

« Surgétique »
***de l'intérêt de la coopération entre Médecin et Machine au service du Malade dans
la réalisation de gestes médico-chirurgicaux***

E. Dubois^[1,2], J. Troccaz^[1], L. Nigay^[2], S. Lavallée^[3], P. Cinquin^[1]

^[1]Laboratoire TIMC-IMAG

^[2]Laboratoire CLIPS-IMAG

^[3]PRAXIM

La notion de « Surgétique » (fusion des termes « surgery » et « informatique ») est née de la prise de conscience de l'importance de la coopération entre homme et machine pour la réalisation de gestes médicaux ou chirurgicaux, dont la complexité croît avec la réduction de leur caractère « invasif ». Nous rappellerons tout d'abord quelques acquis de l'état de l'art en matière de surgétique, puis nous analyserons les divers types d'interaction homme-machine dans les systèmes existants. Enfin, nous discuterons l'apport potentiel des concepts de réalité augmentée et de modélisation de l'interface homme-machine, au service de cette coopération très particulière.

1 Les principes de la surgétique

Au fur et à mesure que progresse la miniaturisation de l'intervention, l'opérateur n'est plus en contact direct, immédiat, avec les organes sur lesquels porte son geste. Ses yeux sont relayés par divers types de capteurs (radiographies, échographies, caméras vidéo, ...), ses mains ne touchent plus directement les tissus mais doivent « deviner » les obstacles qui s'opposent à la progression d'outils thérapeutiques (cathéters, endoscopes, ...) qui profitent autant que possible de cavités naturelles (les nombreux réseaux ramifiés que comporte l'organisme, des vaisseaux aux voies biliaires) ou virtuelles (les espaces entre plans anatomiques qui peuvent prendre forme sous l'effet de l'insufflation de gaz, par exemple). Ces capteurs permettent tout à la fois d'accéder à des organes cachés aux sens de l'opérateur, mais également « d'augmenter » ces derniers, en permettant par exemple de travailler à une échelle plus précise.

Il faut noter que certains de ces capteurs sont plus dangereux pour l'équipe médico-chirurgicale que pour le patient. Ainsi, l'utilisation régulière de rayons X pose-t-elle dans certains cas de réels problèmes de radio-protection pour des équipes qui peuvent y être exposées très régulièrement. L'utilisation de la surgétique devra ici permettre de recueillir l'information pertinente en minimisant l'irradiation. On s'aperçoit en effet que bien souvent les rayons X ne sont utilisés que pour obtenir des informations de position qui peuvent être obtenues par d'autres capteurs, moins riches sur le plan médical, mais largement suffisants dans ce cas précis.

Malgré la richesse des moyens d'imagerie per-opératoires, certaines informations pertinentes peuvent rester inaccessibles pendant le geste médico-chirurgical. Il peut s'agir de données spécifiques à un patient, ou de moyens d'investigation spécifiques, comme la tomodensitométrie X, l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), ou encore les images de médecine nucléaire (SPECT, Single Photon Emission Computed Tomography) ou PET (Positron Emission Tomography). Dans certains cas cependant, ces moyens d'investigation ne suffisent pas, et il faut les compléter par des connaissances *a priori* que peuvent apporter des atlas (atlas fonctionnels utilisés en neurochirurgie stéréotaxique, par exemple).

L'utilisation de ces informations nécessite qu'elles soient « fusionnées », c'est à dire placées dans un référentiel géométrique et conceptuel commun, le « modèle virtuel » du patient. Cette fusion est indispensable pour permettre l'utilisation optimale des moyens d'acquisition d'information et de réalisation du geste. Elle doit répondre à des impératifs de précision qui sont souvent incompatibles avec les capacités des opérateurs humains. La tomodensitométrie X ou l'IRM sont par exemple des moyens d'imagerie pré-opératoires extrêmement intéressants, et fournissent des informations morphologiques et fonctionnelles précieuses pour planifier et guider des gestes médico-chirurgicaux. Une salle d'opérations chirurgicales est moins adaptée à l'acquisition de telles images, mais se prête par nature beaucoup mieux à la réalisation dans des conditions optimales d'interventions invasives, où se rencontrent des contraintes de stérilité, de facilité d'accès au patient et d'utilisation de matériaux parfois incompatibles avec le scanner X ou l'IRM. L'idéal serait donc de pouvoir bénéficier dans une salle de chirurgie de toutes les informations acquises lors des bilans d'imagerie pré-opératoires tomodensitométriques ou IRM. Ce transfert virtuel du scanner ou de l'IRM dans la salle d'opérations est possible, et plus généralement il est possible de fusionner toutes les modalités d'imagerie, pré- et per-opératoires, morphologiques ou fonctionnelles.

C'est sur la base de ce « modèle virtuel » du patient que pourra être réalisée la planification pré-opératoire de l'intervention. Celle-ci est d'autant plus importante que la « médiation » entre l'opérateur et le patient est accrue par l'emploi de capteurs complexes. Elle permet également de prendre en compte et d'optimiser les conséquences morphologiques et fonctionnelles de l'intervention. Les objectifs à atteindre doivent être précisés, et les bénéfices mis en regard des éventuelles conséquences iatrogènes. Cela implique que des moyens d'investigation compatibles avec ces exigences soient mis en œuvre avant l'intervention, et rendus disponibles au moment de la planification de l'intervention. Là encore, les capacités humaines pourront se révéler insuffisantes pour prendre en compte les diverses dimensions du geste envisagé, particulièrement lorsqu'il est nécessaire que cette planification puisse être quantifiée.

On voit donc que, pour gagner en précision, la planification thérapeutique, de qualitative, devient quantitative. Mais à quoi bon une planification sub-millimétrique, si la réalisation de l'intervention elle-même ne peut se faire avec une précision comparable ? Il faut donc offrir à l'utilisateur la possibilité d'utiliser sa planification avec une précision compatible avec ses objectifs.

2 Taxonomie des systèmes de guidage en chirurgie

Les systèmes de guidage sont répartis en plusieurs classes représentatives de l'autonomie laissée au chirurgien dans la réalisation de la tâche planifiée :

- Les systèmes passifs fournissent au chirurgien des données lui permettant de comparer le déroulement de la tâche courante à la planification. Cependant le chirurgien reste complètement en charge de l'exécution de cette tâche. Par exemple la position d'un outil chirurgical, suivie grâce à un localisateur 6D (dispositif capable de suivre en temps réel la position et l'orientation de tout objet équipé d'un « marqueur » adéquat) pourra lui permettre de contrôler la trajectoire de son outil en temps réel pour la bonne réalisation de cette tâche. On distingue dans cette catégorie :
 - les systèmes de navigation, où la position de l'outil est visualisée en temps réel sur un volume de données pré-opératoires [SKK+94],
 - les systèmes de visée, où une interface adéquate permet de se guider vers une cible prédéfinie [Sau94], et
 - les systèmes de réalité augmentée permettant d'enrichir la perception per-opératoire du chirurgien en superposant, grâce à des dispositifs d'interaction comme les casques stéréo semi-transparents, des informations pré-opératoires (images et/ou planification) au champ opératoire réel [GEWG95] ou à des images endoscopiques [BFC95] ou microscopiques [EHH+95] per-opératoires.

Les systèmes de type navigation sont maintenant proposés aux cliniciens par de nombreux industriels du domaine.

- A l'opposé, les systèmes actifs réalisent de manière autonome une partie de la stratégie opératoire. Ce sont des systèmes robotisés d'architecture générique ou spécialisée.
 - Dans la première catégorie, nous trouvons le système ROBODOC (architecture SCARA), pionnier du domaine [PBM+92]. Il réalise de façon extrêmement précise l'usinage d'une cavité osseuse pour la mise en place de prothèses de hanche à partir du planning pré-opératoire. Ce dernier permet de choisir la prothèse et détermine une position d'implantation répondant à des critères biomécaniques et géométriques. Nous trouvons également des architectures parallèles dont la rigidité est plus grande et l'espace de travail plus petit, ce qui peut contribuer à la sécurité de la procédure robotisée [BRL+97].

- Dans la seconde catégorie, nous trouvons le système AESOP [SW94] destiné aux opérations laparoscopiques (interventions abdominales per-cutanées) pour lesquelles l’outil chirurgical est introduit par un orifice de quelques millimètres et qui imposent des mouvements de cet outil dans un cône. L’architecture d’AESOP combine habilement un porteur SCARA et une rotule passive permettant de garantir que seuls des mouvements coniques sont exécutables par le robot. Tous ces systèmes font l’objet de commande en position. Plus récemment des systèmes contrôlés en force ont été introduits pour réaliser des gestes au contact du patient (acquisition échographique [BGM97] ou encore introduction automatisée d’outils de ponction [GFE+95]).
- Les systèmes semi-actifs sont à mi-chemin entre passif et actif. Ils matérialisent la stratégie planifiée dans le champ opératoire au moyen de guides mécaniques, mais le geste reste exécuté par le chirurgien. On trouve ainsi le système SPEEDY [LGC+92] développé pour des gestes linéaires en neurochirurgie stéréotaxique où un robot six axes place, sur la base des données d’imagerie, un guide mécanique linéaire permettant au chirurgien de réaliser son geste simplement et d’utiliser au mieux son sens tactile pour des introductions d’outils de ponction ou d’électrodes. Enfin on citera le système des gabarits [RSR94] dans lequel des techniques de CFAO sont utilisées pour usiner un guide s’adaptant à la géométrie osseuse locale du patient pour réaliser des gestes linéaires ou plans. Cette dernière solution très élégante comporte cependant quelques restrictions d’utilisation.

Les systèmes semi-actifs permettent de matérialiser physiquement le planning chirurgical sur le site opératoire. Cependant, leur usage est à l’heure actuelle très restrictif et gagnerait à être généralisé. Pour cela, les contraintes mécaniques imposées au chirurgien par le mécanisme doivent être rendues programmables au lieu d’être figées dans un dispositif mécanique conçu pour un type de tâche. C’est ainsi qu’a été introduit récemment le concept de robot synergique généralisant la notion de systèmes semi-actifs. Ce type de systèmes doit permettre de mieux répondre aux deux questions fondamentales que sont la sécurité et le besoin d’interaction en robotique médicale. L’objectif concret est de construire des architectures génériques pour lesquelles l’outil chirurgical lié à l’effecteur sera déplacé manuellement par l’opérateur. Cependant ces mécanismes permettront à ce dernier de sentir les déplacements autorisés par la tâche planifiée. A titre d’exemple applicatif, on peut imaginer un système contraignant le déplacement d’une scie dans un plan de découpe osseuse planifié à partir des données du patient et de modèles bio-mécaniques alors que les déplacements de la scie à l’intérieur de ce plan seront complètement laissés à l’appréciation du chirurgien. Un tel système permettra tout aussi bien de contraindre des déplacements dans une région de forme libre ou le long d’une trajectoire. Différents prototypes de tels systèmes sont à l’étude de par le monde : un certain nombre d’entre eux basés sur une technologie complètement passive : c’est le cas du RSP (robot à sécurité

passive) [TD96], du Cobot [PCM96], de IMCAS [BRL+97] et de P-TER [DB97]. D'autres basés sur une technologie active et une commande en force mettant l'utilisateur et les actionneurs sur un pied d'égalité ; c'est le cas de l'ACRobot (Active Constraint Robot). Chacune de ces deux classes comporte avantages et inconvénients : il est clair qu'une technologie passive offre une sécurité intrinsèque plus grande que la technologie active. Mais cette dernière permet des actions plus rapides et continues, comme les systèmes actifs. Par ailleurs, les différentes technologies permettent de reproduire des contraintes de natures différentes : ainsi la technologie active rend possible la perception de chocs visco-élastiques, les technologies passives à freins celle de chocs visqueux et les systèmes de types Cobot ou RSP celle de chocs rigides. Le choix de l'une ou l'autre de ces technologies doit donc être pensé en fonction du type d'applications visées et de la tâche utilisateur. Dans tous les cas cette approche, mettant l'accent sur l'interaction homme-machine, doit encore être mûrie et validée sur le plan expérimental. Les critères de performances à utiliser, outre les critères habituels de précision, rigidité et de robustesse, doivent permettre de caractériser au mieux la capacité à interagir de façon aussi transparente que possible avec l'utilisateur. Les travaux sur les interfaces haptiques [SBM+95] et la téléopération nous semblent très pertinents pour aider à quantifier l'apport de cette nouvelle approche.

Nous constatons une grande variété dans les approches. Il convient de dresser un bilan en les comparant et en les classant. Ces différentes approches peuvent être étudiées selon de nombreux critères tels que :

- la complexité des tâches-utilisateur réalisables avec une aide effective du système,
- le bon usage des compétences de l'homme (raisonnement, adaptabilité, perception, connaissances a priori, expertise, etc.) et de la machine (précision, répétabilité, constance des performances, stabilité des mouvements, etc.),
- la sécurité (puisque contrairement à la robotique industrielle, le système de guidage robotisé doit être utilisé à proximité d'êtres humains voire collaborer avec eux),
- la généralité des tâches réalisables.

Il convient évidemment de compléter ces critères en intégrant l'ergonomie, la sécurité et l'efficacité thérapeutique. Les travaux existants dans le domaine sont très restreints et concernent principalement l'ergonomie [RZAT96].

3 Coopération Médecin – Machine au service du Malade

La composante humaine de l'interface homme-machine des systèmes de chirurgie associe un médecin et un malade. Le premier intègre compétences visuelles (capacité à interpréter en temps réel, dans un environnement technique générateur de stress, des informations multimodales expertes) et motrices (capacité à manipuler avec dextérité outils chirurgicaux complexes et objets anatomiques fragiles). Le deuxième

subit une agression contrôlée, où divers objets contondants ou dangereux, normalement soigneusement éloignés d'êtres humains, interagissent avec ses organes.

Or, les systèmes de surgétique d'aujourd'hui sous-estiment ces particularités. Nous analyserons dans cette section, dans un premier temps l'intérêt potentiel de techniques de Réalité Augmentée [Mac96], un axe de recherche en plein essor du domaine de l'Interaction Homme-Machine (IHM), puis plus généralement l'apport de la modélisation de l'interface homme-machine.

3.1 La Réalité Augmentée au service de la surgétique

La Réalité Augmentée (RA), à la croisée de la réalité virtuelle, du monde physique et de l'informatique embarquée, constitue un nouveau paradigme d'interaction. Ce paradigme vise à offrir à l'utilisateur la possibilité de bénéficier de moyens informatiques, tout en lui permettant de rester au contact de son environnement réel. La RA privilégie donc les moyens d'interaction naturels de l'utilisateur [Wel93], par exemple ses outils habituels dans son environnement réel. Ainsi, en sortant les capacités de l'ordinateur de sa boîte noire habituelle, la frontière entre le monde virtuel, c'est-à-dire les outils informatiques, et le monde réel, dans lequel l'utilisateur maîtrise un grand nombre de moyens d'interaction, tend à disparaître. L'entrelacement simple et transparent des données issues des deux mondes est donc favorisé. Pourtant le terme lui-même n'est pas consensuel et la littérature contient de nombreuses définitions complémentaires, voire contradictoires.

Une première approche, également appelée Réalité Mixte [MK94], désigne l'ensemble des systèmes qui combinent une partie du monde réel et du monde informatique au sein d'une représentation informatique. L'utilisation du réel combiné au virtuel est incontestable puisqu'elle permet par exemple de concevoir des décorations d'intérieurs, tel que le système Interior Design [WCB+95]. Mais cette combinaison se fait sur un écran d'ordinateur : la photo d'une pièce réelle est "augmentée" par des modèles de fauteuils par exemple. La scène observée est bien une combinaison des deux mondes mais la perception du monde réel induit une indirection.

A l'inverse, les approches de caractérisation de la RA dans la communauté IHM visent à distinguer les différentes manières d'ajouter en temps réel des données ou des services informatiques dans l'environnement physique, lieu habituel de réalisation de la tâche de l'utilisateur. Dans ces approches, le point de vue adopté est résolument centré sur l'utilisateur. Elles se distinguent toutefois les unes des autres par les différents aspects de l'interaction pris en compte. En synthèse, nous identifions quatre aspects influençant l'interaction d'un système de RA et contribuant actuellement à leur caractérisation :

- le type des données complémentaires fournies à l'utilisateur [Azu97][FMS93][NMK96] : il peut s'agir de données textuelles, graphiques 2D ou 3D, sonores, ou encore de retour d'effort ;

- les cibles candidates à l'augmentation, permettant de combiner des données réelles et virtuelles [MFF+98] : les trois cibles identifiées sont l'utilisateur, les objets réels manipulés et l'environnement ;
- l'adéquation des données fournies à la tâche courante ainsi que leur lieu de perception [AKB+97] ;
- la capacité du système à pallier le gouffre existant entre les parties du monde réel et virtuel utilisés pour la réalisation de la tâche [RN95].

Ces approches complémentaires soulignent la différence entre la RA et la Réalité Virtuelle (RV). En RV, l'utilisateur est dans un monde entièrement reconstitué par des données informatiques : l'utilisateur est alors coupé du monde réel. La RV vise donc à immerger l'utilisateur dans un monde artificiel, à l'opposé de la RA dont l'essence même est de maintenir l'utilisateur au contact de son environnement réel. Or, en raison de la criticité des systèmes de chirurgie, il est difficile de plonger le chirurgien dans un monde virtuel. En effet, les cliniciens souhaitent pouvoir garder une vision directe sur leur patient et plus généralement sur le champ opératoire. L'indirection liée à l'utilisation de la RV implique que le contact chirurgien-patient n'est plus assuré. La RV peut néanmoins constituer une approche prometteuse dans des contextes d'interaction particuliers comme la télé-chirurgie où le contact chirurgien-patient n'est pas possible. Pour des questions d'éthique mais aussi de sécurité, la mise en œuvre de ces solutions n'est cependant pas anodine.

La RA est donc une approche prometteuse pour les systèmes de chirurgie. Nous la nommons : **Chirurgie Augmentée**. Il s'agit de mettre à la disposition du chirurgien une information dans son contexte, à laquelle il n'a pas accès directement (structures anatomiques visées et/ou structures anatomiques à éviter, nature de la tâche à réaliser, position à atteindre pour une ponction, placement d'une prothèse ou d'un fragment osseux, trajectoire de perçage d'une structure osseuse, etc.). La multiplicité des possibilités actuelles en Chirurgie Augmentée peut se voir comme un facteur de souplesse avec, sa compagne immédiate, la complexité. Il convient alors de s'interroger sur l'utilité et l'utilisabilité de ces nouvelles interfaces, deux aspects qui relèvent de l'Interaction Homme-Machine, de la psychologie et de l'ergonomie cognitives. Dans ces deux derniers domaines, on visera à développer ou étendre des théories existantes pour étudier, c'est-à-dire prédire ou expliquer, les performances sensori-motrices et cognitives du chirurgien.

Il devient alors nécessaire d'établir une méthode de conception et d'évaluation ergonomique des systèmes de chirurgie, tenant compte d'autres critères d'évaluation clinique. Cette logique s'intègre en effet dans *une perspective incontournable d'évaluation rigoureuse et quantitative des systèmes de chirurgie*. Ainsi la flexibilité, la robustesse et la fiabilité du système et en particulier de son interface sont en cause. Par exemple, dans les systèmes de chirurgie, l'étape de mise en correspondance est cruciale pour la précision finale du geste. Le chirurgien est inapte à trouver lui-même la matrice de transformation permettant de passer de données

pré-opératoires, sur lesquelles le geste est planifié, aux données per-opératoires, sur lesquelles le geste est exécuté. Or, on le sait très bien, les algorithmes de recalage trouvent quasiment toujours une solution satisfaisante sur le plan des erreurs résiduelles de recalage ; cela ne signifie pas que la transformation calculée est la bonne ; maudits soient les minima locaux et autres catastrophes naturelles empêchant de « matcher » robustement ! Dans certains produits industriels existants, l'information donnée au chirurgien se limite à une présentation de l'erreur résiduelle. La seule chose que le chirurgien sait est que de trop gros résidus sont un signe de mauvais résultat et il est généralement contraint à refaire des acquisitions de données. Or, de petits résidus ne signifient pas un bon recalage. Dans cet exemple, la question de conception de l'interface est donc : « Sous quelle forme présenter au chirurgien le résultat du recalage, afin qu'il puisse émettre un jugement de valeur sur la qualité de celui-ci ? ». Cet exemple montre que l'aspect Interaction Homme-Machine a des impacts directs sur les performances du système. Les solutions au problème ci-dessus peuvent impliquer des modifications significatives du noyau du système : par exemple si une solution interactive avec le chirurgien dans la boucle n'est pas possible, alors peut-être faudra-t-il lancer plusieurs recalages (avec des méthodes similaires ou différentes) et confronter les résultats ?

L'exemple ci-dessus n'illustre qu'une partie des problèmes d'utilisabilité d'un système. En IHM, il est classique de distinguer deux niveaux d'abstraction dans les problèmes rencontrés par l'utilisateur : le niveau sémantique et le niveau articulatoire pour l'interface en entrée (de l'utilisateur vers le système) et l'interface en sortie (du système vers l'utilisateur). Tandis que le niveau sémantique concerne les phases de planification, d'interprétation et d'évaluation effectuées par l'utilisateur comme dans l'exemple précédent, le niveau articulatoire concerne la phase d'exécution (actions effectuées par l'utilisateur). Par exemple le choix des systèmes de guidage a une implication directe sur le niveau articulatoire de l'interface. En situation d'interaction, l'utilisateur doit parcourir la distance sémantique et la distance articulatoire [Nor86]. L'objectif est de réduire ces deux distances, afin d'augmenter l'utilisabilité du système. Une trop grande distance sémantique ou articulatoire peut entraîner une inefficacité coupable du système et le rejet de son utilisation, indépendamment de toute considération mercantile.

3.2 Principes de modélisation de l'interface homme-machine en chirurgie

La modélisation de l'interface homme-machine s'inscrit dans le cadre d'un processus de conception ergonomique visant à réduire les distances sémantique et articulatoire [Nor86]. Il est classique en IHM de distinguer six étapes de conception, initialement introduites dans [Cou90]. Ces étapes de conception sont générales et présentes dans toute méthode de conception d'interface homme-machine : identification de l'utilisateur et de son activité, définition des tâches et des objets spécifiques au domaine d'application, définition des objets et fonctions informatiques, définition de la présentation de l'interface, et évaluation expérimentale. Cependant ce schéma est

une vue simplifiée du processus de conception. En pratique, les étapes sont chacune soumises à des révisions accompagnées de nombreux retours arrière.

Appliquer ce processus de conception à la chirurgie implique lors des deux premières étapes de modéliser le protocole chirurgical. La modélisation d'un protocole chirurgical vise donc à définir, au sein d'un canevas intégrateur, les besoins interactionnels, le contexte d'interaction et l'utilisateur, en l'occurrence le chirurgien. Ceci nécessite une approche multi-disciplinaire. Dans la modélisation du protocole chirurgicale, deux aspects sont primordiaux : la tâche à accomplir et sa mise en œuvre (ou activité), ainsi que l'utilisateur dans son contexte particulier d'interaction.

Pour cerner la tâche de l'utilisateur, il convient d'étudier et de classer les techniques médico-chirurgicales qui définissent les tâches de plus haut niveau d'abstraction à modéliser. Cette étude est importante pour cerner le domaine applicatif et orienter fortement la conception. En effet, tout système de chirurgie doit améliorer des techniques médico-chirurgicales déjà éprouvées : par exemple l'augmentation de la précision d'un geste n'a de sens que si elle s'accompagne d'une meilleure performance thérapeutique. Or, une revue de la littérature actuelle souligne une approche de conception centrée sur la technologie : les taxonomies existantes reposent sur des aspects techniques, et pour pallier ce problème, il convient de classer les systèmes en termes de tâches, l'objectif étant de centrer la méthode de conception sur l'interaction et non sur les techniques disponibles.

La modélisation de l'utilisateur dans son contexte d'interaction est incontournable pour concevoir des techniques d'interaction enrichies, qui s'appuient sur l'environnement réel et ses objets.

Nous avons entrepris un tel effort de modélisation du protocole chirurgicale, dans le cadre du projet MMM (interface Médecin – Malade – Machine).

4 Conclusion

La chirurgie est un domaine encore jeune (les premières expériences dans ce domaine remontent à 1985), mais déjà mûr sur le plan industriel, ce dont témoigne le nombre exponentiellement croissant de solutions chirurgicales installées de par le monde. La génération actuellement disponible a permis des progrès considérables, en offrant aux médecins la possibilité de bénéficier de performances remarquables en termes de précision dans la planification et la réalisation d'interventions complexes, au prix d'une adaptation de l'utilisateur aux contraintes du système. Les systèmes de chirurgie qui sont actuellement à l'étude remettent au cœur des recherches la spécificité de l'interface homme-machine dans le cas de la chirurgie, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'application.

Remerciements

Certains des travaux décrits dans cet article sont soutenus par l'Institut Fédératif IMAG, ainsi que par le RNTL (Réseau National des Technologies du Logiciel).

Bibliographie

- [AKB+97] – Ahlers, K., Klinker, G., H. Breen, D., Chevalier, P.-Y., Crampton, C., Greer, D., S., Koller, D., Kramer, A., Rose, E., Tuceryan, M., Whitaker, R., "Confluence of Computer Vision and Interactive Graphics for Augmented Reality", dans la revue *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (Special issue on Augmented Reality), 6, 4: 433-451, 1997
- [Azu97] – Azuma, R. T., "A survey of Augmented Reality.", dans la revue *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4: 355-385, 1997
- [BGM97] – S.Boudet, J.Gariepy, S.Mansour : « An Integrated Robotics and Medical Control Device to Quantify Atheromatous Plaques : Experiments on the Arteries of a Patient », 10th IROS Conference, Grenoble, Septembre 1997
- [BRL+97] – G.Brandt, K.Radermacher, S.lavallée, H.W.Standte and G.rau : « A compact robot for image-guided orthopaedic surgery : concept and preliminary results », CVRMed-MRCAS'97, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science Series, vol 1205, 1997
- [BFC95] - I. Bricault, G. Ferretti, and P. Cinquin. : "Computer Assisted Bronchoscopy : aims and research perspectives." In MRCAS95, Medical Robotics and Computer Assisted Surgery Proc., pages 124--131, Baltimore, nov. 1995. Wiley.
- [Cou90] Coutaz, J. Interfaces homme-ordinateur, conception et réalisation. Dunod Informatique, 1990, 455 pages.
- [DB97] – H.Davis and W.Book : « Torque-control of a redundantly actuated passive manipulator », in AAAC symposium, 1997
- [EHH+95] – Edwards, P.J., Hill, D.L.G., Hawkes, D.J., Spink, R., Colchester, A.C.F., Strong, A. and Gleeson, M. (1995). Neurosurgical guidance using the stereo microscope. In proceedings of CVRMed'95, pp 555-564, LNCS vol 905, Springer Verlag
- [FMS93]– Feiner, S., MacIntyre, B., Seligmann, D., "Knowledge-Based Augmented Reality", Communication de l'ACM n°7: 53-61, 1993
- [GEWG95] – W.Grimson, G.Ettinger, S.White and P.Gleason : « Evaluating and

validating an automated registration system for enhanced reality visualization in surgery », CVRMed'95, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science Series, vol 905, 1995

[GFE+95] – D.Glauser, H.Fankhauser, M.Epitaux, J.-L.Helfti and A.Jaccottet : « Neurosurgical robot Minerva : first results and current developments », *Journal of Image Guided Surgery*, 1 :266-272, 1995

[LGC+92] – S.Lavallée, J.Troccaz, L.Gaborit, P.Cinquin, A.L.Benabid and D.Hoffman : « Image guided robot : a clinical application in stereotactic neurosurgery », in *IEEE ICRA*, pages 618-625, Nice, 1992
 Conference on Computer-Supported Cooperative Work.
 (pp. 122-129) Toronto, Ontario: ACM Press.

[Mac96] W. Mackay : « Réalité Augmentée : le meilleur des deux mondes », *La Recherche*, numéro spécial (No. 285) L'ordinateur au doigt et à l'œil, Mars 1996.

[MFF+98] – Mackay, W.E., Fayard, A.-L., Frobert, L., Médini, L., "*Reinventing the Familiar : an Augmented Reality Design Space for Air Traffic Control*", Acte de la conférence CHI'98, Los Angeles, pages 558-565, 1998

[MK94] – Milgram, P., Kishino, F., "*A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*", *Transactions on Information Systems*, E77-D(12): 1321-1329, 1994

[NMK96] – Noma, H., Miyasato, T., Kishino, F., "*A palmtop display for dextrous manipulation with haptic sensation*", Acte de la conférence Human factors in computing systems, pages 126-133, 1996

[Nor86]– Norman, D., "*Cognitive Engineering*", In *User Centered System Design, New Perspectives on Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, p.31-61, 1986

[PBM+92] – H.Paul, W.Bargar, B.Mittlestadt, B.Musit, R.Taylor, P.Kazanzides, B.Williamson and W.Hanson : « Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty », *Clinical Orthopaedics and related research*, (285) :57-66, Décembre 1992

[PCM96] – M.Peshkin, J.E.colgate and C.Moore : « Passive robots and active displays based on non-holonomic elements », in *IEEE ICRA*, 1996

[RSR94] – K.Radermacher, H.W.Staudte and G.Rau : « Computer Assisted orthopaedic surgery by means of individual templates – aspects and analysis of potential applications », In *MRCAS'94, Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, Pittsburgh, Septembre 1994

[RZAT96] - K.Radermacher, A. Zimolong, M. Anton, B. Thull, Recommendations for Ergonomic Analysis, Deliverable 04 du projet IGOS, Lehrstuhl für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen, 91 pges, 1996

[RN95] – Rekimoto, J., Nagao, K., "*The World through the Computer : Computer Augmented Interaction with Real World Environments*", Acte du symposium UIST'95, 1995

[Sau94] – P.Sautot : « Vissage pédiculaire assistée par ordinateur », thèse Génie Biologique et Médical, UJG, Grenoble, Septembre 94

[SBM+95] – K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup and C. Zilles : « Haptic rendering: programming touch interaction with virtual objects », *Proceedings of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics*, 9-12 avril 1995,

Monterey, CA USA, pages 123 – 130.

[SKK+94] – J.Stüttem, B.Kremer, B.Korves, L.Klimek, G.Krückels and R.Mösger :
« Robotics in ear, nose and throat surgery », In Robomed'94, 1st European
Conference on Medical Robotics, pages 31-35, Barcelone, Juin 1994

[SW94] – J.Sackier and Y.Wang : « Robotically assisted laparoscopic surgery : from
concept to development », Surgical endoscopy, (8) :63-66, 1994

[TD96] – J.Troccaz, Y.Delnondedieu : « Semi-active guiding systems in surgery : a
two degrees of freedom prototype of the Passive Arm with Dynamic Constraints
(PADyC) », Mechatronics, 6(4) :399-421, Elsevier Publishers, Juin 1996

[WCB+95] – Whitaker, R., T., Crampton, C., Breen, D., E., Tuceryan, M., Rose, E.,
"Object Calibration for Augmented Reality", Acte de la conférence Eurographics'95,
Vol. 14, 3: 15-28, 1995

[Wel93] – Wellner, P., "Interacting with paper on DigitalDesk", Communication of
the ACM, (36), 7, 1993.

[WK94] - K.G.Wika, J.C.Knight : "Software safety in a medical application",
MRCAS'94 (Medical Robotics and Computer Assisted Surgery), Pittsburgh, 1994

