

Segmentation hiérarchique de maillage 3D à partir des dynamiques de contour

Sébastien DELEST, Romuald BONÉ, Hubert CARDOT

Université François Rabelais de Tours, Laboratoire Informatique
64 avenue Jean Portalis, 37200 Tours, France

{sebastien.delest, romuald.bone, hubert.cardot}@univ-tours.fr

Résumé – La segmentation de maillage 3D est un problème fondamental en synthèse d'image et est devenu un enjeu important pour de nombreuses applications. Cet article introduit une nouvelle méthode de segmentation hiérarchique basée sur la ligne de partage des eaux (LPE), les cascades et les dynamiques de contour. La LPE génère une première partition composée de petits patches surfaciques ; les dynamiques de contour offrent une bonne caractérisation des frontières et les cascades mettent à disposition plusieurs niveaux de segmentation pour l'utilisateur. Le procédé de fusion hiérarchique basé sur les cascades génère un arbre qui contient plusieurs schémas de segmentation ; l'utilisateur a ainsi la possibilité de parcourir facilement chacun des niveaux de segmentation contenus dans cet arbre pour sélectionner le plus adapté à son application.

Abstract – Mesh segmentation is a fundamental problem in computer graphics and has become an important component in many applications. This paper presents a new hierarchical mesh segmentation method based on watersheds, waterfalls and dynamics. The watershed transformation generates an initial partition composed by small patches; the dynamics provide a relevant height boundary information and the waterfalls build several segmentation levels. The waterfalls process allows building a merging tree which contains several segmentation schemes; so, a user can easily browse the different segmentation levels in order to select the best one.

1 Introduction

Les maillages polygonaux sont couramment utilisés pour représenter des surfaces 3D ; en particulier les maillages triangulaires, qui offrent une structure simple et qui sont présents dans de nombreuses applications. Cet article concerne la segmentation de maillage triangulaire, cependant la méthode est tout aussi adaptée aux autres types de maillages. La segmentation de maillage a de nombreuses applications dans les domaines de la visualisation et de la modélisation. Les méthodes de segmentation de maillage sont classées principalement en deux groupes : la décomposition en patches surfaciques et la décomposition en parties significatives. Dans le premier cas, la segmentation est guidée suivant des contraintes de courbures aux frontières, de planéité, de convexité, etc. Dans le deuxième cas, l'objectif est de détecter des parties significatives du maillage représentant l'objet.

Nos travaux concernent la décomposition en patches surfaciques. Elle intervient dans de nombreux domaines comme la paramétrisation de textures, le remaillage, la simplification, la métamorphose, la compression, la détection de collisions, la retro-ingénierie, etc. Concernant la segmentation en patches surfaciques, les études [16, 5] ont proposé un état de l'art des différents travaux basant leur méthode de segmentation sur la croissance de régions, la ligne de partage des eaux, l'analyse spectrale, le partitionnement itératif, le partitionnement hiérarchique, la coupe de graphe, les modèles déformables, etc. Pour segmenter les objets par rapport à des frontières de fortes courbures, la LPE apparaît comme une méthode privilégiée.

Les premiers travaux réellement novateurs concernant la segmentation de maillage 3D par LPE ont été menés par Mangano et Whitaker [10]. Ils ont discuté des approches ascendantes et descendantes de la LPE par rapport à la problématique des

maillages 3D et proposé une fonction de hauteur de la LPE basée sur la courbure calculée par matrice de covariance. Pour éviter le problème de sur-segmentation de la LPE, ils ont proposé de fusionner les régions selon le critère de profondeur de la LPE. Sun et al. [17] ont basé leur méthode sur la « progression rapide » (*fast marching*) pour faire évoluer la LPE sur le maillage d'une manière particulièrement équilibrée, notamment dans le cas de plateaux. Page et al. [14] ont fait en sorte que leur découpage respecte celui réalisé par la vision humaine. Ils utilisent la progression rapide et initialisent la LPE avec des marqueurs définis à partir du filtrage des courbures principales positives. Nous avons proposé dans [3] une méthode de segmentation hiérarchique basée sur les cascades. La LPE initialisée avec les minima génère une sur-segmentation. Deux principales solutions existent à ce problème, l'utilisation de marqueurs pour initialiser la LPE et l'approche hiérarchique qui consiste à fusionner certaines régions à partir d'une partition initiale. La segmentation hiérarchique par les cascades est très efficace car elle permet de réduire considérablement le nombre de régions tout en gardant les plus significatives. Les améliorations que nous apportons ici concernent l'utilisation des dynamiques de contour et des cascades basées sur les graphes. Les dynamiques permettent de caractériser la hauteur des frontières, au même titre que le critère proposé dans [10], mais offrent l'avantage de tenir compte d'informations moins locales. Le schéma des cascades que nous proposons utilise la contraction d'arcs du graphe dual de la partition.

La section suivante concerne la réalisation de la première partition à partir de la LPE. La section 3 détaille la caractérisation des frontières des régions à partir des dynamiques de contour ainsi que le procédé de fusion basé sur les cascades. La section 4 présente les résultats.

2 La segmentation par LPE

Notre approche fait intervenir la LPE comme outil élémentaire pour identifier toutes les régions. Le résultat de cette segmentation va correspondre au premier niveau de notre procédé de segmentation hiérarchique. Les autres niveaux seront définis par rapport à l'analyse du potentiel de fusion de chacune des régions. La LPE 3D [10] est une technique de segmentation qui simule la montée des eaux par rapport à un relief représentant les courbures de vertex interconnectés. L'inondation est réalisée à partir des minima locaux, ce qui permet de générer des lignes de partage aux endroits où les bassins se rejoignent (Figure 1).

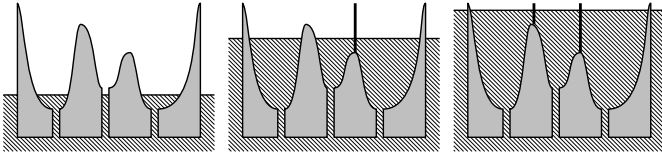


FIG. 1 – Exemple monodimensionnel de la ligne de partage des eaux. Trois niveaux d'inondation pour la LPE avec minima. La figure la plus à droite représente la dernière itération de la LPE lorsque toutes les régions ont été créées.

Plusieurs approches ont été étudiées pour obtenir une estimation de la courbure ; Meyer et al. [12] ont proposé une étude sur les opérateurs discrets pour estimer la courbure et Mangan et Whitaker ont mis en avant l'efficacité de la norme de la matrice de covariance dans [10]. Dans notre cas, cette dernière méthode s'avère la plus adaptée pour caractériser la courbure des vertex qui correspond au critère de hauteur pour la LPE. Le calcul de la courbure par la matrice de covariance repose sur un concept statistique qui consiste à évaluer les variances et covariances des coordonnées des différents vertices appartenant au voisinage. Pour un vertex donné, la courbure C est définie par la norme de la matrice de covariance :

$$\sigma_{uu}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i - \bar{u})^2$$

$$\sigma_{uv}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})$$

$$C = \|M\| \text{ avec } M = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

où σ_{uu}^2 représente la variance des coordonnées en u du voisinage du vertex et σ_{uv}^2 représente la covariance entre les composantes en u et en v . N correspond au nombre de triangles associés au vertex et $[x_t \ y_t \ z_t]^T$ est le vecteur de la normale du triangle t .

3 La fusion hiérarchique

3.1 Les dynamiques de contour

L'inconvénient principal de la LPE avec minima est la sursegmentation. Le résultat obtenu ne permet pas une décomposition pertinente de l'objet. Pour réduire le nombre de régions,

il est nécessaire de s'intéresser aux possibilités de fusion des régions les moins significatives. Pour caractériser les frontières entre les régions, il est possible d'utiliser la courbure des points selle, c'est-à-dire les vertex de frontières les premiers à être inondés lorsque deux bassins se rencontrent. La profondeur de la LPE a été proposée dans [10] pour définir la hauteur d'une frontière relativement à ses bassins voisins. Cette approche apporte déjà une nette amélioration par rapport au critère sur la courbure des points selle. Grimaud [7] a introduit la notion de dynamique de bassin pour appuyer l'importance relative entre les bassins. Cette méthode intervient à un niveau moins local que la profondeur de la LPE. Pour caractériser les frontières, en plus du contraste entre les bassins, Najman et Schmitt ont repris les fondements de la méthode de Grimaud et ont proposé la dynamique de contour [13]. Cette contribution a donné lieu à discussions dans [9, 15].

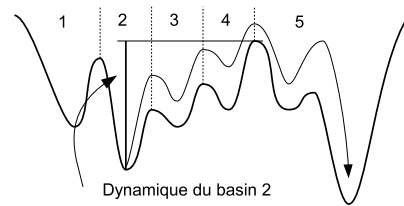


FIG. 2 – Illustration du concept de dynamique de bassin. Dans notre exemple, le chemin débute à partir du bassin 2 et se termine au bassin 5 dont la profondeur est plus importante que le bassin 2. Le point selle le plus haut du chemin permet de calculer la dynamique du bassin 2.

La dynamique de bassin associée à un minimum local est définie comme la différence d'altitude entre ce minimum et le point selle le plus haut qui doit être franchi pour arriver dans un bassin ayant un minimum plus bas que le premier (Figure 2). Le concept de dynamique de contour permet de créer une représentation hiérarchique et compacte des segmentations obtenues en appliquant différents seuils aux dynamiques de bassin. On définit la dynamique d'un contour comme la valeur maximale du seuil pour lequel ce contour subsiste lorsqu'on supprime tous les bassins ayant une dynamique inférieure au seuil. La figure 3 fait apparaître la hauteur des frontières en fonction de

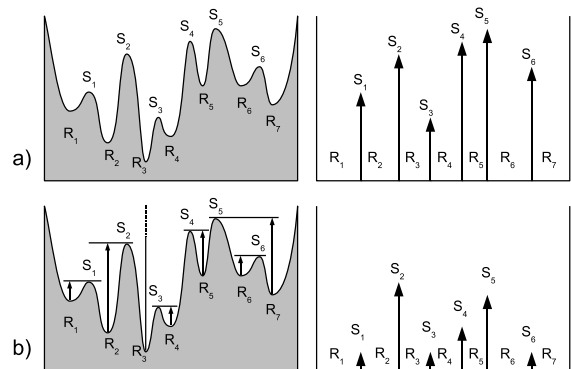


FIG. 3 – Comparaison de a) la courbure des points selle S_i et b) la dynamique de contour pour caractériser la hauteur des frontières des régions R_i . Dans notre exemple, la dynamique de contour peut se déduire directement de la dynamique de bassin.

la courbure des points selle et en fonction de la dynamique de contour. Les frontières définies dans le second cas sont beaucoup plus pertinentes et vont être intégrées à notre méthode de fusion basée sur les cascades.

3.2 Les cascades

La méthode des cascades a été présentée par Beucher [4]. Le procédé de fusion fait intervenir la partition obtenue avec la LPE (figure 4) et réalise itérativement la suppression de lignes de partage des eaux complètement entourées par des LPE plus élevées.

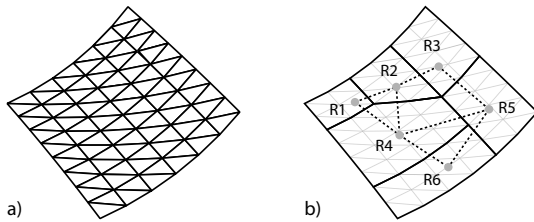


FIG. 4 – Maillage 3D du modèle (a) et graphe dual de la première partition générée par la LPE (b).

L'algorithme des cascades basé sur les graphes a été proposé dans [11, 8]. Il peut faire intervenir le graphe dual de la partition qui est constitué d'arcs reliant des nœuds (figure 4b). Les nœuds représentent les régions et les arcs, les frontières. La valeur d'un arc correspond à la hauteur de la frontière séparant deux régions, c'est-à-dire à la dynamique de contour. Les arcs considérés comme minima locaux sont contractés et obtiennent un label différent (ainsi que les régions qui leur sont connectées). La figure 5 fait apparaître la création de trois labels (10, 11 et 12) à partir des trois minima. La contraction entraîne la fusion des deux régions associées aux deux nœuds de l'arc ainsi que la suppression de la LPE entre les deux régions. Les arcs restants sont extraits par ordre croissant puis contractés si leurs nœuds n'appartiennent pas à deux régions labélisées différemment. Les régions associées aux arcs contractés récupèrent le label du nœud labélisé. A la fin du procédé, une nouvelle partition est obtenue avec un nombre de régions égal au nombre de

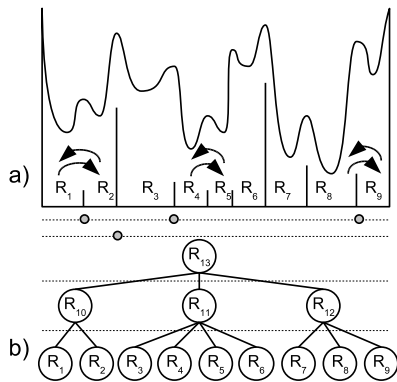


FIG. 5 – La segmentation hiérarchique : a) les dynamiques de contour sont utilisées pour construire b) l'arbre de fusion. Les régions R_{10} , R_{11} et R_{12} appartiennent au deuxième niveau de la segmentation hiérarchique, et R_{13} au troisième.

minima locaux avant la fusion. La deuxième itération des cascades fait intervenir un unique minima dans l'exemple. Le procédé des cascades peut être réitéré avec chaque nouvelle partition jusqu'à la fusion de toutes les régions.

4 Discussion et résultats

Nous avons présenté une nouvelle approche de segmentation hiérarchique en utilisant les dynamiques de contour et les cascades. Le procédé des cascades est très efficace sur les images 2D et les maillages 3D bien qu'il ne se révèle que très peu employé dans le second cas. Il existe de nombreuses autres approches hiérarchiques; elles sont généralement basées sur la contraction d'arcs du graphe dual. Dans [6, 1], la création des patchs surfaciques est guidée par l'approximation à une forme (plan, sphère, cylindre, etc.). La segmentation hiérarchique proposée dans [10] correspond à la fusion successive des différentes régions en fonction du critère de profondeur de la LPE. Nous avons utilisé les dynamiques pour caractériser les frontières d'une manière moins locale que la profondeur de la LPE. Les cascades permettent d'établir un nombre raisonnable de schémas de segmentation alors que dans le cas de la fusion successive de [10], un seuil (qui peut être dynamique) est utilisé, ce qui ne convient pas dans le cas de modèles avec un nombre important de vertex. La figure 6 représente plusieurs modèles 3D segmentés à partir des cascades et des dynamiques de contour. Le tableau 1 fait apparaître les caractéristiques de segmentation des différents modèles. Le nombre de niveaux de segmentation est relativement faible par rapport au nombre de régions générées par la LPE. Le temps de calcul de la LPE dépend directement du nombre de vertex. La création de l'arbre de fusion des régions représente un coût moins important comme il est lié au nombre de régions trouvées par la LPE. Différents niveaux de segmentation sont proposés et l'utilisateur peut rapidement identifier celui qui correspond le mieux à son application. L'évaluation de la segmentation d'un maillage n'est pas évidente et reste difficilement mesurable comme le souligne Attene et al. [2] dans leur étude comparative des méthodes de segmentation de maillage. Dans la plupart des cas, elle est réalisée de manière visuelle mais elle peut aussi tenir

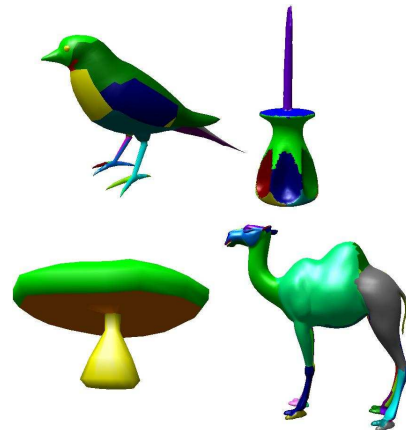


FIG. 6 – Résultats issus de notre algorithme de segmentation hiérarchique. A partir de l'arbre de fusion, les meilleurs niveaux ont pu être sélectionnés.

compte de critères, généralement très spécifiques à une application.

Modèles	Niveau de fusion / max	Nombre de régions / max	T. de calcul (s.)	
			LPE	Fusion
Mushroom 226 vertex	2 / 3	3 / 27	0.001	0.001
Bird 1129 vertex	2 / 4	23 / 125	0.01	0.08
Camel 9770 vertex	3 / 5	76 / 765	2.3	0.15
Screwdriver 27152 vertex	5 / 6	16 / 2840	19.6	4

TAB. 1 – Temps de calcul de la segmentation par ligne de partage des eaux et du processus de fusion.

5 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle méthode de segmentation hiérarchique basée sur les dynamiques de contour et les cascades. Les dynamiques de contour offrent une bonne caractérisation des frontières générées par la LPE. Les cascades basées sur les graphes permettent la construction rapide d'un arbre de fusion mettant ainsi à disposition plusieurs schémas de segmentation. L'utilisateur a ainsi la possibilité de parcourir les différents niveaux de segmentation à partir d'une barre de défilement (*slider*). Les prochaines études pourront faire intervenir une combinaison de différents critères de fusion de régions comme la distance aux lignes de crêtes, le « volume » des patches, etc.

Références

- [1] Marco Attene, Bianca Falcidieno et Michela Spagnuolo : Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *The Visual Computer : International Journal of Computer Graphics*, 22(3):181–193, 2006.
- [2] Marco Attene, Sagi Katz, Michela Mortara, Giuseppe Patané, Michela Spagnuolo et Ayellet Tal : Mesh segmentation - a comparative study. *Dans SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 14–25, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [3] Jonathan Betser, Sébastien Delest et Romuald Boné : Segmentation 3D hiérarchique par ligne de partage des eaux sans biais. *Dans RFIA '06 : Actes du 15ème Congrès Francophone de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Tours, Janvier 2006.
- [4] Serge Beucher : Watershed, hierarchical segmentation and waterfall algorithm. *Dans J. Serra et P. Soille, éditeurs : Mathematical morphology and its applications to image processing*, pages 69–76. Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [5] Sébastien Delest, Romuald Boné et Hubert Cardot : État de l'art de la segmentation de maillage 3D par patches surfaciques. *Dans GTMG '07 : Groupe de Travail en Modélisation Géométrique*, pages 171–185, Valenciennes, Mars 2007.
- [6] Michael Garland, Andrew Willmott et Paul S. Heckbert : Hierarchical face clustering on polygonal surfaces. *Dans SI3D '01 : Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D graphics*, pages 49–58, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.
- [7] Michel Grimaud : A new measure of contrast : Dynamics. *Dans Image Algebra and Morphological Processing*, vol. 1769, pages 292–305, San Diego, July 1992.
- [8] Allan Hanbury et Beatriz Marcotegui : Waterfall segmentation of complex scenes. *Dans ACCV '06 : Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision*, vol. 3851, pages 888–897, Hyderabad, India, 2006.
- [9] Cédric Lemaréchal, Roger Fjørtoft, Philippe Marthon et Eliane Cubero-Castan : Comments on 'geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation'. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(7):762–763, July 1998.
- [10] Alan P. Mangan et Ross T. Whitaker : Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4):308–321, October-December 1999.
- [11] Beatriz Marcotegui et Serge Beucher : Fast implementation of waterfall based on graphs. *Dans Computational Imaging and Vision*, vol. 30 de *Computational Imaging and Vision*, pages 177–186. Springer-Verlag, Dordrecht, 2005.
- [12] Mark Meyer, Mathieu Desbrun, Peter Schröder et Alan H. Barr : Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. *Dans Visualization and Mathematics III*, pages 35–57. Heidelberg, 2003.
- [13] Laurent Najman et Michel Schmitt : Geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(12):1163–1173, 1996.
- [14] David Lon Page, Andreas Koschan et Mongi A. Abidi : Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds. *Dans CVPR '03 : Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pages 27–32, June 2003.
- [15] Michel Schmitt : Response to the comment on "geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(7):764–766, 1998.
- [16] Ariel Shamir : A formulation of boundary mesh segmentation. *Dans 3DPVT '04 : Proceedings of the second IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 82–89, Thessaloniki, Greece, September 2004.
- [17] Yiyong Sun, David Lon Page, Joon Ki Paik, Andreas Koschan et Mongi A. Abidi : Triangle mesh-based edge detection and its application to surface segmentation and adaptive surface smoothing. *Dans ICIP '02 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, vol. 3, pages 825–828, Rochester, NY, USA, September 2002.