
Chirurgie orthopédique assistée par ordinateur : état actuel et perspectives d'avenir

Ph MERLOZ

Service d'Orthopédie - Traumatologie
CHU A. Michallon
BP 217
38043 Grenoble cedex 09 (France)

Correspondance :

Ph Merloz
Tel : + 33 4 76 76 55 93 ; Fax : + 33 4 76 76 52 18 ; Pmerloz@chu-grenoble.fr

Résumé

Les systèmes d'imagerie médicale numérique et les techniques informatiques qui sont actuellement développés pour planifier et réaliser certains actes opératoires en chirurgie orthopédique procurent au chirurgien une panoplie d'outils performants qui sont capables d'améliorer la précision du geste opératoire, sa fiabilité et le résultat clinique, en même temps d'ailleurs que de permettre une réduction du coût des soins et de la durée de l'hospitalisation. Les principaux systèmes de navigation chirurgicale sont équipés de quatre sous-ensembles :

1. Un système de recueil et d'enregistrement des informations numériques spécifiques à chaque patient : images préopératoires (radios conventionnelles, TDM, IRM) ; images peropératoires (fluoroscopie, ultrasons) ; positionnement peropératoire d'outils ou de segments osseux à l'aide de localisateurs tridimensionnels.
2. Un système de recalage permettant de replacer toutes les informations et images numériques dans le champ opératoire du patient en utilisant la fluoroscopie ; les ultrasons ; des repères anatomiques remarquables ou de surface acquis de façon randomisée et aléatoire.
3. Un système d'aide à la décision permettant de planifier le geste opératoire à l'aide d'informations multimodales : positionnement interactif d'outils ou de segments osseux dans le champ opératoire ; éléments prévisionnels de navigation (directions, axes, orientations, longueurs d'un instrument...).
4. Un système d'aide à la réalisation du geste opératoire, permettant de réaliser la stratégie optimale définie en préopératoire : le système est passif lorsqu'il fournit des informations sur la position des outils chirurgicaux dans le champ opératoire ; il est actif lorsqu'il s'agit d'un robot qui effectue une tâche précise, autonome et déterminée à l'avance.

Dans le futur, on peut envisager que les systèmes de navigation chirurgicale permettront aux chirurgiens d'évaluer la fiabilité et la précision de différentes techniques opératoires, première étape de l'optimisation des thérapeutiques.

Mots-clés : Chirurgie Assistée par Ordinateur / Navigation Chirurgicale / Chirurgie Orthopédique Assistée par Ordinateur

Introduction

Les systèmes de Chirurgie Assistée par Ordinateur (CAO) ont été introduits à la fin des années 80 pour la chirurgie stéréotaxique en neurochirurgie dans le but d'assister le chirurgien afin qu'il puisse placer une sonde

Abstract

Computer Assisted Orthopaedic Surgery: Current state and future prospects.

Imaging, sensing and computing technologies that are being introduced to aid in the planning and execution of surgical procedures are providing orthopaedic surgeons with a powerful new set of tools for improving clinical accuracy, reliability and patient outcomes while reducing costs and operating times. Current computer assisted surgery systems typically include four steps :

1. A measurement process for collecting patient-specific medical data ; pre-operative images (CT, x-rays, MRI) ; intra-operative images (fluoroscopy, ultrasound images) ; intra-operative positions of tools or bones obtained using 3D localizers.
2. A registration process for aligning all images and data to the patient coordinate system ; using anatomical landmarks ; using bone surfaces digitized directly or with ultrasounds ; using x-rays
3. A decision making process for generating a surgical plan on multi-modality information ; interactive placement of tools or bones on images ; monitoring of criteria (angles, positions, impingement...)
4. An action process for accurately achieving the goals specified in the plan ; passive systems that display the position of tools or bones on images and data and active robots.

In the future, it is expected that computer assisted surgery systems will enable surgeons to measure the performances of surgical techniques accurately and consistently, which is a first step for optimization of surgery.

Keywords : Computer Assisted Surgery / Surgical Navigation / Computer Assisted Orthopaedic Surgery

à l'intérieur de l'encéphale sans abord direct de la zone opérée. La grande idée des technologies de Chirurgie Assistée par Ordinateur (CAO) consiste à augmenter la précision de l'acte, à réduire la morbidité et le caractère invasif des gestes chirurgicaux, à réduire les doses de rayons X et à améliorer les protocoles chirurgicaux en permettant des études post-opératoires performantes, basées sur des enregistrements d'actes opératoires. Le principe de base des systèmes de CAO consiste à localiser en trois dimensions la position d'instruments chirurgicaux dans le champ opératoire et à faire apparaître ces mêmes instruments sur des images préopératoires (TDM ou

IRM) ou per-opérateurs (images radiographiques).

Principes de la Chirurgie Orthopédique Assistée par Ordinateur

La Chirurgie Assistée par Ordinateur obéit aux principes de la robotique avec trois étapes successives : la perception de l'information ; le raisonnement ; l'action.

II.1 La perception consiste à enregistrer de façon numérique tout type d'images fournies au chirurgien en pré ou en per-opérateur.

L'image la plus classique est celle du scanner ou tomodensitométrie (TDM). Cette imagerie reste le « standard or » et a été utilisée notamment au niveau de la hanche et du rachis. Les images TDM ont l'avantage de fournir des informations en trois dimensions. Elles sont précises et permettent un plan pré-opérateur. Par contre, leur acquisition est irradiante et leur analyse consomme un peu de temps. De plus, si l'on veut se servir de ces images pour faire de la navigation il devient nécessaire de les recalibrer sur des images per-opérateurs ce qui n'est pas toujours évident (1,2) ; [Tabl.I].

La fluoroscopie virtuelle est une autre forme d'imagerie basée sur l'utilisation d'images fournies par un amplificateur de brillance. C'est une solution intéressante qui a été utilisée notamment en chirurgie du rachis et pour les arthroplasties totales de la hanche. L'inconvénient est que

l'image fournie n'est pas exempte de distorsion et c'est la raison pour laquelle il faut équiper l'amplificateur de brillance d'une grille de calibrage. Cette technique est immédiatement disponible et ne nécessite pas de fusion d'images. Par contre, elle ne fournit que des informations en deux dimensions et elle n'est pas exempte d'irradiation (3) ; [Tabl.I].

On peut également se servir de repères osseux remarquables et spécifiques acquis plus généralement en per-opérateur. L'inconvénient est qu'il faut réaliser un abord généralement large, encore que lorsque la peau est peu épaisse et le relief osseux superficiel on puisse acquérir ces points en percutané (4) ; [Tabl.I].

L'utilisation d'atlas anatomiques déformables (ou « bone morphing ») est incontestablement une nouveauté. Cela dispense d'imagerie pré-opérateur mais par contre, cette modalité interdit l'utilisation du système en cas de modification morphologique importante (5) ; [Tabl.I].

Les données cinématiques (centre de rotation des articulations) peuvent être utilisées pour retrouver des axes normaux ou déformés d'un membre. Cette technique a l'avantage d'être simple et précise mais elle ne fournit aucune information d'ordre morphologique (6) ; [Tabl.I].

Enfin, la tomodensitométrie per-opérateur est une technique nouvelle qui s'apparente à un scanner de bloc opératoire. Cette modalité est coûteuse et pour l'instant elle ne donne pas des images de haute définition au niveau du squelette axial (2) ; [Tabl.I].

Tableau I : Avantages et inconvénients des différents systèmes proposés

	Avantages	Inconvénients
Recalage Images TDM / Points anatomiques remarquables ou marquage de surface (nuage de points) Ref : 1 et 2	+ Imagerie 3D complète + Densité osseuse	-Imagerie pre-op (TDM) -Radiation (patient) -Abord chirurgical large
Recalage Images IRM / Points anatomiques remarquables ou marquage de surface (nuage de points) (*)	+ Imagerie 3D complète + Pas de radiation + Infos parties molles +++	- Imagerie pre-op (IRM) - Imagerie chère - Recalage osseux difficile
Recalage Images TDM / fluoroscopie Ref 8	+ Imagerie 3D complète + Densité osseuse +Geste per cutané possible	- Imagerie pré-op (TDM) - Radiation (patient et staff) - Recalage non robuste - Fluoroscopie dépendant
Recalage Images TDM / ultrasons (Echographie) Ref 9	+ Imagerie 3D complète + Densité osseuse + Geste per cutané possible + Recalage 3D robuste	- Imagerie pré-op (TDM) - Radiation (patient)
Fluoroscopie 2D Ref 3	+ Pas d'imagerie pré-op + Pas de recalage + Facile à utiliser (imagerie connue) + Système robuste	- Imagerie 2D (pas de vue axiale) - Radiation (patient + staff) - Fluoroscopie dépendant
Fluoroscopie 3D (exemple ISO-C 3D Siemens) Ref 2	+ Imagerie 3D complète + Densité osseuse + Pas d'imagerie pré-op + Pas de recalage + Facile à utiliser + Système robuste	- Petit volume - Qualité de l'image - Radiation (patient + staff) - Fluoroscopie dépendant
Points remarquables Ref 4 Système cinématique Ref 6	+ Pas d'imagerie pré-op + Pas de recalage	- Pas d'imagerie complète 3D - Système opérateur dépendant - Pas d'info densité osseuse - Abord chirurgical large
"Bone Morphing" Ref 5	+ Imagerie 3D complète + Pas d'imagerie pré-op + Pas de recalage + Facile à utiliser + Système robuste	- Pas d'info densité osseuse - Abord chirurgical large

(*) Technologie purement expérimentale, n'existant pas en pratique clinique en Orthopédie.

II.2 Le raisonnement va consister à fusionner les images pré-opératoires avec des images per-opératoires de façon à retrouver et utiliser une stratégie optimale de guidage d'outils vers une cible préalablement définie et choisie. Il faut donc faire en quelque sorte un recalage entre différentes sources d'imagerie. Les données dont on se sert sont essentiellement les images numériques et les connaissances chirurgicales (1).

La fusion d'images entre scanner pré-opératoire et points acquis en per-opératoire peut se réaliser au niveau du bassin ou du rachis (1,2) ; [Tabl.I]. Le « bone morphing » ou acquisition de données d'anatomie de surface osseuse, grâce aux atlas anatomiques déformables est utilisé déjà depuis plusieurs années pour les arthroplasties prothétiques de la hanche et du genou (5,7). Il est également possible de fusionner des images scanner pré-opératoires avec des images fluoroscopiques (8) ou des images échographiques (9) acquises en per-opératoire [Tabl.I]. Les données cinématiques peuvent être utilisées de façon indépendante ou être associées aux modalités décrites ci-dessus pour optimiser les informations communiquées au chirurgien par les systèmes de navigation [Tabl.I].

Depuis quelques années, les connaissances en biomécanique et en anatomie peuvent être intégrées aux données qui servent à la navigation chirurgicale. C'est ainsi que ces connaissances permettent d'optimiser le positionnement d'implants, notamment au niveau du genou, en augmentant le contrôle du chirurgien sur l'équilibre de la balance ligamentaire (10). Il en est de même lors de l'insertion des greffes de ligament croisé antérieur (11) ou lors du positionnement des cupules céphaliques qui servent au re-surfage des têtes fémorales.

II.3 Les informations dont disposent le chirurgien sont de deux types : elles peuvent être présentées sous forme d'images numériques affichées sur un écran d'ordinateur ou être utilisées comme le système de commande d'un robot. C'est ainsi que l'on peut définir la troisième étape, c'est à dire **l'action**.

Cette action peut être passive (**fig. 1**) et fournir des informations de guidage sur un écran à l'aide d'instruments spécifiques appelés désormais « instruments ancillaires électroniques ». Le guidage peut être actif à l'aide d'un robot qui va effectuer une tâche indépendante de l'opérateur et qui lui aura été assignée au préalable (12).

Evaluation clinique

L'évaluation de ces systèmes a d'ores et déjà commencé en clinique. En particulier, des séries comparatives ont été publiées dans le domaine de l'arthroplastie totale de hanche, de l'arthroplastie totale du genou et de la chirurgie du rachis (2,3,4,6,7,9,11). Au niveau du squelette axial, ces systèmes de navigation ont montré leur supériorité par rapport aux techniques conventionnelles, notamment en matière de précision et de sécurité. Il en est de même au niveau du genou (pour les arthroplasties prothétiques) où l'écart de dispersion des résultats est notablement réduit (2,3,4,6,7,9,11). De plus, avec certaines techniques, l'irradiation subie par le personnel au bloc peut être réduite de 60 %. En matière de chirurgie ligamentaire du genou, on sait que ces systèmes informatiques permet-

tent d'optimiser le positionnement des greffes de ligament croisé antérieur (11). De plus, les machines sont désormais dotées d'éléments ergonomiques puisqu'elles ne disposent plus de clavier ni de souris. Leur menu est présenté de façon conversationnelle et conviviale.

Conclusion

C'est ainsi que ces systèmes fournissent précision et sécurité tout en permettant d'optimiser le geste chirurgical. Dans le futur, d'autres systèmes vont apparaître à base de scanner ou d'échographie : nous pensons que les images ultra-sonores seront certainement très utilisées car elles permettent d'ouvrir la voie aux gestes percutanés ; les scanners de bloc opératoire fourniront des images 3D sans imagerie préalable (c'est à dire pré-opératoire) [Tabl.I] ; l'utilisation des capteurs de pression permettra de mieux équilibrer les balances ligamentaires de certaines articulations et donc d'envisager une réduction de l'usure des implants. Les mini-robots restent encore du domaine du laboratoire. Leur utilisation s'imposera dans quelques années. Enfin, les informations post-opératoires fournies par les systèmes de contrôle (radiologie conventionnelle, TDM, IRM etc..) vont permettre d'effectuer l'évaluation de nos pratiques quotidiennes et servir à la réalisation de simulateurs permettant l'enseignement et l'entraînement des jeunes chirurgiens.

Fig. 1. Ce navigateur moderne peut recevoir tous les types d'applications techniques : navigation à base TDM, à base fluoroscopique, modèles statistiques déformables, modèles cinématiques, grâce à un jeu de CDROM spécifiques et dédiés...



Références

1. Lavallée S, Troccaz J, Sautot P, Mazier B, Cinquin Ph, Merloz Ph, Chirossel JP. Computer assisted spine surgery using anatomy-based registration. In : Taylor R, Lavallée S, Burdea G, Mösges R, editors. Computer Integrated Surgery. MIT Press, Cambridge ; 1995 p. 425-449.
2. Merloz Ph, Tonetti J, Vouaillat H, Huberson Ch, Troccaz J, Eid A, Cazal J, Plaweski S, Blendea S, Badulescu A, Benyahia H, Faure C, Vasile Ch. Chirurgie Computérisée de la fixation des vis Pédiculaires. Techniques et Pratique Clinique. Encyclopédie Médico Chirurgicale, Rhumatologie – Orthopédie, Techniques Chirurgicales, 44-146, Elsevier Edit. Paris 2004 p. 1 – 8
3. Kahler DM Utilisation des systèmes de navigation à base fluoroscopique et à base TDM pour le traitement des fractures de l'anneau pelvien, du cotyle et des disjonctions sacro-iliaques, « Cahiers d'enseignement de la S.O.F.C.O.T. ». In J. Duparc et Ph. Merloz eds. Paris : Elsevier, 2002 : 174-182
4. Nogler M, Krismer M, Rachbauer F, Sledge J. Minimally Invasive Hip Surgery with Imageless Navigation. In : Stiehl JB, Konermann WH, Haaker RG (Eds.) ; Navigation and Robotics in Total Joint and Spine Surgery. Springer Verlag, Berlin ; 2004 p. 110 – 115.
5. Fleute M, Desbat L, Martin R, Lavallee S, Defrise M, Liu X, Taylor R Statistical model registration for a C-arm CT system. In IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), NSS/MIC (Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference), San Diego, 2001 abstract book ; p 112
6. Saragaglia D, Picard F, Chaussard C, Montbarbon E, Leitner F, Cinquin Ph. Mise en place des prothèses totales du genou assistée par ordinateur : comparaison avec la technique conventionnelle Rev. Chir. Orthop, 2001; 87, 18-28
7. Merloz Ph. Chirurgie Orthopédique Assistée par Ordinateur. « Cahiers d'enseignement de la S.O.F.C.O.T. ». In J. Duparc et Ph. Merloz eds. Paris : Elsevier, 2002 ; 233 pages.
8. Merloz Ph, Huberson Ch, Tonetti J, Eid A, Vouaillat H, Plaweski S, Cazal J, Schuster Ch, Badulescu A. Reconstruction d'une Vertèbre Lombar à partir d'un Examen Tomodensitométrie ou d'un Modèle Statistique Tridimensionnel et de deux Radiographies Calibrées. Etude Expérimentale Rev. Chir. Orthop. 2003 ; 89, Supp 6 : 3S42
9. Tonetti J, Carrat L, Blendea S, Merloz Ph, Troccaz J, Lavallée S, Chirossel JP. Clinical results of percutaneous pelvic surgery. Computer assisted surgery using ultrasound compared to standard fluoroscopy. Computer Aided Surgery, 2001, 6, 204-211
10. Marmignon Ch, Merloz Ph, Cinquin Ph. Le distracteur informatisé du genou 1^o Journées Lyonnaises de Navigation au niveau de la Hanche et du Genou, Palais des Congrès, Lyon, 9 et 10 décembre 2005
11. Plaweski S, Cazal J, Rossel Ph, Merloz Ph. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction using Navigation. Am J Sports Med. 2006, 10, 1 – 11
12. Börner M, Wiesel U. Clinical Experience with « Robodoc » in Total Hip Arthroplasty. In : Stiehl JB, Konermann WH, Haaker RG (Eds.) ; Navigation and Robotics in Total Joint and Spine Surgery. Springer Verlag, Berlin ; 2004 p. 140 – 144.

Discussion

Intervention de B Launois

N'existe-t-il pas à Grenoble un environnement particulier d'informatique et de robotique ?

Réponse de Ph Merloz

Depuis quelques années (1985-1986) s'est créée à Grenoble une structure de recherche axée sur l'imagerie médicale numérique, l'informatique et la robotique médico-chirurgicale. Intégrée à l'université Joseph Fourier, implantée sur le campus santé et au sein du CHU de Grenoble cette structure appelée IN3S (INstitut de l'INGénierie et de l'INformation de Santé) dont les principaux fondateurs sont Jacques Demongeot, Philippe Cinquin, Jocelyne Troccaz et Stéphane Lavallée a pu rapidement s'entourer des compétences nécessaires au niveau des sciences de l'ingénieur et des sciences de la Vie. Ainsi dès le début des années 1990 ont été développés des concepts génériques en matière d'informatique et de robotique appliqués à la Médecine et à la Chirurgie. Les applications industrielles sont apparues quelques années plus tard (1995-1996) et sont un exemple de transfert de technologie Université-Industrie.

Intervention de Ph Vichard

Quelle est la place actuelle (dans la littérature et dans votre expérience) de la navigation dans le traitement chirurgical des fractures des deux colonnes du cotyle.

Il serait en effet intéressant d'éviter les voies d'abord extensives de ces fractures (si difficiles à réduire et à fixer par une seule voie d'abord).

Réponse de Ph Merloz

La place de la navigation dans le traitement chirurgical des fractures des deux colonnes du cotyle est encore très faible, voire inexistante (dans la littérature et dans mon expérience). En effet toute la difficulté réside dans l'acquisition d'images numériques tri-dimensionnelles immédiatement disponibles pour la navigation. L'idéal serait de pouvoir disposer d'une imagerie 3D au bloc opératoire et de pouvoir suivre « à la trace » sur cette même imagerie la réduction des principaux fragments fracturaires. A l'heure actuelle seul le « scanner 3D ou amplificateur de brillance 3D » de bloc opératoire est capable de fournir de telles images en temps réel. Il reste pour l'instant de nombreux progrès à effectuer, notamment dans le traitement de l'image avant que cet outil puisse passer définitivement du laboratoire à la salle d'opération.

Intervention de J Hureau

Je dirai toute mon admiration de béotien devant ce déploiement de techniques toutes orientées vers la précision et l'efficacité du geste. Une telle réflexion tridimensionnelle de l'acte orthopédique était jusque là l'apanage du seul cerveau humain qui devait transposer une représentation plane pour la projeter par la pensée sur l'objet tridimensionnel, le corps humain à traiter. Permettez-moi d'évoquer ici mon Maître Robert Judet dont la dextérité en ce domaine devait tout à ses connaissances anatomiques, à un grand entraînement en médecine opératoire et à un don particulier pour penser dans l'espace. Cela n'est pas donné à tous. L'orthopédie assistée par ordinateur permettra-t-elle d'aider les moins doués ? Il faut le penser. C'est pour l'instant le domaine de la recherche, même si l'application à grande échelle peut être espérée avec la diminution du coût des matériels. Néanmoins, d'un point de vue médico-légal, question sous-jacente à l'interrogation de notre Président, ce serait un non sens expertal que d'exiger un tel raffinement technologique de tous les opérateurs dans l'état actuel des connaissances validées à ce jour et des moyens financiers mis à disposition.