

Manipulation aux échelles microscopiques

Michaël Gauthier

Laboratoire d'Automatique de Besançon

24 rue Savary - 25000 BESANCON

Tel : +33 (0)381.402.810

E-mail : michael.gauthier@ens2m.fr

Stéphane Régnier

Institut des Systèmes Intelligents et Robotique (ISIR)

Equipe projet Micro/nano manipulation

BP61 - 92265 Fontenay Aux Roses

Tel : 33 (0)1 46 54 88 17

E-mail : regnier@robot.jussieu.fr

Résumé - La manipulation robotique aux échelles microscopiques représente un enjeu majeur pour le développement des techniques biologiques et pour l'avènement de produits hautement miniaturisés réalisés par micro-assemblage. La miniaturisation d'un système de manipulation est confrontée à plusieurs ruptures de type physique ou technique, comme par exemple la prédominance des forces d'adhésion sur le comportement des micro-objets ou le changement des techniques de fabrication influençant fortement les méthodes de conception des microrobots. L'objet de l'étude de la manipulation aux échelles microscopiques porte sur la recherche de méthodes robotiques adaptées à ce nouveau paradigme : le micromonde. La compréhension et la modélisation de ce micromonde sont un corollaire essentiel à l'étude de stratégies robotiques adaptées. Basées sur cette modélisation, de nouvelles stratégies de manipulation sont étudiées en prenant en compte les comportements particuliers des micro-objets tel que les collages sur les organes terminaux. La mise en œuvre de ces stratégies de manipulation nécessite une structure robotique complète incluant des systèmes de perception et de contrôle de l'environnement. La commande de l'ensemble soit par téléopération avec retour haptique soit en cycle automatique est enfin également un enjeu scientifique.

Mots-clé - Microrobotique, Micromanipulation

I. INTRODUCTION

La manipulation d'objets est nécessaire à de nombreux procédés techniques et scientifiques. D'une manière générale, une manipulation repose sur des actions de saisie, de transfert et de positionnement. Les applications couvertes par ce domaine sont nombreuses, de l'assemblage de composants hétérogènes à l'analyse de cellules biologiques.

La préhension d'objets macroscopiques se caractérise par la génération d'efforts de serrage de module proportionnel à l'accélération développée et au poids de l'objet manipulé pour la réalisation de la tâche. Ces efforts permettent de le solidariser avec le préhenseur afin de procéder à son déplacement. Le système de manipulation dans son ensemble possède des dimensions appartenant à la même échelle que celle de l'objet.

Lorsque l'on considère la micro-préhension et la manipulation précise d'objets microscopiques, la corrélation entre la taille de l'objet et le système de manipulation n'existe plus. Les déplacements mis en jeu appartiennent à une plage très large allant de la dizaine de nanomètres à une dizaine de micromètres, et peuvent être produits par des systèmes de dimensions très supérieures. Seul le préhenseur peut posséder des dimensions comparables à celles de l'objet. Les efforts mis en œuvre (de manière passive ou active) afin d'effectuer la tâche sont très supérieurs au poids de l'objet, négligeable à cette échelle. *La micromanipulation peut être définie comme la manipulation d'objets d'une taille de l'ordre de $10 \sim 10^4 \mu\text{m}^3$ (ou ayant dans leur plus grande dimension des tailles variant entre quelques dizaines et quelques centaines de microns $10 \sim 100 \mu\text{m}$).* Cette manipulation engendre des déplacements et des distances d'interaction micrométriques et nanométriques [17].

De nombreuses techniques sont développées autour de la micromanipulation. Les approches peuvent être du type "top down" (par une réduction d'échelle et une vision macroscopique de la problématique) ou "bottom up" (recherche de phénomènes spécifiques ou de stratégies adaptées à ces échelles). De la même façon, les processus physiques utilisés sont multiples, actions de serrage, effets de dépression, de capillarité, d'adhésion, électrostatiques, engendrant ou non des contacts mécaniques avec l'objet à déplacer. Enfin, ces opérations peuvent être manuelles, automatiques ou téléopérées pour répondre à l'ensemble des besoins couverts par cette problématique. Cependant, un grand nombre des systèmes développés utilisent des structures fixes, dédiées, sans capteur d'effort et obtiennent des performances limitées en termes de reproductibilité et de précision, avec une sensibilité très importante aux perturbations et une flexibilité faible.

La robotique apporte des solutions nouvelles à ces nombreuses difficultés au niveau de la dextérité, de la flexibilité et de la réduction sensible aux perturbations. Cet article propose un panorama de la micromanipulation en se focalisant sur l'apport de la robotique dans ce contexte.

II. PROBLÉMATIQUES DE LA MICROMANIPULATION ROBOTIQUE

La différenciation entre la robotique conventionnelle de manipulation et la micromanipulation robotique tient à l'effet d'échelle inhérent à la réduction de l'objet manipulé. La

réduction d'échelle d'une scène de manipulation robotique est en effet confrontée à plusieurs ruptures d'ordre technique ou physique présentées ci-dessous. La prise en compte de l'ensemble de ces contraintes nouvelles nécessite des ruptures méthodologiques pour s'adapter à ce nouveau paradigme.

A. Perception

La mesure de la position des objets manipulés et/ou de la position des organes terminaux ainsi que la mesure de la force appliquée lors d'une tâche de micromanipulation sont des tâches particulièrement difficiles à réaliser dans le micromonde.

1) *Mesure des positions* : la mesure de la position des micro-objets est très couramment obtenue en utilisant des dispositifs de vision, tant les moyens conventionnels de mesure ne peuvent être utilisés sur ces objets de taille trop petite. Deux moyens sont conventionnellement utilisés :

- le microscope photonique,
- le microscope électronique à balayage (MEB).

Les deux types de dispositif sont en mesure de visualiser des micro-objets d'une taille de 1 micromètre à 1 millimètre. Les particularités du microscope photonique à ces échelles portent sur :

- la faible profondeur de champ,
- le champ de vue extrêmement réduit,
- la forte sensibilité à l'éclairage.

L'étude de la mesure de position de micro-objets lors de tâche robotique en utilisant un microscope photonique doit être réalisée en tenant compte de ces éléments caractéristiques.

L'utilisation de la microscopie électronique est un moyen alternatif de mesure de la position des micro-objets. Elle présente l'avantage de posséder une profondeur de champ infinie mais un temps de réponse plus important de l'ordre de 500 ms. Cet outil initialement développé pour l'imagerie de structures micrométriques n'a pas été conçu pour réaliser des tâches de vision et peu de travaux à ce jour sur le traitement des flux vidéos issus de MEB sont présentés. La mesure automatique de la position tridimensionnelle de micro-objets reste un verrou important à lever pour assurer l'automatisation des tâches de micromanipulation.

2) *Mesure des forces* : de manière comparable aux systèmes robotiques de tailles conventionnelles, certaines tâches de micromanipulation nécessitent une mesure et/ou un contrôle de l'effort de manipulation. La mesure de force peut, par exemple, être nécessaire pour :

- assurer une force de serrage suffisante sans être excessive pour ne pas risquer d'endommager l'effecteur ou l'objet (tout particulièrement dans le cas d'objet biologiques) ;
- contrôler l'effort d'insertion lors d'une opération d'assemblage ;
- détecter le contact dont la vue peut être occulté pour le système de vision.

L'ordre de grandeur des forces à mesurer est évidemment très dépendants du type d'objets (biologiques, artefacts)

et de leur taille caractéristique, les forces sont toutefois généralement de l'ordre du microNewton au milliNewton. La mesure de la force de manipulation appliquée à un micro-objet est confrontée à l'absence de techniques fiables de mesure de ce niveau de force sur un effecteur robotique. Il n'existe aujourd'hui, en effet, pas de capteurs multi-axes capables de mesurer des efforts sur ces gammes de force avec une très bonne résolution. Les contraintes technologiques sont aujourd'hui prédominantes et empêchent les solutions piezorésistives, capacitives ou autres d'émerger.

B. Conception des micro-actionneurs et technologie de réalisation

Le choix de l'énergie d'actionnement, la conception d'un actionneur et les techniques de fabrication disponibles sont également grandement dépendantes de la taille caractéristique de l'actionneur et des performances souhaitées. Ainsi, les actionneurs utilisant des matériaux déformables (bilames thermiques, structures en alliages à mémoire de forme, poutres piézoélectriques) sont particulièrement adaptés aux échelles microscopiques puisque non perturbés par des frottements mécaniques comme dans les systèmes conventionnels. L'utilisation de matériaux actifs possédant des comportements classiquement non-linéaires et fortement hystérétiques nécessite des travaux particuliers de modélisation de leur comportement et de recherche de méthodes de commande adaptées et robustes.

La prise en compte des contraintes de fabrication spécifiques à ces échelles dès le dimensionnement et la conception est de plus nécessaire. Les réalisations de micro-actionneurs ne peuvent être obtenues à l'aide de procédés classiques de fabrication (obtention de forme par enlèvement de matière) et les techniques à ces échelles, inspirés de la microfabrication électronique, ne permettent que l'obtention de structures "2,5D". Les difficultés de connectique, le manque de fiabilité de ces techniques MEMS et le coût des processus sont également des critères importants dans la conception de micro-actionneurs. Deux grandes voies sont étudiées :

- l'utilisation d'une structure monobloc incluant, actionneurs et organes terminaux sur une seule structure indivisible. Ce choix induit de fortes contraintes de micro-fabrication mais facilite la connectique ;
- l'utilisation d'une structure assemblée permettant l'utilisation d'organes terminaux et d'actionneurs présentant des incompatibilités de fabrication. Cette méthode, plus modulaire, simplifie les processus de fabrication mais rend difficile la connectique entre les différents éléments assemblés.

L'étude des micro-actionneurs est de plus rendue difficile par l'absence de "savoir-faire métier" dans le domaine. Les grandes règles de conception valables à l'échelle macroscopique ne sont en effet pas valables à l'échelle microscopique. De manière générale, ces travaux nécessitent une approche pluridisciplinaire à l'interface entre la physique

des matériaux, la microfabrication et l'automatique.

C. Comportement des micro-objets

Le comportement des objets est lui aussi modifié profondément par la réduction d'échelle. Sous une limite de l'ordre du millimètre, le poids et l'inertie deviennent négligeables devant les forces de surface (adhésion, capillarité, électrostatiques...) et les forces d'adhésion. Les objets ont tendance soit à coller sur les effecteurs (effet d'adhésion) soit à être propulsés par de fortes accélérations (faible inertie). La modification de ces comportements nécessite une adaptation des méthodes robotiques de manipulation.

D. Contrôle de l'environnement

Le comportement des actionneurs actifs et des micro-objets étant fortement dépendant des conditions environnementales (température et humidité dans l'air - température et composition chimique dans un liquide), le contrôle de l'environnement est nécessaire pour fiabiliser un processus automatique de micromanipulation. Le contrôle des vibrations est également nécessaire à la mise en œuvre d'une tâche de micromanipulation.

E. Répétabilité et dextérité des microrobots

Enfin, pour la manipulation d'objets possédant une taille micrométrique, le niveau de répétabilité requis des robots est naturellement inférieur au micromètre. Les environnements de travail étant fortement contraints par la fonction de perception actuellement assurée par des systèmes optiques, la dextérité des microrobots de manipulation est également un enjeu majeur pour la réalisation de micromanipulation et tout particulièrement de micro-assemblage.

F. Synthèse

Ainsi la conception d'un robot de micromanipulation est soumis à des contraintes nouvelles qui diffèrent de celle de la robotique conventionnelle. De manière synthétique, un robot de micromanipulation doit :

- intégrer des moyens innovants de perception ;
- posséder des actionneurs performants à ces échelles et intégrant les contraintes de fabrication spécifiques à ces échelles ;
- mettre en œuvre des stratégies de micromanipulation adaptées aux comportements des micro-objets ;
- évoluer dans un environnement contrôlé ;
- posséder des répétabilités submicrométriques et une dextérité suffisante pour réaliser des tâches de micro-assemblage fiable.

La recherche de méthodes et de moyens robotiques novateurs doit permettre de résoudre ces problèmes.

Les sections suivantes sont dédiées à la présentation succincte de quelques résultats de travaux de recherche portant sur la modélisation du comportement des micro-objets, l'étude de stratégies de micromanipulation, la définition des architectures

de structures robotiques de micromanipulation et la commande des tâches de micromanipulation.

III. COMPORTEMENTS DES MICRO-OBJETS

L'échelle physique de la micromanipulation se trouve proche de la limite inférieure de la mécanique classique. En général, les lois de la physique newtonienne sont toujours valables et les effets quantiques négligés : l'échelle considérée se situe donc à la lisière des deux espaces classiques dont les limites sont mal connues. La différence majeure avec l'échelle macroscopique est due aux origines des forces considérées. Si l'on considère une longueur L caractéristique d'un problème, la valeur de L^3 étant plus petite que celle de L^2 dans l'intervalle $[0, 1]$, les forces volumiques deviennent négligeables devant les forces surfaciques pour les objets de dimensions microscopiques. Ainsi, ces forces surfaciques, dont les effets sont négligeables à l'échelle macroscopique, modifient de façon drastique la mécanique du contact et les interactions entre les différents médias. L'état d'adhérence entre deux corps microscopiques est prédominant à cette échelle, engendré par les différents phénomènes d'adhésion.

Un paramètre discriminant apparaît pour classer ces forces : leur dépendance à la distance d'interaction entre deux objets. Cette corrélation entraîne des théories différentes, de la physique ou de la mécanique du contact, pour étudier les phénomènes surfaciques à ces échelles. Trois grandes classes de forces d'adhésion paramétrées par la distance d'interaction apparaissent et doivent être prises en considération [10] :

- les forces de *van der Waals*, forces d'interaction entre les molécules de deux corps en présence. Elle s'exprime par exemple pour une interaction entre une sphère de rayon R et un plan par :

$$F_{vdw} = \frac{AR}{6D^2} \quad (1)$$

avec A la constante de Hamaker et D la distance d'interaction.

- les forces *électrostatiques*, forces de Coulomb classiques qui dépendent des charges acquises par les surfaces¹ avec une formulation pour la même classe d'interaction :

$$F_{elec} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon D^2} \quad (2)$$

avec q la charge électrique et ϵ_0 la permittivité de l'air.

- les forces *capillaires*, dont l'existence est déterminée par les conditions d'humidité de l'environnement. Elles s'expriment par :

$$F_{cap} = \frac{4\pi R\gamma_l \cos \theta}{(1 + D/d)} \quad (3)$$

avec γ_l la tension de surface du liquide, d la hauteur du ménisque et θ l'angle de contact.

Ces forces sont fortement non linéaires de par leur dépendance à la distance d'interaction. Elles sont aussi

¹ Il est à noter que, les dimensions réduites des objets considérés impliquant de faibles charges surfaciques, les phénomènes de triboélectrification ne sont pas négligeables.

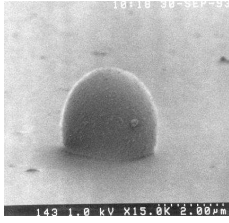


Fig. 1. Illustration des forces d'adhésion au contact

imprédictibles car certains paramètres sont mal connus comme la constante de Hamaker voire inconnus comme les charges électriques présentes sur les matériaux.

De la même façon, lorsqu'un objet de taille microscopique est en contact avec un substrat, ses caractéristiques intrinsèques doivent être connues pour estimer la force nécessaire pour détacher l'objet du contact : cette force est nommée force de *pull-off*. L'objet a en effet tendance à se déformer sous l'effet de l'adhésion et à se coller (voir figure 1).

Cette force s'exprime, à partir d'une analyse énergétique, de la façon suivante :

$$F = \lambda \pi R W_{132}$$

avec W_{132} le travail d'adhésion entre les corps 1 et 2 dans un médium 3 (ce travail peut être relié aux différentes énergies de surfaces des matériaux mis en jeu) et $\frac{3}{2} \leq \lambda \leq 2$ dont l'évaluation dépend des caractéristiques intrinsèques des objets mis en jeu dans l'interaction [14].

Ces forces engendrent ainsi un comportement à deux états :

- à distance les objets sont attirés ou repoussés engendrant des mouvements parasites,
- au contact, les objets restent collés avec une impossibilité de les décoller, par exemple, d'un doigt d'un préhenseur.

Un des points clés pour cette analyse est la recherche de modèles paramétrés pour des formes complexes en fonction par exemple des matériaux et/ou de l'environnement. Seules des études par microscope à force atomique ont, pour l'instant, été effectuées sans répondre complètement à cette problématique [7].

IV. STRATÉGIES DE MICROMANIPULATION

A. Types de stratégies de micromanipulation

Une stratégie de micromanipulation est un ensemble de méthodes permettant de réaliser une tâche de manipulation de micro-objets en prenant en compte les spécificités de leur comportements. Deux grandes approches méthodologiques peuvent être retenues soit en exploitant les phénomènes physiques spécifiques au micromonde soit en cherchant à minimiser ces phénomènes.

Les stratégies de micromanipulation peuvent également être classifiées suivant deux types de préhension :

- les solutions sans contact comme les pinces optiques, les systèmes à diélectrophorèse ou les pinces

magnétiques qui présentent l'avantage de ne jamais créer de contact entre l'effecteur et l'objet, annulant ainsi l'effet d'adhésion. Les forces de blocage sur les micro-objets sont toutefois faibles et ces procédés sont souvent limités à une classe restreinte de matériau en termes de forme et de propriété physique.

- Les solutions de préhension par contact comme les préhenseurs capillaires, les préhenseurs à gel, les micro-pinces ou les préhenseurs par adhésion permettent la manipulation d'un grand type de matériau et de forme de micro-objets. Ils sont également capables d'engendrer une force importante pouvant être intéressante par exemple dans le cadre d'une opération d'insertion pour un micro-assemblage. Ces principes sont en général perturbés par les effets d'adhésion et des stratégies innovantes de lâcher doivent être développées pour assurer une relâche contrôlée de l'objet.

Nos activités de recherche sont focalisées principalement sur la deuxième catégorie de principe de micromanipulation. Quelques exemples de stratégies de micromanipulation sont présentées ci-dessous.

B. Exemples de stratégies

L'objet de cette partie est de décrire quelques exemples de principes de micromanipulation étudiés au LAB et à l'ISIR.

Une première solution est apparue avec la manipulation par adhésion. L'architecture de la plate-forme est décrite dans la figure 9. Ce choix permet l'utilisation d'un préhenseur monodigital capable de mesurer les efforts d'interaction. Des outils d'assistance développés dans la suite de cet article ont donné lieu à différentes stratégies originales comme la manipulation par adhésion et sa relâche (figure 2), la dépose dynamique (l'utilisation des forces inertielles pour vaincre l'adhésion), la dépose sélective (l'exploration fréquentielle pour relâcher sélectivement des objets, illustrée figure 3) ou la dépose par roulement [4] (utilisation de la commande en effort et en vision pour relâcher un objet sphérique, illustrée figure 4).

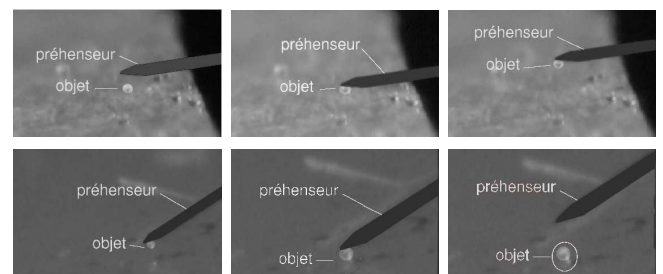


Fig. 2. Manipulation (a-c) par saisie adhésive et dépose (d-f) statique (ISIR)

Un concept plus général consiste à réaliser les opérations de micromanipulation au sein d'un liquide plutôt que dans l'air (ou dans le vide). Ceci présente l'intérêt de réduire de manière générale les forces d'adhésion et les forces de surface, sources de perturbations. L'augmentation des effets

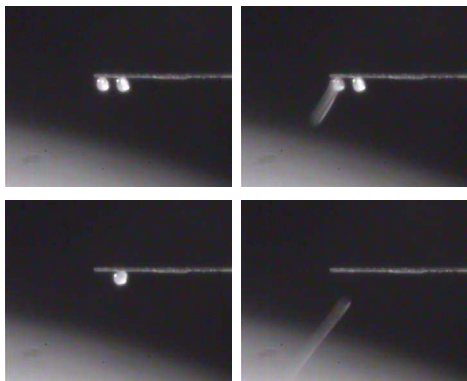


Fig. 3. Dépense sélective des micro-sphères (ISIR)



Fig. 4. Expérience de roulement (ISIR)

hydrodynamiques permet de plus de limiter la vitesse maximale des micro-objets et de stabiliser leur comportements. Ces approches sont étudiées dans le projet ANR PRONOMIA (www.lab.cnrs.fr/pronomia).

Bien que les effets perturbateurs soit réduits, ils restent généralement supérieurs au poids de l'objet et l'étude de stratégies de lâcher est donc également nécessaire. Une solution originale consiste à utiliser les changements de phase du milieu environnant à des fins de manipulation [11]. Il est ainsi possible d'utiliser un préhenseur à glace en milieu immergé afin de réaliser des opérations de prise-dépense d'objet de taille de l'ordre de $600\ \mu\text{m}$ (voir figure 5). La relâche de l'objet est obtenue par liquéfaction de la glace. L'objet n'est à aucun moment en contact direct avec le préhenseur et l'opération de relâche s'effectue sans être perturbée par des effets d'adhésion. Un travail important de modélisation du comportement du préhenseur en utilisant des "circuits" thermiques analogues à des circuits électriques a été mené [12][13].

Dans le cadre général de la micromanipulation en milieu liquide d'objets artificiels, l'utilisation de la force de diélectrophorèse est une voie explorée pour contrôler le détachement d'un micro-objet [15]. Sous certaines conditions cette force engendrée par un champ électrique alternatif sur un objet diélectrique peut, en effet, être une force répulsive. Nous proposons d'utiliser cet effet répulsif pour engendrer une

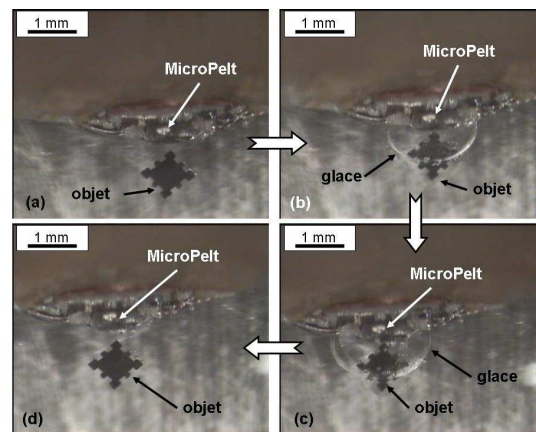


Fig. 5. Manipulation du pièce en silicium à l'aide d'un micropréhenseur immergé à glace (LAB)

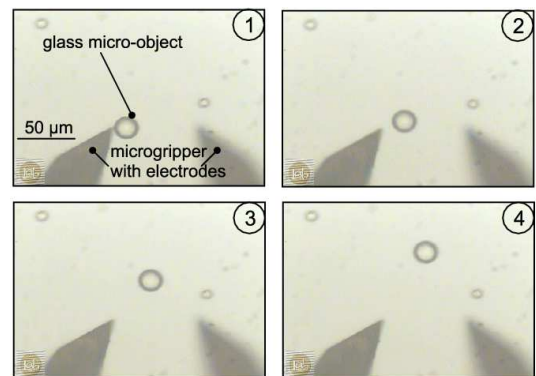


Fig. 6. Opération de relâche d'une bille de polystyrène en utilisant l'effet répulsif de la force de diélectrophorèse (LAB)

force suffisante pour détacher l'objet du préhenseur lors de la relâche par micropince [5]. Les premiers travaux ont permis de montrer la pertinence et l'efficacité de cette méthode (voir figure 6). Le contrôle de la précision de dépense reste un problème toutefois un problème encore ouvert.

V. ARCHITECTURE D'UNE PLATE-FORME DE MICROMANIPULATION

La mise en œuvre des stratégies de micromanipulation nécessite leur intégration dans une station de micromanipulation incluant un contrôle de l'environnement, une structure robotique porteuse, des éléments de perception (force, position) et des stratégies de commande de l'ensemble. Plusieurs plate-formes de micromanipulation regroupant tout ou partie de ces éléments ont été conçues et réalisées au LAB et à l'ISIR.

L'objectif de la plate-forme de l'équipe SAMMI (Systèmes Automatisés de Micromanipulation et de Microassemblage) du LAB est de fédérer sur une plate-forme commune les différents travaux de recherche de l'équipe portant sur la micromanipulation. Cette plate-forme comporte 5 degrés de liberté et intègre une pince piezoélectrique [1] et un système

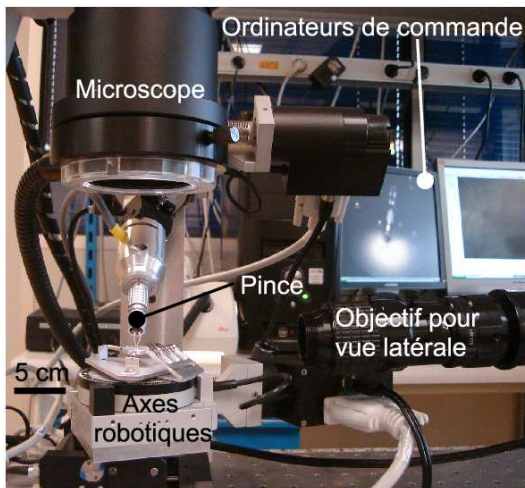


Fig. 7. Plateforme de micromanipulation de l'équipe SAMMI du LAB

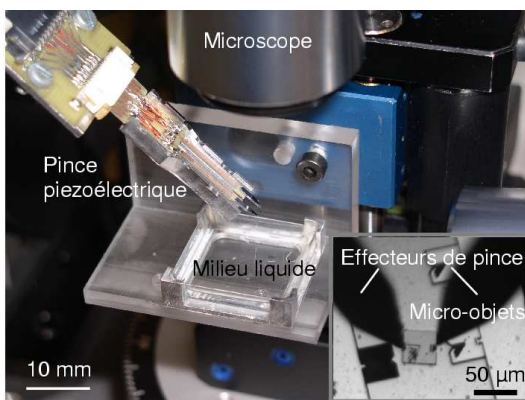


Fig. 8. Plate-forme de micromanipulation en milieu liquide (LAB)

de changement d'outils [3], développés lors de deux thèses du laboratoire (voir figure 7). Les opérations réalisables sont actuellement de type téléopéré sans retour haptique. Cette plate-forme est actuellement le support d'activités de recherche focalisées sur la perception par vision et la fiabilisation de la manipulation. Elle permet l'assemblage de pièces de tailles caractéristiques comprises entre 100 et 400 micromètres.

Une deuxième plate-forme en cours d'élaboration au LAB porte sur l'étude de la micromanipulation d'objets artificiels en milieu liquide (voir figure 8). Comme il a été mentionné précédemment, l'utilisation d'un milieu liquide plutôt que l'air présente l'avantage de réduire de manière sensible les effets d'adhésion et de surface susceptibles de perturber les tâches de manipulation [6][7]. Cette plate-forme en cours d'élaboration possède actuellement 4 degrés de liberté motorisés. La station reprend comme mode de préhension une micropince à actionnement piézoélectrique dont les organes terminaux ont demandé un développement particulier pour être adaptés à des tailles de micro-objets de l'ordre de 10 à 100 micromètres (voir figure 8).

Une autre plate-forme a été développée à l'ISIR depuis 1999 [8]. Son objectif était l'utilisation de stratégies orientées microscopiques pour proposer une approche originale, la manipulation basée sur l'adhésion. Sur la figure 9 sont illustrées les différents composants (le microscope optique, les translateurs, le préhenseur monodigital piézorésistif, une caméra latérale, ...) et un schéma cinématique du dispositif.

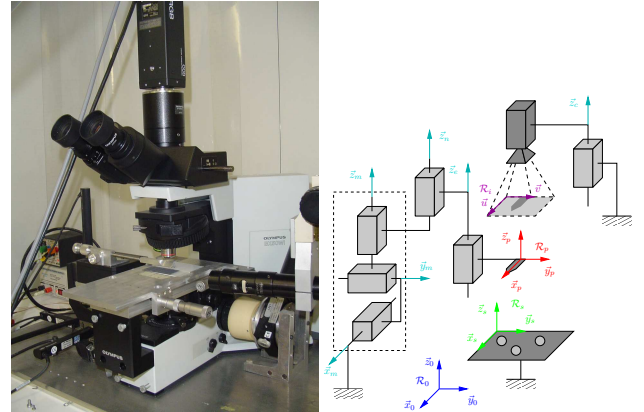


Fig. 9. Vue générale d'un système de micromanipulation basé sur l'adhésion et schéma cinématique (ISIR)

Ce système est capable de saisir un objet microscopique par un simple contact adhérent. Néanmoins, pour s'affranchir de ce contact et rendre ainsi ces manipulations répétibles et flexibles, il faut être capable de la doter d'outils de la robotique classiques et conventionnels comme les commandes référencées vision et efforts ou la téléopération.

VI. COMMANDE DES TÂCHES DE MICROMANIPULATION

Deux approches sont actuellement retenues pour assurer la commande des tâches de micromanipulation : L'automatisation complète de la tâche de micromanipulation ou la téléopération par retour haptique.

A. Problématiques de l'automatisation

L'étude de l'automatisation des procédés microrobotiques est à ce jour une thématique centrale de la microrobotique non encore résolue. L'automatisation est confrontée à plusieurs problématiques synthétisée sur la figure 10. Une des premières spécificités du micromonde tient au fait les actionneurs et les capteurs ont une très forte sensibilité à l'environnement. De la même façon, les signaux de commande ou issus des capteurs sont de niveau faible et donc particulièrement sensible aux bruits. Les commandes de type robuste pour la commande de systèmes microrobotiques sont donc particulièrement adaptées [16]. Les modèles des systèmes et tout particulièrement dans le cas d'actionneurs utilisant des matériaux actifs sont fortement non linéaires. Plusieurs travaux ont également été menés dans ce cadre sur les matériaux en alliage à mémoire de forme et sur les matériaux piézoélectriques [1]

L'étude de stratégies de commande originales adaptées au paradigme du micromonde représente une perspective scientifique majeure des activités microrobotiques.

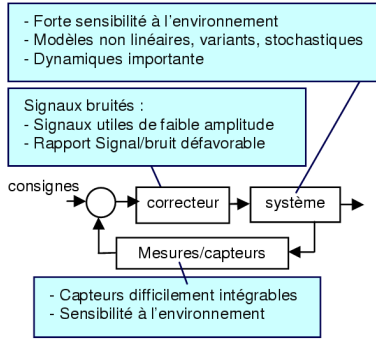


Fig. 10. Synthèses des problématiques de la commande des systèmes agissant dans le micromonde

B. La téléopération dans le micromonde

En mode téléopération, 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. Pour appréhender cette problématique, la tél micromanipulation, nous utiliserons l'exemple de la plate-forme de l'équipe micromanipulation de l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotique avec l'interface, un simple moteur rotatif appelé Brigit (b) et l'esclave une poutre piézorésistive montée sur un nanotranslateur (n) [17].

1) *Le couplage homothétique* : le premier raisonnement pour coupler l'esclave (e) et le maître (ou opérateur o) consiste à copier directement les déplacements du maître sur l'esclave et de transcrire l'effort mesuré par l'esclave sur le maître. Le schéma de fonctionnement est donné par la figure 11. Le

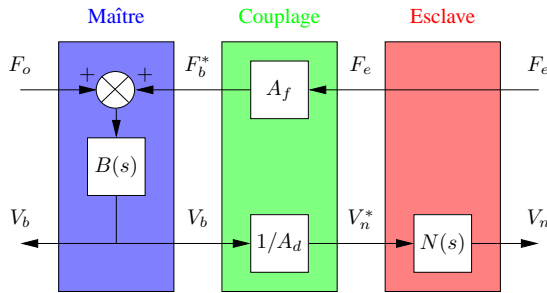


Fig. 11. Principe du couplage homothétique

bloc de couplage se résume alors simplement à un simple couplage homothétique. Celui-ci transpose les grandeurs d'un environnement à l'autre selon :

$$F_b^* = A_f F_e \quad (4)$$

$$V_n^* = \frac{1}{A_d} V_b \quad (5)$$

avec A_f le coefficient homothétique en effort et A_d le coefficient homothétique en déplacement. Ces deux coefficients ont la particularité d'être très élevés et s'expriment à partir du ratio entre les efforts et les déplacements maximaux admissibles dans le macromonde et dans le micromonde.

2) *Le couplage passif* : une autre approche consiste à asservir l'esclave en effort et l'interface en vitesse, les consignes respectives étant issues de l'environnement opposé pour rendre le couplage passif [2]. Le schéma de fonctionnement est donné sur la figure 12.

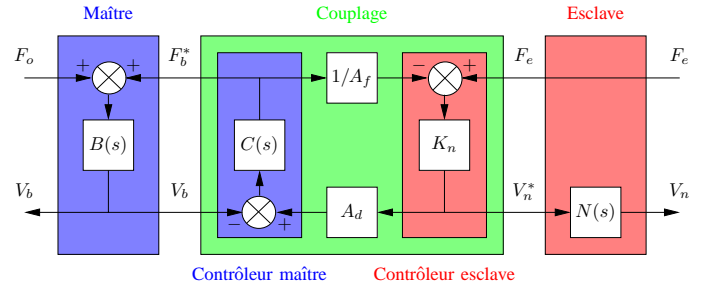


Fig. 12. Principe du couplage passif

Le bloc de couplage est constitué de trois sous-blocs :

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

Le contrôleur maître $C(s)$ réalise l'asservissement de la vitesse de l'interface 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). Le contrôleur esclave est un asservissement en effort utilisant un simple gain proportionnel K_n . Il permet en outre de calculer une consigne en vitesse pour le maître :

$$V_n^* = K_n \left(F_e - \frac{1}{A_f} F_b^* \right) \quad (6)$$

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.

Le couplage passif présente des avantages par rapport au couplage homothétique. Il est en effet possible de régler le couplage passif pour être inconditionnellement stable tout en conservant une bonne forme de transparence [18]. Il est aussi possible de modifier les valeurs des facteurs d'échelle sans perdre la propriété de stabilité [9].

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La problématique de la micromanipulation est très complexe du fait d'un grand nombre de difficultés apportées par le changement d'échelle. De nombreuses solutions apparaissent à partir de l'utilisation des outils de la robotique pour fiabiliser la manipulation, définir des stratégies complexes comme le roulement ou rendre flexible la tâche. Ainsi, la robotique a ouvert de nouvelles solutions dans cette thématique.

De nombreuses perspectives existent dans ce domaine de recherche, largement ouvert. Ainsi, une vaste thématique demeure encore avec la modélisation, l'analyse et l'identification des effets micro ou nano physiques. Il s'agit de pouvoir disposer d'outils pertinents de simulation pour la conception optimisée de plate-formes de manipulation. Le corollaire de cette activité est la recherche sur les capteurs d'effort à ces

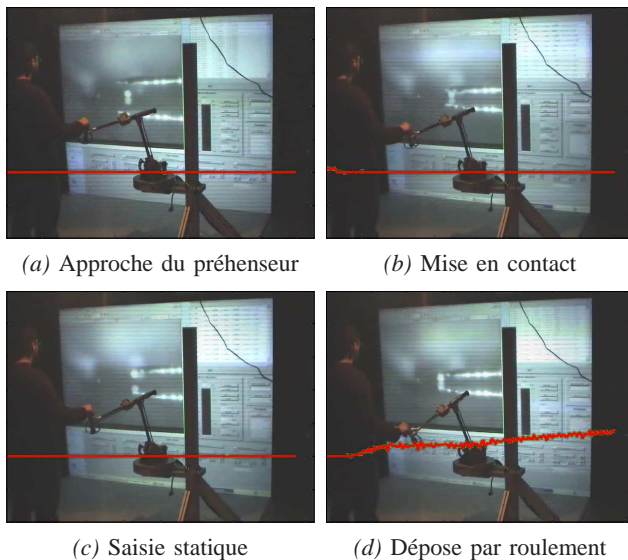


Fig. 13. Télé-manipulation d'un grain de pollen

échelles actuellement fortement contraints par des aspects technologiques et de traitement du signal. De façon similaire aux efforts, les outils de la vision doivent franchir des nouveaux pas pour, par exemple, reconstruire des scènes en temps réel dans des environnements fortement destructurés. Les problématiques liées à la vision autour de l'environnement, par exemple aqueux, ou du changement des conditions d'éclairage, apparaissent encore très ouvertes et non résolues à ces échelles. Les micro-actionneurs ne possèdent pas encore de propriétés satisfaisantes pour répondre à la problématique de la manipulation et des contraintes associées : plage, résolution, vitesse. Leur développement est confrontée à des difficultés technologiques et au manque actuel de méthodes efficaces de commande associées à ces actionneurs. De manière plus générale, l'étude de la commande automatique de l'ensemble de la tâche de micromanipulation est actuellement une des perspectives scientifiques des plus ambitieuses en microrobotique.

En termes applicatifs, deux grands champs se dégagent pour l'avenir. Le premier concerne le micro-assemblage pour des structures optoélectromécaniques, par exemple l'assemblage 3D de composants optiques pour les microsystèmes. De nouvelles règles pour l'assemblage semblent devoir être définies pour répondre à ce champ de recherche. Le second concerne la réduction d'échelle, soit la nanomanipulation. Ainsi, de nouvelles difficultés apparaissent avec les limites optiques de visibilité et l'utilisation d'autres outils comme la microscopie à champ proche ou le microscope électronique à balayage.

REFERENCES

- [1] J. Agnus, "Contribution à la micromanipulation. étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropince piézoélectrique." Ph.D. dissertation, Université de Franche-Comté., novembre 2003.
- [2] R. Anderson and M. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494–501, 1989.

- [3] C. Clévy, "Contribution à la micro-manipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage." Ph.D. dissertation, Université de Franche-Comté, décembre 2005.
- [4] F. Dionnet, D. Haliyo, and S. Régner, "Autonomous manipulation using a new strategy of accurate release by rolling," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Mai 2004, pp. 5019–5024.
- [5] M. Gauthier, E. Gibeau, and D. Hériban, "Submerged robotic micro-manipulation and dielectrophoretic micro-object release," in *proc. of the IEEE ICARCV 2006 conference*, Singapour, dec. 2006.
- [6] M. Gauthier, B. Lopez-Walle, and C. Clévy, "Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums," in *proc. of CIRA'05*, June 2005.
- [7] M. Gauthier, S. Régner, and N. Chaillet, "Forces analysis for micro-manipulation in dry and liquid environments," *International Journal of Micromechatronics, special session on « Micro-handling »*, vol. 3, pp. 389–413, 2006.
- [8] D. Haliyo, S. Régner, and J. Guinot, "Mumad, the adhesion based dynamic micro-manipulator," *European Journal of Mechanics A - Solids*, vol. 22, no. 6, pp. 903–916, 2003.
- [9] G. Hannaford, B. Hirzinger, C. Preusch, and J. Ryu, "Time domain passivity control with reference energy behavior," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [10] J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*. ACADEMIC PRESS, 1991.
- [11] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet, "Submerged freeze gripper to manipulate micro-objects," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 2006, pp. Beijing, China.
- [12] —, "Dynamic modelling of a submerged freeze microgripper using a thermal network," in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, ETH Zürich, Switzerland, September 2007.
- [13] —, "A submerged freeze microgripper for micromanipulations," in *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Roma, Italy, April 2007.
- [14] D. Maugis, *Contact, adhesion and rupture of elastic solids*. Berlin : Springer-Verlag, 2000.
- [15] H. A. Pohl, *Dielectrophoresis*. Cambridge : Cambridge University Press., 1978.
- [16] M. Rakotontrabe, "Développement et commande modulaire d'une station de microassemblage." Ph.D. dissertation, Université de Franche-Comté, Novembre 2006.
- [17] S. Régner, "La manipulation aux échelles microscopiques," *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Pierre et Marie Curie 2006.
- [18] G. Venture, S. Haliyo, A. Micaelli, and S. Régner, "Force-feedback micromanipulation with unconditionally stable coupling," *International Journal of Micromechatronics, special session on « Micro-handling »*, vol. 3, pp. 307–327, 2006.