



de Boston et avec le service de psychiatrie de l'École de médecine de Harvard, un stimulateur magnétique transcrânien. Cette stimulation non invasive est indolore et inoffensive. Elle s'effectue à l'aide d'une paire d'électro-aimants, qui induit des courants électriques dans des zones précises du cortex cérébral. Des capteurs électriques sur la peau du patient identifient les muscles concernés par la stimulation de points donnés du cortex (voir la figure 4) ; les informations obtenues peuvent être intégrées au modèle virtuel de la tête de notre patient.

La superposition du virtuel et du réel

Les modèles de visualisation des structures internes deviennent particulièrement utiles lorsqu'ils sont superposés aux structures du patient allongé sur la table d'opération. Ainsi, l'anatomie interne est directement montrée au chirurgien durant l'intervention, sans imposer à celui-ci de transformation mentale.

Classiquement, le marquage des images préopératoires directement sur le patient s'effectue avec un cadre stéréotaxique que l'on visse sur le crâne du patient. Durant les tests préopératoires et pendant l'intervention, il fournit les repères que le chirurgien utilise pour corréler les images préopératoires avec le cerveau lui-même pendant l'opération. Toutefois, malgré l'anesthésie locale, ce dispositif est douloureux pour le patient et encombrant pour le chirurgien.

En 1995, notre collègue Steven White a proposé d'utiliser la lumière laser afin de remplacer ces cadres. Le faisceau d'un laser, qui est une ligne mince, est d'abord déformé par une lentille de façon qu'un segment lumineux parvienne au cuir chevelu et au visage du patient, dont la tête est immobilisée durant l'enregistrement des images et l'intervention chirurgicale. Sur le crâne du patient, ce segment est déformé par les reliefs. Une caméra enregistre ces déformations, qui sont regroupées avec le modèle segmenté de la tête du patient. Le faisceau est ensuite déplacé vers le haut du visage par incréments prédéfinis, jusqu'à ce que la topologie de la surface de la tête du patient dans sa position exacte et fixe soit mémorisée.

Ensuite, un programme fait tourner le modèle de la tête afin de superposer exactement le masque laser au visage (voir la figure 5). Enfin, on calcule la position du chirurgien par rapport à celle du système laser et l'on oriente l'image selon son angle de vue. La tête virtuelle peut s'incruster dans les images vidéo du patient.

Pendant l'intervention

La localisation de la cible n'est qu'un début : l'objectif majeur de la chirurgie vidéo-assistée reste le contrôle de la position du scalpel à tout instant.

À cette fin, nous avons mis au point une sonde équipée de diodes électroluminescentes à infrarouge, dont la lumière émise est enregistrée par trois caméras fixes. Pour se repérer au cours de l'opération, le chirurgien touche le tissu qu'il veut couper avec l'extrémité stérile de la sonde. Grâce à des méthodes de triangulation, les ordinateurs reliés aux caméras calculent la position exacte de la sonde dans le corps et l'affichent sur le modèle anatomique. Notre ordinateur montre la position de la sonde vue en coupe transversale du dessus, de face et de côté (voir la figure 6).

À mesure que le chirurgien déplace et excise, le modèle initial devient très vite obsolète. L'appareil de résonance magnétique à aimant ouvert sert à mettre à jour les images : pendant l'intervention, qui se déroule à l'intérieur de l'aimant cylindrique, de nouvelles images sont enregistrées et réunies aux données antérieurement calculées. Ces mises à jour sont particulièrement importantes lorsque les structures sont molles et déformables.

Aujourd'hui, les nouvelles images produites sont uniquement en deux

dimensions et sont affichées soit à côté du modèle préopératoire, soit superposées à celui-ci, selon la préférence du chirurgien. Nous espérons obtenir des mises à jour directement en trois dimensions dans un an environ.

Les techniques que nous avons décrites, et d'autres encore, ne s'appliquent pas seulement en neurochirurgie ; elles sont aussi utilisées pour certaines opérations complexes des os, du nez, des reins, du foie, de la colonne vertébrale et d'autres tissus.

En radiothérapie anticancéreuse, des méthodes de construction de modèles et d'imagerie en temps réel facilitent l'irradiation sélective des tumeurs : on focalise mieux les rayons sur les tissus cancéreux, et l'on épargne les tissus environnants. L'efficacité de la radiothérapie et de la chimiothérapie est également évaluée par techniques d'imagerie qui mettent en évidence des caractéristiques telles que la taille et la localisation des tumeurs avant et après traitement.

Des diagnostics plus précoces seront possibles grâce à ces techniques. Notre équipe teste aujourd'hui des algorithmes de détection de tumeurs du sein à partir des représentations tridimensionnelles construites grâce à des clichés d'imagerie par résonance magnétique.

Toutes ces techniques doivent encore être perfectionnées. Les tissus très mous, par exemple, sont difficiles à analyser, parce qu'ils se déforment beaucoup lorsque le patient respire ou contracte certains muscles. Pour mieux les décrire, on explore aujourd'hui des algorithmes de prédiction des déformations des tissus.

L'ordinateur devenu un précieux assistant du chirurgien, les interventions chirurgicales seront moins invasives, plus courtes et moins risquées.

Eric GRIMSON est professeur de génie médical à l'Institut de technologie du Massachusetts. Ron KIKINIS est directeur du Laboratoire d'explorations chirurgicales à l'Hôpital Brigham et Women de Boston. Ferenc JOLESZ est professeur de radiologie à l'École de médecine de Harvard. Peter BLACK est professeur de neurochirurgie à l'École de médecine de Harvard.

W.M. WELLS III, W.E.L. GRIMSON, R. KIKINIS et F.A. JOLESZ, *Adaptive Seg-*

mentation of MRI Data, in *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 15, n° 4, pp. 429-442, août 1996.

P.M. BLACK et al., *Development and Implementation of Intraoperative Magnetic Resonance Imaging and Its Neurosurgical Applications*, in *Neurosurgery*, vol. 41, n° 4, pp. 831-842, octobre 1997.

Ferenc A. JOLESZ, *Image-Guided Procedures and the Operating Room of the Future*, in *Radiology*, vol. 204, n° 3, pp. 601-612, 1997.