Reconstruction surfacique et segmentation robuste à base de maillages déformables

Johan Montagnat et Hervé Delingette
{Johan.Montagnat, Herve.Delingette}@sophia.inria.fr
http://www.inria.fr/epidaure/People.html
INRIA, 2004 route des lucioles, BP93, 06902 Sophia-Antipolis
tel: 04.93.65.76.81, fax: 04.93.65.76.69

Résumé Nous nous intéressons à l'utilisation de modèles déformables pour la reconsrtuction, la représentation géométrique et la segmentation de données bi- ou tri-dimensionnelles. Nous cherchons à mettre en correspondance un modèle surfacique avec les données considérées. Dans la littérature, deux approches différentes à base de modèle sont utilisées, l'une locale (les *modèles déformables*) et l'autre globale (*le recalage*). Plusieurs travaux tendent à les concilier et nous proposons dans cette optique un *processus hybride de déformation*. Il permet un meilleur contrôle du modèle au cours de la déformation et en définitive une plus grand robustesse du modèle pour le traitement de données bruitées ou en présence de points aberrants. Dans ce papier nous appelons modèle un maillage discret 2D ou 3D approximant le contour de l'objet représenté.

Mots-Clés : modèles déformable, recalage, segmentation, reconstruction, images médicales

1 Introduction

Les modèles déformables introduits par Kass et al [KWT87] ont remporté un large succès dans les domaines de la vision et de l'analyse d'image. Ils permettent la segmentation et la reconstruction d'objet en fournissant une représentation géométrique compacte. Les modèles déformables sont en général exprimés comme des maillages ou des surfaces paramétrées. Dans cet article nous considérons un modèle déformable $\mathcal{M}$ comme un ensemble de sommets 2D ou 3D $\{V_i\}_{1\leq i\leq n}$ reliés par des arêtes $\{E_i\}_{1\leq i\leq m}$. Cette représentation nous permet de décrire des formes complexes avec presque n'importe quelle topologie. Les modèles déformables évoluent itérativement sous l'action de *forces internes et externes* appliquées en chacun des sommets.

1.1 Etat de l'art

Deux processus de déformation principaux ont été proposés pour agir sur les modèles déformables.

Le recalage [Bro94] consiste à appliquer itérativement des transformations globales au modèle de façon à le faire converger vers la forme désirée. Les transformations sont limitées à une classe donnée (transformations rigides...), ce qui contraint les déformations possible du modèle. Cette réduction du nombre de degrés de liberté du modèle permet un bon contrôle de sa forme pendant la déformation. Cependant, un modèle trop contraint peut ne pas être capable de décrire l'ensemble des formes potentielles des objets qu'il est supposé représenter. La seule solution pour augmenter la souplesse du recalage est de considérer des transformations de plus en plus complexes qui posent des problèmes de temps de calcul et de stabilité numérique. Soit g une transformation calculée au cours d'une étape. On note $g(\mathcal{M}) = \{g(V_i)\}_i$ le modèle déformé par g.

Les modèles déformables, aussi connus sous le nom de *snakes* dans le cas 2D, offrent beaucoup plus de degrés de liberté au modèle. Chaque sommet est soumis à une force locale. La force est constituée d'une composante externe calculée à partir des données traitées et d'une composante interne ayant pour but la régularisation du modèle (en imposant la continuité de certains paramètres comme la courbure). L'ensemble des forces locales en chaque sommet constitue un champ de déformation $\mathcal{L} = \{l_i\}_{1 \leq i \leq n}$. On note $\mathcal{L} \star \mathcal{M} = \{V_i + l_i\}_i$ l'application des déformations locales sur le modèle. Les déformations locales apportent plus de souplesse mais moins de robustesse aux bruits et aux points aberrants que le processus de recalage.

De nombreuses approches tendent soit à introduire des transformations plus locales dans le processus de recalage [FA94, Thi96] soit à augmenter la robustesse des modèles déformables [TF88, MT91, LC94]. L'analyse modale [VR93] ou les décompositions de Fourier [SKBG96] sont autant de méthodes pour contrôler la souplesse du processus de déformation.

2 Déformations hybrides

2.1 Modèles déformables

Les modèles déformables évoluent itérativement sous l'action de forces. Chaque sommet V_i est soumis à une force externe f_i^{ext} calculée à partir des données et une force interne régularisante f_i^{int}. La force totale exercée en V_i est la somme pondérée $F_i = \alpha f_i^{int} + \beta f_i^{ext}$. A chaque itération, le modèle évolue selon la loi newtonienne

$$m \frac{d^2 V_i}{dt^2} + \delta \frac{dV_i}{dt} = F_i \tag{1}$$

soit en discrétisant

$$V_i^{t+1} = V_i^t + (1 - \delta)(V_i^t - V_i^{t-1}) + F_i \tag{2}$$

où V_i^t est la position de V_i à l'instant t. Le champ de déformation résultant à l'instant t est donc

$$\mathcal{L} = \{l_i = V_i^{t+1} - V_i^t = (1 - \delta)(V_i^t - V_i^{t-1}) + F_i\}_i \tag{3}$$

2.2 recalage

Le recalage nécessite le calcul de transformations globales que nous estimons à l'aide d'un algorithme ICP (*Iterative Closest Point*) [BM92, Zha94]. Soit W_i le point de donné le plus proche de chaque sommet du modèle V_i. L'algorithme ICP détermine à chaque étape la transformation g minimisant le critère

$$g = \arg\min_{g \in G} \left\{ \sum_{i=1}^{n} \|g(V_i) - W_i\|^2 \right\} \tag{4}$$

G est l'espace des transformations admissibles. Nous avons implémenté le calcul des meilleurs transformations rigides, similitudes, transformations affines et B-splines cubiques en nous basant sur les travaux réalisés par Xavier Pennec [Pen96] et Jérôme Declerck et al [DFGB96]. D'avantages de détails sont disponibles dans [MD97].

2.3 Recalage d'un modèle déformable

Pour appliquer le formalisme du recalage aux modèles déformables, il est nécessaire d'évaluer g à partir des forces locales calculées en chaque sommet. Le recalage ne nécessitant pas de contraintes régularisantes de la surface (elles sont déjà exprimées par le choix de l'espace de transformation G), on ne considère que les forces externes. La transformation recalant $\mathcal{M}$ avec $\{f_i^{ext}\}_i \star \mathcal{M}$ est évaluée en minimisant (4) avec $W_i = V_i + f_i^{ext}$.

La transformation g obtenue peut aussi être vue comme un champ de déformation global. Soit $g_i^{ext} = g(V_i) - V_i$ alors $g(\mathcal{M}) = \{g(V_i)\}_i = \mathcal{G} \star \mathcal{M}$ où $\mathcal{G} = \{g_i^{ext}\}_i$. En fait le modèle évolue sous l'action d'une équation de la forme $V_i^{t+1} = V_i^t + g_i^{ext}$ similaire à (2) mais sans terme inertiel ($\delta = 1$) ni force régularisante dont le schéma ICP est dépourvu. g_i^{ext} donc assimilable à une force externe.

2.4 Processus de déformations hybrides

Pour intégrer les deux approches précédentes dans un même cadre, nous calculons le champ des déformations locales agissant sur le modèle $\mathcal{F} = \{f_i^{ext}\}_i$. A partir de $\mathcal{F}$ il est possible d'estimer un champ de déformations global $\mathcal{G} = \{g_i^{ext}\}_i$. La force hybride agissant sur un sommet V_i est la somme pondérée (Fig. 1) des deux précédentes:

$$h_i^{ext} = \lambda f_i^{ext} + (1 - \lambda) g_i^{ext} \tag{5}$$

où λ est le *facteur de localité*.

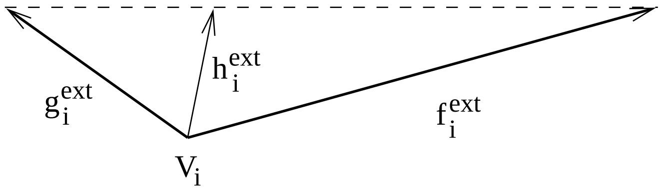

FIG. 1 – *Forces globales, locales et hybrides*

Le champ de déformation hybride obtenu est donc $\mathcal{H} = \{h_i\}_i$ avec $h_i = (1 - \delta)(V_i^t - V_i^{t-1}) + \alpha f_i^{int} + \beta h_i^{ext}$. Les déformations hybrides permettent un meilleur contrôle du modèle se déformant. Par l'intermédiaire du simple paramètre de localité il est possible de contraindre plus ou moins fortement le modèle.

2.5 Contrainte axiale

Un autre avantage du processus de déformations hybride est qu'il permet d'introduire des contraintes propres au problème considéré. Nous avons ainsi développé un type de contrainte axiale qui force un modèle surfacique de révolution à se déformer de manière consistante avec son axe. La figure 2 montre des modèles se déformant sans (à gauche) ou avec contrainte axiale (à droite). D'avantages de détails sur le calcul de la contrainte axiale sont fournis dans [MD97].

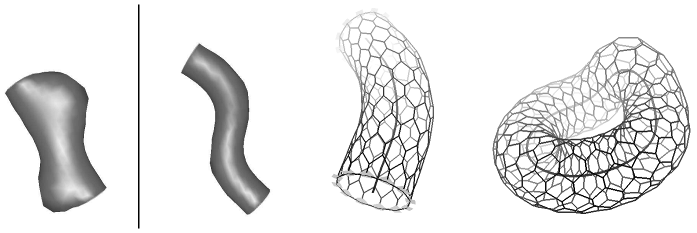

FIG. 2 – *Modèles axiaux déformables*

3 Qualité géométrique des maillages déformables

Le processus de déformations hybrides rend les maillages plus robustes aux distorsions géomértique des modèles. Considérons l'exemple suivant d'un modèle surfacique que l'on veut déformer vers les données (sous forme d'un nuage de points) d'un pied.

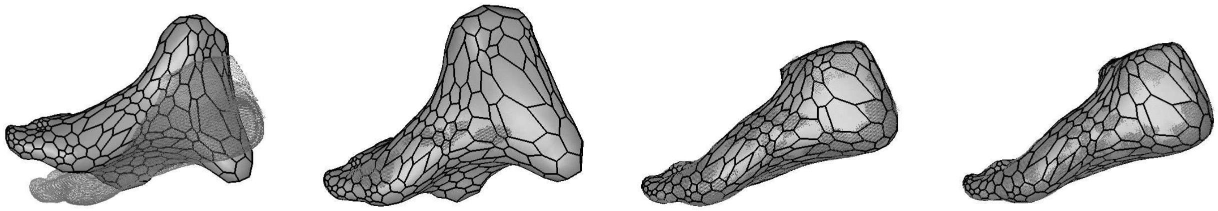

FIG. 3 – *Différents processus de déformation d'un modèle*

La figure 3 montre (de gauche à droite) comment le modèle est initialisé par rapport aux données, sa position après recalage rigide, déformations hybrides ($\lambda = 10\%$) et déformations locales. Le résultat est visuellement similaire pour les déformations hybrides et locales. Cependant, si on mesure la distance entre le modèle après déformations et sa position de référence pour les différents processus de déformations (Fig. 4) on s'apperçoit que la distance importante pour des transformations n'offrant pas assez de degrés de liberté (et donc ne permettant pas une déformation locale suffisante) diminue lorsque l'on accroît le facteur de localité jusqu'à un optimal (ici pour $\lambda = 10\%$). Au delà, la distance augmente à nouveau.

Ceci est dû à un phénomène de distorsion de la surface lorsqu'elle possède trop de degrés de liberté. Les sommets ne conservent pas leur propriétés géométriques: un point extremal (au sens d'un extrema de courbure par exemple) ne le reste pas tout au cours du processus de déformation mais il glisse le long de la surface, attiré par des points de données proches

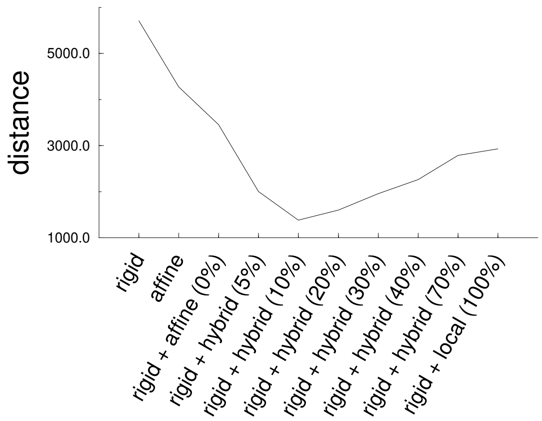

FIG. 4 – *Différents processus de déformation d'un modèle*

ne lui correspondant pas. Il faut donc trouver un compromis entre la souplesse laissée à la surface et les contraintes permettant de préserver les propriétés géométriques.

4 Cas 2D: les snakes

Nous avons réalisé une implémentation 2D du processus hybride de déformation. L'exemple suivant (Fig. 5) illustre les déformations successives d'un contour dans une séquence d'images vidéo pour suivre le mouvement des lèvres.

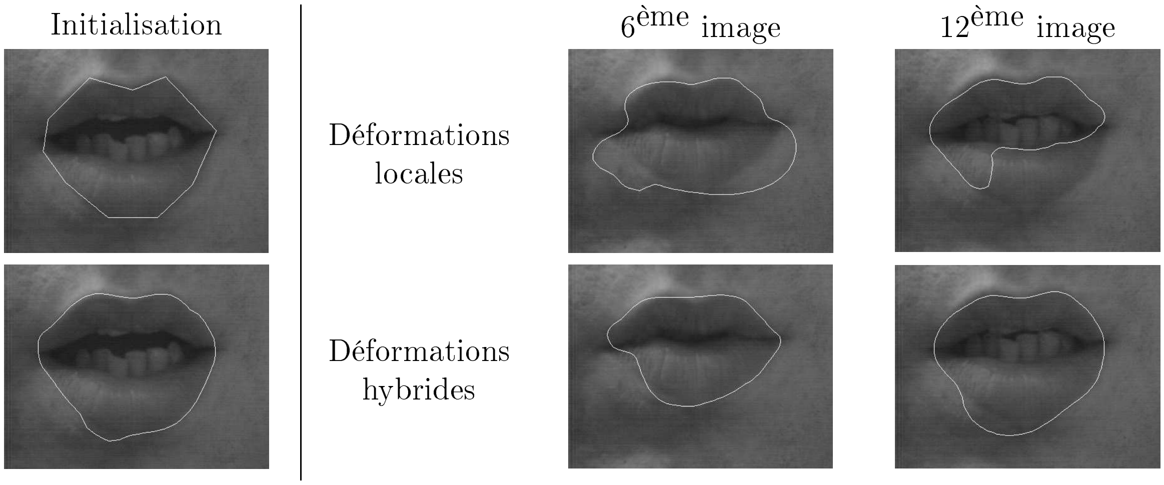

FIG. 5 – *Exemple de contours actifs*

Dans le cas des déformations locales (rangée du haut), le modèle trop flexible est attiré par les mauvais points de contour. Au cour des images de la séquence, il perd la trace des lèvres. Les déformations hybrides (rangée du bas) n'autorisent pas de déformations trop locales 'anormales' dans le sens où elles correspondent à des variations inattendues de la forme du contour. Il en résulte un meilleur suivit du contour des lèvres.

5 Cas 3D: les maillages simplexes

Nous nous intéressons plus particulièrement à la reconstruction et la segmentation de données tridimensionnelles. Nous utilisons le formalisme des *maillages simplexes* [Del94] pour représenter les surfaces déformables. Les maillages simplexes constituent une généralisation assez directe des contours déformables 2D dans des dimensions supérieures. A chaque sommet d'un maillage simplexe sont associés des *paramètres métriques* et un *angle simplexe*. L'angle simplexe est à rapprocher à l'angle de courbure d'une ligne polygonale dans le cas 2D. Il permet de définir une notion de courbure discrète au sommet du maillage considéré. En conjonction avec les paramètres métrique, l'angle simplexe permet de définir localement en chaque sommet la forme du maillage.

5.1 Contrainte de forme

Les forces internes permettent d'exprimer des contraintes régularisantes contrôlant localement la forme du maillage. Grâce à la représentation locale de la forme des maillages simplexes il est possible de définir une contrainte de forme. Un maillage déformé soumis aux seules actions de la contrainte de forme converge vers sa forme de référence. Cette forme est définie à une similitude près. La figure 6 illustre la convergence d'un modèle d'un visage déformé vers sa forme de référence.

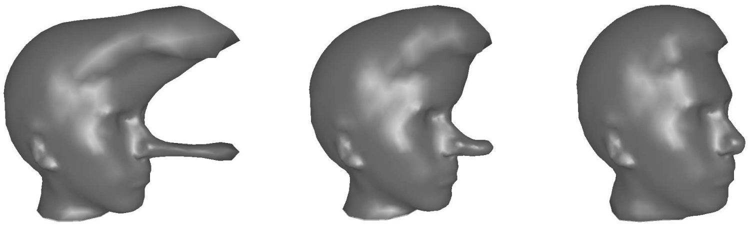

FIG. 6 – *Contrainte de forme*

5.2 Segmentation

Les modèles déformables sont largement utilisés pour la segmentation. Nous nous intéressons à l'extraction de structures anatomiques dans des images médicales. Les maillages déformables nous fournissent des représentations géométriques de ces structures utilisables pour la simulation de chirurgie ou l'étude de l'évolution de patologies affectant la forme des organes.

Une application ayant largement motivé se travail sur les modèles déformables est l'extraction de l'enveloppe du foie dans des images scanner de l'abdomen. Le but est la simulation d'interventions de chirurgie laparoscopique pour l'entraînement et la planification d'opérations délicates. Nous avons extrait à partir des données mises à disposition de la communauté scientifique par la NLM (National Library of Medicine) un modèle précis de la structure du foie (Fig. 7, à gauche).

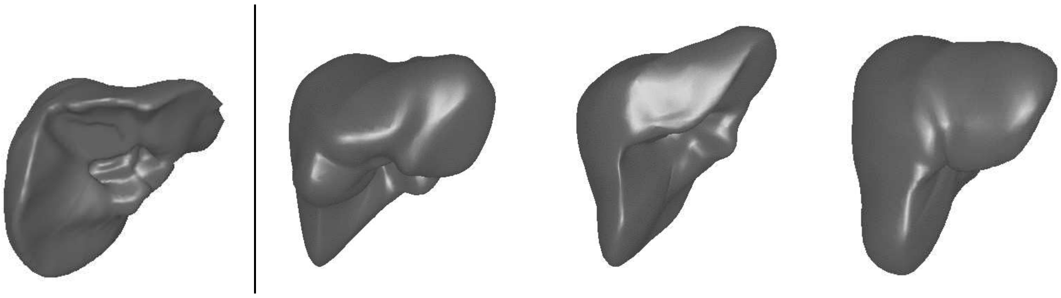

FIG. 7 – *Modèles de foies*

Le modèle de la NLM est grossièrement initialisé dans l'image puis déformé vers les points de contour détectés par une étape préalable d'extraction de gradient. En raison de la très grande variabilité de la forme du foie entre différents individus, l'initialisation à partir d'un modèle provenant d'un patient différent est nécessairement très approximative. La figure 8 représente la trace du modèle sur l'une des coupes de l'image scanner. De gauche à droite on voit l'évolution du modèle se déformant.

FIG. 8 – *Evolution de la trace du modèle 3D sur l'une des coupes scanner*

Le modèle est d'abbord recalé, de manière rigide puis affine. Lorsqu'une initialisation valable est obtenue, on utilise le processus hybride pour autoriser des variations locales. Le facteur de localité λ est faible dans un premier temps. Au fur et à mesure que le modèle converge, il est plus près des contours recherché et donc moins sensible aux mauvais contours. On peut relacher les contraintes en augmentant λ graduellement. On s'arrête lorsque le modèle décrit avec une précision suffisante les contours (ici pour $\lambda = 40\%$). La limite atteinte par λ est un compromis entre la capacité du modèle à représenter des détails fins et sa robustesse aux faux contours. La figure 7 (à droite) montre trois modèles obtenus en segmentant les images scanners de trois patient différents à partir des déformations du modèle unique de gauche.

5.3 Reconstruction de données volumiques

Une autre application des modèles déformables est la reconstruction de données non structurées comme des nuages de points. Nous voulons ici reconstruire les données d'un visage à l'aide d'un maillage pourvu d'un géométrie adaptée. La figure 9 montre le modèle utilisé (à gauche) et les données à reconstruire (à droite).

La figure 10 montre à partir de l'initialisation de gauche le résultat obtenu à différentes

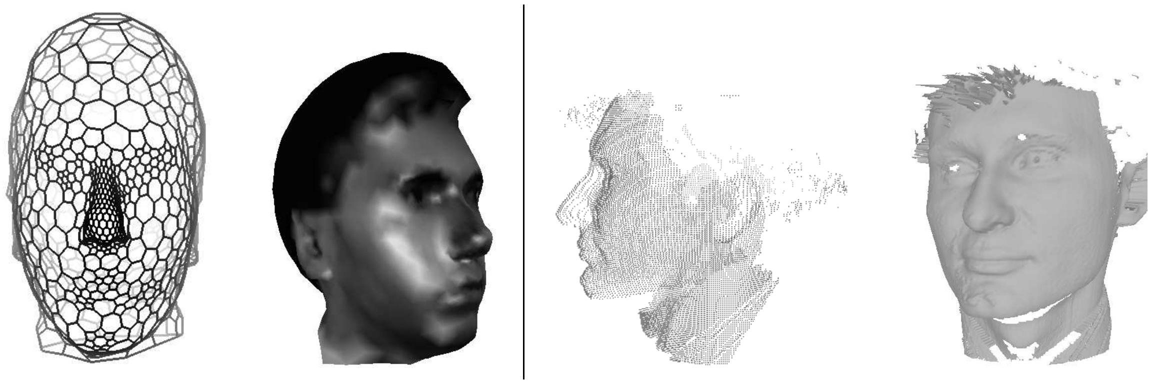

FIG. 9 – *Modèle de référence et données à reconstruire*

étapes en déformant le modèle de manière locale (rangée du haut) ou hybride (rangée du bas) du modèle.

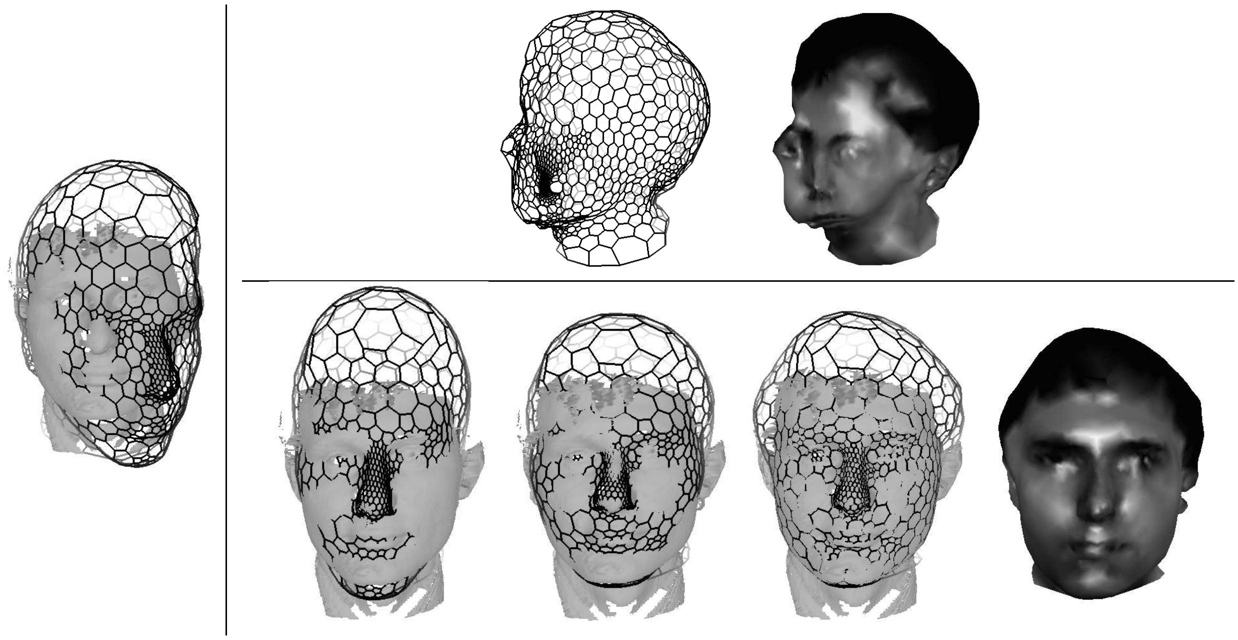

FIG. 10 – *Déformations locales et hybride du visage*

Dans le cas de déformations locales, on est capable de reconstruirela forme générale du visage mais la qualité géométrique du maillage est perdue: les sommet représentant le nez ne se sont pas déformés vers les points du nez... Dans le cas de déformations hybrides on dispose d'un meilleur contrôle de la forme et la vue texturée montre bien comment on à conservé la géométrie du maillage. C'est une hypothèse fondamentale, en particulier pour l'étude statistique des variations de forme du modèle.

5.4 Segmentation de vaisseaux

L'utilisation de modèles cylindriques contraints axialement permet la reconstruction des vaisseaux sanguins dans une image angiographique. Nous montrons ici la reconstruction d'un anévrisme et des vaisseaux environnants. Du point de vue du diagnostique, il est important de déterminer les connexions existantes entre l'anévrisme et les vaisseaux voisins.

L'anévrisme est modélisé par une sphère et les vaisseau par des cylindres contraints axialement. La figure 11 montre l'initialisation des différents modèles dans l'image 3D, les modèles après déformation et le modèle unique obtenu après des opérations topologiques de connexion.

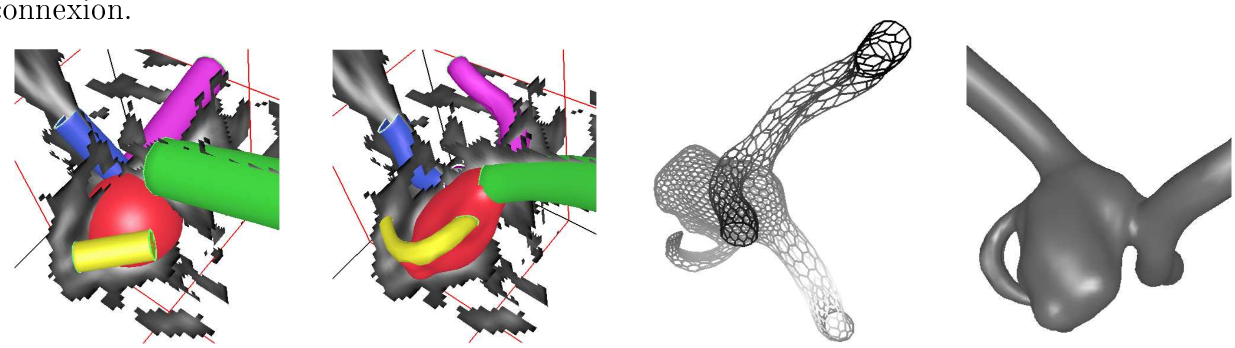

FIG. 11 – *Modèles d'anevrisme et vaisseaux sanguins*

6 Conclusion

Le processus hybride de déformations permet d'intégrer dans un même cadre les modèle déformables et le recalage. L'introduction du paramètre de localité permet d'obtenir n'importe quel comportement entre un modèle complètement contraint par une transformation globale ou complètement libre de se déformer localement et de passer continument de l'une à l'autre de ces extrémités.

De plus le processus hybride de déformations permet de mieux préserver la qualité géométrique des maillages déformés. A l'avenir nous avons l'intention d'améliorer la qualité de la segmentation en introduisant dans le processus de déformation une connaissance a priori des formes potentielles des objets à segmenter. Cette connaissance sera le résultat d'une étude statistique portant sur un ensemble d'objets segmentés par la méthode présentée ici.

Remerciements

Nous remercions l'IRCAD (Institut de Recherche contre le Cancer de l'Appareil Digestif, Strasbourg) pour les images scanner abdominales et General Electric pour les angiographies. Merci aux membres de notre projets qui nous ont apporté leur soutien et dont les travaux antérieurs nous ont été indispensables pour mener à bien cette étude.

Références

[BM92] P. Besl and N. McKay. A method for Registration of 3D shapes. In *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 239–256, February 1992.

[Bro94] L.G. Brown. A Survey of Image Registration Techniques. *ACM Computing Surveys*, 24(4):325–376, December 1994.

[Del94] H. Delingette. Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction. Technical Report 2214, INRIA, March 1994.

[DFGB96] J. Declerck, J. Feldmar, M.L. Goris, and F. Betting. Automatic registration and alignement on a template of cardiac stress and rest spect images. In *Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*, pages 212–221, June 1996.

[FA94] J. Feldmar and N. Ayache. Locally affine registration of free-form surfaces. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994.

[KWT87] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes: Active Shape Models. *Intertnational Journal of Computer Vision*, 1:321–331, 1987.

[LC94] K.F. Lai and R.T. Chin. Deformable Contours: Modeling and Extraction. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994.

[MD97] J. Montagnat and H. Delingette. A Hybrid Framework for Surface Registration and Deformable Models. In *Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'97*, San Juan, Puerto Rico, June 1997.

[MT91] D. Metaxas and D. Terzopoulos. Constrained Deformable Superquadrics and nonrigid Motion Tracking. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, June 1991.

[Pen96] X. Pennec. *L'incertitude dans les Problèmes de Reconnaissance et de Recalage. Application en Imagerie Médicale et Biologie Moléculaire.* PhD thesis, Ecole Polytechnique, France, 1996.

[SKBG96] G. Székely, A. Kelemen, Ch. Brechbüler, and G. Gerig. Segmentation of 2D and 3D objects from MRI volume data using constrained elastic deformations of flexible Fourier surface models. *Medical Image Analysis*, 1(1):19–34, July 1996.

[TF88] D. Terzopoulos and K. Fleisher. Deformable models. *Visual Computer*, 4:306–331, 1988.

[Thi96] J-P Thirion. Non-Rigid Matching using Demons. In *Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'96*, San Francisco, California USA, June 1996.

[VR93] B.C. Vemuri and A. Radisavljevic. From Global to Local, a Continuum of Shape Models with Fractal. In *European Conference on Computer Vision*, 1993.

[Zha94] Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free -form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2):119–152, December 1994.