

Bilan du Projet ECoViA : Etude du Couplage Visuo-hAptique

A. Lécuyer, J. McIntyre, C. Mégard, S. Coquillart, et E. Gentaz

Résumé—Le projet de recherche ECoViA avait pour but d'étudier et de mieux comprendre les mécanismes de la perception humaine qui sont impliqués lors du couplage entre la vision et le toucher. Les applications attendues du projet ECoViA se situent dans le domaine des interfaces homme-machine, pour les systèmes de télé-opération ou de réalité virtuelle. Cet article décrit les principaux résultats du projet ECoViA.

Au cours de ce projet, plusieurs actions de recherche ont été menées qui ont permis de mettre en évidence des propriétés nouvelles de l'intégration visuo-haptique : influence de la délocalisation spatiale, illusions visuo-tactiles, etc. Nous avons ensuite recensé de nombreuses applications potentielles pour ces travaux : simulations industrielles de montage en environnement virtuel encombré, apprentissage des systèmes maître-esclave, etc. Nous avons alors développé pour ces applications différents systèmes d'aide à la manipulation basés sur des retours visuo-haptiques : rendu visuo-haptique en situation sous-actionnée, et représentations visuelles des contacts en situation de contacts multiples.

Le projet ECoViA a ainsi permis de mettre en place une collaboration véritablement multidisciplinaire où les expertises dans plusieurs domaines sont réunies pour développer nos connaissances de la perception visuo-haptique et les appliquer dans le domaine de la robotique et de la réalité virtuelle.

Mots-clés—Perception, Retour Haptique, Vision, Couplage Visuo-Haptique, Réalité Virtuelle, Robotique

A. Lécuyer est chercheur à l'Institut de Recherche en Informatique des Systèmes Aléatoires, IRISA, Campus de Beaulieu, F-35042, Rennes Cedex, France (e-mail: anatole.lecuyer@irisa.fr).

J. McIntyre est chercheur au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, CNRS – Collège de France, 11 pl Marcelin Berthelot, F-75005 Paris, France (e-mail : joe.mcintyre@college-de-france.fr).

C. Mégard est ingénieur ergonomiste au Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, Centre de Fontenay aux Roses, BP 6, 92265, Fontenay-Aux-Roses Cedex, France (e-mail: christine.megard@cea.fr).

S. Coquillart est directeur de recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, INRIA, 655 avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot, France (e-mail : sabine.coquillart@inria.fr).

E. Gentaz est chercheur au Laboratoire Psychologie et Neurocognition, Université Pierre Mendès France, Bâtiment Sciences de l'Homme et Mathématiques, BP 47, 38040 Grenoble Cedex 9, France (e-mail: edouard.gentaz@upmf-grenoble.fr).

I. INTRODUCTION

Le couplage visuo-haptique intervient naturellement en robotique au cours de tâches de télé-opération. En effet, le télé-opérateur réalise la plupart du temps ses actions avec à la fois un retour visuel de la scène et un retour haptique (le retour d'effort du bras maître). C'est le couplage entre les informations visuelles et haptiques qui lui permet de réaliser ces opérations avec un maximum d'efficacité.

Le couplage visuo-haptique est donc une composante fondamentale à prendre en compte dans la mise au point des Interfaces Homme-Machine (IHM) de télé-opération. Nous supposons qu'une meilleure compréhension de l'intégration sensorielle et du couplage visuo-haptique permettra d'améliorer directement ces IHM de télé-opération. Le projet de recherche ECoViA visait donc à étudier les mécanismes de la perception humaine qui sont impliqués lors du couplage entre la vision et le toucher, et à appliquer nos résultats dans le domaine de l'interaction homme-machine lors de tâches de télé-opération mais aussi pour améliorer les systèmes de réalité virtuelle.

Pour cela, nous avons conduit 5 actions de recherche complémentaires. Nous avons commencé (Action 1) par étudier les limites d'un modèle d'intégration visuo-haptique proposé récemment [Ernst et Banks, 2002]. Nous avons également étudié l'utilisation de modèles internes en présence d'informations sensorielles visuelles et haptiques lors de tâches de manipulation (Action 2). Puis nous avons étudié les illusions sensorielles visuo-haptiques du retour « pseudo-haptique » [Lécuyer 2001] (Action 3). Nous avons également lancé une étude sur les bases physiologiques (neuronales) de l'intégration visuo-haptique (Action 4). La cinquième et dernière action de recherche concernait les applications du projet ECoViA, à travers l'utilisation de nos résultats dans un contexte de robotique. Cette action de recherche a dans un premier temps permis de définir et de sélectionner des applications potentielles pour nos résultats. Dans un second temps, nous avons développé plusieurs démonstrateurs basés sur des techniques ou des métaphores visuo-haptiques.

Cet article présente les résultats principaux de ces actions de recherche, obtenus au cours du projet ECoViA.

II. ACTION 1 : INVESTIGATION DU MODELE DE ERNST ET BANKS

La compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'intégration visuo-haptique fait l'objet de débats qui durent depuis plus d'un siècle et qui restent encore très ouverts. Un

modèle statistique a été récemment proposé dans la revue Nature [Ernst et Banks, 2002]. Ce modèle stipule que la pondération des informations visuelles et haptiques est directement liée aux performances perceptives de chacun des deux canaux sensoriels pris indépendamment (performance « uni-modale »). L'expérience menée par les chercheurs concernait la perception kinesthésique d'un paramètre spatial (arête de cube) en présence d'un conflit entre la vision et le toucher. Nous avons mené deux expérimentations afin de tester les limites de ce modèle dans d'autres contextes expérimentaux.

A. Expérience 1 : Perception visuo-haptique d'une texture en rotation

Dans la première expérience nous avons testé le modèle de Ernst et Banks sur une tâche de perception tactile de la vitesse d'un arbre rotatif et de la texture le recouvrant (sa densité spatiale). Les sujets touchaient un arbre rotatif actionné par un moteur électrique (voir Figure 1) tandis qu'ils regardaient en même temps une représentation virtuelle de cet arbre à l'écran d'un ordinateur. Un conflit sensoriel proposé dans notre expérience concernait la vitesse de rotation de l'arbre : la vitesse de rotation « tactile » était constante, tandis que la vitesse « visuelle » était par moment plus ou moins rapide que la vitesse tactile.

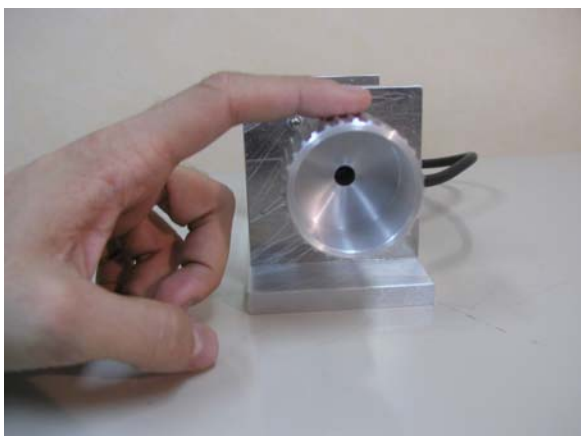


Fig. 1. Dispositif expérimental : une texture striée actionnée en rotation par un moteur électrique est touchée avec l'index. Un écran d'ordinateur est également utilisé pour visualiser un cylindre en rotation.

Les résultats principaux de cette première expérience sont les suivants : la mise en conflit entre la vision et le toucher sur l'information de vitesse de rotation de la texture tourne à l'avantage de la vision (poids visuel observé = 70% ; poids haptique = 30%). Ce résultat conforte le modèle de Ernst et Banks qui prévoit que la modalité sensorielle la plus performante va l'emporter et dominer l'autre modalité en situation de conflit. En effet, la performance perceptive observée en situation uni-modale pour la vision était meilleure que la performance du sens haptique seul.

Par ailleurs, nous observons un effet important du conflit sensoriel et de la vitesse de rotation « visuelle » sur la perception que l'utilisateur a de la période spatiale de la texture striée située sous son doigt. Plus la vitesse visuelle

augmente (à vitesse tactile constante), plus la période spatiale perçue a tendance à augmenter. Nous sommes donc en présence d'un nouvel effet « pseudo-haptique » [Lécuyer et al., 2000] [Lécuyer et al., 2001], que le modèle de Ernst et Banks ne permet pas d'expliquer directement. Nous observons également un effet d'apprentissage fort et significatif. En effet, au fur et à mesure des essais, la période spatiale perçue a de plus en plus tendance à être modifiée par la vitesse visuelle. Ceci suggère qu'un processus d'association systématique est en place entre la vitesse visuelle et la période spatiale de la texture. Ce résultat a une implication forte en termes d'application. Il suggère en effet que nous pouvons développer des interfaces tactiles à bas coût qui exploiteront cette nouvelle illusion pseudo-haptique.

B. Expérience 2 : Influence de la délocalisation spatiale sur l'intégration visuo-haptique

Nous avons testé le modèle de Ernst et Banks dans une des ses conditions limites : la délocalisation spatiale des deux sources d'informations sensorielles visuelles et haptiques. Le modèle exige en effet une co-localisation spatiale, en raison du besoin d'unicité du percept. Nous avons donc mis en place une deuxième plateforme expérimentale de réalité virtuelle de type « Fish-Tank » (voir Figure 2). Celle-ci permet de tester la perception d'un nouveau paramètre : l'amplitude de rotation de l'extrémité d'une interface haptique (une poignée). Nous testons plusieurs conditions : vision seule, toucher seul, vision-toucher co-localisés, vision-toucher délocalisés. Nous introduisons également un conflit perceptif dans les conditions visuo-haptiques afin de pouvoir évaluer le poids attribué à chaque modalité.



Fig. 2. Système « Fish-Tank » : un miroir est utilisé pour superposer parfaitement le retour visuel stéréoscopique d'un écran d'ordinateur et l'extrémité de l'interface haptique.

Le résultat obtenu le plus intéressant est que le poids attribué à la modalité visuelle augmente considérablement en situation délocalisée par rapport à la situation co-localisée (+30% pour atteindre un poids de 98%). La vision est donc utilisée de manière quasiment exclusive pour résoudre la tâche

expérimentale en situation délocalisée. Ceci suggère que la co-localisation spatiale favorise une intégration bi-modale visuo-haptique, tandis que la délocalisation spatiale va plutôt favoriser la dominance ou la capture sensorielle d'une modalité (ici la vision).

Ce résultat peut avoir des conséquences très fortes sur la conception des systèmes de télé-opération et de réalité virtuelle qui combinent périphériques visuels et haptiques. En effet, si les performances de l'interface haptique sont bonnes, il y a un intérêt à co-localiser au maximum les deux sources afin que le retour haptique soit exploité. En revanche, si l'interface haptique souffre de quelques défauts ou limitations, on aura intérêt à délocaliser les deux sources afin de palier les manques du retour haptique par le retour visuel (qui dominera la perception générale de l'environnement virtuel).

III. ACTION 2 : HYPOTHESE DES MODELES INTERNES

Dans le contexte de la perception visuo-haptique, nous pouvons proposer comme hypothèse de travail que le sujet crée puis utilise un « modèle interne » du comportement physique des objets explorés. Par exemple, lorsque le sujet comprime un ressort, il s'attend à percevoir un comportement du type : la force de réaction est proportionnelle au déplacement. La perception de la raideur reposera alors sur une maximisation de la cohérence entre les informations sensorielles (dont les informations visuelles) et ce modèle interne de ressort. Nous avons cherché à tester cette hypothèse d'élaboration et d'utilisation de modèles internes au cours de cette action de recherche. Nous avons abordé deux problèmes pour la télé-opération : le problème de repère et le problème de l'impédance.

A. Expérience 1 : Problème de l'impédance

Nous faisons l'hypothèse que le sujet a un modèle interne de la raideur de son bras, qui lui permet d'exercer des efforts dans une direction voulue malgré la modulation de la force engendrée par l'anisotropie du bras. En règle général l'impédance du robot ne sera pas la même que le bras de l'opérateur. L'écart entre le modèle interne et la raideur effective aura forcément une influence sur la capacité de contrôler avec précision la force exercée par le robot télécommandé.

Afin d'étudier cette question nous avons conçu une tâche de décapage effectuée dans une simulation de réalité virtuelle avec un manche à retour d'effort (Figure 3). Le sujet passe un outil sur une surface courbe avec pour consigne de maintenir constante la force appliquée contre la surface. Nous avons mesuré la variation de la force exercée sur la surface lors du geste. Nous regardons l'effet d'un changement d'impédance entre la main et la surface sur la capacité de maintenir une force constante.



Fig. 3. Dispositif expérimental utilisé pour une tâche de décapage virtuel.

Contrairement à notre hypothèse de base, les sujets n'ont pas réussi à compenser l'anisotropie de la raideur de leur bras. Selon l'orientation de la surface au point de contact, la force exercée variait en fonction de la raideur perpendiculaire à la surface (Figure 4). La force était plus importante dans la direction de la raideur maximale de la main. Nous concluons que le sujet n'a pas un bon modèle interne de la raideur de son propre bras. A ces écarts, s'ajouterait la divergence entre l'impédance du bras et celle du manipulateur en téléopération. Nous procédons actuellement, avec le dispositif à retour d'effort développé, à l'évaluation d'indicateurs visuels de la force (voir Action 5) pour apprendre un modèle interne de l'impédance.

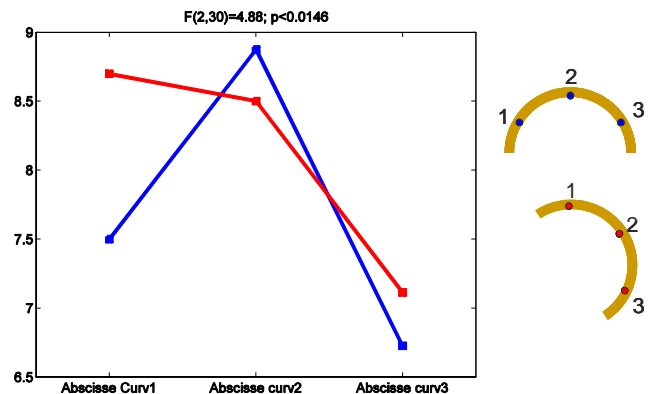


Fig. 4. Variation des forces de la main selon la position sur la surface courbe. La force est plus importante dans la direction de raideur maximale de la main.

B. Expérience 2 : Problème de repère

Dans le cas d'un système de téléopération, le point de vue de la main du sujet n'est pas le même que celui sur le bras effecteur dans l'espace de travail distant. Dans un premier temps, nous avons observé comment un sujet aligne la direction d'un stimulus visuel (l'orientation d'un trait sur un écran vidéo) avec la direction d'une force imposée sur sa main et vice versa. Nous avons effectué l'expérience en plaçant le

joystick utilisé à différents endroits autour du sujet. Nous avons modulé ainsi le point de vue de la main par rapport au point de vue du stimulus visuel (comme si le sujet manipulait un bras robotique avec un joystick tout en regardant l'espace du robot à travers un écran vidéo).

Nous avons mis en évidence une symétrie dans les transformations entre le repère visuel et le repère haptique. Bien que le trait soit incorrectement réorienté quand il s'agit de l'aligner avec une force imposée, une réorientation inverse est produite quand le sujet doit exercer une force dans la direction imposée par le trait. Donc, il y a des erreurs complémentaires dans le transfert visuo-haptique et haptique-visuel qui fait que la boucle complète reste quasiment sans distorsion. Néanmoins, il reste une petite distorsion due à la variation de l'anisotropie de la raideur de la main selon la position de la main dans l'espace (voir expérience 1 ci-dessus).

Les résultats précédents ont montré la nécessité d'apprendre l'impédance de son manipulateur afin de bien diriger les forces dans une direction voulue. De plus, nous voyons ici qu'un opérateur doit prendre en compte le changement de point de vue afin d'aligner son modèle interne de l'impédance avec le repère dans lequel fonctionne le manipulateur esclave d'un système de télé-opération. Dans un deuxième temps nous allons prochainement étudier si des indications visuelles sur un écran renseignant le sujet sur la force réellement produite, ou symbolisant un déplacement du point d'équilibre virtuel, peuvent aider à la construction d'un modèle interne de l'impédance du bras (réel ou artificiel).

IV. ACTION 3 : ILLUSIONS SENSORIELLES ET RETOUR PSEUDO-HAPTIQUE

A. Développement d'une plateforme d'expérimentation du retour pseudo-haptique.

Le retour pseudo-haptique se présente comme une possibilité de retourner des informations haptiques (retour tactile ou retour d'effort) de manière simple, sans nécessairement faire appel aux coûteuses interfaces haptiques (périphériques d'interaction dédiés à la restitution des sensations haptiques) [Lécuyer, 2001]. Le retour pseudo-haptique repose sur un couplage visuo-haptique : la combinaison de l'action de l'utilisateur dans la simulation (via par exemple un périphérique d'entrée totalement passif) avec le retour visuel de la scène. Le retour visuel est utilisé comme un retour "perturbateur" qui va induire des sensations haptiques, à la limite de l'illusions sensorielle. Le retour pseudo-haptique correspond donc à une utilisation astucieuse du couplage visuo-haptique. Il a été montré que le retour pseudo-haptique permet de simuler efficacement des sensations et des « variables haptiques » multiples telles que : la raideur d'un ressort virtuel, un couple ou la viscosité.

Plusieurs expériences ont été effectuées dans le passé pour essayer de mieux comprendre ce phénomène. Afin de permettre des expérimentations complémentaires. Les objectifs des expériences à réaliser sont :

- caractériser plus précisément les plages de raideur physique du ressort simulé pour lesquelles le phénomène d'illusion se produit
- confirmer ou infirmer la disparité de perception inter-individuelle du phénomène
- observer l'influence de la stratégie employée par les sujets pour comprimer les ressorts

La plateforme développée a été conçue pour permettre de mener à bien ces nouvelles expérimentations. Elle s'appuie sur un bras haptique de type PHANTOM. Elle permet de définir et programmer un scénario d'expérimentation et gère le passage des sujets et l'enregistrement des données des tests. Destinée à des non informaticiens la plateforme propose une interface simple et conviviale.

B. Première expérimentation : le retour « pseudo-haptique discret »

Dans le cadre de la caractérisation des plages de raideur, une expérimentation a été menée avec comme objectifs :

- L'évaluation de la perte de performance perceptuelle du retour pseudo-haptique comparé au retour haptique,
- L'introduction et l'évaluation du concept de retour « pseudo-haptique discret » qui consiste à utiliser successivement plusieurs raideurs d'entrée (en nombre fini) pour enrichir la gamme des sensations pseudo-haptiques possibles.

Pour ce faire, trois conditions expérimentales sont comparées : haptique, pseudo-haptique et pseudo-haptique discret. Les tests proposent l'évaluation de 7 couples de ressorts avec des raideurs allant de 170 à 230 N/m. Quatorze répétitions de chaque couple sont enregistrées. L'analyse des données fait apparaître de meilleurs résultats en pseudo-haptique discret qu'en pseudo-haptique pur, ces résultats restant inférieurs au cas haptique pur. La question posée par ces résultats est maintenant celle de l'évaluation du bénéfice du pseudo-haptique discret par rapport au surcoût d'un éventuel dispositif de retour pseudo-haptique discret. Le passage au pseudo-haptique discret nécessite en effet le passage à une technologie plus lourde à mettre en oeuvre. Seule une étude détaillée pourra répondre à cette question.

En conclusion, une plateforme d'expérimentation du pseudo-haptique a été développée, la notion de pseudo-haptique discret a été introduite et comparée au pseudo-haptique classique et au retour haptique. Des bénéfices par rapport au pseudo-haptique classique ont été mis en évidence. Reste à évaluer le coût d'un éventuel dispositif de retour pseudo-haptique discret pour conclure quand à l'apport de la solution proposée.

V. ACTION 4 : BASES PHYSIOLOGIQUES DE L'INTEGRATION VISUO-HAPTIQUE

La pondération des informations visuelles et haptiques proposée par Ernst et Banks, et testée lors de l'action 1

évoque un filtre de Kalman à l'intérieur duquel la réponse est constituée par la somme pondérée des signaux d'entrée, et pour lequel le poids donné respectivement à chacun des deux canaux d'entrée est déterminé par le bruit de fond attendu pour chaque canal. Lors d'une expérience chez l'homme sur le pointage vers des cibles 3D [McIntyre et al. 2000] nous avons trouvé aussi un comportement semblable : le poids donné aux informations visuelles dépendait de la variance des informations selon l'axe dans l'espace. Nous avons détecté des distorsions spécifiques de la direction de profondeur par rapport aux yeux du sujet, cette direction étant plus bruitée que les deux autres directions. Suite à ces expériences nous avons lancé des réflexions sur les mécanismes neuronaux qui peuvent faire apparaître un tel comportement de type filtre de Kalman. En d'autres termes, comment intégrer des informations venant des modalités différentes dans le même « map » neuronal et ceci, selon la variance des informations de chaque modalité ?

Lors de l'action 4 nous avons testé des hypothèses sur le mécanisme qui pourrait être mis en œuvre par des neurones pour effectuer l'intégration visuo-haptique et qui serait cohérent avec les résultats psychophysiques sur la délocalisation obtenus lors de l'action 1. Nous avons modélisé le processus d'intégration par un neurone bi-modal qui est sensible à la fois aux entrées visuelles et haptiques. Le champ récepteur de ce neurone était différent selon l'entrée, en fonction de la variance attendue pour chaque modalité. Ensuite, nous avons testé deux modes d'intégration entre les deux entrées : additif et multiplicatif (voir Figure 5).

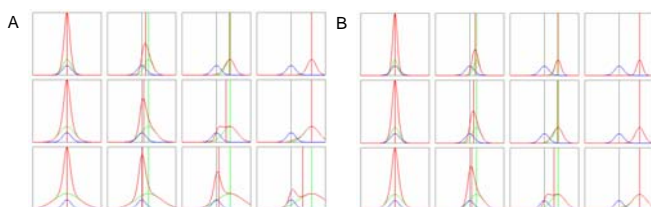


Fig. 5. Simulation de la capture visuelle (voir action 1) engendrée par l'intégration additive (A) ou multiplicative (B). Le largeur du champ récepteur visuel (vert) varie de haut en bas par rapport au champ récepteur haptique (bleu) tandis que la délocalisation entre haptique et visuel augmente de gauche à droite. La réponse simulée est indiquée en rouge.

Ces simulations mettent en évidence deux propriétés importantes pour la compréhension des réseaux de neurones liés à cette tâche. D'abord, la réponse globale s'aligne plus ou moins avec l'une ou l'autre des entrées sensorielles en fonction du champ récepteur relatif entre les deux. La réponse globale est plus proche des informations pour lesquelles le champ récepteur est le plus étroit. On voit ainsi comment implémenter un filtre de Kalman avec les propriétés de neurones. En revanche, seul le modèle multiplicatif démontre l'effet de 'capture visuelle'. Pour le modèle additif, la réponse globale se trouve toujours quelque part entre les deux réponses mono-modale (visuel et haptique). Pour le modèle multiplicatif, quand les deux réponses monomodales sont écartées d'une certaine distance, l'une des deux va 'capturer' la réponse globale. Le seuil de l'écart à partir duquel l'une des

réponses domine est déterminé par la largeur des champs récepteurs respectifs. Nous avons donc identifié deux propriétés essentielles de l'intégration neuronale des sensations visuo-haptiques chez l'homme.

VI. ACTION 5 : UTILISATION ET APPLICATION DES RESULTATS DANS UN CONTEXTE ROBOTIQUE ET REALITE VIRTUELLE

A. Recensement des applications potentielles

Nous avons tout d'abord fait le point sur l'ensemble des applications posant des problèmes ou des questions portant sur l'interaction homme-machine et mettant en œuvre le couplage visuo-haptique. La méthode d'investigation adoptée a consisté à interviewer un grand nombre de chefs de projets et de formaliser leurs réponses. Les trois points suivants ont été mis en évidence :

1. Immersion multi-sensorielle pour la télé-opération

- Quel est le rôle de l'immersion sensorielle dans la capacité à télé-opérer ? Les caméras utilisées sur site industriel sont projetées le plus souvent sur des écrans de petite taille, d'une part pour des raisons de coût et d'autre part parce que ces écrans sont déplacés d'un poste à l'autre selon les besoins. Or la plupart des développements d'environnements virtuels font appel à des périphériques de visualisation dits « immersifs » (lunettes stéréo, casques, etc), afin d'augmenter la sensation de présence. Dans ce contexte, nous sommes en droit de nous demander quel serait l'apport d'un système immersif visuo-haptique pour les applications de télé-opération et que signifie la « présence » en télé-opération.

2. Favoriser la création d'un modèle opératif pour la télé-opération des systèmes maître-esclave

- L'évolution des télémanipulateurs maître-esclave mécaniques vers des télémanipulateurs à contrôleur électrique permet maintenant de commander des bras maîtres et esclaves très dissemblables (Figure 6), tant du point de vue des capacités de charge que par leur morphologie (commande de systèmes robotiques non homomorphes). Ces développements techniques engendrent les questions suivantes : comment favoriser le pilotage de bras de télé-opération très différents ? Que signifie le retour d'effort dans ces conditions ?
- Le passage du couplage maître-esclave mécanique à un couplage électrique permet également aux opérateurs d'utiliser le mode cartésien. Comment accompagner cette évolution technologique auprès des utilisateurs, qui passent brutalement d'un pilotage articulaire (très longuement pratiqué) au pilotage cartésien ?

Dans ces problématiques, peut-on faciliter l'apprentissage des télémanipulateurs et l'élaboration d'un modèle opératif par des assistances visuo-haptiques ?



Fig. 6. Dysmorphie entre bas maître (gauche) et bras esclave MT200 numérique (droite)

3. Métaphores d'interaction visuo-haptiques

Cet axe de recherche concerne plusieurs problématiques de terrain (robotique pour handicapés, reconstitution de tâche en environnement virtuel, formation). La question posée porte sur les représentations utilisées (symboliques, réalistes) et sur les moyens d'interaction qui permettent de restituer un environnement et surtout un contexte d'activité « opératif ». Il s'agit donc de trouver les métaphores visuo-haptiques qui extraient et représentent au mieux les aspects prégnants de la situation. En balayant l'ensemble des projets en cours de développement au CEA, les points suivants méritent qu'on s'y arrête :

- Comment rendre compte à une personne handicapée des propriétés haptiques (sensation de masse et d'inertie) d'objets manipulés par un robot d'assistance ?
- Comment lever l'ambiguïté de la perception haptique (retour d'effort de collisions) lors de la manipulation d'objets en environnement virtuel encombré ? (voir Figure 7).

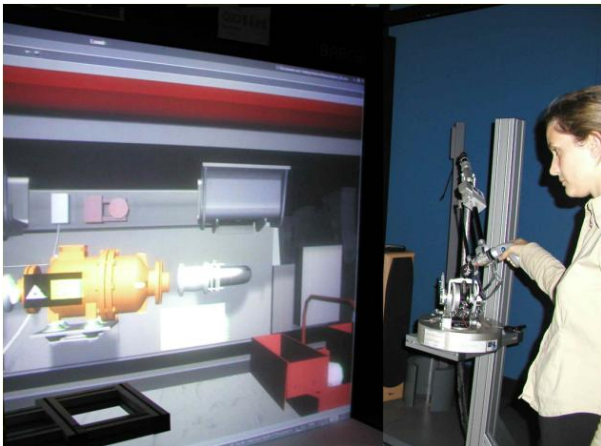


Fig. 7. Exemple d'environnement virtuel encombré où l'interprétation de la sensation haptique est difficile.

- Comment développer des interfaces haptiques portables (faible coût) qui permettent de se déplacer en environnement immersif avec un retour d'effort ?

Comment, en effet, gérer des repères haptiques mobiles ?

Parmi les multiples possibilités, nous avons distingué deux pistes prioritaires d'application : la conception des interfaces haptiques portables sous actionnées, et l'amélioration des simulations complexes d'assemblage en environnement virtuel encombré. Ces deux pistes ont fait l'objet de développements spécifiques qui sont décrits dans les parties suivantes.

B. Application 1 : Représentations visuelles d'informations haptiques de contact en environnement virtuel encombré

La première application que nous avons retenue concerne les tâches de montage industriel en environnement virtuel très encombré (prototypage virtuel). Afin d'améliorer la perception des contacts multiples qui surviennent systématiquement en environnements virtuels encombrés, nous avons proposé un ensemble d'aides et de représentations visuelles (voir Figure 8). Nous avons proposé des retours visuels qui fournissent différents types d'information : proximité entre les objets virtuels, contact, et même effort de contact (en utilisant une représentation « pseudo-haptique » des efforts entre les pièces).

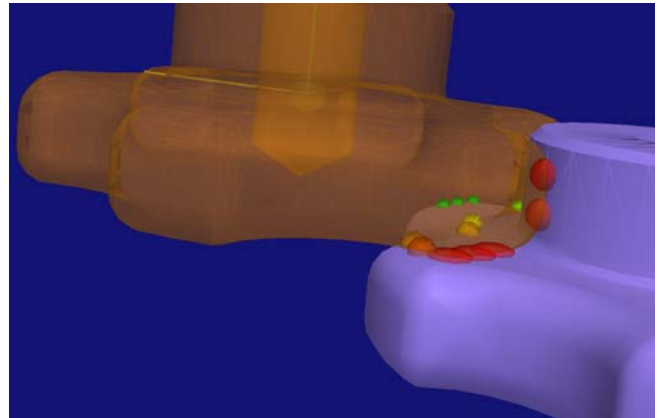


Fig. 8. Représentations visuelles des informations de proximité et d'effort de contact entre deux objets virtuels.

Les résultats obtenus sont encourageants (voir Figure 9). La durée totale de la tâche de montage diminue globalement en présence des aides visuelles. Les performances obtenues se rapprochent de l'utilisation d'une vision stéréoscopique (implémentée et testée avec des lunettes stéréoscopiques). Les questionnaires subjectifs remplis par les sujets après chaque campagne d'essais indiquent également une bonne appréciation des aides visuelles.

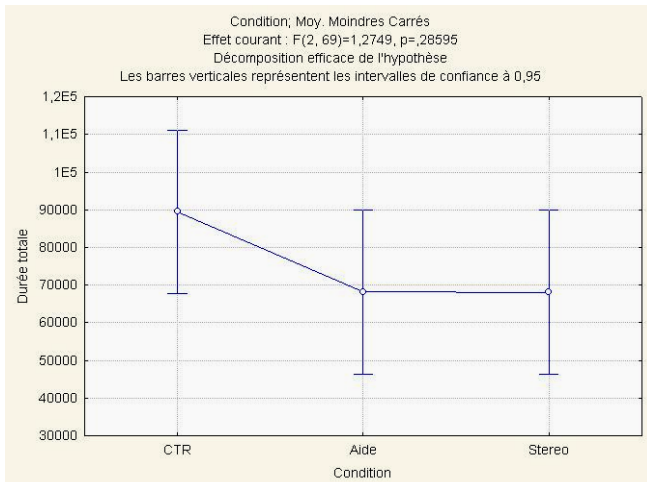


Fig. 9. Temps d'accomplissement de l'opération de montage virtuel dans les conditions : Contrôle (aucune aide visuelle ni stéréoscopie), Aides visuelles activées, et Vision stéréoscopique.

C. Application 2 : Rendu visuo-haptique avec une interface haptique sous-actionnée

Dans un deuxième temps, nous avons développé une nouvelle technique visuo-haptique pour améliorer l'utilisation des interfaces haptiques sous-actionnées (souvent les interfaces haptiques portables).

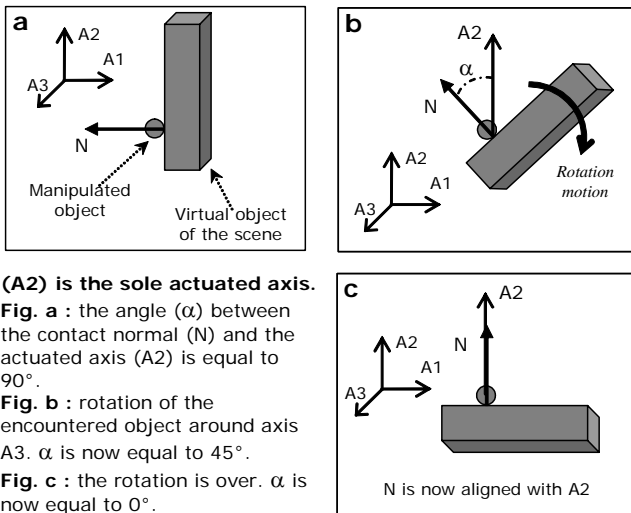


Fig. 10. Principe de la technique A4.

L'idée principale de la technique « A4 » (*Automatic Alignment with the Actuated Axes of the device*) consiste à faire tourner (visuellement et haptiquement) la scène virtuelle pour aligner la résultante des forces avec le ou les axes actionnés de l'interface haptique (voir Figure 10).

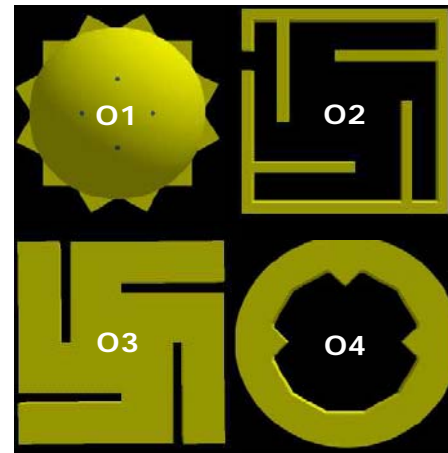


Fig. 11. Objets virtuels utilisés pour la tâche de suivi de surface.

Cette technique a été évaluée expérimentalement sur une tâche de suivi de surface d'objets virtuels (Figure 11). Nous avons montré tout d'abord que la performance des interfaces haptiques sous-actionnées se trouvaient effectivement entre celle des interfaces totalement passives (plus mauvais résultats) et celle des interfaces haptiques totalement actionnées (meilleurs résultats). Ensuite, l'utilisation de la technique A4 a permis de réduire fortement la « pénétration » à l'intérieur des objets virtuels et a donc globalement permis d'augmenter les performances des sujets en situation sous-actionnée.

VII. PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Le projet ECOVIA nous a permis de mettre en place un vaste chantier de réflexion sur le couplage visuo-haptique et ses implications en termes de conception des systèmes de télé-opération et de réalité virtuelle.

A travers la première action de recherche du projet nous avons observé des phénomènes nouveaux tels que l'influence de la vision sur la perception tactile et l'influence de la délocalisation spatiale des deux sources d'informations (vision et toucher) sur leur intégration perceptive. A l'issue de l'Action 2, nous arrivons à une meilleure compréhension des contraintes imposées par l'impédance du bras effecteur sur la reproduction des forces, ainsi que des conséquences d'un changement de repère sur la capacité d'exercer une force dans une direction donnée avec un système de télé-opération. L'Action 3 débouche sur une plateforme d'expérimentation sur le retour pseudo-haptique et a proposé le concept de retour pseudo-haptique discret. L'Action 4 a étudié les bases physiologiques (neuronales) de l'intégration visuo-haptique et montré l'importance des champs récepteurs des neurones, mis en relation avec le poids des modalités sensorielles concernées. Enfin, l'Action 5 a permis de mieux cerner les applications de nos résultats. Nous avons pu identifier deux pistes prioritaires : la conception des interfaces haptiques portables, et l'utilisation des métaphores visuo-haptiques pour améliorer les simulations d'assemblage avec retour d'effort en environnement virtuel encombré. Pour ces deux pistes, nous avons proposé des solutions innovantes basées sur des techniques ou des métaphores visuo-haptiques.

Au final, le projet ECoViA a permis de mettre en place une collaboration nationale véritablement multidisciplinaire où les expertises dans plusieurs domaines sont réunies pour développer nos connaissances de la perception visuo-haptique et les appliquer dans le domaine de la robotique et de la réalité virtuelle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des sujets ayants participé aux expériences menées dans le cadre du projet ECoViA pour leur gentillesse et leur patience. Ils souhaitent également remercier M. Congedo, J. Sreng, L. Damm, N. Bourdaud, C. Arbez, M. Alleon, T. Prados, O. Joly, J. Le Biller, D. Toffin, et G. Bossé pour leur participation aux recherches menées dans le cadre du projet ECoViA.

REFERENCES

- [Berthoz 1997] A. Berthoz, « *Le sens du mouvement* », Odile Jacob, Paris, 1997.
- [Congedo et al., 2006] M. Congedo, A. Lécuyer, and E. Gentaz, “*The influence of spatial delocation on perceptual integration of vision and touch*”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, accepted.
- [Ernst et Banks, 2002] M.O. Ernst et M.S. Banks, “*Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion*”, Nature, Vol. 415, 429-433, 2002.
- [Gentaz et Hatwell, IP] E. Gentaz et Y. Hatwell, “*Haptic geometrical illusions*”, Psychonomic Bulletin and Review, (In Press).
- [Gentaz et Hatwell, 2002] E. Gentaz et Y. Hatwell, « *Le toucher, un sens trompeur ?* », Pour la Science, 293, 78-83, 2002.
- [Hatwell et al., 2000] Y. Hatwell, A. Streri, et E. Gentaz (Eds.), « *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* », Paris: Presses Universitaires de France, 2000.
- [Lécuyer et al., 2000] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet, “*Pseudo-Haptic Feedback : Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?*”, IEEE Int. Conf. on Virtual Reality, 83-90, New Brunswick, US, 2000.
- [Lécuyer 2001] A. Lécuyer, “*Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage/démontage en aéronautique*”, Thèse de Doctorat, Université de Paris XI-Orsay, 5 décembre 2001.
- [Lécuyer et al., 2001] A. Lécuyer, J.M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Coiffet, “*Boundary of Illusion : an Experiment of Sensory Integration with a Pseudo-Haptic System*”, IEEE Int. Conf. on Virtual Reality, 115-122, Yokohama, Japan, 2001.
- [Lécuyer et al., 2005] A. Lécuyer, M. Congedo, E. Gentaz, O. Joly, and S. Coquillart, “*Vision can lead the tactual perception of speed and texture*”, Perception, submitted.
- [Lécuyer et al., 2005b] A. Lécuyer, J.M. Burkhardt, J. Le Biller, M. Congedo, “*A4: A Technique to Improve Perception of Contacts with Under-Actuated Haptic Devices in Virtual Reality*”, Proceedings of World Haptics Conference (joint Eurohaptics Conference and Haptics Symposium), Pisa, Italy, 2005
- [McIntyre et al., 1995] J. McIntyre, E.V. Gurfinkel, M. Lipshits, J. Droulez and V.S. Gurfinkel, “*Measurements of Human Force Control During a Constrained Arm Motion Using a Force Actuated Joystick*”, Journal of Neurophysiology, 73, 1201-1222, 1995.
- [McIntyre et al., 2001] J. McIntyre, M. Zago, A. Berthoz and F. Lacquaniti, “*Does the brain model Newton's laws?*”, Nature Neuroscience 4: 693 – 694, 2001.
- [Minsky 1995] M.D.R. Minsky, “*Computational Haptics: The Sandpaper System for Synthesizing Texture for with a Force-Feedback Haptic Display*”, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [Robles-De-La-Torre et Hayward, 2001] G. Robles-De-La-Torre et V. Hayward, « *Force Can Overcome Object Geometry In The Perception Of Shape Through Active Touch* », Nature, Vol. 412, 445-448, 2001.
- [Toffin et al, 2003] D. Toffin, J. McIntyre, J. Droulez, A. Kemeny and A. Berthoz, “*Perception and reproduction of force direction in the horizontal plane*”, Journal of Neurophysiology, 90, 3040–3053, 2003.
- [Toffin et al, 2005] D. Toffin, J. Droulez, J. McIntyre, “*Transfer between haptically and visually perceived directions in the plane*”, en preparation.