

Imagerie de reconstruction et d'analyse au bloc opératoire : quelles perspectives ? La chirurgie assistée par ordinateur, du virtuel au réel

Computer assisted surgery, from virtual to reality

A Lucas [1, 2, 3], P Haigrón [2, 3], A Kaladji [1], C Göksu [4], O Acosta [2, 3], L Senahdji [2, 3], JP Verhoeye [1]

1. Département de Chirurgie thoracique et cardiovasculaire, CHU Rennes Pontchaillou, F-35033, France

2. LTSI, Université de Rennes 1, F-35042, France

3. INSERM U642, Rennes F-35000, France

4. Therenva, CIC-IT CHU Rennes Pontchaillou, F-35033, France

Mots clés

- ◆ Chirurgie assistée par ordinateur
- ◆ Imagerie de navigation
- ◆ Navigation endovasculaire

Résumé

La chirurgie assistée par ordinateur s'appuie sur différentes technologies et sources d'informations. Le challenge de ces dix dernières années est l'utilisation de ces moyens sur des tissus déformables comme le sont les vaisseaux lorsqu'ils sont soumis à l'introduction d'outils flexibles et relativement rigides (guide rigide Lunderquist, endoprothèse aortique...). La pratique de la chirurgie endovasculaire assistée par ordinateur est envisagée au travers de trois étapes : le sizing, le planning, l'assistance peropératoire. Nos travaux montrent qu'une approche basée sur une exploitation optimisée des données d'imagerie disponibles aux différentes phases d'observation (pré-, peropératoire), qui n'implique que des moyens matériels (informatiques) légers, relativement transparents pour l'utilisateur, permet de restituer au moment voulu l'information utile, i.e. nécessaire et suffisante, dans un objectif d'aide à la décision et de sécurisation des procédures endovasculaires.

Keywords

- ◆ Surgery, computer-assisted
- ◆ Image-guided therapy
- ◆ Endovascular navigation

Abstract

Computer-assisted surgery relies on various technologies and information sources. Last 10 years challenge is the use of these on deformable tissue as vessels when flexible tools and relatively stiff are introduced in. Computer assisted endovascular surgery is considered through three steps: sizing, planning, per-operating assistance. Our works demonstrates that an approach based on an optimized exploitation of imaging data available on observation various phases (pre-, per-operating), which involves only light material means, relatively transparent for the user, allows to restore at the moment wanted the useful information, i.e. necessary and sufficient, to decision-making support and endovascular procedures security.

La chirurgie assistée par ordinateur (fig. 1) constitue une discipline qui s'appuie sur différentes technologies et sources d'informations (1, 2) :

- l'imagerie médicale qu'elle soit pré- ou peropératoire (scanner, IRM, échographie, images de coelioscopie) (3) ;
- les micro-technologies qui concernent à la fois les dispositifs d'action (micro-instruments) et d'observation (micro-capteurs) (4) ;
- la réalité virtuelle (5) et la réalité augmentée (6) qui se réfèrent notamment à la simulation interactive et à la possibilité d'enrichir la réalité, perçue par l'utilisateur, par des données ou modèles pré-calculés ;
- la robotique médicale (7) utilisée en mode maître-esclave et qui s'ouvre à de nouveaux champs d'applications, avec notamment les systèmes de cathétérisme robotisé (8).

Les premières utilisations des outils de chirurgie assistée par ordinateur se sont développées en orthopédie, en neurochirurgie. Il s'agit d'applications utilisant des outils rigides en présence de tissus rigides ou supposés comme tel dans un

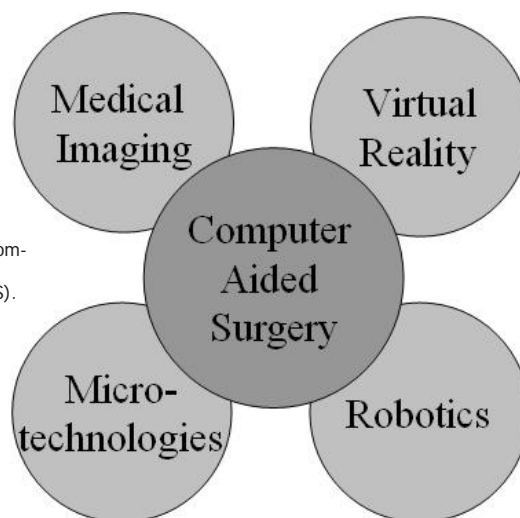


Figure 1 - Computer Aided Surgery (CAS).

Correspondance :

Antoine Lucas, département de Chirurgie thoracique et cardiovasculaire, CHU Rennes Pontchaillou, F-35033, France.

E-mail : antoine.lucas@chu-rennes.fr



Figure 2 - Outil intuitif de sizing EndoSize.

premier temps (organe encapsulé dans des structures osseuses). Le challenge de ces dix dernières années est l'utilisation de ces moyens sur des tissus déformables comme le sont les vaisseaux lorsqu'ils sont soumis à l'introduction d'outils flexibles et relativement rigides (guide rigide Lunderquist, endoprothèse aortique...).

On associe volontiers les progrès en imagerie médicale à des investissements lourds, fruits de la recherche technologique. Nous présentons ici trois applications utilisées en routine clinique qui sont essentiellement le fait de la recherche en traitement du signal et de l'image et d'un savoir-faire algorithmique, relativement indépendant d'investissement matériel lourd (scanner, IRM interventionnelle, robotique sophistiquée).

La pratique de la chirurgie endovasculaire assistée par ordinateur est envisagée au travers de trois étapes : le sizing, le planning, l'assistance peropératoire.

Sizing

Le sizing pré-opératoire, qu'il s'agisse d'endoprothèse aortique ou de lésion sténosante, en particulier sur des situations délicates (troncs supra-aortiques) nécessite une description lésionnelle parfaite et des mesures qui conduiront au choix du dispositif le plus adapté.

En pratique, le chirurgien est confronté à l'utilisation de *vie-*

wers qui ne sont généralement pas adaptés à ce type de travail. Il fait appel soit à un radiologue, soit à une console de radiologie *light* nécessitant un investissement financier conséquent. Il peut aussi faire appel à des dispositifs gratuits et non spécifiques qui ont tous pour caractéristiques d'être l'équivalent de console de radiologie polyvalente et allégée. Parfois le chirurgien vasculaire délèguera le sizing à des spécialistes produit, du laboratoire fournisseur du dispositif.

L'équipe INSERM U642 (et le CHU de Rennes) avait pour objectif de développer un outil adapté au chirurgien pour qu'il réalise lui-même son sizing, utilisable sur un PC portable de base, en automatisant les outils de seuillage, de détection des lignes centrales et de sizing. Ce logiciel devait être peu chronophage et permettre de faire un sizing en sept clics (9). Il s'agit d'un outil de décision orienté vers une action (poser une endoprothèse thoracique ou abdominale, une endovalve ou un stenting sur une artère sténosée).

Le logiciel développé par la Société THERENVA (fig. 2) édite des alarmes en termes de faisabilité (diamètre des artères iliaques, sinuosité, obliquité du collet). Le tout permet une commande optimisée du matériel disponible si on le raccorde au catalogue des constructeurs, le tout à un prix raisonnable compatible avec les budgets de fonctionnement de la plupart des blocs opératoires.

Cet outil fut validé dans une analyse de 32 patients, comparée aux mesures réalisées par un radiologue endovasculaire sur les stations de *General Electric Advanced Vessel Analysis*

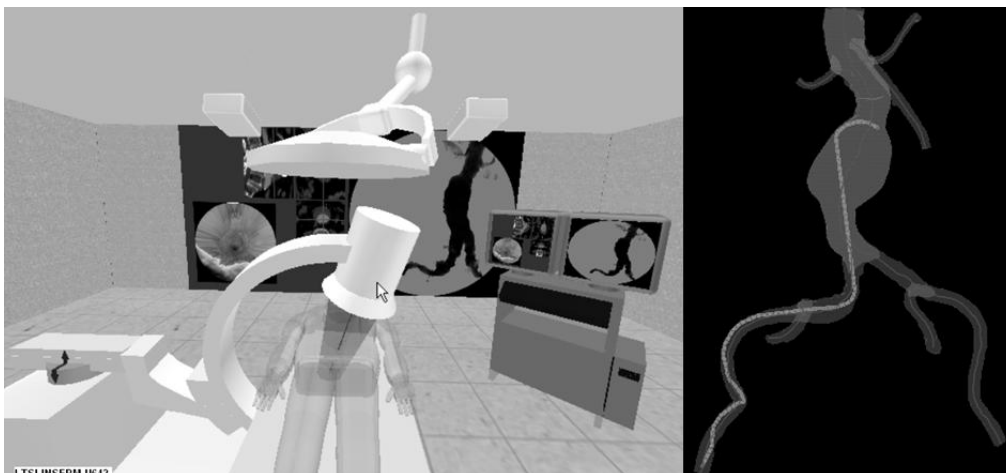


Figure 3 - Planning : choix des incidences et préparation du cathétérisme.



Figure 4 - Dispositif de réalité augmentée EndoNaut.

pour lequel cette étude n'objectivait aucune différence significative entre le sizing fait par le radiologue et le sizing fait par un chirurgien sur EndoSize avec un temps moyen d'utilisation de quinze minutes (10 min. à 40 min.).

Planning

Le planning est lui aussi entièrement informatisé (fig. 3) et s'oriente vers trois fonctions essentielles.

- Le choix en pré-opératoire des futures incidences de travail, de façon à limiter les injections de contraste et l'irradiation en fluoroscopie peropératoire (10). Cette fonction peut éventuellement être complétée du pilotage d'un arceau motorisé en fonction des partenariats ouverts avec les fournisseurs d'imagerie de bloc opératoire.
- La préparation de la navigation endovasculaire au sein de lésions à accès complexe, en particulier au niveau de la carotide et des troncs supra-aortiques. Cette planification peut être réalisée visuellement par angioscopie virtuelle (11), i.e. navigation exploratoire virtuelle au sein de l'imagerie préopératoire, ou/et s'appuyer sur la considération explicite du matériel endovasculaire en interaction avec les tissus (12, 13). Cela suppose alors une modélisation du comportement mécanique du matériel utilisé et l'acquisition pré-opératoire d'un angioscanner complet de la crosse aortique et des troncs supra-aortiques, et de tester sur ordinateur le matériel et anticiper sur ces comportements (longueur, torque, fouet). Le développement industriel de cette application est limité premièrement par l'obtention des paramètres mécaniques des guides et cathéters existants sur le marché (secret industriel légitimement conservé par les fournisseurs) et par le travail considérable que représente l'établissement de ces bases de données matérielles pour un nombre d'utilisateurs assez restreint.
- L'apprentissage pour lequel l'application décrite précédemment s'avérerait être un excellent outil. En effet, si les chirurgiens connaissent bien les simulateurs de cathétérisme, ceux-ci ne permettent pas, en général, de tester simplement et rapidement les outils endovasculaires sur des données de patients qu'ils ont à traiter. L'intégration de simulation de cathétérisme chez un patient prévu, ayant bénéficié d'un scanner pré-opératoire, permettrait non seulement de choisir son matériel de façon optimale mais aussi de tester et de s'entraîner rapidement au maniement de nouveaux outils, disponibles de plus en plus fréquemment sur le marché.

Assistance peropératoire

Il est paradoxal de constater qu'en pré-opératoire on dispose d'informations très précises issues du scanner avec la visualisation de la totalité des lésions, anévrisme ou sténose, la présence de thrombus, de calcification, la possibilité de faire des mesures et qu'en per-opératoire, quelque soit la sophistication de l'ampli de brillance, on dispose d'une image soustraite avec une perte singulière de l'information pariétale. Cette image 2D peropératoire, en l'absence de rotationnel, expose le chirurgien à des erreurs (dont la plus fréquente est l'erreur de parallaxe), à une mauvaise interprétation des sinuosités, à une recherche de la meilleure incidence au prix d'injections itératives de contraste et d'une irradiation supplémentaire.

L'imagerie peropératoire se révèle donc assez peu informative par rapport à l'imagerie pré ou postopératoire. Un certain nombre de complications, fuites, malpositions, couvertures d'artères rénales ou iliaques internes, sont la résultante soit d'une erreur de sizing, soit d'une non-anticipation des déformations, soit de malpositions peropératoires.

Le système d'assistance (14, 15), développé par l'équipe d'INSERM et la société THERENVA, a fait l'objet d'une expérimentation au CHU de Rennes et a obtenu le premier prix de l'AGBM 2008 du concours des Technologies Médicales Innovantes.

Il s'agit d'une console d'assistance (fig. 4) qui permet aux chirurgiens vasculaires, moyennant une procédure de recalage automatisé, de poursuivre son intervention, non seulement comme il en a l'habitude sur des écrans de fluoroscopie, mais aussi de voir la progression de son dispositif dans le volume 3D, issu du scanner pré-opératoire. Ce recalage et cette implantation d'images répond bien à la définition de réalité augmentée. Elle se déroule en temps réel et permet aux chirurgiens de disposer d'un véritable tableau de bord sur lequel il peut voir : la progression fluoroscopique, la progression sur une grande reconstruction 3D de l'anévrisme ou du tronc supra-aortique et les coupes de scanner correspondant au positionnement de son device. Les informations relatives à la paroi sont alors visibles : thrombus, calcification. Cet outil permet donc la localisation à partir d'une seule incidence d'acquisition, il est complété par un système d'alarme s'appuyant sur le sizing pré-opératoire et alertant l'opérateur en cas de non respect du planning pré-opératoire. L'évaluation clinique actuellement conduite sur dix endoprothèses aortiques et quatre angioplasties carotidiennes a permis de constater une optimisation et une sécurisation du positionnement des devices, endoprothèse ou stent, une diminution de l'utili-

sation de la scopie à la recherche des différentes incidences et une diminution de la quantité de produit de contraste injecté.

Le problème technique restant correspond aux déformations. L'introduction d'un guide de Lunderquist ou d'une endoprothèse aortique conduit naturellement à une rigidification de l'artère, en particulier au niveau des artères iliaques. Les modifications de flexion-extension du cou, au cours de l'angioplastie carotidienne, peuvent aussi conduire à des différences de tortuosités au niveau de la carotide commune ou interne. Le planning pré-opératoire, établi à partir du scanner pré-opératoire, se trouve donc pris en défaut. Pour ce faire, le système recalcule donc, à partir des informations données sur la fluoroscopie, une nouvelle base de données scanner intégrant ces modifications.

Conclusion

La chirurgie vasculaire assistée par ordinateur constitue une pratique en émergence. Nos travaux montrent qu'une approche basée sur une exploitation optimisée des données d'imagerie disponibles aux différentes phases d'observation (pré-, per-opératoire), qui n'implique que des moyens matériels (informatiques) légers, relativement transparents pour l'utilisateur, permet de restituer au moment voulu l'information utile, i.e. nécessaire et suffisante, dans un objectif d'aide à la décision.

Ces solutions logicielles intégrables dans un bloc opératoire standard, le sont tout autant dans une salle hybrides de haute technologie, telle que la plateforme TherA-Image (Plateau technique de thérapie et chirurgie mini-invasive guidée par l'image) en cours de déploiement au CHU de Rennes.

Les perspectives de nos travaux concernent la poursuite de l'étude anticipée des déformations sous l'action d'un outil relativement rigide, tel qu'une endoprothèse aortique ou un cathéter porteur. Cette étude fait l'objet d'un projet ANR TECSAN09 dénommé ANGIOVISION (partenaires : LTSI-INSERM U642, CIC-IT RENNES, HENRI MONDOR - Pr BECQUEMIN, LAMCOS-CNRS U5259, ANSYS, THERENVA).

À terme, l'adjonction d'informations provenant d'échographies 2D ou 3D peropératoires, de localisateur magnétique intracorporel ou encore d'IRM interventionnelle, mises en correspondance avec un sizing et un planning pré-opératoire bien construit, intégrant les futures déformations, devrait nous permettre d'atteindre le but que nous poursuivons, à savoir une chirurgie endovasculaire réduisant le recours aux rayons X, avec pour dispositif au centre de cette fusion de données, une station d'angionavigation déjà disponible.

Références

1. Lavallée S, Cinquin P, Troccaz J. Computer integrated surgery and therapy: state of the art. In: Contemporary perspectives in three-dimensional biomedical imaging. Editor: Roux C, Coatrieux JL. Amsterdam : IOS Press ; 1997. Chapter 10 : 239-310.
2. Galloway R.L. The process and development of image-guided procedures. Annual Review of Biomedical Engineering 2001 ; 3 : 83-108.
3. Peters TM. Image guidance for surgical procedures. Physics in Medicine and Biology 2006 ; 51 : 505-40.
4. Haigrón P, Luo L, Coatrieux JL. Issues in image-guided therapy. IEEE Eng Med Biol Mag 2009 ; 28 : 96-8.
5. Fuchs P, Moreau G. Le Traité de la réalité virtuelle. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, deuxième édition, 2003.
6. Eggers G, Salb T, Hoppe H, Kahrs L, Ghanai S, Sudra G, et al. Intraoperative augmented reality: the surgeons view. Stud Health Technol Inform 2005 ; 111 : 123-5.
7. Taylor R, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. IEEE Trans Robotics and Automation 2003 ; 19 : 765-81.
8. Servatius H, Steven D, Rostock T, Hoffman B, Drewitz I, Müllerleile K, Aydin M, Meinertz T Willems S. Robotic Navigation Minimizes the X-ray Exposure in Pulmonary Vein Isolation: A Randomized Comparison with the Conventional Approach. Heart Rhythm 2009 ; 6 : S341.
9. Acosta O, Göksu G, Lucas A, Kulik C, Rolland Y, Haigrón P. Geometrical description of anatomical structures based on virtual exploratory navigation. In : SURGETICA 2005 Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur : Outils et applications. Montpellier : Sauramps Medical ; 2005. p. 437-45.
10. Goksu G, Haigrón P, Zhang H, Soulas T, Le Certen G, Lucas A. 3D intraoperative localization for endovascular navigation guidance. In : Surgetica'2002 - Gestes médico-chirurgicaux assistés par ordinateur : outils et applications. Montpellier : Sauramps Medical ; 2002. p. 323-9.
11. Haigrón P, Bellemare ME, Acosta O, Goksu C, Kulik C, Rioual K, Lucas A. Depth-map-based scene analysis for active navigation in virtual angiography. IEEE Transactions on Medical Imaging 2004 ; 23 : 1380-90.
12. Guilloux V, Haigrón P, Göksu C, Kulik C, Lucas A. Simulation of guide-wire navigation in complex vascular structures. Proceedings of SPIE Medical Imaging 2006:Visualization, Image-Guided Procedures, and Display; 2006; San Diego, USA: SPIE, Bellingham, WA; 2006. 6141 :1-11.
13. Pelerin JL, Kulik C, Goksu C, Coatrieux JL, Rochette M. Fluid-structure interaction applied to the simulation of Abdominal Aortic Aneurysms. Proceedings International IEEE Engineering. In Medicine and Biology Conference, New York, August 2006.
14. Haigrón P, Lucas A. Method for assisting and guiding the navigation of a tool in anatomical structures. Brevet FR 02/04898. Université de Rennes 1. 2002.
15. Goksu C, Haigrón P, Acosta O, Lucas A. Endovascular navigation based on real/virtual environments cooperation for computer assisted TEAM procedures. Proceedings of SPIE Medical Imaging 2004:Visualization, Image-Guided Procedures, and Display; 2004; San Diego, USA: SPIE, Bellingham, WA; 2004. p. 257-66.