

Quelques perspectives en imagerie médicale

Isabelle BLOCH

Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications
Département TSI - CNRS UMR 5141 LTCI - 46 rue Barrault, 75013 Paris
Isabelle.Bloch@enst.fr

Résumé – La complexité du corps humain et de sa vision par des techniques d'imagerie médicale nécessite le développement de méthodes et d'outils de traitement et d'interprétation d'images répondant à cette complexité, et de nombreuses techniques avancées ont trouvé dans l'imagerie médicale un champ d'application particulièrement riche. Dans cet article, nous présentons quelques perspectives d'évolution de ce domaine. Loin d'être exhaustives, elles se restreignent à un petit nombre de coups de projecteur, laissant de côté nombre de problématiques tout aussi intéressantes. Après quelques mots sur les nouvelles sources de données et d'images, nous mentionnons quelques tendances nouvelles en segmentation et en reconnaissance, sur la modélisation du corps et de ses fonctions, sur les applications en neurologie et neurosciences, et concluons sur les contributions possibles au dossier patient numérisé.

Abstract – The complexity of the human body and its vision through medical imaging techniques requires the development of methods and tools for image processing and interpretation addressing this complexity. Several advanced techniques found a particularly rich field of application in the domain of medical imaging. In this paper, we present a few perspectives in this domain. They are far from being exhaustive, and are restricted to a few aspects only, leaving aside a number of very interesting problems. After a few words on new data and image sources, we mention some new trends in segmentation and recognition, modeling of the human body and its functions, on applications for neurology and neurosciences, and we conclude on the possible contributions to the electronic patient records.

1 Nouvelles sources d'information, nouvelles images

Malgré des limites imposées par la physique des processus sous-jacents aux acquisitions d'images, l'imagerie médicale évolue encore de manière importante. Au-delà des améliorations sur la qualité des images, il s'agit de véritables changements d'échelles et de panorama, offrant de nouveaux champs d'investigation sur des structures non visibles avec les techniques classiques.

Ainsi, de nouveaux scanners X font leur apparition avec des tailles de voxels bien inférieures au millimètre cube, donnant ainsi accès à des informations distales (petits vaisseaux sanguins ou bronches par exemple). D'autres évolutions des techniques à rayons X portent sur les développements de la mammographie numérique 3D, qui élimine les artefacts de superposition de la mammographie numérique classique, et permet d'envisager de grands progrès dans le diagnostic et le pronostic.

En ultrasons, des perspectives importantes concernent l'évolution des acquisitions tridimensionnelles en temps réel, l'utilisation d'agents de contraste, ainsi que la combinaison d'images acquises selon des points de vue différents (*spatial compounding*).

En médecine nucléaire, l'apparition de nouveaux détecteurs à semi-conducteurs, reposant donc sur des principes physiques très différents de ceux utilisés pour les détecteurs traditionnels, permet, avec un système compact et léger, d'obtenir des images ayant plus de contraste, une meilleure résolution, un taux de comptage plus élevé.

Autre évolution importante, les machines combinées TEP-CT [27], qui font actuellement leur apparition dans les hôpitaux, fournissent des images anatomiques et fonctionnelles pendant le même examen, facilitant ainsi le recalage entre ces images, même si les difficultés liées aux mouvements physiologiques (en particulier la respiration) subsistent.

En imagerie par résonance magnétique (IRM), les modalités d'acquisition se multiplient, les séquences pouvant ainsi être associées pour offrir des informations complémentaires sur les structures observées. Des séquences rapides permettent soit des acquisitions du corps entier en imagerie anatomique, soit des acquisitions fonctionnelles en IRMf. Des séquences spécifiques permettent de mettre en évidence des pathologies. L'IRM de diffusion, donnant accès à la structure des faisceaux de fibres de matière blanche, connaît un développement qui s'accélère et tend à être de plus en plus associée à d'autres acquisitions, tant pour la recherche en neurosciences que pour des applications cliniques. Les recherches actuelles conduisent au développement de systèmes à haut champ, qui seront exploités par exemple dans le projet Neurospin. Les futures machines de ce site utiliseront des champs allant de 3 à 11 teslas pour l'homme, et jusqu'à 17 teslas pour le petit animal. Elles devront permettre d'identifier des ensembles de moins de 5000 neurones, de quelques centaines de microns d'épaisseur, alors qu'actuellement les machines ne permettent d'imager que des zones de plusieurs millions de neurones, dont seule une partie est vraisemblablement activée. Des champs entièrement nouveaux pour le traitement d'images s'ouvriront alors.

Depuis quelques années, une nouvelle technique est développée. Il s'agit de la tomographie par cohérence optique (OCT), qui exploite la cohérence de la lumière, et peut être ainsi considérée comme le parallèle optique des techniques ultrasonores. Ces techniques fournissent actuellement des informations sur les structures superficielles, avec une résolution de 1 à 10 microns, pour une profondeur accessible de 2 à 3 millimètres.

Mais les nouvelles sources de données ne concernent pas que les techniques d'imagerie. Beaucoup d'informations proviennent également de nouveaux modèles biologiques ou biomécaniques. Nous y reviendrons dans la section 3.

2 Segmentation et reconnaissance

Bien que la segmentation et la reconnaissance de structures en imagerie médicale soient des thèmes de recherche anciens, ils suscitent toujours beaucoup de travaux, tant les problèmes rencontrés sont difficiles et évoluent avec les techniques d'acquisition. Ils concernent à la fois les structures normales et pathologiques, ainsi que des zones relatives à des fonctions en imagerie fonctionnelle.

Les méthodes fondées sur des modèles sont de plus en plus développées. En effet, la complexité des données 3D en imagerie médicale nécessite le développement de modèles intégrant de multiples connaissances et de grandes quantités d'informations, ainsi que des contraintes de type topologique, géométrique ou encore morphologique.

Ainsi les méthodes de type modèles déformables ont suscité un grand engouement et de nombreux développements. Ces modèles peuvent décrire des propriétés que doivent satisfaire les objets (portant sur leur régularité, sur la position de leurs surfaces par rapport aux forts gradients de l'image, etc.), ou être des modèles des objets à segmenter eux-mêmes (par exemple des modèles de reins, de vaisseaux sanguins, de cœur). Ils peuvent être soit continus, soit discrets (maillages simplexes par exemple) [21, 32]. Les mises en œuvre par des techniques d'ensembles de niveaux [26] sont maintenant très répandues, soit en laissant libres les changements éventuels de topologie, soit au contraire en contraignant la topologie. Enfin, des modèles « sans contours » s'inspirant de la méthode de Mumford et Shah ont été développés et leurs versions multi-phases permettent de segmenter plusieurs structures simultanément [8, 28].

La création de bases de données importantes d'images dans de nombreuses équipes permet d'envisager l'utilisation d'outils statistiques afin de définir des modèles statistiques d'apparence, qui sont maintenant exploités dans diverses directions [11, 30].

Plus récemment, des modèles de l'agencement spatial des structures ont été développés. Alors que les relations de type topologique ont été utilisées depuis longtemps, elles sont maintenant enrichies avec d'autres relations, telles que des relations de direction, de distance, ou des relations plus complexes telles que celles qui sont utilisées dans les descriptions anatomiques (par exemple [31] ou le site Neuranat¹ pour la neuro-anatomie). L'introduction de ces relations relève du domaine du raisonnement spatial

et comporte une composante de modélisation des connaissances et une composante de raisonnement et de fusion. Ce domaine, beaucoup développé en intelligence artificielle avec les modèles de raisonnement spatial qualitatif (voir par exemple [29] pour un panorama), émerge petit à petit en traitement d'images [5, 6, 10]. Il bénéficie en particulier du développement de la théorie des ensembles flous en traitement d'images [3], qui permet de combiner notions qualitatives et quantitatives dans le même formalisme, ainsi que de celui de la fusion d'informations [4]. Les formalismes qualitatifs ont été beaucoup utilisés dans le domaine des systèmes d'information géographique. Des tentatives de rapprochement avec l'imagerie médicale se sont concrétisées récemment, par la conférence *Mapping the human body: spatial reasoning at the interface between human anatomy and geographic information science* (Buffalo, USA).

Dans ces problèmes de segmentation et de reconnaissance de structures, la question de la validation reste toujours centrale et sans solution définitive. Des séries d'images annotées et segmentées par des experts peuvent servir de base à cette validation, mais demandent encore à être étendues. De plus, la notion de qualité de la segmentation a un sens qui dépend des objectifs et de l'utilisation ultérieure des résultats. Cela justifie alors la définition de protocoles de validation ou d'évaluation rétrospective, en fonction des étapes ultérieures. Enfin, des mesures absolues ne sont pas toujours nécessaires : par exemple le suivi de l'évolution d'une pathologie s'appuiera plus sur des mesures relatives, permettant de mettre en évidence des tendances dans l'évolution. Les contraintes sont alors moins fortes pour les algorithmes et plus réalistes.

3 Modélisation du corps et de ses fonctions

Nous avons mentionné dans la section 1 l'importance des modèles comme nouvelles sources de données. Les enjeux sont d'une double nature. Il s'agit d'une part d'utiliser des modèles biologiques, anatomiques, ou encore biomécaniques comme guide pour l'interprétation des images. C'est le cas par exemple des descriptions neuro-anatomiques déjà mentionnées. Il s'agit également d'exploiter les sources d'imagerie pour constituer des modèles du corps humain, soit du point de vue anatomique, soit du point de vue fonctionnel. Ce domaine est susceptible de beaucoup progresser grâce aux grosses bases de données qui sont en train d'être constituées dans plusieurs laboratoires et hôpitaux.

Par exemple, mentionnons les modèles de respiration, construits soit à partir de modèles mathématiques comme dans le fantôme NCAT [25] (structures thoraciques définies par des NURBS, et dont les points de contrôle sont modifiés pour simuler la respiration), soit de modèles biomécaniques, comme celui développé dans [24] à partir de propriétés physiologiques et adapté à différents scénarios de respiration.

D'autres modèles concernent les pathologies, et des modèles d'évolution de tumeurs ont par exemple été publiés. Parmi les plus récents, citons l'utilisation de données is-

1. <http://www.chups.jussieu.fr/ext/neuranat>

sues d'IRM de diffusion pour améliorer les modèles de diffusion et prolifération non isotropes de la croissance de tumeurs cérébrales [16]. L'intégration de tels modèles dans les techniques de traitement et d'interprétation d'images constitue une piste prometteuse de recherches.

Le domaine cardiaque est un domaine dans lequel de nombreux modèles sont développés, et ont considérablement évolué ces dernières années. La création de la conférence FIMH (*Functional Imaging and Modeling of the Heart*) en 2001 en atteste. Dans ce contexte, citons le projet *Integrative Biology*² [15]. Ce projet est dédié aux problèmes cardiaques et aux tumeurs cancéreuses et repose sur le développement de modèles computationnels détaillés permettant d'étudier ces pathologies. Par exemple, un modèle des fibres structurelles du cœur a été mis au point.

De manière plus générale, le projet *Physiome*³ [2], qui vise à la compréhension et à la description quantitative de l'organisme, de sa physiologie et de ses pathologies, dans le but d'améliorer la santé, regroupe des travaux sur la modélisation du cœur et des poumons, de la fonction cardiaque, des flux sanguins et des échanges, etc.

Les modèles ne sont pas seulement de nature mathématique ou computationnelle. Ils peuvent également être de nature plus descriptive, et des travaux sur les ontologies commencent à apparaître dans le domaine de l'imagerie médicale. Les ontologies permettent de modéliser à la fois des concepts et des relations entre ces concepts et ont vocation à être réutilisés. Citons par exemple les travaux menés à Rennes sur l'ontologie du cortex cérébral [13].

Ces travaux pourront servir de support à des applications en fouille de données, domaine qui prend de l'importance en imagerie médicale. Ils constituent également des ressources précieuses pour l'enseignement et la formation.

4 Neurologie et neurosciences

Les applications en neurologie et en neurosciences suscitent toujours de nombreux travaux. Les problématiques s'enrichissent et les nouvelles images disponibles permettent de tenter de répondre à des questions de plus en plus complexes. Il s'agit en particulier de cartographier l'architecture cérébrale et ses fonctions. Ces travaux s'appuient sur de nombreux développements : détection et reconnaissance des structures gyrales et des sillons, analyse des faisceaux de fibres en IRM de diffusion [18, 22] et des liens qu'ils établissent entre les aires cérébrales, identification des aires fonctionnelles... Récemment, des travaux visent à étudier les plissements de la surface corticale et la sulcogénèse [23]. L'analyse d'images IRM anténatales fournit des informations permettant d'envisager une meilleure compréhension de la croissance du cerveau et de la variabilité des plissements d'un individu à l'autre [7]. On trouvera dans [17] un panorama des questions importantes, des solutions et des perspectives, ainsi qu'une importante bibliographie.

La détection d'activations repose encore beaucoup sur la méthode SPM⁴ (*Statistical Parametric Mapping*), mais d'autres méthodes, reposant sur des principes différents,

ont pu être développées récemment avec succès (par exemple [9, 12, 19]).

Dans les cas pathologiques, l'étude de la réorganisation du cerveau (voir par exemple [14, 20]), le suivi des évolutions entre des images pré-opératoires et post-opératoires, la localisation de foyers épileptiques ou d'autres types de pathologies, sont autant d'enjeux cruciaux que les développements conjoints des techniques d'imagerie, de leur implantation dans les hôpitaux et des techniques de traitement et d'interprétation d'images permettent d'aborder. Des travaux menés par exemple au sein de l'Institut d'Imagerie Neurofonctionnelle IFR 49⁵ portent entre autres sur la neuroimagerie intégrée des démences (devenu un enjeu majeur de santé publique), sur l'exploitation de l'imagerie en neurochirurgie (par exemple pour l'implantation d'électrodes intracérébrales, les bilans pré-opératoires, la résection de tumeurs), sur l'étude des fonctions cognitives chez l'adulte et l'enfant. Dans tous ces domaines, le traitement d'images peut apporter beaucoup, et la complexité des questions posées donnera sûrement lieu à de nouveaux développements originaux à la fois du point de vue théorique et méthodologique et du point de vue applicatif.

De même, la fusion de données issues de plusieurs types d'imagerie fonctionnelle, ou de données d'imagerie et de données électrophysiologiques (EEG, MEG), a déjà donné lieu à des contributions (par exemple [1]) et est également appelée à prendre de plus en plus d'ampleur.

5 Contribution de l'imagerie au dossier patient

Si les discussions sur le dossier patient sont anciennes, elles se sont amplifiées récemment avec la création du GIP-DMP⁶. Les questions importantes sont actuellement publiées sous forme de fiches et concernent surtout l'identification, le format, les interfaces, les droits d'accès, les aspects juridiques. Très peu de travaux concernent l'exploitation des images, les résultats de traitement d'images, les annotations, dans le contexte du DMP. Ils sont pour l'instant développés dans les laboratoires de recherche, et là encore les développements en imagerie médicale pourraient certainement contribuer à la constitution des DMP. Des outils partagés comme BrainVisa et Anatomist⁷ ou ITK⁸ constitueraient alors des supports de développement et d'utilisation primordiaux.

Références

- [1] A. Aubert, R. Costalat, H. Duffau, and H. Benali. Modeling of pathophysiological coupling between brain electrical activation, energy metabolism and hemodynamics: insights for the interpretation of intracerebral tumor imaging. *Acta Biotheor.*, 50(4):281–295, 2002.
- [2] J. B. Bassingthwaighe. The Macro-Ethics of Genomics to Health: The Physiome Project. *Comptes Rendus de l'Académie Française*, 326:1105–1110, 2003.

5. <http://www.ifr49.org/>

6. http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/gip_dmp/sommaire.htm

7. <http://brainvisa.info/>

8. <http://www.itk.org/>

2. <http://www.integrativebiology.ox.ac.uk/>

3. <http://www.physiome.org/>

4. <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

- [3] I. Bloch. Traitement d'images. In B. Bouchon-Meunier and C. Marsala, editors, *Traitement de données complexes et commande en logique floue*, chapter 3, pages 95–152. Hermès, Paris, France, 2003.
- [4] I. Bloch (sous la direction de). *Fusion d'informations en traitement du signal et des images*. Hermès, Paris, France, 2003.
- [5] I. Bloch. Fuzzy Spatial Relationships for Image Processing and Interpretation: A Review. *Image and Vision Computing*, 23(2):89–110, 2005.
- [6] I. Bloch, T. Géraud, and H. Maître. Representation and Fusion of Heterogeneous Fuzzy Information in the 3D Space for Model-Based Structural Recognition - Application to 3D Brain Imaging. *Artificial Intelligence Journal*, 148:141–175, 2003.
- [7] A. Cachia, J.-F. Mangin, D. Rivière, F. Kherif, N. Bodaert, A. Andrade, D. Papadopoulos-Orfanos, J.-B. Poline, I. Bloch, M. Zilbovicius, P. Sonigo, F. Brunelle, and J. Régis. A Primal Sketch of the Cortex Mean Curvature: A Morphogenesis Based Approach to Study the Variability of the Folding Patterns. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 22(6):754–765, jun 2003.
- [8] T. F. Chan, B. Y. Sandberg, and L. A. Vese. Active contours without edges for vector-valued images. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 11(2):130–141, 2000.
- [9] P. Ciuciu, J.B. Poline, G. Marrelec, J. Idier, C. Pallier, and H. Benali. Unsupervised robust nonparametric estimation of the hemodynamic response function for any fMRI experiment. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 22(10):1235–1251, 2003.
- [10] O. Colliot, O. Camara, and I. Bloch. Un modèle déformable intégrant des relations spatiales pour la segmentation de structures cérébrales. *Revue I3*, 2005.
- [11] T.F. Cootes, D. Cooper, C.J. Taylor, and J.Graham. Active shape models - their training and application. *Computer Vision Image Understanding*, 61(1):38–59, January 1995.
- [12] O. Coulon, J.-F. Mangin, J.-B. Poline, V. Frouin, and I. Bloch. Group Analysis of Individual Activation Maps using 3D Scale-Space Primal Sketches and a Markovian Random Field. In M. Moore, editor, *Spatial Statistics: Methodological Aspects and Applications*, CRM Series in Statistics LNS 159, chapter 10, pages 201–212. Springer Verlag, New York, 2001.
- [13] O. Dameron, B. Gibaud, and M. Musen. Using Semantic Dependencies for Consistency Management of an Ontology of Brain Cortex Anatomy. In *1st International Workshop on Formal Biomedical Knowledge Representation, KRMed04*, pages 30–38, 2004.
- [14] J. Doyon and H. Benali. Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol.*, 15(2):161–167, 2005.
- [15] D. A. Gavaghan, S. Lloyd, D. R. S. Boyd, P. W. Jeffreys, A. C. Simpson, D. F. Mac Randal, L. Sastry, and L. Kleese van Dam. Integrative Biology - Exploiting e-Science to Combat Fatal Diseases. In *AHM2004*, 2004.
- [16] S. Jbabdi, E. Mandonnet, H. Duffau, L. Capelle, K.R. Swanson, M. Péligrini-Issac, R. Guillevin, and H. Benali. Simulation of anisotropic growth of low-grade gliomas using diffusion tensor imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2005.
- [17] J.-F. Mangin. Une vision structurelle de l'analyse des images cérébrales. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 11, 2005.
- [18] J.-F. Mangin, C. Poupon, C. Clark, D. Le Bihan, and I. Bloch. Eddy-Current Distorsion Correction and Robust Tensor Estimation for MR Diffusion Imaging. *Medical Image Analysis*, 6(191-198), 2002.
- [19] G. Marrelec, P. Ciuciu, M. Péligrini-Issac, and H. Benali. Estimation of the hemodynamic response function in event-related functional MRI: Bayesian networks as a framework for efficient Bayesian modeling and inference. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 23(8):959–967, Aug. 2004.
- [20] S. Meunier, L. Garnero, A. Ducorps, L. Mazieres, S. Lehericy, S. T. du Montcel, B. Renault, and M. Vidailhet. Human brain mapping in dystonia reveals both endophenotypic traits and adaptive reorganization. *Ann Neurol.*, 50(4):521–527, 2001.
- [21] J. Montagnat, H. Delingette, and N. Ayache. A Review of Deformable Surface: Topology, Geometry and Deformation. *Image and Vision Computing*, 19:1023–1040, 2001.
- [22] C. Poupon, J.-F. Mangin, C. A. Clark, V. Frouin, J. Régis, D. Le Bihan, and I. Bloch. Towards Inference of Human Brain Connectivity from MR Diffusion Tensor Data. *Medical Image Analysis*, 5:1–15, 2001.
- [23] J. Régis, J.-F. Mangin, T. Ochiai, V. Frouin, D. Rivière, A. Cachia, M. Tamura, and Y. Samson. "Sulcal root" generic model: a hypothesis to overcome the variability of the human cortex folding patterns. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 45:1–17, 2005.
- [24] A. Santhanam, C. Fidopiastis, F. Hamza-Lup, J. Rolland, and C. Imielinska. Physically-based deformation of high-resolution 3D models for augmented reality based medical visualization. In *Augmented Environments for Medical Imaging AMI-ARCS & MICCAI 2004*, pages 21–31, Rennes, France, 2004.
- [25] W. P. Segars, D. S. Lalush, and B. M. W. Tsui. Modeling respiratory mechanics in the MCAT and spline-based MCAT phantoms. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48(1):89–97, 2001.
- [26] J. A. Sethian. *Level set methods: evolving interfaces in geometry, fluid mechanics, computer vision and material science*. Cambridge University Press, 1996.
- [27] D.W. Townsend, J.P.J. Carney, J.T. Yap, and N.C. Hall. PET/CT today and tomorrow. *The Journal of Nuclear Medicine*, 45(1 (Suppl.)):4S–14S, January 1999.
- [28] L. A. Vese and T. F. Chan. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model. *International Journal of Computer Vision*, 50(3):271–293, 2002.
- [29] L. Vieu. Spatial Representation and Reasoning in Artificial Intelligence. In O. Stock, editor, *Spatial and Temporal Reasoning*, pages 5–41. Kluwer, 1997.
- [30] T. Vik. *Modèles statistiques d'apparences non gaussiens. Application à la création d'un atlas probabiliste de perfusion cérébrale en imagerie médicale*. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Strasbourg, France, 2004.
- [31] S. G. Waxman. *Correlative Neuroanatomy*. McGraw-Hill, New York, 24 edition, 2000.
- [32] C. Xu, D.L. Pham, and J.L. Prince. Medical image segmentation using deformable models. In J.M. Fitzpatrick and M. Sonka, editors, *Handbook of Medical Imaging*, volume 2, pages 129–174. SPIE Press, 2000.