La télé micro-manipulation par adhésion

Fabien Dionnet et Stéphane Régnier

Laboratoire de Robotique de Paris (CNRS - UPMC) B.P. 61 F-92265 Fontenay Aux Roses regnier@robot.jussieu.fr

RÉSUMÉ. Cet article traite de la télé micro-manipulation par adhésion. Une approche unifiée de cette problématique est proposée autour de l'étude de deux couplages, un couplage homothétique et un couplage passif. Des comparaisons en terme de transparence et de stabilité sont analysées. Enfin, des expérimentations sur une interface simplifiée et sur une interface industrielle sont décrites pour montrer les avantages du couplage passif pour la problématique plus générale de la télé micro-manipulation.

ABSTRACT. This article deals with tele micro-manipulation by adhesion. A unified approach of these problems is proposed with the study of two couplings, an homothetic coupling and a passive coupling. Comparisons of transparency and stability properties are studied. Experiments on a simple interface and an industrial interface are described to show advantages of the passive coupling for the more general problem of the tele micro-manipulation.

MOTS-CLÉS : micro-manipulation, adhésion, télé-opération, couplage bilatéral

KEYWORDS: micro-manipulation, adhesion, teleoperation, bilateral coupling

1. Introduction

A l'échelle microscopique, la balance des forces mises en jeu est totalement modifiée : les forces surfaciques sont prépondérantes par rapport aux forces volumiques. Il est alors possible de saisir un objet par un simple contact adhérent avec un préhenseur mono-digital et de le relâcher ensuite en utilisant des stratégies évoluées comme par exemple l'inertie ou le roulement. Une plate-forme de micro-manipulation par adhésion appelé [*mü*]MAD a été développée au Laboratoire de Robotique de Paris dans le cadre de cette problématique [Haliyo].

Un axe de recherche de cette étude est l'intervention de l'utilisateur dans les différentes tâches. Les interactions usuelles entre l'opérateur et le système de micro-manipulation en mode assistée se réduisent en effet à une simple interface graphique. Le retour d'informations sur l'état du système est également et uniquement de nature graphique. Il semble donc particulièrement important d'impliquer l'opérateur dans la commande du micro-manipulateur. Le choix de la télé-opération provient ainsi d'un double objectif, faire percevoir à l'utilisateur l'échelle microscopique et définir un mode alternatif de manipulation [Venture, Haliyo, Régnier and Micaelli].

La première partie de cet article décrit le site expérimental développé au laboratoire, du préhenseur mono-digital aux différents composants du système de micro-manipulation. La deuxième partie est consacrée à la problématique de la télé micro-manipulation, du choix d'une interface haptique simplifiée aux différents modes de couplages. Une comparaison en terme de transparence et de stabilité des deux couplages est détaillée pour appréhender les problèmes liés à la télé-opération. Enfin des expérimentations avec une interface haptique Virtuose sont présentées. Le succès des expérimentations montre l'apparition d'une nouvelle voie de recherche prometteuse : la perception du micro-monde.

2. Description de la plate-forme de micro-manipulation [mü]MAD

La plate-forme est schématiquement composée d'un préhenseur mono-digital, d'un bloc de déplacement, d'un dispositif de mesure et d'une informatique de pilotage. L'ensemble est placé dans un environnement contrôlé garantissant les conditions expérimentales les plus favorables pour mener à bien les opérations de micro-manipulation.

2.1. Préhenseur mono-digital

Le préhenseur est l'organe essentiel de la manipulation, quelle que soit l'échelle considérée, et donc a fortiori à l'échelle microscopique. Il conditionne le mode de manipulation et les stratégies de manipulation à mettre en œuvre, ainsi que le dispositif expérimental nécessaire pour mener à bien les tâches de manipulation. Le préhenseur utilisé est une sonde¹ utilisée par la technologie des microscopes à force atomique. Ces systèmes sont généralement dédiés à l'étude de la topologie des surfaces, l'interaction entre la poutre et la surface se faisant au travers d'une micro-pointe présente sous la poutre. Dépourvues de cette pointe², les micro-poutres présentent plusieurs avantages répondant point par point aux attentes :

- elles sont de taille submillimétrique;
 - les matériaux utilisés, ainsi que les procédés de fabrication, garantissent un état de surface adéquate et une bonne énergie de surface ;
- elles présentent des caractéristiques dynamiques intéressantes pour la dépose grâce à leur configuration *encastrée/libre*;
- elles sont équipées d'un dispositif de mesure permettant, au prix d'un travail de modélisation, de remonter à une mesure d'effort.

La poutre utilisée est représentée et modélisée par la figure 2 page ci-contre. Il s'agit d'un parallélépipède rectangle en silicium mono-cristallin, biseauté à son extrémité libre, d'une longueur de 600 µm.

^{1.} En anglais, cantilever.

^{2.} Tipless cantilever.



Figure 1. Vue générale du système de micro-manipulation (a) et du préhenseur (b)



(a) Géométrie

(b) Vues de dessus avec support et de côté

2.2. Bloc de déplacement

Figure 2. Poutre AFM et son support

Compte tenu des stratégies de saisie et de dépose mises en place, les actionneurs doivent garantir une large gamme de déplacements, allant du centimètre au nanomètre, ainsi qu'une large gamme de dynamiques. La solution choisie utilise des actionneurs de natures différentes en série. Ceux-ci possédent des propriétés complémentaires couvrant les exigences souhaitées. Il s'agit de :

- trois micro-translateurs;
- un nano-translateur;
- une pastille piézo-électrique.

Les micro-translateurs permettent de larges déplacements pour l'échelle considérée dans tout l'espace de travail. Il s'agit de vérins motorisés dotés d'une course de 2,5 cm pour une résolution de 50 nm et disposés en série de manière à permettre un déplacement cartésien. Le nano-translateur est placé en série

avec l'axe de translation vertical du micro-translateur. Une platine de translation piézo-électrique permet un positionnement vertical avec une très bonne résolution de 1,83 nm, sur une course en revanche peu importante de 12 µm. L'effecteur actif peut ainsi évoluer dans un espace de travail étendu, avec une bonne précision locale et une grande dynamique. La configuration cinématique a en outre été choisie de manière à pouvoir commander le système de manière totalement découplée en alignant les axes de translation x_m , y_m , z_m , z_n , et z_e avec les axes du repère lié au préhenseur, \mathcal{R}_p , comme l'indique la figure 3.



Figure 3. Configuration cinématique du dispositif expérimental

2.3. Retour d'informations et informatique de pilotage

Dans le cadre d'une procédure manuelle ou automatique, la taille des éléments considérés impose l'utilisation d'informations issues de capteurs adaptés à l'échelle macroscopique. La grande majorité des systèmes de micro-manipulation fournissent à l'opérateur un retour visuel par l'intermédiaire d'un microscope optique. Afin de laisser la possibilité d'utiliser des substrats de natures diverses, le microscope employé est situé au dessus de l'espace de travail. Celui-ci est couplé à une caméra CCD qui permet d'acquérir des images en temps réel. La configuration du système est telle que le plan image du dispositif optique est parallèle au plan de translation vertical du système et que leurs axes sont alignés, toujours dans un soucis de découplage de la commande du dispositif.

Le système de micro-manipulation est agencé autour d'un PC tournant sous RTLinux. Ce système d'exploitation en temps réel est particulièrement adapté à l'implémentation d'asservissements numériques grâce tout d'abord à ses performance du point de vue du temps réel, mais aussi à sa simplicité d'utilisation. La figure 4 page ci-contre illustre schématiquement le principe de fonctionnement du dispositif.

Schématiquement, le logiciel repose sur deux boucles en temps réel principales permettant, pour l'une, la commande des micro-translateurs à la cadence vidéo de 25 Hz par l'intermédiaire d'une liaison série, et pour l'autre, la commande du nano-translateur. Une interface graphique basée sur la librairie graphique Xforms³ a été développée pour permettre à la fois le réglage des paramètres des commandes bas niveau, la centralisation des commandes haut niveau accessibles de manière claire et intuitive, ainsi que l'enregistrement et l'exploitation des données. La figure 4 page suivante présente une copie d'écran de cette interface dédiée.

^{3.}http://www.public.iastate.edu/~xforms/homepage.html



Figure 4. Architecture globale du micro-manipulateur [mü]MAD et interface graphique

3. Etude du couplage bilatéral

3.1. Description de l'organe maître et de l'organe esclave

3.1.1. Organe maître : interface haptique Brigit

En mode télé-opération, l'opérateur utilise un organe maître, une interface haptique, pour contrôler les mouvements d'un système esclave, tout en ressentant les efforts qui lui sont appliqués par l'environnement. Un système haptique, baptisé *Brigit*, a ainsi été réalisé (cf. Fig. 5(a)) pour le problème de la télé micromanipulation. Cette interface se compose d'un moteur à courant continu pouvant fournir un couple maximal de 0, 1Nm, sur l'axe duquel sont montés un codeur optique à haute résolution, ainsi qu'un volant qui permet la manipulation par un opérateur. Le choix, a priori peu adapté, de commander la translation de l'esclave par une interface haptique possédant un degré de liberté en rotation s'explique par la simplicité de mise en œuvre d'un tel dispositif pour un travail exploratoire. Contrairement à certains bras-maîtres, *Brigit* n'a aucune butée de position, laissant envisager une large gamme d'utilisations.



Figure 5. Modélisation de l'interface haptique Brigit

A partir de l'application du principe fondamental de la dynamique, la fonction de transfert de *Brigit* peut être établie :

$$V_{b} = B(s)(F_{o} + F_{b}^{*}) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} B(s) = \frac{R_{b}^{2}}{\mu_{b} + J_{b}s} = \frac{B_{0}}{1 + \tau s}, \quad B_{0} = \frac{R_{b}^{2}}{\mu_{b}}, \quad \tau = \frac{J_{b}}{\mu_{b}} \\ F_{b}^{*} = \frac{K_{b}}{R_{b}}I_{b}^{*} \end{cases}$$
[1]

Ce système possède deux entrées, l'une mécanique, F_o , force tangentielle appliquée par l'opérateur, l'autre d'origine électrique, F_b^* , force tangentielle au volant correspondant à l'utilisation d'un courant I_b^* , et une sortie, V_b , vitesse linéaire de *Brigit*. R_b représente le rayon du volant. L'inertie totale J_b et le coefficient de frottement visqueux μ_b sont identifiés expérimentalement, ainsi que la constante caractéristique K_b liant le couple moteur au courant.

Pour un courant nul, la force requise pour mettre *Brigit* en mouvement est très faible. L'opérateur ne ressent pas d'autre résistance que la faible inertie de *Brigit*. En revanche, l'entrée en courant peut être utilisée pour favoriser ou interdire un déplacement et faire ressentir un effort à l'utilisateur.

3.1.2. Organe esclave : micro-manipulateur [mü]MAD

Le nano-translateur est commandé en position sur une course de 12 μ m. L'identification de sa fonction de transfert en continu permet de l'assimiler à un passe-bas du second ordre à pôles réels négatifs et de gain statique unité. Il possède ainsi pour fonction de transfert :

$$N(s) = \frac{Z_n}{Z_n^*} = \frac{V_n}{V_n^*} = \frac{1}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tau_1 = 1,35 \text{ ms} \\ \tau_2 = 0,57 \text{ ms} \end{cases}$$
[2]

La poutre peut être modélisée par un simple ressort de raideur K_{ℓ} dépendant de la position du point de contact ℓ par la relation suivante :

$$K_{\ell} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^3 K_L \quad \text{avec} \quad 0 \le \ell \le L$$
[3]

où $K_L = 21,06$ Nm représente la raideur équivalente en bout de poutre, de longueur L. En cas de contact, la force extérieure, F_e , correspond à la force exercée par l'environnement microscopique sur le préhenseur et est égale à :

$$F_e = F_l = -K_\ell Z_n = -\frac{K_\ell}{s} V_n \tag{4}$$

3.1.3. Architecture globale du système

L'architecture globale du système est illustrée par la figure 6. Le PC de commande de *Brigit* gère uniquement l'asservissement en courant et communique par liaison Ethernet avec le PC du système de micromanipulation. Celui-ci s'occupe de la partie esclave et du couplage bilatéral. La période d'échantillonnage est fixée à 2 ms à cause des limites intrinsèques de la connexion.



Figure 6. Architecture globale du système

3.2. Etudes de différents couplages

3.2.1. Définition des facteurs d'échelle

L'interface *Brigit* est conçue pour être manipulée par un opérateur humain sur une course choisie par l'utilisateur. L'esclave est en revanche dimensionné pour manipuler des objets d'une taille de l'ordre de quelques dizaines de microns sur des distances analogues. Cette interaction met en jeu des efforts de l'ordre du micronewton. La figure 7 montre la principe général du couplage bilatéral à réaliser entre le maître et l'esclave en fonction du dispositif choisi et de la modélisation adoptée. Il est préalablement nécessaire d'établir des facteurs d'échelle permettant de transcrire les efforts et les vitesses macroscopiques en grandeurs microscopiques et réciproquement.



Figure 7. Principe général du couplage entre le maître et l'esclave

Dans la mesure où le maître ne possède pas de butée, il est possible de choisir librement sa course, en correspondance avec celle du nano-translateur de 12 μ m. Par un compromis entre précision et confort, la course choisie est de 2 rad. L'opérateur peut ainsi manipuler le maître sans lâcher le volant et sans passer par des positions inconfortables tout en gardant une bonne précision de positionnement. Cette course angulaire est équivalente à une course linéaire tangentielle au volant de 7 cm. La constante d'homothétie en déplacement entre le maître et l'esclave peut alors être calculée :

$$A_d = \frac{7 \times 10^{-2}}{12 \times 10^{-6}} = 5,83 \times 10^3$$
^[5]

En considérant que la poutre peut fléchir de 12 μ m, l'effort maximal appliqué à son extrémité est de 252 μ N. Brigit peut exercer un couple maximal de 0,1 Nm, soit une force tangentielle de 2,86 N. La constante d'homothétie en effort A_f vaut alors :

$$A_f = \frac{2,86}{252 \times 10^{-6}} = 1,13 \times 10^4$$
[6]

3.2.2. Le couplage homothétique

Le premier raisonnement pour coupler l'esclave et le maître consiste à copier directement les déplacements de *Brigit* sur le nano-translateur et de transcrire l'effort mesuré par la poutre AFM au niveau de *Brigit* par l'intermédiaire de la commande en courant. Le schéma de fonctionnement est donné par la figure 8. Le bloc de couplage se résume alors simplement à un simple couplage homothétique. Celui-ci transpose les grandeurs d'un environnement à l'autre selon :

$$F_b^* = A_f F_e \tag{7}$$

$$V_n^* = \frac{1}{A_d} V_b \tag{8}$$

En pratique, le nano-translateur est commandé en position, la consigne Z_n^* résultant de l'intégration de la consigne en vitesse V_n^* issue du couplage. De même, *Brigit* est commandé en courant, la consigne valant d'après [1] :

$$I_b^* = \frac{R_b}{K_b} F_b^* \tag{9}$$

Avec ce type de couplage, les butées du nano-translateur ne sont pas prises en compte. Elles sont par exemple⁴ traitées artificiellement en saturant la consigne en position du nano-translateur et en imposant au

^{4.} Il existe néanmoins des méthodes plus complexes conservant des propriétés de continuité pour traiter ces butées.



Figure 8. Principe du couplage homothétique

maître un courant d'intensité limite de $\pm 1,907$ A. Cette valeur correspond au couple maximal admissible, de manière à opposer une forte résistance à l'opérateur.

3.2.3. Le couplage passif

Une autre approche consiste à asservir le nano-translateur en effort et l'interface *Brigit* en vitesse, les consignes respectives étant issues de l'environnement opposé pour rendre le couplage passif [Anderson and Spong]. Le schéma de fonctionnement est donné sur la figure 9. Le bloc de couplage est constitué de trois sous-blocs, détaillés dans la suite :

- un couplage homothétique dont la fonction est similaire au cas précédent ;
- un contrôleur maître;
- un contrôleur esclave.



Figure 9. Principe du couplage passif

Le contrôleur maître C(s) réalise l'asservissement de la vitesse de *Brigit*, V_b , dont la consigne est à l'échelle près la commande de l'esclave, V_n^* . Le correcteur employé est de type proportionnel-intégral (PI) avec des coefficients notés K_p et K_i selon :

$$F_b^* = C(s)(A_d V_n^* - V_b)$$
 avec $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ [10]

Le contrôleur esclave est asservi en effort en utilisant un simple gain proportionnel K_n . Il permet en outre de calculer une consigne en vitesse pour le maître :

$$V_n^* = K_n \left(F_e - \frac{1}{A_f} F_b^* \right)$$
^[11]

Il est à noter que F_e représente la force exercée par l'environnement sur le préhenseur, les signes du comparateur sont donc adaptés en conséquence. Les butées sont traitées en annulant la consigne V_n^* . Ce choix a pour effet de saturer la consigne en position Z_n^* et de modifier la consigne du contrôleur maître plutôt que directement la commande en courant.

3.3. Performances comparées des deux couplages

Cette partie s'attache à comparer les deux couplages présentés en terme de deux critères essentiels dans les couplages bilatéraux, la transparence et la stabilité [Micaelli].

3.3.1. Transparence

Lorsque le préhenseur est en contact avec son environnement, il existe une relation qui lie la force F_e exercée par l'environnement microscopique sur le préhenseur à la vitesse V_n du nano-translateur :

$$F_e = Z_e(V_n) \tag{12}$$

où Z_e représente l'impédance transmise par l'environnement microscopique à l'esclave. De la même manière, il existe une relation entre la force F_o exercée par l'opérateur sur *Brigit* et sa vitesse V_b , mettant en jeu l'impédance Z_o :

$$F_o = Z_o(V_b) \tag{13}$$

La condition pour que l'opérateur ressente exactement les interactions du préhenseur avec le monde microscopique implique que ces deux impédances soient identiques, au signe et au facteur d'homothétie près :

$$Z_o = -\frac{A_f}{A_d} Z_e \tag{14}$$

La transparence est un critère essentiel pour l'application de micro-manipulation. L'intérêt de la mise en place d'un tel système repose en effet sur la capacité de l'opérateur à ressentir les phénomènes particuliers de l'échelle microscopique. Deux cas représentatifs sont étudiés. Si le préhenseur est libre, aucune force n'est mesurée et l'impédance désirée du côté opérateur doit être nulle :

$$Z_h^* = 0 \tag{15}$$

Si le préhenseur est en contact avec l'environnement, l'impédance désirée doit être égale d'après [4] :

$$Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s}$$
[16]

Les expressions des calculs des impédances Z_h et Z_c pour les deux couplages ne sont pas développées dans ce document et sont décrites dans la thèse de Fabien Dionnet [Dionnet]. Elles sont résumées dans le tableau 1.

	Préhenseur hors contact	Préhenseur en contact
Couplage Homothétique	$Z_{h1} = \frac{1}{B_0}(1+\tau s)$	$Z_{c1} = \frac{1}{H_1(s)} Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s} \left(N(s) + \frac{A_d}{A_f K_\ell} \frac{s}{B(s)} \right)$
Couplage Passif	$Z_{h2} = Z_{h1} + \frac{A_f C(s)}{A_f + A_d K_n C(s)}$	$Z_{c2} = \frac{1}{H_2(s)} Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s} \left(\frac{A_d s}{A_f K_\ell B(s)} + \frac{A_d s C(s)}{K_\ell (A_f + A_d K_n C(s))} \right)$
	j	$+ \frac{A_d^2 K_n^2 s C^2(s) N(s)}{(A_f + A_d K_n C(s))(A_f s + A_d K_n s C(s) + A_f K_n K_\ell N(s))} \right)$

Tableau 1. Impédance hors et en contact pour les deux couplages

Dans le cas hors contact, l'opérateur ne devrait idéalement ressentir aucune résistance. Pour le couplage homothétique, l'impédance ressentie Z_{h1} est en pratique minimale en basse fréquence et commence à augmenter pour des pulsations de l'ordre de $1/\tau$. Pour le couplage position/position, l'impédance Z_{h2} est minimale en basse fréquence si la condition suivante est respectée :

$$\frac{1}{K_i K_n} \ll \frac{A_d}{A_f} \frac{1}{K_i B_0} \implies K_n \gg \frac{A_f}{A_d} B_0 = 385$$
^[17]

Si cette condition est vérifiée alors l'impédance Z_{h2} est égale à :

$$Z_{h2} \approx \frac{1}{B_0} (1 + \tau s) = Z_{h1}$$
[18]

La figure 10 montre l'influence du gain proportionnel K_n de la commande en effort sur la transparence lorsque le préhenseur est hors contact. Lorsque K_n croît, Z_{h2} converge en effet vers Z_{h1} qui représente l'impédance la plus faible atteignable.



Figure 10. Influence du gain K_n sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur $Z_h(j\omega)$ en mode libre ($K_p = 4$ à 4000, $K_p = 2$, $K_i = 400$)

Dans le cas du contact, la transparence est parfaite si (voir tab. 1):

$$H_i(s) = 1 \tag{19}$$

Pour le couplage homothétique, l'expression de H_1 peut être simplifiée en considérant que la constante de temps τ est très nettement supérieure aux constantes du nano-translateur τ_1 et τ_2 . Dans ce cas la fonction $H_1(s)$ s'apparente alors à un transfert du second ordre :

$$H_1(s) \approx \frac{1}{1 + A\tau_p s + A\tau\tau_p s^2}$$
^[20]

à pôles complexes conjugués, de pulsation caractéristique $\omega_0 = \sqrt{\frac{A_f B_0 K_\ell}{A_d \tau}} \ge \sqrt{\frac{A_f B_0 K_L}{A_d \tau}} = 27,7$ rad/s. Il est possible d'étendre la plage de transparence ω_0 en jouant sur les facteurs d'homothétie A_f et A_d .

Pour le couplage passif, l'expression brute de $H_2(s)$ est difficilement exploitable en dehors des considérations sur le gain statique. Plusieurs simplifications permettent cependant d'alléger sa forme en considérant que la constante τ est très nettement supérieure aux constantes du nano-translateur et que la condition 17 est vérifiée. Pour obtenir un gain statique le plus proche de l'unité en basse fréquence, il faut alors que :

$$K_i \gg \frac{A_f}{A_d} K_\ell > \frac{A_f}{A_d} K_L = 40.9$$
^[21]

Avec cette hypothèse,

$$H_2(s) \approx H_1(s) \tag{22}$$

La figure 11 page suivante montre l'influence de K_i sur la transparence en mode contact. Lorsque K_i croît, Z_{c2} converge en effet vers Z_{c1} qui représente l'impédance la plus réaliste possible.

Globalement, le couplage homothétique peut sembler le plus performant en terme de transparence. Il est cependant possible d'atteindre un niveau de transparence similaire avec le couplage passif en réglant judicieusement les gains des correcteurs maître et esclave.



Figure 11. Influence du gain K_i sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur $Z_c(j\omega)$ en mode contact ($K_n = 4000, K_p = 4, K_i = 0,4 à 400$)

3.3.2. Stabilité

Il est en général difficile d'établir une condition nécessaire et suffisante de stabilité pour les systèmes de télé-opération dans la mesure où il s'agit de systèmes multi-variables en interaction avec des environnements dont le comportement est a priori inconnu. En télé-opération, le critère requis est plutôt la stabilité inconditionnelle qui garantit la passivité du système de télé-opération du point de vue de l'opérateur si l'environnement distant est passif et vice versa [Micaelli]. Pour déterminer si le système de télé micromanipulation est inconditionnellement stable, il est nécessaire d'écrire les schémas de couplage sous la forme admittance [?] :

$$\begin{bmatrix} V_b \\ V_n \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} F_o \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_o \\ F_e \end{bmatrix}$$
[23]

Le système ainsi décrit est alors inconditionnellement stable en mode couplé si et seulement si le critère de Llewelyn [Llewellyn], composé de trois inégalités, est vérifié :

$$\begin{cases} C_{1}(\omega) = \Re \left[Y_{11}(j\omega) \right] \ge 0 \\ C_{2}(\omega) = \Re \left[Y_{22}(j\omega) \right] \ge 0 \\ C_{3}(\omega) = 2\Re \left[Y_{11}(j\omega) \right] \Re \left[Y_{22}(j\omega) \right] - \Re \left[Y_{12}(j\omega) Y_{21}(j\omega) \right] - |Y_{12}(j\omega) Y_{21}(j\omega)| \ge 0 \end{cases}$$
[24]

Dans le cas contraire, le système est alors dit actif, et peut être potentiellement instable pour certaines entrées.

Les relations [1], [2], [7], [8], [10] et [11] permettent de trouver les coefficients de la matrice admittance pour les deux couplages. Ils sont décrits dans le tableau 2.

Pour le couplage homothétique, le dernier critère est toujours négatif, son calcul aboutissant aux conditions antagonistes :

$$\begin{cases} \left(1 - \tau_1 \tau_2 \omega^2\right) \left(1 + \tau^2 \omega^2\right) \ge 0 & \text{pour } \omega \ge \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}, \\ -\left(\tau_1 + \tau_2\right)^2 \left(1 + \tau^2 \omega^2\right)^2 \omega^2 \ge 0 & \text{pour } \omega \le \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}} \end{cases}$$

$$[25]$$

En théorie, le couplage homothétique peut donc se révéler potentiellement instable.

Pour le couplage passif, l'objectif est de définir des conditions sur les gains K_i , K_p et K_n garantissant si possible la stabilité inconditionnelle du système couplé. Le premier critère de Llewelyn est toujours vérifié.

	$Y_{11}(s) = B(s) = \frac{B_0}{1+\tau s}$ $Y_{12}(s) = A_f B(s) = \frac{A_f B_0}{1+\tau s}$
Couplage homothétique	$Y_{21}(s) = \frac{1}{A_d} N(s) B(s) = \frac{B_0/A_d}{(1+\tau s)(1+\tau s)(1+\tau s)}$
	$Y_{22}(s) = \frac{A_f}{A_d} N(s) B(s) = \frac{A_f B_0 / A_d}{(1 + \tau s)(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$
	$Y_{11}(s) = \frac{B(s)(A_f + A_d K_n C(s))}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
Couplage passif	$Y_{12}(s) = \frac{A_f A_d K_n B(s) C(s)}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
	$Y_{21}(s) = \frac{K_n B(s) C(s) N(s)}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
	$Y_{22}(s) = \frac{A_f K_n N(s)}{A_f + A_d K_n C(s)} + \frac{A_f A_d K_n^2 B(s) C^2(s) N(s)}{[A_f + A_d K_n C(s)] [A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)]}$

Tableau 2. Coefficients de la matrice d'admittance pour les deux couplages

Il apparaît que pour un réglage des gains favorisant uniquement la transparence, le système n'est jamais inconditionnellement stable, le troisième critère n'étant jamais positif, comme le montre la figure 12 page ci-contre. Il est cependant possible de rendre ce couplage inconditionnellement stable. La forme des termes de la matrice admittance conduit en effet à étudier le cas particulier :

$$K_p = \frac{1}{B_0} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{1}{B_0 \tau}$$
[26]

Dans ce cas, le second critère est alors vérifié pour :

$$\omega \le \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}} = 1145 \text{ rad/s}$$
[27]

Le gain K_n peut ainsi être estimé pour que le troisième critère soit positif sur la plage fréquentielle la plus large possible. Celle-ci est définie par les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \left(1 - \tau_{1}\tau_{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau\left(3\tau + 4\frac{A_{d}}{K_{i}K_{n}A_{f}}\right)\omega^{2}\right) + 2\tau\left(\tau_{1} + \tau_{2}\right)\omega^{2} \ge 0, \\ \left[\left(1 - \tau_{1}\tau_{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau\left(3\tau + 4\frac{A_{d}}{K_{i}K_{n}A_{f}}\right)\omega^{2}\right) + 2\tau\left(\tau_{1} + \tau_{2}\right)\omega^{2}\right]^{2} \ge \left(1 + \tau_{1}^{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau_{2}^{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau_{2}^{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau_{2}^{2}\omega^{2}\right)^{2} \end{cases}$$
[28]

Ainsi, le couplage passif peut simplement être réglé pour être passif sur une large gamme de fréquence. La figure 12 page suivante montre l'allure des seconds et troisièmes critères de Llewelyn pour des réglages de gains favorisant la transparence ou la stabilité. Il est par ailleurs possible d'accroître la plage de passivité au delà de la fréquence d'échantillonnage en ajustant les gains K_p , K_i , puis K_n , tout en conservant une bonne transparence.

Si le couplage homothétique est aisé à mettre en œuvre et parfaitement transparent, il peut en théorie conduire à des instabilités, le critère de Llewelyn sur la stabilité inconditionnelle en mode couplé n'étant jamais vérifié. Il est possible, par le réglage des gains des correcteurs maître et esclave du couplage passif de rendre le système inconditionnellement stable en conservant une bonne transparence. Le choix du couplage sera donc fonction de l'objet de la manipulation. Pour un rendu fin des effets microscopiques tels que le *pull-off*, le couplage homothétique semble le plus adapté. Pour une manipulation sécurisée, la stabilité inconditionnelle du couplage passif est la meilleure solution comme le montrent les expérimentations du paragraphe suivant.

3.4. Résultats expérimentaux

3.4.1. Le couplage homothétique

Les deux couplages proposés ont été implémentés sur le système expérimental. La figure 13 page ci-contre (a) et (c) présente les résultats en positions et efforts obtenus pour la commande du nano-translateur avec le



Figure 12. Influence du réglage des gains K_p , K_i et K_n sur la passivité du système couplé

couplage homothétique. Le préhenseur se situe initialement à environ 2,6 µm au dessus du substrat puis est mis en mouvement par l'opérateur par l'intermédiaire de l'interface haptique *Brigit*.



Figure 13. *Résultats expérimentaux ((a) Position (c) Efforts) de télé-opération par couplage homothétique (b) Détails du suivi de position en mode libre (d) Détails du suivi de position en mode contact*

Le suivi du nano-translateur est très bon, incluant les mouvements de grande fréquence comme le montrent les détails de la figure 13 (b) et (d). La perception de l'opérateur est également très bonne, la différence entre les modes contact et libre étant très claire. Le principal problème de ce couplage provient de la gestion des butées. La discontinuité de la commande en courant impose à l'opérateur de tenir très fermement l'interface, sous peine de la lâcher. Le comportement instable en cas de lâcher a été observé mais doit être évité autant que possible pour ne pas endommager le dispositif. Toutefois, sans aller jusqu'au lâcher, il peut apparaître un phénomène d'oscillations lorsque le nano-translateur arrive en butée (cf. Fig. 14). La commande en courant oscille alors brutalement entre sa valeur normale, proportionnelle à l'effort mesuré du côté esclave, à sa valeur maximale signe que le nano-translateur est en butée, et vice versa. Ce comportement est désagréable pour l'opérateur et peut entraîner le lâcher de l'interface.

Figure 14. Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage homothétique (détails)

3.4.2. Le couplage passif

Ce défaut est parfaitement corrigé par le couplage passif dont les résultats en positions et en efforts sont donnés par les figures 15 (a) et(c). Le réglage des gains des correcteurs maître et esclave favorisent dans ce cas la transparence au détriment de la stabilité inconditionnelle afin de privilégier la perception de l'opérateur.

Le suivi du nano-translateur est meilleur en mode libre qu'en mode contact, pour lequel un léger écart est observé (cf. Fig. 15 page ci-contre). Malgré cette écart, la perception des modes contact et libre par l'opérateur est bonne. L'avantage significatif apporté par le couplage passif provient du comportement du système en butée et lors du lâcher. Lorsque le nano-translateur arrive en butée, l'opérateur ressent un « cran » dû à l'annulation de la consigne en vitesse et perçoit ainsi nettement les butées. La commande en courant dans *Brigit* étant continue, le système est netement plus confortable. La figure 16 page suivante montre la réponse du système lorsque l'opérateur lâche *Brigit* alors que le nano-translateur est en butée ou le préhenseur en contact. Cette propriété se traduit par une variation brusque de position. Dans tous les cas, le maître et l'esclave se stabilisent en une position pour laquelle aucun effort n'est mesuré.

Il apparaît au terme de cette étude que le couplage passif présente des avantages par rapport au couplage homothétique. Ce dernier présente pourtant les meilleures performances en terme de transparence. Il est en effet possible de régler le couplage passif pour être inconditionnellement stable tout en conservant une bonne forme de transparence. Il est aussi possible de modifier les valeurs des facteurs d'échelle sans perdre la propriété de stabilité [Niemeyer] [Hannaford, Preusch and Ryu]. Ce couplage sera donc utilisé pour réaliser une télé micro-manipulation réaliste et sécurisée avec une interface haptique conventionnelle comme démontrée dans le paragraphe suivant.

4. La télé micro-manipulation

L'objet de cette partie est d'intégrer la commande passive au sein d'un système plus vaste permettant la téléopération complète du dispositif de micro-manipulation [*mü*]MAD, les trois axes micrométriques et le nano-translateur avec une interface standard.

Figure 15. (*a*) (*c*) *Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage passif* (*b*) *Suivi de position en basse fréquence* (*d*) *Suivi de position en haute fréquence*

Figure 16. Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage passif (détails)

4.1. Description de l'interface Virtuose

Virtuose est une gamme de bras maîtres réalisés par la société Haption⁵. Ils se déclinent principalement en deux séries :

- le Virtuose 3D, à trois articulations rotoïdes permettant à l'opérateur de décrire des mouvements de translations dans l'espace opérationnel;

- le Virtuose 6D, à six articulations rotoïdes permettant à l'opérateur de décrire des mouvements de translations et de rotation.

Les deux types de bras sont utilisés (cf. Fig. 17). Un Virtuose 3D a été implanté dans la salle blanche, mais le Virtuose 6D de la salle de réalité virtuelle du Commissariat à l'Énergie Atomique de Fontenay-aux-Roses peut également être utilisé. Dans ce dernier cas, seuls les trois premiers degrés de liberté sont exploités, le poignet étant laissé libre.

(c) Virtuose 6D

cinématique

Figure 17. Bras maîtres Virtuoses

Les caractéristiques de ces deux bras sont identiques. Ils peuvent développer un effort maximal de 35 N pour une course verticale de 45 cm. Ils se commandent à partir d'un PC industriel et la consigne est un vecteur à plusieurs dimensions contenant les composantes cartésiennes de l'effort que le bras doit produire sur l'opérateur. Le protocole de communication développé pour la commande du nano-translateur et la commande passive sont utilisés en adaptant simplement les facteurs d'échelle en position et en effort et les gains des contrôleurs.

4.2. Commande des micro-translateurs horizontaux

Le capteur d'effort équipant le système de micro-manipulation étant unidirectionnel selon l'axe vertical, la commande des axes horizontaux ne peut pas faire intervenir de retour d'effort à l'image de l'axe vertical. Un asservissement de la position de l'esclave sur celle du maître n'apparaît pas comme une solution judicieuse car, pour couvrir une part importante de la course du micro-translateur et garder une précision satisfaisante pour le positionnement du préhenseur au voisinage de l'objet manipulé, la course requise pour le maître serait trop importante.

La solution choisie est d'asservir le maître en position et les vitesses des micro-tranlateurs sur la position du maître, en ménageant une zone morte au sein de laquelle aucun mouvement n'est produit. L'effort horizontal ressenti par l'opérateur est alors proportionnel à l'écart de position du maître par rapport à la zone morte, donc à la vitesse des micro-translateurs. La figure 18 page suivante donne le principe de cette commande, où $B_i(s)$ représente le transfert du bras maître selon la direction *i*.

En fixant la course utile du maître à 25 cm et la zone morte à 5 cm, il est possible de calculer la constante d'homothétie K_v entre la position du maître et la consigne en vitesse du micro-translateur :

$$K_v = \frac{125 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-2}} = 1,25 \times 10^{-3}.$$
[29]

^{5.} http://www.haption.com

Figure 18. Schéma bloc de la commande des axes horizontaux par un bras maître Virtuose

En retour, une consigne en effort F_i^* est appliquée au bras maître de manière à produire un effort qui s'oppose au mouvement de l'opérateur, provoquant un rappel vers la zone morte et donc une vitesse nulle. Le gain se calcule de la façon suivante :

$$K_f = \frac{35}{10 \times 10^{-2}} = 350.$$
 [30]

4.3. Commande de l'axe vertical

4.3.1. Commande du nano-translateur

La commande du nano-translateur reprend la commande passive décrite dans la partie 3.1 page 5. Il convient cependant d'adapter les facteurs d'échelle. La course utile verticale de l'interface est choisie égale à 25 cm. Ainsi le facteur d'homothétie en déplacement vaut :

$$A_d = \frac{25 \times 10^{-2}}{12 \times 10^{-6}} = 20\,833\tag{31}$$

Le facteur d'homothétie en effort⁶ est égal à :

$$A_f = \frac{35}{252 \times 10^{-6}} = 138\ 890$$
[32]

4.3.2. Commande du micro-translateur vertical

Le micro-translateur vertical est utilisé pour positionner le préhenseur au voisinage d'un objet ou pour transporter cet objet en différents points du substrat. Ses mouvements interviennent donc lorsqu'aucun effort n'est mesuré par le dispositif. En conséquence, le micro-translateur est commandé selon le principe de la figure 18.

4.3.3. Commande associée des micro- et nano-translateurs

La manipulation en mode découplé des micro- et nano-translateurs exige de l'opérateur une grande attention. En effet, il n'existe aucun retour d'effort lors de la manipulation du micro-translateur. En outre, il n'est pas toujours aisé de savoir à quelle distance du contact se situe la poutre AFM sur la vue latérale. La seule information disponible permettant de déterminer la position du préhenseur par rapport aux objets ou au substrat est l'effort de contact mesuré par le système. Un mode de commande couplé tenant compte de ces informations et basé sur les modes découplés est alors à envisager.

Le mode couplé doit permettre de manipuler verticalement la poutre AFM. Lorsque le contact entre la poutre et le substrat ou les objets à manipuler n'est pas établi, l'effort de contact mesuré est nul. Dans ce cas, le micro-translateur est actionné. Lorsque l'effort de contact n'est pas nul, il faut manipuler l'esclave

^{6.} Il est calculé par rapport à l'effort maximal mesuré en bout de poutre ($252 \ \mu N$) et l'effort maximal admissible par l'interface ($35 \ N$).

avec précaution. Le nano-translateur est alors actionné. Ainsi l'opérateur utilise la même interface haptique pour maîtriser l'effort appliqué sur l'objet à saisir et les déplacements à « grande » échelle. Le passage du mode « micro » au mode « nano » s'opère lorsqu'une force est mesurée. Le seuil est fixé pour que la force ressentie par l'opérateur soit continue lors de la transition. Le retour en mode « micro » s'effectue lorsque le nano-translateur arrive en butée haute. Par ailleurs, le recalage des positions de référence du maître et de l'esclave, micro- et nano-translateurs, à chaque transition doit ainsi permettre à l'opérateur de piloter l'ensemble du dispositif de manière totalement intuitive.

4.4. Résultats expérimentaux

(c) Saisie statique

(d) Dépose par roulement

Figure 19. Télé-manipulation d'un grain de pollen

Le système de télé micro-manipulation présenté a pu être testé au cours de plusieurs démonstrations publiques organisées en salle de réalité virtuelle par de nombreux utilisateurs inexpérimentés. Ceux-ci ont tous réussi en quelques minutes à saisir, à faire rouler et à déposer des objets microscopiques comme des grains de pollen d'un diamètre d'environ 20 µm.

5. Conclusion

Le développement d'une plate-forme de télé-micro-manipulation présente plusieurs intérêts. Il s'agit tout d'abord de permettre à un opérateur de piloter le dispositif expérimental [mü]MADpour réaliser des tâches complexes de micro-manipulation comme par exemple la dépose par roulement. Le couplage entre le macro-monde et l'environnement microscopique doit également permettre à l'opérateur de percevoir les effets propres à l'échelle microscopique.

La majeure partie de cet article se concentre sur la commande du nano-translateur, aspect essentiel de la télé-micro-manipulation puisque cette commande intervient lors du contact entre le préhenseur et l'environnement microscopique. À cette fin, une interface haptique à un degré de liberté, nommée Brigit, a été réalisée et deux couplages ont été proposés, un couplage homothétique et un couplage passif. Une étude théorique puis expérimentale a permis de comparer leurs performances, notamment en terme de transparence et de stabilité inconditionnelle, deux notions essentielles de la téléopération.

Le premier schéma de couplage, un couplage homothétique, possède de bonnes performances en terme de transparence mais peut se révéler instable notamment si l'opérateur lâche l'interface haptique. Le second, un couplage passif, possède de telles propriétés que ses différents gains peuvent être réglés pour assurer une bonne transparence et une stabilité inconditionnelle sur une large gamme fréquentielle. Du point de vue expérimentale, les résultats atteints par ce couplage sont très concluants.

Le schéma passif a été validé expérimentalement et intégré au dispositif dans le cadre de la téléopération du système de micro-manipulation par un bras maître Virtuose. Le principe de la commande associée des micro- et nano-translateurs a été présenté. Une démonstration de la plate-forme de télé-micro-manipulation a permis à de nombreux utilisateurs inexpérimentés de manipuler des objets microscopiques comme des grains de pollen. Les résultats se sont avérés très encourageants. La prise en main du système a en effet semblé relativement intuitive et aisée, et chaque « utilisateur » a réussi en quelques minutes à saisir, à déplacer et à déposer par roulement des objets disposés sur le substrat.

Ces premiers travaux menés sur la téléopération du dispositif expérimental de micro-manipulation [*mü*]MAD ont démontré l'intérêt et l'utilité d'impliquer l'opérateur dans la boucle de commande du système. La téléopération permet en effet de réaliser rapidement et efficacement des tâches avancées de micro-manipulation. Néanmoins, si les schémas de commande de commande du nano-translateur seul se sont révélés performants et si leur intégration au sein d'un schéma plus large de téléopération du dispositif complet par un bras maître Virtuose ont permis une manipulation relativement aisée, les interfaces haptiques conventionnelles n'apparaissent pas forcément comme les plus adaptées pour répondre au problème posé.

La conception d'une interface haptique dédiée à la micro-manipulation et adaptée aux spécificités de l'échelle microscopique pourrait alors constituer un travail de recherche innovant. Ce nouvel outil serait en effet un apport clé pour de nombreuses applications comme la manipulation de corps biologiques qui requiert des opérations complexes.

6. Bibliographie

- Anderson R., Spong M., « Bilateral control of teleoperators with time delay », *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 34, n° 5, p. 494-501, 1989.
- Dionnet F., Télé-micro-manipulation par adhésion, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2005.
- Haliyo D., Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2002.
- Hannaford B.and Hirzinger G., Preusch C., Ryu J., « Time domain passivity control with reference energy behavior », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- Llewellyn F., « Some Fundamental Properties of Transmission Systems », Proc. of IRE, vol. 40, p. 271-283, 1952.
- Micaelli A., *Téléopération et télérobotique, Traité IC2*, Hermès, chapter 6 Asservissement et loi de couplage en téléopération, 2002.
- Niemeyer G., Using Wave Variables in Time Delayed Force Reflection Teleoperation,, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, September, 1996.
- Venture G., Haliyo D., Régnier S., Micaelli A., « Force-feedback micromanipulation with inconditionnallystable coupling », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 784-789, Août, 2005.