

# Etat de l'art des méthodes de segmentation de séquences de maillages et proposition d'une classification

R. Arcila<sup>1,2,3</sup>

F. Hétroy<sup>2,3</sup>

F. Dupont<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LIRIS - UMR5205 CNRS, Université Lyon 1, Université de Lyon, France

<sup>2</sup> Université de Grenoble & CNRS, Laboratoire Jean Kuntzmann, Grenoble, France

<sup>3</sup> INRIA Grenoble - Rhône-Alpes, Grenoble, France

{romain.arcila, franck.hetroy}@inrialpes.fr, fdupont@liris.cnrs.fr

## Résumé

Les séquences de maillages représentent un nouveau type de contenu, de plus en plus utilisé dans le domaine du multimédia. Les applications que sont la compression, l'indexation, etc. s'appliquent désormais à ce type de données. Compte-tenu de la taille très importante de ces données, une segmentation préalable est souvent nécessaire. Dans cet article, nous proposons dans un premier temps une formalisation des notions de "séquence de maillages" et de "segmentation de séquence de maillages". Puis nous présentons un état de l'art des différentes méthodes de segmentation de séquences de maillages. Finalement, nous présentons différentes applications possibles de la segmentation de séquences de maillages.

## Mots clefs

Segmentation, Séquence de maillages, Décomposition en composantes rigides, Décomposition par trajectoire.

## 1 Introduction

Grâce aux progrès des systèmes d'acquisition et à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, les "maillages dynamiques", les "séquences de maillages variant au cours du temps", ou plus généralement les "séquences de maillages" sont de plus en plus utilisés, dans le domaine du multimédia par exemple. Ces séquences peuvent être obtenues de plusieurs manières : créées par un artiste avec un modéleur, construites à partir d'une simulation ou d'un scanner... Le fait qu'elles soient de plus en plus utilisées implique qu'un nombre important de traitements est appliqué sur ces séquences, tel que la compression [1, 2] (une séquence peut être composée de centaines de maillages, où chaque maillage est lui-même composé de milliers de faces et de sommets, représentant une quantité très importante de données) ou l'extraction de squelette pour l'animation [3]. Cependant, ces méthodes nécessitent souvent que les données aient été segmentées à une étape précédente dans la chaîne de traitement.

La segmentation de maillages statiques, i.e. segmenter un seul maillage, est un domaine connu et de nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature, voir par

exemple [4] pour un état de l'art complet de la segmentation de maillages statiques et [5, 4] pour une définition de critères de classification de ces méthodes.

Contrairement aux maillages statiques, les recherches sur la segmentation de séquences de maillages sont beaucoup plus récentes. A notre connaissance, les premiers travaux sont ceux de Lengyel [6] sur la compression de maillages dynamiques, qui segmente dans un premier temps la séquence de maillages afin de la compresser. Depuis ces travaux, une douzaine de méthodes ont été proposées.

Dans cet article, nous proposons dans un premier temps différentes définitions de séquences de maillages et de segmentations de séquence de maillages (Sect. 2). Dans la section 3, nous présentons les différentes méthodes de segmentation de maillages dynamiques existant à l'heure actuelle ; dans la section 4, nous exposons les méthodes de segmentation de séquences de maillages et les problèmes liés à ces segmentations. Enfin, dans la section Sect. 5, nous détaillons les différentes applications possibles de la segmentation de séquences de maillages.

## 2 Définitions

Dans cette partie, nous formalisons ce que peut signifier une *séquence de maillages* ainsi que la notion de *segmentation de séquence de maillages*.

### 2.1 Séquences de maillages

Bien que le nombre de méthodes de traitement de séquences de maillages augmente, il n'existe pas à notre connaissance de véritable définition de la notion de séquence de maillages.

Nous utilisons le terme *séquence de maillages* pour désigner tous les types de maillages animés. Nous ne connaissons actuellement que deux types de séquences de maillages utilisés dans la littérature :

- *Maillage dynamique* : dans ce type de séquences de maillages, le nombre de sommets, la connectivité et la topologie du maillage sont constants durant toute la séquence : l'animation représente un maillage dont la position des sommets évolue au cours du temps.
- *Séquence de maillages non contrainte* : ce type de sé-

quence de maillages n'impose aucune restriction sur le nombre de sommets, la connectivité ou la topologie du maillage au cours de la séquence : l'animation représente un ensemble de maillages sans aucune relation entre eux. Les types de séquences peuvent être définis en fonction de trois paramètres : le nombre de sommets, la connectivité (relation de voisinage entre sommets) et la topologie des maillages. Il n'existe pas actuellement de définition de types de séquences de maillages intermédiaire entre maillage dynamique et séquence de maillages variant au cours du temps. Nous pensons cependant que de telles définitions peuvent avoir une utilité, notamment pour la segmentation : segmenter une séquence de maillages sans aucune relation les uns avec les autres est un problème beaucoup plus difficile que segmenter une séquence de maillages à la connectivité variable mais possédant certaines propriétés, par exemple. Nous introduisons donc un nouveau terme, celui de *séquence stable de maillages*. Le tableau 1 résume les différents types de séquences de maillages que nous pensons être les plus intéressants, après avoir enlevé les combinaisons impossibles ou peu probables des paramètres. Nous considérons en effet qu'une séquence de maillages où seule la connectivité change peut être ramenée à un maillage dynamique après remaillage. De plus nous pensons qu'obtenir une séquence de maillages avec un nombre de sommets fixe et une connectivité et une topologie variables est fortement improbable.

## 2.2 Segmentation d'une séquence de maillages

**Segmentation d'un maillage statique.** Dans [7], A. Shamir propose une définition de segmentation d'un maillage statique basée sur la définition de maillage suivante : un maillage  $M$  avec  $m$  sommets est un triplet  $(V, E, F)$ , avec :

- $V$  les sommets =  $\{P_i \mid P_i \in \mathbb{R}^3, 1 \leq i \leq m\}$ .
- $E$  les arêtes =  $\{P_i, P_j \mid P_i, P_j \in V\}$ .
- $F$  les faces =  $\{P_i, P_j, P_k, \dots \mid P_i, P_j, P_k \in V\}$ .

Une *segmentation statique* du maillage  $M$  consiste à le partitionner en  $k$  parties  $S = \{S_0, \dots, S_{k-1}\}$  tel que

$$\begin{cases} \bigcup_{i=0}^{k-1} S_i = M \\ S_i \cap S_j = \emptyset \quad \forall i \neq j \end{cases}$$

**Segmentation d'une séquence de maillages.** La définition précédente peut être directement utilisée pour les séquences de maillages : les méthodes de segmentation de maillages dynamiques actuelles utilisent cette définition. Le paramètre temps est seulement utilisé pour calculer les régions de la segmentation. Nous appelons ce type de segmentation une *segmentation stable*. Nous pouvons cependant définir deux autres types de segmentations. Soit  $f$  le nombre d'instant composant la séquence et soit  $M^i$  le maillage à l'instant  $i$  alors une séquence de maillages est

définie ainsi :  $M_S = (M^1, \dots, M^f)$ . En utilisant cette notation nous proposons les définitions suivantes :

- *Segmentation géométrique* : une segmentation à chaque instant : cela revient à effectuer  $f$  segmentations statiques. Nous posons cependant la restriction suivante : chaque segmentation doit posséder le même nombre de régions et il doit y avoir une correspondance une à une des régions à chaque instant. Soit  $k$  le nombre de régions. Une segmentation géométrique est définie par :

$$S = \bigcup_{1 \leq i \leq f} S^i$$

avec

$$\begin{cases} S^1 = \{S_1^1, S_2^1, \dots, S_k^1\} \text{ et } M^1 = \bigcup_{i=1}^k S_i^1 \\ S^2 = \{S_1^2, S_2^2, \dots, S_k^2\} \text{ et } M^2 = \bigcup_{i=1}^k S_i^2 \\ \dots \\ S^f = \{S_1^f, S_2^f, \dots, S_k^f\} \text{ et } M^f = \bigcup_{i=1}^k S_i^f \end{cases}$$

Une autre contrainte, qui n'est pas obligatoire et qui est levée pour les séquences de maillages non-contraintes, est d'avoir une connectivité constante entre les régions : si la région  $B$  est adjacente à la région  $A$  à un instant de la séquence, elle doit être adjacente à  $A$  à tous les autres instants de la séquence.

- *Segmentation temporelle* : cette segmentation consiste à segmenter la séquence en sous-séquences, en utilisant diverses caractéristiques (changement de topologie ou déformations importantes par exemple) :

$$S = \bigcup S_i$$

avec

$$\begin{cases} S_i = (M^{f_j}, \dots, M^{f_k}), 1 \leq f_j < f_k \leq f \\ \bigcup S_i = M_S \\ S_i \cap S_j = \emptyset, \forall i \neq j \end{cases}$$

Il est bien sûr possible de combiner ces différentes segmentations : une segmentation stable peut être appliquée à chaque sous-séquence d'une segmentation temporelle, différentes segmentations géométriques à des instants différents peuvent être fusionnées en une seule pour obtenir une segmentation stable.

Les algorithmes de segmentation statique les plus couramment utilisés dans la littérature sont souvent de nature hiérarchique. Une question est de savoir si une telle propriété est transposable à la segmentation de séquences de maillages. De plus, définir ce qu'est une segmentation hiérarchique pour une séquence de maillages est un problème non trivial : hiérarchie de maillages ou hiérarchie de la séquence temporelle ?

## 3 Maillages dynamiques

Les maillages dynamiques sont actuellement les séquences de maillages pour lesquelles il existe le plus grand nombre

Nombre de Sommets	Connectivité	Topologie	Nom
constant	constante	constante	Maillage dynamique
variable	variable	constante	Séquence stable de maillages
variable	variable	variable	Séquence de maillages non-contrainte

Tableau 1 – Séquences de maillages : propriétés possibles et noms associés.

de méthodes de segmentation. Ceci est dû au fait qu'il s'agit des séquences les plus couramment utilisées et les plus faciles à manipuler : il existe une correspondance une à une entre les sommets et les faces de chaque maillage de la séquence.

### 3.1 Classification

Il existe principalement deux types de segmentations :

- segmentation par trajectoire ;
- segmentation en composantes quasi-rigides.

La première catégorie ([8, 2]) vise à regrouper les sommets (ou les faces) qui ont une trajectoire voisine tout au long de la séquence, tandis que la deuxième ([6, 1, 9, 10, 3, 11]) essaie de segmenter en régions dont le mouvement peut être décrit avec une transformation rigide.

Le Tableau 2 classe différents algorithmes selon les critères suivants :

- "Type" : méthode basée sur une approche région ou une approche frontière.
- "Rigide ?" : La présence d'une croix signifie que la méthode segmente en composantes quasi-rigides, sinon elle segmente par trajectoire commune.
- "Germes" : indique comment sont sélectionnées les germes de la segmentation.
- "Paramètres" : donne le nombre de paramètres devant être spécifiés.
- "Complexité" : le nombre de croix indique grossièrement la complexité de l'algorithme (en temps).

### 3.2 Limitations

La première limitation provient du choix des germes. La plupart des algorithmes utilisant les germes se servent uniquement du premier maillage pour sélectionner les germes sans utiliser le reste de la séquence. Or, utiliser tous les maillages de la séquence pour le choix des germes pourrait améliorer la segmentation. Plusieurs approches sont possibles : chercher les germes sur l'ensemble de la séquence (mais cela augmente le temps de calcul), choisir sur le premier maillage puis adapter au cours des instants suivants, choisir sur un maillage à un autre instant (mais lequel ?).

Enfin, toutes ces méthodes sont de type *segmentation stable* : une seule segmentation pour toute la séquence. La pertinence de ce choix peut être remise en cause. En effet, si le maillage subit d'importantes déformations (non rigides), il est peut être préférable de couper la séquence en sous-séquences et de segmenter chaque sous-séquence, i.e. réaliser une segmentation du temps basée sur la déformation du maillage et effectuer une segmentation stable sur

chaque sous-séquence.

### 3.3 Méthodes de segmentation de maillages statiques étendues aux maillages dynamiques

De nombreuses méthodes de segmentation de maillages statiques ont été proposées et différents critères [5] sont utilisés pour classer ces méthodes : *type de segmentation* (segmentation sémantique ou basée sur des critères géométriques), *paramètres de contrôles* (nombre de paramètres devant être donnés par l'utilisateur)... Un de ces critères peut être intéressant pour la segmentation de maillages dynamiques : il s'agit de l'*indépendance de pose*. Lorsque ce critère est vérifié, un maillage statique dans deux positions différentes (un homme assis et un homme debout par exemple) est segmenté de manière similaire (les bras, les jambes, le torse...). Katz et al. [13], Tierny et al. [14] et Shamir et al. [15] ont proposé des algorithmes de segmentation vérifiant ce critère d'indépendance de pose. Etant donné qu'il s'agit de méthodes de segmentation statique, elles n'utilisent pas les informations données par la séquence : elles ne travaillent que sur un instant et ignorent les autres. Cependant, il est certainement possible d'étendre ces méthodes pour qu'elles gèrent les maillages dynamiques : en utilisant la segmentation du premier maillage comme une segmentation initiale et en la raffinant en utilisant les autres instants par exemple.

## 4 Segmentation de séquences de maillages

Dans cette partie, nous donnons une vue d'ensemble de la segmentation des autres types de séquences de maillages que les maillages dynamiques, puis nous discutons des problèmes qui leur sont liés.

### 4.1 Présentation

Il existe à notre connaissance peu de méthodes proposant de résoudre ce problème.

Dans [16], une méthode pour obtenir une segmentation stable d'une séquence de maillages non-contrainte est proposée : une extraction de squelette est d'abord effectuée puis les sommets sont assignés à l'os le plus proche. La méthode n'est réellement testée que sur des personnages. Dans [17, 18], une segmentation temporelle est effectuée sur des séquences de maillages non-contraintes. L'algorithme proposé dans [18] fonctionne ainsi : chaque maillage est segmenté en un nombre fixe de régions. En

Article	Type	Rigide ?	Germes	Paramètres	Complexité	Basé sur	But
[3]	Région	X	uniforme	0	X	Segmentation Spectrale	Extraction de squelette
[6]	Région	X	aléatoire	cluster			Compression
[2]	Région		distance	K	X		Compression
[8]	Région		aléatoire	0	X	PCA	Compression
[10]	Région	X	séquence	2 seuils	XX		Segmentation
[11]	Frontière	X		0	X	Graphe de Reeb	Extraction de squelette
[12]	Région	X		2			Compression
[9]	Région	X	meilleur maillage	cluster		Lloyd	Lancer de Rayons
[1]	Région	X		0	XX	Mean shift	Skinning

Tableau 2 – Résumé des algorithmes

suite pour chaque maillage  $i$  et le maillage suivant  $i + 1$  de la séquence, l'algorithme d'*iterative closest point* (ICP) est appliqué d'une part du maillage  $i$  vers le maillage  $i + 1$ , et d'autre part du maillage  $i + 1$  vers le maillage  $i$ . La différence entre le résultat de ces deux ICP définit le *degré de mouvement*. La segmentation est effectuée en prenant les minima locaux des degrés de mouvement. Cependant pour éviter une sur-segmentation, seul les minima locaux respectant la condition suivante sont conservés : un minimum local doit être  $\alpha$  fois plus petit que les maxima locaux précédent et suivant.

#### 4.2 Problèmes liés à la segmentation de séquences de maillages et techniques associées

Dans la segmentation de séquences de maillages (autres que maillages dynamiques), comme le nombre de sommets est variable, il n'y a pas de correspondance une à une entre les sommets et les faces de chaque maillage. Pour une segmentation stable, cela signifie que cette correspondance doit être effectuée par l'algorithme. Trouver cette correspondance peut être difficile.

La deuxième difficulté est liée aux séquences de maillages non-contraintes : trouver une segmentation stable lorsqu'un changement topologique a lieu est une tâche ardue. Ainsi une segmentation temporelle aura plus de sens, et il sera probablement plus intéressant d'appliquer une segmentation stable sur chaque sous-séquence.

Comme les séquences de maillages sont et vont être de plus en plus complexes (des centaines de milliers de sommets et de faces et des centaines à des milliers d'instant), traiter directement ces séquences consomme beaucoup de mémoire et de temps de calcul. Dans [10], la segmentation nécessite de construire le graphe dual du maillage et d'appliquer un plus court chemin entre tout les sommets du graphe : ce calcul sur un maillage contenant plus de 200.000 faces est extrêmement long. Par conséquent, la simplification de séquences de maillages doit être envisagée. Dans [19, 20, 21], quelques méthodes de simplification sont proposées.

Etant donné que la segmentation de maillages dynamiques est plus facile à gérer, transformer une séquence de maillages stable en maillage dynamique et une séquence de maillages non-contrainte en une suite de maillages dyna-

miques peut être intéressant. Une telle transformation implique un remaillage de la séquence.

## 5 Applications de la segmentation de séquences de maillage

Dans cette partie, nous présentons les différentes applications possibles de la segmentation de séquences de maillages. En effet, la segmentation est souvent utilisée comme étape de pré-traitement pour résoudre divers problèmes.

Comme expliqué dans la Section 3, deux domaines utilisant la segmentation sont la compression [22] et l'extraction de squelette (pour l'animation notamment).

Cependant, comme les séquences de maillages sont un type de contenu encore récent, certaines applications n'ont pas été explorées pour l'instant. Pour avoir une idée des différentes applications possibles, on peut regarder les applications de la segmentation statique. L'indexation et la recherche de contenu sont deux applications pour lesquelles les méthodes proposées reposent presque toutes sur la segmentation ; on peut donc envisager que les méthodes d'indexation et de recherche de séquences de maillages devront segmenter ces données en pré-traitement. La simplification d'une séquence de maillages peut aussi se baser sur le résultat de sa segmentation.

Il existe également d'autres applications peut-être moins courantes. Dans [10], une segmentation stable est utilisée pour améliorer le transfert de déformation [23] d'un maillage sur un autre.

## 6 Conclusion

La segmentation de séquences de maillages est une problématique récente, et bien que plusieurs méthodes aient été proposées pour les maillages dynamiques, la segmentation d'autres types plus généraux de séquences n'est pas aussi avancée. La définition de séquences de maillages intermédiaires ainsi que la définition des différents types de segmentations de séquences possibles, comme nous l'avons proposé, permettra de définir de nouvelles méthodes de segmentation pour gérer ces nouveaux types de données. Cependant de nombreuses questions restent posées, telles que la définition de segmentations hiérarchique de séquences de maillages ou le choix des germes pour la seg-

mentation.

Une des possibilités pour améliorer la segmentation de séquences de maillages peut être d'utiliser d'autres critères que les critères géométriques et l'information temporelle. En effet, toutes les méthodes de segmentation actuelles utilisent uniquement la position des sommets, les angles entre les faces et d'autres caractéristiques géométriques similaires, ignorant les autres informations que les séquences de maillages peuvent éventuellement offrir comme la couleur des sommets ou les informations de textures.

## 7 Remerciement

Ce travail est en partie financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) via le projet MADRAS (ANR-07-MDCO-015).

## Références

- [1] Doug L. James et Christopher D. Twigg. Skinning mesh animations. *ACM Transactions on Graphics*, 24 :399–407, 2005.
- [2] Rachida Amjoun et Wolfgang Straßer. Efficient compression of 3d dynamic mesh sequences. Dans *Journal of the WSCG*, 2007.
- [3] E. de Aguiar, C. Theobalt, S. Thrun, et H.-P. Seidel. Automatic conversion of mesh animations into skeleton-based animations. volume 27, Hersonissos, Crete, Greece, 4 2008.
- [4] Ariel Shamir. Segmentation and shape extraction of 3d boundary meshes. Dans *State-of-the-Art Report, Proceedings Eurographics 2006*, pages 137–149, 2006.
- [5] M. Attene, S. Katz, M. Mortara, G. Patane, M. Spagnuolo, et A. Tal. Mesh segmentation - a comparative study. Dans *SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006*, page 7, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [6] Jerome Edward Lengyel. Compression of time-dependent geometry. Dans *I3D '99 : Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 89–95, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [7] Ariel Shamir. A formulation of boundary mesh segmentation. Dans *3DPVT '04 : Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2nd International Symposium*, pages 82–89, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [8] Mirko Sattler, Ralf Sarlette, et Reinhard Klein. Simple and efficient compression of animation sequences. Dans *SCA '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 209–217, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [9] Johannes Günther, Heiko Friedrich, Ingo Wald, Hans-Peter Seidel, et Philipp Slusallek. Ray tracing animated scenes using motion decomposition. *Computer Graphics Forum*, 25(3) :517–525, Septembre 2006. (Proceedings of Eurographics).
- [10] Tong-Yee Lee, Yu-Shuen Wang, et Tai-Guang Chen. Segmenting a deforming mesh into near-rigid components. *Vis. Comput.*, 22(9) :729–739, 2006.
- [11] Julien Tierny, Jean-Philippe Vandeborre, et Mohamed Daoudi. Fast and precise kinematic skeleton extraction of 3D dynamic meshes. Dans *IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2008)*, Tampa, Florida, USA, 2008.
- [12] G. Collins et A. Hilton. A rigid transform basis for animation compression and level of detail. *Vision, Video, and Graphics*, pages 1–7, 2005.
- [13] Sagi Katz, George Leifman, et Ayellet Tal. Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer*, 21(8-10) :649–658, 2005.
- [14] Julien Tierny, Jean-Philippe Vandeborre, et Mohamed Daoudi. Topology driven 3D mesh hierarchical segmentation. Dans *IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI 2007)*, pages 215–220, Lyon, France, 2007.
- [15] Lior Shapira, Ariel Shamir, et Daniel Cohen-Or. Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function. *Vis. Comput.*, 24(4) :249–259, 2008.
- [16] Takashi Maeda, Toshihiko Yamasaki, et Kiyoharu Aizawa. Model-based analysis and synthesis of time-varying mesh. Dans Francisco J. Perales LÃşpez et Robert B. Fisher, éditeurs, *AMDO*, volume 5098 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 112–121. Springer, 2008.
- [17] Toshihiko Yamasaki et Kiyoharu Aizawa. Motion segmentation and retrieval for 3d video based on modified shape distribution. *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, 2007(1) :211–211, 2007.
- [18] Toshihiko Yamasaki et Kiyoharu Aizawa. Motion segmentation for time-varying mesh sequences based on spherical registration. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009, 2009.
- [19] Christopher DeCoro et Szymon Rusinkiewicz. Pose-independent simplification of articulated meshes. Dans *I3D '05 : Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages 17–24, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [20] Bing-Yu Chen, Sheng-Yao Cho, Henry Johan, et Tomoyuki Nishita. Progressive 3d animated models for mobile & web uses. *The Journal of the Society for Art and Science*, 4(4) :145–150, 2005. Proceedings of NICOGRAPH International 2005.
- [21] Frederic Payan, Stefanie Hahmann, et Georges-Pierre Bonneau. Deforming surface simplification based on

dynamic geometry sampling. Dans *Shape Modeling International*, 2007.

- [22] Subramanian Ramanathan, Ashraf A. Kassim, et Tiow-Seng Tan. Impact of vertex clustering on registration-based 3d dynamic mesh coding. *Image Vision Comput.*, 26(7) :1012–1026, 2008.
- [23] Robert W. Sumner et Jovan Popović. Deformation transfer for triangle meshes. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :399–405, 2004.