

Rapport sur la thèse de Jérôme Velut intitulée “Segmentation par modèle déformable surfacique localement régularisé par spline lissante”

Johan Montagnat

Appréciation générale

Dans son manuscrit de thèse d’une très grande clarté, Jérôme Velut introduit une méthode de segmentation par modèles déformables d’objets 2D et 3D dans des images. Elle s’inspire d’une approche par traitement du signal qui amène à retranscrire un problème souvent traité de manière géométrique (la régularisation d’un contour ou d’une surface) en une opération de filtrage passe bas. La contribution principale est la proposition d’une régularisation locale par spline lissante qui peut s’appliquer à la géométrie du modèle considéré ainsi qu’aux champs de forces externes qui s’appliquent sur ce modèle. Des résultats sont proposés sur quelques images médicales (notamment IRM) et quelques images synthétiques mais leur évaluation reste principalement qualitative et n’est pas réalisée dans un contexte applicatif précis. La méthode présentée, dite MoDeRes, montre élégamment le lien existant entre régularisation et échantillonnage d’un modèle discret. La relation analytique entre le paramètre de régularisation λ , la fréquence de coupure du filtre lissant et la fréquence d’échantillonnage est particulièrement intéressante. L’approche est très bien positionnée dans la littérature existante et motivée. Il n’y a cependant pas de comparaison des résultats obtenus avec d’autres méthodes “classiques”, qui ne s’inspirent pas des techniques de traitement du signal mais qui peuvent présenter des caractéristiques similaires (échantillonnage non-uniforme et adaptatif, absence d’effet de contraction du modèle).

Lecture détaillée du document

Le document est décomposé en 5 sections, totalisant 21 chapitres. L’auteur a pris le parti d’une décomposition très fine en un grand nombre de chapitres, certains très courts. Il en résulte un document pédagogique, très agréable à lire, dont la structuration est claire et les articulations particulièrement soignées. Le style et les tournures adoptées montrent également un souci permanent de précision et de didactique. Dans la suite de ce rapport, je décrirai chacune des 5 sections, qui constituent les grands ensembles cohérents du document.

La section I (Introduction) introduit le contexte et les objectifs de la thèse. La motivation affichée est l’extraction de structures dans des images médicales, domaine d’application pour lequel les modèles déformables sont largement utilisés. L’accent est mis sur la nécessité de la régularisation en présence de données bruitées ou incomplètes. La méthode de régularisation par lissage spline présenté dans cette thèse est vue comme un moyen d’introduire un a priori dans le processus de segmentation. Il convient de mentionner que la régularité de la courbure est un a priori globalement valide lorsque l’on considère les formes des structures anatomiques dans des images médicales. Néanmoins, c’est une information minimale et l’on entend souvent par a priori l’introduction d’informations plus précises sur la forme des objets. Une brève catégorisation des représentations de modèles déformables est proposée. La représentation a toute son importance puisque la technique

de régularisation en dépend toujours (dans cette thèse, des courbes paramétriques discrétisées seront étudiées).

La section II (État de l’art) positionne avec précaution le travail réalisé dans un état de l’art touffu. Partant de la définition originale des contours déformables (*snakes*), l’auteur rappelle la nécessité de régulariser la forme obtenue afin de rendre le modèle robuste au bruit et aux aberrations. Le schéma numérique d’un snake discret est introduit.

La représentation B-spline sur lequel s’appuie le reste du document est ensuite détaillée. Les splines sont des courbes avec des contraintes de régularité fortes. De ce fait, l’utilisation de régularisateurs n’est plus absolument nécessaire et l’équation d’évolution peut être simplifiée. L’auteur remarque à juste titre (section 5.2.1) que la régularisation spline est fortement liée à l’échantillonnage utilisé pour la représentation de la courbe. L’absence de lien formel entre échantillonnage et propriété régularisante rend cependant ce paramètre difficile à régler. Une contribution majeure de cette thèse est de proposer un tel lien. Ceci pourrait être soulignée dès cette section.

L’approche traitement du signal des contours splines initialement introduite par Unser est décrite dans le paragraphe 5.3 : elle repose sur la réinterprétation des composantes d’une courbe paramétrique comme des signaux, le paramètre spatial d’abscisse curviligne étant considéré comme la dimension “temporelle”. La relation entre points de contrôles et points de la spline est vue comme une fonction de transfert B qui peut être approchée par un filtre passe bas S_λ . Cette approximation se justifie par la nécessité de rendre le modèle plus robuste au bruit. Il serait intéressant de discuter la forme de S_λ à ce stade : quelle est la relation entre S_λ et B ? Peut-on se contenter de n’importe quel filtre passe bas ?

Pour traiter le cas 3D, différentes représentations de surfaces sont introduites. Des représentations basées sur les B-splines sont en particulier introduites mais leurs limitations en termes de topologies sont soulignées. L’auteur ne le mentionne pas dans son manuscrit mais il peut être souligné qu’une approche complémentaire a été proposée dans la littérature : appliquer à l’ensemble de l’espace (dans lequel est immergé une surface de représentation quelconque) une transformation spline cubique. On s’affranchit alors des problèmes de topologie de la surface. L’auteur présente différentes techniques pour améliorer la déformation de modèles par l’introduction d’a priori et présente la régularisation comme l’une d’entre elles : il souligne à nouveau la relation entre échantillonnage et régularisation.

Une conclusion partielle récapitule les éléments essentiels qui sont repris dans la section III pour définir le modèle MoDeRes.

La section III (MoDeRes-2D) contient la principale contribution de la thèse : le modèle déformable MoDeRes qui exploite le filtrage régularisant. Les chapitres 10 et 11 constituent le point d’articulation du manuscrit.

La méthode itérative du second ordre, classique pour l’évolution des modèles déformables, est discrétisée selon un schéma explicite et réécrite de manière à montrer que les nouvelles positions des points du contour à chaque itération correspondent à une convolution par un filtre passe bas H des positions antérieures et des forces appliquées (équation 10.5). Il n’est cependant pas évident au vu de l’expression de H qu’il s’agisse effectivement toujours d’un filtre passe bas. Ce point pourrait être clarifié. Un raisonnement similaire est appliqué à une représentation spline (en utilisant cette fois un schéma du premier ordre, équation 10.7). L’application itérative de ce filtre passe bas conduit à une régularisation trop forte indésirable. Un effet de rétrécissement, bien connu dans le cadre de l’approche classique (le terme de régularisation minimise la longueur de la courbe), est alors observable. De ce fait le paramètre λ , rattaché à la fréquence de coupure du filtre, est habituellement borné. Pour pallier à cette difficulté, l’auteur fait appel au filtrage B-spline lissant de Unser. Il montre que le paramètre λ peut être relié analytiquement à la fréquence de coupure du filtre et la fréquence d’échantillonnage. Ce résultat très important est à l’origine du modèle de déformation proposé dans les sections suivantes. Des résultats de lissage de courbes paramétriques bruitées et échantillonnées à différentes fréquences sont proposés par filtrage de

chacune des composantes de la courbe. En notant que λ et fréquence d'échantillonnage influent tout deux sur l'effet régularisant, l'auteur propose alors une extension de cette technique de lissage en un "filtre variant" dont le paramètre λ évolue au long de l'abscisse curviligne du contour filtré.

Le modèle déformable MoDeRes proposé par l'auteur exploite le filtre variant discuté précédemment mais en l'appliquant aux champs de forces externes qui s'appliquent sur le modèle géométrique plutôt que la géométrie elle-même. Considérant le fait que le modèle est intrinsèquement régularisé, l'ajout de forces internes n'est plus nécessaires. Pour assurer de conserver une forme régulière, le filtrage lissant est appliqué aux forces externes calculées à partir de l'image. Les forces sont donc également interprétées comme des signaux variant dans l'espace. Le modèle n'étant plus sujet au filtrage, le problème de rétrécissement disparaît. L'idée de filtrer les forces externes (bruitées) en considérant un voisinage (sur lequel une moyenne ou la convolution par une Gaussienne est appliquée) n'est pas nouvelle mais l'interprétation de cette opération sous forme du filtrage d'un signal l'est. Dans ce cadre, le paramètre λ remplace la taille du voisinage. Ce paramètre peut être adapté localement pour adapter le schéma de déformation. En particulier, lier λ à la courbure semble une perspective intéressante. En conclusion l'auteur mentionne que l'effet de rétrécissement observé sur les autres contours actifs n'existe plus. Il faut signaler que d'autres représentations partagent cette propriété, en particulier les maillages simples.

Des exemples de segmentation sont présentés en 2D sur une image synthétique bruitée et 3 images réelles (2 IRM du genou et une photographie). Les résultats montrent de manière qualitative la capacité du modèle à reconstruire les formes recherchées à différents niveaux de lissage. Sur l'image synthétique, l'impact de la régularisation et de la variance du bruit est quantifiée (comme la distance entre le modèle reconstruit et la forme recherchée). Un assez bon compromis pour la valeur de λ semble exister indépendamment de la quantité de bruit sur cet exemple simple. L'auteur indique également qu'un très forte régularisation permet de retrouver la forme d'un ballon partiellement occlus. Il convient de noter que ceci n'est vrai que parce que la forme de l'objet est un cercle dont la régularité est très grande : le modèle ne permet pas d'intégrer de véritable information sur la forme de l'objet, contrairement à d'autres approches. Finalement, une méthode semi-assistée est proposée : l'utilisateur pouvant indiquer des régions dans lesquelles le paramètre λ prend des valeurs différentes. Ces valeurs sont laissées à la discrétion de l'utilisateur. Globalement, les résultats présentés montrent bien la capacité du modèle à segmenter des structures régulières dans des conditions relativement difficiles. Cependant, le travail souffre d'un manque de comparaison avec d'autres méthodes dans un domaine très concurrentiel.

La section IV (MoDeRes-3D) introduit une extension du modèle proposé au cas 3D ce qui est particulièrement intéressant pour le traitement d'images médicales. L'auteur montre comment le modèle s'étend naturellement à des surfaces paramétriques : un filtre lissant bidimensionnel, séparable en deux filtres monodimensionnels, peut être appliqué dans les deux dimensions de l'espace des paramètres de la surface. Une exploitation immédiate est la régularisation d'une image en niveaux de gris vue comme une surface d'élévation. La mise en oeuvre pratique nécessite la discrétisation du modèle sur une grille support. L'auteur propose donc naturellement de discrétiser la surface paramétrique par l'intermédiaire de maillages quadrangulaires pour lesquels la grille support est explicite.

La géométrie des objets homéomorphes à un tore peut être représentée simplement par un maillage quadrangulaire. Pour des surfaces à bord (cylindres et plans), les points des bords sont traités de manière particulière (miroir avec un point pivot) de manière à ne pas introduire de discontinuité dans leur traitement. Le cas des surfaces homéomorphes à une sphère est plus contraignant en raison de la présence de pôles qui ne peuvent pas être quadrangulés. L'auteur propose de traiter ces points de manière particulière : en arrivant au pôle, il n'existe pas un mais une multitude de points suivant possibles. La direction d'arrivée permet de déterminer le point qui se trouve au plus proche de cette direction après avoir franchi le pôle. Puisque les pôles seront traités plusieurs fois (il correspondent à des points résultant de plusieurs valeurs de paramètres différentes), les résultats sont moyennés. Cette stratégie pourrait s'appliquer à toute forme de point singulier. En

particulier, on pourrait envisager de traiter des triangulations (qui sont largement utilisées pour la représentations des surfaces) en traitant le problème du voisinage de chaque triangle de manière similaire. L’auteur ne discute pas cette possibilité et il resterait à vérifier que l’approximation réalisée à chaque point serait de qualité suffisante pour obtenir des résultats cohérents.

Dans le cas de surfaces, l’auteur signale que l’adaptabilité de la spline lissante à l’échantillonnage prend tout son sens. En effet, la paramétrisation de certaines surface (en particulier la sphère) est nécessairement non-uniforme. Pour éviter l’introduction d’un lissage non-homogène (reflétant la paramétrisation), il faut compenser les disparités de paramétrisation par une adaptation de la valeur de régularisation. La relation établie entre λ et fréquence d’échantillonnage dans la section III permet de résoudre le problème de manière élégante. la valeur locale de λ peut s’exprimer et se calculer automatiquement en fonction d’un paramètre de régularisation globale Λ .

Des résultats sont finalement présentés sur un angiogramme aortique (extraction de l’aorte par un cylindre), une IRM du genou (extraction du plateau tibial par une sphère) et une IRM du cerveau (extraction des ventricules supérieurs). Les ventricules présentent un cas plus difficile (forme complexe) pour lesquelles une initialisation manuelle spécifique à partir d’une ligne épinière est nécessaire. Les résultats ne sont évalués que qualitativement. Ils démontrent la faisabilité mais pas la qualité obtenue pour une application particulière ni l’apport par rapport à d’autres méthodes.

La section V (Conclusion) dresse le bilan des travaux réalisés dans les cas 2D (section III) et 3D (section IV). Les perspectives identifiées pour ces travaux sont l’adaptation automatique du paramètre λ , l’extraction d’a priori, le filtrage d’autres types de surfaces ainsi que des applications pour le suivi d’objets et l’aide au diagnostic. La grande force du modèle présenté est sa capacité d’adaptation et la relation établie entre λ et la fréquence d’échantillonnage qui permet un réglage précis. Mais la régularisation dépend aussi de la qualité du terme d’attache aux données (forces externes). L’étude de l’adaptabilité du modèle à des régions de l’image de qualité différentes semble donc particulièrement prometteuse.

Résumé

En conclusion, le manuscrit de thèse de Jérôme Velut est de très grande qualité. Il témoigne d’un soin particulier et d’un soucis permanent de précision. La lecture est rendue aisée par sa structuration très claire.

Le travail présenté est une réinterprétation originale des modèles déformables dans un cadre de traitement du signal. Les développements théoriques aboutissent à une interprétation intéressante du processus de déformation comme l’application d’un filtre régularisant et un résultat très original sur la liaison entre régularisation du modèle et fréquence d’échantillonnage. Un modèle déformable en 2D puis en 3D en découle. Dans le cas 3D, l’inhomogénéité de la paramétrisation est traitée de manière très élégante par la méthode de filtrage adaptatif. Le modèle résultant présente des propriétés remarquables de régularisation. La démonstration en est faite de manière qualitative sur des images réelles et en particuliers des images médicales 3D.

En raison de la qualité du manuscrit et des travaux de recherches rapportés, des contributions originales proposées dans un domaine très concurrentiel et de la rigueur du travail réalisé, j’é mets un avis très favorable à la soutenance de Jérôme Velut en vue de l’obtention du diplôme de Docteur de l’INSA de Lyon.

Sophia Antipolis, le 13 novembre 2007,
Johan Montagnat, CR CNRS, HDR

