

Interactivité dans les Systèmes pour Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur (GMCAO)

DUBOIS Emmanuel(‡,+), NIGAY Laurence(+), TROCCAZ Jocelyne(‡)
E-Mail : [Emmanuel.Dubois|Laurence.Nigay|Jocelyne.Troccaz]@imag.fr

(+)**Laboratoire CLIPS - Equipe IIHM**
B.P. 53
38041 Grenoble Cedex 9
Tél. : 04.76.63.59.70

(‡)**Laboratoire TIMC - Equipe GMCAO**
Institut Albert Bonniot
Faculté de Médecine
Domaine de la Merci
38706 La Tronche Cedex

Résumé :

La chirurgie tend de nos jours à être de moins en moins invasive. C'est pourquoi les systèmes de GMCAO (Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur) sont en plein essor. Cependant la plupart de ces systèmes ont donné lieu au développement d'une Interface Homme-Machine indépendamment de toute utilisation de méthodes ou de critères d'ergonomie. Or l'interactivité entre le chirurgien et le système informatique est cruciale dans le contexte d'utilisation particulier que constitue le bloc opératoire.

Etant donné la criticité du domaine, les critères ergonomiques généraux ne pouvaient être utilisés directement. Nous proposons donc dans cet article une liste de critères ergonomiques destinés aux interfaces d'applications médicales.

Mots clés : Critères Ergonomiques, Interface Homme-Machine, Environnement Médical, Systèmes Critiques, Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur.

Introduction

La recherche dans le domaine des systèmes de GMCAO a donné lieu à de nombreuses innovations. Les robots médicaux sont devenus plus sûrs, les aides plus précises, les techniques récentes telles que la reconnaissance de la parole, la réalité virtuelle ou augmentée ont fait leur apparition, etc.

Tous ceci implique naturellement un besoin d'interface Homme-Machine, que l'on devrait plus exactement appeler Chirurgien-Système. Cependant, l'aspect ergonomique des interfaces de ces systèmes très particuliers n'a donné lieu qu'à un très petit nombre de travaux. Or la criticité de ces systèmes induit des critères supplémentaires aux critères généraux bien connus.

Aussi c'est dans cet objectif et sur les bases des études menées sur le développement des systèmes critiques et dans le domaine des applications médicales, que nous avons émis une nouvelle liste de critères ergonomiques destinés aux interfaces d'applications médicales.

Avant de présenter cette liste, nous présenterons quelques uns des systèmes de GMCAO existants, ainsi qu'une nouvelle taxonomie permettant de mieux comprendre les différents types de systèmes pouvant exister.

Quelques systèmes de GMCAO existants

De nos jours les systèmes informatiques sont de plus en plus souvent utilisés lors d'actes médico-chirurgicaux. Deux termes équivalents, CAS -Computer Assisted Surgery- et CAMI -Computer Assisted Medical Intervention-, sont alors employés pour qualifier ces nouveaux modes opératoires. Ces systèmes s'appuient essentiellement sur des procédés d'imagerie pour planifier une stratégie opératoire, puis fournissent un guidage au chirurgien lors de l'acte opératoire ou en effectuent une partie de manière autonome. Il s'agit donc en général de données complémentaires pour le chirurgien, directement exploitables en salle d'opérations. L'apport de ces données est possible grâce à des dispositifs électromécaniques, qui constituent en quelque sorte une véritable interface entre d'une part le chirurgien, le patient et l'outil et, d'autre part le monde de l'information qui fournit guidage et assistance lors du geste opératoire.

L'utilisation de ces dispositifs suit toujours la même méthode :

1-perception : l'acquisition et le traitement de données multimodales permet de construire un modèle du patient. Par données multimodales, on exprime ici le fait qu'elle proviennent de plusieurs sources : différents procédés d'imagerie (scanner, IRM, échographie), différents phénomènes observés (pression artérielle, squelette, anatomie).

2-décision : à partir du modèle et éventuellement de données complémentaires, telles que celles fournies par un atlas anatomique, une stratégie opératoire est établie.

3-action : le chirurgien effectue l'acte chirurgical, en respectant au mieux la stratégie planifiée. Dans cette perspective, le système assiste le chirurgien.

Le principe de l'assistance du système au chirurgien diffère d'un système à l'autre. Actuellement deux taxonomies, basées sur deux points de vue, permettent de comparer les systèmes entre eux.

Systèmes passifs, actifs ou semi-actifs

Cette première taxonomie se base sur les degrés de passivité des systèmes. Ainsi un système passif ne permet que de comparer la position d'un outil au cours de l'opération par rapport à la stratégie pré-établie, un système actif réalise de façon autonome une sous-partie de l'acte chirurgical, et les systèmes semi-actifs contraignent le chirurgien à suivre la stratégie établie, tout en lui laissant le contrôle complet de l'outil.

Les systèmes passifs

Ces systèmes ne participent pas directement à la réalisation de la tâche : ils ne sont utilisés que pour fournir des informations au chirurgien.

On peut distinguer deux cas pour ce type de systèmes. Le premier ne permet que la visualisation de la position de l'outil au cours de l'opération, sur des images préopératoires. Ce premier type, appelé *navigateur*, est illustré par le système présenté dans [Bainville94], où un navigateur permet de localiser la position d'un endoscope dans le corps du patient au cours de l'opération.

Le deuxième type de système passif est un *système de guidage*. Contrairement aux navigateurs, ceux-ci reproduisent passivement (ex: à l'écran) la stratégie préopératoire établie en plus de la position de l'outil. Mais surtout ils proposent une aide à la reproduction de la trajectoire au moyen d'un système de viseur. C'est notamment le cas de **CASPER**, présenté dans [Chavanon97]. Utilisé dans le cas de la ponction péricardique, la position de l'aiguille est retracée en temps réel sur une image échographique, en plus de la trajectoire prédéfinie. Ceci constitue donc un premier moyen de guidage, complété par un système de 3 croix représentant la trajectoire idéale et deux points de l'outil. L'alignement des trois croix signifie que la trajectoire réelle actuelle est en accord avec la trajectoire préétablie.

Les systèmes actifs

Les systèmes actifs quant à eux sont chargés de réaliser de manière totalement autonome une partie de l'acte chirurgical.

Parmi les systèmes actifs existants, **ROBODOC™**, décrit dans [Bauer97], a déjà été testé avec succès sur de nombreux patients. Utilisé lors de la pose d'une prothèse de hanche, il est chargé d'usiner le fémur pour ajuster au mieux la prothèse.

D'autres systèmes sont en phase de développement dans la radiochirurgie, ainsi que dans la chirurgie des yeux [Jensen94].

Les systèmes semi-actifs

Ces derniers systèmes sont un compromis entre les deux derniers types présentés : ils ne participent pas de manière autonome à la réalisation de l'opération mais fournissent une aide physique au guidage et pas seulement une aide informationnelle.

On identifie dans cette classe des systèmes aux caractéristiques différentes. Nous l'illustrons ici avec trois systèmes.

Tout d'abord le système de "*templates*" : ce système, validé pour différentes applications de chirurgie orthopédique [Radermacher94], consiste à usiner un moule négatif en 3D à partir d'images médicales (CT). La stratégie opératoire est donc moulée, le template est positionné manuellement sur le champs opératoire puis utilisé comme guide en cours d'intervention.

Un autre exemple des systèmes semi-actifs a été développé pour la neurochirurgie stéréotaxique, en particulier pour les électroencéphalographies et l'implantation des électrodes dans le cas de la maladie de Parkinson [Lavalée92]. Le fonctionnement de ces systèmes consiste à positionner un robot de telle sorte que l'outil qu'il porte soit situé exactement sur la trajectoire choisie. Une fois correctement positionné, le robot est verrouillé et seul l'outil peut encore coulisser de façon linéaire et sous l'action et le contrôle exclusif du chirurgien. Ce procédé est donc un *guide mécanique* et répond aux caractéristiques d'un système semi-actif.

Enfin le dernier type de systèmes semi-actifs consiste à mêler la flexibilité et la sécurité, caractéristiques des systèmes passifs, tout en conservant la précision de systèmes actifs. Le principe part de la constatation qu'en cas de dysfonctionnement d'un robot (système actif), ses mouvements ne sont pas contrôlables et peuvent entraîner de sérieux dégâts. La première idée a donc été de limiter volontairement les possibilités de déplacement des parties d'un robot en agissant sur sa conception mécanique. Le robot ne peut alors plus sortir d'une région de sûreté. Basé sur ce principe, un robot porteur d'un laparoscope a été mis en oeuvre [Funda94]. Le concept de **PADyC** -Passive Arm with Dynamic Constraints- présenté dans [Troccaz93], est une adaptation de cette idée : au lieu de construire un robot propre à chaque intervention, les contraintes physiques de déplacement sont modulées et contrôlées par un logiciel. Une reprogrammation du logiciel permet de définir pour chaque opération les zones sûres auxquelles le robot a accès, ou la trajectoire adoptée. De plus, un robot traditionnel est motorisé, ce qui ajoute encore de l'insécurité; dans PADyC, les

mouvements du robot ne sont liés qu'à l'application d'une force par le chirurgien et grâce au logiciel de contraintes, il est possible de guider le chirurgien de façon exacte (système à retour d'effort).

Localisateurs, robots, procédés synergiques

Cette deuxième classification des systèmes de GMCAO prend en considération leurs fonctions et fait totalement abstraction de leurs caractéristiques technologiques ainsi que de leur architecture. Elle comprend également trois volets : les localisateurs dont le seul but est de mesurer les coordonnées (i.e. la position) d'un outil, les robots qui sont chargés au même titre que les systèmes actifs d'effectuer une partie de l'acte opératoire de façon totalement autonome, et les systèmes synergiques qui réalisent un guidage physique des outils, outils qui sont manipulés et contrôlés par le chirurgien.

les localisateurs

Les systèmes relevant de cette catégorie n'agissent absolument pas sur les outils chirurgicaux manipulés : seul le chirurgien peut interagir sur l'outil et ce de manière totalement libre. Un localisateur est donc le système d'aide le plus transparent pour le chirurgien. Différents types de localisateurs ont été développés.

Les *bras mécaniques passifs* en sont un premiers exemple. Disposant de 6 degrés de liberté, le bras porte l'outil et chacun de ses raccords est encodé. La position de l'outil peut donc être facilement connue y compris dans des zones très petites. Mais la manipulation d'un bras n'est pas particulièrement aisée et le risque de déformation (par flexion, lors de l'application d'une force trop importante) entraîne une insécurité des résultats.

Une autre technique consiste à fixer un émetteur d'ultrasons sur l'outil, puis de mesurer le temps de parcours de ces ultrasons pour pouvoir calculer la position de l'outil : ce sont des *localisateurs à ultrasons*, dont les avantages sont leur simplicité et leur coût; mais ils sont très influençables par diverses variables environnementales telles que l'inhomogénéité de l'air, les mouvements des masses d'air.

Pour pallier à ce problème, les ultrasons peuvent être remplacés par des émissions électromagnétiques. Ce sont alors des *localisateurs électromagnétiques*, qui sont eux très sensibles à la présence d'objets métalliques

Enfin la meilleure solution à l'heure actuelle utilisable dans la salle d'opération est le *détecteur optique*. Le principe repose sur le repérage par un système de caméras des outils utilisés. Par conséquent les outils doivent porter un corps rigide capable d'émettre un faisceau lumineux ou de le réfléchir, et c'est ce faisceau lumineux qui est repéré par la (ou les) caméra(s). Ce type de système a fait son apparition dans la chirurgie endonasale [Adams90], [Mosges89] dès le début des années 80. On retrouve également dans cette catégorie le système CASPER introduit précédemment.

les robots

Tous ces systèmes de cette catégorie sont mus par des moteurs. Il s'agit donc d'un mécanisme ayant des fonctions de programmation et portant un outil chirurgical. Contrairement aux précédents ils sont peu enclins à favoriser la coopération avec le chirurgien.

Le système **ROBODOC™** présenté comme système actif fait aussi parti des robots.

Un autre système, **TURP** -Trans Urethral Resection of the Prostate [Davies91]- dispose lui de 4 degrés de liberté. Mus par des moteurs, il est mécaniquement conçu pour ne pas pouvoir sortir d'une zone dite de sécurité, même en cas de défaillance du système. De plus plusieurs mouvements ne peuvent être exécutés simultanément. Cette contrainte permet donc de prédire très exactement où peut aller l'extrémité du robot.

les systèmes synergiques

Les systèmes synergiques, par opposition aux localiseurs, fournissent un guidage physique, mais contrairement aux robots les déplacements sont contrôlés et induits par le chirurgien. Autrement dit, ces systèmes visent à faire coopérer physiquement le chirurgien et le système de guidage. Le chirurgien et le système tiennent donc tout deux l'outil, mais seul le chirurgien est responsable du contrôle final de l'outil. Ainsi, le système peut contraindre les mouvements de l'outil selon une direction (ex : horizontalement), et le chirurgien déplace dans une autre direction (ex : verticalement) le même outil.

Le système **PADyC** fait tout naturellement partie de cette catégorie.

De même **ACROBOT** -Active Constraint ROBOT- procure une bonne coopération entre le chirurgien et le système, tout en utilisant des articulations pilotées par des moteurs. Les deux acteurs sont alors considérés d'égale manière en ce qui concerne le contrôle de la position de l'outil. En effet lorsque le chirurgien approche de la cible ou d'une zone sensible, le système accroît sa résistance à l'avance de l'outil. Ainsi seul le chirurgien est responsable de l'avance de l'outil mais le système l'aide à ne pas s'éloigner de la stratégie établie.

Synthèse

Discussion

Ces deux taxonomies ont l'avantage d'être suffisamment génériques pour pouvoir inclure tout type de système de GMCAO. Cependant la présence de trois catégories seulement, sans autre raffinement ne fournit pas de distinction très claire entre les systèmes. Ainsi un système basé sur la reconnaissance d'images tel que celui présenté dans [Bricault97], est un localisateur au même titre qu'un bras passif par exemple. Or si le chirurgien agit sur le bras passif, il ne peut

qu'utiliser le système de reconnaissance d'images. Des distinctions seraient donc à faire à l'intérieur de chaque catégorie.

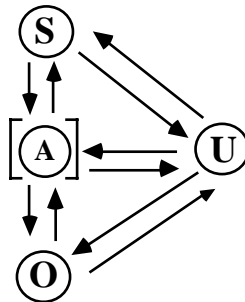
C'est dans cet objectif que nous avons tenter de construire une nouvelle taxonomie des systèmes de GMCAO, tout en nous séparant complètement des principes ayant servis de base aux deux précédentes. Cette nouvelle taxonomie repose sur le point de vue de l'interactivité mise en oeuvre par l'utilisation des systèmes de GMCAO.

Une nouvelle approche pour ces systèmes

Notre approche des systèmes de GMCAO s'appuie sur la constatation que ces systèmes ne forment pas un tout, mais sont composés de plusieurs parties. On distingue donc dans ces systèmes, **l'utilisateur** (U), c'est à dire le chirurgien, **l'outil** (O) chirurgical utilisé pour réaliser l'opération, **le système** (S) informatique c'est à dire les calculateurs et les dispositifs d'affichage de données, les systèmes de reconnaissance de la parole, i.e. les dispositifs propres à l'interface Homme/Machine. Le dernier composant est **un adaptateur** (A) qui englobe tout dispositif permettant de maîtriser la position de l'outil. Maîtriser signifie connaître sa position, imposer une force, etc. Il inclue donc les localisateurs (LED + Caméras), les caméras utilisées pour faire de la reconnaissance d'images, les bras articulés, etc. L'adaptateur peut être vu comme le lien entre le pré-opérateur et le per-opérateur, ou encore comme le moyen de connecter l'outil chirurgical à l'informatique au moyen d'une liaison physique, optique, ultra-sonore, etc., c'est à dire comme le moyen de "passer du bit à l'atome".

Notre taxonomie repose ensuite sur les relations qui peuvent être utilisées entre les 4 composants du systèmes. On définit une **relation** comme un transfert d'informations (force, signal, données numériques). Une relation ne représente jamais uniquement un contact physique.

Pour illustrer ces définitions, un système peut être schématisé comme suit :



les flèches représentant les relations unidirectionnelles potentiellement présentes entre les composants du système. Nous admettons sans entrer dans les détails que la notion d'adaptateur peut en fait représenter un ensemble d'adaptateurs, de même que la notion d'outil peut représenter un ensemble d'outils. Les relations induites par ces deux remarques, i.e. à l'intérieur du groupe ne seront pas considérées de façon individuelles. Il y a donc potentiellement 2^{10} systèmes différents.

Règles de construction de la taxonomie

Des règles dites de simplification ainsi que des règles de combinaisons des relations permettent de limiter le nombre de systèmes à 20. Un dernier regroupement produit finalement 6 classes de systèmes.

Les 5 classes et leurs sous-classes

Nota : AO représente une relation à l'origine de A est destinée à O.

- Les systèmes sans relation AO

Dans ce groupe se retrouvent 2 types de systèmes seulement. Ces deux systèmes comportent les relations UA, UO, AS et SU.

La distinction entre les deux types est que l'un d'eux dispose d'une relation US, i.e. de l'utilisateur vers le système (ajout de données, définition de cible, etc.)

- Les systèmes non combinés

Ce groupe rassemble les systèmes ne mettant en oeuvre deux relations de sources différentes à destination ni de l'adaptateur (A) ni de l'outil (O) mais comportant au moins les relations AO, AS et SU.

Il peut se décomposer en deux sous-groupes: les passifs (sans la relation SA) et les actifs (présence de SA).

Les actifs permettent tous à l'utilisateur d'être à l'origine d'une relation avec le système (présence de US) mais peuvent être de deux types : avec ou sans multiple feed-back (présence ou non de la relation AU).

Les passifs peuvent également être de deux types différents selon qu'ils autorisent ou non une relation de l'utilisateur vers le système. Les deux groupes ainsi formés donnent de nouveau lieu à une distinction qui doit être faite selon la présence ou non de multiple feed-back.

Systèmes non combinés					
Actifs			Passifs		
Avec US			Avec US		Sans US
1	2		1	2	1 2

1 : Avec multiple feedback
2 : Avec simple feedback

- Les systèmes potentiellement à l'origine de synergie sur l'outil (O)

Dans ce groupe se trouvent quatre catégories différentes. Ce sont les mêmes que celles exposées précédemment pour les systèmes non combinés passifs.

Systèmes potentiellement à l'origine de synergie sur l'outil (O)			
Avec US		Sans US	
1	2	1	2

1 : Avec multiple feedback
2 : Avec simple feedback

- Les systèmes potentiellement à l'origine de synergie sur l'adaptateur (A)

Dans ce groupe se trouvent quatre catégories différentes. Ce sont les mêmes que celles exposées précédemment pour les systèmes non combinés passifs.

Systèmes potentiellement à l'origine de synergie sur l'adaptateur (A)			
Avec US		Sans US	
1	2	1	2

1 : Avec multiple feedback
2 : Avec simple feedback

- Les systèmes potentiellement à l'origine de double synergie sur l'outil (O) et l'adaptateur (A)

Dans ce groupe se trouvent quatre catégories différentes. Ce sont les mêmes que celles exposées précédemment pour les systèmes non combinés passifs.

Systèmes potentiellement à l'origine de synergie sur l'outil (O) et l'adaptateur (A)			
Avec US		Sans US	
1	2	1	2

1 : Avec multiple feedback
2 : Avec simple feedback

Remarques : Les trois derniers groupes ne sont pas assignés à produire respectivement de la synergie centrée sur O et A et double. En effet selon la combinaison temporelle des relations mises en oeuvre dans ces systèmes, un système des deux premiers groupes peut devenir un simple système alterné. De même un système du dernier groupe peut devenir un système synergique simple voir même un système alterné.

Les critères ergonomiques pour systèmes de GMCAO

Perspectives

Bibliographie

- [Bauer97] A. Bauer M. Börner, A. Lahmer, Robodoc -Animal Experiment and Clinical Evaluation, Acte de CVRMed/MRCAS'97, Grenoble, (1997), p.561-564.
- [Bricault97] I. Bricault, A Fast Morphology-Based Registration -Application to Computer Assisted Bronchoscopy, Acte de CVRMed/MRCAS'97, Grenoble, (1997), p.417-426.
- [Bainville94] E. Bainville et al., Computer generated visual assistance to a surgical operation : the retroperitoneoscopy, Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 94, Pittsburg PA, (September 1994), p. 254-258.
- [Jensen94] P.S. Jensen et al., Robotic micromanipulatorfor ophtalmic surgery, Acte de Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 94, (MRCAS'94) Pittsburg PA, (September 1994), p. 204-210.
- [Lavallee92] J. Lavallée et al., Image guided Robot : a clinical application in stereotactic neurosurgery, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, (1992), p. 618-625.
- [Funda94] J. Funda et al., An experimental user interface for an interactive surgical robot, acte de MRCAS'94, Pittsburg PA, (September 1994), p. 196-203.
- [Davies91] B.L. Davies et al., A surgeon robot fpr prostatectomies, Acte de Fifth International Conference on Advanced Robotics, Pise, (1991), p.871-875.
- [Troccaz93] J. Troccaz et al., Padyc : A passive arm with dynamic constraint, Int. Conf. on Advanced Robotic , Tokyo, (1993), p. 361-366.
- [Mosges89] R. Mosges et al., Computer Assisted Surgery. An innovative surgical technique in clinical routine, dans H.U. Lemke, editor, Computer Assisted Radiology, CAR'89, Berlin, (Juin 1989), p.413-415.
- [Adams90] L. Adams et al., Computer Assisted Surgery, IEEE Computer Graphics and Applications, (Mai 1990), p. 43-51.
- [P081096-1;13]
- [Radermacher94] K. Radermacher, H.W. Staudte, and G. Rau, Computer assisted orthopaedic surgery by means of individual templates - aspects and analysis of potential applications, Acte de MRCAS'94 -Medical Robotics and Computer Assisted Surgery-, Pittsburgh, USA, (Septembre 1994), p. 42-48.