionné et un doigt de mesure (Fig. 2). Pour saisir un objet, le doigt actionné est mis en mouvement grâce à un actionneur électrostatique à peignes inter-digités². Les éléments mobiles de l'actionneur sont liés à un mécanisme de suspension comprenant une paire de poutres bi-encastées. Par ailleurs, le capteur de force est constitué de deux condensateurs montés en mode différentiel possédant une capacité différentielle nulle en l'absence de contraintes mécaniques. Chaque condensateur comprend plusieurs étages de peignes inter-digités constitués d'électrodes fixes rattachées à un bâti, et d'électrodes mobiles reliées au doigt sensoriel. La structure mobile du capteur est liée au bâti par l'intermédiaire de deux poutres bi-encastées de mêmes dimensions (mécanisme de suspension).

Lorsque les doigts de manipulation sont en contact avec un objet, le mouvement du doigt de mesure est détecté par le capteur capacitif. Connaissant la raideur du mécanisme de suspension du capteur, la force de préhension est déduite à partir de l'amplitude de déplacement du doigt de mesure lors d'une préhension. Au repos, la distance séparant l'extrémité des doigts de manipulation est égale à 100 μm . L'amplitude maximale de la tension admissible par l'actionneur est égale à 200 V.

4. PRÉPARATION À RÉALISER PAR L'ENSEIGNANT

Afin de mener à bien les séances de TP, l'enseignant doit réaliser les tâches suivantes : (1) préparation du banc d'essai expérimental, (2) identification expérimentale des modèles propres aux mécanismes d'actionnement et de mesure du système, (3) calcul de la raideur des suspensions au sein du mécanisme de mesure (4) mesures expérimentales des bruits (bruit de mesure et bruit d'état), (5) préparation du schéma Simulink du filtre de Kalman et (6) préparation d'un algorithme de calcul d'une Transformée de Fourier.

L'intérêt de cette préparation est expliqué dans la suite de l'article.

5. CONTENU DU TP ET PROBLÉMATIQUES ABORDÉES

5.1 Modélisation de la préhension

Modélisation de la préhension : La commande en force intervient à l'instant où le contact entre les doigts de manipulation et l'objet manipulé a lieu (Fig. 3a). Afin de synthétiser la loi de commande, il est nécessaire de

² Comb-drive en terminologie anglo-saxonne.

définir un modèle dynamique du préhenseur. Le modèle doit définir la relation dynamique entre la force de préhension F_c et la tension d'alimentation de l'actionneur V_{in} . Ce modèle doit prendre en compte la dynamique du mécanisme d'actionnement (actionneur + doigt actionné), du mécanisme de mesure (doigt de mesure + capteur), ainsi que la raideur de l'objet. Une modélisation dans l'espace d'état est retenue.

Le modèle dynamique du mécanisme d'actionnement et celui du mécanisme de mesure sont identifiés par l'enseignant lors de la préparation du TP. Ces deux modèles sont mis à la disposition des étudiants. Ce sont des modèles du second ordre de type masse-ressort-amortisseur. Le modèle du mécanisme d'actionnement représente le transfert dynamique x_a/V_{in} , où x_a est le déplacement de l'extrémité du doigt actionné (Fig. 3a). Par ailleurs, le modèle du mécanisme de mesure définit le transfert dynamique x_b/F_c , où x_b est le déplacement de l'extrémité du doigt de mesure.

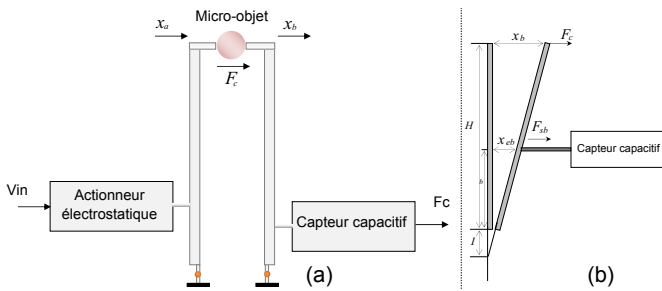


Fig. 3. Système à modéliser (a). Schéma simplifié illustrant le mouvement du doigt de mesure en réponse à une force extérieure F_c (b)

En adoptant l'hypothèse que l'objet manipulé a le comportement d'un ressort de raideur connue k_0 , il est possible de définir un modèle simplifié de la force de préhension comme suit :

$$F_c = k_0 \cdot (x_a - x_b) \quad (1)$$

Il est demandé aux étudiants de définir l'expression analytique du modèle d'état généralisé de la micro-pince en phase de préhension de la forme (2). Le vecteur d'état doit comprendre les états du mécanisme actionné X_a ainsi que ceux du mécanisme de mesure X_b . L'entrée et la sortie du modèle généralisé sont respectivement la tension V_{in} et la force de préhension F_c . Les étudiants utilisent les modèles propres aux mécanismes d'actionnement et de mesure et la relation (1) pour définir les matrices A_{coup} , B_{coup} et C_{coup} , tel que

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{X}_a \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} = A_{coup} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \end{bmatrix} + B_{coup} \cdot V_{in} \\ F_c = C_{coup} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

Détermination de la raideur du mécanisme de mesure :

La raideur des suspensions du mécanisme de mesure K_{sb} est donnée aux étudiants. Afin de simuler le modèle (2) dans le logiciel Matlab, il est nécessaire de trouver la valeur de la raideur k_2 qui lie le déplacement x_b à la force F_c . Le travail demandé aux étudiants consiste à déterminer k_2 connaissant K_{sb} ainsi que les dimensions H , b et l tels que représentés dans Fig. 3b.

Programmation 1 : Les étudiants définissent un fichier nommé "tpmicro.m" qu'ils enregistrent dans un répertoire. Le modèle (2) doit être programmé dans le fichier "tpmicro.m". Le modèle continu est converti sous forme discrète avec une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz. Par la suite, l'analyse de certaines propriétés du modèle discret est effectuée, à savoir: (i) analyse de stabilité à partir des pôles, (ii) analyse du lieu de Bode, (iii) analyse des propriétés de commandabilité et d'observabilité. Le calculateur numérique utilisé pour l'implémentation expérimentale de la commande possède une interface avec la plateforme graphique Simulink. Ainsi, le programme réalisé dans le fichier "tpmicro.m" est traduit sous forme graphique avec Simulink (voir Fig. 5). Les étudiants effectuent dans Simulink une simulation de la réponse indicielle en boucle ouverte du modèle discret pour un échelon de 10 V et déduisent le temps de réponse de la micro-pince en préhension.

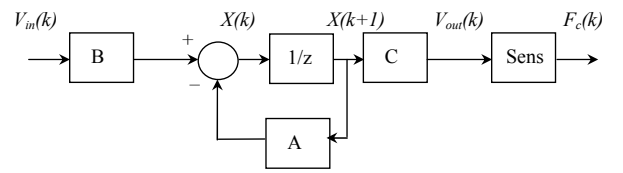


Fig. 5. Schéma bloc du modèle discret à réaliser dans Simulink.

5.2 Filtrage adaptatif de Kalman

Dans la section précédente, le comportement dynamique de la micro-pince a été modélisé sous forme d'une représentation d'état discrète. La sortie du modèle est la force de préhension F_c qui expérimentalement est délivrée par le capteur capacitif. Cette mesure étant fortement bruitée, il est nécessaire dans un premier temps de caractériser la nature des différents bruits perturbants les états du système et dans un second temps d'utiliser les propriétés de variance de ces bruits pour la synthèse d'un filtre adaptatif. L'algorithme de filtrage utilisé dans le TP est celui de Kalman [5]. Il a pour intérêt l'estimation en temps réel des variables d'état du système bruité.

Le filtrage de Kalman utilise une représentation d'état comprenant une partie stochastique modélisée sous forme d'un bruit d'état $w(k)$ et d'un bruit de mesure $v(k)$. Cette représentation est également connue sous le nom de modèle de Kalman.

En considérant le modèle discret de la micro-pince en phase de préhension de matrices d'état $(A_d, B_d, C_d, 0)$ et de vecteur d'état X_d , le modèle de Kalman est défini comme suit :

$$\begin{cases} X_d(k+1) = A_d \cdot X_d(k) + B_d \cdot V_{in}(k) + M \cdot w(k) \\ F_c(k) = C_d \cdot X_d(k) + v(k) \end{cases} \quad (3)$$

$w(k)$ et $v(k)$ sont respectivement les signaux de bruits d'état et de bruit de mesure respectivement. M est une matrice d'entrée.

Le principe de l'algorithme de Kalman (voir Fig. 4) est basé sur une étape de prédiction qui s'appuie sur le modèle déterministe du système perturbé et une étape de recalage (correction) qui tient compte de la différence entre la mesure bruitée et la sortie prédite (innovation). Durant l'**étape de prédiction**, l'algorithme de Kalman réalise une projection (prédiction) de l'état du système à un instant $k+1$ [noté $\hat{X}(k+1/k)$]. Cette prédiction est effectuée

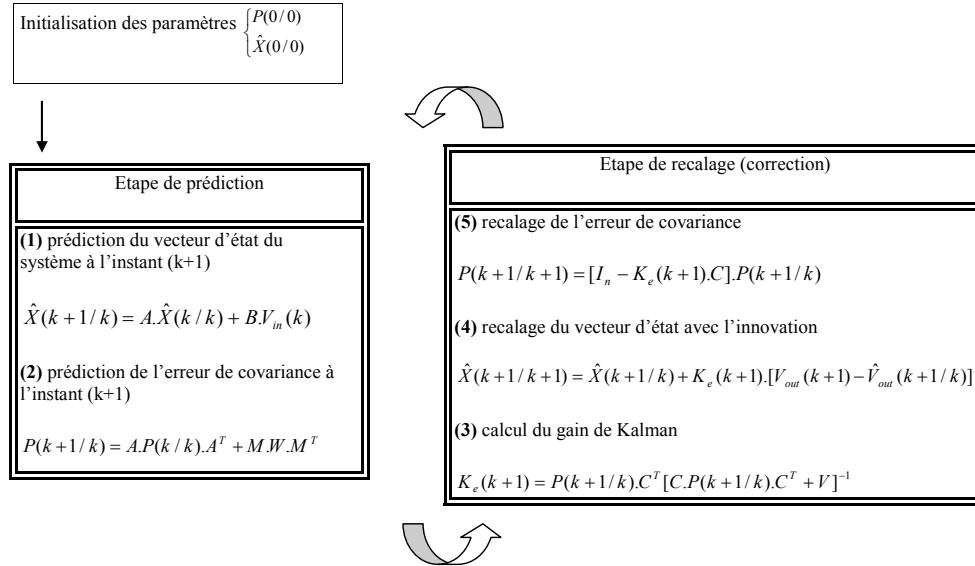


Fig. 4. Algorithme récursif de Kalman.

à l'aide des équations récurrentes du modèle déterministe à l'instant k (équations 1). Le calcul de l'erreur de prédiction à l'instant $k+1$ [notée $P(k+1/k)$] est par la suite réalisé par exploitation de l'erreur d'estimation à l'instant k (équation 2). Par ailleurs, l'**étape de recalage** constitue la phase de correction, qui consiste à mettre à jour l'état prédit à l'instant $k+1$ et à obtenir l'estimée de l'état $\hat{X}(k/k)$ de manière plus précise. Cette correction exploite d'une part l'état prédit $\hat{X}(k+1/k)$ et d'autre part l'erreur entre la sortie réelle du processus $V_{out}(k+1)$ et la sortie prédite au même instant $\hat{V}_{out}(k+1/k)$. Cette erreur appelée innovation est pondérée par le gain de Kalman $K_e(k+1)$.

Le formalisme de Kalman est soumis aux hypothèses suivantes :

- H1 : la paire (A_d, C_d) est observable,
- H2 : les signaux $w(k)$ et $v(k)$ sont des bruits blancs Gaussiens centrés de matrices de covariance W et V respectivement, i.e. $w(k) \sim N(0, W)$ et $v(k) \sim N(0, V)$,
- H3 : les bruits considérés dans le système pris à deux instants différents sont supposés indépendants, i.e. $E[w(k)w(k+l)^T] = W\delta(l)$ et $E[v(k)v(k+l)^T] = V\delta(l)$. δ étant le symbole de Kronecker définissant la condition suivante: $\delta_{k,j} = 1$ si $j = k$ et $\delta_{k,j} = 0$ sinon,
- H4 : les bruits d'état et de mesure sont indépendants, i.e. $E[w(k)v(k+l)^T] = 0$,
- H5 : V est inversible.

$E(.)$ désigne l'espérance mathématique

Ainsi, avant de synthétiser un filtre de Kalman, il convient de vérifier les hypothèses précédente. Cette vérification est réalisée par les étudiants en caractérisant des mesures de bruits expérimentales mis à disposition par l'enseignant sous forme de deux vecteurs de données (fichiers brm.csv et bre.txt).

Analyse des bruits : Le bruit de mesure est un signal aléatoire parasite venant se superposer au signal utile issu du capteur de force. D'autre part, au vu du modèle (2), il est possible d'adopter l'hypothèse que le bruit de la source d'alimentation est à l'origine du bruit d'état. Les

enregistrements de bruits sont réalisés par l'enseignant lors de la préparation du TP. Les étudiants utilisent les données obtenues (fichiers brm.csv et bre.txt pour les bruits de mesure et d'état respectivement). L'enregistrement du bruit de mesure a été effectué à la sortie du capteur de force lorsqu'aucune sollicitation mécanique volontaire est appliquée à l'extrémité du doigt de mesure. Le bruit d'état a été enregistré à la sortie de la source d'alimentation lorsque cette dernière ne délivre aucune tension désirable.

Les étudiants chargent les fichiers bre.txt et brm.csv et procèdent à l'analyse de ces signaux : (1) visualisation des signaux dans le domaine temporel, (2) analyse fréquentielle par le biais d'une Transformée de Fourier et (3) analyse des propriétés statistiques (histogramme et calcul de variances).

Compréhension du principe du filtre de Kalman : Les étudiants réalisent une recherche bibliographique entre les deux séances du TP. A partir de l'équation (3) de Fig. 4, chaque étudiant doit commenter et expliquer l'évolution du gain de Kalman K_e en fonction de la covariance du bruit de mesure V . De même, sachant que l'erreur de covariance prédite est initialement définie comme suit $P(k+1/k) = E[(X(k+1) - \hat{X}(k+1/k)).(X(k+1) - \hat{X}(k+1/k))^T]$ (E symbolisant la moyenne), l'évolution gain de Kalman K_e lorsque l'état estimé $\hat{X}(k/k)$ devient très proche de l'état prédit $\hat{X}(k+1/k)$ doit être expliqué. Les questions posées aux étudiants ont pour but de les guider vers une compréhension et une maîtrise du filtre de Kalman.

5.3 Commande en force

Mode opératoire : L'objectif de l'étude est la manipulation de micro-billes en verre de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre (Fig. 6). La manipulation doit être réalisée avec un contrôle de la force de préhension en boucle fermée. Dans un premier temps, il est important de réaliser un positionnement du manipulateur de manière à ce que la bille soit en contact uniquement avec l'extrémité du doigt de mesure. La commande en force à lieu au moment où l'extrémité du doigt actionné entre également en contact avec l'objet manipulé.

Compte tenu de l'absence d'un système de mesure associé au doigt actionné, le positionnement de ce dernier est

réalisé en boucle ouverte avec une tension d'excitation de 70 V. Par ailleurs, étant donnée la raideur importante des micro-billes de verre estimée approximativement à 1000 N/m, l'application d'une force de préhension supérieure à celle pouvant être mesurée par le capteur engendrerait la destruction des doigts de manipulation et non celle de la bille. Pour cette raison la tension maximale admissible correspond à celle impliquant un déplacement de 20 μm à l'extrémité du doigt de mesure, cette tension est évaluée à 100 V. Enfin, si la micro-pince est amenée à réaliser un déplacement de l'objet saisi, la dynamique de la force de préhension doit être suffisamment rapide pour ne pas perdre les objets au cours du déplacement et les oscillations de la force de préhension en régime transitoire doivent être atténuées.

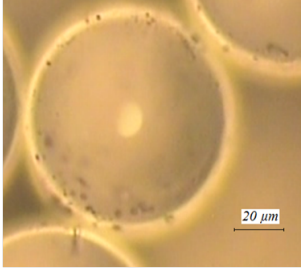


Fig. 6. Micro-bille en verre vue au microscope.

Commande : La commande Linéaire Quadratique Gaussienne (LQG) [6] est retenue pour satisfaire le cahiers des charges imposé. Cette commande fait partie de la famille des commandes dites "optimales". Elle est basée sur la minimisation d'un critère énergétique. L'approche LQG comprend un contrôleur de type linéaire quadratique (LQ) et un estimateur de Kalman pouvant être calculé indépendamment du contrôleur selon un principe de séparation.

La commande LQ permet de placer les pôles du modèle discret en boucle fermée. Elle est fondée sur un critère quadratique $J(k)$ défini comme suit :

$$J(k) = \sum_{i=k}^{\infty} X_d^T(i) \cdot Q \cdot X_d(i) + V_{in}^T(i) \cdot R \cdot V_{in}(i) \quad (4)$$

Dans un cadre générale, Q et R sont des matrices diagonales qui définissent respectivement le degré d'importance donné aux états du système et à la commande dans le critère quadratique. Les paramètres Q et R permettent ainsi de modifier et d'ajuster la dynamique du système en boucle fermée.

Le gain du retour d'état K_c (voir Fig. 7) est calculé dans le but de minimiser le critère quadratique $J(k)$ tout en assurant la stabilité du système en boucle fermée. Ce gain est défini comme suit :

$$K_c = (R + B^T \cdot P_c \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot P_c \cdot A \quad (5)$$

P_c est la solution de l'équation de Riccati qui représente la base des théories modernes en commande optimale.

Les étudiants définissent l'expression du pré-filtre L (Fig. 7) et calculent sa valeur numérique pour annuler l'erreur statique. Autrement dit, il faut trouver L tel que $F_{cc} = F_c$ où F_{cc} est la consigne en force. Par la suite, le gain K_c est calculé à partir des paramètres Q

et R . Ces paramètres³ doivent conduire aux propriétés du modèle en boucle fermée suivantes: (1) dépassement nul, (2) temps de réponse à 5 % inférieur à 10 ms et (3) tension maximale admissible égale à 10 V autour du point de fonctionnement.

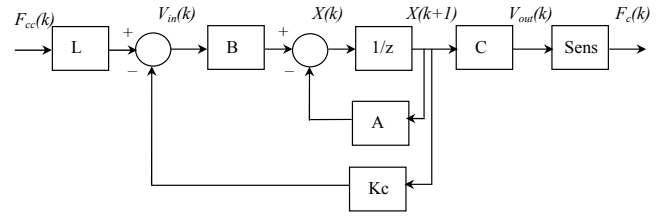


Fig. 7. Schéma du modèle discret bouclé par un gain statique K_c .

Le schéma du modèle discret bouclé par le gain statique K_c est construit dans Simulink. Ce schéma est augmenté par l'introduction du filtre de Kalman. Rappelons que le schéma Simulink du filtre de Kalman est construit par l'enseignant lors de la préparation du TP. Il n'est pas demandé aux étudiants de le réaliser durant la séance de TP. Les mesures expérimentales du bruit de mesure et du bruit d'état sont prises en compte dans le schéma Simulink pour une simulation réaliste de la commande LQG. Chaque binôme doit présenter des résultats de simulation de la force contrôlée pour une consigne de 10 μN . Dans une figure commune, le signal bruité de la force de préhension doit être superposé à au signal filtré du schéma. Les binômes ayant démontré des résultats de simulation pertinents entame la dernière phase du TP, à savoir l'implémentation du programme Simulink au sein d'une carte de calcul pour la commande de la micro-pince dans des conditions expérimentales.

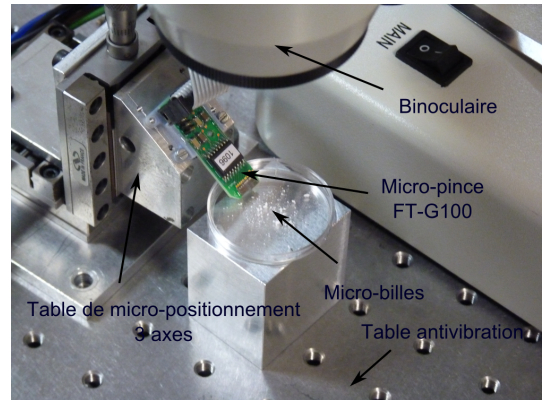


Fig. 8. Banc d'essai expérimental.

6. IMPLÉMENTATION EN TEMPS RÉEL ET EXPÉRIMENTATIONS

6.1 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale comprend les éléments suivants (Fig. 8):

- Une micro-pince (FT-G100, FemtoTools).
- Une table de micro-positionnement à 3 axes (M-UMR 5.16, Newport) sur laquelle la micro-pince est fixée.
- Une table anti-vibration.
- Une binoculaire.

³ L'enseignant doit guider les étudiants pour le choix des paramètres Q et R .

- Une carte de commande dSPACE avec une interface homme/machine temps réel.
- Des échantillons de micro-billes en verre de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre.

Le schéma de la commande LQG est illustré sur Fig. 9. Ce schéma est construit en utilisant l'interface graphique Simulink et est implémenté dans une carte de calcul de la société dSPACE avec une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz.

L'expérimentation est réalisée en suivant les étapes suivantes: (1) Le programme de commande réalisé dans Simulink est implémenté dans la carte de calcul. A ce state, la tension appliquée à l'actionneur doit être nulle. (2) A l'aide de la table de micro-positionnement, la micro-pince est positionnée de manière à ce que l'extrémité du doigt de mesure soit en contact avec une micro-bille. (3) Une tension électrique est appliqué à l'actionneur électrostatique pour la mise en contacte de l'extrémité du doigt actionné avec la micro-bille. (4) Les doigts de manipulation étant en contact avec la micro-bille, une force de référence F_{cc} de 10 μN est renseignée à l'entrée du schéma de commande. Cette information est introduite en temps réel en utilisant l'interface homme/machine. (5) La mesure du capteur de force est enregistrée dans un fichier Excel. L'évolution temporelle de cette mesure est affichée à l'aide de la fonction *plot* de Matlab. Les étudiants vérifient si la dynamique de cette force remplit les exigences du cahier des charges.

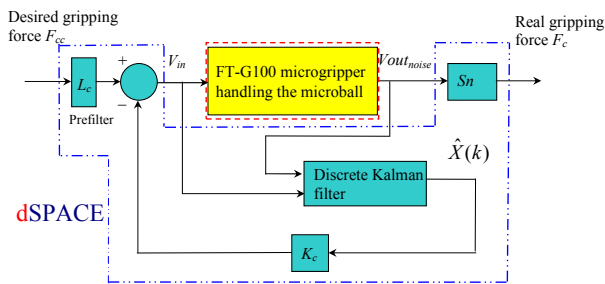


Fig. 9. Schéma bloc du système de manipulation bouclé par approche LQG.

7. SYSTÈME DE NOTATION

Chaque binôme rédige un rapport sur le travail réalisée durant les deux séances de TP. Ce rapport doit être remis à la fin de la deuxième séance du TP. Le système de notation est défini comme suit: 50 % de la note porte sur l'appréciation de l'enseignant sur le travail accompli par 'chaque' étudiant durant les deux séances de TP. 10 % de la note est relative au travail de recherche réalisé par chaque étudiant en dehors des séances de TP (rapport sur les filtre de Kalman). Enfin, le compte rendu des séances de TP est noté pour chaque binôme et porte sur 40 % de la note finale. Ainsi, 60 % de la note porte sur le travail individuel et le reste sur le travail en binôme.

8. BILAN PÉDAGOGIQUE

La problématique abordée par les étudiants permet de mettre en application les connaissances pluridisciplinaires acquises en mécanique, en automatique et en traitement du signal. Ce TP a pour objectif de démontrer l'intérêt d'allier ces différentes connaissances pour aboutir à un résultat technologique. Il contribue également à réduire l'écart entre des concepts théoriques fondamentaux et une mise en œuvre expérimentale d'un système mécatronique.

De même, ce TP aborde les étapes nécessaires à franchir pour l'aboutissement d'un projet technologique.

A la fin du TP (implémentation expérimentale), les étudiants avaient un réel sentiment d'avoir accompli un travail complet en mécatronique. Partant d'un modèle dynamique théorique d'un système de manipulation, la plupart des étudiants ont réussi à démontrer que leur travail conduit à une maîtrise réelle des forces de préhension à l'échelle du micromètre. Cette problématique était depuis de nombreuses années un sujet de recherche ouvert. Outre l'intérêt pédagogique de cette formation en mécatronique, le travail réalisé est également une ouverture vers le domaine de la recherche.

La problématique abordée est le fruit de résultats de recherche. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans un journal international à comité de lecture en mécatronique [3] et une conférence internationale à comité de lecture en robotique [4].

9. CONCLUSION

Cet article a présenté le contenu de travaux pratiques en mécatronique destinés aux élèves ingénieurs en dernière année de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) et aux étudiants en master 2 mécatronique de l'Université de Franche-Comté (UFC). Le TP a porté sur la modélisation et la commande d'une micro-pince actionnée par un principe électrostatique pour la maîtrise des forces de préhension à l'échelle du micromètre. Réalisé en deux séances de quatre heures, le TP a permis d'arborer une problématique pluridisciplinaire en mécanique, en automatique et en traitement du signal. Le sujet traité est issu de résultats de recherche récents obtenus au département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques de l'institut FEMTO-ST. Les problématiques inhérentes au système étudié peuvent également être retrouvées dans des systèmes mécatroniques divers tels que ceux issus de l'aéronautique et l'automobile. Cette formation permet d'avoir une ouverture dans le secteur industriel grâce à la maîtrise d'un système de commande en temps réel mais également dans le domaine de la recherche en robotique.

REFERENCES

- [1] Chaillet N., Régnier S, "Microrobotics for Micromanipulation", John Wiley and Sons Inc, ISBN: 978-1-84821-186-5, 2010.
- [2] Beyeler F, Neild A, Oberti S, Bell D, Yu S, Bell D, Dual J, Nelson B. J, "Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field", Journal of microelectromechanical systems, vol. 16, pp. 7-15, 2007.
- [3] Boudaoud M, Haddab Y, Le Gorrec Y, "Modeling and optimal force control of a nonlinear electrostatic microgripper", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol. 18, pp. 1130-1139, 2013.
- [4] Boudaoud M, Haddab Y, Le Gorrec Y, "Modelling of a MEMS-based microgripper: application to dexterous micromanipulation", Proc. IEEE IROS 2010, Taipei, Taiwan.
- [5] Kalman R. E, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Trans ASME. Journal of Basic Engineering, pp.35-45, 1960.
- [6] Anderson B. D. O, Moore, J. B, "Optimal control: linear quadratic methods", Prentice Hall, 1990.