

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

en

INFORMATIQUE

présentée et soutenue publiquement par

David SARRUT

le 25 JANVIER 2000

**Recalage multimodal et
plate-forme d'imagerie médicale à
accès distant**

préparée au sein du laboratoire ERIC

sous la direction de

Serge Miguet

COMPOSITION DU JURY

Mme.	Jocelyne Troccaz	Rapporteur	(Directeur de Recherche CNRS)
M.	Christian Roux	Rapporteur	(Professeur)
Mme.	Isabelle Magnin	Examineur	(Directeur de Recherche INSERM)
M.	Ehoud Ahronovitz	Examineur	(Maître de conférences)
M.	Bernard Tourancheau	Examineur	(Professeur)
M.	Serge Miguet	Directeur de thèse	(Professeur)

Table des matières

Introduction	1
I Recalage d'images. Application au positionnement de patient	5
1 Recalage d'images	7
1.1 Domaines d'application	8
1.2 Classification des techniques de recalage	10
1.3 Les méthodes iconiques	20
1.4 Conclusion	22
2 Mesures de similarité	23
2.1 Principes de base	24
2.2 Classification des mesures	28
2.3 Expérimentations	42
2.4 Conclusion	57
3 Interpolations	61
3.1 Introduction	62
3.2 Étude de procédures d'interpolation	64
3.3 Autres procédures d'interpolation	69
3.4 Expérimentations	72
3.5 Conclusion	82
4 Transformations géométriques d'images	83
4.1 Transformations d'images	84
4.2 Principe de la nouvelle méthode	86
4.3 Modèle d'exécution de l'algorithme	90
4.4 Expérimentations	93
4.5 Discussion et conclusion	96
5 Positionnement de patients	97
5.1 Description de la problématique	98
5.2 Travaux préalables	99
5.3 Principe	101
5.4 Justification géométrique	105
5.5 Évaluations expérimentales	109

5.6	Conclusion	120
II	Santé et calculs haute-performance	121
6	ARAMIS : une plate-forme d'imagerie médicale à accès distant	123
6.1	Contexte	124
6.2	Principes généraux	127
6.3	Coeur du système	134
6.4	Conclusion	136
7	Approche surface	137
7.1	Extraction de surface triangulée	138
7.2	Détermination de la relation d'adjacence	140
7.3	Complexité et tests expérimentaux	145
7.4	Conclusion	149
	Conclusion générale	151
III	Annexes	167
A	Transformations affines et modèle sténopé	169
A.1	Matrices des transformations affines	169
A.2	Modèle sténopé	170
B	Modalités d'acquisition d'images médicales	173
B.1	Modalités d'acquisition	173
B.2	Nomenclature des données	175
C	Index des auteurs cités	177

Conclusion générale

Trois domaines d'étude ont été abordés dans cette thèse : le recalage d'images, le positionnement de patient et les travaux du projet *Santé et Calculs haute-performance*. Pour chaque partie, nous présentons un résumé de notre contribution et quelques perspectives.

Recalages d'images

Résumé Les travaux présentés dans la première partie du document sont consacrés au problème du recalage d'images par les méthodes dites *iconiques*, c'est-à-dire sans segmentation et basées sur l'évaluation des liens entre les distributions d'intensités des images. Cette technique a tout d'abord été abordée à travers l'étude de différentes mesures de similarité (chapitre 2). Nous avons ainsi présenté une classification synthétique de nombreux critères de similarité en essayant de mettre l'accent sur les hypothèses sous-jacentes des liens entre les distributions d'intensités des image. Il s'agit d'une classification originale, aucun état de l'art n'existant à notre connaissance sur ce sujet. Deux séries d'expérimentations concluent le chapitre, illustrant d'une part les différences de comportement entre plusieurs mesures et d'autre part leur utilisation potentielle en dehors du champ d'application du recalage d'images dans l'optique d'une recherche par le contenu appliquée au positionnement de patient (une partie de ce chapitre est publiée dans [SM99c]).

Ensuite, au chapitre 3, différentes méthodes d'interpolation, dont certaines originales [SF99], ont été présentées et comparées dans le but de mettre en avant l'importance de cette étape (compromis précision/rapidité). Par la suite, au chapitre 4, ayant constaté que la majorité du temps de calcul lors d'une procédure de recalage est passée durant les étapes de transformation d'image, nous avons proposé un algorithme permettant d'accélérer l'ensemble du processus au prix d'une perte de précision contrôlée. Une étude des performances de cette méthode conduit à régler de manière automatique certains paramètres et fournit un modèle permettant de prévoir le comportement de l'algorithme. Ce travail a été publié dans [SM99b].

Perspectives Différentes voies peuvent être envisagées en ce qui concerne l'amélioration des techniques de recalages iconiques. En particulier, nous n'avons pas exploré d'autres méthodes d'optimisation que celle de Powell-Brent, bien qu'il soit sûrement possible d'accélérer et/ou de rendre plus robuste le processus par l'utilisation de procédures plus évoluées. Quant à la précision qu'il est possible d'obtenir, outre la conjugaison de la mesure et de la procédure d'interpolation, il semble que la prochaine étape soit d'étudier l'adéquation modalité/mesure.

De manière plus générale, l'actuel emploi des mesures de similarité dans le domaine du recalage d'images médicales ne doit pas faire oublier le caractère original de la démarche en tant qu'outil potentiellement adaptable à d'autres types d'images. Même si cette approche semble a priori limitée par des hypothèses fortes mais explicites sur le lien entre les distributions d'intensités des images, elle nous paraît

originale par rapport aux approches classiques basées sur des informations de nature *différentielle*. Ainsi, bien que le calcul de la similarité puisse être perçu comme une segmentation en régions homogènes de même intensité, il n'en est rien puisqu'il s'agit en fait de l'extraction d'une caractéristique *commune* à deux images : l'histogramme joint. Cette caractéristique représente une réduction de l'information de *deux images* au même titre qu'une segmentation représente une réduction de l'information *d'une seule* image. La mesure de similarité est également un critère *global*, tenant compte de la totalité de l'information contenue dans les images, mais est *relative* à une position. De plus, nous avons exhibé deux cas (chapitre 2 et chapitre 5) où le critère peut être utilisé de manière relative par rapport à *différents couples* d'images. De futurs travaux pourraient consister à associer les méthodes avec et sans segmentation dans le but de profiter des avantages des deux approches.

Positionnement de patient

Résumé Le traitement des cancers par radiothérapie conformationnelle nécessite la connaissance exacte de la position du patient afin d'irradier le plus précisément possible les cellules tumorales. Pour cela, un examen scanner est tout d'abord généré et sert de position de référence. Ensuite, lors de chaque séance d'irradiation, un couple d'images portales est acquis et fournit une certaine information sur la position actuelle du patient. La majorité des méthodes de positionnement utilisées aujourd'hui reposent sur l'extraction de structures particulières dans les images. Or, les images portales sont de très mauvaise qualité et rendent délicate une telle étape.

Nous avons décrit au chapitre 5 une méthode entièrement automatique et sans étape de segmentation, permettant à partir de l'examen volumique de référence et des images portales d'estimer le déplacement du patient. Notre approche consiste tout d'abord à générer, préalablement aux séances d'irradiation, un ensemble d'images candidates projetées selon différentes orientations. Ensuite, une recherche par le contenu permet de déterminer parmi cet ensemble d'images, celle qui est la plus semblable à l'image portale. Cette recherche est effectuée à l'aide des méthodes de recalages iconiques et retient l'image dont le recalage conduit à la mesure de similarité la plus haute. Cette étape conduit de plus à une estimation de la transformation 2D observée entre les différentes projections. Enfin, la dernière étape utilise ces paramètres pour estimer le déplacement 3D par une simple optimisation géométrique.

Cette méthode donne de bons résultats sur les expérimentations effectuées puisque les déplacements simulés sont retrouvés avec une précision de l'ordre du millimètre en translation et de 1 degré en rotation. En particulier les déplacements comportant des rotations hors-plan, traditionnellement délicats à estimer, sont correctement retrouvés.

Perspectives L'approche préliminaire qui a été développée nous laisse espérer différentes perspectives. Ainsi, la prochaine étape consiste en une évaluation clinique des travaux par l'intermédiaire d'une collaboration suivie avec des médecins du centre de lutte contre le cancer Léon Bérard. Un protocole de tests devrait être mis en place et conduire à une série d'expérimentations au courant de l'année prochaine. Plusieurs aspects de la méthode proposée vont faire l'objet de travaux plus poussés. En ce qui concerne la précision et la robustesse de la méthode, deux étapes sont critiques : les résultats (transformation 2D) du recalage pris en considération et la méthode de minimisation permettant de combiner les transformations 2D pour trouver le déplacement 3D. Du point de vue de la rapidité de la méthode, nous pensons que de nombreuses solutions existent puisque la seule étape coûteuse consiste en la série

de recalages. Or, nous l'avons vu, différents moyens permettent de réduire le temps de calcul d'une étape de recalage : choix de l'interpolation, sous-échantillonnage, algorithme de transformation spécifique. De plus, nous pensons que le nombre de recalages à effectuer peut être drastiquement limité en employant une technique de recherche autre que celle utilisée pour montrer la faisabilité de l'approche, *i.e.* un parcours exhaustif. Cette optimisation est en effet facilitée par la régularité observée de la mesure de similarité dans l'espace des images pré-calculées.

Santé et calculs haute-performance

Résumé La troisième partie de ce document est consacrée aux travaux plus spécifiquement liés au projet *Santé et Calculs Haute-Performance*. Nous avons ainsi présenté au chapitre 6 le prototype de plate-forme d'imagerie médicale à accès distant nommé ARAMIS (A Remote Access Medical Imaging System). Cette plate-forme est constituée d'une applet Java s'exécutant au sein d'un navigateur Web et est ainsi disponible à partir de pratiquement n'importe quel poste de travail banalisé. De l'autre côté, un serveur de calcul composé d'une machine parallèle ou d'un réseau de stations, gère un ensemble d'outils parallèles d'imagerie médicale. Ces applications proviennent des travaux effectués au cours des activités de recherche de S. MIGUET, et ont été développées par de nombreux auteurs. La spécificité du serveur d'imagerie est de ne jamais transférer les importants volumes de données vers les postes clients. Tous les traitements 3D, grands consommateurs de puissance de calcul mais aussi de ressources mémoire, sont ainsi effectués de manière distante sur le serveur. Ne sont alors transférés au client, que les résultats de tels traitements, typiquement des images 2D. À travers un protocole de communication spécifique basé sur les principes classiques d'encapsulation des appels de méthodes, les accès distants de l'applet vers le serveur de calcul peuvent être rendus transparents à l'utilisateur. Notre système permet ainsi d'une part l'intégration d'outils d'imagerie médicale haute-performance (dédiés à une architecture parallèle), et d'autre part la construction d'applications utilisateur (avec interface graphique conviviale), grâce à un ensemble d'objets masquant les accès distants. Plus de détails peuvent être trouvés dans les publications [Sar98] et [SM99a].

Parmi les outils d'imagerie médicale à notre disposition, les approches surfaciques basées sur l'algorithme des Marching-Cubes ont fait l'objet de plusieurs travaux au sein du laboratoire. Nous nous sommes ainsi intéressés plus particulièrement à la surface triangulée résultant de l'algorithme et avons constaté qu'un grand nombre de traitements utilisant cette surface nécessite la connaissance de la relation d'adjacence entre les triangles (relation de voisinage). Or, nous montrons au chapitre 7 que le temps de calcul nécessité par cette étape peut être prohibitif si la méthode utilisée est basique. Nous proposons alors un nouvel algorithme, ne requérant aucun besoin en mémoire supplémentaire (autre que celui nécessaire pour stocker la relation). Cette technique est basée sur la mémorisation de certaines recherches de voisins, caractérisées par la position des facettes lors de leurs générations par les Marching-Cubes au sein d'une cellule (groupement de huit voxels). Nous prouvons ensuite que la complexité de cette approche est linéaire suivant le nombre de facettes (complexité optimale) par une technique d'analyse amortie. Une série d'expérimentation a permis de vérifier ce comportement (voir la publication [MNS97]). Enfin, cet algorithme a servi de base à une technique de décimation de surface triangulée (décrite dans [CST99]), permettant de réduire rapidement et de manière importante le nombre d'éléments composant cette surface.

Perspectives Les images à partir desquelles les médecins travaillent sont de plus en plus sous forme numérique. Elles font maintenant partie des traitements routiniers en milieu hospitalier et permettent ainsi des diagnostics et des thérapeutiques jusque là impossible. Cependant, les moyens matériels et logiciels permettant d'exploiter au mieux ces données sont encore d'un coût relativement élevé. En particulier, l'évolution des capacités des machines liée à celle des besoins (toujours plus de données de meilleure résolution donc plus volumineuses) rend délicat le renouvellement régulier du matériel informatique. Dans cet esprit, le système ARAMIS développé est une première approche visant à permettre l'accès, à partir de machines non puissantes, à des traitements haute-performance. Le prototype développé est encore incomplet, les outils à notre disposition ne sont pas tous intégrés, mais il est fonctionnel et à été conçu de manière modulable. A l'avenir, outre une amélioration des protocoles de communication développés, l'effort devrait être mis sur la facilité d'intégration des bibliothèques de traitements d'images. Ainsi, grâce à des systèmes de génération automatique de code, il devrait être possible à un concepteur d'ajouter son propre outil d'une manière conviviale. De même, l'interface utilisateur est encore "rustique" et mériterait une étude plus importante.

Le mot de la fin

L'ensemble des travaux qui a été présenté dans cette thèse puise sa motivation dans le rêve de prendre part d'une certaine manière à l'amélioration des techniques de santé. Nous espérons que cette étude servira au moins à stimuler la recherche dans ce domaine.